

ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ, ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ,
ΤΟΜΕΑΣ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗΣ - ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑΣ - ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

**CCD ΦΩΤΟΜΕΤΡΙΑ ΔΙ' ΕΚΛΕΙΨΕΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ
ΑΣΤΕΡΩΝ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ Ο-С ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΤΟΥΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΓΙΑ ΤΟ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΔΙΠΛΩΜΑ ΕΞΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

ΑΛΕΞΙΟΣ ΛΙΑΚΟΣ
Α.Μ.: 200650

ΑΘΗΝΑ 2008



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ, ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗΣ - ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑΣ – ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΓΙΑ ΤΟ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΔΙΠΛΩΜΑ ΕΞΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ**

**CCD ΦΩΤΟΜΕΤΡΙΑ ΔΙ' ΕΚΛΕΙΨΕΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ
ΑΣΤΕΡΩΝ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ O-C ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΤΟΥΣ**

**ΛΙΑΚΟΣ ΑΛΕΞΙΟΣ
Α.Μ.: 200650**

ΑΘΗΝΑ 2008

Ευχαριστίες

Θεωρώντας ότι η διπλωματική μου εργασία αποτελεί την κορύφωση των μεταπτυχιακών σπουδών μου Α' κύκλου στο τμήμα Φυσικής και ότι αυτό είναι αποτέλεσμα διαφόρων παραγόντων που έπαιξαν ρόλο κατά τα φοιτητικά μου χρόνια στο Πανεπιστήμιο, θα ήθελα να ευχαριστήσω πρώτα απ' όλα την οικογένειά μου για την ηθική και οικονομική συμπαράσταση που μου παρείχε όλα αυτά τα χρόνια, και εν συνεχεία να ευχαριστήσω ξεχωριστά αυτούς που με βοήθησαν να πετύχω τους στόχους μου.

Θέλω να εκφράσω τις θερμές και ειλικρινείς μου ευχαριστίες στον κ. Παναγιώτη Νιάρχο, Καθηγητή του Τομέα Αστροφυσικής – Αστρονομίας – Μηχανικής του Πανεπιστημίου Αθηνών, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε ως νέο παρατηρητή του Γεροσταθοπούλειου πανεπιστημιακού αστεροσκοπείου τόσο στον ερευνητικό όσο και στον εκπαιδευτικό τομέα, για την καθοδήγηση και την αμέριστη συμπαράσταση που μου παρείχε κατά την διάρκεια όλου του μεταπτυχιακού κύκλου σπουδών μου, για τις ευκαιρίες που μου έδωσε να εργαστώ σε διάφορα κρατικά και διακρατικά ερευνητικά προγράμματα, για την προτροπή του να συμμετάσχω σε διάφορα συνέδρια αστροφυσικής εγχώρια ή και του εξωτερικού και τέλος για την επίβλεψή του στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης, ευχαριστώ τις επίκουρες καθηγήτριες του Τομέα Αστροφυσικής – Αστρονομίας – Μηχανικής του Πανεπιστημίου Αθηνών Ευγενία Αντωνοπούλου και Ελένη Λιβανίου-Ροβίθη για τις πολύτιμες υποδείξεις τους σε επί μέρους θέματα της παρούσης εργασίας.

Ευχαριστώ τον Dr. Petr Zasche, για την παροχή των απαραίτητων υπολογιστικών προγραμμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, καθώς και για την καθοδήγηση και την βοήθεια που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή J. Kreiner, Mt Suhora Observatory of the Pedagogical University, Crakow, Poland, για την παροχή δεδομένων για κάποια από τα συστήματα που αναλύθηκαν.

Πρόλογος

Οι μεταβλητοί αστέρες κατέχουν σήμερα μία πολύ σημαντική θέση στην σύγχρονη αστροφυσική και προσφέρονται τόσο για θεωρητικές όσο και για παρατηρησιακές μελέτες. Ο λόγος για τον οποίο έχουν αυτή τη θέση είναι διότι παρουσιάζουν πληθώρα φυσικών φαινομένων (π.χ. αναπάσεις, εκρήξεις, δημιουργία δίσκων ύλης γύρω τους κ.α), τα οποία μπορούν να παρατηρηθούν σε χρονικές κλίμακες πολύ μικρότερες από τον χρόνο της συνολικής ζωής τους, και μας παρέχουν ένα μεγάλο πλούτο γνώσεων για την αστρική εξέλιξη. Ανάλογα με την μεταβλητότητα του αστέρα, αυτοί κατατάσσονται σε διάφορες κατηγορίες. Μία από τις σημαντικότερες κατηγορίες μεταβλητών αστερών αποτελούν οι *Κηφείδες* αστέρες χάρη στους οποίους είμαστε σε θέση να μετράμε ενδογαλαξιακές αποστάσεις καθώς και αποστάσεις κοντινών γαλαξιών στους οποίους μπορούμε να τους διακρίνουμε.

Σήμερα πιστεύουμε ότι η φυσική μεταβλητότητα των αστερών είναι ένα στάδιο της εξελικτικής τους πορείας. Όταν ο αστέρας φύγει από την Κύρια Ακολουθία (δηλαδή όταν ολοκληρωθεί η καύση του υδρογόνου στον πυρήνα του), τότε ακολουθεί μία ασταθής φάση κατά την οποία η λαμπρότητά του αρχίζει να μεταβάλλεται λόγω φυσικών αιτίων. Επιπροσθέτως, οι μεμονωμένοι αστέρες της Κύριας Ακολουθίας οι οποίοι έχουν μάζα αρκετά μεγαλύτερη από αυτήν του Ήλιου έχουν βίαιο τέλος (*υπερκαινοφανείς* αστέρες), με αποτέλεσμα και πάλι, σε αυτό το στάδιο της εξέλιξής τους, τη μεταβολή της λαμπρότητάς τους.

Υπάρχουν όμως και μεταβολές λαμπρότητας σε αστέρες, οι οποίες δεν οφείλονται σε φυσικά αίτια αλλά αντιθέτως σε γεωμετρικά και συγκεκριμένα σε διαδοχικές διαβάσεις και αποκρύψεις από κάποιον συνοδό αστέρα. Αυτό φυσικά δεν σχετίζεται με την φυσική εξέλιξη των αστερών του συστήματος, αλλά μέσω αυτών των περιοδικών μεταβολών στη λαμπρότητά τους μπορούμε να συλλέξουμε πολύτιμες πληροφορίες τόσο για τις φυσικές τους παραμέτρους (μάζα, ακτίνα, θερμοκρασία κ.α) όσο και για την εξελικτική φάση στην οποία βρίσκονται.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως θέμα την μελέτη των O-C διαγραμμάτων επιλεγμένων δι' εκλείψεων μεταβλητών αστερών. Παρουσιάζονται εκτενώς τα όργανα και οι τεχνικές παρατήρησης που χρησιμοποιήθηκαν, αλλά και οι τεχνικές επεξεργασίας των δεδομένων από την ανάλυση των οποίων εξάγονται τα αστροφυσικά αποτελέσματα και κατ' επέκταση συμπεράσματα. Μέσω της ανάλυσης των O-C διαγραμμάτων των συστημάτων, εξάγονται νέες τροχιακές παράμετροι και φωτομετρικά στοιχεία σε περιπτώσεις συστημάτων όπου: α) υπάρχει τρίτο μέλος στο σύστημα, β) παρουσιάζεται το φαινόμενο μεταφοράς μάζας μεταξύ των μελών του ή απώλεια μάζας από το σύστημα, γ) ο συνοδός αστέρας έχει έκκεντρη τροχιά και δ) κάποια από τα παραπάνω φαινόμενα εμφανίζονται σε συνδυασμό (π.χ. ύπαρξη τρίτου σώματος και έκκεντρη τροχιά του συνοδού αστέρα).

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση της θεωρίας των O-C διαγραμμάτων και οι φυσικές παράμετροι που προκύπτουν από την μελέτη τους, καθώς και η εφαρμογή της παραπάνω θεωρίας σε συστήματα αστερών στα οποία λαμβάνουν χώρα φυσικά φαινόμενα που μεταβάλλουν την τροχιακή περίοδο τους. Τέλος, σε κάποιες περιπτώσεις

συστημάτων, όπου παρατηρήθηκαν οι πλήρεις φωτομετρικές τους καμπύλες, τα διαγράμματα O-C χρησιμοποιήθηκαν ως «δείκτες» στην επιλογή τόσο του τρόπου επίλυσης των φωτομετρικών καμπυλών τους (π.χ. ημιαποχωρισμένο σύστημα με μεταφορά μάζας) όσο και στην επιλογή των παραμέτρων που έπρεπε να συνυπολογιστούν (π.χ. συνεισφορά τρίτου φωτός στην ολική φωτεινότητα του διπλού συστήματος λόγω ύπαρξης τρίτου σώματος).

Αθήνα, Δεκέμβριος 2008
Α. Λιάκος

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες
Πρόλογος

Σελ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο - ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΙ ΑΣΤΕΡΕΣ

| | | |
|---------|--|----|
| 1.1 | Εισαγωγή, ιστορικά στοιχεία | 1 |
| 1.2 | Ονοματολογία & κατάλογοι μεταβλητών αστέρων | 3 |
| 1.3 | Ταξινόμηση των μεταβλητών αστέρων | 4 |
| 1.4 | Τύποι μεταβλητών αστέρων | 5 |
| 1.4.1 | Φυσικοί μεταβλητοί αστέρες | 6 |
| 1.4.1.1 | Παλλόμενοι μεταβλητοί αστέρες | 7 |
| 1.4.1.2 | Βραχυπερίοδοι μεταβλητοί αστέρες | 13 |
| 1.4.1.3 | Μακροπερίοδοι μεταβλητοί αστέρες | 17 |
| 1.4.1.4 | Αστέρες τύπου RV Tauri και ημι-ομαλοί μεταβλητοί αστέρες | 20 |
| 1.4.1.5 | Αστέρες τύπου R Coronae Borealis και ανώμαλοι μεταβλητοί | 22 |
| 1.4.2 | Περιστρεφόμενοι μεταβλητοί αστέρες | 23 |
| 1.4.2.1 | Αστέρες τύπου α_2 Canum Venaticorum - μαγνητικοί μεταβλητοί αστέρες | 23 |
| 1.4.2.2 | Αστέρες τύπου BY Draconis | 24 |
| 1.4.2.3 | Μεμονωμένοι Pulsars (radiopulsars) | 25 |
| 1.4.3 | Εκρηκτικοί μεταβλητοί αστέρες | 27 |
| 1.4.3.1 | Υπερκαινοφανείς αστέρες (Supernova) | 27 |
| 1.4.3.2 | Κατακλυσμικοί μεταβλητοί αστέρες, αστέρες τύπου U Geminorum, SS Cygni και Z Camelopardalis | 29 |
| 1.4.3.3 | Διπλά συστήματα εκπομπής ακτίνων X | 31 |
| 1.4.3.4 | Συμβιοτικοί αστέρες | 33 |
| 1.4.3.5 | Αστέρες εκλάμψεων ή αστέρες τύπου UV Ceti | 33 |
| 1.4.3.6 | Μεταβλητοί W-R (Wolf-Rayet) και αστέρες τύπου P Cygni | 35 |
| 1.4.4 | Ανώμαλοι μεταβλητοί αστέρες | 36 |
| 1.4.4.1 | Μεταβλητοί νεφελωμάτων και αστέρες τύπου RW Aurigae | 36 |
| 1.4.4.2 | Αστέρες τύπου T Tauri | 36 |
| 1.4.4.3 | Μεταβλητοί αστέρες Be ή αστέρες τύπου γ Cassiopeiae | 38 |
| 1.4.5 | Μη φυσικοί μεταβλητοί – Εκλειπτικοί μεταβλητοί αστέρες | 39 |
| 1.4.5.1 | Διπλά συστήματα αστέρων | 39 |
| 1.4.5.2 | Υπολογισμός των παραμέτρων διπλού συστήματος αστέρων | 39 |
| 1.4.5.3 | Ταξινομήσεις διπλών συστημάτων | 42 |
| 1.4.5.4 | Ταξινόμηση διπλών συστημάτων βάση των μεθόδων παρατήρησης | 43 |
| 1.4.5.5 | Ταξινόμηση διπλών συστημάτων βάση του μοντέλου Roche | 46 |
| 1.4.5.6 | Ταξινόμηση διπλών συστημάτων βάση της μορφής της καμπύλης φωτός τους | 50 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2° - ΟΡΓΑΝΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ

| | |
|---|----|
| 2.1 Εισαγωγή | 52 |
| 2.2 Το Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο | 53 |
| 2.2.1 Υποδομή | 53 |
| 2.2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά του τηλεσκοπίου | 54 |
| 2.3 CCD κάμερα | 55 |
| 2.3.1 Εισαγωγή | 56 |
| 2.3.2 Αρχή λειτουργίας του CCD | 56 |
| 2.3.3 Παράμετροι ανιχνευτών ακτινοβολίας | 57 |
| 2.3.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του CCD | 58 |
| 2.3.5 Συγχώνευση ψηφίδων | 59 |
| 2.3.6 Πηγές θορύβου | 60 |
| 2.3.6.1 Ο λόγος σήματος προς θόρυβο | 60 |
| 2.3.6.2 Θόρυβος αποφόρτισης | 60 |
| 2.3.6.3 Θερμικός θόρυβος | 61 |
| 2.3.6.4 Θόρυβος φωτονίων από το παρατηρούμενο αντικείμενο | 62 |
| 2.3.6.5 Θόρυβος υποβάθρου | 62 |
| 2.3.7 Σχηματισμός εικόνας με CCD και επεξεργασία | 63 |
| 2.3.7.1 Σχηματισμός εικόνας με CCD | 63 |
| 2.3.7.2 Η πληροφορία της CCD εικόνας | 64 |
| 2.3.7.3 Επεξεργασία εικόνας | 65 |
| 2.3.8 Εφαρμογή του CCD στην αστρική φωτομετρία | 68 |
| 2.3.8.1 Η αστρική φωτομετρία και η σταθερά του μεγέθους | 68 |
| 2.3.8.2 Φωτομετρία εκτεταμένων πηγών | 69 |
| 2.3.9 Η CCD κάμερα ST-8XMEI | 69 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3° - ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΩΝ

| | |
|---|----|
| 3.1 Διαφορική φωτομετρία διαφράγματος | 72 |
| 3.2 Ηλιοκεντρική διόρθωση | 76 |
| 3.3 Διαγράμματα V-C, K-C | 78 |
| 3.4 Υπολογισμός των χρόνων ελαχίστου στις καμπύλες φωτός | 80 |
| 3.5 Αστρονομική εφημερίδα και διαγράμματα φάσης μεταβλητού αστέρα | 81 |
| 3.6 Διαγράμματα ροής μεταβλητού αστέρα | 83 |
| 3.7 Διαγράμματα O-C δι' εκλείψεων μεταβλητών αστερών | 84 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4° - ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ O-C ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΔΙ' ΕΚΛΙΨΕΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΑΣΤΕΡΩΝ

| | |
|---|----|
| 4.1 Διαμόρφωση των διαγραμμάτων O-C και φαινόμενες μεταβολές της περιόδου | 88 |
| 4.2 Διαφορές O-C λόγω έκκεντρης σχετικής τροχιάς του δευτερεύοντος αστέρα | 89 |
| 4.3 Διαφορές O-C λόγω περιστροφής της γραμμής των αψίδων | 91 |

| | |
|--|-----|
| 4.3.1 Μετάθεση του περιιάστρου λόγω της παλιρροιακής αλληλεπίδρασης των μελών | 92 |
| 4.3.2 Μετάθεση του περιιάστρου λόγω ύπαρξης τρίτου αστέρα | 92 |
| 4.3.3 Μετάθεση του περιιάστρου λόγω σχετικιστικών φαινομένων | 93 |
| 4.3.4 Διαμόρφωση των O-C διαγραμμάτων από την περιστροφή της γραμμής των αψίδων | 93 |
| 4.4 Διαφορές O-C λόγω του <i>Light-Time Effect</i> (LITE) | 95 |
| 4.4.1 Εισαγωγή | 95 |
| 4.4.2 Το μαθηματικό μοντέλο του LITE | 96 |
| 4.4.3 Παρατηρήσεις του LITE σε διπλά συστήματα αστέρων | 99 |
| 4.4.3.1 LITE και περιστροφή της γραμμής των αψίδων | 100 |
| 4.4.3.2 Υπολογισμός των φυσικών παραμέτρων του τρίτου σώματος | 101 |
| 4.4.3.3 Υπολογισμός της γωνιακής απόστασης του τρίτου σώματος από το διπλό εκλειπτικό σύστημα | 103 |
| 4.5 Διαφορές O-C λόγω μεταφοράς μάζας μεταξύ των μελών του διπλού συστήματος ή απώλειας μάζας από το σύστημα | 104 |
| 4.6 Μη περιοδικοί μηχανισμοί διαμόρφωσης των O-C διαγραμμάτων | 111 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο - ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ O-C ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΩΝ ΔΙ' ΕΚΛΕΙΨΕΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΑΣΤΕΡΩΝ

| | |
|--|-----|
| 5.1 Εισαγωγή | 114 |
| 5.2 Συστήματα με έκκεντρη σχετική τροχιά του δευτερεύοντος αστέρα | 115 |
| 5.2.1 Το σύστημα <i>YY Sgr</i> | 115 |
| 5.2.1.1 Ιστορικά στοιχεία | 115 |
| 5.2.1.2 Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων | 115 |
| 5.2.1.3 Ανάλυση του O-C διαγράμματος | 117 |
| 5.2.1.4 Συμπεράσματα | 120 |
| 5.2.2 Το σύστημα <i>FT Ori</i> | 121 |
| 5.2.2.1 Ιστορικά στοιχεία | 121 |
| 5.2.2.2 Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων | 121 |
| 5.2.2.3 Ανάλυση του O-C διαγράμματος | 122 |
| 5.2.2.4 Συμπεράσματα | 126 |
| 5.3 Συστήματα με πιθανή ύπαρξη τρίτου μέλους | 127 |
| 5.3.1 Το σύστημα <i>UZ Sge</i> | 128 |
| 5.3.1.1 Ιστορικά στοιχεία | 128 |
| 5.3.1.2 Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων | 128 |
| 5.3.1.3 Ανάλυση του O-C διαγράμματος | 130 |
| 5.3.1.4 Συμπεράσματα | 133 |
| 5.3.2 Το σύστημα <i>PY Lyr</i> | 134 |
| 5.3.2.1 Ιστορικά στοιχεία | 134 |
| 5.3.2.2 Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων | 134 |
| 5.3.2.3 Ανάλυση του O-C διαγράμματος | 139 |
| 5.3.2.4 Συμπεράσματα | 142 |

| | |
|---|-----|
| 5.4 Συστήματα που παρουσιάζουν μεταφορά μάζας μεταξύ των μελών ή απώλεια μάζας | 144 |
| 5.4.1 Το σύστημα <i>DD Mon</i> | 144 |
| 5.4.1.1 Ιστορικά στοιχεία | 145 |
| 5.4.1.2 Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων | 145 |
| 5.4.1.3 Ανάλυση του O-C διαγράμματος | 146 |
| 5.4.1.4 Συμπεράσματα | 149 |
| 5.4.2 Το σύστημα <i>LZ Lyr</i> | 150 |
| 5.4.2.1 Ιστορικά στοιχεία | 150 |
| 5.4.2.2 Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων | 150 |
| 5.4.2.3 Ανάλυση του O-C διαγράμματος | 151 |
| 5.4.2.4 Συμπεράσματα | 155 |
| 5.5 Σύνθετα συστήματα | 156 |
| 5.5.1 Το σύστημα <i>TZ Eri</i> | 156 |
| 5.5.1.1 Ιστορικά στοιχεία | 156 |
| 5.5.1.2 Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων | 156 |
| 5.5.1.3 Ανάλυση του O-C διαγράμματος | 161 |
| 5.5.1.4 Συμπεράσματα | 165 |
| 5.5.2 Το σύστημα <i>VX Lac</i> | 168 |
| 5.5.2.1 Ιστορικά στοιχεία | 168 |
| 5.5.2.2 Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων | 168 |
| 5.5.2.3 Ανάλυση του O-C διαγράμματος | 169 |
| 5.5.2.4 Συμπεράσματα | 175 |
| 5.5.3 Το σύστημα <i>GK Cep</i> | 176 |
| 5.5.3.1 Ιστορικά στοιχεία | 176 |
| 5.5.3.2 Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων | 176 |
| 5.5.3.3 Ανάλυση του O-C διαγράμματος | 178 |
| 5.5.3.4 Συμπεράσματα | 183 |
| 5.5.4 Το σύστημα <i>DR Vul</i> | 184 |
| 5.5.4.1 Ιστορικά στοιχεία | 184 |
| 5.5.4.2 Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων | 184 |
| 5.5.4.3 Ανάλυση του O-C διαγράμματος | 186 |
| 5.5.4.4 Συμπεράσματα | 192 |
| Παράρτημα Α – Πίνακες χρόνων ελαχίστων | 194 |
| Παράρτημα Β - Λογισμικά ανάλυσης | 226 |
| Βιβλιογραφία | 234 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο

ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΙ ΑΣΤΕΡΕΣ

1.1 Εισαγωγή, ιστορικά στοιχεία

Σύμφωνα με την σύγχρονη αστροφυσική, ένας μεγάλος αριθμός αστέρων που βλέπουμε είναι μεταβλητοί. Ως μεταβλητό αστέρα ορίζουμε τον αστέρα εκείνο, ο οποίος για κάποιους λόγους, τους οποίους θα αναλύσουμε εκτενώς στα επόμενα κεφάλαια, μεταβάλλει σημαντικά την λαμπρότητά του συναρτήσει του χρόνου. Το πιο κοντινό μας παράδειγμα μεταβολής λαμπρότητας αποτελεί ο Ήλιος. Όμως οι διακυμάνσεις της λαμπρότητάς του δεν ξεπερνούν το 0.2% της συνολικής, επομένως δεν μπορεί να χαρακτηριστεί μεταβλητός αστέρας. Σήμερα ένας νέος κλάδος της αστροφυσικής, η **αστεροσεισμολογία**, ασχολείται αποκλειστικά με τέτοιου είδους αστέρες μελετώντας τις φυσικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την εξέλιξή τους. Η μεταβολή της λαμπρότητας οφείλεται, όπως θα δούμε, είτε σε φυσικά αίτια (ενδογενείς μεταβλητοί) είτε σε εκλείψεις από κάποιον συνοδό αστέρα (εξωγενείς μεταβλητοί). Από την αστρική εξέλιξη γνωρίζουμε ότι οι αστέρες που έχουν μάζα μεγαλύτερη από $0.8 M_{\odot}$ στην Κύρια Ακολουθία, μπορούν να φθάσουν στο στάδιο των ερυθρών γιγάντων όπου πλέον οι αστέρες αυξομειώνουν την λαμπρότητά τους για μερικά εκατομμύρια χρόνια. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι η φυσική μεταβολή της λαμπρότητας ενός αστέρα τύπου – Ήλιου, είναι ουσιαστικά ένα στάδιο της ζωής του, και αυτό ακριβώς το σημείο είναι αντικείμενο ταχέως αναπτυσσόμενης έρευνας στη σύγχρονη αστροφυσική.

Οι άνθρωποι από αρχαιότατων χρόνων χρησιμοποιούσαν την αστρονομία ως μέσο πλοήγησης και ήταν φυσικό κάποιοι από αυτούς να παρατηρούσαν την μεταβολή της λαμπρότητας σε κάποια λαμπρά άστρα. Χαρακτηριστικά ιστορικά παραδείγματα είναι ο *supernova* το 1054 μ.Χ. που σήμερα γνωρίζουμε ως *Crab pulsar (M1)* στον αστερισμό του Ταύρου που παρατηρήθηκε από Κινέζους αστρονόμους, ο *supernova* του *Tycho Brahe* στην Κασσιόπη το 1572 μ.Χ., και του *Kepler* στον αστερισμό του Οφιούχου το 1604 μ.Χ. Σύμφωνα με άλλες ιστορικές μαρτυρίες ένας πολύ λαμπρός αστέρας που εμφανίστηκε στον αστερισμό του Σκορπιού το 134 π.Χ. παρακίνησε τον Ίππαρχο τον Ρόδιο να αρχίσει να καταγράφει τις θέσεις των αστέρων στον ουρανό, με αποτέλεσμα την σύνταξη των αστρονομικών καταλόγων που όλοι γνωρίζουμε μέχρι σήμερα.

Τον Αύγουστο του 1595, ένας Λουθηρανός ιερέας και αστρονόμος ονόματι *David Fabricius* παρατήρησε τον αστέρα ο *Ceti*. Καθώς τον παρατηρούσε για μερικούς μήνες, κατάλαβε ότι αυτός του 2^{ου} μεγέθους αστέρας είχε γίνει αμυδρότερος. Λίγο καιρό αργότερα ο αστέρας είχε εξαφανισθεί τελείως από τον ουρανό και μετά από λίγους μήνες επανήλθε στο ίδιο σημείο με λαμπρότητα, όμοια με αυτή που είχε αρχικά. Η μεταβολή της λαμπρότητας του αστέρα συνεχίστηκε και τελικά το 1660 προσδιορίστηκε η ενδεκαετής περιόδός του. Προς τιμή αυτού του θαυματουργού, για την τότε εποχή, γεγονόςτος, ο αστέρας ονομάστηκε *Mira*, από τον *Helvetius* το 1638, που στα ελληνικά σημαίνει θαύμα. Το 1667 ο *Montanari* ανακάλυψε την περιοδικότητα του β *Persei*, του γνωστού *Algol*, η περίοδος του οποίου υπολογίστηκε από τον *Goodricke* το 1782. Αυτός ο

αστέρας είναι το πρώτο σύστημα εκλειπτικού μεταβλητού στην ιστορία της αστρονομίας.

Πίνακας 1.1 Ο παρακάτω πίνακας περιέχει μερικούς από τους πρωτοανακαλυφθέντες μεταβλητούς αστέρες. Αναγράφονται, το όνομα του αστέρα, ο τύπος μεταβλητότητας, το έτος και ο παρατηρητής που έκανε την ανακάλυψη

| Όνομα/Αστερισμός | Τύπος | Έτος ανακάλυψης | Παρατηρητής |
|------------------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|
| SN 1572 Cas | <i>Supernova</i> | 1572 | <i>W.Schuler, Tycho Brahe</i> |
| Mira, ο Ceti | <i>Mira</i> | 1596 | <i>David Fabricious</i> |
| P Cyg, Nova 1600 cyg | <i>S Dor</i> | 1600 | <i>Willem Janszoom Blaeu</i> |
| SN 1604 Oph | <i>Supernova</i> | 1604 | <i>Brunowsky, J. Kepler</i> |
| Algol, β Persei | <i>Algol</i> | 1669 | <i>Geminiano Montarari</i> |
| Nova Vulpeculae 1670 | <i>Nova</i> | 1670 | <i>Dom Anthelme</i> |
| SN 1680 | <i>Supernova</i> | 1680 | <i>J.Flamsteed</i> |
| χ Cygni | <i>Mira</i> | 1687 | <i>G. Kirch</i> |
| R Hydrae | <i>Mira</i> | 1704 | <i>G.F. Maraldi</i> |
| R Delphini | <i>Mira</i> | 1751 | <i>Hencke</i> |
| R Leonis | <i>Mira</i> | 1782 | <i>J.A. Koch</i> |
| Nova 1783 Sagittae | <i>Nova</i> | 1783 | <i>D'Aleget</i> |
| Sheliak, β Lyrae | <i>β Lyr</i> | 1784 | <i>J.Goodricke</i> |
| δ Cephei | <i>δ Cep</i> | 1784 | <i>J.Goodricke</i> |
| η Aquilae | <i>δ Cep</i> | 1784 | <i>E.Piggot</i> |
| ι Bootis B | <i>W UMa</i> | 1785 | <i>W. Herschel</i> |
| Ras Algheti, α Her | <i>SR c</i> | 1795 | <i>W. Herschel</i> |
| R Coronae Borealis | <i>R Cr B</i> | 1795 | <i>E.Piggot</i> |
| R Scuti | <i>RV Tau a</i> | 1795 | <i>E.Piggot</i> |
| R Virginis | <i>Mira</i> | 1809 | <i>Harding</i> |
| R Aquarii | <i>Mira</i> | 1810 | <i>Harding</i> |
| ε Aurigae | <i>Algol</i> | 1821 | <i>Fritsch</i> |
| R Serpentis | <i>Mira</i> | 1826 | <i>Harding</i> |
| η Carinae | <i>S Dor</i> | 1827 | <i>Burchell</i> |
| S Serpentis | <i>Mira</i> | 1828 | <i>Harding</i> |
| R Cancri | <i>Mira</i> | 1829 | <i>Schwerd</i> |
| Betelguese, α Orionis | <i>SR c</i> | 1836 | <i>J. Herschel</i> |

Έως τον 19^ο αιώνα για τις παρατηρήσεις των μεταβλητών αστέρων, και γενικά για όλες τις αστρονομικές παρατηρήσεις, ως ανιχνευτής χρησιμοποιούταν το ανθρώπινο μάτι. Είναι αυτονόητο ότι τέτοιου είδους παρατηρήσεις περιείχαν σε μεγάλο βαθμό την υποκειμενικότητα του παρατηρητή, και έτσι υπήρχαν αποκλίσεις στα αποτελέσματα μεταξύ διαφορετικών παρατηρητών.

Στα τέλη του 19^{ου} αιώνα, η τεχνολογία αναπτυσσόταν με πολύ γρήγορους ρυθμούς. Οι αστρονόμοι είχαν αντιληφθεί πλήρως την ανάγκη καταγραφής των παρατηρήσεων και αναζητούσαν ένα νέο αστρονομικό μέσο καταγραφής και αποθήκευσης των παρατηρήσεων. Η φωτογραφία άρχισε να παίζει σημαντικό ρόλο πλέον στην παρατηρησιακή αστρονομία. Ειδικές φωτογραφικές τεχνικές για

την αποτύπωση αμυδρών σχετικά αντικειμένων και συγκρίσεις φωτογραφικών πλακών που λαμβάνονταν με κάποια χρονική διαφορά, έδιναν πλέον αντικειμενικές παρατηρήσεις, αποτελούσαν μέσο αποθήκευσης και μπορούσαν πλέον να χρησιμοποιηθούν για την ανακάλυψη νέων μεταβλητών αστέρων. Με αυτό τον τρόπο μια νέα εποχή ανακαλύψεων και τεχνολογικής προόδου για την αστρονομία και την μελέτη των μεταβλητών αστέρων είχε μόλις αρχίσει....

1.2 Ονοματολογία & κατάλογοι μεταβλητών αστέρων

Η ραγδαία αύξηση των ανακαλύψεων μεταβλητών αστέρων, ανάγκασε τους αστρονόμους να δημιουργήσουν μια νέα κατηγορία αστέρων, που θα περιείχε μόνο αυτούς που η λαμπρότητά τους δεν είναι σταθερή. Από τα μέσα του 19^{ου} αιώνα ο *Argelander* εισήγαγε τον κώδικα των *κεφαλαίων γραμμάτων* για κάθε αστερισμό. Αρχικά λόγω του μικρού πλήθους των μεταβλητών αστέρων, τα γράμματα που τους αντιπροσώπευαν ήταν από το R έως το Z. Όμως εν συνεχεία, νέες ανακαλύψεις ανέβασαν τον αριθμό των μεταβλητών σε μερικές χιλιάδες, οπότε τα χρησιμοποιούμενα γράμματα δεν ήταν αρκετά. Πλέον χρησιμοποιούνταν όλα τα κεφαλαία γράμματα της λατινικής αλφαβήτου, και όταν τελείωναν και αυτά χρησιμοποιούνταν τα *διπλά κεφαλαία γράμματα* (π.χ. HV Aqr) ακολουθούμενα πάντα από την συντομογραφία του αστερισμού στον οποίο ανήκει ο μεταβλητός αστέρας. Οι παραπάνω συνδυασμοί των διπλών κεφαλαίων γραμμάτων, για κάθε αστερισμό, είναι 334. Στα τέλη του 19^{ου} αιώνα κι άλλες ανακαλύψεις μεταβλητών δημιούργησαν την ανάγκη εισαγωγής νέου καταλόγου. Ο *Charles Andre* πρότεινε ότι οι υπόλοιποι μεταβλητοί του αστερισμού θα χαρακτηρίζονται από το γράμμα **V** (*variable star*) και έναν αύξοντα αριθμό μεγαλύτερο του 334 (π.χ. V401 Cyg). Έχουμε πλέον ένα κατάλογο ο οποίος μπορεί να περιλάβει άπειρο πλήθος μεταβλητών αστέρων. Εδώ πρέπει να επισημάνουμε ότι οι λαμπρότεροι αστέρες των αστερισμών (αυτοί που χρησιμοποιούν την ελληνική αλφάβητο), δεν μετονομάζονται αν διαπιστωθεί ότι είναι μεταβλητοί. (π.χ. ο αστέρας δ Cep είναι μεταβλητός, όμως το όνομά του δεν έχει αλλάξει).

Αστέρες που πρόσφατα ανακαλύφθηκε η μεταβλητότητά τους, λαμβάνουν προσωρινά το όνομα του παρατηρητή ο οποίος έκανε την ανακάλυψη, και εν συνεχεία, όταν προσδιοριστούν όλες οι απαραίτητες παράμετροι (τύπος μεταβλητότητας, περίοδος), λαμβάνει επίσημο όνομα από την αρμόδια επιτροπή της *Διεθνούς Αστρονομικής Ένωσης (IAU)*.

Ένας μεταβλητός αστέρας λαμβάνει οριστικό όνομα όταν γίνει γνωστός ο τύπος της μεταβλητότητάς του. Ο προσδιορισμός του ονόματος δίνεται Από την *Επιτροπή Μεταβλητών Αστέρων της Διεθνούς Αστρονομικής Ένωσης (Variable star Commission of the International Astronomical Union)*, η οποία κάθε έτος δημοσιεύει έναν κατάλογο με τους νέους μεταβλητούς.

Ο πιο εμπειριστατωμένος κατάλογος για τους μεταβλητούς αστέρες είναι του Kukarkin et al.(1969, 1971, 1974, 1976, 1985) «*Γενικός Κατάλογος Μεταβλητών Αστέρων*» (**General Catalog of Variable Stars**), ο οποίος περιέχει πάνω από 28.500 μεταβλητούς, ενώ υπάρχει και ο κατάλογος των Kukarkin & Kholopov (1982) «*ο Νέος Κατάλογος των Υπόπτων Μεταβλητών Αστέρων*» (**New Catalog of suspected Variable Stars**), που περιέχει υποψήφιους μεταβλητούς αστέρες οι οποίοι ακόμη δεν έχουν προσδιοριστεί ακριβώς.

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας είμαστε πλέον σε θέση να παρατηρούμε μεταβλητούς αστέρες σε αστρικά σμήνη και στα νέφη του Μαγγελάνου. Συνολικά

λοιπόν μπορούμε να πούμε ότι πάνω από **50000** μεταβλητοί αστέρες είναι γνωστοί σήμερα.

1.3 Ταξινόμηση των μεταβλητών αστέρων

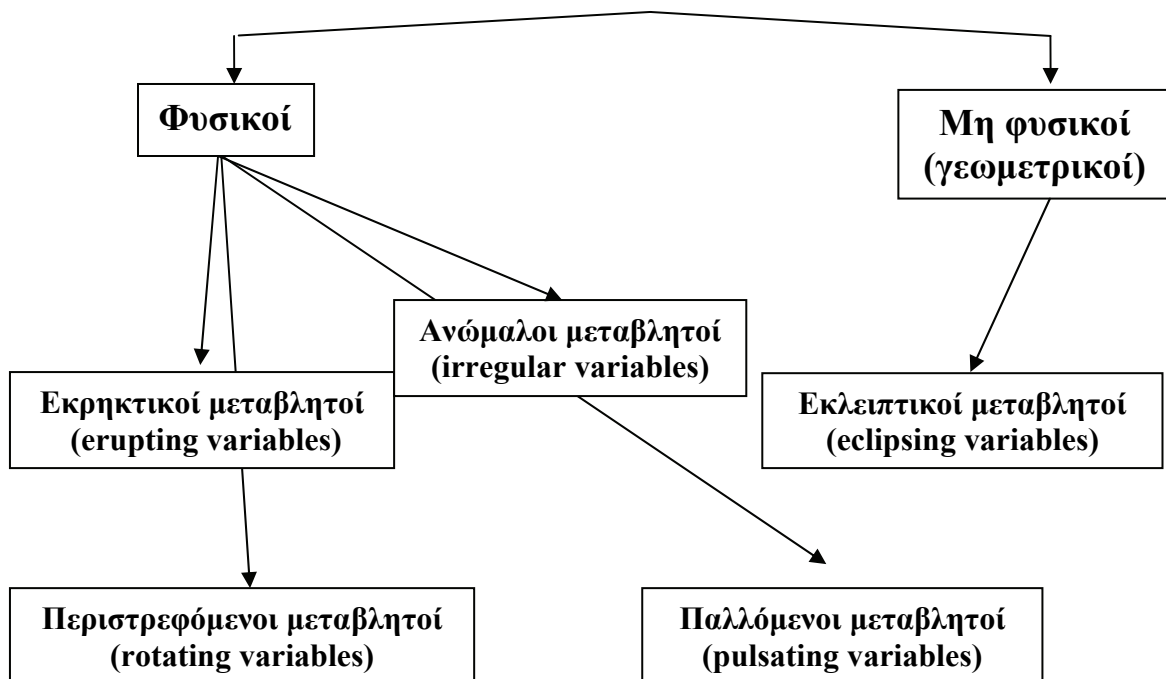
Η ταξινόμηση των μεταβλητών αστέρων γίνεται βάσει παρατηρησιακών δεδομένων. Βασικά στοιχεία ενός μεταβλητού αστέρα είναι η περίοδος, αν υπάρχει, και οι αιτίες που οδηγούν στην μεταβολή της λαμπρότητάς του. Μέσω παρατηρήσεων μπορούμε να δούμε την μεταβολή της λαμπρότητας συναρτήσει του χρόνου, και έτσι μπορούμε να αποφανθούμε για την περίοδο του μεταβλητού αστέρα και τους φυσικούς μηχανισμούς που δημιουργήσαν αυτή την μεταβολή.

Η σύγχρονη αστροφυσική κατατάσσει αυτούς τους αστέρες σε διάφορες κατηγορίες, με διαφορετικά πάντα κριτήρια. Οι ταξινομήσεις των μεταβλητών αστέρων γίνονται είτε με βάση την *περιοδικότητά* τους, είτε με βάση τον *τύπο μεταβλητότητας* τους.

Στα παρακάτω σχεδιαγράμματα παραθέτουμε τις δύο βασικότερες ταξινομήσεις, με όποια υποκατηγορία μεταβλητού αστέρα έχει παρατηρηθεί μέχρι σήμερα.

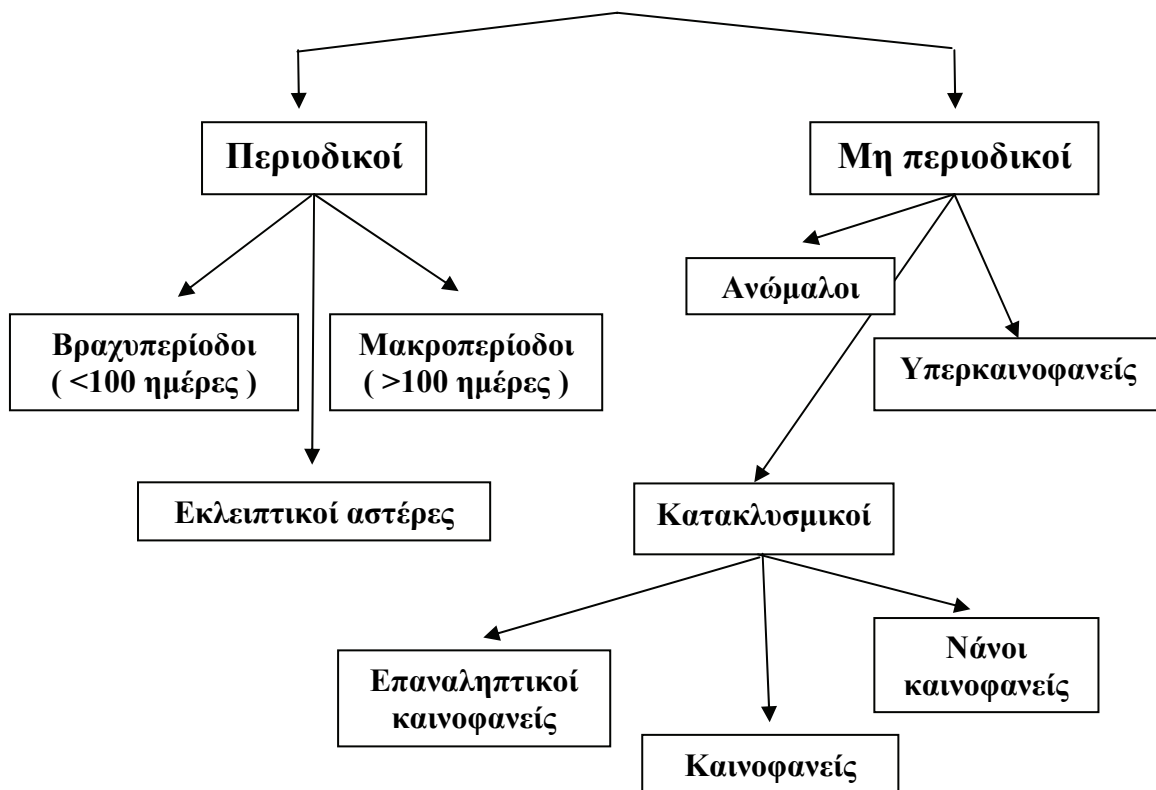
Βάσει αιτίων μεταβλητότητας

Αυτή η ταξινόμηση χωρίζει τους μεταβλητούς αστέρες σε δύο μεγάλες κατηγορίες



Βάσει περιοδικότητας

Η ταξινόμηση αυτή χωρίζει τους μεταβλητούς αστέρες σε δύο μεγάλες κατηγορίες



1.4 Τύποι μεταβλητών αστέρων

Όπως προαναφέραμε, όταν εξακριβωθεί ο τύπος της μεταβλητότητας του αστέρα, τότε κατατάσσεται σε μία από τις παραπάνω κατηγορίες και υποκατηγορίες. Κάθε αστέρας που παρουσιάζει ειδικές ιδιότητες μεταβολής, ενώ γενικά ανήκει σε μια μεγάλη κατηγορία, ονομάζεται *πρότυπος αστέρας της κατηγορίας*. Παρακάτω αναφέρονται όλες οι κατηγορίες μεταβλητών αστέρων και οι πρότυποι αυτών.

1. ΦΥΣΙΚΟΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΙ ΑΣΤΕΡΕΣ

A. Παλλόμενοι μεταβλητοί

- Κηφείδες : δ Cep, W Virginis
- Βραχυπερίοδοι μεταβλητοί: β Cep ή β CMa , δ Scuti , RR Lyrae
- Αστέρες τύπου Mira (ο Ceti), μακροπερίοδοι μεταβλητοί, μεταβλητοί OH/IR
- Αστέρες τύπου RV Tauri και ημι-ομαλοί μεταβλητοί
- Αστέρες τύπου R Coronae Borealis και ανώμαλοι μεταβλητοί

Β. Περιστρεφόμενοι μεταβλητοί

- Αστέρες τύπου α_2 Canum Venaticorum ή μαγνητικοί μεταβλητοί
- Αστέρες τύπου BY Draconis
- Pulsars (μεμονωμένοι)

Γ. Εκρηκτικοί μεταβλητοί

- Υπερκαινοφανείς
- Κατακλυσμικοί μεταβλητοί, αστέρες τύπου U Geminorum, SS Cygni και Z Camelopardalis
- Συμπαγή διπλά συστήματα ακτίνων X μικρής και μεγάλης μάζας
- Συμβιοτικοί αστέρες
- Αστέρες εκλάμψεων ή αστέρες τύπου UV Ceti
- Μεταβλητοί W-R (Wolf – Rayet) και αστέρες τύπου P Cygni

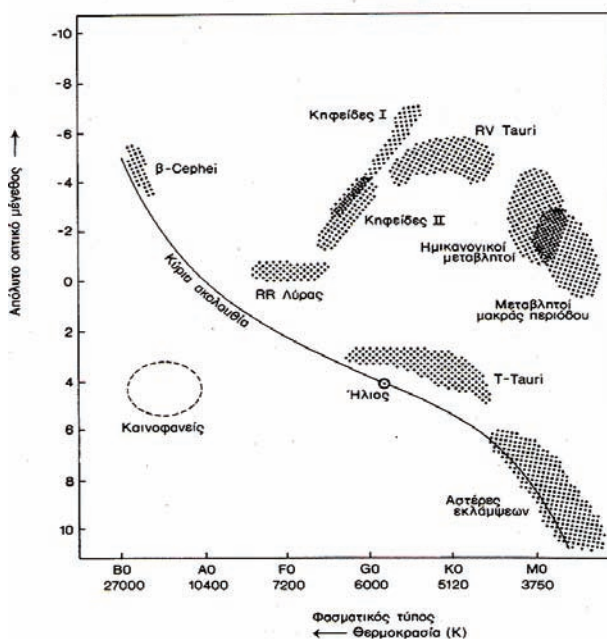
Δ. Ανώμαλοι μεταβλητοί

- Μεταβλητοί νεφελωμάτων, αστέρες τύπου RW Aurigae
- Αστέρες τύπου T Tauri
- Μεταβλητοί αστέρες Be ή αστέρες τύπου γ Cassiopeiae

2. ΜΗ ΦΥΣΙΚΟΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΙ – ΕΚΛΕΙΠΤΙΚΟΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΙ

- Αποχωρισμένα συστήματα
- Ημι-αποχωρισμένα συστήματα
- Συστήματα σε επαφή

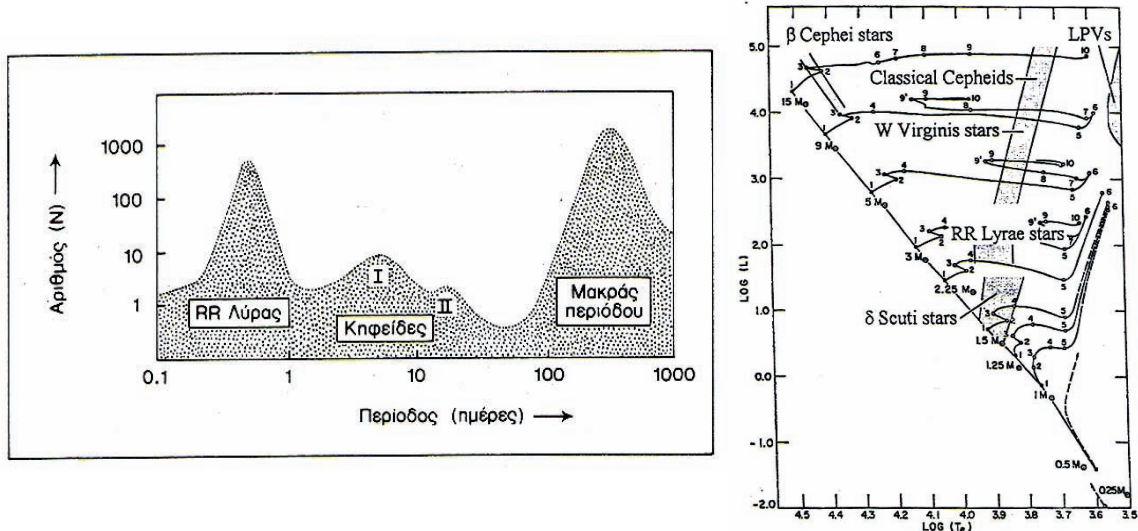
1.4.1 Φυσικοί μεταβλητοί αστέρες



Σχ. 1.1 Η θέση των διαφόρων τύπων φυσικών μεταβλητών αστέρων στο διάγραμμα H-R (Αντωνοπούλου, Κοντιζά, Μαστιχιάδης 2005).

1.4.1.1 Παλλόμενοι μεταβλητοί αστέρες

Οι εν λόγω αστέρες είναι μια πολύ σημαντική κατηγορία μεταβλητών, διότι έχουμε περιοδικότητα της μεταβολής της λαμπρότητας. Συνήθως η λαμπρότητά τους φτάνει μία μέγιστη τιμή, και εν συνεχεία μειώνεται έως ότου πάρει μία ελάχιστη. Τα αίτια αυτής της μεταβολής οφείλονται, όπως έχει διαπιστωθεί, σε αναπάσεις του ίδιου του αστέρα, και σε μεγάλη πλειοψηφία είναι ακτινικές. Όπως θα δούμε παρακάτω η υδροστατική ισορροπία, για κάποιους λόγους καταστρέφεται, κι αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη περιοδική συστολή και διαστολή του αστέρα.



Σχ.1.2 & 1.3 Ιστόγραμμα της κατανομής της περιόδου των παλλόμενων μεταβλητών αστέρων (αριστερά), και οι θέσεις των παλλόμενων αστέρων στο διάγραμμα H-R (δεξιά) (Αντωνοπούλου, Κοντιζά, Μαστιχιάδης 2005).

Φυσική των ακτινικών αναπάσεων

Οι ακτινικές αναπάσεις ενός παλλόμενου αστέρα, κατά πάσα πιθανότητα, οφείλονται σε εκτόνωση ακουστικών κυμάτων, που προέρχονται από το εσωτερικό του, στην περιφέρεια του αστέρα. Μπορούμε να κάνουμε έναν πρώτο υπολογισμό της περιόδου ανάπασης Π , μετρώντας τον χρόνο που χρειάζεται το ακουστικό κύμα, για να διασχίσει όλη την διάμετρο του αστέρα σταθερής πυκνότητας ρ .

Η αδιαβατική ταχύτητα του ήχου δίνεται από την σχέση:
$$U_s = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} \quad (1.1)$$

Όπου \mathbf{P} η πίεση, και γ ο λόγος των ειδικών θερμότητων

Η πίεση \mathbf{P} βρίσκεται από τις εξισώσεις της μαγνητοϋδροδυναμικής, θεωρώντας υδροστατική ισορροπία και (μη ρεαλιστικά) σταθερή πυκνότητα, από την σχέση:

$$\frac{dP}{dr} = -G \frac{M_r \rho}{r^2} \quad (1.2)$$

Παρατηρούμε ότι η έλκουσα μάζα M είναι συνάρτηση της απόστασης r από το κέντρο του αστέρα.

Χρησιμοποιώντας τις βασικές σχέσεις: $m = \rho V$ (1.3)

Όπου V ο όγκος του αστέρα που δίνεται από την σχέση: $V = \frac{4}{3} \pi r^3$ (1.4)

Συνδυάζοντας τις (2), (3), (4) παίρνουμε την σχέση: $\frac{dP}{dr} = -\frac{4}{3} \pi G r \rho^2$ (1.5)

Θεωρούμε ότι στην επιφάνεια του αστέρα, δηλαδή σε απόσταση R από το κέντρο του (όπου R η ακτίνα του αστέρα) η πίεση έχει μηδενική τιμή $P(R) = 0$. Η παραπάνω διαφορική εξίσωση (1.5) μας δίνει ως λύση:

$$P(r) = \frac{2}{3} \pi G \rho^2 (R^2 - r^2) \quad (1.6)$$

Οπότε η περίοδος ανάπαλσης μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση:

$$\Pi \approx 2 \int_0^R \frac{dr}{U_s} \approx 2 \int_0^R \frac{dr}{\sqrt{\frac{2}{3} \gamma \pi G \rho (R^2 - r^2)}} \quad (1.7)$$

Λύνοντας το παραπάνω ολοκλήρωμα βρίσκουμε:

$$\Pi \approx \sqrt{\frac{3\pi}{2\gamma\rho G}} \Rightarrow \Pi^2 \rho = \sqrt{\frac{3\pi}{2\gamma G}} = \text{σταθερό} \quad (1.8)$$

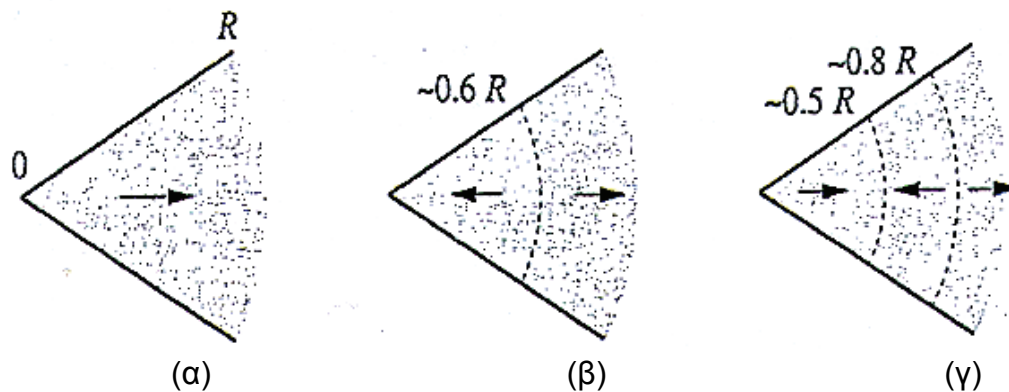
Βρήκαμε τελικά μια σχέση ανάμεσα στη περίοδο ανάπαλσης και την πυκνότητα του αστέρα. Η παραπάνω σχέση ανακαλύφθηκε για πρώτη φορά από την *Leavitt* (1912) και εξηγούσε πλήρως την παραλληλία της ζώνης αστάθειας με τον άξονα της λαμπρότητας στο διάγραμμα H-R. Παρατηρήσεις, σε νάνους αστέρες και ερυθρούς γίγαντες, έδειξαν όντως την ισχύ της παραπάνω σχέσης, αφού οι περίοδοι ανάπαλσης των νάνων αστέρων ήταν μικρότερες σε σχέση με τις περιόδους των αραιότερων ερυθρών γιγάντων.

Πίνακας 1.2 Ο παρακάτω πίνακας περιέχει τα εύρη των τιμών της περιόδου ανάπαλσης, τον πληθυσμό στον οποίο ανήκουν, καθώς και τον τύπο ανάπαλσης για όλες τις κατηγορίες παλλόμενων αστέρων (Carroll & Ostlie 1996)

| Type | Range of Periods | Population Type | Radial or Nonradial |
|-----------------------|------------------|-----------------|---------------------|
| Long-Period Variables | 100–700 days | I,II | R |
| Classical Cepheids | 1–50 days | I | R |
| W Virginis stars | 2–45 days | II | R |
| RR Lyrae stars | 1.5–24 hours | II | R |
| δ Scuti stars | 1–3 hours | I | R,NR |
| β Cephei stars | 3–7 hours | I | R,NR |
| ZZ Ceti stars | 100–1000 seconds | I | NR |

Η ακτινική ανάπαυση των παλλόμενων αστέρων μπορεί να επεξηγηθεί με στάσιμα κύματα, σε τρία στάδια.

- *Fundamental mode* (α): Το αέριο ξεκινά από το κέντρο και διαδίδεται ακτινικά προς την περιφέρεια του αστήρα
- *First overtone* (β) : Ένα μέρος του κύματος σε κάποια απόσταση από το κέντρο, επιστρέφει προς τα πίσω, ενώ το υπόλοιπο συνεχίζει προς την επιφάνεια
- *Second overtone* (γ) : Το κύμα, που προηγουμένως όδευε προς την επιφάνεια, με τη σειρά του «σπάει» και αυτό σε δύο κομμάτια, εκ των οποίων το ένα συνεχίζει προς την περιφέρεια διαστέλλοντας την ακτίνα του αστήρα και το άλλο επιστρέφει προς τα πίσω και συγκρούεται με ένα νέο εξερχόμενο κύμα από το κέντρο του αστήρα. Αυτό ακριβώς το «φρενάρισμα» εμποδίζει το νέο κύμα να διαφύγει, και πλέον τα εξωτερικά κελύφη αρχίζουν να καταρρέουν, προκαλώντας έτσι την συστολή του αστήρα.



Σχ.1.4 Στάδια ανάπαυσης των παλλόμενων αστέρων (Carroll & Ostlie 1996).

Θεωρία της ανάπαυσης

Το 1914 ο αμερικανός αστρονόμος *Harlow Shapley*, προκειμένου να ερμηνεύσει το φαινόμενο της περιοδικής μεταβολής της λαμπρότητας αυτών των αστέρων, διατύπωσε την θεωρία της ανάπαυσης, την οποία επεξεργάστηκε μαθηματικά το 1918 ο *Eddington*.

Εξετάζοντας ποιοτικά αυτή την θεωρία, μπορούμε να δούμε τα βήματα αυτής της ανάπαυσης. Σε μια πρώτη φάση ο αστέρας συστέλλεται και ως εκ τούτου γίνεται θερμότερος και φασματικά πιο γαλάζιος, εκπέμπει δηλαδή την ακτινοβολία του σε μικρότερα μήκη κύματος. Όταν η διάμετρος του αστήρα πάρει την μικρότερη τιμή της, τότε η θερμοκρασία του κέντρου γίνεται μεν η μεγαλύτερη δυνατή, τα ποσά ενέργειας, όμως, που δημιουργούνται εκείνη ακριβώς τη στιγμή στον πυρήνα του, φθάνουν στην επιφάνειά του 1/4 της περιόδου αργότερα, όταν πια η φωτόσφαιρά του διαστέλλεται με τη μέγιστη δυνατή ταχύτητα.

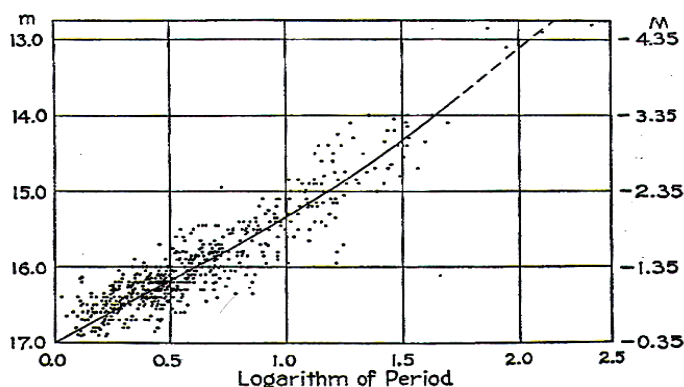
Σε μια δεύτερη φάση, ο αστέρας διαστέλλεται και ως εκ τούτου συνεχώς ψύχεται. Όταν η διάμετρος του πάρει την μεγαλύτερη τιμή της, η θερμοκρασία του πυρήνα του γίνεται ελάχιστη. Το φαινόμενο αυτό θα εκδηλωθεί στη φωτόσφαιρα

πάλι 1/4 της περιόδου αργότερα, όταν πλέον αυτή θα συστέλλεται με την μέγιστη δυνατή ταχύτητα.

Κηφείδες

Αυτή η κατηγορία παλλόμενων αστέρων θεωρείται ίσως η πιο σημαντική. Ο λόγος είναι ότι οι κηφείδες εκτός του μεγάλου αριθμού τους, έχουν μελετηθεί με μεγάλη λεπτομέρεια, και μέσω των ιδιοτήτων που παρουσιάζουν μπορούμε να μετράμε αποστάσεις στο σύμπαν.

Η αστρονόμος *Leavitt* (1912) ανακάλυψε μερικές χιλιάδες παλλόμενων αστέρων όταν εργαζόταν για τον *Edward Charles Pickering* στο πανεπιστήμιο του *Harvard*. Η δουλειά της ήταν να συγκρίνει φωτογραφίες ενός αστρικού πεδίου που είχαν ληφθεί με κάποια χρονική διαφορά, και να παρατηρεί τυχόν μεταβολές στην λαμπρότητα των άστρων. Τελικά ανακάλυψε 2400 κηφείδες, πολλοί εκ των οποίων βρίσκονται στο μικρό νέφος του Μαγγελάνου, με περιόδους από 1 έως 50 ημέρες. Μετά από αυτές τις ανακαλύψεις η *Leavitt* ασχολήθηκε με την μελέτη της φύσης των κηφείδων στο μικρό νέφος του Μαγγελάνου. Παρατήρησε ότι οι πιο λαμπροί κηφείδες είχαν μεγαλύτερη περίοδο ανάπαλσης, κι έτσι αντιστοίχισε τα φαινόμενα μεγέθη με τις περιόδους ανάπαλσής τους. Θεωρώντας ότι όλοι οι κηφείδες βρίσκονταν σε απόσταση 60 kpc, όση δηλαδή η απόσταση του μικρού νέφους του Μαγγελάνου από εμάς, και βάση της σχέσης που συνδέει το απόλυτο με το φαινόμενο μέγεθος, βρήκε ότι οι διαφορές που παρουσιάζουν στο φαινόμενο μέγεθός τους, θα είναι οι ίδιες με αυτές στο απόλυτο μέγεθος.



Σχ. 1.5 Διάγραμμα απολύτου & φαινομένου μεγέθους συναρτήσεως της περιόδου των κλασσικών κηφείδων στο μικρό νέφος του Μαγγελάνου (www.aavso.org).

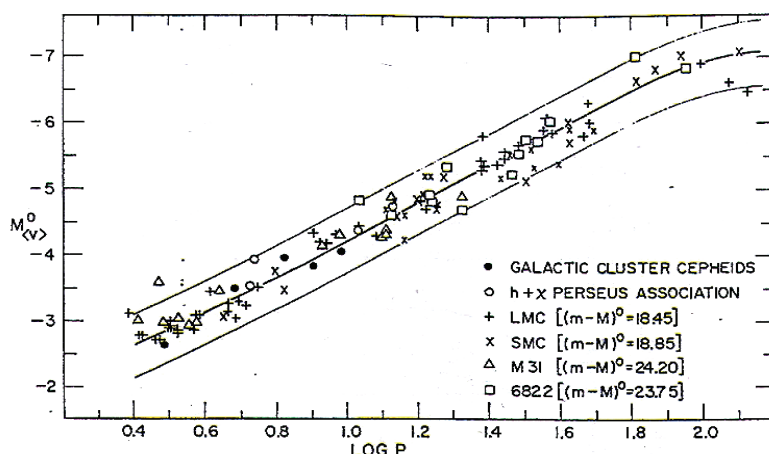
Οι αστρονόμοι εκείνης της εποχής είχαν ενθουσιαστεί πολύ με την παραπάνω συσχέτιση περιόδου ανάπαλσης και απολύτου μεγέθους, διότι πλέον μπορούσαν να υπολογίσουν αποστάσεις στο σύμπαν, χρησιμοποιώντας την σχέση ($m - M = 5 \log \Pi - 5$) παρατηρώντας απλά την περίοδο ανάπαλσης ενός κηφείδη.

Πλέον το μόνο που χρειαζόταν ήταν ο υπολογισμός της απόστασης ενός κηφείδη αστέρα, ώστε να προσδιοριστεί η απόστασή του. Ο υπολογισμός του απολύτου μεγέθους M προϋποθέτει την γνώση της απόστασής του από εμάς. Για να αποφύγει την χρήση της απόστασης η *Leavitt* εξήγαγε την παρακάτω **σχέση Περιόδου-Λαμπρότητας**:

$$\log \frac{\langle L \rangle}{L_{\odot}} = 1.15 \log \Pi + 2.47 \quad (1.9)$$

Όπου $\langle L \rangle$ η μέση λαμπρότητα του κηφείδη, και Π η περίοδος ανάπαλσής του σε ημέρες. Η αναγωγή της λαμπρότητας σε απόλυτο μέγεθος, δίνει την σχέση:

$$M_V = -2.8 \log P - 1.43 \quad (1.10)$$



Σχ. 1.6 Σχέση περιόδου – λαμπρότητας για τους κηφείδες αστέρες (Carroll & Ostlie 1996).

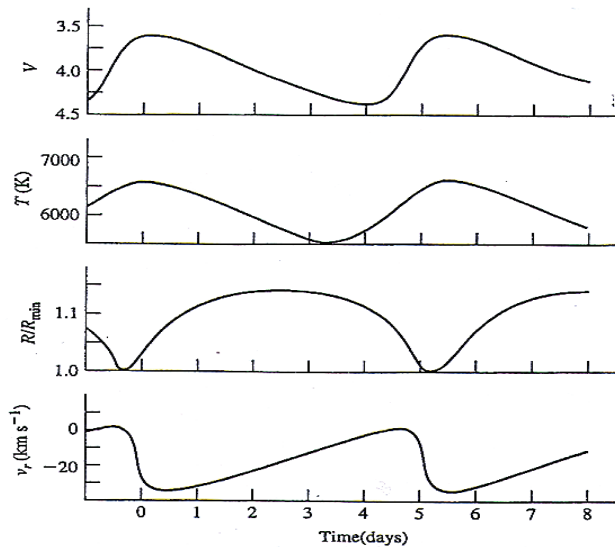
Οι κηφείδες εισήγαγαν την τρίτη διάσταση (βάθος) στους υπολογισμούς των αστρονόμων, και έκαναν δυνατό τον υπολογισμό των αποστάσεων εξωγαλαξιακών πηγών. Επειδή οι κηφείδες είναι υπεργίγαντες (τάξη φωτεινότητας Ib), περίπου 50 φορές μεγαλύτεροι από τον ήλιο και εκατοντάδες φορές λαμπρότεροι, παρατηρούνται πολύ εύκολα σε διαγαλαξιακές αποστάσεις.

Η σημαντική προσφορά των κηφείδων σαν δείκτες κοσμικών αποστάσεων, δεν απαιτεί την κατανόηση των φυσικών αιτιών της ανάπαλσής τους. Όμως κάποτε πιστεύαμε ότι οι αναπάσεις δημιουργούνται από παλιρροϊκές δυνάμεις από κάποιον κοντινό συνοδό αστέρα, και κατ' επέκταση θεωρούσαμε ότι οι όλοι οι κηφείδες ανήκουν σε διπλά συστήματα. Ωστόσο ο Shapley (1914) διαφώνησε με την θεωρία των διπλών συστημάτων, και πρότεινε ότι οι παρατηρούμενες μεταβολές της λαμπρότητας, άρα και της θερμοκρασίας, δημιουργούνταν από ακτινικές αναπάσεις του ίδιου του αστέρα. Πρότεινε την ιδέα ότι αυτοί οι αστέρες «εισπνέουν και εκπνέουν» αυξομειώνοντας την λαμπρότητά τους. Ο Eddington (1918) δημοσίευσε μια θεωρητική εργασία που ερχόταν σε πλήρη συμφωνία με τις μεταβολές της λαμπρότητας, της θερμοκρασίας και της επιφανειακής ταχύτητας των κηφείδων κατά την διάρκεια μιας περιόδου ανάπαλσης.

Στον γαλαξία μας έχουμε ανακαλύψει περίπου 700 κηφείδες που ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες ανάλογα την ηλικία τους.

Κηφείδες Πληθυσμού I (κλασσικοί κηφείδες)

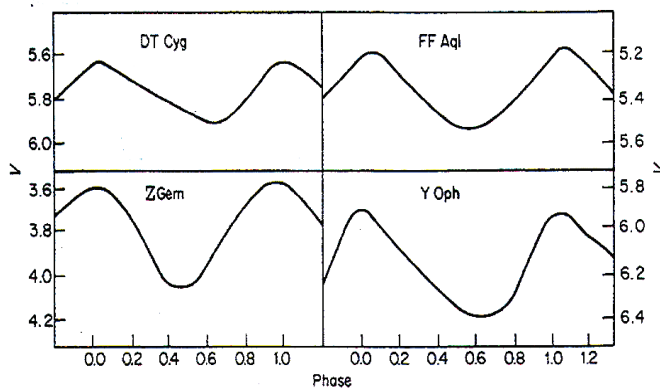
Πρότυπος αστέρας αυτής της κατηγορίας είναι ο δ Cep, ενώ όλοι οι αστέρες της κατηγορίας ανήκουν στον *πληθυσμό I*, δηλαδή είναι πλούσιοι σε μέταλλα. Στον γενικό κατάλογο συμβολίζονται ως **Cδ**, δηλαδή κλασσικοί κηφείδες. Στον πρότυπο αστέρα της κατηγορίας, δ Cep, έχει παρατηρηθεί ότι η αλλαγή στην λαμπρότητά του οφείλεται στην μείωση της επιφανειακής θερμοκρασίας του κατά 1000 – 1500 K, ενώ η ακτίνα του αστέρα κατά την ανάπαυση μειώνεται 5%-10%. Ο φασματικός τύπος του αστέρα αλλάζει συνεχώς μέσα σε μία περίοδο ανάπαλσης. Στο μέγιστο είναι φασματικού τύπου F5 (θερμότερος), ενώ στο ελάχιστο είναι τύπου G2 (ψυχρότερος).



Σχ.1.7 Το παραπάνω σχήμα απεικονίζει τις μεταβολές του φαινομένου μεγέθους, της θερμοκρασίας, της ακτίνας και της επιφανειακής ταχύτητας του δ Cep. (www.aavso.org).

Στο διπλανό σχήμα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι οι καμπύλες της ακτίνας και του φαινομένου μεγέθους είναι «κατοπτρικές». Βλέπουμε ότι η λαμπρότητα του αστέρα είναι μεγαλύτερη όταν η ακτίνα του αυξάνει ταχέως, μετά το ελάχιστό της. Η περίοδός του είναι 5d 8h 47min 30sec και το απόλυτο μέγεθός του είναι -3.4. Έχει έναν συνοδό αστέρα φασματικού τύπου A0V και φαινομένου μεγέθους 7.5.

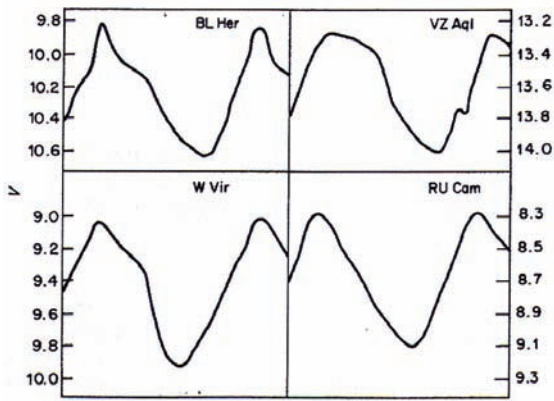
Οι κλασσικοί κηφείδες βρίσκονται κυρίως στο γαλαξιακό επίπεδο. Έχουν εν γένει μεγάλη μάζα γι' αυτό και ο χρόνος παραμονής τους στην κύρια ακολουθία κυμαίνεται από 10 έως 20 εκατομμύρια χρόνια. Οι κηφείδες που παρατηρούμε εμείς είναι σε μεταγενέστερο στάδιο εξέλιξης και βρίσκονται στο στάδιο των υπεργιγάντων. Σε αυτή τη φάση της ζωής τους, διασχίζουν την ζώνη αστάθειας, και χαρακτηρίζονται από έντονες αναπάσεις, ενώ η περίοδός τους εξαρτάται από την αρχική θέση που θα καταλάβουν σε αυτή τη ζώνη. Από τις φωτομετρικές καμπύλες αυτού του τύπου κηφείδων έχουμε ανακαλύψει ότι η μεταβολή της λαμπρότητάς τους δεν ξεπερνά τα 0.5 mag, ενώ η περίοδος κυμαίνεται από 1.8–20 days.



Σχ.1.8 Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε διαγράμματα φάσης τεσσάρων κλασσικών κηφείδων (www.aavso.org).

Κηφείδες πληθυσμού II

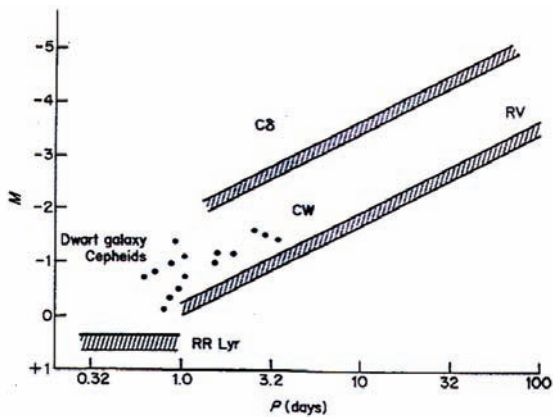
Πρότυπος αστέρας αυτής της κατηγορίας είναι ο W Virginis και ανακαλύφθηκε από τον Schonfeld το 1866. Βρίσκεται στις $+61^\circ$ από το γαλαξιακό επίπεδο, και οι φωτομετρικές καμπύλες του διέφεραν από αυτές των κλασσικών κηφείδων ίδιας περιόδου κι επιπροσθέτως παρουσίαζε γραμμές έντονα ιονισμένου ασβεστίου, γεγονός που προκάλεσε σκέψη για νέα κατηγορία κηφείδων στους αστρονόμους. Για 80 περίπου χρόνια ο αστέρας αυτός άνηκε στην κατηγορία των κλασσικών κηφείδων, όμως το 1939 ανακαλύφθηκε ένας νέος αστέρας, που παρουσίαζε πολλές ομοιότητες με τον W Vir, και επιβεβαίωσε την ανάγκη για δημιουργία νέας κατηγορίας κηφείδων. Οι κηφείδες αυτού του πληθυσμού είναι φτωχοί σε μέταλλα,



έχουν μάζες από $0.6 M_{\odot}$ έως $1 M_{\odot}$, είναι γηραιοί αστέρες, έχουν διαφορετική κατανομή και κίνηση στον γαλαξία από τους κλασσικούς και στον γενικό κατάλογο συμβολίζονται ως **CW**. Έχει παρατηρηθεί ότι τέτοιου είδους αστέρες που έχουν περίοδο μικρότερη των 2.5 days παρουσιάζουν ασύμμετρες καμπύλες φωτός, ενώ αντίθετα αυτοί που έχουν περίοδο μεγαλύτερη των 10 days παρουσιάζουν μικρότερη ασυμμετρία.

Σχ.1.9 Στο παραπάνω σχήμα φαίνονται τα διαγράμματα φάσης τεσσάρων CW κηφείδων (www.aavso.org).

Η μεταβολή της λαμπρότητας αυτών των αστέρων είναι συχνά μεγαλύτερη από 1 mag.



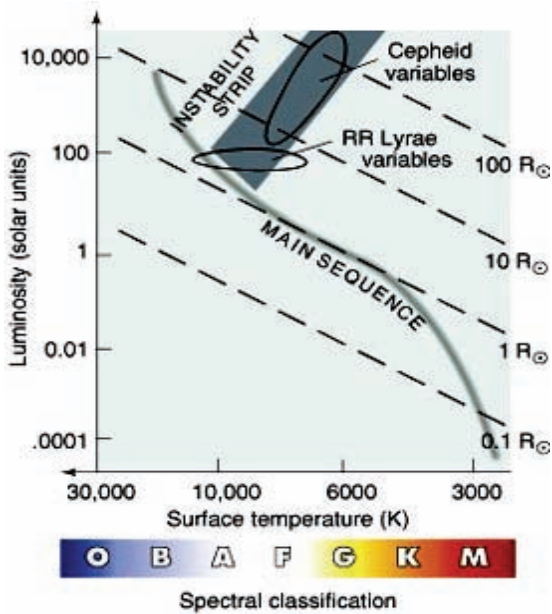
Σχ.1.10 Στο διπλανό σχήμα βλέπουμε την σχέση περιόδου-λαμπρότητας για τους κηφείδες πληθυσμού I & II και τους παλλόμενους RR Lyrae (www.aavso.org).

1.4.1.2 Βραχυπερίοδοι μεταβλητοί αστέρες

Είναι προφανές ότι πρόκειται για μεταβλητούς αστέρες με μικρή σχετικά περίοδο. Υπάρχουν διάφορες υποκατηγορίες, οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω και στην κάθε μια φυσικά αντιστοιχεί κάποιος πρότυπος αστέρας.

Αστέρες τύπου RR Lyrae

Ο πρότυπος αστέρας αυτής της κατηγορίας ανακαλύφθηκε σε σφαιρωτό σμήνος, και γι' αυτό τον λόγο οι αστέρες αυτού του τύπου ονομάστηκαν μεταβλητοί σμηνών. Ο αστέρας RR Lyrae έχει περίοδο 13h 36min και η μεταβολή της λαμπρότητάς του κυμαίνεται από 7.06 έως 8.12 mag. Οι αστέρες αυτού του τύπου είναι γηραιοί αστέρες δίσκου, με μικρή περίοδο που κυμαίνεται από 1.5 έως 24hr και μικρές μεταβολές λαμπρότητας. Ανήκουν στον πληθυσμό II και είναι συνήθως φασματικού τύπου A (κυανοί γίγαντες). Βρίσκονται σε σφαιρωτά σμήνη και σε αστρικά συστήματα με μικρή περιεκτικότητα σε μέταλλα. Το απόλυτο μέγεθός τους

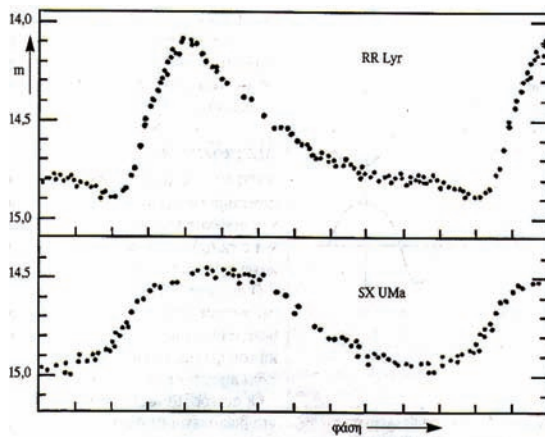
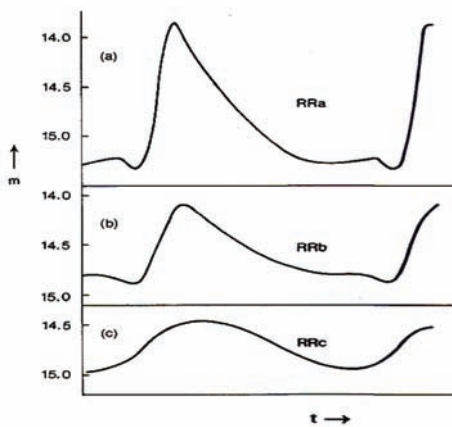


κυμαίνεται μεταξύ 0.5 και 1 mag με μέση τιμή 0.6 mag, ενώ η μάζα τους είναι περίπου ίση με μία ηλιακή μάζα. Εφόσον όλοι αυτοί οι αστέρες έχουν περίπου την ίδια μάζα, συμπεραίνουμε ότι βρίσκονται στην ίδια εξελικτική φάση, και συγκεκριμένα στην φάση καύσης ηλίου στον πυρήνα. Στο διάγραμμα H-R, ο οριζόντιος κλάδος των σμηνών με μικρή περιεκτικότητα σε μέταλλα τέμνει την ζώνη αστάθειας και σε ακριβώς αυτή την τομή βρίσκονται οι αστέρες RR Lyrae.

Σχ.1.11 Η θέση των RR Lyrae στο διάγραμμα H-R.

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά αυτών των αστέρων είναι τα εξής:

- α) Οι RR Lyrae με μεγαλύτερες περιόδους παρουσιάζουν μεγαλύτερο εύρος και ασύμμετρες καμπύλες φωτός. Ανάλογα με το εύρος της μεταβολής της λαμπρότητας κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες RRa και RRb. Αργότερα διαπιστώθηκε ότι αυτές οι δύο κατηγορίες ουσιαστικά αποτελούν μία, και από τότε ονομάζονται RRab. β) Οι RR Lyrae με μικρές περιόδους, έχουν σχετικά συμμετρικές καμπύλες φωτός και μικρό εύρος μεταβολής της λαμπρότητάς τους. Αποτελούν ξεχωριστή κατηγορία που ονομάζεται RRc.



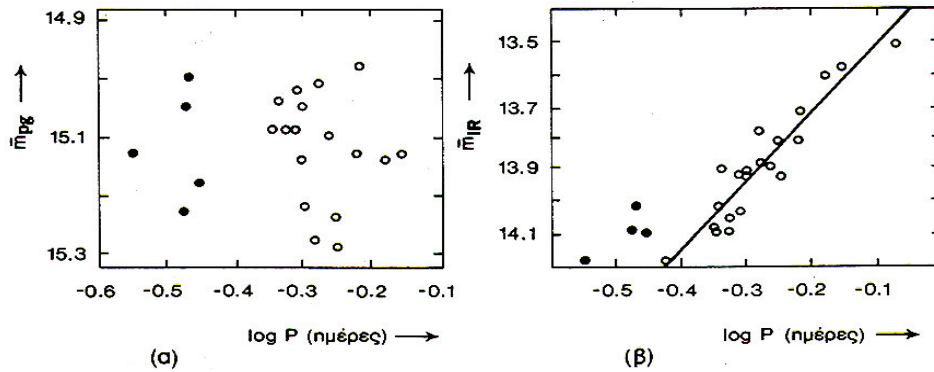
Σχ.1.12 & 1.13 Φωτομετρικές καμπύλες των διαφόρων τύπων αστέρων RR Lyrae (αριστερά), και τα διαγράμματα φάσης των αστέρων RR Lyrae και SX UMa (δεξιά) (www.aavso.org).

Ο μηχανισμός των ανατάσεων των αστέρων αυτών είναι ανάλογος με αυτόν των κηφειδών. Η περίοδος ανατάσεων εξαρτάται από την μέση πυκνότητα των εξωτερικών στρωμάτων του αστέρα σύμφωνα με τον τύπο του *Eddington*:

$$P = \rho^{-1/2} \tag{1.11}$$

Η «βαλβίδα» που επιτυγχάνει την διατήρηση των ανατάσεων στους RR Lyrae, είναι ένας εξωτερικός φλοιός ιονισμένου ηλίου (Hell). Κατά την συστολή του

αστέρα η ενέργεια που παράγεται δεν ακτινοβολείται αλλά χρησιμεύει για τον περαιτέρω ιονισμό του ηλίου ($\text{HeII} \rightarrow \text{HeIII}$). Η ενέργεια αυτή εκλύεται κατά την διαστολή του αστέρα (οπότε ελαττώνεται η θερμοκρασία του και ο βαθμός ιονισμού του). Έτσι επιτείνεται η διαστολή του αστέρα με αποτέλεσμα την διατήρηση των αναπάσεων. Πολύπλοκοι θεωρητικοί υπολογισμοί έδειξαν ότι το απόλυτο μέγεθος αυτών των αστέρων συνδέεται με την θερμοκρασία, την χημική σύσταση, την απορρόφηση, την ηλικία, την μάζα, το εύρος των μεταβολών και τέλος με την περίοδο των αναπάσεων. Η πειραματική εύρεση αυτών των παραμέτρων είναι εξαιρετικά δύσκολη, κι έτσι η επαλήθευση των θεωρητικών υπολογισμών είναι σχεδόν αδύνατη. Η εξάρτηση του απόλυτου μεγέθους από την θερμοκρασία είναι ασθενέστερη, όταν οι παρατηρήσεις γίνονται σε μεγάλα μήκη κύματος (υπέρυθρη ακτινοβολία). Παραδείγματος χάρη για τα οπτικά μήκη κύματος έχουμε μια εξάρτηση $L_V \propto T^4$, ενώ για τα υπέρυθρα μήκη κύματος έχουμε μια εξάρτηση $L_{IR} \propto T^{1.6}$.



Σχ.1.14 Διαγράμματα μέσου φαινομένου μεγέθους-περιόδου του σφαιρωτού σμήνους M5 σε οπτικά μήκη κύματος (α) και στο υπέρυθρο (β). Οι ανοικτοί κύκλοι είναι αστέρες τύπου RRab ενώ οι κλειστοί κύκλοι τύπου RRc (www.aavso.org).

Η μελέτη των αστέρων αυτών είναι πολύ σημαντική διότι χρησιμοποιούνται για την εύρεση αποστάσεων των σφαιρωτών σμηνών. Όπως προαναφέραμε η τιμή του απόλυτου μεγέθους συνδέεται με την χημική σύσταση (αφθονία μετάλλων) και συγκεκριμένα τον λόγο $[\frac{Fe}{H}]$.

$$\text{Πρόσφατα έχει βρεθεί ότι: } \langle M_V \rangle = (0.16 \pm 0.03) \left[\frac{Fe}{H} \right] + 1.02 \pm 0.03 \quad (1.12)$$

Με παρατηρήσεις στο υπέρυθρο ($2.2\mu\text{m}$), με γνωστή την περίοδο ανάπασης και την βοήθεια της σχέσης:

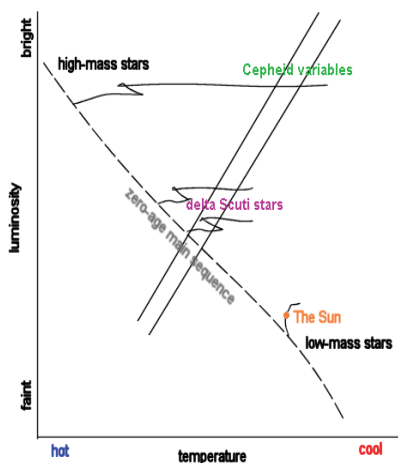
$$\langle M_V \rangle = -(2.3 \pm 0.2) \log(P(\text{days})) - 0.88 \pm 0.06 \quad (1.13)$$

μπορούμε και πάλι να υπολογίσουμε το απόλυτο μέγεθος και κατ' επέκταση την απόσταση από την σχέση:

$$m - M = 5 \log r - 5 \quad (1.14)$$

Αστέρες τύπου δ Scuti

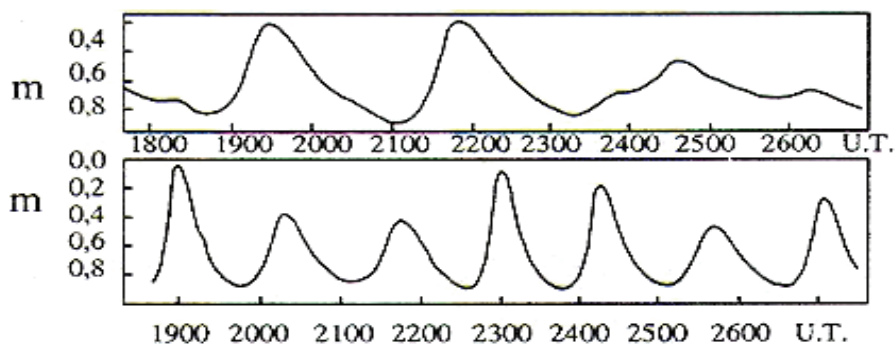
Αυτού του τύπου οι αστέρες βρίσκονται πολύ κοντά στο σημείο τομής της ζώνης αστάθειας με την Κύρια Ακολουθία (παρακάτω διάγραμμα). Μπορούν να βρεθούν σε διάφορες εξελικτικές φάσεις, συμπεριλαμβανομένης και της φάσης πριν τη Κύρια Ακολουθία, και παραμένουν στην ζώνη αστάθειας όσο ο φασματικός τους τύπος κυμαίνεται από A2 έως F8 και η τάξη φωτεινότητά τους από V (νάνοι) έως III (υπογίγαντες). Πρόκειται για εξαιρετικά βραχυπερίοδους αστέρες, με περίοδο από 0.03 έως 0.3 days. Για τέτοιου τύπου αστέρες με μεγάλη περιεκτικότητα σε μέταλλα η μάζα τους κυμαίνεται από $1.5 M_{\odot}$ έως $2.5 M_{\odot}$, ενώ αυτοί με μικρή περιεκτικότητα σε μέταλλα έχουν μάζες από $1 M_{\odot}$ έως $2 M_{\odot}$. Οι δ Scuti αστέρες μπορούν να ταξινομηθούν είτε βάσει του εύρους μεταβολής της λαμπρότητας είτε βάσει της περιεκτικότητάς τους σε μέταλλα.



Σχ.1.15 Η θέση των αστέρων δ Scuti στο διάγραμμα H-R (www.aavso.org).

Οι αστέρες με το μεγαλύτερο πλάτος, γνωστοί ως *HADS*, έχουν εύρος μεταβολής μεγαλύτερο του 0.1 mag στο V-φίλτρο, ενώ αυτοί με το μικρότερο πλάτος παρουσιάζουν εύρος μικρότερο του 0.1 mag και είναι γνωστοί ως *LADS*. Οι *HADS* αστέρες έχουν ακτινικές αναπάσεις με σχεδόν σταθερή περίοδο και βρίσκονται στον κλάδο των υπογιγάντων στο διάγραμμα H-R. Οι *LADS* αστέρες μπορούν να βρίσκονται σε φάση είτε πριν την κύρια ακολουθία, είτε στην κύρια ακολουθία, είτε σε μεταγενέστερη φάση, και μπορεί να είναι πολυπεριοδικοί. Οι τελευταίοι έχουν πολύ καλά καθορισμένη σχέση περιόδου λαμπρότητας και χρησιμοποιούνται ως δείκτες αποστάσεων.

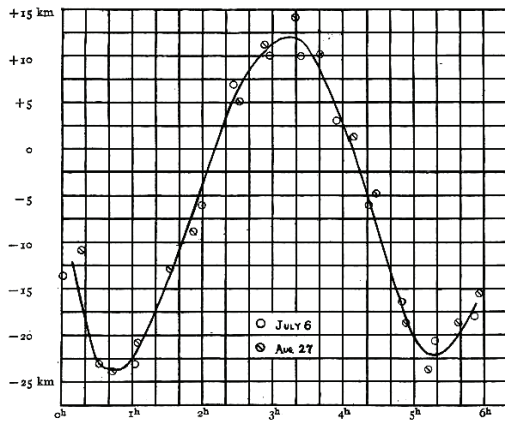
Η δεύτερη ταξινόμηση γίνεται βάσει της περιεκτικότητας σε μέταλλα. Οι πλούσιοι σε μέταλλα αστέρες (πληθυσμού I) είναι γνωστοί ως δ *Scuti*. Οι αστέρες που είναι φτωχοί σε μέταλλα είναι γνωστοί ως *SX Phoenicis* αστέρες, έχουν ίδιο τρόπο ανάπτυξης με τους *HADS* αστέρες, διαφέρουν όμως εντελώς στην χημική σύσταση. Έχουν σχέση περιόδου-λαμπρότητας, και βρίσκονται σε σφαιρωτά σμήνη και στην γαλαξιακή άλω.



Σχ.1.16 Το παραπάνω σχήμα δείχνει δύο τυπικές φωτομετρικές καμπύλες δύο δ Scuti αστέρων (www.aavso.org).

Αστέρες τύπου β Cephei ή β Canis Majoris

Αυτή η κατηγορία περιέχει δύο πρότυπους αστέρες, οι οποίοι παρουσιάζουν μια διαφορά που θα εξηγηθεί παρακάτω. Στον γενικό κατάλογο των μεταβλητών αστερών έχουν την ονομασία BCEP (εκτός από τρεις βραχυπερίοδους αστέρες που για ειδικούς λόγους ονομάζονται BCEPs). Ο φασματικός τους τύπος κυμαίνεται από B0 έως B2, και η τάξη φωτεινότητάς τους από III (γίγαντες) έως V (νάνοι), τιμές που αντιστοιχούν σε θερμοκρασίες από 20.000 έως 30.000K. Η μάζα τους κυμαίνεται από $10 M_{\odot}$ έως $20 M_{\odot}$. Η περίοδός τους κυμαίνεται από 0.1 έως



Σχ.1.17 Διάγραμμα ακτινικής ταχύτητας του β Cephei (www.aavso.org).

0.3 days και παρουσιάζουν μεγάλο εύρος μεταβολής στην ακτινική τους ταχύτητα (διπλανό σχήμα). Βασικό χαρακτηριστικό τους είναι ότι, αν και έχουν μεγάλες ταχύτητες ανάπαλσης, η διαφορά της λαμπρότητάς τους στο οπτικό φάσμα είναι μερικά εκατοστά του φαινομένου μεγέθους, όμως παρουσιάζουν πολύ μεγάλη μεταβολή στο υπεριώδες φάσμα. Για παράδειγμα ο αστέρας *BW Vulpeculae*, έχει τη μεγαλύτερη ακτινική ταχύτητα, που φθάνει έως και τα 200 km/sec.

Οι παρατηρήσεις έδειξαν ότι σε μερικούς αστέρες το πλάτος ανάπαλσης δεν ήταν σταθερό, αλλά αντίθετα μεταβαλλόταν με τον χρόνο. Το φαινόμενο αυτό, που σήμερα είναι γνωστό ως *beat effect*, είναι αποτέλεσμα δύο πολύ μικρών περιόδων ανάπαλσης που παρουσιάζουν οι αστέρες. Συγκεκριμένα πρόκειται για μία σύνθεση ακτινικών και μη αναπάσεων με μικρές περιόδους. Αυτή είναι και η ειδοποιός διαφορά ανάμεσα στους αστέρες β Cephei και β Canis Majoris αφού οι πρώτοι δεν παρουσιάζουν αυτό το φαινόμενο. Φασματοσκοπικές μελέτες έδειξαν ότι υπάρχει ένα επιπλέον φαινόμενο σ' αυτούς τους αστέρες, γνωστό σήμερα ως *level effect*. Μετρώντας τις ακτινικές ταχύτητες από τις γραμμές απορρόφησης που δημιουργούνται σε διαφορετικά στρώματα του αστέρα, είμαστε σε θέση να παρατηρήσουμε την «συμπεριφορά» του κύματος σε όλη την διάρκεια της εξέλιξής του, έως ότου φθάσει στην επιφάνεια. Ανακαλύφθηκαν περίεργα σχήματα φασματικών γραμμών και μεταβολές σε αυτούς τους αστέρες, τα οποία αργότερα αποδόθηκαν σε σύνθετες κινήσεις του πλάσματος στις αστρικές ατμόσφαιρες. Τέλος ανακαλύφθηκε ότι πολλοί από αυτούς τους αστέρες είναι μέλη διπλών φασματοσκοπικών συστημάτων.

1.4.1.3 Μακροπερίοδοι μεταβλητοί αστέρες

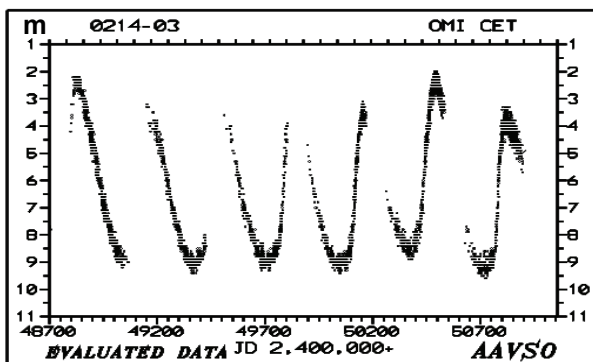
Όπως είναι προφανές οι αστέρες αυτής της κατηγορίας έχουν μεγάλες περιόδους που κυμαίνονται από 100 days έως 2 years. Οι κυριότερες κατηγορίες είναι οι αστέρες τύπου *Mira* και οι μεταβλητοί *OH/IR*.

Αστέρες τύπου Mira

Ο πρότυπος αστέρας αυτής της κατηγορίας είναι ο ο *Ceti* και, όπως αναφέραμε στην ιστορική αναδρομή, ήταν ο πρώτος μακροπερίοδος μεταβλητός που παρατηρήθηκε στα τέλη του 16^{ου} αιώνα.

Σήμερα έχουν ανακαλυφθεί αρκετοί αστέρες που παρουσιάζουν τα χαρακτηριστικά του Mira. Τα κύρια χαρακτηριστικά των αστερών αυτών παρουσιάζονται παρακάτω.

Οι αστέρες αυτού του τύπου είναι πολύ ψυχροί ερυθροί γίγαντες με τυπική θερμοκρασία 3.000K. Έχουν ακτίνα περίπου $200 R_{\odot}$ - $300 R_{\odot}$ και φωτεινότητα περίπου $3000 L_{\odot}$ - $4000 L_{\odot}$. Η περίοδος τους κυμαίνεται από 150 έως 1000 days και παρουσιάζουν σημαντική μεταβολή στην λαμπρότητά τους, της τάξης των 2.5 mag στο ορατό φίλτρο και 1 mag στο υπέρυθρο.



Σχ.1.18 Η φωτομετρική καμπύλη του Mira (www.aavso.org).

Ο φασματικός τους τύπος εξαρτάται άμεσα από τον λόγο $[\frac{C}{O}]$ στην «επιφάνειά τους» (όπου [C] η συγκέντρωση του άνθρακα και [O] η συγκέντρωση του οξυγόνου). Οι φασματικού τύπου **M** έχουν $[\frac{C}{O}] > 1$, οι τύπου **S** έχουν $[\frac{C}{O}] \sim 1$ και οι τύπου

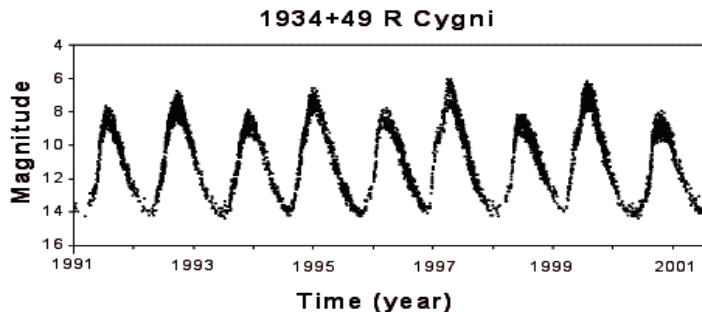
έχουν $[\frac{C}{O}] < 1$. Οι φασματοσκοπικές αναλύσεις έχουν δείξει ότι υπάρχουν γραμμές εκπομπής του H (υδρογόνου), μετατοπίσεις γραμμών λόγω φαινομένου Doppler, και «ίχνη» ωστικών κυμάτων. Παρουσιάζουν ταχύτερες απώλειες μάζας λόγω αστρικών ανέμων, της τάξης του $10^{-6} M_{\odot}/yr$, και παίζουν σημαντικό ρόλο στην γαλαξιακή εξέλιξη διότι εμπλουτίζουν τον μεσοαστρικό χώρο με βαρύτερα στοιχεία. Μέσω της απώλειας μάζας, αποφεύγουν την έκρηξη υπερκαινοφανούς, ενώ ταυτόχρονα είναι προγενήτορες πλανητικών νεφελωμάτων. Παρ' όλα αυτά, κάποιοι αστέρες περνούν κατ' ευθείαν στο στάδιο του λευκού νάνου. Έχουν εκτεταμένες ατμόσφαιρες και πολύ απ' αυτούς διαθέτουν κελύφη σκόνης. Σχετίζονται με τους ημι-ομαλούς μεταβλητούς, είναι πηγές υδροξυλίου (OH) και παρουσιάζουν γραμμές εκπομπής στο υπέρυθρο.

Η περίοδος αυτών των αστερών είναι πολύ σημαντική παράμετρος, διότι πληροφορούμαστε για το μέγεθός τους, την λαμπρότητά τους και τους τρόπους μεταβολής της, την ηλικία τους, την αφθονία τους σε μέταλλα και τέλος την εξελικτική τους φάση. Άλλες σημαντικές παράμετροι που σχετίζονται με την περίοδο, είναι το πλάτος της μεταβολής, η εκπομπή στο υπέρυθρο από την περιβάλλουσα σκόνη και η απώλεια μάζας.

Η μεταβολή του φωτός αυτών των αστερών δεν είναι αυστηρά περιοδική σε φάση και πλάτος. Πολλές περιπτώσεις έδειξαν ότι υπάρχει διαφοροποίηση στο

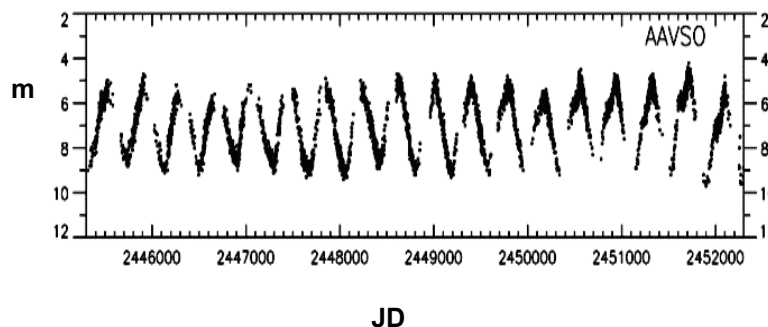
πλάτος μεταξύ δύο διαδοχικών κύκλων και η περίοδος κυμαίνεται γύρω από μία μέση τιμή.

Σε έναν μεγάλο αριθμό αστερών τύπου Mira παρατηρήσαμε ότι το μέγιστο της λαμπρότητάς τους μεταβάλλεται από κύκλο σε κύκλο, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχ.1.19 Η φωτομετρική καμπύλη του αστέρα R Cygni στην οποία φαίνεται ξεκάθαρα η μεταβολή του μεγίστου σε δύο διαδοχικούς κύκλους (www.aavso.org).

Επίσης ένα άλλο πλήθος αστερών παρουσιάζει μεταβολές τόσο στο μέγιστο όσο και στο ελάχιστο της λαμπρότητάς τους, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχ.1.20 Η παραπάνω φωτομετρική καμπύλη είναι του αστέρα R Hydrae (www.aavso.org).

Αυτές οι μεταβολές αποδίδονται στην εκπομπή ακτινοβολίας από τα κελύφη σκόνης που περιβάλλουν αυτούς τους αστέρες.

Η μελέτη αυτών των αστερών είναι εξαιρετικά σημαντική για την σύγχρονη αστροφυσική, διότι βοηθούν στην βαθύτερη κατανόηση της αστρικής εξέλιξης λόγω της ηλικίας τους και της συμπεριφοράς τους, και καλύτερη αντίληψη της κινηματικής του γαλαξία. Παρατηρήσεις σε τέτοιου τύπου αστέρες μας βοηθά στο να καταλάβουμε καλύτερα τις συσχετίσεις που υπάρχουν ανάμεσα στις φωτομετρικές καμπύλες και στις μεταβολές της περιόδου και να μάθουμε περισσότερες λεπτομέρειες για αυτούς τους αστέρες.

Μεταβλητοί OH/IR

Αυτού του τύπου οι αστέρες παρουσιάζουν πολλές ομοιότητες με τους αστέρες τύπου Mira και αρχικά είχε προταθεί να ονομαστούν υπέρυθροι Mira αστέρες. Οι αστέρες αυτοί πρωτοπαρατηρήθηκαν στα μικροκύματα και συγκεκριμένα στην γραμμή 1612 Hz, δηλαδή στην συχνότητα που εκπέμπει η ρίζα υδροξυλίου (OH) λόγω του μηχανισμού maser που λαμβάνει χώρα σε αυτούς τους αστέρες. Στο περιαστρικό περίβλημα του αστέρα συμβαίνουν πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις διέγερσης και εκπομπής στο ηλεκτρονικό περίβλημα ατόμων και μορίων, με αποτέλεσμα την εκπομπή στην προαναφερόμενη συχνότητα.

Οι Mira αστέρες όπως γνωρίζουμε έχουν ισχυρό ρυθμό απώλειας μάζας, και ως εκ τούτου αναμένουμε ότι τους περιβάλλουν κελύφη μοριακής σκόνης.

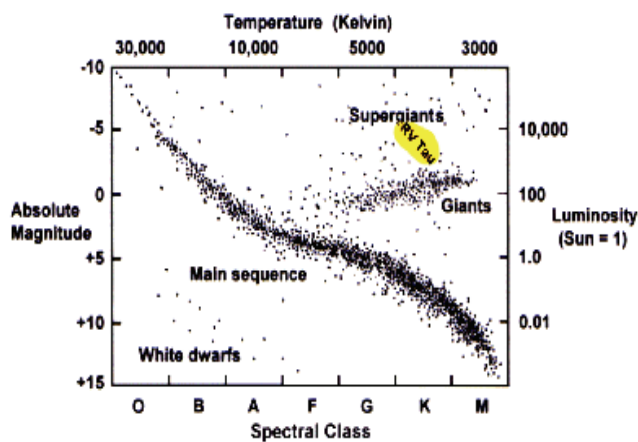
Μετρήσεις στην υπεριώδη περιοχή του φάσματος, έδειξαν ισχυρές περιοχές ακτινοβολίας, κάτι όμως που δεν επαληθεύτηκε στην ορατή περιοχή.

Μεταγενέστερες μελέτες έδειξαν ότι πίσω από το περίβλημα σκόνης υπήρχαν αστέρες φωτεινότεροι των Mira που εξέπεμπαν ισχυρή υπέρυθη ακτινοβολία, και βρίσκονται στον ασυμπτωτικό κλάδο των γιγάντων.

Αυτοί οι αστέρες εξελίσσονται ταχέως, το μέλλον τους είναι μονόδρομος. Μετά από έντονη απώλεια μάζας, το τελευταίο περίβλημα θα εκτιναχθεί ακτινικά και ο κύριος αστέρας θα αποτελέσει τον πυρήνα ενός πλανητικού νεφελώματος.

1.4.1.4 Αστέρες τύπου RV Tauri και ημι-ομαλοί μεταβλητοί αστέρες

Οι αστέρες τύπου *RV Tauri* αποτελούν μια μικρή κατηγορία (σε πλήθος) αστέρων και πρόκειται για φωτεινούς κίτρινους υπεργίγαντες αστέρες. Τέτοιοι αστέρες είναι γηραιοί, πληθυσμού II αστέρες και συναντώνται είτε στην γαλαξιακή άλω είτε στον γαλαξιακό δίσκο. Αρκετοί από αυτούς έχουν βρεθεί σε σφαιρωτά σμήνη και οι αποστάσεις τους είναι λίγο πολύ γνωστές, ενώ δεν έχουν βρεθεί ποτέ σε ανοικτά σμήνη, στα μαγγελανικά νέφη ή σε διπλά συστήματα. Αυτού του τύπου οι αστέρες βρίσκονται κάπου ανάμεσα στους κηφείδες και τους αστέρες τύπου



Mira. Η μελέτη τους είναι πολύ σημαντική, διότι μπορούμε να μάθουμε πολλά πράγματα για την μετάβαση του αστέρα από ένα στάδιο εξέλιξης σε ένα επόμενο. Αυτού του τύπου οι αστέρες είναι μικρής μάζας και έχουν χαμηλή περιεκτικότητα σε μέταλλα και είναι ο συνδετικός κρίκος της γνώσης μας για την εξέλιξη από τον ασυμπτωτικό κλάδο των γιγάντων στο στάδιο των λευκών νάνων.

Σχ.1.21 Η θέση των *RV Tauri* στο διάγραμμα H-R.

Αυτού του τύπου οι αστέρες λόγω των έντονων απωλειών μάζας, που υφίστανται πριν καταλήξουν σε λευκούς νάνους, αναμένεται ότι θα δημιουργήσουν πλανητικά νεφελώματα. Παρ' όλα αυτά κάποιος από αυτούς μπορεί να έχουν πιο αργή εξέλιξη, και να έχουν διαφορετικό μέλλον. Λόγω της μικρής διάρκειας παραμονής αυτών αστέρων στον οριζόντιο κλάδο (μερικές εκατοντάδες χρόνια) είμαστε αβέβαιοι για την πορεία που ακολουθούν.

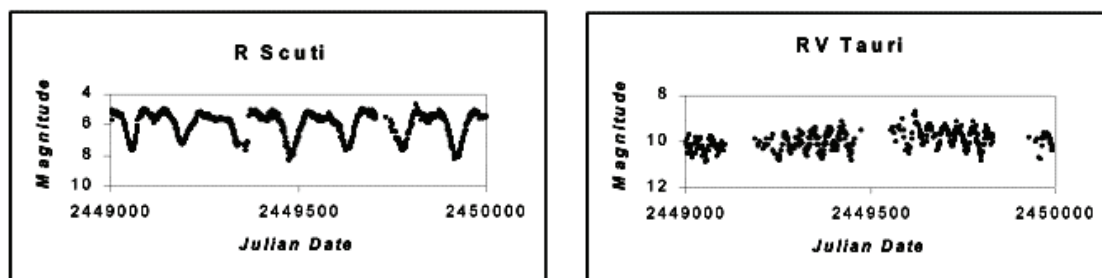
Οι λόγοι που οδηγούν στην μεταβολή της λαμπρότητάς τους είναι φυσικά οι αναπάσεις. Οι αστέρες αυτού του τύπου ακολουθούν τις διαδικασίες *fundamental* και *1st overtone* (§1.4.1.1). Μελέτες από τον Fokin το 1994 έδειξαν ότι δύο ωστικά κύματα παράγονται κατά την διάρκεια ενός κύκλου. Το πρώτο ωστικό κύμα είναι ισχυρότερο και έχει μεγαλύτερο πλάτος, ενώ το δεύτερο είναι ασθενέστερο και παράγεται πριν το δευτερεύον ελάχιστο της λαμπρότητας.

Η ταξινόμηση των αστέρων αυτών αποτέλεσε μεγάλο πρόβλημα για τους αστρονόμους, λόγω των ομοιοτήτων τους με τους κόκκινους ημι-ομαλούς αστέρες (SRc), τους κίτρινους ημι-ομαλούς (SRd) και τους αστέρες τύπου W Virginis.

Τελικά οι αστέρες *RV Tauri* ταξινομούνται βάσει τριών παραμέτρων : (1) τις φωτομετρικές καμπύλες τους, (2) τις περιόδους τους και (3) τον φασματικό τους τύπο.

Αυτοί οι αστέρες έχουν χαρακτηριστικές φωτομετρικές καμπύλες που παρουσιάζουν ένα βαθύ πρωτεύον ελάχιστο, και εν συνεχεία ένα δευτερεύον ρηχό ελάχιστο. Το εύρος της μεταβολής της λαμπρότητας είναι της τάξης των 4 mag. Η περίοδος είναι ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών ελαχίστων και κυμαίνεται από 30 έως 150 days, τιμές κοντινές με αυτές των μακροπεριόδων κηφείδων και βραχυπεριόδων αστέρων τύπου *Mira*. Ο φασματικός τους τύπος κυμαίνεται από F σε G κατά το ελάχιστο (συγκρίσιμο με των κηφείδων) και από G σε K κατά το μέγιστο (συγκρίσιμο με των αστέρων τύπου *Mira*). Το εύρος των φασματικών τύπων που παρουσιάζουν είναι και ο λόγος που ξεχωρίζουν από τους SRc και SRd αστέρες. Επιπροσθέτως, οι αστέρες τύπου *RV Tauri* παρουσιάζουν τάξη φωτεινότητας από II (πραγματικά λαμπροί γίγαντες) → Ib (αμυδρότεροι υπεργίγαντες) και περιστασιακά έως Ia (φωτεινότεροι υπεργίγαντες).

Περαιτέρω ταξινόμηση αυτών των αστέρων γίνεται με κριτήριο την συμπεριφορά της φωτομετρικής τους καμπύλης. Χωρίζονται σε (1) **RVa-μεταβλητούς τύπου RV Tauri**, των οποίων η μεταβολή της λαμπρότητας δεν κυμαίνεται γύρω από κάποια μέση τιμή φαινομένου μεγέθους (παράδειγμα ο αστέρας R Scuti), και (2) **RVb-μεταβλητούς τύπου RV Tauri**, η λαμπρότητα των οποίων παρουσιάζει περιοδικότητα γύρω από κάποια μέση τιμή φαινομένου μεγέθους (χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο αστέρας RV Tauri). Η περίοδος κυμαίνεται από 600 έως 1500 days ή και περισσότερες, και το εύρος της μεταβολής είναι της τάξης των 2 mag στο V- φίλτρο.

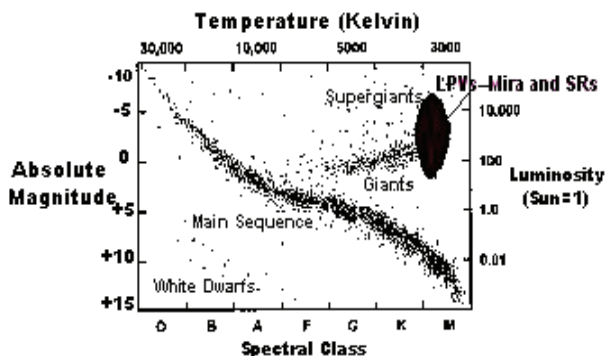


Σχ.1.22 Οι φωτομετρικές καμπύλες των αστέρων R Scuti και RV Tauri (www.aavso.org).

Μία άλλη ταξινόμηση αυτών των αστέρων προτάθηκε από τον Preston (1963), και γίνεται βάσει φασματοσκοπικών ιδιοτήτων. Οι αστέρες χωρίζονται σε τρεις τάξεις: **A**, **B** και **C**. Η **τάξη A** περιλαμβάνει τους αστέρες φασματικών τύπων F και G, οι οποίοι παρουσιάζουν ανωμαλίες στις γραμμές απορρόφησης των CN και CH και παρουσιάζουν γραμμές απορρόφησης του στοιχείου TiO κατά το ελάχιστο. Οι αστέρες της **B τάξης** είναι πλούσιοι σε άνθρακα, παρουσιάζουν ασθενή μεταλλική απορρόφηση και παρουσιάζουν έντονες γραμμές απορρόφησης των CN και CH μεταξύ του δευτερεύοντος και πρωτεύοντος μεγίστου. Οι αστέρες της **C τάξης** παρουσιάζουν κι αυτοί ασθενή μεταλλική απορρόφηση όμως σε αυτούς απουσιάζουν οι γραμμές των CN και CH. Πιστεύεται ότι οι αστέρες της A τάξης είναι νεότεροι και πλουσιότεροι σε μέταλλα από τους αστέρες της c τάξης.

Ο Dawson (1979) διαχώρισε περαιτέρω τους αστέρες της A τάξης, σε αυτούς που παρουσιάζουν γραμμές απορρόφησης του στοιχείου TiO κατά το ελάχιστο, τους οποίους ονόμασε A1 αστέρες, και σε αυτούς που δεν παρουσιάζουν την προαναφερόμενη απορρόφηση, τους οποίους ονόμασε αστέρες A2.

Οι ημι-ομαλοί μεταβλητοί αστέρες (SR) είναι ψυχροί κόκκινοι γίγαντες ή και υπεργίγαντες αστέρες. Ανήκουν στους μακροπερίόδους μεταβλητούς (LPVs), βρίσκονται στα άκρα δεξιά του διαγράμματος H-R και συνήθως ονομάζονται



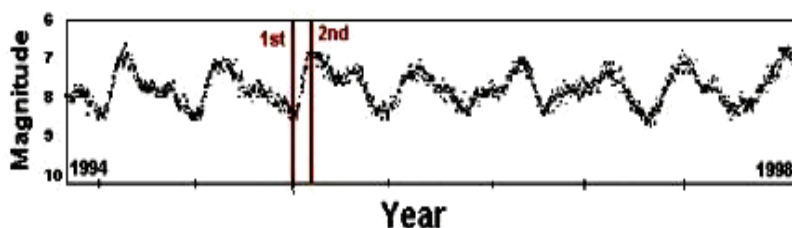
κόκκινοι μεταβλητοί μαζί με τους αστέρες τύπου Mira και τους αργούς ανώμαλους μεταβλητούς (διπλανό σχήμα). Η περίοδός τους κυμαίνεται από 100 έως 1000 days, και οι φωτομετρικές τους καμπύλες μπορεί να παρουσιάζουν τοπικές ανωμαλίες.

Οι ημι-ομαλοί αστέρες είναι μια υποκατηγορία κόκκινων μεταβλητών και έχουν εύρος μεταβολής λαμπρότητας μικρότερο των 2.5 mag.

Σχ.1.23 Η θέση των SR αστέρων στο διάγραμμα H-R (www.aavso.org).

Ταξινομούνται επιπλέον σε τέσσερις κατηγορίες :

- (1) **SRa**: Περιλαμβάνει τους αστέρες οι οποίοι έχουν περιοδική μεταβολή της λαμπρότητάς τους με περίοδο της τάξης των 35 days,
- (2) **SRb**: Περιλαμβάνει αστέρες που παρουσιάζουν λιγότερο εμφανή περιοδικότητα στην μεταβολή της λαμπρότητάς τους, με περίοδο μεγαλύτερη των 20 days,
- (3) **SRc**: Περιλαμβάνει αστέρες που είναι λιγότερο φωτεινοί, πιθανόν πολύ μεγάλους υπεργίγαντες και
- (4) **SRd**: Περιλαμβάνει τους θερμότερους αστέρες, με φασματικούς τύπους προγενέστερων των M, S, C.



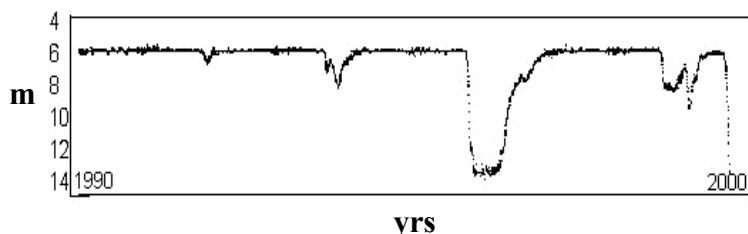
Σχ.1.24 Η φωτομετρική καμπύλη του αστέρα Z Ma, ο οποίος είναι τύπου SRb (www.aavso.org).

1.4.1.5 Αστέρες τύπου R Coronae Borealis και ανώμαλοι μεταβλητοί

Οι αστέρες τύπου **R Coronae Borealis** είναι υπεργίγαντες αστέρες, ανήκουν στους φασματικούς τύπους F,G,K,R και παρουσιάζουν μεταβολές λαμπρότητας από 1 έως 9 mag, μέσα σε χρονικό διάστημα από δέκα έως λίγες εκατοντάδες ημέρες. Είναι πλούσιοι σε άνθρακα και φτωχοί σε υδρογόνο, γεγονός που αντιστοιχεί σε έντονες γραμμές άνθρακα και πολύ μικρή παρουσία γραμμών υδρογόνου στο φάσμα τους.

Ο πρότυπος αστέρας της κατηγορίας ανακαλύφθηκε το 1795 από τον Άγγλο ερασιτέχνη αστρονόμο *Edward Pigott*. Ο αστέρας αυτός είναι ένας κίτρινος υπεργίγαντας, ορατός με γυμνό μάτι, και κύριο χαρακτηριστικό του είναι η απότομη και μεγάλη μείωση της λαμπρότητάς του, κατά 1000 φορές περίπου, μέσα σε λίγες εβδομάδες. Αντιθέτως, για να αυξηθεί αντίστοιχα η λαμπρότητά του μέχρι τα αρχικά της επίπεδα, απαιτείται χρονικό διάστημα μηνών ακόμα και χρόνων, και γι' αυτό ακριβώς τον λόγο χαρακτηρίζονται ως «αντίστροφοι καινοφανείς». Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι κατά την διάρκεια ενός πλήρους κύκλου του φαινομένου, παρατηρούνται έντονες αυξομειώσεις στη

λαμπρότητα του αστέρα. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται σε ατμούς άνθρακα, οι οποίοι, δημιουργώντας συμπυκνώσεις στερεού γραφίτη, συγκροτούν σιγά σιγά μεγάλα νέφη που καλύπτουν σταδιακά τον αστρικό δίσκο, αυξάνοντας έτσι το οπτικό βάθος, εγκλωβίζοντας με αυτόν τον τρόπο το εξερχόμενο φως του αστέρα. Οι ανθρακούχοι κόκκοι σκόνης απορροφούν έντονα την ακτινοβολία, και σ' αυτήν ακριβώς την απορρόφηση οφείλονται τα παρατηρούμενα ελάχιστα της λαμπρότητας του αστέρα. Εν συνεχεία, λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας του

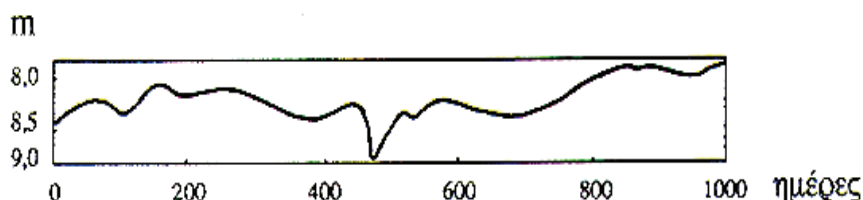


Σχ.1.25 Η καμπύλη φωτός του αστέρα *R Coronae Borealis* (www.aavso.org).

νέφους από την απορρόφηση της ακτινοβολίας, το νέφος αυτό διαστέλλεται κάτω από την πίεση αυτής με συνέπεια την μείωση της πυκνότητάς του, κατ' επέκταση την μείωση του οπτικού βάθους και φυσικά την αύξηση της λαμπρότητάς του μέχρι το μέγιστο. Το φαινόμενο αυτό επαναλαμβάνεται.

Οι **ανώμαλοι παλλόμενοι μεταβλητοί** χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες : (1) **Lb**: Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει γίγαντες αστέρες φασματικών τύπων M, S, C ενίοτε και K, (2) **Lc**: Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει υπεργίγαντες αστέρες φασματικού τύπου M.

Κύριο χαρακτηριστικό αυτών των αστέρων είναι η πλήρης απουσία περιοδικότητας, γεγονός που δυσκολεύει την περιγραφή τους, και πολύ περισσότερο την παρατήρησή τους.



Σχ.1.26 Τυπική φωτομετρική καμπύλη ενός ανώμαλου μεταβλητού αστέρα, στην οποία είναι εμφανής η έλλειψη περιοδικότητας (Θεοδοσίου & Δανέζης 1999).

1.4.2 Περιστροφόμενοι μεταβλητοί αστέρες

Αυτού του τύπου οι αστέρες μεταβάλλουν την λαμπρότητά τους λόγω του μαγνητικού τους πεδίου. Έχουν ταξινομηθεί σε τρεις μεγάλες κατηγορίες, (1) αστέρες τύπου α_2 Canum Venaticorum, (2) αστέρες τύπου BY Draconis, (3) μεμονωμένοι Pulsars.

1.4.2.1 Αστέρες τύπου α_2 Canum Venaticorum - μαγνητικοί μεταβλητοί αστέρες

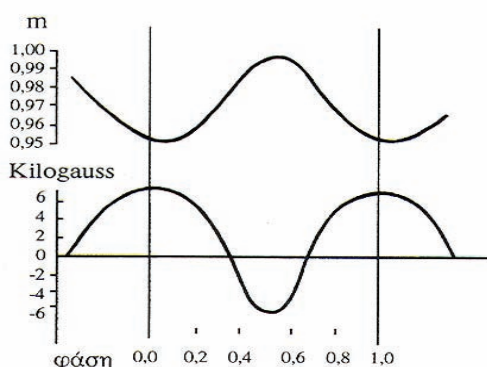
Κύριο χαρακτηριστικό αυτών των αστέρων είναι ότι η μεταβλητότητά τους συνίσταται στην περιοδική μεταβολή του μαγνητικού τους πεδίου, που δεν

συνοδεύεται με μια αντίστοιχη μεταβολή της φαινόμενης λαμπρότητάς τους, η οποία παραμένει σχεδόν αμετάβλητη. Οι αστέρες αυτού του τύπου είναι συγχρόνως φωτομετρικά και φασματοσκοπικά μεταβλητοί, όμως οι μεταβολές που παρουσιάζουν είναι πολύ μικρές.

Αυτοί οι μεταβλητοί αστέρες τις περισσότερες φορές είναι φασματικού τύπου A, με χαρακτηριστικά έντονες φασματικές γραμμές μετάλλων (Si, Mn, Cr, Sr, Eu κ.α), σπανιότεροι είναι οι γίγαντες αστέρες τύπου M, όπως και οι χημικά ιδιόμορφοι αστέρες φασματικού τύπου S. Συγκεκριμένα, το εύρος των φασματικών τύπων που ανήκει η πλειοψηφία αυτών των αστέρων, κυμαίνεται από B9 έως A5. Περίπου το 15%-20% των αστέρων τύπου A, ανήκουν στην υποομάδα Am και το 2%-5% στην υποομάδα Ap. Οι Ap αστέρες εμφανίζουν ισχυρά μαγνητικά πεδία της τάξης των 10000 Gauss, μεταβάλλουν φασματοσκοπικά τις ακτινικές τους ταχύτητες, παρουσιάζουν μικρές μεταβολές της λαμπρότητας της τάξης των 0.01 – 0.2 mag και μεταβάλλουν επίσης και την πολικότητα του μαγνητικού τους πεδίου. Οι μεταβολές αυτές συνήθως ακολουθούν την ίδια περίοδο, όμως σε κάποιες περιπτώσεις η περίοδος των φασματικών και φωτομετρικών μεταβολών είναι η μισή της περιόδου μεταβολής του μαγνητικού πεδίου. Οι περίοδοι κυμαίνονται από 5 - 9 days και οι καμπύλες φωτός γενικά είναι ημιτονοειδείς.

Ο κυριότερος αντιπρόσωπος αυτών των αστέρων είναι ο α_2 *Canum Venaticorum*, του οποίου το μαγνητικό πεδίο στους πόλους του μεταβάλλεται κατά πολλές χιλιάδες Gauss σε περίοδο 5.5 days.

Ένα δεύτερο χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο αστέρας HD 215441 του οποίου το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται ανώμαλα από 12000 έως 34000 Gauss. Με την εξήγηση αυτού του φαινομένου ασχολήθηκε ο Αμερικανός αστρονόμος *Horace Babcock*, ο οποίος κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η μεταβολή του πολικού μαγνητικού πεδίου των αστέρων αυτών οφείλεται σε μια υδρομαγνητική ανάπαυση που δημιουργείται στα επιφανειακά στρώματά τους.



Σχ. 1.27 Τα παραπάνω διαγράμματα φάσης είναι του αστέρα α_2 CVn και δείχνουν τη μεταβολή της λαμπρότητάς του και συγχρόνως του μαγνητικού του πεδίου (Θεοδοσίου & Δανέζης 1999).

1.4.2.2 Αστέρες τύπου BY Draconis

Κύριο χαρακτηριστικό αυτών των αστέρων είναι η μεταβολή της λαμπρότητάς τους λόγω ύπαρξης κηλίδων στην φωτόσφαιρά τους. Όπως άλλωστε γνωρίζουμε και από τον ήλιο, οι κηλίδες είναι τοπικές αναδιπλώσεις των μαγνητικών γραμμών του μαγνητικού πεδίου του αστέρα. Αυτές οι αναδιπλώσεις οφείλονται στην διαφορετική περιστροφή των αστέρων, καθώς οι μαγνητικές γραμμές ακολουθούν την κίνηση του πλάσματος κατά την περιστροφή. Πρόκειται για περιοχές με θερμοκρασία 500-1000 K μικρότερη από την φωτόσφαιρα του αστέρα με ισχυρότατα μαγνητικά πεδία της τάξης των μερικών χιλιάδων Gauss. Όπως γνωρίζουμε, η ύπαρξη κηλίδων στον ήλιο μεταβάλλει απειροελάχιστα την λαμπρότητά του. Δεν συμβαίνει όμως το ίδιο στους αστέρες τύπου *BY Draconis*,

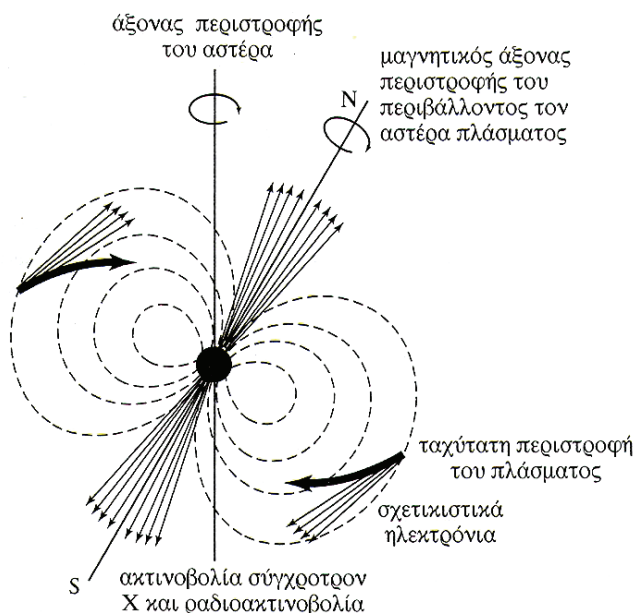
όπου οι κηλίδες καλύπτουν το 30%-40% της επιφάνειας του αστέρα, με αποτέλεσμα την έντονη μεταβολή της λαμπρότητάς τους.

Πιστεύεται ότι ο χρόνος ζωής των κηλίδων στις φωτόσφαιρες αυτών του τύπου αστέρων, ισοδυναμεί με αρκετές ιδιοπεριστροφές του αστέρα, όπως ακριβώς και στον ήλιο, με αποτέλεσμα να έχουμε σχεδόν περιοδικές καμπύλες φωτός. Αυτές οι καμπύλες συνήθως παρουσιάζονται με έντονο και ομαλό ελάχιστο, που όμως διαρκεί όσο η μισή περίοδος. Αυτό εξηγείται με την ιδιοπεριστροφή του αστέρα. Η μεγάλης έκτασης κηλίδα, ή μια μεγάλη ομάδα από μικρότερες κηλίδες, που εμφανίζονται στην φωτόσφαιρα του αστέρα, άλλοτε προβάλλονται στον αστρικό δίσκο, και άλλοτε βρίσκονται στα χείλη ή στην «αόρατη» προς εμάς πλευρά του αστέρα. Η τόσο μεγάλη διάρκεια του ελαχίστου της λαμπρότητας προφανώς οφείλεται στο ποσοστό κατάληψης του αστρικού δίσκου από αυτές τις κηλίδες. Σε άλλες περιπτώσεις έχει παρατηρηθεί παύση της μεταβολής της λαμπρότητας, φαινόμενο το οποίο προφανώς οφείλεται στην παύση της δραστηριότητας του αστέρα.

Οι αστέρες τύπου *BY Draconis* συναντώνται στην βιβλιογραφία και ως αστέρες εκλάμψεων. Ο λόγος είναι ότι πολλοί αστρονόμοι πιστεύουν ότι υπάρχει και χρωμοσφαιρική δραστηριότητα, όπως στους αστέρες εκλάμψεων, όμως, αφ' ενός δεν γνωρίζουμε αν έχει σχέση με τις κηλίδες, και αφ' ετέρου φασματοσκοπικές παρατηρήσεις στις γραμμές H και K του ασβεστίου δεν έχουν επιβεβαιώσει την ύπαρξη της. Επίσης ένα δεύτερο κύριο και κοινό χαρακτηριστικό, με τους αστέρες εκλάμψεων είναι ότι η πλειοψηφία τους είναι μέλη στενών διπλών συστημάτων.

1.4.2.3 Μεμονωμένοι Pulsars (radiopulsars)

Όπως γνωρίζουμε από την αστρική εξέλιξη, ο *pulsar* είναι το τελικό στάδιο εξέλιξης ενός αστέρα μεγάλης μάζας, που λόγω βίαιου γεγονότος (supernova) ή λόγω έντονων αστρικών ανέμων είχε μεγάλη απώλεια μάζας. Η μάζα του πυρήνα



του αστέρα μετά την απώλεια, είναι της τάξης των $1 M_{\odot}$ έως $3 M_{\odot}$ και η ακτίνα του της τάξης των μερικών χιλιομέτρων. Μετά την απώλεια μάζας η εναπομένουσα ύλη καταρρέει προς το κέντρο του αστέρα, αυξάνοντας δραματικά την πυκνότητά του και την θερμοκρασία του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την επιτάχυνση των ελεύθερων ηλεκτρονίων σε σχετικιστικές ταχύτητες, και την ένωση τους με πρωτόνια παράγοντας έτσι νετρόνια. Σε αυτή τη κατάσταση η ύλη δεν μπορεί να συμπιεστεί άλλο και αποτελείται από εκφυλισμένο

Σχ.1.28 Το μαγνητικό πεδίο ενός Pulsar (Θεοδοσίου & Δανέζης 1999).

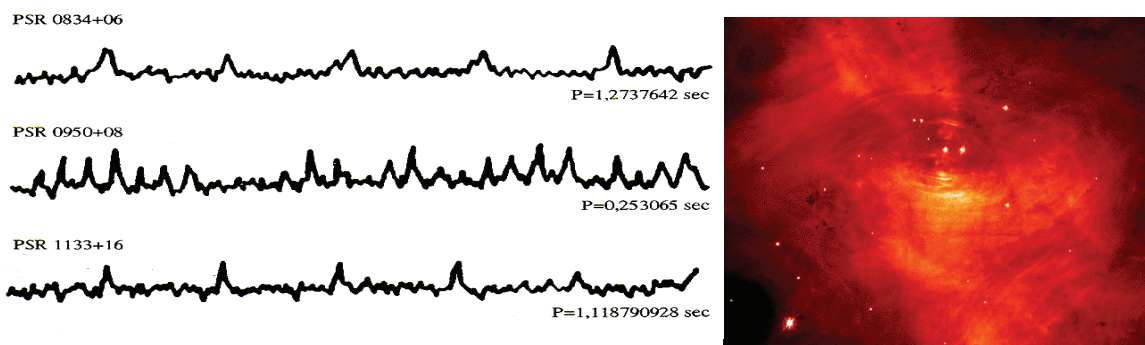
αέριο νετρονίων, η πίεση του οποίου εξισορροπεί τις βαρυτικές δυνάμεις. Οι αστέρες αυτοί ονομάζονται *αστέρες νετρονίων* και κύριο χαρακτηριστικό τους είναι οι ταχύτατες ιδιοπεριστροφές και το ισχυρό μαγνητικό πεδίο τους. Μία κατηγορία αστέρων νετρονίων είναι οι *pulsars* οι οποίοι παρουσιάζουν εξαιρετικά ισχυρά μαγνητικά πεδία, της τάξης των 10^{12} Gauss, και λόγω της ιδιοπεριστροφής τους εκπέμπουν ραδιοπαλμούς με αυστηρή περιοδικότητα.

Η θεωρητική πρόβλεψη των αστέρων νετρονίων είχε γίνει ήδη από τη δεκαετία του 1930, όμως η παρατηρησιακή επαλήθευση έγινε σχεδόν τέσσερις δεκαετίες αργότερα, και συγκεκριμένα έως το 1967 όπου η αγγλίδα αστρονόμος *Susan Jocelyn Bell* δουλεύοντας στο ραδιοτηλεσκόπιο του *Cambridge* ανακάλυψε την πρώτη παλλόμενη ραδιοπηγή στον αστερισμό της αλώπεκος.

Ένα χρόνο αργότερα ο *Thomas Gold* απέδειξε ότι οι *pulsars* είναι μαγνητικοί αστέρες νετρονίων, που περιστρέφονται ταχύτατα γύρω από τον άξονά τους εκπέμποντας μια στενή δέσμη ραδιοσημάτων, πράγμα που επιβεβαιώθηκε από τις παρατηρήσεις.

Τα ηλεκτρόνια στην επιφάνεια του αστέρα κινούνται επιταχυνόμενα λόγω του ισχυρότατου μαγνητικού πεδίου κατά μήκος των δυναμικών γραμμών (σχ. 1.28). Σύμφωνα με την θεωρία των «μαγνητικών καθρεπτών» τα ηλεκτρόνια κινούμενα προς τους μαγνητικούς πόλους επιβραδύνονται, φτάνουν στον πόλο του αστέρα, και εν συνεχεία ανακλώνται και κινούνται επιταχυνόμενα και πάλι κατά μήκος των δυναμικών γραμμών προς τον άλλο πόλο κ.ο.κ.

Αυτή ακριβώς η επιβράδυνση η οποία συνεπάγεται απώλεια κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων κοντά στους πόλους έχει και ως αποτέλεσμα τη εκπομπή ακτινοβολίας στα ραδιοφωνικά μήκη κύματος. Συμπεραίνουμε ότι τα φωτεινά σήματα που λαμβάνουμε εμείς προέρχονται αυστηρά από τους μαγνητικούς πόλους του αστέρα. Επομένως λόγω της ταχείας περιστροφής τους, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από τους μαγνητικούς πόλους του αστέρα σαρώνει το διάστημα σαν φάρος. Ο λόγος που έχουμε αυστηρή περίοδο είναι ότι η γη λαμβάνει σήματα μόνο όταν βρίσκεται στην οπτική ευθεία με έναν από τους δύο πόλους του αστέρα.



Σχ. 1.29 & Εικ.1 Τα παραπάνω διαγράμματα (αριστερά) είναι οι περιοδικοί παλμοί τριών *pulsars* (Θεοδοσίου & Δανέζης 1999), και ο *crab pulsar* (δεξιά) (<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/>).

Από το 1968 έως σήμερα έχουν ανακαλυφθεί περίπου 1000 *pulsars*. Ο πιο γνωστός *pulsar* σήμερα είναι ο *crab pulsar* (*M1*) με το περίφημο *crab nebula*. Το 1987 ανακαλύφθηκε ο ταχύτερα περιστρεφόμενος *pulsar* με περίπου 600 περιστροφές / sec.

Σε αυτή τη κατηγορία που περιγράψαμε αναφέρουμε μόνο για τους μεμονωμένους pulsars. Τέτοιου τύπου αστέρες συναντώνται σε διπλά συμπαγή συστήματα ακτίνων-Χ, και ανήκουν σε υποκατηγορία των εκρηκτικών μεταβλητών που θα περιγραφεί σε επόμενη παράγραφο.

1.4.3 Εκρηκτικοί μεταβλητοί αστέρες

Αυτή η κατηγορία μεταβλητών αστέρων περιέχει αρκετές υποκατηγορίες. Κύριο χαρακτηριστικό αυτών των αστέρων είναι η απουσία περιοδικότητας στις μεταβολές της λαμπρότητας, και σε κάποιες περιπτώσεις το μεγάλο πλάτος αυτής της μεταβολής. Οι υποκατηγορίες είναι οι εξής : (1) Υπερκαινοφανείς αστέρες, (2) Κατακλυσμικοί μεταβλητοί αστέρες, αστέρες τύπου U Geminorum και SS Cygni, αστέρες τύπου Z Camelopardalis (3) Συμπαγή συστήματα εκπομπής ακτίνων Χ, μικρής και μεγάλης μάζας, (4) Συμβιοτικοί αστέρες, (5) αστέρες τύπου UV Ceti, (6) Αστέρες τύπου Wolf-Rayet και P Cygni.

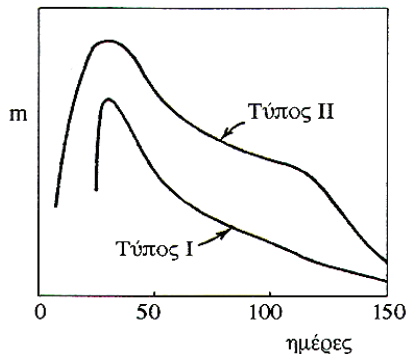
1.4.3.1 Υπερκαινοφανείς αστέρες (Supernova)

Η έκρηξη υπερκαινοφανούς αποτελεί όπως πιστεύουμε το δεύτερο πιο βίαιο γεγονός στο σύμπαν μετά το Big Bang. Προέρχεται από αστέρες μεγάλης μάζας, με περίπου $10 M_{\odot}$ κατά την παραμονή τους στην κύρια ακολουθία. Μετά την καύση όλων των αποθεμάτων πυρηνικής ενέργειας στο εσωτερικό του αστέρα, δεν υπάρχει τίποτα πλέον να συγκρατήσει τις βαρυτικές δυνάμεις των εξωτερικών στρωμάτων, με συνέπεια να ξεκινήσει η βαρυτική κατάρρευση προς τον πυρήνα του αστέρα. Λόγω αυτής της απότομης κατάρρευσης, η θερμοκρασία του πυρήνα αυξάνεται δραματικά και παίρνει τιμές της τάξης των 8×10^9 K με αποτέλεσμα την φωτοδιάσπαση του σιδήρου σύμφωνα με την αντίδραση ${}^{56}_{26}\text{Fe} + h\nu \rightarrow 13 {}^4_2\text{He} + 4n$. Ο σίδηρος είναι ο σταθερότερος ατομικός πυρήνας, και η προηγούμενη αντίδραση είναι ενδόθερμη, και η ενέργεια που απορροφά προέρχεται από την περαιτέρω βαρυτική συστολή του άστρου, με μορφή βαρυτικής ενέργειας. Αυτή η απορρόφηση είναι τόσο απότομη, ώστε η συστολή διαρκεί μόλις δέκα δευτερόλεπτα, και επιφέρει ολοκληρωτικές μεταβολές στην επιφάνεια του αστέρα. Η αύξηση της θερμοκρασίας είναι τόσο μεγάλη ώστε η έκρηξη της ύλης γύρω από τον πυρήνα συμπαρασύρει και τα εξωτερικά του στρώματα. Πρόκειται λοιπόν για μια επιβολή της πίεσης της ακτινοβολίας έναντι των βαρυτικών δυνάμεων.

Τα τελευταία 2000 χρόνια έχουν εμφανιστεί και καταγραφεί στον γαλαξία μας 14 υπερκαινοφανείς, ενώ συνολικά έχουν καταγραφεί πάνω από 600 σε άλλους γαλαξίες. Ο λόγος της μικρής συχνότητας εμφάνισης υπερκαινοφανών στον δικό μας γαλαξία είναι η απορρόφηση της εκλυόμενης ακτινοβολίας από την μεσοαστρική σκόνη στον δίσκο του γαλαξία. Η έκταση μιας τέτοιας έκρηξης είναι πολύ μεγάλη και οι παρατηρήσεις σε άλλους γαλαξίες έχουν δείξει ότι η λαμπρότητα ενός υπερκαινοφανούς είναι 10^8 - 10^9 φορές μεγαλύτερη από εκείνη του Ήλιου, κατά την περίοδο της έκρηξης και αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η λαμπρότητα του υπερκαινοφανούς να υποσκιάζει την λαμπρότητα ολόκληρου του γαλαξία. Αν και η ίδια η στιγμή της έκρηξης θα πρέπει να θεωρείται ως ένα εξαιρετικό γεγονός, η παρατήρηση των υπολειμμάτων τέτοιων εκρήξεων είναι σχετικά πιο απλή περίπτωση διότι διαρκούν πολύ περισσότερο και εκπέμπουν σε

μήκη κύματος που υπόκεινται σε μικρότερη απορρόφηση από την μεσοαστρική σκόνη, όπως τα ραδιοκύματα και οι ακτίνες-Χ. Έτσι όλοι οι ιστορικοί υπερκαινοφανείς έχουν αφήσει πίσω τους υπολείμματα τα οποία συνεχίζουν να εκτονώνονται μέχρι και σήμερα.

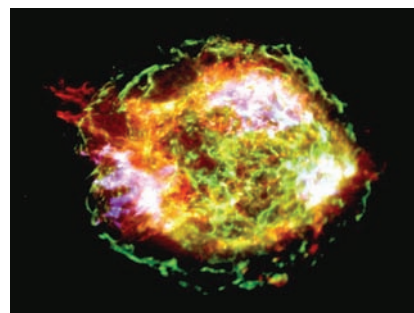
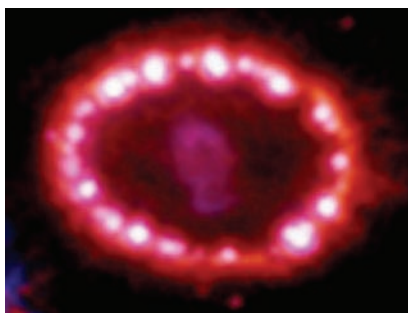
Οι υπερκαινοφανείς χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες τους *S/N τύπου I* και *τύπου II* (παρακάτω σχήμα). Οι **υπερκαινοφανείς τύπου I** παρουσιάζουν απότομη αύξηση της λαμπρότητας μέχρι κάποιο μέγιστο και εν συνεχεία εξασθενούν εκθετικά. Οι καμπύλες φωτός όλων αυτών των υπερκαινοφανών είναι πανομοιότυπες και απουσιάζουν οι γραμμές υδρογόνου από το φάσμα τους.



Πιστεύεται ότι η γεννεσιουργός αιτία αυτής της έκρηξης είναι ο μεγάλος ρυθμός πρόσπτωσης ύλης στην επιφάνεια λευκών νάνων μελών διπλών συστημάτων, με αποτέλεσμα η μάζα τους να ξεπεράσει το όριο *Chandrasekhar* και να δημιουργηθεί η έκρηξη. Οι **υπερκαινοφανείς τύπου II** προέρχονται από την καταστροφική έκρηξη ενός αστέρα μεγάλης μάζας. Η έκρηξη οδηγεί σε μια μεγάλη αύξηση της λαμπρότητας, που φθάνει ορισμένες φορές έως -18 mag

Σχ.1.30 Φωτομετρικές καμπύλες των τύπων των Υπερκαινοφανών Αστέρων τύπου I και II (Θεοδοσίου & Δανέζης 1999).

(απόλυτο βολομετρικό μέγεθος). Εν συνεχεία η λαμπρότητα ακολουθεί μια φθίνουσα πορεία και ελαττώνεται εκθετικά κατά $6-8$ mag/yr. Το φάσμα τους παρουσιάζει γραμμές εκπομπής του υδρογόνου και άλλων βαρύτερων στοιχείων. Παρ' όλα αυτά οι καμπύλες φωτός διαφέρουν σε κάθε περίπτωση, και λόγω αυτού του γεγονότος δημιουργήθηκαν δύο επιπλέον υποκατηγορίες, τους **Υπερκαινοφανείς τύπου II-L**, στους οποίους μετά το μέγιστο της λαμπρότητας ακολουθεί εκθετική πτώση, και τους **Υπερκαινοφανείς τύπου II-P**, στους οποίους το μέγιστο παρατείνεται και η καμπύλη φωτός παρουσιάζει ένα πρόσκαιρο πλάτωμα.



Εικ.1.2 & 1.3 Στις παραπάνω φωτογραφίες απεικονίζονται τα υπολείμματα των υπερκαινοφανών sn1987a (αριστερά) και ο CasA (δεξιά) (<http://antwarp.gsfc.nasa.gov/apod/>).

Τα κελύφη των υπερκαινοφανών χωρίζονται και αυτά σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το σχήμα τους. (1) **Κελυφωτά υπολείμματα** τα οποία είναι σχεδόν σφαιρικά συμμετρικά γύρω από το κέντρο της έκρηξης και (2) **Πλήρη υπολείμματα** τα οποία παρουσιάζουν μη θερμική εκπομπή από όλο τον όγκο τους και πηγή της ενέργειάς του αποτελεί ένας νέος και δραστήριος pulsar.

1.4.3.2 Κατακλυσμικοί μεταβλητοί αστέρες, αστέρες τύπου U Geminorum, SS Cygni και Z Camelopardalis

Αυτού του τύπου οι αστέρες χωρίζονται τυπικά σε τρεις κατηγορίες, αφού η φυσική που τους διέπει είναι η ίδια. Οι τρεις κατηγορίες είναι οι εξής : (1) Καινοφανείς, (2) Επαναληπτικοί καινοφανείς, (3) Νάνοι καινοφανείς

Λόγω της μικρής συχνότητας εμφάνισής τους, το όνομά τους το παίρνουν από το όνομα του αστερισμού στον οποίο ανήκουν και το έτος ανακάλυψής τους (π.χ. Nova Herculis 1934). Αρχικά μπορούμε να πούμε ότι οι καινοφανείς αστέρες δεν έχουν καμία σχέση με τους υπερκαινοφανείς αστέρες, αν και πολλοί αστροφυσικοί πιστεύουν, χωρίς να είναι πλήρως επιβεβαιωμένο, ότι οι *υπερκαινοφανείς τύπου I* έχουν την ίδια γεννεσιουργό αιτία με τους καινοφανείς, αλλά η έκρηξη είναι πολύ ισχυρότερη, λόγω μεγαλύτερου ρυθμού πρόσπτωσης ύλης στην επιφάνεια του λευκού νάνου.

Οι περισσότεροι καινοφανείς αστέρες στην προ-νονα φάση τους, είναι νάνοι ή πιθανόν υπονάνοι αστέρες προγενέστερων φασματικών τύπων. Στο διάγραμμα H-R βρίσκονται κάτω από την κύρια ακολουθία και πάνω από τους λευκούς νάνους. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι οι υψηλές θερμοκρασίες της τάξης των 50.000 K και οι μικρές τους μάζες της τάξης μίας ηλιακής.

Η τεράστια αύξηση της λαμπρότητας αυτών των αστέρων οφείλεται σε μια έκρηξη των εξωτερικών στρωμάτων τους, τα οποία σχηματίζουν ένα αεριώδες περίβλημα γύρω από τους αστέρες και αναγκάζονται, λόγω της σφοδρότητας της έκρηξης, να διασταλούν ταχύτατα. Όπως είναι προφανές αυτή η έκρηξη είναι η αιτία της αύξησης της λαμπρότητας του αστέρα. Πολλές φορές αντί για ένα κέλυφος μπορεί να δημιουργηθούν περισσότερα επάλληλα, εξαιτίας μιας σειράς εκρήξεων στα εξωτερικά στρώματα του αστέρα. Η άποψη αυτή απαιτεί έναν μεμονωμένο αστέρα. Σήμερα όμως πιστεύεται ότι όλοι οι καινοφανείς είναι μέλη διπλών συστημάτων.

Σε αυτή τη περίπτωση, δηλαδή διπλού συστήματος με μέλη έναν λευκό νάνο και έναν κανονικό αστέρα, υπάρχει η δυνατότητα να αποκατασταθεί μια ροή μάζας από τον κανονικό αστέρα προς τον λευκό νάνο, λόγω του ότι ο δεύτερος έχει ισχυρότερο βαρυτικό πεδίο. Αυτή η ροή υλικού, πλούσιο σε υδρογόνο και ήλιο από τον κανονικό αστέρα,



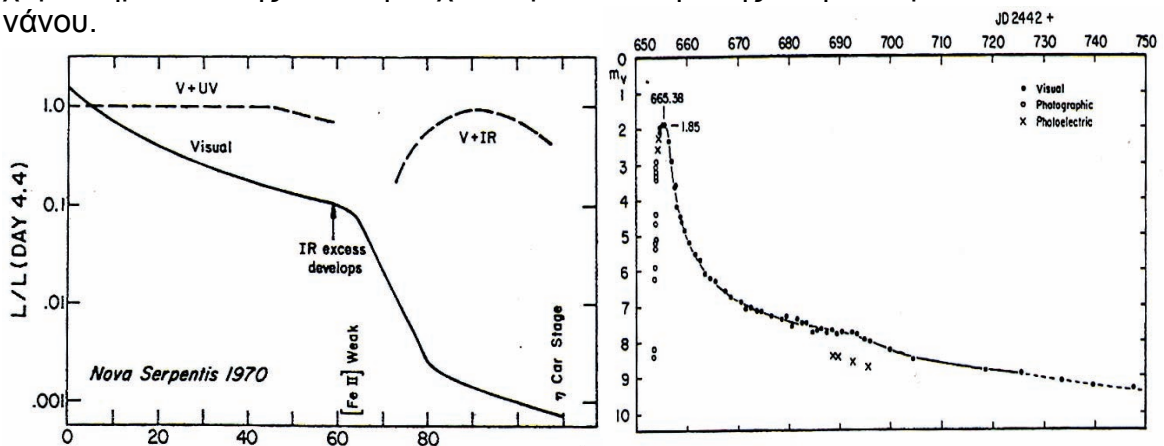
σχηματίζει έναν δίσκο προσαύξεσης (*accretion disk*) γύρω από τον λευκό νάνο, και σιγά σιγά πέφτει επάνω στην επιφάνεια του. Το υλικό κατευθύνεται προς τον πυρήνα του λευκού νάνου αυξάνοντας την θερμοκρασία και την πυκνότητά του, με αποτέλεσμα να αρχίζουν ξαφνικά οι πυρηνικές αντιδράσεις καύσης του προσπίπτοντος υλικού, γεγονός που οδηγεί σε έκρηξη και φυσικά σε ξαφνική αύξηση της λαμπρότητας.

Εικ. 1.4 Η φωτογραφία είναι πραγματική και απεικονίζει τον αστέρα BZ Camelopardalis να σχηματίζει δίσκο συσώρευσης γύρω από έναν λευκό νάνο (<http://antwpr.gsfc.nasa.gov/apod/>).

Μετά την έκρηξη αποκαθίσταται εκ νέου η ροή μάζας, έως ότου το φαινόμενο επαναληφθεί. Η περίοδος μεταξύ δύο διαδοχικών αναλάμπσεων του καινοφανούς εξαρτάται μόνο από τον ρυθμό πρόσπτωσης ύλης στην επιφάνεια του λευκού νάνου.

Θεωρητικά προβλέπεται ότι, αν η πρόσπτωση ύλης έχει πολύ μεγάλο ρυθμό, τότε μπορεί να ξεκινήσουν και πάλι οι πυρηνικές αντιδράσεις στο πυρήνα του λευκού νάνου, καίγοντας τα δικά του πυρηνικά αποθέματα. Σε τέτοια περίπτωση, που χαϊδευτικά αποκαλείται «ανάσταση του λευκού νάνου», ο αστέρας ξαναζωντανεύει στην κυριολεξία παίρνοντας και πάλι θέση ανάλογη της μάζας του στο διάγραμμα H-R.

Όπως αναφέραμε στην αρχή της παραγράφου, οι καινοφανείς που αναλάμπουν περιοδικά ονομάζονται **επαναληπτικοί καινοφανείς**, ενώ όταν το φαινόμενο δεν έχει περιοδικότητα αναφέρεται απλά ως **καινοφανής**. Σήμερα, πάντως, πιστεύουμε ότι όλοι οι καινοφανείς είναι επαναληπτικοί και προέρχονται από πρόσπτωση ύλης στην επιφάνεια ενός λευκού νάνου. Η τρίτη κατηγορία, οι **νάνοι καινοφανείς**, είναι μια εξειδίκευση της προηγούμενης, αφού περιλαμβάνει διπλά συστήματα όπου ο συνοδός αστέρας είναι ερυθρός γίγαντας και κύριο χαρακτηριστικό της είναι η ταχεία πρόσπτωση ύλης στην επιφάνεια του λευκού νάνου.

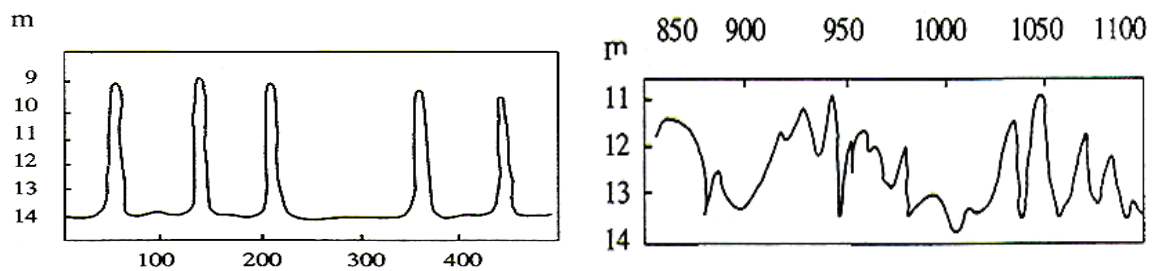


Σχ. 1.31 & 1.32 Οι παραπάνω καμπύλες φωτός είναι των καινοφανών αστέρων FH Ser (αριστερά) και V1500 Cyg (δεξιά) (www.aavso.org).

Βασικό χαρακτηριστικό των καινοφανών αστέρων είναι η ξαφνική αύξηση της λαμπρότητάς τους που κυμαίνεται από 7 έως 12 mag μέσα σε χρονικό εύρος 1 έως 100 days.

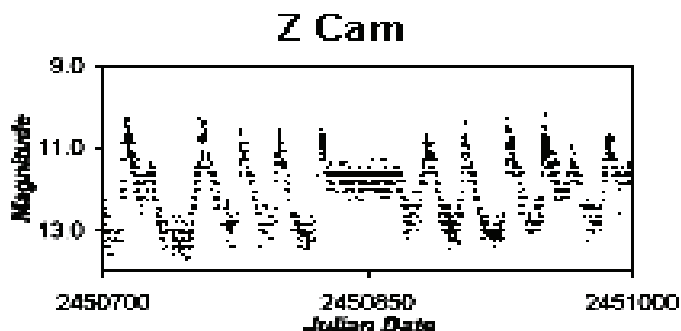
Οι αστέρες τύπου **U Geminorum** ανήκουν στην κατηγορία των νάνων καινοφανών. Πρόκειται για νάνους αστέρες που παρουσιάζουν μεταβολές λαμπρότητας της τάξης των 2 έως 6 mag διάρκειας λίγων ημερών.

Οι αστέρες τύπου **SS Cygni** είναι ανώμαλοι νάνοι καινοφανείς, και κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η ανώμαλη μεταβολή της λαμπρότητά τους κατά 8.1 έως 12.6 mag μέσα σε χρονική διάρκεια περίπου 50 days.



Σχ. 1.33 & 1.34 Καμπύλη φωτός του αστέρα U Gem (αριστερά) και του αστέρα SS Cyg (δεξιά) (www.aavso.org).

Οι αστέρες τύπου **Z Camelopardalis** θεωρούνται όμοιοι με τους αστέρες U Geminozum, δηλαδή και πάλι πρόκειται για νάνους καινοφανείς αστέρες. Ειδοποιός διαφορά τους από τους προαναφερόμενους είναι ότι η λαμπρότητά τους, μεταξύ μεγίστου και ελαχίστου, παραμένει κατά διαστήματα σχεδόν σταθερή και παρουσιάζει μεταβολές της τάξης 2-3 mag.



Σχ.1.35 Καμπύλη φωτός του αστέρα Z Camelopardalis (www.aavso.org).

1.4.3.3 Διπλά συστήματα εκπομπής ακτίνων X

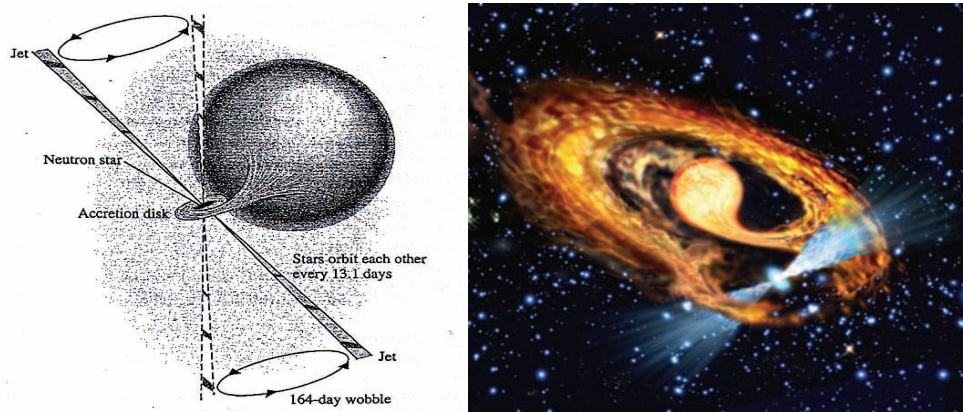
Αυτού του τύπου τα συστήματα περιέχουν ως κύριο αστέρα έναν εξελιγμένο αστέρα μεγάλης μάζας, και ως συνοδό έναν αστέρα προγενέστερης εξελικτικής φάσης. Η κατηγοριοποίηση σε συστήματα μικρής ή μεγάλης μάζας γίνεται αυστηρά με κριτήριο την μάζα του συνοδού αστέρα. Στα συστήματα μικρής μάζας (**Low Mass X-Ray Binaries**) ο συνοδός αστέρας είναι συνήθως μικρής μάζας, ενώ στα συστήματα μεγάλης μάζας (**High Mass X-Ray Binaries**) ο συνοδός είναι συνήθως γίγαντας αστέρας.

Η ανακάλυψη αυτών των συστημάτων προήλθε από μια ασυνήθιστη παρατήρηση την εποχή της δεκαετίας του '60. Παρατηρήθηκε, από δορυφόρο στην τροχιά της γης, μια ασυνήθιστη εκπομπή ακτίνων X από τον αστερισμό του Σκορπιού και του Κύκνου. Οι δύο αυτές πηγές ονομάζονται σήμερα Sco X-1 και Cyg X-2. Σημειωτέον ότι εκείνη την εποχή δεν είχαν ανακαλυφθεί παρατηρησιακά οι αστέρες νετρονίων, και το ερώτημα για την αιτία αυτών των εκλάμψεων ακτίνων-X παρέμενε αναπάντητο. Μετά την ανακάλυψη των pulsars, έγινε αντιληπτό ότι οι παλμοί στις ακτίνες-X προέρχονται λόγω περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του pulsar, όταν υπάρχει πρόσπτωση ύλης πάνω σε αυτό. Για αυτό τον λόγο υπέθεσαν, πολύ σωστά, ότι οι παλμοί αυτοί προέρχονται από διπλά συστήματα στα οποία ο κύριος αστέρας έχει ισχυρό μαγνητικό πεδίο, και ο συνοδός αστέρας είναι πολύ κοντά στον κύριο, επιτρέποντας έτσι την αποκατάσταση της ροής μάζας.

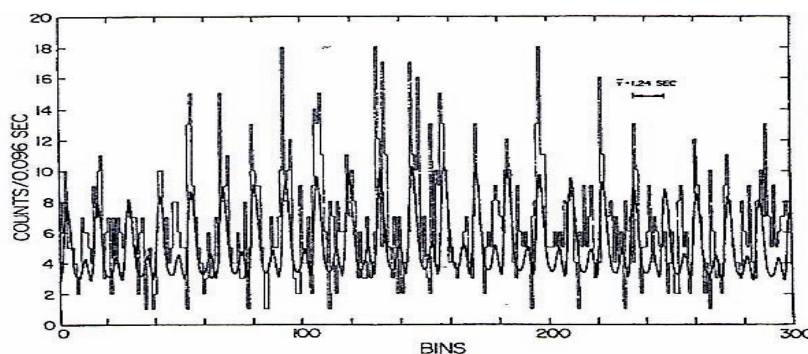
Τα **LMXRB** περιλαμβάνουν έναν αστέρα νετρονίων και έναν αστέρα μικρής μάζας της τάξης $< 2 M_{\odot}$, φασματικού τύπου G ή K ή M. Συναντώνται κυρίως στην γαλαξιακή άλω και στο κέντρο του γαλαξία. Η εκπομπή τους σε ακτίνες X παρουσιάζεται ως έκλαμψη και όχι σαν σειρά περιοδικών παλμών αποδεικνύοντας έτσι ότι το μαγνητικό πεδίο του αστέρα νετρονίων είναι ασθενές, της τάξης των 10^8 Gauss. Η φυσική διαδικασία που είναι υπεύθυνη για την εκπομπή στις ακτίνες X είναι παραπλήσια με αυτή των καινοφανών αστέρων. Σημαντική διαφορά αποτελεί το γεγονός ότι στα LMXRB η παρουσία δίσκου προσαύξησης γύρω από τον κύριο αστέρα δεν είναι απαραίτητη. Η μεταφορά μάζας από τον συνοδό στον κύριο αστέρα επιτυγχάνεται με έντονους αστρικούς ανέμους του συνοδού. Το επικαθήμενο υλικό στην επιφάνεια του αστέρα νετρονίων αυξάνει την επιφανειακή του πυκνότητα και θερμοκρασία, με αποτέλεσμα την επιφανειακή θερμοπυρηνική

σύντηξη. Αυτή η έκρηξη, η οποία διώχνει το επικαθήμενο υλικό είναι η αιτία της έκλαμψης στις ακτίνες Χ. Τέτοιου είδους συστήματα διαρκούν αρκετό καιρό, και το φαινόμενο επαναλαμβάνεται, έως ότου ο συνοδός αστέρας, ύστερα από την συνεχή απώλεια μάζας την οποία υφίσταται, μεταβεί σε περαιτέρω στάδιο εξέλιξης.

Στα **HMXRB** ο κύριος αστέρας είναι ένας αστέρας με ισχυρότατο μαγνητικό πεδίο της τάξης των 10^{12} Gauss, πιθανόν ένας pulsar ή μια μελανή οπή. Ο συνοδός αστέρας είναι ένας νέος γίγαντας αστέρας, φασματικού τύπου O ή B με κύριο χαρακτηριστικό του την υπερκάλυψη του λοβού Roche. Μέσω του σημείου Langrange L_1 (§1.4.5.5) αποκαθίσταται ροή μάζας προς τον κύριο αστέρα, με αποτέλεσμα τον σχηματισμό ενός δίσκου προσαύξησης γύρω από αυτόν. Λόγω του ισχυρότατου μαγνητικού πεδίου του κύριου αστέρα, ύλη μπορεί να ολισθήσει πάνω στις δυναμικές γραμμές, και να ακολουθήσει την πορεία τους προς τους πόλους. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται συσσώρευση υλικού πάνω από τις πολικές περιοχές, αυξάνεται πολύ η πυκνότητα και η θερμοκρασία τους, και λόγω ιδιοπεριστροφής του κύριου αστέρα έχουμε την ακτινοβολία στις ακτίνες-Χ και θερμικό φάσμα λόγω του δίσκου. Η περίοδος του διπλού συστήματος κυμαίνεται από 9.8 days έως 40 min, και πρόκειται για συστήματα τα οποία προβλέπεται να διαρκέσουν λίγο. Εάν ο κύριος αστέρας του συστήματος είναι αστέρας νετρονίων τότε λαμβάνει τον χαρακτηρισμό *x-ray pulsar*. Λόγω πρόσπτωσης ύλης στον pulsar αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής του, με αποτέλεσμα την μείωση της περιόδου του.



Σχ.1.36 & Εικ. 1.5 Σχηματισμός δίσκου προσαύξησης γύρω από τον κύριο αστέρα (Charles & Seward 1995 και <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/>).



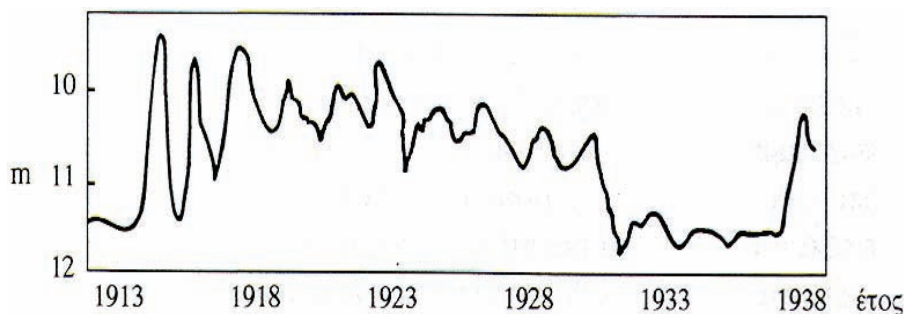
Σχ.1.37 Παλμοί ακτίνων Χ από την πηγή Her X-1, με περίοδο 1.245 sec (Charles & Seward 1995).

Τέτοιοι pulsars είναι γνωστοί ως *millisecond – pulsars* με τυπική τιμή της περιόδου 0.001 sec. Τα εν λόγω συστήματα πιστεύεται ότι έχουν μικρό χρόνο ζωής, διότι η αυξημένη πρόσπτωση ύλης στον pulsar αυξάνει πολύ την ταχύτητα περιστροφής του, με αποτέλεσμα οι φυγόκεντρες δυνάμεις να αρχίζουν να διαλύουν τον αστέρα.

Τέτοια συστήματα είναι εντοπισμένα στο γαλαξιακό επίπεδο και αποτελούν πανάκεια για τους σύγχρονους αστροφυσικούς, διότι οι δίσκοι προσαύξησης και οι εκπομπές στις ακτίνες Χ «προδίδουν» τη παρουσία μελανών οπών. Συστήματα που πιστεύεται ότι περιέχουν μια μικρής μάζας μελανή οπή ονομάζονται **Galactic Black Holes Candidates**, με χαρακτηριστικό παράδειγμα την πηγή *Cyg X-1*.

1.4.3.4 Συμβιοτικοί αστέρες

Αστέρες τέτοιου τύπου χαρακτηρίζονται τα διπλά εκείνα συστήματα όπου φασματοσκοπικά έχει αποδειχθεί ότι περιέχουν έναν θερμό κι έναν ψυχρό αστέρα. Ο ψυχρός αστέρας είναι συνήθως γίγαντας αστέρας φασματικού τύπου M και ενίοτε ανήκει στην κατηγορία αστέρων τύπου *Mira*. Ο θερμός αστέρας μπορεί να είναι ένας λευκός νάνος, ή θερμός αστέρας της κύριας ακολουθίας ή ακόμα και αστέρας νετρονίων. Όλο το σύστημα περιβάλλεται από ένα αέριο κέλυφος, το οποίο σχηματίστηκε πιθανόν από απώλεια μάζας του γίγαντα αστέρα λόγω αναπάσεων. Ο θερμός αστέρας περιβάλλεται από δίσκο προσαύξησης λόγω της ροής υλικού από τον συνοδό αστέρα. Η τροχιακή περίοδος του συστήματος κυμαίνεται μεταξύ 200 και 1000 days.



Σχ. 1.38
Φωτομετρική
καμπύλη ενός
συμβιοτικού
αστέρα
(Θεοδοσίου &
Δανέζης 1999).

Περίπου οι μισοί από τους συμβιοτικούς αστέρες που γνωρίζουμε είναι εκλειπτικοί μεταβλητοί, κάτι που δείχνει ότι ο γίγαντας αστέρας δεν γεμίζει πάντα τον λοβό Roche. Η μεταβολή της λαμπρότητάς τους είναι αρκετά πολύπλοκη και είναι της τάξης των 1-3 mag. Τέτοια διπλά συστήματα μπορούν να παρουσιάσουν μεταβολές αντίστοιχες με τους εκλειπτικούς αστέρες, όμως έχουν παρατηρηθεί και ανώμαλες μεταβολές που αποδόθηκαν στην ύπαρξη σκόνης στο κέλυφος που περιβάλλει το σύστημα. Ο δίσκος συσσώρευσης μπορεί να αυξομειώνει την λαμπρότητά του με περιοδικό τρόπο ή να προκαλεί εκρήξεις στην επιφάνεια του κύριου αστέρα, όπως ακριβώς οι νάνοι καινοφανείς.

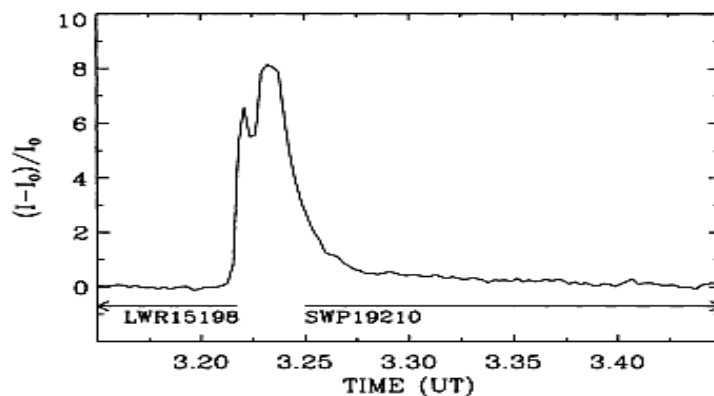
1.4.3.5 Αστέρες εκλάμψεων ή αστέρες τύπου UV Ceti

Ο γαλαξίας μας είναι γεμάτος από κόκκινους νάνους αστέρες οι οποίοι είναι πολύ αμυδροί για να φανούν με γυμνό μάτι. Βρίσκονται κάτω δεξιά κι επάνω στην κύρια ακολουθία στο H-R διάγραμμα και οι μάζες τους είναι μερικά δέκατα της

ηλιακής. Λόγω όμως της πολύ μικρής τους θερμοκρασίας είναι πολύ αμυδρότεροι από τον ήλιο. Τέτοιοι αστέρες έχουν ανακαλυφθεί σε αποστάσεις μερικών parsecs από εμάς. Μερικοί από αυτούς τους αστέρες είναι μεταβλητοί και ανήκουν στον τύπο *αστέρων εκλάμψεων* ή είναι γνωστοί ως αστέρες τύπου *UV Ceti*. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η ξαφνική αύξηση της λαμπρότητάς τους από μερικά λεπτά έως μερικές ώρες, σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων που εκτείνεται από τις ακτίνες X έως τα ραδιοκύματα.

Η κατηγορία αυτών των αστέρων, είχε αρχίσει να μελετάται από τους αστρονόμους από την δεκαετία του '20, όμως εδραιώθηκε το 1948 από τους *Joy και Humason*. Από το όρος *Wilson* παρατηρούσαν ένα διπλό σύστημα με πολύ ιδιαίτερη κίνηση, στο οποίο ανακάλυψαν μια ξαφνική και τεράστια αύξηση της λαμπρότητας μέσα σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Περαιτέρω φασματοσκοπικές αναλύσεις κατά την διάρκεια της παρατήρησης έδειξαν αύξηση της λαμπρότητας κατά 4 mag που μεταφράζεται σε αύξηση της επιφανειακής θερμοκρασίας πάνω από 10000 K. Σε χρονικό διάστημα μικρότερο μιας μέρας ο αστέρας επέστρεψε στην κανονική ψυχρή του κατάσταση. Ο αστέρας αυτός είναι ο γνωστός *UV Ceti*, ο πρότυπος αστέρας της κατηγορίας των αστέρων εκλάμψεων.

Τέτοιου τύπου αστέρες ανήκουν σε φασματικούς τύπους M έως K, με αντίστοιχες θερμοκρασίες από 4000 K έως 2500 K. Παρουσιάζουν γραμμές εκπομπής υδρογόνου και ασβεστίου πράγμα που αποδεικνύει την χρωμοσφαιρική τους δραστηριότητα, και οι μάζες τους κυμαίνονται από $0.1 M_{\odot}$ έως $0.6 M_{\odot}$. Αρκετοί από αυτούς που γνωρίζουμε βρίσκονται σε περιοχές γέννησης νέων αστέρων όπως σε νεφελώματα του Ταύρου και του Ωρίωνα, άλλοι είναι μέλη διπλών συστημάτων, ενώ μερικοί από αυτούς ανήκουν στην κατηγορία των «κηλιδωτών» αστέρων *BY Draconis*, επειδή κατά πάσα πιθανότητα η χρωμοσφαιρική τους δραστηριότητα συνδέεται με κηλίδες, πράγμα που είναι αντικείμενο έρευνας ακόμα και για τον Ήλιο. Το πλάσμα ακολουθεί τις δυναμικές γραμμές του τοπικού μαγνητικού πεδίου, και στο σημείο (στο ύψος της χρωμόσφαιρας) όπου επανενώνονται αποθηκεύεται μεγάλο ποσό μαγνητικής ενέργειας, με αποτέλεσμα την εκτόνωση του υλικού προς τον μεσοαστρικό χώρο. Το παραπάνω φαινόμενο είναι γνωστό ως έκλαμψη, και στους αστέρες *UV Ceti* λόγω αυτών των φαινομένων παρατηρούμε την ραγδαία και μεγάλου πλάτους αύξηση της λαμπρότητάς τους. Στο V φίλτρο έχει παρατηρηθεί αύξηση της τάξης του 1 mag ενώ σε αντίθεση στο U φίλτρο παρουσιάζουν αύξηση της τάξης των 4 mag, ενώ στις ακτίνες X και στα ραδιοκύματα η αύξηση της λαμπρότητας είναι πολύ μικρότερη. Στο φάσμα εκπομπής τους παρουσιάζουν τις γραμμές Balmer του υδρογόνου, ενώ έντονη είναι και η παρουσία των γραμμών ιονισμένου ηλίου (He). Όπως προαναφέραμε, μετά από λίγο χρονικό διάστημα ο αστέρας επανέρχεται στα κανονικά του επίπεδα.



Σχ. 1.39 Η καμπύλη φωτός του αστέρα εκλάμψεων *YZ Canis Minoris* (www.aavso.org).

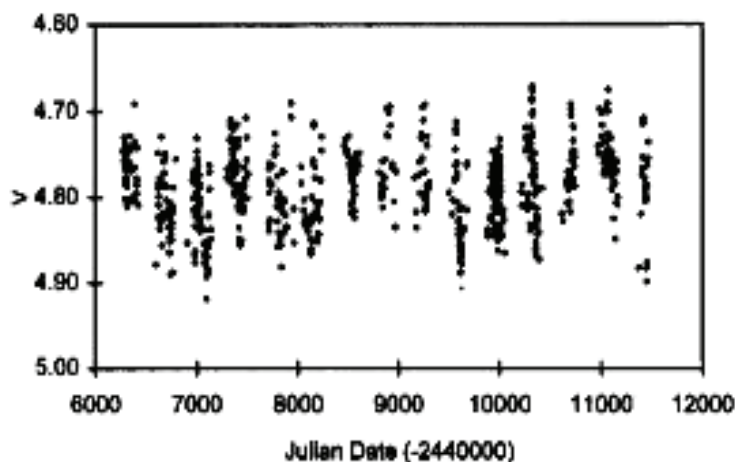
1.4.3.6 Μεταβλητοί W-R (Wolf-Rayet) και αστέρες τύπου P Cygni

Οι αστέρες W-R ανήκουν στον φασματικό τύπο W και οφείλουν την ονομασία τους στους δύο Γάλλους αστρονόμους *C.J.E Wolf* και *G.A.P Rayet* οι οποίοι τους ανακάλυψαν το 1867. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι οι ευρείες φασματικές γραμμές εκπομπής ατομικής προέλευσης (HeI, HeII, CIII, CIV, NIII, NV), που όπως πιστεύεται προέρχονται από τα ανώμαλα διαστελλόμενα αέρια κελύφη που τους περιβάλλουν. Πολλές φορές οι γραμμές αυτές συνοδεύονται από γραμμές απορρόφησης, του ίδιου ακριβώς μήκους κύματος που, λόγω μετατόπισης Doppler, σχηματίζονται στην ιώδη πλευρά των γραμμών εκπομπής.

Οι ακτίνες αυτών των αστέρων είναι της τάξης των $2 R_{\odot}$, ενώ η θερμοκρασία τους κυμαίνεται από 60000 K έως 100000 K. Τα κελύφη αυτών των αστέρων έχουν διαφορετική σύσταση και διαστέλλονται με ταχύτητες 10^3 έως 3×10^3 km/sec. Λόγω αυτής της διαφορετικής σύστασης από τον αστέρα, οι αστέρες W-R διακρίνονται σε δύο μεγάλες ομάδες, τις (1) WC η οποία περιλαμβάνει τους αστέρες με κύριο συστατικό του περιβλήματός τους τον άνθρακα και την (2) WN η οποία περιλαμβάνει αυτούς με κύριο συστατικό του κελύφους το άζωτο.

Οι αστέρες τύπου P Cygni παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά με τους αστέρες W-R αλλά μικρότερης κλίμακας και ανήκουν σε προγενέστερους φασματικούς τύπους αστέρων. Κύριο φασματικό γνώρισμά τους είναι η εμφάνιση και η ανάμιξη με έναν ιδιόζοντα τρόπο φασματικών γραμμών εκπομπής και απορρόφησης του ίδιου ακριβώς μήκους κύματος με τρόπο ώστε το βαθύτερο σημείο της απορρόφησης να βρίσκεται προς τα αριστερά του υψηλότερου σημείου της εκπομπής. Οι φασματικές γραμμές απορρόφησης παράγονται σε διάφορα στρώματα του αστρικού κελύφους, που διαστέλλεται με ταχύτητες 100-200 km/sec, ενώ οι γραμμές εκπομπής σε ένα στρώμα ύλης που βρίσκεται στις εξώτατες περιοχές του.

Μέχρι σήμερα δεν είναι γνωστά τα φυσικά αίτια που αναγκάζουν τον αστέρα να αποβάλλει τα εξωτερικά του στρώματα δημιουργώντας γύρω του αυτά τα διαστελλόμενα κελύφη. Πιθανότερη άποψη είναι ότι η αιτία δημιουργίας των κελυφών είναι η παρουσία ισχυρών τοπικών μαγνητικών πεδίων στις φωτόσφαιρες των αστέρων, καθώς και η ύπαρξη αστέρων συνοδών, τα βαρυτικά πεδία των οποίων υποβοηθούν την αποβολή μάζας από τους αστέρες τύπου P Cygni. Σύμφωνα με μια άλλη άποψη, η αποβολή μάζας από αυτούς τους αστέρες συντελείται σε όλη την έκταση του ημεμερινού τους, λόγω ασταθειών που προκαλεί η διαφορική περιστροφή τους.



Σχ.1.40 η καμπύλη φωτός του αστέρα P Cygni (www.aavso.org).

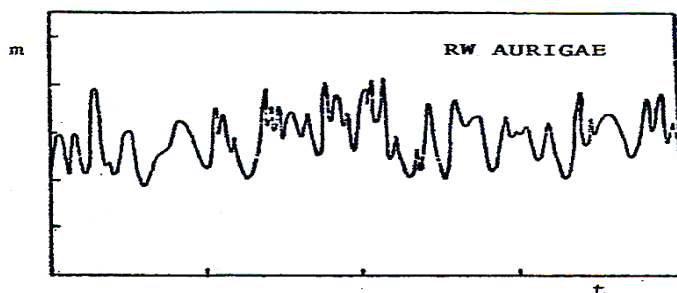
1.4.4 Ανώμαλοι μεταβλητοί αστέρες

Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει αστέρες που βρίσκονται σε φάση πριν τη κύρια ακολουθία. Έως τώρα οι αστρονόμοι έχουν καταλήξει σε τρεις μεγάλες υποκατηγορίες για αυτού του τύπου τους αστέρες οι οποίες είναι οι εξής: (1) Μεταβλητοί νεφελωμάτων, αστέρες τύπου RW Aurigae, (2) Αστέρες τύπου T Tauri και (3) Μεταβλητοί αστέρες Be ή αστέρες τύπου γ Cas.

1.4.4.1 Μεταβλητοί νεφελωμάτων και αστέρες τύπου RW Aurigae

Οι μεταβλητοί νεφελωμάτων όπως είναι προφανές, έχουν ανακαλυφθεί σε διάχυτα αστρικά νεφελώματα. Είναι τύπου Ήλιου και κύριο χαρακτηριστικό τους, εκτός της θέσης τους, είναι η ένδειξη κελύφους που παρουσιάζουν. Δεν ανήκουν σε κάποιον συγκεκριμένο φασματικό τύπο και παρουσιάζουν γραμμές εκπομπής και απορρόφησης στα ίδια μήκη κύματος. Παρ' όλο που φαινομενικά έχουν σταθερή λαμπρότητα, έχει παρατηρηθεί ότι υπάρχει μεταβολή της τάξης λίγων μεγεθών μέσα σε χρονικά διαστήματα αρκετών δεκάδων ημερών.

Οι αστέρες τύπου RW Aurigae δεν φαίνεται να συνδέονται με πυκνά διαστρικά αέρια και νέφη σκόνης. Παρουσιάζουν μη περιοδικές μεταβολές της λαμπρότητάς τους και παρουσιάζουν πλάτη μεταβολής συνήθως μικρότερα του 1 mag.

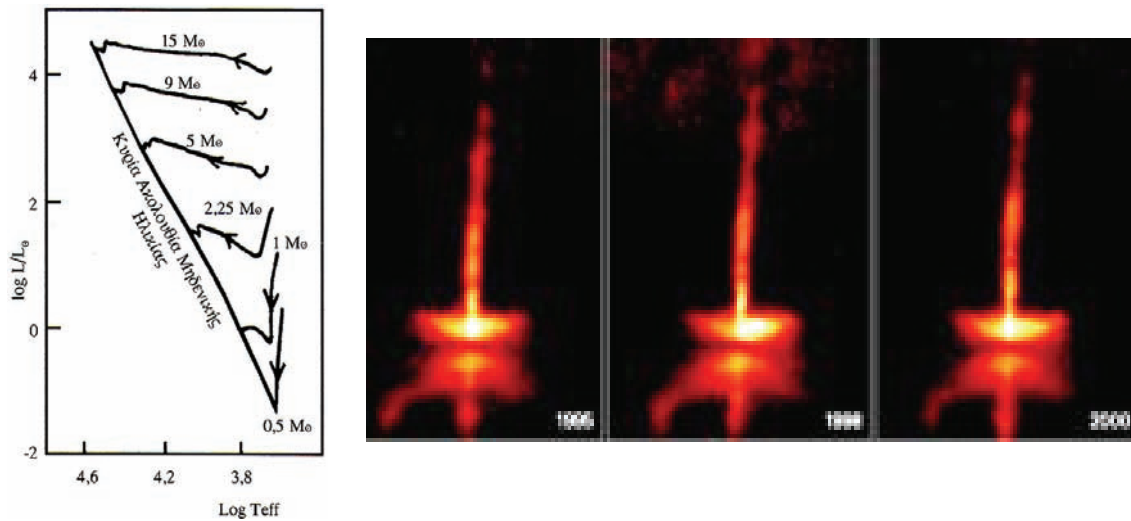


Σχ.1.42 Καμπύλη φωτός του αστέρα RW Aurigae (www.aavso.org).

1.4.4.2 Αστέρες τύπου T Tauri

Αυτού του τύπου οι αστέρες βρίσκονται μέσα σε σκοτεινά πυκνά νεφελώματα μεσοαστρικού αερίου, που χαϊδευτικά αποκαλούνται «βρεφοκομεία αστέρων», υπολείμματα του πρωταρχικού υλικού από το οποίο δημιουργήθηκαν. Ανήκουν στους φασματικούς τύπους από F έως M και οι μάζες τους κυμαίνονται από $0.3 M_{\odot}$ έως $3 M_{\odot}$. Έχουν παρατηρηθεί μέσα σε αντικείμενα Herbig-Haro (περιοχές ιονισμένου υδρογόνου) οι οποίες είναι αρκετά λαμπρές λόγω της απορρόφησης ακτινοβολίας από τους αστέρες T Tauri. Η παρατήρηση αυτών των αστέρων γίνεται κατά κανόνα στην υπέρυθρη περιοχή του φάσματος, στην περιοχή δηλαδή όπου εκπέμπει η μεσοαστρική σκόνη λόγω θέρμανσης από την εκπνευόμενη ακτινοβολία του αστέρα. Θεωρούνται ως νεογέννητοι αστέρες που πρόσφατα έχουν συσταλεί από την κατάρρευση μεσοαστρικού αερίου και οδεύουν καθ' οδόν προς την κύρια ακολουθία (σχ. 1.43). Απλούστερα, μπορούμε να πούμε ότι βρίσκονται στην φάση της βαρυτικής συστολής τους, όμως η θερμοκρασία του πυρήνα δεν έχει αυξηθεί τόσο ώστε να αρχίσουν οι θερμοπυρηνικές αντιδράσεις στο εσωτερικό τους. Η θέση τους στο διάγραμμα H-R είναι λίγο πιο πάνω από

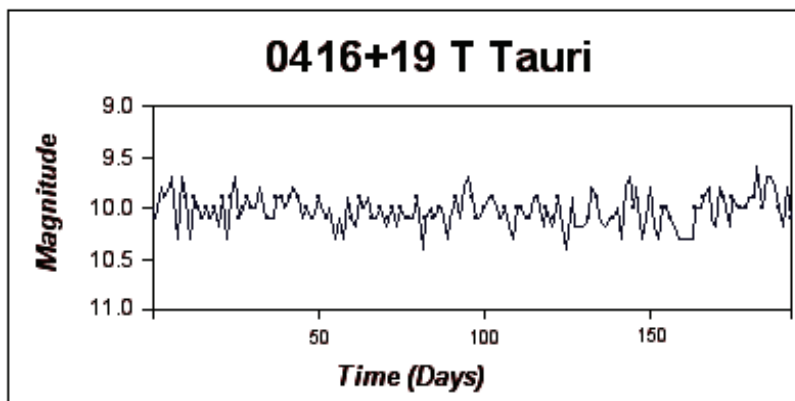
την κύρια ακολουθία, ουσιαστικά μεταξύ αυτής και της ζώνης των ερυθρών γιγάντων.



Σχ.1.43 & Εικ.1.6 Πορεία των αστέρων T Tauri στο διάγραμμα H-R (αριστερά) και οι δίσκοι προσαύξεσης και οι πίδακες υλικού που διαφαίνονται σε έναν νεογέννητο αστέρα τύπου T Tauri (δεξιά) (Θεοδοσίου & Δανέζης 1999 και <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/>).

Από φασματοσκοπικές παρατηρήσεις βρέθηκε ότι διαθέτουν σε πολύ μεγάλες ποσότητες το στοιχείο Λίθιο (Li), το οποίο εξαντλείται στα πρώτα στάδια εξέλιξης του αστέρα. Επίσης ένα δεύτερο κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η έντονη χρωμοσφαιρική δραστηριότητά τους, η οποία γίνεται αντιληπτή από τα φάσματά τους και οι έντονοι αστρικοί άνεμοι. Ο αστρικός άνεμος μεταφέρει υλικό που απομακρύνεται με μεγάλη ταχύτητα από τους πόλους και επιστρέφει στον ισημερινό δημιουργώντας έναν δίσκο προσαύξεσης γύρω από τον αστέρα, από τον οποίο πιθανόν να δημιουργηθεί ένα πλανητικό σύστημα ή συνοδός αστέρας. Οι αστέρες αυτού του τύπου παρουσιάζουν γραμμές εκπομπής της σειράς Balmer του υδρογόνου και CaII, γραμμές φθορισμού FeI, απαγορευμένες γραμμές εκπομπής OI και SII και όπως προαναφέραμε ισχυρές γραμμές απορρόφησης LiI.

Γενικά η λαμπρότητα των αστέρων τύπου T Tauri μεταβάλλεται ανώμαλα, από λίγα δέκατα του μεγέθους έως το πολύ 4 mag, σε σχετικά μικρά χρονικά διαστήματα της τάξεως μερικών ωρών.



Σχ.1.44 Καμπύλη φωτός του αστέρα T Tauri (www.aavso.org).

1.4.4.3 Μεταβλητοί αστέρες Be ή αστέρες τύπου γ Cassiopeiae

Μεταξύ του 1863 και του 1867 ο ιερέας *Angelo Secchi* μελέτησε φασματοσκοπικά περίπου 4000 αστέρες από το αστεροσκοπείο του Βατικανού. Το 1867 δημοσίευσε μια εργασία για την εκπομπή του αστέρα γ Cas στην γραμμή απορρόφησης H_{β} . Από τότε ξεκίνησε το μυστήριο και το ενδιαφέρον για τους Be αστέρες, όπου το γράμμα **B** δείχνει την τάξη θερμοκρασίας (από τους αστέρες φασματικού τύπου B στο διάγραμμα H-R) και το γράμμα **e** δείχνει τις γραμμές εκπομπής.

Σήμερα ως Be αστέρες θεωρούμε τους όχι υπεργίγαντες αστέρες με επιφανειακές θερμοκρασίες μεταξύ 10000K και 30000K, φασματικού τύπου από A έως O, τάξης φωτεινότητας από V έως III, που έχουν παρουσιάσει γραμμές εκπομπής στο φάσμα τους τουλάχιστον μία φορά. Περίπου το 20% των αστέρων φασματικού τύπου B ανήκουν στην κατηγορία των Be αστέρων, ενώ είναι γνωστό ότι το φάσμα αυτών των αστέρων μεταβάλλεται με τον χρόνο.

Για τον αστέρα γ Cas, από μελέτες περίπου 120 ετών βγήκαν τα παρακάτω συμπεράσματα. Από το 1866 έως το 1932 ο αστέρας με μικρές μεταβολές της λαμπρότητάς του παρουσίασε μέτριες έως έντονες γραμμές απορρόφησης στο φάσμα του. Από το 1932 έως το 1942 παρουσίασε έντονες μεταβολές λαμπρότητας έως ότου ξαναέγινε ένας κανονικός αστέρας φασματικού τύπου B. Το 1981 άρχισε ξανά να παρουσιάζει αυτές τις ανώμαλες μεταβολές στις γραμμές απορρόφησης, πράγμα που αμέσως σχετίστηκε με τους αστέρες Be και τους αστέρες που διαθέτουν κέλυφος αερίου γύρω τους. Παρατηρώντας λοιπόν αυτό τον αστέρα, οι αστρονόμοι κατέληξαν ότι οι αστέρες φασματικού τύπου B που παρουσιάζουν βαθιές και στενές γραμμές απορρόφησης στο φάσμα τους (οι κανονικοί αστέρες φασματικού τύπου B, παρουσιάζουν κανονικές και φαρδιές φασματικές γραμμές απορρόφησης H και He) μπορούν να διαγράψουν έναν «κύκλο», δηλαδή από B αστέρες να μετατραπούν σε αστέρες Be, ύστερα σε αστέρες Be με κέλυφος και τελικά να ξαναγίνουν κανονικοί αστέρες φασματικού τύπου B.

Οι αστέρες Be ξεχωρίζουν από τους υπόλοιπους αστέρες, διότι πιθανότατα είναι ταχέως περιστρεφόμενοι αστέρες με ταχύτητες της τάξης των 450 km/sec στον ισημερινό τους, πράγμα που αυξάνει τις φυγόκεντρες δυνάμεις σε αυτό ακριβώς το επίπεδο. Ένα σενάριο δημιουργίας τους είναι το εξής : Η λαμπρότητα των αστέρων φασματικού B είναι της τάξης των $10^3 L_{\odot}$, επικρατούν έντονοι αστρικοί άνεμοι και λόγω αυτών σχηματίζονται δίσκοι προσαύξησης και αέρια κελύφη τα οποία είναι κύρια χαρακτηριστικά των αστέρων Be. Ένα δεύτερο σενάριο απαιτεί την παρουσία ισχυρού μαγνητικού πεδίου, όμως οι παρατηρήσεις δεν έχουν δείξει τίποτα τέτοιο.

Οι αστέρες Be παίζουν σημαντικότατο ρόλο στην αστρική εξέλιξη του γαλαξία. Λόγω της απώλειας μάζας τους, μέσω των ισχυρών αστρικών ανέμων, εμπλουτίζουν τον μεσοαστρικό χώρο με βαρύτερα στοιχεία, από τα οποία νέοι αστέρες ή πλανήτες μπορεί να σχηματιστούν.

Οι αστέρες Be παρουσιάζουν μεταβολές τόσο στη λαμπρότητά όσο και στο φάσμα τους με διαφορετικές κλίμακες χρόνου και αυτό πιθανώς οφείλεται στον χρόνο σχηματισμού του δίσκου γύρω τους ή λόγω μη ακτινικής ανάπαλσης (για μεταβολές της τάξης 0.3 έως 2 days) ή λόγω περιστροφής γύρω από κάποιον αστέρα – συνοδό όπως ο αστέρας CX Dra (για μεταβολές της τάξης ημερών έως μερικών εβδομάδων).

1.4.5 Μη φυσικοί μεταβλητοί – Εκλειπτικοί μεταβλητοί αστέρες

1.4.5.1 Διπλά συστήματα αστέρων

Ως μη φυσικούς μεταβλητούς ορίζουμε τους αστέρες εκείνους που είναι μέλη διπλών συστημάτων και μεταβάλλεται η λαμπρότητά τους με την πάροδο του χρόνου, όμως αυτή η μεταβολή σχετίζεται με την γεωμετρία του συστήματος και όχι με φυσικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στον ίδιο τον αστέρα. Αναφερόμαστε σε διπλά συστήματα αστέρων, όπου το επίπεδο της τροχιάς του συστήματος έχει τέτοια κλίση ως προς την οπτική ευθεία που μας συνδέει με το σύστημα, ώστε οι αστέρες να παρουσιάζουν διαδοχικές εκλείψεις και κατ' επέκταση να αυξομειώνεται η λαμπρότητά τους.

Ορίζουμε ως *πρωτεύοντα αστέρα* του συστήματος, εκείνον ο οποίος έχει την μεγαλύτερη θερμοκρασία από τους δύο, ενώ αυτόν με την μικρότερη τον ονομάζουμε *δευτερεύοντα αστέρα ή συνοδό αστέρα*.

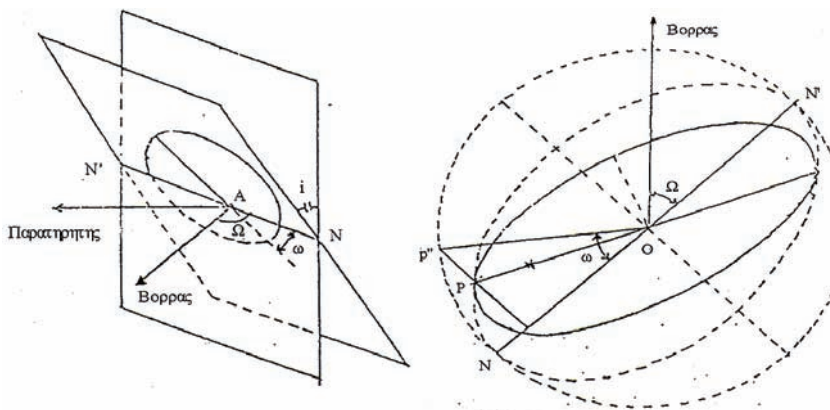
1.4.5.2 Υπολογισμός των παραμέτρων διπλού συστήματος αστέρων

Ορίζουμε ως *πραγματική τροχιά αστέρα* την τροχιά που διαγράφει ο αστέρας στον τρισδιάστατο χώρο, ως *φαινόμενη τροχιά αστέρα* την προβολή της πραγματικής στον δισδιάστατο χώρο, ως *απόλυτη τροχιά αστέρα* την τροχιά που διαγράφει γύρω από το κοινό κέντρο μάζας του συστήματος και ως *σχετική τροχιά αστέρα* την τροχιά του δευτερεύοντος αστέρα ως προς τον πρωτεύοντα.

Η κίνηση των μελών ενός διπλού συστήματος αστέρων περιγράφεται από το γνωστό πρόβλημα της μηχανικής, αυτό των δύο σωμάτων το οποίο υπόκειται στους τρεις νόμους του *Kepler* : (1) Οι τροχιές των δύο μελών του συστήματος ως προς το αδρανειακό σύστημα αναφοράς, είναι συνεπίπεδες και διαγράφουν όμοιες ελλείψεις. Στη μία εκ των εστιών βρίσκεται το κέντρο μάζας του συστήματος. Η τροχιά ενός μέλους ως προς το σύστημα αναφοράς στο οποίο το άλλο θεωρείται ακίνητο, είναι έλλειψη συνεπίπεδη και όμοια με την προηγούμενη, (2) τα δύο μέλη του συστήματος έχουν ισοεμβαδική ταχύτητα (σε ίσους χρόνους, σαρώνουν ίσα εμβαδά), (3) ο μεγάλος ημιάξονας της σχετικής τροχιάς A , συνδέεται με την περίοδο περιφοράς με την σχέση:

$$G (M_1 + M_2) P^2 = 4\pi^2 A^3 \quad (1.15)$$

Όπου M_1, M_2 οι μάζες των αστέρων, G η σταθερά της παγκόσμιας έλξης, P η περίοδος του συστήματος, και A ο μεγάλος ημιάξονας της τροχιάς τους.



Σχ. 1.45 Απεικόνιση τροχιάς διπλού συστήματος.

i : κλίση του επιπέδου της τροχιάς ως προς το επίπεδο του ουρανού
 Ω : η γωνία μεταξύ του βορρά και των συνδέσμων N'N
 ω : η γωνία μεταξύ των συνδέσμων και του μεγάλου ημιάξονα

Μετά από σειρά παρατηρήσεων είναι δυνατό να προσδιορίσουμε πλήρως την σχετική και απόλυτη τροχιά του συστήματος. Ο 3^{ος} νόμος του Kepler μπορεί να πάρει την μορφή:

$$(m_1 + m_2) P^2 = a^3 \quad (1.16)$$

Όπου m_1, m_2 οι μάζες των αστέρων είναι κανονικοποιημένες στην μάζα του ήλιου, P η περίοδος του συστήματος εκφρασμένη σε έτη και a ο ημιάξονας της τροχιάς εκφρασμένος σε A.U.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι μπορούμε να εξάγουμε το άθροισμα των μαζών του συστήματος.

Από την απόλυτη τροχιά και από τον ορισμό του κέντρου μάζας βρίσκουμε την σχέση:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{A_2}{A_1} \quad (1.17)$$

Όπου A_1, A_2 οι ημιάξονες των απόλυτων πραγματικών τροχιών των αστέρων. Λόγω του ότι εμείς έχουμε μόνο την δυνατότητα να μετράμε γωνιακές αποστάσεις μεταξύ των αστέρων η σχέση (2) γίνεται:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1} \quad (1.18)$$

Όπου a_1, a_2 η γωνιακές αποστάσεις των αστέρων από το κέντρο μάζας.

Στην πραγματικότητα όμως εμείς μετράμε τις προβολές b των γωνιακών αποστάσεων a στο δισδιάστατο επίπεδο του ουρανού επομένως, υπάρχει εξάρτηση από την γωνία i . Θεωρώντας $b = a \cos i$ η σχέση (1.18) παίρνει τη μορφή:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{b_2}{b_1} \quad (1.19)$$

Από την τριγωνομετρία βρίσκουμε ότι : $b = \frac{A}{d}$ (1.20)

Επίσης από την γεωμετρία των ελλείψεων ισχύουν οι εξής σχέσεις:

$$b_1 + b_2 = b \quad (1.21)$$

$$A_1 + A_2 = A \quad (1.22)$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (1.20), (1.21), (1.22) στην σχέση (1.16) παίρνουμε την έκφραση:

$$m_1 + m_2 = \left(\frac{d}{\cos i}\right)^3 \frac{b^3}{P^2} \quad (1.23)$$

Επομένως από τις σχέσεις (1.19) και (1.23) μπορούμε να υπολογίσουμε την μάζα του κάθε αστέρα ξεχωριστά. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι χρειάζεται να γνωρίζουμε την απόσταση d του συστήματος από εμάς, κάτι που δεν μπορεί να υπολογιστεί πάντα.

Σε περιπτώσεις όπου το διπλό σύστημα είναι εκλειπτικά και φασματοσκοπικά διπλό τότε μας παρέχεται μία επιπλέον πληροφορία, η *καμπύλη ακτινικών ταχυτήτων* του συστήματος. Από αυτήν μπορούμε να υπολογίσουμε τους μεγάλους ημιάξονες, a_1 και a_2 των απόλυτων τροχιών του κάθε μέλους του συστήματος. Αν οι τροχιές είναι κυκλικές όπως στην περίπτωση στενών συστημάτων (close binaries) τότε προκύπτει η παρακάτω σχέση που ισχύει και για τα δύο μέλη του συστήματος:

$$u = \frac{2\pi a}{P} \quad (1.24)$$

Όπου u η γραμμική ταχύτητα των αστέρων και P η περίοδος του συστήματος.

Και πάλι λόγω προβολής στον ουράνιο θόλο η μετρούμενη ακτινική ταχύτητα u_r έχει εξάρτηση από την γωνία i η οποία δίνεται από την σχέση:

$$u_r = u \sin i \quad (1.25)$$

όπως και πριν βρίσκουμε ότι ο λόγος μαζών δίνεται από την σχέση:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1} \quad (1.26)$$

Από τις σχέσεις (1.24), (1.25), (1.26) προκύπτει η σχέση: $\frac{m_1}{m_2} = \frac{u_{2r}}{u_{1r}}$ (1.27)

Από την γεωμετρία των ελλείψεων παίρνουμε την σχέση:

$$a = a_1 + a_2 = \frac{P}{2\pi} (u_1 + u_2) \quad (1.28)$$

Από τις σχέσεις (1.25), (1.28) και τον 3^ο νόμο του Kepler προκύπτει η σχέση:

$$m_1 + m_2 = \frac{P}{2\pi G} \frac{(u_{1r} + u_{2r})^3}{\sin^3 i} \quad (1.29)$$

Άρα από τις σχέσεις (1.27) και (1.29) υπολογίζουμε μεμονωμένα τις μάζες των μελών του συστήματος.

Άρα, παρατηρώντας φασματοσκοπικά τέτοια συστήματα, και βασιζόμενοι στον νόμο του Doppler, μπορούμε να μετρήσουμε τις ακτινικές ταχύτητες των αστέρων. Το φωτομετρικό μέγιστο της λαμπρότητας ή το μέγιστο (ή και ελάχιστο) της ακτινικής ταχύτητας των αστέρων αντιστοιχούν στη μέγιστη απόσταση των αστέρων από το κέντρο μάζας, οπότε εφαρμόζοντας την σχέση (1.27) υπολογίζουμε τον φασματοσκοπικό λόγο μαζών. Από φασματοσκοπικές ή ακόμα και από φωτομετρικές παρατηρήσεις προσδιορίζουμε την περίοδο του συστήματος, και υπολογίζουμε την κλίση του i , ως προς την ευθεία παρατήρησης. Επομένως, εφόσον γνωρίζουμε από την σχέση (1.29) το άθροισμα των μαζών, και έχουμε υπολογίσει και τον λόγο τους, μπορούμε πλέον να βρούμε τις μάζες των μελών του συστήματος.

Σε περιπτώσεις όπου ο συνοδός αστέρας είναι αμυδρός έχουμε δηλαδή φασματοσκοπικά διπλό σύστημα με μονές γραμμές στο φάσμα του, τότε οι μάζες δεν υπολογίζονται μεμονωμένα.

Επιλύνοντας την σχέση (4) ως προς την ακτινική ταχύτητα u_{2r} προκύπτει η σχέση:

$$u_{2r} = \frac{m_1}{m_2} u_{1r} \quad (1.30)$$

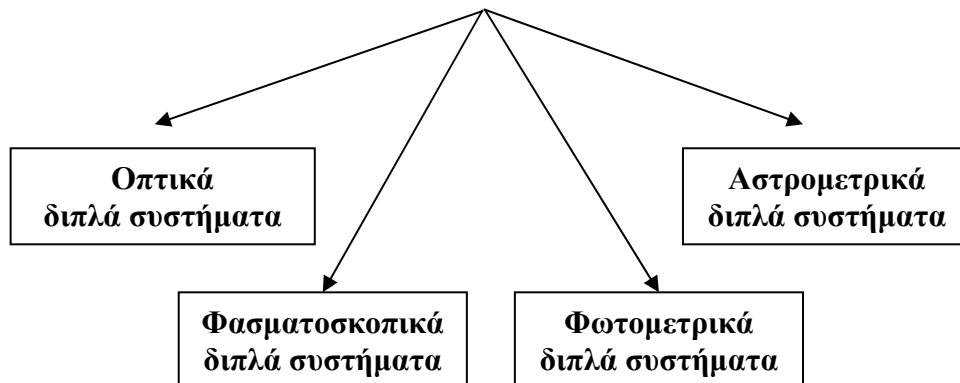
Από την σχέση (1.30) και τον 3^ο νόμο του Kepler προκύπτει η **συνάρτηση μάζας** του συστήματος, που μας επιτρέπει να υπολογίσουμε τα όρια των μαζών των μελών, η οποία δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$m_1 + m_2 = \frac{P}{2\pi G} u_{1r}^3 \quad (1.31)$$

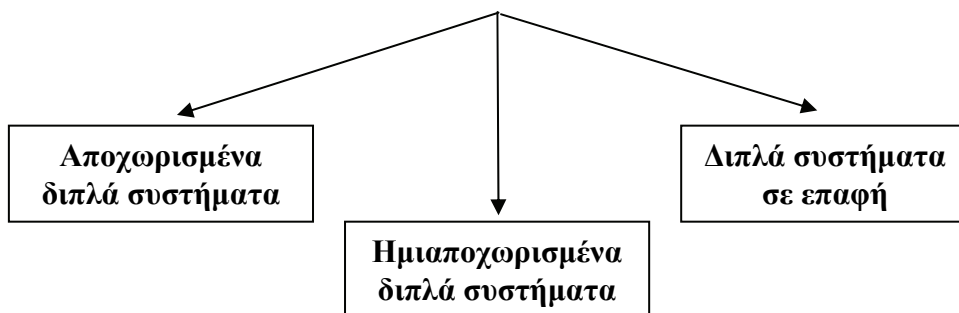
1.4.5.3 Ταξινομήσεις διπλών συστημάτων

Υπάρχουν τριών ειδών ταξινομήσεις για τα διπλά συστήματα αστέρων. Η πρώτη βασίζεται στις μεθόδους παρατήρησής τους, η δεύτερη στην μεταξύ τους απόσταση (μοντέλο Roche) και η τρίτη στην μορφή της καμπύλης φωτός τους.

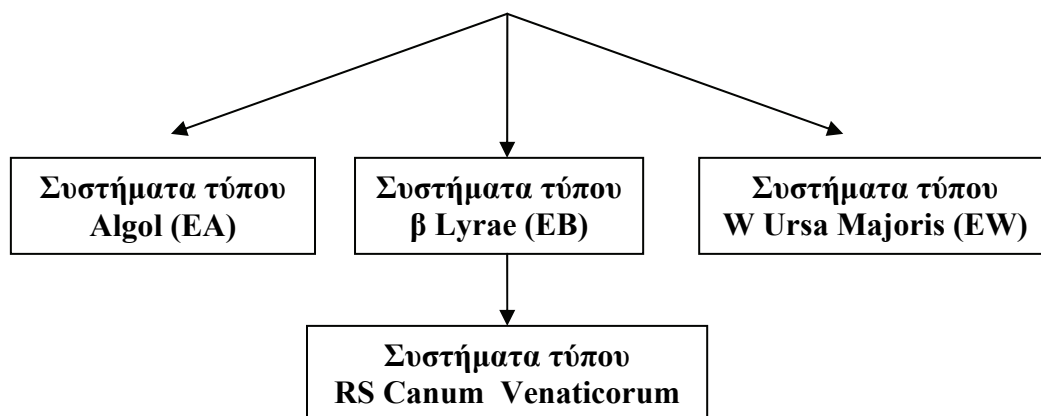
A. Βάσει της μεθόδου παρατήρησης



B. Βάσει της μεταξύ τους απόστασης (μοντέλο Roche)



Γ. Βάσει της μορφής της καμπύλης φωτός τους



1.4.5.4 Ταξινόμηση διπλών συστημάτων βάσει των μεθόδων παρατήρησης

Όπως φαίνεται στο προηγούμενο σχεδιάγραμμα τα διπλά συστήματα μπορούν να ταξινομηθούν βάσει των μεθόδων παρατήρησης που χρησιμοποιούμε. Οι *οπτικώς διπλοί αστέρες* είναι τα διπλά συστήματα στα οποία είναι οπτικά εμφανή και τα δύο μέλη, ενώ οι άλλες τρεις κατηγορίες μπορούν να ενταχθούν σε μία μεγαλύτερη, με τον χαρακτηρισμό *μη οπτικώς διπλοί αστέρες* διότι ο συνοδός αστέρας ανιχνεύεται έμμεσα.

Οπτικώς διπλοί αστέρες

Οι δύο αστέρες που συνιστούν ένα τέτοιο σύστημα απέχουν μεταξύ τους μέχρι και χιλιάδες αστρονομικές μονάδες κι έτσι μπορούν να αναγνωριστούν το καθένα ξεχωριστά με τη βοήθεια τηλεσκοπίου. Λόγω της μεγάλης απόστασής τους, η περίοδος του συστήματος κυμαίνεται από 10 έως 100 ή και περισσότερα χρόνια. Πολύ συχνά αυτά τα διπλά συστήματα συγχέονται με αστέρες που προβάλλονται πολύ κοντά στην ουράνια σφαίρα και δίνουν την εντύπωση διπλού συστήματος, ενώ στην πραγματικότητα δεν υπάρχει καμία αλληλεπίδραση μεταξύ τους.

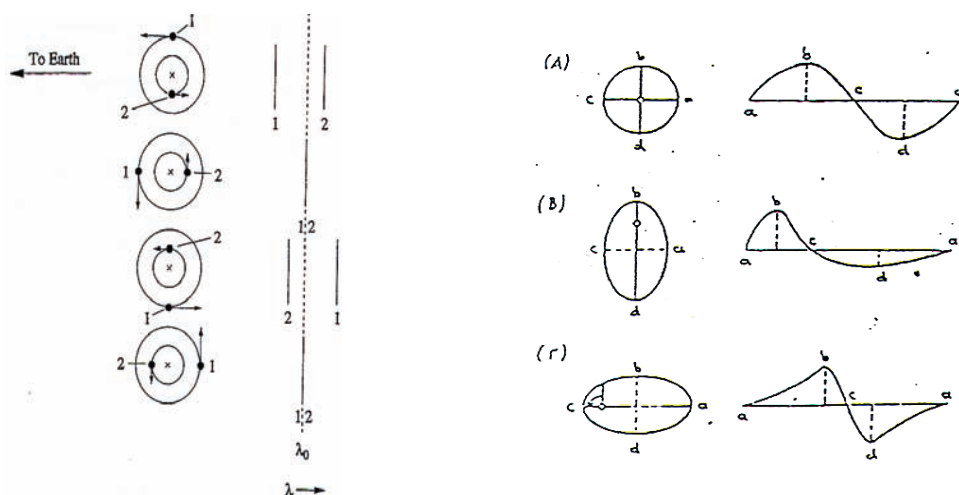
Φασματοσκοπικά διπλά συστήματα αστέρων

Αυτού του τύπου τα διπλά συστήματα ανακαλύφθηκαν αποκλειστικά με φασματοσκοπικές παρατηρήσεις, διότι ο συνοδός αστέρας δεν είναι οπτικά ορατός. Στα φάσματά τους παρατηρείται μετατόπιση των φασματικών γραμμών προς το ερυθρό και προς το ιώδες. Με τη βοήθεια του νόμου *Doppler* : $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{u}{c}$, υπολογίζονται οι ακτινικές ταχύτητες των αστέρων γύρω από το κέντρο μάζας του συστήματος. Εάν, επομένως, η τροχιά του συστήματος είναι τέτοια ώστε να υπάρχει συνιστώσα της ταχύτητας περιφοράς κατά μήκος της οπτικής ακτίνας, τότε υπάρχει περιοδική μεταβολή της μετατόπισης των φασματικών γραμμών και κατ' επέκταση των ακτινικών ταχυτήτων των αστέρων του συστήματος. Μέσω αυτών των παρατηρήσεων προκύπτει η *καμπύλη ακτινικών ταχυτήτων* του

συστήματος, που αποτελεί πολύ χρήσιμο εργαλείο στη μελέτη των τροχιακών και φυσικών παραμέτρων του.

Αυτού του τύπου τα συστήματα χωρίζονται σε επιπλέον δύο κατηγορίες ανάλογα με το πλήθος των γραμμών στο φάσμα τους.

(1) *Φασματοσκοπικά διπλοί αστέρες με διπλές γραμμές στο φάσμα τους*, όπου ανήκουν τα διπλά συστήματα στα οποία τα μέλη τους είναι περίπου όμοιας λαμπρότητας, και (2) *Φασματοσκοπικά διπλοί αστέρες με μονές γραμμές στο φάσμα τους*, όπου ανήκουν τα διπλά συστήματα στα οποία ο ένας αστέρας είναι σημαντικά αμυδρότερος από τον άλλο. Ανάλογα με την προβολή της τροχιάς του συστήματος, οι καμπύλες ακτινικών ταχυτήτων διαφοροποιούνται όπως φαίνεται στο σχήμα 1.47.



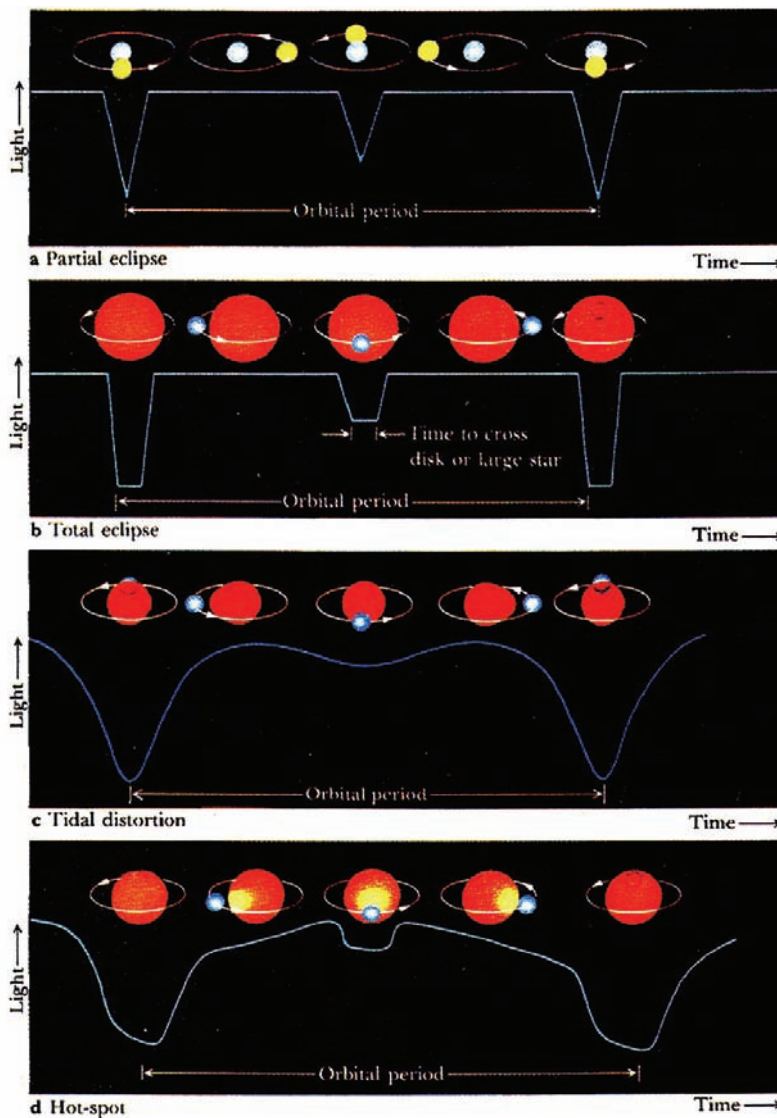
Σχ.1.46 & 1.47 Στο αριστερό διάγραμμα μπορούμε να διακρίνουμε τις κινήσεις των αστέρων του διπλού συστήματος, και τις μετατοπίσεις φασματικών γραμμών που παρουσιάζουν οι αστέρες λόγω των ακτινικών ταχυτήτων τους, όταν απομακρύνονται ή πλησιάζουν την Γη. Στο δεξιό σχήμα απεικονίζονται οι τροχιές και οι καμπύλες ακτινικών ταχυτήτων τριών διπλών συστημάτων με γωνία $i = 90^\circ$. Το σχήμα (A) απεικονίζει κυκλική τροχιά διπλού συστήματος και ημιτονοειδή καμπύλη ταχυτήτων. Τα σχήματα (B) και (Γ) απεικονίζουν τροχιές με εκκεντρότητα $e \neq 0$ και γωνίες $\omega = 0^\circ$ και 90° αντίστοιχα, και τις μεταβολές της μορφής της καμπύλης ταχυτήτων τους (Carroll & Ostlie 1996).

Αstromετρικά διπλά συστήματα αστέρων

Σε περιπτώσεις όπου ο ένας αστέρας του συστήματος είναι πολύ λαμπρότερος από τον άλλο είναι αδύνατο να παρατηρηθεί φασματοσκοπικά ή φωτομετρικά ο συνοδός αστέρας. Σε τέτοιες περιπτώσεις η ύπαρξη του αμυδρού συνοδού αστέρα γίνεται αντιληπτή μόνον έμμεσα, από την παρατήρηση της τροχιάς του κύριου αστέρα. Η τροχιά του κύριου αστέρα δεν διαγράφει ευθύγραμμη τροχιά στην ουράνια σφαίρα αλλά μια κλειστή τροχιά στο σύστημα αναφοράς του κέντρου μάζας του συστήματος. Λαμπρό στην κυριολεξία παράδειγμα αποτελεί ο αστέρας *Σείριος* (α CMa) όπου διαθέτει έναν συνοδό αστέρα, τον γνωστό *Σείριο-B* ο οποίος ανιχνεύτηκε αστρομετρικά. Το σύστημα πλέον ονομάζεται *Σείριος A-B* και η περίοδος του είναι περίπου 50 χρόνια.

Φωτομετρικά διπλά συστήματα

Τα συστήματα αυτών των αστέρων παρουσιάζουν περιοδική μεταβολή της λαμπρότητάς τους. Η μεταβολή αυτή οφείλεται σε διαδοχικές περιοδικές εκλείψεις που συμβαίνουν όταν ο ένας αστέρας του συστήματος περάσει μπροστά από τον άλλο, εμποδίζοντας έτσι το φως του αστέρα που υφίσταται την έκλειψη να φτάσει σε μας. Τα συστήματα αυτά ονομάζονται *μεταβλητοί δι' εκλείψεων*. Παρατηρήσεις της περιοδικής μεταβολής του φωτός μας δίνουν την καμπύλη φωτός του συστήματος που όχι μόνο αποδεικνύει την ύπαρξη ενός συνοδού αστέρα, αλλά επίσης μας δίνει πληροφορίες για τις σχετικές ενεργές θερμοκρασίες και τις ακτίνες των δύο αστέρων από το βάθος και την διάρκεια της έκλειψης. Για να αντιληφθούμε τέτοιου τύπου διπλά συστήματα θα πρέπει η γωνία που σχηματίζουν το επίπεδο της τροχιάς του συστήματος και η οπτική ευθεία που μας συνδέει με το σύστημα, να είναι περίπου 90° ώστε να είμαστε σε θέση να παρατηρήσουμε τις εκλείψεις. Τα περισσότερα εκλειπτικά διπλά συστήματα είναι και φασματοσκοπικά διπλά.



Εικ. 1.7 Το παραπάνω σχήμα απεικονίζει διάφορους τύπους δι' εκλείψεων μεταβλητών. Το σχήμα (a) απεικονίζει αποχωρισμένο σύστημα με μερικές εκλείψεις, το σχήμα (b) απεικονίζει το ίδιο αλλά με ολικές εκλείψεις, το σχήμα (c) απεικονίζει στενά αλληλεπιδρόν σύστημα, Το σχήμα (d) απεικονίζει σύστημα όπου ο συνοδός είναι πολύ θερμός και στον κύριο αστέρα εμφανίζεται μια θερμή κηλίδα.

1.4.5.5 Ταξινόμηση διπλών συστημάτων βάσει του μοντέλου Roche

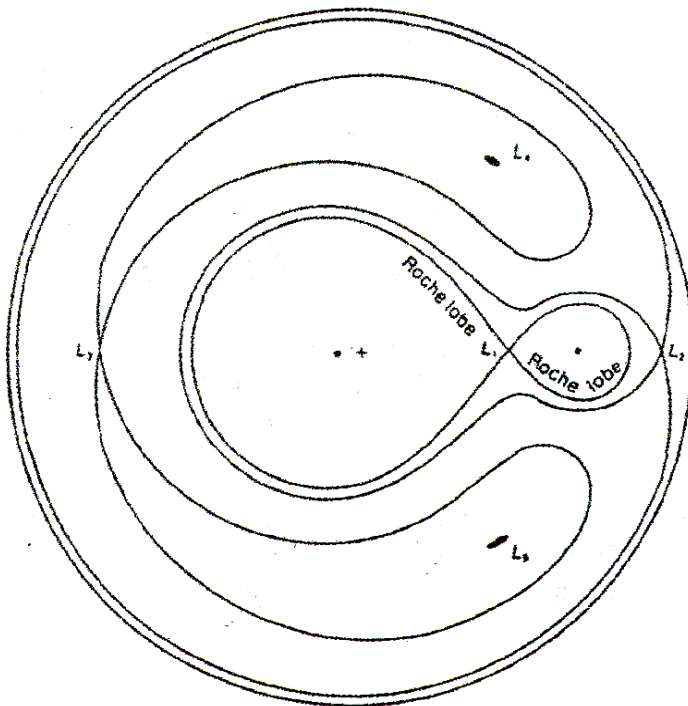
Το μοντέλο Roche

Αυτό το μοντέλο περιγράφει τα στενά διπλά συστήματα αστέρων (*close binary systems*) στα οποία οι αστέρες δεν εξελίσσονται ανεξάρτητα ως μεμονωμένοι αστέρες, αλλά η εξελικτική τους πορεία εξαρτάται από την παρουσία του άλλου μέλους του συστήματος. Αυτοί οι αστέρες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και λαμβάνουν χώρα φαινόμενα όπως η ανταλλαγή μάζας μεταξύ τους, η σύγχρονη περιστροφή, ή ακόμα και μεταφορά θερμότητας από τον θερμό αστέρα στον ψυχρότερο.

Το μοντέλο περιγράφεται ως εξής: Θεωρούμε ένα σύστημα δύο αστέρων με κυκλικές τροχιές και το παρατηρούμε με σύστημα αναφοράς το κέντρο μάζας του συστήματος. Με την παραπάνω παραδοχή μπορούμε να ορίσουμε ισοδυναμικές επιφάνειες έτσι ώστε η *ανηγμένη βαρύτητα* του συστήματος να είναι κάθετη σ' αυτές. Η ανηγμένη βαρύτητα ορίζεται ως η συνισταμένη δύναμη που ασκείται σε ένα στοιχείο μάζας από τους δύο αστέρες του συστήματος, λόγω βαρυτικής έλξης και λόγω περιστροφής του συστήματος αναφοράς. Κοντά στο κέντρο του κάθε αστέρα οι δυνάμεις που ασκούνται λόγω της παρουσίας του συνοδού καθώς και της περιστροφής του συστήματος αναφοράς θεωρούνται αμελητέες. Επομένως οι ισοδυναμικές επιφάνειες κοντά στους δύο αστέρες του συστήματος είναι σφαίρες. Αντίθετα μακριά από τους αστέρες, η ανηγμένη βαρύτητα του συστήματος κυριαρχείται από την φυγόκεντρο δύναμη. Με αυτόν τον τρόπο οι ισοδυναμικές επιφάνειες πρέπει να τέμνουν το ισημερινό επίπεδο σε κύκλους που τους περικλείουν. Φυσικά σε ενδιάμεσες θέσεις το στοιχείο μάζας επηρεάζεται τόσο

από την ανηγμένη βαρύτητα όσο και από την φυγόκεντρο δύναμη.

Τα δύο μισά της εσωτερικής επιφάνειας που αντιστοιχούν στους δύο αστέρες ονομάζονται *λοβοί Roche* και ενώνονται σε ένα και μοναδικό σημείο, στο Λαγκρανζιανό σημείο ισορροπίας (*Lagrangian point*) L_1 . Τα σημεία ισορροπίας L_2, L_3 βρίσκονται πάνω στην ευθεία που ενώνει τα κέντρα των αστέρων και έξω από τους λοβούς Roche, ενώ τα σημεία L_4, L_5 βρίσκονται πάνω και κάτω αντίστοιχα από την προαναφερόμενη ευθεία, και η απόστασή τους είναι τέτοια ώστε να σχηματίζονται ισόπλευρα



Σχ.1.48 Η Γεωμετρία Roche.

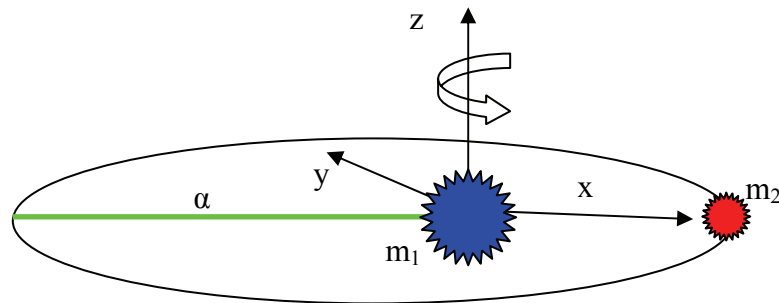
τρίγωνα, με κορυφές τα κέντρα των αστέρων και αυτά τα σημεία (σχ.1.48). Το σχήμα των ισοδυναμικών επιφανειών και οι ακτίνες των λοβών Roche εξαρτώνται από το λόγο μαζών του συστήματος. Η μαθηματική επεξεργασία του μοντέλου στηρίζεται πάνω σε τρεις υποθέσεις:

1. Η κατανομή της μάζας σε κάθε αστέρα του συστήματος είναι τέτοια ώστε να μπορούμε να θεωρήσουμε ότι όλη η μάζα του αστέρα είναι συγκεντρωμένη στο κέντρο του.
2. Οι τροχιές των αστέρων είναι κυκλικές.
3. Η ιδιοπεριστροφή του κάθε αστέρα είναι σύγχρονη με την περιφορά του γύρω από το κοινό κέντρο μάζας.

Θεωρούμε περιστρεφόμενο σύστημα αξόνων που περιστρέφεται μαζί με το κέντρο μάζας και ως αρχή των αξόνων θέτουμε τον αστέρα με την μεγαλύτερη μάζα ($m_1 > m_2$). Ο άξονας x συνδέει τα κέντρα των δύο αστέρων και ο άξονας z είναι κάθετος στο επίπεδο τη τροχιάς. Το δυναμικό στον χώρο που δημιουργούν οι βαρυτικές δυνάμεις των αστέρων και η περιστροφή του συστήματος δίνεται από την σχέση:

$$V = -G\left(\frac{m_1}{r_1} + \frac{m_2}{r_2}\right) - \frac{\omega^2}{2} \left[\left(x - \frac{m_2 a}{m_1 + m_2}\right)^2 + y^2 \right] \quad (1.32)$$

Όπου $r_1 = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$ και $r_2 = [(a - x)^2 + y^2 + z^2]^{1/2}$ οι αποστάσεις ενός στοιχείου μάζας από κάθε μέλος του συστήματος.



Σχ.1.49 Το περιστρεφόμενο σύστημα αξόνων, στο οποίο ο μεγαλύτερης μάζας αστέρας έχει τοποθετηθεί στο κέντρο μάζας του συστήματος.

Η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής δίνεται από την σχέση:

$$\omega = \frac{2\pi}{P} = [G(m_1 + m_2)]^{1/2} a^{-3/2} \quad (1.33)$$

Οι ισοδυναμικές επιφάνειες Roche με $\Omega =$ σταθερό συνδέονται με το δυναμικό μέσω της σχέσης:

$$\Omega = \frac{\alpha V}{Gm_1} + \frac{q^2}{2(1+q)} \quad (1.34)$$

Όπου $q = \frac{m_2}{m_1}$, ο λόγος μαζών του συστήματος και α ο ημιάξονας της έλλειψης.

Η ακτίνα του λοβού Roche του αστέρα, καλείται σαν ενεργός ακτίνα r_L , και δίνεται από την εμπειρική σχέση (Eggleton 1983):

$$r_L = \frac{0.49q^{2/3}}{0.69q^{2/3} + \ln(1 + q^{1/3})} \quad (1.35)$$

Η σχέση αυτή, αν και εμπειρική, έχει ακρίβεια της τάξης του 1% για κάθε τιμή του λόγου μαζών q .

Για να βρούμε τις ενεργές ακτίνες του κάθε αστέρα, πρέπει να διαφοροποιούμε κάθε φορά το q , έτσι ώστε να προκύπτει η αντίστοιχη ακτίνα. Π.χ για τον αστέρα m_2 , θέτουμε $q = m_2/m_1$ έτσι ώστε $q \leq 1$, οπότε βρίσκουμε την r_{L2} , ενώ για τον αστέρα m_1 θέτουμε $q = m_1/m_2$ ώστε $q \geq 1$, οπότε προκύπτει η r_{L1} .

Η πραγματική ενεργός ακτίνα του αστέρα R_L προκύπτει από την σχέση:

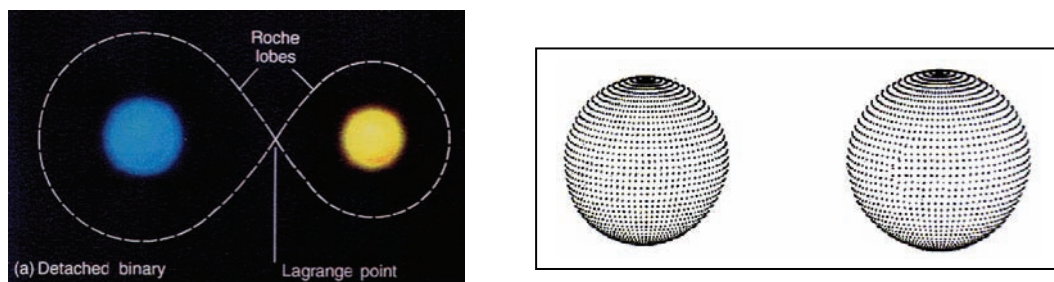
$$R_L = r_L \alpha \quad (1.36)$$

όπου α ο μεγάλος ημιάξονας της σχετικής τροχιάς των αστέρων

Βάσει του βαθμού πλήρωσης των λοβών Roche από τους αστέρες τα διπλά συστήματα χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: (1) *Αποχωρισμένα συστήματα*, (2) *Ημιαποχωρισμένα συστήματα*, (3) *Συστήματα σε επαφή*.

Αποχωρισμένα διπλά συστήματα αστέρων (detached binaries)

Οι ακτίνες των αστέρων αυτών των συστημάτων είναι μικρότερες από τις ακτίνες των αντίστοιχων λοβών Roche που τους περιβάλλουν. Η αλληλεπίδραση των αστέρων περιορίζεται μόνο σε αμοιβαία βαρυτική έλξη. Η ηλικία των δύο αστέρων είναι περίπου η ίδια, και η εξελικτική τους πορεία δεν επηρεάζεται από τις μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις.



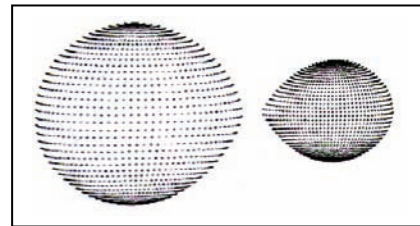
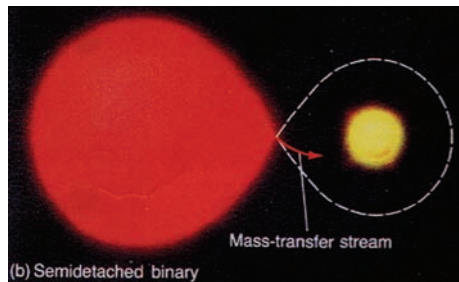
Σχ. 1.50 & 1.51 Τα παραπάνω σχήματα είναι η δισδιάστατη (αριστερά) και η τρισδιάστατη (δεξιά) απεικόνιση ενός αποχωρισμένου ζεύγους αστέρων.

Μια πρώτη υποκατηγορία αυτού του τύπου συστημάτων αποτελούν οι *ελλειψοειδείς μεταβλητοί αστέρες*. Οι αστέρες αυτών των συστημάτων είναι παλιρροιακά παραμορφωμένοι, δεν γεμίζουν τους λοβούς τους, όμως παρατηρείται μια ημιτονοειδής συμπεριφορά στην καμπύλη φωτός τους, λόγω αυτών των παραμορφώσεων και της προβολής τους σε εμάς.

Ημιαποχωρισμένα διπλά συστήματα αστέρων (semi - detached binaries)

Σε αυτού του τύπου τα συστήματα ο ένας αστέρας του συστήματος γεμίζει τον λοβό που του αντιστοιχεί, ενώ ο άλλος όχι. Η βασική δυναμική ιδιότητα αυτών των ζευγών είναι η μεταφορά μάζας του αστέρα που γεμίζει τον λοβό του προς τον συνοδό αστέρα μέσω του εσωτερικού σημείου Lagrange L_1 . Ανάλογα με την φύση του συνοδού που δέχεται την μάζα που εκρέει από το μέλος σε επαφή, έχουμε ποικιλία φαινομένων που χαρακτηρίζουν διάφορες ομάδες διπλών συστημάτων.

Σε τέτοιου τύπου συστήματα, φασματοσκοπικές παρατηρήσεις στην υπεριώδη περιοχή του φάσματος έδειξαν την ύπαρξη δακτυλίων πλάσματος, δίσκων προσαύξησης ή ακόμα και κελύφη που περιβάλλουν τον αστέρα στον οποίο προσπίπτει η ύλη, ο οποίος είναι θερμότερος και λιγότερο εξελιγμένος.

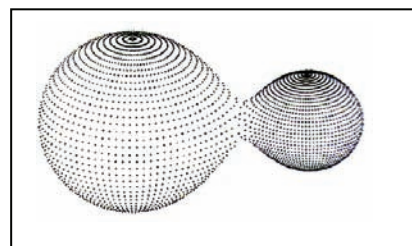
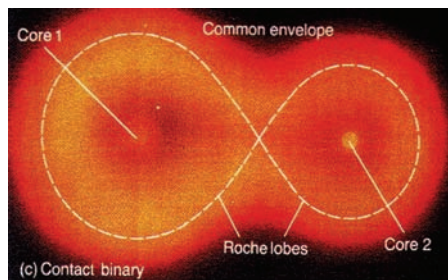


Σχ.1.52 & 1.53 Τα παραπάνω σχήματα είναι η δισδιάστατη (αριστερά) και η τρισδιάστατη (δεξιά) απεικόνιση ενός ημιαποχωρισμένου ζεύγους αστέρων.

Διπλά συστήματα αστέρων σε επαφή (contact binaries)

Σε αυτού του τύπου τα συστήματα, οι αστέρες συνήθως είναι της κύριας ακολουθίας, και γεμίζουν ή ξεπερνούν τους αντίστοιχους λοβούς τους. Σε τέτοιες περιπτώσεις οι δύο αστέρες έχουν κοινή φωτόσφαιρα, και αυτό συμβαίνει λόγω εξελικτικής διαστολής τους ή διότι έτσι γεννήθηκαν από το αρχικό πρωτοαστρικό νέφος. Παρουσιάζουν πολύ μικρές περιόδους περιφοράς της τάξης των 0.3 – 0.8 days και γι' αυτό αποτελούν ιδανικούς στόχους παρατήρησης. Βασικός εκπρόσωπος αυτού του τύπου συστημάτων είναι ο αστέρας *W Ursa Majoris* με λόγο μαζών 0.4.

Οι καμπύλες φωτός τους δεν παρουσιάζουν σταθερά μέγιστα λόγω του ότι η μορφή των δύο αστέρων έχει υποστεί παλιρροϊκές παραμορφώσεις, ενώ παρουσιάζουν ισοβαθή ελάχιστα. Τέτοιου είδους καμπύλη φαίνεται σε επόμενη παράγραφο.



Σχ.1.54 & 1.55 Τα παραπάνω σχήματα είναι η δισδιάστατη (αριστερά) και η τρισδιάστατη (δεξιά) απεικόνιση ενός ζεύγους αστέρων σε επαφή.

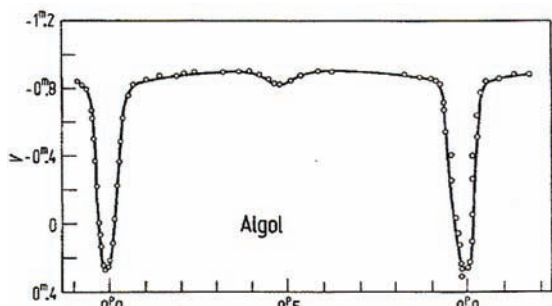
1.4.5.6 Ταξινόμηση διπλών συστημάτων βάσει της μορφής της καμπύλης φωτός τους

Αυτή η ταξινόμηση, όπως είναι προφανές ταξινομεί τους μεταβλητούς δι' εκλείψεων με κριτήριο την μορφή της καμπύλης φωτός που παρουσιάζουν. Έως τώρα οι κατηγορίες είναι οι εξής: (1) Συστήματα τύπου *Algol* (EA), (2) Συστήματα τύπου β *Lyrae* (EB), (3) Συστήματα τύπου *W Ursa Majoris* (EW)

Συστήματα τύπου *Algol*

Ο αστέρας *Algol* ή β *Persei* έχει ιστορική σημασία, διότι είναι ο πρώτος μεταβλητός δι' εκλείψεων που παρατηρήθηκε από τον *Montanari* το 1667 και αποτελεί τον πρότυπο αστέρα της κατηγορίας ημιαποχωρισμένων διπλών συστημάτων που δημιουργήθηκε μέσω του γνωστού *παραδόξου του Algol*. Σε αυτό το σύστημα παρατηρήθηκε ότι ο μικρότερης μάζας αστέρας του συστήματος είχε πολύ μεγαλύτερη φωτεινότητα και ακτίνα από έναν αστέρα της κύριας ακολουθίας, ενώ ο μεγάλης μάζας αστέρας βρισκόταν ακόμα στην κύρια ακολουθία. Από την αστρική εξέλιξη γνωρίζουμε ότι ο χρόνος παραμονής ενός αστέρα στην κύρια ακολουθία είναι ανάλογος της μάζας του, και ακολουθεί την σχέση: $t_{\text{Κ.Α}} \propto m^{-1/3}$. Επίσης οι παρατηρήσεις έδειχναν ότι οι αστέρες δεν είχαν κοινή προέλευση και ηλικία, γεγονός που ερχόταν σε αντίθεση με όλα όσα γνωρίζαμε για τα διπλά συστήματα.

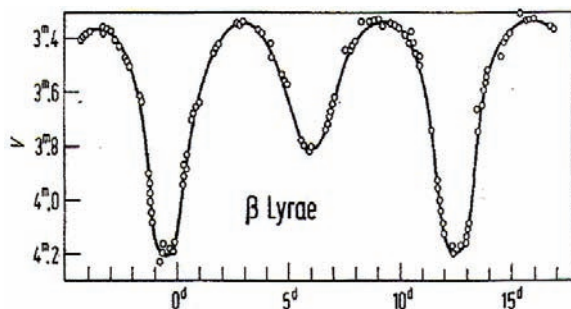
Η καμπύλη φωτός αυτών των συστημάτων παρουσιάζει ένα βαθύ πρωτεύον ελάχιστο, και ένα ρηχότερο δευτερεύον ελάχιστο. Στο χρονικό διάστημα μεταξύ των δύο αυτών ελαχίστων η λαμπρότητα του συστήματος παραμένει σταθερή. Οι περίοδοι αυτών των συστημάτων κυμαίνονται από 0.1 έως 10000 days, όμως η πλειοψηφία αυτών έχει περίοδο της τάξης των 3 days.



Σχ.1.56 Φωτομετρική καμπύλη του αστέρα *Algol* (www.aavso.org).

Συστήματα τύπου β *Lyrae*

Πρόκειται για συστήματα που περιέχουν έναν αστέρα μεγάλης μάζας αλλά μη παρατηρήσιμο φασματοσκοπικά. Ο β *Lyrae* είναι ημιαποχωρισμένο σύστημα, ενώ άλλα συστήματα αυτού του τύπου ενίοτε είναι και σε οριακή επαφή. Η καμπύλη φωτός αυτών των συστημάτων παρουσιάζει ένα βαθύ πρωτεύον ελάχιστο, και ένα ρηχότερο δευτερεύον ελάχιστο όπως και στην

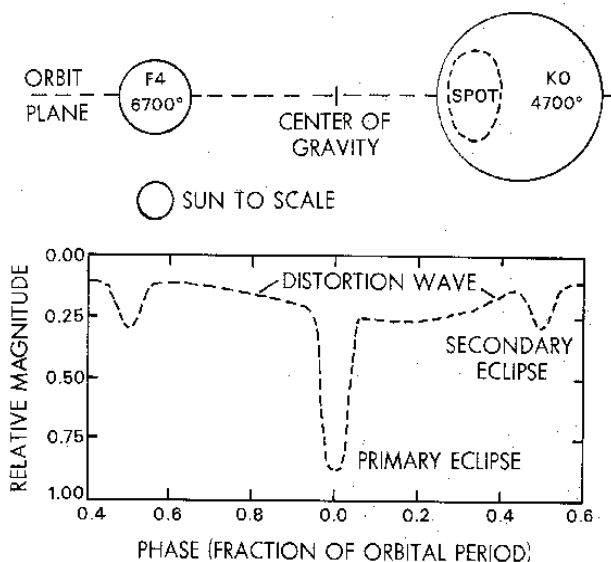


Σχ.1.57 Φωτομετρική καμπύλη του αστέρα β *Lyrae* (www.aavso.org).

προηγούμενη περίπτωση, μόνο που τώρα η λαμπρότητα του συστήματος δεν είναι σταθερή στο χρονικό διάστημα μεταξύ των δύο ελαχίστων και η περίοδος τους κυμαίνεται από 0.4 έως 200 days με τυπική τιμή 13 days.

Συστήματα τύπου RS Canum Venaticorum

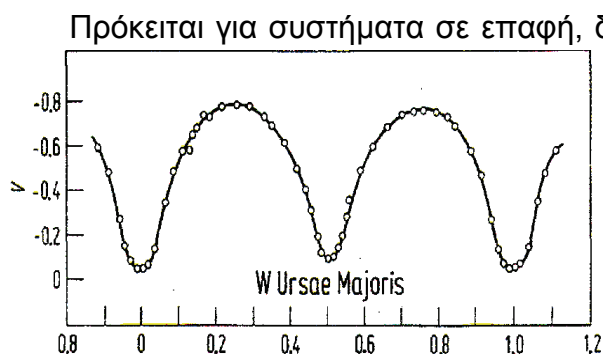
Αυτού του τύπου τα συστήματα, τα οποία αποτελούν υποκατηγορία των β Lyrae, είναι αποχωρισμένα, περιέχουν αστέρες φασματικού τύπου F ή G και οι περιόδοί τους κυμαίνονται από 5 έως 12 days. Στους αστέρες αυτούς υπάρχει έντονη φωτοσφαιρική και χρωμοσφαιρική δραστηριότητα. Λόγω αυτών των δραστηριοτήτων οι καμπύλες φωτός τους είναι ισχυρά διαταραγμένες και παρουσιάζουν στο φάσμα τους ισχυρές γραμμές εκπομπής CaII (διπλανό σχήμα). Η συνεχής αλλαγή φάσης οφείλεται στο ένα μέλος του συστήματος που δεν παρουσιάζει ομοιόμορφη κατανομή λαμπρότητας λόγω του ότι η τιμή της ιδιοπεριστροφής του ταυτίζεται με αυτήν της τροχιάς του συστήματος. Επίσης, οι αστέρες



αυτοί εκπέμπουν στα ραδιοκύματα και στις ακτίνες X, προφανώς λόγω στεμματικής δραστηριότητας. Πιστεύεται ότι τουλάχιστον ο ένας εκ των δύο αστέρων του συστήματος είναι εξελιγμένος, συνήθως φασματικού τύπου K3 – K5 και τάξης φωτεινότητας IV, αλλά αυτό δεν αποκλείει το ενδεχόμενο και οι δύο αστέρες να είναι υπογίγαντες, και η σχετικά γρήγορη αύξηση της ακτίνας τους να προκαλεί αυτά τα περίεργα φαινόμενα.

Σχ.1.58 Διάγραμμα Φάσης αστέρα τύπου RS CVn (www.aavso.org).

Συστήματα τύπου W Ursa Majoris



Πρόκειται για συστήματα σε επαφή, δηλαδή και οι δύο αστέρες έχουν γεμίσει τον λοβό Roche που τους περιβάλλει και αλληλεπιδρούν στενά με τον συνοδό τους.

Οι καμπύλες φωτός τους παρουσιάζουν συνεχή μεταβολή και δύο σχεδόν ισοβαθή ελάχιστα. Η περίοδος αυτών των συστημάτων είναι της τάξης των 10 ωρών.

Σχ.1.59 Φωτομετρική καμπύλη του αστέρα W UMa (www.aavso.org).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο

ΟΡΓΑΝΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ

2.1 Εισαγωγή

Όπως είναι γνωστό από την αρχαιότητα, οι άνθρωποι παρατηρούσαν τον νυχτερινό ουρανό, και πίστευαν ότι το σύμπαν είναι ό,τι μπορούσαν να δουν με τα μάτια τους. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε ότι το ανθρώπινο μάτι σε κατασκότεινη νύκτα μπορεί να διακρίνει αστέρες μέχρι 6^{ου} μεγέθους, και από τα δύο ημισφαίρια της γης μπορεί να διακρίνει μόλις 5500 ουράνια σώματα. Από τον μεσαίωνα οι άνθρωποι είχαν ανακαλύψει την επεξεργασία του γυαλιού, όμως αυτό αρχικά χρησιμοποιούταν μόνο για διακοσμητικά σκεύη. Μετά την ανακάλυψη όμως του τηλεσκοπίου τον 16^ο αιώνα από τον Γαλιλαίο, άλλαξαν ριζικά οι απόψεις μας για το σύμπαν. Ανακαλύψεις, όπως ότι η γη δεν είναι το κέντρο του σύμπαντος, και ότι πιθανόν να υπάρχουν κι άλλοι κόσμοι εκεί έξω, η παρατήρηση νέων πλανητών στο ηλιακό μας σύστημα, οι γαλαξίες κ.α. συνθέτουν μια νέα εικόνα του σύμπαντος για την ανθρωπότητα.

Σήμερα, βάσει εκτιμήσεων, έχουν καταγραφεί μερικές εκατοντάδες δισεκατομμύρια γαλαξιών με τυπική τιμή αστέρων 100 δις, όσα δηλαδή περιέχει περίπου ο δικός μας Γαλαξίας. Οι αριθμοί είναι όντως αστρονομικοί, και χαρακτηριστικά αναφέρουμε ότι το αμυδρότερο αντικείμενο που έχουμε καταγράψει είναι περίπου 30^{ου} μεγέθους. Πιστεύεται ότι έχουμε «δει» μια πάρα πολύ μικρή περιοχή του σύμπαντος, και με την ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας ελπίζουμε να μπορέσουμε να «δούμε» ακόμα πιο μακριά, σε αυτό που αποκαλούμε πλέον *χωρόχρονο*.

Στις αρχές του περασμένου αιώνα με την βοήθεια τηλεσκοπίου και των νέων τεχνολογιών παρατήρησης ανακαλύφθηκαν οι υπόλοιποι πλανήτες του ηλιακού μας συστήματος, ο Ουρανός, ο Ποσειδώνας, ο Πλούτωνας και οι δορυφόροι του και πολύ πρόσφατα δύο νέοι νάνοι πλανήτες ακόμα πιο μακριά. Επίσης ο *Edwin Hubble* έθεσε, με την ανακάλυψή του για την διαστολή του σύμπαντος, τις βάσεις για όλες τις σύγχρονες κοσμοθεωρίες.

Αρχικά, ως συλλέκτης φωτός χρησιμοποιούταν το ανθρώπινο μάτι. Όμως, λόγω του ότι οι αστρονόμοι ήθελαν να απαλλαγούν από την υποκειμενικότητα του παρατηρητή, χρειάζονταν ένα μέσο αποθήκευσης της πληροφορίας. Στα τέλη του 19^{ου} αιώνα χρησιμοποιήθηκε το φωτογραφικό φιλμ, που έμελλε να αποτελέσει τον κύριο καταγραφέα πληροφορίας για πάνω από 120 χρόνια. Η σημερινή ψηφιακή τεχνολογία μας επιτρέπει να χρησιμοποιούμε καλύτερες και αποδοτικότερες τεχνικές παρατήρησης και καταγραφής, γεγονός που συμβάλλει στην βαθύτερη κατανόηση του σύμπαντος.

Μεγάλα επίγεια τηλεσκόπια αλλά και διαστημικά (όπως το Hubble) παρατηρούν αστρονομικούς στόχους και πολλές φορές συνεργάζονται για να πετύχουν καλύτερα αποτελέσματα.

Η κατανόηση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, ώθησε την ανθρωπότητα να ερευνήσει το διάστημα και σε άλλα μήκη κύματος εκτός του οπτικού, και να

ανακαλύψει αυτό που χαρακτηρίζεται ως «αθέατο» σύμπαν. Επίσης η ανακάλυψη της δομής της γήινης ατμόσφαιρας και η κατανόηση της επιλεκτικής απορροφητικότητάς της οδήγησε τους επιστήμονες να στείλουν τηλεσκόπια σε τροχιά γύρω από την Γη. Τηλεσκόπια ακτίνων Χ, ακτίνων γ, υπεριώδους και υπέρυθρης ακτινοβολίας έχουν μπει σε τροχιά γύρω από τη Γη για την εξερεύνηση του σύμπαντος στα μήκη κύματος όπου η γήινη ατμόσφαιρα είναι αδιαφανής, ενώ ταυτόχρονα ραδιοτηλεσκόπια και οπτικά τηλεσκόπια παρατηρούν από την γήινη επιφάνεια.

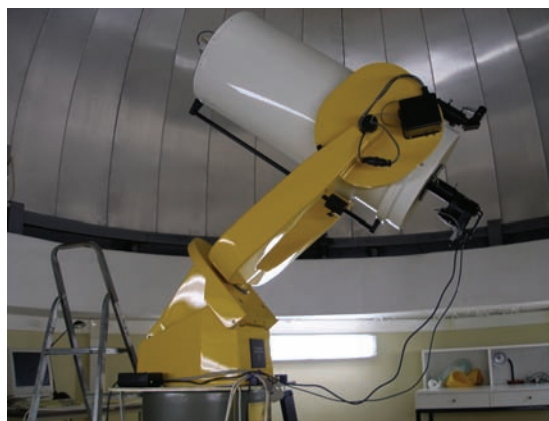
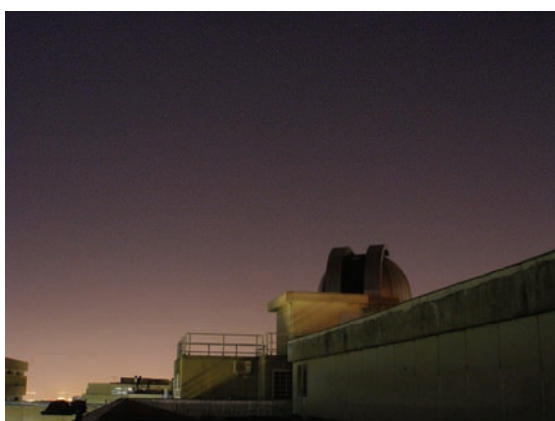
Η φασματοσκοπία, η φωτομετρία, οι προσπάθειες για την ανίχνευση νετρίνων και βαρυτικών κυμάτων και φυσικά οι νέες τεχνολογίες καταγραφής και αποθήκευσης δεδομένων άνοιξαν νέους ορίζοντες στην αστροφυσική, η οποία θα μπορούσαμε να πούμε ότι μέχρι πριν μερικά χρόνια βρισκόταν σε πρωτόγονη φάση.

2.2 Το Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο

Το τηλεσκόπιο που χρησιμοποιήσαμε για τις παρατηρήσεις μας είναι ένα **κατοπτρικό τηλεσκόπιο τύπου Cassegrain**. Παρακάτω αναφέρονται η υποδομή, τα τεχνικά χαρακτηριστικά καθώς και οι ερευνητικές δραστηριότητες.

2.2.1 Υποδομή

Το νέο αστεροσκοπείο βρίσκεται στην οροφή του κτιρίου του Τμήματος Φυσικής στην Πανεπιστημιούπολη Ζωγράφου. Η εγκατάσταση του θόλου του αστεροσκοπείου, διαμέτρου 5 μέτρων, έγινε πριν από 9 χρόνια από την εταιρεία OBSERVADOME. Το αστεροσκοπείο, εκτός από το θόλο και το τηλεσκόπιο, περιλαμβάνει ένα μεγάλο γραφείο, όπου βρίσκεται και ο θάλαμος ελέγχου του τηλεσκοπίου (control room), και ένα μικρό διαμέρισμα για χρήση από τους παρατηρητές και διαμονή ξένων επιστημονικών συνεργατών του Τμήματος Φυσικής. Η εγκατάσταση του τηλεσκοπίου έγινε τον Απρίλιο του 1999 από την κατασκευάστρια εταιρεία DFM ENGINEERING, INC. USA.



Εικ. 2.1&2.2 Ο θόλος του Γεροσταθοπούλειου Πανεπιστημιακού Αστεροσκοπείου και το τηλεσκόπιο που χρησιμοποιήσαμε στις παρατηρήσεις μας.

2.2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά του τηλεσκοπίου

ΟΠΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

- Κατοπτρικό τηλεσκόπιο τύπου Cassegrain (CCT-16, DFM ENGINEERING, INC, USA)
- Πρωτεύον κάτοπτρο διαμέτρου 40cm
- Εστιακός λόγος για το πρωτεύον κάτοπτρο F/3
- Ο ενεργός εστιακός λόγος του τηλεσκοπίου είναι F/8. Το πρωτεύον και δευτερεύον κάτοπτρο είναι κατασκευασμένα από pyrex και έχουν επαλουμινωθεί και προστατευθεί με στρώμα μονοξειδίου του πυριτίου
- Η θέση του εστιακού επιπέδου βρίσκεται μεταξύ 0 και 20 cm από την επιφάνεια προσαρμογής του οργάνου παρατήρησης
- Η εστίαση μπορεί να γίνει είτε από το χειριστήριο είτε από το σύστημα ελέγχου (control system)
- Το τηλεσκόπιο μπορεί να λειτουργεί σε θερμοκρασία μέχρι -40°C
- Υπάρχουν 2 ταχύτητες για εστίαση
- Παράλληλα στο τηλεσκόπιο είναι στερεωμένος ένας ερευνητής 9 x 60

ΣΤΗΡΙΞΗ ΤΟΥ ΤΗΛΕΣΚΟΠΙΟΥ

- Η στήριξη του τηλεσκοπίου είναι ισημερινού διχαλωτού τύπου
- Η κίνηση κατ' ορθή αναφορά και απόκλιση γίνεται με τη βοήθεια servo-motors
- Η κατασκευή είναι από χάλυβα και αλουμίνιο για μεγάλη αντοχή
- Η ακρίβεια οδήγησης του τηλεσκοπίου είναι: 2" σε 2 λεπτά, ή 20" για 1 ώρα.
- Η ακρίβεια σκόπευσης είναι καλύτερη από 1" RMS
- Η λειτουργία του τηλεσκοπίου παράγει πολύ μικρή θερμότητα και έτσι δεν επηρεάζει τα είδωλα
- Υψηλοί ρυθμοί επιτάχυνσης ή επιβράδυνσης βοηθούν στην ταχεία σκόπευση.
- Οι ρυθμοί οδήγησης κυμαίνονται από $0^{\circ} - 4^{\circ} / \text{sec}$
- Ειδική βάση επιτρέπει μικροκινήσεις (μικροδιορθώσεις) για τον προσανατολισμό του τηλεσκοπίου προς το Βόρειο Πόλο
- Βοηθητικά όργανα παρατήρησης βάρους μέχρι 20 Kg μπορούν να προσαρμοστούν στο τηλεσκόπιο

ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ

- Υπάρχει σύστημα ελέγχου του τηλεσκοπίου από απόσταση. Το σύστημα ελέγχου του τηλεσκοπίου TCS (Telescope Control System) είναι φιλικό προς τον χρήστη και με τη βοήθεια ενός Η/Υ(PC) μπορούμε να έχουμε συνεχή ενημέρωση για την κατάσταση του τηλεσκοπίου και δυνατότητα επιλογών
- Υπάρχει αυτόματη διόρθωση στις συντεταγμένες ενός αστέρα για μετάπτωση, κλόνηση, αποπλάνηση φωτός, ατμοσφαιρική διάθλαση και πιθανά λάθη στην ευθυγράμμιση του τηλεσκοπίου
- Τα ηλεκτρονικά του συστήματος ελέγχου μπορούν να τοποθετηθούν σε απόσταση μέχρι 50 m
- Το λειτουργικό σύστημα που χρησιμοποιείται είναι DOS 6.0
- Ο πλήρης έλεγχος του τηλεσκοπίου γίνεται με μόνο 28 εντολές
- Υπάρχει ενσωματωμένη βιβλιοθήκη αστρονομικών αντικειμένων

- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν συστήματα αυτο-οδήγησης, διαθέσιμα στην αγορά
- Υπάρχει σύστημα αυτοπροστασίας του συστήματος μέσω Η/Υ για τη μη υπέρβαση ορισμένων ορίων
- Χειρισμός για οδήγηση, εστίαση και κίνηση του θόλου γίνονται από ειδικό φορητό χειριστήριο
- Υπάρχει σύστημα αυτόματης κίνησης του θόλου για να ακολουθεί το τηλεσκόπιο
- Έλεγχος της κίνησης του θόλου με τη βοήθεια ειδικού μοτέρ

ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ

- Φωτόμετρο καταμέτρησης παλμών τύπου SPP
- ST-8XMEI CCD κάμερα (SBIG) με ειδικά φωτομετρικά φίλτρα UBVRI για αστρική φωτομετρία
- Ειδικά φίλτρα για ηλιακές παρατηρήσεις
- Φίλτρο OIII για παρατηρήσεις νεφελωμάτων

2.3 CCD κάμερα

2.3.1 Εισαγωγή

Στην αστρονομική παρατήρηση αρχικά, τον ρόλο του ανιχνευτή της ακτινοβολίας τον έπαιζε το ανθρώπινο μάτι. Όμως οι αστρονόμοι ήθελαν οι παρατηρήσεις να έχουν αντικειμενικότητα και γι' αυτό αναζήτησαν ένα νέο μέσο καταγραφής και αποθήκευσης της πληροφορίας. Στα τέλη του 19^{ου} αιώνα το φωτογραφικό φιλμ αποτέλεσε το ιδανικό αυτό μέσο, διότι καταγράφονταν και αποθηκεύονταν οι πληροφορίες σ' αυτό, κι έτσι μπορούσαν να συγκρίνουν το ίδιο αντικείμενο σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.

Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα ο *Einstein* δημοσίευσε μια εργασία με θέμα το *φωτοηλεκτρικό φαινόμενο* για την οποία και τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ. Αυτή η ανακάλυψη είχε μεγάλη σημασία για την αστρονομία και αρκετά χρόνια αργότερα, την δεκαετία του 1960, στα *Bell Telephone Laboratories, USA*, στην προσπάθεια να κατασκευαστεί ένα νέου τύπου μνήμης τσιπ για Η/Υ, ανακαλύφθηκε ο καλύτερος ανιχνευτής ακτινοβολίας για την αστρονομία και όχι μόνο, το γνωστό σε όλους πλέον CCD.

Το CCD είναι τα αρχικά των λέξεων *Charge Coupled Devices*, που στα ελληνικά σημαίνει *στοιχεία συζευγμένου φορτίου*. Αποτελεί τον ιδανικότερο ανιχνευτή ακτινοβολίας καθώς καλύπτει ένα μεγάλο μέρος του φάσματος, από τις ακτίνες X έως το κοντινό υπέρυθρο. Η ικανότητά του να καταγράφει σχεδόν όλη την ακτινοβολία που δέχεται, αποτέλεσε το σημαντικότερο κριτήριο για την αντικατάσταση του φωτογραφικού φιλμ ως ανιχνευτή.

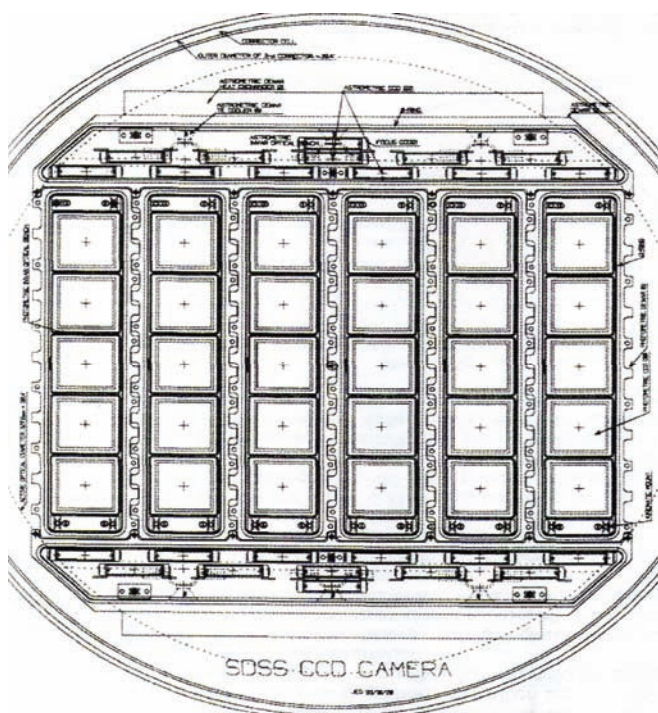
Όπως όλα τα όργανα, έτσι και οι CCD κάμερες έχουν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους, τα οποία αναφέρονται σε επόμενη παράγραφο, σε σχέση με άλλες μεθόδους ανίχνευσης ακτινοβολίας. Παρ' όλο όμως τα μειονεκτήματά τους, αποτελούν την αιχμή του δόρατος στην ανίχνευση της ακτινοβολίας σε όλα τα σύγχρονα παρατηρητήρια του πλανήτη αλλά ακόμα και σε διαστημικά τηλεσκόπια.

2.3.2 Αρχή λειτουργίας του CCD

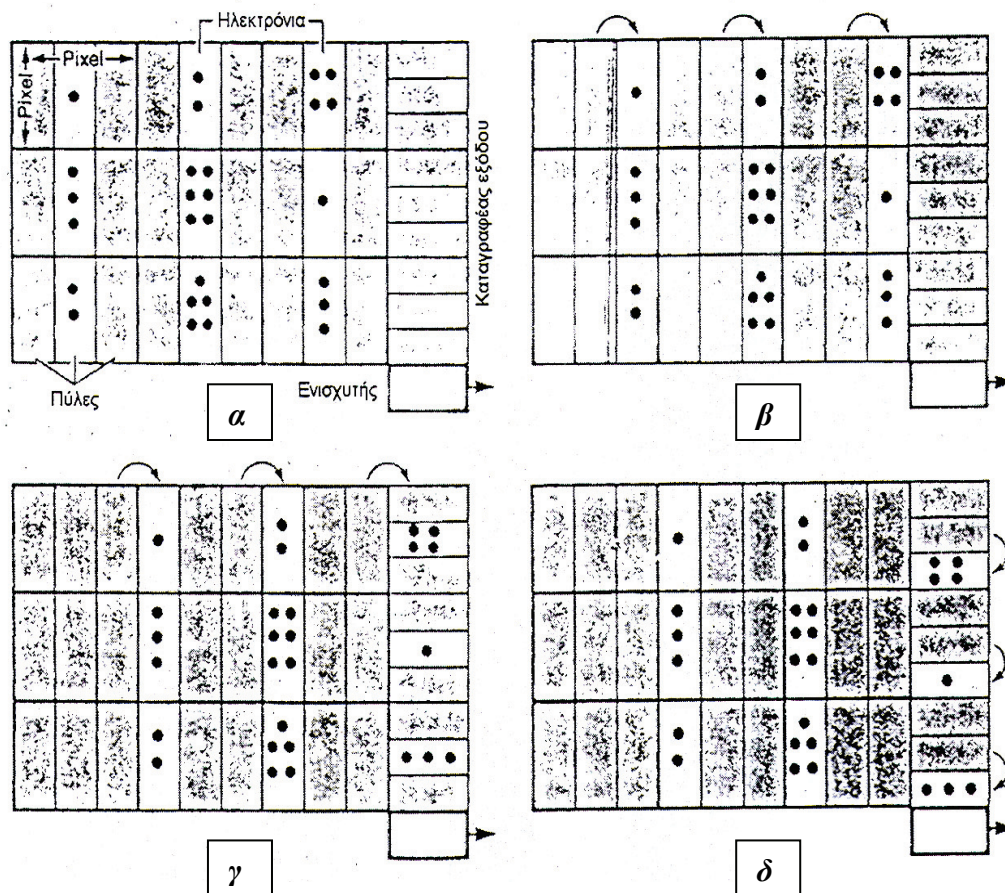
Το τσιπ του CCD αποτελείται από μικρούς ισεμβαδικούς στοιχειώδεις ανιχνευτές ακτινοβολίας, τα λεγόμενα *pixels*. Σύμφωνα με το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, όταν φωτόνια προσπίπτουν σε μέταλλα, προσδίδουν ενέργεια στα ηλεκτρόνια τους που συγκρατούνται ασθενέστατα από τα άτομα τους. Ως αποτέλεσμα έχουμε την απελευθέρωση των ηλεκτρονίων από τα άτομα και την κίνηση τους πάνω στο μέταλλο. Συγκεκριμένα όλη η ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου μετατρέπεται σε έργο εξαγωγής του ηλεκτρονίου (σπάσιμο των δεσμών των ηλεκτρονίων) από το άτομο και σε κινητική ενέργεια αυτού σύμφωνα με την παρακάτω σχέση :

$$E_{\text{φωτονίου}} = h\nu = W_{\text{εξαγωγής}} + E_{\text{κιν. e}} \quad (2.1)$$

Τα φωτόνια προσπίπτουν στα *pixels*, αυτά απελευθερώνουν φωτοηλεκτρόνια και συλλέγονται στις πλησιέστερες πύλες, οι οποίες είναι διακριτές περιοχές που ορίζονται από ένα πλέγμα ηλεκτροδίων πάνω στην επιφάνεια του τσιπ. Το κάθε *pixel* διαιρείται σε τρεις πύλες, εκ των οποίων η μία επιτρέπεται να αλλάζει τάση. Κατά την διάρκεια της έκθεσης η μεσαία πύλη είναι «ON» ενώ οι άλλες δύο «OFF» (σχήμα 2.2.α). Μετά το τέλος της έκθεσης, μέσω της αλλαγής της τάσης τα ηλεκτρόνια μεταφέρονται σε διπλανή πύλη με συστηματικό τρόπο, έτσι ώστε να κινούνται οριζόντια από το ένα *pixel* στο άλλο, έως ότου φθάσουν με διαδοχικά βήματα στην τελευταία πύλη της σειράς που ανήκουν τα *pixel* (σχήμα 2.2.β). Στο άκρο κάθε οριζόντιας γραμμής υπάρχει μια άλλη διάταξη από *pixels*, τα οποία μεταφέρουν, με τον ίδιο τρόπο όπως και πριν τα ηλεκτρόνια, αλλά αυτή την φορά κάθετα (σχήμα 2.2.γ). Αυτά τα *pixels* ονομάζονται *καταγραφείς φορτίου* και ολόκληρη η παράπλευρη διάταξη των *pixels*, *καταγραφέας εξόδου*. Εν συνεχεία ένα-ένα τα φορτία από τους καταγραφείς μεταφέρονται στον τελικό καταμετρητή φορτίων και μέσω του ενισχυτή καταλήγουν, σαν καταγεγραμμένη εικόνα πλέον, στην οθόνη του υπολογιστή (σχήμα 2.2.δ).



Σχ.2.1 Μωσαϊκό CCD με 30 επιμέρους chip.



Σχ.2.2 Οι παραπάνω εικόνες απεικονίζουν την κυκλοφορία των ηλεκτρονίων, από την απελευθέρωση τους από τα pixels έως ότου καταγραφούν σαν ολοκληρωμένη εικόνα στον Η/Υ (Νιάρχος 2002).

2.3.3 Παράμετροι ανιχνευτών ακτινοβολίας

Οι ανιχνευτές ακτινοβολίας χαρακτηρίζονται από κάποιες παραμέτρους, οι οποίες τους χαρακτηρίζουν, και φυσικά αποτελούν κριτήριο για την αξιολόγησή τους. Κάθε ανιχνευτής έχει την «προσωπικότητά» του, και ανάλογα με τον τύπο της παρατήρησης που επιθυμούμε να κάνουμε, κρίνουμε βάση αυτών των παραμέτρων προτού επιλέξουμε τον κατάλληλο. Οι παράμετροι είναι οι εξής :

- Φασματική ευαισθησία: Είναι η απόκριση του ανιχνευτή σε διάφορα μήκη κύματος
- Κβαντική απόδοση Q: Είναι ο λόγος των φωτονίων N που τελικά καταγράφονται από τον ανιχνευτή προς το πλήθος των προσπιπτόντων φωτονίων N' ,
$$Q = \frac{N}{N'}$$

- Θόρυβος: Είναι επιπλέον ηλεκτρόνια που καταγράφει ο ανιχνευτής λόγω θερμιονικής τάσης των ηλεκτρονικών συστημάτων του και προστίθενται στο τελικό αποτέλεσμα.
- Ανιχνευτική κβαντική απόδοση Q_D : Είναι ο λόγος της πληροφορίας του σήματος εξόδου προς την πληροφορία του σήματος εισόδου. Ο μαθηματικός ορισμός της είναι ο εξής:

$$Q_D = \frac{\left(\frac{S}{N}\right)_{OUT}^2}{\left(\frac{S}{N}\right)_{IN}^2}$$
, όπου **S** η ισχύς της ακτινοβολίας και **N** η ισχύς του θορύβου
- Γραμμικότητα απόκρισης (συνάρτηση μεταφοράς): Είναι η αναλογία των σημάτων εισόδου και εξόδου.
- Πολλαπλότητα: Είναι ο αριθμός των στοιχειωδών ανιχνευτών που διαθέτει ο ανιχνευτής.
- Χωρητικότητα αποθήκευσης της πληροφορίας: Είναι η ικανότητα αποθήκευσης της πληροφορίας, το μέγιστο μέγεθος πληροφορίας που μπορεί να αποθηκευτεί και ο χρόνος που απαιτείται από τον ανιχνευτή για να αποθηκεύσει αυτή την πληροφορία.
- Δυναμική περιοχή: Είναι η περιοχή της έντασης της ακτινοβολίας I_λ που μπορεί να ανιχνεύσει το σύστημα.
- Γραμμική διακριτική ικανότητα: Είναι το μέγεθος των στοιχειωδών ανιχνευτών του συστήματος κι εκφράζει την ελάχιστη χωρική απόσταση μεταξύ δύο ταυτόχρονα προσπιπτόντων κατανομών φωτονίων (πληροφορία) στην οποία ο ανιχνευτής μπορεί να διακρίνει και τις δύο.
- Χρόνος απόκρισης: Είναι ο χρόνος ο οποίος απαιτείται για να αντιδράσει ο ανιχνευτής σε διαδοχικές μεταβολές της έντασης της ακτινοβολίας.
- Λειτουργικότητα: Εκφράζει το πόσο εύχρηστος είναι ο ανιχνευτής στη συλλογή και αποθήκευση της πληροφορίας.

2.3.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του CCD

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του CCD είναι τα παρακάτω:

- i) Μεγάλη διακριτική ικανότητα: Η διακριτική ικανότητα του CCD εξαρτάται αυστηρά από τον αριθμό των στοιχειωδών ανιχνευτών που διαθέτει. Όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των pixels, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ανάλυση της πληροφορίας που καταγράφουμε.
- ii) Μεγάλη κβαντική απόδοση: Η κβαντική απόδοση του CCD είναι περίπου 90%, και ίσως αποτελεί την σημαντικότερη από τις παραμέτρους. Είναι εξαιρετικά ανώτερο συγκριτικά με άλλους φωτοανιχνευτές στο υπέρυθρο μέρος του H/M

φάσματος, ενώ υστερεί στο υπεριώδες σε σχέση με τις φωτοηλεκτρονικές διατάξεις εικόνας.

iii) Ευρεία φασματική περιοχή απόκρισης: Η φασματική ευαισθησία του CCD εκτείνεται από 2.000 Å έως 12.000 Å.

iv) Μεγάλη δυναμική περιοχή: Της τάξης των δεκάδων χιλιάδων ADU's.

v) Υψηλή φωτομετρική ακρίβεια.

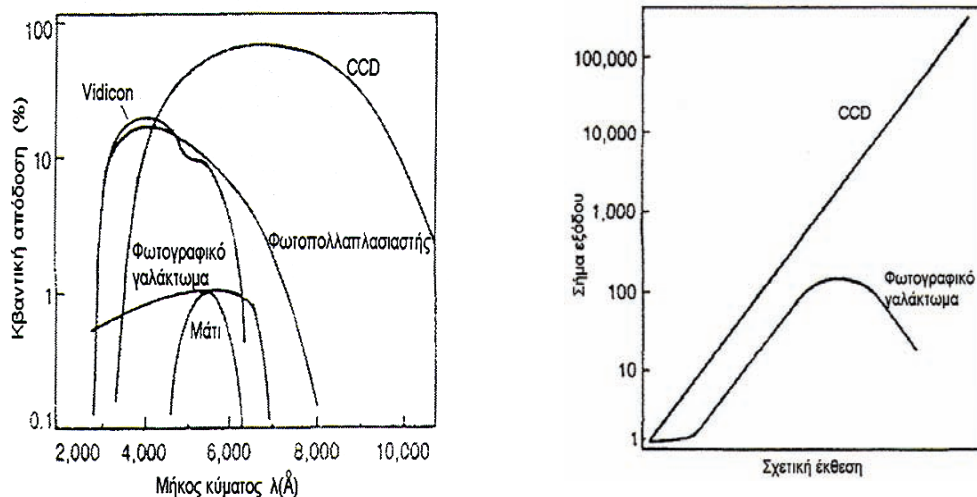
vi) Γραμμικότητα απόκρισης.

Τα μειονεκτήματα του CCD είναι τα εξής:

i) Τεχνική μείωσης θορύβου: Αποτελεί βασικό μειονέκτημα των CCD διότι απαιτείται ισχυρή ψύξη έως και $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ έτσι ώστε να μειωθεί ο θερμικός θόρυβος, κάτι που δεν είναι πάντα εφικτό.

ii) Ανομοιόμορφη απόκριση των pixels στην προσπίπτουσα ακτινοβολία.

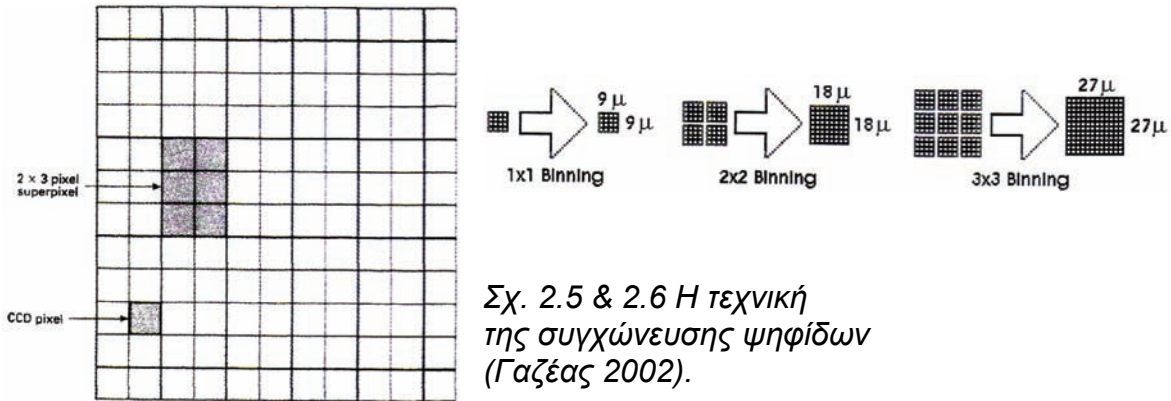
iii) Όγκος δεδομένων και χρήση Η/Υ: Αμελητέο μειονέκτημα των CCD, αφού πλέον η τεχνολογία έχει εξελιχθεί αρκετά και μας παρέχει σκληρούς δίσκους πολύ μεγάλης χωρητικότητας. Όμως η απαραίτητη σύνδεση του CCD με Η/Υ μπορεί να θεωρηθεί ίσως μειονέκτημα, διότι δεν αποτελεί ανεξάρτητο ανιχνευτή, όπως η φωτογραφική πλάκα. Όμως και αυτό αυτοαναιρείται διότι μέσω του Η/Υ επεξεργαζόμαστε τις εικόνες και έχουμε πολύ καλύτερα αποτελέσματα.



Σχ.2.3 & 2.4 Στα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται η γραμμικότητα της απόκρισης του CCD (δεξιά) και η σύγκρισή του με άλλους φωτοανιχνευτές (αριστερά) (Νιάρχος 2002).

2.3.5 Συγχώνευση ψηφίδων

Η μέθοδος της συγχώνευσης των pixels, αποτελεί μια ειδική τεχνική που χρησιμοποιείται προκειμένου να έχουμε καλύτερα ποσοτικά αποτελέσματα. Ενοποιούμε ένα πλήθος από pixels φτιάχνοντας ένα μεγαλύτερο το οποίο καλείται superpixel. Ουσιαστικά τα φωτόνια που έπεφταν στα επιμέρους pixels τώρα πέφτουν στο μεγαλύτερο (παρακάτω σχήματα), αυξάνοντας έτσι τον λόγο σήματος προς θόρυβο. Με αυτή την τεχνική μειώνουμε την διακριτική ικανότητα του CCD και φυσικά την ανάλυση της πληροφορίας, και την χρησιμοποιούμε ευρέως στην αστρική φωτομετρία, διότι μας ενδιαφέρει μόνο η ροή της ακτινοβολίας και όχι η λεπτομέρεια της πληροφορίας όπως λόγω χάρη για πλανητική φωτογράφιση.



2.3.6 Πηγές θορύβου

2.3.6.1 Ο λόγος σήματος προς θόρυβο

Παρόλα τα πλεονεκτήματα του CCD που το έχουν καθιερώσει ως βασικό ανιχνευτή φωτός για τις αστρονομικές παρατηρήσεις, υπάρχει και ο παράγοντας θόρυβος που υπεισέρχεται στις εικόνες. Όμως, με την κατάλληλη επεξεργασία της εικόνας, όπως θα δούμε, ο θόρυβος σχεδόν εξαλείφεται και το αποτέλεσμα είναι πολύ ικανοποιητικό και επιβεβαιώνει πλήρως την προτίμησή μας για το CCD.

Όπως προαναφέραμε το CCD έχει, εν γένει, κβαντική απόδοση της τάξης του 90%, και πολύ μεγάλη γραμμικότητα απόκρισης. Σημαντικός παράγοντας είναι και ο λόγος σήματος προς θόρυβο $\frac{S}{N}$ (όπου S τα φωτοηλεκτρόνια και N τα ηλεκτρόνια που δημιουργήθηκαν λόγω θορύβου) που καθορίζει την ποιότητα του αποτελέσμάς μας. Τα ηλεκτρόνια που τελικά καταγράφονται, προέρχονται κατά ένα μεγάλο μέρος από τα προσπίπτοντα φωτόνια στα pixels, και τα υπόλοιπα προέρχονται από τις πηγές θορύβου, οι οποίες αναφέρονται στις παρακάτω παραγράφους, όπως και ο τρόπος με τον οποίο απαλλασσόμαστε από αυτές.

2.3.6.2 Θόρυβος αποφόρτισης

Όπως περιγράψαμε στην αρχή λειτουργίας του CCD, για να καταγραφούν τα φωτοηλεκτρόνια, αυτά διαγράφουν αρχικά μια οριζόντια πορεία στα διαδοχικά pixels έως ότου φθάσουν στον καταγραφέα εξόδου. Όμως κατά την διάρκεια της έκθεσης παράγονται επιπλέον ηλεκτρόνια σε κάθε φωτοδίοδο, τα οποία «συνταξιδεύουν» με τα φωτοηλεκτρόνια προς τους καταγραφείς, και παράγουν τον λεγόμενο *θόρυβο αποφόρτισης*. Επιπλέον υπάρχουν και απώλειες ηλεκτρονίων κατά την μεταφορά τους σε διπλανό pixel.

Αυτός ο θόρυβος που δημιουργείται από τα επιπλέον ηλεκτρόνια, καθώς και η απώλεια των ηλεκτρονίων (φωτοηλεκτρονίων και θορύβου) κατά την μεταφορά τους, αποτελεί κριτήριο για την χρήση ή αγορά ενός CCD. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε ότι μία καλή αστρονομική CCD κάμερα έχει θόρυβο αποφόρτισης περίπου 2-3 ηλεκτρόνια ανά pixel.

2.3.6.3 Θερμικός θόρυβος

Από την φυσική στερεάς κατάστασης γνωρίζουμε ότι σε μία δίοδο p-n δημιουργείται στην τομή των περιοχών **p** (οπές) και **n** (ηλεκτρόνια) η *περιοχή απογύμνωσης*. Όταν ο αριθμός των φορτίων κάποιας περιοχής υπερέχει έναντι της άλλης τότε επικρατεί το φαινόμενο της *διάχυσης* των φορέων πλειονότητας στην αντίθετου τύπου περιοχή, ενώ συνολικά η δίοδος είναι ουδέτερα φορτισμένη. Η διάχυση οπών ή ηλεκτρονίων στην αντίθετου τύπου περιοχή, συνιστά κίνηση φορτίων και κατ' επέκταση ηλεκτρικό *ρεύμα διάχυσης* i_d . Εντός της περιοχής απογύμνωσης σχηματίζονται δύο αντίθετα φορτισμένες περιοχές. Η θετικά φορτισμένη περιοχή βρίσκεται προς το μέρος της n-περιοχής και η αρνητικά φορτισμένη περιοχή βρίσκεται προς το μέρος της p-περιοχής. Η περιοχή απογύμνωσης είναι ουσιαστικά η περιοχή ισορροπίας των δυνάμεων Coulomb, και παρατηρείται και πάλι κίνηση φορτίων, από την θετική υποπεριοχή στην αρνητική και το αντίστροφο, με την ταυτόχρονη εμφάνιση του *ρεύματος κόρου* i_s έως ότου επέλθει ισορροπία. Για περαιτέρω κίνηση φορτίων από την p στην n περιοχή απαιτείται προσφορά ενέργειας στα φορτία. Η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο περιοχών ονομάζεται *θερμική τάση* και είναι ευθέως ανάλογη της θερμοκρασίας του χώρου στον οποίο βρίσκεται το CCD. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε ότι σε θερμοκρασία δωματίου η θερμική τάση παίρνει την τιμή $V = 26$ mVolts.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι οι φωτοδίοδοι του CCD παράγουν ηλεκτρόνια, τα οποία καταγράφονται, λόγω θερμικής τάσης ακόμα και με τον φωτοφράκτη κλειστό. Το ρεύμα που παράγεται λόγω αυτής της τάσης ονομάζεται *ρεύμα σκότους*, ενώ ο θόρυβος που υπεισέρχεται στην εικόνα ονομάζεται *θερμικός θόρυβος*.

Για να μειώσουμε όσο το δυνατόν περισσότερο τον θερμικό θόρυβο, ψύχουμε όσο το δυνατόν περισσότερο την κάμερα ώσπου να φτάσουμε το όριο του κατασκευαστή. Η ένταση του ρεύματος σκότους μειώνεται κατά έναν παράγοντα 2 κάθε φορά που η θερμοκρασία μειώνεται κατά 6°C .

Όμως και πάλι ο θερμικός θόρυβος δεν εξαφανίζεται εντελώς και η μόνη λύση που απομένει είναι να αφαιρέσουμε στατιστικά τα ηλεκτρόνια που τον προκαλούν. Οι μονάδες μέτρησης του ρεύματος σκότους είναι ηλεκτρόνια/sec/pixel, και το πλήθος των ηλεκτρονίων που προκαλούν τον θόρυβο δίνονται από την στατιστική

σχέση:

$$N\left(\frac{e^-}{\text{pixel}}\right) = \sqrt{I\left(\frac{e^-}{\text{sec} * \text{pixel}}\right) * t_{\text{έκθεσης}} \text{ (sec)}} \quad (2.2)$$

Στην τελική εικόνα, γνωρίζουμε τα ηλεκτρόνια που προήλθαν από κάθε pixel, τα λεγόμενα counts, και αφαιρώντας τον θόρυβο στατιστικά πετυχαίνουμε καλύτερο αποτέλεσμα.

Σε αρκετές περιπτώσεις όμως, όταν η τεχνολογία της κάμερας δεν είναι πολύ προηγμένη και δεν της παρέχεται ικανοποιητική ψύξη, τα αποτελέσματα «υποφέρουν» έντονα από τον θερμικό θόρυβο, ακόμα και μετά την αφαίρεση του στατιστικού θορύβου. Αυτός είναι και ένας από τους πολλούς λόγους που τα αστεροσκοπεία κατασκευάζονται σε απομονωμένες περιοχές, και σε κορυφές βουνών, διότι εκεί επικρατούν πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, και βοηθούν στην καλύτερη ψύξη των ηλεκτρονικών συστημάτων της κάμερας.

2.3.6.4 Θόρυβος φωτονίων από το παρατηρούμενο αντικείμενο

Ο αριθμός των φωτονίων που προσπίπτουν σε κάθε ρixel δεν είναι σταθερός σε συνάρτηση με τον χρόνο, αλλά υπόκειται και πάλι σε στατιστικές διακυμάνσεις. Οι πιθανές αιτίες που προκαλούν αυτές τις διακυμάνσεις, είναι η τυχαιότητα με την οποία εκπέμπει ο αστέρας, αλλά και η μεταβολή του μετώπου κύματος μπροστά από το τηλεσκόπιο, στην οποία οφείλεται η διάθλαση ορισμένων φωτονίων με αποτέλεσμα την αυξομείωση της λαμπρότητας του αστέρα που σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να συγχέεται με φυσικά αίτια του ίδιου του αστέρα. Οι θόλοι των αστεροσκοπειών, προσδίδουν σε μεγάλο βαθμό σταθερότητα στο μέτωπο κύματος μπροστά από το τηλεσκόπιο, όμως οι κινήσεις των αερίων μαζών της ατμόσφαιρας της γης, μπορούν και πάλι να διαταράξουν το είδωλο του αστέρα. Παρ' όλα αυτά, ο αριθμός των ηλεκτρονίων που προέρχονται από κάθε ρixel, κυμαίνεται γύρω από μία μέση τιμή. Ο φωτονικός θόρυβος που υπεισέρχεται στις μετρήσεις μας, συνδέεται με τον αριθμό των ολικών ηλεκτρονίων που καταγράφονται με την εξής στατιστική σχέση:

$$N_{\text{φωτ.θορύβου}} = \sqrt{N_{\text{ΟΛΙΚΟ}}} \quad (2.3)$$

Άρα γνωρίζοντας τα counts από κάθε ρixel, μπορούμε να αφαιρέσουμε και τον φωτονικό θόρυβο.

2.3.6.5 Θόρυβος υποβάθρου

Οι κύριες συνιστώσες αυτού του θορύβου είναι: i) Το διάχυτο φως από το όλες τις πηγές του σύμπαντος, ii) Το Σεληνόφως, iii) Κοντινές τεχνητές πηγές φωτός (π.χ λάμπες, φωτορύπανση), iv) Το ζωδιακό φως, v) Κοσμική ακτινοβολία



Η Σελήνη αποτελεί μια σημαντική πηγή φωτεινού υποβάθρου του ουρανού και καλό είναι να αποφεύγεται η παρατήρηση στόχων που βρίσκονται κοντά της σε χρονικές περιόδους μεταξύ πρώτου και τελευταίου τετάρτου, διότι σε αυτήν την περίοδο η διάχυση του φωτός της στην ατμόσφαιρα της γης είναι πολύ έντονος. Αποτέλεσμα αυτού του θορύβου είναι η παραπάνω εκπομπή

Εικ.2.3 Στη παραπάνω εικόνα παρατηρούμε την επίδραση της Σελήνης στην φωτορύπανση. Αριστερά φαίνεται ο αστερισμός του Ωρίωνα, πάνω από την Σελήνη το ανοικτό σμήνος των Πλειάδων, ενώ είναι εμφανής η «απαγορευμένη» περιοχή παρατήρησης γύρω από τον σεληνιακό δίσκο λόγω του υπερβολικού θορύβου που θα εισάγει στις παρατηρήσεις.

φωτοηλεκτρονίων από τα pixels, λόγω της αύξησης του αριθμού των προσπιπτόντων φωτονίων από εξωτερικές πηγές, και όχι από το παρατηρούμενο αντικείμενο. Αυτός ο θόρυβος οριοθετεί ουσιαστικά το μέγεθος του αστέρα που

μπορούμε να παρατηρήσουμε με το εκάστοτε τηλεσκόπιο, ενώ σε λαμπρά αντικείμενα είναι αμελητέος. Στην περίπτωση παρατήρησης αμυδρών αντικειμένων, πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη και να αφαιρείται από το τελικό αποτέλεσμα.

2.3.7 Σχηματισμός εικόνας με CCD και επεξεργασία

Σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιάσουμε το σημαντικότερο αποτέλεσμα της χρήσης του CCD στην παρατηρησιακή αστρονομία, την εικόνα του αστρικού αντικειμένου, καθώς και την επεξεργασία που υφίσταται προκειμένου να πάρουμε ικανοποιητική και αντικειμενική πληροφορία.

2.3.7.1 Σχηματισμός εικόνας με CCD

Επάνω στα pixels προσπίπτουν φωτόνια με κάποιο χρονικό ρυθμό. Εφόσον γνωρίζουμε εκ κατασκευής του CCD το εμβαδόν του κάθε pixel, μπορούμε να μετρήσουμε το γνωστό αστροφυσικό μέγεθος, την ένταση της ακτινοβολίας I_v . Η συνολική ένταση που μετράμε είναι η $I(x,y)$, όπου x και y οι διαστάσεις του pixel. Αυτή όμως η ένταση είναι το άθροισμα όλων των θορύβων που υπεισέρχονται από τα ηλεκτρονικά συστήματα του CCD και μας δίνει την μη επεξεργασμένη εικόνα. Η πραγματική ένταση $i(x,y)$ που προέρχεται από το αντικείμενο που παρατηρούμε, είναι το ζητούμενο μέγεθος και αυτό που θα πρέπει να απεικονίζει η τελική εικόνα. Οι παράμετροι που υπεισέρχονται σαν θόρυβος στην ακατέργαστη εικόνα είναι οι εξής:

- **Bias – $b(x,y)$** : Πρόκειται για το φορτίο που προϋπάρχει στη CCD, πριν τη φόρτιση και είναι σταθερό και ανεξάρτητο του χρόνου έκθεσης και της θερμοκρασίας.
- **Dark – $d(x,y,t,T)$** : Πρόκειται για τον θερμικό θόρυβο που παράγεται κατά την έκθεση και είναι άμεσα εξαρτημένος από τον χρόνο έκθεσης και την θερμοκρασία.
- **Flat field – $r(x,y)$** : Πρόκειται για τον παράγοντα απόκρισης του pixel, είναι σταθερός και ανεξάρτητος του χρόνου έκθεσης και της θερμοκρασίας.

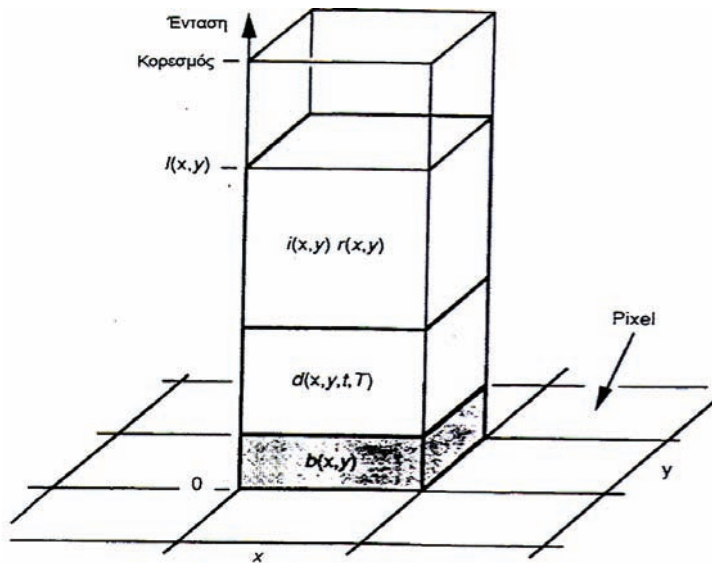
Επομένως μπορούμε να εκφράσουμε την ένταση της ακτινοβολίας συναρτήσει αυτών των παραμέτρων με την παρακάτω σχέση:

$$I(x,y) = b(x,y) + d(x,y,t,T) + i(x,y) * r(x,y) \quad (2.4)$$

Επιλύοντας ως προς $i(x,y)$ παίρνουμε την σχέση:

$$i(x,y) = \{I(x,y) - b(x,y) - d(x,y,t,T)\} / r(x,y) \quad (2.5)$$

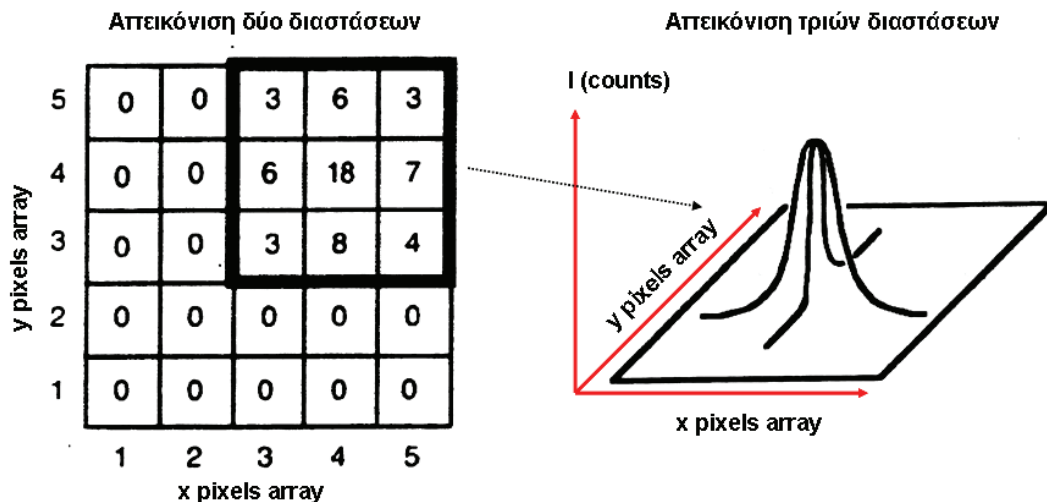
που είναι και το ζητούμενο αποτέλεσμα.



Σχ.2.7 Το διπλανό σχεδιάγραμμα απεικονίζει τις συνιστώσες που σχηματίζουν μια CCD εικόνα (Νιάρχος 2002).

2.3.7.2 Η πληροφορία της CCD εικόνας

Μετά την έκθεση του CCD στην ακτινοβολία, τα φωτοηλεκτρόνια που έχουν εκπεμφθεί δημιουργούν την ψηφιακή απεικόνιση, δηλαδή την εικόνα του πεδίου. Όπως είπαμε από την κάθε στοιχειώδη ψηφίδα εκπέμπεται ένας συγκεκριμένος αριθμός ηλεκτρονίων ο οποίος και καταγράφεται στην τελική εικόνα, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Είμαστε πλέον σε θέση να επεξεργαστούμε αυτή την εικόνα ανάλογα με το είδος της έρευνας που διεξάγουμε. Ένας από αυτούς τους τρόπους, που εφαρμόζεται στην αστρονομία περιγράφεται εκτενώς στο επόμενο κεφάλαιο. Πρωτίστως λοιπόν, μία CCD εικόνα περιλαμβάνει την πληροφορία από το αστρικό πεδίο, δηλαδή την μετρούμενη ροή που παίρνουμε.



Σχ.2.8 Ο αριθμός των counts (εντός των μικρών τετραγώνων) που καταγράφονται σε κάθε στοιχειώδη ψηφίδα του CCD (αριστερή εικόνα). Οι αύξοντες αριθμοί αντιστοιχούν στις γραμμές και τις στήλες του CCD και κάθε ζεύγος τέτοιων αριθμών αντιστοιχούν στις συντεταγμένες μίας στοιχειώδους ψηφίδας. Στην δεξιά εικόνα παρουσιάζεται η τρισδιάστατη απεικόνιση του CCD και η Gaussian καμπύλη που περιγράφει την ένταση της ακτινοβολίας στις ψηφίδες που περικλείονται στο έντονο πλαίσιο του αριστερού σχήματος.

Δευτερευόντως όμως, μέσα στην εικόνα αποθηκεύονται και επιπρόσθετες πληροφορίες που χρησιμοποιούνται κυρίως για λόγους οργάνωσης. Αυτές οι πληροφορίες αποθηκεύονται στο *fits header* της εικόνας και είναι οι εξής:

- Bit: Ο αριθμός των Bits που εξάγει το CCD (π.χ 16, 8, 4)
- NAXIS: Ο αριθμός των αξόνων του CCD
- NAXIS1: Ο αριθμός των ψηφίδων στον οριζόντιο άξονα
- NAXIS2: Ο αριθμός των ψηφίδων στον κατακόρυφο άξονα
- INSTRUMENT: Το μοντέλο της CCD
- DATE-OBS: Η ημερομηνία της παρατήρησης στη μορφή YYYY-MM-DD
- TIME-OBS: Ο χρόνος κατά τον οποίο ξεκίνησε η έκθεση στη μορφή HH:MM:SS
- EXPTIME: Ο χρόνος έκθεσης της φωτογραφίας
- SET-TEMP: Η θερμοκρασία του CCD την οποία έχουμε θέσει
- CCD-TEMP: Η θερμοκρασία του CCD κατά την έναρξη της έκθεσης
- XPIXSZ: Το μέγεθος του pixel σε μm μετά την συγχώνευση των ψηφίδων στον οριζόντιο άξονα
- YPIXSZ: Το μέγεθος του pixel σε μm μετά την συγχώνευση των ψηφίδων στον κατακόρυφο άξονα
- XBINNING: Η συγχώνευση των ψηφίδων στον οριζόντιο άξονα
- YBINNING: Η συγχώνευση των ψηφίδων στον κατακόρυφο άξονα
- FILTER: Το φωτομετρικό φίλτρο που χρησιμοποιήθηκε στην έκθεση
- IMAGETYP: Ο τύπος της έκθεσης (π.χ light, dark, bias, flat)
- EGAIN: Η ηλεκτρονική ενίσχυση σε μονάδες e⁻/ADU
- FOCALLEN: Η εστιακή απόσταση του τηλεσκοπίου σε mm
- APTDIA: Η ενεργή διάμετρος του τηλεσκοπίου σε mm
- APTAREA: Το αστρικό πεδίο που περιέχεται στην εικόνα σε mm²
- SWCREATE: Το λογισμικό που χρησιμοποιούμε για τον έλεγχο της CCD
- SWOWNER: Ο ιδιοκτήτης του λογισμικού ή ο παρατηρητής
- INPUTFMT: Η μορφή του αρχείου (π.χ fit, fts, fits)

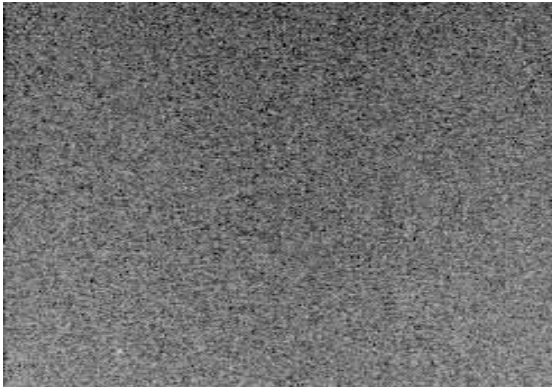
Ο χρόνος και η ημερομηνία που καταγράφονται στην εικόνα λαμβάνονται από τον H/Y στον οποίο βρίσκεται το λογισμικό ελέγχου της CCD. Για να είμαστε σίγουροι ότι το ρολόι του H/Y δουλεύει σωστά, είμαστε συνδεδεμένοι μονίμως μέσω του διαδικτύου με έναν εξυπηρετητή χρόνου (time-server) ο οποίος ανά τακτά χρονικά διαστήματα της τάξεως των 30 sec διορθώνει αυτόματα τον χρόνο του H/Y.

2.3.7.3 Επεξεργασία εικόνας

Η επεξεργασία των εικόνων που λαμβάνουμε από την CCD κάμερα, αποτελείται από τρία στάδια. Λαμβάνουμε εικόνες **dark**, **bias** και **flat field**, και εν συνεχεία αφαιρούμε τις δύο πρώτες παραμέτρους από την φωτογραφία, και διαιρούμε όλες τις φωτογραφίες με την τρίτη παράμετρο. Τελικά κρατάμε την εικόνα που προκύπτει από την παραπάνω διαδικασία. Αναλυτικότερα τα στάδια παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους.

Εικόνα αντιστάθμισης – Bias

Αυτή η εικόνα (εικ.2.4) λαμβάνεται σε πλήρες σκοτάδι, με πολύ μικρό χρόνο έκθεσης (σχεδόν μηδενικό) πριν και στο τέλος της παρατήρησης. Για να απαλλαγούμε από τις στατιστικές διακυμάνσεις του φωτός στην τελική εικόνα



προσθέτουμε σε κάθε ρixel ένα σταθερό φορτίο. Φυσικά στην τελική φωτογραφία αυτό το αντιστάθμισμα θα αφαιρεθεί. Για την εικόνα bias ισχύει:

$$I_b(x,y) = b(x,y) \quad (2.6)$$

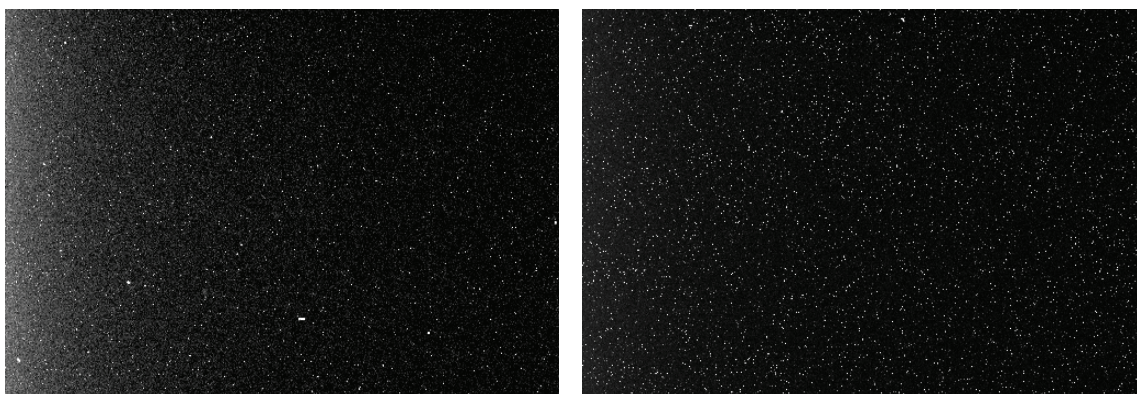
Σαν εικόνα Bias στην επεξεργασία παίρνουμε την διάμεσο αρκετών εκθέσεων, για την ελάττωση του θορύβου που υπεισέρχεται κατά την λήψη τους.

Εικ.2.4 Εικόνα Bias.

Εικόνα σκότους – Dark image

Αυτή η εικόνα λαμβάνεται με κλειστό τον φωτοφράκτη της κάμερας, και έχει χρόνο έκθεσης όσο και οι εικόνες που θα επεξεργαστούμε. Η εικόνα αυτή αντιστοιχεί στον θερμικό θόρυβο του CCD και είναι ανάλογη της θερμοκρασίας. Κανονικά μετά από κάθε λήψη εικόνας που θέλουμε να επεξεργαστούμε θα έπρεπε να λαμβάνουμε και την αντίστοιχη Dark εικόνα ώστε να είναι αντιπροσωπευτική του θορύβου του CCD εκείνη την στιγμή. Πρακτικά όμως αυτό δεν γίνεται γιατί χάνεται χρόνος παρατήρησης, οπότε λαμβάνουμε ένα πλήθος εικόνων dark πριν ή μετά την παρατήρηση, με χρόνο έκθεσης ίδιο με αυτόν που λαμβάνουμε τις φωτογραφίες του παρατηρούμενου αντικειμένου για κάθε φίλτρο που χρησιμοποιούμε, και εν συνεχεία, μέσω του προγράμματος παίρνουμε τη διάμεσο αυτών των εικόνων η οποία και αφαιρείται από όλες τις εικόνες του παρατηρούμενου αντικειμένου. Συνίσταται για χρόνους έκθεσης μικρότερους των 5 sec να μην λαμβάνονται εικόνες dark, ώστε να μην εισάγεται θόρυβος. Για την εικόνα dark ισχύει:

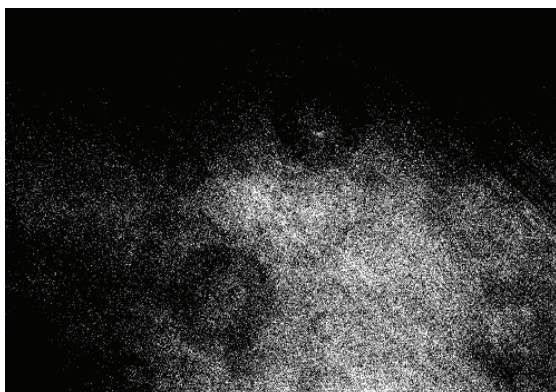
$$I_d = b(x,y) + d(x,y,t,T) \quad (2.7)$$



Εικ.2.5 & 2.6 Οι παραπάνω εικόνες dark είχαν έκθεση 120 sec σε θερμοκρασία -27°C (αριστερά) και 0°C (δεξιά) και είναι προφανής η εξάρτηση του θερμικού θορύβου από την θερμοκρασία.

Εικόνα απόκρισης – Flat field

Αυτή η εικόνα λαμβάνεται διότι τα pixels στο CCD δεν έχουν όλα την ίδια ευαισθησία και κατ' επέκταση την ίδια απόκριση. Ουσιαστικά κάποια pixels



Εικ.2.7 Εικόνα Flat field.

παράγουν περισσότερα φωτοηλεκτρόνια από κάποια άλλα, με αποτέλεσμα η εικόνα να μην έχει ομοιόμορφη λαμπρότητα. Σε αυτή την εικόνα είναι ορατά και τα αποτελέσματα της σκέδασης του φωτός από κόκκους σκόνης στην επιφάνεια των οπτικών του συστήματος (κάτοπτρα τηλεσκοπίου, φίλτρα, φακός της κάμερας), τα οποία αλλοιώνουν την ποιότητα της εικόνας. Επίσης, λόγω vignetting, δηλαδή ανομοιόμορφου φωτι-

σμού του πεδίου από έκκεντρο φωτισμό, η λαμπρότητα της εικόνας φθίνει από το κέντρο προς την περιφέρεια. Η τεχνική με την οποία λαμβάνονται οι εικόνες flat είναι η εξής: Λαμβάνουμε πλήθος εικόνων flat, με κλειστό τον αστροστάτη του τηλεσκοπίου, έτσι ώστε τα pixels να βρίσκονται ακριβώς στην ίδια θέση κατά την λήψη της εικόνας του ουρανού και της αντίστοιχης εικόνας flat. Για να λάβουμε μια εικόνα flat θα πρέπει να φωτογραφήσουμε μία ομοιόμορφα φωτισμένη επιφάνεια, και ο χρόνος έκθεσης να είναι τέτοιος ώστε αφενός ο θόρυβος αποφόρτισης και ο φωτονικός θόρυβος να είναι αμελητέοι, και αφετέρου κανένα pixel να μην φθάσει στον κόρο. Συνήθως χρησιμοποιούμε χρόνο έκθεσης 1-3 sec, και φθάνουμε περίπου στα 2/3 της δυναμικής περιοχής του CCD. Ο ουρανός κατά το λυκαυγές ή το λυκόφως αποτελεί μία ιδανική ομοιόμορφα φωτισμένη επιφάνεια με την προσοχή πάντα να μην έχουν εμφανιστεί αστέρια. Για τη λήψη εικόνων flat κατά το λυκόφως θα πρέπει η κάμερα να έχει ήδη ψυχθεί από πριν, έτσι ώστε να μην εισαχθεί παραπάνω θερμικός θόρυβος. Εναλλακτική λύση αποτελεί μια τεχνητή ομοιόμορφα φωτισμένη επιφάνεια, που τοποθετείται μπροστά ακριβώς και κάθετα στο τηλεσκόπιο. Προσοχή επίσης απαιτεί η εστίαση του τηλεσκοπίου, αφού πρέπει να χρησιμοποιηθεί η ίδια ακριβώς, με αυτήν κατά την βραδινή παρατήρηση, διότι η διαδρομή που θα ακολουθήσει το φως πρέπει να είναι ακριβώς η ίδια. Όλη η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα φίλτρα, και η εικόνα που προκύπτει διαιρεί όλες τις εικόνες του παρατηρούμενου αντικειμένου.

Εικόνες flat πρέπει να λαμβάνονται καθημερινά, αλλά αν ο στόχος παρατήρησης δεν αλλάξει, οπότε η εστίαση δεν αλλάζει, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις ίδιες εικόνες για μερικές διαδοχικές ημέρες.

Για την εικόνα flat ισχύει σχέση: $I_f = b(x,y) + r(x,y) \times \text{σταθερά}$ (2.8)

Στην παραπάνω σχέση δεν λαμβάνουμε υπ' όψη την συνιστώσα του θερμικού θορύβου $d(x,y,t,T)$ διότι θεωρείται αμελητέος.

Το ζητούμενο αποτέλεσμα είναι η ένταση της παρατηρούμενης πηγής $i(x,y)$, από την καταγραφόμενη ένταση στον ανιχνευτή $I(x,y)$. Η σχέση που μας δίνει αυτή την ένταση είναι η παρακάτω:

$$i(x,y) = \frac{I(x,y) - I_a(x,y)}{I_f(x,y) - I_b(x,y)} \times \text{σταθερά} \quad (2.9)$$

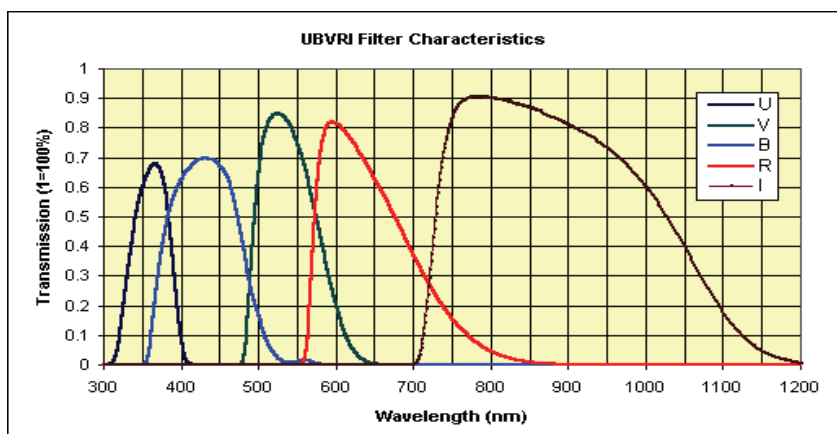
Η επεξεργασία των εικόνων και το τελικό αποτέλεσμα παρατίθενται στο επόμενο κεφάλαιο.

2.3.8 Εφαρμογή του CCD στην αστρική φωτομετρία

Στην αστρική φωτομετρία με CCD κάμερα χρησιμοποιούμε τα φίλτρα ακτινοβολίας του συστήματος **UBVRI Bessell**. Τα γράμματα της προηγούμενης συντομογραφίας είναι τα αρχικά των λέξεων ULTRAVIOLET-BLUE-VISUAL-RED-INFRARED τα οποία είναι τα φίλτρα που χρησιμοποιούμε για την λήψη των εικόνων.

Πίνακας 2.1 Χαρακτηριστικά των φίλτρων που χρησιμοποιούμε στις παρατηρήσεις μας. Αναγράφονται οι κωδικοί που χρησιμοποιεί η Γερμανική υαλουργία Schott

| FILTER | ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΦΙΛΤΡΟΥ (πάχος 5mm) | Μέγιστο απόκρισης | Εύρος (FWHM) |
|----------|--------------------------------|-------------------|--------------|
| U | 1mm + 2mm S8612 + 2mm WG295 | 3670 | 660 |
| B | 2mm GG385 + 1mm BG1 + 2mm BG39 | 4360 | 940 |
| V | 2mm GG495 + 3mm BG40 | 5450 | 880 |
| R | 3mm OG570 + 2mm KG3 | 6380 | 1380 |
| I | 2mm RG9 + 3 mm WG295 | 8000 | 1490 |



Σχ.2.9 Η διαπερατότητα των φωτομετρικών φίλτρων UBVRI (www.sbig.com).

2.3.8.1 Η αστρική φωτομετρία και η σταθερά του μεγέθους

Όπως περιγράψαμε στις προηγούμενες παραγράφους, το CCD έχει την ικανότητα να καταγράφει τον αριθμό των προσπιπτόντων φωτονίων ή καλύτερα την ένταση ακτινοβολίας από κάποια φωτεινή πηγή. Ο αριθμός των φωτοηλεκτρονίων που παράγονται από τα pixels είναι ευθέως ανάλογος, μέσω της κβαντικής απόδοσης του CCD, με τον αριθμό φωτονίων που έπεσαν πάνω σ' αυτά. Άρα μπορούμε να μετατρέψουμε την ροή της ακτινοβολίας **F** σε ροή ηλεκτρονίων και να προσδιορίσουμε το φαινόμενο μέγεθος της πηγής που την εξέπεμψε μέσω της μαθηματικής σχέσης του *Pogson*:

$$m = C - 2.5 \log F \quad (2.10)$$

όπου η σταθερά **C** ονομάζεται σταθερά «μηδενικού σημείου» και είναι ένας συντελεστής που χρησιμεύει για την προσαρμογή της κλίμακας μεγεθών του CCD στην κλίμακα απολύτων μεγεθών.

Η σταθερά **C** υπολογίζεται από έναν μόνο αστέρα γνωστού φαινομένου μεγέθους του πεδίου και έτσι εύκολα μπορούμε να υπολογίσουμε τα μεγέθη των υπολοίπων αστερών. Στην πραγματικότητα η σταθερά **C** είναι μια μέση τιμή των σταθερών που προκύπτουν από την παραπάνω σχέση, χρησιμοποιώντας όλους τους γνωστούς αστέρες του πεδίου. Είναι ανάλογη της ροής της ακτινοβολίας, και κατ' επέκταση του χρόνου έκθεσης. Για διαφορετικούς χρόνους έκθεσης t_1 , t_2 ισχύει η παρακάτω αναλογική σχέση μεταξύ των αντίστοιχων σταθερών C_1 , C_2 :

$$C_2 = C_1 - 2.5 \log(t_1/t_2) \quad (2.11)$$

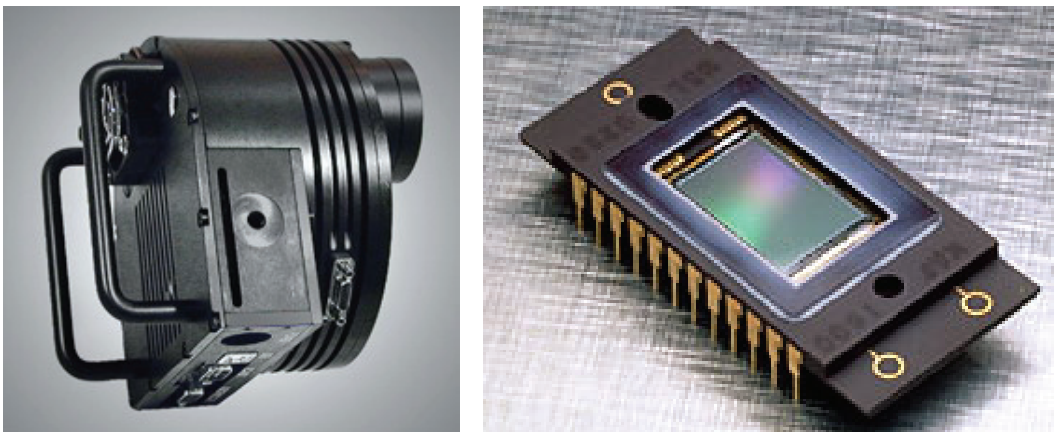
2.3.8.2 Φωτομετρία εκτεταμένων πηγών

Στη περίπτωση εκτεταμένων πηγών μπορούμε να κάνουμε *φωτομετρία του όλου* και να προσδιορίσουμε το μέγεθος όλης της πηγής, ή *φωτομετρία επιφανείας* όπου μπορούμε να προσδιορίσουμε το μέγεθος ανά μονάδα επιφάνειας.

Τέτοιες τύπου πηγές μπορεί να είναι γαλαξίες, κομήτες, πλανήτες και ο ήλιος, και γενικά οποιαδήποτε φωτεινή πηγή δεν είναι σημειακή.

2.3.9 Η CCD κάμερα ST-8XMEI

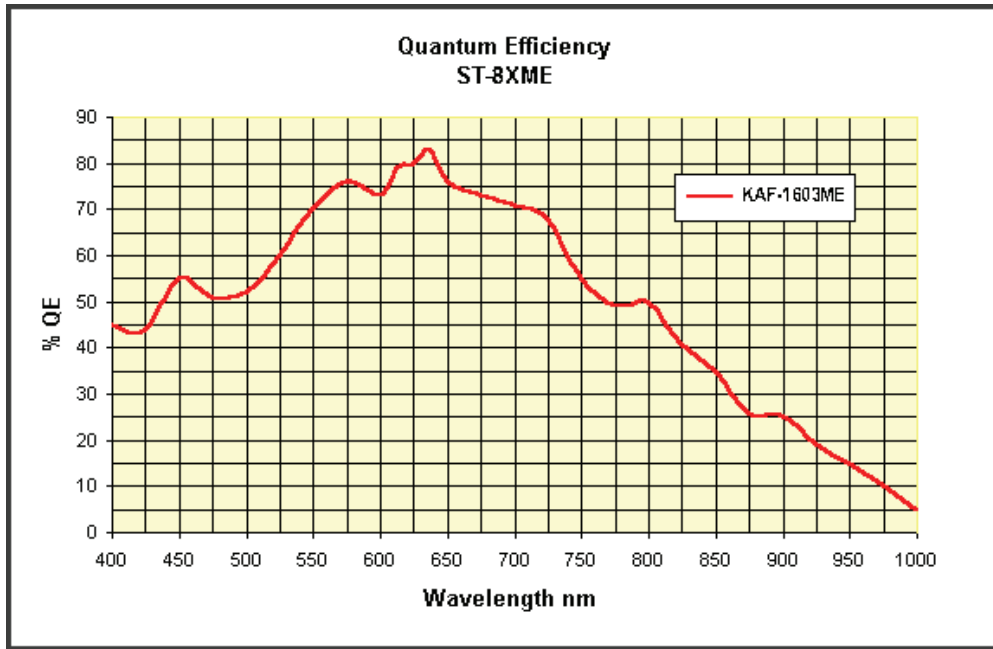
Το μοντέλο ST8XMEI είναι η CCD κάμερα η οποία χρησιμοποιήσαμε στις παρατηρήσεις μας. Παρακάτω παρατίθενται τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της.



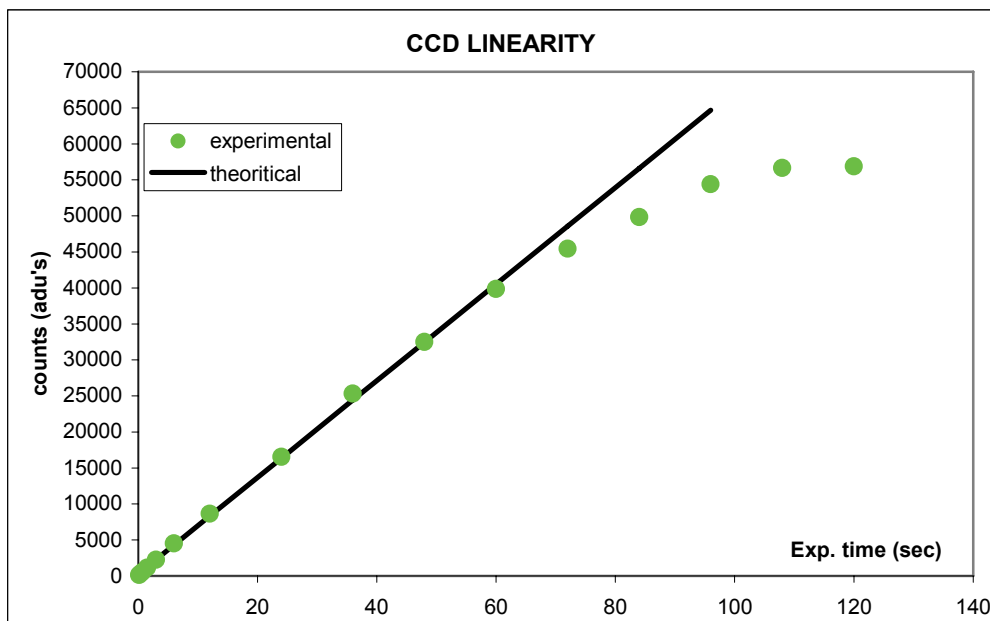
Εικ.2.8 & 2.9 Η CCD κάμερα ST-8XMEI (αριστερά) και το chip Kodak KAF-1603ME (δεξιά) που εμπεριέχει.

Πίνακας 2.2 Τα χαρακτηριστικά της CCD κάμερας ST-8XMEI

| | |
|-----------------------------------|--|
| CCD | Kodak KAF-1603ME |
| Pixel Array | 1530×1020 pixels |
| CCD Size | 13.8×9.2 mm |
| Total Pixels | 1.6 million |
| Pixel Size | 9×9 microns square |
| Full Well Capacity | ~100000 e ⁻ |
| Dark Current | 1 e ⁻ /pixel/sec at 0°C |
| Shutter | Electromechanical |
| Exposure | 0.12 to 3600 seconds, 10ms resolution |
| Correlated Double Sampling | Yes |
| A/D Converter | 16 bits |
| A/D Gain | 2.3e ⁻ /ADU |
| Read Noise | 15e ⁻ RMS |
| Binning Modes | 1×1, 2×2, 3×3 |
| Pixel Digitization Rate | Up to 420000 pixels/second |
| Full Frame Download | ~3.7 seconds |
| Cooling - standard | Single Stage Thermoelectric, Active Fan, Water Assist -45°C from Ambient Typical with water, -35°C w/air only |
| Temperature Regulation | ±0.1°C |
| Power | 5VDC at 1.5 amps, +/-12VDC at 0.5 amps, power supply included |
| Computer Interface | USB 1.1 |
| Computer Compatibility | Windows 98/2000/Me/XP/Vista |
| Optical Head | 5 inches diameter × 3 inches 12.5 cm diameter × 7.5 deep |
| CPU | All electronics integrated into Optical Head, No CPU |
| Mounting | T-Thread, 2'' nosepieces included |
| Weight | ~ 2 pounds/0.9kg |
| Backfocus | 0.92 inches / 2.3 cm |



Σχ. 2.10 Το διάγραμμα της κβαντικής απόδοσης της CCD κάμερας ST-8XMEI συναρτήσει του μήκους κύματος (www.sbig.com).



Σχ. 2.11 Το διάγραμμα της γραμμικότητας της CCD κάμερας ST-8XMEI.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΩΝ

Μετά το τέλος των παρατηρήσεων διαθέτουμε πλέον τα δεδομένα στον σκληρό δίσκο του Η/Υ. Η επεξεργασία των παρατηρήσεων ολοκληρώνεται σε έξι στάδια που αναλύονται εκτενώς στις παρακάτω παραγράφους (3.1-3.6).

3.1 Διαφορική φωτομετρία διαφράγματος

Σε αυτό το στάδιο χρησιμοποιούμε το πρόγραμμα **AIP4WIN** (*astronomical image processing for windows*, Berry & Burnell 2001). Το πρόγραμμα έχει την δυνατότητα να επεξεργάζεται αστρονομικές εικόνες αφήνοντας ελεύθερη την επιλογή των παραμέτρων επεξεργασίας. Το πρόγραμμα βάσει της σχέσης : $m = C - 2.5 \log F$ μετατρέπει την ροή F της ακτινοβολίας σε φαινόμενο μέγεθος του αστέρα. Όμως αν δεν ξέρουμε την σταθερά C (προκύπτει από πρότυπους αστέρες), τότε είναι αδύνατον να υπολογίσουμε το φαινόμενο μέγεθος. Εδώ λοιπόν εισάγεται ο όρος **διαφορική φωτομετρία**. Το πρόγραμμα υπολογίζει την διαφορά ροών από δύο επιλεγμένους αστέρες και τη μετατρέπει σε διαφορά φαινομένου μεγέθους βάση της παρακάτω σχέσης, απαλορίζοντας την σταθερά C .

$$m_1 - m_2 = 2.5 \log(F_2/F_1) \quad (3.1)$$

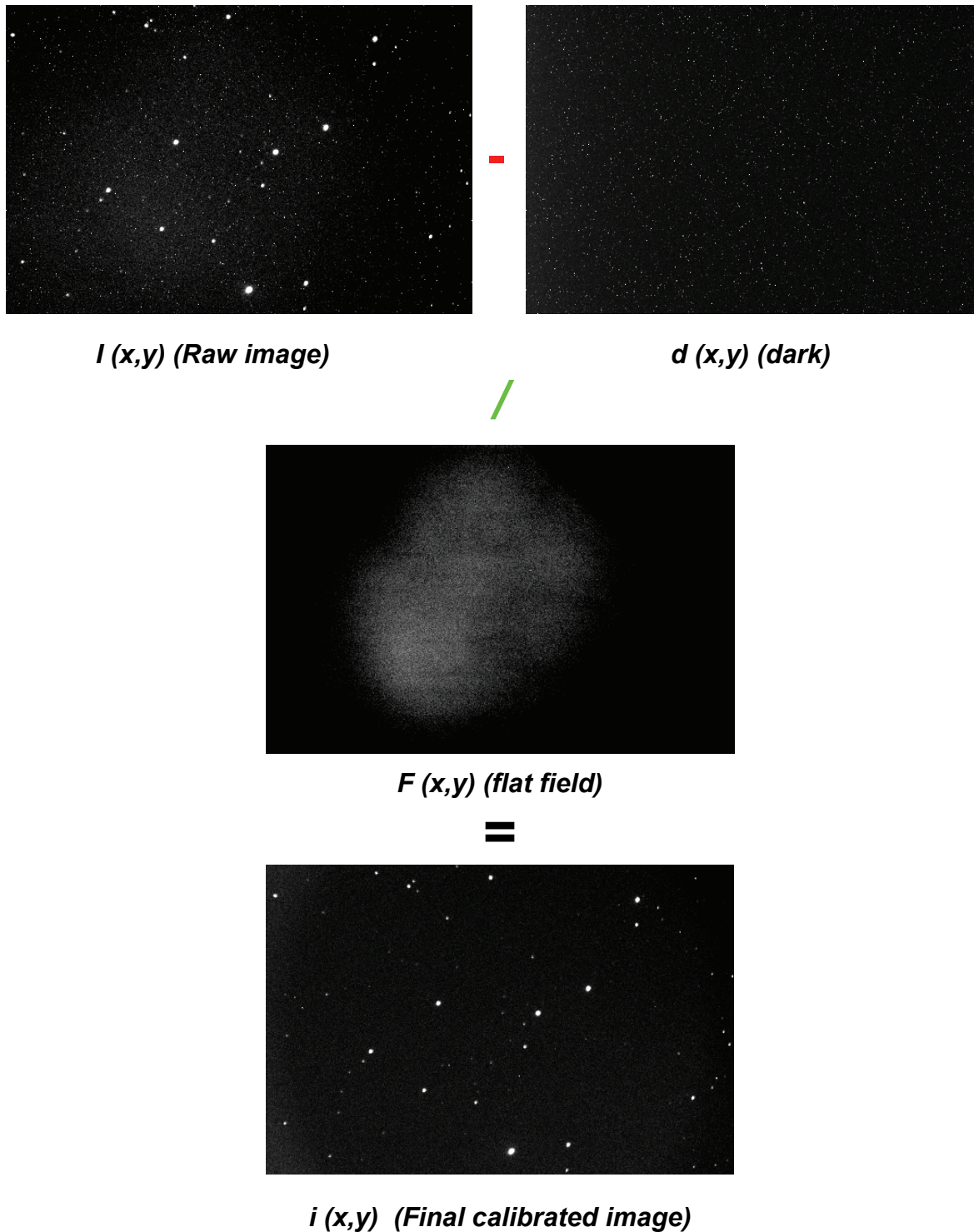
i) Διόρθωση της εικόνας του πεδίου από τις εικόνες flat field και dark

Επιλέγουμε τις εικόνες Dark από το αρχείο μας και δηλώνουμε ότι επιθυμούμε να αφαιρέσουμε από όλες τις εικόνες, που θα φωτομετρηθούν, την διάμεσο εικόνα του Dark. Ουσιαστικά επιλέγουμε την διάμεσο του Dark ($d(x,y)$) από μια στατιστική κατανομή, ώστε να είμαστε σίγουροι ότι είναι αντιπροσωπευτική του θορύβου της κάμερας και όχι τον μέσο όρο του θορύβου από όλες τις εικόνες dark.

Επιλέγουμε από το αρχείο μας τις εικόνες Flat field και δηλώνουμε ότι επιθυμούμε να διαιρέσουμε όλες τις φωτογραφίες, που θα φωτομετρηθούν ($I(x,y)$), μετά την αφαίρεση του dark, με την κανονικοποιημένη εικόνα flat field ($F(x,y)$). Η πράξη που κάνει το πρόγραμμα και προκύπτει η τελική και ζητούμενη εικόνα $i(x,y)$ είναι η:

$$i(x,y) = \{I(x,y) - d(x,y)\} / F(x,y) \quad (3.2)$$

Όπως αναφέραμε στο κεφάλαιο της CCD φωτομετρίας, από την εικόνα του πεδίου πρέπει να αφαιρεθεί και η εικόνα Bias. Η CCD κάμερα που χρησιμοποιούμε στις παρατηρήσεις μας δεν έχει την δυνατότητα λήψης φωτογραφίας με μηδενικό χρόνο έκθεσης που απαιτείται για να ληφθεί μια εικόνα Bias. Αυτό αντιμετωπίζεται παίρνοντας εικόνες Dark με χρόνο έκθεσης ίσο με αυτόν που λαμβάνονται και οι εικόνες του αστρικού πεδίου. Η εικόνα Dark εμπεριέχει και την εικόνα Bias, και αφού όπως προαναφέραμε η εικόνα Dark αφαιρείται από όλες τις εικόνες του αστρικού πεδίου, με αυτόν τον τρόπο αφαιρούμε και το Bias.



Εικ.3.1-3.4 Η επάνω αριστερή εικόνα αποτελεί την αρχική εικόνα αστρικού πεδίου η οποία και εμπεριέχει όλες τις συνιστώσες. Η επάνω δεξιά εικόνα είναι η εικόνα dark (θερμικός θόρυβος) η οποία έχει ληφθεί με ίδιο χρόνο έκθεσης και θερμοκρασία του CDD ίση με αυτήν της αρχικής εικόνας. Η μεσαία εικόνα είναι η εικόνα απόκρισης των pixels στον ομοιόμορφο φωτισμό και η οποία διαιρεί την εικόνα που προκύπτει από την αφαίρεση του dark από την αρχική εικόνα (raw). Η τελευταία εικόνα είναι το αποτέλεσμα των παραπάνω διορθώσεων, και απεικονίζει το ίδιο πεδίο απαλλαγμένο από τον θερμικό θόρυβο και είναι ομοιόμορφο φωτισμένο. Όλες οι εικόνες ελήφθησαν από τον συγγραφέα με την CCD κάμερα ST-8XMEI.

ii) Επιλογή αστέρων και κύκλων

Στην εικόνα του αστρικού πεδίου επιλέγουμε τους αστέρες τους οποίους θέλουμε να φωτομετρήσουμε. Στον κύκλο **V** θέτουμε τον μεταβλητό αστέρα, στον κύκλο **C** τον αστέρα σύγκρισης του οποίου η λαμπρότητα είναι σταθερή και συγκρίνεται με εκείνη του μεταβλητού και στον κύκλο **K** τον αστέρα ελέγχου, ο οποίος χρησιμοποιείται για να ελεγχθεί η σταθερότητα της λαμπρότητας του αστέρα σύγκρισης. Το πρόγραμμα μετράει τα counts σε κάθε φωτογραφία που προήλθαν από τα μετατρεπόμενα φωτόνια των αστέρων σε ηλεκτρόνια. Οι αστέρες συγκρίσεως C και ελέγχου K πρέπει να ικανοποιούν τα εξής κριτήρια:

- Να είναι περίπου ίδιου φασματικού τύπου με τον μεταβλητό (ίδιο χρώμα)
- Να απέχουν μικρότερη απόσταση από 1° από τον μεταβλητό
- Να μην είναι μεταβλητοί αστέρες
- Να μην είναι ερυθροί αστέρες
- Να είναι περίπου ίδιας λαμπρότητας (ίδιο φαινόμενο μέγεθος)

Οι κόκκινοι αστέρες είναι ψυχροί αστέρες οι οποίοι παρουσιάζουν έντονη μαγνητική δραστηριότητα και είναι συνήθως αστέρες εκλάμψεων, οπότε κρίνονται ακατάλληλοι για σύγκριση. Τα παραπάνω κριτήρια, εκτός από αυτό με την μεταβλητότητα, δεν είναι πολύ αυστηρά, αλλά σε κάθε περίπτωση πρέπει να ικανοποιούνται όσο το δυνατόν περισσότερο. Τις περισσότερες φορές, και κυρίως όταν πρόκειται για σχετικά λαμπρούς αστέρες ($m < 12 \text{mag}$), μπορούμε να βρούμε τα στοιχεία τους (φασματικός τύπος, φαινόμενο μέγεθος, μη-μεταβλητότητα) από αστρικούς καταλόγους ή κάποια αστρονομικά λογισμικά που εμπεριέχουν πληθώρα τέτοιων καταλόγων. Σε περιπτώσεις που κάποιος από τους αστέρες συγκρίσεως ή ελέγχου δεν έχει εξακριβωμένα στοιχεία τότε επιλέγουμε αυτόν που παρουσιάζει σχεδόν ίδιες μετρήσεις σε counts με τον μεταβλητό μας αστέρα. Φυσικά για να είμαστε σίγουροι, τουλάχιστον για την μη μεταβλητότητα κάποιου από τους προαναφερόμενους αστέρες, πρέπει να επαναλάβουμε τη φωτομετρία και άλλους αστέρες του πεδίου.

Η απόσταση των αστέρων που πρέπει να είναι μικρότερη από 1° από τον μεταβλητό εξυπηρετεί στα εξής:

- Βραδείες ατμοσφαιρικές μεταβολές εξαλείφονται, εφόσον επηρεάζουν εξίσου και τους δύο αστέρες
- Η εξασθένιση φωτός 1^{ns} τάξης (λόγω απορρόφησης από την ατμόσφαιρα) είναι σχεδόν ίδια για όλους τους αστέρες του πεδίου
- Εάν ο αστέρας σύγκρισης είναι ίδιου φασματικού τύπου με τον μεταβλητό αστέρα, τα σφάλματα στις εξισώσεις μετατροπής στο πρότυπο σύστημα θα έχουν μικρή επίδραση

Το πρόγραμμα μετράει σε κάθε εικόνα τις διαφορές φαινομένου μεγέθους V-C και K-C βάση της σχέσης 3.1, οπότε και προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$V-C = m_v - m_c = 2.5 \log(F_c/F_v) \quad (3.3)$$

$$K-C = m_k - m_c = 2.5 \log(F_c/F_k) \quad (3.4)$$

Η διαφορά K-C ουσιαστικά είναι η επιβεβαίωση ότι ο C αστέρας έχει πράγματι σταθερή λαμπρότητα, οπότε αν και ο K αστέρας είναι σταθερός, τότε η διαφορά K-C σε όλες τις φωτογραφίες κυμαίνεται γύρω από μία σταθερή τιμή, και η μορφή της καμπύλης που θα προκύψει είναι ευθεία, ενώ από τη διαφορά V-C προκύπτει η καμπύλη φωτός του παρατηρούμενου αστέρα.

Το εν λόγω πρόγραμμα κάνει φωτομετρία διαφράγματος, και οι επιλογές του κύκλου και των δακτυλίων γίνονται με βάση τα παρακάτω κριτήρια. Επειδή θέλουμε να είμαστε σίγουροι ότι μετράμε το φως του αστέρα και όχι και του υποβάθρου (§2.3.6.5) επιλέγουμε τιμές για τις παρακάτω παραμέτρους του προγράμματος.

Ο πρώτος κύκλος (*star aperture*) πρέπει να περιλαμβάνει ολόκληρο και μόνο τον αστέρα που επιθυμούμε. Ο δεύτερος κύκλος (*sky annulus in*) και ο πρώτος ορίζουν έναν «νεκρό» δακτύλιο γύρω από τον αστέρα. Τα counts που καταγράφονται μέσα σε αυτόν τον δακτύλιο δεν προστίθενται στα counts του αστέρα. Η δυνατότητα που μας δίνει το πρόγραμμα να απομονώσουμε τα counts από τον προαναφερόμενο δακτύλιο είναι σημαντικότερη διότι μπορεί κοντά στον αστέρα που θέλουμε να φωτομετρήσουμε να υπάρχει και άλλος αστέρας με κίνδυνο να καταμετρώμε φωτόνια και από τα δύο αστέρια. Με αυτόν τον τρόπο κρατούμε μόνο τα counts του αστέρα που μας ενδιαφέρει, τοποθετώντας τον κοντινό αστέρα στον νεκρό δακτύλιο. Ο τρίτος κύκλος (*sky annulus out*) και ο δεύτερος κύκλος ορίζουν έναν δεύτερο δακτύλιο μέσα στον οποίο δεν πρέπει να περιέχονται αστέρες, καθώς τα counts (F_S) αυτού του δακτυλίου το πρόγραμμα τα αντιλαμβάνεται ως το φωτεινό υπόβαθρο του ουρανού (διάχυτο φως που προέρχεται από κάθε φωτεινή πηγή του ουρανού), και τα αφαιρεί από τα counts του φωτομετρούμενου αστέρα. Επομένως οι σχέσεις (3.3) και (3.4) μετασχηματίζονται ως εξής:

$$V-C = m_v - m_c = 2.5 \log[(F_c - F_S)/(F_v - F_S)] \quad (3.5)$$

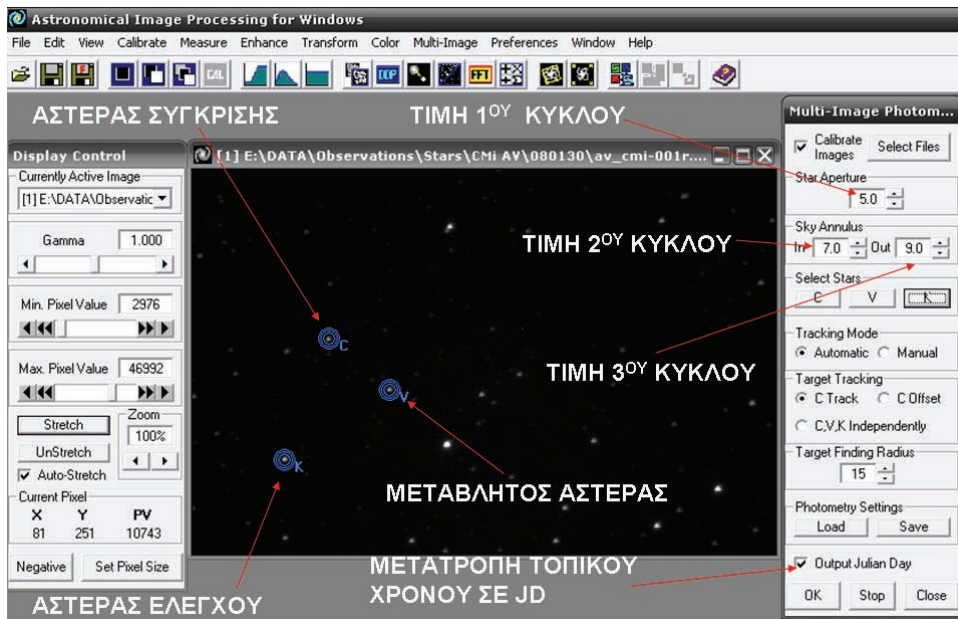
$$K-C = m_k - m_c = 2.5 \log[(F_c - F_S)/(F_k - F_S)] \quad (3.6)$$

Δύο άλλες παράμετροι του προγράμματος αφορούν περισσότερο την οδήγηση του τηλεσκοπίου. Με την ρύθμιση *automatic* επιλέγουμε στην πρώτη εικόνα τους αστέρες που επιθυμούμε, και εν συνεχεία το πρόγραμμα συνεχίζει μόνο του, επαναλαμβάνοντας την φωτομετρία σ' όλες τις εικόνες. Όμως κατά την παρατήρηση η οδήγηση του τηλεσκοπίου χρειάζεται πάντα διορθωτικές κινήσεις ώστε το αστρικό πεδίο να μένει σταθερό και κατά συνέπεια οι αστέρες μπορεί να μετατοπιστούν μέσα στην φωτογραφία. Τότε με την ρύθμιση *manual* μπορούμε να κάνουμε φωτομετρία σε καθεμία εικόνα ξεχωριστά, οπότε λύνουμε το πρόβλημα της μετατόπισης των αστέρων.

Ρυθμίζοντας την παράμετρο *Target finding radius* μπορούμε να επιλέξουμε πόσο θα «επιτρέψουμε» στους κύκλους να ακολουθούν τους αστέρες σε ενδεχόμενη μετατόπισή τους μέσα στο πεδίο.

Τέλος με την επιλογή *Output Julian Day* μετατρέπεται ο ακριβής χρόνος λήψης της φωτογραφίας από UT σε JD (§3.2).

Όλη η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται σε όλα τα φίλτρα που χρησιμοποιήσαμε. Για το κάθε φίλτρο αντιστοιχούν εικόνες dark και flat field βάση των οποίων γίνονται οι διορθώσεις των αντίστοιχων φωτογραφιών. Κανονικά η dark εικόνα δεν διαφέρει από φίλτρο σε φίλτρο. Όμως εμείς λαμβάνουμε εικόνες dark, για κάθε φίλτρο, χρόνου έκθεσης ίσο με αυτόν που χρησιμοποιούμε για τις εικόνες του αντίστοιχου φίλτρου, από τις οποίες το αφαιρούμε.



Εικ.3.5 Το πρόγραμμα AIP4WIN και οι διάφορες επιλογές του.

Τέλος για κάθε ημέρα και για κάθε φίλτρο έχουμε τα δεδομένα σε πίνακες. Τα δεδομένα περιλαμβάνουν για κάθε φωτογραφία, τα εξής στοιχεία:

- Όνομα εικόνας και αύξοντα αριθμό
- Ημερομηνία
- Χρόνος λήψης της εικόνας
- Χρόνος έκθεσης
- ADU (analog to digital unit) του αστέρα σύγκρισης
- ADU του υποβάθρου
- ADU του μεταβλητού αστέρα
- ADU του αστέρα ελέγχου
- V-C: Διαφορά φαινομένων μεγεθών του μεταβλητού αστέρα με τον αστέρα σύγκρισης
- K-C: Διαφορά φαινομένων μεγεθών του αστέρα ελέγχου με τον αστέρα σύγκρισης
- JULIAN DAY (Ιουλιανή ημερομηνία)

Εδώ πρέπει να αναφέρουμε ότι ο χρόνος λήψης της εικόνας που εξάγει το πρόγραμμα, είναι το άθροισμα του χρόνου έναρξης της έκθεσης της εικόνας που εμπεριέχει το fits header της εικόνας (§2.3.7.2) και ο μισός χρόνος έκθεσης που χρησιμοποιήθηκε.

3.2 Ηλιοκεντρική διόρθωση

Για να έχουμε αντικειμενικότητα στους χρόνους λήψης των πρέπει να αφαιρέσουμε τον παράγοντα “τροχιά της Γης” από της παρατηρήσεις. Λόγω της περιφοράς της Γης γύρω από τον Ήλιο, και λόγω της πεπερασμένης ταχύτητας του φωτός, παρατηρήσεις στον ίδιο αστέρα που θα απέχουν χρονικά μεταξύ τους θα δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα για τον χρόνο των ελαχίστων και της περιόδου του συστήματος. Αναλυτικότερα, αν η Γη βρίσκεται ανάμεσα στην οπτική ευθεία αστέρα και Ήλιου, το φως από τον αστέρα θα διανύσει μικρότερη απόσταση από

αυτήν που θα διένυε αν η Γη βρισκόταν στο αντιδιαμετρικό σημείο από το προαναφερόμενο (δηλ. αστέρας-Ήλιος-Γη). Η απόσταση αυτών των δύο ακραίων θέσεων της γης είναι περίπου 300×10^6 km. Το γεγονός ότι η ταχύτητα του φωτός είναι περίπου 300000 km/sec μεταφράζεται σε χρονική διαφορά περίπου 16 min. Για τον παραπάνω λόγο, θεωρούμε ότι οι παρατηρήσεις γίνονται από τον Ήλιο. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση περιφοράς της Γης γύρω από τον Ήλιο και τις συντεταγμένες του αστέρα, είμαστε σε θέση κάθε στιγμή να γνωρίζουμε την γωνία που σχηματίζει η οπτική ευθεία Γης - Ηλίου και η οπτική ευθεία Ηλίου - αστέρα. Όπως προαναφέραμε ως μονάδα μέτρησης χρόνου για μεταβλητούς αστέρες έχει επικρατήσει η *Ιουλιανή ημέρα (Julian Day)*, που έχει σαν αρχή μέτρησης την μέση μεσημβρία της 1^{ης} Ιανουαρίου του 4713 π.Χ.

Η αναγωγή του χρόνου σε ηλιοκεντρικό (*Heliocentric Julian Day* → *HJD*) βασίζεται στην παρακάτω μαθηματική σχέση :

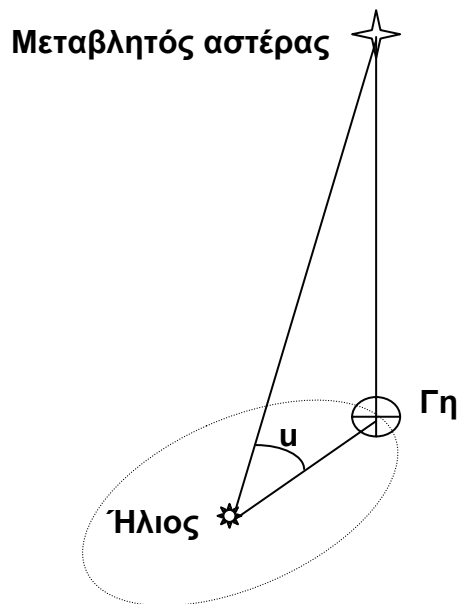
$$T_{\odot} = T_{\oplus} - \Delta t \quad (3.7)$$

Όπου T_{\oplus} ο ακριβής χρόνος κάποιου ουράνιου φαινομένου που καταγράφεται στη Γη, T_{\odot} ο ακριβής χρόνος του ίδιου ουράνιου φαινομένου που θα κατέγραφε παρατηρητής που θα βρισκόταν στον Ήλιο και Δt η διαφορά των δύο προαναφερόμενων χρόνων.

Η χρονική διαφορά Δt υπολογίζεται από την σφαιρική τριγωνομετρία:

$$\Delta t \text{ (days)} = 0.00578 \cos u \quad (3.8)$$

Όπου u η γωνία που σχηματίζει η νοητή ευθεία Γης – Ηλίου με την ευθεία Ηλίου – αστέρα, με αρχή μέτρησης πάνω στην οπτική ευθεία αστέρα – Ηλίου κατά την ανάδρομη φορά.



Σχ.3.1 Το νοητό τρίγωνο μεταβλητού αστέρα-Γης-Ηλίου.

$$\text{Με } \cos u = \sin \delta \sin l_{\odot} \sin \epsilon + \cos \delta \cos \alpha \cos l_{\odot} + \cos \delta \sin \alpha \sin l_{\odot} \cos \epsilon \quad (3.9)$$

Όπου (α, δ) οι ουρανογραφικές συντεταγμένες του αστέρα και ϵ η κλίση του άξονα της Γης ως προς το επίπεδο της τροχιάς της.

Όπου l_{\odot} το ηλιογραφικό μήκος το οποίο δίνεται από την σχέση:

$$l_{\odot} = L + (1.915^{\circ} - 0.0048^{\circ} T) \sin M + 0.020^{\circ} \sin 2M \quad (3.10)$$

Όπου T ο Ιουλιανός αιώνας $\rightarrow T = \frac{J.D - 2451545}{36525}$ (3.11)

Όπου L το ηλιογραφικό μήκος σε εκλειπτικές συντεταγμένες το οποίο δίνεται από την σχέση: $L = 280.460^{\circ} + 36000.722^{\circ} T$ (3.12)

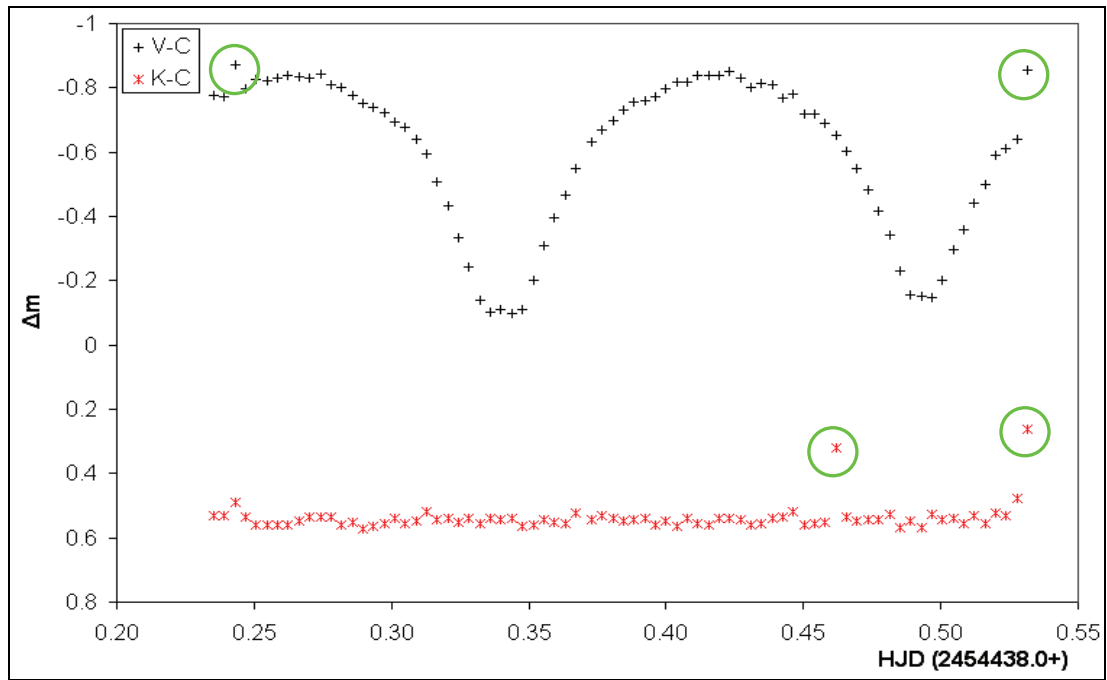
Όπου M το ηλιογραφικό πλάτος σε εκλειπτικές συντεταγμένες το οποίο δίνεται από την σχέση: $M = 357.528^{\circ} + 35999.050^{\circ} T$ (3.13)

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω εξισώσεις, είμαστε σε θέση να κάνουμε την μετατροπή του γεωκεντρικού χρόνου JD σε ηλιοκεντρικό χρόνο HJD .

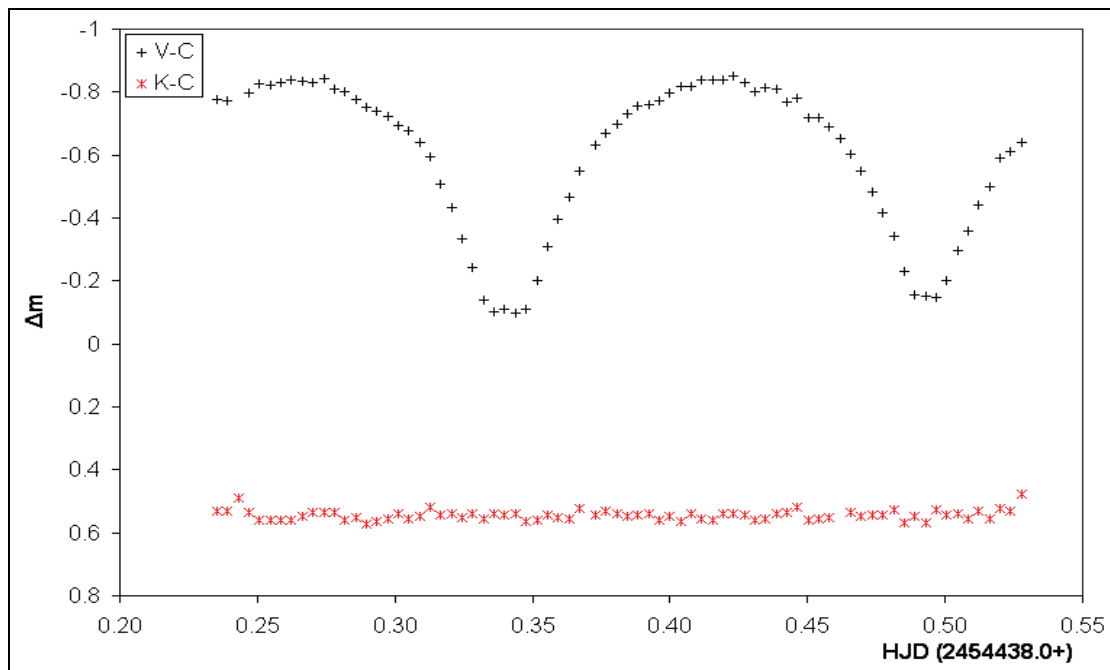
3.3 Διαγράμματα V-C, K-C

Σε αυτή τη φάση της επεξεργασίας, και από τα αρχεία που παίρνουμε από το πρόγραμμα της φωτομετρίας μπορούμε να φτιάξουμε τα διαγράμματα $V-C = f(HJD)$ και $K-C = f(HJD)$ χρησιμοποιώντας κάποιο πρόγραμμα απεικόνισης σημείων, και να δούμε την μορφή της μεταβολής της λαμπρότητας του μεταβλητού αστέρα συναρτήσει του χρόνου.

Λόγω απρόβλεπτων συνθηκών (παροδική ύπαρξη συννεφιάς) ενδέχεται κάποιες μετρήσεις (εικόνες) να επηρεάστηκαν με αποτέλεσμα κάποια σημεία στις καμπύλες να «ξεφεύγουν» από τα υπόλοιπα. Συγκρίνοντας τις καμπύλες και των τεσσάρων φίλτρων (πρέπει και στα τέσσερα η μορφή της καμπύλης να είναι ίδια) μπορούμε εύκολα να καταλάβουμε ποια σημεία και από πιο φίλτρο πρέπει να αφαιρεθούν. Η δεύτερη καμπύλη χρησιμοποιείται ως βοηθητική καμπύλη, διότι η μορφή της πρέπει να είναι ευθεία. Οπότε τα σημεία που είναι προφανώς λάθος σε αυτήν μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι και τα αντίστοιχα στην πρώτη είναι λάθος, αφού και οι δύο περιέχουν τον C αστέρα. Επιστρέφουμε στην βάση δεδομένων μας και σβήνουμε τα λάθος σημεία ώστε να μην υπεισέλθουν στους παρακάτω υπολογισμούς. Φυσικά εάν πρόκειται για πρόσπτωση κοσμικής ακτινοβολίας, η επιρροή της μπορεί να είναι σε οποιοδήποτε από τα φωτομετρούμενα αστέρια, οπότε και πάλι πρέπει να επέμβουμε στα σημεία μας και να σβήσουμε τα προφανώς λάθος που εμφανίζονται.



Πρωτογενής καμπύλη



Διορθωμένη καμπύλη

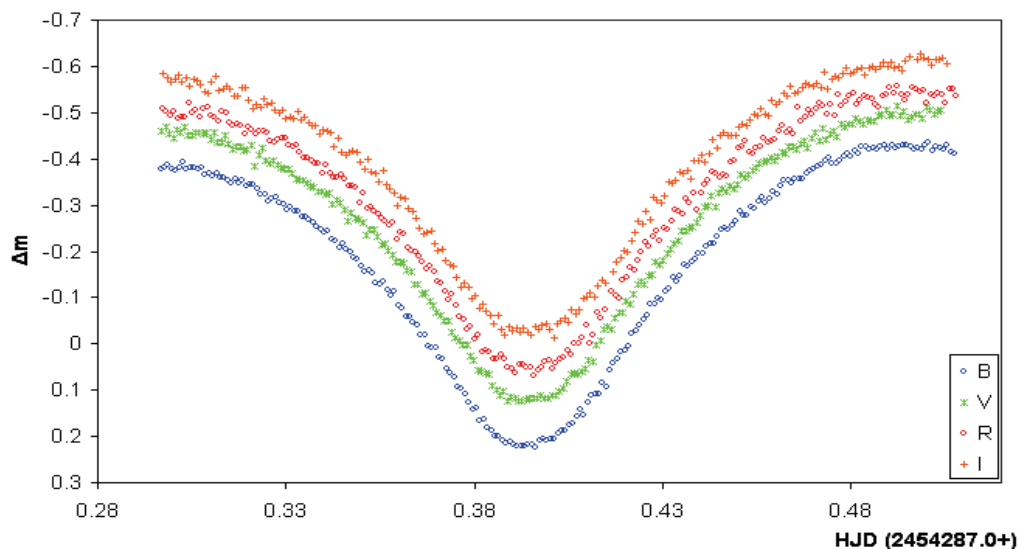
Σχ.3.2 Οι παραπάνω καμπύλες είναι αποτελέσματα της φωτομετρίας του μεταβλητού αστέρα V1128 Ταυ στο V φίλτρο. Οι παρατηρήσεις του εν λόγω συστήματος πραγματοποιήθηκαν στις 3/12/2007 από τον συγγραφέα. Στο επάνω διάγραμμα έχουν σημειωθεί με πράσινο κύκλο τα σημεία που είναι προφανώς λάθος, και έχουν αφαιρεθεί από το τελικό διάγραμμα (κάτω).

3.4 Υπολογισμός των χρόνων ελαχίστου στις καμπύλες φωτός

Κατά την διάρκεια των παρατηρήσεων κάποιου μεταβλητού αστέρα παρατηρούμε τα ελάχιστα της λαμπρότητας του. Συγκεκριμένα στα διπλά συστήματα αστέρων παρατηρούμε το πρωτεύον και το δευτερεύον ελάχιστο. Σε συστήματα όπου τα μέλη τους έχουν διαφορά θερμοκρασίας το πρωτεύον ελάχιστο (βαθύτερο – μεγαλύτερη πτώση ολικής λαμπρότητας) παρατηρείται όταν ο θερμότερος αστέρας βρίσκεται πίσω από τον ψυχρότερο, δηλαδή έχουμε έκλειψη του θερμότερου αστέρα, ενώ στην αντίθετη περίπτωση, όταν δηλαδή ο θερμότερος αστέρας βρίσκεται μπροστά από τον ψυχρότερο, έχουμε το δευτερεύον ελάχιστο (ρηχότερο - μικρότερη πτώση ολικής λαμπρότητας). Σε συστήματα όπου τα μέλη τους έχουν σχεδόν ίδια θερμοκρασία (π.χ W UMa) ή σε περιπτώσεις παλλόμενων αστέρων, δεν υπάρχει ουσιαστική διαφορά λαμπρότητας μεταξύ των ελαχίστων οπότε η ταυτοποίηση τους δεν έχει πάντα νόημα. Από τα δεδομένα των παρατηρήσεων για όλα τα φίλτρα που χρησιμοποιήσαμε και με την χρήση της μεθόδου Kwee & van Woerden (1956) βρίσκουμε την ακριβή χρονική στιγμή κατά την οποία παρουσιάστηκε το ελάχιστο της λαμπρότητας καθώς και το σφάλμα της.

Η εν λόγω μέθοδος υπολογίζει τις κλίσεις ευθύγραμμων τμημάτων (παραγώγους) που ενώνουν δύο διαδοχικά σημεία. Επιλέγουμε όλα τα σημεία εκατέρωθεν του προς υπολογισμό ελαχίστου, και έτσι προκύπτει με ακρίβεια πέντε δεκαδικών ψηφίων ο ακριβής χρόνος ελαχίστου και το σφάλμα του.

Επαναλαμβάνουμε την διαδικασία για όλα τα φίλτρα που χρησιμοποιήσαμε. Λόγω του ότι η κάθε εικόνα έχει χρόνο έκθεσης, οι διαδοχικές εικόνες στα διάφορα φωτομετρικά φίλτρα θα απέχουν μεταξύ τους χρονικά οπότε και οι χρόνοι ελαχίστων που προκύπτουν από την επεξεργασία των δεδομένων για κάθε φίλτρο διαφέρουν ελάχιστα μεταξύ τους. Για να είμαστε ακριβείς και αντικειμενικοί βγάζουμε την μέση τιμή από τους χρόνους ελαχίστων που προκύπτουν για κάθε φίλτρο καθώς και την μέση τιμή του σφάλματος.



Σχ.3.3 Στο παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε ένα πρωτεύον ελάχιστο του δι' εκλείψεων μεταβλητού αστέρα V839 Orh στα φίλτρα BVRI. Χρησιμοποιώντας την μέθοδο KVV και βγάζοντας τον μέσο όρο των χρόνων ελαχίστου από τα τέσσερα φίλτρα βρίσκουμε τον χρόνο ελαχίστου την $2454287.39454 \pm 0.00014$ HJD . Οι παρατηρήσεις του εν λόγω αστέρα έγιναν από τον συγγραφέα στις 5/7/2007.

3.5 Αστρονομική εφημερίδα και διαγράμματα φάσης μεταβλητού αστέρα

Αστρονομική εφημερίδα

Η αστρονομική εφημερίδα ενός μεταβλητού αστέρα μας δίνει πληροφορίες για τις χρονικές στιγμές κατά τις οποίες το σύστημα παρουσιάζει το ελάχιστο της λαμπρότητάς του. Η γενική μαθηματική σχέση που δίνει την αστρονομική εφημερίδα ενός συστήματος είναι η :

$$T = T_0 + P \cdot E \quad (3.14)$$

Όπου T η χρονική στιγμή παρατήρησης εκφρασμένη σε HJD, T_0 ένας παρελθόντας χρόνος ελαχίστου (HJD), P η περίοδος του συστήματος εκφρασμένη σε days και τέλος E ένας ακέραιος αριθμός (≥ 1) που εκφράζει τον αριθμό των περιφορών του συστήματος γύρω από το κοινό κέντρο μάζας.

Από τις αστρονομικές εφημερίδες των μεταβλητών αστέρων, οι οποίες είναι δημοσιευμένες σε καταλόγους, μπορούμε να βρούμε τις τιμές για το T_0 και της περιόδου P .

Αν δεν διαθέτουμε αστρονομική εφημερίδα και έχουμε παρατηρήσει αρκετούς χρόνους ελαχίστων του συστήματος, τότε με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων μπορούμε να φτιάξουμε μια δική μας εφημερίδα. Η σχέση (3.14) είναι της μορφής $\Psi = \alpha + \beta X$, οπότε έχοντας παρατηρήσεις αρκετούς χρόνους ελαχίστων (T) θα προκύψουν τα T_0 και η P καθώς και τα σφάλματά τους, τα οποία θα μειώνονται όσο προσθέτουμε περισσότερες παρατηρήσεις.

Διαγράμματα φάσης ενός δι' εκλείψεων μεταβλητού αστέρα

Τα διαγράμματα φάσης ενός δι' εκλείψεων μεταβλητού αστέρα, μας πληροφορούν για την γεωμετρική θέση των αστέρων του συστήματος σε σχέση με την οπτική ευθεία παρατήρησης για κάθε χρονική στιγμή της περιόδου τους. Μας δείχνουν την εξάρτηση της ολικής λαμπρότητας του συστήματος από την θέση των αστέρων στο τροχιακό τους επίπεδο πάντα φυσικά σε σχέση με την ευθεία παρατήρησης. Ο όρος *φάση* υπεισέρχεται για να αντικαταστήσει την χρονική εξάρτηση από την HJD με την γωνία που σχηματίζεται από την ευθεία που συνδέει τα κέντρα των αστέρων και την οπτική ευθεία παρατήρησης. Την στιγμή του πρωτεύοντος ελαχίστου όπου αυτές οι δύο νοητές ευθείες ταυτίζονται, την θέτουμε ως αρχή μέτρησης της περιφοράς του συστήματος, δηλαδή την μηδενική γωνιακή φάση. Προφανώς μετά από μία πλήρη περιφορά του συστήματος γύρω από το κέντρο μάζας, η γωνία αυτή θα έχει διαγράψει 360° και θα βρίσκεται ξανά στο μηδενικό σημείο. Για λόγους ευκολίας και για να απαλλαγούμε από την εξάρτηση από την γωνία φάσης, την κανονικοποιούμε στην μονάδα.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονίσουμε ότι τα στοιχεία του παρακάτω πίνακα αφορούν ομαλά εκλειπτικά συστήματα των οποίων τα μέλη παρουσιάζουν διαφορά θερμοκρασίας, αλλά και δεν παρουσιάζουν μαγνητική δραστηριότητα. Η μαγνητική δραστηριότητα, σε κάποιον από τους αστέρες – μέλη, μπορεί να δημιουργήσει τοπική μεταβολή λαμπρότητας εκτός των εκλείψεων, με αποτέλεσμα τα δύο μέγιστα να εμφανίζονται άνισα (*O'Connell effect*). Η εφημερίδα των μεταβλητών αστέρων στηρίζεται σε παρατηρήσεις στο οπτικό μέρος του H/M φάσματος όπου και θεωρούμε ότι το φως προέρχεται από τις φωτόσφαιρες των αστέρων. Το ίδιο

σύστημα λοιπόν, αν παρατηρηθεί σε άλλο φασματικό κομμάτι μπορεί να παρουσιάσει ακόμα και αντίθετη συμπεριφορά, λόγω του ότι το φως προέρχεται από άλλες περιοχές των αστερών (π.χ στο EUV παίρνουμε ακτινοβολία κυρίως από την χρωμόσφαιρα και το στέμμα των αστερών). Επιπροσθέτως αν κάποιος εκ των δύο αστερών εκπέμπει ελάχιστα στο μέρος του H/M φάσματος που παρατηρούμε λόγω του φασματικού του τύπου, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να μην ανιχνεύεται (π.χ τα ΗΜΧΒ δεν παρουσιάζουν σχεδόν καμμία μεταβολή λαμπρότητας στο οπτικό). Γι' αυτό λοιπόν, έχουμε σαν σημείο αναφοράς το οπτικό μέρος του H/M φάσματος, και θεωρούμε ότι το γεωμετρικό ελάχιστο ταυτίζεται με το ελάχιστο της λαμπρότητας του συστήματος. Αναλυτικά, λοιπόν, ισχύουν οι παρακάτω ισότητες μεταξύ των τιμών φάσης – λαμπρότητας συστήματος – γεωμετρικής θέσης αστερών για ομαλό δι' εκλείψεων αστέρα:

Πίνακας 3.1 Οι ισότητες μεταξύ των τιμών της γωνιακής φάσης, κανονικοποιημένης φάσης στη μονάδα, ολικής λαμπρότητας του συστήματος και γεωμετρικής θέσης των αστερών

| Γωνιακή φάση (deg / rad) | Κανον/νη φάση | Λαμπρότητα συστήματος | Γεωμετρική θέση αστερών |
|--------------------------|---------------|-------------------------|-------------------------------|
| 0 / 0 | 0.00 | 1 ^ο ελάχιστο | Έκλειψη του θερμότερου μέλους |
| 90 / π/2 | 0.25 | 1 ^ο μέγιστο | Μέγιστη απόσταση των μελών |
| 180 / π | 0.50 | 2 ^ο ελάχιστο | Έκλειψη του ψυχρότερου μέλους |
| 270 / 3π/2 | 0.75 | 2 ^ο μέγιστο | Μέγιστη απόσταση των μελών |
| 360 / 2π | 1.00 | 1 ^ο ελάχιστο | Έκλειψη του θερμότερου μέλους |

Τα κανονικοποιημένα διαγράμματα φάσης στη μονάδα κατασκευάζονται βάση των παρακάτω εξισώσεων :

Επιλύοντας την σχέση (3.14) ως προς Ε προκύπτει :

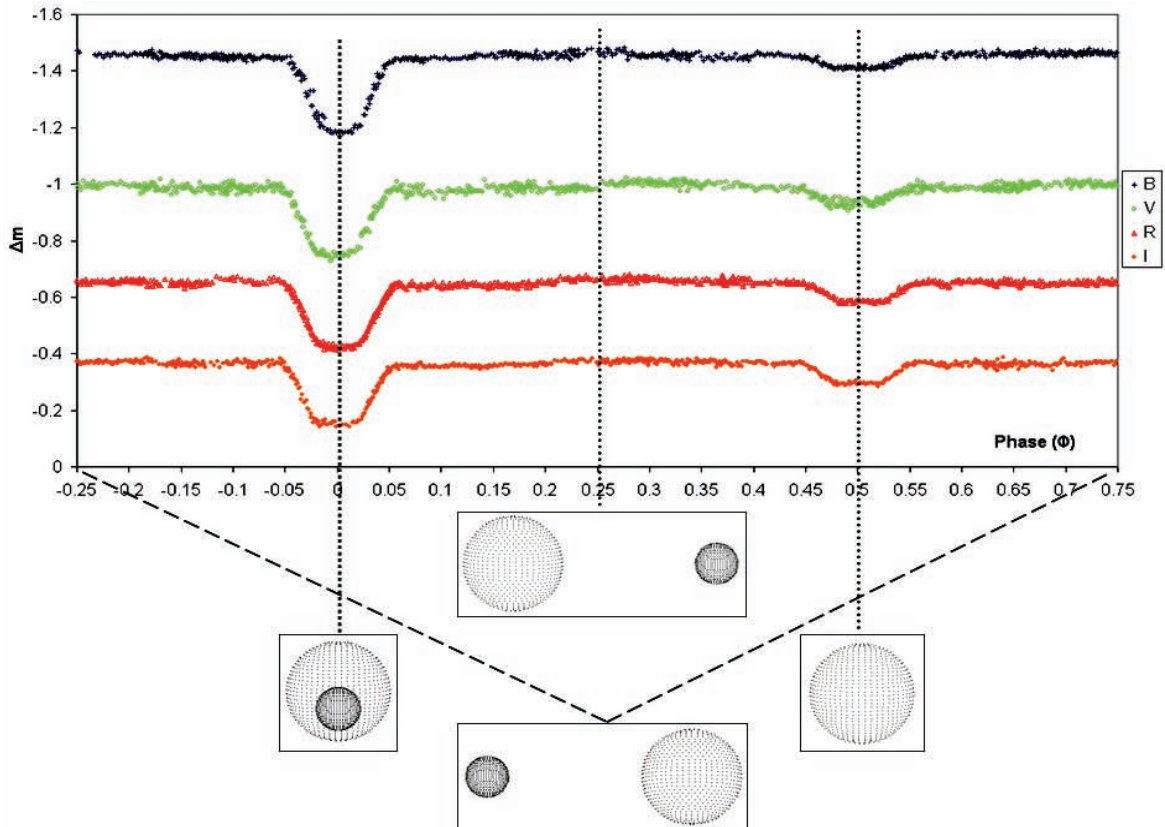
$$E = \frac{T - T_0}{P} \quad (3.15)$$

Γνωρίζοντας λοιπόν τις τιμές T_0 και P από τους αστρονομικούς καταλόγους για τον μεταβλητό αστέρα, και θέτοντας ως T τις τιμές HJD της κάθε εικόνας βγάζουμε τις αντίστοιχες τιμές για το Ε, οι οποίες είναι προφανώς δεκαδικοί αριθμοί. Αφαιρώντας το ακέραιο μέρος από αυτήν την τιμή, μένει μόνο το δεκαδικό της μέρος το οποίο και αποτελεί τη φάση (Φ) του συστήματος εκείνη τη χρονική στιγμή και οι τιμές της κυμαίνονται από 0.00 έως 1.00.

$$\Phi = \frac{HJD - T_0}{P} - \text{INTEGER}\left\{\frac{HJD - T_0}{P}\right\} \quad (3.16)$$

Εφόσον έχουμε μετατρέψει όλες τις τιμές της HJD σε τιμές φάσης Φ , μπορούμε να κάνουμε το διάγραμμα φάσης του συστήματος $V-C = \Delta m = f(\Phi)$. Επαναλαμβάνουμε την παραπάνω διαδικασία για όλα τα φίλτρα που έχουμε χρησιμοποιήσει στην παρατήρηση του συστήματος.

Όπως βλέπουμε η μετατροπή της HJD σε φάση του συστήματος, αυτόματα μας αποδεσμεύει από την χρονική στιγμή των παρατηρήσεων αφού μπορούν να συνδυαστούν στο ίδιο διάγραμμα, παρατηρήσεις που απέχουν μεταξύ τους μεγάλα χρονικά διαστήματα κάτι που μας διευκολύνει στην περαιτέρω ανάλυση του συστήματος.



Σχ.3.4 Το διάγραμμα φάσης στα BVRI φωτομετρικά φίλτρα του δι' εκλείψεων μεταβλητού αστέρα τύπου Algol GSC 4589:2999, καθώς και οι τρισδιάστατες γεωμετρικές αναπαραστάσεις του στα ελάχιστα στα μέγιστα της λαμπρότητάς του. Οι παρατηρήσεις του συστήματος έγιναν στο χρονικό διάστημα Ιούνιος – Οκτώβριος 2007 από τον συγγραφέα.

3.6 Διαγράμματα ροής μεταβλητού αστέρα

Τα διαγράμματα ροής ενός δι' εκλείψεων μεταβλητού αστέρα περιγράφουν την ροή της ακτινοβολίας που παίρνουμε από τους αστέρες του συστήματος συναρτήσει της φάσης του ή αλλιώς συναρτήσει μιας πλήρους τροχιακής περιόδου του. Για να κατασκευάσουμε τα διαγράμματα ροής μετατρέπουμε τη διαφορά φαινομένων μεγεθών V-C (§3.3) σε φαινόμενη λαμπρότητα. Χρησιμοποιούμε τη σχέση του Pogson που μετατρέπει τη διαφορά φαινομένων μεγεθών σε λογαριθμική διαφορά λαμπροτήτων.

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log \frac{l_2}{l_1} \Rightarrow V - C = m_v - m_c = \Delta m = -2.5 \log \frac{l_c}{l_v} \quad (3.17)$$

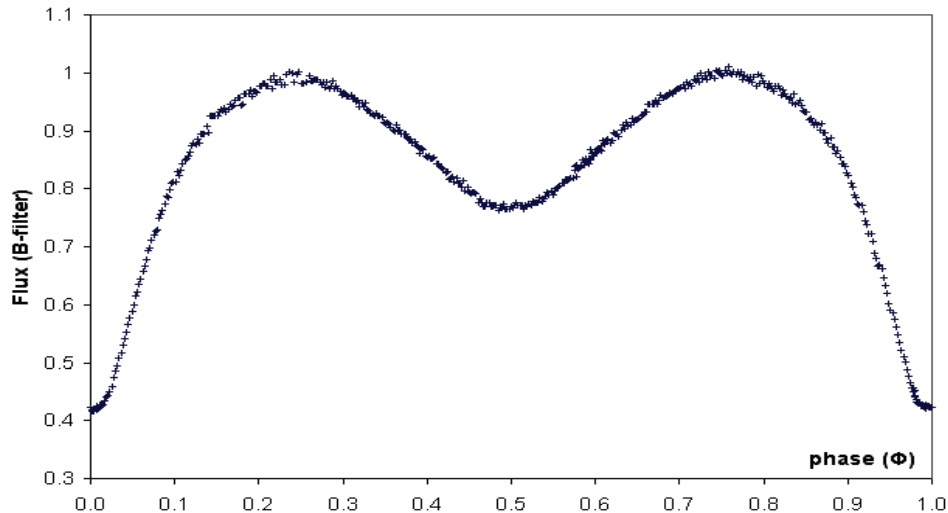
Κανονικοποιούμε τις τιμές των λαμπροτήτων στη μέγιστη τιμή και χρησιμοποιούμε τον εξής λογισμό:

Βρίσκουμε από το διάγραμμα φάσης την μέγιστη τιμή $(V-C)_{max}$, η οποία προφανώς θα αντιστοιχεί στη μέγιστη λαμπρότητα 100% ($L_{MAX} = 1$) του συστήματος. Με αυτά τα δεδομένα πλέον η παραπάνω σχέση μετασχηματίζεται ως εξής :

$$L = 10^{-0.4[\Delta m - (V-C)_{max}]} = 2.512^{[(V-C)_{max} - \Delta m]} \quad (3.18)$$

Όπου Δm η διαφορά του φαινομένου μεγέθους του μεταβλητού αστέρα και του αστέρα συγκρίσεως σε κάθε εικόνα και προκύπτει από το λογισμικό της φωτομετρίας.

Επαναλαμβάνουμε όλη την διαδικασία για όλα τα φίλτρα και τέλος μπορούμε να φτιάξουμε τα διαγράμματα $L = f(\Phi)$.



Σχ.3.5 Το διάγραμμα ροής του ημιαποχωρισμένου δι' εκλείψεων μεταβλητού αστέρα EG Cer στο B φίλτρο. Οι παρατηρήσεις του συστήματος πραγματοποιήθηκαν στις 19 και 21 Αυγούστου 2007 από τον συγγραφέα.

Σε περιπτώσεις όπου παρουσιάζεται έντονη διασπορά σημείων γύρω από τη μέγιστη τιμή, υπολογίζουμε την τυπική απόκλιση της διασποράς. Στη φάση 0.25 (ή 0.75, ανάλογα με το ποιο μέγιστο είναι λαμπρότερο) αφαιρούμε από τη μέγιστη τιμή των σημείων στην περιοχή αυτή το μισό της τυπικής απόκλισης που υπολογίσαμε, έτσι ώστε να είμαστε σίγουροι ότι στη μέγιστη τιμή της κάθε φάσης που θα περάσει η θεωρητική καμπύλη, αντιστοιχεί και παρατηρησιακά η μέγιστη τιμή της λαμπρότητας του συστήματος.

3.7 Διαγράμματα O-C δι' εκλείψεων μεταβλητών αστέρων

Τα διαγράμματα O-C μας πληροφορούν για την κατανομή των χρονικών διαφορών που προκύπτουν μεταξύ των παρατηρηθέντων και των προβλεπομένων από τις αστρονομικές εφημερίδες χρόνων ελαχίστου του συστήματος συναρτήσεως του αριθμού περιφορών των αστέρων γύρω από το κοινό κέντρο μάζας τους. Οι χρόνοι ελαχίστων των διαφόρων εκλειπτικών συστημάτων υπάρχουν στη βιβλιογραφία και συνήθως καλύπτουν αρκετές δεκαετίες παρατηρήσεων. Από την αστρονομική εφημερίδα του μεταβλητού αστέρα που δίνεται από την σχέση (3.14) μπορούμε να προβλέψουμε τις χρονικές στιγμές των μελλοντικών ελαχίστων του συστήματος. Παρ' όλα αυτά, οι παρατηρήσεις έχουν δείξει ότι σε πολλά εκλειπτικά συστήματα αστέρων υπάρχει μεταβολή της περιόδου, από παράγοντες που θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο οι οποίοι διαμορφώνουν το διάγραμμα O-C και αυτό ακριβώς είναι που κάνει την μελέτη και την ανάλυσή τους να έχει έντονο αστροφυσικό ενδιαφέρον.

Τα αρχικά O-C συμβολίζουν την χρονική διαφορά μεταξύ του παρατηρούμενου χρόνου ελαχίστου του συστήματος $T_{OBSERVED}$ και του αντίστοιχα υπολογισμένου

χρόνου από την αστρονομική του εφημερίδα $T_{CALCULATED}$. Τα διαγράμματα O-C έχουν στον κατακόρυφο άξονα την διαφορά $T_{OBS} - T_{CAL}$ και στον οριζόντιο άξονα τον αριθμό περιφορών του συστήματος E (epoch) γύρω από το κέντρο μάζας του. Είναι προφανές ότι σε ένα κανονικό διπλό εκλειπτικό σύστημα (δηλαδή η τροχιά του συστήματος να είναι κυκλική, το σύστημα να είναι απομονωμένο και οι αστέρες να είναι σε απόσταση τέτοια ώστε να μην επιτρέπεται η ανταλλαγή μάζας) στο διάγραμμα O-C προκύπτει η ευθεία O-C = 0. Σε κάθε άλλη περίπτωση, όπου το διπλό σύστημα δεν είναι κανονικό, το διάγραμμα O-C παρουσιάζει ιδιαιτερότητες, όπως π.χ ημιτονοειδή συμπεριφορά, και απαιτεί ειδικό χειρισμό και ανάλυση.

Η κατασκευή των O-C διαγραμμάτων γίνεται με την παρακάτω μέθοδο. Συγκεντρώνοντας από τη βιβλιογραφία όλους τους παρατηρηθέντες χρόνους ελαχίστων του συστήματος (T_{OBS}) και ακόμα καλύτερα παρατηρώντας και νέους, και στηριζόμενοι στην αστρονομική εφημερίδα του συστήματος (P, T_0) λύνουμε την γραμμική μας σχέση

$$T_{OBS} = T_0 + PE \quad (3.19)$$

ως προς τον αριθμό των κύκλων οπότε και προκύπτει η σχέση:

$$E = \frac{T_{OBS} - T_0}{P} \quad (3.20)$$

Γνωρίζουμε ότι οι ακέραιες τιμές του αριθμού περιφορών E αντιστοιχούν σε χρόνους πρωτεύοντος ελαχίστου του συστήματος, ενώ οι ημιακέραιες τιμές σε χρόνους δευτερεύοντος ελαχίστου. Οι τιμές του E που προκύπτουν από την παραπάνω σχέση είναι πολύ κοντά σε ακέραιες ή ημιακέραιες τιμές, ανάλογα με το παρατηρούμενο σύστημα. Μετατρέπουμε αυτές τις τιμές σε ακέραιες ή ημιακέραιες, έτσι ώστε να αντιστοιχούν ακριβώς σε χρόνους πρωτευόντων ή δευτερευόντων ελαχίστων βάση της αστρονομικής εφημερίδας που χρησιμοποιήσαμε και έτσι παίρνουμε νέες τιμές E (fixed) για το E. Βάση αυτών των νέων τιμών υπολογίζουμε τους αντίστοιχους χρόνους ελαχίστων από την σχέση:

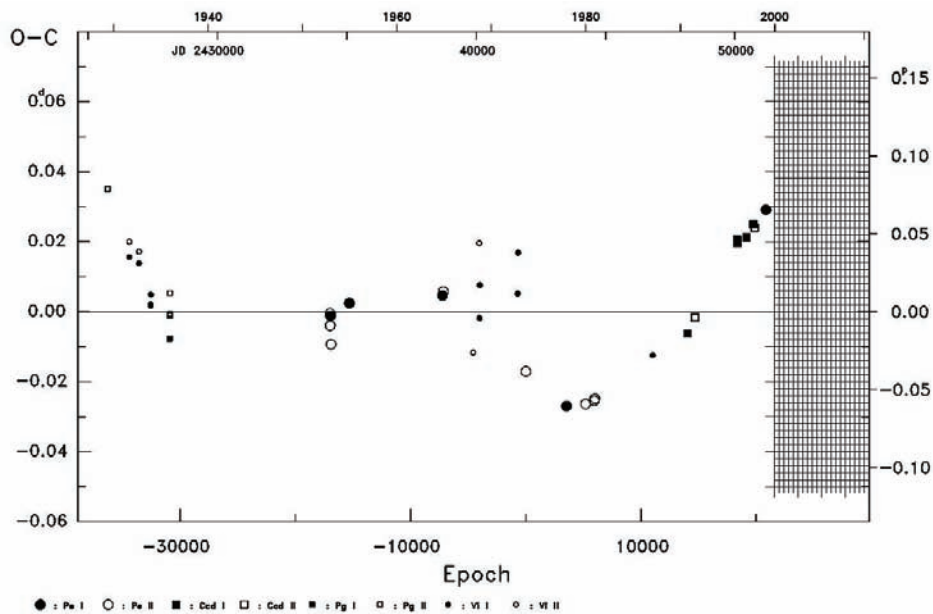
$$T_{CAL} = T_0 + PE \quad (3.21)$$

Πλέον μπορούμε να υπολογίσουμε την διαφορά $T_{OBS} - T_{CAL}$, και να φτιάξουμε το διάγραμμα O-C = f(E).

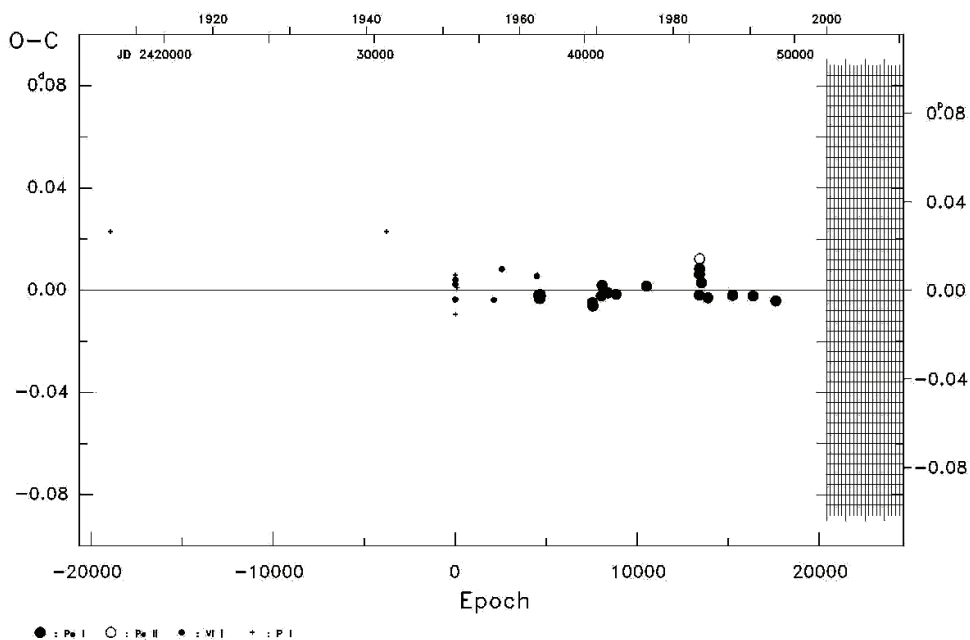
Πίνακας 3.2 Η πρώτη στήλη του παραπάνω πίνακα περιέχει παρατηρούμενους χρόνους ελαχίστων του αστέρα RY Aqr που παρατηρήθηκαν από τον συγγραφέα το 2007. Η δεύτερη στήλη πρόεκυψε από την σχέση $E = (T_{OBS} - T_0)/P$, χρησιμοποιώντας την εφημερίδα του Kreiner ($T_0 = 2440824.3724$, $P = 1.96660885$).

Στην τρίτη στήλη κάνουμε τις προσεγγίσεις του E ώστε οι χρόνοι να αντιστοιχούν ακριβώς σε ελάχιστα του συστήματος (ακέραιες και ημιακέραιες τιμές), στην τέταρτη στήλη είναι οι αντίστοιχοι χρόνοι ελαχίστων υπολογισμένοι για τις τιμές του E (fixed) της τρίτης στήλης και τέλος στην πέμπτη στήλη υπάρχουν οι διαφορές $T_{OBS} - T_{CAL}$

| T_{OBS} (HJD) | E | E(fixed) | T_{CAL} (HJD) | O-C (days) |
|-----------------|----------|----------|-----------------|------------|
| 2454297.46580 | 6850.927 | 6851.0 | 2454297.60963 | -0.14383 |
| 2454361.37312 | 6883.423 | 6883.5 | 2454361.52442 | -0.15130 |
| 2454362.36259 | 6883.926 | 6884.0 | 2454362.50772 | -0.14513 |

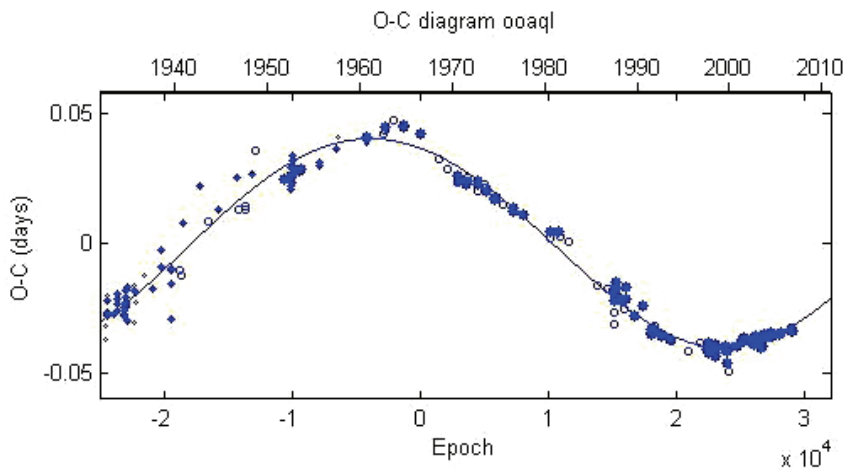


Σχ.3.6 Το O-C διάγραμμα του αστέρα UX Eri. Είναι προφανές ότι αυτό το διπλό σύστημα παρουσιάζει μεταβολές στην περίοδό του, καθώς η μορφή του διαγράμματος δεν είναι η ευθεία $O-C=0$. Ο κάτω οριζόντιος άξονας περιέχει τις τιμές των περιφορών E και ο άνω οριζόντιος άξονας περιέχει τα έτη παρατήρησης και την JD . Ο αριστερός κατακόρυφος άξονας περιέχει τις τιμές $O-C$ σε days, ενώ ο δεξιός περιέχει την ίδια χρονική διαφορά εκφρασμένη σε κλάσματα της περιόδου του συστήματος (Kreiner 2001).

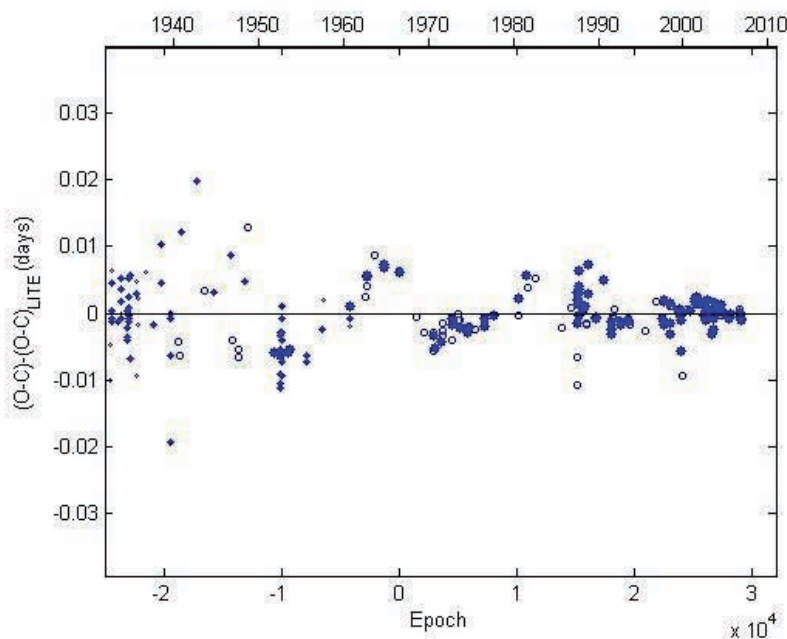


Σχ.3.7 Το O-C διάγραμμα του αστέρα TZ Dra. Αυτό το διπλό σύστημα φαίνεται ότι έχει ομαλή περίοδο και η μορφή της καμπύλης του είναι σχεδόν η ευθεία $O-C=0$. Οι άξονες αναπαριστούν τα ίδια μεγέθη όπως και στο προηγούμενο σχήμα (βλ. λεζάντα) (Kreiner 2001).

Με τη χρήση ειδικού λογισμικού μπορούμε να βρούμε την εξίσωση που αντιστοιχεί στην θεωρητική καμπύλη η οποία περνάει όσο το δυνατόν καλύτερα από τα θεωρητικά σημεία. Εφόσον έχουμε βρει την εξίσωση της θεωρητικής καμπύλης, τότε το πρόγραμμα μπορεί να την αφαιρέσει από το O-C διάγραμμα, και έτσι παρουσιάζεται μια νέα κατανομή των σημείων η οποία ονομάζεται *υπόλοιπα του O-C διαγράμματος*. Αυτή η κατανομή πρέπει να εμφανίζεται συμμετρική γύρω από την ευθεία $O-C = 0$, αφού αντιστοιχεί στην κατανομή η οποία προέρχεται από τα παρατηρηθέντα σημεία του συστήματος αφού πρώτα έχει αφαιρεθεί το φαινόμενο το οποίο δημιούργησε το πρωτότυπο O-C διάγραμμα. Τυχόν περιοδικότητες ή προφανείς σχηματισμοί σε αυτό το διάγραμμα, μας ενημερώνουν ότι στο σύστημα πιθανόν λαμβάνουν χώρα κι άλλα φυσικά φαινόμενα, όπως η ύπαρξη τρίτου σώματος, μαγνητικής δραστηριότητας, μεταφοράς μάζας κ.α.



Σχ.3.8 Το O-C διάγραμμα του αστέρα OO Aql, στο οποίο έχει προσαρμοστεί μία ημιτονοειδής θεωρητική καμπύλη.



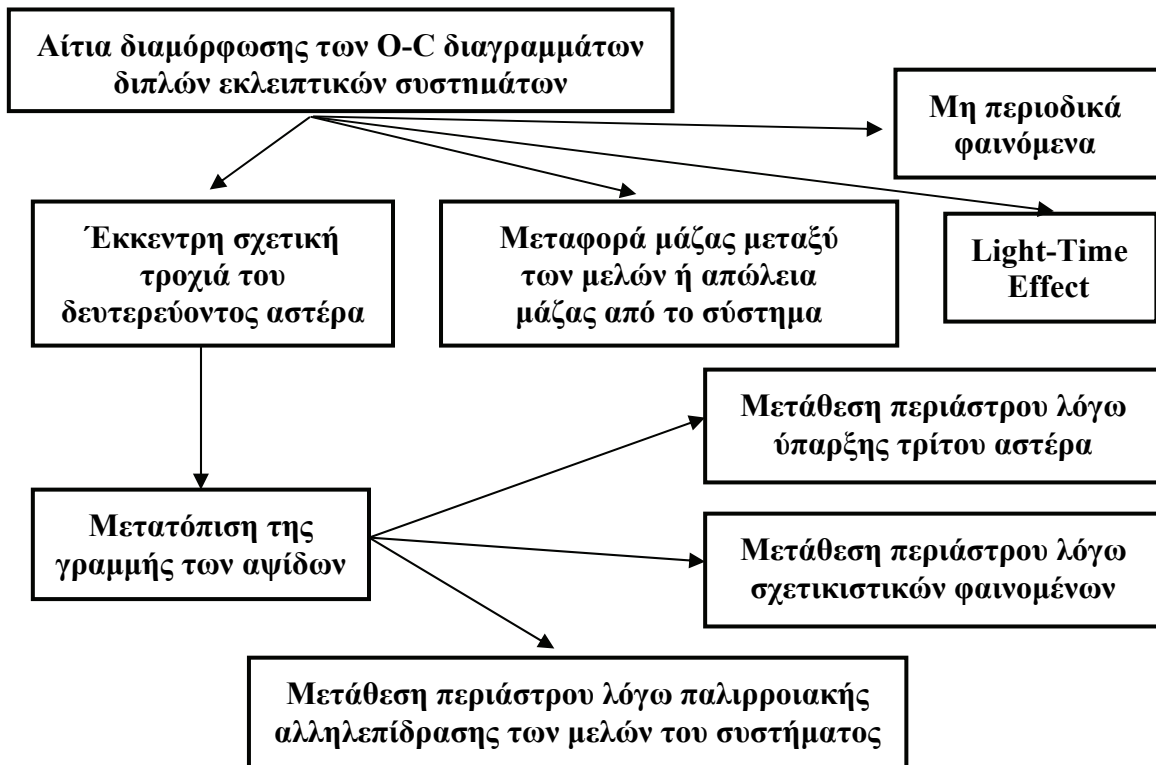
Σχ.3.9 Το διάγραμμα των O-C υπολοίπων του αστέρα OO Aql, το οποίο είναι αποτέλεσμα της αφαίρεσης της ημιτονοειδούς συνάρτησης από το O-C διάγραμμα του σχ.3.8. Παρατηρούμε ότι υπάρχει κάποια εμφανής κατανομή των σημείων η οποία πιθανότατα σχετίζεται με κάποιο φαινόμενο το οποίο δεν λάβαμε υπ' όψη μας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ O-C ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΔΙ' ΕΚΛΕΙΨΕΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΑΣΤΕΡΩΝ

4.1 Διαμόρφωση των διαγραμμάτων O-C και φαινόμενες μεταβολές της περιόδου

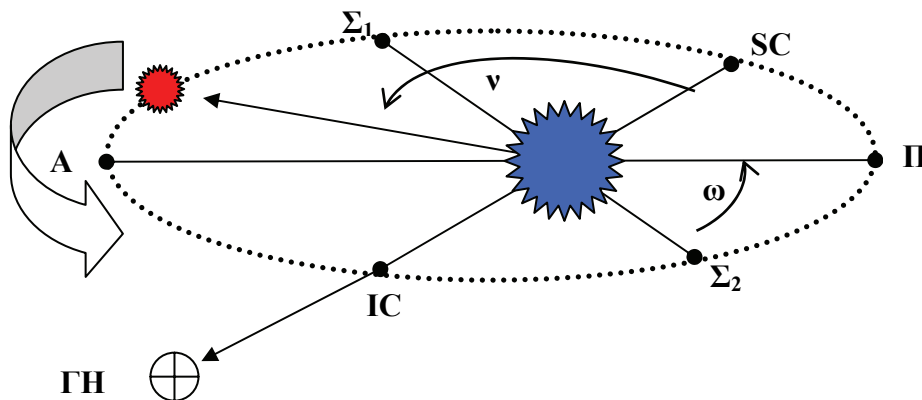
Όπως αναφέραμε και στο τέλος του προηγούμενου κεφαλαίου η μελέτη των O-C διαγραμμάτων παρουσιάζει εξαιρετικό αστροφυσικό ενδιαφέρον, διότι μας προσφέρει πληροφορίες για τις μεταβολές της περιόδου ενός συστήματος. Μέσω των μορφών αυτών των διαγραμμάτων μπορούμε να αντλήσουμε πληροφορίες για τα αίτια που προκαλούν αυτές τις μεταβολές, και με την χρήση υπολογιστικών προγραμμάτων να βρούμε τις παραμέτρους αυτών των αιτίων. Όπως είπαμε, σε ένα διπλό εκλειπτικό σύστημα αστερών, που δεν παρουσιάζει τροχιακές μεταβολές, η μορφή του O-C διαγράμματος είναι ευθεία γραμμή. Όμως, όπως θα δούμε παρακάτω, σε κάποια συστήματα η ύπαρξη ενός τρίτου σώματος ή άλλα φαινόμενα επηρεάζουν την κατανομή των O-C διαγραμμάτων τους, μέσω των οποίων μπορούμε να αποσαφηνίσουμε την κατάσταση που επικρατεί στο σύστημα. Στο παρακάτω σχεδιάγραμμα συνοψίζονται τα αίτια που προκαλούν την διαμόρφωση των O-C διαγραμμάτων.



Σχ.4.1 Σχεδιάγραμμα των αιτίων διαμόρφωσης των O-C διαγραμμάτων.

4.2 Διαφορές O-C λόγω έκκεντρης σχετικής τροχιάς του δευτερεύοντος αστέρα

Από την ουράνιο μηχανική, και συγκεκριμένα από το πρόβλημα των δύο σωμάτων, γνωρίζουμε ότι όταν δύο αστέρες αλληλεπιδρούν βαρυτικά, κινούνται γύρω από το κοινό κέντρο μάζας τους. Σε περιπτώσεις όμως όπου ο ένας αστέρας έχει πολύ μεγαλύτερη μάζα από τον άλλο, τότε δεν έχει νόημα να συζητούμε για κέντρο μάζας. Θεωρούμε το κέντρο μάζας του συστήματος ταυτίζεται με τη θέση του αστέρα με τη μεγαλύτερη μάζα και ο αστέρας με τη μικρότερη μάζα περιφέρεται γύρω από αυτόν, κάτι ανάλογο με τη κίνηση των πλανητών στο ηλιακό μας σύστημα. Σε αυτή τα παράγραφο θα δούμε πως μεταβάλλεται η περίοδος ενός διπλού εκλειπτικού συστήματος αστέρων, όπου η τροχιά του δευτερεύοντος αστέρα παρουσιάζει εκκεντρότητα e και κλίση i ως προς το τοπικό επίπεδο του ουρανού.



Σχ.4.2 Η γεωμετρία ενός διπλού εκλειπτικού συστήματος με έκκεντρη τροχιά του δευτερεύοντος αστέρα.

Τα σημεία A και Π αντιστοιχούν στο άπαστρο και στο περίαστρο της τροχιάς του συνοδού αστέρα αντίστοιχα, και η ευθεία ΑΠ ονομάζεται γραμμή των αψίδων. Τα σημεία Σ_1 και Σ_2 αντιστοιχούν στους συνδέσμους (σημεία που ενώνονται από την ευθεία που είναι κάθετη στην οπτική ευθεία), και τα σημεία SC και IC αντιστοιχούν στα σημεία ανωτέρας και κατωτέρας συνόδου όπου λαμβάνουν χώρα τα φωτομετρικά ελάχιστα της λαμπρότητας του συστήματος. Η γωνία ω δίνει το φαινόμενο μήκος του περιάστρου Π, και η γωνία ν παριστάνει το φαινόμενο τροχιακό μήκος του δευτερεύοντος αστέρα. Αρχή μέτρησης της γωνίας ν ορίζουμε το σημείο SC ($\nu_A = 0$), ενώ στο σημείο IC έχουμε την τιμή $\nu_{\pi} = \pi$.

Από την μηχανική γνωρίζουμε ότι η ταχύτητα του περιφερόμενου σώματος δεν είναι σταθερή κατά μήκος της τροχιάς του. Αυτό έχει ως συνέπεια ότι οι χρόνοι που απαιτούνται για την κάλυψη των τόξων SC-IC και IC-SC από τον δευτερεύοντα αστέρα να είναι άνισοι. Κατ' επέκταση τα ελάχιστα της λαμπρότητας του συστήματος δεν παρατηρούνται στις φάσεις $\Phi_I = 0$ και $\Phi_{II} = 0.5$ όπως στα κανονικά εκλειπτικά συστήματα, αλλά σε φάσεις Φ_I' , Φ_{II}' που δίνονται από τις σχέσεις (Καλημέρης 2002):

$$\Phi_I' = \frac{1}{2\pi} [\nu_1 - 2e \cos(\nu_1 - \omega) - \frac{3}{4} e^2 \sin 2(\nu_1 - \omega)] \quad (4.1)$$

$$\Phi_{II'} = \frac{1}{2\pi} [v_2 - 2e \cos(v_2 - \omega) - \frac{3}{4} e^2 \sin 2(v_2 - \omega)] \quad (4.2)$$

Το παραπάνω σχήμα έχει σχεδιαστεί με κλίση $i = 90^\circ$ (δηλ. η ευθεία παρατήρησης συμπίπτει με το επίπεδο της τροχιάς) κάτι που θεωρείται εξιδανικευμένη περίπτωση για εκλειπτικό σύστημα αστέρων. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων $i \neq 90^\circ$ και κατ' επέκταση τα φωτομετρικά ελάχιστα του συστήματος παρατηρούνται σε ελαφρώς διαφορετικές τιμές τροχιακού μήκους v από ότι στα κανονικά εκλειπτικά συστήματα.

Οι τιμές του τροχιακού μήκους, κατά τις οποίες παρατηρούνται τα φωτομετρικά ελάχιστα ενός εκλειπτικού συστήματος με έκκεντρη τροχιά δευτερεύοντος, δίνονται από τις σχέσεις (Καλημέρης 2002):

$$v_1 = \pi + e \frac{\cos \omega \cos^2 i}{\sin^2 i} \left(1 + e \frac{\sin \omega}{\sin^2 i} \right) \quad (4.3)$$

$$v_2 = -e \frac{\cos \omega \cos^2 i}{\sin^2 i} \left(1 - e \frac{\sin \omega}{\sin^2 i} \right) \quad (4.4)$$

Αφαιρούμε κατά μέλη τις σχέσεις (4.1) και (4.2), και κρατάμε μόνο τους πρωτοβάθμιους όρους της εκκεντρότητας. Γνωρίζουμε ότι η διαφορά $T_2 - T_1$ είναι η χρονική διαφορά μεταξύ των ελαχίστων. Από την παραπάνω αφαίρεση όμως προκύπτει η σχέση:

$$T_2 - T_1 = \frac{P}{2} + \frac{P}{\pi} e \cos \omega \left(1 + \frac{1}{\sin^2 i} \right) \quad (4.5)$$

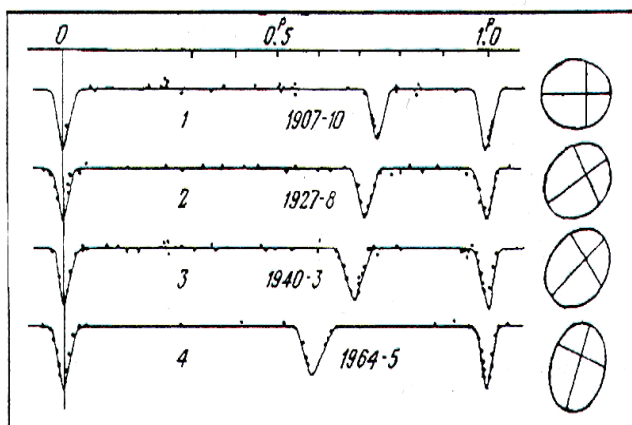
Παρατηρούμε ότι ο δεύτερος όρος του δεξιού μέλους είναι ο επιπρόσθετος χρόνος της περιόδου λόγω της έκκεντρης τροχιάς του δευτερεύοντος αστέρα.

Αν κάνουμε διερεύνηση στην σχέση (4.5) καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

- Αν $-\pi \leq \omega \leq \pi$, τότε $T_2 - T_1 \geq \frac{P}{2}$
- Αν $\pi \leq \omega \leq \frac{3\pi}{2}$, τότε $T_2 - T_1 \leq \frac{P}{2}$

Άρα η τροχιακή εκκεντρότητα έχει ως αποτέλεσμα την προσέγγιση πρωτεύοντος-δευτερεύοντος ελαχίστου ή μία μετάθεση φάσης του δευτερεύοντος ελαχίστου

($\varphi=0 \rightarrow$ πρωτεύον ελάχιστο) κατά μία τιμή $\pm 2 \frac{e}{\pi} \cos \omega$.



Σχ.4.3 Το διπλανό σχήμα μας δείχνει τέσσερα διαγράμματα φάσης, στα οποία είναι εμφανής η μετατόπιση του δευτερεύοντος ελαχίστου λόγω της τροχιακής εκκεντρότητας και της μετατόπισης της γραμμής των αψίδων, όπως δείχνουν οι άξονες της ελλειπτικής τροχιάς του συστήματος, δεξιά του εκάστοτε διαγράμματος φάσης (Martynov 1973).

4.3 Διαφορές O-C λόγω περιστροφής της γραμμής των αψίδων

Ενδιαφέρουσες αλλαγές στα O-C διαγράμματα προκαλεί η λεγόμενη *μετάθεση της γραμμής των αψίδων (apsidal motion)*, που είναι ο μεγάλος ημιάξονας της έλλειψης της τροχιάς του εκλειπτικού συστήματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2. Τα αίτια αυτής της μετάθεσης, όπως η ύπαρξη τρίτου σώματος ή οι παλιρροιακές δυνάμεις μεταξύ των μελών, προκαλούν μεταβολές στα στοιχεία e , i , ω της τροχιάς, όμως άμεση επίδραση στα O-C διαγράμματα έχει μόνο η μεταβολή του τροχιακού μήκους του περιάστρου ω της τροχιάς. Στη παράγραφο 4.4 θα δούμε τελικά πως διαμορφώνονται τα O-C διαγράμματα, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις επιρροές που λαμβάνουν χώρα.

Σε χρονικά διαστήματα πολύ μεγαλύτερα από την τροχιακή περίοδο P ενός διπλού εκλειπτικού συστήματος, το μήκος του περιάστρου της τροχιάς μεταβάλλεται με σταθερό ρυθμό $\dot{\omega}$ (deg/E), και η θέση του για τυχαία χρονική στιγμή δίνεται από την σχέση:

$$\omega = \omega_0 + \dot{\omega} E \quad (4.6)$$

όπου E ακέραιος αριθμός των τροχιακών κύκλων. Παρατηρούμε ότι η μεταβλητή ω είναι μια αύξουσα συνάρτηση του χρόνου. Τέλος μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η γραμμή των αψίδων περιστρέφεται αργά γύρω από το κέντρο μάζας τους συστήματος, με την περίοδο περιφοράς της U , να υπολογίζεται από τη σχέση (Kopal 1959):

$$U = \frac{2\pi}{\dot{\omega}} P_a \quad (4.7)$$

Όπου P_a η ανωμαλιστική περίοδος (ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών διαβάσεων του συνοδού αστέρα από το περίαστρο της τροχιάς του) του διπλού συστήματος και συνδέεται με την τροχιακή βάσει της σχέσης:

$$P = P_a \left(1 - \frac{\dot{\omega}}{360^\circ} \right) \quad (4.8)$$

Από τις παρατηρήσεις μας, μπορούμε να μετρήσουμε την περίοδο P του συστήματος, αλλά και τον ρυθμό μεταβολής του μήκους του περιάστρου $\dot{\omega}$. Οπότε από την θεωρία διάδοσης των σφαλμάτων, ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις για τον υπολογισμό των σφαλμάτων της ανωμαλιστικής περιόδου του διπλού συστήματος, και της περιόδου της γραμμής των αψίδων αντίστοιχα:

$$\delta P_a = \sqrt{\left(\frac{\partial P_a}{\partial P} \delta P \right)^2} = \sqrt{\left[\frac{1}{1 - \dot{\omega}/360^\circ} \delta P \right]^2} \quad (4.9)$$

$$\delta U = \sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial \dot{\omega}} \delta \dot{\omega} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial P_a} \delta P_a \right)^2} = \sqrt{\left(-\frac{360^\circ P_a}{\dot{\omega}^2} \delta \dot{\omega} \right)^2 + \left(\frac{360^\circ}{\dot{\omega}} \delta P_a \right)^2} \quad (4.10)$$

4.3.1 Μετάθεση του περιάστρου λόγω της παλιρροιακής αλληλεπίδρασης των μελών

Η μετάθεση του περιάστρου της τροχιάς ενός διπλού εκλειπτικού συστήματος περιόδου P λόγω παλιρροιακών αλληλεπιδράσεων αποδεικνύεται ότι οφείλεται στους ανώτερους όρους του τετραπολικού αναπτύγματος του δυναμικού μεταξύ των μελών του. Η γραμμή των αψίδων περιστρέφεται ομόρροπα με την τροχιακή κίνηση και η περίοδος περιφοράς της (U_1) δίνεται από το ανάπτυγμα (Martynov 1973):

$$\frac{P}{U_1} = k_{2,1} \cdot \left[15q \cdot f_2(e) + \left(\frac{\Omega_1}{\omega_K} \right)^2 \cdot \frac{1+q}{(1-e^2)^2} \right] \cdot \left(\frac{R_1}{D} \right)^5 + k_{2,2} \cdot \left[15 \frac{f_2(e)}{q} + \left(\frac{\Omega_2}{\omega_K} \right)^2 \cdot \frac{1+q^{-1}}{(1-e^2)^2} \right] \cdot \left(\frac{R_2}{D} \right)^5 + 28 \cdot f_3(e) \cdot \left[k_{3,1} \cdot q \cdot \left(\frac{R_1}{D} \right)^7 + k_{3,2} \cdot q^{-1} \cdot \left(\frac{R_2}{D} \right)^7 \right] + 45 \cdot f_4(e) \cdot \left[k_{4,1} \cdot q \cdot \left(\frac{R_1}{D} \right)^9 + k_{4,2} \cdot q^{-1} \cdot \left(\frac{R_2}{D} \right)^9 \right] + \dots \quad (4.11)$$

Όπου $q = \frac{m_2}{m_1}$ ο λόγος μαζών των μελών του συστήματος, $k_{j,i}$ σταθερές j-τάξης του

i-μέλους του συστήματος που εξαρτώνται από την κατανομή της πυκνότητας του εσωτερικού του αστέρα, Ω_i οι γωνιακές ταχύτητες της ιδιοπεριστροφής των μελών, ω_K η τροχιακή γωνιακή ταχύτητα, R_i οι ακτίνες των αστέρων, D η μεταξύ τους απόσταση και $f_i(e)$ οι συναρτήσεις της εκκεντρότητας που δίνονται από τις σχέσεις:

$$f_2(e) = (1-e^2)^{-5} \cdot \left(1 + \frac{3}{2}e^2 + \frac{1}{8}e^4 \right), \quad f_3(e) = (1-e^2)^{-7} \cdot \left(1 + \frac{15}{4}e^2 + \frac{15}{8}e^4 + \frac{5}{64}e^6 \right), \quad f_4(e) = (1-e^2)^{-9} \cdot \left(1 + 7e^2 + \frac{35}{4}e^4 + \frac{35}{16}e^6 + \frac{7}{128}e^8 \right) \quad (4.12)$$

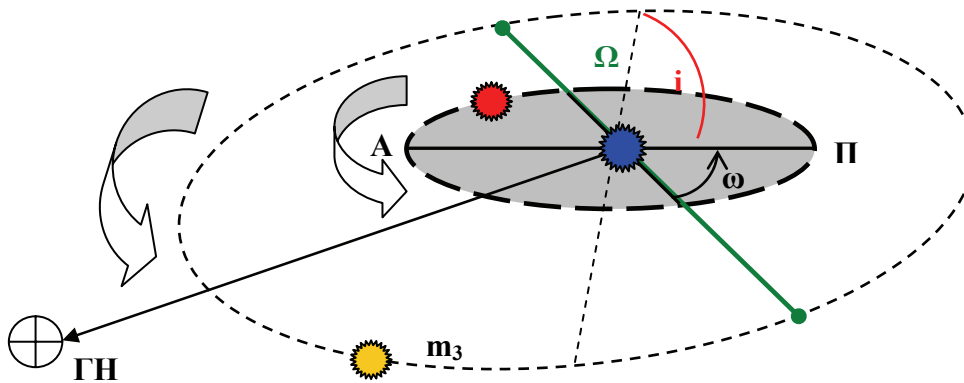
Οι δεύτεροι όροι των δύο πρώτων αγκυλών του αναπτύγματος (4.11) οφείλονται στην φυγοκεντρική παραμόρφωση των μελών, ενώ οι υπόλοιποι στην παλιρροιακή παραμόρφωση.

4.3.2 Μετάθεση του περιάστρου λόγω ύπαρξης τρίτου αστέρα

Θεωρούμε αστέρα μάζας m_3 ο οποίος περιφέρεται σε τροχιά εκκεντρότητας e' και με περίοδο περιφοράς P' γύρω από το διπλό εκλειπτικό σύστημα. Το εν λόγω θέμα μελετήθηκε πρώτα από τον Slavenas (1927), και στη συνέχεια από τους Martynov (1948) και Korpal (1938, 1959). Ο Korpal έδειξε ότι η περίοδος U_2 της περιστροφής της γραμμής των αψίδων της τροχιάς του διπλού συστήματος δίνεται από την σχέση:

$$\frac{P'}{U_2} = \frac{3}{8\pi} \frac{m_3}{m_1 + m_2 + m_3} \frac{1}{(1-e'^2)^{3/2}} \cdot \left(\frac{P'}{P} \right) \cdot \left[(1-Q)^2 - 5(1-Q^2) \cdot \sin^2(\omega - \Omega) \right] \quad (4.13)$$

Όπου $Q = 2 \sin\left(\frac{i}{2}\right) \cos \Omega$, Ω (πράσινη γραμμή στο παρακάτω σχήμα) το μήκος των συνδέσμων (η τομή των επιπέδων τροχιάς του διπλού συστήματος και του τρίτου σώματος) και i η κλίση των δύο τροχιακών επιπέδων.



Σχ.4.4 Η γεωμετρία ενός διπλού εκλειπτικού συστήματος με την παρουσία ενός τρίτου σώματος.

Υπό ορισμένες συνθήκες η κίνηση του περιάστρου λόγω της ύπαρξης του τρίτου σώματος μπορεί να εκτελείται ανάδρομα. Η γραμμή των συνδέσμων του διπλού συστήματος υφίσταται συνεχείς μεταβολές που μακροχρόνια αποδεικνύονται μονότονες, και υπόκειται σε ανάδρομη περιφορά με περίοδο U_T που δίνεται από την σχέση (Kopal 1959):

$$\frac{P'}{U_T} = -\frac{3}{8\pi} \frac{m_3}{m_1 + m_2 + m_3} \frac{P}{P'} \frac{1}{(1 - e'^2)^{3/2}} Q \quad (4.14)$$

4.3.3 Μετάθεση του περιάστρου λόγω σχετικιστικών φαινομένων

Μετάθεση του περιάστρου και περιστροφή της γραμμής των αψίδων προκαλείται και από σχετικιστικά φαινόμενα. Το μήκος του περιάστρου της τροχιάς μεταβάλλεται με σταθερό ρυθμό $\dot{\omega}_3$ (deg/cycle), σύμφωνα με την σχέση (Misner, Thorne & Wheeler 1970):

$$\dot{\omega}_3 = \frac{G}{c^2} \frac{6\pi M_1}{D(1 - e^2)} \quad (4.15)$$

Και η περίοδος περιφοράς της γραμμής των αψίδων U_3 δίνεται από την σχέση:

$$\frac{P}{U_3} = \frac{G}{c^2} \frac{3M_1}{D(1 - e^2)} \quad (4.16)$$

Όπου M_1 η μάζα του πρωτεύοντος αστέρα, D η απόσταση των μελών και G η παγκόσμια σταθερά της βαρύτητας.

4.3.4 Διαμόρφωση των O-C διαγραμμάτων από την περιστροφή της γραμμής των αψίδων

Είναι προφανές ότι για να έχουμε περιστροφή της γραμμής των αψίδων, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η έκκεντρη τροχιά του δευτερεύοντος αστέρα του συστήματος. Σε όλες τις περιπτώσεις περιστροφής της γραμμής των αψίδων, η τροχιακή περίοδος του εκλειπτικού συστήματος δεν αλλάζει, μεταβάλλεται όμως ο προσανατολισμός της ελλειπτικής τροχιάς του (σχ.4.3). Επιλέγοντας για τις διάφορες παραμέτρους που εμπλέκονται στις σχέσεις των §4.3.2 και §4.3.3, τιμές που είναι τυπικές για τα συστήματα W UMa ($M_1 \sim 1 M_\odot$, $q \sim 0.5$, $D \sim 2 R_\odot$, $\Omega_1 = \Omega_2 = \omega_k$, $n \sim 1.5$, $e \sim 10^{-2}$) διαπιστώνουμε ότι ο ρυθμός περιστροφής της γραμμής των αψίδων λόγω παλιρροιακών και περιστροφικών παραμορφώσεων των μελών τους είναι μεγαλύτερος ($\sim 100-1000$ φορές) από τον ρυθμό σχετικιστικής περιστροφής, καθώς και από τον ρυθμό περιστροφής λόγω ύπαρξης τρίτου αστέρα.

Από την σχέση 4.5 βλέπουμε ότι $T_2 - T_1 \propto \cos \omega$, δηλαδή οι χρονικές διαφορές μεταξύ πρωτεύοντων και δευτερευόντων ελαχίστων αποτελούν μια περιοδική συνάρτηση του χρόνου. Αν θεωρήσουμε ότι το μήκος του περιάστρου μεταβάλλεται λόγω όλων των παραγόντων που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους (ύπαρξη τρίτου σώματος, παλιρροιακές αλληλεπιδράσεις, σχετικιστικά φαινόμενα) τότε θα δίνεται από την σχέση:

$$\omega = \omega_0 + (\dot{\omega}_1 + \dot{\omega}_2 + \dot{\omega}_3)E \quad (4.17)$$

Όπου $\dot{\omega}_1$ ο ρυθμός περιστροφής του περιάστρου λόγω παλιρροιακής αλληλεπίδρασης, $\dot{\omega}_2$ ο ρυθμός περιστροφής του περιάστρου λόγω ύπαρξης τρίτου σώματος και $\dot{\omega}_3$ ο ρυθμός περιστροφής του περιάστρου λόγω σχετικιστικών φαινομένων.

Θεωρώντας $\dot{\omega}_T = \dot{\omega}_1 + \dot{\omega}_2 + \dot{\omega}_3$ τότε η παραπάνω σχέση παίρνει την μορφή:

$$\omega = \omega_0 + \dot{\omega}_T E \quad (4.18)$$

Επομένως όπως απέδειξε ο Martynov (1973) η χρονική στιγμή $O_{E,I}$ αναμενόμενης παρατήρησης του πρωτεύοντος ελαχίστου κατά τον τυχαίο τροχιακό κύκλο E δίνεται από την σχέση:

$$O_{E,I} = T_{0,I} + E \cdot P - \frac{P}{2\pi} \cdot e \cdot \left(1 + \frac{1}{\sin^2 i}\right) \cdot \cos \omega + \frac{3P}{4 \cdot 2\pi} \cdot e^2 \cdot \left(1 + \frac{4}{3} \cdot \cot^2 i + \frac{2}{3} \cdot \frac{\cot^2 i}{\sin^2 i}\right) \cdot \sin 2\omega + O(e^3) \quad (4.19)$$

Εντελώς αντίστοιχα η χρονική στιγμή $O_{E,II}$ αναμενόμενης παρατήρησης του δευτερεύοντος ελαχίστου κατά τον τυχαίο τροχιακό κύκλο E δίνεται από την σχέση:

$$O_{E,II} = T_{0,II} + E \cdot P + \frac{P}{2\pi} \cdot e \cdot \left(1 + \frac{1}{\sin^2 i}\right) \cdot \cos \omega + \frac{3P}{4 \cdot 2\pi} \cdot e^2 \cdot \left(1 + \frac{4}{3} \cdot \cot^2 i + \frac{2}{3} \cdot \frac{\cot^2 i}{\sin^2 i}\right) \cdot \sin 2\omega + O(e^3) \quad (4.20)$$

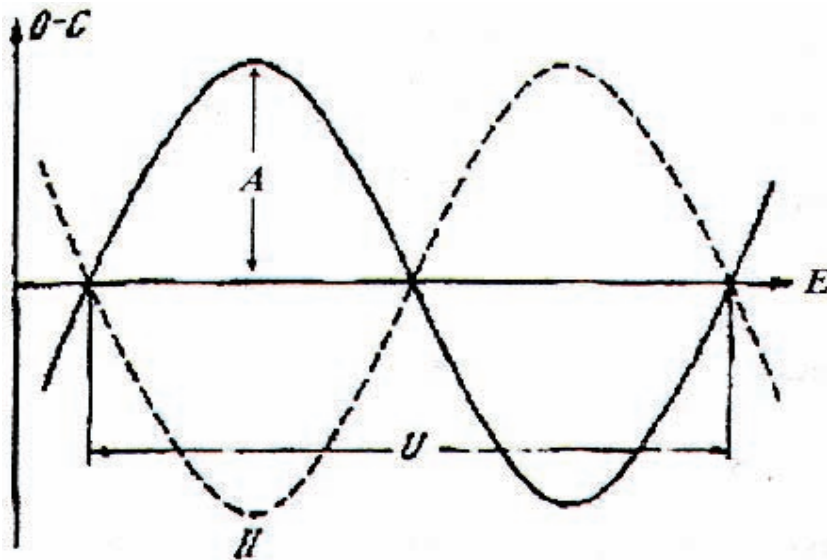
Τελικά, τα διαγράμματα $(O-C)_I$ (πρωτεύοντα ελάχιστα) και $(O-C)_{II}$ (δευτερεύοντα ελάχιστα) διαμορφώνονται βάση των σχέσεων:

$$(O-C)_I = -\frac{P}{2\pi} \cdot e \cdot \left(1 + \frac{1}{\sin^2 i}\right) \cdot \cos(\omega_0 + \dot{\omega}_T \cdot E) \quad (4.21)$$

$$(O-C)_{II} = \frac{P}{2\pi} \cdot e \cdot \left(1 + \frac{1}{\sin^2 i}\right) \cdot \cos(\omega_0 + \dot{\omega}_T \cdot E) \quad (4.22)$$

Οι παραπάνω κατανομές έχουν ημιτονοειδή μορφή πλάτους:

$$A = \frac{P}{2\pi} \cdot e \cdot \left(1 + \frac{1}{\sin^2 i}\right) \quad (4.23)$$



Σχ. 4.5 Διαμόρφωση O-C διαγράμματος διπλού εκλειπτικού συστήματος με περίοδο περιστροφής της γραμμής των αψίδων U . Η συνεχής γραμμή αντιστοιχεί στην κατανομή των πρωτευόντων ελαχίστων και η διακεκομμένη στην κατανομή των δευτερευόντων ελαχίστων.

4.4 Διαφορές O-C λόγω του Light-Time Effect (LITE)

4.4.1 Εισαγωγή

Τα διπλά εκλειπτικά συστήματα συχνά παρουσιάζουν μεταβολές στην περίοδό τους. Σε μερικές περιπτώσεις η αιτία για αυτές τις μεταβολές μπορεί να είναι η ύπαρξη ενός τρίτου σώματος. Το διπλό σύστημα περιφέρεται γύρω από ένα κοινό κέντρο μάζας και των τριών σωμάτων και έτσι η απόστασή του από εμάς αυξομειώνεται περιοδικά, και προφανώς οι χρόνοι παρατήρησης των φωτομετρικών ελαχίστων μεταβάλλονται και αυτοί.

Η θεωρία του LITE εισήχθη από τον Irwin (1959). Πιθανότατα ο πρώτος που ανέφερε το LITE ως πιθανή αιτία μεταβολής της περιόδου του Algol ήταν ο Chandler (1888) και ο πρώτος που υπολόγισε αυτό το φαινόμενο ήταν ο Woltjer (1922). Αργότερα το LITE προτάθηκε πολλές φορές ως ερμηνεία για διπλά εκλειπτικά συστήματα που παρουσίαζαν αλλαγή στην περίοδό τους, εντούτοις

γινόταν αποδεκτό μόνο όταν υπήρχαν και άλλες ενδείξεις για την ύπαρξη τρίτου αστέρα στο σύστημα.

Οι Frieboes-Conde & Herczeg (1973) δημοσίευσαν μια λίστα με τα κριτήρια που θα έπρεπε να πληρούν οι παρατηρήσεις σε διπλά εκλειπτικά συστήματα, ώστε να ερμηνευτούν οι περιοδικές μεταβολές των O-C διαγραμμάτων τους με το LITE.

- Συμφωνία των παρατηρησιακών σημείων (χρόνοι ελαχίστων) με την θεωρητική καμπύλη του LITE
- Τα σημεία των δευτερευόντων ελαχίστων να έχουν ταυτοτική (συμμετρική) συμπεριφορά με αυτά των πρωτευόντων στο διάγραμμα O-C.
- Λογική τιμή της συνάρτησης μάζας, ώστε να αποδεικνύεται η ύπαρξη του τρίτου αστέρα
- Αντίστοιχες μεταβολές στις ακτινικές ταχύτητες των αστέρων

Εκτός από LITE τα φωτομετρικά τριπλά συστήματα αστέρων παρουσιάζουν και άλλα φαινόμενα, ανάλογα προφανώς με το πολύ καλά μελετημένο σύστημα Ήλιος-Γη-Σελήνη. Η δυναμική των τριπλών συστημάτων έχει μελετηθεί από πολλούς επιστήμονες. Η ευκολία στην παρατήρηση τέτοιου είδους συστημάτων γενικά αυξάνει όσο μικρότερη είναι η περίοδος του τρίτου σώματος.

Γνωρίζοντας τις μάζες των αστέρων του τριπλού συστήματος, το πλάτος του LITE αυξάνει ανάλογα με την απόσταση και τη μάζα του τρίτου αστέρα από τους αστέρες του διπλού συστήματος. Όταν το τρίτο σώμα παρουσιάζει περίοδο μεγαλύτερη από μερικές δεκαετίες είναι δύσκολο να υπολογισθεί με ακρίβεια διότι τα δεδομένα των παλαιότερων ετών θεωρούνται επισφαλής λόγω της χαμηλής ποιότητας των παρατηρήσεων τα παλαιότερα χρόνια.

Εκτός από τον αστέρα Algol, το LITE έχει βρεθεί και στο σύστημα EE Peg μετά από φασματοσκοπικές μελέτες που απέδειξαν την ύπαρξη του τρίτου σώματος. Ωστόσο υπάρχει ένα περιορισμένο εύρος περιόδων του τρίτου σώματος, που μπορεί να ανακαλυφθεί το LITE. Αυτό το εύρος διαφέρει από το εύρος των περιόδων που μπορούν να ανακαλυφθούν καλύτερα μέσω φασματοσκοπικών μελετών (μικρότερες περίοδοι) ή όταν το τρίτο σώμα είναι ορατό (μεγαλύτερες περίοδοι).

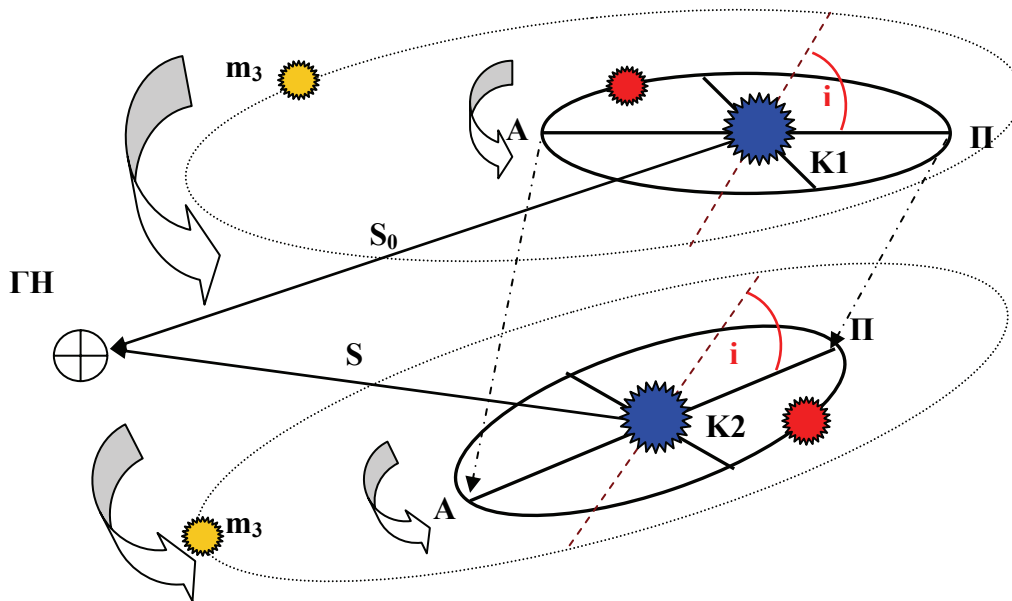
4.4.2 Το μαθηματικό μοντέλο του LITE

Το **LITE** (*Light-Time Effect*) προκαλείται συνήθως από την ύπαρξη ενός τρίτου σώματος στην γειτονιά του διπλού εκλειπτικού συστήματος το οποίο προκαλεί μετατόπιση του κέντρου μάζας του διπλού συστήματος με αποτέλεσμα την χρονική διαφορά μεταξύ των φωτεινών σημάτων που λαμβάνουμε στην γη, που γίνεται αντιληπτή μέσω των διαφορών μεταξύ παρατηρηθέντων και προβλεπομένων χρόνων ελαχίστων που προκύπτουν στα O-C διαγράμματα. Κύριο χαρακτηριστικό του είναι η περιοδικότητα των σημείων στα O-C διαγράμματα. Αναλυτικότερα, μπορούμε να πούμε ότι λόγω της μετάθεσης του κέντρου μάζας του διπλού συστήματος, τα φωτομετρικά ελάχιστα παρατηρούνται λίγο νωρίτερα ή αργότερα από τον αναμενόμενο χρόνο, καθώς το φως διανύει λιγότερο ή περισσότερο δρόμο αντίστοιχα, ώσπου να φθάσει σε μας. Με αυτόν τον τρόπο σχηματίζεται μια διαφορά O-C το μέγεθος της οποίας ελέγχεται από την ανά τροχιακό κύκλο μεταβολή της απόστασης κέντρου μάζας – Γη. Το κέντρο μάζας του διπλού συστήματος διαγράφει ομοίothete ελλειπτική τροχιά προς εκείνη

του τρίτου σώματος. Η απόστασή του από την γη σε τυχαία χρονική στιγμή δίνεται από την σχέση (Martynov 1973):

$$S = s_0 + v_{ob} \cdot (t - T_0) + a' \cdot (1 - e' \cdot \cos \varepsilon') \cdot \sin i' \cdot \sin(\nu' + \omega') \quad (4.24)$$

Όπου S_0 η απόσταση του κέντρου μάζας του συστήματος από την γη την χρονική στιγμή T_0 , U_{ob} η συνιστώσα της ταχύτητας του διπλού συστήματος στην διεύθυνση της ευθείας παρατήρησης, a' το μήκος του ημιάξονα της τροχιάς του κέντρου μάζας του διπλού συστήματος ως προς το κέντρο βάρους του τριπλού συστήματος, e' η εκκεντρότητα της τροχιάς του κέντρου μάζας του διπλού συστήματος, i' η κλίση της τροχιάς του τρίτου αστερά, ω' το μήκος του περιιάστρου της τροχιάς του και ν' , ε' η αληθής και έκκεντρη ανωμαλία αντίστοιχα του τρίτου αστερά σε τυχαία χρονική στιγμή.



Σχ.4.6 Η γεωμετρία ενός διπλού εκλειπτικού συστήματος με την παρουσία ενός τρίτου αστερά (m_3), ο οποίος προκαλεί μετάθεση της γραμμής των αψίδων και μετατόπιση του κέντρου μάζας του διπλού συστήματος (από $K1$ στο $K2$). Επίσης είναι εμφανής η διαφορά δρόμων που ακολουθεί το φως ώσπου να φθάσει σε μας. Στη πρώτη περίπτωση είναι ο S_0 και στην δεύτερη ο S .

Αν για το μήκος D' του ημιάξονα της σχετικής τροχιάς του τρίτου αστερά $D' \gg D$, τότε για το a' έχουμε σύμφωνα με το πρόβλημα των δύο σωμάτων:

$$a' = \frac{m_3}{m_{1,2} + m_3} \cdot D' \quad (4.25)$$

Με την χρήση κατάλληλων αναπτυγμάτων των ποσοτήτων $1 - e'$, $\cos \varepsilon'$, $\sin \nu'$, $\cos \nu'$ ως προς την μέση ανωμαλία M' του τρίτου σώματος (Martynov 1973), έπεται ότι η χρονική απόσταση $\frac{S}{c}$ του κέντρου μάζας του διπλού συστήματος από την Γη, δίνεται από την εξίσωση φωτός:

$$\frac{S}{c} = \frac{v_{ob}}{c} + \frac{a' \cdot \sin i'}{c} \cdot \left[-\frac{3}{2} e' \cdot \sin \omega' + \left(1 - \frac{1}{2} e'^2\right) \cdot \sin \left(2\pi \frac{P}{P'} E + N'_0 + \omega'\right) - \frac{1}{8} e'^2 \sin \left(2\pi \frac{P}{P'} E + N'_0 - \omega'\right) + \frac{1}{2} e' \cdot \sin \left(4\pi \frac{P}{P'} E + 2N'_0 + \omega'\right) + \frac{3}{8} e'^2 \cdot \sin \left(6\pi \frac{P}{P'} E + 3N'_0 + \omega'\right) \right] \quad (4.26)$$

$$\text{Όπου} \quad N'_0 = \frac{2\pi}{P'} \cdot T_0 + c' \quad (4.27)$$

Με C' σταθερά με τιμή που επιλέγεται έτσι ώστε η τιμή της M' τη χρονική στιγμή T_0 να είναι ίση με μια παρατηρούμενη τιμή M_0' .

Από την παραπάνω σχέση αποδεικνύεται ότι οι χρονικές στιγμές των φωτομετρικών ελαχίστων δίνονται από την σχέση:

$$O_E = T_0 + P \cdot E + \frac{v_{ob}}{c} P \cdot E + \frac{a' \cdot \sin i'}{c} \cdot \left(1 - \frac{1}{2} e'^2\right) \cdot \sin \left(2\pi \frac{P}{P'} E + N'_0 + \omega'\right) + \frac{e'^2}{8} \cdot \frac{a' \cdot \sin i'}{c} \cdot \sin \left(2\pi \frac{P}{P'} E + N'_0 - \omega'\right) + \frac{e'}{2} \cdot \frac{a' \cdot \sin i'}{c} \cdot \sin \left(4\pi \frac{P}{P'} E + 2N'_0 + \omega'\right) + \frac{3}{8} e'^2 \cdot \frac{a' \cdot \sin i'}{c} \cdot \sin \left(6\pi \frac{P}{P'} E + 3N'_0 + \omega'\right) \quad (4.28)$$

Όπου το άθροισμα των πέντε τελευταίων όρων δίνει την εξίσωση των διαφορών $O-C$ ως συνάρτηση του τροχιακού κύκλου E .

$$(O-C)_E = \frac{v_{ob}}{c} P \cdot E + \frac{a' \cdot \sin i'}{c} \cdot \left(1 - \frac{1}{2} e'^2\right) \cdot \sin \left(2\pi \frac{P}{P'} E + N'_0 + \omega'\right) + \frac{1}{8} e'^2 \cdot \frac{a' \cdot \sin i'}{c} \cdot \sin \left(2\pi \frac{P}{P'} E + N'_0 - \omega'\right) + \frac{1}{2} e' \cdot \frac{a' \cdot \sin i'}{c} \cdot \sin \left(4\pi \frac{P}{P'} E + 2N'_0 + \omega'\right) + \frac{3}{8} e'^2 \cdot \frac{a' \cdot \sin i'}{c} \cdot \sin \left(6\pi \frac{P}{P'} E + 3N'_0 + \omega'\right) \quad (4.29)$$

Στην τελευταία εξίσωση, ο πρώτος όρος αναφέρεται στην γαλαξιακή κίνηση του συστήματος. Οι υπόλοιποι όροι είναι συναρτήσεις του ημιτόνου της βασικής γωνίας $2\pi P/P'$ και των πολλαπλασίων της. Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι η τελευταία εξίσωση δείχνει ότι το *διάγραμμα O-C* ενός διπλού εκλειπτικού συστήματος, στο οποίο υπάρχει και τρίτος αστέρας, έχει *ημιτονοειδή μορφή πλάτους*:

$$B \approx \frac{a' \cdot \sin i'}{c} \cdot \left(1 - \frac{1}{2} e'^2\right) \quad (4.30)$$

επί της οποίας, εκτός από την βασική συχνότητα P/P' , θα συνυπάρχουν και οι αρμονικές $2P/P'$, $4P/P'$,

Αξίζει να παρατηρήσουμε το γεγονός ότι, αν και πολλά διαγράμματα $O-C$ παρουσιάζουν ημιτονοειδή συμπεριφορά και δεδομένου ότι η ύπαρξη τρίτου σώματος είναι προφανής αιτία τέτοιας συμπεριφοράς, εν τούτοις τα μοντέλα εξάγουν τιμές για τις μάζες αυτών των αστέρων τέτοιες που θα έπρεπε να είναι φωτομετρικά ή φασματοσκοπικά ανιχνεύσιμοι. Κάτι τέτοιο όμως δεν συμφωνεί με τις παρατηρήσεις αφού σε πολύ λίγα τέτοια συστήματα έχει όντως παρατηρηθεί και ο τρίτος αστέρας. Η ερμηνεία των ημιτονοειδών $O-C$ διαγραμμάτων μέσω της ύπαρξης τρίτου σώματος, έχει αποδειχθεί πολλές φορές ανεπαρκής και για να εξηγηθούν πλέον αυτές οι μορφές, υποτίθεται ευρέως ότι οι αιτίες που δημιουργούν αυτές τις περιοδικότητες σχετίζονται με φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό των αστέρων του συστήματος.

4.4.3 Παρατηρήσεις του LITE σε διπλά συστήματα αστέρων

Τελικά για την εξαγωγή συμπερασμάτων από το LITE χρησιμοποιούμε τις παρακάτω εξισώσεις:

- **Μεταβολές των παρατηρούμενων χρόνων φωτομετρικών ελαχίστων**

$$O - C = \frac{A}{1 - e^2 \cos^2 \omega} \left[\frac{1 - e^2}{1 + e \cos \nu} \sin(\nu + \omega) + e \sin \omega \right] \quad (4.31)$$

- **Παρατηρούμενο ημιπλάτος της καμπύλης του LITE**

$$A = \frac{1}{2} [(O - C)_{\max} - (O - C)_{\min}] = \frac{a_{12} \sin i \sqrt{1 - e^2 \cos^2 \omega}}{173.15} \quad (4.32)$$

- **Συνάρτηση μάζας**

$$f(m_3) = \frac{(\alpha_{12} \sin i)^3}{P_3^2} = \frac{(m_3 \sin i)^3}{(m_1 + m_2 + m_3)^2} = \frac{1}{P_3^2} \left[\frac{173.15 A}{\sqrt{1 - e^2 \cos^2 \omega}} \right]^3 \quad (4.33)$$

- **Ακτινικές ταχύτητες των αστέρων του διπλού συστήματος**

$$V_r = K [\cos(\nu + \omega) + e \cos \omega] \quad (4.34)$$

$$\text{Όπου } K = \frac{A}{P_2} \frac{5156}{\sqrt{[(1 - e^2)(1 - e^2 \cos^2 \omega)]}} \quad (4.35)$$

Όπου ν η αληθινή ανωμαλία, e η εκκεντρότητα, ω το μήκος του περιάστρου, i η κλίση της τροχιάς και P_2 η περίοδος της τροχιάς εκφρασμένη σε years. Οι παραπάνω μεταβλητές αναφέρονται στο τρίτο σώμα. Ο ημιάξονας της τροχιάς του διπλού συστήματος a_{12} γύρω από το βαρύκεντρο του τριπλού συστήματος είναι εκφρασμένος σε AU, το ημιπλάτος A εκφρασμένο σε days και η ακτινική ταχύτητα και ο όρος K είναι εκφρασμένα σε km/s.

4.4.3.1 LITE και περιστροφή της γραμμής των αψίδων

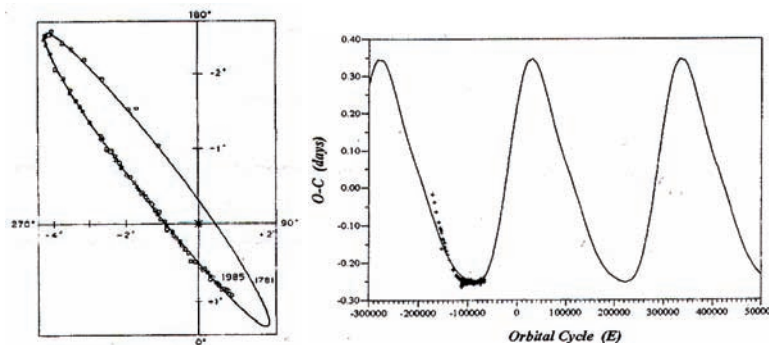
Η ύπαρξη ενός τρίτου αστέρα με τροχιά γύρω από ένα διπλό εκλειπτικό σύστημα, μπορεί να προκαλέσει, όπως αναφέρθηκε και στην §4.3.2, μετάθεση της γραμμής των αψίδων του διπλού συστήματος. Έχει παρατηρηθεί ότι μπορεί σε ένα σύστημα να έχουμε ταυτόχρονα LITE και μετάθεση της γραμμής των αψίδων, οπότε τα παρατηρούμενα O-C διαγράμματα προκύπτουν από τις επιρροές και των δύο παραπάνω φαινομένων όπως δείχνει η παρακάτω σχέση:

$$(O-C)_{OBS} = (O-C)_{LITE} + (O-C)_{APS} \quad (4.36)$$

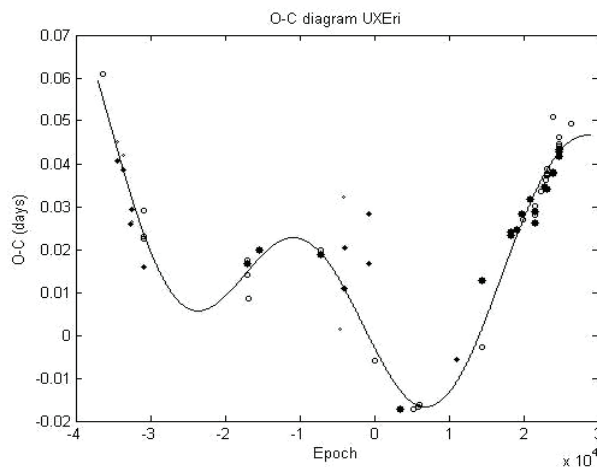
Από την θεωρία και τις εξισώσεις του LITE και της μετάθεσης της γραμμής των αψίδων λόγω τρίτου σώματος μένει να καθοριστούν οι παρακάτω δέκα ανεξάρτητες μεταβλητές :

$T_0, U, P_s, e, \dot{\omega}, \omega_0 \rightarrow$ για την μετάθεση της γραμμής των αψίδων
 $A, T_3, P_3, e_3, \omega_3 \rightarrow$ για το LITE (παράμετροι του τρίτου σώματος)

Η σχέση μεταξύ αληθούς P_s και ανώμαλης P_a περιόδου δίνεται από την σχέση 4.7, ενώ περίοδος της περιστροφής των αψίδων U από την σχέση 4.8.



Σχ.4.7 Η φαινόμενη τροχιά του αστέρα 44i Boo (αριστερά), και το O-C διάγραμμα του (δεξιά) (Hill et al. 1989).



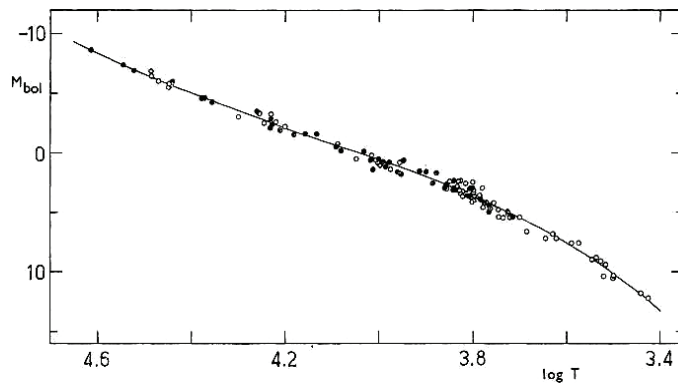
Σχ.4.8 Το O-C διάγραμμα του αστέρα UX Eri και η θεωρητική καμπύλη (σύνθεση ημιτονοειδούς και παραβολικής καμπύλης) που προέκυψε λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους του LITE και της μεταφοράς μάζας. Το τρίτο σώμα βρέθηκε να έχει περίοδο περιφοράς 42 yrs και πλάτος της ημιτονοειδούς καμπύλης να είναι ίσο με 0.018 days (Α.Λιάκος 2006).

4.4.3.2 Υπολογισμός των φυσικών παραμέτρων του τρίτου σώματος

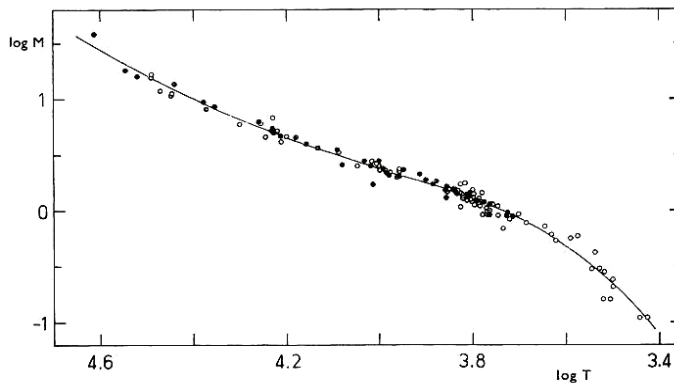
Σύμφωνα με την εξίσωση 4.33, εάν γνωρίζουμε τις μάζες των αστερών του εκλειπτικού συστήματος, και βρίσκοντας το πλάτος του LITE, είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε την συνάρτηση μάζας του τριπλού πλέον συστήματος. Από τον όρο $m_3 \sin i$ της ίδιας εξίσωσης μπορούμε να βρούμε ένα εύρος μαζών για την μάζα του τρίτου μέλους, ανάλογα με την γωνία που σχηματίζει το τροχιακό του επίπεδο με το τροχιακό επίπεδο του διπλού συστήματος. Για λόγους απλότητας ως αποτέλεσμα παρουσιάζεται η ελάχιστη μάζα του τρίτου σώματος, δηλαδή όταν $i=90^\circ$ (τα τροχιακά επίπεδα διπλού συστήματος και τρίτου αστερά ταυτίζονται).

Για να υπολογίσουμε τις φυσικές παραμέτρους του τρίτου σώματος (ενεργός θερμοκρασία, βολομετρικό μέγεθος, ακτίνα, φασματικός τύπος) πρέπει να βασιστούμε στην υπόθεση ότι ο αστέρας βρίσκεται στη κύρια ακολουθία.

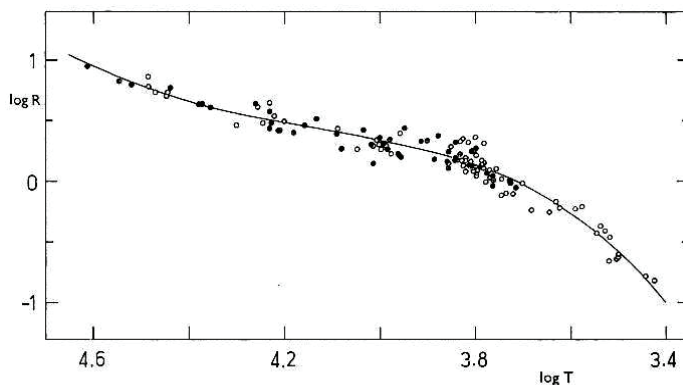
Ο Harmanec (1988) συνέλεξε πληθώρα φασματοσκοπικών και φωτομετρικών δεδομένων από αστέρες όλων των φασματικών τύπων που ανήκουν στην κύρια ακολουθία αλλά και αποτελούν μέλη διπλών συστημάτων και έκανε τα παρακάτω διαγράμματα συσχέτισης των διαφόρων παραμέτρων τους.



Σχ.4.10 Το διάγραμμα του βολομετρικού μεγέθους σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία αστερών της κύριας ακολουθίας και η θεωρητική καμπύλη (συνεχής γραμμή).



Σχ.4.11 Το διάγραμμα της μάζας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία αστερών της κύριας ακολουθίας και η θεωρητική καμπύλη (συνεχής γραμμή).



Σχ.4.12 Το διάγραμμα της ακτίνας σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία αστερών της κύριας ακολουθίας και η θεωρητική καμπύλη (συνεχής γραμμή).

Στα παραπάνω διαγράμματα ο Harmanec προσάρμοσε θεωρητικές καμπύλες βασιζόμενος στα πολυώνυμα Chebyshev. Οι εξισώσεις που αναπαριστούν τις παραπάνω θεωρητικές καμπύλες είναι οι εξής:

$$M_{\text{bol}} = \{[(4.328314 \log T_{\text{eff}} - 81.10091) \log T_{\text{eff}} + 561.1516] \log T_{\text{eff}} - 1718.301\} \log T_{\text{eff}} + 1977.795 \quad (4.42)$$

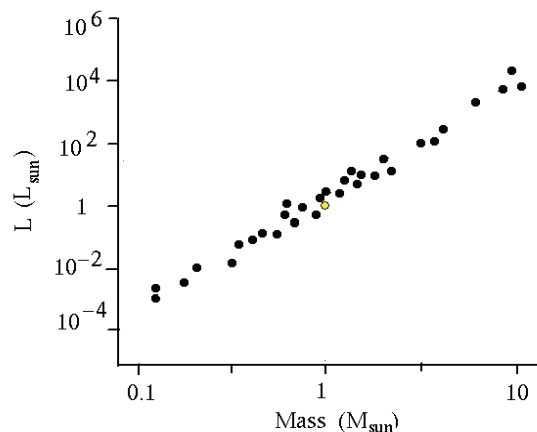
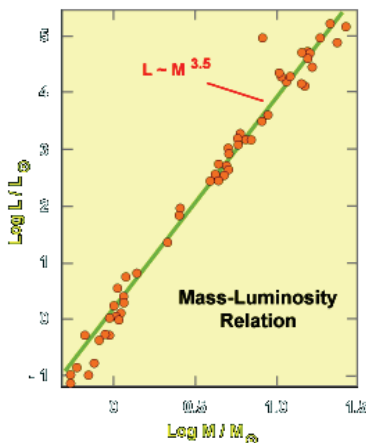
$$\text{Log}\left(\frac{M}{M_{\odot}}\right) = \{[(-1.744951 \log T_{\text{eff}} + 30.31681) \log T_{\text{eff}} - 196.2387] \log T_{\text{eff}} + 562.674\} \log T_{\text{eff}} - 604.0760 \quad (4.43)$$

$$\text{Log}\left(\frac{R}{R_{\odot}}\right) = \{[(-0.8656627 \log T_{\text{eff}} + 16.22018) \log T_{\text{eff}} - 112.2303] \log T_{\text{eff}} + 341.6602\} \log T_{\text{eff}} - 387.0969 \quad (4.44)$$

Εφόσον λοιπόν υπολογίσουμε την ελάχιστη μάζα του τρίτου σώματος, την αντικαθιστούμε στην εξίσωση 4.43, και βρίσκουμε απ' ευθείας την ενεργό θερμοκρασία του τρίτου αστέρα. Εν συνεχεία αντικαθιστώντας αυτή την θερμοκρασία στις σχέσεις 4.42 και 4.44, μπορούμε να υπολογίσουμε την ακτίνα και το βολομετρικό μέγεθός του αστέρα και τέλος από το διάγραμμα H-R βρίσκουμε τον φασματικό τύπο του.

Επίσης από το διάγραμμα μάζας – φωτεινότητας αστέρων της Κυρίας Ακολουθίας μπορούμε να υπολογίσουμε την φωτεινότητα του αστέρα σε Ηλιακές μονάδες βασιζόμενοι στη σχέση:

$$\frac{L_{MS}}{L_{\odot}} \propto \left(\frac{M_{MS}}{M_{\odot}}\right)^{3.5} \quad (4.45)$$



Σχ. 4.13 & 4.14 Το διάγραμμα μάζας – φωτεινότητας για τους αστέρες της Κύριας Ακολουθίας σε λογαριθμική κλίμακα (αριστερά) και δεκαδική (δεξιά).

Το απόλυτο μέγεθος του τρίτου σώματος και πάλι σε Ηλιακές μονάδες δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$M_{MS} = M_{\odot} - 2.5 \log\left(\frac{L_{MS}}{L_{\odot}}\right) \quad (4.46)$$

Επομένως βάσει της σχέσης 4.45, αν οι αστέρες του διπλού συστήματος ανήκουν στη Κύρια Ακολουθία (επιβεβαιωμένο από φασματοσκοπικές παρατηρήσεις) μπορούμε να υπολογίσουμε τις φωτεινότητές τους L_1 και L_2 , όπως ακριβώς και για το τρίτο σώμα L_3 . Εφαρμόζοντας την σχέση:

$$L_3(\%) = 100 \frac{L_3}{L_1 + L_2 + L_3} \quad (4.47)$$

Μπορούμε να υπολογίσουμε τη συνεισφορά του τρίτου σώματος στην ολική φωτεινότητα του τριπλού πλέον συστήματος, και να κάνουμε μια πρώτη εκτίμηση για την δυνατότητα άμεσης ανίχνευσης του.

Στη περίπτωση όπου για κάποιον εκ των δύο αστέρων του διπλού συστήματος ή για τους δύο έχει επιβεβαιωθεί ότι η τάξη φωτεινότητάς του(ς) δεν αντιστοιχεί στη Κ.Α, τότε πρέπει να ανατρέξουμε σε ειδικούς πίνακες, που περιέχουν τη φωτεινότητα για τη συγκεκριμένη μάζα και τάξη φωτεινότητας.

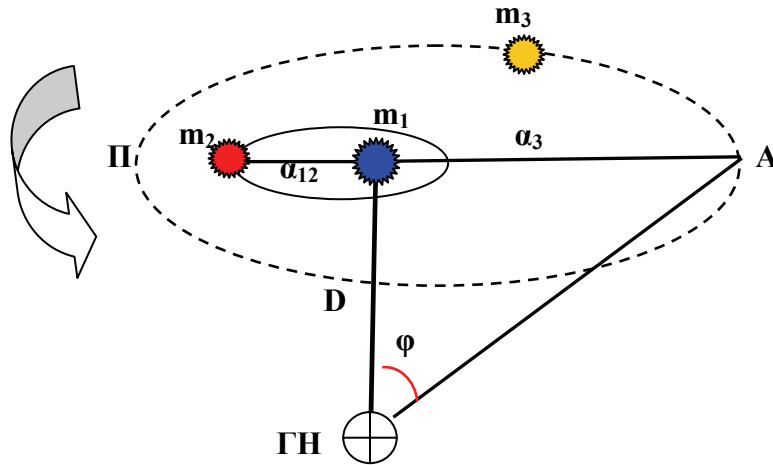
4.4.3.3 Υπολογισμός της γωνιακής απόστασης του τρίτου σώματος από το διπλό εκλειπτικό σύστημα

Για να υπολογίσουμε την γωνιακή απόσταση του τρίτου αστέρα από το διπλό σύστημα, στηριζόμαστε στην υπόθεση ότι η πραγματική ακτίνα της τροχιάς του είναι πολύ μεγαλύτερη από την απόσταση των αστέρων του διπλού συστήματος, δηλαδή $a_3 \gg a_{12}$, και με βάση τον τρίτο νόμο του Kepler οι περίοδοι των διπλών συστημάτων είναι πολύ μικρότερες (τάξης ημερών) από τις περιόδους των τρίτων σωμάτων (τάξης ετών), κάτι που φυσικά και παρατηρείται.

Επομένως, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, μπορούμε να θεωρήσουμε το διπλό σύστημα σαν ένα σώμα μάζας $m_{12}=m_1+m_2$ και ο τρίτος αστέρας να περιφέρεται γύρω από το βαρύκεντρο του συστήματος. Όπως και με απλά διπλά συστήματα (§1.4.5.2), έτσι και σε αυτή τη περίπτωση, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το τρίτο σώμα διαγράφει ελλειπτική τροχιά όπου η μία εστία της καταλαμβάνεται από το διπλό σύστημα. Για να υπολογίσουμε πλέον την προβολή της πραγματικής απόστασης του τρίτου σώματος από το διπλό σύστημα, απαιτείται προηγουμένως να έχει μετρηθεί η απόσταση (D) του διπλού συστήματος από την Γη. Έχουν υπολογιστεί αποστάσεις αρκετών εκλειπτικών συστημάτων με διάφορες μεθόδους, και πολλά από αυτά εμπεριέχονται στον κατάλογο του Ίππαρχου. Για να απλοποιήσουμε τους υπολογισμούς υποθέτουμε ότι τα τροχιακά επίπεδα του εκλειπτικού συστήματος και τρίτου σώματος ταυτίζονται. Από την εξίσωση 4.33, μπορεί να υπολογιστεί ο μεγάλος ημιάξονας της σχετικής τροχιάς του δευτερεύοντος αστέρα a_{12} όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Οπότε, ο μεγάλος ημιάξονας της τροχιάς του τρίτου σώματος γύρω από το βαρύκεντρο του συστήματος θα δίνεται από την σχέση:

$$a_3 = a_{12} \frac{m_{12}}{m_3} \quad (4.48)$$

Όπου m_{12} και m_3 το άθροισμα των μαζών των αστέρων του διπλού συστήματος και η μάζα του τρίτου σώματος εκφρασμένες σε ηλιακές μάζες αντίστοιχα και a_{12} και a_3 ο μεγάλος ημιάξονας της τροχιάς του δευτερεύοντος αστέρα και του τρίτου σώματος εκφρασμένη σε AU, αντίστοιχα.



Σχ.4.15 Η γεωμετρία ενός διπλού εκλειπτικού συστήματος με την παρουσία ενός τρίτου αστέρα (m_3) ο οποίος περιφέρεται σε έλλειψη με μεγάλο ημιάξονα α_3 και με περίοδο P_3 .

Από την ανάλυση του Ο-С διαγράμματος, μπορούμε να υπολογίσουμε την συνάρτηση μάζας και κατ' επέκταση την απόσταση α_{12} , την ελάχιστη μάζα του τρίτου σώματος και γνωρίζοντας τις μάζες των μελών του διπλού συστήματος και αντικαθιστώντας αυτές τις τιμές στην σχέση 4.48 και επιλύοντάς την ως προς α_3 βρίσκουμε την απόσταση α_3 του τρίτου σώματος από το βαρύκεντρο σε ΑU. Όμως η μέγιστη απόσταση του τρίτου σώματος από το διπλό σύστημα είναι προφανώς το άθροισμα των ημιαξόνων των τροχιών $\alpha_{\max} = \alpha_{12} + \alpha_3$. Από το ορθογώνιο τρίγωνο Εκλειπτικό σύστημα – Γη – Άπαστρο (Α) του τρίτου σώματος, ισχύει η σχέση:

$$\tan \varphi = \frac{\alpha_{\max}}{D} \quad (4.49)$$

Όπου, εάν γνωρίζουμε την απόσταση του διπλού συστήματος από τη γη, τότε μπορούμε να υπολογίσουμε την μέγιστη γωνία μεταξύ του διπλού συστήματος και του τρίτου σώματος, αρκεί τα μεγέθη α_{\max} και D να βρίσκονται στις ίδιες μονάδες.

Με αυτή την μέθοδο μπορούμε να εκτιμήσουμε αν η διακριτική ικανότητα των οργάνων της σημερινής τεχνολογίας είναι σε θέση να εντοπίσει άμεσα το τρίτο φως στο σύστημα.

4.5 Διαφορές Ο-С λόγω μεταφοράς μάζας μεταξύ των μελών του διπλού συστήματος ή απώλειας μάζας από το σύστημα

Σε διπλά συστήματα όπου η βαρυτική αλληλεπίδραση των μελών είναι τόσο ώστε να επηρεάζει άμεσα την εξέλιξή τους ως μεμονωμένους αστέρες, παρατηρείται μία ειδική διαμόρφωση του Ο-С διαγράμματός τους. Οι αστέρες των συστημάτων τα οποία είναι απομονωμένα (αλληλεπιδρούν βαρυτικά μόνο μεταξύ τους) εξελίσσονται διαφορετικά από ότι θα εξελίσσονταν εάν δεν ήταν. Τέτοια συστήματα είναι τα ημι-αποχωρισμένα και τα συστήματα σε επαφή.

Στην περίπτωση των *ημιαποχωρισμένων συστημάτων*, ο ένας εκ των δύο αστέρων του συστήματος λόγω ισχυρών παλιρροιακών αλληλεπιδράσεων γεμίζει τον λοβό Roche του (§1.4.5.2 και §1.4.5.5) και μπορεί να μεταφέρει μάζα στον άλλον μέσω του λαγκρατζιανού σημείου L_1 ή ακόμα και να χάσει μάζα. Στη περίπτωση των συστημάτων σε επαφή και οι δύο αστέρες γεμίζουν τον λοβό

Roche τους, και μπορούν να μεταφέρουν μάζα ο ένας στον άλλο ή η μάζα να διαφύγει τελείως από το σύστημα.

Στην απλούστερη περίπτωση, ο ένας εκ των δύο αστερών μεταφέρει μάζα στον συνοδό του, ο οποίος την δέχεται χωρίς απώλειες. Οπότε η ολική μάζα του συστήματος παραμένει σταθερή και η ολική στροφορμή διατηρείται.

Οπότε ισχύει ότι

$$m_1 + m_2 = m_{tot} \quad (4.50) \quad \text{και} \quad dm_1 = -dm_2 \quad (4.51)$$

και η ολική στροφορμή θα δίνεται από την σχέση:

$$J_{tot} = \left[\frac{Gm_1^2 m_2^2 \alpha (1 - e^2)}{m_{tot}} \right]^{1/2} \quad (4.52)$$

$$\text{Από την 4.52 προκύπτει ότι:} \quad \alpha = \text{σταθ.} / (m_1 m_2)^2 \quad (4.53)$$

$$\text{και από τον τρίτο νόμο του Kepler ισχύει:} \quad GM_{tot} = 4\pi^2 a^3 / P^2 \quad (4.54)$$

Ορίζουμε σαν m_{1i} , m_{2i} , P_i τις αρχικές τιμές των μαζών και της περιόδου αντίστοιχα πριν ξεκινήσει η μεταφορά μάζας, και τα ίδια μεγέθη χωρίς τον δείκτη (i) για μετά την έναρξη της **μεταφοράς μάζας**. Οπότε σε κάποια τυχαία χρονική στιγμή συνδυάζοντας τις 4.52-4.54, προκύπτει (Kruszewski 1966):

$$P/P_i = (m_{1i} m_{2i} / m_1 m_2)^3 \quad (4.55)$$

Διαφορίζοντας την σχέση 4.55 και χρησιμοποιώντας την σχέση 4.51 παίρνουμε:

$$\frac{\dot{P}}{P} = \frac{3\dot{m}_1(m_1 - m_2)}{m_1 m_2} = 3 \frac{1 - q^2}{qM} \dot{m} \quad (4.56)$$

Όπου $q = m_2/m_1$ και $M = m_1 + m_2$ ο λόγος και το άθροισμα των μαζών του συστήματος, αντίστοιχα. Οι μάζες των αστερών και η περίοδος P μπορούν να προσδιοριστούν από φασματοσκοπικές και φωτομετρικές παρατηρήσεις.

Οι Kalimeris & Livaniou-Rovithis (2006) διερεύνησαν την τελευταία σχέση, λαμβάνοντας υπ' όψη τους την εξελικτική φάση του διπλού συστήματος και έστω ότι η μάζα χάνεται (μεταφέρεται) από τον αστέρα μικρότερης μάζας, εξήγαγαν τις παρακάτω σχέσεις για την συσχέτιση της τροχιακής στροφορμής J_{orb} και μεταβολής της περιόδου του συστήματος σε διάφορες περιπτώσεις:

i) Περίπτωση όπου οι εσωτερικές μεταβολές των αστερών είναι αμελητέες σε σχέση με τις παρατηρούμενες μεταβολές της περιόδου:

$$\frac{\dot{J}}{J_{orb}} = \frac{1 - q}{m_2} \dot{m}_2 + \frac{2q + 3}{3qM} \dot{\mu} - \frac{e}{1 - e^2} \dot{e} + \frac{\dot{\Omega}}{\Omega} + \frac{4}{3} \frac{\dot{P}}{P} + \sum_{i=1}^2 \frac{J_i}{J_{orb}} \frac{\dot{\omega}_i}{\omega_i} \quad (4.57)$$

Όπου $\mu = m_1 m_2 / M$ η ανηγμένη μάζα του συστήματος, e η εκκεντρότητα της τροχιάς, Ω και ω η γωνιακή ταχύτητα του συστήματος και του κάθε αστέρα, J_{orb} και J_i η στροφορμή του συστήματος και του αστέρα-μέλους, αντίστοιχα. Τα σύμβολα τα οποία έχουν το σύμβολο της τελείας αντιστοιχούν στους ρυθμούς μεταβολής των αντίστοιχων ποσοτήτων.

ii) Περίπτωση όπου οι αστέρες του συστήματος είναι σε σύγχρονη κυκλική τροχιά και ο αστρικός άνεμος αφαιρεί ιδιοστροφορμή από το σύστημα με ρυθμό \dot{J}_w μεγαλύτερο του ολικού ρυθμού απώλειας στροφορμής \dot{J}_T . Τότε τα μέλη του συστήματος παύουν να είναι σε σύγχρονη τροχιά και η παραπάνω εξίσωση μπορεί να πάρει τη μορφή:

$$\frac{1-q}{m_2} \dot{m}_2 = \frac{J_w - J_1}{J_{orb}} - \frac{3q+2}{3M} \dot{\mu} - \kappa \dot{m}_{L_2} - \sum_{i=1}^2 \frac{J_i}{J_{orb}} \frac{\dot{\omega}_i}{\omega_i} - \frac{1}{3} \frac{\dot{P}}{P} \quad (4.58)$$

Όπου $\kappa = M \varepsilon_j \zeta / J_{orb}$ με ε_j να αντιστοιχεί στην στροφορμή της μάζας που χάνεται μέσω του αστρικού ανέμου και ζ η απόσταση όπου αυτή η μάζα ασυμπτωτικά αποκτά τα τελικά της κινητικά χαρακτηριστικά (δεν αλληλεπιδρά με το σύστημα). Ο δείκτης L_2 αντιστοιχεί στο δεύτερο λαγκρατζιανό σημείο ισορροπίας (§1.4.5.5).

iii) Στην αντίθετη της περίπτωσης B, δηλαδή όταν $\dot{J}_T > \dot{J}_w$, η τροχιακή εξέλιξη συνεχίζεται με σύγχρονη περιστροφή των μελών και σε κυκλική τροχιά. Επομένως η εξίσωση 4.57 παίρνει τη μορφή:

$$\frac{1-q}{m_2} \dot{m}_2 = \frac{J_w - J_1}{J_{orb}} - \frac{3q+2}{3M} \dot{\mu} - \frac{M \varepsilon_j \zeta}{J_{orb}} \dot{m}_{L_2} - \frac{3(J_1 + J_2) - J_{orb}}{3J_{orb}} \frac{\dot{P}}{P} \quad (4.59)$$

Αυτή η εξίσωση ισχύει με μεγαλύτερη ακρίβεια στην εφαρμογή σε συστήματα σε επαφή ή σε ημι-αποχωρισμένα συστήματα.

iv) Στη περίπτωση συντηρητικής μεταφοράς μάζας ($\dot{m}_{L_2} = 0$) και $\dot{m}_1 = -\dot{m}_2 = -\dot{m}$ η εξίσωση 4.57 γίνεται:

$$\frac{1-q}{m_2} \dot{m}_2 = \frac{J_w - J_1}{J_{orb}} - \frac{3q+2}{3M} \dot{m}_w - \left(\frac{J_1 + J_2}{J_{orb}} - \frac{1}{3} \right) \frac{\dot{P}}{P} \quad (4.60)$$

v) Στη περίπτωση όπου οι τροχιακές στροφορμές των μελών, J_1 και J_2 , είναι αμελητέες σε σχέση με την ολική στροφορμή του συστήματος J_{tot} , τότε η εξίσωση 4.60 απλοποιείται:

$$\frac{1-q}{m_2} \dot{m}_2 = \frac{J_w}{J_{orb}} - \frac{3q+2}{3M} \dot{m}_w - \frac{1}{3} \frac{\dot{P}}{P} \quad (4.61)$$

Σε άλλη περίπτωση μπορεί να μεταφερθεί μεταξύ των μελών του συστήματος ένα μέρος μάζας και στροφορμής, ενώ το υπόλοιπο να χαθεί από το σύστημα. Οι πιθανότεροι φυσικοί μηχανισμοί (μη-διατήρησης της ολικής μάζας και στροφορμής) είναι οι ακόλουθοι :

- Μεταφορά/απώλεια μάζας από το σύστημα μέσω αστρικών ανέμων, ανεξάρτητα από το αν ο αστέρας έχει γεμίσει τον λοβό Roche του.
- Υπερσυμπλήρωση του λοβού Roche με αποτέλεσμα την ταχεία μεταφορά μάζας (RLOF)
- Ξαφνική απώλεια μάζας αν το σύστημα γίνει novα ή ένα από τα μέλη του supernova

Προφανώς η πιο απλή περίπτωση από τις παραπάνω είναι αυτή της **απώλειας μάζας** μέσω αστρικού ανέμου από κάποιον μαγνητικά ενεργό αστέρα, που όμως δεν αλληλεπιδρά με τον συνοδό, αλλά απλώς χάνεται στον διαστρικό χώρο.

Διαφορίζοντας τον τρίτο νόμο του Kepler, διαιρώντας με $2P$ και θεωρώντας ότι $\dot{m}_1 < 0$ (απώλεια μάζας) και $\dot{m}_2 = 0$ παίρνουμε την σχέση (Hilditch 2001):

$$\frac{\dot{P}}{P} = \frac{1}{2(m_1 + m_2)} \left[\frac{3\dot{a}(m_1 + m_2)}{a} - \dot{m}_1 \right] \quad (4.62)$$

Από την απαίτηση ο αστέρας που χάνει την μάζα (έστω ο m_1) να έχει σταθερή ταχύτητα, προκύπτει:

$$a(m_1 + m_2) = \text{σταθ.} \quad (4.63)$$

Συνδυάζοντας την 4.63 με τη σχέση: $a_1 = a m_2 / (m_1 + m_2)$ (4.64)

Έχουμε:
$$\frac{a m_2}{(m_1 + m_2)} \frac{2\pi G^{1/2} (m_1 + m_2)^{1/2}}{2\pi a^{3/2}} = \text{σταθ.} \quad (4.65)$$

Ωστόσο $a(m_1 + m_2) = \text{σταθ.}$, έτσι ώστε να ισχύει : $\dot{a}(m_1 + m_2) + a\dot{m}_1 = 0$ (4.66)

Οπότε αντικαθιστώντας τις 4.65 και 4.66 στην 4.62, παίρνουμε την εξίσωση:

$$\frac{\dot{P}}{P} = \frac{-2\dot{m}_1}{m_1 + m_2} \quad (4.67)$$

Η 4.62 μας λέει ότι αν κάποιος από τους αστέρες χάνει μάζα ($dm/dt < 0$), τότε υποχρεωτικά η περίοδος του συστήματος θα αυξάνει.

Οι Tout & Hall (1991) πρότειναν ότι εξελιγμένοι ψυχροί αστέρες διπλών συστημάτων, παρουσιάζουν τόσο πιο έντονους ρυθμούς απώλειας μάζας λόγω αστρικών ανέμων όσο πλησιάζουν στο όριο της ακτίνας Roche των. Οι ίδιοι ερευνητές έδειξαν ότι ο ρυθμός απώλειας μάζας θα δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{m} = -4 \times 10^{-13} \frac{RL}{m} \left(1 + 10^4 \left(\frac{R}{R_L} \right)^6 \right) \quad (4.68)$$

Όπου R , L και R_L η ακτίνα, η φωτεινότητα και η ακτίνα Roche του αστέρα σε ηλιακές μονάδες.

Κατ' επέκταση, έδειξαν ότι ο σχετικός ρυθμός μεταβολής της περιόδου θα δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{\dot{P}}{P} = -\frac{2\dot{M}}{M} + \frac{3\dot{M}_2(M_2 - M_1)}{M_1M_2} + 3K \quad (4.69)$$

Όπου M_1 και M_2 οι μάζες των αστέρων αντίστοιχα και $M=M_1+M_2$ η ολική μάζα.

Ο πρώτος όρος της 4.69 αντιστοιχεί στην απώλεια μάζας λόγω αστρικού ανέμου από τον πρωτεύοντα αστέρα και μπορεί να προκαλέσει μόνο αύξηση της περιόδου, αφού εξ' ορισμού ο ρυθμός απώλειας μάζας έχει αρνητικές τιμές ($\dot{M} < 0$). Ο δεύτερος όρος περιγράφει την συνεισφορά της μεταφοράς μάζας στη μεταβολή της περιόδου και μπορεί να προκαλεί μόνο τη μείωσή της, όμως σε αυτή τη περίπτωση είναι αμελητέα. Τέλος, ο τρίτος όρος αντιστοιχεί σε μία επιπλέον απώλεια στροφορμής εξ' αιτίας της σύγχρονης περιστροφής του αστρικού ανέμου έως την ακτίνα Alfven R_A και δίνεται από τη σχέση:

$$K = \frac{2}{3} \left(\frac{R_A}{d} \right)^2 \frac{M}{M_1M_2} \dot{M} \quad (4.70)$$

Όπου $d=d_1+d_2$ το άθροισμα των αποστάσεων των αστέρων από το κοινό κέντρο μάζας.

Έως τώρα έχουμε αναπτύξει την φυσική που διέπει ένα διπλό σύστημα στις περιπτώσεις όπου το φαινόμενο της μεταφοράς ή απώλειας μάζας λαμβάνει χώρα. Όμως, εμείς έχουμε στην διάθεση μας μόνο το φως των αστέρων και έτσι θα δείξουμε πως μπορούν να γίνουν αντιληπτά τα παραπάνω φαινόμενα μέσω των παρατηρήσεων. Προφανώς αναφερόμαστε σε εκλειπτικά συστήματα αστέρων από τα οποία μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα για αυτά τα φαινόμενα από την μελέτη των O-C διαγραμμάτων τους.

Ορίζουμε μία γραμμική αστρονομική εφημερίδα για την πρόβλεψη των εκλείψεων του συστήματος, όπως φαίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$T_{cal} = T_0 + \varepsilon P \quad (4.71)$$

Όπου T_{cal} ο προβλεπόμενος χρόνος ελαχίστου, T_0 ένας παρελθόντας χρόνος ελαχίστου, ε ακέραιος αριθμός περιφορών και P η περίοδος του συστήματος.

Από τον ορισμό του O-C ισχύει: $O-C = T_{obs} - T_{cal} = \Delta T(\varepsilon) = T_{obs} - T_0 - \varepsilon P \quad (4.72)$

Μία πολύ χρήσιμη και γενική περιγραφή για μη σταθερές περιόδους σε διπλά εκλειπτικά συστήματα, έγινε από τους Kalimeris, Rovithis-Livaniou, Rovithis (1994) και δίνεται παρακάτω:

Έστω $T_{obs} = \Delta T(\varepsilon) + T_{cal} \quad (4.73)$

Και ο χρόνος T_{cal} υπολογίζεται από μία γραμμική εφημερίδα που περιέχει μία σταθερή τιμή περιόδου P_{le} , δηλαδή: $T_{cal} = T_0 + \varepsilon P_{le} \quad (4.74)$

Οπότε η τιμή της περιόδου η οποία μεταβάλλεται ανά τροχιακό κύκλο θα δίνεται από την σχέση:

$$P(\varepsilon) = T_{obs}(\varepsilon) - T_{obs}(\varepsilon-1) = P_{le} + \Delta T(\varepsilon) - \Delta T(\varepsilon-1) \quad (4.75)$$

Η διαφορά $\Delta T(\varepsilon)$ μπορεί να γραφεί σε μία γενική πολυωνυμική μορφή:

$$\Delta T(\varepsilon) = \sum_{j=0}^n c_j \varepsilon^j \quad (4.76)$$

Αντικαθιστώντας την 4.76 στην 4.75 παίρνουμε:

$$P(\varepsilon) = P_{le} + \sum_{j=0}^n c_j \varepsilon^j - \sum_{j=0}^n c_j (\varepsilon - 1)^j \quad (4.77)$$

Διαφορίζοντας την 4.77, και διαιρώντας με $d\varepsilon$, προκύπτει:

$$\frac{dP(\varepsilon)}{d\varepsilon} = \sum_{j=0}^n c_j j \varepsilon^{j-1} - \sum_{j=0}^n c_j j (\varepsilon - 1)^{j-1} \quad (4.78)$$

Επιλύοντας την 4.74 ως προς (ε) και διαφορίζοντας την, έχουμε:

$$\frac{d\varepsilon}{dT_{cal}} = \frac{1}{P_{le}} \quad (4.79)$$

Από τον κανόνα της «αλυσίδας» το πρώτο μέλος της 4.78 μπορεί να πάρει τη μορφή:

$$\frac{dP(\varepsilon)}{d\varepsilon} = \frac{dP(\varepsilon)}{dT_{cal}} \frac{dT_{cal}}{d\varepsilon} \quad (4.80)$$

Οπότε συνδυάζοντας τις 4.79 και 4.80 παίρνουμε:

$$\frac{dP(\varepsilon)}{dT_{cal}} = \dot{P} = \frac{1}{P_{le}} \frac{dP}{d\varepsilon} \quad (4.81)$$

Είμαστε πλέον σε θέση να προσδιορίσουμε την εξίσωση μεταβολής της τροχιακής περιόδου του συστήματος, αρκεί να ορίσουμε μέχρι ποια τάξη μεγέθους θα συμπεριλάβουμε. Ουσιαστικά πρόκειται για διόρθωση της γραμμικής εφημερίδας τοποθετώντας επιπλέον όρους, οι οποίοι αποβλέπουν στην βελτίωση της πρόβλεψης των χρόνων ελαχίστων του εκλειπτικού συστήματος.

Βλέπουμε ότι από την σχέση 4.78 είμαστε «μαθηματικά» ελεύθεροι να συμπεριλάβουμε όσους όρους θέλουμε στο ανάπτυγμα του πολυωνύμου. Όμως λόγω του ότι ο τυπικός χρόνος του φαινομένου της μεταφοράς μάζας είναι αρκετές δεκαετίες, δεν έχει νόημα να κρατήσουμε όρους μεγαλύτερους του ε^2 , διότι οι συντελεστές των όρων μεγαλύτερης τάξης θα είναι τόσο μικροί ώστε πρακτικά δεν θα προσφέρουν τίποτα περισσότερο στην πρόβλεψη των χρόνων ελαχίστων.

Οπότε μία πολύ καλή προσέγγιση της O-C διαφοράς θα είναι ένα τριώνυμο, όπως φαίνεται και στην παρακάτω σχέση:

$$\Delta T(\varepsilon) = O - C = c_2 \varepsilon^2 + c_1 \varepsilon + c_0 \quad (4.82)$$

Αναπτύσσοντας την 4.78 μέχρι τάξης ε^2 ($j=3$), και κρατώντας τους όρους c_0 , c_1 και

c_2 , προκύπτει:

$$\frac{dP(\varepsilon)}{d\varepsilon} = 2c_2 \quad (4.83)$$

Οπότε συνδυάζοντας τις 4.81 και 4.83 παίρνουμε ότι ο συντελεστής του

παραβολικού όρου ε^2 θα δίνεται από την σχέση:

$$c_2 = \frac{P_{le} \dot{P}}{2} \quad (4.84)$$

Συνοψίζοντας την παραπάνω ανάλυση, θα παρουσιάσουμε τις σχέσεις που χρησιμοποιούμε στην O-C ανάλυση ώστε να προσδιορίσουμε τα ζητούμενα φυσικά μεγέθη. Σε περιπτώσεις όπου τα σημεία του O-C διαγράμματος παρουσιάζουν παραβολική συμπεριφορά, μπορούμε να προσαρμόσουμε μία παραβολική καμπύλη και με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων θα προκύψει η εξίσωση της, από την οποία με τη σειρά τους προκύπτουν η αριθμητική τιμή του συντελεστή του παραβολικού όρου (με το σφάλμα της δc_2) και η διορθωμένη περίοδος του διπλού συστήματος P καθώς και το σφάλμα της δP . Στην 4.84 ο συντελεστής c_2 έχει μονάδες days/cycle. Από τις σχέσεις 4.62, 4.67 και 4.84 προκύπτουν:

- **Ρυθμός μεταβολής της περιόδου:** $\dot{P}(\text{days} / \text{yr}) = \frac{2 * 365.24}{P} c_2$ (4.85)

και το σφάλμα του από τη διάδοση σφαλμάτων:

$$\delta \dot{P} = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{P}}{\partial c_2} \delta c_2\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{P}}{\partial P} \delta P\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{2 * 365.24}{P} \delta c_2\right)^2 + \left(-\frac{2 * 365.24 \cdot c_2}{P^2} \delta P\right)^2} \quad (4.86)$$

- **Ρυθμός μεταφοράς μάζας:** $\dot{M}(M_{\odot} / \text{yr}) = \frac{\dot{P}}{3P} \frac{M_1 M_2}{(M_1 - M_2)}$ (4.87)

και το σφάλμα του από τη διάδοση σφαλμάτων:

$$\delta \dot{M} = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{M}}{\partial \dot{P}} \delta \dot{P}\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{M}}{\partial P} \delta P\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{M_1 M_2}{3P(M_1 - M_2)} \delta \dot{P}\right)^2 + \left(-\frac{\dot{P} M_1 M_2}{3P(M_1 - M_2)} \delta P\right)^2} \quad (4.88)$$

- **Ρυθμός απώλειας μάζας:** $\dot{M}(M_{\odot} / \text{yr}) = -\frac{\dot{P}}{2P} (M_1 + M_2)$ (4.89)

και το σφάλμα του από τη διάδοση σφαλμάτων:

$$\delta \dot{M} = \sqrt{\left(\frac{\partial \dot{M}}{\partial \dot{P}} \delta \dot{P}\right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{M}}{\partial P} \delta P\right)^2} = \sqrt{\left(-\frac{M_1 + M_2}{2P} \delta \dot{P}\right)^2 + \left(-\frac{\dot{P}(M_1 + M_2)}{2P^2} \delta P\right)^2} \quad (4.90)$$

- **Εφημερίδα με παραβολικό όρο:** $T_{\text{cal}} = T_0 + P\varepsilon + c_2 \varepsilon^2$ (4.91)

4.6 Μη περιοδικοί μηχανισμοί διαμόρφωσης των O-C διαγραμμάτων

Οι παρατηρήσεις σε συστήματα σε επαφή έχουν δείξει ότι λαμβάνουν χώρα μη περιοδικά φαινόμενα, σε βραχείες χρονικές κλίμακες, τα οποία και διαμορφώνουν τη τροχιακή τους περίοδο. Το γεγονός ότι σχεδόν όλα τα συστήματα αυτού του είδους παρουσιάζουν μεταβλητή περίοδο, ανεξάρτητα του φασματικού τους τύπου και του βαθμού υπερπλήρωσης των λοβών Roche των, ίσως είναι μία ένδειξη ενός πραγματικού φυσικού μηχανισμού ο οποίος και διαμορφώνει την τροχιακή περίοδο αυτών των συστημάτων.

Μία πιθανή εξήγηση αυτού του μηχανισμού (Kalimeris et al. 1994) είναι η μεγάλη κλίμακας επαναλαμβανόμενη μεταφορά ενέργειας (large-scale main circulation system) κατά την οποία μεταφέρονται ποσότητες ενέργειας στον συνοδό αστέρα. Η υδροδυναμική αυτού του φαινομένου δεν είναι πολύ ξεκάθαρη έως τώρα για το περιβάλλον της κοινής περιβάλλουσας. Ωστόσο, η μη-στασιμότητα του φαινομένου είναι σχεδόν κοινή παραδοχή διαφόρων ερευνητών (Robertson 1980, Kahler 1989), ενώ έχουν προταθεί σαν εξήγηση αυτής της επαναλαμβανόμενης διαδικασίας φυσικά φαινόμενα όπως η δύναμη Coriolis και γεωμετρικά αίτια (γεωμετρία Roche). Κάτω από αυτές τις συνθήκες είναι προφανές ότι μπορεί εύκολα να ξεκινήσει η μεταφορά μάζας. Εάν, οι παρατηρούμενες μεταβολές της περιόδου οφείλονται στην υδροδυναμική ροή, τότε μεγάλη ποσότητα ενέργειας μπορεί να μεταφερθεί μεταξύ των δύο μελών σε χρονικές κλίμακες της τάξης μερικών ετών ή δεκαετιών. Ωστόσο, η δυνατότητα αυτού του μηχανισμού να διαμορφώνει τη τροχιακή περίοδο συστημάτων σε επαφή δεν μπορεί να εξασφαλιστεί εάν δεν υπάρχει ένας μη-στατικός μηχανισμός μεταφοράς μάζας στο εσωτερικό της κοινής περιβάλλουσας.

Οι Kalimeris, Rovithis-Livaniou & Rovithis (2002) έκαναν μία έρευνα για το αν η εμφάνιση ψυχρών κηλίδων σε κάποιον από τους αστέρες ενός διπλού συστήματος επηρεάζει την περίοδό του. Στη περίπτωση όπου η κηλίδα κινείται κατά το αστρογραφικό μήκος κατά γωνία $\delta\theta$ με ταχύτητα ίση με αυτήν της ιδιοπεριστροφής του αστέρα, υπάρχει σύγχρονη περιστροφή των μελών και δημιουργήθηκε κατά τον κύκλο E_0 σε αστρογραφικό μήκος θ_0 τότε η κηλίδα σε έναν τυχαίο τροχιακό κύκλο θα βρίσκεται στη θέση:

$$\theta_E = \theta_0 + (E - E_0)\delta\theta \quad (4.92)$$

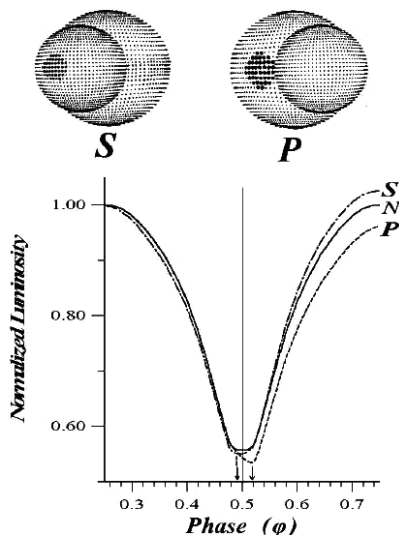
Η εμφάνιση της κηλίδας μπορεί να προκαλέσει χρονική μετατόπιση στο ελάχιστο της φωτεινότητας του συστήματος ίσο με $\delta\phi(\theta_0)$.

Επομένως, είναι προφανές ότι αν η κηλίδα παραμείνει στον αστέρα, μετά από κάθε τροχιακό κύκλο E αυτή η χρονική μετατόπιση θα αυξάνεται:

$$d\phi(\theta_1) = \delta\phi(\theta_E) - \delta\phi(\theta_{E-1}) \quad (4.93)$$

Επομένως η μεταβολή της περιόδου θα δίνεται από τη σχέση:

$$\delta P_E = d\phi_E P \quad (4.94)$$



Σχ.4.16 Η χρονική μετατόπιση του ελαχίστου λόγω της παρουσίας μίας κηλίδας στον πρωτεύοντα (P) ή στον δευτερεύοντα αστέρα (S). Στη περίπτωση N οι αστέρες δεν έχουν κηλίδες (Kalimeris et al. 2002).

Στη περίπτωση όπου η κηλίδα παραμένει σταθερή, τότε η σχέση που θα δίνει τη μεταβολή της περιόδου θα είναι η εξής: $P = P_0 + \delta t$ (4.95)
 Ωστόσο, η εφαρμογή των σχέσεων σε πραγματικά δεδομένα αστερών τύπου RS CVn έδειξε τα εξής:

- Οι κηλίδες δεν μπορούν να προκαλέσουν μόνιμες κλίσεις στα O-C διαγράμματα, δηλαδή δεν μπορούν να μεταβάλλουν σταθερά την τροχιακή περίοδο του συστήματος
- Η επεξήγηση απότομων μεταβολών στα O-C διαγράμματα είναι πολύ αβέβαιη διαδικασία
- Η ταξινόμηση των O-C διαγραμμάτων σε κανονικά και ανώμαλα είναι αμφίβολη

Ο Applegate (1992) πρότεινε μία εναλλακτική εξήγηση για την διαμόρφωση των O-C διαγραμμάτων από μη περιοδικούς παράγοντες, η οποία στηρίζεται στη μαγνητική δραστηριότητα κάποιου εκ των δύο αστερών του συστήματος. Σύμφωνα με αυτή τη θεωρία οι μη περιοδικές μεταβολές της τροχιακής περιόδου ενός διπλού συστήματος της τάξεως των δεκαετιών πιθανόν να παράγονται από μαγνητική δραστηριότητα ενός εκ των δύο αστερών μελών. Συγκεκριμένα, οι αστέρες των συστημάτων τύπου Algol θα πρέπει να ιδιοπεριστρέφονται πολύ γρήγορα, ενώ η παρουσία ή η απουσία ζώνης μεταφοράς στο εσωτερικό του αστερά θα προσδιορίζει αν υπάρχουν ή όχι τα απαραίτητα συστατικά του δυναμό. Προφανώς, μεταβολές στην τροχιακή περίοδο παρουσιάζουν τα συστήματα εκείνα στα οποία τουλάχιστον ο ένας αστέρας έχει βαθιά ζώνη μεταφοράς από την οποία εξαρτάται η ένταση του μαγνητικού του πεδίου.

Στο μοντέλο του Applegate (1992) οι μεταβολές της τροχιακής περιόδου του συστήματος οφείλονται στην τετραμερή ροπή αδράνειας (quadruple moment) λόγω της οποίας ο μαγνητικά ενεργός αστέρας γίνεται πεπλατυσμένος στο ισημερινό του επίπεδο. Η τετραμερής ροπή αδράνειας εξαρτάται από τον ρυθμό περιστροφής των εξωτερικών στρωμάτων του αστερά. Αν μεταφέρεται τροχιακή στροφορμή από το εσωτερικό προς τα εξωτερικά στρώματα του αστερά, τότε ο αστέρας ιδιοπεριστρέφεται με μεγαλύτερη γωνιακή ταχύτητα και κατ' επέκταση γίνεται ολοένα και πιο πεπλατυσμένος. Ωστόσο, αν με τη σειρά τους τα εξωτερικά στρώματα χάνουν στροφορμή (π.χ. λόγω αστρικού ανέμου) τότε η πλάτυση μειώνεται. Εφόσον το σημαντικό της ανάπτυξης και διατήρησης του δυναμό είναι το μαγνητικό πεδίο του αστερά, η διαφορική περιστροφή του παίζει σημαντικότατο ρόλο και αναμένεται να μεταβάλλεται από κύκλο σε κύκλο. Ποσοτικά, αν το μαγνητικό πεδίο κάτω από τη φωτόσφαιρα του αστερά είναι της τάξης μερικών KG τότε είναι δυνατό να μεταφέρει την απαιτούμενη ποσότητα στροφορμής στα εξωτερικά στρώματα και να ικανοποιεί τις παρατηρούμενες μεταβολές στη περίοδο του συστήματος.

Υπολογισμοί έδειξαν ότι οι μεταβολές στην τροχιακή περίοδο ενός συστήματος ΔP και η μεταβολή της τετραμερούς ροπής αδράνειας του ΔQ συνδέονται με τη σχέση:

$$\frac{\Delta P}{P} = -9 \left(\frac{R}{\alpha} \right)^2 \frac{\Delta Q}{MR^2} \quad (4.96)$$

Όπου M και R η μάζα και η ακτίνα του μαγνητικά ενεργού αστερά και α η απόσταση των δύο μελών.

Η τροχιακή στροφορμή ΔJ που πρέπει να μεταφερθεί από το εσωτερικό προς το εξωτερικό του μαγνητικά δραστήριου αστέρα ώστε να προκύψει μεταβολή στη περίοδο του συστήματος ΔP δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta J = -\frac{GM^2}{R} \left(\frac{\alpha}{R}\right)^2 \frac{\Delta P}{6\pi} \quad (4.97)$$

Ενώ η ενέργεια που χάνεται λόγω της παραπάνω μεταφοράς στροφορμής είναι ίση με:

$$\Delta E = \Omega_{dr} \Delta J \quad (4.98)$$

Όπου Ω_{dr} είναι η διαφορά γωνιακής ταχύτητας των τμημάτων ανάμεσα στα οποία γίνεται η μεταφορά στροφορμής.

Αυτή η απώλεια ενέργειας οδηγεί στην μεταβολή της φωτεινότητας σύμφωνα με τη σχέση:

$$\Delta L = \pi \frac{\Delta E}{P_{mod}} \quad (4.99)$$

Όπου P_{mod} η τιμή της περιόδου της διαταραχής της τροχιακής περιόδου P του συστήματος.

Τέλος, η ένταση του μαγνητικού πεδίου του αστέρα στον οποίο η στροφορμή στο εσωτερικό του μεταφέρεται λόγω της τετραμερούς ροπής αδρανείας δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$B^2 \sim 10 \frac{GM^2}{R^4} \left(\frac{\alpha}{R}\right)^2 \frac{\Delta P}{P_{mod}} \quad (4.100)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ O-C ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΩΝ ΔΙ' ΕΚΛΕΙΨΕΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΑΣΤΕΡΩΝ

5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο, το οποίο και αποτελεί την ερευνητική συνεισφορά της παρούσας εργασίας, θα παρουσιάσουμε τις παρατηρήσεις που έγιναν σε διάφορα επιλεγμένα εκλειπτικά συστήματα αστέρων, καθώς και την ανάλυση των O-C διαγραμμάτων τους. Επιλέχθηκαν συστήματα στα οποία ο συνοδός αστέρας παρουσιάζει έκκεντρη τροχιά, συστήματα στα οποία παρατηρείται μεταφορά μάζας μεταξύ των μελών τους, συστήματα στα οποία είναι πιθανή η ύπαρξη τρίτου μέλους και τέλος συστήματα στα οποία παρατηρείται συνδυασμός των παραπάνω φαινομένων.

Για καθένα από τα συστήματα που επιλέξαμε, έχουμε συλλέξει τους παρελθόντες χρόνους ελαχίστων από την βιβλιογραφία, και έχουμε προσθέσει τους χρόνους ελαχίστων που προέκυψαν από τις παρατηρήσεις μας με την μέθοδο της διαφορικής φωτομετρίας και τις τεχνικές που περιγράφονται στο 3^ο κεφάλαιο.

Για την ανάλυση των O-C διαγραμμάτων χρησιμοποιούμε υπολογιστικό κώδικα στο λογισμικό Matlab, ο οποίος βασίζεται στην επαναληπτική μέθοδο ώσπου η τυπική απόκλιση ($\chi^2 = \text{sum of square residuals}$) να πάρει την ελάχιστη δυνατή τιμή. Το πρόγραμμα δέχεται για αρχικές παραμέτρους τιμές που του δίνει ο χρήστης, εν συνεχεία με την επαναληπτική μέθοδο κατασκευάζει την θεωρητική καμπύλη και την προσαρμόζει όσο το δυνατόν καλύτερα στα παρατηρησιακά σημεία, εξάγοντας νέες βελτιωμένες τροχιακές και φωτομετρικές παραμέτρους (αστρονομική εφημερίδα) του συστήματος. Σε κάθε χρόνο ελαχίστου τίθεται στατιστικό βάρος ανάλογα με την μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή του. Θέτουμε στατιστικό βάρος στις οπτικές παρατηρήσεις (**v**) ίσο με 1, στις φωτογραφικές παρατηρήσεις (**p**) ίσο με 5, και στις φωτοηλεκτρικές (**e**) και CCD (**cc**) παρατηρήσεις ίσο με 10. Το πρόγραμμα εξάγει τα εξής διαγράμματα : i) Το διάγραμμα O-C με την θεωρητική καμπύλη και το ii) διάγραμμα των O-C υπολοίπων, στο οποίο παρουσιάζεται η κατανομή των παρατηρησιακών σημείων ύστερα από την αφαίρεση της θεωρητικής καμπύλης (residuals). Στις περιπτώσεις συστημάτων όπου υπάρχει συνδυασμός φαινομένων (π.χ. LITE και μεταφορά μάζας) τότε το πρόγραμμα, εκτός του διαγράμματος που περιέχει την συνολική θεωρητική καμπύλη και του διαγράμματος των O-C υπολοίπων, εξάγει και διαγράμματα στα οποία έχει αφαιρεθεί η μία εκ των δύο θεωρητικών καμπύλων ώστε να είναι εμφανή τα φαινόμενα ξεχωριστά. Ο αναλυτικός πίνακας των χρόνων ελαχίστου για κάθε σύστημα που αναλύθηκε παρατίθεται στο παράρτημα A, ενώ περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με το πρόγραμμα και την λειτουργία του παρατίθενται στο παράρτημα B της παρούσας εργασίας.

Τέλος, παρουσιάζουμε τα αστροφυσικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την προαναφερόμενη ανάλυση και τις αιτίες που δημιούργησαν την κατανομή του O-C διαγράμματος στο εκάστοτε σύστημα.

5.2 Συστήματα με έκκεντρη σχετική τροχιά του δευτερεύοντος αστέρα

Σε συστήματα στα οποία οι αστέρες είναι σχετικά απομακρυσμένοι μεταξύ τους (αποχωρισμένα ή ημι-αποχωρισμένα), πολλές φορές παρατηρείται το φαινόμενο της έκκεντρης τροχιάς του συνοδού αστέρα. Παρατηρησιακά το φαινόμενο γίνεται αντιληπτό από τη χρονική μετατόπιση των ελαχίστων του συστήματος. Είναι προφανές ότι ο χρόνος μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος ελαχίστου διαφέρει από τον χρόνο μεταξύ δευτερεύοντος – πρωτεύοντος ελαχίστου, αφού ο συνοδός αστέρας διαγράφει έλλειψη όπου η μία της εστία είναι το κέντρο μάζας του συστήματος. Για αυτό το λόγο στη βιβλιογραφία δίνονται πάντα δύο αστρονομικές εφημερίδες για τέτοιου είδους συστήματα, οι οποίες αφορούν τις προβλέψεις πρωτεύοντων και δευτερευόντων ελαχίστων αντίστοιχα.

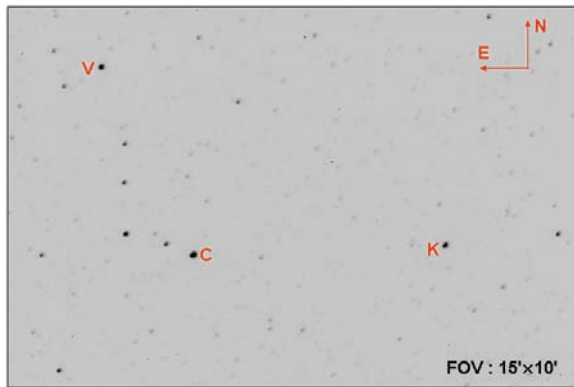
5.2.1 Το σύστημα YY Sgr

5.2.1.1 Ιστορικά στοιχεία

Το ημιαποχωρισμένο σύστημα YY Sgr (= HD 173140 = BD -19°5148 = AN.38.1908, $\alpha_{2000} = 18^{\text{h}}44^{\text{m}}35.8^{\text{s}}$, $\delta_{2000} = -19^{\circ}23'22.7''$) με φασματικούς τύπους αστέρων B5 + B6, είναι ένα αρκετά γνωστό εκλειπτικό σύστημα με αστέρες προγενέστερου φασματικού τύπου και περίοδο περίπου 2.63 days. Το σύστημα αποτελεί ένα κλασικό παράδειγμα συστήματος με έκκεντρη τροχιά του συνοδού αστέρα και υπάρχουν παρατηρήσεις που καλύπτουν παραπάνω από έναν αιώνα. Η μεταβλητότητά του ανακαλύφθηκε από τον Cannon (Pickering 1908, 1909) και η πρώτη φωτοηλεκτρική καμπύλη φωτός δημοσιεύτηκε από τους Keller & Limber (1951). Η σύνοψη των εργασιών σε αυτό το σύστημα δημοσιεύτηκε από τους Woodward & Koch (1992). Ο Lacy (1993) δημοσίευσε τα φωτομετρικά στοιχεία του συστήματος και τις παραμέτρους της έκκεντρης τροχιάς του συνοδού αστέρα. Λίγο αργότερα και πάλι ο Lacy (1997) κατέληξε ότι η περίοδος της μετάθεσης της γραμμής των αψίδων είναι $U=297\pm 4$ yrs, και η εκκεντρότητα είναι $e=0.1575\pm 0.0007$. Ο Wolf (2000) χρησιμοποιώντας νέους χρόνους ελαχίστων επανέλαβε τους υπολογισμούς και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι εκτός της έκκεντρης τροχιάς του συνοδού αστέρα, στο σύστημα πιθανότατα υπάρχει και τρίτο μέλος.

5.2.1.2 Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι παρατηρήσεις του συστήματος διεξήχθησαν στις 15/5/2007 και 19/8/2007 στο Γεροσταθοπούλειο Πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (κεφ.2) χρησιμοποιώντας το φωτομετρικό φίλτρο R με χρόνο έκθεσης 40 sec. Στο παρακάτω σχήμα παρατίθεται το πεδίο του αστέρα YY Sgr (V), όπου δίνονται η φορά του, οι διαστάσεις του και οι αστέρες συγκρίσεως (C) και ελέγχου (K) που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία.

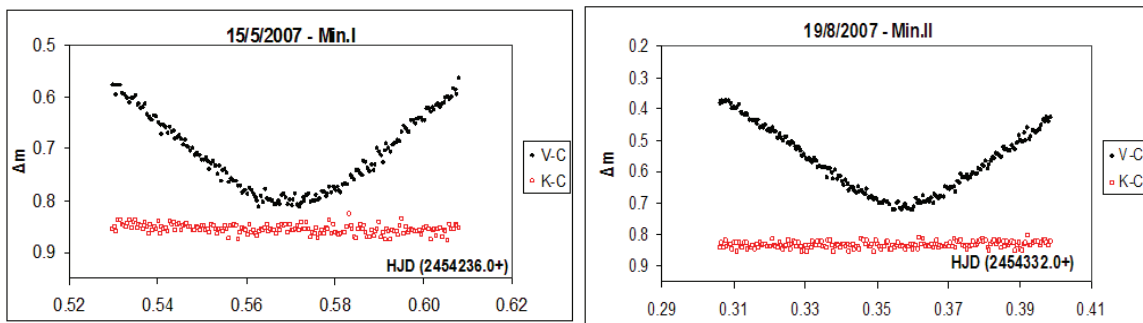


Σχ.5.1 Το πεδίο του αστέρα YY Sgr, και οι αστέρες σύγκρισης και ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν στις παρατηρήσεις μας.

Στο πρόγραμμα AIP4WIN χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των ακτίνων των διαφραγμάτων 5, 6 και 7 αντίστοιχα (§3.1).

Πίνακας 5.1 Οι αστέρες σύγκρισης (C) και ελέγχου (K) που χρησιμοποιήθηκαν στην φωτομετρία

| Αστέρας | Mag | Χρήση στη φωτομετρία |
|---------------|-------------|----------------------|
| YY Sgr | 10.02/10.73 | V |
| GSC 6288:0707 | 10.62 | C |
| GSC 6288:0719 | 11.2 | K |



Σχ.5.2&5.3 Τα διαγράμματα ελαχίστων της φωτεινότητας του αστέρα YY Sgr, όπως προέκυψαν από τις παρατηρήσεις μας στο R φίλτρο.

Τέλος, στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζουμε τους χρόνους ελαχίστους που προέκυψαν από τις παρατηρήσεις μας με τη χρήση της μεθόδου Kwee & Van Woerden (§3.1).

Πίνακας 5.2 Οι χρόνοι ελαχίστου που προέκυψαν από τις παρατηρήσεις μας

| Minima (HJD) | Error | Type |
|---------------|---------|------|
| 2454236.56964 | 0.00010 | I |
| 2454332.35726 | 0.00011 | II |

5.2.1.3 Ανάλυση του O-C διαγράμματος

Για την κατασκευή του O-C διαγράμματος του αστέρα YY Sgr, χρησιμοποιήθηκε η εφημερίδα από τον Kreiner* η οποία είναι:

$$Min.I = HJD 2419467.02830 + 2.6284749 \times E$$

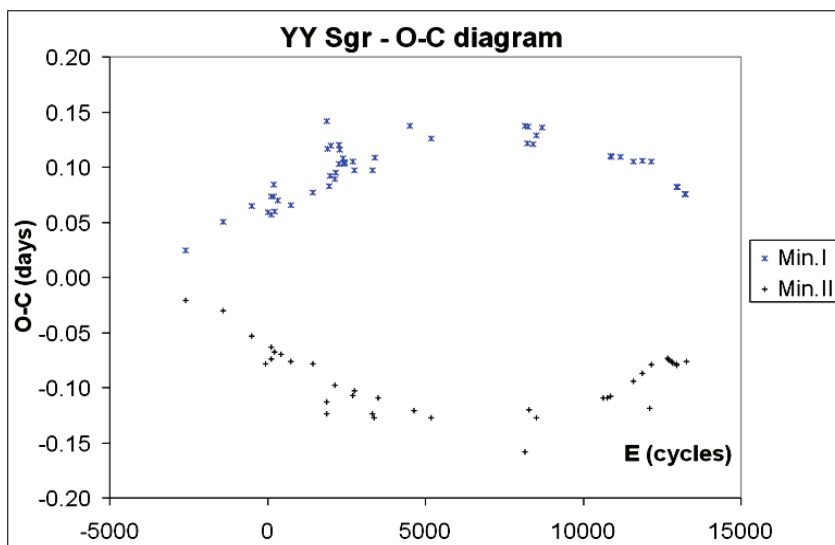
Οι χρόνοι παρελθόντων ελαχίστων που χρησιμοποιήθηκαν από τη βιβλιογραφία, αλλά και από τη βάση δεδομένων του Kreiner (προσωπική επικοινωνία), παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα και βάσει της εφημερίδας του συστήματος βρέθηκαν οι αντίστοιχες O-C τιμές (§3.7). Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 86 χρόνοι ελαχίστων, εκ των οποίων οι 41 προέρχονται από οπτικές παρατηρήσεις, οι 22 προέκυψαν με φωτογραφικές μεθόδους, οι 9 από φωτοηλεκτρικές και οι 14 από CCD παρατηρήσεις αντίστοιχα. Το χρονικό εύρος των παραπάνω παρατηρήσεων κυμαίνεται από το 1880 έως σήμερα.

Πίνακας 5.3 Οι χρόνοι ελαχίστου και οι O-C τιμές τους για το σύστημα YY Sgr

| To (HJD) | E (fixed) | O-C (days) | To (HJD) | E (fixed) | O-C (days) | To (HJD) | E (fixed) | O-C (days) |
|---------------|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|
| 2412643.53200 | -2596.0 | 0.025 | 2425060.51200 | 2128.0 | 0.089 | 2441861.76300 | 8520.0 | 0.129 |
| 2412644.80100 | -2595.5 | -0.021 | 2425061.63900 | 2128.5 | -0.098 | 2441862.82100 | 8520.5 | -0.128 |
| 2415747.78700 | -1415.0 | 0.051 | 2425118.34400 | 2150.0 | 0.095 | 2442303.35400 | 8688.0 | 0.136 |
| 2415749.02000 | -1414.5 | -0.031 | 2425378.57100 | 2249.0 | 0.103 | 2447382.63650 | 10620.5 | -0.109 |
| 2418121.31400 | -512.0 | 0.065 | 2425386.47400 | 2252.0 | 0.120 | 2447742.73740 | 10757.5 | -0.110 |
| 2418122.51000 | -511.5 | -0.053 | 2425486.35200 | 2290.0 | 0.116 | 2448059.68800 | 10878.0 | 0.110 |
| 2419305.29900 | -61.5 | -0.078 | 2425775.47600 | 2400.0 | 0.108 | 2448060.78450 | 10878.5 | -0.108 |
| 2419467.08710 | 0.0 | 0.059 | 2425833.29900 | 2422.0 | 0.104 | 2448067.57300 | 10881.0 | 0.109 |
| 2419764.10300 | 113.0 | 0.057 | 2425854.32500 | 2430.0 | 0.103 | 2448853.48700 | 11180.0 | 0.109 |
| 2419764.11900 | 113.0 | 0.073 | 2425883.24000 | 2441.0 | 0.104 | 2449907.50080 | 11581.0 | 0.105 |
| 2419765.28600 | 113.5 | -0.074 | 2426540.35900 | 2691.0 | 0.105 | 2449908.61600 | 11581.5 | -0.094 |
| 2419765.29700 | 113.5 | -0.063 | 2426557.23200 | 2697.5 | -0.107 | 2450672.38820 | 11872.0 | 0.106 |
| 2419953.38000 | 185.0 | 0.084 | 2426703.31700 | 2753.0 | 0.097 | 2450681.39520 | 11875.5 | -0.087 |
| 2419974.39700 | 193.0 | 0.073 | 2426704.43100 | 2753.5 | -0.103 | 2451320.08300 | 12118.5 | -0.118 |
| 2420012.36900 | 207.5 | -0.068 | 2428164.74900 | 3309.0 | 0.097 | 2451408.36050 | 12152.0 | 0.105 |
| 2420024.32500 | 212.0 | 0.060 | 2428165.84200 | 3309.5 | -0.124 | 2451417.37570 | 12155.5 | -0.079 |
| 2420342.38000 | 333.0 | 0.070 | 2428360.34600 | 3383.5 | -0.127 | 2452810.47340 | 12685.5 | -0.073 |
| 2420582.74630 | 424.5 | -0.070 | 2428372.41000 | 3388.0 | 0.109 | 2452839.38530 | 12696.5 | -0.075 |
| 2421406.90800 | 738.0 | 0.065 | 2428699.43700 | 3512.5 | -0.109 | 2453128.51580 | 12806.5 | -0.076 |
| 2421408.08100 | 738.5 | -0.076 | 2431324.21600 | 4511.0 | 0.137 | 2453178.45560 | 12825.5 | -0.078 |
| 2423233.71000 | 1433.0 | 0.077 | 2431656.46000 | 4637.5 | -0.121 | 2453517.52830 | 12954.5 | -0.078 |
| 2423234.86900 | 1433.5 | -0.078 | 2433074.76900 | 5177.0 | 0.126 | 2453546.43970 | 12965.5 | -0.08 |
| 2424361.39000 | 1862.0 | 0.141 | 2433075.82960 | 5177.5 | -0.127 | 2453550.54460 | 12967.0 | 0.082 |
| 2424362.43900 | 1862.5 | -0.124 | 2440889.23600 | 8150.0 | 0.137 | 2453579.45770 | 12978.0 | 0.082 |
| 2424362.45000 | 1862.5 | -0.113 | 2440890.25500 | 8150.5 | -0.158 | 2454236.56964 | 13228.0 | 0.075 |
| 2424432.33400 | 1889.0 | 0.117 | 2441070.58500 | 8219.0 | 0.121 | 2454265.4830 | 13239.9 | 0.075 |
| 2424621.55000 | 1961.0 | 0.082 | 2441178.36800 | 8260.0 | 0.137 | 2454332.35726 | 13264.5 | -0.076 |
| 2424650.47300 | 1972.0 | 0.092 | 2441208.33800 | 8271.5 | -0.120 | | | |
| 2424700.44100 | 1991.0 | 0.119 | 2441596.27900 | 8419.0 | 0.121 | | | |

*<http://www.as.ap.krakow.pl/o-c/data/getdata.php3?YY%20sgr>

Βάσει του παραπάνω πίνακα και της αστρονομικής εφημερίδας του αστέρα κατασκευάστηκε το O-C διάγραμμά του.



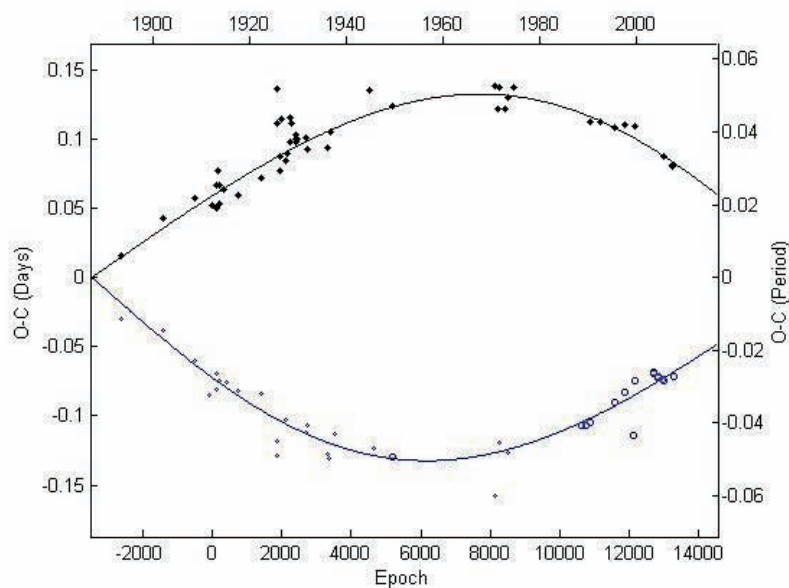
Σχ.5.4 Το O-C διάγραμμα του αστέρα YY Sgr.

Οι χρόνοι ελαχίστων που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτοί του πίνακα 5.3. Σε κάθε χρόνο ελαχίστου τίθεται στατιστικό βάρος, ανάλογα με την μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή του (§5.1). Οι τελικές τροχιακές και φωτομετρικές παράμετροι του συστήματος καθώς και τα σφάλματά τους προκύπτουν χρησιμοποιώντας το λογισμικό Matlab. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε σε αυτό το λογισμικό έχει το όνομα *Apsidal Motion* (Zasche 2007) και εμπεριέχει όλες τις εξισώσεις της *μετάθεσης της γραμμής των αψίδων* (§4.3.4).

Πίνακας 5.4 Οι αρχικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τον αστέρα YY Sgr στον κώδικα *Apsidal Motion*

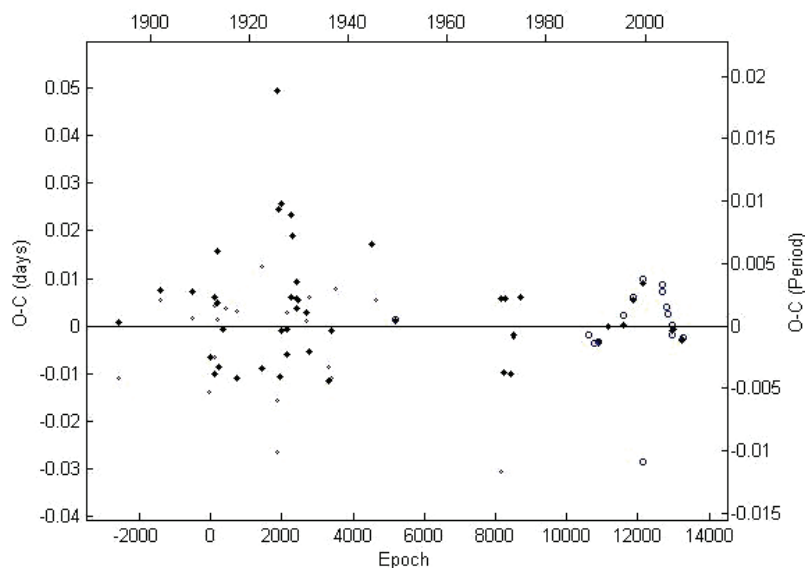
| | |
|---|--------------|
| JD₀ (HJD) | 2419467.0283 |
| P (days) | 2.6284749 |
| ω (deg) | 100.0 |
| $\dot{\omega}$ (deg/yr) | 0.01 |
| e | 0.2 |

Όπου JD₀ και P είναι τα στοιχεία της αστρονομικής εφημερίδας του αστέρα, ω και $\dot{\omega}$ το μήκος και ο ρυθμός μεταβολής του περιάστρου της τροχιάς του δευτερεύοντος αστέρα (ταχύτητα της κίνησης της γραμμής των αψίδων), και e η εκκεντρότητα της τροχιάς του δευτερεύοντος αστέρα ως προς τον πρωτεύοντα.



Σχ.5.5 Το O-C διάγραμμα του αστέρα YY Sgr στο οποίο έχει προσαρμοστεί η θεωρητική καμπύλη. Η μπλε συνεχής γραμμή και τα μπλε σημεία αντιστοιχούν στα πρωτεύοντα ελάχιστα ενώ η μαύρη συνεχής γραμμή και τα μαύρα σημεία στα δευτερεύοντα ελάχιστα. Όσο μεγαλύτερο το σύμβολο του κάθε σημείου τόσο μεγαλύτερο και το στατιστικό βάρος που χρησιμοποιήθηκε. Στον άνω οριζόντιο άξονα αναγράφεται η χρονολογία, στον κάτω οριζόντιο άξονα ο αριθμός των περιφορών, στον αριστερό κατακόρυφο αναγράφονται οι O-C τιμές εκφρασμένες σε days και στον δεξιό κατακόρυφο οι O-C τιμές εκφρασμένες σε υποπολλαπλάσια της περιόδου του συστήματος.

Εν συνεχεία, το πρόγραμμα εξάγει το διάγραμμα των O-C υπολοίπων (§5.1).



Σχ.5.6 Το διάγραμμα των O-C υπολοίπων του YY Sgr. Οι άξονες και τα σημεία αναπαριστούν τα ίδια μεγέθη όπως και στο προηγούμενο σχήμα.

Πίνακας 5.5 Οι τροχιακές και φωτομετρικές παράμετροι που προέκυψαν για τον αστέρα YY Sgr με τη χρήση του κώδικα *Apsidal Motion*

| Parameter | Value | error |
|----------------------------|----------------|-----------|
| JD ₀ (HJD) | 2419467.035032 | 0.01566 |
| P (days) | 2.6284740 | 0.0000022 |
| ω (deg) | 120 | 4 |
| $\dot{\omega}$ (deg/cycle) | 0.009 | 0.002 |
| e | 0.16 | 0.02 |
| χ^2 | 0.0275 | - |

Από τις σχέσεις 4.7 - 4.10 υπολογίζουμε την ανωμαλιστική περίοδο του διπλού συστήματος, και την περίοδο της κίνησης της γραμμής των αψίδων.

$$P_a = (2.6285372 \pm 0.0000022) \text{ days}$$

$$U = (299 \pm 56) \text{ yrs}$$

Τέλος η ανανεωμένη φωτομετρική εφημερίδα του συστήματος που προέκυψε από την ανάλυση του O-C διαγράμματος είναι:

$$Min.I = HJD 2419467.035032(1566) + 2.6284740(22) \times E$$

Η παραπάνω εφημερίδα προβλέπει τους χρόνους των πρωτεύοντων ελαχίστων του συστήματος, ενώ ισχύει και για τους χρόνους των δευτερευόντων ελαχίστων εάν στη θέση του JD₀ βάλουμε έναν αντίστοιχο παρελθόντα χρόνο δευτερεύοντος ελαχίστου.

5.2.1.4 Συμπεράσματα

Στη παρούσα παράγραφο της εργασίας, μελετήθηκε το διάγραμμα O-C του μεταβλητού δι' εκλείψεων αστέρα YY Sgr. Από την μορφή του O-C διαγράμματος που παρουσιάζει, υποθέσαμε ότι πρόκειται για διπλό εκλειπτικό σύστημα στο οποίο ο δευτερεύων αστέρας έχει έκκεντρη τροχιά.

Ο εν λόγω αστέρας παρατηρήθηκε φωτομετρικά και υπολογίστηκαν δύο χρόνοι φωτομετρικών ελαχίστων. Από την βιβλιογραφία συλλέξαμε και παλαιότερους χρόνους ελαχίστων, και ανάλογα την μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή τους, τους δόθηκαν στατιστικά βάρη στην περαιτέρω ανάλυση.

Η ανάλυση του O-C διαγράμματος με την βοήθεια H/Y και εξειδικευμένου υπολογιστικού κώδικα, έδειξε ότι στο σύστημα λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της μετάθεσης της γραμμής των αψίδων με περίοδο περίπου 300 yrs και η υπολογίστηκε η νέα αστρονομική εφημερίδα του. Παρατηρούμε ότι το σφάλμα της περιόδου της κίνησης της γραμμής των αψίδων είναι της τάξης του 19% και αυτό οφείλεται στο σφάλμα του όρου $d\omega/dt$ το οποίο και επηρεάζει το άμεσα (σχέση 4.10). Περισσότεροι χρόνοι ελαχίστων απαιτούνται στα επόμενα χρόνια, έτσι ώστε να είμαστε σε θέση να εξαγάγουμε με μεγαλύτερη ακρίβεια τις τιμές που υπολογίσαμε.

Στο διάγραμμα των O-C υπολοίπων βλέπουμε ότι μετά το 1980 τα σημεία ακολουθούν μία σχεδόν περιοδική κατανομή. Δυστυχώς, τα προηγούμενα χρόνια

η ακρίβεια των μεθόδων παρατήρησης δεν ήταν ικανοποιητική ώστε να μπορέσουμε να διακρίνουμε κάτι παρόμοιο για τότε. Επίσης η ανυπαρξία δεδομένων μεταξύ 1975 – 1985 δεν μας επιτρέπει να εξάγουμε με βεβαιότητα συμπεράσματα για αυτή τη περιοδικότητα. Στο μέλλον όμως, με την προσθήκη επιπλέον χρόνων ελαχίστων ίσως τελικά να βρεθούμε σε θέση να μελετήσουμε καλύτερα αυτήν την υποψήφια περιοδικότητα. Λόγω του ότι οι αστέρες του συστήματος είναι θερμοί (B5+B6), η μαγνητική δραστηριότητα αποκλείεται, οπότε ίσως η ύπαρξη τρίτου μέλους στο σύστημα να αποτελέσει λύση στο πρόβλημα. Το LITE περιγράφει επακριβώς τέτοιες περιοδικότητες στο O-C διάγραμμα, αλλά παρ' όλα αυτά φασματοσκοπικές παρατηρήσεις για την ύπαρξη ενός επιπλέον μέλους είναι απαραίτητες για την άμεση επιβεβαίωση του.

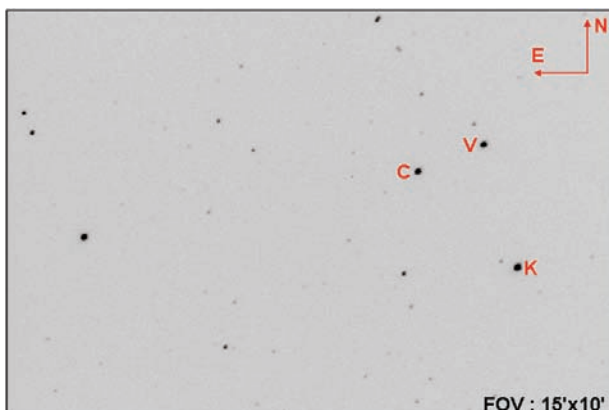
5.2.2 Το σύστημα *FT Ori*

5.2.2.1 Ιστορικά στοιχεία

Το αποχωρισμένο σύστημα *FT Ori* ($=$ HD 42858 $=$ BD +21° 1159 $=$ SAO 78120 $=$ GSC 1326:0910, $\alpha_{2000} = 6^{\text{h}}13^{\text{m}}58.09^{\text{s}}$, $\delta_{2000} = 21^{\circ}25'39.5''$) ανακαλύφθηκε σαν μεταβλητός αστέρας με φωτογραφική μέθοδο από τον Hoffmeister (1934). Τα πρώτα φωτομετρικά στοιχεία του συστήματος εξήχθησαν από τον Cristaldi (1970). Ο Gronbech (1974) παρατήρησε για πρώτη φορά την ύπαρξη της μετάθεσης της γραμμής των αψίδων και προσδιόρισε την περίοδο της σε 520 ± 100 yrs. Το O-C διάγραμμα του συστήματος δημοσιεύτηκε πολλά χρόνια αργότερα από τον Diethelm (1992), όμως δεν υπήρχαν παρατηρήσεις για παραπάνω από 20 χρόνια. Τέλος, οι Wolf & Sarounova (1995) μελέτησαν και πάλι την τροχιακή περίοδο του συστήματος, συνεισέφεραν νέους χρόνους ελαχίστων και προσδιόρισαν εκ νέου την περίοδο της κίνησης της γραμμής των αψίδων σε 481 ± 19 yrs.

5.2.2.2 Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι παρατηρήσεις του συστήματος διεξήχθησαν στις 22/12/2007 στο Γεροσταθοπούλειο Πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (κεφ.2) χρησιμοποιώντας τα φωτομετρικά φίλτρα V και R με χρόνο έκθεσης 15 και 10 sec αντίστοιχα. Στο παρακάτω σχήμα παρατίθεται το πεδίο του αστέρα *FT Ori* (V), όπου δίνονται η φορά του, οι διαστάσεις του και οι αστέρες σύγκρισης (C) και ελέγχου (K) που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία.

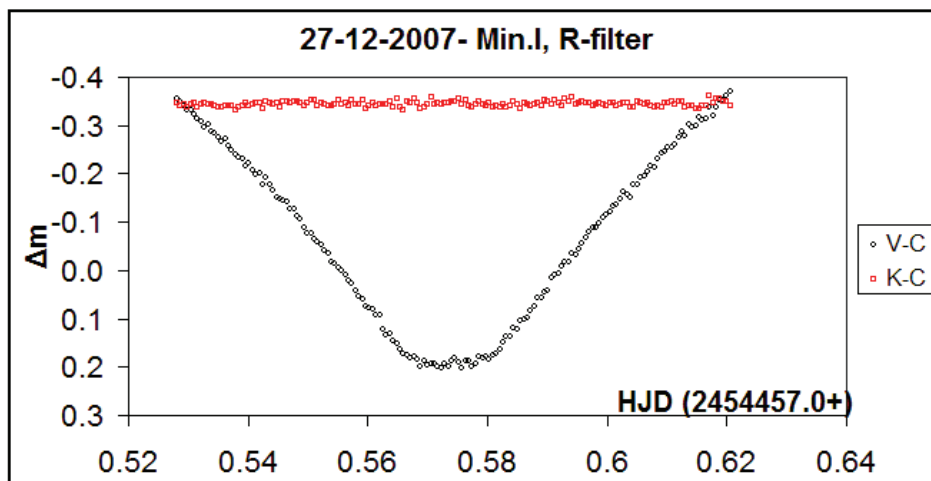


Σχ.5.7 Το πεδίο του αστέρα *FT Ori*, και οι αστέρες σύγκρισης και ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν στις παρατηρήσεις μας.

Στο πρόγραμμα AIP4WIN χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των ακτίνων των διαφραγμάτων 5, 7 και 9 αντίστοιχα (§3.1).

Πίνακας 5.6 Οι αστέρες σύγκρισης (C) και ελέγχου (K) που χρησιμοποιήθηκαν στην φωτομετρία

| Αστέρας | Mag | Χρήση στη φωτομετρία |
|---------------|-----------|----------------------|
| FT Ori | 9.30/10.1 | V |
| GSC 1326:1430 | 9.77 | C |
| GSC 1326:1684 | 9.44 | K |



Σχ.5.8 Το διάγραμμα ελαχίστου της φωτεινότητας του αστέρα FT Ori, όπως προέκυψε από τις παρατηρήσεις μας στο R φίλτρο.

Τέλος, στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζουμε τον χρόνο ελαχίστου που προέκυψε από τις παρατηρήσεις μας με τη χρήση της μεθόδου Kwee & Van Woerden (§3.1).

Πίνακας 5.7 Ο χρόνος ελαχίστου που προέκυψε από τις παρατηρήσεις μας

| Minima (HJD) | Error | Type | Mean minima (HJD) | Mean error |
|---------------|---------|------|-------------------|------------|
| 2454457.57383 | 0.00004 | I | | |
| 2454457.57381 | 0.00006 | I | 2454457.57382 | 0.00005 |

5.2.2.3 Ανάλυση του O-C διαγράμματος

Για την κατασκευή του O-C διαγράμματος του αστέρα FT Ori, χρησιμοποιήθηκε η εφημερίδα από τον Kreiner* η οποία είναι:

$$Min.I = HJD 2441349.0572 + 3.1503978 \times E$$

Οι χρόνοι παρελθόντων ελαχίστων που χρησιμοποιήθηκαν από τη βιβλιογραφία, αλλά και από τη βάση δεδομένων του Kreiner (προσωπική επικοινωνία) παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα, και βάσει της εφημερίδας του συστήματος βρέθηκαν οι αντίστοιχες O-C τιμές (§3.7). Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 110 χρόνοι

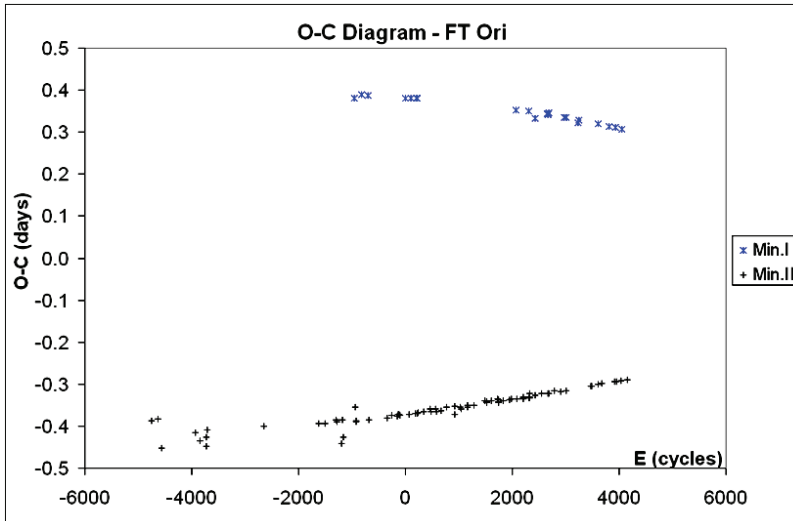
*<http://www.as.ap.krakow.pl/o-c/data/getdata.php3?FT%20ori>

ελαχίστων, εκ των οποίων οι 34 προέρχονται από οπτικές παρατηρήσεις, οι 14 προέκυψαν με φωτογραφικές μεθόδους, οι 42 από φωτοηλεκτρικές και οι 20 από CCD παρατηρήσεις αντίστοιχα. Το χρονικό εύρος των παραπάνω παρατηρήσεων κυμαίνεται από το 1935 έως σήμερα.

Πίνακας 5.8 Οι χρόνοι ελαχίστου και οι O-C τιμές τους για το σύστημα FT Ori

| To (HJD) | E (fixed) | O-C (days) | To (HJD) | E (fixed) | O-C (days) | To (HJD) | E (fixed) | O-C (days) |
|---------------|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|
| 2426384.28000 | -4750.0 | -0.388 | 2442060.67780 | 226.0 | -0.369 | 2448651.34600 | 2318.0 | -0.333 |
| 2426743.43000 | -4636.0 | -0.383 | 2442095.33400 | 237.0 | -0.367 | 2448651.34800 | 2318.0 | -0.331 |
| 2426979.64000 | -4561.0 | -0.453 | 2442451.33040 | 350.0 | -0.366 | 2448692.31200 | 2331.0 | -0.322 |
| 2428983.33000 | -3925.0 | -0.416 | 2442829.38500 | 470.0 | -0.359 | 2448984.37900 | 2423.5 | 0.333 |
| 2429219.59000 | -3850.0 | -0.436 | 2442870.33300 | 483.0 | -0.366 | 2449013.64800 | 2433.0 | -0.327 |
| 2429619.70000 | -3723.0 | -0.426 | 2443128.67300 | 565.0 | -0.359 | 2449347.59600 | 2539.0 | -0.321 |
| 2429635.43000 | -3718.0 | -0.448 | 2443172.77300 | 579.0 | -0.365 | 2449721.58330 | 2657.5 | 0.344 |
| 2429638.62000 | -3717.0 | -0.409 | 2443459.46000 | 670.0 | -0.364 | 2449724.73380 | 2658.5 | 0.344 |
| 2433009.55300 | -2647.0 | -0.401 | 2443780.81000 | 772.0 | -0.354 | 2449725.64270 | 2659.0 | -0.322 |
| 2436232.41700 | -1624.0 | -0.394 | 2444259.65200 | 924.0 | -0.373 | 2449759.38560 | 2669.5 | 0.341 |
| 2436629.36800 | -1498.0 | -0.393 | 2444281.72600 | 931.0 | -0.352 | 2449760.29660 | 2670.0 | -0.323 |
| 2437281.50800 | -1291.0 | -0.386 | 2444590.46190 | 1029.0 | -0.355 | 2449763.44760 | 2671.0 | -0.322 |
| 2437319.30800 | -1279.0 | -0.390 | 2444631.41370 | 1042.0 | -0.358 | 2449782.35020 | 2677.0 | -0.322 |
| 2437577.59000 | -1197.0 | -0.441 | 2445028.36700 | 1168.0 | -0.355 | 2449800.34580 | 2682.5 | 0.347 |
| 2437659.55700 | -1171.0 | -0.384 | 2445034.67200 | 1170.0 | -0.351 | 2450138.35210 | 2790.0 | -0.315 |
| 2437697.32000 | -1159.0 | -0.426 | 2445406.42000 | 1288.0 | -0.350 | 2450494.34450 | 2903.0 | -0.318 |
| 2438345.53400 | -953.5 | 0.381 | 2446058.56200 | 1495.0 | -0.340 | 2450726.55190 | 2976.5 | 0.336 |
| 2438406.23100 | -934.0 | -0.355 | 2446143.61900 | 1522.0 | -0.344 | 2450849.41770 | 3015.5 | 0.336 |
| 2438431.39950 | -926.0 | -0.389 | 2446143.62000 | 1522.0 | -0.343 | 2450850.34230 | 3016.0 | -0.315 |
| 2438453.45350 | -919.0 | -0.388 | 2446436.61000 | 1615.0 | -0.340 | 2451504.68600 | 3223.5 | 0.321 |
| 2438783.44800 | -814.5 | 0.390 | 2446814.66200 | 1735.0 | -0.335 | 2451580.30320 | 3247.5 | 0.329 |
| 2439120.53830 | -707.5 | 0.388 | 2446827.25600 | 1739.0 | -0.343 | 2451602.35600 | 3254.5 | 0.329 |
| 2439139.44110 | -701.5 | 0.388 | 2446827.26200 | 1739.0 | -0.337 | 2452296.38520 | 3475.0 | -0.304 |
| 2439184.34900 | -687.0 | -0.385 | 2446858.76100 | 1749.0 | -0.342 | 2452337.34060 | 3488.0 | -0.304 |
| 2440274.39170 | -341.0 | -0.380 | 2447132.84840 | 1836.0 | -0.339 | 2452692.38480 | 3600.5 | 0.320 |
| 2440554.78200 | -252.0 | -0.375 | 2447482.54500 | 1947.0 | -0.337 | 2452693.33830 | 3601.0 | -0.301 |
| 2440885.57300 | -147.0 | -0.376 | 2447507.74780 | 1955.0 | -0.337 | 2452715.39130 | 3608.0 | -0.301 |
| 2440926.53200 | -134.0 | -0.372 | 2447605.41210 | 1986.0 | -0.335 | 2452939.07260 | 3679.0 | -0.298 |
| 2440945.43400 | -128.0 | -0.372 | 2447840.80450 | 2060.5 | 0.353 | 2453385.46620 | 3820.5 | 0.314 |
| 2441027.34200 | -102.0 | -0.375 | 2447898.39990 | 2079.0 | -0.334 | 2453682.57040 | 3915.0 | -0.294 |
| 2441348.68410 | 0.0 | -0.373 | 2448273.29750 | 2198.0 | -0.334 | 2453701.47280 | 3921.0 | -0.294 |
| 2441363.61550 | 4.5 | 0.382 | 2448273.29800 | 2198.0 | -0.334 | 2453760.36020 | 3939.5 | 0.311 |
| 2441575.51360 | 72.0 | -0.372 | 2448273.30090 | 2198.0 | -0.331 | 2453764.48130 | 3941.0 | -0.294 |
| 2441675.50430 | 103.5 | 0.381 | 2448279.59920 | 2200.0 | -0.333 | 2454073.22160 | 4039.0 | -0.292 |
| 2441959.86480 | 194.0 | -0.370 | 2448282.75120 | 2201.0 | -0.332 | 2454097.44830 | 4046.5 | 0.306 |
| 2441996.84410 | 205.5 | 0.380 | 2448606.34900 | 2303.5 | 0.350 | 2454457.57382 | 4161.0 | -0.289 |
| 2442056.70190 | 224.5 | 0.380 | 2448632.44400 | 2312.0 | -0.333 | | | |

Βάσει του παραπάνω πίνακα και της αστρονομικής εφημερίδας του αστέρα κατασκευάστηκε το O-C διάγραμμά του.



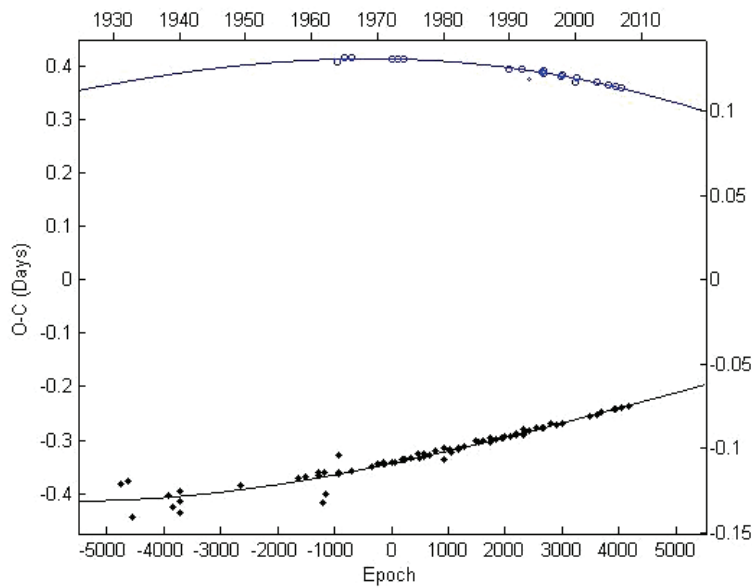
Σχ.5.9 Το O-C διάγραμμα του αστέρα FT Ori.

Οι χρόνοι ελαχίστων που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτοί του πίνακα 5.8. Σε κάθε χρόνο ελαχίστου τίθεται στατιστικό βάρος, ανάλογα με την μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή του (§5.1). Οι τελικές τροχιακές και φωτομετρικές παράμετροι του συστήματος καθώς και τα σφάλματά τους προκύπτουν χρησιμοποιώντας το λογισμικό Matlab. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε σε αυτό το λογισμικό έχει το όνομα *Apsidal Motion* (Zasche 2007) και εμπεριέχει όλες τις εξισώσεις της *μετάθεσης της γραμμής των αψίδων* (§4.3.4).

Πίνακας 5.9 Οι αρχικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τον αστέρα FT Ori στον κώδικα *Apsidal Motion*

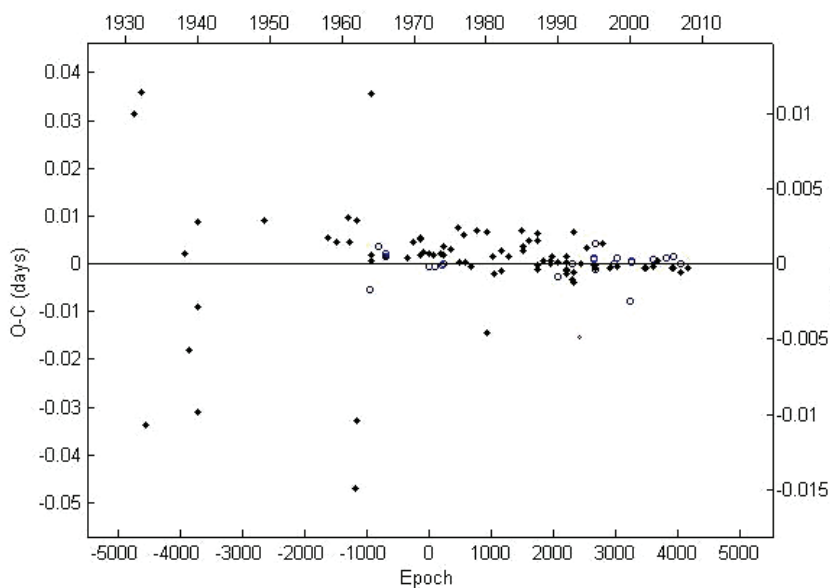
| | |
|---|--------------|
| JD₀ (HJD) | 2441349.0572 |
| P (days) | 3.1503978 |
| Ω (deg) | 0.0 |
| $\dot{\omega}$ (deg/yr) | 0.01 |
| e | 0.5 |

Όπου JD₀ και P είναι τα στοιχεία της αστρονομικής εφημερίδας του αστέρα, ω και $\dot{\omega}$ το μήκος και ο ρυθμός μεταβολής του περιάστρου της τροχιάς του δευτερεύοντος αστέρα (ταχύτητα της κίνησης της γραμμής των αψίδων), και e η εκκεντρότητα της τροχιάς του δευτερεύοντος αστέρα ως προς τον πρωτεύοντα.



Σχ.5.10 Το O-C διάγραμμα του αστέρα FT Ori στο οποίο έχει προσαρμοστεί η θεωρητική καμπύλη. Οι άξονες και οι γραμμές αναπαριστούν τα ίδια μεγέθη με αυτά του σχήματος 5.5.

Εν συνεχεία, το πρόγραμμα εξάγει το διάγραμμα των O-C υπολοίπων (§5.1).



Σχ.5.11 Το διάγραμμα των O-C υπολοίπων του FT Ori. Οι άξονες και τα σημεία αναπαριστούν τα ίδια μεγέθη με αυτά του σχήματος 5.5.

Πίνακας 5.10 Οι τροχιακές και φωτομετρικές παράμετροι που προέκυψαν για τον αστέρα FT Ori με τη χρήση του κώδικα Apidal Motion

| Parameter | Value | error |
|----------------------------|---------------|-----------|
| JD ₀ (HJD) | 2441349.02595 | 0.03621 |
| P (days) | 3.1503927 | 0.0000152 |
| ω (deg) | 18 | 1 |
| $\dot{\omega}$ (deg/cycle) | 0.0059 | 0.0007 |
| e | 0.40 | 0.06 |
| χ^2 | 0.0513 | - |

Από τις σχέσεις 4.7 - 4.10 υπολογίζουμε την ανωμαλιστική περίοδο του διπλού συστήματος, και την περίοδο της κίνησης της γραμμής των αψίδων:

$$P_{\alpha} = (3.1504441 \pm 0.0000152) \text{ yrs}$$

$$U = (529 \pm 67) \text{ yrs}$$

Τέλος η ανανεωμένη φωτομετρική εφημερίδα του συστήματος που προέκυψε από την ανάλυση του O-C διαγράμματος είναι:

$$MIn.I = HJD \ 2441349.02595(3621) + 3.1503927(152) \times E$$

Η παραπάνω εφημερίδα προβλέπει τους χρόνους των πρωτεύοντων ελαχίστων του συστήματος, ενώ ισχύει και για τους χρόνους των δευτερεύοντων ελαχίστων εάν στη θέση του JD_0 βάλουμε έναν αντίστοιχο παρελθόντα χρόνο δευτερεύοντος ελαχίστου.

5.2.2.4 Συμπεράσματα

Στη παρούσα παράγραφο της εργασίας, μελετήθηκε το διάγραμμα O-C του μεταβλητού δι' εκλείψεων αστέρα FT Ori. Από την μορφή του O-C διαγράμματος που παρουσιάζει, υποθέσαμε ότι πρόκειται για διπλό εκλειπτικό σύστημα στο οποίο ο δευτερεύων αστέρας έχει έκκεντρη τροχιά.

Ο εν λόγω αστέρας παρατηρήθηκε φωτομετρικά και υπολογίστηκε ένας χρόνος φωτομετρικού ελαχίστου. Από την βιβλιογραφία συλλέξαμε και παλαιότερους χρόνους ελαχίστων και ανάλογα την μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή τους, τους δόθηκαν στατιστικά βάρη στην περαιτέρω ανάλυση.

Η ανάλυση του O-C διαγράμματος με την βοήθεια H/Y και εξειδικευμένου υπολογιστικού κώδικα, έδειξε ότι στο σύστημα λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της μετάθεσης της γραμμής των αψίδων με περίοδο περίπου 530 yrs και υπολογίστηκε η νέα αστρονομική εφημερίδα του συστήματος. Περισσότεροι χρόνοι ελαχίστων απαιτούνται στα επόμενα χρόνια, ώστε να είμαστε σε θέση να εξάγουμε με μεγαλύτερη ακρίβεια τις τιμές που υπολογίσαμε.

Στο διάγραμμα των O-C υπολοίπων βλέπουμε ότι δεν διαφαίνεται κάποια επιπλέον περιοδικότητα ή γενικά κάποια ιδιαίτερη κατανομή των σημείων, οπότε με ασφάλεια συμπεραίνουμε ότι η μετάθεση της γραμμής των αψίδων είναι το μοναδικό φυσικό φαινόμενο που λαμβάνει χώρα στο σύστημα και είναι η αιτία διαμόρφωσης του O-C διαγράμματος.

5.3 Συστήματα με πιθανή ύπαρξη τρίτου μέλους

Τα πολλαπλά συστήματα αστερών είναι ένα από τα πιο σύγχρονα ερευνητικά προβλήματα της αστροφυσικής. Στις περισσότερες περιπτώσεις τα επιπρόσθετα μέλη ενός διπλού συστήματος αστερών γίνονται αντιληπτά από την αλληλεπίδρασή τους με αυτό. Οι παλιρροιακές δυνάμεις που ασκεί ο τρίτος αστέρας στα μέλη του διπλού συστήματος, προκαλούν μεταβολές στην τροχιακή του περίοδο. Ο τρίτος αστέρας είναι συνήθως σε πολύ μεγαλύτερη απόσταση από την απόσταση των μελών του συστήματος και σπανίως γίνεται φωτομετρικά αντιληπτός.

Παρατηρησιακά, το τρίτο μέλος μπορεί να αφήσει το ίχνος του στα φάσματα του διπλού συστήματος και να ανιχνευθεί άμεσα, σε περιπτώσεις φυσικά που η λαμπρότητά του είναι άμεσα συγκρίσιμη με τη λαμπρότητα του διπλού συστήματος. Το πρόβλημα με την ανίχνευση αμυδρών επιπρόσθετων μελών μέσω φασμάτων, είναι ότι λόγω της μεγάλης απόστασής τους από το διπλό σύστημα, παρουσιάζουν μεγάλη περίοδο περιφοράς, οπότε απαιτούνται φασματοσκοπικές παρατηρήσεις που να καλύπτουν αρκετά μεγάλο χρονικό εύρος, της τάξης των δεκαετιών, κάτι που είναι πολύ δύσκολο να πραγματοποιηθεί αφού οι φασματοσκοπικές παρατηρήσεις απαιτούν μεγάλα τηλεσκόπια. Συνδυάζοντας όλα τα φάσματα, τότε μπορούμε να ανιχνεύσουμε την κίνηση των φασματικών γραμμών του διπλού συστήματος γύρω από κάποιο σημείο αναφοράς, και έτσι να υπολογίσουμε την περίοδο αυτής της κίνησης, που προφανώς ταυτίζεται με αυτήν του τρίτου σώματος γύρω από κάποιο κοινό κέντρο μάζας

Από φωτομετρικές παρατηρήσεις η άμεση ανίχνευση ενός τρίτου μέλους στο διπλό σύστημα είναι αρκετά πιο δύσκολη, καθώς είναι ελάχιστες οι περιπτώσεις όπου ο τρίτος αστέρας διακρίνεται από το διπλό σύστημα. Παρ' όλα αυτά, αν επιλύσουμε το μοντέλο του διπλού συστήματος και αν ο τρίτος αστέρας έχει συγκρίσιμη λαμπρότητα με αυτήν του διπλού, τότε μπορεί να ανιχνευτεί άμεσα η ύπαρξη του, καθώς ο κώδικας Wilson & Devinney έχει την δυνατότητα να ανιχνεύσει και τρίτη συνιστώσα στην ολική λαμπρότητα. Σε αυτή τη περίπτωση όμως, δεν παίρνουμε καμία πληροφορία σχετικά με την περίοδο του τρίτου σώματος.

Τέλος, μία έμμεση ανίχνευση ενός επιπρόσθετου μέλους ή και παραπάνω στο διπλό σύστημα γίνεται με την ανάλυση του O-C διαγράμματος. Αυτή η μέθοδος εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι υπάρχει πληθώρα δεδομένων, αφού αυτά αφορούν μόνο τα ελάχιστα της λαμπρότητας του συστήματος τα οποία μπορούν να παρατηρηθούν με διάφορα όργανα και κυρίως με μικρά τηλεσκόπια. Εδώ πρέπει να τονίσουμε την προσφορά των ερασιτεχνών αστρονόμων οι οποίοι έχουν εμπλουτίσει τη βιβλιογραφία με αρκετούς χρόνους ελαχίστων από διάφορα λαμπρά διπλά συστήματα. Το τρίτο μέλος προκαλεί όπως είπαμε μεταβολές στην τροχιακή περίοδο του συστήματος και μάλιστα περιοδικές. Το LITE (§4.4) έχει συνδεθεί άρρηκτα με περιοδικές μεταβολές της περιόδου των διπλών συστημάτων και γίνεται αντιληπτό από την ημιτονοειδή κατανομή των χρόνων ελαχίστων στο O-C διάγραμμα. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι υπολογίζεται η περίοδος αυτής της ημιτονοειδούς κατανομής, η οποία και αντιστοιχεί στην περίοδο περιφοράς του τρίτου σώματος γύρω από το βαρύκεντρο του τριπλού πλέον συστήματος. Από το πλάτος της κατανομής και χρησιμοποιώντας τις τιμές των μαζών (όπου υπάρχουν) των αστερών του διπλού συστήματος υπολογίζουμε τη συνάρτηση μάζας του συστήματος και την ελάχιστη μάζα του τρίτου σώματος

(το τροχιακό του επίπεδο ταυτίζεται με το τροχιακό επίπεδο του διπλού συστήματος) και εν συνεχεία, υποθέτοντας ότι ο τρίτος αστέρας βρίσκεται στην κυρία ακολουθία, υπολογίζουμε από τις εξισώσεις που περιγράφονται στην §4.5 τον φασματικό του τύπο και το βολομετρικό φαινόμενο μέγεθός του. Συνοψίζοντας, αυτή η μέθοδος ανεύρεσης επιπρόσθετων μελών σε ένα διπλό εκλειπτικό σύστημα αστέρων, αν και υπολογίζει έμμεσα τις παραμέτρους του, τις δίνει με αρκετά μεγάλη ακρίβεια, και πρόκειται ίσως για την πιο πρακτική σε περιπτώσεις όπου ο επιπρόσθετος συνοδός είναι σχετικά αμυδρός.

Στην παρούσα παράγραφο έχουν επιλεγθεί δύο διπλά συστήματα αστέρων τα οποία παρουσιάζουν περιοδικές μεταβολές στο O-C διάγραμμά τους. Από την ανάλυση του O-C διαγράμματος θα προκύψουν νέα φωτομετρικά στοιχεία για τους αστέρες καθώς και οι φυσικές και τροχιακές παράμετροι του πιθανού τρίτου σώματος.

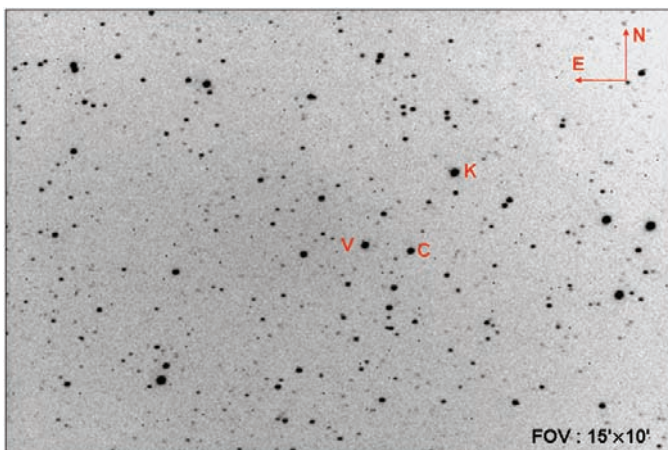
5.3.1 Το σύστημα UZ Sge

5.3.1.1 Ιστορικά στοιχεία

Ο αστέρας UZ Sge (= AN 435.1936 = GSC 1626-1289, $\alpha_{2000} = 20^{\text{h}}12^{\text{m}}16.21^{\text{s}}$, $\delta_{2000} = +19^{\circ}20'55.5''$) ανακαλύφθηκε ως μεταβλητός από τους Guthnick και Schneller (1939). Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των φωτομετρικών παραλλάξεων οι Baniewicz & Dworak (1980) υπολόγισαν τις απόλυτες παραμέτρους του συστήματος και τον φασματικό του τύπο σαν A0. Οι πρώτες φασματοσκοπικές παρατηρήσεις πραγματοποιήθηκαν από τον Halbedel (1984) ο οποίος και προσδιόρισε τον φασματικό τύπο του αστέρα σαν A0. Έκτοτε, δεν έχουν πραγματοποιηθεί περαιτέρω φασματοσκοπικές και φωτομετρικές αναλύσεις, εκτός από παρατηρήσεις χρόνων ελαχίστων.

5.3.1.2 Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι παρατηρήσεις του συστήματος διεξήχθησαν στις 11/7/2007, 31/7/2007 και 1/8/2007 στο Γεροσταθοπούλειο Πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (κεφ.2) χρησιμοποιώντας το φωτομετρικό φίλτρο R με χρόνο έκθεσης 60 sec. Στο παρακάτω σχήμα παρατίθεται το πεδίο του αστέρα UZ Sge (V), όπου δίνονται η φορά του, οι διαστάσεις του και οι αστέρες σύγκρισης (C) και ελέγχου (K) που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία.

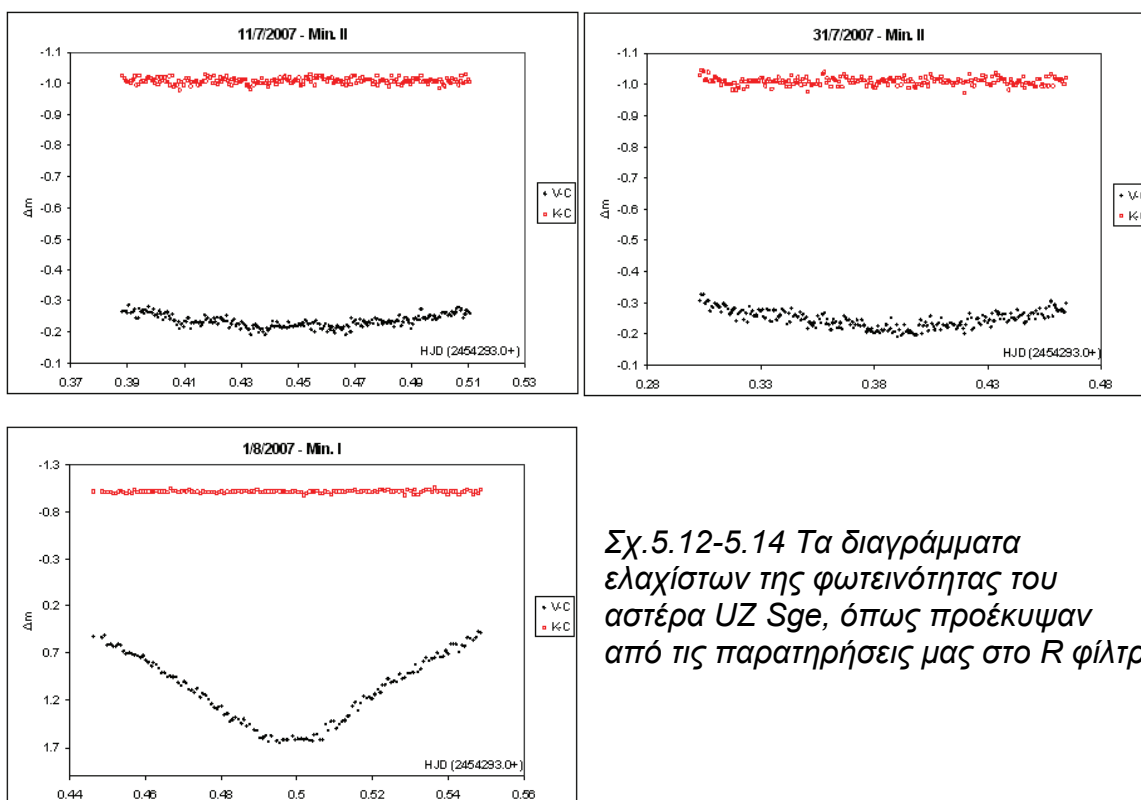


Σχ.5.12. Το πεδίο του αστέρα UZ Sge, και οι αστέρες σύγκρισης και ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν στις παρατηρήσεις μας.

Στο πρόγραμμα AIP4WIN χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των ακτίνων των διαφραγμάτων 4, 4.5 και 5 αντίστοιχα (§3.1).

Πίνακας 5.11 Οι αστέρες σύγκρισης (C) και ελέγχου (K) που χρησιμοποιήθηκαν στην φωτομετρία

| Αστέρας | Mag | Χρήση στη φωτομετρία |
|---------------|-----------|----------------------|
| UZ Sge | 11.4 / 13 | V |
| GSC 1626:1303 | 11.9 | C |
| GSC 1626:1845 | 10.8 | K |



Σχ.5.12-5.14 Τα διαγράμματα ελαχίστων της φωτεινότητας του αστέρα UZ Sge, όπως προέκυψαν από τις παρατηρήσεις μας στο R φίλτρο.

Τέλος, στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζουμε τους χρόνους ελαχίστους που προέκυψαν από τις παρατηρήσεις μας με τη χρήση της μεθόδου Kwee & Van Woerden (§3.1).

Πίνακας 5.12 Οι χρόνοι ελαχίστου που προέκυψαν από τις παρατηρήσεις μας

| Minima (HJD) | Error | Type |
|---------------|---------|------|
| 2454293.45120 | 0.00023 | II |
| 2454313.39219 | 0.00021 | II |
| 2454314.49758 | 0.00013 | I |

5.3.1.3 Ανάλυση του O-C διαγράμματος

Για την κατασκευή του O-C διαγράμματος του αστέρα UZ Sge, χρησιμοποιήθηκε η εφημερίδα από τον Kreiner* η οποία είναι:

$$Min.I = HJD\ 2445861.4115 + 2.21574259 \times E$$

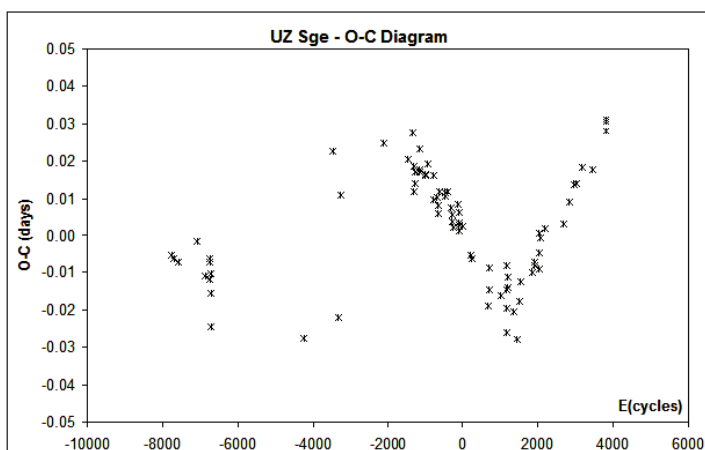
Οι χρόνοι παρελθόντων ελαχίστων που χρησιμοποιήθηκαν από τη βιβλιογραφία, αλλά και από τη βάση δεδομένων του Kreiner (προσωπική επικοινωνία), παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα, και βάσει της εφημερίδας του συστήματος βρέθηκαν οι αντίστοιχες O-C τιμές (§3.7). Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 81 χρόνοι ελαχίστων, εκ των οποίων οι 73 προέρχονται από οπτικές παρατηρήσεις, οι 4 προέκυψαν με φωτογραφικές μεθόδους και οι 4 από CCD παρατηρήσεις αντίστοιχα. Το χρονικό εύρος των παραπάνω παρατηρήσεων κυμαίνεται από το 1935 έως σήμερα.

Πίνακας 5.13 Οι χρόνοι ελαχίστου και οι O-C τιμές τους για το σύστημα UZ Sge

| To (HJD) | E (fixed) | O-C (days) | To (HJD) | E (fixed) | O-C (days) | To (HJD) | E (fixed) | O-C (days) |
|---------------|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|
| 2428700.48000 | -7745.0 | -0.005 | 2443765.33800 | -946.0 | 0.019 | 2448440.51000 | 1164.0 | -0.026 |
| 2428811.26600 | -7695.0 | -0.006 | 2444115.41600 | -685.0 | 0.010 | 2448460.45800 | 1173.0 | -0.020 |
| 2429130.33200 | -7551.0 | -0.007 | 2444135.36400 | -667.0 | 0.006 | 2448460.46300 | 1173.0 | -0.015 |
| 2430169.52100 | -7082.0 | -0.001 | 2444343.63800 | -658.0 | 0.008 | 2448480.40800 | 1182.0 | -0.011 |
| 2430639.24900 | -6870.0 | -0.011 | 2444383.51700 | -621.0 | 0.012 | 2448500.34700 | 1191.0 | -0.014 |
| 2430938.37800 | -6735.0 | -0.007 | 2444403.46100 | -459.0 | 0.010 | 2448850.42800 | 1349.0 | -0.020 |
| 2430947.24200 | -6731.0 | -0.006 | 2444485.44700 | -459.0 | 0.011 | 2449078.64200 | 1452.0 | -0.028 |
| 2430967.17800 | -6722.0 | -0.012 | 2444844.39600 | -427.0 | 0.012 | 2449158.41900 | 1488.0 | -0.017 |
| 2430987.11600 | -6713.0 | -0.015 | 2444844.39700 | -315.0 | 0.007 | 2449220.46500 | 1516.0 | -0.012 |
| 2430989.32300 | -6712.0 | -0.024 | 2444915.30100 | -287.0 | 0.004 | 2449929.50500 | 1836.0 | -0.010 |
| 2430998.20000 | -6708.0 | -0.010 | 2445163.46000 | -287.0 | 0.006 | 2450040.29400 | 1886.0 | -0.008 |
| 2436453.34090 | -4246.0 | -0.028 | 2445225.49700 | -265.0 | 0.002 | 2450040.29500 | 1886.0 | -0.007 |
| 2438210.47490 | -3453.0 | 0.023 | 2445225.49900 | -148.0 | 0.008 | 2450319.47650 | 2012.0 | -0.009 |
| 2438560.51790 | -3295.0 | -0.022 | 2445274.24200 | -116.0 | 0.003 | 2450319.48100 | 2012.0 | -0.005 |
| 2438651.39590 | -3254.0 | 0.011 | 2445533.49000 | -102.0 | 0.001 | 2450319.48620 | 2012.0 | 0.001 |
| 2441188.43500 | -2109.0 | 0.025 | 2445604.38800 | -102.0 | 0.003 | 2450370.44300 | 2035.0 | -0.005 |
| 2442606.50600 | -1469.0 | 0.020 | 2445635.40700 | -98.0 | 0.006 | 2450379.31000 | 2039.0 | -0.001 |
| 2442874.61800 | -1348.0 | 0.028 | 2445635.40900 | 0.0 | 0.002 | 2450718.32100 | 2192.0 | 0.002 |
| 2442996.46800 | -1293.0 | 0.012 | 2445644.27500 | 195.0 | -0.005 | 2451746.42700 | 2656.0 | 0.003 |
| 2442996.47500 | -1293.0 | 0.019 | 2445861.41400 | 231.0 | -0.006 | 2452116.46190 | 2823.0 | 0.009 |
| 2443016.41200 | -1284.0 | 0.014 | 2446293.47600 | 663.0 | -0.019 | 2452404.51300 | 2953.0 | 0.014 |
| 2443016.41500 | -1284.0 | 0.017 | 2446373.24200 | 691.0 | -0.015 | 2452526.37900 | 3008.0 | 0.014 |
| 2443284.52600 | -1163.0 | 0.023 | 2447330.43000 | 691.0 | -0.009 | 2452856.52900 | 3157.0 | 0.018 |
| 2443304.46200 | -1154.0 | 0.017 | 2447392.47500 | 1020.0 | -0.016 | 2453463.64200 | 3431.0 | 0.018 |
| 2443335.48200 | -1140.0 | 0.017 | 2447392.48100 | -788.0 | 0.010 | 2454293.45120 | 3805.5 | 0.031 |
| 2443663.41100 | -992.0 | 0.016 | 2448121.45300 | -779.0 | 0.016 | 2454313.39219 | 3814.5 | 0.031 |
| 2443674.49000 | -987.0 | 0.016 | 2448429.44900 | 1159.0 | -0.008 | 2454314.49758 | 3815.0 | 0.028 |

*<http://www.as.ap.krakow.pl/o-c/data/getdata.php3?UZ%20sge>

Βάσει του παραπάνω πίνακα και της αστρονομικής εφημερίδας του αστέρα προκύπτει το O-C διάγραμμά του.



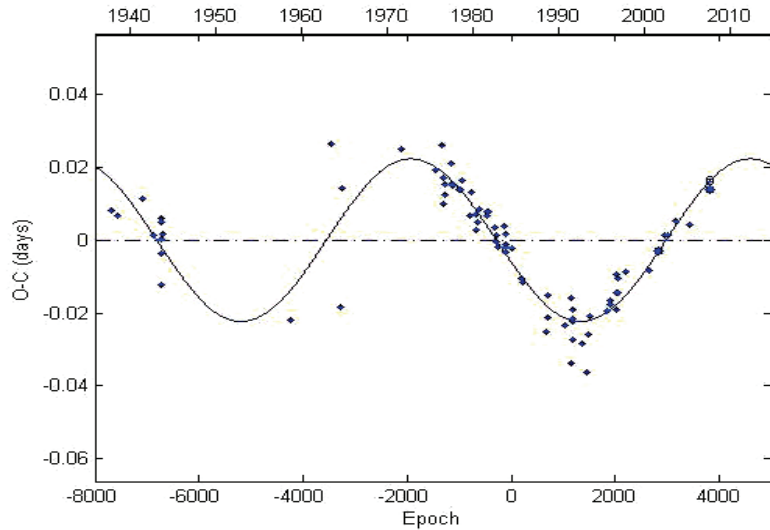
Σχ.5.15 Το O-C διάγραμμα του αστέρα UZ Sge.

Οι χρόνοι ελαχίστων που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτοί του πίνακα 5.13. Σε κάθε χρόνο ελαχίστου τίθεται στατιστικό βάρος, ανάλογα με την μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή του (§5.1). Οι τελικές τροχιακές και φωτομετρικές παράμετροι του συστήματος καθώς και τα σφάλματά τους προκύπτουν χρησιμοποιώντας το λογισμικό Matlab. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε σε αυτό το λογισμικό έχει το όνομα *LITE & Mass transfer* (Zasche 2007) και εμπεριέχει όλες τις εξισώσεις του LITE (§4.4).

Πίνακας 5.14 Οι αρχικές παράμετροι που χρησιμοποιήσαμε για τον αστέρα UZ Sge στον κώδικα LITE

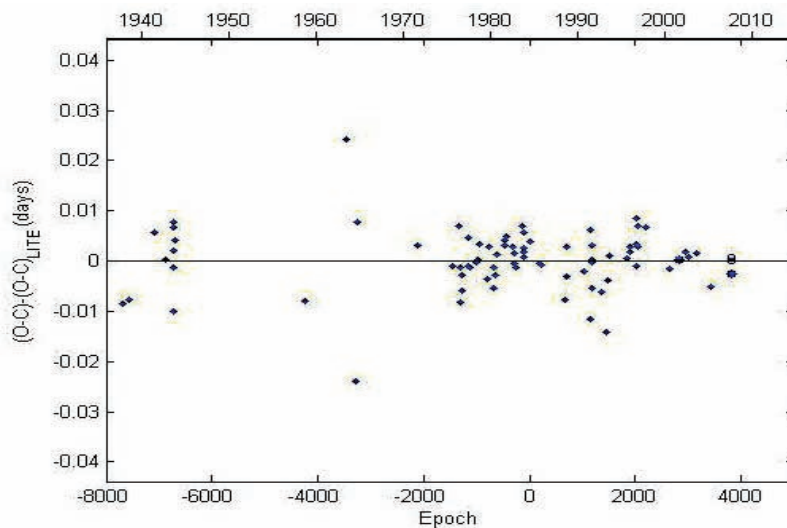
| | | | |
|-----------------------|--------------|-----------------------------|------|
| JD ₀ (HJD) | 2445861.4115 | A (days) | 0.02 |
| P (days) | 2.21574259 | Ω (deg) | 60.0 |
| P ₃ (days) | 15000.0 | e | 0.1 |
| T ₀ (HJD) | 2425000.0 | c ₂ (days/cycle) | 0.0 |

Όπου JD₀ και P είναι ο χρόνος (αρχικού) πρωτεύοντος ελαχίστου και η περίοδος του διπλού συστήματος αντίστοιχα, P₃ είναι η περίοδος του τρίτου σώματος, η ύπαρξη του οποίου υποδηλώνεται από την ημιτονοειδή συμπεριφορά του O-C διαγράμματος, T₀ μία τιμή HJD όπου θεωρούμε ότι ξεκινάει η ημιτονοειδής καμπύλη του O-C, δηλαδή η στιγμή όπου το τρίτο σώμα περνά από το περίαστρο της τροχιάς του, A το πλάτος του ημιτονοειδούς O-C, Ω το μήκος του περιάστρου της τροχιάς του τρίτου σώματος, e η εκκεντρότητα της τροχιάς του τρίτου σώματος και c₂ ο ρυθμός μεταβολής της περιόδου ανά τροχιακό κύκλο.



Σχ.5.16 Το O-C διάγραμμα του αστέρα UZ Sge στο οποίο έχει προσαρμοστεί η θεωρητική καμπύλη (μπλε συνεχής γραμμή) διαμέσου των πειραματικών σημείων. Όσο μεγαλύτερο το σύμβολο του κάθε σημείου τόσο μεγαλύτερο και το στατιστικό βάρος που χρησιμοποιήθηκε. Στον άνω οριζόντιο άξονα αναγράφεται η χρονολογία, στον κάτω οριζόντιο άξονα ο αριθμός των περιφορών και στον κατακόρυφο αναγράφονται οι O-C τιμές εκφρασμένες σε days.

Εν συνεχεία, το πρόγραμμα εξάγει το διάγραμμα των O-C υπολοίπων (§5.1).



Σχ.5.17 Το διάγραμμα των O-C υπολοίπων του UZ Sge. Οι άξονες και τα σημεία αναπαριστούν τα ίδια μεγέθη όπως και στο προηγούμενο σχήμα (βλ. λεζάντα).

Πίνακας 5.15 Οι τιμές των τροχιακών παραμέτρων του τρίτου σώματος που προέκυψαν με την χρήση του κώδικα LITE

| Parameter | Value | error |
|---------------------------|---------|---------|
| P_3 (days) | 14465 | 217 |
| P_3 (years) | 39.6 | 0.6 |
| T_0 (HJD) | 2448084 | 913 |
| A (days) | 0.022 | 0.001 |
| Ω (deg) | 252 | 24 |
| e | 0.27 | 0.06 |
| $f(m_3)$ | 0.03654 | 0.00002 |
| $M_{3, \min} (M_{\odot})$ | 0.69550 | 0.00004 |
| χ^2 | 0.0088 | - |

Για να εξάγει ο κώδικας την ελάχιστη μάζα του τρίτου σώματος ($i'=90^\circ$) χρησιμοποιήσαμε τις τιμές $M_1=2.89 M_{\odot}$ και $M_2=1.97 M_{\odot}$ (Brancewicz & Dworak 1980) για τις μάζες των μελών του διπλού συστήματος αντίστοιχα, ενώ η νέα αστρονομική εφημερίδα του διπλού συστήματος υπολογίστηκε ίση με:

$$Min.I = HJD 2445861.41634(175) + 2.21574259(6) \times E$$

5.3.1.4 Συμπεράσματα

Βάσει των σχέσεων 4.42 – 4.46 και υποθέτοντας ότι ο επιπρόσθετος συνοδός ανήκει στην Κύρια Ακολουθία μπορούμε να υπολογίσουμε τις φυσικές του παραμέτρους, οι οποίες και δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.16 Οι τιμές των φυσικών παραμέτρων του τρίτου σώματος

| Parameter | Value | Parameter | Value |
|-----------------|-------|-----------------|-------|
| $M (M_{\odot})$ | 0.7 | $R (R_{\odot})$ | 0.74 |
| T (K) | 4546 | M (mag) | 7.0 |
| $L (L_{\odot})$ | 0.212 | Sp. Type | K4 |

Εντελώς αντίστοιχα βρίσκουμε για τους αστέρες του διπλού συστήματος $L_1=41.03 L_{\odot}$ και $L_2=10.73 L_{\odot}$. Από τη σχέση 4.47 βρίσκουμε ότι το τρίτο σώμα συνεισφέρει μόνο κατά 0.55% στην ολική λαμπρότητα του τριπλού συστήματος. Οι θεωρητικές τιμές των απολύτων μεγεθών για τους αστέρες του συστήματος, βασιζόμενοι στη σχέση 4.46, είναι $M_1=0.67$ mag και $M_2=2.12$ mag, οπότε προκύπτει ότι ο «αόρατος» συνοδός είναι περίπου πέντε μεγέθη αμυδρότερος από τον πιο αμυδρό αστέρα του συστήματος, και ως εκ τούτου είναι σχεδόν αδύνατον να ανιχνευθεί. Δυστυχώς, δεν έχει υπολογιστεί έως τώρα η απόσταση του συστήματος από τον ήλιο και ως εκ τούτου δεν είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε την γωνιακή απόσταση του τρίτου σώματος από το σύστημα.

Στην παρούσα παράγραφο της εργασίας, μελετήθηκε το διάγραμμα O-C του μεταβλητού δι' εκλείψεων αστέρα UZ Sge. Από την ημιτονοειδή μορφή του O-C

διαγράμματος που παρουσιάζει, υποθέσαμε ότι πρόκειται για διπλό εκλειπτικό σύστημα στο οποίο υπάρχει και τρίτο μέλος.

Ο εν λόγω αστέρα παρατηρήθηκε φωτομετρικά και υπολογίστηκαν τρεις χρόνοι φωτομετρικών ελαχίστων. Από τη βιβλιογραφία συλλέξαμε και παλαιότερους χρόνους ελαχίστων και κατασκευάστηκε το διάγραμμα O-C του συστήματος.

Η ανάλυση του O-C διαγράμματος με τη βοήθεια H/Y και εξειδικευμένου υπολογιστικού κώδικα, έδειξε ότι στο σύστημα λαμβάνει χώρα το LITE και υπολογίστηκαν οι τροχιακές και φυσικές παράμετροι του τρίτου σώματος, βασιζόμενοι στο ότι ανήκει στην Κύρια Ακολουθία. Το διάγραμμα των O-C υπολοίπων δεν παρουσιάζει καμία απολύτως ιδιαίτερη κατανομή, οπότε με βεβαιότητα εξάγεται το συμπέρασμα ότι το LITE είναι το μοναδικό φαινόμενο το οποίο και διαμορφώνει το O-C διάγραμμα του αστέρα. Η σύγκριση της φωτεινότητας του τρίτου μέλους με τις φωτεινότητες των μελών του διπλού συστήματος έδειξε ότι συμμετέχει ελάχιστα στην ολική λαμπρότητα του συστήματος, οπότε είναι σχεδόν αδύνατο να παρατηρηθεί φωτομετρικά ή φασματοσκοπικά.

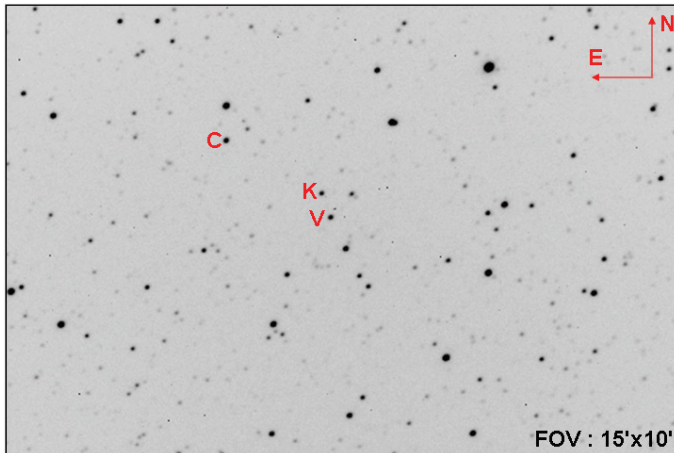
5.3.2 Το σύστημα *PY Lyr*

5.3.2.1 Ιστορικά στοιχεία

Το σύστημα *PY Lyr* (= GSC 02136-03365, $\alpha_{2000} = 19^{\text{h}}20^{\text{m}}25.9^{\text{s}}$, $\delta_{2000} = +28^{\circ}56'44.0''$) έχει φαινόμενο μέγεθος ~ 12 mag στο B φίλτρο και περίοδο ~ 0.39 days. Ανακαλύφθηκε ως μεταβλητός από τον Wachmann (1961) και ταξινομήθηκε ως τύπου W UMa από τους Kholopov et al. (1985). Οι Pribulla et al. (2003) συμπεριέλαβαν το σύστημα στον κατάλογο τους με τα 361 γαλαξιακά συστήματα σε επαφή με την σημείωση ότι παρουσιάζει μεταβολές στην τροχιακή του περίοδο. Οι Demircan et al. (2003) παρατήρησαν το σύστημα φωτομετρικά αλλά δεν έκαναν την ανάλυση της καμπύλης φωτός του. Οι Manimanis, Niarchos, Gazeas (2004) διεξήγαγαν CCD παρατηρήσεις του συστήματος οι οποίες κάλυπταν όλη την φάση του και εξήγαγαν το φωτομετρικό μοντέλο του συστήματος, όμως δεν έλαβαν υπ' όψη τους την συνεισφορά ενός τρίτου φωτός στην επίλυση του. Έως τώρα δεν υπάρχουν φασματοσκοπικές παρατηρήσεις ακτινικών ταχυτήτων του συστήματος ούτε επίσης ανάλυση της τροχιακών μεταβολών του. Τέλος, οι Malkov et al. (2006) εκτίμησαν το φασματικό τύπο του συστήματος ως F0.

5.3.2.2 Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι παρατηρήσεις του συστήματος διεξήχθησαν στις 7/4/2008 και στις 5/5/2008 στο Γεροσταθοπούλειο Πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (κεφ.2) χρησιμοποιώντας το φωτομετρικό φίλτρο R με χρόνο έκθεσης 80 sec. Στο παρακάτω σχήμα παρατίθεται το πεδίο του αστέρα *PY Lyr* (V), όπου δίνονται η φορά του, οι διαστάσεις του και οι αστέρες συγκρίσεως (C) και ελέγχου (K) που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία.

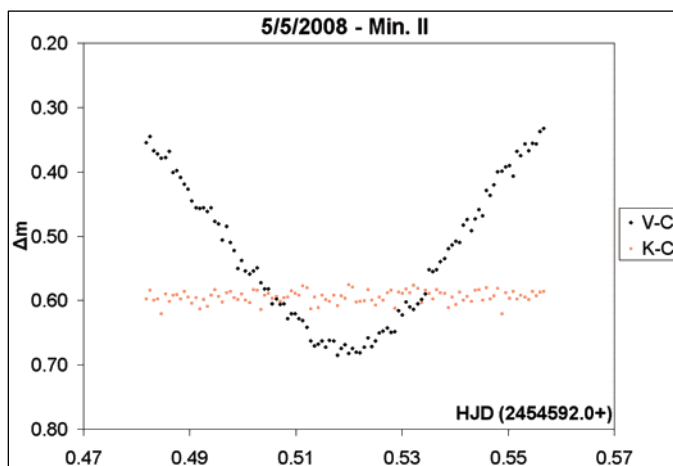
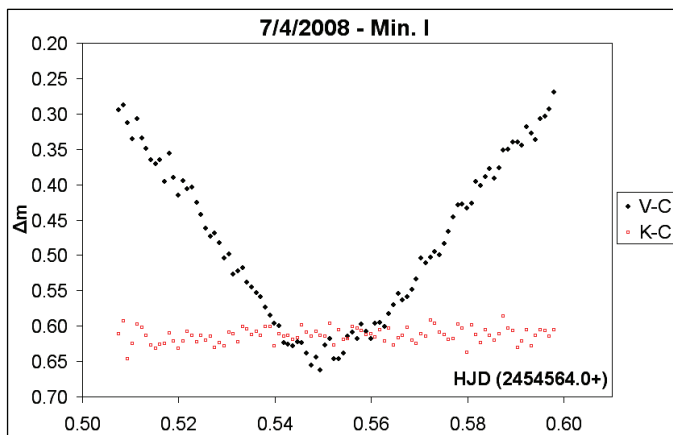


Σχ.5.18. Το πεδίο του αστέρα PY Lyr, και οι αστέρες σύγκρισης και ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν στις παρατηρήσεις μας.

Στο πρόγραμμα AIP4WIN χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των ακτίνων των διαφραγμάτων 3.5, 5.5 και 7.5 αντίστοιχα (§3.1).

Πίνακας 5.17 Οι αστέρες σύγκρισης (C) και ελέγχου (K) που χρησιμοποιήθηκαν στην φωτομετρία

| Αστέρας | Mag | Χρήση στη φωτομετρία |
|----------------|-------------|----------------------|
| PY Lyr | 12.5 / 13.5 | V |
| GSC 2136 :1107 | 13.1 | C |
| GSC 2136 :3105 | 13.5 | K |



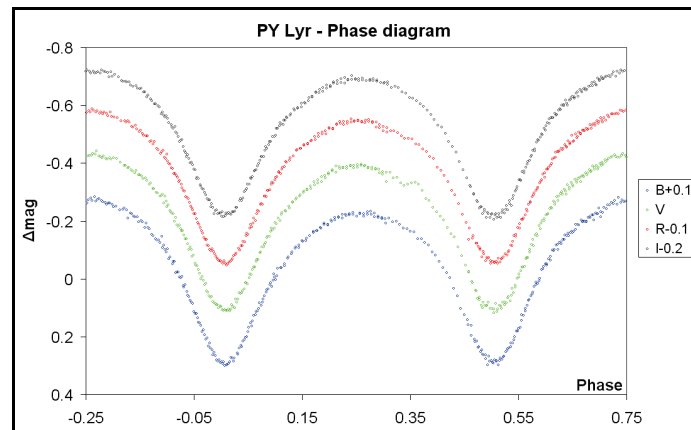
Σχ.5.19 & 5.20 Τα διαγράμματα ελαχίστων της φωτεινότητας του αστέρα PY Lyr, όπως προέκυψε από τις παρατηρήσεις μας στο R φίλτρο.

Τέλος, στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζουμε τους χρόνους ελαχίστων που προέκυψαν από τις παρατηρήσεις μας με τη χρήση της μεθόδου Kwee & Van Woerden (§3.1).

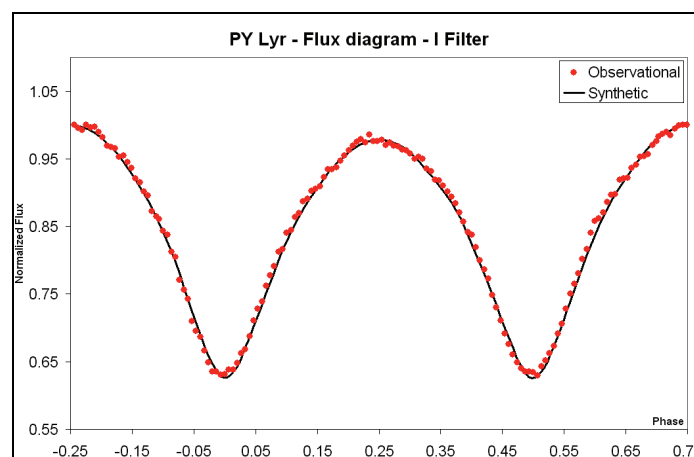
Πίνακας 5.18 Οι χρόνοι ελαχίστων που προέκυψαν από τις παρατηρήσεις μας

| Minima (HJD) | Error | Type |
|---------------|---------|------|
| 2454564.55117 | 0.00021 | I |
| 2454592.51913 | 0.00017 | II |

Το σύστημα είχε παρατηρηθεί, όπως αναφέρεται και στα ιστορικά του στοιχεία, από τους Manimanis & Niarchos στον Αστρονομικό σταθμό του Κρυονερίου τον Ιούλιο του 2004. Ύστερα από προσωπική επικοινωνία με τον Β. Μανιμάνη, μας δόθηκαν τα παρατηρησιακά δεδομένα έτσι ώστε να κατασκευάσουμε το φωτομετρικό μοντέλο του συστήματος, λαμβάνοντας όμως υπ' όψη και τη συνεισφορά του τρίτου φωτός στην ολική λαμπρότητα του συστήματος. Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα φάσης (§3.5) και ροής (§3.6) του συστήματος.



Σχ.5.21 Το διάγραμμα φάσης του συστήματος PY Lyr, όπως προέκυψε από την επεξεργασία των παρατηρήσεων των Manimanis & Niarchos (2004).



Σχ.5.22 Το διάγραμμα ροής στο I φίλτρο του συστήματος PY Lyr. Τα πορτοκαλί σημεία αντιστοιχούν στα παρατηρησιακά δεδομένα, ενώ η μαύρη συνεχής γραμμή είναι η θεωρητική καμπύλη. Φαίνεται πολύ καθαρά η διαφορά φωτεινότητας των μεγίστων της καμπύλης, ένδειξη της ύπαρξης ψυχρής κηλίδας σε έναν από τους αστέρες του συστήματος.

Η ανάλυση του συστήματος για την κατασκευή του φωτομετρικού μοντέλου έγινε με το λογισμικό PHOEBE 0.29d (Prša & Zwitter 2005) το οποίο χρησιμοποιεί την έκδοση του κώδικα των Wilson & Devinney (2003). Για κάθε φωτομετρικό φίλτρο εφαρμόστηκε η επιλογή «*Overcontact binary of W UMa type not in thermal contact*» η οποία και προφανώς αφορά συστήματα τύπου W UMa τα οποία βρίσκονται σε επαφή, αλλά όχι ακόμα σε θερμική ισορροπία. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία του προγράμματος δίνονται στο παράρτημα Β της παρούσας εργασίας.

Ως αρχικές παραμέτρους δώσαμε αυτές που προέκυψαν από την ανάλυση των Manimakis et al. (2004), εκτός από αυτήν που αφορούσε το επιπρόσθετο φως λόγω του τρίτου σώματος και τις λαμπρότητες των αστερών του διπλού συστήματος. Η προαναφερόμενη εργασία παρουσίαζε δύο λύσεις οι οποίες βασίζονταν σε διαφορετικό λόγο μαζών του συστήματος, αφού δεν υπάρχει έως τώρα φασματοσκοπική τιμή του. Επιλέξαμε σαν αρχικό λόγο μαζών αυτόν που δίνεται για λόγο μαζών $q < 1$ καθώς θεωρήσαμε ότι είναι πιο «λογικός» για τέτοιου είδους συστήματα. Σαφώς, και η άλλη λύση με $q > 1$ δίνει και πάλι αποδεκτή λύση, αλλά στην παρούσα φάση δεν μας ενδιαφέρει και τόσο ο λόγος μαζών για την εύρεση του τρίτου φωτός.

Το πρόγραμμα ύστερα από αρκετές επαναλήψεις συνέκλινε σε αποδεκτή από φυσικής σημασίας λύση και οι παράμετροι των μελών του συστήματος παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

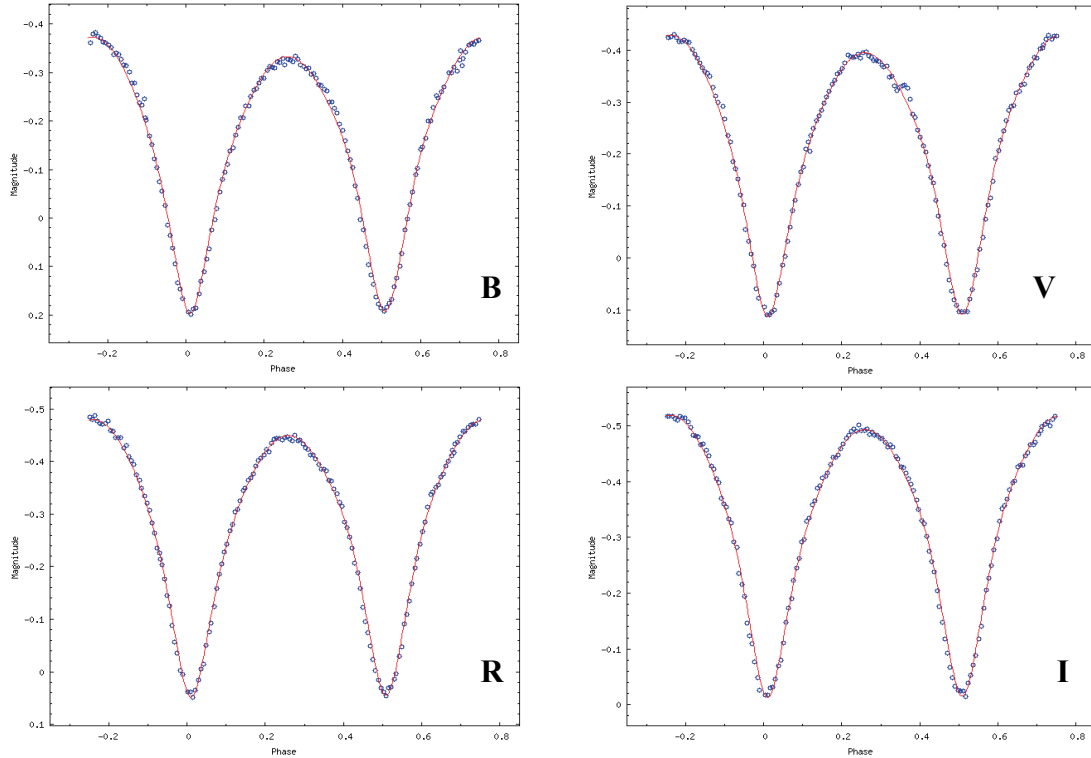
Πίνακας 5.19 Οι τιμές των φυσικών παραμέτρων του συστήματος PY Lyr, που προέρχονται από το φωτομετρικό μοντέλο του

| Parameter / filter | B | V | R | I |
|----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| q | 0.660 (5) | 0.660 (5) | 0.660 (5) | 0.660 (5) |
| i (deg) | 80.4 (2) | 80.4 (2) | 80.4 (2) | 80.4 (2) |
| T ₁ (K)* | 6980 | 6980 | 6980 | 6980 |
| T ₂ (K) | 7042 (8) | 7042 (8) | 7042 (8) | 7042 (8) |
| g ₁ =g ₂ * | 0.32 | 0.32 | 0.32 | 0.32 |
| A ₁ =A ₂ * | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| Ω ₁ =Ω ₂ * | 3.018 | 3.018 | 3.018 | 3.018 |
| x ₁ | 0.607 | 0.498 | 0.417 | 0.339 |
| x ₂ | 0.603 | 0.495 | 0.414 | 0.335 |
| L ₁ | 2.84 (1) | 2.98 (1) | 3.13 (1) | 3.21 (1) |
| L ₂ | 2.069 | 2.154 | 2.252 | 2.300 |
| L ₃ | 1.13(2) | 1.12 (2) | 1.32 (2) | 1.46 (2) |
| L₃ (%) | 18.7 (3) | 19.5 (3) | 19.7 (3) | 20.9 (3) |
| Spot | | | | |
| Latitude (deg) | 71.89 | 71.89 | 71.89 | 71.89 |
| Longitude (deg) | 278.34 | 278.34 | 278.34 | 278.34 |
| Radius (deg) | 18.63 | 18.63 | 18.63 | 18.63 |
| Temperature factor | 0.80 | 0.80 | 0.80 | 0.80 |
| x ² | 0.0085 | 0.0085 | 0.0085 | 0.0085 |

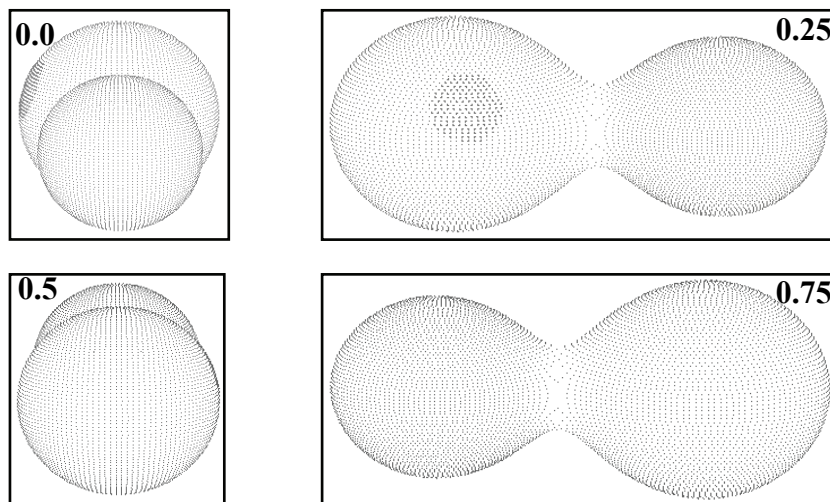
*assumed

Οι τιμές που σημειώνονται με αστερίσκο, πάρθηκαν είτε από τη βιβλιογραφία είτε προέκυψαν από την θεωρία των διπλών συστημάτων. Στο σύστημα λαμβάνει χώρα το φαινόμενο O'Connell (μαγνητική δραστηριότητα) κάτι που λήφθηκε υπ' όψη στη κατασκευή του μοντέλου με την εφαρμογή μίας κηλίδας στον ένα εκ των δύο αστερών του συστήματος.

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι θεωρητικές καμπύλες διαμέσου των παρατηρησιακών σημείων και η τρισδιάστατη μορφή του διπλού συστήματος σε διάφορες τιμές της φάσης του.



Σχ. 5.23-5.26 Οι θεωρητικές καμπύλες (κόκκινες γραμμές) διαμέσου των παρατηρησιακών σημείων (μπλε σημεία) στα φίλτρα B, V, R, I.



Σχ. 5.27-5.30 Το τρισδιάστατο μοντέλο του συστήματος PY Lyr στις διάφορες τροχιακές φάσεις του.

5.3.2.3 Ανάλυση του O-C διαγράμματος

Για την κατασκευή του O-C διαγράμματος του αστέρα PY Lyr, χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω εφημερίδα:

$$Min.I = HJD 2451663.561 + 0.3857644 \times E$$

Οι χρόνοι παρελθόντων ελαχίστων που χρησιμοποιήθηκαν από τη βιβλιογραφία, αλλά και από τη βάση δεδομένων του Kreiner (προσωπική επικοινωνία), παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα, και βάσει της εφημερίδας του συστήματος βρέθηκαν οι αντίστοιχες O-C τιμές (§3.7). Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 106 χρόνοι ελαχίστων, εκ των οποίων οι 19 προέρχονται από οπτικές παρατηρήσεις, οι 39 προέκυψαν με φωτογραφικές μεθόδους και οι 48 από CCD παρατηρήσεις αντίστοιχα. Το χρονικό εύρος των παραπάνω παρατηρήσεων κυμαίνεται από το 1940 έως σήμερα.

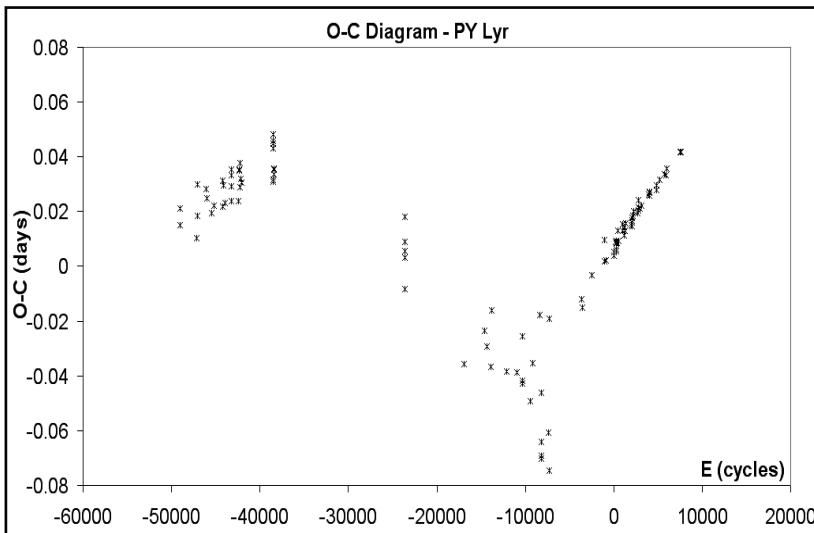
Πίνακας 5.20 Οι χρόνοι ελαχίστου και οι O-C τιμές τους για το σύστημα PY Lyr

| To (HJD) | E (fixed) | O-C (days) | To (HJD) | E (fixed) | O-C (days) | To (HJD) | E (fixed) | O-C (days) |
|---------------|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|
| 2432763.43500 | -48994.0 | 0.015 | 2442552.56900 | -23618.0 | -0.008 | 2451878.24827 | 556.5 | 0.009 |
| 2432765.37000 | -48989.0 | 0.021 | 2442561.46800 | -23595.0 | 0.018 | 2452050.49572 | 1003.0 | 0.013 |
| 2433487.51000 | -47117.0 | 0.010 | 2442571.48300 | -23569.0 | 0.003 | 2452052.42700 | 1008.0 | 0.015 |
| 2433504.49200 | -47073.0 | 0.019 | 2445119.41800 | -16964.0 | -0.036 | 2452135.36520 | 1223.0 | 0.014 |
| 2433506.43200 | -47068.0 | 0.030 | 2446033.30600 | -14595.0 | -0.024 | 2452135.55500 | 1223.5 | 0.011 |
| 2433893.35200 | -46065.0 | 0.028 | 2446148.64400 | -14296.0 | -0.029 | 2452140.37889 | 1236.0 | 0.013 |
| 2433927.29600 | -45977.0 | 0.025 | 2446298.50600 | -13907.5 | -0.037 | 2452197.28183 | 1383.5 | 0.016 |
| 2434134.44600 | -45440.0 | 0.019 | 2446348.29000 | -13778.5 | -0.016 | 2452415.43100 | 1949.0 | 0.015 |
| 2434237.44800 | -45173.0 | 0.022 | 2446976.48500 | -12150.0 | -0.039 | 2452469.43880 | 2089.0 | 0.016 |
| 2434600.45200 | -44232.0 | 0.022 | 2447439.40200 | -10950.0 | -0.039 | 2452470.40200 | 2091.5 | 0.015 |
| 2434622.45000 | -44175.0 | 0.031 | 2447675.48600 | -10338.0 | -0.043 | 2452476.38420 | 2107.0 | 0.018 |
| 2434637.49300 | -44136.0 | 0.030 | 2447675.50300 | -10338.0 | -0.026 | 2452477.34790 | 2109.5 | 0.017 |
| 2434707.31000 | -43955.0 | 0.023 | 2447686.48100 | -10309.5 | -0.042 | 2452505.51017 | 2182.5 | 0.018 |
| 2434980.43200 | -43247.0 | 0.024 | 2448039.44800 | -9394.5 | -0.049 | 2452521.52113 | 2224.0 | 0.020 |
| 2434980.43720 | -43247.0 | 0.029 | 2448119.50800 | -9187.0 | -0.035 | 2452695.69310 | 2675.5 | 0.019 |
| 2434982.37200 | -43242.0 | 0.035 | 2448446.46100 | -8339.5 | -0.018 | 2452721.54123 | 2742.5 | 0.021 |
| 2434987.38500 | -43229.0 | 0.033 | 2448506.41900 | -8184.0 | -0.046 | 2452725.59453 | 2753.0 | 0.024 |
| 2435309.48900 | -42394.0 | 0.024 | 2448803.44300 | -7414.0 | -0.061 | 2452741.98590 | 2795.5 | 0.021 |
| 2435319.53000 | -42368.0 | 0.035 | 2448840.51800 | -7318.0 | -0.019 | 2452809.49530 | 2970.5 | 0.021 |
| 2435336.50400 | -42324.0 | 0.035 | 2448862.45100 | -7261.0 | -0.075 | 2452863.31030 | 3110.0 | 0.022 |
| 2435360.41500 | -42262.0 | 0.029 | 2450245.47900 | -3676.0 | -0.012 | 2453186.39210 | 3947.5 | 0.026 |
| 2435374.31100 | -42226.0 | 0.038 | 2450285.40250 | -3572.5 | -0.015 | 2453203.36545 | 3991.5 | 0.026 |
| 2435399.38000 | -42161.0 | 0.032 | 2450713.42000 | -2463.0 | -0.003 | 2453203.55950 | 3992.0 | 0.027 |
| 2435428.31100 | -42086.0 | 0.031 | 2451274.51940 | -1008.5 | 0.002 | 2453204.33116 | 3994.0 | 0.027 |
| 2436809.36000 | -38506.0 | 0.043 | 2451274.91300 | -1007.5 | 0.010 | 2453204.52285 | 3994.5 | 0.026 |
| 2436810.50600 | -38503.0 | 0.032 | 2451331.41990 | -861.0 | 0.002 | 2453205.48868 | 3997.0 | 0.027 |
| 2436812.44800 | -38498.0 | 0.045 | 2451657.58550 | -15.5 | 0.004 | 2453517.37960 | 4805.5 | 0.028 |
| 2436815.53500 | -38490.0 | 0.046 | 2451684.39767 | 54.0 | 0.005 | 2453520.46750 | 4813.5 | 0.030 |
| 2436817.44900 | -38485.0 | 0.031 | 2451751.52416 | 228.0 | 0.009 | 2453653.36550 | 5158.0 | 0.032 |
| 2436819.39500 | -38480.0 | 0.048 | 2451758.46462 | 246.0 | 0.006 | 2453867.46684 | 5713.0 | 0.034 |
| 2436822.47600 | -38472.0 | 0.043 | 2451776.40560 | 292.5 | 0.009 | 2453934.39630 | 5886.5 | 0.033 |
| 2436846.38400 | -38410.0 | 0.034 | 2451777.36790 | 295.0 | 0.006 | 2453990.33450 | 6031.5 | 0.036 |
| 2536848.31500 | -38405.0 | 0.036 | 2451777.56280 | 295.5 | 0.008 | 2454564.55117 | 7520.0 | 0.042 |

Πίνακας 5.20 συν.

| | | | | | | | | |
|---------------|----------|-------|---------------|-------|-------|---------------|--------|-------|
| 2436849.47200 | -38402.0 | 0.035 | 2451783.35004 | 310.5 | 0.009 | 2454592.51913 | 7592.5 | 0.042 |
| 2442549.49700 | -23626.0 | 0.006 | 2451815.36807 | 393.5 | 0.009 | | | |
| 2442551.42900 | -23621.0 | 0.009 | 2451841.21850 | 460.5 | 0.013 | | | |

Βάσει του παραπάνω πίνακα και της αστρονομικής εφημερίδας του αστέρα προκύπτει το O-C διάγραμμά του.



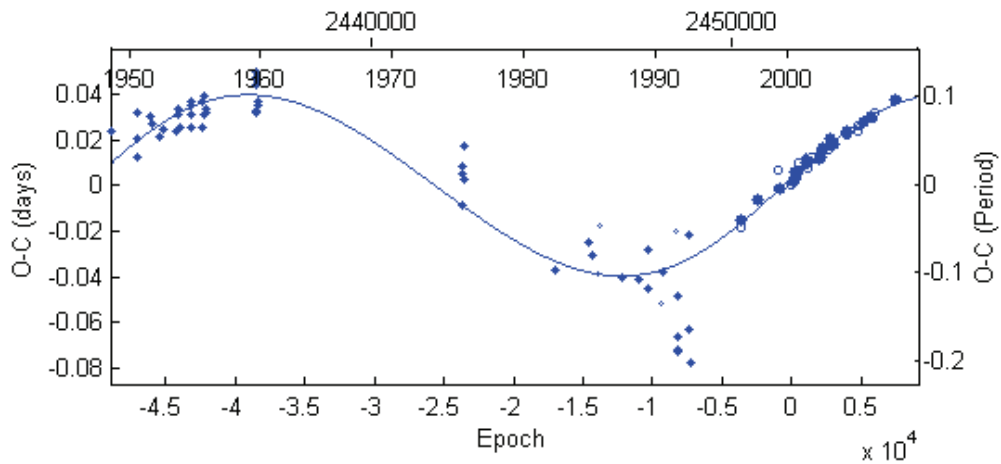
Σχ.5.31 Το O-C διάγραμμα του αστέρα PY Lyr.

Οι χρόνοι ελαχίστων που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτοί του πίνακα 5.20. Σε κάθε χρόνο ελαχίστου τίθεται στατιστικό βάρος, ανάλογα με την μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή του (§5.1). Οι τελικές τροχιακές και φωτομετρικές παράμετροι του συστήματος καθώς και τα σφάλματά τους προκύπτουν χρησιμοποιώντας το λογισμικό Matlab. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε σε αυτό το λογισμικό έχει το όνομα *LITE & Mass transfer* (Zasche 2007) και εμπεριέχει όλες τις εξισώσεις του LITE (§4.4).

Πίνακας 5.21 Οι αρχικές παράμετροι που χρησιμοποιήσαμε για τον αστέρα PY Lyr στον κώδικα LITE

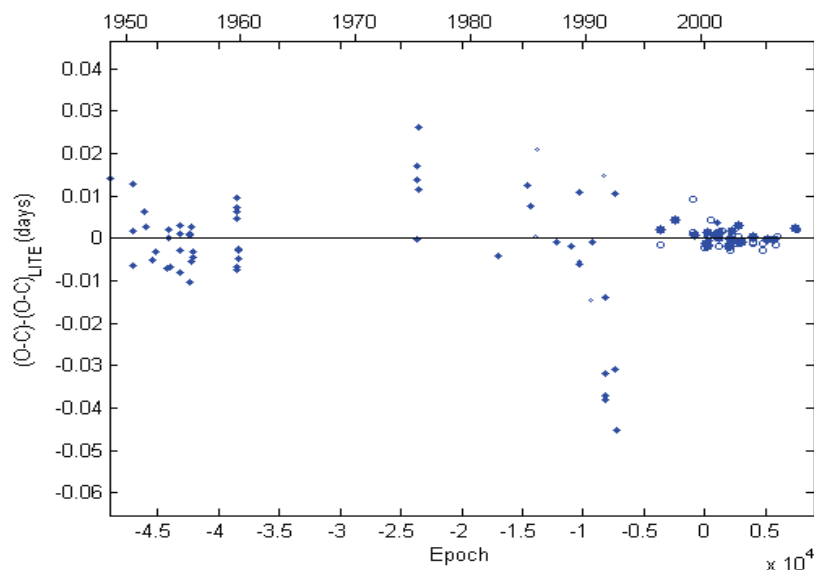
| | | | |
|-----------------------|-------------|-----------------------------|-------|
| JD ₀ (HJD) | 2451663.561 | A (days) | 0.035 |
| P (days) | 0.3857644 | Ω (deg) | 0.0 |
| P ₃ (days) | 18000.0 | e | 0.1 |
| T ₀ (HJD) | 2430000.0 | c ₂ (days/cycle) | 0.0 |

Όπου JD₀ και P είναι ο χρόνος (αρχικού) πρωτεύοντος ελαχίστου και η περίοδος του διπλού συστήματος αντίστοιχα, P₃ είναι η περίοδος του τρίτου σώματος, η ύπαρξη του οποίου υποδηλώνεται από την ημιτονοειδή συμπεριφορά του O-C διαγράμματος, T₀ μία τιμή HJD όπου θεωρούμε ότι ξεκινάει η ημιτονοειδής καμπύλη του O-C, δηλαδή η στιγμή όπου το τρίτο σώμα περνά από το περίαστρο της τροχιάς του, A το πλάτος του ημιτονοειδούς O-C, Ω το μήκος του περιάστρου της τροχιάς του τρίτου σώματος, e η εκκεντρότητα της τροχιάς του τρίτου σώματος και c₂ ο ρυθμός μεταβολής της περιόδου ανά τροχιακό κύκλο.



Σχ.5.32 Το O-C διάγραμμα του αστέρα PY Lyr στο οποίο έχει προσαρμοστεί η θεωρητική καμπύλη (μπλε συνεχής γραμμή) διαμέσου των πειραματικών σημείων. Όσο μεγαλύτερο το σύμβολο του κάθε σημείου τόσο μεγαλύτερο και το στατιστικό βάρος που χρησιμοποιήθηκε. Στον άνω οριζόντιο άξονα αναγράφεται η χρονολογία, στον κάτω οριζόντιο άξονα ο αριθμός των περιφορών και στον αριστερό κατακόρυφο άξονα αναγράφονται οι O-C τιμές εκφρασμένες σε days, ενώ στον δεξιό κατακόρυφο οι O-C τιμές εκφρασμένες σε υποπολλαπλάσια της περιόδου.

Εν συνεχεία, το πρόγραμμα εξάγει το διάγραμμα των O-C υπολοίπων (§5.1).



Σχ.5.33 Το διάγραμμα των O-C υπολοίπων του PY Lyr. Οι άξονες και τα σημεία αναπαριστούν τα ίδια μεγέθη όπως και στο προηγούμενο σχήμα (βλ. λεζάντα).

Πίνακας 5.22 Οι τιμές των τροχιακών παραμέτρων του τρίτου σώματος που προέκυψαν με την χρήση του κώδικα LITE

| Parameter | Value | error |
|---------------------------|---------|-------|
| P_3 (days) | 19348 | 311 |
| P_3 (years) | 53.0 | 0.9 |
| T_0 (HJD) | 2432118 | 2192 |
| A (days) | 0.040 | 0.002 |
| Ω (deg) | 0.0 | 41.4 |
| e | 0.07 | 0.08 |
| $f(m_3)$ | 0.117 | 0.001 |
| $M_{3, \min} (M_{\odot})$ | 1.20 | 0.01 |
| χ^2 | 0.0181 | - |

Για να εξαγάγει ο κώδικας την ελάχιστη μάζα του τρίτου σώματος ($i'=90^\circ$) χρησιμοποιήσαμε τις τιμές $M_1=1.6 M_{\odot}$ (από το φασματικό του τύπο) και $M_2=1.06 M_{\odot}$ (από τον λόγο μαζών που προέκυψε από την επίλυση του μοντέλου) για τις μάζες των μελών του διπλού συστήματος αντίστοιχα, ενώ η νέα αστρονομική εφημερίδα του διπλού συστήματος υπολογίστηκε ίση με:

$$Min.I = HJD 2451663.56427 (369) + 0.3857645 (1) \times E$$

5.3.2.4 Συμπεράσματα

Βάσει των σχέσεων 4.42 – 4.46 και υποθέτοντας ότι ο επιπρόσθετος συνοδός ανήκει στην κύρια ακολουθία μπορούμε να υπολογίσουμε τις φυσικές του παραμέτρους, οι οποίες και δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.23 Οι τιμές των φυσικών παραμέτρων του τρίτου σώματος

| Parameter | Value | Parameter | Value |
|-----------------|-------|-----------------|-------|
| $M (M_{\odot})$ | 1.2 | $R (R_{\odot})$ | 1.2 |
| T (K) | 6381 | M (mag) | 4 |
| $L (L_{\odot})$ | 1.4 | Sp. Type | F7-F8 |

Εντελώς αντίστοιχα βρίσκουμε για τους αστέρες του διπλού συστήματος $L_1=5.2 L_{\odot}$ και $L_2=1.2 L_{\odot}$. Από τη σχέση 4.47 βρίσκουμε ότι το τρίτο σώμα συνεισφέρει κατά $(23.0 \pm 4.2) \%$ στην ολική φωτεινότητα του τριπλού συστήματος. Οι θεωρητικές τιμές των απολύτων μεγεθών για τους αστέρες του συστήματος, βασιζόμενοι στη σχέση 4.46, είναι $M_1=2.9$ mag και $M_2=4.5$ mag, άρα βλέπουμε ότι το τρίτο σώμα είναι άμεσα συγκρίσιμο με τα μέλη του διπλού συστήματος. Η απόσταση του συστήματος έχει εκτιμηθεί ίση με 750 pc, οπότε βρίσκουμε (§4.3.4.4) ότι, αν τα τροχιακά επίπεδα του διπλού συστήματος και του τρίτου σώματος ταυτίζονται (οπότε $m_3=m_{3, \min}$), τότε η μέγιστη γωνιακή απόσταση του τρίτου σώματος από το διπλό σύστημα είναι 29.6 mas.

Η μέση τιμή $L_3(\%)$ που προκύπτει από όλα τα φωτομετρικά φίλτρα του πίνακα 5.19 είναι ίση με 19.7%. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση του φωτομετρικού μοντέλου αλλά και από την ανάλυση του O-C του συστήματος, δηλαδή δύο διαφορετικές και ανεξάρτητες μεθόδους, βλέπουμε ότι σχεδόν ταυτίζονται και ότι με βεβαιότητα συμπεραίνουμε την ύπαρξη του τρίτου μέλους στο σύστημα με συνεισφορά ~20% στην ολική φωτεινότητα του. Από την γωνιακή απόσταση που υπολογίσαμε καταλαβαίνουμε ότι ο επιπρόσθετος συνοδός πιθανόν να μπορεί να ανιχνευθεί συμβολομετρικά, ενώ λόγω της μεγάλης συνεισφοράς του στην ολική φωτεινότητα είναι βέβαιο ότι μπορεί να ανιχνευθεί φασματοσκοπικά. Ακόμα, αν οι φασματοσκοπικές παρατηρήσεις γίνονται συστηματικά και καλύψουν χρονικό εύρος τέτοιο ώστε να καλύπτουν ένα σημαντικό κλάσμα της περιόδου του τρίτου σώματος, τότε η ανίχνευσή του μπορεί να γίνει ακόμα και αστρομετρικά.

Συνοψίζοντας την συνεισφορά της παρούσας μελέτης του συστήματος PY Lyr, μπορούμε να πούμε ότι από φωτομετρικές παρατηρήσεις υπολογίστηκαν δύο χρόνοι ελαχίστου οι οποίοι μαζί με άλλους παρελθόντες χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή και την μελέτη του O-C διαγράμματός του. Από CCD παρατηρήσεις οι οποίες κάλυπταν όλη την τροχιακή φάση του συστήματος, κατασκευάστηκε το φωτομετρικό μοντέλο του συστήματος και προσδιορίστηκαν οι διάφορες φυσικές παράμετροί του. Από την ανάλυση του O-C διαγράμματος προέκυψε η ύπαρξη τρίτου σώματος με περίοδο ~53 yrs κάτι που επιβεβαιώθηκε και από την επίλυση του φωτομετρικού μοντέλου και μάλιστα οι τιμές της συνεισφοράς της φωτεινότητάς του στην ολική λαμπρότητα του συστήματος από τις δύο μεθόδους, μέσα στα όρια του σφάλματος, σχεδόν ταυτίζονται, κάτι που επιβεβαιώνει όλες τις υποθέσεις που κάναμε για το είδος του. Το διάγραμμα των O-C υπολοίπων δεν παρουσιάζει κάποια ιδιαίτερη κατανομή, οπότε συμπεραίνουμε ότι το μόνο αίτιο διαμόρφωσης του O-C διαγράμματος είναι η ύπαρξη του τρίτου μέλους.

5.4 Συστήματα που παρουσιάζουν μεταφορά μάζας μεταξύ των μελών ή απώλεια μάζας

Στα εκλειπτικά διπλά συστήματα συναντάμε πολύ συχνά το φαινόμενο της μεταβολής της τροχιακής περιόδου. Αυτό το φαινόμενο έχει τις ρίζες του στην αλληλεπίδραση των μελών του συστήματος. Όπως έχει αποδειχθεί, η ζωή των αστέρων οι οποίοι είναι μέλη διπλών ή ακόμα και πολλαπλών συστημάτων εξελίσσεται διαφορετικά από τη ζωή μεμονωμένων αστέρων. Ειδικά στις περιπτώσεις όπου τα διπλά συστήματα είναι κοντινά (close binaries) οι βαρυτικές αλληλεπιδράσεις παίζουν πολύ μεγάλο ρόλο τόσο στην εξέλιξη των αστέρων όσο και στη μορφολογία και την γεωμετρία τους.

Σύμφωνα με τη γεωμετρία Roche (§1.4.5.5) όταν κάποιος από τους αστέρες ή και οι δύο γεμίσει(ουν) τον(ους) λοβό του(ς), τότε μέσω του λαγκρατζιανού σημείου L_1 μπορεί να υπάρξει μεταφορά μάζας μεταξύ των αστέρων. Ως αποτέλεσμα αυτής της μεταφοράς μάζας, η εξελικτική πορεία των αστέρων αλλάζει, αφού προφανώς λόγω αύξησης της μάζας του ενός και μείωσης του άλλου, ο ρυθμός των πυρηνικών τους αντιδράσεων αλλάζει. Εδώ πρέπει να αναφέρουμε το παράδοξο του Algol κατά το οποίο, ο πιο εξελιγμένος αστέρας του συστήματος βρέθηκε να έχει μικρότερη μάζα από τον συνοδό του, κάτι που ερχόταν σε αντίφαση με την πεποίθηση ότι όσο πιο μεγάλη μάζα έχει ένας αστέρας τόσο πιο γρήγορα εξελίσσεται και συγκεκριμένα ο χρόνος παραμονής του στη Κύρια Ακολουθία ακολουθεί νόμο δύναμης ($t_{K,A} \sim M^{-3}$). Οι αστρονόμοι εξήγησαν το εν λόγω παράδοξο βασιζόμενοι στην μεταφορά μάζας που λάμβανε χώρα στο σύστημα και απέδειξαν ότι ο πιο εξελιγμένος αστέρας (αρχικά μεγαλύτερης μάζας) μετέφερε μάζα στον λιγότερο εξελιγμένο (αρχικά μικρότερης μάζας) με αποτέλεσμα το εν λόγω παράδοξο.

Μαγνητικοί αστέρες, όπως ο Ήλιος, αποβάλλουν συνεχώς μάζα μέσω του αστρικών ανέμων αλλά και μέσω έκτακτων μαγνητικών φαινομένων όπως οι εκλάμψεις και οι εκτοξεύσεις μάζας από το στέμμα. Προφανώς τέτοιοι αστέρες μπορούν να είναι μέλη διπλών συστημάτων και ακριβώς αυτή η δραστηριότητά τους προκαλεί απώλεια μάζας από το σύστημα.

Απώλειες μάζας παρατηρούνται και από εκρηκτικούς αστέρες όπως η *nova* και *supernova*. Στη περίπτωση των *nova* που πλέον θεωρούνται διπλά συστήματα, όπου τουλάχιστον ο ένας αστέρας – μέλος έχει φύγει από την Κύρια ακολουθία, η αποβολή μάζας από το σύστημα είναι σύνηθες φαινόμενο και γίνεται αντιληπτό αμέσως με την αύξηση της λαμπρότητας του συστήματος, αφού οι πυρηνικές εκρήξεις στην επιφάνεια του εξελιγμένου αστέρα οδηγούν σε απότομη αύξηση της επιφανειακής θερμοκρασίας του και την βίαιη αποβολή του επικαθήμενου υλικού. Η περίπτωση των *supernova* είναι διαφορετική, αφού ο αστέρας αποβάλλει απότομα τα εξωτερικά του κελύφη.

Στα διπλά συστήματα είμαστε σε θέση να αντιληφθούμε το φαινόμενο της μεταφοράς μάζας μεταξύ των αστέρων ή της απώλειας μάζας από το σύστημα, μελετώντας την συμπεριφορά της περιόδου. Σε αστέρες *nova* η περίοδος μπορεί να μεταβάλλεται απότομα ακόμα κι από κύκλο σε κύκλο αφού το φαινόμενο είναι απότομο. Γενικώς, όμως, στα διπλά συστήματα φαινόμενα έχουν χρονική διάρκεια αρκετών δεκαετιών, και συστηματικές μελέτες της περιόδου τους είναι αναγκαίες ώστε να αντιληφθούμε την παρουσία τους. Λόγω του ότι τα φαινόμενα επηρεάζουν την περίοδο του συστήματος, κάτι που γίνεται αντιληπτό μέσω της χρονικής μετατόπισης των εκλείψεων του συστήματος, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το

O-C διάγραμμα του συστήματος ώστε να μελετήσουμε τις μεταβολές της περιόδου και κατ' επέκταση τα φαινόμενα που την προκάλεσαν.

Σύμφωνα με την ανάλυση που έγινε στην §4.5, από την μελέτη του O-C διαγράμματος, είμαστε σε θέση να προσδιορίσουμε ποσοτικά τα μεγέθη που εμπλέκονται στην μεταφορά ή απώλεια μάζας.

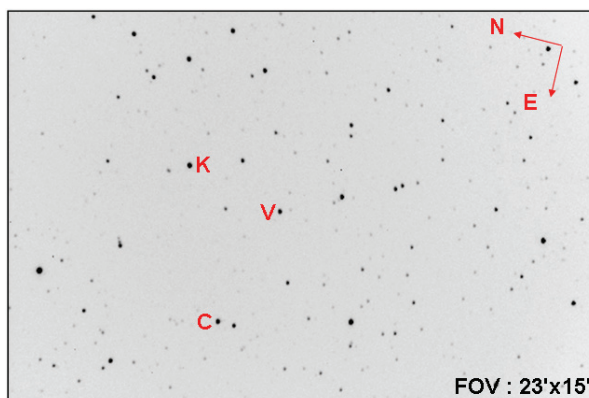
5.4.1 Το σύστημα *DD Mon*

5.4.1.1 Ιστορικά στοιχεία

Η μεταβλητότητα του αστέρα *DD Mon* (= HD 292319 = GSC 4800-0372 = AN 301.1934, $\alpha_{2000}=6^{\text{h}}45^{\text{m}}57.8^{\text{s}}$, $\delta_{2000}=-00^{\circ}17'31.7''$) ανακαλύφθηκε από τον Hoffmeister (1934). Αργότερα, οι Ahnert et al. (1947) προσδιόρισαν από φωτογραφικές παρατηρήσεις την τροχιακή περίοδο σε 0.567989 days. Ο Wachmann (1968) δημοσίευσε την πρώτη καμπύλη φωτός του συστήματος και ανανέωσε την εφημερίδα του. Οι πρώτες φωτοηλεκτρικές και φασματοσκοπικές παρατηρήσεις έγιναν από τους Yamasaki et al. (1990) από τις οποίες προσδιορίστηκε ο φασματικός τύπος του αστέρα ως F5 και έγινε το πρώτο φωτομετρικό μοντέλο του συστήματος το οποίο έδειξε ότι πρόκειται για ένα ημιαποχωρισμένο σύστημα όπου ο πρωτεύων αστέρας έχει σχεδόν γεμίσει τον λοβό Roche του. Οι παρατηρήσεις έδειξαν ότι οι αστέρες του συστήματος έχουν μικρή μάζα σχετικά με την ακτίνα και την λαμπρότητα που παρουσιάζουν, κάτι που έχει εξηγηθεί με την απώλεια μάζας από το σύστημα κατά την διάρκεια της εξέλιξής του. Τέλος, οι Qian et al. (1997) παρατήρησαν φωτοηλεκτρικά στα B και V φωτομετρικά φίλτρα, επιβεβαίωσαν την μικρή τιμή των μαζών των αστέρων, προσδιόρισαν τις απόλυτες παραμέτρους του συστήματος και βρήκαν ότι οι καμπύλες παρουσιάζουν ασυμμετρίες που οφείλονται στο φαινόμενο O'Connell.

5.4.1.2 Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι παρατηρήσεις του συστήματος διεξήχθησαν στις 25 και 29 Μαρτίου 2008, στο Γεροσταθοπούλειο Πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (κεφ.2) χρησιμοποιώντας το φωτομετρικό φίλτρο R με χρόνο έκθεσης 25 sec. Στο παρακάτω σχήμα παρατίθεται το πεδίο του αστέρα *DD Mon* (V), όπου δίνονται η φορά του, οι διαστάσεις του και οι αστέρες συγκρίσεως (C) και ελέγχου (K) που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία.

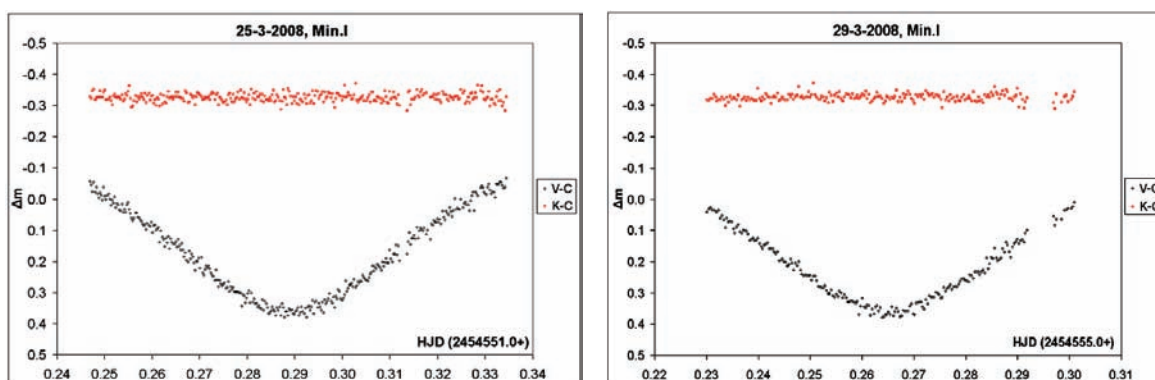


Σχ.5.34 Το πεδίο του αστέρα *DD Mon* και οι αστέρες σύγκρισης και ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν στις παρατηρήσεις μας.

Στο πρόγραμμα AIP4WIN χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των ακτίνων των διαφραγμάτων 4, 5 και 6 αντίστοιχα (§3.1).

Πίνακας 5.24 Οι αστέρες σύγκρισης (C) και ελέγχου (K) που χρησιμοποιήθηκαν στην φωτομετρία

| Αστέρας | Mag | Χρήση στη φωτομετρία |
|---------------|-------------|----------------------|
| DD Mon | 11.5 / 12.4 | V |
| GSC 4800:0288 | 11.0 | C |
| GSC 4800:0369 | 12.5 | K |



Σχ. 5.34-5.35 Τα διαγράμματα ελαχίστων της φωτεινότητας του αστέρα DD Mon, όπως προέκυψαν από τις παρατηρήσεις μας στο R φίλτρο.

Τέλος, στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζουμε τους χρόνους ελαχίστους που προέκυψαν από τις παρατηρήσεις μας με τη χρήση της μεθόδου Kwee & Van Woerden (§3.1).

Πίνακας 5.25 Οι χρόνοι ελαχίστου που προέκυψαν από τις παρατηρήσεις μας

| Minima (HJD) | Error | Type |
|---------------|---------|------|
| 2454551.28902 | 0.00008 | I |
| 2454555.26499 | 0.00008 | I |

5.4.1.3 Ανάλυση του O-C διαγράμματος

Για την κατασκευή του O-C διαγράμματος του αστέρα DD Mon, χρησιμοποιήθηκε τροποποιημένη εφημερίδα από τον Kreiner* η οποία είναι:

$$Min.I = HJD 2439639.72260 + 0.5680148 \times E$$

Οι χρόνοι παρελθόντων ελαχίστων, που χρησιμοποιήθηκαν από τη βιβλιογραφία, παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα και βάση της εφημερίδας του συστήματος βρέθηκαν οι αντίστοιχες O-C τιμές (§3.7). Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 83 χρόνοι ελαχίστων, εκ των οποίων οι 25 προέρχονται από οπτικές παρατηρήσεις, οι 35

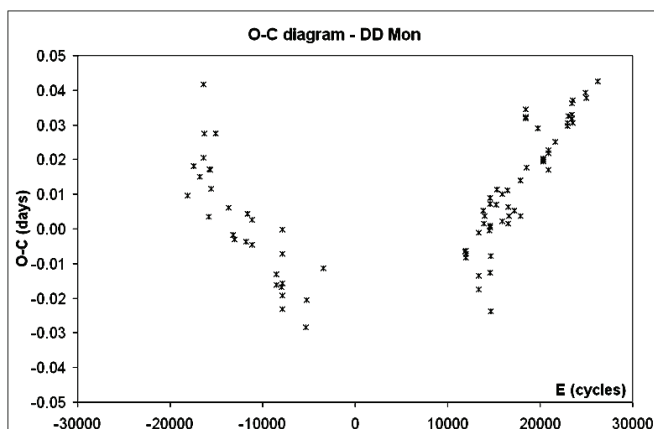
*<http://www.as.ap.krakow.pl/o-c/data/getdata.php3?DD%20mon>

προέκυψαν με φωτογραφικές μεθόδους και οι 23 από CCD παρατηρήσεις αντίστοιχα. Το χρονικό εύρος των παραπάνω παρατηρήσεων κυμαίνεται από το 1940 έως σήμερα.

Πίνακας 5.26 Οι χρόνοι ελαχίστου και οι O-C τιμές τους για το σύστημα DD Mon

| To (HJD) | E (fixed) | O-C (days) | To (HJD) | E (fixed) | O-C (days) | To (HJD) | E (fixed) | O-C (days) |
|---------------|-----------|------------|---------------|-----------|------------|---------------|-----------|------------|
| 2429364.34500 | -18090.0 | 0.010 | 2437704.48500 | -3407.0 | -0.011 | 2449779.35800 | 17851.0 | 0.004 |
| 2429727.31500 | -17451.0 | 0.018 | 2446411.30420 | 11921.5 | -0.006 | 2449812.31300 | 17909.0 | 0.014 |
| 2430078.34500 | -16833.0 | 0.015 | 2446420.10850 | 11937.0 | -0.006 | 2450099.74910 | 18415.0 | 0.035 |
| 2430321.48200 | -16405.0 | 0.042 | 2446443.11110 | 11977.5 | -0.008 | 2450123.60300 | 18457.0 | 0.032 |
| 2430326.57300 | -16396.0 | 0.021 | 2446443.96430 | 11979.0 | -0.007 | 2450127.57960 | 18464.0 | 0.032 |
| 2430369.46500 | -16320.5 | 0.027 | 2447207.36600 | 13323.0 | -0.017 | 2450167.32600 | 18534.0 | 0.018 |
| 2430672.47700 | -15787.0 | 0.004 | 2447211.34600 | 13330.0 | -0.013 | 2450860.31530 | 19754.0 | 0.029 |
| 2430721.34000 | -15701.0 | 0.017 | 2447232.37500 | 13367.0 | -0.001 | 2451168.17070 | 20296.0 | 0.020 |
| 2430735.54000 | -15676.0 | 0.017 | 2447529.45300 | 13890.0 | 0.005 | 2451174.13430 | 20306.5 | 0.020 |
| 2430784.38400 | -15590.0 | 0.012 | 2447554.44200 | 13934.0 | 0.002 | 2451174.41790 | 20307.0 | 0.019 |
| 2431060.45500 | -15104.0 | 0.027 | 2447587.38900 | 13992.0 | 0.004 | 2451495.34400 | 20872.0 | 0.017 |
| 2431845.43000 | -13722.0 | 0.006 | 2447864.57600 | 14480.0 | 0.000 | 2451503.58490 | 20886.5 | 0.022 |
| 2432146.47000 | -13192.0 | -0.002 | 2447909.45000 | 14559.0 | 0.000 | 2451503.86980 | 20887.0 | 0.023 |
| 2432233.37500 | -13039.0 | -0.003 | 2447913.43300 | 14566.0 | 0.007 | 2451925.05520 | 21628.5 | 0.025 |
| 2432948.50500 | -11780.0 | -0.004 | 2447929.33100 | 14594.0 | 0.001 | 2452675.40810 | 22949.5 | 0.031 |
| 2433022.35500 | -11650.0 | 0.004 | 2447929.33900 | 14594.0 | 0.009 | 2452695.57180 | 22985.0 | 0.030 |
| 2433294.42500 | -11171.0 | -0.005 | 2447946.35800 | 14624.0 | -0.013 | 2452710.05900 | 23010.5 | 0.033 |
| 2433327.37700 | -11113.0 | 0.003 | 2447954.29900 | 14638.0 | -0.024 | 2452948.34170 | 23430.0 | 0.033 |
| 2434776.36700 | -8562.0 | -0.013 | 2447996.34800 | 14712.0 | -0.008 | 2452948.34170 | 23430.0 | 0.033 |
| 2434780.34000 | -8555.0 | -0.016 | 2448305.36300 | 15256.0 | 0.007 | 2452952.32100 | 23437.0 | 0.036 |
| 2435106.38000 | -7981.0 | -0.017 | 2448330.36000 | 15300.0 | 0.011 | 2452964.81290 | 23459.0 | 0.032 |
| 2435160.33500 | -7886.0 | -0.023 | 2448689.33600 | 15932.0 | 0.002 | 2452986.11870 | 23496.5 | 0.037 |
| 2435161.48700 | -7884.0 | -0.007 | 2448689.34400 | 15932.0 | 0.010 | 2453013.09300 | 23544.0 | 0.031 |
| 2435164.31500 | -7879.0 | -0.019 | 2448991.52900 | 16464.0 | 0.011 | 2453814.00250 | 24954.0 | 0.039 |
| 2435165.47000 | -7877.0 | 0.000 | 2449057.40900 | 16580.0 | 0.002 | 2453833.31340 | 24988.0 | 0.038 |
| 2435185.33500 | -7842.0 | -0.016 | 2449065.36600 | 16594.0 | 0.006 | 2454551.28902 | 26252.0 | 0.043 |
| 2436630.35200 | -5298.0 | -0.028 | 2449090.35600 | 16638.0 | 0.004 | 2454555.26499 | 26259.0 | 0.043 |
| 2436638.31200 | -5284.0 | -0.021 | 2449416.39800 | 17212.0 | 0.005 | | | |

Βάσει του παραπάνω πίνακα και της αστρονομικής εφημερίδας του αστέρα προκύπτει το O-C διάγραμμα του.



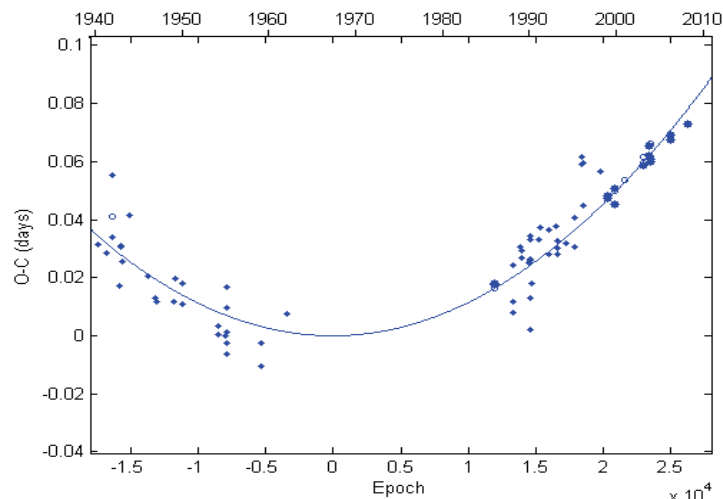
Σχ.5.36 Το O-C διάγραμμα του αστέρα DD Mon.

Οι χρόνοι ελαχίστων που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτοί του πίνακα 5.26. Σε κάθε χρόνο ελαχίστου τίθεται στατιστικό βάρος, ανάλογα με την μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή του (§5.1). Οι τελικές τροχιακές και φωτομετρικές παράμετροι του συστήματος καθώς και τα σφάλματά τους προκύπτουν χρησιμοποιώντας το λογισμικό Matlab. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε σε αυτό το λογισμικό έχει το όνομα *Mass transfer* (Zasche 2007) και εμπεριέχει όλες τις εξισώσεις της μεταφοράς μάζας (§4.5).

Πίνακας 5.27 Οι αρχικές παράμετροι που χρησιμοποιήσαμε για τον αστέρα *DD Mon* στον κώδικα *Mass transfer*

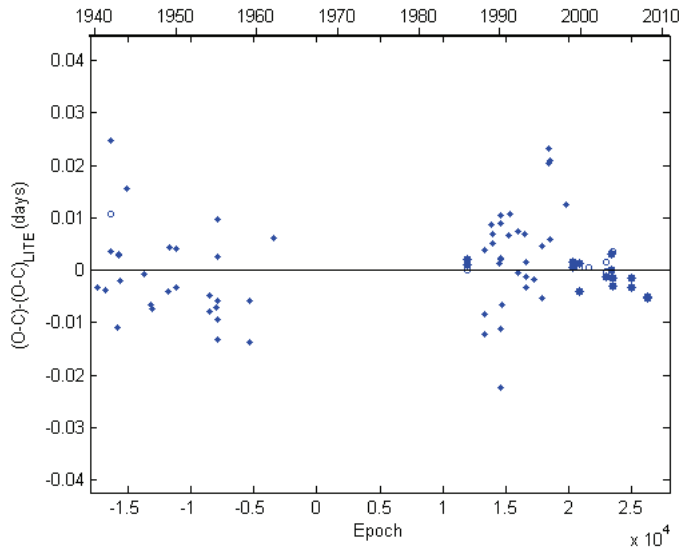
| | |
|-----------------------------------|-----------------------|
| JD₀ (HJD) | 2439639.72260 |
| P (days) | 0.5680148 |
| c₂ (days/cycle) | 1.0×10 ⁻¹⁰ |

Όπου JD₀ και P είναι ο χρόνος (αρχικού) πρωτεύοντος ελαχίστου και η περίοδος του διπλού συστήματος αντίστοιχα και c₂ ο ρυθμός μεταβολής της περιόδου ανά τροχιακό κύκλο.



Σχ.5.37 Το O-C διάγραμμα του αστέρα *DD Mon* στο οποίο έχει προσαρμοστεί η θεωρητική καμπύλη (μπλε συνεχής γραμμή) διαμέσου των πειραματικών σημείων. Όσο μεγαλύτερο το σύμβολο του κάθε σημείου τόσο μεγαλύτερο και το στατιστικό βάρος που χρησιμοποιήθηκε. Στον άνω οριζόντιο άξονα αναγράφεται η χρονολογία, στον κάτω οριζόντιο άξονα ο αριθμός των περιφορών και στον αριστερό κατακόρυφο αναγράφονται οι O-C τιμές εκφρασμένες σε *days*.

Τέλος, το πρόγραμμα εξάγει και το διάγραμμα των O-C υπολοίπων (§5.1), το οποίο είναι αποτέλεσμα αφαίρεσης της παραβολής από την θεωρητική καμπύλη (λύση).



Σχ.5.38 Το διάγραμμα των O-C υπολοίπων, στο οποίο έχει αφαιρεθεί η παραβολική λύση. Οι άξονες και τα σημεία αναπαριστούν τα ίδια μεγέθη όπως και στο προηγούμενο σχήμα.

Πίνακας 5.28 Οι τιμές των τροχιακών παραμέτρων του συστήματος DD Mon που προέκυψαν με την χρήση του κώδικα Mass transfer

| Parameter | Value | error |
|---|---------------|-----------|
| JD ₀ (HJD) | 2439639.70265 | 0.00494 |
| P (days) | 0.5680144 | 0.0000003 |
| c ₂ (days/cycle) (×10 ⁻¹⁰) | 1.13320 | 0.00003 |
| \dot{P} (days/year) (×10 ⁻⁷) | 1.4573 | 0.0004 |
| \dot{M} (M _☉ /year) (×10 ⁻⁸) | -2.60750 | 0.00002 |
| χ ² | 0.0155 | |

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων \dot{P} , \dot{M} χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις 4.77 – 4.83 και οι τιμές $M_1=0.37 M_{\odot}$ και $M_2=0.25 M_{\odot}$ (Yamasaki et al. 1990) για τις μάζες των μελών του διπλού συστήματος αντίστοιχα.

Από τις παραμέτρους του διπλού συστήματος που προέκυψαν από το πρόγραμμα, προκύπτει η νέα αστρονομική εφημερίδα του βασισμένη στον παραβολικό όρο και η οποία δίνεται από την σχέση:

$$Min.I = HJD 2439639.70265 (494) + 0.5680144 (3) \times E + 1.13320 (3) \cdot 10^{-10} \times E^2$$

5.4.1.4 Συμπεράσματα

Στην παρούσα παράγραφο της εργασίας, μελετήθηκε το διάγραμμα O-C του μεταβλητού δι' εκλείψεων αστέρα DD Mon. Από την μορφή του O-C διαγράμματος που παρουσιάζει, υποθέσαμε ότι πρόκειται για διπλό εκλειπτικό σύστημα στο οποίο λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της μεταβολής της τροχιακής περιόδου.

Ο εν λόγω αστέρας παρατηρήθηκε φωτομετρικά και υπολογίστηκαν δύο χρόνοι φωτομετρικών ελαχίστων. Από τη βιβλιογραφία συλλέξαμε και παλαιότερους χρόνους ελαχίστων και κατασκευάστηκε το διάγραμμα O-C του συστήματος.

Η ανάλυση του O-C διαγράμματος με τη βοήθεια H/Y και εξειδικευμένου υπολογιστικού κώδικα έδειξε ότι στο σύστημα λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της απώλειας μάζας και υπολογίστηκαν ο ρυθμός αύξησης της περιόδου του διπλού συστήματος και ο ρυθμός απώλειας μάζας. Από το πρόσημο του παραβολικού όρου προκύπτει μία συνεχόμενη αύξηση της τροχιακής περιόδου του διπλού συστήματος με ρυθμό $1.4573(4) \times 10^{-7}$ days/year και απώλεια μάζας με ρυθμό $-2.6075(2) \times 10^{-8} M_{\odot}$ /yr. Σύμφωνα με το φωτομετρικό μοντέλο των Yamasaki et al. (1990) και Shengbang et al. (1997), ο πρωτεύων αστέρας έχει σχεδόν γεμίσει τον λοβό Roche του, και αν λάβουμε υπ' όψη το φασματικό του τύπο (F5) και τις μικρές μάζες των δύο μελών, τότε είναι πολύ πιθανό το σύστημα να χάνει μάζα, κάτι που επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα της ανάλυσής του O-C διαγράμματός του.

Από το διάγραμμα των O-C υπολοίπων του συστήματος ίσως διαφαίνεται κάποια επιπλέον μεταβολή, αλλά απαιτούνται περισσότεροι χρόνοι ελαχίστων στα επόμενα χρόνια ώστε να εξάγουμε με βεβαιότητα κάποιο συμπέρασμα.

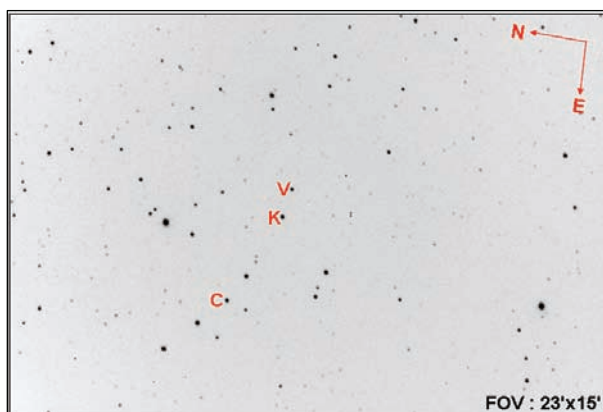
5.4.2 Το σύστημα LZ Lyr

5.4.2.1 Ιστορικά στοιχεία

Το σύστημα LZ Lyr (= GSC 2641-1446, $\alpha_{2000}=18^{\text{h}}41^{\text{m}}26.2^{\text{s}}$, $\delta_{2000}=+32^{\circ}58'47.4''$) ανακαλύφθηκε ως μεταβλητός από τον Hoffmeister (1951). Η πρώτη αστρονομική εφημερίδα του συστήματος δημοσιεύτηκε από τους Wood & Forbes (1963), ενώ έκτοτε δεν υπάρχουν παρατηρήσεις στο σύστημα εκτός από αρκετούς χρόνους ελαχίστων.

5.4.2.2 Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι παρατηρήσεις του συστήματος διεξήχθησαν στις 8/5/2008, στο Γεροσταθοπούλειο Πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (κεφ.2) χρησιμοποιώντας το φωτομετρικό φίλτρο R με χρόνο έκθεσης 45 sec. Στο παρακάτω σχήμα παρατίθεται το πεδίο του αστέρα LZ Lyr (V), όπου δίνονται η φορά του, οι διαστάσεις του και οι αστέρες συγκρίσεως (C) και ελέγχου (K) που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία.

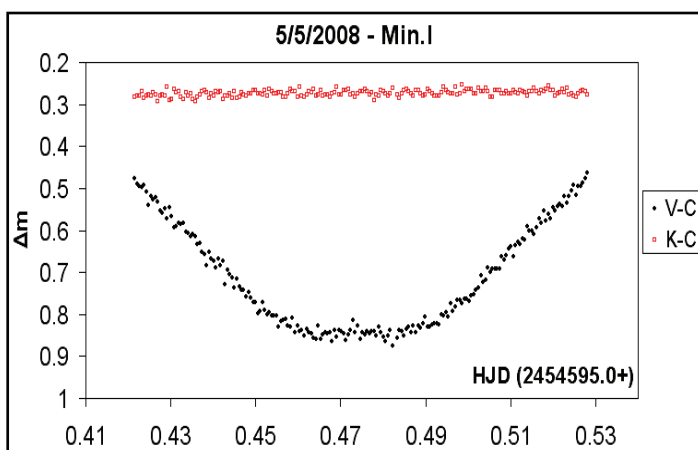


Σχ.5.39 Το πεδίο του αστέρα LZ Lyr και οι αστέρες σύγκρισης και ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν στις παρατηρήσεις μας.

Στο πρόγραμμα AIP4WIN χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των ακτίνων των διαφραγμάτων 3.5, 5.5 και 6.5 αντίστοιχα (§3.1).

Πίνακας 5.29 Οι αστέρες σύγκρισης (C) και ελέγχου (K) που χρησιμοποιήθηκαν στην φωτομετρία

| Αστέρας | Mag | Χρήση στη φωτομετρία |
|---------------|-------------|----------------------|
| LZ Lyr | 12.0 / 13.3 | V |
| GSC 2641:0876 | 12.1 | C |
| GSC 2641:1050 | 12.1 | K |



Σχ.5.40 Το διαγράμμα ελαχίστου της φωτεινότητας του αστέρα LZ Lyr, όπως προέκυψε από τις παρατηρήσεις μας στο R φίλτρο.

Τέλος, στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζουμε τους χρόνους ελαχίστους που προέκυψαν από τις παρατηρήσεις μας με τη χρήση της μεθόδου Kwee & Van Woerden (§3.1).

Πίνακας 5.30 Ο χρόνος ελαχίστου που προέκυψε από τις παρατηρήσεις μας

| Minima (HJD) | Error | Type |
|---------------|---------|------|
| 2454551.28902 | 0.00008 | I |

5.4.2.3 Ανάλυση του O-C διαγράμματος

Για την κατασκευή του O-C διαγράμματος του αστέρα LZ Lyr, χρησιμοποιήθηκε τροποποιημένη εφημερίδα από τον Kreiner* η οποία είναι:

$$Min.I = HJD 2437270.21631 + 1.6111786 \times E$$

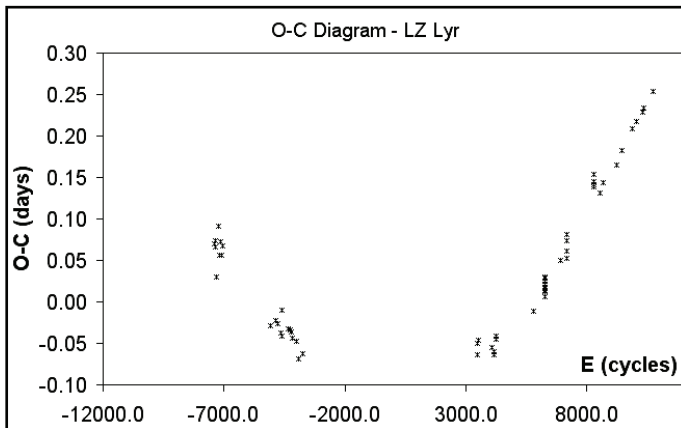
Οι χρόνοι παρελθόντων ελαχίστων που χρησιμοποιήθηκαν από τη βιβλιογραφία παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα και βάσει της εφημερίδας του συστήματος βρέθηκαν οι αντίστοιχες O-C τιμές (§3.7). Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 59 χρόνοι ελαχίστων, εκ των οποίων οι 27 προέρχονται από οπτικές παρατηρήσεις, οι 24 προέκυψαν με φωτογραφικές μεθόδους και οι 8 από CCD παρατηρήσεις αντίστοιχα. Το χρονικό εύρος των παραπάνω παρατηρήσεων κυμαίνεται από το 1935 έως σήμερα.

*<http://www.as.ap.krakow.pl/o-c/data/getdata.php3?LZ%20lyr>

Πίνακας 5.31 Οι χρόνοι ελαχίστου και οι O-C τιμές τους για το σύστημα LZ Lyr

| To (HJD) | E (fixed) | O-C (days) | To (HJD) | E (fixed) | O-C (days) | To (HJD) | E (fixed) | O-C (days) |
|---------------|-----------|------------|---------------|-----------|------------|---------------|-----------|------------|
| 2425347.56500 | -7400.0 | 0.070 | 2430991.38400 | -3897.0 | -0.069 | 2448461.51300 | 6946.0 | 0.050 |
| 2425389.45200 | -7374.0 | 0.067 | 2431231.45600 | -3748.0 | -0.063 | 2448830.47500 | 7175.0 | 0.052 |
| 2425439.40500 | -7343.0 | 0.073 | 2442870.60900 | 3476.0 | -0.064 | 2448830.48400 | 7175.0 | 0.061 |
| 2425497.36400 | -7307.0 | 0.030 | 2442904.45800 | 3497.0 | -0.050 | 2448830.49700 | 7175.0 | 0.074 |
| 2425624.70900 | -7228.0 | 0.092 | 2442962.46400 | 3533.0 | -0.046 | 2448830.50400 | 7175.0 | 0.081 |
| 2425716.51100 | -7171.0 | 0.056 | 2443837.32500 | 4076.0 | -0.055 | 2450662.47170 | 8312.0 | 0.139 |
| 2425737.47200 | -7158.0 | 0.072 | 2443977.49300 | 4163.0 | -0.060 | 2450662.47170 | 8312.0 | 0.139 |
| 2425803.51500 | -7117.0 | 0.057 | 2444006.49000 | 4181.0 | -0.064 | 2450662.47380 | 8312.0 | 0.141 |
| 2425937.25400 | -7034.0 | 0.068 | 2444114.45800 | 4248.0 | -0.045 | 2450662.47730 | 8312.0 | 0.144 |
| 2429072.51100 | -5088.0 | -0.029 | 2444122.51800 | 4253.0 | -0.041 | 2450662.48700 | 8312.0 | 0.154 |
| 2429425.36500 | -4869.0 | -0.023 | 2446592.48500 | 5786.0 | -0.011 | 2451031.42340 | 8541.0 | 0.131 |
| 2429546.20000 | -4794.0 | -0.026 | 2447388.42400 | 6280.0 | 0.006 | 2451274.72500 | 8692.0 | 0.144 |
| 2429752.42000 | -4666.0 | -0.037 | 2447388.43100 | 6280.0 | 0.013 | 2452146.39320 | 9233.0 | 0.165 |
| 2429868.42100 | -4594.0 | -0.041 | 2447388.43200 | 6280.0 | 0.014 | 2452536.31600 | 9475.0 | 0.182 |
| 2429876.50800 | -4589.0 | -0.010 | 2447388.43400 | 6280.0 | 0.016 | 2453190.48100 | 9881.0 | 0.209 |
| 2430258.33500 | -4352.0 | -0.032 | 2447388.43500 | 6280.0 | 0.017 | 2453517.55900 | 10084.0 | 0.218 |
| 2430443.61900 | -4237.0 | -0.034 | 2447388.43900 | 6280.0 | 0.021 | 2453899.42000 | 10321.0 | 0.229 |
| 2430498.39700 | -4203.0 | -0.036 | 2447388.44300 | 6280.0 | 0.025 | 2453999.31700 | 10383.0 | 0.233 |
| 2430514.50100 | -4193.0 | -0.043 | 2447388.44700 | 6280.0 | 0.029 | 2454595.47414 | 10753.0 | 0.254 |
| 2430791.62000 | -4021.0 | -0.047 | 2447388.44800 | 6280.0 | 0.030 | | | |

Βάσει του παραπάνω πίνακα και της αστρονομικής εφημερίδας του αστέρα προκύπτει το O-C διάγραμμα του.



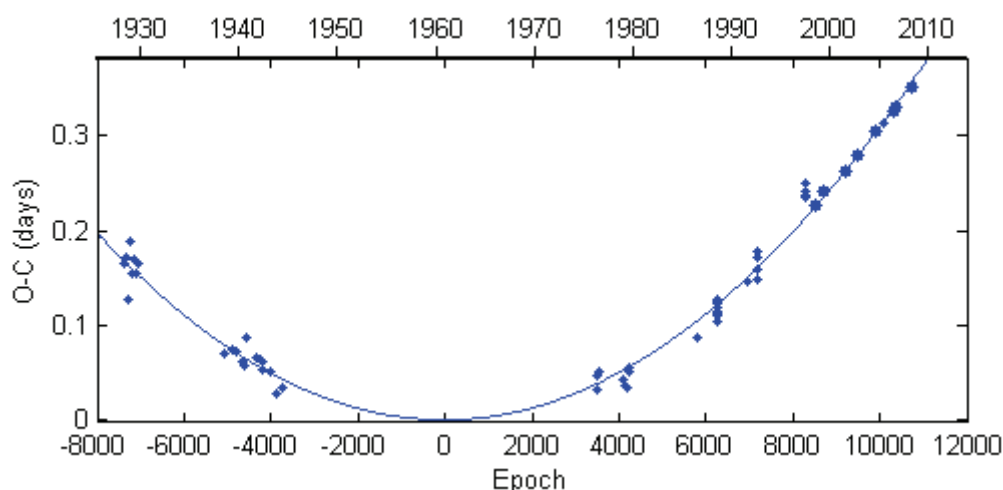
Σχ.5.41 Το O-C διάγραμμα του αστέρα LZ Lyr.

Οι χρόνοι ελαχίστων που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτοί του πίνακα 5.31. Σε κάθε χρόνο ελαχίστου τίθεται στατιστικό βάρος, ανάλογα με την μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή του (§5.1). Οι τελικές τροχιακές και φωτομετρικές παράμετροι του συστήματος καθώς και τα σφάλματά τους προκύπτουν χρησιμοποιώντας το λογισμικό Matlab. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε σε αυτό το λογισμικό έχει το όνομα *Mass transfer* (Zasche 2007) και εμπεριέχει όλες τις εξισώσεις της μεταφοράς μάζας (§4.5).

Πίνακας 5.32 Οι αρχικές παράμετροι που χρησιμοποιήσαμε για τον αστέρα LZ Lyr στον κώδικα *Mass transfer*

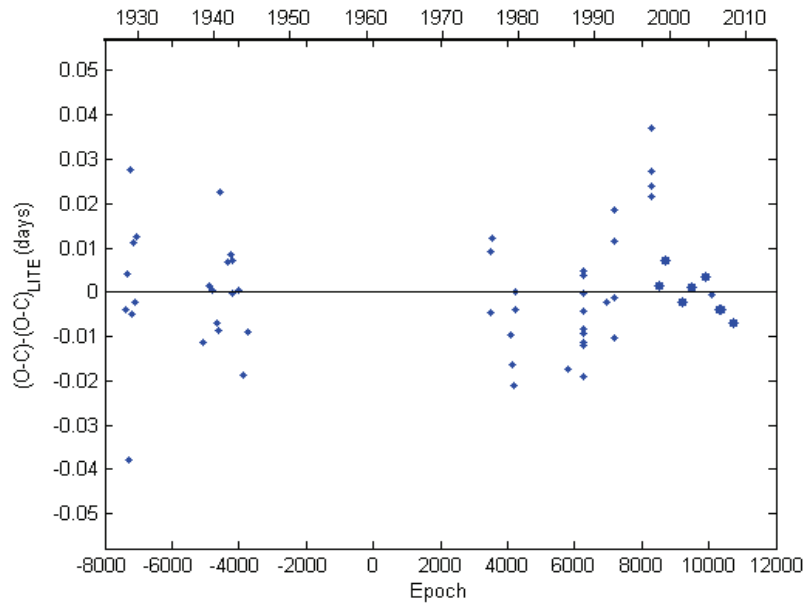
| | |
|-----------------------------------|----------------------|
| JD₀ (HJD) | 2437270.21631 |
| P (days) | 1.6111786 |
| c₂ (days/cycle) | 25×10^{-10} |

Όπου JD₀ και P είναι ο χρόνος (αρχικού) πρωτεύοντος ελαχίστου και η περίοδος του διπλού συστήματος αντίστοιχα και c₂ ο ρυθμός μεταβολής της περιόδου ανά τροχιακό κύκλο.



Σχ. 5.42 Το O-C διάγραμμα του αστέρα LZ Lyr στο οποίο έχει προσαρμοστεί η θεωρητική καμπύλη (μπλε συνεχής γραμμή) διαμέσου των πειραματικών σημείων. Όσο μεγαλύτερο το σύμβολο του κάθε σημείου τόσο μεγαλύτερο και το στατιστικό βάρος που χρησιμοποιήθηκε. Στον άνω οριζόντιο άξονα αναγράφεται η χρονολογία, στον κάτω οριζόντιο άξονα ο αριθμός των περιφορών και στον αριστερό κατακόρυφο αναγράφονται οι O-C τιμές εκφρασμένες σε days.

Τέλος, το πρόγραμμα εξάγει και το διάγραμμα των O-C υπολοίπων (§5.1), το οποίο είναι αποτέλεσμα αφαίρεσης της παραβολής από την θεωρητική καμπύλη (λύση).



Σχ.5.43 Το διάγραμμα O-C των υπολοίπων, στο οποίο έχει αφαιρεθεί η παραβολική λύση. Οι άξονες και τα σημεία αναπαριστούν τα ίδια μεγέθη όπως και στο προηγούμενο σχήμα.

Πίνακας 5.33 Οι τιμές των τροχιακών παραμέτρων του συστήματος LZ Lyr που προέκυψαν με την χρήση του κώδικα Mass transfer

| Parameter | Value | error |
|--|---------------|-----------|
| JD ₀ (HJD) | 2437270.11906 | 0.02394 |
| P (days) | 1.6111787 | 0.0000036 |
| c ₂ (days/cycle) (×10 ⁻¹⁰) | 30.9509 | 0.0003 |
| \dot{P} (days/year) (×10 ⁻⁷) | 14.0331 | 0.0002 |
| \dot{M}_{loss} (M _☉ /year) (×10 ⁻⁶) | -3.3914 | 0.0001 |
| $\dot{M}_{transfer}$ (M _☉ /year) (×10 ⁻⁷) | 5.8063 | 0.0007 |
| χ ² | 0.0275 | |

Για τον υπολογισμό της μεταβολής της περιόδου χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις 4.77 και 4.78, ενώ λόγω του ότι δεν υπάρχει καμία φασματοσκοπική μελέτη, δεν είναι δυνατή η εκτίμηση των μαζών του συστήματος. Για να έχουμε όμως μία πρώτη εντύπωση για τον ρυθμό απώλειας μάζας από το σύστημα ή μεταφορά μάζας μεταξύ των μελών, θεωρήσαμε σαν τυπικές μάζες των αστέρων $M_1=2 M_{\odot}$ και $M_2=1 M_{\odot}$ και βάσει των σχέσεων 4.79 – 4.82 προέκυψαν οι τιμές \dot{M}_{loss} και $\dot{M}_{transfer}$ που δίνονται στον παραπάνω πίνακα.

Από τις παραμέτρους του διπλού συστήματος που προέκυψαν από το πρόγραμμα, προκύπτει η νέα αστρονομική εφημερίδα του βασισμένη στον παραβολικό όρο και η οποία δίνεται από την σχέση:

$$Min.I = HJD 2437270.11906(2394) + 1.6111787(36) \times E + 30.9509(3) \cdot 10^{-10} \times E^2$$

5.4.2.4 Συμπεράσματα

Στην παρούσα παράγραφο της εργασίας, μελετήθηκε το διάγραμμα O-C του μεταβλητού δι' εκλείψεων αστέρα LZ Lyr. Από την μορφή του O-C διαγράμματος που παρουσιάζει, υποθέσαμε ότι πρόκειται για διπλό εκλειπτικό σύστημα στο οποίο λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της μεταβολής της τροχιακής περιόδου.

Ο εν λόγω αστέρας παρατηρήθηκε φωτομετρικά και υπολογίστηκε ένας χρόνος φωτομετρικού ελαχίστου. Από τη βιβλιογραφία συλλέξαμε και παλαιότερους χρόνους ελαχίστων και κατασκευάστηκε το διάγραμμα O-C του συστήματος.

Από την ανάλυση του O-C διαγράμματος με τη βοήθεια H/Y και εξειδικευμένου υπολογιστικού κώδικα υπολογίστηκε η ραγδαία αύξηση της περιόδου ίση με $14.0331 \times 10^{-7} \text{days/year}$, ενώ λόγω, έλλειψης φωτομετρικών και φασματοσκοπικών δεδομένων από τη βιβλιογραφία δεν υπήρχε καμία πληροφορία σχετικά με τις μάζες των αστέρων του συστήματος. Υποτέθηκαν τυπικές μάζες αστέρων και υπολογίστηκαν εν συνεχεία οι ρυθμοί απώλειας μάζας από το σύστημα και η μεταφορά μάζας μεταξύ των μελών. Προφανώς ένα από τα δύο προαναφερόμενα φαινόμενα λαμβάνουν χώρα, αλλά επιπλέον φωτομετρικές ή φασματοσκοπικές παρατηρήσεις θα το επιβεβαιώσουν. Η επίλυση του φωτομετρικού μοντέλου του συστήματος θα δείξει εάν κάποιος από τους αστέρες έχει γεμίσει τον λοβό Roche του, οπότε θα ενισχυθεί η άποψη περί μεταφορά μάζας από το αστέρα μικρότερης μάζας προς τον αστέρα με τη μεγαλύτερη μάζα. Εάν αυτό δεν επιβεβαιωθεί, τότε και πάλι μέσω του φωτομετρικού μοντέλου μπορεί να αποδειχθεί η ύπαρξη κηλίδων σε κάποιων από τους αστέρες, κάτι που θα ενισχύσει την άποψη περί μαγνητικής δραστηριότητας και απώλειας μάζας. Οι φασματοσκοπικές παρατηρήσεις, κυρίως στο UV μέρος του H/M φάσματος, μπορούν να δείξουν χρωμοσφαιρική ή και στεμματική δραστηριότητα κάποιου εκ των δύο αστέρων, οπότε και πάλι θα καταλήξουμε στο συμπέρασμα περί απώλειας μάζας.

Το διάγραμμα των O-C υπολοίπων δεν δείχνει κάποια προφανή περιοδικότητα, κυρίως λόγω του μεγάλου κενού από παρατηρήσεις μεταξύ 1940-1975 και γι' αυτό απαιτούνται μελλοντικές παρατηρήσεις χρόνων ελαχίστου ώστε να επιβεβαιωθεί αν όντως στη μεταβολή της τροχιακής περιόδου δεν συνεισφέρουν και άλλοι παράγοντες εκτός της μεταφοράς ή απώλειας μάζας.

5.5 Σύνθετα συστήματα

Σε αυτή τη παράγραφο της εργασίας θα παρουσιαστεί η μελέτη των O-C διαγραμμάτων επιλεγμένων δι' εκλείψεων μεταβλητών αστέρων που παρουσιάζουν ένα συνδυασμό φυσικών φαινομένων. Στα τρία πρώτα από τα παρακάτω συστήματα έχει διαπιστωθεί η ροής μάζας μεταξύ των μελών τους από την ανάλυση των καμπύλων φωτός που παρουσιάζουν, κάτι που προκύπτει και από το O-C διάγραμμά τους. Όμως, εκτός από το παραπάνω φαινόμενο, το O-C διάγραμμα δείχνει να παρουσιάζει και μία ημιτονοειδή κατανομή, που πιθανώς να οφείλεται στην ύπαρξη ενός επιπλέον σώματος σε τροχιά γύρω από το διπλό σύστημα. Επίσης, θα παρουσιαστεί η μελέτη του O-C διαγράμματος ενός συστήματος στο οποίο λαμβάνει χώρα το LITE αλλά και η κίνηση της γραμμής των ασπίδων.

Στις παραγράφους 5.1-5.3 αναλύθηκαν συστήματα τα οποία είτε παρουσίαζαν μόνο το LITE, είτε παραβολική συμπεριφορά, είτε την κίνηση της γραμμής των ασπίδων στην O-C κατανομή τους. Όπως δείξαμε το LITE αντιστοιχεί στην ύπαρξη ενός τρίτου αστέρα στο σύστημα ενώ η παραβολική συμπεριφορά στο O-C διάγραμμα αντιστοιχεί στην μεταβολή της τροχιακής περιόδου λόγω της ανταλλαγής μάζας μεταξύ των μελών του διπλού συστήματος. Από την ανάλυση του O-C διαγράμματος θα προκύψουν νέα φωτομετρικά στοιχεία για κάποια επιλεγμένα διπλά συστήματα, θα υπολογιστεί ο ρυθμός μεταφοράς μάζας και η επίπτωση του στην τροχιακή περίοδο τους, και τέλος θα υπολογιστούν οι φυσικές και τροχιακές παράμετροι του πιθανού τρίτου σώματος.

5.5.1 Το σύστημα *TZ Eri*

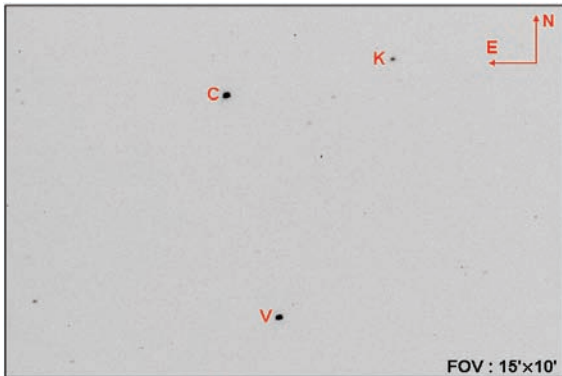
5.5.1.1 Ιστορικά στοιχεία

Ο αστέρας *TZ Eri* (= AN 40.1929 = BD-06 880, $\alpha_{2000}=04^{\text{h}}21^{\text{m}}40.3^{\text{s}}$, $\delta_{2000}=-06^{\circ}01'09.2''$) είναι δι' εκλείψεων μεταβλητός με περίοδο περίπου 2.6 days και φαινόμενο μέγεθος περίπου 9.7 mag (V). Η μεταβλητότητά του ανακαλύφθηκε από τον Hoffmeister (1929) ο οποίος το κατέταξε σε τύπου Algol. Αρχικά, ο Cannon (1934) ταξινόμησε και τους δύο αστέρες-μέλη ως φασματικού τύπου F, αργότερα οι Bancewicz & Dvorak (1980) εκτίμησαν ότι ο πρωτεύων αστέρας είναι τύπου F8, οι Kaitchuck & Park (1988) βρήκαν ότι ο δευτερεύων αστέρας είναι τύπου K0 IV, ενώ οι Yoon et al (1994) συμφώνησαν στον φασματικό τύπο ως K0. Τέλος, τα μέλη του συστήματος επαναταξινομήθηκαν από τους Barblan et al. (1998) ως A5/6 V ο πρωτεύων αστέρας και K0/1 III ο δευτερεύων και με τη χρήση φωτομετρικών δεδομένων σε επτά φίλτρα και των ακτινικών ταχυτήτων τους συστήματος υπολόγισαν τις απόλυτες παραμέτρους τους.

5.5.1.2 Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι παρατηρήσεις των φωτομετρικών ελαχίστων του συστήματος διεξήχθησαν στο Γεροσταθοπούλειο Πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (κεφ.2) στις 24/9/2007 χρησιμοποιώντας το R φωτομετρικό φίλτρο με χρόνο έκθεσης 60 sec και στις 9, 13 και 30/1/2008, χρησιμοποιώντας τα φωτομετρικά φίλτρα B και V με χρόνους έκθεσης 35 και 15 sec αντίστοιχα. Η πλήρης φωτομετρική καμπύλη του

συστήματος προέκυψε από 26 νύχτες παρατηρήσεων στα B και V φίλτρα στο ίδιο αστροσκοπείο μεταξύ 12/2007 και 2/2008. Στο παρακάτω σχήμα παρατίθεται το πεδίο του αστέρα TZ Eri (V), όπου δίνονται η φορά του, οι διαστάσεις του και οι αστέρες σύγκρισης (C) και ελέγχου (K) που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία.

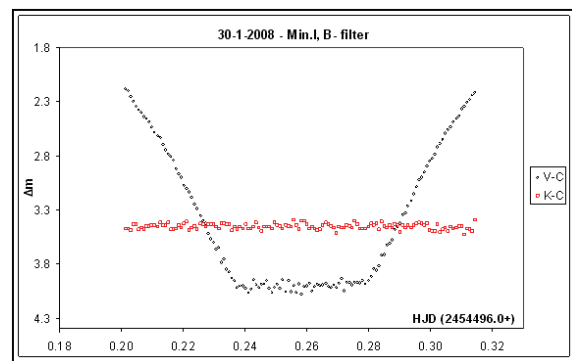
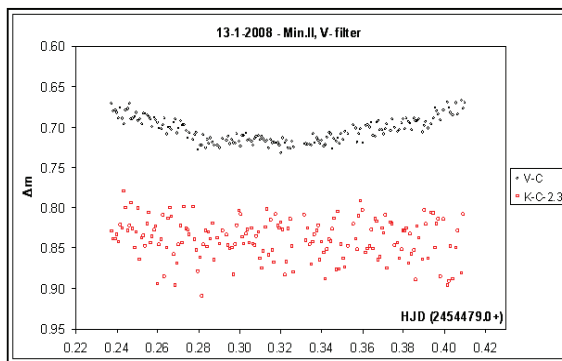
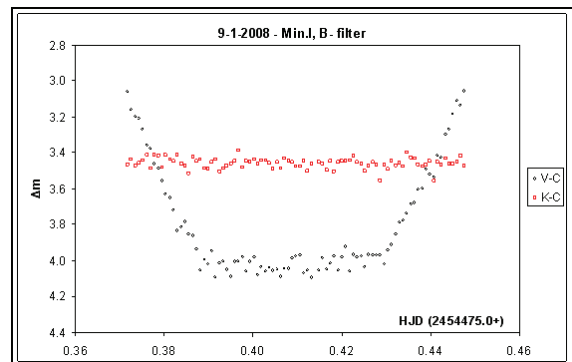
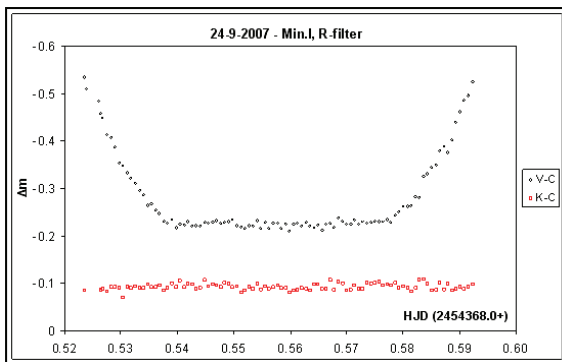


Σχ. 5.44 Το πεδίο του αστέρα TZ Eri, και οι αστέρες σύγκρισης και ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν στις παρατηρήσεις μας.

Στο πρόγραμμα AIP4WIN χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των ακτίνων των διαφραγμάτων 6, 8 και 10 αντίστοιχα (§3.1).

Πίνακας 5.34 Οι αστέρες σύγκρισης (C) και ελέγχου (K) που χρησιμοποιήθηκαν στην φωτομετρία

| Αστέρας | Mag | Χρήση στη φωτομετρία |
|---------------|------------|----------------------|
| TZ Eri | 9.7 / 12.6 | V |
| GSC 4733:0951 | 8.9 | C |
| GSC 4733:1292 | 12.6 | K |



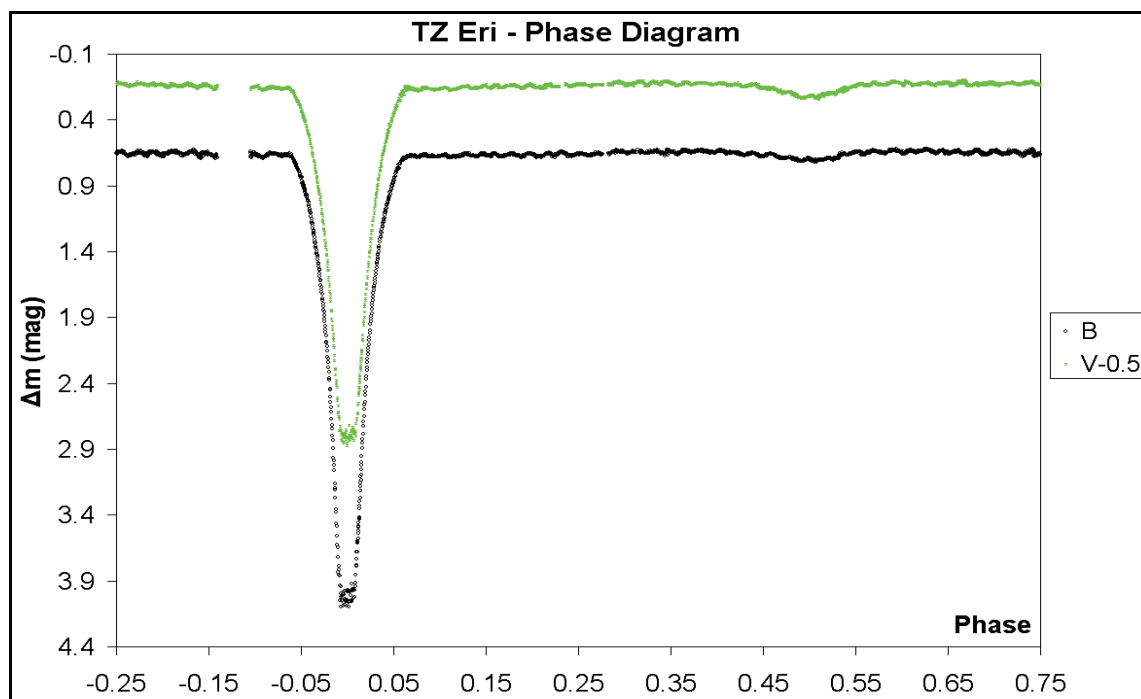
Σχ.5.45-5.48 Τα διαγράμματα ελαχίστων της φωτεινότητας του αστέρα TZ Eri, όπως προέκυψαν από τις παρατηρήσεις μας.

Λόγω του ότι σε κάποιες ημέρες παρατηρήθηκε το ελάχιστο της λαμπρότητας σε δύο φωτομετρικά φίλτρα, ο χρόνος ελαχίστου προκύπτει από τον μέσο όρο των χρόνων ελαχίστου όπως προέκυψαν σε κάθε φίλτρο. Οι τιμές των χρόνων ελαχίστων που προέκυψαν από τις παρατηρήσεις μας, παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.35 Οι χρόνοι ελαχίστου που προέκυψαν από τις παρατηρήσεις μας

| Date | Filter | Minima (HJD) | Error | Type | Mean Minima (HJD) | Error |
|---------|--------|---------------|---------|------|-------------------|---------|
| 24/9/07 | R | 2454368.55806 | 0.00008 | I | 2454368.55806 | 0.00008 |
| 9/1/08 | B | 2454475.40912 | 0.00018 | I | 2454475.40918 | 0.00017 |
| | V | 2454475.40925 | 0.00017 | I | | |
| 13/1/08 | B | 2454479.31937 | 0.00034 | II | 2454479.31937 | 0.00034 |
| 30/1/08 | B | 2454496.25822 | 0.00006 | I | 2454496.25826 | 0.00006 |
| | V | 2454496.25834 | 0.00006 | I | | |

Από όλες τις φωτομετρικές παρατηρήσεις κατασκευάστηκε το διάγραμμα φάσης (σχ3.5) του συστήματος το οποίο και παρατίθεται παρακάτω.



Σχ.5.49 Το διάγραμμα φάσης του συστήματος TZ Eri, όπως προέκυψε από την επεξεργασία των παρατηρήσεων.

Η ανάλυση του συστήματος για την κατασκευή του φωτομετρικού μοντέλου έγινε με το λογισμικό PHOEBE 0.29d (Prša and Zwitter 2005) το οποίο χρησιμοποιεί την έκδοση του κώδικα των Wilson-Devinney (2003) και εφαρμόστηκε η επιλογή «*Semi detached binary, 2ry component fills its Roche Lobe*». Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία του προγράμματος δίνονται στο παράρτημα Β της παρούσας εργασίας.

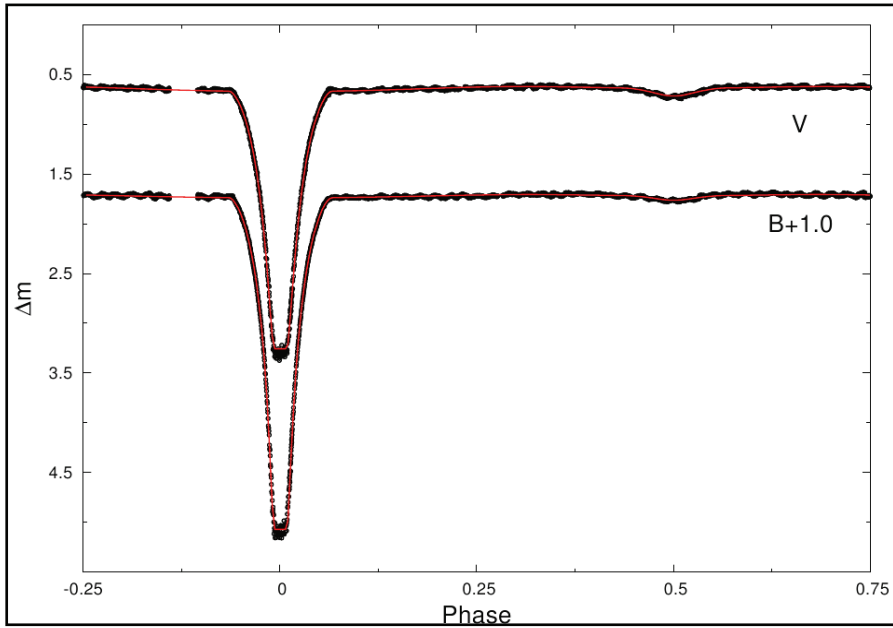
Ως αρχικές παραμέτρους στο πρόγραμμα δόθηκαν αυτές που προέκυψαν από την εργασία των Barblan et al. (1998). Η επιλογή του προγράμματος για τη συνεισφορά ενός τρίτου σώματος στην ολική λαμπρότητα αφέθηκε ως ελεύθερη παράμετρος καθ' όλη τη διάρκεια των επαναλήψεων. Το πρόγραμμα ύστερα από αρκετές επαναλήψεις συνέκλινε σε αποδεκτή από φυσικής σημασίας λύση και οι παράμετροί του συστήματος παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.36 Οι τιμές των φυσικών παραμέτρων του συστήματος TZ Eri, που προέρχονται από το φωτομετρικό μοντέλο του

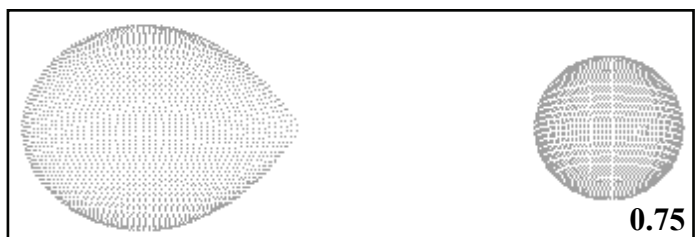
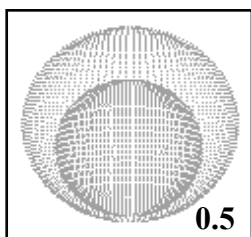
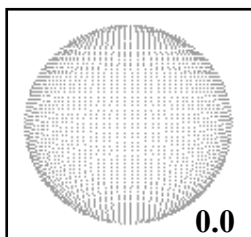
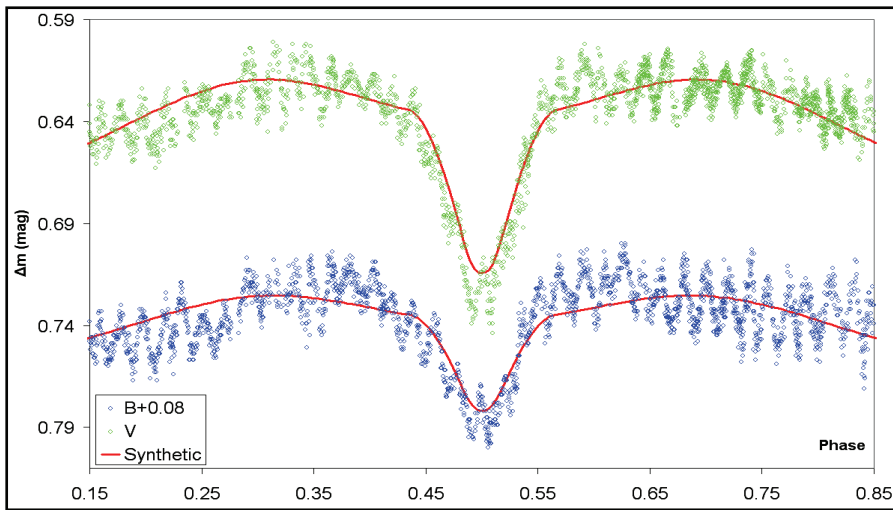
| Parameter / filter | B | V |
|---------------------------|------------|------------|
| q | 0.1773 (5) | 0.1773 (5) |
| i (deg) | 87.69 (7) | 87.69 (7) |
| T ₁ (K) | 9307 (20) | 9307 (20) |
| T ₂ (K)* | 4562 | 4562 |
| g ₁ * | 1.0 | 1.0 |
| g ₂ * | 0.32 | 0.32 |
| A ₁ * | 1.0 | 1.0 |
| A ₂ * | 1.0 | 1.0 |
| Ω ₁ | 6.32 (1) | 6.32 (1) |
| Ω ₂ | 2.175 | 2.175 |
| x ₁ | 0.508 | 0.443 |
| x ₂ | 0.940 | 0.792 |
| L ₁ | 11.16 (1) | 10.71 (1) |
| L ₂ | 0.63 | 1.19 |
| L ₃ | 0.06 (1) | 0.14 (1) |
| L₃ (%) | 0.53 (9) | 1.17 (9) |
| | | |
| χ ² | 0.4999 | 0.4999 |

*assumed

Οι τιμές που σημειώνονται με αστερίσκο, πάρθηκαν είτε από τη βιβλιογραφία είτε προέκυψαν από την θεωρία των διπλών συστημάτων. Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι θεωρητικές καμπύλες διαμέσου των παρατηρησιακών σημείων και η τρισδιάστατη μορφή του διπλού συστήματος σε διάφορες τιμές της φάσης του.



Σχ.5.50-5.51 Οι θεωρητικές καμπύλες (κόκκινες συνεχείς γραμμές) διαμέσου των παρατηρησιακών σημείων στα φίλτρα B και V. Στην άνω εικόνα παρουσιάζεται ολόκληρη η φάση του συστήματος, ενώ στην κάτω έχει απομονωθεί το μέρος της φάσης από 0.15 έως 0.85 στην οποία φαίνεται το φαινόμενο ανάκλασης και οι αναπάσεις του πρωτεύοντος αστέρα.



Σχ.5.52-5.55 Το τρισδιάστατο μοντέλο του συστήματος TZ Eri στις διάφορες τροχιακές φάσεις του.

5.5.1.3 Ανάλυση του O-C διαγράμματος

Για την κατασκευή του O-C διαγράμματος του αστέρα TZ Eri, χρησιμοποιήθηκε η εφημερίδα:

$$Min.I = HJD 2440120.90039 + 2.60610103 \times E$$

Οι χρόνοι παρελθόντων ελαχίστων που χρησιμοποιήθηκαν από τη βιβλιογραφία, αλλά και από τη βάση δεδομένων του Kreiner (προσωπική επικοινωνία), παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα, και βάσει της εφημερίδας του συστήματος βρέθηκαν οι αντίστοιχες O-C τιμές (§3.7). Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 116 χρόνοι ελαχίστων, εκ των οποίων οι 108 προέρχονται από οπτικές παρατηρήσεις, μία προέκυψε με φωτογραφικές μεθόδους, οι 2 από φωτοηλεκτρικές παρατηρήσεις και οι 5 από CCD παρατηρήσεις. Το χρονικό εύρος των παραπάνω παρατηρήσεων κυμαίνεται από το 1930 έως σήμερα. Βλέπουμε ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των χρόνων ελαχίστου προέρχονται από οπτικές παρατηρήσεις σε πρωτεύοντα ελάχιστα, κάτι που ίσως χρήζει αμφισβήτησης για την ποιότητα. Το γεγονός όμως ότι το πρωτεύον ελάχιστο παρουσιάζει περίπου 2.9 mag βάθος στο V-φίλτρο σίγουρα αναιρεί εν μέρει την αμφισβήτηση καθώς όπως θα φανεί και από το O-C διάγραμμα, οι χρόνοι ελαχίστων έχουν πολύ καλή χρονική ροή, και παρουσιάζουν πολύ μικρή διασπορά.

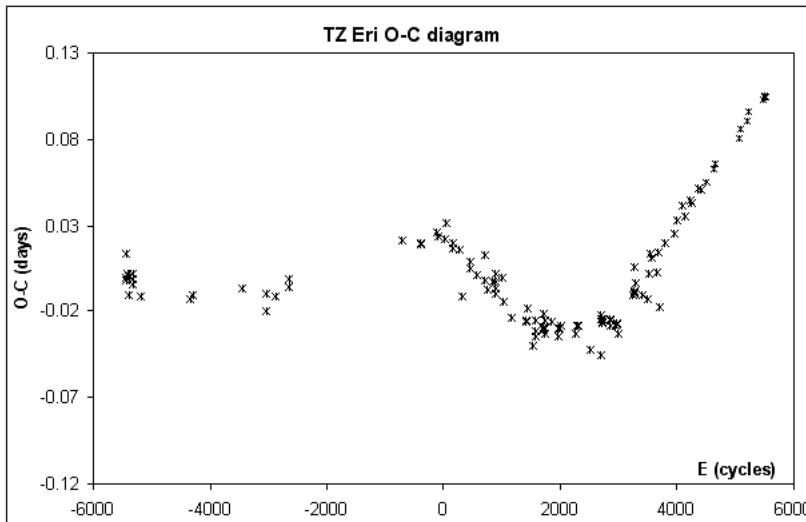
Πίνακας 5.37 Οι χρόνοι ελαχίστου και οι O-C τιμές τους για το σύστημα TZ Eri

| To (HJD) | E (fixed) | O-C (days) | To (HJD) | E (fixed) | O-C (days) | To (HJD) | E (fixed) | O-C (days) |
|-------------|-----------|------------|-------------|-----------|------------|-------------|-----------|------------|
| 25946.33000 | -5439.0 | 0.013 | 42427.29700 | 885.0 | -0.003 | 47824.50800 | 2956.0 | -0.027 |
| 25951.52700 | -5437.0 | -0.002 | 42453.35400 | 895.0 | -0.007 | 47858.38800 | 2969.0 | -0.026 |
| 25951.52900 | -5437.0 | 0.000 | 42453.35400 | 895.0 | -0.007 | 47897.47300 | 2984.0 | -0.033 |
| 26032.32000 | -5406.0 | 0.002 | 42453.35400 | 895.0 | -0.007 | 48538.59600 | 3230.0 | -0.011 |
| 26066.18700 | -5393.0 | -0.011 | 42716.57700 | 996.0 | 0.000 | 48616.78200 | 3260.0 | -0.008 |
| 26066.19800 | -5393.0 | 0.000 | 42807.77600 | 1031.0 | -0.015 | 48619.38600 | 3261.0 | -0.010 |
| 26269.47500 | -5315.0 | 0.002 | 43172.62100 | 1171.0 | -0.024 | 48619.38700 | 3261.0 | -0.009 |
| 26295.53000 | -5305.0 | -0.004 | 43795.47800 | 1410.0 | -0.025 | 48619.40200 | 3261.0 | 0.006 |
| 26295.53300 | -5305.0 | -0.001 | 43821.53800 | 1420.0 | -0.026 | 48653.27200 | 3274.0 | -0.003 |
| 26600.43700 | -5188.0 | -0.011 | 43889.30400 | 1446.0 | -0.018 | 48963.39100 | 3393.0 | -0.010 |
| 28836.47000 | -4330.0 | -0.013 | 44118.62000 | 1534.0 | -0.039 | 49239.63500 | 3499.0 | -0.013 |
| 28930.29200 | -4294.0 | -0.011 | 44212.44500 | 1570.0 | -0.034 | 49270.92300 | 3511.0 | 0.002 |
| 31153.30000 | -3441.0 | -0.007 | 44212.45400 | 1570.0 | -0.025 | 49364.75400 | 3547.0 | 0.013 |
| 32227.00100 | -3029.0 | -0.019 | 44225.47800 | 1575.0 | -0.032 | 49382.99500 | 3554.0 | 0.012 |
| 32234.82900 | -3026.0 | -0.010 | 44582.51600 | 1712.0 | -0.029 | 49661.83900 | 3661.0 | 0.003 |
| 32615.31800 | -2880.0 | -0.011 | 44590.33500 | 1715.0 | -0.029 | 49693.12400 | 3673.0 | 0.015 |
| 33209.51500 | -2652.0 | -0.005 | 44603.36400 | 1720.0 | -0.030 | 49737.39600 | 3690.0 | -0.017 |
| 33209.51900 | -2652.0 | -0.001 | 44603.36500 | 1720.0 | -0.029 | 50008.46700 | 3794.0 | 0.019 |
| 38283.62000 | -705.0 | 0.021 | 44608.58500 | 1722.0 | -0.021 | 50425.44900 | 3954.0 | 0.025 |
| 39112.35800 | -387.0 | 0.019 | 44634.64200 | 1732.0 | -0.025 | 50503.64000 | 3984.0 | 0.033 |
| 39112.35900 | -387.0 | 0.020 | 44663.30200 | 1743.0 | -0.032 | 50790.31900 | 4094.0 | 0.041 |
| 39852.49800 | -103.0 | 0.026 | 44957.79800 | 1856.0 | -0.026 | 50863.28400 | 4122.0 | 0.035 |
| 39886.37500 | -90.0 | 0.024 | 45236.64200 | 1963.0 | -0.035 | 51144.75200 | 4230.0 | 0.044 |
| 40157.40800 | 14.0 | 0.022 | 45241.85920 | 1965.0 | -0.030 | 51189.05400 | 4247.0 | 0.043 |
| 40243.41800 | 47.0 | 0.031 | 45296.58700 | 1986.0 | -0.030 | 51488.76400 | 4362.0 | 0.051 |
| 40527.46900 | 156.0 | 0.017 | 45351.31700 | 2007.0 | -0.028 | 51582.58300 | 4398.0 | 0.050 |

Πίνακας 5.37 συν.

| | | | | | | | | |
|-------------|-------|--------|-------------|--------|--------|-------------|--------|-------|
| 40527.47200 | 156.0 | 0.020 | 46005.44400 | 2258.0 | -0.033 | 51595.61400 | 4403.0 | 0.051 |
| 40837.59400 | 275.0 | 0.016 | 46065.38900 | 2281.0 | -0.028 | 51840.59200 | 4497.0 | 0.055 |
| 40923.56800 | 308.0 | -0.012 | 46109.69220 | 2298.0 | -0.028 | 52184.60500 | 4629.0 | 0.063 |
| 41301.46900 | 453.0 | 0.005 | 46685.62700 | 2519.0 | -0.042 | 52278.42800 | 4665.0 | 0.066 |
| 41335.35200 | 466.0 | 0.009 | 47149.51000 | 2697.0 | -0.045 | 53302.64000 | 5058.0 | 0.081 |
| 41585.53000 | 562.0 | 0.001 | 47157.34900 | 2700.0 | -0.024 | 53373.01000 | 5085.0 | 0.086 |
| 41942.57800 | 699.0 | 0.013 | 47157.35100 | 2700.0 | -0.022 | 53662.29200 | 5196.0 | 0.091 |
| 41989.47300 | 717.0 | -0.002 | 47170.37700 | 2705.0 | -0.027 | 53763.93500 | 5235.0 | 0.096 |
| 42096.31800 | 758.0 | -0.007 | 47170.37800 | 2705.0 | -0.026 | 54368.55806 | 5467.0 | 0.103 |
| 42299.59800 | 836.0 | -0.003 | 47170.37900 | 2705.0 | -0.025 | 54475.40918 | 5508.0 | 0.104 |
| 42414.26000 | 880.0 | -0.009 | 47527.41100 | 2842.0 | -0.029 | 54479.31937 | 5509.5 | 0.105 |
| 42414.26300 | 880.0 | -0.006 | 47532.62700 | 2844.0 | -0.025 | 54496.25828 | 5516.0 | 0.105 |
| 42414.27100 | 880.0 | 0.002 | 47545.65800 | 2849.0 | -0.024 | | | |
| 42427.29700 | 885.0 | -0.003 | 47803.65800 | 2948.0 | -0.028 | | | |

Βάσει του παραπάνω πίνακα και της αστρονομικής εφημερίδας του αστέρα προκύπτει το O-C διάγραμμά του.



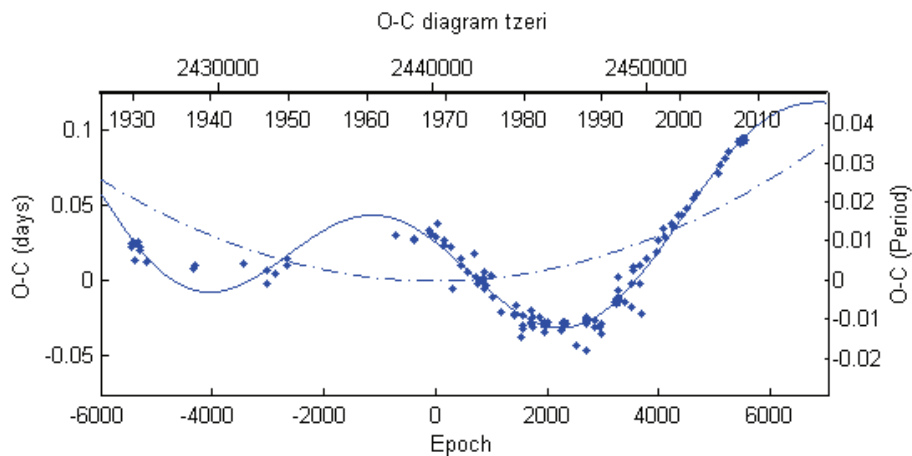
Σχ.5.56 Το O-C διάγραμμα του αστέρα TZ Eri.

Οι χρόνοι ελαχίστων που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτοί του πίνακα 5.37. Σε κάθε χρόνο ελαχίστου τίθεται στατιστικό βάρος, ανάλογα με την μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή του (§5.1). Οι τελικές τροχιακές και φωτομετρικές παράμετροι του συστήματος καθώς και τα σφάλματά τους προκύπτουν χρησιμοποιώντας το λογισμικό Matlab. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε σε αυτό το λογισμικό έχει το όνομα *LITE & Mass transfer* (Zasche 2007) και εμπεριέχει όλες τις εξισώσεις του LITE (§4.4) και τις εξισώσεις της μεταφοράς μάζας (§4.5).

Πίνακας 5.38 Οι αρχικές παράμετροι που χρησιμοποιήσαμε για τον αστέρα TZ Eri στον κώδικα LITE & Mass transfer

| | | | |
|-----------------------------|---------------|-----------------------------------|----------------------|
| JD₀ (HJD) | 2440120.90039 | A (days) | 0.04 |
| P (days) | 2.60610103 | Ω (deg) | 260.0 |
| P₃ (days) | 19000.0 | e | 0.1 |
| T₀ (HJD) | 2460000.0 | c₂ (days/cycle) | 15×10 ⁻¹⁰ |

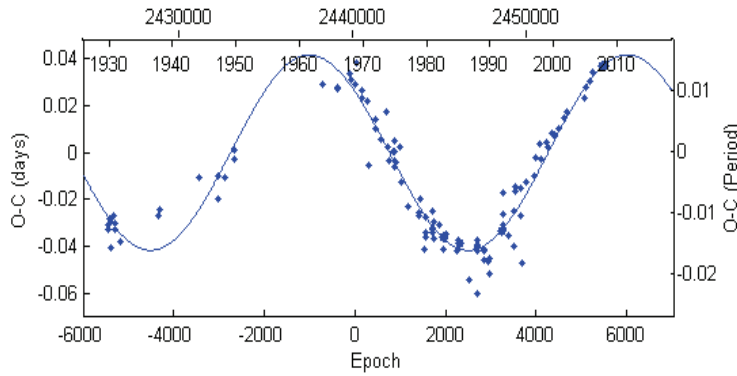
Όπου JD_0 και P είναι ο χρόνος (αρχικού) πρωτεύοντος ελαχίστου και η περίοδος του διπλού συστήματος αντίστοιχα, P_3 είναι η περίοδος του τρίτου σώματος, η ύπαρξη του οποίου υποδηλώνεται από την ημιτονοειδή συμπεριφορά του O-C διαγράμματος, T_0 μία τιμή HJD όπου θεωρούμε ότι ξεκινάει η ημιτονοειδής καμπύλη του O-C, δηλαδή η στιγμή όπου το τρίτο σώμα περνά από το περίαστρο της τροχιάς του, A το πλάτος του ημιτονοειδούς O-C, Ω το μήκος του περιάστρου της τροχιάς του τρίτου σώματος, e η εκκεντρότητα της τροχιάς του τρίτου σώματος και c_2 ο ρυθμός μεταβολής της περιόδου ανά τροχιακό κύκλο.



Σχ.5.57 Το O-C διάγραμμα του αστέρα TZ Eri στο οποίο έχει προσαρμοστεί η θεωρητική καμπύλη (μπλε συνεχής γραμμή) διαμέσου των πειραματικών σημείων. Όσο μεγαλύτερο το σύμβολο του κάθε σημείου τόσο μεγαλύτερο και το στατιστικό βάρος που χρησιμοποιήθηκε. Στον άνω οριζόντιο άξονα αναγράφεται η χρονολογία, στον κάτω οριζόντιο άξονα ο αριθμός των περιφορών, στον αριστερό κατακόρυφο άξονα οι O-C τιμές εκφρασμένες σε days και στον δεξιό κατακόρυφο άξονα οι O-C τιμές εκφρασμένες σε υποπολλαπλάσια της περιόδου του συστήματος.

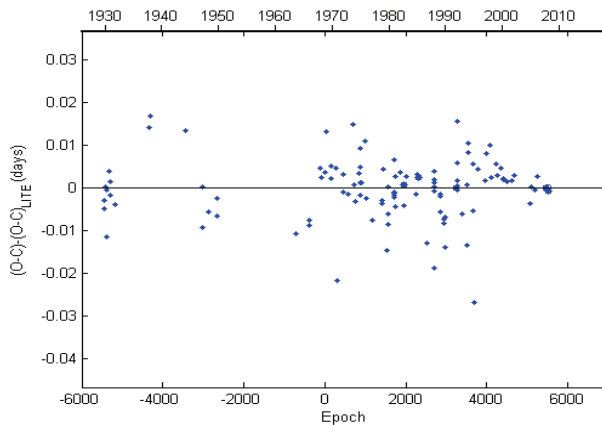
Στο αρχικό O-C διάγραμμα προσαρμόσαμε θεωρητική καμπύλη η οποία είναι το άθροισμα μιας παραβολικής και μιας ημιτονοειδούς συνάρτησης. Όπως αναφέραμε στην εισαγωγή, η παραβολή αντιστοιχεί στην μεταφορά μάζας μεταξύ των μελών του διπλού συστήματος και η ημιτονοειδής συνάρτηση στην ύπαρξη ενός τρίτου μέλους το οποίο περιφέρεται γύρω από το βαρύκεντρο του τριπλού πλέον συστήματος.

Εν συνεχεία το πρόγραμμα κατασκευάζει το διάγραμμα των O-C υπολοίπων (§3.7) αφαιρώντας όμως μόνο την παραβολή από την λύση, οπότε απομένει μόνο η ημιτονοειδής λύση λόγω του LITE.



Σχ. 5.58 Το διάγραμμα των O-C υπολοίπων, στο οποίο έχει αφαιρεθεί η παραβολική και έχει απομείνει μόνο η ημιτονοειδής (μπλε) καμπύλη. Οι άξονες και τα σημεία αναπαριστούν τα ίδια μεγέθη όπως και στο προηγούμενο σχήμα.

Τέλος, το πρόγραμμα εξάγει και το διάγραμμα των O-C υπολοίπων (§5.1), το οποίο είναι αποτέλεσμα αφαίρεσης και των δύο συναρτήσεων από την θεωρητική καμπύλη (λύση).



Σχ. 5.59 Το διάγραμμα των O-C υπολοίπων, στο οποίο έχουν αφαιρεθεί η παραβολική και η ημιτονοειδής λύση. Οι άξονες και τα σημεία αναπαριστούν τα ίδια μεγέθη όπως και στο προηγούμενο σχήμα.

Πίνακας 5.39 Οι τιμές των τροχιακών παραμέτρων του τρίτου σώματος (άνω μέρος) και των παραμέτρων του διπλού συστήματος (κάτω μέρος) που προέκυψαν με την χρήση του κώδικα LITE & Mass transfer

| Parameter | Value | error |
|---|---------------|-----------|
| P_3 (days) | 18281 | 259 |
| P_3 (years) | 50.1 | 0.7 |
| T_0 (HJD) | 2451107 | 2290 |
| A (days) | 0.042 | 0.007 |
| Ω (deg) | 0.0 | 40.4 |
| e | 0.00 | 0.03 |
| $f(m_3)$ | 0.150 | 0.002 |
| $M_{3, \min}$ (M_{\odot}) | 1.24 | 0.01 |
| JD_0 (HJD) | 2440120.89308 | 0.00345 |
| P (days) | 2.6061042 | 0.0000011 |
| c_2 (days/cycle) ($\times 10^{-10}$) | 18.826 | 0.001 |
| \dot{P} (days/year) ($\times 10^{-7}$) | 5.2768 | 0.0003 |
| \dot{M} (M_{\odot} /year) ($\times 10^{-8}$) | 3.0747 | 0.0002 |
| χ^2 | 0.0059 | |

Για να εξάγει ο κώδικας την ελάχιστη μάζα του τρίτου σώματος ($i'=90^\circ$) χρησιμοποιήσαμε τις τιμές $M_1=1.97 M_\odot$ και $M_2=0.37 M_\odot$ (Barblan et al. 1998) για τις μάζες των μελών του διπλού συστήματος αντίστοιχα.

Οι παράμετροι \dot{P} , \dot{M} και τα σφάλματά τους υπολογίστηκαν από τις σχέσεις της παραγράφου §4.5. Από τις παραμέτρους του διπλού συστήματος που προέκυψαν από το πρόγραμμα, προκύπτει η νέα αστρονομική εφημερίδα του βασισμένη στον παραβολικό όρο και η οποία δίνεται από την σχέση:

$$Min.I = HJD\ 2440120.89308(345) + 2.6061042(11) \times E + 18.826(1) \cdot 10^{-10} \times E^2$$

5.5.1.4 Συμπεράσματα

Από τις σχέσεις 4.42 – 4.46 και υποθέτοντας ότι ο επιπρόσθετος συνοδός ανήκει στην Κύρια Ακολουθία μπορούμε να υπολογίσουμε τις φυσικές του παραμέτρους, οι οποίες και δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.40 Οι τιμές των φυσικών παραμέτρων του τρίτου σώματος

| Parameter | Value | Parameter | Value |
|---------------|-------|---------------|-------|
| $M (M_\odot)$ | 1.2 | $R (R_\odot)$ | 1.2 |
| T (K) | 6381 | M (mag) | 3.8 |
| $L (L_\odot)$ | 2.2 | Sp. Type | F7 |

Για τον γίγαντα αστέρα (Barblan et al. 1998) του συστήματος βρίσκουμε $L_2=6.62 L_\odot$, ενώ για τον νάνο αστέρα, εντελώς αντίστοιχα όπως και για το τρίτο σώμα, $L_1=10.73 L_\odot$.

Από τη σχέση 4.47 βρίσκουμε ότι το τρίτο σώμα συνεισφέρει κατά 10.89 % στην ολική φωτεινότητα του τριπλού συστήματος, ενώ θεωρητικά βρίσκουμε ότι το απόλυτο μέγεθος του νάνου αστέρα του συστήματος είναι $M_1=2.12$ mag και άρα έχει περίπου 1.7 mag διαφορά από το τρίτο σώμα. Από τις σχέσεις 4.48 και 4.49 και γνωρίζοντας ότι η απόσταση του συστήματος είναι 270 pc (Barblan et al. 1998), βρίσκουμε ότι αν τα τροχιακά επίπεδα του διπλού συστήματος και του τρίτου σώματος ταυτίζονται (οπότε $m_3=m_{3,min}$), τότε η μέγιστη γωνιακή απόσταση του τρίτου σώματος από το διπλό σύστημα είναι 81.8 mas.

Για την κατασκευή του φωτομετρικού μοντέλου του συστήματος, όπως αναφέρθηκε, χρησιμοποιήθηκαν ως αρχικές παράμετροι αυτές που προέκυψαν από την επίλυσή του σε επτά φωτομετρικά φίλτρα από τους Barblan et al. (1998). Δυστυχώς, όμως, οι καμπύλες φωτός τους είναι πολύ υποδειέστερες σε ποιότητα από ότι οι δικές μας, με αποτέλεσμα οι τελικές παράμετροι να αλλάξουν. Ο λόγος μαζών, λόγω ότι προέρχεται από φασματοσκοπικές παρατηρήσεις της ίδιας εργασίας, κρατήθηκε μέσα στα όρια του σφάλματος του ($q = 0.193 \pm 0.013$). Λόγω του ότι κατά το πρωτεύον ελάχιστο έχουμε ολική έκλειψη του νάνου αστέρα του συστήματος (θερμότερος), η κλίση του συστήματος αφέθηκε σαν ελεύθερη παράμετρος στο πρόγραμμα και με εύρος τιμών $87^\circ \pm 1^\circ$. Από την ίδια εργασία είδαμε ότι οι θερμοκρασίες των αστέρων του συστήματος εξήχθησαν βάσει του δείκτη B-V που παρουσίαζαν, και χρησιμοποιώντας τες για την κατασκευή του

δικού μας μοντέλου, το πρόγραμμα δεν μπορούσε να συγκλίνει. Όμως η μέθοδος του προσδιορισμού της θερμοκρασίας που χρησιμοποίησαν οι Barblan et al. (1998) δεν είναι ιδιαίτερος αξιόπιστος για τον θερμό αστέρα, αφού δεν υπάρχει φάση κατά την οποία να λαμβάνουμε φως μόνο από αυτόν. Αντιθέτως, κατά την ολική έκλειψη του πρωτεύοντος ελαχίστου, ο θερμός αστέρας αποκρύπτεται εντελώς, οπότε και το φως που λαμβάνουμε προέρχεται εξ' ολοκλήρου από τον γίγαντα αστέρα. Επομένως, θεωρήσαμε αξιόπιστη την τιμή της θερμοκρασίας του γίγαντα αστέρα που προέκυψε με αυτή τη μέθοδο, και αφέθηκε σαν ελεύθερη παράμετρος η θερμοκρασία του νάνου αστέρα. Λόγω της τεράστιας διαφοράς θερμοκρασίας των αστέρων ($T_1=9323$ K και $T_2=4562$ K) παρατηρήθηκε πολύ έντονα το φαινόμενο της ανάκλασης. Ο ανερχόμενος και κατερχόμενος κλάδος του δευτερεύοντος ελαχίστου υποδηλώνουν ακριβώς αυτό το φαινόμενο και επιπροσθέτως είναι προφανές ότι τα μέγιστα της λαμπρότητας του συστήματος δεν είναι στις φάσεις 0.25 και 0.75, όπως αναμένεται θεωρητικά, αλλά παρουσιάζονται στις φάσεις ~ 0.43 και ~ 0.57 . Η συνεισφορά ενός τρίτου σώματος στην ολική λαμπρότητα του συστήματος αφέθηκε ως ελεύθερη παράμετρος, όμως τα αποτελέσματα έδειξαν ότι αυτό συνεισφέρει κατά 0.53% και 1.17% στα φίλτρα B και V αντίστοιχα, τιμές που είναι μέσα στα όρια του σφάλματος. Συνοπτικά, μπορούμε να πούμε ότι η θερμοκρασία του νάνου αστέρα είχε υποεκτιμηθεί από τους Barblan et al. ($T_1 \sim 7770$ K) και σύμφωνα με το δικό μας μοντέλο, το οποίο βασίζεται σε σαφώς καλύτερης ποιότητας καμπύλες φωτός, βρέθηκε ότι πρέπει να έχει περίπου $\sim 9300^\circ$, και επομένως είναι φασματικού τύπου A1/2 έναντι A5/6 που είχε υπολογιστεί.

Από την μορφή του O-C διαγράμματος που παρουσιάζει, υποθέσαμε ότι πρόκειται για διπλό εκλειπτικό σύστημα στο οποίο υπάρχει και τρίτο μέλος, αλλά λαμβάνει χώρα και το φαινόμενο της ανταλλαγής μάζας μεταξύ των μελών του διπλού συστήματος

Ο εν λόγω αστέρας παρατηρήθηκε φωτομετρικά και υπολογίστηκαν τέσσερις χρόνοι φωτομετρικών ελαχίστων. Από τη βιβλιογραφία συλλέξαμε και παλαιότερους χρόνους ελαχίστων και κατασκευάστηκε το διάγραμμα O-C του συστήματος.

Η ανάλυση του O-C διαγράμματος, με τη βοήθεια H/Y και εξειδικευμένου υπολογιστικού κώδικα, έδειξε ότι στο σύστημα λαμβάνει χώρα το LITE και το φαινόμενο της ανταλλαγής μάζας, υπολογίστηκαν οι τροχιακές και φυσικές παράμετροι του τρίτου σώματος βασιζόμενοι στο ότι ανήκει στην Κύρια Ακολουθία, ο ρυθμός αύξησης της περιόδου του διπλού συστήματος και ο ρυθμός μεταφοράς μάζας μεταξύ των μελών. Από το πρόσημο του παραβολικού όρου προκύπτει μία συνεχόμενη αύξηση της τροχιακής περιόδου του διπλού συστήματος με ρυθμό $5.2768(3) \times 10^{-7}$ days/year και μεταφορά μάζας από τον μικρότερης μάζας αστέρα (γίγαντας) στον μεγαλύτερης μάζας αστέρα (νάνος) με ρυθμό $3.0747(2) \times 10^{-8} M_\odot$ /year, κάτι που έρχεται σε συμφωνία ποιοτικά με την επίλυση του φωτομετρικού μας μοντέλου με τους Barblan et al. (1998) οι οποίοι έκαναν μελέτη της τροχιακής περιόδου αλλά επέλυσαν και το φωτομετρικό μοντέλο του συστήματος (ο γίγαντας αστέρας έχει γεμίσει τον λοβό Roche του (§1.4.5.5)), αλλά επίσης και με τους Kaitchuck & Honeycutt (1982) και Kaitchuck & Park (1988) οι οποίοι πραγματοποίησαν μελέτες για την ύπαρξη ενός δίσκου συσσώρευσης που οφείλεται στην μεταφορά μάζας μεταξύ των μελών.

Η σύγκριση των δύο μεθόδων για την ανίχνευση ενός τρίτου σώματος, έδειξε διαφορετικά αποτελέσματα. Η επίλυση του φωτομετρικού μοντέλου, μέθοδος η οποία στηρίζεται αυστηρά στην φωτεινότητα και το φασματικό τύπο του τρίτου

σώματος, έδειξε ότι αυτό συνεισφέρει ~1% στην ολική φωτεινότητα του συστήματος, ενώ αντιθέτως η O-C ανάλυση του συστήματος, μέθοδος η οποία στηρίζεται αυστηρά στην διαταραχή της περιόδου του συστήματος, έδειξε ότι το τρίτο μέλος πρέπει να έχει ελάχιστη μάζα $\sim 1.2 M_{\odot}$ και περίοδο ~ 50 yrs. Η υπόθεση ότι ανήκει στην Κύρια Ακολουθία, οδήγησε στο συμπέρασμα ότι θα συνεισφέρει ~10% στην ολική φωτεινότητα του συστήματος, κάτι όμως που αντικρούεται από την επίλυση του φωτομετρικού μοντέλου. Εφόσον φωτομετρικά δεν αποδείχθηκε η ύπαρξή του, τότε η υπόθεση ότι είναι αστέρας της Κυρίας Ακολουθίας απορρίπτεται. Το γεγονός όμως ότι το O-C διάγραμμα παρουσιάζει περιοδική κατανομή οδηγεί στο συμπέρασμα της ύπαρξης ενός επιπρόσθετου συνοδού, αφού λόγω του φασματικού τύπου του νάνου (A1/2) αλλά και της τάξης φωτεινότητας του συνοδού (γίγαντας) η μαγνητική δραστηριότητα δεν μπορεί να αποτελεί λύση. Επομένως, το γεγονός ότι το τρίτο σώμα ανιχνεύεται μόνο μέσω της O-C ανάλυσης, αλλά ταυτόχρονα όχι και φωτομετρικά, μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι πρόκειται για εξελιγμένο αστέρα με μάζα $\sim 1.2 M_{\odot}$ (π.χ. λευκός νάνος, αστέρας νετρονίων ή μελανή οπή) και σε απόσταση ~ 15.5 AU από το διπλό σύστημα.

Το διάγραμμα των O-C υπολοίπων δεν δείχνει κάποια ιδιαίτερη κατανομή, οπότε με βεβαιότητα εξάγεται το συμπέρασμα ότι το LITE και η μεταφορά μάζας μεταξύ των μελών του διπλού συστήματος είναι τα μοναδικά φαινόμενα τα οποία διαμορφώνουν το O-C διάγραμμα του αστέρα.

Για την ανίχνευση του τρίτου σώματος, απαιτούνται φασματοσκοπικές παρατηρήσεις σε συχνότητες υψηλότερης ενέργειας (π.χ. EUV, ακτίνες-X) ώστε να επιβεβαιωθεί ή να καταρριφθεί η ύπαρξή του.

Τέλος, πρέπει να προσθέσουμε ότι ο νάνος αστέρας του συστήματος παρουσιάζει περιοδικές αναπάσεις με ημιπλάτος ~ 10 mmag και κυρίαρχη συχνότητα ~ 18.7 c/d, όπως προέκυψε από την ανάλυση των φωτομετρικών καμπύλων. Η εκτενής ανάλυση (Liakos et al. 2008) αυτού του φαινομένου δεν παρουσιάστηκε στην παρούσα εργασία καθώς ξεφεύγει από τα πλαίσια της.

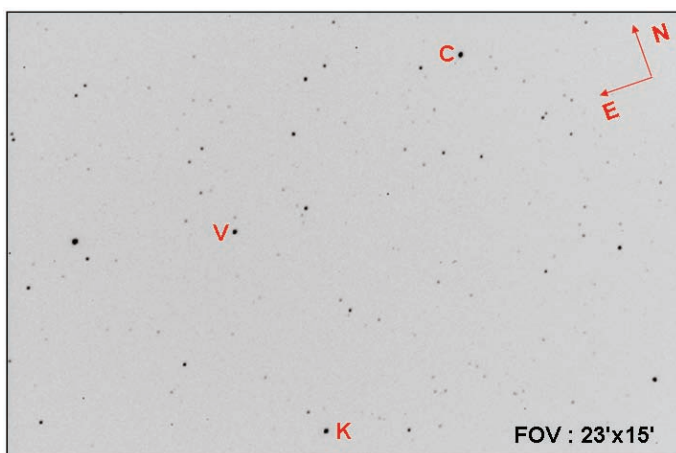
5.5.2 Το σύστημα VX Lac

5.5.2.1 Ιστορικά στοιχεία

Το εκλειπτικό σύστημα VX Lac (= BD +37 4662 = GSC 03214-01295, $\alpha_{2000}=22^{\text{h}}41^{\text{m}}0.6^{\text{s}}$, $\delta_{2000}=+38^{\circ}19'20.0''$) έχει φαινόμενο μέγεθος 10.55 mag στο V φίλτρο και τροχιακή περίοδο περίπου 1 day. Ο φασματικός του τύπος αρχικά είχε υπολογιστεί ως F0 (Cannon 1934), ενώ το 1990 η Svehnikon έβγαλε το συμπέρασμα ότι οι φασματικοί τύποι των αστερών που αποτελούν το σύστημα είναι F0 και K0IV αντίστοιχα. Δυστυχώς, δεν έχει παρατηρηθεί έως σήμερα η καμπύλη φωτός του συστήματος, ενώ ούτε έχει υπολογιστεί ο φασματοσκοπικός λόγος μαζών του. Ο Kreiner (1971) συμπεριέλαβε το σύστημα στην μελέτη του σχετικά με τις μεταβολές της περιόδου του, αλλά τότε λόγω έλλειψης παρατηρησιακών δεδομένων δεν ήταν σε θέση να εντοπίσει το LITE.

5.5.2.2 Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι παρατηρήσεις του συστήματος διεξήχθησαν στο Γεροσταθοπούλειο Πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (κεφ.2) στις 6, 15, 29/9/2007 χρησιμοποιώντας το R φωτομετρικό φίλτρο με χρόνο έκθεσης 15 sec. Στο παρακάτω σχήμα παρατίθεται το πεδίο του αστέρα VX Lac (V), όπου δίνονται η φορά του, οι διαστάσεις του και οι αστέρες σύγκρισης (C) και ελέγχου (K) που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία.

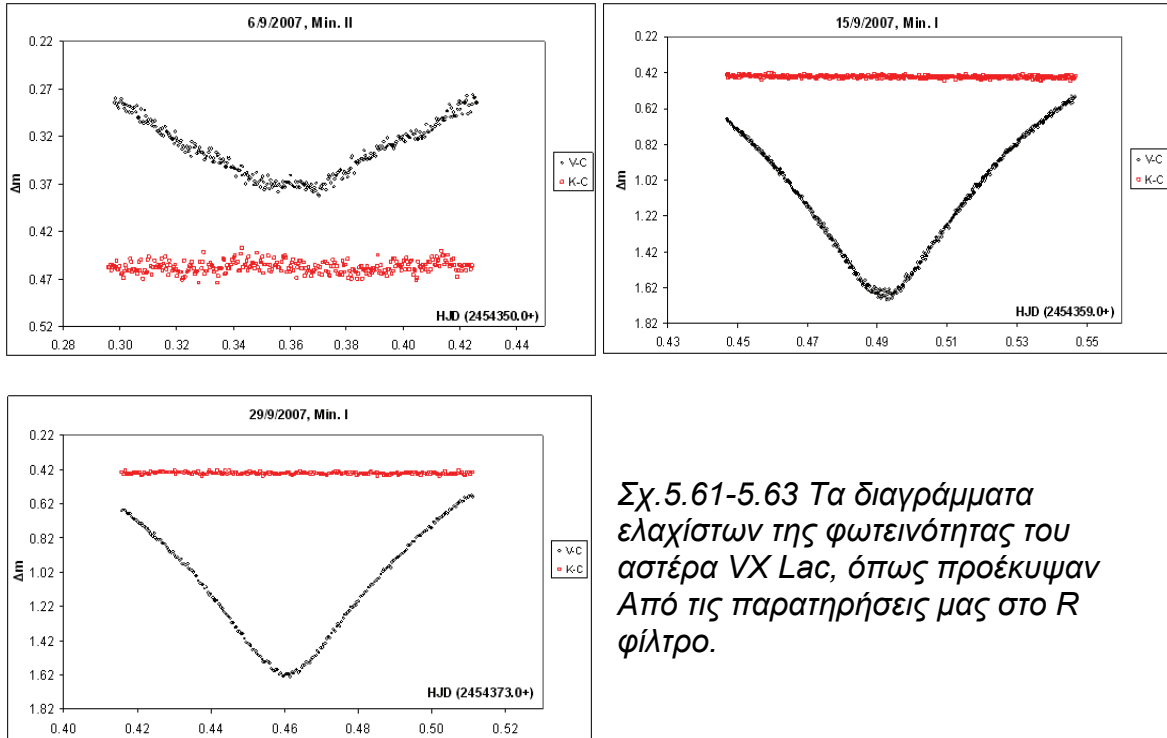


Σχ.5.60 Το πεδίο του αστέρα VX Lac, και οι αστέρες σύγκρισης και ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν στις παρατηρήσεις μας.

Στο πρόγραμμα AIP4WIN χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των ακτίνων των διαφραγμάτων 4, 6 και 8 αντίστοιχα (§3.1).

Πίνακας 5.41 Οι αστέρες σύγκρισης (C) και ελέγχου (K) που χρησιμοποιήθηκαν στην φωτομετρία

| Αστέρας | Mag | Χρήση στη φωτομετρία |
|---------------|-----------|----------------------|
| VX Lac | 10.9 / 13 | V |
| GSC 3214:1046 | 10.77 | C |
| GSC 3214:1611 | 10.9 | K |



Σχ. 5.61-5.63 Τα διαγράμματα ελαχίστων της φωτεινότητας του αστέρα VX Lac, όπως προέκυψαν Από τις παρατηρήσεις μας στο R φίλτρο.

Οι τιμές των χρόνων ελαχίστων που προέκυψαν από τις παρατηρήσεις μας, παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.42 Οι χρόνοι ελαχίστου που προέκυψαν από τις παρατηρήσεις μας

| Minima (HJD) | Error | Type |
|---------------|---------|------|
| 2454350.36051 | 0.00006 | II |
| 2454359.49220 | 0.00003 | I |
| 2454373.46069 | 0.00003 | I |

5.5.2.3 Ανάλυση του O-C διαγράμματος

Για την κατασκευή του O-C διαγράμματος του αστέρα VX Lac, χρησιμοποιήθηκε η εφημερίδα:

$$Min.I = HJD 2440908.91020 + 1.0744961 \times E$$

Οι χρόνοι παρελθόντων ελαχίστων που χρησιμοποιήθηκαν από τη βιβλιογραφία, αλλά και από τη βάση δεδομένων του Kreiner (προσωπική επικοινωνία), παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα, και βάσει της εφημερίδας του συστήματος βρέθηκαν οι αντίστοιχες O-C τιμές (§3.7). Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 305 χρόνοι ελαχίστων, εκ των οποίων οι 280 προέρχονται από οπτικές παρατηρήσεις, 10 προέκυψαν με φωτογραφικές μεθόδους και οι 15 από CCD παρατηρήσεις. Το χρονικό εύρος των παραπάνω παρατηρήσεων κυμαίνεται από το 1932 έως σήμερα και οι περισσότεροι χρόνοι πρωτεύοντων ελαχίστων προέρχονται από οπτικές παρατηρήσεις, όμως λόγω του ότι το εύρος των μεταβολών είναι 1.3 mag μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστες.

Πίνακας 5.43 Οι χρόνοι ελαχίστου και οι O-C τιμές τους για το σύστημα VX Lac

| To (HJD) | E (fixed) | O-C (days) | To (HJD) | E (fixed) | O-C (days) | To (HJD) | E (fixed) | O-C (days) |
|---------------|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|
| 2424791.48500 | -15000.0 | 0.016 | 2442416.42200 | 1403.0 | -0.006 | 2446975.50300 | 5646.0 | -0.012 |
| 2426594.47700 | -13322.0 | 0.004 | 2442416.42300 | 1403.0 | -0.005 | 2447003.44400 | 5672.0 | -0.008 |
| 2426940.46600 | -13000.0 | 0.005 | 2442428.25000 | 1414.0 | 0.002 | 2447004.51800 | 5673.0 | -0.009 |
| 2427384.23300 | -12587.0 | 0.005 | 2442428.25800 | 1414.0 | 0.010 | 2447061.47200 | 5726.0 | -0.003 |
| 2427385.30600 | -12586.0 | 0.004 | 2442565.78100 | 1542.0 | -0.002 | 2447063.62200 | 5728.0 | -0.002 |
| 2427385.30700 | -12586.0 | 0.005 | 2442575.45600 | 1551.0 | 0.002 | 2447064.69300 | 5729.0 | -0.005 |
| 2427602.36100 | -12384.0 | 0.011 | 2442575.45900 | 1551.0 | 0.005 | 2447065.76800 | 5730.0 | -0.005 |
| 2428814.37200 | -11256.0 | -0.010 | 2442604.46500 | 1578.0 | 0.000 | 2447088.32700 | 5751.0 | -0.010 |
| 2429146.38900 | -10947.0 | -0.012 | 2442608.76200 | 1582.0 | -0.001 | 2447088.34000 | 5751.0 | 0.003 |
| 2429630.98100 | -10496.0 | -0.018 | 2442624.88200 | 1597.0 | 0.002 | 2447108.74800 | 5770.0 | -0.005 |
| 2432479.47600 | -7845.0 | -0.012 | 2442633.47500 | 1605.0 | -0.001 | 2447117.34600 | 5778.0 | -0.003 |
| 2432781.40500 | -7564.0 | -0.017 | 2442637.77400 | 1609.0 | 0.000 | 2447150.65700 | 5809.0 | -0.001 |
| 2432868.43700 | -7483.0 | -0.019 | 2442664.63400 | 1634.0 | -0.003 | 2447159.24500 | 5817.0 | -0.009 |
| 2433170.37700 | -7202.0 | -0.012 | 2442664.63900 | 1634.0 | 0.002 | 2447307.53800 | 5955.0 | 0.004 |
| 2433185.41900 | -7188.0 | -0.013 | 2442665.71000 | 1635.0 | -0.001 | 2447363.40300 | 6007.0 | -0.005 |
| 2433561.49800 | -6838.0 | -0.008 | 2442679.67900 | 1648.0 | -0.001 | 2447378.43900 | 6021.0 | -0.012 |
| 2433792.51200 | -6623.0 | -0.011 | 2442692.57500 | 1660.0 | 0.001 | 2447381.67600 | 6024.0 | 0.001 |
| 2433863.43500 | -6557.0 | -0.004 | 2442707.61700 | 1674.0 | 0.000 | 2447382.74300 | 6025.0 | -0.006 |
| 2434195.45200 | -6248.0 | -0.007 | 2442722.66100 | 1688.0 | 0.001 | 2447392.41700 | 6034.0 | -0.003 |
| 2434224.46500 | -6221.0 | -0.005 | 2442908.54400 | 1861.0 | -0.003 | 2447392.42400 | 6034.0 | 0.004 |
| 2434239.50500 | -6207.0 | -0.008 | 2442965.49100 | 1914.0 | -0.005 | 2447410.68400 | 6051.0 | -0.002 |
| 2434685.42600 | -5792.0 | -0.003 | 2442984.83200 | 1932.0 | -0.005 | 2447411.75600 | 6052.0 | -0.005 |
| 2434958.35200 | -5538.0 | 0.001 | 2442984.84200 | 1932.0 | 0.005 | 2447412.83400 | 6053.0 | -0.001 |
| 2434988.43700 | -5510.0 | 0.000 | 2442999.87800 | 1946.0 | -0.002 | 2447425.72300 | 6065.0 | -0.006 |
| 2435018.52100 | -5482.0 | -0.002 | 2443036.41200 | 1980.0 | 0.000 | 2447438.62300 | 6077.0 | 0.000 |
| 2435349.47200 | -5174.0 | 0.005 | 2443301.80600 | 2227.0 | -0.007 | 2447439.69100 | 6078.0 | -0.006 |
| 2435421.45700 | -5107.0 | -0.002 | 2443301.81100 | 2227.0 | -0.002 | 2447508.47100 | 6142.0 | 0.006 |
| 2435723.39100 | -4826.0 | -0.001 | 2443357.68200 | 2279.0 | -0.005 | 2447534.24400 | 6166.0 | -0.009 |
| 2436128.48600 | -4449.0 | 0.009 | 2443371.65100 | 2292.0 | -0.004 | 2447539.61900 | 6171.0 | -0.007 |
| 2436762.43000 | -3859.0 | 0.000 | 2443373.79700 | 2294.0 | -0.007 | 2447767.41500 | 6383.0 | -0.004 |
| 2437196.52400 | -3455.0 | -0.002 | 2443410.33800 | 2328.0 | 0.001 | 2447772.79100 | 6388.0 | 0.000 |
| 2437526.39800 | -3148.0 | 0.002 | 2443510.26200 | 2421.0 | -0.003 | 2447799.64900 | 6413.0 | -0.005 |
| 2437526.39900 | -3148.0 | 0.003 | 2443718.71400 | 2615.0 | -0.004 | 2447823.29400 | 6435.0 | 0.001 |
| 2437556.48400 | -3120.0 | 0.002 | 2443774.58500 | 2667.0 | -0.006 | 2447838.32900 | 6449.0 | -0.007 |
| 2437888.51200 | -2811.0 | 0.010 | 2443776.73900 | 2669.0 | -0.001 | 2447853.37300 | 6463.0 | -0.005 |
| 2437901.40300 | -2799.0 | 0.007 | 2443790.70900 | 2682.0 | 0.000 | 2447910.32400 | 6516.0 | -0.003 |
| 2438551.46900 | -2194.0 | 0.003 | 2444022.79700 | 2898.0 | -0.003 | 2448042.48700 | 6639.0 | -0.003 |
| 2438623.46600 | -2127.0 | 0.009 | 2444117.35500 | 2986.0 | -0.001 | 2448061.82500 | 6657.0 | -0.006 |
| 2439012.43300 | -1765.0 | 0.008 | 2444136.69300 | 3004.0 | -0.003 | 2448085.46700 | 6679.0 | -0.003 |
| 2439025.32700 | -1753.0 | 0.008 | 2444189.34700 | 3053.0 | 0.000 | 2448113.40700 | 6705.0 | 0.000 |
| 2439026.39800 | -1752.0 | 0.005 | 2444437.54900 | 3284.0 | -0.006 | 2448143.49400 | 6733.0 | 0.002 |
| 2439027.47000 | -1751.0 | 0.002 | 2444525.66200 | 3366.0 | -0.002 | 2448159.60800 | 6748.0 | -0.002 |
| 2439027.47800 | -1751.0 | 0.010 | 2444564.34500 | 3402.0 | -0.001 | 2448160.68100 | 6749.0 | -0.003 |
| 2439055.41200 | -1725.0 | 0.008 | 2444786.75700 | 3609.0 | -0.010 | 2448170.35400 | 6758.0 | -0.001 |
| 2439291.80100 | -1505.0 | 0.007 | 2444816.84800 | 3637.0 | -0.005 | 2448188.61600 | 6775.0 | -0.005 |
| 2439363.79400 | -1438.0 | 0.009 | 2444853.38000 | 3671.0 | -0.005 | 2448202.58400 | 6788.0 | -0.006 |
| 2439679.69400 | -1144.0 | 0.007 | 2444854.45100 | 3672.0 | -0.009 | 2448459.38500 | 7027.0 | -0.009 |
| 2439705.48100 | -1120.0 | 0.006 | 2444871.64500 | 3688.0 | -0.007 | 2448460.46100 | 7028.0 | -0.008 |

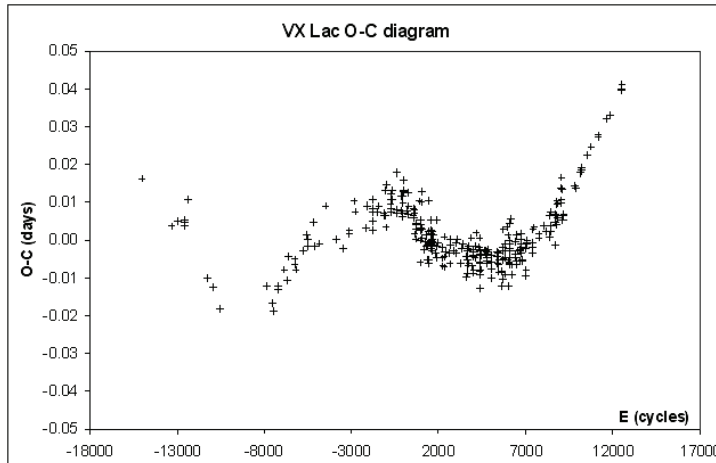
Πίνακας 5.43 συν.

| | | | | | | | | |
|---------------|---------|--------|---------------|--------|--------|---------------|---------|--------|
| 2439736.64800 | -1091.0 | 0.013 | 2444885.61600 | 3701.0 | -0.004 | 2448461.54100 | 7029.0 | -0.002 |
| 2439765.65300 | -1064.0 | 0.007 | 2444885.61800 | 3701.0 | -0.002 | 2448502.37400 | 7067.0 | 0.000 |
| 2439793.59800 | -1038.0 | 0.015 | 2444895.28800 | 3710.0 | -0.003 | 2448503.44800 | 7068.0 | -0.001 |
| 2439818.30000 | -1015.0 | 0.003 | 2444900.65700 | 3715.0 | -0.006 | 2448517.41600 | 7081.0 | -0.001 |
| 2440084.78400 | -767.0 | 0.012 | 2444911.40200 | 3725.0 | -0.006 | 2448862.32700 | 7402.0 | -0.003 |
| 2440097.67500 | -755.0 | 0.009 | 2444925.37500 | 3738.0 | -0.002 | 2448863.40300 | 7403.0 | -0.002 |
| 2440125.61000 | -729.0 | 0.007 | 2445100.52000 | 3901.0 | 0.001 | 2448866.63100 | 7406.0 | 0.003 |
| 2440149.25000 | -707.0 | 0.009 | 2445172.50400 | 3968.0 | -0.007 | 2448891.34100 | 7429.0 | -0.001 |
| 2440151.40100 | -705.0 | 0.011 | 2445200.43900 | 3994.0 | -0.009 | 2448934.32500 | 7469.0 | 0.003 |
| 2440197.60700 | -662.0 | 0.013 | 2445200.44500 | 3994.0 | -0.003 | 2449213.69200 | 7729.0 | 0.001 |
| 2440207.27500 | -653.0 | 0.011 | 2445214.41200 | 4007.0 | -0.004 | 2449241.62800 | 7755.0 | 0.001 |
| 2440472.67200 | -406.0 | 0.007 | 2445227.30700 | 4019.0 | -0.003 | 2449241.62900 | 7755.0 | 0.002 |
| 2440483.41800 | -396.0 | 0.008 | 2445258.46600 | 4048.0 | -0.004 | 2449271.71400 | 7783.0 | 0.001 |
| 2440510.29000 | -371.0 | 0.018 | 2445261.68600 | 4051.0 | -0.008 | 2449557.53300 | 8049.0 | 0.004 |
| 2440750.96700 | -147.0 | 0.008 | 2445317.56300 | 4103.0 | -0.005 | 2449664.98100 | 8149.0 | 0.002 |
| 2440801.47200 | -100.0 | 0.011 | 2445328.31100 | 4113.0 | -0.002 | 2449688.62000 | 8171.0 | 0.002 |
| 2440857.34400 | -48.0 | 0.010 | 2445342.28300 | 4126.0 | 0.002 | 2449917.49200 | 8384.0 | 0.006 |
| 2440858.41500 | -47.0 | 0.006 | 2445504.52800 | 4277.0 | -0.002 | 2449920.71000 | 8387.0 | 0.001 |
| 2440858.41600 | -47.0 | 0.007 | 2445561.47200 | 4330.0 | -0.006 | 2449945.43000 | 8410.0 | 0.008 |
| 2440861.64400 | -44.0 | 0.012 | 2445562.54700 | 4331.0 | -0.006 | 2449963.69100 | 8427.0 | 0.002 |
| 2440884.21000 | -23.0 | 0.013 | 2445574.37300 | 4342.0 | 0.001 | 2449978.73400 | 8441.0 | 0.002 |
| 2440913.22400 | 4.0 | 0.016 | 2445577.58300 | 4345.0 | -0.013 | 2450001.30000 | 8462.0 | 0.004 |
| 2440915.37000 | 6.0 | 0.013 | 2445602.30000 | 4368.0 | -0.009 | 2450278.51500 | 8720.0 | -0.001 |
| 2441162.49900 | 236.0 | 0.008 | 2445602.30100 | 4368.0 | -0.008 | 2450278.52100 | 8720.0 | 0.005 |
| 2441217.30300 | 287.0 | 0.012 | 2445603.38000 | 4369.0 | -0.004 | 2450278.52300 | 8720.0 | 0.007 |
| 2441246.30900 | 314.0 | 0.007 | 2445603.38100 | 4369.0 | -0.003 | 2450320.43200 | 8759.0 | 0.010 |
| 2441246.31100 | 314.0 | 0.009 | 2445608.75200 | 4374.0 | -0.004 | 2450333.32500 | 8771.0 | 0.010 |
| 2441507.41300 | 557.0 | 0.008 | 2445617.34400 | 4382.0 | -0.008 | 2450340.84100 | 8778.0 | 0.004 |
| 2441522.45400 | 571.0 | 0.007 | 2445622.72200 | 4387.0 | -0.003 | 2450369.85500 | 8805.0 | 0.007 |
| 2441536.42200 | 584.0 | 0.006 | 2445664.62600 | 4426.0 | -0.004 | 2450391.34800 | 8825.0 | 0.010 |
| 2441565.42900 | 611.0 | 0.002 | 2445673.21800 | 4434.0 | -0.008 | 2450438.62200 | 8869.0 | 0.006 |
| 2441592.29800 | 636.0 | 0.008 | 2445878.45200 | 4625.0 | -0.003 | 2450638.48200 | 9055.0 | 0.010 |
| 2441607.34000 | 650.0 | 0.007 | 2445935.40000 | 4678.0 | -0.003 | 2450666.42000 | 9081.0 | 0.011 |
| 2441622.37600 | 664.0 | 0.000 | 2445939.69800 | 4682.0 | -0.003 | 2450666.42300 | 9081.0 | 0.014 |
| 2441623.45300 | 665.0 | 0.003 | 2445991.27300 | 4730.0 | -0.004 | 2450666.42600 | 9081.0 | 0.017 |
| 2441650.31700 | 690.0 | 0.004 | 2446006.31400 | 4744.0 | -0.006 | 2450684.68900 | 9098.0 | 0.013 |
| 2441664.28500 | 703.0 | 0.004 | 2446010.61400 | 4748.0 | -0.004 | 2450708.32000 | 9120.0 | 0.005 |
| 2441897.45700 | 920.0 | 0.010 | 2446024.58000 | 4761.0 | -0.006 | 2450741.63100 | 9151.0 | 0.007 |
| 2441911.41500 | 933.0 | 0.000 | 2446024.58300 | 4761.0 | -0.003 | 2450751.30100 | 9160.0 | 0.007 |
| 2441913.55800 | 935.0 | -0.006 | 2446025.65600 | 4762.0 | -0.005 | 2451430.39600 | 9793.0 | 0.014 |
| 2441928.61000 | 949.0 | 0.003 | 2446068.63800 | 4802.0 | -0.002 | 2451478.74200 | 9837.0 | 0.014 |
| 2441939.35600 | 959.0 | 0.004 | 2446297.49800 | 5015.0 | -0.010 | 2451822.58500 | 10157.0 | 0.018 |
| 2441942.57800 | 962.0 | 0.003 | 2446329.73700 | 5045.0 | -0.006 | 2451866.64000 | 10198.0 | 0.019 |
| 2441971.59200 | 989.0 | 0.005 | 2446329.73900 | 5045.0 | -0.004 | 2451880.60900 | 10211.0 | 0.019 |
| 2441981.25800 | 998.0 | 0.001 | 2446352.30000 | 5066.0 | -0.007 | 2452241.64300 | 10547.0 | 0.022 |
| 2441981.26000 | 998.0 | 0.003 | 2446357.67400 | 5071.0 | -0.006 | 2452489.85400 | 10778.0 | 0.025 |
| 2441981.27000 | 998.0 | 0.013 | 2446657.46000 | 5350.0 | -0.004 | 2452887.42000 | 11148.0 | 0.027 |
| 2442026.39600 | 1040.0 | 0.010 | 2446674.65000 | 5366.0 | -0.006 | 2452899.24000 | 11159.0 | 0.028 |
| 2442187.55800 | 1190.0 | -0.003 | 2446702.59000 | 5392.0 | -0.003 | 2453394.58700 | 11620.0 | 0.032 |
| 2442258.47700 | 1256.0 | 0.000 | 2446727.30000 | 5415.0 | -0.007 | 2453650.31800 | 11858.0 | 0.033 |
| 2442300.38100 | 1295.0 | -0.002 | 2446742.34600 | 5429.0 | -0.004 | 2454350.36051 | 12509.5 | 0.041 |

Πίνακας 5.43 συν.

| | | | | | | | | |
|---------------|--------|--------|---------------|--------|--------|---------------|---------|-------|
| 2442304.68200 | 1299.0 | 0.001 | 2446770.27800 | 5455.0 | -0.008 | 2454359.49220 | 12518.0 | 0.040 |
| 2442414.27400 | 1401.0 | -0.005 | 2446770.28000 | 5455.0 | -0.006 | 2454373.46069 | 12531.0 | 0.040 |
| 2442414.27800 | 1401.0 | -0.001 | 2446774.57900 | 5459.0 | -0.005 | | | |

Βάσει του παραπάνω πίνακα και της αστρονομικής εφημερίδας του αστέρα προκύπτει το O-C διάγραμμα του.



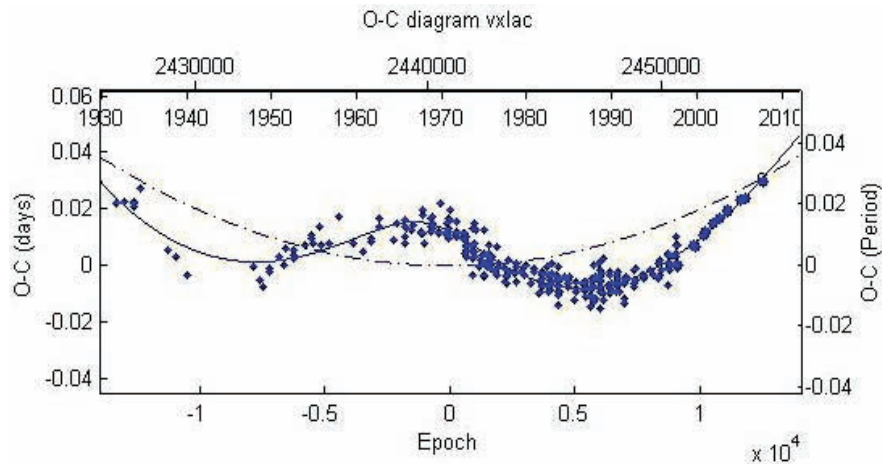
Σχ.5.64 Το O-C διάγραμμα του αστέρα VX Lac.

Οι χρόνοι ελαχίστων που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτοί του πίνακα 5.43. Σε κάθε χρόνο ελαχίστου τίθεται στατιστικό βάρος, ανάλογα με την μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή του (§5.1). Οι τελικές τροχιακές και φωτομετρικές παράμετροι του συστήματος καθώς και τα σφάλματά τους προκύπτουν χρησιμοποιώντας το λογισμικό Matlab. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε σε αυτό το λογισμικό έχει το όνομα *LITE & Mass transfer* (Zasche 2007) και εμπεριέχει όλες τις εξισώσεις του LITE (§4.4) και τις εξισώσεις της μεταφοράς μάζας (§4.5).

Πίνακας 5.44 Οι αρχικές παράμετροι που χρησιμοποιήσαμε για τον αστέρα VX Lac στον κώδικα LITE

| | | | |
|-----------------------------|---------------|-----------------------------------|---------------------|
| JD₀ (HJD) | 2440908.91020 | A (days) | 0.02 |
| P (days) | 1.0744961 | Ω (deg) | 150.0 |
| P₃ (days) | 20000 | e | 0.1 |
| T₀ (HJD) | 2440000.0 | c₂ (days/cycle) | 2×10^{-10} |

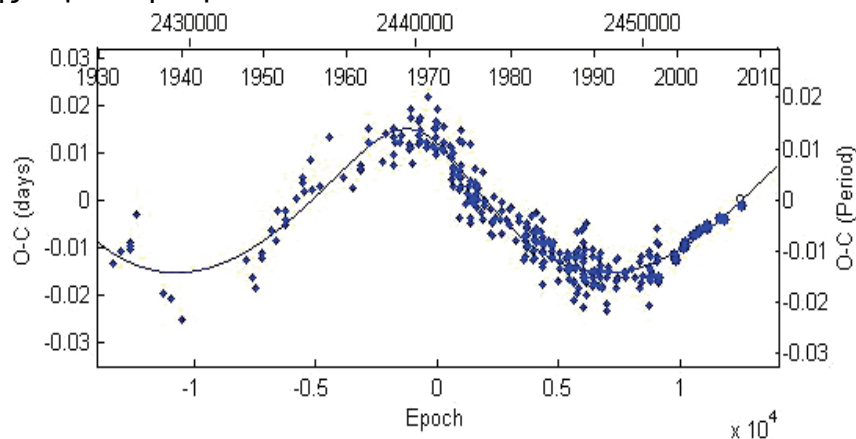
Όπου JD₀ και P είναι ο χρόνος (αρχικού) πρωτεύοντος ελαχίστου και η περίοδος του διπλού συστήματος αντίστοιχα, P₃ είναι η περίοδος του τρίτου σώματος, η ύπαρξη του οποίου υποδηλώνεται από την ημιτονοειδή συμπεριφορά του O-C διαγράμματος, T₀ μία τιμή HJD όπου θεωρούμε ότι ξεκινάει η ημιτονοειδής καμπύλη του O-C, δηλαδή η στιγμή όπου το τρίτο σώμα περνά από το περίαστρο της τροχιάς του, A το πλάτος του ημιτονοειδούς O-C, Ω το μήκος του περιάστρου της τροχιάς του τρίτου σώματος, e η εκκεντρότητα της τροχιάς του τρίτου σώματος και c₂ ο ρυθμός μεταβολής της περιόδου ανά τροχιακό κύκλο.



Σχ.5.65 Το O-C διάγραμμα του αστέρα VX Lac στο οποίο έχει προσαρμοστεί η θεωρητική καμπύλη (μπλε συνεχής γραμμή) διαμέσου των πειραματικών σημείων. Όσο μεγαλύτερο το σύμβολο του κάθε σημείου τόσο μεγαλύτερο και το στατιστικό βάρος που χρησιμοποιήθηκε. Στον άνω οριζόντιο άξονα αναγράφεται η χρονολογία, στον κάτω οριζόντιο άξονα ο αριθμός των περιφορών, στον αριστερό κατακόρυφο αναγράφονται οι O-C τιμές εκφρασμένες σε days και στον δεξιό κατακόρυφο οι O-C τιμές εκφρασμένες σε υποπολλαπλάσια της περιόδου του συστήματος.

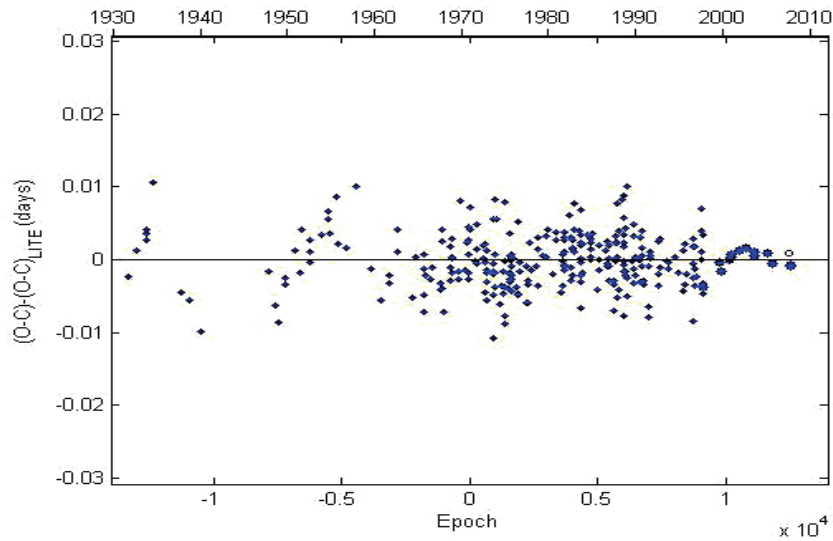
Στο αρχικό O-C διάγραμμα προσαρμόσαμε θεωρητική καμπύλη η οποία είναι το άθροισμα μιας παραβολικής και μιας ημιτονοειδούς συνάρτησης. Όπως αναφέραμε στην εισαγωγή, η παραβολή αντιστοιχεί στην μεταφορά μάζας μεταξύ των μελών του διπλού συστήματος και η ημιτονοειδής συνάρτηση στην ύπαρξη ενός τρίτου μέλους το οποίο περιφέρεται γύρω από το βαρύκεντρο του τριπλού πλέον συστήματος.

Εν συνεχεία, το πρόγραμμα κατασκευάζει το διάγραμμα O-C των υπολοίπων (§3.7) αφαιρώντας όμως μόνο την παραβολή από την λύση, οπότε απομένει μόνο η ημιτονοειδής καμπύλη λόγω του LITE.



Σχ.5.66 Το O-C διάγραμμα των υπολοίπων, στο οποίο έχει αφαιρεθεί η παραβολική και έχει απομείνει μόνο η ημιτονοειδής (μπλε) καμπύλη. Οι άξονες και τα σημεία αναπαριστούν τα ίδια μεγέθη όπως και στο προηγούμενο σχήμα.

Τέλος, το πρόγραμμα εξάγει και το διάγραμμα των O-C υπολοίπων (§5.1), το οποίο είναι αποτέλεσμα αφαίρεσης και των δύο συναρτήσεων από την θεωρητική καμπύλη (λύση).



Σχ.5.67 Το διάγραμμα των O-C υπολοίπων, στο οποίο έχουν αφαιρεθεί η παραβολική και η ημιτονοειδής λύση. Οι άξονες και τα σημεία αναπαριστούν τα ίδια μεγέθη όπως και στο προηγούμενο σχήμα.

Πίνακας 5.45 Οι τιμές των τροχιακών παραμέτρων του τρίτου σώματος (άνω μέρος) και των παραμέτρων του διπλού συστήματος (κάτω μέρος) που προέκυψαν με την χρήση του κώδικα LITE & Mass Transfer

| Parameter | Value | error |
|---|---------------|-----------|
| P_3 (days) | 19012.4 | 456.1 |
| P_3 (years) | 52.055 | 1.25 |
| T_0 (HJD) | 2459400 | 621 |
| A (days) | 0.0151 | 0.0005 |
| Ω (deg) | 112 | 8 |
| e | 0.31 | 0.05 |
| $f(m_3)$ | 0.0067679 | 0.0000007 |
| $M_{3, \min}$ (M_{\odot}) | 0.32422 | 0.00002 |
| JD_0 (HJD) | 2440908.90661 | 0.00063 |
| P (days) | 1.0744972 | 0.0000001 |
| c_2 (days/cycle) ($\times 10^{-10}$) | 1.9723 | 0.0001 |
| \dot{P} (days/year) ($\times 10^{-7}$) | 1.34084 | 0.00007 |
| \dot{M} (M_{\odot} /year) ($\times 10^{-8}$) | 2.8926 | 0.0002 |
| χ^2 | 0.0052 | |

Για να εξαγάγει ο κώδικας την ελάχιστη μάζα του τρίτου σώματος ($i'=90^\circ$) χρησιμοποιήσαμε τις τιμές $M_1=1.45 M_{\odot}$ και $M_2=0.47 M_{\odot}$ (Svechnikov & Kuznetsova 1990) για τις μάζες των μελών του διπλού συστήματος αντίστοιχα. Οι παράμετροι \dot{P} , \dot{M} και τα σφάλματά τους υπολογίστηκαν από τις σχέσεις της παραγράφου §4.5. Από τις παραμέτρους του διπλού συστήματος που προέκυψαν

από το πρόγραμμα, προκύπτει η νέα αστρονομική εφημερίδα του βασισμένη στον παραβολικό όρο και η οποία δίνεται από την σχέση:

$$Min.I = HJD\ 2440908.90661(63) + 1.0744972(1) \times E + 1.9723(1) \cdot 10^{-10} \times E^2$$

5.5.2.4 Συμπεράσματα

Βάσει των σχέσεων 4.42 – 4.46 και υποθέτοντας ότι ο επιπρόσθετος συνοδός ανήκει στην κύρια ακολουθία μπορούμε να υπολογίσουμε τις φυσικές του παραμέτρους, οι οποίες και δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.46 Οι τιμές των φυσικών παραμέτρων του τρίτου σώματος

| Parameter | Value | Parameter | Value |
|-----------------|-------|-----------------|-------|
| $M (M_{\odot})$ | 0.32 | $R (R_{\odot})$ | 0.41 |
| T (K) | 3399 | M (mag) | 10.7 |
| $L (L_{\odot})$ | 0.02 | Sp. Type | M3 |

Για τον μεγαλύτερης μάζας αστέρα του συστήματος βρίσκουμε $L_1=3.67 L_{\odot}$ ενώ για τον μικρότερης μάζας αστέρα βρίσκουμε $L_2=0.07 L_{\odot}$.

Από τη σχέση 4.47 βρίσκουμε ότι το τρίτο σώμα συνεισφέρει κατά 0.49 % στην ολική λαμπρότητα του τριπλού συστήματος, και ως εκ τούτου είναι πολύ δύσκολο να ανιχνευθεί είτε μέσω φωτομετρικών είτε φασματοσκοπικών παρατηρήσεων. Δυστυχώς δεν έχει γίνει έως τώρα εκτίμηση της απόστασης του συστήματος, οπότε δεν είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε την μέγιστη γωνιακή απόσταση του συστήματος από το τρίτο σώμα.

Στην παρούσα παράγραφο της εργασίας, μελετήθηκε το διάγραμμα O-C του μεταβλητού δι' εκλείψεων αστέρα VX Lac. Από την μορφή του O-C διαγράμματος που παρουσιάζει, υποθέσαμε ότι πρόκειται για διπλό εκλειπτικό σύστημα στο οποίο υπάρχει και τρίτο μέλος αλλά λαμβάνει χώρα και το φαινόμενο της ανταλλαγής μάζας μεταξύ των μελών του διπλού συστήματος

Ο εν λόγω αστέρας παρατηρήθηκε φωτομετρικά και υπολογίστηκαν τρεις χρόνοι φωτομετρικών ελαχίστων. Από τη βιβλιογραφία συλλέξαμε και παλαιότερους χρόνους ελαχίστων και κατασκευάστηκε το διάγραμμα O-C του συστήματος.

Η ανάλυση του O-C διαγράμματος, με τη βοήθεια H/Y και εξειδικευμένου υπολογιστικού κώδικα, έδειξε ότι στο σύστημα λαμβάνει χώρα το LITE και το φαινόμενο της ανταλλαγής μάζας. Υπολογίστηκαν οι τροχιακές και φυσικές παράμετροι του τρίτου σώματος βασιζόμενοι στο ότι ανήκει στην Κύρια Ακολουθία, ο ρυθμός αύξησης της περιόδου του διπλού συστήματος και ο ρυθμός μεταφοράς μάζας μεταξύ των μελών. Βρήκαμε ότι η ελάχιστη μάζα του τρίτου σώματος είναι $0.32 M_{\odot}$ και ανήκει στον φασματικό τύπο M3. Από το πρόσημο του παραβολικού όρου προκύπτει μία συνεχόμενη αύξηση της τροχιακής περιόδου του διπλού συστήματος με ρυθμό $1.34084 \times 10^{-7} \text{days/year}$ και μεταφορά μάζας από τον μικρότερης μάζας αστέρα (γίγαντας) στον μεγαλύτερης μάζας αστέρα (νάνος) με ρυθμό $2.89261 \times 10^{-8} M_{\odot}/\text{year}$, δηλαδή ο γίγαντας αστέρας γεμίζει τον λοβό Roche (§1.4.5.5). Δυστυχώς δεν έχει παρατηρηθεί η καμπύλη φωτός του συστήματος

έτσι ώστε να διασταυρωθεί το αποτέλεσμα μας με τα αποτελέσματα του φωτομετρικού μοντέλου του συστήματος.

Το διάγραμμα των O-C υπολοίπων δεν δείχνει κάποια ιδιαίτερη κατανομή, οπότε με βεβαιότητα εξάγεται το συμπέρασμα ότι το LITE και η μεταφορά μάζας μεταξύ των μελών του διπλού συστήματος είναι τα μοναδικά φαινόμενα τα οποία και διαμορφώνουν το O-C διάγραμμα του αστέρα. Η σύγκριση της φωτεινότητας του τρίτου μέλους με τις φωτεινότητες των μελών του διπλού συστήματος έδειξε ότι συμμετέχει κατά περίπου 0.49% στην ολική λαμπρότητα του συστήματος, οπότε είναι πολύ δύσκολη η ανίχνευσή του είτε μέσω επίλυσης του φωτομετρικού μοντέλου του συστήματος λαμβάνοντας υπ' όψη τη συνεισφορά του, είτε απ' ευθείας μέσω φασματοσκοπικών παρατηρήσεων.

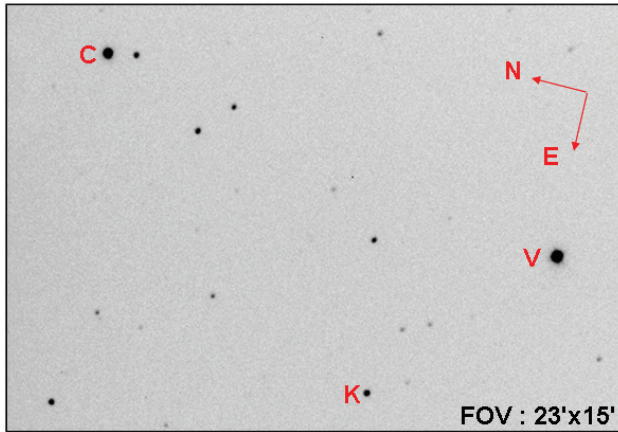
5.5.3 Το σύστημα GK Cep

5.5.3.1 Ιστορικά στοιχεία

Ο αστέρας GK Cep (= BD 70°1183 = HD 205372 = SAO 10069 = HIP 106226, $\alpha_{2000}=21^{\text{h}}30^{\text{m}}59.1^{\text{s}}$, $\delta_{2000}=+70^{\circ}49'23.6''$) είναι ένας δι' εκλείψεων μεταβλητός τύπου W UMa με περίοδο ~ 0.93 days. Το σύστημα παρατηρήθηκε φωτομετρικά από τους Ruiz & Stokes (βλ. Gleim 1967), Gleim (1967), Bartolini et al. (1965), Hutchings & Hill (1973), Dworak (1975) και Rovithis-Livaniou et al. (1990). Φασματοσκοπική μελέτη διεξήχθη από τους Bartolini et al. (1965), ενώ μελέτη των μεταβολών της περιόδου παρουσιάστηκε από τους Derman & Demircan (1992). Τέλος, ο Erdem (2001) διεξήγαγε φωτοηλεκτρικές παρατηρήσεις στα B και V φίλτρα, έκανε το φωτομετρικό μοντέλο του συστήματος και μελέτησε τις μεταβολές της περιόδου επιβεβαιώνοντας την ύπαρξη του LITE στο σύστημα. Αυτές οι μελέτες αποκάλυψαν ότι πρόκειται για ένα σύστημα τύπου W UMa με μερικές εκλείψεις, τα μέλη του είναι του ίδιου φασματικού τύπου (A2V+ A2V), ενώ η περίοδος του είναι από τις μεγαλύτερες για τέτοιου είδους συστήματα. Οι καμπύλες φωτός του αστέρα παρουσιάζουν ασυμμετρίες που πιθανόν οφείλονται στη μεταφορά μάζας μεταξύ των μελών του, ενώ η μεταβολή της περιόδου του υποδεικνύει την ύπαρξη ενός τρίτου μέλους.

5.5.3.2 Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι παρατηρήσεις του συστήματος διεξήχθησαν στο Γεροσταθοπούλειο Πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (κεφ.2) στις 13/1/2007, και 21 και 27/6/2007 χρησιμοποιώντας τα V, R, I φωτομετρικά φίλτρα με χρόνο έκθεσης 1.5, 4 και 4 sec αντίστοιχα. Στο παρακάτω σχήμα παρατίθεται το πεδίο του αστέρα GK Cep (V), όπου δίνονται η φορά του, οι διαστάσεις του και οι αστέρες συγκρίσεως (C) και ελέγχου (K) που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία.

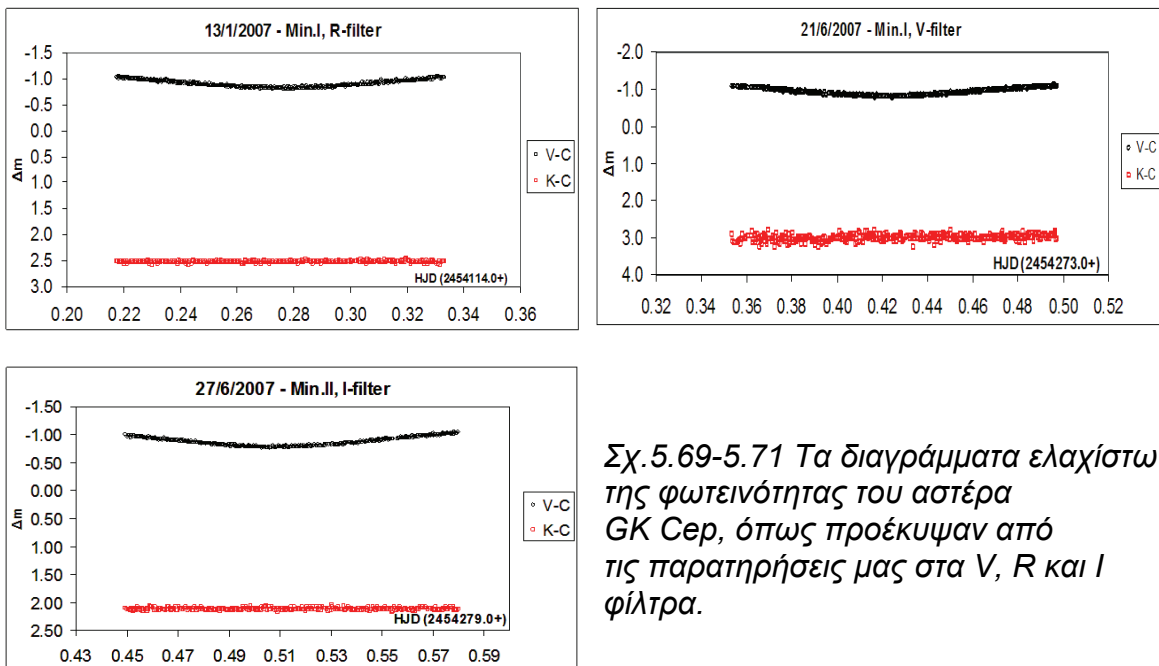


Σχ.5.68 Το πεδίο του αστέρα GK Cep, και οι αστέρες σύγκρισης και ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν στις παρατηρήσεις μας.

Στο πρόγραμμα AIP4WIN χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των ακτίνων των διαφραγμάτων 6, 8 και 10 αντίστοιχα (§3.1).

Πίνακας 5.47 Οι αστέρες σύγκρισης (C) και ελέγχου (K) που χρησιμοποιήθηκαν στην φωτομετρία

| Αστέρας | Mag | Χρήση στη φωτομετρία |
|---------------|----------|----------------------|
| GK Cep | 6.99/7.6 | V |
| HIP 106205 | 8.19 | C |
| GSC 4465:0372 | 11.28 | K |



Σχ.5.69-5.71 Τα διαγράμματα ελαχίστων της φωτεινότητας του αστέρα GK Cep, όπως προέκυψαν από τις παρατηρήσεις μας στα V, R και I φίλτρα.

Λόγω του ότι σε κάποιες ημέρες παρατηρήθηκε το ελάχιστο της λαμπρότητας σε δύο φωτομετρικά φίλτρα, ο χρόνος ελαχίστου προκύπτει από τον μέσο όρο των χρόνων ελαχίστου όπως προέκυψαν σε κάθε φίλτρο. Οι τιμές των χρόνων ελαχίστων που προέκυψαν από τις παρατηρήσεις μας, παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.48 Οι χρόνοι ελαχίστων που προέκυψαν από τις παρατηρήσεις μας

| Date | Filter | Minima (HJD) | Error | Type | Mean Minima (HJD) | Error |
|---------|--------|---------------|---------|------|-------------------|---------|
| 13/1/07 | R | 2454114.27388 | 0.00002 | I | 2454114.27388 | 0.00002 |
| 21/6/07 | V | 2454273.42228 | 0.00011 | I | | |
| | I | 2454273.42272 | 0.00010 | I | 2454273.42250 | 0.00010 |
| 27/6/07 | V | 2454279.50710 | 0.00013 | II | | |
| | I | 2454279.50854 | 0.00012 | II | 2454279.50782 | 0.00013 |

5.5.3.3 Ανάλυση του O-C διαγράμματος

Για την κατασκευή του O-C διαγράμματος του αστέρα GK Cep, χρησιμοποιήθηκε η εφημερίδα από τη βάση δεδομένων του Kreiner*:

$$Min.I = HJD\ 2438694.70150 + 0.93616376 \times E$$

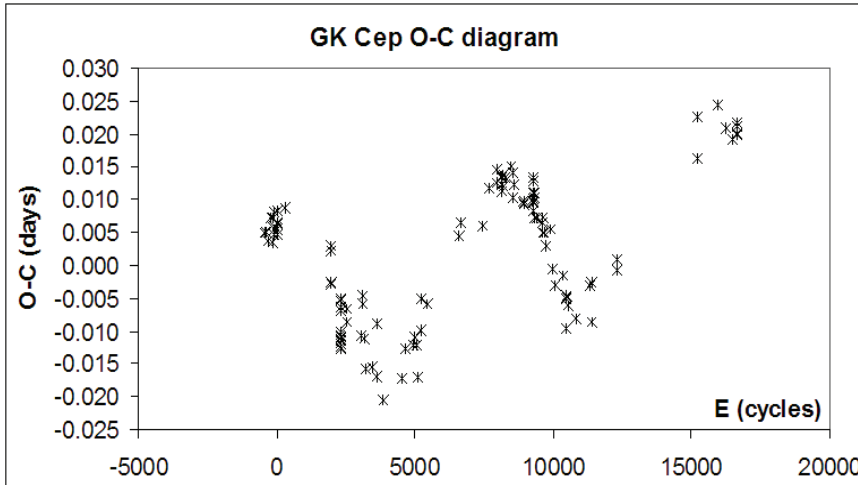
Οι χρόνοι παρελθόντων ελαχίστων που χρησιμοποιήθηκαν από τη βιβλιογραφία αλλά και από τη βάση δεδομένων του Kreiner (προσωπική επικοινωνία), παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα και βάσει της εφημερίδας του συστήματος βρέθηκαν οι αντίστοιχες O-C τιμές (§3.7). Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 120 χρόνοι ελαχίστων, εκ των οποίων οι 15 προέρχονται από οπτικές παρατηρήσεις, 92 προέκυψαν με φωτοηλεκτρικές μεθόδους και οι 13 από CCD παρατηρήσεις με χρονικό εύρος από το 1965 έως σήμερα. Εδώ θα πρέπει να τονίσουμε, ότι υπάρχουν και άλλοι χρόνοι ελαχίστων γι' αυτό το σύστημα, όμως κρίθηκε ότι δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν διότι πρόκειται για οπτικές παρατηρήσεις οι οποίες βρίσκονται ενδιάμεσα στις φωτοηλεκτρικές και CCD παρατηρήσεις, και λόγω του ότι το βάθος των ελαχίστων είναι μόλις 0.6 mag δεν μπορούν να θεωρηθούν αρκετά αξιόπιστες. Οι μόνοι χρόνοι ελαχίστων που προέρχονται από οπτικές παρατηρήσεις και χρησιμοποιήθηκαν στην περαιτέρω ανάλυση του O-C διαγράμματος είναι αυτοί οι οποίοι βρίσκονται σε τέτοια θέση στο O-C διάγραμμα όπου είτε δεν υπάρχει πληροφορία από άλλη μέθοδο παρατήρησης είτε υπάρχει αλλά αποτελείται από λίγα σημεία.

*<http://www.as.ap.krakow.pl/o-c/data/getdata.php3?GK%20cep>

Πίνακας 5.49 Οι χρόνοι ελαχίστου και οι O-C τιμές τους για το σύστημα GK Cep

| To (HJD) | E (fixed) | O-C (days) | To (HJD) | E (fixed) | O-C (days) | To (HJD) | E (fixed) | O-C (days) |
|---------------|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|
| 2438265.47540 | -458.5 | 0.005 | 2441570.58600 | 3072.0 | -0.011 | 2447350.48120 | 9246.0 | 0.010 |
| 2438355.34720 | -362.5 | 0.005 | 2441581.35800 | 3083.5 | -0.004 | 2447351.41890 | 9247.0 | 0.011 |
| 2438407.30300 | -307.0 | 0.004 | 2441589.31400 | 3092.0 | -0.006 | 2447393.54500 | 9292.0 | 0.010 |
| 2438528.53970 | -177.5 | 0.007 | 2441647.35100 | 3154.0 | -0.011 | 2447394.48460 | 9293.0 | 0.013 |
| 2438559.43310 | -144.5 | 0.007 | 2441713.34600 | 3224.5 | -0.016 | 2447395.41760 | 9294.0 | 0.010 |
| 2438580.49300 | -122.0 | 0.003 | 2441946.91910 | 3474.0 | -0.015 | 2447396.35640 | 9295.0 | 0.013 |
| 2438606.70680 | -94.0 | 0.005 | 2442086.40600 | 3623.0 | -0.017 | 2447397.28820 | 9296.0 | 0.008 |
| 2438627.77120 | -71.5 | 0.005 | 2442087.35000 | 3624.0 | -0.009 | 2447402.43600 | 9301.5 | 0.007 |
| 2438634.79500 | -64.0 | 0.008 | 2442319.50700 | 3872.0 | -0.021 | 2447416.48150 | 9316.5 | 0.010 |
| 2438687.68600 | -7.5 | 0.006 | 2442957.50600 | 4553.5 | -0.017 | 2447416.48230 | 9316.5 | 0.011 |
| 2438694.70700 | 0.0 | 0.005 | 2443068.44600 | 4672.0 | -0.013 | 2447469.37160 | 9373.0 | 0.007 |
| 2438703.60150 | 9.5 | 0.006 | 2443307.63630 | 4927.5 | -0.012 | 2447688.43400 | 9607.0 | 0.007 |
| 2438708.74870 | 15.0 | 0.005 | 2443384.40300 | 5009.5 | -0.011 | 2447695.45300 | 9614.5 | 0.005 |
| 2438709.68660 | 16.0 | 0.006 | 2443411.55050 | 5038.5 | -0.012 | 2447703.41200 | 9623.0 | 0.007 |
| 2438711.55870 | 18.0 | 0.006 | 2443464.43900 | 5095.0 | -0.017 | 2447731.49520 | 9653.0 | 0.005 |
| 2438713.43100 | 20.0 | 0.006 | 2443590.36000 | 5229.5 | -0.010 | 2447813.40750 | 9740.5 | 0.003 |
| 2438731.68640 | 39.5 | 0.006 | 2443597.38600 | 5237.0 | -0.005 | 2447967.40900 | 9905.0 | 0.005 |
| 2438737.30530 | 45.5 | 0.008 | 2443772.44800 | 5424.0 | -0.006 | 2448038.55140 | 9981.0 | -0.001 |
| 2438997.09110 | 323.0 | 0.009 | 2444880.40800 | 6607.5 | 0.004 | 2448104.54850 | 10051.5 | -0.003 |
| 2438997.55920 | 323.5 | 0.009 | 2444937.51600 | 6668.5 | 0.006 | 2448372.76100 | 10338.0 | -0.001 |
| 2440532.38810 | 1963.0 | -0.003 | 2445671.46800 | 7452.5 | 0.006 | 2448479.47550 | 10452.0 | -0.010 |
| 2440532.38830 | 1963.0 | -0.003 | 2445890.53600 | 7686.5 | 0.012 | 2448488.37400 | 10461.5 | -0.005 |
| 2440542.22290 | 1973.5 | 0.002 | 2446162.49230 | 7977.0 | 0.012 | 2448495.39480 | 10469.0 | -0.005 |
| 2440542.22370 | 1973.5 | 0.003 | 2446162.49430 | 7977.0 | 0.014 | 2448503.35250 | 10477.5 | -0.005 |
| 2440845.53250 | 2297.5 | -0.005 | 2446287.47120 | 8110.5 | 0.014 | 2448562.32950 | 10540.5 | -0.006 |
| 2440845.53270 | 2297.5 | -0.005 | 2446311.34130 | 8136.0 | 0.011 | 2448831.47460 | 10828.0 | -0.008 |
| 2440852.54760 | 2305.0 | -0.011 | 2446318.36440 | 8143.5 | 0.013 | 2449313.60400 | 11343.0 | -0.003 |
| 2440852.54880 | 2305.0 | -0.010 | 2446325.38470 | 8151.0 | 0.012 | 2449356.66800 | 11389.0 | -0.003 |
| 2440867.52570 | 2321.0 | -0.012 | 2446332.40570 | 8158.5 | 0.012 | 2449357.59800 | 11390.0 | -0.009 |
| 2440867.52650 | 2321.0 | -0.011 | 2446339.42870 | 8166.0 | 0.014 | 2450210.45300 | 12301.0 | 0.001 |
| 2440868.46250 | 2322.0 | -0.011 | 2446434.44880 | 8267.5 | 0.013 | 2450225.42970 | 12317.0 | -0.001 |
| 2440868.46320 | 2322.0 | -0.011 | 2446646.49170 | 8494.0 | 0.015 | 2452912.23680 | 15187.0 | 0.016 |
| 2440869.39720 | 2323.0 | -0.013 | 2446691.42640 | 8542.0 | 0.014 | 2452919.26450 | 15194.5 | 0.023 |
| 2440869.39760 | 2323.0 | -0.012 | 2446699.38010 | 8550.5 | 0.010 | 2453617.64430 | 15940.5 | 0.024 |
| 2440870.33470 | 2324.0 | -0.011 | 2446750.40310 | 8605.0 | 0.012 | 2454114.27388 | 16471.0 | 0.019 |
| 2440870.33530 | 2324.0 | -0.011 | 2447063.54720 | 8939.5 | 0.010 | 2454273.42250 | 16641.0 | 0.020 |
| 2440876.42430 | 2330.5 | -0.007 | 2447064.48280 | 8940.5 | 0.009 | 2454279.50782 | 16647.5 | 0.020 |
| 2440876.42470 | 2330.5 | -0.006 | 2447065.41930 | 8941.5 | 0.010 | 2453899.42620 | 16241.5 | 0.021 |
| 2441080.50620 | 2548.5 | -0.009 | 2447335.50290 | 9230.0 | 0.010 | 2454271.55140 | 16639.0 | 0.021 |
| 2441080.50820 | 2548.5 | -0.007 | 2447349.54560 | 9245.0 | 0.010 | 2454271.55200 | 16639.0 | 0.022 |

Βάσει του παραπάνω πίνακα και της αστρονομικής εφημερίδας του αστέρα προκύπτει το O-C διάγραμμα του.



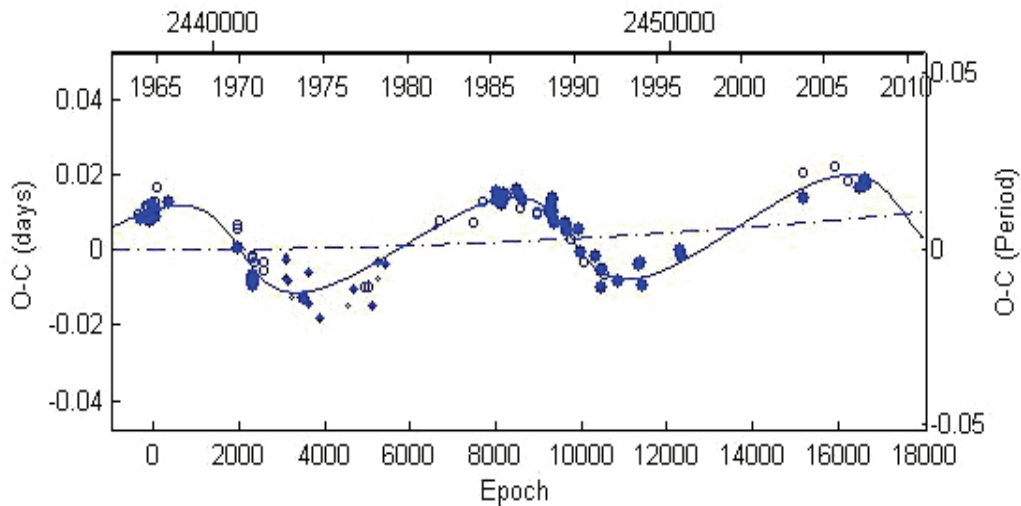
Σχ.5.72 Το O-C διάγραμμα του αστέρα GK Cep.

Οι χρόνοι ελαχίστων που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτοί του πίνακα 5.49. Σε κάθε χρόνο ελαχίστου τίθεται στατιστικό βάρος, ανάλογα με την μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή του (§5.1). Οι τελικές τροχιακές και φωτομετρικές παράμετροι του συστήματος καθώς και τα σφάλματά τους προκύπτουν χρησιμοποιώντας το λογισμικό Matlab. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε σε αυτό το λογισμικό έχει το όνομα *LITE & Mass transfer* (Zasche 2007) και εμπεριέχει όλες τις εξισώσεις του LITE (§4.4) και τις εξισώσεις της μεταφοράς μάζας (§4.5).

Πίνακας 5.50 Οι αρχικές παράμετροι που χρησιμοποιήσαμε για τον αστέρα GK Cep στον κώδικα *LITE & Mass Transfer*

| | | | |
|-----------------------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------|
| JD₀ (HJD) | 2438694.70150 | A (days) | 0.01 |
| P (days) | 0.93616376 | Ω (deg) | 200.0 |
| P₃ (days) | 8000 | e | 0.1 |
| T₀ (HJD) | 2455000.0 | c₂ (days/cycle) | 0.2×10^{-10} |

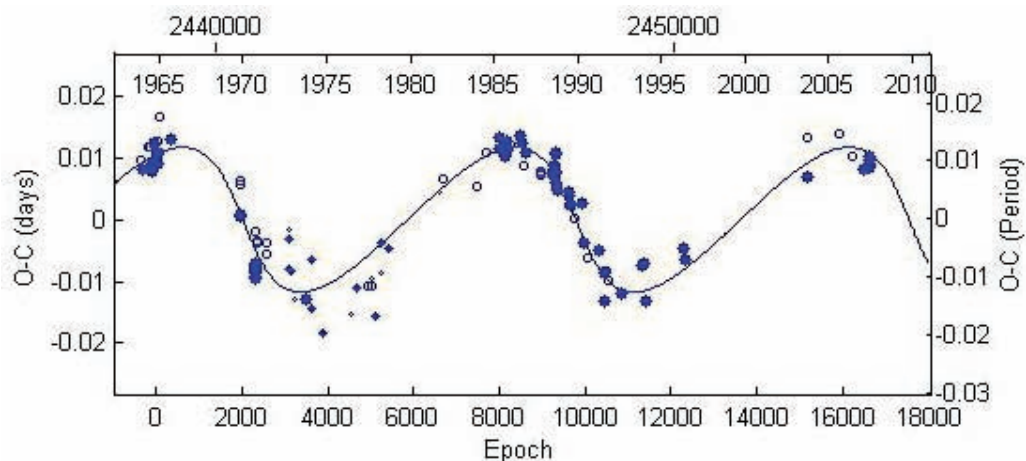
Όπου JD₀ και P είναι ο χρόνος (αρχικού) πρωτεύοντος ελαχίστου και η περίοδος του διπλού συστήματος αντίστοιχα, P₃ είναι η περίοδος του τρίτου σώματος, η ύπαρξη του οποίου υποδηλώνεται από την ημιτονοειδή συμπεριφορά του O-C διαγράμματος, T₀ μία τιμή HJD όπου θεωρούμε ότι ξεκινάει η ημιτονοειδής καμπύλη του O-C, δηλαδή η στιγμή όπου το τρίτο σώμα περνά από το περίαστρο της τροχιάς του, A το πλάτος του ημιτονοειδούς O-C, Ω το μήκος του περιάστρου της τροχιάς του τρίτου σώματος, e η εκκεντρότητα της τροχιάς του τρίτου σώματος και c₂ ο ρυθμός μεταβολής της περιόδου ανά τροχιακό κύκλο.



Σχ.5.73 Το O-C διάγραμμα του αστέρα GK Cep στο οποίο έχει προσαρμοστεί η θεωρητική καμπύλη (μπλε συνεχής γραμμή) διαμέσου των πειραματικών σημείων. Όσο μεγαλύτερο το σύμβολο του κάθε σημείου τόσο μεγαλύτερο και το στατιστικό βάρος που χρησιμοποιήθηκε. Στον άνω οριζόντιο άξονα αναγράφεται η χρονολογία, στον κάτω οριζόντιο άξονα ο αριθμός των περιφορών, στον αριστερό κατακόρυφο αναγράφονται οι O-C τιμές εκφρασμένες σε days και στον δεξιό κατακόρυφο οι O-C τιμές εκφρασμένες σε υποπολλαπλάσια της περιόδου του συστήματος.

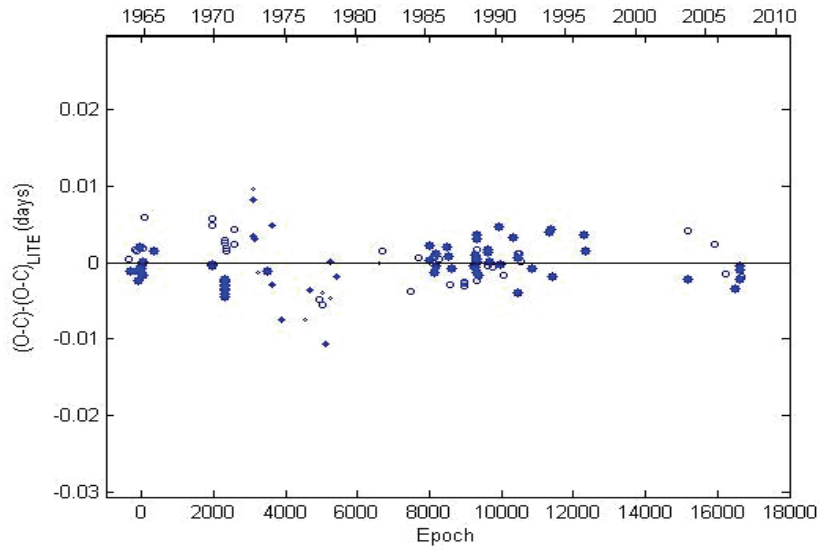
Στο αρχικό O-C διάγραμμα προσαρμόσαμε θεωρητική καμπύλη η οποία είναι το άθροισμα μιας παραβολικής και μιας ημιτονοειδούς συνάρτησης. Όπως αναφέραμε στην εισαγωγή, η παραβολή αντιστοιχεί στην μεταφορά μάζας μεταξύ των μελών του διπλού συστήματος και η ημιτονοειδής συνάρτηση στην ύπαρξη ενός τρίτου μέλους το οποίο περιφέρεται γύρω από το βαρύκεντρο του τριπλού πλέον συστήματος.

Εν συνεχεία το πρόγραμμα κατασκευάζει το διάγραμμα των O-C υπολοίπων (§3.7) αφαιρώντας όμως μόνο την παραβολή από την λύση, οπότε απομένει μόνο η ημιτονοειδής καμπύλη λόγω του LITE.



Σχ. 5.74 Το O-C διάγραμμα των υπολοίπων, στο οποίο έχει αφαιρεθεί η παραβολική και έχει απομείνει μόνο η ημιτονοειδής (μπλε) καμπύλη. Οι άξονες και τα σημεία αναπαριστούν τα ίδια μεγέθη όπως και στο προηγούμενο σχήμα.

Τέλος, το πρόγραμμα εξάγει και το διάγραμμα των O-C υπολοίπων (§5.1), το οποίο είναι αποτέλεσμα αφαίρεσης και των δύο συναρτήσεων από την θεωρητική καμπύλη (λύση).



Σχ.5.75 Το O-C διάγραμμα των υπολοίπων, στο οποίο έχουν αφαιρεθεί η παραβολική και η ημιτονοειδής λύση. Οι άξονες και τα σημεία αναπαριστούν τα ίδια μεγέθη όπως και στο προηγούμενο σχήμα.

Πίνακας 5.51 Οι τιμές των τροχιακών παραμέτρων του τρίτου σώματος (άνω μέρος) και των παραμέτρων του διπλού συστήματος (κάτω μέρος) που προέκυψαν με την χρήση του κώδικα LITE

| Parameter | Value | error |
|---|---------------|-----------|
| P_3 (days) | 7272 | 69 |
| P_3 (years) | 19.9 | 0.2 |
| T_0 (HJD) | 2455141 | 155 |
| A (days) | 0.0117 | 0.0004 |
| Ω (deg) | 181 | 7 |
| e | 0.45 | 0.06 |
| $f(m_3)$ | 0.02994 | 0.00001 |
| $M_{3, \min}$ (M_{\odot}) | 1.06410 | 0.00001 |
| JD_0 (HJD) | 2438694.69719 | 0.00159 |
| P (days) | 0.9361642 | 0.0000002 |
| c_2 (days/cycle) ($\times 10^{-10}$) | 0.30960 | 0.00004 |
| \dot{P} (days/year) ($\times 10^{-7}$) | 2.4158 | 0.0003 |
| \dot{M} (M_{\odot} /year) ($\times 10^{-8}$) | 2.9031 | 0.0003 |
| χ^2 | 0.0064 | |

Για να εξάγει ο κώδικας την ελάχιστη μάζα του τρίτου σώματος ($i'=90^\circ$) χρησιμοποιήσαμε τις τιμές $M_1=2.7 M_{\odot}$ και $M_2=2.5 M_{\odot}$ (Branczewicz & Dworak 1980) για τις μάζες των μελών του διπλού συστήματος αντίστοιχα, ενώ οι

παράμετροι \dot{P} , \dot{M} και τα σφάλματά τους υπολογίστηκαν από τις σχέσεις της παραγράφου §4.5.

Από τις παραμέτρους του διπλού συστήματος που προέκυψαν από το πρόγραμμα, προκύπτει η νέα αστρονομική εφημερίδα του βασισμένη στον παραβολικό όρο και η οποία δίνεται από την σχέση:

$$T = 2440282.14835(132) + 0.3408091(1) \times E + 0.19720(1) \cdot 10^{-10} \times E^2$$

5.5.3.4 Συμπεράσματα

Βάσει των σχέσεων 4.42 – 4.46 και υποθέτοντας ότι ο επιπρόσθετος συνοδός ανήκει στην κύρια ακολουθία μπορούμε να υπολογίσουμε τις φυσικές του παραμέτρους, οι οποίες και δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.52 Οι τιμές των φυσικών παραμέτρων του τρίτου σώματος

| Parameter | Value | Parameter | Value |
|-------------------|-------|-------------------|-------|
| M (M_{\odot}) | 1.06 | R (R_{\odot}) | 1.1 |
| T (K) | 5940 | M (mag) | 4.4 |
| L (L_{\odot}) | 1.35 | Sp. Type | G0V |

Για τον μεγαλύτερης μάζας αστέρα του εκλειπτικού συστήματος βρίσκουμε $L_1=32.3 L_{\odot}$, ενώ για τον μικρότερης μάζας αστέρα $L_2=24.7 L_{\odot}$.

Από τη σχέση 4.47 βρίσκουμε ότι το τρίτο σώμα συνεισφέρει κατά 2.1% στην ολική φωτεινότητα του τριπλού συστήματος, το απόλυτο μέγεθος του λαμπρότερου αστέρα του συστήματος είναι 0.9 mag, οπότε προκύπτει ότι το τρίτο σώμα είναι 3.5 mag αμυδρότερο. Το σύστημα εμπεριέχεται στον κατάλογο του Ίππαρχου και έχει υπολογιστεί η απόστασή του ίση με 178.25 pc. Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις 4.48 και 4.49 βρίσκεται ότι, εάν το τρίτο σώμα έχει συνεπίπεδη τροχιά με το διπλό σύστημα (οπότε $m_3=m_{3,\min}$), τότε η μέγιστη γωνιακή του απόσταση είναι ίση με 76.2 mas. Βάσει των προαναφερομένων εκτιμήσεων καταλήγουμε ότι η φωτομετρική ή η φασματοσκοπική ανίχνευση του τρίτου σώματος είναι πολύ δύσκολη λόγω της μεγάλης διαφοράς λαμπρότητας, όμως βρίσκεται εντός των ορίων για την ανίχνευσή του μέσω συμβολομετρίας.

Στην παρούσα παράγραφο της εργασίας, μελετήθηκε το διάγραμμα O-C του μεταβλητού δι' εκλείψεων αστέρα GK Cep. Από την μορφή του O-C διαγράμματος που παρουσιάζει, υποθέσαμε ότι πρόκειται για διπλό εκλειπτικό σύστημα στο οποίο υπάρχει και τρίτο μέλος, αλλά λαμβάνει χώρα και το φαινόμενο της ανταλλαγής μάζας μεταξύ των μελών του διπλού συστήματος

Ο εν λόγω αστέρας παρατηρήθηκε φωτομετρικά και υπολογίστηκαν τρεις χρόνοι φωτομετρικών ελαχίστων. Από τη βιβλιογραφία συλλέξαμε και παλαιότερους χρόνους ελαχίστων και κατασκευάστηκε το διάγραμμα O-C του συστήματος.

Η ανάλυση του O-C διαγράμματος με τη βοήθεια H/Y και εξειδικευμένου υπολογιστικού κώδικα, έδειξε ότι στο σύστημα λαμβάνει χώρα το LITE και το φαινόμενο της ανταλλαγής μάζας, υπολογίστηκαν οι τροχιακές και φυσικές παράμετροι του τρίτου σώματος βασιζόμενοι στο ότι ανήκει στην Κύρια Ακολουθία

και ο ρυθμός αύξησης της περιόδου του διπλού συστήματος και ο ρυθμός μεταφοράς μάζας μεταξύ των μελών. Βρήκαμε ότι η ελάχιστη μάζα του τρίτου σώματος είναι $\sim 1 M_{\odot}$ και ανήκει στον φασματικό τύπο G0. Από το πρόσημο του παραβολικού όρου προκύπτει μία συνεχόμενη αύξηση της τροχιακής περιόδου του διπλού συστήματος με ρυθμό 2.4158×10^{-7} days/year και μεταφορά μάζας από τον μικρότερης μάζας αστέρα στον μεγαλύτερης μάζας αστέρα με ρυθμό $2.9031 \times 10^{-8} M_{\odot}/yr$.

Από το διάγραμμα των O-C υπολοίπων του συστήματος ίσως διαφαίνεται κάποια επιπλέον μεταβολή, αλλά απαιτούνται περισσότεροι χρόνοι ελαχίστων στα επόμενα χρόνια ώστε να εξάγουμε με βεβαιότητα κάποιο συμπέρασμα. Η σύγκριση της φωτεινότητας του τρίτου μέλους με τις φωτεινότητες των μελών του διπλού συστήματος έδειξε ότι συμμετέχει κατά περίπου 2.1% στην ολική φωτεινότητα του συστήματος και απέχει από αυτό 76.2 mas, τιμές οι οποίες καθιστούν πολύ δύσκολη την άμεση ανίχνευσή του.

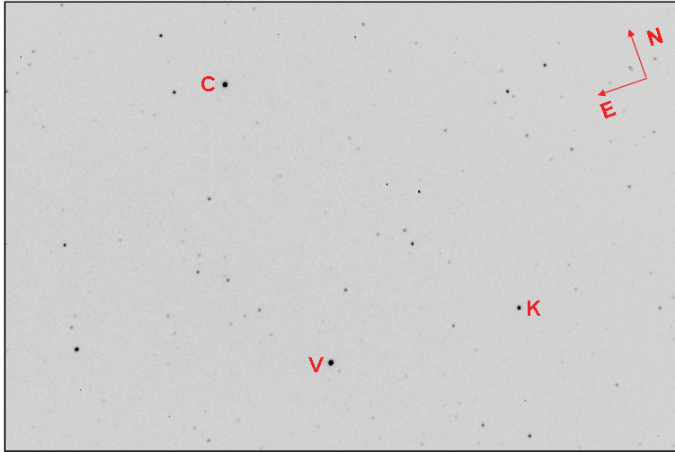
5.5.4 Το σύστημα *DR Vul*

5.5.4.1 Ιστορικά στοιχεία

Ο αστέρας DR Vul (= BD+26° 3835 = SAO 88380 = GSC 2162-0017 = AN 129.1935, $\alpha_{2000} = 20^h 13^m 46.8^s$, $\delta_{2000} = +26^{\circ} 45' 01''$) ανακαλύφθηκε ως μεταβλητός από τον Hoffmeister (1935). Είναι σχετικά καλά μελετημένο σύστημα το οποίο ανήκει στην κατηγορία των ημιαποχωρισμένων διπλών εκλειπτικών μεταβλητών, οι αστέρες του είναι φασματικού τύπου B0V και B0.5V αντίστοιχα, η εκκεντρότητα της τροχιάς του είναι 0.098, ενώ η περιόδός του είναι περίπου 2.25 days. Η πρώτη πλήρης καμπύλη του συστήματος δημοσιεύτηκε από τους Khaliullina & Khaliullin (1988) οι οποίοι ανήγαγαν τις παρατηρήσεις τους στο standard UBV φωτομετρικό σύστημα και εκτίμησαν τις απόλυτες παραμέτρους του συστήματος. Η μελέτη της κίνησης της γραμμής των αψίδων έχει γίνει από τους O'Connell (1972), Khaliullina & Khaliullin (1988) και αργότερα από τους Wolf & Diethelm (1993). Οι Wolf et al. (1999), ξαναμελέτησαν την κίνηση της γραμμής των αψίδων, ενώ από την μελέτη του O-C βρήκαν ότι στο σύστημα μπορεί να υπάρχει και τρίτο μέλος. Τέλος, πλήρεις καμπύλες του συστήματος δημοσιεύτηκαν και από τον Cicek (2001), ο οποίος το παρατήρησε φωτοηλεκτρικά στα B και V φίλτρα. Δυστυχώς το σύστημα δεν είχε συμπεριληφθεί στον φωτομετρικό κατάλογο του HIPPARCOS.

5.5.4.2 Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι παρατηρήσεις του συστήματος διεξήχθησαν στο Γεροσταθοπούλειο Πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (κεφ.2) στις 15 και 23/6/2007 χρησιμοποιώντας το R φωτομετρικό φίλτρο με χρόνο έκθεσης 4 sec. Στο παρακάτω σχήμα παρατίθεται το πεδίο του αστέρα DR Vul (V), όπου δίνονται η φορά του, οι διαστάσεις του και οι αστέρες συγκρίσεως (C) και ελέγχου (K) που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία.

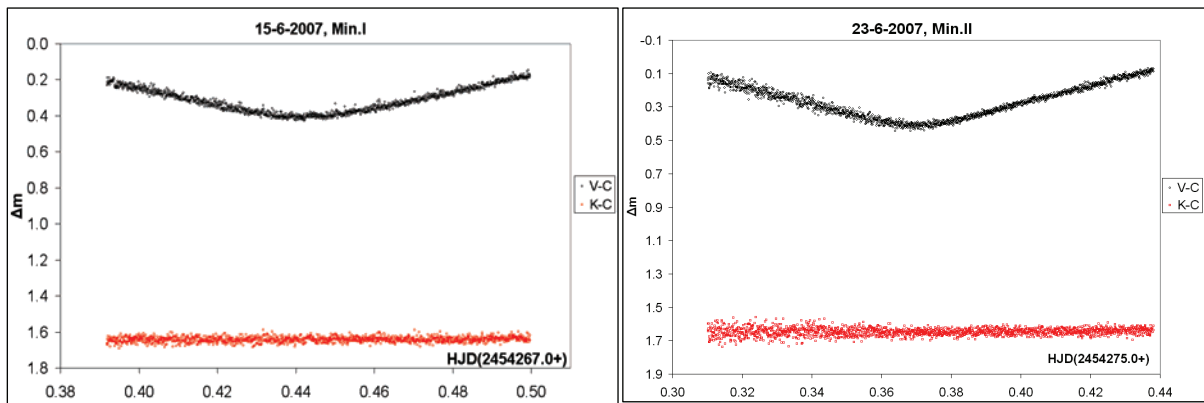


Σχ.5.76 Το πεδίο του αστέρα DR Vul, και οι αστέρες σύγκρισης και ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν στις παρατηρήσεις μας.

Στο πρόγραμμα AIP4WIN χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των ακτίνων των διαφραγμάτων 4, 5 και 6 αντίστοιχα (§3.1).

Πίνακας 5.53 Οι αστέρες σύγκρισης (C) και ελέγχου (K) που χρησιμοποιήθηκαν στην φωτομετρία

| Αστέρας | Mag | Χρήση στη φωτομετρία |
|---------------|-------------|----------------------|
| DR Vul | 8.74 / 9.34 | V |
| SAO 88382 | 9.13 | C |
| GSC 2162:1021 | 10.49 | K |



Σχ.5.77-5.78 Τα διαγράμματα ελαχίστων της φωτεινότητας του αστέρα DR Vul, όπως προέκυψαν από τις παρατηρήσεις μας στο R φίλτρο.

Οι τιμές των χρόνων ελαχίστων που προέκυψαν από τις παρατηρήσεις μας, παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.54 Οι χρόνοι ελαχίστων που προέκυψαν από τις παρατηρήσεις μας

| Minima (HJD) | Error | Type |
|---------------|---------|------|
| 2454267.44243 | 0.00003 | I |
| 2454275.36960 | 0.00004 | II |

5.5.4.3 Ανάλυση του O-C διαγράμματος

Για την κατασκευή του O-C διαγράμματος του αστέρα DR Vul, χρησιμοποιήθηκε η εφημερίδα από την εργασία των Wolf et al. (1999):

$$Min.I = HJD\ 2440300.7295 + 2.250888 \times E$$

Οι χρόνοι παρελθόντων ελαχίστων που χρησιμοποιήθηκαν από τη βιβλιογραφία παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα, και βάσει της εφημερίδας του συστήματος βρέθηκαν οι αντίστοιχες O-C τιμές (§3.7). Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 248 χρόνοι ελαχίστων, εκ των οποίων οι 208 προέρχονται από φωτογραφικές παρατηρήσεις, 13 προέκυψαν με φωτοηλεκτρικές μεθόδους και οι 27 από CCD παρατηρήσεις με χρονικό εύρος από το 1932 έως σήμερα. Εδώ θα πρέπει να τονίσουμε, ότι υπάρχουν και άλλοι χρόνοι ελαχίστων γι' αυτό το σύστημα, όμως κρίθηκε ότι δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν διότι πρόκειται για οπτικές παρατηρήσεις οι οποίες βρίσκονται ενδιάμεσα στις φωτοηλεκτρικές και CCD παρατηρήσεις, και λόγω του ότι το βάθος των ελαχίστων είναι μόλις 0.6 mag δεν μπορούν να θεωρηθούν αρκετά αξιόπιστες.

Πίνακας 5.55 Οι χρόνοι ελαχίστου και οι O-C τιμές τους για το σύστημα DR Vul

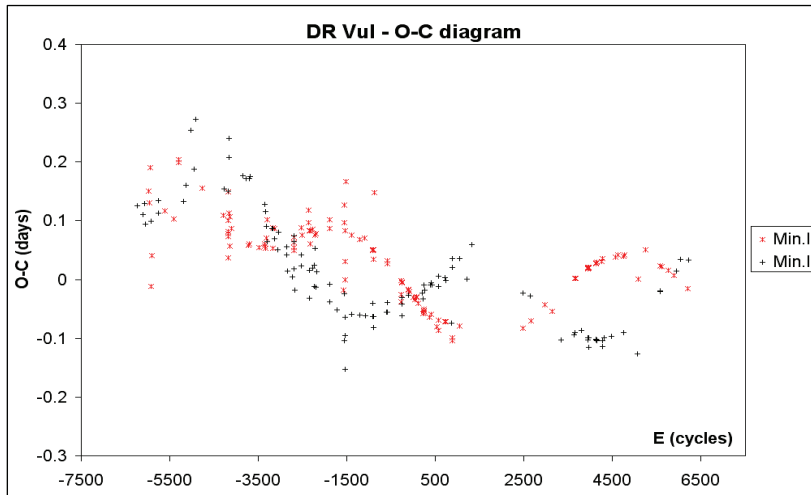
| To (HJD) | E (fixed) | O-C (days) | To (HJD) | E (fixed) | O-C (days) | To (HJD) | E (fixed) | O-C (days) |
|-------------|--------------|---------------|-------------|--------------|---------------|-------------|--------------|---------------|
| 26265.41100 | -6235.5 | 0.125 | 35012.25200 | -2349.5 | 0.015 | 41191.99000 | 396.0 | -0.060 |
| 26562.51400 | -6103.5 | 0.111 | 35038.18200 | -2338.0 | 0.060 | 41193.17000 | 396.5 | -0.005 |
| 26632.31000 | -6072.5 | 0.129 | 35038.20500 | -2338.0 | 0.083 | 41240.43400 | 417.5 | -0.010 |
| 26677.29300 | -6052.5 | 0.095 | 35164.25700 | -2282.0 | 0.085 | 41509.34400 | 537.0 | -0.081 |
| 26840.53800 | -5980.0 | 0.150 | 35165.31700 | -2281.5 | 0.020 | 41563.36000 | 561.0 | -0.086 |
| 26894.53900 | -5956.0 | 0.130 | 35282.33100 | -2229.5 | -0.012 | 41564.56000 | 561.5 | -0.012 |
| 26928.36300 | -5941.0 | 0.191 | 35282.36800 | -2229.5 | 0.025 | 41570.13000 | 564.0 | -0.069 |
| 26956.40800 | -5928.5 | 0.100 | 35317.30800 | -2214.0 | 0.076 | 41571.33000 | 564.5 | 0.006 |
| 26957.42200 | -5928.0 | -0.012 | 35318.41100 | -2213.5 | 0.054 | 41905.51000 | 713.0 | -0.071 |
| 27000.24200 | -5909.0 | 0.041 | 35351.07300 | -2199.0 | 0.078 | 41906.71000 | 713.5 | 0.003 |
| 27332.34100 | -5761.5 | 0.134 | 35352.10800 | -2198.5 | -0.013 | 41932.52000 | 725.0 | -0.072 |
| 27359.33100 | -5749.5 | 0.114 | 35397.15200 | -2178.5 | 0.014 | 41933.71500 | 725.5 | -0.002 |
| 27682.33700 | -5606.0 | 0.117 | 36045.38600 | -1890.5 | -0.008 | 42253.26960 | 867.5 | -0.074 |
| 28121.24600 | -5411.0 | 0.103 | 36048.85700 | -1889.0 | 0.086 | 42279.13000 | 879.0 | -0.099 |
| 28373.44200 | -5299.0 | 0.200 | 36048.87200 | -1889.0 | 0.101 | 42280.39000 | 879.5 | 0.036 |
| 28391.45400 | -5291.0 | 0.204 | 36049.85800 | -1888.5 | -0.038 | 42281.38000 | 880.0 | -0.099 |
| 28635.60400 | -5182.5 | 0.133 | 36049.88800 | -1888.5 | -0.008 | 42292.63000 | 885.0 | -0.104 |
| 28759.43000 | -5127.5 | 0.160 | 36053.37400 | -1887.0 | 0.102 | 42293.88000 | 885.5 | 0.021 |
| 28984.61200 | -5027.5 | 0.253 | 36439.24800 | -1715.5 | -0.052 | 42659.55000 | 1048.0 | -0.079 |
| 29162.36700 | -4948.5 | 0.188 | 36737.52400 | -1583.0 | -0.018 | 42660.79000 | 1048.5 | 0.036 |
| 29250.23600 | -4909.5 | 0.273 | 36789.43900 | -1560.0 | 0.126 | 43016.39500 | 1206.5 | 0.001 |
| 29575.37200 | -4765.0 | 0.155 | 36790.41400 | -1559.5 | -0.024 | 43268.55280 | 1318.5 | 0.059 |
| 30651.25000 | -4287.0 | 0.109 | 36802.91500 | -1554.0 | 0.097 | 45879.50100 | 2478.5 | -0.023 |
| 30668.17700 | -4279.5 | 0.154 | 36803.84000 | -1553.5 | -0.103 | 45889.57000 | 2483.0 | -0.083 |
| 30885.27000 | -4183.0 | 0.037 | 36816.35400 | -1548.0 | 0.031 | 46255.39370 | 2645.5 | -0.029 |
| 30894.31000 | -4179.0 | 0.073 | 36817.35400 | -1547.5 | -0.095 | 46274.48480 | 2654.0 | -0.070 |
| 30903.31900 | -4175.0 | 0.078 | 36834.41300 | -1540.0 | 0.083 | 46974.53800 | 2965.0 | -0.043 |
| 30903.32200 | -4175.0 | 0.081 | 36835.39200 | -1539.5 | -0.064 | 47368.43190 | 3140.0 | -0.054 |

Πίνακας 5.55 συν.

| | | | | | | | | |
|-------------|---------|--------|-------------|---------|--------|-------------|--------|--------|
| 30903.34100 | -4175.0 | 0.100 | 36843.33300 | -1536.0 | -0.001 | 47799.42800 | 3331.5 | -0.103 |
| 30903.39000 | -4175.0 | 0.149 | 36844.30700 | -1535.5 | -0.152 | 48490.45990 | 3638.5 | -0.094 |
| 30904.51600 | -4174.5 | 0.150 | 36868.26100 | -1525.0 | 0.167 | 48490.46000 | 3638.5 | -0.094 |
| 30920.33000 | -4167.5 | 0.208 | 37165.28700 | -1393.0 | 0.076 | 48499.46660 | 3642.5 | -0.091 |
| 30938.37000 | -4159.5 | 0.241 | 37166.27700 | -1392.5 | -0.059 | 48534.44850 | 3658.0 | 0.002 |
| 30946.12000 | -4156.0 | 0.113 | 37581.69300 | -1208.0 | 0.068 | 48536.69950 | 3659.0 | 0.002 |
| 30959.62000 | -4150.0 | 0.107 | 37582.69000 | -1207.5 | -0.061 | 48543.45190 | 3662.0 | 0.002 |
| 30984.33000 | -4139.0 | 0.057 | 37833.79500 | -1096.0 | 0.070 | 48839.35500 | 3793.5 | -0.087 |
| 31054.13700 | -4108.0 | 0.087 | 37879.80600 | -1075.5 | -0.062 | 49162.46270 | 3937.0 | 0.019 |
| 31620.32500 | -3856.5 | 0.177 | 38226.46400 | -921.5 | -0.041 | 49163.46700 | 3937.5 | -0.103 |
| 31789.13700 | -3781.5 | 0.172 | 38243.43610 | -914.0 | 0.050 | 49180.47040 | 3945.0 | 0.019 |
| 31918.44900 | -3724.0 | 0.058 | 38252.44050 | -910.0 | 0.051 | 49181.47740 | 3945.5 | -0.099 |
| 31963.47000 | -3704.0 | 0.061 | 38253.45250 | -909.5 | -0.063 | 49189.47550 | 3949.0 | 0.021 |
| 31964.70600 | -3703.5 | 0.172 | 38268.18000 | -903.0 | 0.034 | 49198.47740 | 3953.0 | 0.019 |
| 32023.23300 | -3677.5 | 0.176 | 38269.19000 | -902.5 | -0.082 | 49198.47900 | 3953.0 | 0.021 |
| 32463.16000 | -3482.0 | 0.054 | 38270.44730 | -902.0 | 0.050 | 49207.48160 | 3957.0 | 0.020 |
| 32733.27000 | -3362.0 | 0.057 | 38296.21980 | -890.5 | -0.062 | 49208.48780 | 3957.5 | -0.099 |
| 32762.53500 | -3349.0 | 0.061 | 38322.31600 | -879.0 | 0.149 | 49216.48540 | 3961.0 | 0.020 |
| 32763.72800 | -3348.5 | 0.128 | 38926.47510 | -610.5 | -0.056 | 49225.48930 | 3965.0 | 0.020 |
| 32795.22800 | -3334.5 | 0.116 | 38983.96000 | -585.0 | 0.031 | 49228.73000 | 3966.5 | -0.115 |
| 32796.29000 | -3334.0 | 0.053 | 38985.01500 | -584.5 | -0.039 | 49574.38330 | 4120.0 | 0.027 |
| 32818.81700 | -3324.0 | 0.071 | 38992.95880 | -581.0 | 0.027 | 49575.37880 | 4120.5 | -0.103 |
| 32819.96200 | -3323.5 | 0.090 | 38994.00240 | -580.5 | -0.055 | 49592.39110 | 4128.0 | 0.027 |
| 32831.21700 | -3318.5 | 0.091 | 39679.42700 | -276.0 | -0.026 | 49593.38690 | 4128.5 | -0.102 |
| 32857.11300 | -3307.0 | 0.102 | 39697.42200 | -268.0 | -0.038 | 49601.39530 | 4132.0 | 0.028 |
| 32858.20100 | -3306.5 | 0.064 | 39697.45780 | -268.0 | -0.002 | 49610.39980 | 4136.0 | 0.029 |
| 33101.32000 | -3198.5 | 0.087 | 39706.45900 | -264.0 | -0.005 | 49611.39320 | 4136.5 | -0.103 |
| 33142.92700 | -3180.0 | 0.053 | 39735.72000 | -251.0 | -0.005 | 49647.40680 | 4152.5 | -0.104 |
| 33144.08700 | -3179.5 | 0.087 | 39736.82000 | -250.5 | -0.031 | 49889.51190 | 4260.0 | 0.031 |
| 33154.21700 | -3175.0 | 0.088 | 39737.97000 | -250.0 | -0.006 | 49898.52000 | 4264.0 | 0.036 |
| 33223.99300 | -3144.0 | 0.087 | 39739.04000 | -249.5 | -0.061 | 49899.50580 | 4264.5 | -0.104 |
| 33225.10100 | -3143.5 | 0.069 | 39741.31100 | -248.5 | -0.041 | 49917.50270 | 4272.5 | -0.114 |
| 33416.40800 | -3058.5 | 0.051 | 40064.33700 | -105.0 | -0.018 | 50014.30550 | 4315.5 | -0.100 |
| 33447.95000 | -3044.5 | 0.081 | 40068.84000 | -103.0 | -0.017 | 50376.70090 | 4476.5 | -0.097 |
| 33864.33900 | -2859.5 | 0.055 | 40069.95500 | -102.5 | -0.027 | 50562.53500 | 4559.0 | 0.039 |
| 33875.58000 | -2854.5 | 0.042 | 40109.35230 | -85.0 | -0.020 | 50722.35100 | 4630.0 | 0.042 |
| 33891.30900 | -2847.5 | 0.015 | 40300.66800 | 0.0 | -0.030 | 50974.44890 | 4742.0 | 0.040 |
| 34152.40200 | -2731.5 | 0.005 | 40370.44100 | 31.0 | -0.035 | 50984.44700 | 4746.5 | -0.091 |
| 34214.34600 | -2704.0 | 0.049 | 40460.48000 | 71.0 | -0.031 | 51046.47930 | 4774.0 | 0.042 |
| 34214.36900 | -2704.0 | 0.072 | 40480.74000 | 80.0 | -0.029 | 51693.44100 | 5061.5 | -0.127 |
| 34215.49700 | -2703.5 | 0.075 | 40530.24800 | 102.0 | -0.041 | 51737.46060 | 5081.0 | 0.001 |
| 34223.35500 | -2700.0 | 0.055 | 40774.48700 | 210.5 | -0.023 | 52113.40900 | 5248.0 | 0.051 |
| 34224.49000 | -2699.5 | 0.064 | 40807.09000 | 225.0 | -0.058 | 52832.49680 | 5567.5 | -0.020 |
| 34230.12500 | -2697.0 | 0.072 | 40808.24000 | 225.5 | -0.033 | 52840.41780 | 5571.0 | 0.023 |
| 34231.19700 | -2696.5 | 0.018 | 40822.85000 | 232.0 | -0.054 | 52850.50490 | 5575.5 | -0.019 |
| 34250.37400 | -2688.0 | 0.063 | 40824.02000 | 232.5 | -0.009 | 52859.50670 | 5579.5 | -0.021 |
| 34294.18500 | -2668.5 | -0.018 | 40827.35530 | 234.0 | -0.050 | 52859.50820 | 5579.5 | -0.019 |
| 34600.36600 | -2532.5 | 0.042 | 40836.35600 | 238.0 | -0.053 | 52912.44570 | 5603.0 | 0.022 |
| 34607.10000 | -2529.5 | 0.023 | 40845.35660 | 242.0 | -0.056 | 53252.32270 | 5754.0 | 0.015 |
| 34608.29000 | -2529.0 | 0.088 | 40871.28030 | 253.5 | -0.018 | 53549.43110 | 5886.0 | 0.006 |
| 34653.29600 | -2509.0 | 0.076 | 40871.28030 | 253.5 | -0.018 | 53674.36370 | 5941.5 | 0.015 |

Πίνακας 5.55 συν.

| | | | | | | | | |
|-------------|---------|--------|-------------|-------|--------|-------------|--------|--------|
| 34984.19700 | -2362.0 | 0.096 | 40871.28030 | 253.5 | -0.018 | 53899.47210 | 6041.5 | 0.034 |
| 34984.21900 | -2362.0 | 0.118 | 41124.45900 | 366.0 | -0.064 | 54267.44243 | 6205.0 | -0.016 |
| 34999.94000 | -2355.0 | 0.083 | 41177.40970 | 389.5 | -0.009 | 54275.36960 | 6208.5 | 0.033 |
| 35000.95000 | -2354.5 | -0.032 | 41179.66000 | 390.5 | -0.010 | | | |



Σχ.5.79 Το O-C διάγραμμα του αστέρα DR Vul.

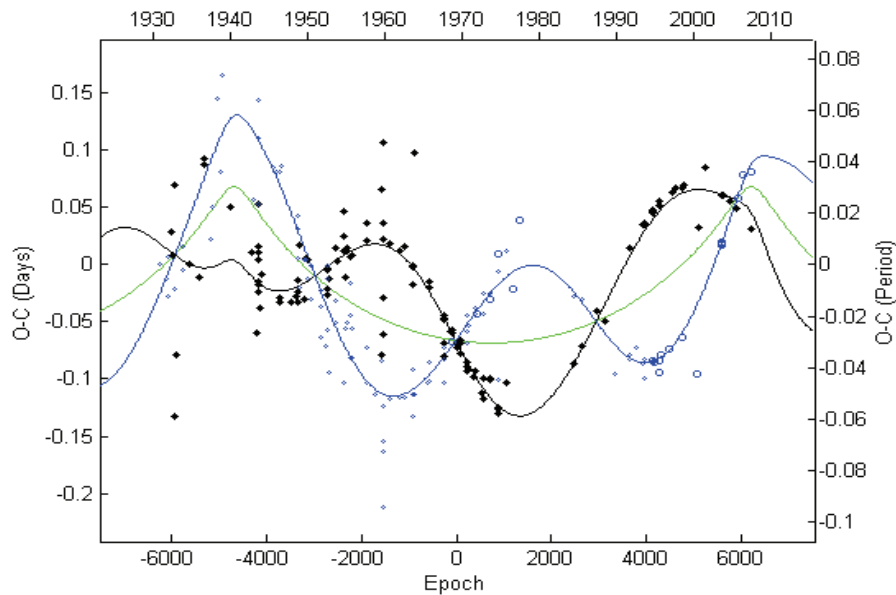
Οι χρόνοι ελαχίστων που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτοί του πίνακα 5.55. Σε κάθε χρόνο ελαχίστου τίθεται στατιστικό βάρος, ανάλογα με την μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή του (§5.1). Οι τελικές τροχιακές και φωτομετρικές παράμετροι του συστήματος καθώς και τα σφάλματά τους προκύπτουν χρησιμοποιώντας το λογισμικό Matlab. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε σε αυτό το λογισμικό έχει το όνομα *LITE & Aps. Motion* (Zasche 2008) και εμπεριέχει όλες τις εξισώσεις του LITE (§4.4) και της μετάθεσης της γραμμής των αψίδων (§4.3.4).

Πίνακας 5.56 Οι αρχικές παράμετροι που χρησιμοποιήσαμε για τον αστέρα DR Vul στον κώδικα *LITE & Aps. Motion*

| | | | |
|-----------------------------|--------------|-----------------------------------|--------|
| JD₀ (HJD) | 2440300.7295 | e₃ | 0.5 |
| P₂ (days) | 2.250888 | c₂ (days/cycle) | 0.0 |
| P₃ (days) | 22000 | | |
| T₀ (HJD) | 2430000.0 | ω₂ (deg) | 250.00 |
| A (days) | 0.05 | ω̇ (deg/yr) | 0.05 |
| ω₃ (deg) | 100.0 | e₂ | 0.1 |

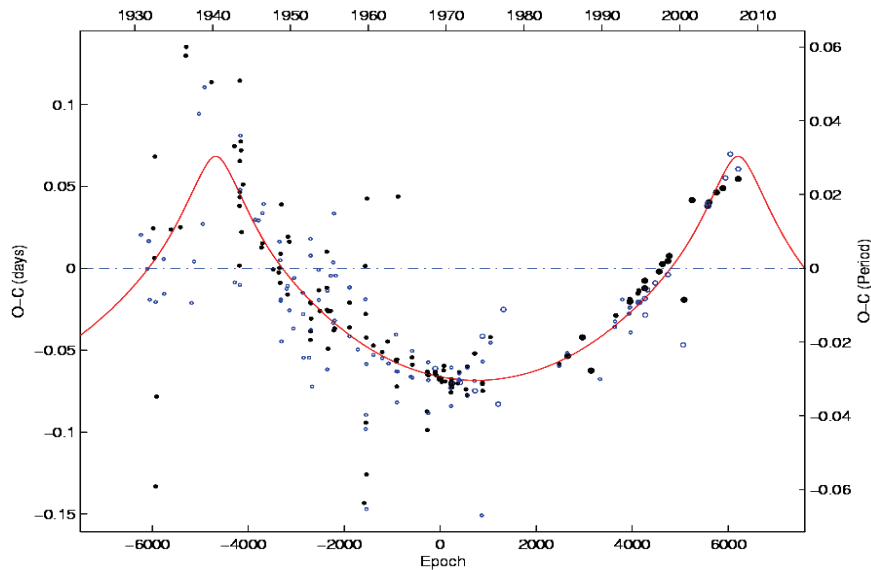
Όπου JD₀ και P₂ είναι ο χρόνος (αρχικού) πρωτεύοντος ελαχίστου και η περίοδος του διπλού συστήματος αντίστοιχα, P₃ είναι η περίοδος του τρίτου σώματος, η ύπαρξη του οποίου υποδηλώνεται από την ημιτονοειδή συμπεριφορά του O-C διαγράμματος, T₀ μία τιμή HJD όπου θεωρούμε ότι ξεκινάει η ημιτονοειδής καμπύλη του O-C, δηλαδή η στιγμή όπου το τρίτο σώμα περνά από το περίαστρο της τροχιάς του, A το πλάτος του ημιτονοειδούς O-C, ω₃ το μήκος του περιάστρου της τροχιάς του τρίτου σώματος, e₃ η εκκεντρότητα της τροχιάς του τρίτου σώματος, c₂ ο ρυθμός μεταβολής της περιόδου ανά τροχιακό κύκλο, ω₂ και ω̇ το

μήκος και ο ρυθμός μεταβολής του περιάστρου της τροχιάς του δευτερεύοντος αστέρα (ταχύτητα της κίνησης της γραμμής των αψίδων), και e_2 η εκκεντρότητα της τροχιάς του δευτερεύοντα αστέρα ως προς τον πρωτεύοντα.



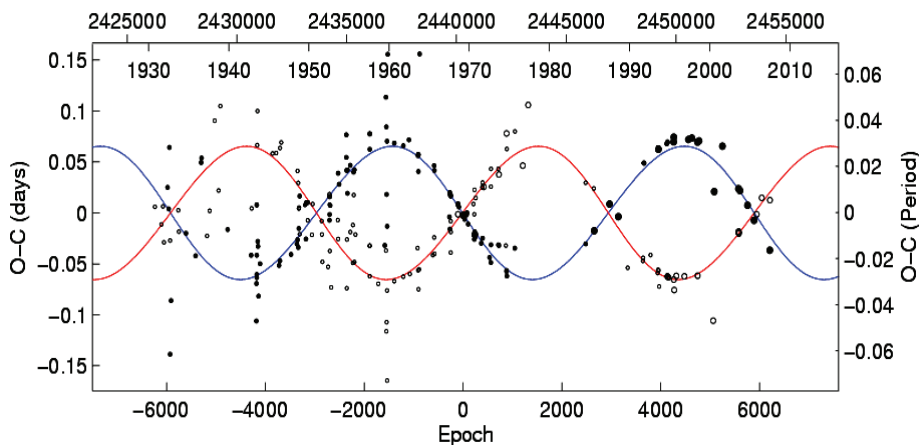
Σχ.5.80 Το O-C διάγραμμα του αστέρα DR Vul στο οποίο έχουν προσαρμοστεί οι θεωρητικές καμπύλες διαμέσου των πειραματικών σημείων. Η μαύρη συνεχής γραμμή και τα μαύρα σημεία αντιστοιχούν στα πρωτεύοντα ελάχιστα, η μπλε συνεχής γραμμή και τα μπλε σημεία στα δευτερεύοντα ελάχιστα, καμπύλες-λύσεις της κίνησης της γραμμής των αψίδων, ενώ η πράσινη καμπύλη αναφέρεται στο LITE. Όσο μεγαλύτερο το σύμβολο του κάθε σημείου τόσο μεγαλύτερο και το στατιστικό βάρος που χρησιμοποιήθηκε. Στον άνω οριζόντιο άξονα αναγράφεται η χρονολογία, στον κάτω οριζόντιο άξονα ο αριθμός των περιφορών, στον αριστερό κατακόρυφο αναγράφονται οι O-C τιμές εκφρασμένες σε days και στον δεξιό κατακόρυφο οι O-C τιμές εκφρασμένες σε υποπολλαπλάσια της περιόδου του συστήματος.

Εν συνεχεία, το πρόγραμμα κατασκευάζει το διάγραμμα O-C των υπολοίπων (§3.7) αφαιρώντας όμως μόνο τις ημιτονοειδείς καμπύλες της κίνησης της γραμμής των αψίδων οπότε απομένει μόνο η ημιτονοειδής του LITE.



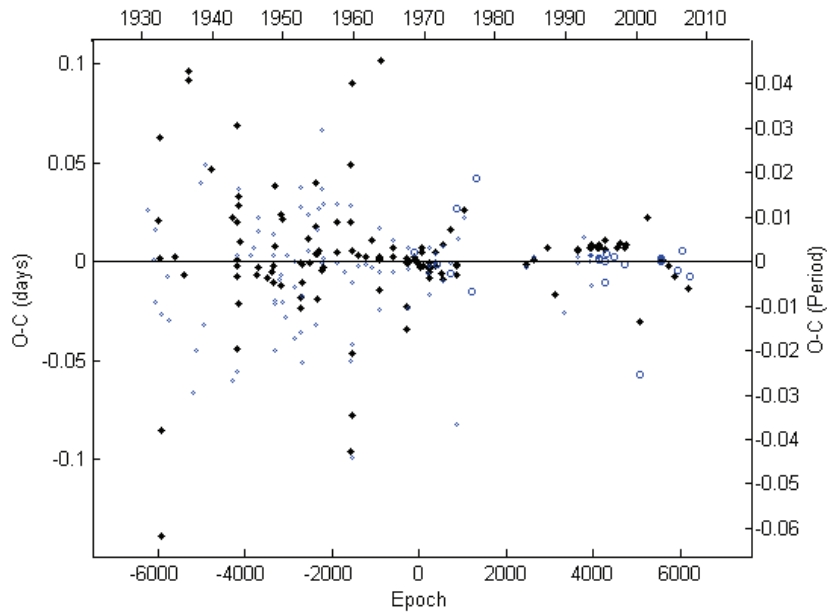
Σχ.5.81 Το διάγραμμα των O-C υπολοίπων, στο οποίο έχει αφαιρεθεί η λύση της μετάθεσης της γραμμής των ασίδων και έχει απομείνει μόνο η ημιτονοειδής καμπύλη του LITE (κόκκινη γραμμή). Οι άξονες και τα σημεία αναπαριστούν τα ίδια μεγέθη όπως και στο προηγούμενο σχήμα.

Εν συνεχεία το πρόγραμμα κατασκευάζει το διάγραμμα O-C των υπολοίπων (§3.7) αφαιρώντας όμως μόνο την ημιτονοειδή καμπύλη του LITE από την λύση, οπότε απομένουν μόνο οι ημιτονοειδείς καμπύλες της κίνησης της γραμμής των ασίδων.



Σχ.5.82 Το O-C διάγραμμα των υπολοίπων, στο οποίο έχει αφαιρεθεί η ημιτονοειδής καμπύλη του LITE και έχουν απομείνει μόνο οι ημιτονοειδείς συναρτήσεις της κίνησης της γραμμής των ασίδων. Η μπλε γραμμή είναι η προσαρμογή στα πρωτεύοντα ελάχιστα, ενώ η κόκκινη γραμμή αναφέρεται στα δευτερεύοντα ελάχιστα. Οι άξονες και τα σημεία αναπαριστούν τα ίδια μεγέθη όπως και στο προηγούμενο σχήμα.

Τέλος παρατίθεται το διάγραμμα των O-C υπολοίπων (§5.1), στο οποίο έχουν αφαιρεθεί οι καμπύλες – λύσεις τόσο του LITE όσο και της μετάθεσης της γραμμής των ασίδων.



Σχ.5.83 Το O-C διάγραμμα των υπολοίπων του αστέρα DR Vul. Οι άξονες και τα σημεία αναπαριστούν τα ίδια μεγέθη όπως και στο προηγούμενο σχήμα.

Πίνακας 5.57 Οι τιμές των τροχιακών παραμέτρων του τρίτου σώματος (άνω μέρος) και των παραμέτρων του διπλού συστήματος και της κίνησης της γραμμής των αψίδων (κάτω μέρος) που προέκυψαν με την χρήση του κώδικα LITE

| Parameter | Value | error |
|----------------------------|---------------|-----------|
| P_3 (days) | 24459 | 690 |
| P_3 (years) | 67 | 2 |
| T_0 (HJD) | 2429807 | 571 |
| A (days) | 0.068 | 0.005 |
| ω_3 (deg) | 91 | 14 |
| e_3 | 0.73 | 0.06 |
| $f(m_3)$ | 0.362 | 0.002 |
| $M_{3, \min} (M_{\odot})$ | 7.25 | 0.03 |
| JD_0 (HJD) | 2440300.73618 | 0.0043133 |
| P (days) | 2.2508741 | 0.0000013 |
| ω_2 (deg) | 271 | 2 |
| $\dot{\omega}$ (deg/cycle) | 0.061 | 0.002 |
| e_2 | 0.09 | 0.01 |
| χ^2 | 1.0097 | - |

Για να εξάγει ο κώδικας την ελάχιστη μάζα του τρίτου σώματος ($i'=90^\circ$) χρησιμοποιήσαμε τις τιμές $M_1=13.2 M_{\odot}$ and $M_2=12.1 M_{\odot}$ (Khaliullina & Khaliullin

1988) για τις μάζες των μελών του διπλού συστήματος αντίστοιχα, ενώ από τις σχέσεις 4.7 - 4.10 υπολογίζουμε την ανωμαλιστική περίοδο του διπλού συστήματος, και την περίοδο της κίνησης της γραμμής των ασίδων.

$$P_{\alpha} = (2.2512551 \pm 0.0000013) \text{ days}$$

$$U = (36 \pm 1) \text{ yrs}$$

Τέλος η ανανεωμένη φωτομετρική εφημερίδα του συστήματος που προέκυψε από την ανάλυση του O-C διαγράμματος είναι:

$$Min.I = HJD \ 2440300.73618 (43133) + 2.2508741 (13) \times E$$

Η παραπάνω εφημερίδα προβλέπει τους χρόνους των πρωτευόντων ελαχίστων του συστήματος, ενώ ισχύει και για τους χρόνους των δευτερευόντων ελαχίστων, εάν στη θέση του JD₀ βάλουμε έναν αντίστοιχο παρελθόντα χρόνο δευτερεύοντος ελαχίστου.

5.5.4.4 Συμπεράσματα

Βάσει των σχέσεων 4.42 – 4.46 και υποθέτοντας ότι ο επιπρόσθετος συνοδός ανήκει στην Κύρια Ακολουθία μπορούμε να υπολογίσουμε τις φυσικές του παραμέτρους, οι οποίες και δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.58 Οι τιμές των φυσικών παραμέτρων του τρίτου σώματος

| Parameter | Value | Parameter | Value |
|-------------------|--------|-------------------|--------|
| M (M_{\odot}) | 7.24 | R (R_{\odot}) | 4.6 |
| T (K) | 17857 | M (mag) | -1.83 |
| L (L_{\odot}) | 1021.1 | Sp. Type | B3-B4V |

Εντελώς αντίστοιχα όπως για το τρίτο σώμα, για τον μεγαλύτερης μάζας αστέρα του εκλειπτικού συστήματος βρίσκουμε $L_1 = 8356.2 L_{\odot}$, ενώ για τον μικρότερης μάζας αστέρα $L_2 = 6162.4 L_{\odot}$.

Από τη σχέση 4.47 βρίσκουμε ότι το τρίτο σώμα συνεισφέρει κατά 6.6% στην ολική φωτεινότητα του τριπλού συστήματος, το απόλυτο μέγεθος του λαμπρότερου αστέρα του συστήματος είναι -5.1 mag, οπότε προκύπτει ότι το τρίτο σώμα είναι 3.3 mag αμυδρότερο. Δυστυχώς δεν έχει γίνει έως τώρα εκτίμηση της απόστασης του συστήματος, οπότε δεν είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε την μέγιστη γωνιακή απόσταση του συστήματος από το τρίτο σώμα.

Στην παρούσα παράγραφο της εργασίας, μελετήθηκε το διάγραμμα O-C του μεταβλητού δι' εκλείψεων αστέρα DR Vul. Από την μορφή του O-C διαγράμματος που παρουσιάζει, υποθέσαμε ότι πρόκειται για διπλό εκλειπτικό σύστημα στο οποίο πιθανόν να υπάρχει και τρίτο μέλος, αλλά λαμβάνει χώρα και το φαινόμενο της μετάθεσης της γραμμής των ασίδων.

Ο εν λόγω αστέρας παρατηρήθηκε φωτομετρικά και υπολογίστηκαν δύο χρόνοι φωτομετρικών ελαχίστων. Από τη βιβλιογραφία συλλέξαμε και

παλαιότερους χρόνους ελαχίστων και κατασκευάστηκε το διάγραμμα O-C του συστήματος.

Η ανάλυση του O-C διαγράμματος με τη βοήθεια H/Y και εξειδικευμένου υπολογιστικού κώδικα, έδειξε ότι στο σύστημα λαμβάνει χώρα το LITE και το φαινόμενο της μετάθεσης της γραμμής των αψίδων με περίοδο περίπου 36 yrs. Υπολογίστηκαν οι τροχιακές και φυσικές παράμετροι του τρίτου σώματος βασιζόμενοι στο ότι ανήκει στην Κύρια Ακολουθία και υπολογίστηκε η νέα αστρονομική εφημερίδα του συστήματος. Βρήκαμε ότι η ελάχιστη μάζα του τρίτου σώματος είναι $7.24 M_{\odot}$ και ανήκει μεταξύ των φασματικών τύπων B3 και B4.

Το διάγραμμα των O-C υπολοίπων δεν δείχνει κάποια ιδιαίτερη κατανομή, οπότε με βεβαιότητα εξάγεται το συμπέρασμα ότι το LITE και η μετάθεση της γραμμής των αψίδων είναι τα μοναδικά φαινόμενα τα οποία και διαμορφώνουν το O-C διάγραμμα του αστέρα. Η σύγκριση της φωτεινότητάς του τρίτου μέλους με τις φωτεινότητες των μελών του διπλού συστήματος έδειξε ότι πρέπει να συμμετέχει κατά περίπου 6.6% στην ολική φωτεινότητα του συστήματος, οπότε είναι δυνατό να ανιχνευτεί μέσω υψηλής ανάλυσης φασματοσκοπίας είτε ακόμα και με επίλυση του φωτομετρικού του μοντέλου λαμβάνοντας υπ' όψη τη συνεισφορά του τρίτου σώματος.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Πίνακες χρόνων ελαχίστων

Στο πρώτο παράρτημα της εργασίας παρουσιάζονται σε πίνακες, οι χρόνοι ελαχίστων που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή και μελέτη των Ο-С διαγραμμάτων τους στο κεφάλαιο 5. Οι πίνακες παρουσιάζονται με αλφαβητική σειρά βασισμένη στον αστερισμό που ανήκει το κάθε σύστημα και περιλαμβάνουν τους χρόνους ελαχίστων, τον τύπο τους, την μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για την παρατήρησή τους (ν = οπτική, ρ, ρg = φωτογραφική, e & ρe = φωτοηλεκτρική, cc = ccd) και την δημοσίευσή τους.

GK Cep

| Minima (HJD) | Type | Method | Observer | Journal | Date | Vol | Issue |
|---------------|------|--------|---------------------|--------------|------|-----|-------|
| 2438265.47540 | sec | e | Bartolini,C. et al. | Contr.Asiago | 1965 | 168 | 1 |
| 2438355.34720 | sec | e | Bartolini,C. et al. | Contr.Asiago | 1965 | 168 | 1 |
| 2438407.30300 | pri | e | Bartolini,C. et al. | Contr.Asiago | 1965 | 168 | 1 |
| 2438528.53970 | sec | e | Bartolini,C. et al. | Contr.Asiago | 1965 | 168 | 1 |
| 2438559.43310 | sec | e | Bartolini,C. et al. | Contr.Asiago | 1965 | 168 | 1 |
| 2438580.49300 | pri | e | Bartolini,C. et al. | Contr.Asiago | 1965 | 168 | 1 |
| 2438606.70680 | pri | e | Robinson,L.J.t al. | I.B.V.S. | 1967 | 180 | |
| 2438627.77120 | sec | e | Gleim,J.K. | Astr.J. | 1967 | 72 | 510 |
| 2438634.79500 | pri | e | Robinson,L.J. | I.B.V.S. | 1967 | 180 | |
| 2438687.68600 | sec | e | Gleim,J.K. | Astr.J. | 1967 | 72 | 510 |
| 2438694.70700 | pri | e | Gleim,J.K. | Astr.J. | 1967 | 72 | 510 |
| 2438703.60150 | sec | e | Robinson,L.J. | I.B.V.S. | 1967 | 180 | |
| 2438708.74870 | pri | e | Robinson,L.J. | I.B.V.S. | 1967 | 180 | |
| 2438709.68660 | pri | e | Gleim,J.K. | Astr.J. | 1967 | 72 | 510 |
| 2438711.55870 | pri | e | Robinson,L.J. | I.B.V.S. | 1967 | 180 | |
| 2438713.43100 | pri | e | Bartolini,C. et al. | Contr.Asiago | 1965 | 168 | 1 |
| 2438731.68640 | sec | e | Gleim,J.K. | Astr.J. | 1967 | 72 | 510 |
| 2438737.30530 | sec | e | Bartolini,C. et al. | Contr.Asiago | 1965 | 168 | 1 |
| 2438748.54330 | sec | e | Gleim,J.K. | Astr.J. | 1967 | 72 | 510 |
| 2438997.09110 | pri | e | Robinson,L.J. | I.B.V.S. | 1967 | 180 | |
| 2438997.55920 | sec | e | Robinson,L.J. | I.B.V.S. | 1967 | 180 | |
| 2440532.38810 | pri | e | Dworak,T.Z. | Acta Astr. | 1975 | 25 | 103 |
| 2440532.38830 | pri | e | Dworak,T.Z. | Acta Astr. | 1975 | 25 | 103 |
| 2440542.22290 | sec | e | Dworak,T.Z. | Acta Astr. | 1975 | 25 | 103 |
| 2440542.22370 | sec | e | Dworak,T.Z. | Acta Astr. | 1975 | 25 | 103 |
| 2440845.53250 | sec | e | Dworak,T.Z. | Acta Astr. | 1975 | 25 | 103 |
| 2440845.53270 | sec | e | Dworak,T.Z. | Acta Astr. | 1975 | 25 | 103 |
| 2440852.54760 | pri | e | Dworak,T.Z. | Acta Astr. | 1975 | 25 | 103 |
| 2440852.54880 | pri | e | Dworak,T.Z. | Acta Astr. | 1975 | 25 | 103 |
| 2440867.52570 | pri | e | Dworak,T.Z. | Acta Astr. | 1975 | 25 | 103 |

| | | | | | | | |
|---------------|-----|---|----------------------------|------------------|------|------|-----|
| 2440867.52650 | pri | e | Dworak,T.Z. | Acta Astr. | 1975 | 25 | 103 |
| 2440868.46250 | pri | e | Dworak,T.Z. | Acta Astr. | 1975 | 25 | 103 |
| 2440868.46320 | pri | e | Dworak,T.Z. | Acta Astr. | 1975 | 25 | 103 |
| 2440869.39720 | pri | e | Dworak,T.Z. | Acta Astr. | 1975 | 25 | 103 |
| 2440869.39760 | pri | e | Dworak,T.Z. | Acta Astr. | 1975 | 25 | 103 |
| 2440870.33470 | pri | e | Dworak,T.Z. | Acta Astr. | 1975 | 25 | 103 |
| 2440870.33530 | pri | e | Dworak,T.Z. | Acta Astr. | 1975 | 25 | 103 |
| 2440876.42430 | sec | e | Dworak,T.Z. | Acta Astr. | 1975 | 25 | 103 |
| 2440876.42470 | sec | e | Dworak,T.Z. | Acta Astr. | 1975 | 25 | 103 |
| 2441080.50620 | sec | e | Dworak,T.Z. | Acta Astr. | 1975 | 25 | 103 |
| 2441080.50820 | sec | e | Dworak,T.Z. | Acta Astr. | 1975 | 25 | 103 |
| 2441570.58600 | pri | v | Isles,J.E. | J.Br.Astr.Assoc. | 1973 | 83 | 452 |
| 2441581.35800 | sec | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1972 | 5 | |
| 2441589.31400 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1972 | 5 | |
| 2441647.35100 | pri | v | Isles,J.E. | J.Br.Astr.Assoc. | 1973 | 83 | 452 |
| 2441713.34600 | sec | v | Derman,E.,Demircan,O. | Astr.J. | 1992 | 103 | 599 |
| 2441946.91910 | pri | e | Isles,J.E. | I.B.V.S. | 1985 | 2741 | |
| 2442086.40600 | pri | v | Isles,J.E. | J.Br.Astr.Assoc. | 1975 | 85 | 443 |
| 2442087.35000 | pri | v | Isles,J.E. | J.Br.Astr.Assoc. | 1975 | 85 | 443 |
| 2442319.50700 | pri | v | Isles,J.E. | J.Br.Astr.Assoc. | 1975 | 85 | 443 |
| 2442957.50600 | sec | v | Isles,J.E. | BAA VSS Circ. | 1984 | 58 | 11 |
| 2443068.44600 | pri | v | Derman,E.,Demircan,O. | Astr.J. | 1992 | 103 | 599 |
| 2443307.63630 | sec | e | Winiarski,M. | unpublished | 1977 | | |
| 2443384.40300 | sec | v | Isles,J.E. | BAA VSS Circ. | 1984 | 58 | 11 |
| 2443411.55050 | sec | e | Winiarski,M. | unpublished | 1977 | | |
| 2443464.43900 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1977 | 35 | |
| 2443590.36000 | sec | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1978 | 38 | |
| 2443597.38600 | pri | v | Isles,J.E. | BAA VSS Circ. | 1984 | 58 | 11 |
| 2443772.44800 | pri | v | Isles,J.E. | BAA VSS Circ. | 1984 | 58 | 11 |
| 2444880.40800 | sec | v | Isles,J.E. | BAA VSS Circ. | 1984 | 59 | 14 |
| 2444937.51600 | sec | e | Isles,J.E. | I.B.V.S. | 1985 | 2741 | |
| 2445671.46800 | sec | e | Isles,J.E. | I.B.V.S. | 1985 | 2741 | |
| 2445890.53600 | sec | e | Diethelm,R. | BBSAG Bull. | 1984 | 73 | |
| 2446162.49230 | pri | e | Isles,J.E. | BAA VSS Circ. | 1986 | 66 | 32 |
| 2446162.49430 | pri | e | Isles,J.E. | I.B.V.S. | 1985 | 2741 | |
| 2446287.47120 | sec | e | Pohl,E. et al. | I.B.V.S. | 1987 | 3078 | |
| 2446311.34130 | pri | e | Pohl,E. et al. | I.B.V.S. | 1987 | 3078 | |
| 2446318.36440 | sec | e | Pohl,E. et al. | I.B.V.S. | 1987 | 3078 | |
| 2446325.38470 | pri | e | Pohl,E. et al. | I.B.V.S. | 1987 | 3078 | |
| 2446332.40570 | sec | e | Pohl,E. et al. | I.B.V.S. | 1987 | 3078 | |
| 2446339.42870 | pri | e | Pohl,E. et al. | I.B.V.S. | 1987 | 3078 | |
| 2446434.44880 | sec | e | Isles,J.E. | BAA VSS Circ. | 1986 | 66 | 32 |
| 2446646.49170 | pri | e | Zola,S. | unpublished | 1985 | | |
| 2446691.42640 | pri | e | Pohl,E. et al. | I.B.V.S. | 1987 | 3078 | |
| 2446699.38010 | sec | e | Braune,W.,Huebscher,J. | B.A.V.Mitt. | 1987 | 46 | |
| 2446750.40310 | pri | e | Isles,J.E. | BAA VSS Circ. | 1986 | 66 | 32 |
| 2447063.54720 | sec | e | Rovithis-Livaniou,H.et al. | I.B.V.S. | 1990 | 3528 | |
| 2447064.48280 | sec | e | Rovithis-Livaniou,H.et al. | I.B.V.S. | 1990 | 3528 | |

| | | | | | | | |
|---------------|-----|----|----------------------------|----------------------|------|------|-----|
| 2447065.41930 | sec | e | Rovithis-Livaniou,H.et al. | I.B.V.S. | 1990 | 3528 | |
| 2447335.50290 | pri | e | Rovithis-Livaniou,H.et al. | I.B.V.S. | 1990 | 3528 | |
| 2447349.54560 | pri | e | Rovithis-Livaniou,H.et al. | I.B.V.S. | 1990 | 3528 | |
| 2447350.48120 | pri | e | Rovithis-Livaniou,H.et al. | I.B.V.S. | 1990 | 3528 | |
| 2447351.41890 | pri | e | Rovithis-Livaniou,H.et al. | I.B.V.S. | 1990 | 3528 | |
| 2447393.54500 | pri | e | Kreiner,J.M.et al. | Contr.Skalnate Pleso | 1990 | 20 | 49 |
| 2447394.48460 | pri | e | Rovithis-Livaniou,H.et al. | I.B.V.S. | 1990 | 3528 | |
| 2447395.41760 | pri | e | Rovithis-Livaniou,H.et al. | I.B.V.S. | 1990 | 3528 | |
| 2447396.35640 | pri | e | Rovithis-Livaniou,H.et al. | I.B.V.S. | 1990 | 3528 | |
| 2447397.28820 | pri | e | Rovithis-Livaniou,H.et al. | I.B.V.S. | 1990 | 3528 | |
| 2447402.43600 | sec | e | Kreiner,J.M.et al. | Contr.Skalnate Pleso | 1990 | 20 | 49 |
| 2447416.48150 | sec | e | Kreiner,J.M.et al. | Contr.Skalnate Pleso | 1990 | 20 | 49 |
| 2447416.48230 | sec | e | Isles,J. | BAA VSS Circ. | 1991 | 72 | 22 |
| 2447469.37160 | pri | e | Isles,J. | BAA VSS Circ. | 1991 | 72 | 22 |
| 2447688.43400 | pri | e | Kreiner,J.M.et al. | Contr.Skalnate Pleso | 1990 | 20 | 49 |
| 2447695.45300 | sec | e | Paschke,A. | BBSAG Bull. | 1990 | 93 | |
| 2447703.41200 | pri | e | Kreiner,J.M.et al. | Contr.Skalnate Pleso | 1990 | 20 | 49 |
| 2447731.49520 | pri | e | Isles, J. | BAA VSS Circ. | 1992 | 73 | 16 |
| 2447813.40750 | sec | e | Isles, J. | BAA VSS Circ. | 1992 | 73 | 16 |
| 2447967.40900 | pri | e | Kreiner,J.M.et al. | Contr.Skalnate Pleso | 1990 | 20 | 49 |
| 2448038.55140 | pri | e | Brelstaff,T. | BAA VSS Circ. | 1997 | 91 | 16 |
| 2448104.54850 | sec | e | Brelstaff,T. | BAA VSS Circ. | 1997 | 91 | 16 |
| 2448372.76100 | pri | cc | Hipparcos | unpublished | 2001 | | |
| 2448479.47550 | pri | e | Wolf,M.,Diethelm,R. | Acta Astr. | 1992 | 42 | 363 |
| 2448488.37400 | sec | e | Wolf,M.,Diethelm,R. | Acta Astr. | 1992 | 42 | 363 |
| 2448495.39480 | pri | e | Wolf,M.,Diethelm,R. | Acta Astr. | 1992 | 42 | 363 |
| 2448503.35250 | sec | e | Wolf,M.,Diethelm,R. | Acta Astr. | 1992 | 42 | 363 |
| 2448562.32950 | sec | cc | Hipparcos | unpublished | 2001 | | |
| 2448831.47460 | pri | e | Brelstaff,T. | BAA VSS Circ. | 1994 | 81 | 4 |
| 2449313.60400 | pri | e | Benge,R.D.,Roberts,J.A. | J.A.A.V.S.O. | 1994 | 23 | 20 |
| 2449356.66800 | pri | e | Benge,R.D.,Roberts,J.A. | J.A.A.V.S.O. | 1994 | 23 | 20 |
| 2449357.59800 | pri | e | Benge,R.D.,Roberts,J.A. | J.A.A.V.S.O. | 1994 | 23 | 20 |
| 2450210.45300 | pri | cc | Biro,I.B.et al. | I.B.V.S. | 1998 | 4555 | |
| 2450225.42970 | pri | cc | Biro,I.B.et al. | I.B.V.S. | 1998 | 4555 | |
| 2452912.23680 | pri | cc | Kim,C.H. et al. | I.B.V.S. | 2006 | 5694 | |
| 2452919.26450 | sec | cc | Kim,C.H. et al. | I.B.V.S. | 2006 | 5694 | |
| 2453617.64430 | sec | cc | Ogloza,W. | unpublished | 2005 | | |
| 2453899.42620 | sec | cc | Dreveny, R. | OEJV | 2007 | 74 | 1 |
| 2454271.55140 | pri | cc | Dreveny, R. | OEJV | 2007 | 74 | 1 |
| 2454271.55200 | pri | cc | Dreveny, R. | OEJV | 2007 | 74 | 1 |
| 2454114.27388 | pri | cc | Liakos, A. | | | | |
| 2454273.42250 | pri | cc | Liakos, A. | | | | |
| 2454279.50782 | sec | cc | Liakos, A. | | | | |

TZ Eri

| Minima (HJD) | Type | Method | Observer | Journal | Date | Vol | Issue |
|---------------|------|--------|------------------------|------------------|------|-----|-------|
| 2425946.33000 | pri | v | Pagaczewski,J. | Acta Astr.ser.b | 1934 | 2 | 19 |
| 2425951.52700 | pri | v | Pagaczewski,J. | Acta Astr.ser.b | 1934 | 2 | 19 |
| 2425951.52900 | pri | v | Pagaczewski,J. | Acta Astr.ser.c | 1930 | 1 | 149 |
| 2426032.32000 | pri | v | Pagaczewski,J. | Acta Astr.ser.b | 1934 | 2 | 19 |
| 2426066.18700 | pri | v | Pagaczewski,J. | Acta Astr.ser.b | 1934 | 2 | 19 |
| 2426066.19800 | pri | v | Pagaczewski,J. | Acta Astr.ser.c | 1931 | 2 | 28 |
| 2426269.47500 | pri | v | Pagaczewski,J. | Acta Astr.ser.b | 1934 | 2 | 19 |
| 2426295.53000 | pri | v | Pagaczewski,J. | Acta Astr.ser.b | 1934 | 2 | 19 |
| 2426295.53300 | pri | v | Pagaczewski,J. | Acta Astr.ser.b | 1934 | 2 | 19 |
| 2426600.43700 | pri | v | Pagaczewski,J. | Acta Astr.ser.b | 1934 | 2 | 19 |
| 2428836.47000 | pri | v | Pagaczewski,J. | Circ.Warsaw Obs. | 1945 | 21 | 5 |
| 2428930.29200 | pri | v | Pagaczewski,J. | Circ.Warsaw Obs. | 1945 | 21 | 5 |
| 2431153.30000 | pri | v | Pagaczewski,J. | Circ.Warsaw Obs. | 1945 | 21 | 5 |
| 2432227.00100 | pri | v | Soloviev,A.V. | Perem.Zv. | 1958 | 12 | 262 |
| 2432234.82900 | pri | v | Soloviev,A. | Astr.Circ.USSR | 1947 | 62 | 8 |
| 2432615.31800 | pri | v | Szczepanowska,A. | Acta Astr.ser.c | 1953 | 5 | 74 |
| 2433209.51500 | pri | v | Szczepanowska,A. | Acta Astr. | 1956 | 6 | 144 |
| 2433209.51900 | pri | v | Kreiner,J.M. | unpublished | 1994 | | |
| 2438283.62000 | pri | v | Kordylewski,K. | I.B.V.S. | 1963 | 35 | |
| 2439112.35800 | pri | v | Pohl,E.,Kizilirmak,A. | A.N. | 1966 | 289 | 191 |
| 2439112.35900 | pri | v | Kizilirmak,R. | A.N. | 1966 | 289 | 192 |
| 2439852.49800 | pri | v | Locher,K. | Orion | 1968 | 105 | 54 |
| 2439886.37500 | pri | v | Locher,K. | Orion | 1968 | 105 | 54 |
| 2440157.40800 | pri | v | Diethelm,R.,Locher,K. | Orion | 1969 | 110 | 23 |
| 2440243.41800 | pri | v | Diethelm,R.,Locher,K. | Orion | 1969 | 111 | 46 |
| 2440527.46900 | pri | v | Diethelm,R.,Locher,K. | Orion | 1970 | 116 | 21 |
| 2440527.47200 | pri | v | Diethelm,R.,Locher,K. | Orion | 1970 | 116 | 21 |
| 2440837.59400 | pri | v | Diethelm,R.,Locher,K. | Orion | 1970 | 121 | 191 |
| 2440923.56800 | pri | v | Diethelm,R.,Locher,K. | Orion | 1971 | 122 | 21 |
| 2441301.46900 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1972 | 1 | |
| 2441335.35200 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1972 | 2 | |
| 2441585.53000 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1972 | 5 | |
| 2441942.57800 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1973 | 11 | |
| 2441989.47300 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1973 | 12 | |
| 2442096.31800 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1974 | 14 | |
| 2442299.59800 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1974 | 17 | |
| 2442414.26000 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1975 | 20 | |
| 2442414.26300 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1975 | 20 | |
| 2442414.27100 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1975 | 20 | |
| 2442427.29700 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1975 | 20 | |
| 2442453.35400 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1975 | 21 | |
| 2442716.57700 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1975 | 24 | |
| 2442807.77600 | pri | v | Baldwin,M., Samolyk,G. | AAVSO | 2000 | 6 | |
| 2443172.62100 | pri | v | Baldwin,M., Samolyk,G. | AAVSO | 2000 | 6 | |
| 2443795.47800 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1978 | 39 | |
| 2443821.53800 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1978 | 40 | |
| 2443889.30400 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1979 | 41 | |
| 2444118.62000 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1979 | 45 | |
| 2444212.44500 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1980 | 46 | |

| | | | | | | | |
|---------------|-----|----|-----------------------------|----------------------|------|------|-----|
| 2444212.45400 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1980 | 46 | |
| 2444225.47800 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1980 | 46 | |
| 2444582.51600 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1981 | 52 | |
| 2444590.33500 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1981 | 52 | |
| 2444603.36400 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1981 | 52 | |
| 2444603.36500 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1981 | 52 | |
| 2444608.58500 | pri | v | Baldwin,M., Samolyk,G. | AAVSO | 2000 | 6 | |
| 2444634.64200 | pri | v | Baldwin,M., Samolyk,G. | AAVSO | 2000 | 6 | |
| 2444663.30200 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1981 | 53 | |
| 2444957.79800 | pri | v | Baldwin,M., Samolyk,G. | AAVSO | 2000 | 6 | |
| 2445236.64200 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1982 | 62 | |
| 2445241.85920 | pri | e | Faulkner,D.R.,Kaitchuck,R.H | I.B.V.S. | 1983 | 2321 | |
| 2445296.58700 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1983 | 64 | |
| 2445351.31700 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1983 | 64 | |
| 2446005.44400 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1984 | 74 | |
| 2446065.38900 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1985 | 75 | |
| 2446109.69220 | pri | e | Barblan,F. et al. | A.Astroph.Suppl. | 1998 | 132 | |
| 2446685.62700 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1986 | 81 | |
| 2447149.51000 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1988 | 86 | |
| 2447157.34900 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1988 | 86 | 367 |
| 2447157.35100 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1988 | 87 | |
| 2447170.37700 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1988 | 87 | |
| 2447170.37800 | pri | v | Brno observers | Brno Contr. | 1992 | 30 | |
| 2447170.37900 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1988 | 87 | |
| 2447527.41100 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1989 | 90 | |
| 2447532.62700 | pri | v | Baldwin,M., Samolyk,G. | AAVSO | 2000 | 6 | |
| 2447545.65800 | pri | v | Baldwin,M., Samolyk,G. | AAVSO | 2000 | 6 | 4 |
| 2447803.65800 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1989 | 92 | |
| 2447824.50800 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1990 | 93 | |
| 2447858.38800 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1990 | 93 | |
| 2447897.47300 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1990 | 94 | |
| 2448538.59600 | pri | cc | Paschke,A. | BBSAG Bull. | 1992 | 100 | |
| 2448616.78200 | pri | v | Baldwin,M., Samolyk,G. | AAVSO | 2000 | 6 | |
| 2448619.38600 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1992 | 100 | |
| 2448619.38700 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1992 | 99 | |
| 2448619.40200 | pri | v | Zejda,M. (red.) | Brno Contr. | 1995 | 31 | |
| 2448653.27200 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1992 | 100 | |
| 2448963.39100 | pri | v | Locher,K. | BBSAG Bull. | 1992 | 102 | |
| 2449239.63500 | pri | v | Locher,K. | BBSAG Bull. | 1994 | 105 | |
| 2449270.92300 | pri | v | Baldwin,M., Samolyk,G. | AAVSO | 2000 | 6 | 4 |
| 2449364.75400 | pri | v | Baldwin,M., Samolyk,G. | AAVSO | 2000 | 6 | |
| 2449382.99500 | pri | v | V.S.L.O.Japan observers | Var.Star Bull.,Japan | 1995 | 23 | |
| 2449661.83900 | pri | v | Baldwin,M., Samolyk,G. | AAVSO | 2000 | 6 | |
| 2449693.12400 | pri | v | V.S.L.O.Japan observers | Var.Star Bull.,Japan | 1995 | 23 | |
| 2449737.39600 | pri | v | Locher,K. | BBSAG Bull. | 1995 | 108 | |
| 2450008.46700 | pri | v | Locher,K. | BBSAG Bull. | 1995 | 110 | |
| 2450425.44900 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1997 | 114 | |
| 2450503.64000 | pri | v | Baldwin,M., Samolyk,G. | AAVSO | 2000 | 6 | |
| 2450790.31900 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1998 | 116 | |
| 2450863.28400 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1998 | 117 | |
| 2451144.75200 | pri | v | Baldwin,M., Samolyk,G. | AAVSO | 2000 | 6 | |
| 2451189.05400 | pri | v | Nagai,K. | Var.Star Bull.,Japan | 2000 | 37 | |

| | | | | | | | |
|---------------|-----|----|------------------------|---------------------|------|-----|-----|
| 2451397.48400 | pri | cc | Paschke A. | Rotse | | | |
| 2451488.76400 | pri | v | Baldwin,M., Samolyk,G. | AAVSO | 2000 | 6 | |
| 2451582.58300 | pri | v | Baldwin,M., Samolyk,G. | AAVSO | 2000 | 6 | |
| 2451595.61400 | pri | v | Baldwin,M., Samolyk,G. | AAVSO | 2000 | 6 | 2 |
| 2451840.59200 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 2001 | 124 | |
| 2452184.60500 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 2001 | 126 | |
| 2452278.42800 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 2002 | 127 | |
| 2453302.64000 | pri | v | Locher,K. | Eur.J.Var.Stars | 2005 | 3 | |
| 2453373.01000 | pri | v | Nagai,K. | Var.Star.Bull.Japan | 2006 | 44 | |
| 2453662.29200 | pri | v | Nagai,K. | Var.Star.Bull.Japan | 2006 | 44 | |
| 2453763.93500 | pri | v | Nagai,K. | Var.Star Bull.Japan | 2007 | 45 | |
| 2454368.55806 | pri | cc | Liakos, A. | New Astronomy | 2008 | 13 | 405 |
| 2454475.40918 | pri | cc | Liakos, A. | | | | |
| 2454479.31937 | sec | cc | Liakos, A. | | | | |
| 2454496.25828 | pri | cc | Liakos, A. | | | | |

VX Lac

| Minima (HJD) | Type | Method | Observer | Journal | Date | Vol | Issue |
|---------------|------|--------|------------------------------|-----------------|------|------|-------|
| 2424791.48500 | pri | pg | Romano,G.,Perissinotto,M. | Contr.Padova | 1972 | 163 | |
| 2426594.47700 | pri | pg | Romano,G.,Perissinotto,M. | Contr.Padova | 1972 | 163 | |
| 2426940.46600 | pri | pg | Romano,G.,Perissinotto,M. | Contr.Padova | 1972 | 163 | |
| 2427384.23300 | pri | v | Tsesevitch,V.P. | Tadjik Circ. | 1934 | 1 | |
| 2427385.30600 | pri | v | Tsesevitch,V.P. | Astr.Circ.USSR | 1943 | 18 | 3 |
| 2427385.30700 | pri | v | Tsesevitch,V.P. | Tadjik Circ. | 1934 | 1 | |
| 2427602.36100 | pri | v | Romano,G.,Perissinotto,M. | Contr.Padova | 1972 | 163 | |
| 2428814.37200 | pri | v | Romano,G.,Perissinotto,M. | Contr.Padova | 1972 | 163 | |
| 2429146.38900 | pri | v | Romano,G.,Perissinotto,M. | Contr.Padova | 1972 | 163 | |
| 2429630.98100 | pri | v | Romano,G.,Perissinotto,M. | Contr.Padova | 1972 | 163 | |
| 2432479.47600 | pri | v | Szafraniec,R. | Acta Astr.ser.c | 1948 | 4 | 81 |
| 2432781.40500 | pri | v | Szafraniec,R. | Acta Astr.ser.c | 1950 | 4 | 113 |
| 2432868.43700 | pri | v | Szafraniec,R. | Acta Astr.ser.c | 1950 | 4 | 113 |
| 2433170.37700 | pri | v | Szafraniec,R. | Acta Astr.ser.c | 1952 | 5 | 5 |
| 2433185.41900 | pri | v | Szafraniec,R. | Acta Astr.ser.c | 1952 | 5 | 5 |
| 2433561.49800 | pri | v | Szafraniec,R. | Acta Astr.ser.c | 1952 | 5 | 7 |
| 2433792.51200 | pri | v | Szafraniec,R. | Acta Astr.ser.c | 1952 | 5 | 10 |
| 2433863.43500 | pri | v | Szafraniec,R. | Acta Astr.ser.c | 1952 | 5 | 10 |
| 2434195.45200 | pri | v | Szafraniec,R. | Acta Astr.ser.c | 1953 | 5 | 51 |
| 2434224.46500 | pri | v | Szafraniec,R. | Acta Astr.ser.c | 1953 | 5 | 51 |
| 2434239.50500 | pri | v | Szafraniec,R. | Acta Astr.ser.c | 1953 | 5 | 51 |
| 2434685.42600 | pri | v | Szafraniec,R. | Acta Astr.ser.c | 1955 | 5 | 189 |
| 2434958.35200 | pri | v | Szafraniec,R. | Acta Astr.ser.c | 1955 | 5 | 193 |
| 2434988.43700 | pri | v | Szafraniec,R. | Acta Astr.ser.c | 1955 | 5 | 193 |
| 2435018.52100 | pri | v | Szafraniec,R. | Acta Astr.ser.c | 1955 | 5 | 193 |
| 2435349.47200 | pri | v | Tsesevitch,V.P. | Astr.Circ.USSR | 1955 | 164 | 15 |
| 2435421.45700 | pri | v | Szafraniec,R. | Acta Astr. | 1956 | 6 | 141 |
| 2435723.39100 | pri | v | Szafraniec,R. | Acta Astr. | 1957 | 7 | 188 |
| 2436128.48600 | pri | v | Szafraniec,R. | Acta Astr. | 1958 | 8 | 189 |
| 2436762.43000 | pri | v | Szafraniec,R. | Acta Astr. | 1960 | 10 | 69 |
| 2437196.52400 | pri | v | Flin,P.,Slowik,A. | Acta Astr. | 1967 | 17 | 59 |
| 2437526.39800 | pri | v | Czerlunczakiewicz,B.,Flin,P. | Acta Astr. | 1968 | 18 | 331 |
| 2437526.39900 | pri | v | Flin,P.,Slowik,A. | Acta Astr. | 1967 | 17 | 59 |
| 2437556.48400 | pri | v | Flin,P.,Slowik,A. | Acta Astr. | 1967 | 17 | 59 |
| 2437888.51200 | pri | v | Czerlunczakiewicz,B.,Flin,P. | Acta Astr. | 1968 | 18 | 331 |
| 2437901.40300 | pri | v | Flin,P.,Slowik,A. | Acta Astr. | 1967 | 17 | 59 |
| 2438551.46900 | pri | v | Romano,G.,Perissinotto,M. | Contr.Padova | 1972 | 163 | |
| 2438623.46600 | pri | v | Kreiner,J.M.,Winiarski,M. | I.B.V.S. | 1977 | 1255 | |
| 2439012.43300 | pri | v | Ahnert,P. | M.V.S. | 1973 | 6 | 109 |
| 2439025.32700 | pri | v | Oburka,O. | Brno Contr. | 1966 | 5 | |
| 2439026.39800 | pri | v | Ahnert,P. | M.V.S. | 1973 | 6 | 109 |
| 2439027.47000 | pri | v | Kreiner,J.M.,Winiarski,M. | I.B.V.S. | 1977 | 1255 | |
| 2439027.47800 | pri | v | Oburka,O. | Brno Contr. | 1966 | 5 | |
| 2439055.41200 | pri | v | Szafraniec,R. | Acta Astr. | 1966 | 16 | 157 |
| 2439291.80100 | pri | v | Robinson,L.J. | I.B.V.S. | 1966 | 154 | |
| 2439363.79400 | pri | v | Romano,G.,Perissinotto,M. | Contr.Padova | 1972 | 163 | |
| 2439679.69400 | pri | v | Baldwin,M.E. | J.A.A.V.S.O. | 1974 | 3 | 60 |
| 2439705.48100 | pri | v | Czerlunczakiewicz,B.,Flin,P. | Acta Astr. | 1968 | 18 | 331 |
| 2439736.64800 | pri | p | Romano,G.,Perissinotto,M. | Contr.Padova | 1972 | 163 | |

| | | | | | | | |
|---------------|-----|----|---------------------------|--------------|------|-----|-----|
| 2439765.65300 | pri | v | Baldwin,M.E. | J.A.A.V.S.O. | 1974 | 3 | 60 |
| 2439793.59800 | pri | v | Baldwin,M.E. | J.A.A.V.S.O. | 1974 | 3 | 60 |
| 2439818.30000 | pri | p | Romano,G.,Perissinotto,M. | Contr.Padova | 1972 | 163 | |
| 2440084.78400 | pri | v | Baldwin,M.E. | J.A.A.V.S.O. | 1974 | 3 | 60 |
| 2440097.67500 | pri | v | Baldwin,M.E. | J.A.A.V.S.O. | 1974 | 3 | 60 |
| 2440125.61000 | pri | v | Baldwin,M.E. | J.A.A.V.S.O. | 1974 | 3 | 60 |
| 2440149.25000 | pri | p | Romano,G.,Perissinotto,M. | Contr.Padova | 1972 | 163 | |
| 2440151.40100 | pri | p | Romano,G.,Perissinotto,M. | Contr.Padova | 1972 | 163 | |
| 2440197.60700 | pri | v | Baldwin,M.E. | J.A.A.V.S.O. | 1974 | 3 | 60 |
| 2440207.27500 | pri | p | Romano,G.,Perissinotto,M. | Contr.Padova | 1972 | 163 | |
| 2440472.67200 | pri | v | Baldwin,M.E. | J.A.A.V.S.O. | 1974 | 3 | 60 |
| 2440483.41800 | pri | pg | Ahnert,P. | M.V.S. | 1969 | 5 | 112 |
| 2440510.29000 | pri | p | Romano,G.,Perissinotto,M. | Contr.Padova | 1972 | 163 | |
| 2440750.96700 | pri | v | Ahnert,P. | M.V.S. | 1973 | 6 | 109 |
| 2440801.47200 | pri | v | Diethelm,R.,Locher,K. | Orion | 1970 | 120 | 160 |
| 2440857.34400 | pri | v | Baldwin,M.E. | J.A.A.V.S.O. | 1975 | 4 | 86 |
| 2440858.41500 | pri | pg | Ahnert,P. | M.V.S. | 1971 | 6 | 8 |
| 2440858.41600 | pri | v | Baldwin,M.E. | J.A.A.V.S.O. | 1975 | 4 | 86 |
| 2440861.64400 | pri | v | Baldwin,M.E. | J.A.A.V.S.O. | 1975 | 4 | 86 |
| 2440884.21000 | pri | p | Romano,G.,Perissinotto,M. | Contr.Padova | 1972 | 163 | |
| 2440913.22400 | pri | p | Romano,G.,Perissinotto,M. | Contr.Padova | 1972 | 163 | |
| 2440915.37000 | pri | p | Romano,G.,Perissinotto,M. | Contr.Padova | 1972 | 163 | |
| 2441162.49900 | pri | v | Diethelm,R. et al. | Orion | 1971 | 126 | |
| 2441217.30300 | pri | v | Diethelm,R. et al. | Orion | 1971 | 127 | |
| 2441246.30900 | pri | v | Diethelm,R. et al. | Orion | 1972 | 129 | 60 |
| 2441246.31100 | pri | v | Diethelm,R. et al. | Orion | 1972 | 129 | 60 |
| 2441507.41300 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1972 | 4 | |
| 2441522.45400 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1972 | 4 | |
| 2441536.42200 | pri | v | Ahnert,P. | M.V.S. | 1973 | 6 | 109 |
| 2441565.42900 | pri | v | Baldwin,M.E. | J.A.A.V.S.O. | 1976 | 5 | 29 |
| 2441592.29800 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1972 | 6 | |
| 2441607.34000 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1972 | 6 | |
| 2441622.37600 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1972 | 6 | |
| 2441623.45300 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1972 | 6 | |
| 2441650.31700 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1972 | 6 | |
| 2441664.28500 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1973 | 7 | |
| 2441897.45700 | pri | v | Pokorny,Z. | Brno Contr. | 1974 | 17 | |
| 2441911.41500 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1973 | 11 | |
| 2441913.55800 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1973 | 11 | |
| 2441928.61000 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1973 | 11 | |
| 2441939.35600 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1973 | 11 | |
| 2441942.57800 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1973 | 11 | |
| 2441971.59200 | pri | v | Baldwin,M.E. | J.A.A.V.S.O. | 1976 | 5 | 84 |
| 2441981.25800 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1973 | 12 | |
| 2441981.26000 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1973 | 12 | |
| 2441981.27000 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1973 | 12 | |
| 2442026.39600 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1974 | 13 | |
| 2442187.55800 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1974 | 15 | |
| 2442258.47700 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1974 | 16 | |
| 2442300.38100 | pri | v | Pokorny,Z. | Brno Contr. | 1976 | 20 | |
| 2442304.68200 | pri | v | Baldwin,M.E. | J.A.A.V.S.O. | 1977 | 6 | 24 |
| 2442414.27400 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1975 | 20 | |

| | | | | | | | |
|---------------|-----|---|-------------------------|---------------------|------|------|----|
| 2442414.27800 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1975 | 20 | |
| 2442416.42200 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1975 | 20 | |
| 2442416.42300 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1975 | 20 | |
| 2442428.25000 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1975 | 20 | |
| 2442428.25800 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1975 | 20 | |
| 2442565.78100 | pri | v | Baldwin,M.E. | J.A.A.V.S.O. | 1978 | 7 | 28 |
| 2442575.45600 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1975 | 23 | |
| 2442575.45900 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1975 | 23 | |
| 2442604.46500 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1975 | 23 | |
| 2442608.76200 | pri | v | Baldwin,M.E. | J.A.A.V.S.O. | 1978 | 7 | 28 |
| 2442624.88200 | pri | v | Baldwin,M.E. | J.A.A.V.S.O. | 1978 | 7 | 28 |
| 2442633.47500 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1975 | 23 | |
| 2442637.77400 | pri | v | Baldwin,M.E. | J.A.A.V.S.O. | 1978 | 7 | 28 |
| 2442664.63400 | pri | v | Mallama,A.D. et al. | I.B.V.S. | 1977 | 1249 | |
| 2442664.63900 | pri | v | Baldwin,M.E. | J.A.A.V.S.O. | 1978 | 7 | 28 |
| 2442665.71000 | pri | v | Baldwin,M.E. | J.A.A.V.S.O. | 1978 | 7 | 28 |
| 2442679.67900 | pri | v | Baldwin,M.E. | J.A.A.V.S.O. | 1978 | 7 | 28 |
| 2442692.57500 | pri | v | Baldwin,M.E. | J.A.A.V.S.O. | 1978 | 7 | 28 |
| 2442707.61700 | pri | v | Mallama,A.D. et al. | I.B.V.S. | 1977 | 1249 | |
| 2442722.66100 | pri | v | Baldwin,M.E. | J.A.A.V.S.O. | 1978 | 7 | 28 |
| 2442908.54400 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1976 | 28 | |
| 2442965.49100 | pri | v | Pokorny,Z. | Brno Contr. | 1978 | 21 | 3 |
| 2442984.83200 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2442984.84200 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2442999.87800 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2443036.41200 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1976 | 30 | |
| 2443301.80600 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2443301.81100 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2443357.68200 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2443371.65100 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2443373.79700 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2443410.33800 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1977 | 35 | |
| 2443510.26200 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1978 | 36 | |
| 2443718.71400 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2443774.58500 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2443776.73900 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2443790.70900 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2444022.79700 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2444117.35500 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1979 | 44 | |
| 2444136.69300 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2444189.34700 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1979 | 45 | |
| 2444437.54900 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1980 | 49 | |
| 2444525.66200 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2444564.34500 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1980 | 51 | |
| 2444786.75700 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2444816.84800 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2444853.38000 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1981 | 56 | |
| 2444854.45100 | pri | v | Mikulasek,Z. | Brno Contr. | 1985 | 26 | 5 |
| 2444871.64500 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2444885.61600 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2444885.61800 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2444895.28800 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1981 | 57 | |

| | | | | | | | |
|---------------|-----|---|-------------------------|---------------------|------|----|----|
| 2444900.65700 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2444911.40200 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1982 | 58 | |
| 2444925.37500 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1981 | 57 | |
| 2445100.52000 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1982 | 60 | |
| 2445172.50400 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1982 | 61 | |
| 2445200.43900 | pri | v | Mikulasek,Z. | Brno Contr. | 1985 | 26 | 5 |
| 2445200.44500 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1982 | 62 | |
| 2445214.41200 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1982 | 62 | |
| 2445227.30700 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1982 | 62 | |
| 2445258.46600 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1982 | 63 | |
| 2445261.68600 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2445317.56300 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2445328.31100 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1983 | 64 | |
| 2445342.28300 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1983 | 64 | |
| 2445504.52800 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1983 | 67 | |
| 2445561.47200 | pri | v | Isles,J.E. | BAA VSS Circ. | 1985 | 60 | 15 |
| 2445562.54700 | pri | v | Mikulasek,Z. | Brno Contr. | 1985 | 26 | 5 |
| 2445574.37300 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1983 | 68 | |
| 2445577.58300 | pri | v | Mikulasek,Z. | Brno Contr. | 1985 | 26 | 5 |
| 2445602.30000 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1983 | 68 | |
| 2445602.30100 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1983 | 68 | |
| 2445603.38000 | pri | v | Isles,J.E. | BAA VSS Circ. | 1985 | 60 | 15 |
| 2445603.38100 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1983 | 69 | |
| 2445608.75200 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2445617.34400 | pri | v | Mikulasek,Z. | Brno Contr. | 1985 | 26 | 5 |
| 2445622.72200 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2445664.62600 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2445673.21800 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1984 | 70 | |
| 2445878.45200 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1984 | 72 | |
| 2445935.40000 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1984 | 73 | |
| 2445939.69800 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2445991.27300 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1984 | 74 | |
| 2446006.31400 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1984 | 74 | |
| 2446010.61400 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2446024.58000 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2446024.58300 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2446025.65600 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2446068.63800 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2446297.49800 | pri | v | Isles,J. | BAA VSS Circ. | 1986 | 64 | 21 |
| 2446329.73700 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2446329.73900 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2446352.30000 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1986 | 79 | |
| 2446357.67400 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2446657.46000 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1986 | 81 | |
| 2446674.65000 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2446702.59000 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2446727.30000 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1987 | 82 | |
| 2446742.34600 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1987 | 82 | |
| 2446770.27800 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1987 | 83 | |
| 2446770.28000 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1987 | 82 | |
| 2446774.57900 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2446975.50300 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1987 | 84 | |

| | | | | | | | |
|---------------|-----|---|-------------------------|---------------------|------|-----|----|
| 2447003.44400 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1988 | 86 | |
| 2447004.51800 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1988 | 86 | |
| 2447061.47200 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1988 | 86 | |
| 2447063.62200 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2447064.69300 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2447065.76800 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2447088.32700 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1988 | 86 | |
| 2447088.34000 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1988 | 86 | |
| 2447108.74800 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2447117.34600 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1988 | 86 | |
| 2447150.65700 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2447159.24500 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1988 | 87 | |
| 2447307.53800 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1988 | 88 | |
| 2447363.40300 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1988 | 89 | |
| 2447378.43900 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1988 | 89 | |
| 2447381.67600 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2447382.74300 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2447392.41700 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1988 | 89 | |
| 2447392.42400 | pri | v | Brno observers | Brno Contr. | 1992 | 30 | 4 |
| 2447410.68400 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2447411.75600 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2447412.83400 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2447425.72300 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2447438.62300 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2447439.69100 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2447508.47100 | pri | v | Isles,J. | BAA VSS Circ. | 1991 | 72 | 22 |
| 2447534.24400 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1989 | 91 | |
| 2447539.61900 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2447767.41500 | pri | v | Isles,J. | BAA VSS Circ. | 1992 | 73 | |
| 2447772.79100 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2447799.64900 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2447823.29400 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1990 | 93 | |
| 2447838.32900 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1990 | 93 | |
| 2447853.37300 | pri | v | Isles,J. | BAA VSS Circ. | 1992 | 73 | |
| 2447910.32400 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1990 | 94 | |
| 2448042.48700 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1990 | 95 | |
| 2448061.82500 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2448085.46700 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1990 | 96 | |
| 2448113.40700 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1990 | 96 | |
| 2448143.49400 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1990 | 96 | |
| 2448159.60800 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2448160.68100 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2448170.35400 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1990 | 96 | |
| 2448188.61600 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2448202.58400 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1993 | 1 | 36 |
| 2448459.38500 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1991 | 98 | |
| 2448460.46100 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1991 | 98 | |
| 2448461.54100 | pri | v | Zejda,M. (red.) | Brno Contr. | 1995 | 31 | 4 |
| 2448502.37400 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1992 | 99 | |
| 2448503.44800 | pri | v | Zejda,M. (red.) | Brno Contr. | 1995 | 31 | 4 |
| 2448517.41600 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1992 | 99 | |
| 2448862.32700 | pri | v | Peter,H. | BBSAG Bull. | 1992 | 102 | |

| | | | | | | | |
|---------------|-----|----|-------------------------|----------------------|------|------|-----|
| 2448863.40300 | pri | v | Zejda,M. (red.) | Brno Contr. | 1995 | 31 | 4 |
| 2448866.63100 | pri | v | AAVSO observers | Obs.Minima Timings | 1999 | 5 | |
| 2448891.34100 | pri | v | Peter,H. | BBSAG Bull. | 1992 | 102 | |
| 2448934.32500 | pri | v | Peter,H. | BBSAG Bull. | 1992 | 102 | |
| 2449213.69200 | pri | v | AAVSO observers | Obs.Minima Timings | 1999 | 5 | |
| 2449241.62800 | pri | v | AAVSO observers | Obs.Minima Timings | 1999 | 5 | |
| 2449241.62900 | pri | v | AAVSO observers | Obs.Minima Timings | 1999 | 5 | |
| 2449271.71400 | pri | v | AAVSO observers | Obs.Minima Timings | 1999 | 5 | |
| 2449557.53300 | pri | v | Huebscher,J. et al. | B.A.V.Mitt. | 1995 | 79 | |
| 2449664.98100 | pri | v | V.S.L.O.Japan observers | Var.Star Bull.,Japan | 1995 | 23 | |
| 2449688.62000 | pri | v | AAVSO observers | Obs.Minima Timings | 1999 | 5 | |
| 2449917.49200 | pri | v | Peter,H. | BBSAG Bull. | 1995 | 110 | |
| 2449920.71000 | pri | v | AAVSO observers | Obs.Minima Timings | 1999 | 5 | |
| 2449945.43000 | pri | v | Peter,H. | BBSAG Bull. | 1995 | 110 | |
| 2449963.69100 | pri | v | AAVSO observers | Obs.Minima Timings | 1999 | 5 | |
| 2449978.73400 | pri | v | AAVSO observers | Obs.Minima Timings | 1999 | 5 | |
| 2450001.30000 | pri | v | Peter,H. | BBSAG Bull. | 1995 | 110 | |
| 2450278.51500 | pri | v | Brno observers | Brno Contr. | 2002 | 32 | 4 |
| 2450278.52100 | pri | v | Brno observers | Brno Contr. | 2002 | 32 | 4 |
| 2450278.52300 | pri | v | Brno observers | Brno Contr. | 2002 | 32 | 4 |
| 2450320.43200 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1996 | 113 | |
| 2450333.32500 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1996 | 113 | |
| 2450340.84100 | pri | v | AAVSO observers | Obs.Minima Timings | 1999 | 5 | |
| 2450369.85500 | pri | v | AAVSO observers | Obs.Minima Timings | 1999 | 5 | |
| 2450391.34800 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1997 | 114 | |
| 2450438.62200 | pri | v | AAVSO observers | Obs.Minima Timings | 1999 | 5 | |
| 2450638.48200 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1997 | 115 | |
| 2450666.42000 | pri | v | Brno observers | Brno Contr. | 2002 | 32 | 4 |
| 2450666.42300 | pri | v | Brno observers | Brno Contr. | 2002 | 32 | 4 |
| 2450666.42600 | pri | v | Brno observers | Brno Contr. | 2002 | 32 | 4 |
| 2450684.68900 | pri | v | AAVSO observers | Obs.Minima Timings | 1999 | 5 | |
| 2450708.32000 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1998 | 116 | |
| 2450741.63100 | pri | v | AAVSO observers | Obs.Minima Timings | 1999 | 5 | |
| 2450751.30100 | pri | cc | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1998 | 116 | |
| 2451431.46500 | pri | cc | Van Caeteren,P.,Wils,P. | I.B.V.S. | 2000 | 4872 | |
| 2451478.74200 | pri | cc | Nelson,R.H. | I.B.V.S. | 2000 | 4840 | |
| 2451822.58500 | pri | cc | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | AAVSO | 2002 | 7 | |
| 2451866.64000 | pri | cc | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | AAVSO | 2002 | 7 | |
| 2451880.60900 | pri | cc | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | AAVSO | 2002 | 7 | |
| 2452241.64300 | pri | cc | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | AAVSO | 2002 | 7 | |
| 2452489.85400 | pri | cc | Nelson,R.H. | I.B.V.S. | 2003 | 5371 | |
| 2452887.42000 | pri | cc | Krajci,T. | I.B.V.S. | 2005 | 5592 | |
| 2452899.24000 | pri | cc | Krajci,T. | I.B.V.S. | 2005 | 5592 | |
| 2453394.58700 | pri | cc | Krajci,T. | I.B.V.S. | 2006 | 5690 | |
| 2453650.31800 | pri | cc | Huebscher,J.et al. | I.B.V.S. | 2006 | 5731 | |
| 2454350.36051 | sec | cc | Liakos, A. | New Astronomy | 2008 | 13 | 405 |
| 2454359.49220 | pri | cc | Liakos, A. | New Astronomy | 2008 | 13 | 405 |
| 2454373.46069 | pri | cc | Liakos, A. | New Astronomy | 2008 | 13 | 405 |

LZ Lyr

| Minima (HJD) | Type | Method | Observer | Journal | Date | Vol | Issue |
|---------------|------|--------|----------------|---------|------|-----|-------|
| 2425347.56500 | pri | pg | Hoffmeister C | BAV | | | |
| 2425389.45200 | pri | pg | Hoffmeister C | BAV | | | |
| 2425439.40500 | pri | pg | Hoffmeister C | BAV | | | |
| 2425497.36400 | pri | pg | Hoffmeister C | BAV | | | |
| 2425624.70900 | pri | pg | Hoffmeister C | BAV | | | |
| 2425716.51100 | pri | pg | Hoffmeister C | BAV | | | |
| 2425737.47200 | pri | pg | Hoffmeister C | BAV | | | |
| 2425803.51500 | pri | pg | Hoffmeister C | BAV | | | |
| 2425937.25400 | pri | pg | Hoffmeister C | BAV | | | |
| 2429072.51100 | pri | pg | Hoffmeister C | BAV | | | |
| 2429425.36500 | pri | pg | Hoffmeister C | BAV | | | |
| 2429546.20000 | pri | pg | Hoffmeister C | BAV | | | |
| 2429752.42000 | pri | pg | Hoffmeister C | BAV | | | |
| 2429868.42100 | pri | pg | Hoffmeister C | BAV | | | |
| 2429876.50800 | pri | pg | Hoffmeister C | BAV | | | |
| 2430258.33500 | pri | pg | Hoffmeister C | BAV | | | |
| 2430443.61900 | pri | pg | Hoffmeister C | BAV | | | |
| 2430498.39700 | pri | pg | Hoffmeister C | BAV | | | |
| 2430514.50100 | pri | pg | Hoffmeister C | BAV | | | |
| 2430791.62000 | pri | pg | Hoffmeister C | BAV | | | |
| 2430991.38400 | pri | pg | Hoffmeister C | BAV | | | |
| 2431231.45600 | pri | pg | Hoffmeister C | BAV | | | |
| 2442870.60900 | pri | vis | Locher Kurt | BBSAG | 1976 | 27 | |
| 2442904.45800 | pri | vis | Locher Kurt | BBSAG | 1976 | 28 | |
| 2442962.46400 | pri | vis | Locher Kurt | BBSAG | 1976 | 29 | |
| 2443837.32500 | pri | vis | Locher Kurt | BBSAG | 1978 | 40 | |
| 2443977.49300 | pri | vis | Locher Kurt | BBSAG | 1979 | 43 | |
| 2444006.49000 | pri | vis | Locher Kurt | BBSAG | 1979 | 43 | |
| 2444114.45800 | pri | vis | Locher Kurt | BBSAG | 1979 | 44 | |
| 2444122.51800 | pri | vis | Locher Kurt | BBSAG | 1979 | 45 | |
| 2446592.48500 | pri | vis | Kucera Petr ZD | BRNO | | 28 | |
| 2447388.42400 | pri | vis | Lutcha P | BRNO | | 30 | |
| 2447388.43100 | pri | vis | Dedoch A | BRNO | | 30 | |
| 2447388.43200 | pri | vis | Tichy Mar | BRNO | | 30 | |
| 2447388.43400 | pri | vis | Hajek P | BRNO | | 30 | |
| 2447388.43500 | pri | vis | Jechumtal M | BRNO | | 30 | |
| 2447388.43900 | pri | vis | Beck O | BRNO | | 30 | |
| 2447388.44300 | pri | vis | Zahajsky J | BRNO | | 30 | |
| 2447388.44700 | pri | vis | Egyhazi Z | BRNO | | 30 | |
| 2447388.44800 | pri | vis | Vrastak M | BRNO | | 30 | |
| 2448461.51300 | pri | vis | Zahajsky J | BRNO | | 30 | |
| 2448830.47500 | pri | vis | Stepan P | BRNO | | 31 | |
| 2448830.48400 | pri | vis | Lutcha P | BRNO | | 31 | |
| 2448830.49700 | pri | vis | Tichy Mar | BRNO | | 31 | |

| | | | | | | | |
|---------------|-----|-----|-----------------|-------|------|------|---|
| 2448830.50400 | pri | vis | Dvorak J., B. | BRNO | | 31 | |
| 2450662.47170 | pri | vis | Bracek O | BRNO | | 32 | |
| 2450662.47170 | pri | vis | Macuchova S | BRNO | | 32 | |
| 2450662.47380 | pri | vis | Cechal J | BRNO | | 32 | |
| 2450662.47730 | pri | vis | Gostal J | BRNO | | 32 | |
| 2450662.48700 | pri | vis | Netolicky M | BRNO | | 32 | |
| 2451031.42340 | pri | ccd | Blaettler Ernst | BBSAG | 1998 | 118 | |
| 2451274.72500 | pri | ccd | Paschke Anton | ROTSE | | | |
| 2452146.39320 | pri | ccd | Blaettler Ernst | BBSAG | 2001 | 126 | |
| 2452536.31600 | pri | ccd | Blaettler Ernst | BBSAG | 2003 | 129 | |
| 2453190.48100 | pri | ccd | Paschke Anton | BBSAG | 2003 | 131 | |
| 2453517.55900 | pri | vis | Locher Kurt | OEJV | 2005 | 3 | 1 |
| 2453899.42000 | pri | ccd | Raetz M | IBVS | 2007 | 5802 | |
| 2453999.31700 | pri | ccd | Raetz M | IBVS | 2007 | 5802 | |
| 2454595.47414 | pri | ccd | Liakos A | | | | |

PY Lyr

| Minima (HJD) | Type | Method | Observer | Journal | Date | Vol | Issue |
|---------------|------|--------|--------------|---------|------|------|-------|
| 2432763.43500 | pri | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2432765.37000 | pri | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2433487.51000 | pri | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2433504.49200 | pri | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2433506.43200 | pri | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2433893.35200 | pri | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2433927.29600 | pri | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2434134.44600 | pri | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2434237.44800 | pri | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2434600.45200 | pri | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2434622.45000 | pri | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2434637.49300 | pri | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2434707.31000 | pri | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2434980.43200 | pri | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2434982.37200 | pri | pg | Kreiner J | | | | |
| 2434987.38500 | pri | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2435309.48900 | pri | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2435319.53000 | pri | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2435336.50400 | pri | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2435360.41500 | pri | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2435374.31100 | pri | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2435399.38000 | pri | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2435428.31100 | pri | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2436809.36000 | pri | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2436810.50600 | pri | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2436812.44800 | pri | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2436815.53500 | pri | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2436817.44900 | pri | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2436819.39500 | pri | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2436822.47600 | pri | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2436846.38400 | pri | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2436848.31500 | pri | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2436849.47200 | pri | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2442549.49700 | pri | pg | Locher Kurt | BBSAG | 1975 | 22 | |
| 2442551.42900 | pri | vis | Locher Kurt | BBSAG | 1975 | 22 | |
| 2442552.56900 | pri | vis | Locher Kurt | BBSAG | 1975 | 22 | |
| 2442561.46800 | pri | vis | Locher Kurt | BBSAG | 1975 | 22 | |
| 2442571.48300 | pri | vis | Locher Kurt | BBSAG | 1975 | 23 | |
| 2445119.41800 | pri | pg | Hoffmann M | IBVS | 1983 | 2344 | |
| 2446033.30600 | pri | vis | Locher Kurt | BBSAG | 1984 | 75 | |
| 2446148.64400 | pri | vis | Locher Kurt | BBSAG | 1985 | 76 | |
| 2446298.50600 | sec | vis | J.Borovicka | BRNO | | 22 | |
| 2446348.29000 | sec | vis | Locher Kurt | BBSAG | 1986 | 78 | |
| 2446976.48500 | pri | vis | J.Borovicka | BRNO | | 30 | |

| | | | | | | | |
|---------------|-----|-----|----------------------|-------|------|------|--|
| 2447439.40200 | pri | vis | Dedoch, A. | BRNO | | 30 | |
| 2447675.48600 | pri | vis | Dedoch, A. | BRNO | | 30 | |
| 2447675.50300 | pri | vis | Jechumtal, M. | BRNO | | 30 | |
| 2447686.48100 | sec | vis | Dedoch, A. | BRNO | | 30 | |
| 2448039.44800 | sec | vis | Dedoch, A. | BRNO | | 30 | |
| 2448119.50800 | pri | vis | Dedoch, A. | BRNO | | 30 | |
| 2448446.46100 | sec | vis | Hroch, F. | BRNO | | | |
| 2448506.41900 | pri | vis | Koss, K. | BRNO | | 31 | |
| 2448840.51800 | pri | vis | Hajek, P. | BRNO | | 31 | |
| 2450245.47900 | pri | e | Diethelm, R. | BBSAG | 1996 | 112 | |
| 2450285.40250 | sec | ccd | Blaettler, E. | BBSAG | 1996 | 112 | |
| 2450713.42000 | pri | ccd | J.Safar | IBVS | 2000 | 4887 | |
| 2451274.51940 | sec | ccd | J.Safar | IBVS | 2002 | 5263 | |
| 2451274.91300 | sec | ccd | Paschke Anton | rotse | | | |
| 2451684.39767 | pri | ccd | | OEJV | | 74 | |
| 2451751.52416 | pri | ccd | | OEJV | | 74 | |
| 2451758.46462 | pri | ccd | | OEJV | | 74 | |
| 2451776.40560 | sec | ccd | Zejda, M. | IBVS | 2002 | 5287 | |
| 2451777.36790 | pri | ccd | Zejda, M. | IBVS | 2002 | 5287 | |
| 2451777.56280 | sec | ccd | Zejda, M. | IBVS | 2002 | 5287 | |
| 2451783.35004 | sec | ccd | | OEJV | | 74 | |
| 2451815.36807 | sec | ccd | | OEJV | | 74 | |
| 2451841.21850 | sec | ccd | Zejda, M. | IBVS | 2002 | 5287 | |
| 2451878.24827 | sec | ccd | | OEJV | | 74 | |
| 2452050.49572 | pri | ccd | | OEJV | | 74 | |
| 2452135.36520 | pri | ccd | Bittler, E. | BBSAG | 2001 | 126 | |
| 2452135.55500 | sec | ccd | Bittler, E. | BBSAG | 2001 | 126 | |
| 2452140.37889 | pri | ccd | | OEJV | | 74 | |
| 2452197.28183 | sec | ccd | | OEJV | | 74 | |
| 2452415.43100 | pri | e | Diethelm, R. | BBSAG | 1996 | 112 | |
| 2452469.43880 | pri | e | Demircan, O., et al. | IBVS | 2003 | 5364 | |
| 2452470.40200 | sec | ccd | Demircan, O., et al. | IBVS | 2003 | 5364 | |
| 2452476.38420 | pri | ccd | Bakis, V., et al. | IBVS | 2003 | 5399 | |
| 2452477.34790 | sec | ccd | Bakis, V., et al. | IBVS | 2003 | 5399 | |
| 2452505.51017 | sec | ccd | Zejda, M. | IBVS | 2005 | 5583 | |
| 2452521.52113 | pri | ccd | Zejda, M. | IBVS | 2005 | 5583 | |
| 2452695.69310 | sec | ccd | Moschner, W. | IBVS | 2006 | 5643 | |
| 2452721.54123 | sec | ccd | Zejda, M. | IBVS | 2005 | 5583 | |
| 2452725.59453 | pri | ccd | Zejda, M. | IBVS | 2005 | 5583 | |
| 2452741.98590 | sec | ccd | Nelson, R. | IBVS | 2004 | 5493 | |
| 2452809.49530 | sec | ccd | Zejda, M. | IBVS | 2005 | 5583 | |
| 2452863.31030 | pri | ccd | Bakis, V., et al. | IBVS | 2004 | 5464 | |
| 2453186.39210 | sec | ccd | Zejda, M. | IBVS | 2005 | 5583 | |
| 2453203.36545 | sec | ccd | Manimanis, V. et al. | | 2004 | | |
| 2453203.55950 | pri | ccd | Manimanis, V. et al. | | 2004 | | |
| 2453204.33116 | pri | ccd | Manimanis, V. et al. | | 2004 | | |
| 2453204.52285 | sec | ccd | Manimanis, V. et al. | | 2004 | | |
| 2453205.48868 | pri | ccd | Manimanis, V. et al. | | 2004 | | |

| | | | | | | | |
|---------------|-----|-----|-------------|------|------|------|--|
| 2453517.37960 | sec | ccd | Agerer, F. | IBVS | 2007 | 5731 | |
| 2453520.46750 | sec | ccd | Agerer, F. | IBVS | 2007 | 5731 | |
| 2453653.36550 | sec | ccd | Zejda, M. | | | | |
| 2453867.46684 | pri | ccd | Odrejov obs | | | | |
| 2453934.39630 | pri | ccd | Agerer, F. | IBVS | 2007 | 5761 | |
| 2453990.33450 | pri | ccd | Klagyivik | IBVS | 2007 | 5736 | |
| 2454564.55117 | pri | ccd | Liakos, A. | | | | |
| 2454592.51913 | sec | ccd | Liakos, A. | | | | |

DD Mon

| Minima (HJD) | Type | Method | Observer | Journal | Date | Vol | Issue |
|---------------|------|--------|----------------|---------|------|-----|-------|
| 2429364.34500 | p | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2429727.31500 | p | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2430078.34500 | p | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2430321.48200 | p | pg | Ahnert P | BAV | | | |
| 2430326.57300 | p | pg | Ahnert P | BAV | | | |
| 2430369.46500 | s | pg | Ahnert P | BAV | | | |
| 2430672.47700 | p | pg | Ahnert P | BAV | | | |
| 2430721.34000 | p | pg | Ahnert P | BAV | | | |
| 2430735.54000 | p | pg | Ahnert P | BAV | | | |
| 2430784.38400 | p | pg | Ahnert P | BAV | | | |
| 2431060.45500 | p | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2431845.43000 | p | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2432146.47000 | p | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2432233.37500 | p | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2432948.50500 | p | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2433022.35500 | p | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2433294.42500 | p | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2433327.37700 | p | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2434776.36700 | p | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2434780.34000 | p | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2435106.38000 | p | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2435160.33500 | p | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2435161.48700 | p | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2435164.31500 | p | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2435165.47000 | p | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2435185.33500 | p | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2436630.35200 | p | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2436638.31200 | p | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2437704.48500 | p | pg | Wachmann A A | BAV | | | |
| 2446411.30420 | s | cc | Yamasaki | AJ | 1990 | 99 | 1218 |
| 2446420.10850 | p | cc | Yamasaki | AJ | 1990 | 99 | 1218 |
| 2446443.11110 | s | cc | Yamasaki | AJ | 1990 | 99 | 1218 |
| 2446443.96430 | p | cc | Yamasaki | AJ | 1990 | 99 | 1218 |
| 2447207.36600 | p | v | Peter H | BBSAG | 1989 | 91 | |
| 2447211.34600 | p | v | Peter H | BBSAG | 1989 | 91 | |
| 2447232.37500 | p | v | Peter H | BBSAG | 1989 | 91 | |
| 2447529.45300 | p | v | Peter H | BBSAG | 1989 | 91 | |
| 2447554.44200 | p | v | Peter H | BBSAG | 1989 | 91 | |
| 2447587.38900 | p | v | Peter H | BBSAG | 1989 | 91 | |
| 2447864.57600 | p | pg | Moschner Wolfg | BAV | | 56 | |
| 2447909.45000 | p | pg | Moschner Wolfg | BAV | | 56 | |
| 2447913.43300 | p | v | Peter H | BBSAG | 1990 | 94 | |
| 2447929.33100 | p | pg | Moschner Wolfg | BAV | | 56 | |
| 2447929.33900 | p | v | Peter H | BBSAG | 1990 | 94 | |

| | | | | | | | |
|---------------|---|----|-------------------|-------|------|------|-----|
| 2447946.35800 | p | v | Peter H | BBSAG | 1990 | 94 | |
| 2447954.29900 | p | v | Peter H | BBSAG | 1990 | 94 | |
| 2447996.34800 | p | v | Peter H | BBSAG | 1990 | 94 | |
| 2448305.36300 | p | pg | Frank | BAV | | 59 | |
| 2448330.36000 | p | v | Peter H | BBSAG | 1991 | 97 | |
| 2448689.33600 | p | pg | Moschner Wolfg | BAV | | 79 | |
| 2448689.34400 | p | v | Peter H | BAV | | 101 | |
| 2448991.52900 | p | pg | Moschner Wolfg | BAV | | 93 | |
| 2449057.40900 | p | v | Peter H | BBSAG | 1993 | 103 | |
| 2449065.36600 | p | v | Peter H | BBSAG | 1993 | 103 | |
| 2449090.35600 | p | v | Peter H | BBSAG | 1993 | 104 | |
| 2449416.39800 | p | v | Peter H | BBSAG | 1994 | 106 | |
| 2449779.35800 | p | v | Peter H | BBSAG | 1995 | 108 | |
| 2449812.31300 | p | v | Peter H | BBSAG | 1995 | 109 | |
| 2450099.74910 | p | cc | Qian Shengbang | A&A | 1997 | 125 | 475 |
| 2450123.60300 | p | cc | Qian Shengbang | A&A | 1997 | 125 | 475 |
| 2450127.57960 | p | cc | Qian Shengbang | A&A | 1997 | 125 | 475 |
| 2450167.32600 | p | v | Peter H | BBSAG | 1996 | 111 | |
| 2450860.31530 | p | v | Peter H | BBSAG | 1998 | 117 | |
| 2451168.17070 | p | cc | Kiyota Seichihiro | VSOLJ | 1999 | 33 | |
| 2451174.13430 | s | cc | Ogloza Waldemar | IBVS | 2004 | 5507 | 1 |
| 2451174.41790 | p | cc | Ogloza Waldemar | IBVS | 2004 | 5507 | 1 |
| 2451495.34400 | p | cc | Paschke Anton | ROTSE | | | |
| 2451503.58490 | s | cc | Ogloza Waldemar | IBVS | 2004 | 5507 | 1 |
| 2451503.86980 | p | cc | Ogloza Waldemar | IBVS | 2004 | 5507 | 1 |
| 2451925.05520 | s | cc | Kiyota Seichihiro | VSOLJ | 2002 | 39 | |
| 2452675.40810 | s | cc | Kotkova Lenka | IBVS | 2006 | 5676 | 1 |
| 2452695.57180 | p | cc | Dvorak S W | IBVS | 2004 | 5502 | 1 |
| 2452710.05900 | s | cc | Kiyota Seichihiro | VSOLJ | 2003 | 42 | |
| 2452948.34170 | p | cc | Nakajima Kazuhir | VSOLJ | 2003 | 42 | |
| 2452948.34170 | p | cc | Nakajima Kazuhir | VSOLJ | 2003 | 42 | |
| 2452952.32100 | p | cc | Nakajima Kazuhir | VSOLJ | 2003 | 42 | |
| 2452964.81290 | p | cc | Dvorak S W | IBVS | 2004 | 5502 | 1 |
| 2452986.11870 | s | cc | Nakajima Kazuhir | VSOLJ | 2003 | 42 | |
| 2453013.09300 | p | cc | Nakajima Kazuhir | VSOLJ | 2005 | 43 | |
| 2453814.00250 | p | cc | Nakajima Kazuhir | VSOLJ | 2007 | 45 | |
| 2453833.31340 | p | cc | Smelcer L | OEJV | 2007 | 74 | 1 |
| 2454551.28902 | p | cc | Liakos A | | | | |
| 2454555.26499 | p | cc | Liakos A | | | | |

FT Ori

| Minima (HJD) | Type | Method | Observer | Journal | Date | Vol | Issue |
|---------------|------|--------|---------------------------|---------------------|------|------|-------|
| 2426384.28000 | pri | p | Ahnert,P. et al. | Ver.Sonneberg | 1947 | 1 | 45 |
| 2426743.43000 | pri | p | Ahnert,P. et al. | Ver.Sonneberg | 1947 | 1 | 45 |
| 2426979.64000 | pri | p | Ahnert,P. et al. | Ver.Sonneberg | 1947 | 1 | 45 |
| 2428983.33000 | pri | p | Ahnert,P. et al. | Ver.Sonneberg | 1947 | 1 | 45 |
| 2429219.59000 | pri | p | Ahnert,P. et al. | Ver.Sonneberg | 1947 | 1 | 45 |
| 2429619.70000 | pri | p | Ahnert,P. et al. | Ver.Sonneberg | 1947 | 1 | 45 |
| 2429635.43000 | pri | p | Ahnert,P. et al. | Ver.Sonneberg | 1947 | 1 | 45 |
| 2429638.62000 | pri | p | Ahnert,P. et al. | Ver.Sonneberg | 1947 | 1 | 45 |
| 2433009.55300 | pri | v | Ashbrook,J. | Astr.J. | 1952 | 57 | 63 |
| 2436232.41700 | pri | v | Braune,W.,Quester,W. | A.N. | 1956 | 286 | 209 |
| 2436629.36800 | pri | p | Haeussler,K. | Hartha Beob.Zirk. | 1991 | 97 | |
| 2437281.50800 | pri | p | Huth,H. | M.V.S. | 1963 | 2 | 112 |
| 2437319.30800 | pri | p | Haeussler,K. | Hartha Beob.Zirk. | 1991 | 97 | |
| 2437577.59000 | pri | p | Huth,H. | M.V.S. | 1963 | 2 | 112 |
| 2437659.55700 | pri | v | Dueball,J.,Lehmann,P.B. | A.N. | 1964 | 288 | 167 |
| 2437697.32000 | pri | p | Haeussler,K. | Hartha Beob.Zirk. | 1991 | 97 | |
| 2438345.53400 | sec | e | Wolf,M.,Sarounova,L. | A.Astroph. | 1995 | 114 | 143 |
| 2438406.23100 | pri | p | Haeussler,K. | Hartha Beob.Zirk. | 1991 | 97 | |
| 2438431.39950 | pri | e | Wolf,M.,Sarounova,L. | A.Astroph. | 1995 | 114 | 143 |
| 2438453.45350 | pri | e | Wolf,M.,Sarounova,L. | A.Astroph. | 1995 | 114 | 143 |
| 2438783.44800 | sec | e | Wolf,M.,Sarounova,L. | A.Astroph. | 1995 | 114 | 143 |
| 2439120.53830 | sec | e | Wolf,M.,Sarounova,L. | A.Astroph. | 1995 | 114 | 143 |
| 2439139.44110 | sec | e | Wolf,M.,Sarounova,L. | A.Astroph. | 1995 | 114 | 143 |
| 2439184.34900 | pri | v | Braune,W.et al. | A.N. | 1970 | 292 | 185 |
| 2440274.39170 | pri | e | Pohl,E.,Kizilirmak,A. | I.B.V.S. | 1970 | 456 | |
| 2440554.78200 | pri | v | Baldwin,M.E. | J.A.A.V.S.O. | 1974 | 3 | 60 |
| 2440885.57300 | pri | v | Diethelm,R.,Locher,K. | Orion | 1971 | 122 | 21 |
| 2440926.53200 | pri | v | Diethelm,R.,Locher,K. | Orion | 1971 | 122 | 21 |
| 2440945.43400 | pri | v | Diethelm,R.,Locher,K. | Orion | 1971 | 123 | 55 |
| 2441027.34200 | pri | v | Diethelm,R.,Locher,K. | Orion | 1971 | 124 | 91 |
| 2441348.68410 | pri | e | Wolf,M.,Sarounova,L. | A.Astroph. | 1995 | 114 | 143 |
| 2441363.61550 | sec | e | Wolf,M.,Sarounova,L. | A.Astroph. | 1995 | 114 | 143 |
| 2441575.51360 | pri | e | Pohl,E. Kizilirmak,A. | I.B.V.S. | 1974 | 937 | |
| 2441675.50430 | sec | e | Sandberg Lacy C.H. et al. | I.B.V.S. | 1995 | 4194 | |
| 2441959.86480 | pri | e | Wolf,M.,Sarounova,L. | A.Astroph. | 1995 | 114 | 143 |
| 2441996.84410 | sec | e | Wolf,M.,Sarounova,L. | A.Astroph. | 1995 | 114 | 143 |
| 2442056.70190 | sec | e | Wolf,M.,Sarounova,L. | A.Astroph. | 1995 | 114 | 143 |
| 2442060.67780 | pri | e | Wolf,M.,Sarounova,L. | A.Astroph. | 1995 | 114 | 143 |
| 2442095.33400 | pri | e | Pohl,E.,Kizilirmak,A. | I.B.V.S. | 1975 | 1053 | |
| 2442451.33040 | pri | e | Pohl,E.,Kizilirmak,A. | I.B.V.S. | 1976 | 1163 | |
| 2442829.38500 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1976 | 26 | |
| 2442870.33300 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1976 | 27 | |
| 2443128.67300 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1996 | 3 | 38 |
| 2443172.77300 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1996 | 3 | 38 |

| | | | | | | | |
|---------------|-----|----|---------------------------|---------------------|------|------|-----|
| 2443459.46000 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1977 | 35 | |
| 2443780.81000 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1996 | 3 | 38 |
| 2444259.65200 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1996 | 3 | 38 |
| 2444281.72600 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1996 | 3 | 38 |
| 2444590.46190 | pri | e | Pohl,E.,et al. | I.B.V.S. | 1982 | 2189 | |
| 2444631.41370 | pri | e | Braune,W.,Mundry,E. | B.A.V.Mitt. | 1981 | 32 | |
| 2445028.36700 | pri | e | Diethelm,R. | BBSAG Bull. | 1982 | 59 | |
| 2445034.67200 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1996 | 3 | 38 |
| 2445406.42000 | pri | v | Braune,W.et al. | B.A.V.Mitt. | 1983 | 36 | |
| 2446058.56200 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1996 | 3 | 38 |
| 2446143.61900 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1996 | 3 | 38 |
| 2446143.62000 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1996 | 3 | 38 |
| 2446436.61000 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1996 | 3 | 38 |
| 2446814.66200 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1996 | 3 | 38 |
| 2446827.25600 | pri | v | Braune,W.,Huebscher,J. | B.A.V.Mitt. | 1987 | 46 | |
| 2446827.26200 | pri | v | Brno observers | Brno Contr. | 1992 | 30 | 4 |
| 2446858.76100 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1996 | 3 | 38 |
| 2447132.84840 | pri | e | Caton,D.B. | I.B.V.S. | 1989 | 3408 | |
| 2447482.54500 | pri | e | Hegedus,T. et al. | I.B.V.S. | 1996 | 4340 | |
| 2447507.74780 | pri | e | Caton,D.B. | I.B.V.S. | 1989 | 3408 | |
| 2447605.41210 | pri | e | Wunder,E. et al. | I.B.V.S. | 1992 | 3760 | |
| 2447840.80450 | sec | e | Caton,D.B.,Burns,W.C. | I.B.V.S. | 1993 | 3900 | |
| 2447898.39990 | pri | e | Ogloza,W. | I.B.V.S. | 1995 | 4263 | |
| 2448273.29750 | pri | e | Hanzl,D. | I.B.V.S. | 1994 | 4097 | |
| 2448273.29800 | pri | e | Hanzl,D. | I.B.V.S. | 1994 | 4097 | |
| 2448273.30090 | pri | e | Hanzl,D. | I.B.V.S. | 1994 | 4097 | |
| 2448279.59920 | pri | e | Caton,D.B.,Burns,W.C. | I.B.V.S. | 1993 | 3900 | |
| 2448282.75120 | pri | e | Caton,D.B.,Burns,W.C. | I.B.V.S. | 1993 | 3900 | |
| 2448606.34900 | sec | e | Diethelm,R. | BBSAG Bull. | 1992 | 99 | |
| 2448632.44400 | pri | v | Huebscher,J. et al. | B.A.V.Mitt. | 1992 | 60 | |
| 2448651.34600 | pri | v | Huebscher,J. et al. | B.A.V.Mitt. | 1992 | 60 | |
| 2448651.34800 | pri | v | Huebscher,J. et al. | B.A.V.Mitt. | 1992 | 60 | |
| 2448692.31200 | pri | v | Peter,H. | BBSAG Bull. | 1992 | 101 | |
| 2448984.37900 | sec | v | Huebscher,J. et al. | B.A.V.Mitt. | 1993 | 62 | |
| 2449013.64800 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1996 | 3 | 38 |
| 2449347.59600 | pri | v | Baldwin,M.E.,Samolyk,G. | Obs.Min.of Ecl.Bin. | 1996 | 3 | 38 |
| 2449721.58330 | sec | e | Sandberg Lacy C.H. et al. | I.B.V.S. | 1995 | 4194 | |
| 2449724.73380 | sec | e | Sandberg Lacy C.H. et al. | I.B.V.S. | 1995 | 4194 | |
| 2449725.64270 | pri | e | Sandberg Lacy C.H. et al. | I.B.V.S. | 1995 | 4194 | |
| 2449759.38560 | sec | e | Wolf,M.,Sarounova,L. | A.Astroph. | 1995 | 114 | 143 |
| 2449760.29660 | pri | e | Wolf,M.,Sarounova,L. | A.Astroph. | 1995 | 114 | 143 |
| 2449763.44760 | pri | e | Wolf,M.,Sarounova,L. | A.Astroph. | 1995 | 114 | 143 |
| 2449782.35020 | pri | e | Wolf,M.,Sarounova,L. | A.Astroph. | 1995 | 114 | 143 |
| 2449800.34580 | sec | e | Wolf,M.,Sarounova,L. | A.Astroph. | 1995 | 114 | 143 |
| 2450138.35210 | pri | e | Hegedus,T. et al. | I.B.V.S. | 1996 | 4340 | |
| 2450494.34450 | pri | e | Biro,I.B.et al. | I.B.V.S. | 1998 | 4555 | |
| 2450726.55190 | sec | cc | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1998 | 116 | |
| 2450849.41770 | sec | cc | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1998 | 117 | |

| | | | | | | | |
|---------------|-----|----|-------------------------|---------------------|------|------|---|
| 2450850.34230 | pri | cc | Agerer,F., Huebscher,J. | I.B.V.S. | 1999 | 4712 | |
| 2451504.68600 | s | cc | | Rotse | | | |
| 2451580.30320 | sec | cc | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 2000 | 122 | |
| 2451602.35600 | sec | cc | Agerer,F.,Huebscher,J. | I.B.V.S. | 2002 | 5296 | |
| 2452296.38520 | pri | cc | Agerer,F.,Huebscher,J. | I.B.V.S. | 2003 | 5484 | |
| 2452337.34060 | pri | cc | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 2002 | 127 | |
| 2452692.38480 | sec | cc | Agerer,F.,Huebscher,J. | I.B.V.S. | 2003 | 5484 | |
| 2452693.33830 | pri | cc | Agerer,F.,Huebscher,J. | I.B.V.S. | 2003 | 5484 | |
| 2452715.39130 | pri | cc | Agerer,F.,Huebscher,J. | I.B.V.S. | 2003 | 5484 | |
| 2452939.07260 | | cc | | IBVS | 2007 | 5809 | 1 |
| 2453385.46620 | sec | cc | Huebscher,J. et al. | I.B.V.S. | 2005 | 5657 | |
| 2453682.57040 | p | cc | Brat L | OEJV | 2007 | 74 | 1 |
| 2453701.47280 | pri | cc | Huebscher,J.et al. | I.B.V.S. | 2006 | 5731 | |
| 2453760.36020 | sec | cc | Huebscher,J.et al. | I.B.V.S. | 2006 | 5731 | |
| 2453764.48130 | pri | cc | Huebscher,J.et al. | I.B.V.S. | 2006 | 5731 | |
| 2454073.22160 | pri | cc | Nagai,K. | Var.Star Bull.Japan | 2007 | 45 | |
| 2454097.44830 | sec | cc | Diethelm,R. | I.B.V.S. | 2007 | 5781 | |
| 2454457.57382 | pri | cc | Liakos, A. | - | 2007 | - | - |

UZ Sge

| Minima (HJD) | Type | Method | Observer | Journal | Date | Vol | Issue |
|---------------|------|--------|---------------------------|-----------------|------|-----|-------|
| 2428700.48000 | pri | v | Kordylewski,K. | Acta Astr.ser.c | 1938 | 3 | 91 |
| 2428811.26600 | pri | v | Dworak,T.Z. | Acta Astr. | 1977 | 27 | 151 |
| 2429130.33200 | pri | v | Dworak,T.Z. | Acta Astr. | 1977 | 27 | 151 |
| 2430169.52100 | pri | v | Dworak,T.Z. | Acta Astr. | 1977 | 27 | 151 |
| 2430639.24900 | pri | v | Dworak,T.Z. | Acta Astr. | 1977 | 27 | 151 |
| 2430938.37800 | pri | v | Lange,G.A.,Kanisheva,R.K. | Astr.Circ.USSR | 1961 | 219 | 31 |
| 2430947.24200 | pri | v | Lange,G.A.,Kanisheva,R.K. | Astr.Circ.USSR | 1961 | 219 | 31 |
| 2430967.17800 | pri | v | Lange,G.A.,Kanisheva,R.K. | Astr.Circ.USSR | 1961 | 219 | 31 |
| 2430987.11600 | pri | v | Lange,G.A.,Kanisheva,R.K. | Astr.Circ.USSR | 1961 | 219 | 31 |
| 2430989.32300 | pri | v | Lange,G.A.,Kanisheva,R.K. | Astr.Circ.USSR | 1961 | 219 | 31 |
| 2430998.20000 | pri | v | Lange,G.A.,Kanisheva,R.K. | Astr.Circ.USSR | 1961 | 219 | 31 |
| 2436453.34090 | pri | p | Huth,H. | M.V.S. | 1965 | 3 | 114 |
| 2438210.47490 | pri | p | Huth,H. | M.V.S. | 1965 | 3 | 114 |
| 2438560.51790 | pri | p | Huth,H. | M.V.S. | 1965 | 3 | 114 |
| 2438651.39590 | pri | p | Huth,H. | M.V.S. | 1965 | 3 | 114 |
| 2441188.43500 | pri | v | Diethelm,R. et al. | Orion | 1972 | 129 | 60 |
| 2442606.50600 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1975 | 23 | |
| 2442874.61800 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1976 | 27 | |
| 2442996.46800 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1976 | 29 | |
| 2442996.47500 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1976 | 29 | |
| 2443016.41200 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1976 | 29 | |
| 2443016.41500 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1976 | 29 | |
| 2443284.52600 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1977 | 33 | |
| 2443304.46200 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1977 | 33 | |
| 2443335.48200 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1977 | 34 | |
| 2443663.41100 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1978 | 37 | |
| 2443674.49000 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1978 | 37 | |
| 2443765.33800 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1978 | 39 | |
| 2444115.41600 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1979 | 44 | |
| 2444135.36400 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1979 | 45 | |
| 2444343.63800 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1980 | 47 | |
| 2444383.51700 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1980 | 48 | |
| 2444403.46100 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1980 | 48 | |
| 2444485.44700 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1980 | 50 | |
| 2444844.39600 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1981 | 56 | |
| 2444844.39700 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1981 | 56 | |
| 2444915.30100 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1981 | 57 | |
| 2445163.46000 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1982 | 61 | |
| 2445225.49700 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1982 | 62 | |
| 2445225.49900 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1982 | 62 | |
| 2445274.24200 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1982 | 63 | |
| 2445533.49000 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1983 | 67 | |
| 2445604.38800 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1983 | 69 | |
| 2445635.40700 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1983 | 69 | |
| 2445635.40900 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1983 | 69 | |
| 2445644.27500 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1983 | 69 | |
| 2445861.41400 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1984 | 72 | |
| 2446293.47600 | pri | v | Brno observers | Brno Contr. | 1986 | 27 | 4 |
| 2446373.24200 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1986 | 79 | |

| | | | | | | | |
|---------------|-----|----|-------------------|---------------------|------|------|-----|
| 2447330.43000 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1988 | 88 | |
| 2447392.47500 | pri | v | Brno observers | Brno Contr. | 1992 | 30 | 4 |
| 2447392.48100 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1988 | 89 | |
| 2448121.45300 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1990 | 96 | |
| 2448429.44900 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1991 | 98 | |
| 2448440.51000 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1991 | 98 | |
| 2448460.45800 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1991 | 98 | |
| 2448460.46300 | pri | v | Zejda, M. (red.) | Brno Contr. | 1995 | 31 | 4 |
| 2448480.40800 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1991 | 98 | |
| 2448500.34700 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1991 | 98 | |
| 2448850.42800 | pri | v | Peter, H. | BBSAG Bull. | 1992 | 102 | |
| 2448890.33200 | pri | v | Peter, H. | BBSAG Bull. | 1992 | 102 | |
| 2449078.64200 | pri | v | Locher, K. | BBSAG Bull. | 1993 | 103 | |
| 2449158.41900 | pri | v | Peter, H. | BBSAG Bull. | 1993 | 104 | |
| 2449220.46500 | pri | v | Peter, H. | BBSAG Bull. | 1994 | 105 | |
| 2449929.50500 | pri | v | Peter, H. | BBSAG Bull. | 1995 | 110 | |
| 2450040.29400 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1996 | 111 | |
| 2450040.29500 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1996 | 111 | |
| 2450319.47650 | pri | v | Brno observers | Brno Contr. | 2002 | 32 | 4 |
| 2450319.48100 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1997 | 115 | |
| 2450319.48620 | pri | v | Brno observers | Brno Contr. | 2002 | 32 | 4 |
| 2450370.44300 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1996 | 113 | |
| 2450379.31000 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1996 | 113 | |
| 2450688.43510 | pri | cc | Agerer, F. et al. | I.B.V.S. | 2001 | 5017 | |
| 2450718.32100 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1998 | 116 | |
| 2451746.42700 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 2000 | 123 | |
| 2452116.46190 | pri | cc | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 2001 | 126 | |
| 2452404.51300 | pri | v | BBSAG Observers | BBSAG Bull. | 2002 | 128 | |
| 2452526.37900 | pri | v | Diethelm, R. | I.B.V.S.(BBSAG 129) | 2003 | 5438 | |
| 2452856.52900 | pri | v | Diethelm, R. | I.B.V.S. | 2004 | 5543 | |
| 2453463.64200 | pri | v | Locher, K. | OEJV | 2005 | 3 | |
| 2454293.45120 | sec | cc | Liakos, A. | New Astronomy | 2008 | 13 | 405 |
| 2454313.39219 | sec | cc | Liakos, A. | New Astronomy | 2008 | 13 | 405 |
| 2454314.49758 | pri | cc | Liakos, A. | New Astronomy | 2008 | 13 | 405 |

YY Sgr

| Minima (HJD) | Type | Method | Observer | Journal | Date | Vol | Issue |
|---------------|------|--------|------------------------|---------------------|------|-----|-------|
| 2412643.53200 | pri | pg | Lacy,C.H.S. | Astr.J. | 1993 | 105 | 637 |
| 2412644.80100 | sec | pg | Lacy,C.H.S. | Astr.J. | 1993 | 105 | 637 |
| 2415747.78700 | pri | pg | Lacy,C.H.S. | Astr.J. | 1993 | 105 | 637 |
| 2415749.02000 | sec | pg | Lacy,C.H.S. | Astr.J. | 1993 | 105 | 637 |
| 2418121.31400 | pri | pg | Lacy,C.H.S. | Astr.J. | 1993 | 105 | 637 |
| 2418122.51000 | sec | pg | Lacy,C.H.S. | Astr.J. | 1993 | 105 | 637 |
| 2419305.29900 | sec | v | Zinner,E. | A.N. | 1930 | 239 | 59 |
| 2419467.08710 | pri | pg | Shapley,H.,Keller,K.W. | Harvard Bull. | 1933 | 893 | 6 |
| 2419764.10300 | pri | pg | Lacy,C.H.S. | Astr.J. | 1993 | 105 | 637 |
| 2419764.11900 | pri | pg | Lacy,C.H.S. | Astr.J. | 1993 | 105 | 637 |
| 2419765.28600 | sec | pg | Lacy,C.H.S. | Astr.J. | 1993 | 105 | 637 |
| 2419765.29700 | sec | pg | Lacy,C.H.S. | Astr.J. | 1993 | 105 | 637 |
| 2419953.38000 | pri | v | Zinner,E. | A.N. | 1930 | 239 | 59 |
| 2419974.39700 | pri | v | Zinner,E. | A.N. | 1930 | 239 | 59 |
| 2420012.36900 | sec | v | Zinner,E. | A.N. | 1930 | 239 | 59 |
| 2420024.32500 | pri | v | Zinner,E. | A.N. | 1930 | 239 | 59 |
| 2420342.38000 | pri | v | Zinner,E. | A.N. | 1930 | 239 | 59 |
| 2420582.74630 | sec | pg | Shapley,H.,Keller,K.W. | Harvard Bull. | 1933 | 893 | 6 |
| 2421406.90800 | pri | pg | Lacy,C.H.S. | Astr.J. | 1993 | 105 | 637 |
| 2421408.08100 | sec | pg | Lacy,C.H.S. | Astr.J. | 1993 | 105 | 637 |
| 2423233.71000 | pri | pg | Lacy,C.H.S. | Astr.J. | 1993 | 105 | 637 |
| 2423234.86900 | sec | pg | Lacy,C.H.S. | Astr.J. | 1993 | 105 | 637 |
| 2424361.39000 | pri | v | Zessewitch,W.P. | Perem.Zv. | 1929 | 2 | 26 |
| 2424362.43900 | sec | v | Tsesevitch,V.P. | Odessa Izv.(part 2) | 1954 | 4 | 327 |
| 2424362.45000 | sec | v | Zessewitch,W.P. | Perem.Zv. | 1929 | 2 | 11 |
| 2424432.33400 | pri | v | Kordylewski,K. | Acta Astr.ser.c | 1930 | 1 | 95 |
| 2424621.55000 | pri | v | Kordylewski,K. | Acta Astr.ser.c | 1930 | 1 | 95 |
| 2424650.47300 | pri | v | Kordylewski,K. | Acta Astr.ser.c | 1930 | 1 | 95 |
| 2424700.44100 | pri | v | Kordylewski,K. | Acta Astr.ser.c | 1930 | 1 | 95 |
| 2425060.51200 | pri | pg | Lacy,C.H.S. | Astr.J. | 1993 | 105 | 637 |
| 2425061.63900 | sec | pg | Lacy,C.H.S. | Astr.J. | 1993 | 105 | 637 |
| 2425118.34400 | pri | v | Kordylewski,K. | Acta Astr.ser.c | 1930 | 1 | 95 |
| 2425378.57100 | pri | v | Kordylewski,K. | Acta Astr.ser.c | 1930 | 1 | 95 |
| 2425386.47400 | pri | v | Kordylewski,K. | Acta Astr.ser.c | 1930 | 1 | 95 |
| 2425486.35200 | pri | v | Kordylewski,K. | Acta Astr.ser.c | 1930 | 1 | 95 |
| 2425775.47600 | pri | v | Kordylewski,K. | Acta Astr.ser.c | 1930 | 1 | 95 |
| 2425833.29900 | pri | v | Kordylewski,K. | Acta Astr.ser.c | 1930 | 1 | 95 |
| 2425854.32500 | pri | v | Kordylewski,K. | Acta Astr.ser.c | 1930 | 1 | 95 |
| 2425883.24000 | pri | v | Kordylewski,K. | Acta Astr.ser.c | 1930 | 1 | 95 |
| 2426540.35900 | pri | v | Tsesevitch,V.P. | Odessa Izv.(part 2) | 1954 | 4 | 327 |
| 2426557.23200 | sec | v | Tsesevitch,V.P. | Odessa Izv.(part 2) | 1954 | 4 | 327 |
| 2426703.31700 | pri | pg | Lacy,C.H.S. | Astr.J. | 1993 | 105 | 637 |
| 2426704.43100 | sec | pg | Lacy,C.H.S. | Astr.J. | 1993 | 105 | 637 |
| 2428164.74900 | pri | pg | Lacy,C.H.S. | Astr.J. | 1993 | 105 | 637 |
| 2428165.84200 | sec | pg | Lacy,C.H.S. | Astr.J. | 1993 | 105 | 637 |
| 2428360.34600 | sec | v | Kordylewski,K. | S.A.C. | 1937 | 15 | 61 |
| 2428372.41000 | pri | v | Kordylewski,K. | S.A.C. | 1937 | 15 | 61 |
| 2428699.43700 | sec | v | Dworak,T.Z. | Acta Astr. | 1977 | 27 | 151 |
| 2431324.21600 | pri | v | Tsesevitch,V.P. | Odessa Izv.(part 2) | 1954 | 4 | 327 |

| | | | | | | | |
|---------------|-----|----|-----------------------|-------------|------|-----|-----|
| 2431656.46000 | sec | v | Dworak,T.Z. | Acta Astr. | 1977 | 27 | 151 |
| 2433074.76900 | pri | e | Lacy,C.H.S. | Astr.J. | 1993 | 105 | 637 |
| 2433075.82960 | sec | e | Lacy,C.H.S. | Astr.J. | 1993 | 105 | 637 |
| 2440889.23600 | pri | v | Diethelm,R.,Locher,K. | Orion | 1971 | 122 | 21 |
| 2440890.25500 | sec | v | Diethelm,R.,Locher,K. | Orion | 1971 | 122 | 21 |
| 2441070.58500 | pri | v | Diethelm,R.,Locher,K. | Orion | 1971 | 125 | 111 |
| 2441178.36800 | pri | v | Diethelm,R. et al. | Orion | 1971 | 126 | |
| 2441208.33800 | sec | v | Diethelm,R. et al. | Orion | 1971 | 127 | |
| 2441596.27900 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1972 | 6 | |
| 2441861.76300 | pri | v | Lacy,C.H.S. | Astr.J. | 1993 | 105 | 637 |
| 2441862.82100 | sec | v | Lacy,C.H.S. | Astr.J. | 1993 | 105 | 637 |
| 2442303.35400 | pri | v | BBSAG observers | BBSAG Bull. | 1974 | 17 | |
| 2447382.63650 | sec | e | Lacy,C.H.S. | Astr.J. | 1993 | 105 | 637 |
| 2447742.73740 | sec | e | Lacy,C.H.S. | Astr.J. | 1993 | 105 | 637 |
| 2448059.68800 | pri | e | Lacy,C.H.S. | Astr.J. | 1993 | 105 | 637 |
| 2448060.78450 | sec | e | Lacy,C.H.S. | Astr.J. | 1993 | 105 | 637 |
| 2448067.57300 | pri | e | Lacy,C.H.S. | Astr.J. | 1993 | 105 | 637 |
| 2448853.48700 | pri | cc | Paschke,A. | BBSAG Bull. | 1992 | 102 | |
| 2449907.50080 | pri | cc | Wolf,M. | A.Astroph. | 2000 | 356 | 134 |
| 2449908.61600 | sec | cc | Wolf,M. | A.Astroph. | 2000 | 356 | 134 |
| 2450672.38820 | pri | cc | Wolf,M. | A.Astroph. | 2000 | 356 | 134 |
| 2450681.39520 | sec | cc | Wolf,M. | A.Astroph. | 2000 | 356 | 134 |
| 2451320.0830 | sec | cc | Paschke, A. | rotse | | | |
| 2451408.36050 | pri | e | Wolf,M. | A.Astroph. | 2000 | 356 | 134 |
| 2451417.37570 | sec | e | Wolf,M. | A.Astroph. | 2000 | 356 | 134 |
| 2452810.47340 | sec | cc | Wolf,M. et al. | Aph.Sp.Sci. | 2006 | 304 | 179 |
| 2452839.38530 | sec | cc | Wolf,M. et al. | Aph.Sp.Sci. | 2006 | 304 | 179 |
| 2453128.51580 | sec | e | Wolf,M. et al. | Aph.Sp.Sci. | 2006 | 304 | 179 |
| 2453178.45560 | sec | cc | Wolf,M. et al. | Aph.Sp.Sci. | 2006 | 304 | 179 |
| 2453517.52830 | sec | cc | Wolf,M. et al. | Aph.Sp.Sci. | 2006 | 304 | 179 |
| 2453546.4397 | sec | cc | Motl, D. | OEJV | 2007 | 74 | 1 |
| 2453550.54460 | pri | cc | Wolf,M. et al. | Aph.Sp.Sci. | 2006 | 304 | 179 |
| 2453579.45770 | pri | cc | Wolf,M. et al. | Aph.Sp.Sci. | 2006 | 304 | 179 |
| 2454236.56964 | pri | cc | Liakos, A. | - | 2007 | - | - |
| 2454265.4830 | sec | cc | Paschke, A. | OEJV | 2007 | 73 | 1 |
| 2454332.35726 | sec | cc | Liakos, A. | | | | |

DR Vul

| Minima (HJD) | Type | Method | Observer | Journal | Date | Vol | Issue |
|---------------|------|--------|-----------------|---------|------|-----|-------|
| 2426265.41100 | sec | pg | Strohmeier W | BAV | | | |
| 2426562.51400 | sec | pg | Strohmeier W | BAV | | | |
| 2426632.31000 | sec | pg | Strohmeier W | BAV | | | |
| 2426677.29300 | sec | pg | Strohmeier W | BAV | | | |
| 2426840.53800 | pri | pg | Strohmeier W | BAV | | | |
| 2426894.53900 | pri | pg | Strohmeier W | BAV | | | |
| 2426928.36300 | pri | pg | Strohmeier W | BAV | | | |
| 2426956.40800 | sec | pg | Strohmeier W | BAV | | | |
| 2426957.42200 | pri | pg | Strohmeier W | BAV | | | |
| 2427000.24200 | pri | pg | Strohmeier W | BAV | | | |
| 2427332.34100 | sec | pg | Strohmeier W | BAV | | | |
| 2427359.33100 | sec | pg | Strohmeier W | BAV | | | |
| 2427682.33700 | pri | pg | Strohmeier W | BAV | | | |
| 2428121.24600 | pri | pg | Strohmeier W | BAV | | | |
| 2428373.44200 | pri | pg | Strohmeier W | BAV | | | |
| 2428391.45400 | pri | pg | Strohmeier W | BAV | | | |
| 2428635.60400 | sec | pg | Strohmeier W | BAV | | | |
| 2428759.43000 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2428984.61200 | sec | pg | Strohmeier W | BAV | | | |
| 2429162.36700 | sec | pg | Strohmeier W | BAV | | | |
| 2429250.23600 | sec | pg | Strohmeier W | BAV | | | |
| 2429575.37200 | pri | pg | Strohmeier W | BAV | | | |
| 2430651.25000 | pri | pg | Zessewitsch V P | BAV | | | |
| 2430668.17700 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2430885.27000 | pri | pg | Zessewitsch V P | BAV | | | |
| 2430894.31000 | pri | pg | Zessewitsch V P | BAV | | | |
| 2430903.31900 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2430903.32200 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2430903.34100 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2430903.39000 | pri | pg | Zessewitsch V P | BAV | | | |
| 2430904.51600 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2430920.33000 | sec | pg | Zessewitsch V P | BAV | | | |
| 2430938.37000 | sec | pg | Zessewitsch V P | BAV | | | |
| 2430946.12000 | pri | pg | Zessewitsch V P | BAV | | | |
| 2430959.62000 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2430984.33000 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2431054.13700 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2431620.32500 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2431789.13700 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2431918.44900 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2431963.47000 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2431964.70600 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2432023.23300 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2432463.16000 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |

| | | | | | | | |
|---------------|-----|----|---------------|-----|--|--|--|
| 2432733.27000 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2432762.53500 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2432763.72800 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2432795.22800 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2432796.29000 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2432818.81700 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2432819.96200 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2432831.21700 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2432857.11300 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2432858.20100 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2433101.32000 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2433142.92700 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2433144.08700 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2433154.21700 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2433223.99300 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2433225.10100 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2433416.40800 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2433447.95000 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2433864.33900 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2433875.58000 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2433891.30900 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2434152.40200 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2434214.34600 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2434214.36900 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2434215.49700 | sec | pg | Strohmeier W | BAV | | | |
| 2434223.35500 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2434224.49000 | sec | pg | Strohmeier W | BAV | | | |
| 2434230.12500 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2434231.19700 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2434250.37400 | pri | pg | Strohmeier W | BAV | | | |
| 2434294.18500 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2434600.36600 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2434607.10000 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2434608.29000 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2434653.29600 | pri | pg | Strohmeier W | BAV | | | |
| 2434984.19700 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2434984.21900 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2434999.94000 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2435000.95000 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2435012.25200 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2435038.18200 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2435038.20500 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2435164.25700 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2435165.31700 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2435282.33100 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2435282.36800 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2435317.30800 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2435318.41100 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |

| | | | | | | | |
|---------------|-----|----|-----------------|-----|--|--|--|
| 2435351.07300 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2435352.10800 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2435397.15200 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2436045.38600 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2436048.85700 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2436048.87200 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2436049.85800 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2436049.88800 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2436053.37400 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2436439.24800 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2436737.52400 | pri | pg | Strohmeier W | BAV | | | |
| 2436789.43900 | pri | pg | Strohmeier W | BAV | | | |
| 2436790.41400 | sec | pg | Strohmeier W | BAV | | | |
| 2436802.91500 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2436803.84000 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2436816.35400 | pri | pg | Strohmeier W | BAV | | | |
| 2436817.35400 | sec | pg | Strohmeier W | BAV | | | |
| 2436834.41300 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2436835.39200 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2436843.33300 | pri | pg | Strohmeier W | BAV | | | |
| 2436844.30700 | sec | pg | Strohmeier W | BAV | | | |
| 2436868.26100 | pri | pg | Strohmeier W | BAV | | | |
| 2437165.28700 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2437166.27700 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2437581.69300 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2437582.69000 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2437833.79500 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2437879.80600 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2438243.43610 | sec | pe | Semeniuk I | BAV | | | |
| 2438252.44050 | pri | pe | Semeniuk I | BAV | | | |
| 2438253.45250 | pri | pe | Semeniuk I | BAV | | | |
| 2438268.18000 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2438269.19000 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2438270.44730 | sec | pe | Semeniuk I | BAV | | | |
| 2438296.21980 | pri | pe | Semeniuk I | BAV | | | |
| 2438322.31600 | sec | pg | Voigtlaender | BAV | | | |
| 2438926.47510 | pri | pe | Semeniuk I | BAV | | | |
| 2438983.96000 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2438985.01500 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2438992.95880 | sec | pe | Krzeminski | BAV | | | |
| 2438994.00240 | pri | pe | Krzeminski | BAV | | | |
| 2439062.73420 | sec | pe | Semeniuk I | BAV | | | |
| 2439679.45130 | pri | pe | Semeniuk I | BAV | | | |
| 2439697.45780 | pri | pe | Semeniuk I | BAV | | | |
| 2439706.45900 | pri | pe | O'Connell D J K | BAV | | | |
| 2439707.54600 | pri | pe | Semeniuk I | BAV | | | |
| 2439736.82000 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2439737.97000 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |

| | | | | | | | |
|---------------|-----|----|-----------------|------|------|------|---|
| 2439739.04000 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2439741.31100 | sec | pe | O'Connell D J K | BAV | | | |
| 2440064.33700 | sec | pe | O'Connell D J K | BAV | | | |
| 2440068.84000 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2440069.95500 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2440109.35230 | sec | e | Gueduer N | IBVS | 1970 | 456 | 1 |
| 2440300.66800 | pri | pg | GCVS | - | | | |
| 2440370.44100 | pri | e | Gueduer N | IBVS | 1970 | 456 | 1 |
| 2440460.48000 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2440461.59000 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2440530.24800 | pri | pe | O'Connell D J K | BAV | | | |
| 2440774.48700 | pri | pe | Pohl E | IBVS | 1971 | 530 | 1 |
| 2440807.09000 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2440808.24000 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2440822.85000 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2440824.02000 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2440827.35530 | sec | pe | Ibanoglu C | IBVS | 1971 | 530 | 1 |
| 2440836.35600 | pri | pe | O'Connell D J K | BAV | | | |
| 2440845.35660 | pri | e | Ganea M | IBVS | 1971 | 508 | 1 |
| 2440871.28030 | pri | pe | Karacan | IBVS | 1971 | 530 | 1 |
| 2440871.28030 | sec | pe | O'Connell D J K | BAV | | | |
| 2440871.28030 | sec | pe | Karacan H | IBVS | 1971 | 530 | 1 |
| 2441124.45900 | sec | pe | Gueduer N | IBVS | 1972 | 647 | 1 |
| 2441177.40970 | pri | pe | Gueduer N | IBVS | 1972 | 647 | 1 |
| 2441179.66000 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2441191.99000 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2441193.17000 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2441240.43400 | sec | pe | Endres C | IBVS | 1972 | 647 | 1 |
| 2441509.34400 | sec | e | Gueduer N | IBVS | 1974 | 937 | 1 |
| 2441563.36000 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2441564.56000 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2441570.13000 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2441571.33000 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2441905.51000 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2441906.71000 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2441932.52000 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2441933.71500 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2442253.26960 | sec | e | Dumitrescu AI | IBVS | 1974 | 931 | 1 |
| 2442279.13000 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2442280.39000 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2442281.38000 | sec | e | Edersberger J | IBVS | 1974 | 1053 | 1 |
| 2442292.63000 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2442293.88000 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2442659.55000 | sec | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2442660.79000 | pri | pg | Erleksova G E | BAV | | | |
| 2442982.48060 | sec | pe | Rovithis P | BAV | | | |
| 2443268.55280 | sec | e | Tunca Z | IBVS | 1978 | 1449 | 1 |
| 2443268.55350 | sec | e | Tunca Z | IBVS | 1978 | 1449 | 1 |

| | | | | | | | |
|---------------|-----|----|-----------------|-------|------|------|---|
| 2445889.57000 | sec | pe | Diethelm Roger | BBSAG | 1984 | 73 | |
| 2446255.39370 | pri | pe | Khaliulli A | BAV | | | |
| 2446274.48480 | sec | pe | Khaliulli A | BAV | | | |
| 2446319.50470 | pri | e | Betten | IBVS | 1987 | 3078 | 1 |
| 2447368.43190 | pri | e | Kreiner J | IBVS | 1996 | 4263 | 1 |
| 2447368.43210 | pri | e | Kreiner J | IBVS | 1996 | 4263 | 1 |
| 2448490.45990 | sec | pe | Wolf Marek | BAV | | | |
| 2448490.46000 | sec | pe | Blaettler Ernst | BBSAG | 1991 | 98 | |
| 2448499.46660 | sec | pe | Wolf Marek | BAV | | | |
| 2448534.44850 | sec | pe | Wolf Marek | BAV | | | |
| 2448536.69950 | pri | pe | Caton | IBVS | 1993 | 3900 | 1 |
| 2448543.45190 | pri | pe | Wolf Marek | BAV | | | |
| 2448839.35500 | pri | pe | Blaettler Ernst | BBSAG | 1992 | 102 | |
| 2449162.46270 | sec | pe | Cicek C | IBVS | 2001 | 5142 | 1 |
| 2449163.46700 | pri | pe | Cicek C | IBVS | 2001 | 5142 | 1 |
| 2449180.47040 | sec | pe | Cicek C | IBVS | 2001 | 5142 | 1 |
| 2449181.47740 | pri | pe | Cicek C | IBVS | 2001 | 5142 | 1 |
| 2449189.47550 | sec | pe | Cicek C | IBVS | 2001 | 5142 | 1 |
| 2449198.47740 | pri | pe | Cicek C | IBVS | 2001 | 5142 | 1 |
| 2449198.47900 | pri | e | Diethelm Roger | BBSAG | 1993 | 104 | |
| 2449207.48160 | pri | pe | Cicek C | IBVS | 2001 | 5142 | 1 |
| 2449208.48780 | pri | pe | Cicek C | IBVS | 2001 | 5142 | 1 |
| 2449216.48540 | sec | pe | Cicek C | IBVS | 2001 | 5142 | 1 |
| 2449225.48930 | pri | pe | Cicek C | IBVS | 2001 | 5142 | 1 |
| 2449228.73000 | pri | pe | Fox G W | IBVS | 1994 | 4009 | 1 |
| 2449574.38330 | sec | pe | Cicek C | IBVS | 2001 | 5142 | 1 |
| 2449575.37880 | pri | pe | Cicek C | IBVS | 2001 | 5142 | 1 |
| 2449592.39110 | sec | pe | Cicek C | IBVS | 2001 | 5142 | 1 |
| 2449593.38690 | pri | pe | Cicek C | IBVS | 2001 | 5142 | 1 |
| 2449601.39530 | sec | pe | Cicek C | IBVS | 2001 | 5142 | 1 |
| 2449610.39980 | pri | pe | Cicek C | IBVS | 2001 | 5142 | 1 |
| 2449611.39320 | pri | pe | Cicek C | IBVS | 2001 | 5142 | 1 |
| 2449647.40680 | sec | cc | Wolf Marek | BAV | | | |
| 2449889.51190 | sec | cc | Wolf Marek | BAV | | | |
| 2449898.52000 | pri | cc | Diethelm Roger | BBSAG | 1995 | 109 | |
| 2449899.50580 | pri | cc | Wolf Marek | BAV | | | |
| 2449917.50270 | sec | cc | Diethelm Roger | BBSAG | 1995 | 109 | |
| 2450014.30550 | sec | cc | Wolf Marek | BAV | | | |
| 2450376.70090 | sec | cc | Caton D B | IBVS | 2007 | 5745 | |
| 2450562.53500 | sec | cc | Wolf Marek | BAV | | | |
| 2450722.35100 | pri | cc | Diethelm Roger | BBSAG | 1998 | 116 | |
| 2450974.44890 | pri | cc | Wolf Marek | BAV | | | |
| 2450984.44700 | pri | cc | Diethelm Roger | BBSAG | 1998 | 118 | |
| 2451046.47930 | sec | cc | Wolf Marek | BAV | | | |
| 2451352.57800 | pri | cc | Paschke Anton | Rotse | | | |
| 2451737.46060 | sec | cc | Cicek C | IBVS | 2001 | 5142 | 1 |
| 2451747.52630 | pri | cc | Diethelm Roger | BBSAG | 2000 | 123 | |
| 2452832.49680 | pri | cc | Zejda Milos | IBVS | 2004 | 5583 | 1 |

| | | | | | | | |
|---------------|-----|----|------------------|-------|------|------|---|
| 2452840.41780 | sec | cc | Jungbluth Hans | BAV | | | |
| 2452850.50490 | pri | cc | Jungbluth Hans | BAV | | | |
| 2452859.50670 | sec | cc | Zejda Milos | IBVS | 2004 | 5583 | 1 |
| 2452859.50820 | sec | cc | Zejda Milos | IBVS | 2004 | 5583 | 1 |
| 2452912.44570 | sec | cc | Jungbluth Hans | BAV | | | |
| 2453252.32270 | pri | cc | Oezuyar D | IBVS | 2005 | 5588 | 1 |
| 2453674.36370 | pri | cc | Jungbluth Helmut | BAV | | | |
| 2453899.47210 | pri | cc | Diethelm Roger | BBSAG | 2003 | 132 | |
| 2453549.43110 | sec | cc | Brat Lubos | OEJV | 2007 | 74 | 1 |
| 2453549.43160 | sec | cc | Brat L | OEJV | 2007 | 74 | 1 |
| 2454267.44243 | pri | cc | Liakos A | | | | |
| 2454275.36960 | sec | cc | Liakos A | | | | |

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Λογισμικά ανάλυσης

Στο παρόν παράρτημα παρουσιάζονται τα λογισμικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν τόσο για την ανάλυση των O-C διαγραμμάτων όσο και για την κατασκευή των φωτομετρικών μοντέλων σε κάποιες περιπτώσεις.

1. Λογισμικό για την ανάλυση των O-C διαγραμμάτων

Στο λογισμικό Matlab (v.7.0.4.365) χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω κώδικες που κατασκευάστηκαν από τον P. Zaslav (http://sirrah.troja.mff.cuni.cz/~zaslav/) για την ανάλυση των O-C διαγραμμάτων. Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων με στατιστικό βάρος ώστε να κατασκευάσει την καλύτερη θεωρητική καμπύλη και να την προσαρμόσει στα παρατηρησιακά δεδομένα. Το στατιστικό βάρος σε κάθε χρόνο παρατήρησης είναι ανάλογο του τρόπου παρατήρησης από τον οποίο προήλθε ο χρόνος ελαχίστου. Ο κατασκευαστής του προγράμματος προτείνει στατιστικό βάρος ίσο με 1 για τα σημεία που προήλθαν από οπτικές παρατηρήσεις (v), ίσο με 5 για τα σημεία που προήλθαν από φωτογραφικές παρατηρήσεις (p), ίσο με 10 για τα σημεία που προήλθαν από φωτοηλεκτρικές παρατηρήσεις (e), και τέλος ίσο με 10 για τα σημεία που προήλθαν από ccd παρατηρήσεις (cc). Βέβαια το στατιστικό βάρος είναι προσωπική υπόθεση, και είναι στην ευχέρεια του χρήστη να αποκλείσει κάποια σημεία τα οποία τα θεωρεί τελείως λάθος, ανεξάρτητα της μεθόδου με την οποία έχουν προκύψει, θέτοντας στατιστικό βάρος ίσο με 0. Χρησιμοποιεί την μέθοδο των επαναλήψεων (iterations), δηλαδή οι τελικές παράμετροι που προκύπτουν από κάθε επανάληψη χρησιμοποιούνται στην επόμενη ως αρχικές τιμές.

A. Ο κώδικας *Apsidal motion*

Το πρόγραμμα εμπεριέχει τις εξισώσεις της *Apsidal Motion* (§4.3) και έχει ως ελεύθερες παραμέτρους τις ποσότητες : JD_0 και P , που είναι τα στοιχεία της αστρονομικής εφημερίδας του αστέρα, ω και $\dot{\omega}$ το μήκος και ο ρυθμός μεταβολής του περιάστρου της τροχιάς του δευτερεύοντος αστέρα (ταχύτητα της κίνησης της γραμμής των ασίδων), και e η εκκεντρότητα της τροχιάς του δευτερεύοντος αστέρα ως προς τον πρωτεύοντα.

Παρακάτω παρουσιάζεται η σειρά δημιουργίας απαραίτητων αρχείων, για την εκτέλεση του προγράμματος.

Το αρχείο minima (.min)

Αρχικά πρέπει να φτιάξουμε ένα αρχείο όπου θα περιέχει τους χρόνους ελαχίστων τους οποίους θα χρησιμοποιήσουμε με τα αντίστοιχα στατιστικά βάρη. Τέλος κάνουμε `save` το παραπάνω αρχείο δίνοντάς του το όνομα : Όνομα αστέρα.min (π.χ GOCyg.min).

Το αρχείο input (.in)

Σε αυτό το αρχείο δίνουμε αρχικές παραμέτρους για τον αστέρα : JD_0 , P , Ω και $\frac{d\Omega}{dt}$. Τέλος κάνουμε `save` το παραπάνω αρχείο δίνοντας του το όνομα : Όνομα αστέρα.in (π.χ GOCyg.in).

Το αρχείο (_Epoch.m)

Αυτό το αρχείο είναι ένα σύνολο εντολών που κατασκευάζει το O-C διάγραμμα του αστέρα και καλεί τις τιμές των δύο παραπάνω αρχείων. Μπαίνουμε μέσα στον κώδικα, και αλλάζουμε το όνομα του αστέρα, με το όνομα του αστέρα τον οποίο θέλουμε να μελετήσουμε. Τέλος κάνουμε `save` το παραπάνω αρχείο δίνοντας του το όνομα: Όνομα αστέρα_Epoch.m (π.χ GOCyg_Epoch.m).

Το αρχείο (_onlyApsidal.m)

Αυτό το αρχείο είναι ουσιαστικά το σύνολο εντολών που θα τρέξουν στο Matlab. Στις παραμέτρους εισόδου (input parameters και input Data points) το πρόγραμμα «καλεί» τα αρχεία .min και .in ώστε να πάρει τιμές για τους υπολογισμούς. Πηγαίνουμε μέσα στο πρόγραμμα και αλλάζουμε το όνομα των αρχείων .min και .in με το όνομα των αρχείων που φτιάξαμε στα δύο πρώτα βήματα. Στα τελευταία βήματα του κώδικα, στις εντολές που αναφέρονται στην εμφάνιση των O-C διαγραμμάτων, αλλάζουμε το όνομα, με το όνομα του συστήματός μας, ώστε ο τίτλος στα διαγράμματα που θα προκύψουν να είναι του συστήματός μας.

B. Ο κώδικας *LITE & Mass transfer*

Το πρόγραμμα περιέχει τις εξισώσεις του *LITE* (§4.4) και τις εξισώσεις της μεταφοράς μάζας (§4.5), περνά από τα σημεία του O-C διαγράμματος την θεωρητική καμπύλη και εξάγει τις παραμέτρους του τρίτου σώματος και της μεταφοράς μάζας. Έχει ως ελεύθερες παραμέτρους τις παρακάτω ποσότητες : JD_0 και P που είναι ο χρόνος (αρχικού) πρωτεύοντος ελαχίστου και η περίοδος του διπλού συστήματος αντίστοιχα, P_3 είναι η περίοδος του τρίτου σώματος, T_0 μία τιμή HJD όπου θεωρούμε ότι ξεκινάει η ημιτονοειδής καμπύλη του O-C, δηλαδή η στιγμή όπου το τρίτο σώμα περνά από το περίαστρο της τροχιάς του, A το πλάτος του ημιτονοειδούς O-C, Ω το μήκος του περιάστρου της τροχιάς του τρίτου σώματος, e η εκκεντρότητα της τροχιάς του τρίτου σώματος και qmt ο ρυθμός μεταβολής της περιόδου ανά τροχιακό κύκλο.

Ο κώδικας έχει δημιουργηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε οι υπορουτίνες που καλούν είτε τις εξισώσεις του *LITE* είτε της μεταφοράς (απώλειας) μάζας να μπορούν να απομονωθούν. Ο χρήστης αρχικά καλείται να επιλέξει ποιες εξισώσεις θέλει να εφαρμόσει ο κώδικας στη κατασκευή της θεωρητικής καμπύλης στο O-C διάγραμμα. Δίνονται οι παρακάτω τρεις επιλογές : i) *LITE only*, ii) *LITE + mass transfer*, iii) *Mass transfer only*. Παρακάτω παρουσιάζεται η σειρά δημιουργίας των απαραίτητων αρχείων για την εκτέλεση του προγράμματος.

Το αρχείο *minima (.min)*

Αρχικά πρέπει να φτιάξουμε ένα αρχείο όπου θα περιέχει τους χρόνους ελαχίστων τους οποίους θα χρησιμοποιήσουμε με τα αντίστοιχα στατιστικά βάρη. Τέλος κάνουμε *save* το παραπάνω αρχείο δίνοντας του το όνομα : Όνομα αστέρα.min (π.χ *GOCyg.min*).

Το αρχείο *input (.in)*

Σε αυτό το αρχείο δίνουμε αρχικές παραμέτρους για το σύστημα : JD_0 , P_3 , T_0 , A , Ω , e , qmt . Τέλος κάνουμε *save* το παραπάνω αρχείο δίνοντας του το όνομα : Όνομα αστέρα.in (π.χ *GOCyg.in*).

Το αρχείο *(.m)*

Αυτό το αρχείο είναι ουσιαστικά το σύνολο εντολών, που θα τρέξουν στο Matlab. Στις παραμέτρους εισόδου (*input parameters* και *input Data points*) το πρόγραμμα «καλεί» τα αρχεία *.min* και *.in* ώστε να πάρει τιμές για τους υπολογισμούς. Πηγαίνουμε μέσα στο πρόγραμμα και αλλάζουμε το όνομα των αρχείων *.min* και *.in* με το όνομα των αρχείων που φτιάξαμε στα προηγούμενα βήματα. Στα τελευταία βήματα του κώδικα, στις εντολές που αναφέρονται στην εμφάνιση των O-C διαγραμμάτων, αλλάζουμε το όνομα, με το όνομα του αστέρα μας, ώστε ο τίτλος στα διαγράμματα που θα προκύψουν να είναι του αστέρα μας.

C. Ο κώδικας *LITE & Apsidal motion & Mass Transfer*

Το πρόγραμμα εμπεριέχει τις εξισώσεις της *Apsidal Motion* (§4.3) του *LITE* (§4.4) και τις εξισώσεις της *μεταφοράς μάζας* (§4.5). και έχει ως ελεύθερες παραμέτρους τις ποσότητες : JD_0 και P , που είναι τα στοιχεία της αστρονομικής εφημερίδας του αστέρα, ω και $\dot{\omega}$ το μήκος και ο ρυθμός μεταβολής του περιάστρου της τροχιάς του δευτερεύοντος αστέρα (ταχύτητα της κίνησης της γραμμής των αψίδων), e η εκκεντρότητα της τροχιάς του δευτερεύοντος αστέρα ως προς τον πρωτεύοντα, P_3 η περίοδος του τρίτου σώματος, T_0 μία τιμή HJD όπου θεωρούμε ότι ξεκινάει η ημιτονοειδής καμπύλη του O-C, δηλαδή η στιγμή όπου το τρίτο σώμα περνά από το περίαστρο της τροχιάς του, A το πλάτος του ημιτονοειδούς O-C, Ω_3 το μήκος του περιάστρου της τροχιάς του τρίτου σώματος, e_3 η εκκεντρότητα της τροχιάς του τρίτου σώματος και qmt ο ρυθμός μεταβολής της περιόδου ανά τροχιακό κύκλο. Ο κώδικας έχει δημιουργηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε οι υπορουτίνες που καλούν είτε τις εξισώσεις του *LITE* είτε της μεταφοράς (απώλειας) μάζας να μπορούν να απομονωθούν, ενώ πάντα θα χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις της *Apsidal motion*. Ο χρήστης αρχικά καλείται να επιλέξει ποιες εξισώσεις θέλει να εφαρμόσει ο κώδικας στη κατασκευή της θεωρητικής καμπύλης στο O-C διάγραμμα μαζί με αυτές της *Apsidal motion*. Δίνονται οι παρακάτω τρεις επιλογές: i) *LITE only*, ii) *LITE + mass transfer*, iii) *Mass transfer only*. Παρακάτω παρουσιάζεται η σειρά δημιουργίας απαραίτητων αρχείων, για την εκτέλεση του προγράμματος.

Το αρχείο *minima (.min)*

Αρχικά πρέπει να φτιάξουμε ένα αρχείο όπου θα περιέχει τους χρόνους ελαχίστων τους οποίους θα χρησιμοποιήσουμε με τα αντίστοιχα στατιστικά βάρη. Τέλος κάνουμε *save* το παραπάνω αρχείο δίνοντας του το όνομα : Όνομα αστέρα.min (π.χ *GOCyg.min*).

Το αρχείο *input (.in)*

Σε αυτό το αρχείο δίνουμε αρχικές παραμέτρους για το σύστημα : JD_0 , P_3 , T_0 , A , Ω_3 , e_3 , qmt , e , Ω και $\frac{d\Omega}{dt}$. Τέλος κάνουμε *save* το παραπάνω αρχείο δίνοντας του το όνομα : Όνομα αστέρα.in (π.χ *GOCyg.in*).

Το αρχείο *(.m)*

Αυτό το αρχείο είναι ουσιαστικά το σύνολο εντολών, που θα τρέξουν στο Matlab. Στις παραμέτρους εισόδου (*input parameters* και *input Data points*) το πρόγραμμα «καλεί» τα αρχεία *.min* και *.in* ώστε να πάρει τιμές για τους υπολογισμούς. Πηγαίνουμε μέσα στο πρόγραμμα και αλλάζουμε το όνομα των αρχείων *.min* και *.in* με το όνομα των αρχείων που φτιάξαμε στα προηγούμενα βήματα. Στα τελευταία βήματα του κώδικα, στις εντολές που αναφέρονται στην εμφάνιση των O-C διαγραμμάτων, αλλάζουμε το όνομα, με το όνομα του αστέρα μας, ώστε ο τίτλος στα διαγράμματα που θα προκύψουν να είναι του αστέρα μας.

Το αρχείο (_Epoch.m)

Αυτό το αρχείο είναι ένα σύνολο εντολών που κατασκευάζει το O-C διάγραμμα του αστέρα και καλεί τις τιμές των δύο παραπάνω αρχείων. Μπαίνουμε μέσα στον κώδικα, και αλλάζουμε το όνομα του αστέρα, με το όνομα του αστέρα τον οποίο θέλουμε να μελετήσουμε. Τέλος κάνουμε `save` το παραπάνω αρχείο δίνοντας του το όνομα: Όνομα αστέρα_Epoch.m (π.χ GOCyg_Epoch.m).

Το αρχείο (_onlyApsidal.m)

Αυτό το αρχείο είναι ουσιαστικά το σύνολο εντολών, που θα τρέξουν στο Matlab. Στις παραμέτρους εισόδου (input parameters και input Data points) το πρόγραμμα «καλεί» τα αρχεία `.mih` και `.ih` ώστε να πάρει τιμές για τους υπολογισμούς. Πηγαίνουμε μέσα στο πρόγραμμα και αλλάζουμε το όνομα των αρχείων `.mih` και `.ih` με το όνομα των αρχείων που φτιάξαμε στα δύο πρώτα βήματα. Στα τελευταία βήματα του κώδικα, στις εντολές που αναφέρονται στην εμφάνιση των O-C διαγραμμάτων, αλλάζουμε το όνομα, με το όνομα του συστήματός μας, ώστε ο τίτλος στα διαγράμματα που θα προκύψουν να είναι του συστήματός μας.

2. Λογισμικό για την κατασκευή του φωτομετρικού μοντέλου ενός διπλού εκλειπτικού συστήματος

Η ανάλυση των φωτομετρικών και φασματοσκοπικών παρατηρήσεων (ακτινικές ταχύτητες) για την κατασκευή των μοντέλων γίνεται με το λογισμικό PHOEBE 0.29d (Prša & Zwitter 2005) το οποίο χρησιμοποιεί την έκδοση του κώδικα των Wilson & Devinney (2003). Η επίσημη ιστοσελίδα του προγράμματος είναι η : <http://phoebe.fiz.uni-lj.si/> όπου είναι διαθέσιμες οι τρέχουσες εκδόσεις του και το εγχειρίδιο χρήσης (manual). Παρακάτω παρουσιάζονται οι παράμετροι που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα και μία σύντομη επεξήγησή τους.

Λόγω απουσίας φασματοσκοπικών παρατηρήσεων σε συστήματα που αναλύθηκαν στην παρούσα εργασία, εξήχθη το φωτομετρικό μοντέλο του συστήματος.

Εισαγωγή παρατηρησιακών δεδομένων και επιλογή μοντέλου

Αρχικά εισάγουμε στο πρόγραμμα τα παρατηρησιακά μας δεδομένα με αρχεία τύπου .txt. Οι καμπύλες φωτός (LC) δίνονται σε μορφή Phase – magnitude ή Phase - Flux πρέπει να οριστεί με ανάλογη επιλογή ποιο φωτομετρικό φίλτρο αντιπροσωπεύουν (π.χ Bessell – R). Επιλέγουμε την τιμή του φαινομένου μεγέθους στην οποία το πρόγραμμα θα κανονικοποιήσει την καμπύλη φωτός, έτσι ώστε να κατασκευάσει το διάγραμμα ροής.

Εν συνεχεία και με παρόμοιο τρόπο δίνονται (εάν υπάρχουν) οι ακτινικές ταχύτητες στη μορφή Phase – RV.

Οι επιλογές του προγράμματος για την εφαρμογή μοντέλου είναι οι εξής :

- *General Binary (No constraints)* : Ελεύθερες όλες οι παράμετροι
- *Detached Binary* : Για αποχωρισμένα συστήματα
- *Semi - Detached Binary, primary star fills Roche Lobe* : Για ημι-αποχωρισμένα συστήματα όπου ο πρωτεύων αστέρας έχει γεμίσει τον λοβό Roche του
- *Semi - Detached Binary, secondary star fills Roche Lobe* : Για ημι-αποχωρισμένα συστήματα όπου ο δευτερεύων αστέρας έχει γεμίσει τον λοβό Roche του
- *Double contact Binary* : Για συστήματα σε επαφή
- *Overcontact binary of the W UMa type* : Για συστήματα σε υπερ-επαφή τύπου W UMa
- *Overcontact binary not in Thermal contact* : Για συστήματα σε υπερ-επαφή που δεν βρίσκονται σε θερμική ισορροπία
- *X-Ray Binary* : Για συστήματα ακτίνων X

Αναλόγα λοιπόν με την καμπύλη φωτός του συστήματος, ο χρήστης καλείται να επιλέξει κάποιο από τα παραπάνω μοντέλα το οποίο και θα περιγράφει καλύτερα τα δεδομένα του. Πιθανόν, η καμπύλη φωτός να επιλύεται με παραπάνω από ένα από τα μοντέλα, οπότε η λύση δεν είναι μοναδική. Οι ακτινικές ταχύτητες όμως (εάν είναι διαθέσιμες) αποτελούν μία πολύ σημαντική πηγή πληροφόρησης και συνήθως δείχνουν ποιο μοντέλο πρέπει να χρησιμοποιηθεί.

Παράμετροι που σχετίζονται με το σύστημα

| | |
|------------------------|--|
| HJD₀ | Χρόνος πρωτεύοντος ελαχίστου |
| PERIOD | Περίοδος του συστήματος |
| DPDT | Πρώτη παράγωγος της περιόδου |
| PSHIFT | Μετατόπιση της καμπύλης σε φάση |
| SMA | Ημιάξονας της σχετικής τροχιάς |
| RM | Λόγος μαζών (m_2/m_1) των αστέρων |
| INCL | Γωνία μεταξύ του τροχιακού επιπέδου του συστήματος και της οπτικής ευθείας |
| VGA | Σχετική ταχύτητα του κέντρο μάζας |

Παράμετροι που σχετίζονται με τους αστέρες του συστήματος

| | |
|-------------------------|---|
| TAVH | Θερμοκρασία του πρωτεύοντος αστέρα |
| TAVC | Θερμοκρασία του δευτερεύοντος αστέρα |
| PHSV | Δυναμικό επιφανείας του πρωτεύοντος αστέρα |
| PCSV | Δυναμικό επιφανείας του δευτερεύοντος αστέρα |
| LOGG₁ | Επιτάχυνση της βαρύτητας του πρωτεύοντος αστέρα |
| LOGG₂ | Επιτάχυνση της βαρύτητας του δευτερεύοντος αστέρα |
| MET 1 | Μεταλλικότητα του πρωτεύοντος αστέρα |
| MET 2 | Μεταλλικότητα του δευτερεύοντος αστέρα |

Τροχιακές παράμετροι

| | |
|----------------------|---|
| E | Σχετική εκκεντρότητα του δευτερεύοντος αστέρα |
| PERR0 | Γωνία του περιάστρου της σχετικής τροχιάς |
| DPERDT | Πρώτη παράγωγος της γωνία του περιάστρου της σχετικής τροχιάς |
| F₁ | Σύγχρονη κίνηση του πρωτεύοντος αστέρα |
| F₂ | Σύγχρονη κίνηση του δευτερεύοντος αστέρα |

Παράμετροι φωτεινότητας των αστέρων

| | |
|--|--|
| Primary level / Filter | Φωτεινότητα του πρωτεύοντος αστέρα / φίλτρο |
| Secondary level / Filter | Φωτεινότητα του δευτερεύοντος αστέρα / φίλτρο |
| 3rd light level / Filter | Συνεισφορά της φωτεινότητας του τρίτου σώματος είτε σε ποσοστό επί ολικής φωτεινότητας είτε στην ροή |
| Eclipse proximity effects | Φαινόμενα ασυμμετρίας στις εκλείψεις, είτε για τον πρωτεύοντα είτε για τον δευτερεύοντα αστέρα |

Παράμετροι φαινομένου αμαύρωσης χείλους

| | |
|--|---|
| Limb darkening Law | Εξίσωση υπολογισμού του φαινομένου (Συνημίτονο, λογάριθμος, τετραγωνική ρίζα) |
| Bolometric coefficients | Συντελεστές βολομετρικού μεγέθους |
| LC Monochromatic Limb darkening coefficients / filter * | Συντελεστές του φαινομένου αμαύρωσης χείλους / φίλτρο στις καμπύλες φωτός |
| RV Monochromatic Limb darkening coefficients / filter * | Συντελεστές του φαινομένου αμαύρωσης χείλους / φίλτρο στις καμπύλες ακτινικών ταχυτήτων |

*Λαμβάνονται από τους πίνακες του van Hamme (1993)

Παράμετροι της επιφανείας των αστέρων

| | |
|--------------------------------|---|
| ALB 1 | Λευκαύγεια του πρωτεύοντος αστέρα |
| ALB 2 | Λευκαύγεια του δευτερεύοντος αστέρα |
| GR 1 | Φαινόμενο αμαύρωσης λόγω βαρύτητας του πρωτεύοντος αστέρα |
| GR 2 | Φαινόμενο αμαύρωσης λόγω βαρύτητας του δευτερεύοντος αστέρα |
| Spots on primary star | Αριθμός κηλίδων στον πρωτεύοντα αστέρα με παραμέτρους το αστρογραφικό τους πλάτος και μήκος, την θερμοκρασία τους και την ακτίνα τους |
| Spots on secondary star | Αριθμός κηλίδων στον δευτερεύοντα αστέρα με παραμέτρους το αστρογραφικό τους πλάτος και μήκος, την θερμοκρασία τους και την ακτίνα τους |

Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί την μέθοδο των διαφορικών διορθώσεων κάθε φορά που συγκλίνει σε νέες παραμέτρους, ενώ ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει και την μέθοδο των υποσυνόλων, δηλαδή την χρήση συνόλου παραμέτρων (multiple subsets που θα αφήνονται ελεύθερες σε κάθε επανάληψη).

Σε κάθε μια από τις παραπάνω παραμέτρους υπάρχει σχετική επιλογή (adjust) για το αν ο χρήστης επιθυμεί να την συμπεριλάβει στους υπολογισμούς είτε να παραμείνει ως έχει, αλλά και το βήμα της αλλαγής της εκάστοτε τιμής της (step).

Από την βιβλιογραφία χρησιμοποιούμε κάποιες αρχικές τιμές σε όλες τις παραπάνω παραμέτρους (ανάλογα με το μοντέλο που χρησιμοποιούμε) και έτσι το πρόγραμμα με κατάλληλες επιλογές των παραμέτρων που θα χρησιμοποιηθούν στις επαναλήψεις προκειμένου να κατασκευαστεί νέα θεωρητική καμπύλη συγκλίνει σε νέα λύση.

Από το άθροισμα των τετραγώνων των υπολοίπων (χ^2) αλλά και από την προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης στα παρατηρησιακά δεδομένα ανά φίλτρο, ο χρήστης μπορεί να κρίνει αν θα συνεχίσει προκειμένου να βρει νέα λύση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική βιβλιογραφία

- Αντωνοπούλου, Ε., Μαστιχιάδης, Α.: *Αστροφυσική I*, Αθήνα, 2004
- Αντωνοπούλου, Ε., Κοντιζά, Μ., Μαστιχιάδης, Α.: *Αστροφυσική II*, Αθήνα, 2005
- Arnold, H.: *Αστροφωτογραφία (μεταφ.)*, εκδ. Πλανητάριο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 2005
- Γαζέας, Κ.: *CCD φωτομετρία μεταβλητών αστέρων*, μεταπτυχιακή εργασία, Αθήνα, 2002
- Δανέζης, Μ. & Θεοδοσίου, Ε.: *Το σύμπαν που αγάπησα*, εκδ. Δίαυλος, Αθήνα, 1999
- Καλημέρης, Α.: *Μελέτη των διπλών συστημάτων τύπου W UMa μέσω των μεταβολών της τροχιακής τους περιόδου*, Διδακτορική διατριβή, Αθήνα, 2005
- Λιάκος, Α.: *Μελέτη του LITE και της κίνησης της γραμμής των αψίδων στα διπλά εκλειπτικά συστήματα TX Her, UX Eri, IQ Per*, πτυχιακή εργασία, Αθήνα, 2006
- Λιβανίου-Ροβίθη, Ε. & Νιάρχος, Π.: *Σημειώσεις Παρατηρησιακής Αστροφυσικής*, Αθήνα, 2002
- Μαστιχιάδης, Α., Βλαχάκης, Ν.: *Αστροφυσική υψηλών ενεργειών*, Αθήνα, 2004
- Νιάρχος, Π.: *Εισαγωγή στην αστρονομική φωτομετρία*, Αθήνα, 2003

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

- Applegate, J., 1992, ApJ., 385, 621
- Applegate, J., 1992, ASPC., 26, 343
- Berry, R. & Burnell, J.: *The handbook of astronomical image processing*, εκδ. Wilmann-Bell, Inc., USA., 2001
- Carroll, B. & Ostlie, D. : *An introduction to modern astrophysics*, εκδ. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., USA, 1996
- Charles, P. & Seward, F.: *Exploring the X-ray universe*, εκδ. Cambridge University Press, Great Britain, 1995
- Dawson, D., 1979, ApJS, 41, 97
- de Loore, C. & Doom, C.: *Structure and Evolution of single and binary stars*, εκδ. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 1992
- Eddington, A., 1918, MNRAS, 79, 2
- Eggleton, P., 1983, ApJ, 268, 368
- Frieboes-Conde, H. & Herczeg, T., 1973, A&AS, 12, 1
- Harmanec, P., 1988, BAICz, 39, 329
- Hilditch, R. : *An introduction to Close Binary Stars*, εκδ. Cambridge University Press, USA, 2001
- Hill, G., Fisher, W., Holmgren, D., 1989, A&A, 211, 81
- Irwin, J., 1959, AJ, 64, 149
- Kahler, H., 1989, A&A, 209, 67
- Kalimeris, A., Rovithis-Livaniou, H., Rovithis, P., 1994, A&A, 282, 775

- Kalimeris, A., Rovithis-Livaniou, H., Rovithis, P., Oprescu, G., Dumitrescu, A., Suran, M., 1994, *A&A*, 291, 765
- Kalimeris, A., Mitrou, C., Doyle, J., Antonopoulou, E., Rovithis-Livaniou, H., 1995, *A&A*, 293, 371
- Kalimeris, A., Rovithis-Livaniou, H., Rovithis, P., 2002, *A&A*, 387, 969
- Kalimeris, A. & Rovithis-Livaniou, H., 2006, *ApSS*, 304, 113
- Kopal, Z., 1938, *MNRAS*, 98, 448
- Kopal, Z.: *Close Binary Systems*, Εκδ. Chapman & Hall, London, 1959
- Kreiner, J., Kim, C., Nha, S.: *An Atlas of O-C diagrams Of Eclipsing Binary Stars*, Cracow, Poland : Wydawnictwo Naukowe Akademii Pedagogicznej, 2001
- Kruszewski, A., 1966, *Adv. In A&A*, 4, 233
- Kukarkin, B.: *Obscij katalog peremennyh zvezd. Vol.1: Constellations Andromeda-Crux*, Moscow, 1969
- Kukarkin, B., Kholopov, P., Pskovsky, Y., Efremov, Y., Kukarkina, N., Kurochkin, N., Medvedeva, G., 1971, *GCVS*, 3
- Kukarkin, B.: *Obscij katalog peremennyh zvezd*, Moscow, 1974
- Kukarkin, B.: *Obscij katalog peremennyh zvezd*, Moscow, 1976
- Kukarkin, B., Kholopov, P.: *ncsv book*, εκδ. Nauka, Moscow, 1982
- Kukarkin, B.: *General catalogue of variable stars. Vol.1: Constellations Andromeda – Crux, Vol.2: Constellations Cygnus – Orion, Vol.3: Constellations Pavo-Vulpecula*, Moscow, 1985
- Kwee, K. & van Woerden, H., 1956, *Bulletin of the astronomical institutes of the Netherlands*, 12, 464
- Leavitt, H., 1912, *Harvard College Observatory Circular*, 173, 1
- Martynov, D. Ya.: *Uch. Zap. Kazanskogo Un-ta 108 (Book 5) = Izv. AOE*, No. 25, Sec. 28, 1948
- Martynov, D. Ya.: *Eclipsing variable stars*, ed. by V.P. Tsesevich, W., 1973
- Mayer, P., 1990, *BAICz*, 41, 4
- Misner, C., Thorne, K., Wheeler, J.: *Gravitation*, εκδ. Freeman, 1973
- Prša, A. & Zwitter, T., 2005, *ApJ*, 628, 426
- Robertson, A., 1980, *MNRAS*, 192, 263
- Shapley, H., *ApJ*, 40, 448
- Slavenas, P.: *The stellar case of the problem of three bodies*, Ph.D. Thesis, Great Britain, 1928
- Tout, A. & Hall. S., 1991, *MNRAS*, 253, 9
- van Hamme, W., 1993, *AJ*, 106, 2096
- Wilson, R. & Devinney, E., 1971, *ApJ*, 166, 605
- Wilson, R., 1979, *ApJ*, 234, 1054
- Wilson, R., 1990, *ApJ*, 356, 613
- Wilson, R., 1993, *Documentation of Eclipsing Binary Computer Model*
- Woltjer, J., 1922, *Bull. Astron. Inst. Netherlands*, 1, 93
- Zasche, P.: *Multiple stellar systems under photometric and astrometric analysis*, Ph.D. Thesis, Prague, 2007

Βιβλιογραφία για κάθε σύστημα που αναλύθηκε (Αλφαβητική σειρά αστερισμών)

GK Cep

- Bartolini, C., Mammano, A., Mannino, G., Margoni, R., 1965, IBVS, 85
Derman, E. & Demircan, O., 1992, AJ, 103, 599
Dworak, T., 1975, AcA, 25, 103
Erdem, A., 2001, AN, 322, 4
Gleim, J. K., 1967, AJ, 72, 530
Liakos, A. & Niarchos, P., 2008, Proceedings of IAU Symposium, In press
Hutchings, J. & Hill, G., 1973, ApJ, 179, 539
Rovithis-Livaniou, H., Niarchos, P., Rovithis, P., Kalimeris, A., 1990, IBVS, 3528

TZ Eri

- Barblan, F., Bartholdi, P., North, P., Burki, G., Olson, E., 1998, A&A, 132, 367
Brancewicz, H. & Dworak, T., 1980, AcA, 30, 501
Cannon, A., 1934, BHarO, 897, 12
Hoffmeister, C., 1929, AN, 236, 233
Kaitchuck, R. & Park, E., 1988, ApJ, 325, 225
Liakos, A., Ulas, B., Gazeas, K., Niarchos, P., 2008, CoAst, Proceedings of the Wroclaw HELAS Workshop, In press
Yoon, tae S., Honeycutt, K., Kaitchuck, R., Schlegel, E., 1994, PASP, 106, 239
Zasche, P., Liakos, A., Wolf, M., Niarchos, P., 2008, New Astronomy, 13, 405

VX Lac

- Cannon, A., 1934, BHarO, 897, 12
Kreiner, J., 1971, AcA 21, 365
Svechnikov, M. & Kuznetsova, E.: *Catalogue of Approximate Photometric and Absolute Elements of Eclipsing Variable Stars*, A.M. Gorky University of the Urals, Sverdlovsk, 1990
Zasche, P., Liakos, A., Wolf, M., Niarchos, P., 2008, New Astronomy, 13, 405

LZ Lyr

- Hoffmeister, C., Rohlf, E., Ahnert, P., 1951, Veroeff. Sternwarte Sonneberg, 1, 407
Wood, B. & Forbes, J., 1963, AJ, 68, 257

PY Lyr

- Demircan, O. et al., 2003, IBVS, 5364, 1
Kholopov, P. et al., 1985, GCVS, 4, 1

Malkov, Y., Oblak, E., Snegireva, A., Torra, J., 2006, A&A, 446, 785
Manimanis, V., Niarchos, P., Gazeas, K., 2006, AIPC, 848, 927
Pribulla, T., Kreiner, J., Tremko, J., 2003, Contributions of the Astronomical
Observatory Skalnaté Pleso, 33, 38
Wachmann, A., 1961, AAHam, 6, 1
Zasche, P., Liakos, A., Niarchos, P., Wolf, M., Manimanis, V., Gazeas, K., 2009,
New Astronomy, 14, 121

DD Mon

Ahnert, P., Hoffmeister, C., Rohlf, E., van de Voorde, A., 1947, Veroeff.
Sternwarte Sonneberg, 1, 43
Hoffmeister, C., 1934, AN, 253, 195
Qian, S., Liu, Q., Yang Y., Gu, S., Huang Z., A&A, 1997, 125, 475
Wachmann, A., 1968, Astron. Abh. Hamburger-Sternw. Bergedorf, 7, 8
Yamasaki, A., Okazaki, A., Nakamura, Y., Liu, Q., Yang, Y., Zhang, Z., Zhang, Y.,
1990, AJ, 99, 1218

FT Ori

Cristaldi, S., 1970, A&A, 5, 228
Diethelm, R., 1982, BRSAG Bull. No. 59
Diethelm, R., 1992, BRSAG Bull. No. 99
Gronbech, B., 1974, A&A, 37, 435
Hoffmeister, C., 1994, AN, 253, 195
Wolf, M., Sarounova, L., 1995, A&A, 114, 143

UZ Sge

Brancewicz, H.K. & Dworak, T.Z.: 1980, AcA, 30, 501
Frieboes-Conde, H. & Herczeg, T., 1973, A&AS, 12, 1
Halbedel, E., 1984, IBVS, 2549, 1
Irwin, B., 1959, AJ, 64, 149
Liakos, A. & Niarchos, P., 2008, RomAJ, In press
Zasche, P., Liakos, A., Wolf, M., Niarchos, P., 2008, New Astronomy, 13, 405

YY Sgr

Keller, G. & Limber, D.N., 1951, ApJ, 113, 637
Lacy, C., 1992, AJ, 104, 2213
Lacy, C., 1997, AJ, 113, 1091
Pickering, E., 1908, HCO Cic No.137
Pickering, E., 1909, ANAS, 179, 7
Wolf, M., 2000, A&A, 356, 134
Woodward, E.J., Koch, R.H., 1992, AJ, 104, 796

DR Vul

- Cicek, C., 2001, IBVS, 5142, 1
Hoffmeister, C., 1935, AN, 255, 405
Khaliullina, A. & Khaliullin, Kh., 1988, AZh, 65, 108
Khaliullina, A., 1987, MNRAS, 225, 425
O'Connell, D., 1972, Ric. Astron. Specola Vaticana, 8, 14
Wolf, M. & Diethelm, R., 1993, MNRAS, 263, 527
Wolf, M. & Diethelm, R., Sarounova, L., 1999, A&A, 345, 553

Σελίδες στο διαδίκτυο

<http://www.newton.dep.anl.gov/newton/askasci/1995/astron/AST186.HTM>

<http://www.aavso.org/>

http://spider.ipac.caltech.edu/staff/gerard/q_refs/sptype_temp.html

http://esoads.eso.org/abstract_service.html

<http://www.as.ap.krakow.pl/o-c/index.php3>

<http://ostrava.astronomy.cz/int.php>

<http://binaries.boulder.swri.edu/binaries/omc/>

<http://ebola.eastern.edu/>

<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-fid>

<http://var.astro.cz/ocgate/>

<http://phoebe.fiz.uni-lj.si/>

<http://www.as.ap.krakow.pl/o-c/index.php3>

<http://www.bavdata-astro.de/>

<http://www.sbig.com/sbwhtmls/online.htm>

<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/>