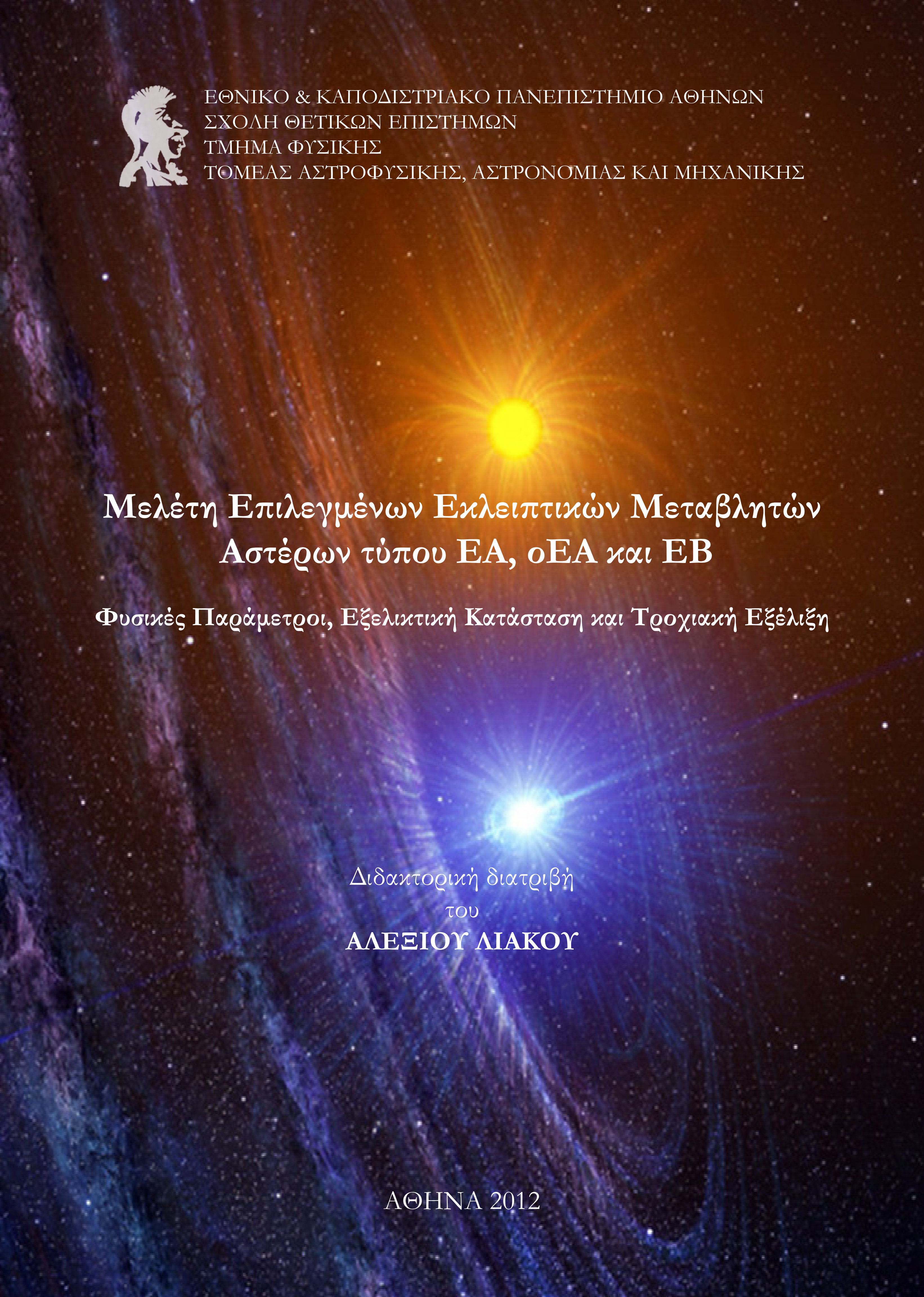


ΕΘΝΙΚΟ & ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗΣ, ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Μελέτη Επιλεγμένων Εκλειπτικών Μεταβλητών Αστέρων τύπου EA, oEA και EB

Φυσικές Παράμετροι, Εξελικτική Κατάσταση και Τροχιακή Εξέλιξη

Διδακτορική διατριβή
του
ΑΛΕΞΙΟΥ ΛΙΑΚΟΥ

ΑΘΗΝΑ 2012

ΕΘΝΙΚΟ & ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗΣ, ΑΣΤΡΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Μελέτη Επιλεγμένων Εκλειπτικών Μεταβλητών Αστέρων τύπου EA, oEA και EB

Φυσικές Παράμετροι, Εξελικτική Κατάσταση και Τροχιακή Εξέλιξη

Διδακτορική διατριβή
του
ΑΛΕΞΙΟΥ ΛΙΑΚΟΥ

ΑΘΗΝΑ 2012

«ἐπιστήμη ποιητικὴ εὐδαιμονίας»

Πλάτων, 427-347 π.Χ.

Στη Μαίρη

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διδακτορική διατριβή, η οποία αποτελεί την κορύφωση των μεταπτυχιακών σπουδών μου στο τμήμα Φυσικής, θα ήθελα να παραθέσω τις ευχαριστίες μου ξεχωριστά σε κάθε έναν που με βοήθησε με τον δικό του τρόπο να πετύχω στους στόχους μου, αλλά και να αναφέρω τις δυσκολίες που αντιμετώπισα.

Πάνω απ' όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την αμέριστη ηθική και οικονομική συμπαράσταση που μου παρείχε όλα αυτά τα χρόνια, την εμπιστοσύνη που έδειξε στις επιλογές μου και την ατελείωτη υπομονή που επέδειξε στις συνήθειες και στον ιδιάζοντα τρόπο ζωής ενός ενεργού παρατηρησιακού αστροφυσικού.

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές και ειλικρινείς μου ευχαριστίες στον Καθηγητή κ. Παναγιώτη Νιάρχο (ΕΚΠΑ) 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 τη διάρκεια και των δύο μεταπτυχιακών κύκλων σπουδών μου, για την προτροπή του να συμμετάσχω σε διάφορα συνέδρια αστροφυσικής στο εσωτερικό και στο εξωτερικό και πάνω απ' όλα για την επίβλεψή του στην εκπόνηση της παρούσας διατριβής. Η εμπειρία του στις δημοσιεύσεις επιστημονικών άρθρων προκαλούσε πάντα μια καλόβουλη κριτική των εργασιών στις οποίες συμμετείχαμε από κοινού, και κρίνοντας εκ του αποτελέσματος, φαίνεται ότι αυτό ήταν και το «κλειδί» για την εξέλιξή μου στον τομέα της συγγραφής επιστημονικών άρθρων. Επίσης, η βοήθειά του από τη θέση του διευθυντή του Γεροσταθοπούλειου πανεπιστημιακού αστεροσκοπείου για την αγορά και την εγκατάσταση ενός δεύτερου τηλεσκοπίου, το οποίο χρησιμοποιήθηκε εκτενώς για τις παρατηρήσεις, ήταν καταλυτική για τη συγκέντρωση περισσοτέρων δεδομένων. Τέλος, πολύτιμη ήταν και η συμβολή του για τη λήψη χρόνου τόσο στο αστεροσκοπείο του Κρυονερίου όσο και στο αστεροσκοπείο Σκίνακα.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Επίκουρη Καθηγήτρια κα Ευγενία Αντωνοπούλου (ΕΚΠΑ) για τις παρατηρήσεις και τις συμβουλές της για την παρούσα μελέτη.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια κα Δέσποινα Χατζηδημητρίου (ΕΚΠΑ) για τις πολύτιμες συμβουλές της αναφορικά με την παρατήρηση και επεξεργασία φασματοσκοπικών δεδομένων, τη συμβολή της στη λήψη χρόνου παρατήρησης στο αστεροσκοπείο Σκίνακα και τις υποδείξεις της σε επί μέρους θέματα της παρούσας διατριβής.

Επιθυμώ να ευχαριστήσω τις Επίκουρες Καθηγήτριες κα Παναγιώτα Πρέκα και κα Μαίρη Κοντιζά (ΕΚΠΑ) για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν ως επικουρικό στέλεχος του εργαστηρίου Αστροφυσικής και για την άψογη συνεργασία που είχαμε.

Οφείλω να ευχαριστήσω τους συνεργάτες μου στο εξωτερικό Dr. Petr Zasche (Charles University, Prague, Czech Republic) για τις πολύτιμες υπολογιστικές γνώσεις που μου προσέφερε στο μέρος της ανάλυσης των O−C διαγραμμάτων, Dr. Esin Soydugan (Onsekiz Mart University, Çanakkale, Turkey) για την πολύτιμη συνεργασία της στο κεφάλαιο των συστημάτων με παλλόμενο μέλος, Dr. Edwin Budding (Victoria University, Wellington και University of Canterbury, Christchurch, New Zealand) για τη χρήσιμη και εποικοδομητική επικοινωνία μας στο πλαίσιο κοινών εργασιών και τον Δρ.

Δημήτριο Μισλή (University of Cambridge, UK) για την παροχή υπολογιστικού κώδικα ανάλυσης καμπυλών φωτός εξωπλανητών.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο του αστεροσκοπείου Κρυονερίου Κορινθίας Δρ. Αναστάσιο Δαπέργολα, το προσωπικό του αστεροσκοπείου και ιδιαίτερα τον κ. Γιώργο Δήμου, καθώς και το προσωπικό του αστεροσκοπείου Σκίνακα και ιδιαίτερα τους: Αναπληρωτή Καθηγητή του τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Κρήτης κ. Ιωσήφ Παπαδάκη, Δρ. Ευθύμιο Παλαιολόγο, κ. Αναστάσιο Κουγεντάκη, Dr. Pablo Reig και Dr. Evgeni Semkov για τις συμβουλές τους και την καθοδήγησή τους στη διεξαγωγή των παρατηρήσεων.

Επιθυμώ να ευχαριστήσω τους φίλους μου Λέκτορα Κοσμά Γαζέα (ΕΚΠΑ) και Δρ. Νικόλαο Νανούρη για τις ατελείωτες ώρες συζητήσεων επί θεμάτων σχετιζόμενα τόσο με την παρούσα διατριβή όσο και γενικά με την επιστήμη της Αστροφυσικής.

Τέλος, θα ήθελα επίσης να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στη φίλη μου Μαίρη Πίζγα, η οποία στάθηκε δίπλα μου όλο αυτό το διάστημα και αποτέλεσε πηγή έμπνευσης και δημιουργίας.

Η μεγάλη οικονομική, πολιτική και κοινωνική κρίση της Ελλάδας αποτέλεσε αρνητική παράμετρο τόσο για τις σπουδές μου όσο και για την εκπόνηση της παρούσας διατριβής και στάθηκε τροχοπέδη μερικές φορές στην ψυχολογία μου, στην απαιτούμενη διαύγεια και συγκέντρωση.

Η διδακτορική διατριβή υποστηρίχθηκε οικονομικά από τον Αύγουστο 2011 έως τον Απρίλιο 2012 από πρόγραμμα χρηματοδότησης (ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΣ) με κωδικό 70/4/11112 του Ειδικού Λογαριασμού Κονδυλίων έρευνας (ΕΛΚΕ) του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών (ΕΚΠΑ). Επίσης, ο συγγραφέας ενισχύθηκε οικονομικά για μετακινήσεις σε αστεροσκοπεία, συμμετοχή σε συνέδρια και σχολεία και επιστημονικές επισκέψεις στο εξωτερικό μέσω: α) ερευνητικών προγραμμάτων του ΕΛΚΕ (κωδικός 70/4/9709), διακρατικών προγραμμάτων της ΓΓΕΤ (κωδικοί 70/3/8374 και 70/3/8680), β) υποτροφίας από το Υπουργείο Παιδείας, Δια Βίου Μάθησης και Θρησκευμάτων και γ) της Διεθνούς Αστρονομικής Ένωσης (IAU).

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 4 – Ανάλυση δεδομένων και θεωρητικά μοντέλα

Κεφάλαιο 5 – Μελέτη αποχωρισμένων εκλειπτικών συστημάτων

Κεφάλαιο 6 – Μελέτη ημιαποχωρισμένων εκλειπτικών συστημάτων

Κεφάλαιο 7 – Μελέτη εκλειπτικών συστημάτων με παλλόμενο μέλος

Κεφάλαιο 8 – Συνεισφορά της έρευνας και μελλοντικές προοπτικές

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Οι μεταβλητοί αστέρες κατέχουν σήμερα μία πολύ σημαντική θέση στη 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. αναπάλσεις, εκρήξεις, δημιουργία δίσκων ύλης κ.α.), τα οποία μπορούν να παρατηρηθούν σε χρονικές κλίμακες πολύ μικρότερες από τον χρόνο της συνολικής ζωής τους, και παρέχουν ένα μεγάλο πλούτο γνώσεων για την αστρική εξέλιξη. Τα διπλά εκλειπτικά συστήματα ή δι' εκλείψεων μεταβλητοί αστέρες είναι εξαιρετικά χρήσιμα αστροφυσικά αντικείμενα τόσο για τον προσδιορισμό των απόλυτων παραμέτρων των αστέρων (π.χ. μάζες, ακτίνες, φωτεινότητες) όσο και για τον εντοπισμό φυσικών μηχανισμών που επηρεάζουν την τροχιακή περίοδό τους (π.χ. ανταλλαγή μάζας, ύπαρξη τρίτου μέλους κ.α.).

Η παρούσα διατριβή επικεντρώθηκε σε εκλειπτικά συστήματα τύπου Algol (EA), τύπου Algol με παλλόμενο συνοδό (oEA) και β Lyr (EB), τα οποία είναι είτε αποχωρισμένα ή ημιαποχωρισμένα, και είχε ως στόχο τον υπολογισμό των απόλυτων παραμέτρων και την εκτίμηση της εξελικτικής κατάστασης των αστέρων-μελών τους. Επιπλέον, μελετήθηκαν και ερμηνεύτηκαν οι μακροχρόνιοι φυσικοί μηχανισμοί που προκαλούν μεταβολές στις περιόδους των συστημάτων και εξετάστηκε η επίδραση τους στην εξελικτική κατάσταση των αστέρων-μελών τους.

Ο συνδυασμός ανεξάρτητων μεθόδων μελέτης (π.χ. φασματοσκοπική μελέτη, μελέτη των μεταβολών της τροχιακής περιόδου του συστήματος) και ανάλυσης δεδομένων (π.χ. φωτομετρία, φασματοσκοπία) των διπλών συστημάτων είναι χρήσιμος και αναγκαίος, ώστε να μπορούν να γίνουν πλήρως κατανοητοί οι φυσικοί μηχανισμοί που διαμορφώνουν τόσο τη φυσική όσο και την τροχιακή τους εξέλιξη. Η μελέτη της μακροχρόνιας συμπεριφοράς της περιόδου ενός διπλού εκλειπτικού συστήματος (ανάλυση O−C διαγράμματος) παρέχει πληροφορίες για τους φυσικούς μηχανισμούς που τη διαμορφώνουν, ενώ, οι καμπύλες φωτός και οι καμπύλες ακτινικών ταχυτήτων ενός διπλού συστήματος αποτελούν στιγμιότυπο της συμπεριφοράς του. Ωστόσο, οι μακροχρόνιοι μηχανισμοί διαμόρφωσης της τροχιακής περιόδου είναι δυνατόν να εντοπιστούν και μέσω των φωτομετρικών καμπυλών, ενώ επιπλέον μέλη του συστήματος (π.χ. τρίτο σώμα) μπορούν να εντοπιστούν φωτομετρικά ή ακόμη και φασματοσκοπικά.

Στη βιβλιογραφία υπάρχει τεράστιος αριθμός εργασιών που αναφέρονται τόσο στην ανάλυση των καμπυλών φωτός διπλών συστημάτων όσο και στη μελέτη της τροχιακής περιόδου τους. Πολύ λίγες, όμως, είναι αυτές οι οποίες χρησιμοποιούν τη σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών των μεθόδων (ανάλυση O−C διαγράμματος και φωτομετρική και φασματοσκοπική ανάλυση) ώστε να προσδιοριστούν πληρέστερα οι φυσικές παράμετροι και η εξελικτική κατάσταση των αστέρων-μελών του διπλού συστήματος, κάτι που έχει ως κύριο σκοπό της η παρούσα διατριβή.

Οι περιπτώσεις ημιαποχωρισμένων εκλειπτικών συστημάτων που περιέχουν και έναν παλλόμενο συνοδό φασματικού τύπου A-F (αστέρες τύπου oEA) είναι εξαιρετικά ενδιαφέρουσες, αφενός διότι υπάρχει μικρός αριθμός τέτοιου είδους συστημάτων που είναι γνωστά έως σήμερα και αφετέρου διότι έχει γίνει μία πρώτη προσπάθεια συσχέτισης της περιόδου ανάπαλσής τους με την τροχιακή περίοδο του συστήματος (Soydugan et al. 2006a) για τις περιπτώσεις όπου το παλλόμενο μέλος είναι αστέρας τύπου δ Scuti. Τα εκλειπτικά διπλά συστήματα με μέλη που εμφανίζουν αναπάλσεις είναι τέλεια εργαστήρια στα οποία η θεωρία των αναπάλσεων μπορεί να συνδυαστεί με τη θεωρία των διπλών συστημάτων για μια πληρέστερη μελέτη της εσωτερικής δομής και εξέλιξης των αστέρων. Η εκτίμηση της μάζας και της εξελικτικής κατάστασης των παλλόμενων μελών στενών διπλών συστημάτων θα μπορούσε να βελτιώσει τα σενάρια της εξέλιξης των διπλών συστημάτων, καθώς και να αποτελέσει ένα εργαλείο για τη μελέτη της δομής του εσωτερικού των παλλόμενων αστέρων που υπόκειται σε παλιρροιακά φαινόμενα.

Εάν το παλλόμενο μέλος του διπλού εκλειπτικού συστήματος εμφανίζει χαρακτηριστικά παλλόμενου αστέρα τύπου δ Scuti, τότε έχουμε μια πολύ ενδιαφέρουσα περίπτωση για την αστεροσεισμολογία. Συγκεκριμένα, μπορεί να προσδιοριστεί η φύση των τρόπων ταλάντωσης με διαφορετικές μεθόδους διάκρισης που εφαρμόζονται σε διαφορετικές φάσεις της τροχιακής περιόδου. Όμως, μόνο λίγα τέτοια συστήματα είναι γνωστά μέχρι σήμερα, με την πλειοψηφία τους να έχει ανακαλυφθεί πολύ πρόσφατα. Ακόμα πιο μικρός είναι ο αριθμός τέτοιων συστημάτων των οποίων η λεπτομερής ανάλυση είναι διαθέσιμη στη βιβλιογραφία. Έπειτα από μακράς διάρκειας παρατηρησιακή έρευνα σε υποψήφια τέτοια συστήματα έγιναν πολλές ανακαλύψεις και συνολικά παρατηρήθηκε περίπου το 23% των γνωστών έως σήμερα τέτοιων συστημάτων. Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μελέτη μας και συνδυάζοντάς τα με άλλα από τη βιβλιογραφία, παρήχθησαν συσχετίσεις μεταξύ της κυρίαρχης περιόδου ανάπαλσής τους και άλλων βασικών φυσικών μεγεθών και διαπιστώθηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά της εξέλιξής τους.

Κατά την πορεία της έρευνάς μας έγιναν μερικές δεκάδες ανακαλύψεων νέων μεταβλητών αστέρων, αλλά και παρατηρήθηκαν πολλά εκλειπτικά συστήματα τύπου W UMa. Καθώς, όμως, δεν εντάσσονται στο κύριο αντικείμενο της παρούσας διατριβής, απλώς αναφέρονται σε καταλόγους σε ειδικά παραρτήματα στο τέλος της.

Το παρατηρησιακό υλικό που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή, αλλά και γενικότερα το υλικό που αφορά και άλλες κατηγορίες μεταβλητών αστέρων είναι διαθέσιμο στην προσωπική ιστοσελίδα του συγγραφέα (http://alexiosliakos.weebly.com/), η οποία κατασκευάστηκε με σκοπό την άμεση διαθεσιμότητα των αποτελεσμάτων της έρευνας σε κάθε ενδιαφερόμενο.

Α. Λιάκος
Αθήνα, Ιούνιος 2012

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

1.1. Μεταβλητοί αστέρες

Ως μεταβλητός αστέρας χαρακτηρίζεται ο αστέρας του οποίου η λαμπρότητα[1] μεταβάλλεται «σημαντικά» συναρτήσει του χρόνου. Το διάγραμμα το οποίο περιγράφει αυτές τις μεταβολές ονομάζεται «καμπύλη φωτός». Τα αίτια της φωτομετρικής μεταβλητότητας στους αστέρες ποικίλλουν και θα αναφερθούν παρακάτω. Γενικά, υπάρχει ασάφεια ως προς τον όρο «σημαντική μεταβολή της λαμπρότητας», επομένως, δεν μπορούν να καθοριστούν ακριβή όρια. Θα μπορούσαμε ίσως να πούμε, ότι μεταβλητοί θεωρούνται οι αστέρες στους οποίους μπορούν να εντοπιστούν φωτομετρικές μεταβολές, καθώς, λόγω των αποστάσεων τους, αυτές μπορούν να θεωρηθούν αξιοσημείωτες, διαφορετικά δεν θα παρατηρούνταν. Π.χ. ο Ήλιος παρουσιάζει μεταβολές λαμπρότητας της τάξεως του 0.2%, αλλά μόνο λόγω της πολύ κοντινής του απόστασης από τη Γη μπορούν αυτές να μετρηθούν, άρα ο Ήλιος δεν θεωρείται μεταβλητός. Όμως, στη σημερινή εποχή εντοπίζονται ολοένα και μικρότερες φωτομετρικές μεταβολές στους αστέρες από παρατηρήσεις μεγάλης φωτομετρικής ακρίβειας (10^{-4} mag), με τη χρήση δορυφορικών κυρίως τηλεσκοπίων (π.χ. Kepler, Corot, Herschel, JWST). Επομένως, τα επόμενα χρόνια είναι πολύ πιθανό είτε να τεθούν διευκρινιστικά όρια για τις μεταβολές είτε οι αστέρες να θεωρούνται στη πλειοψηφία τους μεταβλητοί.

1.1.1. Ιστορικά στοιχεία

Χαρακτηριστικά ιστορικά παραδείγματα μεταβλητών αστέρων είναι ο υπερκαινοφανής που σήμερα είναι γνωστός ως Crab Pulsar (M1), ο οποίος παρατηρήθηκε από Κινέζους αστρονόμους το 1054, ο υπερκαινοφανής που ανακάλυψε ο Tycho Brahe στον αστερισμό της Κασσιόπης το 1572 και του Kepler στον αστερισμό του Οφιούχου το 1604. Σύμφωνα με άλλες ιστορικές μαρτυρίες, ένας πολύ λαμπρός αστέρας, ο οποίος εμφανίστηκε στον αστερισμό του Σκορπιού το 134 π.Χ., παρακίνησε τον Ίππαρχο τον Ρόδιο να αρχίσει να καταγράφει τις ουράνιες θέσεις των αστέρων με αποτέλεσμα τη σύνταξη ενός αστρονομικού καταλόγου ("HIPPARCOS" catalogue), ο οποίος χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα.

Το 1595 ο ιερέας-αστρονόμος David Fabricious παρατήρησε ότι το φαινόμενο μέγεθος του αστέρα ο Ceti αυξομειωνόταν μέσα σε διάστημα μερικών μηνών και τελικά το 1638 προσδιορίστηκε η περίπου ενδεκάμηνη περίοδός του από τον Johannes Holwarda. Προς τιμή αυτού του θαυματουργού, για την τότε εποχή, γεγονότος, ο αστέρας ονομάστηκε Mira το 1638 από τον Helvetius, το οποίο στα ελληνικά σημαίνει θαύμα. Το 1667 ο Montanari ανακάλυψε την περιοδικότητα του αστέρα β Persei, του γνωστού Algol, η περίοδος του οποίου υπολογίστηκε από τον Goodricke το 1782 και αποτελεί το πρώτο σύστημα εκλειπτικού μεταβλητού στην ιστορία της Αστρονομίας.

[1]Ο όρος «λαμπρότητα» αντιπροσωπεύει τη φαινόμενη λαμπρότητα του αστέρα, η οποία εξαρτάται από τη φωτεινότητά (luminosity) του και την απόστασή του από τη Γη.

Από τα τέλη του 18ου αι. και έπειτα, οπότε άρχισαν να χρησιμοποιούνται τεχνητά μέσα καταγραφής (π.χ. φωτογραφικό φιλμ, φωτοηλεκτρικό φωτόμετρο, CCD) για επίγειες αστρονομικές παρατηρήσεις, αλλά και χάρη στις σύγχρονες διαστημικές αποστολές, οι ανακαλύψεις μεταβλητών αστέρων άρχισαν να αυξάνονται ραγδαία και σήμερα είναι γνωστοί περισσότεροι από 200,000.

1.1.2. Ονοματολογία και κατάλογοι

Στα μέσα του 19ου αι. ο Argelander ασχολήθηκε με την ονοματολογία των μεταβλητών αστέρων και εισήγαγε τον κώδικα των κεφαλαίων γραμμάτων για κάθε αστερισμό. Αρχικά, λόγω του μικρού πλήθους των μεταβλητών αστέρων, τα γράμματα που τους αντιπροσώπευαν ήταν τα κεφαλαία από το "R" έως το "Z" της λατινικής αλφαβήτου, ακολουθούμενα από τη συντομογραφία του αστερισμού στον οποίο ανήκει ο μεταβλητός αστέρας (π.χ. X Tau). Εν συνεχεία, όμως, οι νέες ανακαλύψεις ανέβασαν τον αριθμό των μεταβλητών σε μερικές χιλιάδες, οπότε τα χρησιμοποιούμενα γράμματα δεν επαρκούσαν. Επομένως, άρχισαν να χρησιμοποιούνται όλα τα κεφαλαία γράμματα της λατινικής αλφαβήτου, ενώ όταν τελείωναν και αυτά, χρησιμοποιούνταν τα διπλά κεφαλαία γράμματα (ξεκινώντας από το συνδυασμό "RR"), ακολουθούμενα πάντα από τη συντομογραφία του αστερισμού στον οποίο ανήκει ο μεταβλητός αστέρας (π.χ. ZZ Ori). Οι παραπάνω συνδυασμοί των διπλών κεφαλαίων γραμμάτων για κάθε αστερισμό (RR, RS... AA, AB... QY, QZ) είναι 334. Στα τέλη του 19ου αι. οι ανακαλύψεις νέων 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. V1401 Cyg). Με αυτόν τον τρόπο, συντάχθηκε ένας κατάλογος, ο οποίος μπορεί να περιλάβει άπειρο πλήθος μεταβλητών αστέρων. Εδώ πρέπει να επισημανθεί, ότι οι λαμπρότεροι αστέρες των αστερισμών (για τους οποίους χρησιμοποιούνται γράμματα της ελληνικής αλφάβητου) δεν μετονομάζονται εάν διαπιστωθεί ότι είναι μεταβλητοί. (π.χ. οι αστέρες δ Scuti, β Lyr, β Cep).

Ένας μεταβλητός αστέρας παίρνει 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 τακτικά δημοσιεύει ανανεωμένους καταλόγους με τους νέους μεταβλητούς.

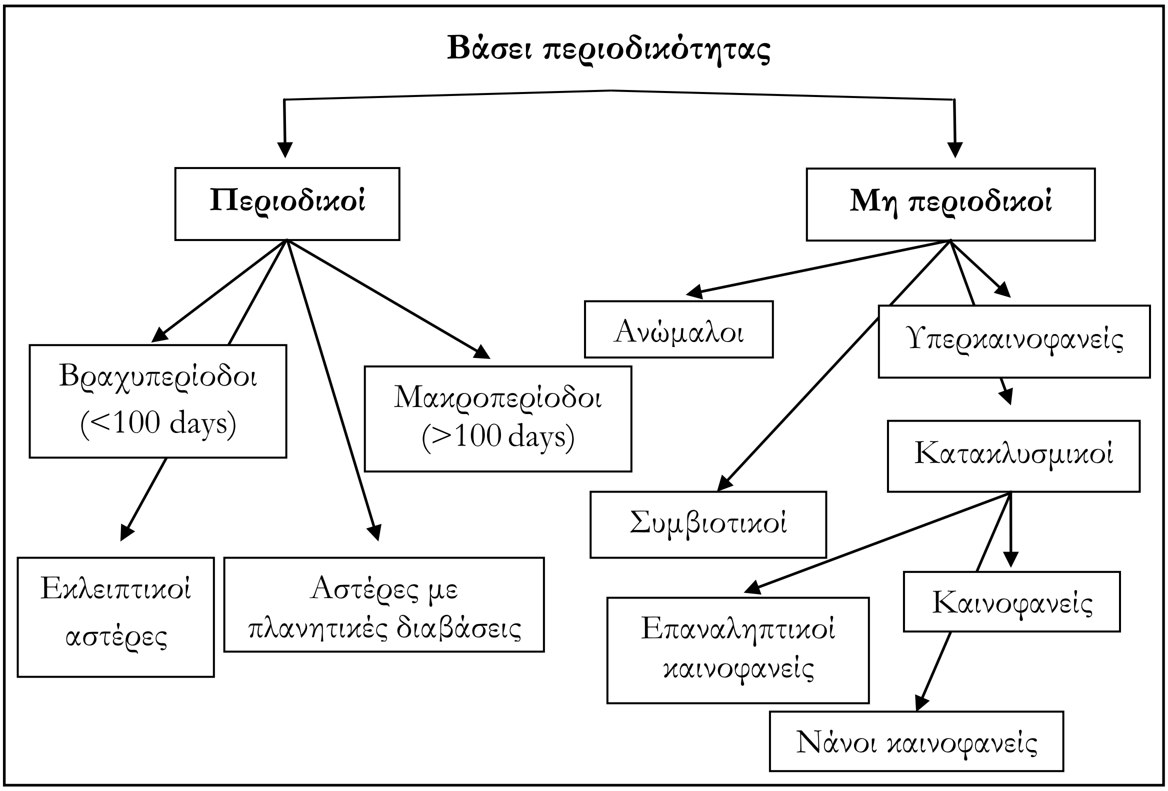
Ο πιο εμπεριστατωμένος κατάλογος για τους μεταβλητούς αστέρες είναι ο "General Catalog of Variable Stars" (Samus et al. 2011), ο οποίος περιέχει πάνω από 40,000 μεταβλητούς με πλήρη στοιχεία, ενώ οι "New Catalog of suspected Variable Stars" (Kukarkin et al. 1982) και "New Catalog of suspected Variable Stars – supplement version 1.0" (Kazarovets et al. 1998) περιέχουν υποψήφιους μεταβλητούς αστέρες, η μεταβλητότητα των οποίων δεν έχει ακόμη προσδιοριστεί ακριβώς.

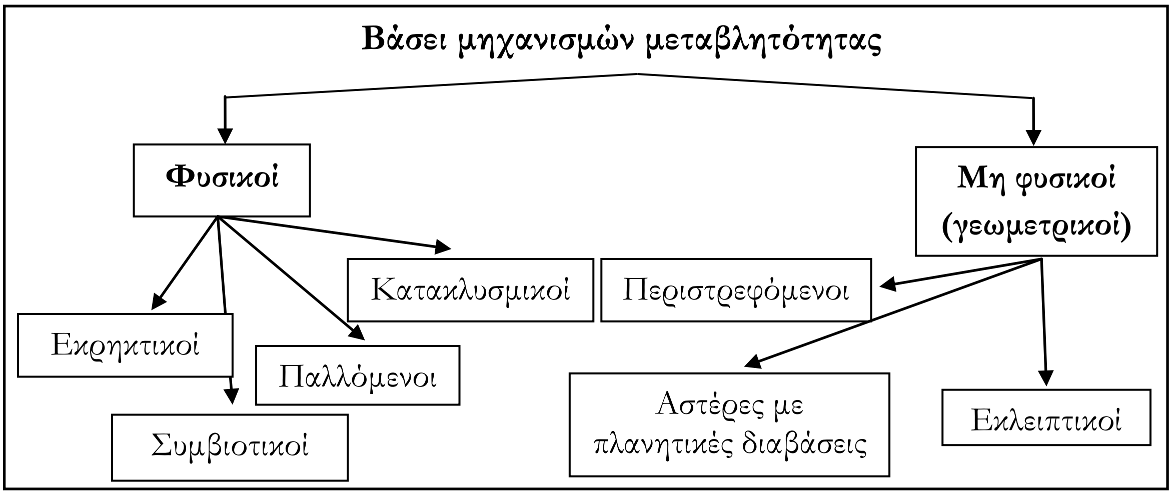
Πολύτιμη είναι η συμβολή των ηλεκτρονικών καταχωρήσεων νέων μεταβλητών αστέρων είτε σε ηλεκτρονικά περιοδικά (π.χ. Information Bulletin on Variable Stars[1], Peremennye Zvezdy[2]) είτε σε ηλεκτρονικούς καταλόγους (π.χ. AAVSO[3]), όπου αριθμούνται πάνω από 200,000 μεταβλητοί αστέρες.

[1]http://www.konkoly.hu/IBVS/IBVS.html
[2]http://www.astronet.ru/db/varstars
[3]http://www.aavso.org/

1.1.3. Ταξινομήσεις και τύποι

Η ταξινόμηση των μεταβλητών αστέρων γίνεται βάσει των παρατηρησιακών δεδομένων. Βασικά στοιχεία ενός μεταβλητού αστέρα είναι η περίοδός του, εάν υπάρχει, οι αιτίες που οδηγούν στη μεταβολή της λαμπρότητάς του και η μορφή της καμπύλης φωτός του. Οι ταξινομήσεις των μεταβλητών αστέρων γίνονται είτε με βάση την *περιοδικότητά* τους είτε με βάση τα *αίτια* της μεταβλητότητάς τους. *Φυσικοί* μεταβλητοί ονομάζονται οι αστέρες των οποίων η λαμπρότητα μεταβάλλεται για φυσικούς λόγους (π.χ. μεταβολή της ακτίνας, επιφανειακές εκρήξεις, εκρηκτική διάλυση του αστέρα), ενώ *γεωμετρικοί* μεταβλητοί είναι εκείνοι των οποίων οι φωτομετρικές μεταβολές οφείλονται σε γεωμετρικά φαινόμενα (π.χ. εκλείψεις μεταξύ δύο αστέρων σε διπλό σύστημα). Στα παρακάτω σχεδιαγράμματα παρατίθενται οι δύο βασικότερες ταξινομήσεις μεταβλητών αστέρων.





Όταν εξακριβωθεί ο τύπος της μεταβλητότητας του αστέρα, τότε κατατάσσεται σε μια γενική κατηγορία και ακολούθως σε κάποια υποκατηγορία. Κάθε αστέρας ο οποίος παρουσιάζει ειδικές ιδιότητες μεταβολής, ενώ γενικά ανήκει σε μια κατηγορία, ονομάζεται *πρότυπος αστέρας* της κατηγορίας. Παρακάτω, παρουσιάζονται συνοπτικά όλες οι κατηγορίες μεταβλητών αστέρων γνωστές έως σήμερα:

ΦΥΣΙΚΟΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΙ ΑΣΤΕΡΕΣ

Α. Παλλόμενοι μεταβλητοί

- Κηφείδες: τύπου I – Κλασσικοί (δ Cephei) και τύπου II (W Virginis)
- Βραχυπερίοδοι: β Cep, δ Scuti, RR Lyrae, SX Phoenicis
- Αστέρες τύπου PV Telescopii
- Μακροπερίοδοι: Mira (ο Ceti)
- Ημι-ομαλοί και ανώμαλοι αστέρες
- Αστέρες τύπου RV Tauri
- Αστέρες τύπου α Cygni
- Παλλόμενοι λευκοί νάνοι

Β. Εκρηκτικοί μεταβλητοί

- Πρωτοαστέρες: τύπου T Tauri, τύπου FU Orionis, τύπου Ae/Be
- Αστέρες εκλάμψεων (τύπου UV Ceti)
- Μεταβλητοί W-R (Wolf – Rayet)
- Αστέρες τύπου S Doradus
- Αστέρες τύπου γ Cassiopeiae
- Αστέρες τύπου R Coronae Borealis

Γ. Κατακλυσμικοί μεταβλητοί

- Υπερκαινοφανείς
- Καινοφανείς
- Νάνοι Καινοφανείς
- Επαναληπτικοί Καινοφανείς

Δ. Συμβιοτικοί αστέρες

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΙ ΑΣΤΕΡΕΣ

Α. Εκλειπτικά συστήματα

- Τύπου β Persei (Algol)
- Τύπου β Lyrae
- Τύπου W Ursa Majoris

Β. Ταχέως περιστρεφόμενοι μεταβλητοί και αστέρες με μεγάλες κηλίδες

- Ελλειψοειδείς
- Τύπου FK Comae Berenices
- Τύπου BY Draconis
- Τύπου α^2 Canum Venaticorum

- Τύπου SX Arietis
- PULSARS (που εκπέμπουν και στα οπτικά μήκη κύματος)

Γ. Αστέρες με πλανητικές διαβάσεις

Είναι προφανές, ότι ένας μεταβλητός αστέρας μπορεί να ανήκει σε περισσότερες από μια κατηγορίες, ή ακόμα και να περιέχει χαρακτηριστικά από δύο η περισσότερες κατηγορίες. Δύο τέτοια παραδείγματα αποτελούν τα παρακάτω:

- Τύπου RS Canum Venaticotrum: Διπλά εκλειπτικά συστήματα αστέρων με έντονη χρωμοσφαιρική δραστηριότητα.
- Τύπου oEA (oscillating eclipsing binary of Algol type): Διπλά συστήματα αστέρων όπου ο ένας συνοδός είναι παλλόμενος αστέρας και υπάρχει μεταφορά μάζας προς αυτόν.

Στις παρακάτω παραγράφους (§1.2 και §1.3) παρουσιάζονται εκτενώς τόσο τα διπλά εκλειπτικά συστήματα όσο και η υποκατηγορία των παλλόμενων αστέρων τύπου δ Sct που είναι τα κύρια αντικείμενα της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

1.2. Διπλά συστήματα αστέρων

Γενικά, τα διπλά συστήματα αστέρων αποτελούνται από δύο αστέρες που περιφέρονται γύρω από το κοινό κέντρο μάζας. Η σημασία τους στη σύγχρονη Αστροφυσική είναι τεράστια, καθώς, λόγω των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των αστέρων μπορούν να υπολογιστούν οι απόλυτες παράμετροί τους (μάζες, ακτίνες κ.τ.λ.), όπως θα δούμε στην επόμενη παράγραφο. Στατιστικές μελέτες (Abt 1983, Latham et al. 1992, Pinfield et al. 2003) έχουν δείξει ότι το 50-60% των αστέρων στον Γαλαξία είναι μέλη διπλών ή πολλαπλών συστημάτων, κάτι που τα καθιστά ιδιαίτερα ενδιαφέροντα. Υπάρχουν διάφοροι τύποι τέτοιων συστημάτων (βλ. §1.2.3) που κατηγοριοποιούνται είτε βάσει του τρόπου αλληλεπίδρασής τους είτε βάσει του τρόπου εντοπισμού τους.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον, λόγω της πληροφορίας που μπορεί να προκύψει, έχουν τα *εκλειπτικά* συστήματα. Πρόκειται και πάλι για διπλά συστήματα αστέρων, όμως το επίπεδο της τροχιάς τους έχει κατάλληλη κλίση ως προς την οπτική ευθεία παρατήρησης, ώστε οι αστέρες να υφίστανται διαδοχικές εκλείψεις και κατ' επέκταση να αυξομειώνεται η συνολική λαμπρότητά τους. *Πρωτεύων αστέρας* του διπλού εκλειπτικού συστήματος ορίζεται εκείνος με τη μεγαλύτερη μάζα, ενώ αυτός με τη μικρότερη ονομάζεται *δευτερεύων αστέρας* ή *συνοδός αστέρας*. Η έκλειψη του θερμότερου αστέρα καλείται *πρωτεύον φωτομετρικό ελάχιστο*, ενώ η αντίθετη περίπτωση (έκλειψη του ψυχρότερου) *δευτερεύον φωτομετρικό ελάχιστο*. Για όλα τα εκλειπτικά συστήματα αστέρων, τα οποία αναλύθηκαν στην παρούσα διατριβή (κεφάλαια 5-7), ισχύει ότι ο αστέρας μεγαλύτερης μάζας είναι και ο θερμότερος του συστήματος, κάτι όμως που δεν ισχύει και γενικά. Οι δείκτες 1 και 2 στις παραμέτρους εφεξής θα αναφέρονται στον πρωτεύοντα και τον δευτερεύοντα αστέρα , αντίστοιχα.

1.2.1. Δυναμική των διπλών συστημάτων και απόλυτες παράμετροι των μελών

Ως *πραγματική τροχιά* ορίζεται εκείνη την οποία διαγράφει ο κάθε αστέρας του συστήματος στον τρισδιάστατο χώρο, ως *φαινόμενη τροχιά* την προβολή της πραγματικής στον δισδιάστατο χώρο σε επίπεδο κάθετο ως προς την οπτική ευθεία παρατήρησης, ως *απόλυτη τροχιά* εκείνη την οποία διαγράφει ο κάθε αστέρας γύρω από το κοινό κέντρο μάζας του συστήματος και ως *σχετική τροχιά* η τροχιά του δευτερεύοντος αστέρα ως προς τον πρωτεύοντα.

Η κίνηση των μελών ενός διπλού συστήματος αστέρων περιγράφεται από το γνωστό πρόβλημα της μηχανικής (δύο σωμάτων), που 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 μια εκ των εστιών βρίσκεται το κέντρο μάζας του συστήματος. Η σχετική τροχιά του ενός μέλους ως προς το σύστημα αναφοράς στο οποίο το άλλο μέλος θεωρείται ακίνητο, είναι έλλειψη συνεπίπεδη και όμοια με την προηγούμενη και δίνεται από τη σχέση:

$$r(\omega) = \frac{\alpha\,(1 - e^2)}{1 + e\cos\omega} \tag{1.1}$$

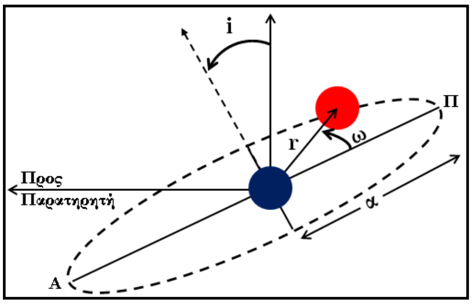
   όπου *ω* το όρισμα του περιάστρου (για ω=0° → περίαστρο και για ω=180° → άπαστρο), *α* ο μεγάλος ημιάξονας της σχετικής τροχιάς και *e* η εκκεντρότητα.
2. Τα δύο μέλη του συστήματος σαρώνουν σε ίσους χρόνους ίσα εμβαδά.
3. Ο μεγάλος ημιάξονας της σχετικής τροχιάς *α*, συνδέεται με την περίοδο περιφοράς *P* με τη σχέση:

$$G(M_1 + M_2)P^2 = 4\pi^2\alpha^3 \tag{1.2}$$

όπου M_1, M_2 οι μάζες των αστέρων και G (=6.67300 × 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}) η σταθερά της παγκόσμιας έλξης.

Εάν οι μάζες δίνονται σε ηλιακές μονάδες ($M_\odot$), η περίοδος σε έτη και ο ημιάξονας της τροχιάς σε AU, τότε η σχέση (1.2) μπορεί να πάρει τη μορφή:

$$(M_1 + M_2)P^2 = \alpha^3 \tag{1.3}$$



Εικόνα 1.1. Απεικόνιση της σχετικής τροχιάς ενός διπλού εκλειπτικού συστήματος (οι αστέρες απεικονίζονται σαν έγχρωμες σφαίρες), όπου φαίνονται η κλίση της *i*, η γραμμή των αψίδων (ΑΠ), ο ημιάξονας *a*, η απόσταση *r* του δευτερεύοντα αστέρα από τον πρωτεύοντα και το όρισμα του περιάστρου.

Ο ημιάξονας *a* της σχετικής τροχιάς θα δίνεται από τη σχέση:

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 \tag{1.4}$$

όπου a_1 και a_2 οι ημιάξονες των απόλυτων τροχιών των αστέρων-μελών.

Από τον ορισμό του κέντρου μάζας προκύπτει:

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \tag{1.5}$$

Το μέτρο της μεγίστης πραγματικής ταχύτητας *u* των αστέρων γύρω από το κοινό κέντρο μάζας (προς απλούστευση για απλή κυκλική κίνηση) δίνεται από τη σχέση:

$$u_{1,2} = \frac{2\pi\alpha_{1,2}}{P} \tag{1.6}$$

Λόγω προβολής στο επίπεδο του ουρανού η μετρούμενη μεγίστη ακτινική ταχύτητα K έχει εξάρτηση από την κλίση της τροχιάς του συστήματος i[1], η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$K_{1,2} = u_{1,2} \sin i \tag{1.7}$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (1.4) και (1.6) προκύπτει:

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 = \frac{P}{2\pi}(u_1 + u_2) \tag{1.8}$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (1.2), (1.7) και (1.8) προκύπτει το άθροισμα των μαζών του συστήματος:

$$M_1 + M_2 = \frac{P}{2\pi G}\frac{(K_1 + K_2)^3}{\sin^3 i} \tag{1.9}$$

και από τις σχέσεις (1.5-1.7) ορίζεται ο λόγος μαζών του συστήματος q:

$$q = \frac{M_2}{M_1} = \frac{K_1}{K_2} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \tag{1.10}$$

Παρατηρώντας φασματοσκοπικά τέτοια συστήματα, και βάσει του νόμου του Doppler, δύνανται να υπολογιστούν οι μέγιστες ακτινικές ταχύτητες των αστέρων, K_1 και K_2, ενός διπλού συστήματος (βλ. §3.2.3) και κατ' επέκταση ο φασματοσκοπικός λόγος μαζών. Από φασματοσκοπικές ή/και από φωτομετρικές παρατηρήσεις προσδιορίζεται η περίοδος του συστήματος και από την επίλυση των καμπυλών φωτός (βλ. §4.1) υπολογίζεται η κλίση του. Επομένως, συνδυάζοντας τις σχέσεις (1.9-1.10) μπορούν να υπολογιστούν οι μάζες των μελών του συστήματος. Οι παρακάτω εξισώσεις (1.11-1.26) (Hilditch 2001) δίνουν τα απόλυτα στοιχεία των αστέρων ενός διπλού συστήματος και λαμβάνουν υπόψη και την πιθανή εκκεντρότητα της τροχιάς του. Οι μονάδες των μεγεθών δίνονται στο τέλος της κάθε εξίσωσης σε αγκύλες και είναι τέτοιες, ώστε να έχουν συνυπολογιστεί διάφορες σταθερές (π.χ. G). Οι K_1, K_2 δίνονται σε km/sec, η P σε days, η θερμοκρασία T σε βαθμούς Kelvin, ενώ οι μάζες, M_1, M_2 και οι ακτίνες R_1, R_2 των αστέρων σε ηλιακές μονάδες. Στην πραγματικότητα όμως, οι φασματοσκοπικές παρατηρήσεις δεν παράγουν πάντα τις ακτινικές ταχύτητες και των δύο μελών. Ειδικότερα, σε περιπτώσεις διπλών μεγάλης διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ των αστέρων είναι πιθανό να μπορεί να υπολογιστεί μόνο η ακτινική ταχύτητα του ενός μέλους. Τέλος, σε περιπτώσεις όπου δεν διατίθενται καθόλου φασματοσκοπικά δεδομένα, παρά μόνο φωτομετρικά, μπορεί να υπολογιστεί μόνο ο φωτομετρικός λόγος μαζών από την επίλυση των καμπυλών φωτός (βλ. §4.1), να υπολογιστούν οι K_1, K_2 και κατ' επέκταση όλες οι υπόλοιπες παράμετροι. Για να μη γίνεται σύγχυση, παρακάτω παρατίθενται οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται σε κάθε περίπτωση.

Α. Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων των αστέρων του συστήματος από φωτομετρικά και φασματοσκοπικά δεδομένα

Μάζες

$$M_{1,2} = (1.0361 \times 10^{-7})(1 - e^2)^{\frac{3}{2}}(K_1 + K_2)^2 K_{2,1} P (\sin i)^{-3} \; [M_\odot] \tag{1.11}$$

[1]Ως κλίση του τροχιακού επιπέδου ενός εκλειπτικού συστήματος ορίζεται η γωνία που σχηματίζουν η κάθετη ευθεία στο τροχιακό επίπεδο και η κάθετη ευθεία στην οπτική ευθεία (εικ. 1.1).

Ημιάξονες των τροχιών

$$\alpha_{1,2} = (1.9758 \times 10^{-2})(1 - e^2)^{1/2}\, K_{1,2}\, P\, (\sin i)^{-1}\, [R_\odot] \tag{1.12}$$

Ακτίνες

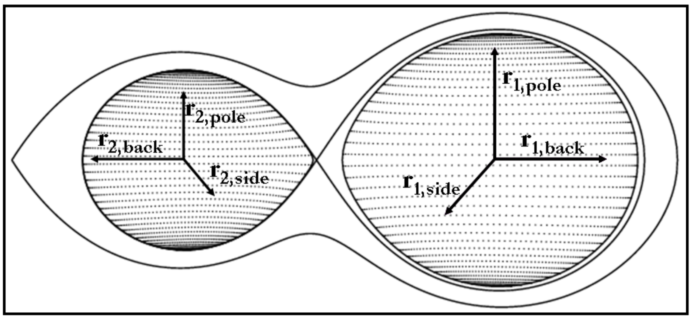
Είναι προφανές, ότι στα στενά διπλά συστήματα υπάρχουν ισχυρές βαρυτικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των αστέρων οι οποίες αλλοιώνουν το σφαιρικό σχήμα τους. Επομένως, δεν γίνεται να οριστεί μια μοναδική ακτίνα για αυτούς τους αστέρες, αφού κάθε στοιχειώδες κομμάτι της επιφανείας τους απέχει διαφορετική απόσταση από το κέντρο μάζας τους. Ως ακτίνα του αστέρα θεωρείται η τιμή που προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$R_{1,2} = \alpha\, r_{1,2}\ [R_\odot] \tag{1.13}$$

όπου

$$r_{1,2} = (r_{1,2,\mathrm{pole}}\, r_{1,2,\mathrm{side}}\, r_{1,2,\mathrm{back}})^{1/3} \tag{1.14}$$

οι σχετικές ακτίνες *r* του κάθε αστέρα και υπολογίζονται από την επίλυση των καμπυλών φωτός (βλ. §4.1).



Εικόνα 1.2. Οι σχετικές ακτίνες *r* των αστέρων ενός διπλού συστήματος.

Φωτεινότητες

$$L_{1,2} = R_{1,2}^2 \left(\frac{T_{1,2}}{T_\odot}\right)^4\ [L_\odot] \tag{1.15}$$

όπου $T_\odot$=5780 K.

Βολομετρικά μεγέθη

$$M_{\mathrm{bol},1,2} = 42.369 - 5\log R_{1,2} - 10\ \log T_{1,2}\ [\mathrm{mag}] \tag{1.16}$$

Στροφορμές

Η τροχιακή στροφορμή του συστήματος δίνεται από τη σχέση:

$$J_{\mathrm{orb}} = \frac{q}{(1+q)^2}\ (M_1 + M_2)^{5/3}\ P^{1/3} \tag{1.17}$$

Η στροφορμή του κάθε αστέρα του συστήματος δίνεται από τη σχέση:

$$J_{1,2} = 0.1\ M_{1,2}\ r_{1,2}^2 \tag{1.18}$$

Η ολική στροφορμή του συστήματος δίνεται από τη σχέση:

$$J_{\mathrm{total}} = J_1 + J_2 + J_{\mathrm{orb}} \tag{1.19}$$

Επιφανειακές βαρύτητες

$$\log g_{1,2} = 4.438 + \log M_{1,2} - 2\log R_{1,2}\ [\mathrm{cm/sec^2}] \tag{1.20}$$

Β. Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων των αστέρων του συστήματος μόνο από φωτομετρικά δεδομένα

Για να υπολογιστούν τα απόλυτα μεγέθη χωρίς τη χρήση των ακτινικών ταχυτήτων απαιτείται η γνώση της μάζας και της θερμοκρασίας ενός εκ των δύο συνοδών (συνήθως η M_1 και T_1). Βάσει αυτών των δεδομένων και της επίλυσης των καμπυλών φωτός του συστήματος, από την οποία προκύπτει ο φωτομετρικός λόγος μαζών q, υπολογίζονται οι ακτινικές ταχύτητες K_1 και K_2 και κατ' επέκταση και τα υπόλοιπα απόλυτα στοιχεία (a, R).

Ακτινικές ταχύτητες

Επιλύοντας τη σχέση (1.10) ως προς K_1 προκύπτει:

$$\mathrm{K_1 = q\,K_2} \tag{1.21}$$

Ομοίως, επιλύοντας τη σχέση (1.10) ως προς M_2, με γνωστή τη M_1 προκύπτει:

$$\mathrm{M_2 = q\,M_1} \tag{1.22}$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (1.11), (1.21) και (1.22) προκύπτουν:

$$\mathrm{K_2} = \frac{218\,\mathrm{sin}i}{\sqrt{1-\mathrm{e}^2}}\sqrt[3]{\frac{\mathrm{M_1}}{\mathrm{P\,(1+q)^2}}} \tag{1.23}$$

και

$$\mathrm{K_1} = \frac{218\,\mathrm{sin}i}{\sqrt{1-\mathrm{e}^2}}\,\mathrm{q}\sqrt[3]{\frac{\mathrm{M_1}}{\mathrm{P\,(1+q)^2}}} \tag{1.24}$$

Ημιάξονες των τροχιών

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (1.12), (1.23) και (1.24) προκύπτουν:

$$\alpha_1 = 4.3072\,\mathrm{q}\sqrt[3]{\frac{\mathrm{P^2\,M_1}}{\mathrm{(1+q)^2}}} \tag{1.25}$$

και

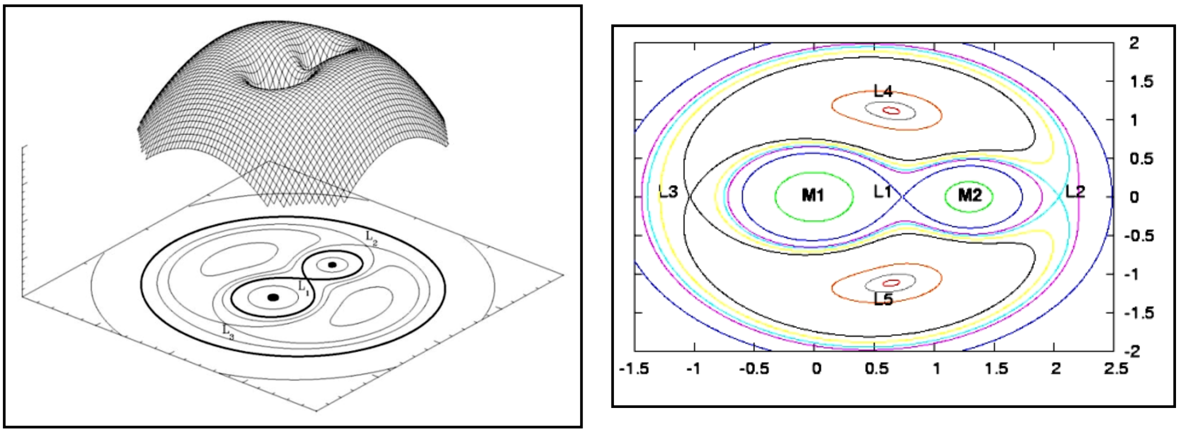
$$\alpha_2 = 4.3072\sqrt[3]{\frac{\mathrm{P^2\,M_1}}{\mathrm{(1+q)^2}}} \tag{1.26}$$

Όλες οι υπόλοιπες ποσότητες υπολογίζονται από τις σχέσεις (1.13-1.20).

1.2.2. Γεωμετρία Roche

Το μοντέλο Roche περιγράφει τα στενά διπλά συστήματα αστέρων στα οποία οι αστέρες δεν εξελίσσονται ανεξάρτητα ως μεμονωμένοι, αλλά, αντιθέτως, 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 θερμότερο αστέρα προς στον ψυχρότερο.

Το μοντέλο περιγράφεται ως εξής: Ορίζεται ένα σύστημα δύο αστέρων με κυκλικές τροχιές και ως σύστημα αναφοράς ορίζεται το κέντρο μάζας τους. Με την παραπάνω παραδοχή ορίζονται 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 τη φυγόκεντρο δύναμη. Με αυτόν τον τρόπο, οι ισοδυναμικές επιφάνειες τέμνουν το ισημερινό επίπεδο σε κύκλους που τις περικλείουν. Φυσικά, σε ενδιάμεσες θέσεις το στοιχείο μάζας επηρεάζεται τόσο από την ανηγμένη βαρύτητα όσο και από τη φυγόκεντρο δύναμη.



Εικόνα 1.3. Αριστερά: Δισδιάστατη (κάτω επίπεδο) και τρισδιάστατη (άνω επίπεδο) απεικόνιση του μοντέλου Roche. Στο κάτω επίπεδο διακρίνονται οι ισοδυναμικές επιφάνειες, οι αστέρες στο κέντρο των λοβών και τα σημεία ισορροπίας L_1, L_2, L_3. Στο άνω επίπεδο διακρίνονται τα πηγάδια δυναμικού που προκαλούνται από τις μάζες των αστέρων. Δεξιά: Η κάτοψη του μοντέλου Roche όπου διακρίνονται όλες οι ισοδυναμικές επιφάνειες και τα σημεία ισορροπίας.

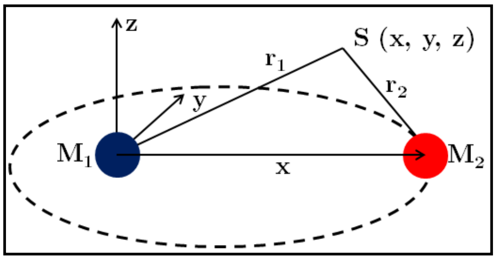
Τα δύο μισά της εσωτερικής επιφάνειας που αντιστοιχούν στους δύο αστέρες ονομάζονται *λοβοί Roche* και ενώνονται σε ένα και μοναδικό σημείο, στο *Λαγκρατζιανό* σημείο ισορροπίας L_1. Τα σημεία ισορροπίας L_2, L_3 βρίσκονται πάνω στην ευθεία που ενώνει τα κέντρα των αστέρων και εκτός των λοβών Roche, ενώ τα σημεία L_4, L_5 βρίσκονται πάνω και κάτω αντίστοιχα από την προαναφερθείσα ευθεία και η απόστασή τους είναι τέτοια ώστε να σχηματίζονται ισόπλευρα τρίγωνα με τις άλλες δύο κορυφές να αντιστοιχούν στα κέντρα των αστέρων. 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 μπορεί να θεωρηθεί ότι όλη 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.

Θεωρείται περιστρεφόμενο σύστημα αξόνων που περιστρέφεται μαζί με το κέντρο μάζας και ως αρχή των αξόνων τίθεται το κέντρο μάζας του αστέρα με τη μεγαλύτερη μάζα ($M_1 > M_2$). Ο άξονας x συνδέει τα κέντρα των δύο αστέρων και ο άξονας z είναι κάθετος στο επίπεδο της τροχιάς.

Το δυναμικό που δημιουργούν στον χώρο οι βαρυτικές δυνάμεις των αστέρων μαζί με την περιστροφή του συστήματος δίνεται από τη σχέση:

$$\Omega = -G\left(\frac{M_1}{r_1}+\frac{M_2}{r_2}\right)-\frac{\omega^2}{2}\left[\left(x-\frac{M_2}{M_1+M_2}\right)^2+y^2\right] \tag{1.27}$$



Εικόνα 1.4. Απεικόνιση σε Καρτεσιανές συντεταγμένες ενός διπλού συστήματος αστέρων (έγχρωμες σφαίρες) και η απόστασή τους από ένα σημείο μάζας *S*.

όπου $r_1 = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$ και $r_2 = [(\alpha - x)^2 + y^2 + z^2]^{1/2}$, οι αποστάσεις ενός στοιχείου μάζας από κάθε μέλος του συστήματος, και ω η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής που δίνεται από τη σχέση:

$$\omega = \frac{2\pi}{P} = [G(M_1+M_2)]^{1/2}\,\alpha^{-3/2} \tag{1.28}$$

Τίθεται χάριν ευκολίας:

$$\frac{\omega^2}{2} = \frac{GM}{2\alpha^3} \tag{1.29}$$

και όλες οι αποστάσεις x, y, z σαν κλάσματα του ημιάξονα *α*: $x \to \frac{x}{\alpha}, y \to \frac{y}{\alpha}, z \to \frac{z}{\alpha}$

Συνδυάζοντας τα παραπάνω προκύπτει:

$$\Omega_N(x,y,z) = \frac{2}{(1+q)}\frac{1}{r_1}+\frac{2q}{(1+q)}\frac{1}{r_2}+\left(x-\frac{q}{1+q}\right)^2+y^2 \tag{1.30}$$

Η σχέση (1.30) περιγράφει τις δυναμικές επιφάνειες ανεξάρτητα από τη μάζα και το μέγεθος του συστήματος, εξαρτάται μόνο από τον λόγο μαζών *q* και είναι μια αδιάστατη ποσότητα.

Το δυναμικό της σχέσης (1.27) με το αντίστοιχο αδιάστατο της σχέσης (1.30) συνδέονται ως εξής:

$$\Omega(x,y,z) = -\frac{\omega^2}{2}\,\Omega_N\left(\frac{x}{\alpha},\frac{y}{\alpha},\frac{z}{\alpha}\right) \tag{1.31}$$

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

$$r_L = \frac{0.49\,q^{2/3}}{0.69\,q^{2/3}+\ln\left(1+q^{1/3}\right)} \tag{1.32}$$

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

Για να υπολογιστούν οι ενεργές ακτίνες του κάθε αστέρα, πρέπει να διαφοροποιείται κάθε φορά το *q*, έτσι ώστε να προκύπτει η αντίστοιχη ακτίνα. Π.χ. για τον δευτερεύοντα αστέρα, θέτουμε $q=M_1/M_2$, έτσι ώστε $q\leq 1$, οπότε βρίσκουμε την r_{L2}, ενώ για τον πρωτεύοντα αστέρα θέτουμε $q=M_1/M_2$ ώστε $q\geq 1$, οπότε προκύπτει η r_{L1}.

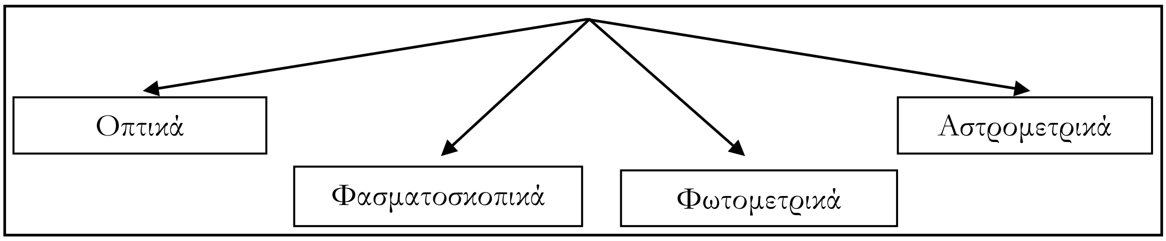
Η πραγματική ενεργός ακτίνα του αστέρα R_L προκύπτει από τη σχέση:

$$R_L = \alpha\, r_L \tag{1.33}$$

1.2.3. Ταξινομήσεις και τύποι

Υπάρχουν τριών ειδών ταξινομήσεις για τα διπλά συστήματα αστέρων. Η πρώτη βασίζεται στις μεθόδους παρατήρησής τους, η δεύτερη στη γεωμετρία τους (πληρότητα λοβών Roche) και η τρίτη στη μορφή της καμπύλης φωτός τους.

Α. Βάσει της μεθόδου παρατήρησης



Α1. Οπτικώς διπλοί αστέρες

Οι δύο αστέρες που συνιστούν ένα τέτοιο σύστημα απέχουν μεταξύ τους μέχρι και χιλιάδες AU κι έτσι μπορούν να αναγνωριστούν ο καθένας ξεχωριστά με τη βοήθεια τηλεσκοπίου. Λόγω της μεγάλης απόστασής τους, η περίοδος του συστήματος κυμαίνεται από 10 έως 100 yrs ή και περισσότερο.

Α2. Φασματοσκοπικά διπλά συστήματα αστέρων

Αυτού του τύπου τα διπλά συστήματα ανακαλύφθηκαν αποκλειστικά με φασματοσκοπικές παρατηρήσεις. Στα φάσματά τους παρατηρείται μετατόπιση των φασματικών γραμμών και χρησιμοποιώντας το νόμο Doppler υπολογίζονται οι ακτινικές ταχύτητες των αστέρων γύρω από το κέντρο μάζας του συστήματος. Επομένως, εάν η τροχιά του συστήματος είναι τέτοια ώστε να υπάρχει συνιστώσα της ταχύτητας περιφοράς κατά μήκος της οπτικής ευθείας παρατήρησης, τότε υπάρχει περιοδική μεταβολή της μετατόπισης των φασματικών γραμμών και κατ' επέκταση των ακτινικών ταχυτήτων των αστέρων του συστήματος. Μέσω αυτών των παρατηρήσεων προκύπτουν οι *καμπύλες ακτινικών ταχυτήτων* των αστέρων του συστήματος (βλ. §3.2.3), οι οποίες αποτελούν ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την περαιτέρω μελέτη τους.

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* (SB2), όπου στο φάσμα μπορούν να εντοπιστούν φασματικές γραμμές κι από τα δύο μέλη, και (2) *Φασματοσκοπικά διπλοί αστέρες με μονές γραμμές στο φάσμα τους* (SB1), όπου ανήκουν τα διπλά συστήματα στα οποία ο ένας αστέρας είναι σημαντικά αμυδρότερος από τον άλλο, του οποίου οι φασματικές γραμμές κυριαρχούν στο φάσμα.

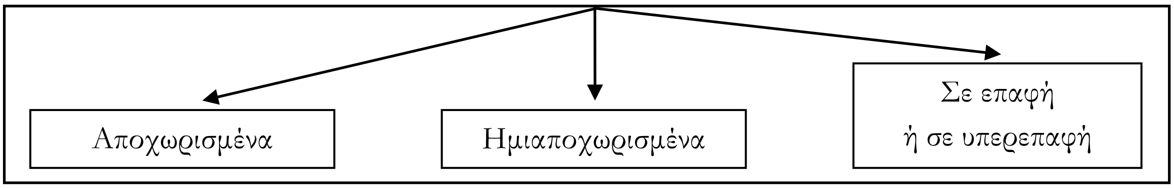
Α3. Αστρομετρικά διπλά συστήματα αστέρων

Σε περιπτώσεις όπου ο ένας αστέρας του συστήματος είναι πολύ λαμπρότερος από τον άλλο, είναι αδύνατο να παρατηρηθεί φασματοσκοπικά ή φωτομετρικά ο συνοδός αστέρας. Επομένως, η ύπαρξη του αμυδρού συνοδού αστέρα γίνεται αντιληπτή μόνον έμμεσα και συγκεκριμένα από τη μεταβολή της τροχιάς του πρωτεύοντα αστέρα. Η τροχιά αυτού του αστέρα δεν διαγράφει ευθύγραμμη τροχιά στην ουράνια σφαίρα αλλά μια κλειστή τροχιά στο σύστημα αναφοράς του κέντρου μάζας του διπλού συστήματος.

Α4. Φωτομετρικά διπλά συστήματα αστέρων

Τα συστήματα αυτού του τύπου 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 στον παρατηρητή. Τα συστήματα αυτά ονομάζονται *μεταβλητοί δι' εκλείψεων*. Παρατηρήσεις της περιοδικής μεταβολής του φωτός μας δίνουν την *καμπύλη φωτός* (βλ. §3.1.3) του συστήματος. Για να γίνονται αντιληπτά τέτοια διπλά συστήματα θα πρέπει η γωνία μεταξύ του τροχιακού επιπέδου του συστήματος και της οπτικής ευθείας παρατήρησης να είναι περίπου 0° ώστε οι εκλείψεις να είναι παρατηρήσιμες.

Β. Βάσει του βαθμού πληρότητας των λοβών Roche



Β1. Αποχωρισμένα διπλά συστήματα αστέρων

Οι ακτίνες των αστέρων των συστημάτων αυτών είναι μικρότερες από εκείνες των αντίστοιχων λοβών Roche που τους περιβάλλουν (εικ. 1.5α). 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 πάντα από τις μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις.

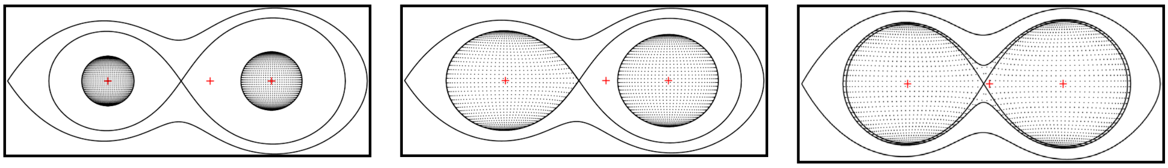
Β2. Ημιαποχωρισμένα διπλά συστήματα αστέρων

Σε αυτού του τύπου τα συστήματα ο ένας αστέρας του συστήματος γεμίζει τον λοβό Roche του, ενώ ο άλλος όχι (εικ. 1.5β). 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 τη φύση του συνοδού που δέχεται τη μάζα που εκρέει από τον συνοδό του, υπάρχει 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.

Β3. Διπλά συστήματα αστέρων σε (υπερ)επαφή

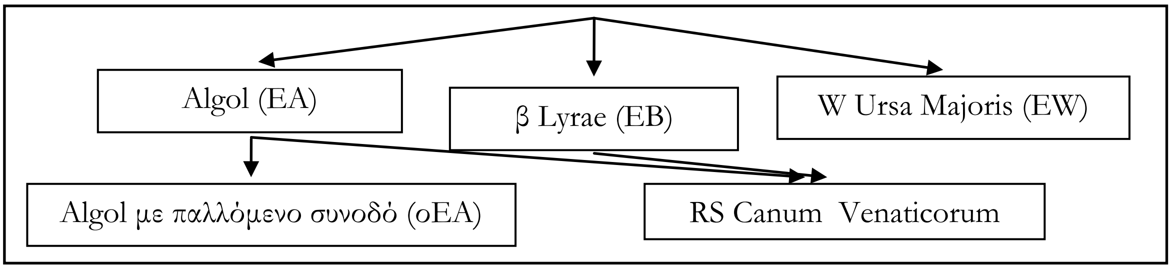
Σε αυτού του τύπου τα συστήματα, οι αστέρες ανήκουν στην Κύρια Ακολουθία (ΚΑ), και είτε γεμίζουν ακριβώς (σε επαφή) ή ξεπερνούν τους αντίστοιχους λοβούς τους (σε υπερεπαφή) (εικ. 1.5γ). Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι δύο αστέρες έχουν κοινή φωτόσφαιρα και αυτό συμβαίνει λόγω εξελικτικής διαστολής τους ή διότι έτσι γεννήθηκαν από το αρχικό πρωτοαστρικό νέφος. Παρουσιάζουν πολύ μικρές περιόδους περιφοράς, της τάξης των μερικών ωρών (5-20 hrs), και γι' αυτό αποτελούν ιδανικούς στόχους παρατήρησης.



(α) (β) (γ)

Εικόνα 1.5. (α) Αποχωρισμένο σύστημα, (β) ημιαποχωρισμένο σύστημα, (γ) σύστημα σε υπερεπαφή. Οι κόκκινοι σταυροί δείχνουν τα κέντρα μάζας των αστέρων και του συστήματος.

Γ. Βάσει της μορφής της καμπύλης φωτός τους



Γ1. Συστήματα τύπου Algol

Ο αστέρας Algol ή β Persei ανακαλύφθηκε από τον Montanari το 1667 και έχει ιδιαίτερη ιστορική σημασία, καθώς είναι ο πρώτος μεταβλητός δι' εκλείψεων που παρατηρήθηκε ποτέ. Έκτοτε αποτελεί τον πρότυπο αστέρα της κατηγορίας των ημιαποχωρισμένων διπλών συστημάτων. Σε αυτό το σύστημα βρέθηκε ότι ο μικρότερης μάζας αστέρας του συστήματος είναι πιο εξελιγμένος από τον συνοδό του, ο οποίος είναι μεγαλύτερης μάζας και βρίσκεται ακόμα επάνω στην ΚΑ. Από την αστρική εξέλιξη γνωρίζουμε ότι ο χρόνος παραμονής ενός αστέρα στην ΚΑ είναι αντιστρόφως ανάλογος της μάζας του και συγκεκριμένα ακολουθεί τη σχέση: $t_{\mathrm{K.A.}} \sim m^{-1/3}$. Επίσης, οι παρατηρήσεις έδειχναν ότι οι αστέρες δεν είχαν κοινή προέλευση και ηλικία, γεγονός που ερχόταν σε αντίθεση με όλα όσα ήταν γνωστά για τα διπλά συστήματα. Η εξελικτική κατάσταση αυτού του συστήματος είναι γνώστη και ως *παράδοξο του Algol.*

Η καμπύλη φωτός αυτών των συστημάτων παρουσιάζει ένα βαθύ πρωτεύον ελάχιστο και ένα ρηχότερο δευτερεύον (εικ. 1.6). Στο χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών ελαχίστων η λαμπρότητα του συστήματος παραμένει σταθερή. Οι περίοδοι αυτών των συστημάτων κυμαίνονται από 0.4 έως 10,000 days, με την πλειοψηφία τους να έχει περίοδο της τάξης των 3 days.

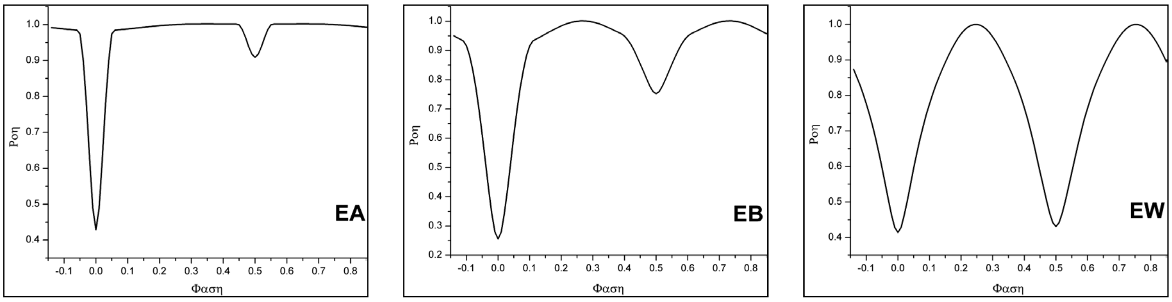
Μια νέα υποκατηγορία τέτοιων συστημάτων, κυρίως ως προς την εξελικτική τους κατάσταση, είναι οι αστέρες oEA (oscillating EA). Σε αυτήν την κατηγορία συνήθως ο θερμότερος και μεγαλύτερης μάζας αστέρας είναι παλλόμενος, ενώ ο συνοδός του (μικρότερης μάζας) είναι πολύ πιο εξελιγμένος. Εκτός από των φωτομετρικών μεταβολών οι οποίες οφείλονται στις εκλείψεις, παρατηρούνται και μικρομεταβολές που σχετίζονται με τις αναπάλσεις. Αυτή η κατηγορία αποτελεί ένα από τα κύρια αντικείμενα της παρούσας διατριβής (βλ. κεφάλαιο 7).

Γ2. Συστήματα τύπου β Lyrae

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, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, μόνο που τώρα η λαμπρότητα του συστήματος δεν είναι σταθερή στο χρονικό διάστημα μεταξύ των ελαχίστων. Η περίοδος αυτών των συστημάτων κυμαίνεται από 0.4 έως 200 days (εικ. 1.6).

Γ3. Συστήματα τύπου W Ursae Majoris

Πρόκειται για συστήματα σε (υπέρ)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 (εικ. 1.6) και δύο σχεδόν ισοβαθή ελάχιστα. Η περίοδος αυτών των συστημάτων κυμαίνεται μεταξύ 0.25-1 days.



Εικόνα 1.6. Καμπύλες φωτός εκλειπτικών συστημάτων τύπου Algol (αριστερά), β Lyrae (μέση) και W UMa (δεξιά).

Τα συστήματα τύπου RS Canum Venaticorum, τα οποία παρουσιάζουν καμπύλες φωτός τύπου τόσο β Lyrae όσο και Algol, είναι αποχωρισμένα, περιέχουν αστέρες φασματικού τύπου F ή G και οι περίοδοί 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. Η συνεχής αλλαγή φάσης οφείλεται στο ένα μέλος του συστήματος, το οποίο 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.

1.2.4. Εξέλιξη

Η εξέλιξη των διπλών συστημάτων εξαρτάται από τις βαρυτικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μελών, αλλά κυρίως από την ανταλλαγή μάζας που λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια της ζωής τους. Είναι γνωστό ότι η διάρκεια ζωής ενός αστέρα εξαρτάται από τη μάζα και τη χημική του σύσταση, καθώς αυτές οι παράμετροι καθορίζουν το ρυθμό καύσεων στον πυρήνα του και κατ' επέκταση την περαιτέρω εξέλιξη του αστέρα. Όταν όμως ένας αστέρας είναι μέλος διπλού συστήματος, στις προαναφερόμενες παραμέτρους εξέλιξης προστίθενται: (α) η συνολική μάζα, (β) ο λόγος μαζών, και (γ) η απόσταση των μελών του συστήματος. Επιπλέον, στα διπλά συστήματα ο ρυθμός των πυρηνικών καύσεων των αστέρων μπορεί να αλλάξει είτε απότομα είτε σταδιακά, ανάλογα με τον ρυθμό μεταφοράς μάζας μεταξύ των αστέρων-μελών.

Χρονικές κλίμακες της μεταφοράς μάζας

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, όταν ο αστέρας γεμίσει τον λοβό Roche του το σχήμα του μεταβάλλεται "προσπαθώντας» να διατηρηθεί εντός των ορίων του λοβού, ανεξάρτητα από το αν θα βρίσκεται σε θερμική ισορροπία ή όχι. Οι αστέρες έχουν τη δυνατότητα να μεταβάλλουν την εσωτερική δομή τους κατά τη διάρκεια της μεταφοράς μάζας, διότι το μεγαλύτερο μέρος της μάζας τους βρίσκεται κοντά στον πυρήνα. Τα εξωτερικά στρώματα των αστέρων παραμορφώνονται από την παρουσία ενός συνοδού, χωρίς όμως να διαταράσσουν τη συνολική υδροστατική ισορροπία τους. Ωστόσο, η θερμική ισορροπία μπορεί να διαταραχθεί εφόσον η χρονική κλίμακα, όπου η ισορροπία μεταξύ των πυρηνικών αντιδράσεων και εκπομπών ακτινοβολίας και η απώλεια υλικού μέσω ακτινοβολίας από την ατμόσφαιρα του αστέρα, είναι μεγαλύτερη από το δυναμικό χρόνο. Για πολύ μεγάλους ρυθμούς απώλειας μάζας, οι οποίοι προκαλούν ταχείες αλλαγές στις μάζες των αστέρων, η εντροπία στο εσωτερικό του αστέρα μπορεί να μείνει σταθερή ή με άλλα λόγια οι μεταβολές στα εσωτερικά στρώματα να γίνονται αδιαβατικά. Οι χρονικές κλίμακες κατά τις οποίες μπορεί να παρατηρηθεί μεταφορά μάζας είναι οι εξής:

1. **Δυναμικός χρόνος**: Χρόνος που απαιτείται για να επέλθει υδροστατική ισορροπία στους αστέρες. Ο αστέρας ο οποίος έχει γεμίσει τον λοβό Roche του δεν μπορεί να παραμείνει εντός των ορίων του λοβού, ακόμα και με ταχεία μεταφορά μάζας. Ο ρυθμός απώλειας μάζας από τον αστέρα περιορίζεται μόνο από την υπερηχητική εκτόνωση του περιβλήματός του διαμέσου του σημείου L_1. Αστέρες με ζώνες ακτινοβολίας σε θερμική ισορροπία είναι σταθεροί σε τέτοια κλίμακα χρόνου, όμως αστέρες οι οποίοι έχουν βαθιές ζώνες μεταφοράς ή οι εκφυλισμένοι αστέρες είναι αρκετά ασταθείς. Άρα, εάν η μεταφορά μάζας ξεκινήσει κατά τη διάρκεια που ο αστέρας είναι επάνω ή πολύ κοντά στον οριζόντιο κλάδο των γιγάντων ή στο κάτω μέρος της ΚΑ ή είναι εκφυλισμένος, τότε η αστάθεια σε τέτοια κλίμακα χρόνου είναι σίγουρη. Γενικά, ο δυναμικός χρόνος δίνεται από τη σχέση:

$$t_{dyn} = \sqrt{\frac{2R^3}{GM}} \approx 40\sqrt{\frac{R^3}{M}}\ [\text{min}] \tag{1.34}$$

2. **Θερμικός χρόνος**: Χρόνος που απαιτείται ώστε οι αστέρες να αποκτήσουν θερμική ισορροπία. Ο αστέρας έχει γεμίσει τον λοβό Roche του αλλά δεν μπορεί πλέον διατηρήσει τη θερμική ισορροπία, κάτι το οποίο του επιτρέπει να παραμείνει εντός των ορίων του λοβού του. Η μεταφορά μάζας σε τέτοιες κλίμακες μπορεί να λάβει χώρα μόνο σε μη εκφυλισμένους αστέρες, αριστερά του κλάδου των γιγάντων στο διάγραμμα H-R, όποτε και γίνονται ασταθείς εξαιτίας της ταχείας μεταφοράς μάζας. Η μεταφορά μάζας σε θερμικό χρόνο συμβαίνει όταν ο πρωτεύων αστέρας αρχίζει να γεμίζει τον λοβό Roche του και στο περίβλημά του υπάρχει ανισορροπία. Ο ρυθμός απώλειας μάζας είναι αντιστρόφως ανάλογος του θερμικού χρόνου (Kelvin-Helmlhotz), ο οποίος με τη σειρά του εξαρτάται από τη μάζα M, την ακτίνα R και τη φωτεινότητα L του αστέρα:

$$t_{th} = \frac{GM^2}{RL} = (3 \times 10^7)M^2RL\ [\text{yrs}] \tag{1.35}$$

3. **Πυρηνικός χρόνος**: Χρόνος καύσης του υδρογόνου (Η) στον πυρήνα του αστέρα. Σε αυτήν τη χρονική κλίμακα η μεταφορά μάζας καθορίζεται από την εξελικτική πορεία των αστέρων. Η ακτίνα του αστέρα ο οποίος χάνει μάζα είναι ίση με την ακτίνα του λοβού Roche του, ενώ ο αστέρας παραμένει σε θερμική ισορροπία. Η μεταφορά μάζας σε πυρηνικό χρόνο συμβαίνει μετά τη φάση της ταχείας μεταφορά μάζας, όταν ο αστέρας καίει ακόμα υδρογόνο στον πυρήνα του. Η μεταφορά μάζας σε τέτοιες χρονικές κλίμακες διαρκεί πολύ παραπάνω απ' ότι στις προηγούμενες περιπτώσεις και η πιθανότητα να την παρατηρήσουμε είναι μεγάλη. Η παρακάτω σχέση δίνει προσεγγιστικά τον πυρηνικό χρόνο:

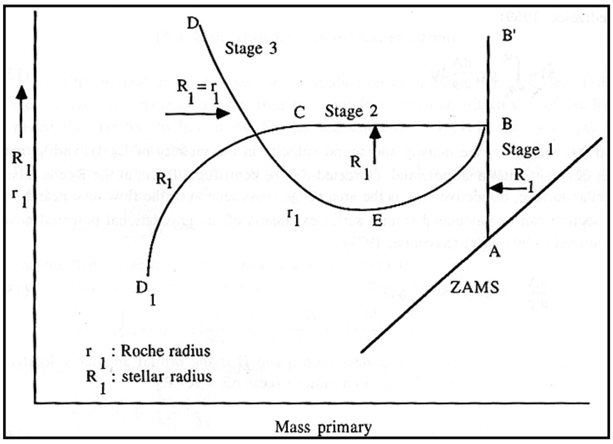
$$t_{nuc} = (7 \times 10^9)\frac{M}{L}\ [\text{yrs}] \tag{1.36}$$

Η απότομη απώλεια μάζας του αστέρα είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη μεταβολή της εσωτερικής του δομής. Εάν τα εξωτερικά στρώματα του αστέρα βρίσκονται σε ακτινοβολιακή ισορροπία, όταν η εντροπία αυξηθεί στην επιφάνειά του, τότε ο αστέρας έχει τη δυνατότητα να ξαναπάρει τις κανονικές του διαστάσεις, έτσι ώστε η ακτίνα του να προσαρμοστεί στην ακτίνα του λοβού Roche του. Αντίθετα, εάν ο αστέρας έχει βαθιές ζώνες μεταφοράς, τότε η συμπεριφορά της ακτίνας στη μείωση της μάζας είναι εντελώς διαφορετική.

Η χρονική κλίμακα κατά την οποία θα διαδραματιστεί η μεταφορά μάζας εξαρτάται από την κατάσταση των εξωτερικών στρωμάτων του αστέρα. Εάν οι αστέρες έχουν ζώνη ακτινοβολίας, η μεταφορά μάζας λαμβάνει χώρα σε θερμικές χρονικές κλίμακες, ενώ εάν έχουν ζώνη μεταφοράς το φαινόμενο συμβαίνει σε πολύ μικρές χρονικές κλίμακες.

Μεταβολές κατά τη μεταφορά μάζας

Για να γίνει πλήρως κατανοητό το φαινόμενο της μεταφοράς μάζας, πρέπει αρχικά να γίνει αντιληπτή η αλλαγή στην ακτίνα του αστέρα και του λοβού Roche του όταν η μάζα του μειώνεται (εικ. 1.7). Η μεταβολή της ακτίνας ενός μεμονωμένου αστέρα ακολουθεί τη γραμμή ΑΒ΄ στην εικ. 1.7, δηλαδή κάθετα και προς τα πάνω με σταθερή μάζα. Σε ένα διπλό σύστημα αστέρων η ακτίνα R_1 του πρωτεύοντα αστέρα αυξάνει έως ότου φτάσει στην κρίσιμη ακτίνα του λοβού Roche r_1 (σημείο Β), οπότε και ξεκινά η μεταφορά μάζας. Κατά την έναρξη της μεταφοράς μάζας η ακτίνα του αστέρα παραμένει σχεδόν σταθερή (BC) και εν συνεχεία μειώνεται καθώς η μεταφορά μάζας συνεχίζεται (CD_1). Όταν ξεκινά η απώλεια μάζας, η ακτίνα Roche μειώνεται και η τροχιά του συστήματος μικραίνει. Η μεταβολή της ακτίνας Roche συναρτήσει της συνεχώς μειούμενης μάζας M_1 φαίνεται σχηματικά από την καμπύλη r_1 από το σημείο Β στο Ε. Όταν οι μάζες των αστέρων του συστήματος εξισωθούν, τότε η r_1 παίρνει την ελάχιστη τιμή της (σημείο Ε), ενώ για $M_1<M_2$ αυξάνεται (ED) και η τροχιά του συστήματος μεγαλώνει. Εφόσον $R_1>r_1$ μεταξύ των



Εικόνα 1.7. Μεταβολή της πραγματικής ακτίνας του αστέρα και της αντίστοιχης ακτίνας Roche συναρτήσει της μάζας του (de Loore & Doom 1992).

σημείων B και C, η απώλεια μάζας απαιτείται ώστε να μειωθεί η μάζα του πρωτεύοντος αστέρα. Για αστέρες με ζώνες ακτινοβολίας αυτό συμβαίνει σε θερμική κλίμακα χρόνου. Η καμπύλη για την ακτίνα R_1 δείχνει πως η ακτίνα ενός αστέρα σε θερμική ισορροπία μεταβάλλεται καθώς η μάζα του μειώνεται λόγω απώλειας από τα εξωτερικά του στρώματα. Εκτός του σημείου C, η ακτίνα του πρωτεύοντος αστέρα είναι μικρότερη από την αντίστοιχη του λοβού Roche του.

Πρέπει να διακριθούν δύο πιθανές περιπτώσεις:

1. $R_1 < r_1$: Το σύστημα είναι αποχωρισμένο.
2. Εάν ένα νέο στάδιο πυρηνικών καύσεων ξεκινήσει, τότε $R_1 > r_1$ και η μεταφορά μάζας συνεχίζει σε πυρηνική χρονική κλίμακα (CD).

Επομένως, δύο στάδια ανταλλαγής μάζας μπορούν να συσχετιστούν με την εξέλιξη των αστέρων του διπλού συστήματος:

1. Ταχεία μεταφορά μάζας (διάρκειας 10^4-10^5 yrs), όπου ο λόγος μαζών του συστήματος αντιστρέφεται ($q<1 \rightarrow q>1$, όπου $q = M_2/M_1$).
2. Μεγάλη αύξηση της μάζας του δευτερεύοντα αστέρα μάζας M_2.

Οπότε, η αλληλουχία των γεγονότων κατά τη διάρκεια της μεταφοράς μάζας είναι η εξής:

1. A→B: Η ακτίνα του πρωτεύοντα αστέρα αυξάνει σε πυρηνική χρονική κλίμακα.
2. B→C: Ταχεία μεταφορά μάζας σε θερμική κλίμακα χρόνου. Το σύστημα πλέον αποτελείται από έναν υπογίγαντα αστέρα με τη μικρότερη μάζα και έναν νάνο αστέρα με τη μεγαλύτερη μάζα.
3. Πάνω από το σημείο C ο υπογίγαντας εξελίσσεται σε πυρηνική χρονική κλίμακα, η ακτίνα του αυξάνει με μικρό ρυθμό και χάνει μικρές ποσότητες υλικού.

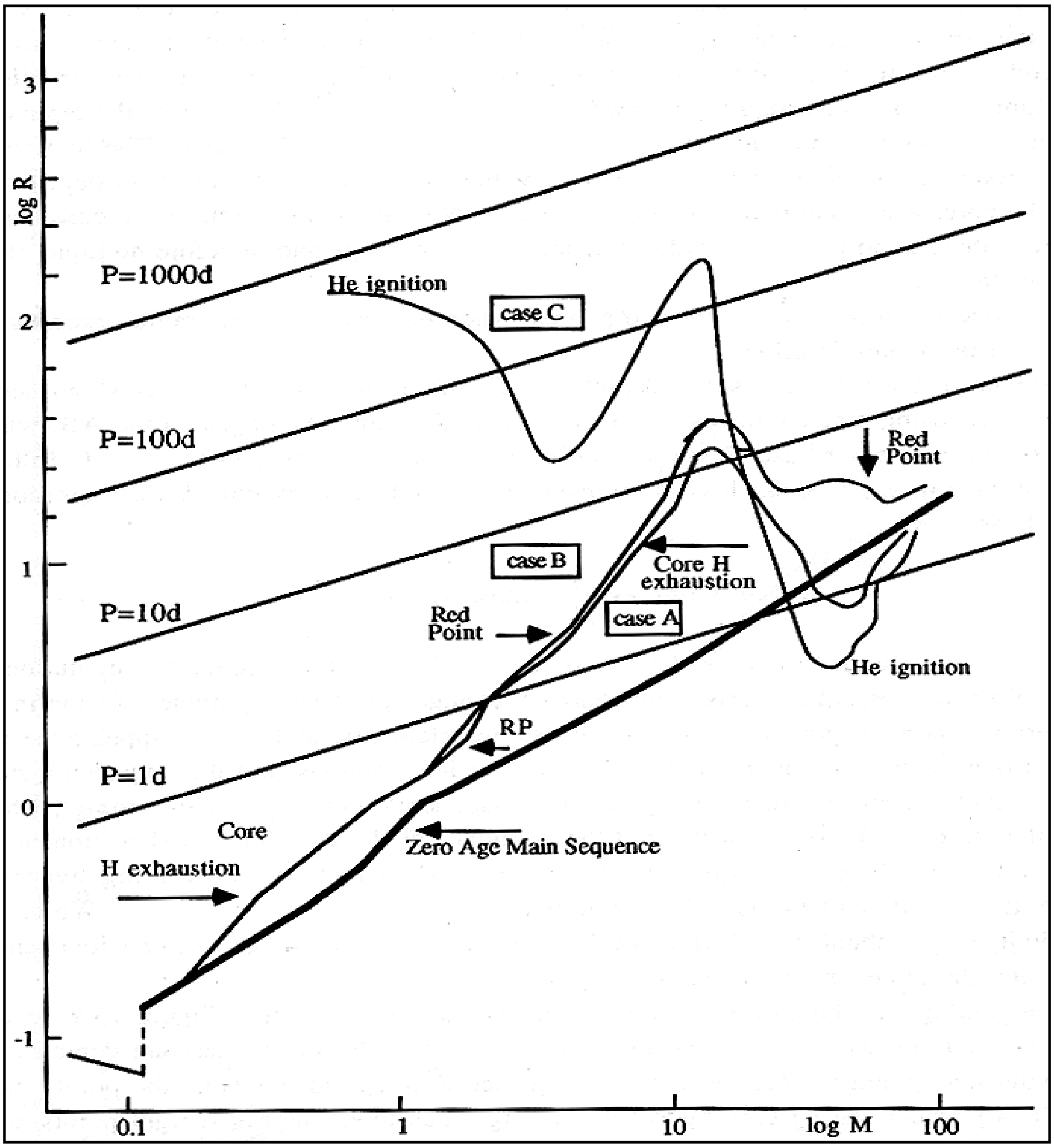
Περιπτώσεις μεταφοράς μάζας

Η ακτίνα ενός μεμονωμένου αστέρα αυξάνεται κατά τη διάρκεια της εξέλιξής του από την ΚΑ στον κλάδο των ερυθρών γιγάντων ή υπεργιγάντων. Αυτή η μεταβολή της ακτίνας συναρτήσει του χρόνου φαίνεται στην εικ. 1.8. Αστέρες οι οποίοι ανήκουν σε διπλά συστήματα έχουν περιορισμό στην αύξηση της ακτίνας τους, καθώς, όταν αυτή υπερβεί την ακτίνα Roche, αρχίζει η μεταφορά μάζας η οποία τείνει να επαναφέρει τον αστέρα σε διαστάσεις τέτοιες ώστε να βρίσκεται εξ ολοκλήρου εντός του λοβού Roche του. Οι Kippenhahn & Weigert (1967) διετύπωσαν τρεις πιθανές περιπτώσεις μεταφοράς μάζας, οι οποίες και παρατίθενται παρακάτω:

- **Περίπτωση A (case A)**: Οι παράμετροι του διπλού συστήματος (μάζες αστέρων, σχετική τους απόσταση) είναι τέτοιες ώστε ο ένας αστέρας γεμίζει τον λοβό Roche του πριν φτάσει στην ελάχιστη τιμή της ακτίνας του λόγω κατάρρευσης και ξεκινήσει η ανάφλεξη του H στον πυρήνα του. Αρχικά, ο ρυθμός μεταφοράς μάζας είναι πολύ μεγάλος και εκτυλίσσεται σε θερμική χρονική κλίμακα. Αυτή η φάση καλείται ταχεία φάση μεταφοράς μάζας. Μετά από λίγο διάστημα ο λόγος μαζών έχει αντιστραφεί και η μεταφορά μάζας πλέον διαδραματίζεται σε πυρηνικό χρόνο.
- **Περίπτωση B (case B)**: Όταν η σχετική απόσταση των αστέρων είναι τέτοια ώστε η κρίσιμη ακτίνα Roche του πρωτεύοντος αστέρα γίνει μεγαλύτερη από την ακτίνα του στο τέλος της καύσης του H στον πυρήνα, αλλά μικρότερη από αυτήν που θα έχει όταν ξεκινήσει η καύση του He, τότε και πάλι η μεταφοράς μάζας μπορεί να λάβει χώρα. Με αυτόν τον τρόπο ο αστέρας γεμίζει τον λοβό Roche του κατά τη διάρκεια της ραγδαίας αύξησης της ακτίνας του και η μεταφορά μάζας ξεκινά όταν αυτός

συμπληρωθεί. Η φωτεινότητα του αστέρα μειώνεται, φτάνει σε μια ελάχιστη τιμή και εν συνεχεία αυξάνει και πάλι. Η συστολή του πυρήνα γίνεται με αργό ρυθμό κι επομένως δεν υπάρχει φάση ταχείας μεταφοράς μάζας.

- **Περίπτωση Γ (case C)**: Η μεταφορά μάζας συμβαίνει σε πιο προχωρημένα στάδια εξέλιξης και συγκεκριμένα όταν ο αστέρας γεμίσει τον λοβό Roche του ύστερα από την ανάφλεξη του He.



Εικόνα 1.8. Διάγραμμα μάζας-ακτίνας για τις περιπτώσεις μεταφοράς μάζας σε διάφορα στάδια εξέλιξης (de Loore & Doom 1992).

Βασική παράμετρος της εξέλιξης των αστέρων είναι η μάζα. Ακολούθως, παρουσιάζονται συνοπτικά οι περιπτώσεις εξέλιξης διπλών συστημάτων μικρής μάζας, τα οποία αποτελούν αντικείμενο της διατριβής.

Περιπτώσεις εξέλιξης διπλών συστημάτων μικρής μάζας (1 $M_\odot < M_1 < 2.8\ M_\odot$)

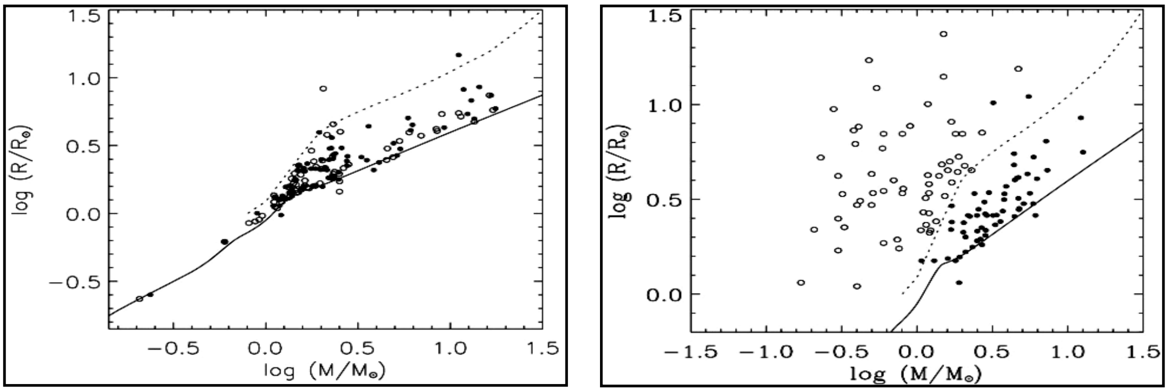
1. Όταν ο αστέρας μεγαλύτερης μάζας γεμίσει τον λοβό Roche του, τότε ξεκινά η φάση της ραγδαίας μεταφοράς μάζας. Εν συνεχεία, επέρχεται η φάση μεταφοράς μάζας με

μικρότερο ρυθμό, ενώ ο δότης αστέρας συνεχίζει να γεμίζει τον λοβό Roche του. Με αυτόν τον τρόπο το σύστημα γίνεται ημιαποχωρισμένο.

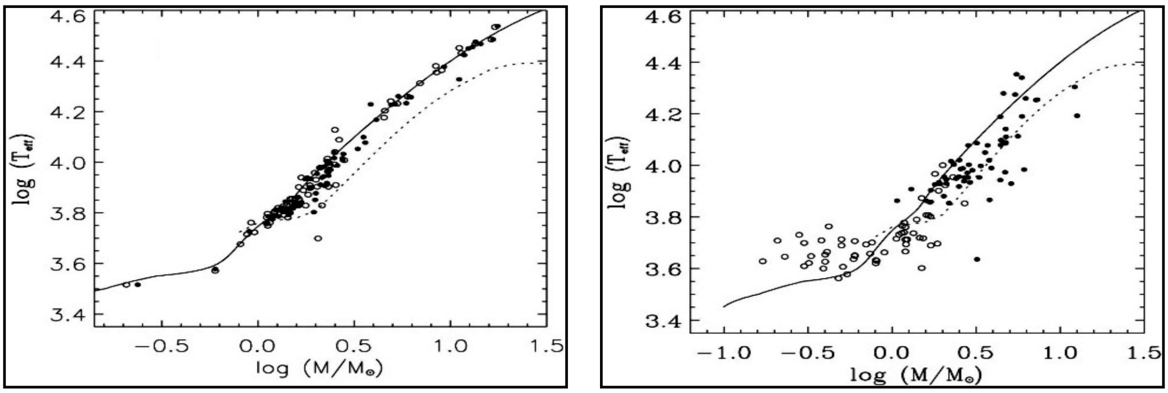
2. Ο πυρήνας είναι εκφυλισμένος και συστέλλεται με μικρότερους ρυθμούς, ενώ τα κελύφη του υδρογόνου συνεχώς μικραίνουν, οπότε δεν υπάρχει ραγδαία διαστολή του περιβλήματός του. Η μάζα του εναπομείναντα πυρήνα (μετά το τέλος των καύσεων Η) είναι ~0.35 $M_\odot$, ενώ η αύξηση της θερμοκρασίας του δεν είναι τόσο μεγάλη ώστε να αναφλεγεί το He. Η μεταφορά μάζας σταματά λόγω της σημαντικής εξασθένισης των κελυφών Η και ο αστέρας γίνεται λευκός νάνος.

Διαγράμματα συσχετίσεων διαφόρων θεμελιωδών παραμέτρων για αστέρες-μέλη διπλών συστημάτων

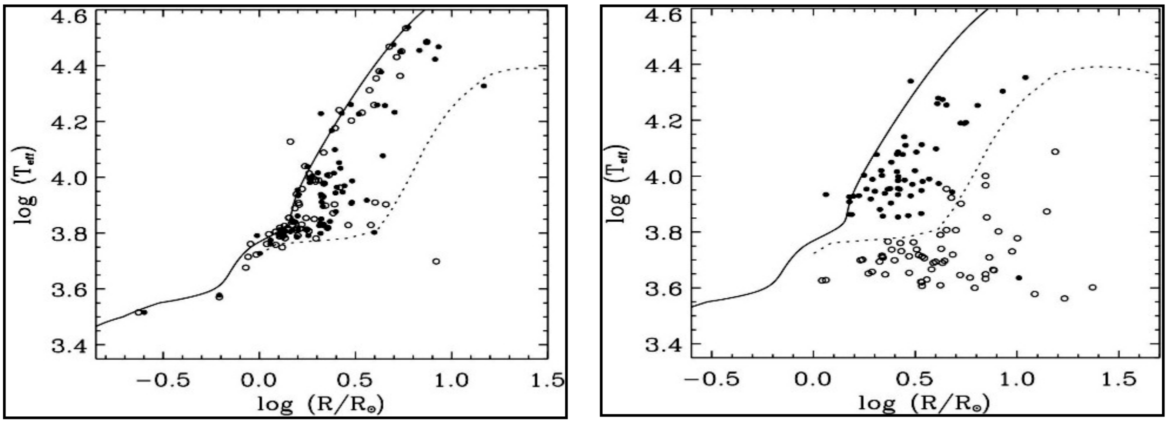
Χρησιμοποιώντας τις πολύ καλά καθορισμένες απόλυτες παραμέτρους 74 αποχωρισμένων και 61 ημιαποχωρισμένων φασματοσκοπικά διπλών κι εκλειπτικών συστημάτων, οι İbanoğlu et al. (2006) παρουσίασαν διάφορες συσχετίσεις μεταξύ των φυσικών παραμέτρων των αστέρων-μελών, με απώτερο σκοπό να αποδείξουν τη διαφοροποίηση, σε εξελικτικό επίπεδο, των αστέρων, οι οποίοι ανήκουν σε διαφορετικούς τύπους βάσει της γεωμετρίας Roche. Στα παρακάτω διαγράμματα (εικ. 1.9-1.14) παρουσιάζεται η κατανομή των πρωτευόντων (γεμάτοι κύκλοι) και των συνοδών αστέρων (άδειοι κύκλοι) αποχωρισμένων (αριστερά) και ημιαποχωρισμένων (δεξιά) συστημάτων. Η συνεχής γραμμή αναφέρεται στην Κύρια Ακολουθία Μηδενικής Ηλικίας (ZAMS), ενώ η διακεκομμένη στην Κύρια Ακολουθία Τερματικής Ηλικίας (TAMS).



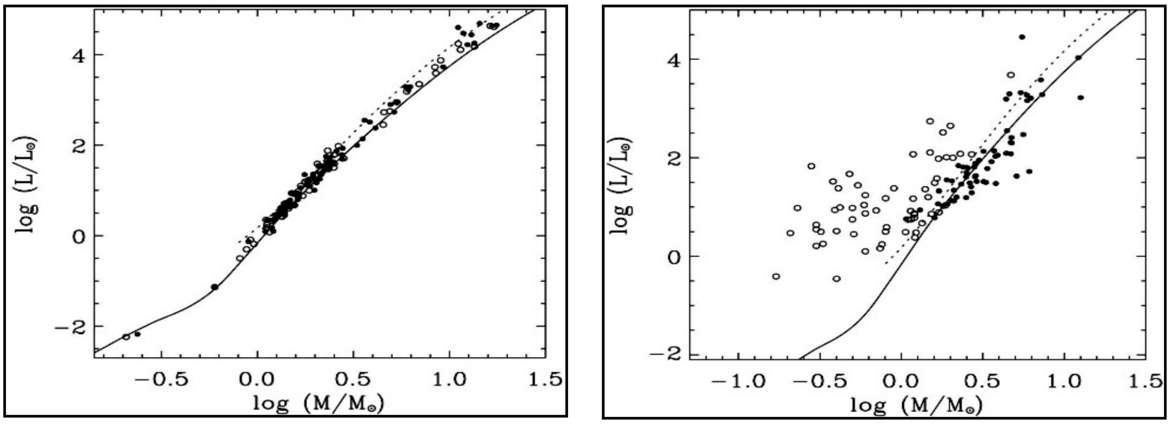
Εικόνα 1.9. Διάγραμμα μάζας-ακτίνας (M-R) (İbanoğlu et al. 2006).



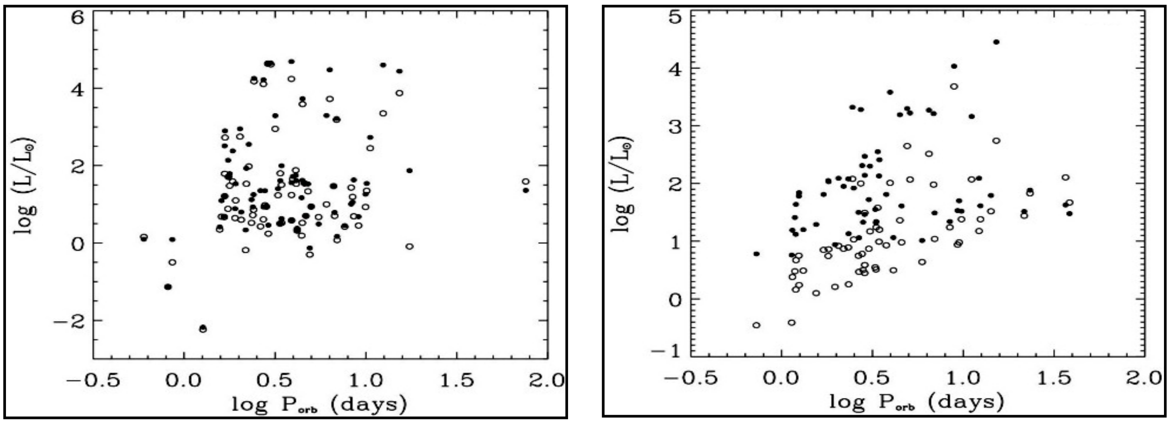
Εικόνα 1.10. Διάγραμμα μάζας-θερμοκρασίας (M-T) (İbanoğlu et al. 2006).



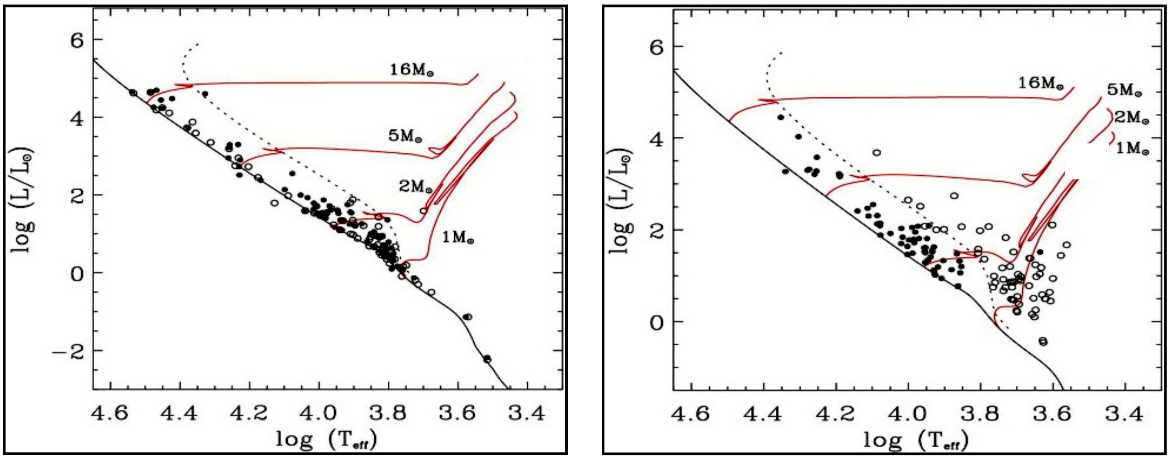
Εικόνα 1.11. Διάγραμμα ακτίνας-θερμοκρασίας (R-T) (İbanoğlu et al. 2006).



Εικόνα 1.12. Διάγραμμα μάζας-φωτεινότητας (M-L) (İbanoğlu et al. 2006).



Εικόνα 1.13. Διάγραμμα περιόδου-φωτεινότητας (P-L) (İbanoğlu et al. 2006).



Εικόνα 1.14. Διάγραμμα Hertzsprung-Russell (İbanoğlu et al. 2006).

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω εικόνες, οι δευτερεύοντες κυρίως αστέρες παρουσιάζουν εξαιρετικά μεγάλες διαφορές. Μια από τις βασικές σχέσεις που διέπουν τη μάζα και τη φωτεινότητα αστέρων της ΚΑ είναι η $L{\sim}M^{3.5}$, όμως, όπως έδειξαν οιİ banoğlu et al. (2006), δεν ισχύει το ίδιο και για τους αστέρες των διπλών συστημάτων. Συγκεκριμένα από τις παραπάνω κατανομές προέκυψαν οι σχέσεις:

Για αστέρες-μέλη αποχωρισμένων συστημάτων

$$L_1 = M_1^{3.92(5)} \tag{1.37}$$

$$L_2 = M_2^{3.86(5)} \tag{1.38}$$

Για αστέρες-μέλη ημιαποχωρισμένων συστημάτων

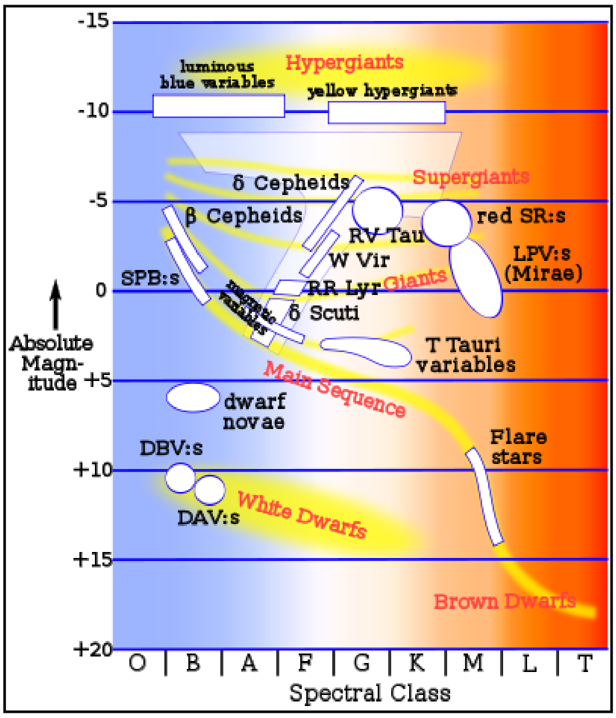
$$L_1 = M_1^{3.2(3)} \tag{1.39}$$

$$L_2 = M_2^{1.5(3)} \tag{1.40}$$

1.3. Παλλόμενοι αστέρες

Οι παλλόμενοι αστέρες είναι μια πολύ σημαντική κατηγορία μεταβλητών, διότι, λόγω των αναπάλσεων που παρουσιάζουν, δίνουν τη δυνατότητα να μελετηθεί το εσωτερικό τους. Η *αστεροσεισμολογία* είναι ένας σχετικά νέος κλάδος της Αστροφυσικής, ο οποίος έχει δημιουργηθεί για τη μελέτη τέτοιων αστέρων. Επιπροσθέτως, σε κάποιους τύπους παλλόμενων αστέρων (π.χ. Κηφείδες) υπάρχουν σχέσεις που συνδέουν την περίοδο ανάπαλσής τους με το απόλυτο μέγεθος τους και κατ' επέκταση με την απόσταση τους, γεγονός το οποίο τους καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμους στον προσδιορισμό αποστάσεων στο σύμπαν.

Η περιοδική μεταβολή της λαμπρότητας των αστέρων αυτών οφείλεται σε φυσικά αίτια και σχετίζεται με τις αναπάλσεις του ίδιου του αστέρα, οι οποίες είναι κατά κύριο λόγο ακτινικές. Μελετώντας τις αναπάλσεις των αστέρων προκύπτουν συμπεράσματα για το εσωτερικό τους, κατ' αντιστοιχία με τις επιστήμες της γεωλογίας και της σεισμολογίας, οι οποίες μελετούν το γήινο υπέδαφος. Η ταξινόμηση των παλλόμενων αστέρων (βλ. §1.1.3) γίνεται με βάση τα παρατηρούμενα χαρακτηριστικά τους (π.χ. περίοδος και πλάτος ανάπαλσης, θερμοκρασία). Οι θέσεις τους επάνω στο διάγραμμα H-R φαίνονται στην εικ. 1.15.



Εικόνα 1.15. Οι τύποι των παλλόμενων αστέρων στο διάγραμμα H-R.

1.3.1. Φυσική των αναπάλσεων

Οι ακτινικές αναπάλσεις ενός παλλόμενου αστέρα οφείλονται στο συντονισμό και διάδοση ακουστικών κυμάτων, τα οποία προέρχονται από το εσωτερικό του και οδεύουν προς την περιφέρειά του. Η περίοδος ανάπαλσης P_{puls} μπορεί να υπολογιστεί μέσω της αδιαβατικής ταχύτητας του ήχου, δηλαδή υπολογίζοντας το χρόνο που χρειάζεται ένα ακουστικό κύμα για να διασχίσει όλη τη διάμετρο του αστέρα σταθερής πυκνότητας ϱ. Η αδιαβατική ταχύτητα του ήχου δίνεται από τη σχέση:

$$U_s = \sqrt{\frac{\gamma\Pi}{\rho}} \tag{1.41}$$

όπου Π η πίεση και $\gamma = C_\Pi / C_V$ ο λόγος των ειδικών θερμοτήτων.

Η πίεση βρίσκεται από τις εξισώσεις της μαγνητοϋδροδυναμικής, θεωρώντας υδροστατική ισορροπία και (μη ρεαλιστικά) σταθερή πυκνότητα ϱ, από τη σχέση:

$$\frac{d\Pi}{dr} = -G\frac{M_r\,\rho}{r^2} \tag{1.42}$$

όπου r η απόσταση από το κέντρο του αστέρα και M_r η έλκουσα μάζα (συνάρτηση της r). Χρησιμοποιώντας τη βασική σχέση:

$$M = \rho V = \frac{4}{3}\pi r^3 \tag{1.43}$$

όπου M και V η μάζα και ο όγκος του αστέρα αντίστοιχα, και συνδυάζοντας τις σχέσεις (1.42) – (1.43) προκύπτει η διαφορική εξίσωση:

$$\frac{\mathrm{d}\Pi}{\mathrm{dr}} = -\frac{4}{3}\mathrm{G}\pi\mathrm{r}\rho^2 \tag{1.44}$$

Θεωρείται ότι στην επιφάνεια του αστέρα ακτίνας *R* η πίεση έχει μηδενική τιμή $\Pi(R)= 0$. Επομένως, η σχέση (1.44) δίνει ως λύση:

$$\Pi(\mathrm{r}) = \frac{2}{3}\mathrm{G}\pi\rho^2(\mathrm{R}^2 - \mathrm{r}^2) \tag{1.45}$$

οπότε, η περίοδος ανάπαλσης μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\mathrm{P_{puls}} \approx 2\int_0^{\mathrm{R}} \frac{\mathrm{dr}}{\mathrm{U_s}} \approx 2\int_0^{\mathrm{R}} \frac{\mathrm{dr}}{\sqrt{\frac{2}{3}\mathrm{G}\gamma\pi\rho(\mathrm{R}^2 - \mathrm{r}^2)}} \tag{1.46}$$

Τέλος, λύνοντας το παραπάνω ολοκλήρωμα προκύπτει:

$$\mathrm{P_{puls}^2}\,\rho = \frac{3\pi}{2\mathrm{G}\gamma} = \sigma\tau\alpha\theta. \;\rightarrow\; \mathrm{P_{puls}}\,\rho^{-1/2} = \mathrm{Q} \tag{1.47}$$

όπου *Q* σταθερά της ανάπλασης και μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (Breger 2000):

$$\log \mathrm{Q} = -\log \mathrm{f_{puls}} + 0.3\mathrm{M_{bol}} + 3\log \mathrm{T} + 0.5\log\frac{\mathrm{M}}{\mathrm{M_\odot}} - 12.7085 \tag{1.48}$$

όπου f_{puls} η συχνότητα της ανάπαλσης σε c/d.

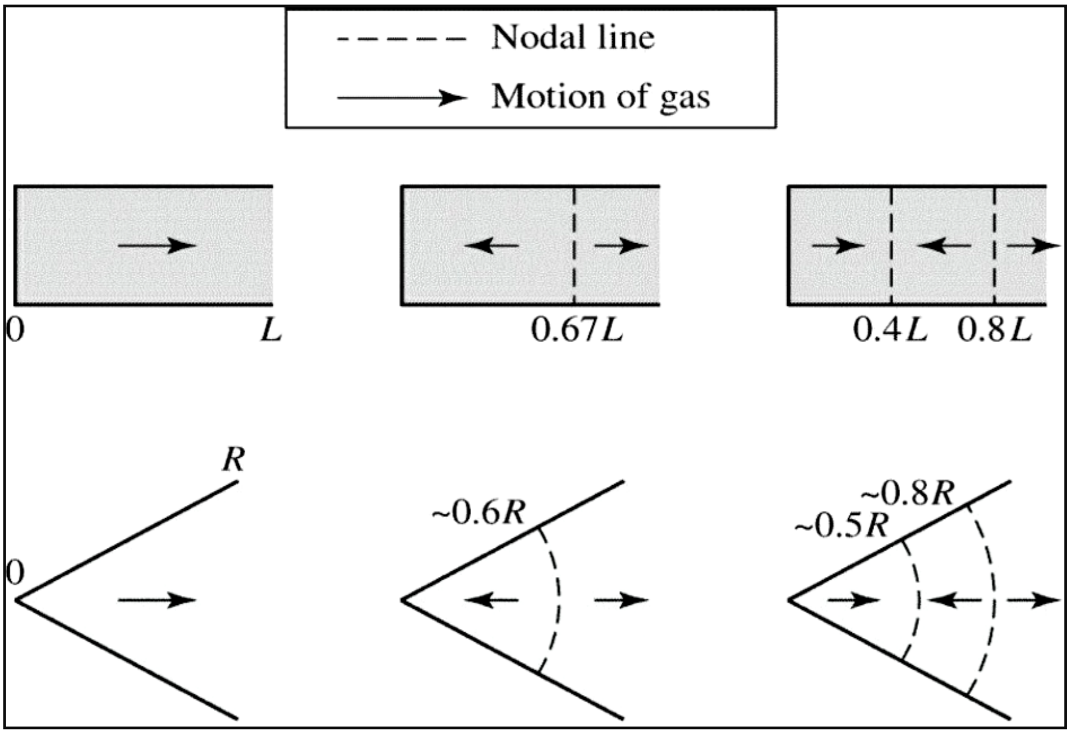
Η ακτινική ανάπαλση (f-mode) των παλλόμενων αστέρων μπορεί να επεξηγηθεί με στάσιμα κύματα σε τρία στάδια:

- **Θεμελιώδης τρόπος** (Fundamental mode): Το αέριο ξεκινά από το κέντρο και διαδίδεται ακτινικά προς την περιφέρεια του αστέρα (εικ. 1.16α).
- **Πρώτος απόηχος** (First overtone): Ένα μέρος του κύματος, αφού διανύσει κάποια απόσταση από το κέντρο, επιστρέφει προς τα πίσω, ενώ το υπόλοιπο συνεχίζει προς την επιφάνεια (εικ. 1.16β). Ο λόγος μεταξύ των συχνοτήτων του πρώτου αποήχου και της θεμελιώδους είναι ~0.75.
- **Δεύτερος απόηχος** (second overtone): Το κύμα που προηγουμένως όδευε προς την επιφάνεια «σπάει» και αυτό σε δύο κομμάτια, εκ των οποίων το ένα συνεχίζει προς την περιφέρεια διαστέλλοντας την ακτίνα του αστέρα και το άλλο επιστρέφει προς τα πίσω και συγκρούεται με ένα νέο εξερχόμενο κύμα από το κέντρο του αστέρα. Αυτή ακριβώς η πέδηση εμποδίζει το νέο κύμα να διαφύγει, και πλέον τα εξωτερικά κελύφη αρχίζουν να καταρρέουν, προκαλώντας έτσι τη συστολή του αστέρα (εικ. 1.16γ).

Η ποιοτική εξήγηση του φαινομένου της ανάπαλσης προέρχεται από τον Shapley (1914) και η μαθηματική θεμελίωση από τον Eddington (1919). Οι παλλόμενοι αστέρες μπορούν να θεωρηθούν θερμοδυναμικές μηχανές που παράγουν θερμότητα. Το κάθε στρώμα του εσωτερικού φλοιού του αστέρα αποτελείται από αέρια και κατά την ανάπαλση παράγει έργο ίσο με $\Pi \mathrm{d}V$ (όπου Π η πίεση και V ο όγκος). Αν λοιπόν ισχύει για το έργο:

$$\oint \Pi \mathrm{dV} > 0 \tag{1.49}$$

σε κάποιο στρώμα του αστέρα, τότε αυτό το στρώμα δύναται να μεταδώσει θερμότητα στα περίγυρά του. Αθροίζοντας αλγεβρικά πλέον το έργο που παράγεται από το κάθε στρώμα του αστέρα, μπορούν να προκύψουν συμπεράσματα για την εξέλιξη της ανάπαλσης. Εάν το συνολικό έργο είναι θετικό, τότε η ταλάντωση, η οποία ξεκίνησε από κάποιο τυχαίο στρώμα, ενισχύεται και παράγονται οι παρατηρούμενες αναπάλσεις Στην αντίθετη περίπτωση, δηλαδή εάν το συνολικό έργο είναι αρνητικό, τότε η αρχική ταλάντωση δεν εξελίσσεται. Αρχικά λοιπόν, το πλάτος της ανάπαλσης είναι μεταβαλλόμενο, έως το σημείο όπου το συνολικό έργο από όλα τα στρώματα είναι μηδέν και επέρχεται ισορροπία στο πλάτος της ανάπαλσης. Όπως σε όλες τις θερμοδυναμικές μηχανές, έτσι και σε ένα στρώμα του αστέρα, το έργο που παράγεται είναι ίσο με τη διαφορά εισερχόμενης-εξερχόμενης θερμότητας του στρώματος. Για τη συντήρηση των αναπάλσεων απαιτείται κατά τη στιγμή που εισέρχεται η θερμότητα σε ένα στρώμα, αυτό να βρίσκεται σε μέγιστη θερμοκρασία και καθώς η θερμότητα εξέρχεται, το στρώμα να βρίσκεται στην ελάχιστη θερμοκρασία. Δηλαδή, όλα τα στρώματα του αστέρα πρέπει να απορροφούν τη θερμότητα τη χρονική στιγμή της μεγίστης συμπίεσής τους. Με αυτόν τον τρόπο, η πίεση θα λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της κατά τη μέγιστη συμπίεση των στρωμάτων (συστολή του αστέρα) και οι ταλαντώσεις θα ενισχύονται.

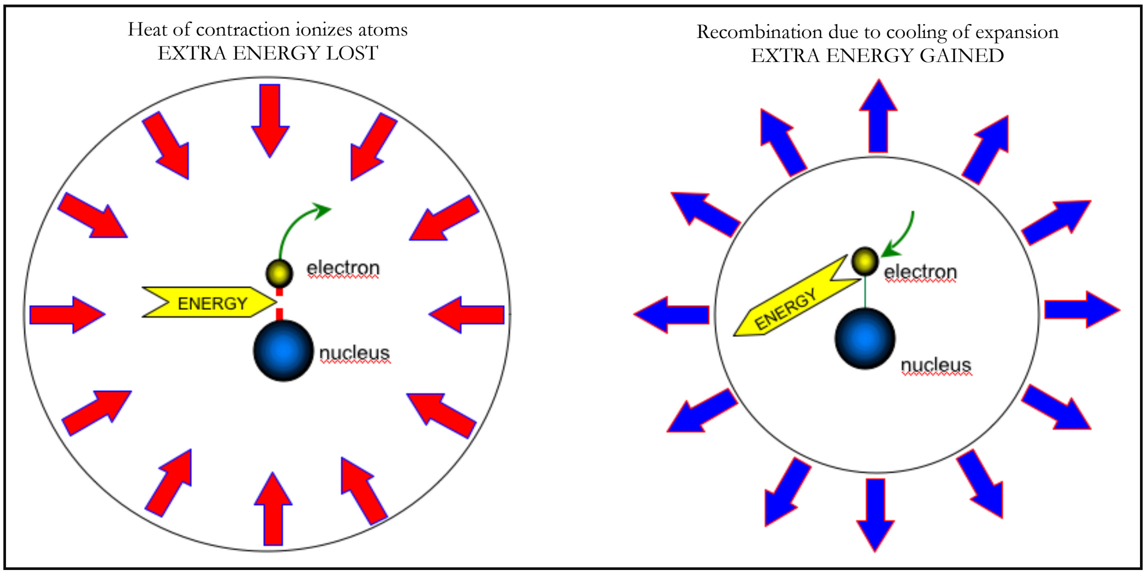


(α) (β) (γ)

Εικόνα 1.16. Στάδια ακτινικής ανάπαλσης των παλλόμενων αστέρων. (α): θεμελιώδης, (β) πρώτος απόηχος, (γ) δεύτερος απόηχος.

Ο μηχανισμός των αναπάλσεων εισήχθη από τον Eddington (1919), ονομάζεται «μηχανισμός της βαλβίδας» (valve mechanism) και περιγράφεται παρακάτω: Η συμπίεση ενός στρώματος του αστέρα από άλλα υπερκείμενα οδηγεί στην αύξηση της αδιαφάνειάς του, οπότε, το στρώμα αυτό μπορεί να παίξει αφενός τον ρόλο του «φράγματος» της ενέργειας από τον πυρήνα προς την επιφάνεια του αστέρα και αφετέρου ταυτόχρονα να ωθεί προς την επιφάνεια τα υπερκείμενα στρώματα λόγω διαστολής του. Κατόπιν τούτου, εφόσον το στρώμα συνεχώς λαμβάνει ποσότητα ενέργειας από τον πυρήνα, διαστέλλεται και ταυτόχρονα γίνεται πιο διαφανές, επιτρέποντας έτσι μέρος της ενέργειας να κατευθυνθεί προς την επιφάνεια. Καθώς όμως χάνει ενέργεια, επανασυμπιέζεται έως ότου επαναληφθεί όλη η διαδικασία. Όμως, γνωρίζοντας από τον νόμο του Kramer ότι η αδιαφάνεια κ εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την πυκνότητα του στρώματος ($\kappa \sim \rho T^{-3.5}$), φαινόταν ότι δεν υπήρχαν περιοχές στο εσωτερικό του αστέρα ικανές να συντηρήσουν τις αναπάλσεις, αφού λόγω της συμπίεσης η αδιαφάνεια των στρωμάτων αυξάνεται, οπότε η ενέργεια δεν μπορεί να διαδοθεί.

Η απάντηση ήρθε από τον Zhevakin (1953, 1963) και η μαθηματική επεξεργασία έγινε από τους Baker & Kippenhahn (1965) και Cox (1980), οι οποίοι, παρατηρώντας τη μεγαλύτερη ευαισθησία της αδιαφάνειας στη θερμοκρασία απ' ότι στην πυκνότητα, πρότειναν ότι οι αναπάλσεις μπορούν να δημιουργηθούν σε στρώματα του αστέρα όπου επικρατούν μεγάλες θερμοκρασίες, τα οποία ονόμασαν «Ζώνες μερικού ιονισμού». Σε αυτά τα στρώματα του αστέρα το αέριο είναι μερικώς ιονισμένο. Επομένως, η συμπίεση ενός τέτοιου στρώματος από άλλα υπερκείμενα έχει ως αποτέλεσμα τον περαιτέρω ιονισμό του αερίου παρά την αύξηση της θερμοκρασίας του. Η μικρότερη αύξηση της θερμοκρασίας και η αύξηση της πυκνότητας λόγω συμπίεσης προκαλούν αύξηση της αδιαφάνειας. Με παρόμοιο τρόπο, κατά τη διάρκεια της διαστολής του στρώματος η θερμοκρασία δεν μειώνεται όπως αναμενόταν, αφού τα ελεύθερα πλέον ιόντα συγκρούονται με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και χάνουν ενέργεια. Βέβαια, ο όρος της πυκνότητας υπερισχύει και πάλι και η αδιαφάνεια μειώνεται καθώς μειώνεται η πυκνότητα κατά τη διαστολή του στρώματος. Ωστόσο, το στρώμα του αστέρα με μερικώς ιονισμένο αέριο είναι ικανό να απορροφά ενέργεια κατά τη διάρκεια της συμπίεσης και να τη διαδίδει στα υπερκείμενα στρώματα με τη διαστολή του, να συστέλλεται ξανά λόγω συμπίεσης κ.ο.κ. Η προαναφερόμενη διαδικασία ονομάζεται «μηχανισμός-κ». Σε μια ζώνη μερικού ιονισμού, ο μηχανισμός-κ ενισχύεται από την τάση της θερμότητας να διαδίδεται μέσα στο στρώμα κατά τη διάρκεια της συμπίεσης, πολύ απλά διότι η θερμοκρασία του έχει αυξηθεί λιγότερο από ότι στα παρακείμενα στρώματα, τα οποία δεν είναι ιονισμένα. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται «μηχανισμός-γ» λόγω του ότι ο μικρότερος λόγος των ειδικών θερμοτήτων γ επιτυγχάνεται από τις αυξημένες τιμές των ειδικών θερμοτήτων C_Π και C_V. Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι οι ζώνες μερικού ιονισμού μπορούν να δημιουργήσουν και να συντηρήσουν τις ταλαντώσεις εντός των αστέρων και να ρυθμίζουν τη διάδοση ενέργειας μεταξύ των αστρικών κελυφών.



Εικόνα 1.17. Μηχανισμός–κ. Αριστερά: Συμπίεση του στρώματος που οδηγεί σε αύξηση πυκνότητας και θερμοκρασίας και σε ιονισμό του αερίου. Δεξιά: διαστολή του στρώματος με επανασύνδεση των ιόντων και απώλεια ενέργειας.

Στους περισσότερους παλλόμενους αστέρες υπάρχουν δύο κύριες ζώνες ιονισμού. Η πρώτη είναι αρκετά ευρεία, ονομάζεται «Ζώνη μερικού ιονισμού του υδρογόνου», έχει θερμοκρασία 10,000-15,000 K και λαμβάνει χώρα τόσο ο ιονισμός του ατομικού υδρογόνου (HI→HII) όσο και ο πρώτος ιονισμός του ηλίου (HeI→HeII). Η δεύτερη, η οποία βρίσκεται σε βαθύτερα στρώματα του αστέρα, ονομάζεται «Ζώνη μερικού ιονισμού του HeII», έχει θερμοκρασία περίπου 40,000 K και εκεί διαδραματίζεται ο δεύτερος ιονισμός του ηλίου (HeII→HeIII). Το βάθος αυτών των ζωνών μέσα στον αστέρα καθορίζει τις ιδιότητες των αναπάλσεών του.

Έως τώρα έχει εξηγηθεί ο μηχανισμός των ακτινικών αναπάλσεων, όμως, υπάρχουν περιπτώσεις αστέρων των οποίων οι επιφάνειες δεν ταλαντώνονται ομοιόμορφα. Στην πραγματικότητα ο αστέρας εκτελεί μια πιο πολύπλοκη ταλάντωση, κατά την οποία μερικές περιοχές της επιφανείας του διαστέλλονται, ενώ ταυτόχρονα άλλες συστέλλονται. Αυτές οι «μη ακτινικές ταλαντώσεις τύπου-p» (p-modes) περιγράφονται ικανοποιητικά από τα πραγματικά μέρη των συναρτήσεων των σφαιρικών αρμονικών $Y_l^m(\theta,\varphi)$ (βλ. §4.3). Στην περίπτωση των μη-ακτινικών ταλαντώσεων, τα ηχητικά κύματα μπορούν και κινούνται οριζόντια γύρω από την αστρική επιφάνεια λόγω διαφοράς πίεσης σε διάφορα σημεία της.

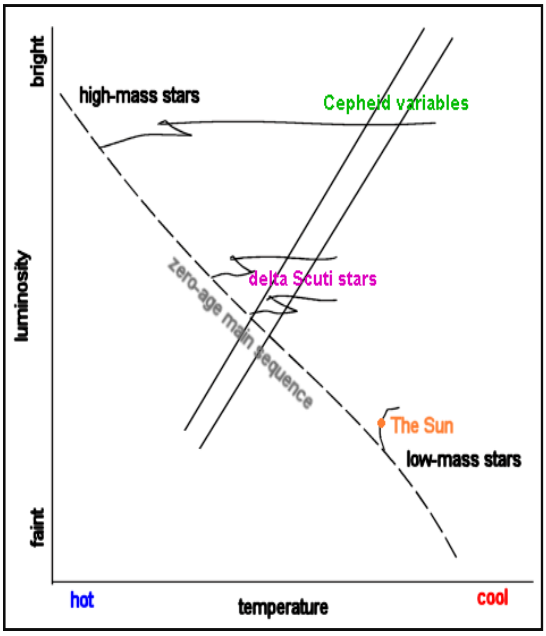
Όπως στην προηγούμενη περίπτωση η διαφορά πίεσης είναι υπεύθυνη για κάποιες από τις μη ακτινικές ταλαντώσεις, έτσι και η βαρύτητα μπορεί να παίξει τον ρόλο του τροφοδότη κάποιων άλλων μη-ακτινικών ταλαντώσεων, οι οποίες ονομάζονται «μη ακτινικές ταλαντώσεις τύπου-g» (g-modes). Αυτές οι ταλαντώσεις οφείλονται σε βαρυτικά κύματα ή ακόμα και σε παρέλξεις από κάποιον συνοδό αστέρα (στην περίπτωση που ο αστέρας ανήκει σε κάποιο διπλό ή πολλαπλό σύστημα).

Οι περιοδικές μεταβολές στους παλλόμενους αστέρες είναι εμφανείς τόσο σε μικρές όσο και σε μεγάλες χρονικές κλίμακες. Μια από τις μακροπρόθεσμες μεταβολές είναι γνωστή ως «φαινόμενο Blazhko», το οποίο είναι γνωστό εδώ και περισσότερο από 100 χρόνια (Blazhko 1907). Πρόκειται για μια περιοδική μεταβολή του πλάτους και της φάσης ανάπαλσης με περίοδο πολύ μεγαλύτερη από την περίοδο ανάπαλσης του αστέρα. Παραμένει ακόμη άγνωστος ο μηχανισμός, ο οποίος προκαλεί αυτήν τη μεταβολή και οι σύγχρονες έρευνες της αστεροσεισμολογίας επικεντρώνονται στην επίλυση αυτού του προβλήματος.

1.3.2. Αστέρες τύπου δ Scuti

Αυτού του τύπου οι αστέρες βρίσκονται στη ζώνη αστάθειας των κλασσικών Κηφειδών επάνω στην ΚΑ ή κινούνται από την ΚΑ στον κλάδο των γιγάντων. Μπορούν να βρεθούν σε διάφορες εξελικτικές φάσεις, συμπεριλαμβανομένης και της φάσης πριν την ΚΑ. Ο φασματικός τους τύπος κυμαίνεται από A2 έως F8 και η τάξη φωτεινότητάς τους από V (νάνοι) έως III (γίγαντες). Πρόκειται για εξαιρετικά βραχυπερίοδους αστέρες, με τυπική περίοδο ανάπαλσης από 20 min έως 8 hrs. Αστέρες τέτοιου τύπου με μεγάλη περιεκτικότητα σε μέταλλα έχουν μάζες από 1.5 $M_\odot$ έως 2.5 $M_\odot$, ενώ αυτοί με μικρότερη μεταλλικότητα έχουν από 1 $M_\odot$ έως 2 $M_\odot$. Οι δ Sct αστέρες μπορούν να ταξινομηθούν είτε βάσει του εύρους μεταβολής της λαμπρότητάς τους είτε βάσει της περιεκτικότητάς τους σε μέταλλα.

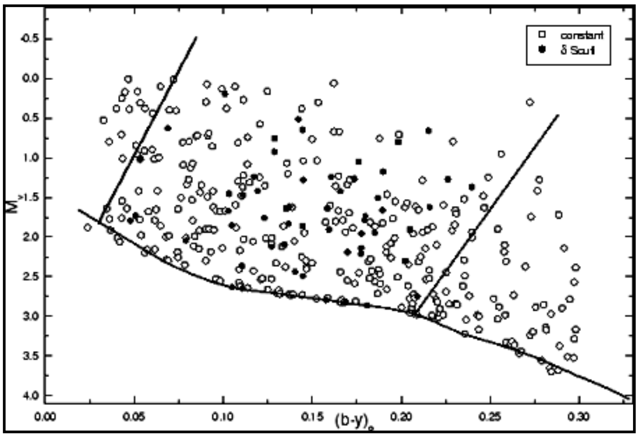
Οι αστέρες με το μεγαλύτερο πλάτος ανάπαλσης, γνωστοί ως High Amplitude Delta Sct (HADS), έχουν εύρος μεταβολής μεγαλύτερο του 0.1 mag στο *V*-φίλτρο, ενώ αυτοί



Εικόνα 1.18. Η θέση των αστέρων δ Sct στο διάγραμμα H-R.

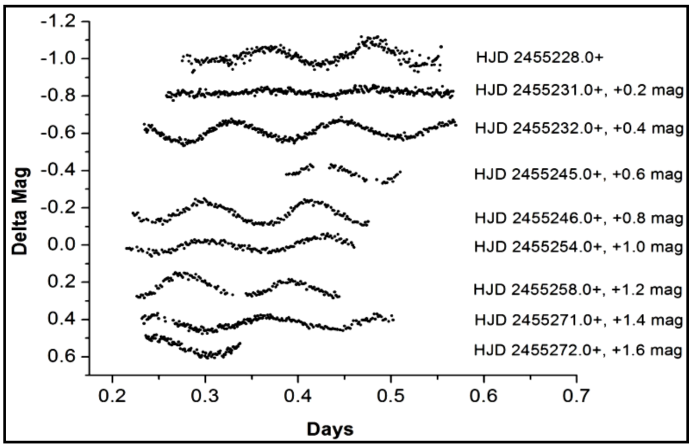
με το μικρότερο πλάτος παρουσιάζουν εύρος μικρότερο του 0.1 mag και είναι γνωστοί ως Low Amplitude Delta Sct (LADS). Οι HADS αστέρες έχουν ακτινικές αναπάλσεις με σχεδόν σταθερή περίοδο και βρίσκονται στον κλάδο των υπογιγάντων στο διάγραμμα H-R. Οι LADS αστέρες μπορούν να βρίσκονται σε φάση είτε πριν την ΚΑ είτε στην ΚΑ ή ακόμα και σε μεταγενέστερη φάση, ενώ μπορεί να είναι πολυπεριοδικοί. Έχουν πολύ καλά καθορισμένη σχέση περιόδου-φωτεινότητας και χρησιμοποιούνται ως δείκτες αποστάσεων.

Η δεύτερη ταξινόμηση γίνεται βάσει της περιεκτικότητας αυτών των αστέρων σε μέταλλα. Οι πλούσιοι σε μέταλλα αστέρες (πληθυσμού Ι) είναι γνωστοί ως δ Sct. Οι αστέρες που είναι φτωχοί σε μέταλλα είναι γνωστοί ως SX Phoenicis αστέρες ή πληθυσμού ΙΙ. Έχουν ίδιο τρόπο ανάπλασης με τους HADS αστέρες, διαφέρουν όμως εντελώς στη χημική σύσταση. Έχουν σχέση περιόδου-φωτεινότητας και βρίσκονται κυρίως σε σφαιρωτά σμήνη και στη γαλαξιακή άλω. Ορισμένοι δ Sct αστέρες πάλλονται μόνο ακτινικά, όμως στην πλειοψηφία τους παρουσιάζουν μεγάλο αριθμό μη-ακτινικών (τύπου-p) αναπάλσεων. Εκτιμάται ότι οι δ Sct αστέρες αποτελούν το μεταβατικό στάδιο μεταξύ των Κηφειδών αστέρων, οι οποίοι παρουσιάζουν μεγάλα πλάτη και ακτινικές αναπάλσεις εντός της κλασσικής ζώνης αστάθειας, και των θερμών μη-ακτινικά παλλόμενων αστέρων.



Εικόνα 1.19. Σύγκριση του αριθμού αστέρων τύπου δ Sct (γεμάτοι κύκλοι) με άλλους αστέρες σταθερής λαμπρότητας (άδειοι κύκλοι) στο κάτω μέρος της ζώνης αστάθειας.
Πηγή: http://www.univie.ac.at/tops

Ο μηχανισμός διέγερσης και συντήρησης των αναπάλσεων στους δ Sct αστέρες είναι ο μηχανισμός-κ (βλ. §1.3.1). Κατά τη διάρκεια ενός κύκλου ανάπαλσης η κινητική ενέργεια της ανάπαλσης τροφοδοτείται από την εσωτερική ενέργεια του «μείγματος» αερίων και ακτινοβολίας στις ζώνες μερικού ιονισμού των H και He. Η διέγερση των αναπάλσεων σε αυτές τις ζώνες, και συγκεκριμένα στη ζώνη ιονισμού HeII με θερμοκρασία ~48,000 K, είναι αρκετή για να αντισταθμίσει την απόσβεσή τους στα υποκείμενα στρώματα. Ο Chevalier (1971), βασιζόμενος σε θεωρητικά μοντέλα, έδειξε ότι οι ζώνες μερικού ιονισμού HI και HeI κοντά στις 15,000 K βρίσκονται πολύ κοντά στην αστρική επιφάνεια και πιθανόν δεν παίζουν κάποιο ιδιαίτερο ρόλο στις αναπάλσεις.



Εικόνα 1.20. Καμπύλες φωτός του τύπου δ Sct αστέρα BI CMi (Liakos & Niarchos 2011k), ο οποίος παρουσιάζει πληθώρα συχνοτήτων ανάπαλσης με κυρίαρχη την 8.248 c/d.

Η σχέση περιόδου-φωτεινότητας για τους δ Sct βρέθηκε από τους McNamara & Feltz (1978):

$$\mathrm{M_v} = -3.25(12)\log \mathrm{P_{puls}} - 1.45(11) \tag{1.50}$$

Ειδικότερα, για τους δ Sct πληθυσμού I με ακτινικές αναπάλσεις έχει βρεθεί (López de Coca et al. 1990):

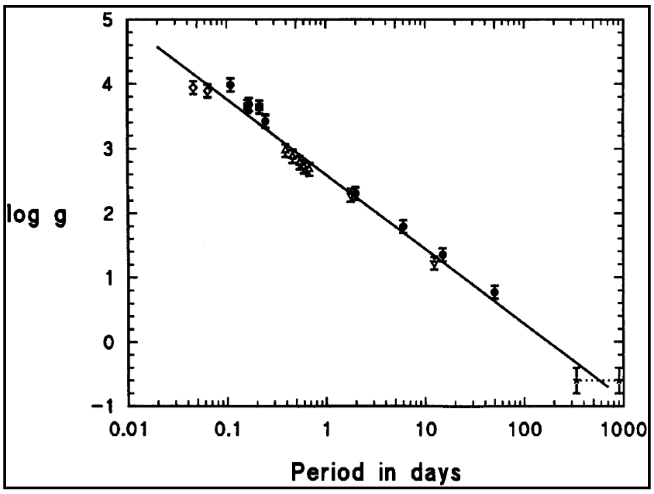
$$\log \mathrm{P_{puls}} = -0.3\mathrm{M_{bol}} - 3.195\log \mathrm{T} + 11.90 \tag{1.51}$$

που ονομάζεται σχέση P-L-C (Period-Luminosity-constant).

Η επιφανειακή επιτάχυνση της βαρύτητας *g* πρακτικά δείχνει το εξελικτικό στάδιο του αστέρα (βλ. σχέση 1.20). Για τους δ Sct αστέρες έχουν βρεθεί εμπειρικά οι παρακάτω σχέσεις, οι οποίες συνδέουν την περίοδο της κυρίαρχης ανάπλασης (δηλαδή της ανάπαλσης με το μεγαλύτερο πλάτος) με την επιτάχυνση της βαρύτητας. Η σχέση (1.52) (Claret et al. 1990) αναφέρεται ειδικά στους δ Sct αστέρες, ενώ η σχέση (1.53) (Fernie 1995) γενικά στους ακτινικά παλλόμενους αστέρες:

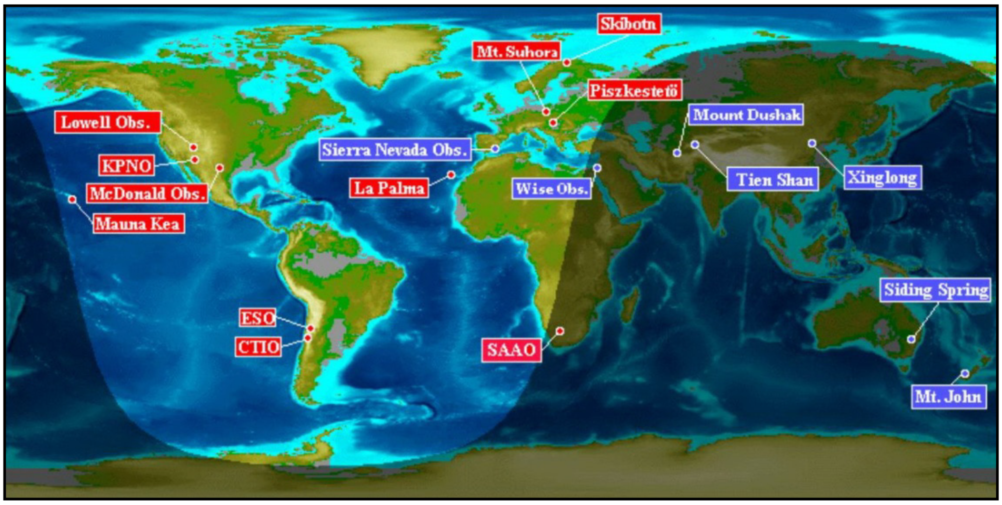
$$\log g = 2.68(10) - 1.21\,(11)\log \mathrm{P_{puls}} \tag{1.52}$$

$$\log g = 2.62(4) - 1.14\,(4)\log \mathrm{P_{puls}} \tag{1.53}$$



Εικόνα 1.21. Συσχέτιση της επιφανειακής επιτάχυνσης της βαρύτητας με την κυρίαρχη περίοδο ανάπαλσης για διαφόρους τύπους ακτινικά παλλόμενων αστέρων (Fernie 1995).

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι έχει δημιουργηθεί ένα παγκόσμιο δίκτυο ερευνητών για τους δ Sct αστέρες (delta Sct network) και εδρεύει στο πανεπιστήμιο της Βιέννης[1]. Βάσει αυτού του δικτύου οι αστρονόμοι μπορούν είτε να συνδυάζουν τις παρατηρήσεις τους με άλλες από διάφορα αστεροσκοπεία είτε να συμμετέχουν σε κάποιο διεθνές πρόγραμμα παρατηρήσεων. Ο λόγος της δημιουργίας αυτού του δικτύου είναι η όσο το δυνατόν συνεχής και αδιάκοπη παρατήρηση δ Sct αστέρων, κάτι το οποίο απαιτεί παρατηρήσεις από αστεροσκοπεία όλης της Γης. Στόχος αυτού του δικτύου είναι η βελτίωση των λύσεων των πολυπεριοδικών αναπάλσεων των δ Sct αστέρων.



Εικόνα 1.22. Θέσεις των αστεροσκοπείων τα οποία είναι μέλη του παγκοσμίου δικτύου ερευνών και παρατηρήσεων δ Sct αστέρων.

[1]http://www.univie.ac.at/tops/dsn

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Όργανα και τεχνικές παρατήρησης

2.1. CCD

Το ακρωνύμιο CCD προέρχεται από τις των λέξεις "Charge Coupled Devices" (στοιχεία συζευγμένου φορτίου). Αποτελεί τον ιδανικότερο ανιχνευτή ακτινοβολίας, καθώς μπορεί να καταγράψει φως από ένα μεγάλο μέρος του Η/Μ φάσματος, από τις ακτίνες Χ έως το υπέρυθρο. Η ικανότητά του να καταγράφει σχεδόν όλη την προσπίπτουσα ακτινοβολία αποτέλεσε το σημαντικότερο κριτήριο για την αντικατάσταση του φωτοηλεκτρικού φωτόμετρου και του φωτογραφικού φιλμ ως ανιχνευτές. Σήμερα, οι CCD κάμερες αποτελούν την αιχμή του δόρατος στην ανίχνευση της ακτινοβολίας τόσο στα σύγχρονα επίγεια αστεροσκοπεία όσο και στα διαστημικά τηλεσκόπια.

2.1.1. Γενικά χαρακτηριστικά

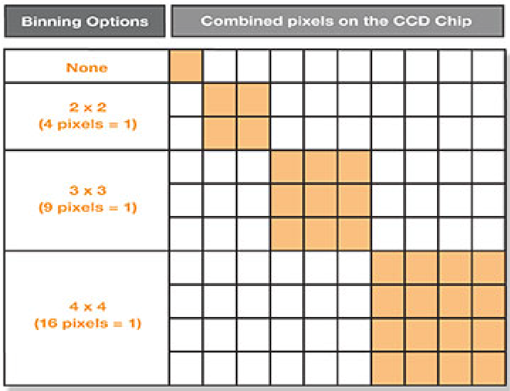
Το CCD αποτελείται από μικρούς ισοεμβαδικούς στοιχειώδεις ανιχνευτές ακτινοβολίας, τα επονομαζόμενα *εικονοστοιχεία* (pixels). Σύμφωνα με το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, όταν φωτόνια προσπίπτουν σε μέταλλα προσδίδουν ενέργεια στα ηλεκτρόνιά τους, τα οποία συγκρατούνται ασθενέστατα από τα άτομά τους. Ως αποτέλεσμα προκύπτει η διαφυγή των ηλεκτρονίων από τα άτομα και η κίνηση τους επάνω στο μέταλλο. Η «παγίδευση» των ελευθέρων ηλεκτρονίων, τα οποία καλούνται «φωτοηλεκτρόνια», από τους καταγραφείς φορτίου και η μεταφορά τους στον ενισχυτή κι εν συνεχεία στον Η/Υ καταλήγει στη δημιουργία της ψηφιακής εικόνας.

Τα CCD έχουν παραμέτρους, οι οποίες και τα χαρακτηρίζουν, και φυσικά αποτελούν κριτήριο για την αξιολόγησή τους. Συγκεκριμένα οι κυριότερες παράμετροι είναι:

- **Φασματική ευαισθησία**: Απόκριση του ανιχνευτή σε διάφορα μήκη κύματος.
- **Κβαντική απόδοση**: Λόγος των φωτονίων που τελικά καταγράφονται προς το πλήθος των προσπιπτόντων φωτονίων στον ανιχνευτή.
- **Θόρυβος**: Επιπλέον ηλεκτρόνια τα οποία καταγράφονται από τον ανιχνευτή λόγω θερμιονικής τάσης των ηλεκτρονικών συστημάτων του και προστίθενται στο τελικό αποτέλεσμα.
- **Γραμμικότητα απόκρισης**: Αναλογία των σημάτων εισόδου και εξόδου.
- **Ανάλυση**: Αριθμός των εικονοστοιχείων που διαθέτει ο ανιχνευτής.
- **Χωρητικότητα αποθήκευσης της πληροφορίας (bit)**: Ικανότητα αποθήκευσης της πληροφορίας. Δηλαδή, το μέγιστο μέγεθος πληροφορίας το οποίο μπορεί να αποθηκευτεί και ο χρόνος αποθήκευσης.
- **Δυναμική περιοχή**: Περιοχή της έντασης της ακτινοβολίας που μπορεί να ανιχνεύσει το σύστημα.
- **Γραμμική διακριτική ικανότητα**: Ελάχιστη χωρική απόσταση μεταξύ δύο ταυτόχρονα προσπιπτόντων κατανομών φωτονίων (πληροφορία), οι οποίες μπορούν να διακριθούν σαν ξεχωριστές. Πρακτικά, αναφέρεται στο μέγεθος των εικονοστοιχείων.

Συγχώνευση εικονοστοιχείων (Binning)

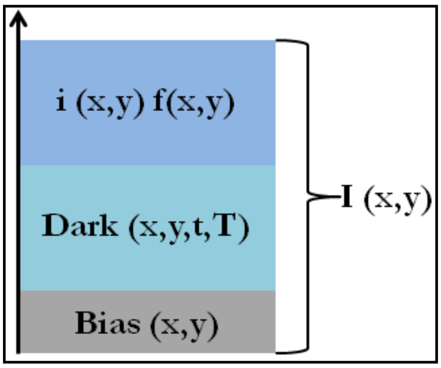
Η μέθοδος της συγχώνευσης (binning) των εικονοστοιχείων αποτελεί μια ειδική τεχνική που χρησιμοποιείται προκειμένου να προκύπτουν καλύτερα ποσοτικά αποτελέσματα. Ενοποιώντας ένα πλήθος από εικονοστοιχεία και φτιάχνοντας ένα μεγαλύτερο, το οποίο καλείται μέγα-εικονοστοιχείο (superpixel), ουσιαστικά, τα φωτόνια που θα έπεφταν στα επιμέρους εικονοστοιχεία τώρα πέφτουν στο μεγαλύτερο (εικ. 2.1), ελαττώνοντας έτσι το λόγο σήματος προς θόρυβο. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η καταγραφή για δεδομένο χρόνο έκθεσης μεγαλύτερης ποσότητας φωτοηλεκτρονίων, κάτι που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο.



Εικόνα 2.1. Συγχώνευση των εικονοστοιχείων CCD.

2.1.2. Σχηματισμός και επεξεργασία ψηφιακής εικόνας

Επάνω στα εικονοστοιχεία προσπίπτουν φωτόνια με κάποιο χρονικό ρυθμό. Εφόσον είναι γνωστό εκ κατασκευής του CCD το εμβαδόν του κάθε εικονοστοιχείου, μπορεί να μετρηθεί η ένταση της ακτινοβολίας I_ν. Η συνολική ένταση είναι η I(x,y), όπου x και y οι διαστάσεις του εικονοστοιχείου. Αυτή όμως η ένταση περιέχει και το άθροισμα όλων των ηλεκτρονικών θορύβων που υπεισέρχονται από τα ηλεκτρονικά συστήματα του CCD. Η πραγματική ένταση i(x,y), η οποία προέρχεται από το παρατηρούμενο αντικείμενο, είναι το ζητούμενο μέγεθος και αυτό που θα πρέπει να απεικονίζει η τελική εικόνα. Οι παράμετροι που υπεισέρχονται ως ηλεκτρονικοί θόρυβοι στην πρωτότυπη εικόνα (raw image) είναι οι εξής:



Εικόνα 2.2. Συνιστώσες φορτίου σε εικονοστοιχείο CCD.

- **Bias – b(x,y)**: Φορτίο που προϋπάρχει στο CCD και είναι σταθερό και ανεξάρτητο του χρόνου έκθεσης και της θερμοκρασίας.
- **Dark – d(x,y,t,T):** Θερμικός θόρυβος ο οποίος παράγεται κατά την έκθεση και είναι άμεσα εξαρτημένος από τον χρόνο έκθεσης και τη θερμοκρασία.

Για λόγους πληρότητας αναφέρεται ότι υπάρχει ακόμα ένας ηλεκτρονικός θόρυβος που υπεισέρχεται στην τελική καταγραφή και καλείται *θόρυβος αποφόρτισης*, αλλά είναι πολύ μικρότερος σε σχέση με τους προαναφερόμενους. Δημιουργείται κατά τη μεταφορά των φωτοηλεκτρονίων από το εικονοστοιχείο από το οποίο προήλθαν έως τον ενισχυτή. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι μια καλή αστρονομική CCD κάμερα έχει θόρυβο αποφόρτισης περίπου 2-3 e^-/pixel, ενώ μια τυπική τιμή bias είναι ~800 e^-/pixel.

Εκ κατασκευής τα εικονοστοιχεία των CCD δεν αποκρίνονται το ίδιο στην προσπίπτουσα ακτινοβολία. Επομένως, ορίζεται σαν **Flat field – f(x,y)** ο παράγοντας απόκρισης του εικονοστοιχείου, ο οποίος είναι σταθερός και ανεξάρτητος του χρόνου έκθεσης και της θερμοκρασίας.

Επομένως, η ένταση της ακτινοβολίας σχετίζεται με τις παραπάνω παραμέτρους ως εξής:

$$\mathrm{I(x,y) = b(x,y) + d(x,y) + i(x,y) \cdot f(x,y)} \tag{2.1}$$

και επιλύοντας ως προς *i*(x,y) προκύπτει:

$$\mathrm{i(x,y) = \frac{I(x,y) - b(x,y) - d(x,y)}{f(x,y)}} \tag{2.2}$$

το οποίο είναι και το ζητούμενο αποτέλεσμα.

Η επεξεργασία των CCD εικόνων έχει τη λογική πράξεων μεταξύ μαθηματικών πινάκων διαστάσεων x×y. Όπως και με τους πίνακες, έτσι και με τις ψηφιακές εικόνες μπορούν να τελεστούν μαθηματικές πράξεις (π.χ. αφαίρεση) με τη χρήση ειδικών λογισμικών. Για να αφαιρεθούν οι προαναφερόμενοι θόρυβοι από την πρωτότυπη εικόνα, πρέπει να ληφθούν κάποιες εικόνες που να τους απεικονίζουν. Επιπλέον, πρέπει να ληφθούν εικόνες οι οποίες να αποτυπώνουν και τον παράγοντα απόκρισης του κάθε εικονοστοιχείου στην ακτινοβολία. Τελικά, οι εικόνες διόρθωσης (calibration images) που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία είναι οι εξής:

- **Εικόνα αντιστάθμισης – Bias**: Λαμβάνεται σε πλήρες σκοτάδι με πολύ μικρό χρόνο έκθεσης (σχεδόν μηδενικό) πριν και στο τέλος της παρατήρησης.
- **Εικόνα σκότους – Dark image**: Λαμβάνεται σε πλήρες σκοτάδι και έχει χρόνο έκθεσης και θερμοκρασία ίδια με αυτά των πρωτότυπων εικόνων.
- **Εικόνα απόκρισης – Flat field**: Σε αυτήν αποτυπώνονται τόσο ο παράγοντας απόκρισης του κάθε εικονοστοιχείου όσο και τα αποτελέσματα της σκέδασης του φωτός από κόκκους σκόνης στην επιφάνεια των οπτικών του συστήματος (κάτοπτρα τηλεσκοπίου, φίλτρα, προστατευτικό τζάμι του CCD), τα οποία αλλοιώνουν την ποιότητα της εικόνας. Επίσης, αποτυπώνεται και ο ανομοιόμορφος φωτισμός του πεδίου από έκκεντρο φωτισμό (vignetting). Λαμβάνεται σε ομοιόμορφα φωτισμένη επιφάνεια (π.χ. ουρανός κατά το λυκόφως ή το λυκαυγές) με χρόνο έκθεσης μερικά δευτερόλεπτα και με μέγιστη ένταση ακτινοβολίας τα ~2/3 της δυναμικής περιοχής του CCD. Για λόγους πληρότητας, θα έπρεπε να λαμβάνονται εικόνες θερμικού θορύβου και για τις εικόνες απόκρισης, όπως γίνεται για τις πρωτότυπες, αλλά λόγω του σχετικά μικρού τους χρόνου έκθεσης δεν θεωρείται αναγκαίο, καθότι ο αντίστοιχος θόρυβος είναι αμελητέος.

Για καθένα από τα παραπάνω είδη εικόνων πρέπει να λαμβάνονται όσες το δυνατόν περισσότερες εικόνες και σαν τελική του κάθε είδους (Master) λαμβάνεται η διάμεσός τους, έτσι ώστε να εξαλειφθεί ο τυχαίος ηλεκτρονικός θόρυβος, ο οποίος δημιουργείται κατά τη λήψη τους. Πρέπει όμως να σημειωθεί, ότι ο θόρυβος bias υπεισέρχεται σε όλες τις εικόνες (πρωτότυπες, θερμικού θορύβου και απόκρισης), επομένως πρέπει να αφαιρεθεί σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\text{Διορθωμένη εικόνα}\ \mathrm{(x,y) = \frac{raw(x,y) - d(x,y)}{f(x,y) - b(x,y)}} \tag{2.3}$$

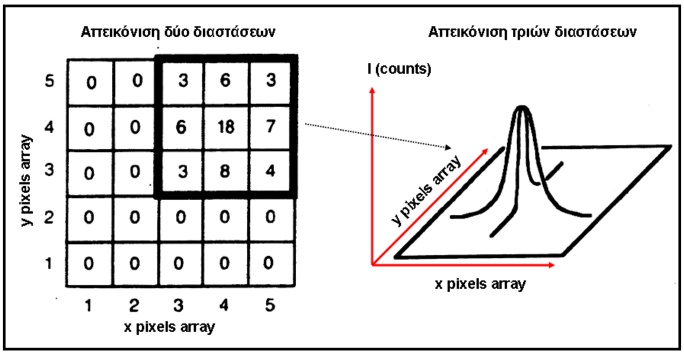
Η τελική εικόνα είναι διορθωμένη από ηλεκτρονικούς θορύβους, αλλά και απαλλαγμένη τόσο από ανομοιομορφίες λόγω απόκρισης ή έκκεντρου φωτισμού (κανονικοποιημένη στη μέγιστη τιμή της έντασης) όσο και από «ανωμαλίες» λόγω σκόνης ή φθοράς των οπτικών συστημάτων.

2.2. Τεχνικές παρατήρησης

Οι CCD κάμερες, όπως αναφέρθηκε ήδη, χρησιμοποιούνται ευρέως στις παρατηρήσεις αστρονομικών αντικειμένων με δύο κύριες εφαρμογές: α) τη φωτομετρία και β) τη φασματοσκοπία.

2.2.1. Φωτομετρία

Η CCD κάμερα τοποθετείται συνήθως στην κύρια εστία του τηλεσκοπίου, εκτός αν απαιτείται διαφορετικά, όπως π.χ. σε περιπτώσεις ταυτόχρονης παρατήρησης και με άλλα όργανα ή με παραπάνω από μια CCD. Με τη φωτομετρία καταμετράται η ροή F της ακτινοβολίας από μια αστρική πηγή (αριθμός των counts) με απώτερο σκοπό τον υπολογισμό της έντασης και της λαμπρότητας της πηγής. Σε μια φωτομετρική εικόνα αποτυπώνονται οι αστρονομικοί στόχοι ως μεμονωμένες πηγές ακτινοβολίας. Για τους αστέρες, ιδανικό θα ήταν το μέγεθός τους επάνω σε μια εικόνα να καλύπτει μόλις ένα εικονοστοιχείο, καθώς θεωρούνται με πολύ καλή προσέγγιση σημειακές πηγές. Στην πραγματικότητα όμως, τα είδωλα των αστέρων καλύπτουν παραπάνω από ένα εικονοστοιχεία, λόγω ατμοσφαιρικών κυρίως φαινομένων (seeing). Η περιγραφή της κατανομής της έντασης του αστέρα επάνω στα εικονοστοιχεία γίνεται με την κατανομή Gauss (εικ. 2.3).



Εικόνα 2.3. Αριστερά: Ο αριθμός των counts (εντός των μικρών τετραγώνων), τα οποία καταγράφονται σε κάθε εικονοστοιχείο του CCD. Δεξιά: Τρισδιάστατη απεικόνιση του CCD και η Gaussian καμπύλη, η οποία περιγράφει την ένταση της ακτινοβολίας στα εικονοστοιχεία που περικλείονται στο έντονο πλαίσιο του αριστερού σχήματος.

Αφού μετρηθούν τα συνολικά counts του αστέρα, βάσει της Gaussian καμπύλης του, μπορεί να υπολογιστεί το φαινόμενο μέγεθός του m από τη σχέση Pogson:

$$\mathrm{m = C - 2.5 \log F} \tag{2.4}$$

όπου η σταθερά C ονομάζεται «σταθερά μηδενικού σημείου» και χρησιμοποιείται για την προσαρμογή της κλίμακας μεγεθών του CCD στην κλίμακα απολύτων μεγεθών. Υπολογίζεται από έναν μόνο αστέρα γνωστού φαινομένου μεγέθους του πεδίου και έτσι εύκολα μπορούν να υπολογιστούν τα μεγέθη των υπολοίπων αστέρων. Στην πραγματικότητα αυτή η σταθερά είναι μια μέση τιμή των σταθερών που προκύπτουν από την παραπάνω σχέση, χρησιμοποιώντας όλους τους γνωστούς αστέρες του πεδίου.

Ανάλογα με το είδος της μελέτης που γίνεται, χρησιμοποιείται και το καταλληλότερο είδος φωτομετρίας:

- **Διαφορική φωτομετρία διαφράγματος**: Προσδιορίζει το σχετικό φαινόμενο μέγεθος μιας πηγής σε σύγκριση με εκείνο μιας άλλης (βλ. §3.1.1).
- **Φωτομετρία όλου του ουρανού (απόλυτη)**: Προσδιορίζει φαινόμενα μεγέθη αστέρων σε μεγάλο τμήμα του ουρανού και σε μεγάλο εύρος αερίων μαζών.

- **Φωτομετρία Point Spread Function (PSF)**: Προσδιορίζει τα φαινόμενα μεγέθη σημειακών πηγών ενός πεδίου από την αναλυτική συνάρτηση που προκύπτει από αυτές, βάσει των εικονοστοιχείων που καταλαμβάνουν. Συνήθως χρησιμοποιείται για πυκνά αστρικά πεδία.
- **Φωτομετρία επιφανείας**: Προσδιορίζει το φαινόμενο μέγεθος εκτεταμένων πηγών ανά μονάδα επιφανείας.

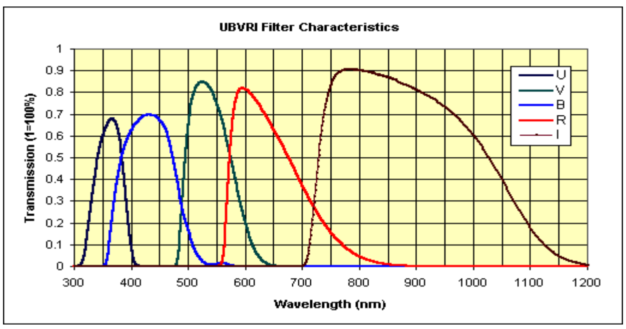
Στην αστρική φωτομετρία χρησιμοποιούνται φωτομετρικά φίλτρα ώστε να απομονώνονται φασματικές περιοχές, οι οποίες δίνουν διαφορετική πληροφορία, ανάλογα πάντα με το είδος της μελέτης. Τα CCD δεν αποκρίνονται το ίδιο σε όλα τα μήκη κύματος του Η/Μ φάσματος, επομένως, η χρήση έγχρωμων καμερών θα εισήγαγε μεγάλο βαθμό υποκειμενικότητας. Γι’ αυτόν τον λόγο, έχει επικρατήσει η χρήση ασπρόμαυρων CCD καμερών εφοδιασμένες με τροχό έγχρωμων φίλτρων τοποθετημένο μπροστά από το CCD.

Το πιο ευρέως διαδεδομένο φωτομετρικό σύστημα είναι το σύστημα *UBVRI* του Bessell (ή Johnson-Cousins) και οι φωτομετρικές μελέτες της παρούσας διατριβής βασίζονται σε αυτό. Το ακρωνύμιο *UBVRI* προκύπτει από τα αρχικά των λέξεων Ultraviolet, Blue, Visual, Red, Infrared όπου είναι τα τμήματα του Η/Μ φάσματος στα οποία γίνονται οι παρατηρήσεις. Στον πίνακα 2.1 δίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους. Συγκεκριμένα, δίνονται τα στοιχεία των επιστρώσεων του κάθε φίλτρου, το μήκος κύματος λ_{max} για το οποίο η διαπερατότητά τους έχει τη μέγιστη τιμή και το εύρος του μήκους κύματος της καμπύλης διαπερατότητας τους στη μισή διαπερατότητα (Full Width at Half Maximum-FWHM). Η εικόνα 2.4 δείχνει γραφικά τη διαπερατότητά αυτών των φίλτρων.

Πίνακας 2.1. Χαρακτηριστικά των φίλτρων *UBVRI* (Bessell) σύμφωνα με την υαλουργία Schott.

Φίλτρο	Στοιχεία	λ_{max} [nm]	FWHM [nm]
U	1 mm + 2 mm S8612 + 2 mm WG295	367	66
B	2 mm GG385 + 1 mm BG1 + 2 mm BG39	436	94
V	2 mm GG495 + 3 mm BG40	545	88
R	3 mm OG570 + 2 mm KG3	638	138
I	2 mm RG9 + 3 mm WG295	800	320

Άλλα φωτομετρικά συστήματα που υπάρχουν είναι: Sloan Digital Sky Survey (*ugriz*), Hipparcos-Tycho (H_p, B_T, V_T), the Strömgren 4-colour (*ubvy*), the Geneva ($UBB_1B_2VV_1G$), 2MASS (*JHK*) κ.α.

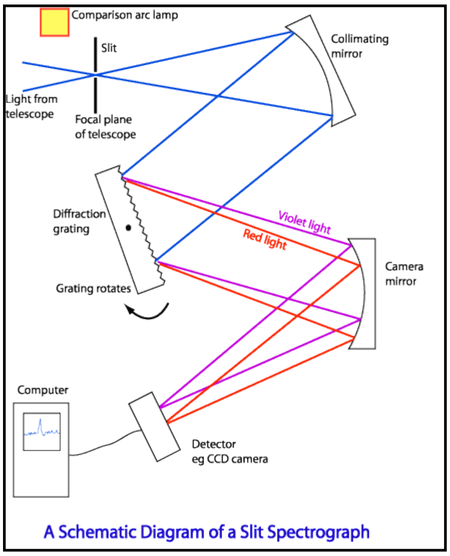


Εικόνα 2.4. Διαπερατότητα των φωτομετρικών φίλτρων *UBVRI* (Bessell). Πηγή: www.sbig.com

2.2.2. Φασματοσκοπία

Η φασματοσκοπία μελετά: (α) την ένταση των φασματικών γραμμών (φασματοφωτομετρία) απορρόφησης ή εκπομπής, (β) την κίνηση των γραμμών μιας πηγής και γ) το προφίλ των γραμμών. Η CCD κάμερα τοποθετείται μετά από αναλυτή δέσμης που ονομάζεται *φασματογράφος*. Τα δύο βασικότερα είδη φασματογράφων είναι ο φασματογράφος *πρίσματος* και ο φασματογράφος *φράγματος*.

Ο φασματογράφος φράγματος χρησιμοποιείται ευρέως, καθώς προσφέρει πληθώρα ευκολιών. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στο φαινόμενο της περίθλασης και συμβολής του φωτός. Περιέχει μια γυάλινη επιφάνεια στην οποία έχουν χαραχθεί πολλές λεπτές γραμμές και η οποία ονομάζεται *φράγμα περίθλασης* (diffraction grating). Το φως ανακλάται σε αυτές, σκεδάζεται, συμβάλει και τελικά αναλύεται. Αυτό το είδος φασματογράφου μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλο το Η/Μ φάσμα, ενώ μεγάλο πλεονέκτημα αποτελεί η διακριτική του ικανότητα, καθώς αυτή εξαρτάται μόνο από το πλήθος των χαραγών του φράγματος περίθλασης. Αυτού του τύπου οι φασματογράφοι διαχωρίζονται στις κατηγορίες μικρής, μεσαίας, υψηλής, και υπερυψηλής ανάλυσης. Το φως που αναλύεται προέρχεται από μια λεπτή σχισμή για τους εξής λόγους: i) Η δέσμη πρέπει να προσπίπτει κάθετα στο φράγμα και ii) να προέρχεται εξ ολοκλήρου από την πηγή και όχι από το υπόβαθρο.



Εικόνα 2.5. Διάταξη ενός φασματογράφου φράγματος. Επάνω αριστερά διακρίνεται η λάμπα βαθμονόμησης (comparison lamp) και η σχισμή (slit) από την οποία εισέρχεται το φως. Εν συνεχεία, το φως ανακλάται στο ορθοσκοπικό κάτοπτρο (collimating mirror) το οποίο στέλνει τη δέσμη παράλληλα στο φράγμα περίθλασης (diffraction grating). Οι μονοχρωματικές δέσμες πλέον κατευθύνονται στο κατευθυντήριο κάτοπτρο (camera mirror) το οποίο τις συγκλίνει επάνω στον καταγραφέα (detector).

Έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά, ότι οι δέσμες που εξέρχονται από το φράγμα έχουν πεπερασμένο πλάτος και υπάρχει αλληλοεπικάλυψη μεταξύ τους στο φάσμα. Γι' αυτόν τον λόγο χρησιμοποιείται φακός (ή κάτοπτρο ανάλογα με τη διάταξη), ο οποίος παίζει το ρόλο του κατευθυντήρα και τοποθετείται από το CCD σε απόσταση ίση με την εστιακή του απόσταση. Πλέον, οι ακτίνες της δέσμης συγκεκριμένου μήκους κύματος εξέρχονται παράλληλα από το φράγμα περίθλασης, συγκλίνουν και πέφτουν στο ίδιο σημείο του CCD. Με αυτόν τον τρόπο σε κάθε σημείο του CCD αντιστοιχούν δέσμες μόνο του συγκεκριμένου μήκους κύματος και διαχωρίζονται με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια από τις παράπλευρες.

Οι κυριότερες παράμετροι ενός φασματογράφου φράγματος είναι:

- **Φασματική ανάλυση** (spectral resolution): Η ελάχιστη διαφορά μηκών κύματος $\Delta\lambda$ που μπορεί να διαχωρίσει ο φασματογράφος σαν δύο διαφορετικές ακτίνες.
- **Διακριτική ικανότητα** (resolving power): Ορίζεται ως ο λόγος $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$, δηλαδή ο λόγος ενός συγκεκριμένου μήκους κύματος λ προς τη φασματική ανάλυση σε αυτό μήκος κύματος. Είναι ευθέως ανάλογος με το πλήθος των γραμμών του φράγματος.

- **Φασματικό εύρος του φράγματος**: Εξαρτάται από το πλήθος των γραμμών του φράγματος και τη μεταξύ τους απόσταση.

2.3. Αστεροσκοπεία λήψης δεδομένων

Σε αυτήν την παράγραφο παρουσιάζεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη των δεδομένων πάνω στα οποία βασίστηκαν τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής.

2.3.1. Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο[1]

Σε αυτό ο αστεροσκοπείο πραγματοποιήθηκε περίπου το 90% του συνόλου των φωτομετρικών παρατηρήσεων για την παρούσα διατριβή. Βρίσκεται στην οροφή του τμήματος Φυσικής του πανεπιστημίου Αθηνών στην Πανεπιστημιούπολη (Ζωγράφου) και είναι σε υψόμετρο ~220 m στους πρόποδες του όρους Υμηττού. Το αστεροσκοπείο λειτουργεί από το 2000 με κύριο όργανο ένα κατοπτρικό τηλεσκόπιο διαμέτρου 40 cm στεγασμένο μέσα σε θόλο διαμέτρου 5 m, κατασκευασμένο από την εταιρία DFM engineering[2]. Το τηλεσκόπιο, ο θόλος και η CCD κάμερα διαχειρίζονται εξ ολοκλήρου μέσω Η/Υ από την αίθουσα ελέγχου του αστεροσκοπείου. Το 2009 τοποθετήθηκε ένα δεύτερο κατοπτρικό τηλεσκόπιο διαμέτρου 20 cm (celestron[3]) στην ταράτσα του αστεροσκοπείου πάνω σε ρομποτική στήριξη (Skywatcher[4] NEQ-6 Pro) και ο χειρισμός του γίνεται επίσης μέσα από την αίθουσα ελέγχου. Το 2010, αυτό το τηλεσκόπιο αντικαταστάθηκε από ένα άλλο νευτώνειο κατοπτρικό διαμέτρου 25 cm (Skywatcher), το οποίο χρησιμοποιείται είτε σαν βοηθητικό τηλεσκόπιο σε αυτό των 40 cm είτε σαν ανεξάρτητο όργανο για λαμπρότερους στόχους.

Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν τρία τηλεσκόπια και δύο CCD κάμερες εφοδιασμένες με τροχό φίλτρων και τα φίλτρα *UBVRI* (Bessell). Στον πίνακα 2.2 παρουσιάζεται αναλυτικά ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε. Συγκεκριμένα, αναφέρεται ο τύπος του τηλεσκοπίου, η διάμετρός του *D*, ο εστιακός του λόγος *f*, η CCD με την οποία συνδυάστηκε στις παρατηρήσεις και το εύρος πεδίου *FoV* που επιτυγχανόταν για τον κάθε συνδυασμό. Στον πίνακα 2.3 και στην εικ. 2.6 δίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των CCD καμερών, ενώ στις εικόνες 2.7-2.8 παρουσιάζονται οι φωτογραφίες του εξοπλισμού.

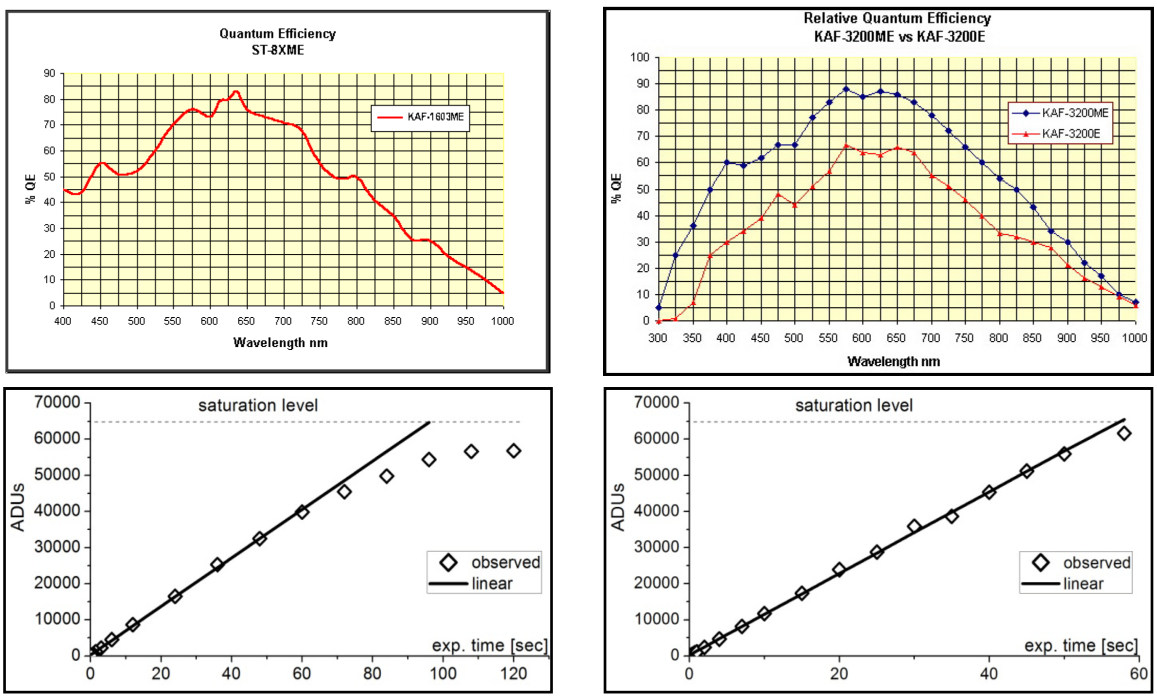
Πίνακας 2.2. Συνδυασμοί τηλεσκοπίων και CCD καμερών που χρησιμοποιήθηκαν στις παρατηρήσεις από το Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο.

Τύπος τηλεσκοπίου	D [cm]	f	CCD	FoV
Cassegrain DFM	40	8.0	SBIG[5] ST-10XME, SBIG ST-8XMEI	16′×11′ 15′×10′
Newtonian reflector Skywatcher	25	4.7	ST-8XMEI	40′×26′
Newtonian reflector Celestron	20	5.1	ST-8XMEI	45′×32′

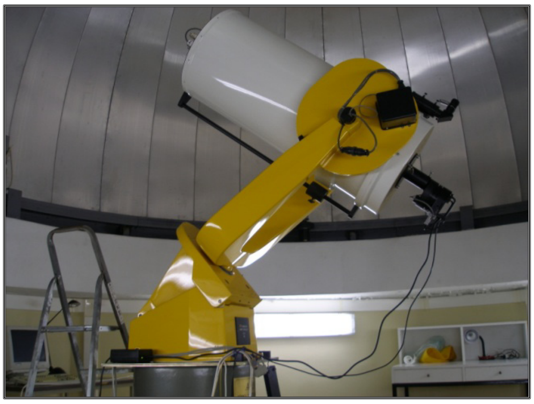
[1]http://observatory.phys.uoa.gr
[2]http://www.dfmengineering.com
[3]http://www.celestron.com
[4]http://www.skywatcher.com
[1]http://www.sbig.com

Πίνακας 2.3. Τεχνικά χαρακτηριστικά των CCD καμερών του Γεροσταθοπούλειου πανεπιστημιακού αστεροσκοπείου.

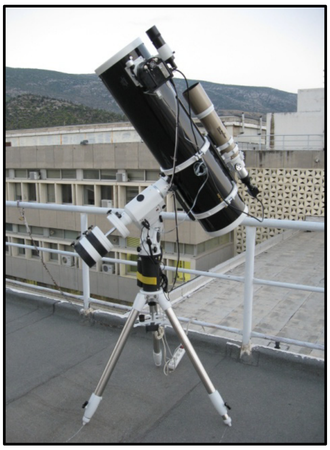
Παράμετρος	ST-8XMEI	ST-10XME
CCD chip	Kodak KAF-1603ME	Kodak KAF-3200ME
Pixel Array [pixels]	1530×1020	2184×1472
CCD Size [mm]	13.8×9.2	14.9×10
Total Pixels ($\times 10^6$)	1.6	3.2
Pixel Size [μm^2]	9×9	6.8×6.8
Full Well Capacity [e$^-$]	~100,000	~77,000
Dark Current [e$^-$/pixel/sec at 0°C]	1	0.5
Shutter	Electromechanical	
Exposure [sec]	0.12 to 3600	
Time resolution [msec]	10	
A/D Converter [bits]	16	
A/D Gain [e$^-$/ADU]	2.3	1.3
Read Noise [e$^-$ RMS]	15	8.8
Full Frame Download [sec]	3.7	8.7
Cooling - standard	Single Stage Thermoelectric, Active Fan, —35 °C w/air only	
Temperature Regulation [°C]	±0.1	
PC connectivity	USB 1.1	
Guiding chip	-	Dual CCD Self-Guiding with built-in TC-237 CC



Εικόνα 2.6. Διαγράμματα των κβαντικών αποδόσεων (επάνω) και της γραμμικότητας (κάτω) για τις CCD κάμερες ST-8XMEI (αριστερά) και ST-10XME (δεξιά).



Εικόνα 2.7. Αριστερά: Ο θόλος διαμέτρου 5 m του Γεροσταθοπούλειου πανεπιστημιακού αστεροσκοπείου. Δεξιά: Το τηλεσκόπιο Cassegrain διαμέτρου 40 cm επάνω σε ρομποτική ισημερινή στήριξη διχαλωτού τύπου. Στην εστία του τηλεσκοπίου έχει προσαρμοστεί η CCD κάμερα ST-10XME.



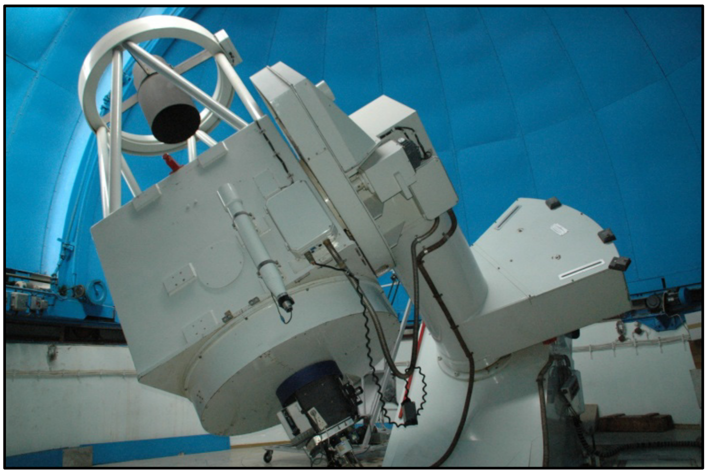
Εικόνα 2.8. Τα νευτώνεια κατοπτρικά τηλεσκόπια διαμέτρου 20 cm (αριστερά) και 25 cm (δεξιά) επάνω σε ρομποτική γερμανική ισημερινή στήριξη στην ταράτσα του πανεπιστημιακού αστεροσκοπείου. Στα τηλεσκόπια έχει προσαρμοστεί η CCD ST-8XMEI, ενώ, επιπροσθέτως, στο τηλεσκόπιο των 25 cm έχει τοποθετηθεί παράλληλα ένα διοπτρικό τηλεσκόπιο διαμέτρου 8 cm με μια χαμηλότερης ποιότητας CCD για αυτόματη οδήγηση του κυρίως οργάνου.

2.3.2. Αστρονομικός σταθμός Κρυονερίου Κορινθίας[1]

Το αστεροσκοπείο Κρυονερίου βρίσκεται σε υψόμετρο 930 m στο όρος Κυλήνη κοντά στο χωριό Κρυονέρι του νομού Κορινθίας. Είναι ιδιοκτησία του Ινστιτούτου Αστρονομίας και Αστροφυσικής του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών και ιδρύθηκε το 1972. Διαθέτει κατοπτρικό τηλεσκόπιο διαμέτρου 1.23 m τύπου Cassegrain (f/13), το οποίο κατασκευάστηκε από την εταιρία Grubb Parsons Co., Newcastle το 1975. Το τηλεσκόπιο είναι τοποθετημένο επάνω σε ισημερινή στήριξη, στεγάζεται σε θόλο διαμέτρου 12 m (εικ. 2.9) και διαθέτει τη CCD κάμερα Apogee[2] Ap47p με τροχό φίλτρων και το σετ φίλτρων *UBVRI* (Bessell). Τα χαρακτηριστικά της CCD δίνονται στον πίνακα 2.4 και στα διαγράμματα της εικόνας 2.10.

[1]http://www.astro.noa.gr/ASK_1.2m/ask_main_gr.htm
[2]http://www.ccd.com/

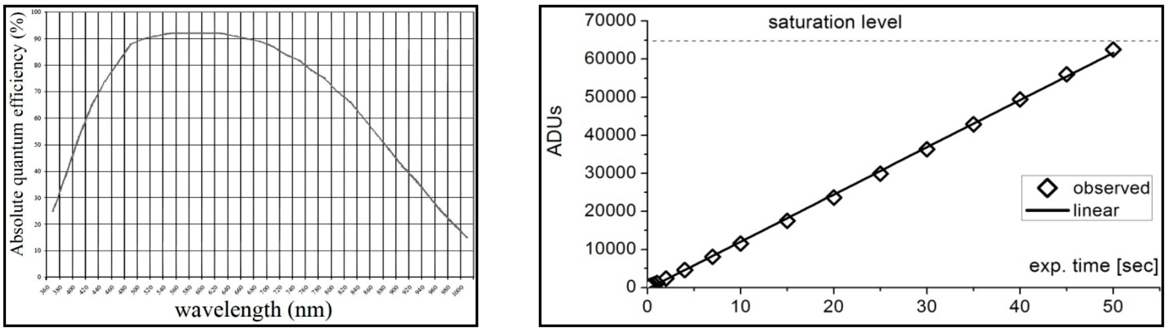
Ο παραπάνω εξοπλισμός χρησιμοποιήθηκε για φωτομετρία και εξυπηρέτησε παρατηρήσεις είτε σε στόχους σχετικά αμυδρούς για τις δυνατότητες του πανεπιστημιακού αστεροσκοπείου (βλ. §2.3.1) είτε σε στόχους όπου η μεγάλη φωτομετρική ακρίβεια ήταν αναγκαία, δεδομένου ότι το πεδίο (*FoV*) που διαθέτει είναι μόλις 3'×3' και αποδίδει μια κλίμακα 0.17"/pixel.



Εικόνα 2.9. Ο θόλος (αριστερά) και το τηλεσκόπιο διαμέτρου 1.23 m με τη CCD Ap47p στην κύρια εστία του (δεξιά) του αστρονομικού σταθμού Κρυονερίου.

Πίνακας 2.4. Τεχνικά χαρακτηριστικά της CCD κάμερας του αστρονομικού σταθμού Κρυονερίου.

CCD chip	Marconi 47-10
Pixel Array [pixels]	1024×1024
CCD Size [mm]	13.3×13.3
Total Pixels (×10^6)	1.05
Pixel Size [μm^2]	13×13
Full Well Capacity [e^-]	~100,000
Dark Current [e^-/pixel/sec at −30°C]	1-2
Shutter	Vincent 25mm
Exposure [sec]	0.003 to 10,400
Time resolution [msec]	10
A/D Converter [bits]	16
A/D Gain [e^-/ADU]	1.6
Read Noise [e^- RMS]	11.3
Full Frame Download [sec]	20
Cooling - standard	Single Stage Thermoelectric, Active Fan, −45-50 °C w/air only
Temperature Regulation [°C]	±0.1
PC connectivity	parallel



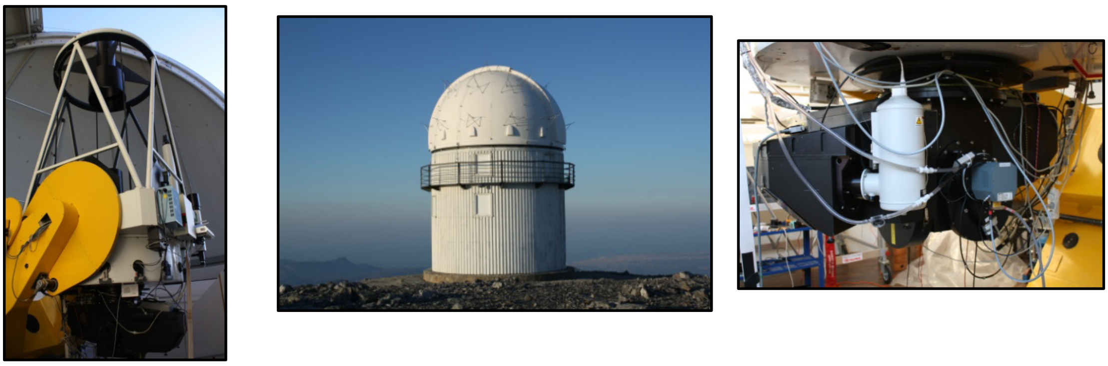
Εικόνα 2.10. Διαγράμματα κβαντικής απόδοσης (αριστερά) και γραμμικότητας (δεξιά) για τη CCD κάμερα Ap47p του αστεροσκοπείου Κρυονερίου.

2.3.3. Αστεροσκοπείο Σκίνακα[1]

Το αστεροσκοπείο του Σκίνακα βρίσκεται σε υψόμετρο 1750 m στο όρος Ίδη του νομού Ρεθύμνης. Είναι συνιδιοκτησία του πανεπιστημίου Κρήτης, του Ιδρύματος Τεχνολογίας & Έρευνας και του ινστιτούτου Max Planck εξωγήινης Φυσικής και εγκαινιάσθηκε το 1986. Σήμερα, διαθέτει τρία κατοπτρικά τηλεσκόπια διαμέτρων 0.3 m, 0.6 m και 1.3 m, αντίστοιχα, το καθένα εκ των οποίων στεγάζεται σε διαφορετικό θόλο.

Για τις παρατηρήσεις μας, που αφορούσαν στη λήψη φασματοσκοπικών δεδομένων, χρησιμοποιήθηκε το τηλεσκόπιο τύπου Ritchey-Chrétien διαμέτρου 1.29 m (f/7.6), στο οποίο είχε προσαρμοστεί ένας φασματογράφος φράγματος. Το τηλεσκόπιο κατασκευάστηκε από την εταιρία Carl Zeiss Oberkochen[2] και η στήριξη από την εταιρία DFM engineering Τα χαρακτηριστικά του φασματογράφου δίνονται στον πίνακα 2.5. Για την καταγραφή των φασμάτων χρησιμοποιήθηκε η CCD κάμερα ISA SITe 608 και τα κυριότερα χαρακτηριστικά της δίνονται στον πίνακα 2.6. και στην εικόνα 2.13.

Εικόνα 2.11. Αεροφωτογραφία του Αστεροσκοπείου Σκίνακα.



Εικόνα 2.12. Το τηλεσκόπιο διαμέτρου 1.3 m (αριστερά), ο θόλος που το περικλείει (μέση) και ο φασματογράφος φράγματος τοποθετημένος επάνω στο τηλεσκόπιο (δεξιά), όπου διακρίνεται η λευκή φιάλη υγρού αζώτου, η οποία χρησιμοποιείται για την ψύξη της CCD κάμερας.

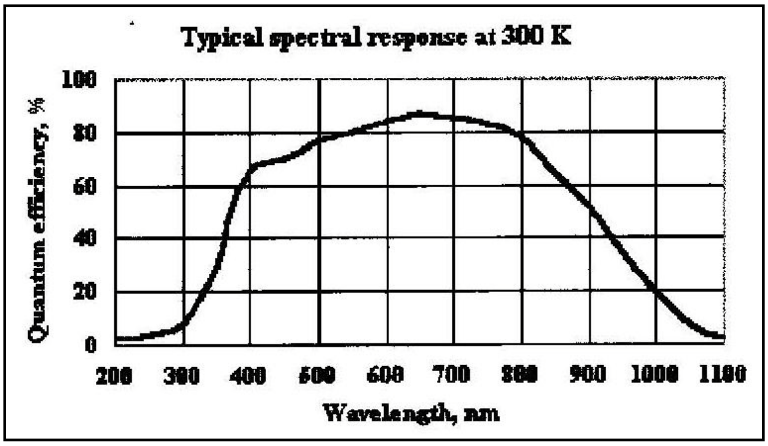
[1]http://skinakas.physics.uoc.gr
[2]http://www.zeiss.com

Πίνακας 2.5. Τεχνικά χαρακτηριστικά του φασματογράφου φράγματος του Αστεροσκοπείου Σκίνακα.

Slit [μm]	80
Diffraction grating [lines/mm]	2400
Scale [Å/pixel]	~0.55
Wavelength range [Å]	~1000 Å
R	~2500

Πίνακας 2.6. Τεχνικά χαρακτηριστικά της CCD κάμερας του φασματογράφου φράγματος του Αστεροσκοπείου Σκίνακα.

CCD chip	SITe ST-005A
Pixel Array [pixels]	2000×800
CCD Size [mm]	15×15
Total Pixels ($\times 10^6$)	1.6
Pixel Size [μm^2]	15×15
Full Well Capacity [e^-]	~85,000
Dark Current [e^-/pixel/sec at −133°C]	<3
A/D Converter [bits]	16
A/D Gain [e^-/ADU]	0.8
Read Noise [e^- RMS]	7.3
Full Frame Download [sec]	90
Cooling - standard	With liquid nitrogen up to −140 °C
PC connectivity	parallel



Εικόνα 2.13. Διάγραμμα κβαντικής απόδοσης της CCD κάμερας SITe ST-005A του αστεροσκοπείου Σκίνακα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Τεχνικές επεξεργασίας δεδομένων

Αντικείμενο αυτού του κεφαλαίου είναι οι τεχνικές που εφαρμόστηκαν για την επεξεργασία των δεδομένων, δηλαδή οι διαδικασίες οι οποίες λαμβάνουν χώρα μετά τη γενική επεξεργασία των εικόνων CCD, η οποία περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο (βλ. §2.1.2) και πριν την ανάλυσή τους όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο. Για την παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκαν φωτομετρικά και φασματοσκοπικά δεδομένα, τα οποία απαιτούν διαφορετικές τεχνικές επεξεργασίας. Οι τεχνικές αυτές παρουσιάζονται εκτενώς στα παρακάτω υποκεφάλαια και εφαρμόστηκαν στα δεδομένα όλων των συστημάτων τα οποία περιέχει η διατριβή.

3.1. Επεξεργασία φωτομετρικών δεδομένων

Ως φωτομετρικά δεδομένα ορίζονται οι εικόνες CCD, οι οποίες περιέχουν αστέρες σαν μεμονωμένες πηγές ακτινοβολίας. Με την τεχνική της φωτομετρίας (βλ. §2.2.1) μπορούν να μετρηθούν οι ροές ακτινοβολίας όλων των αστέρων του πεδίου και εκ των υστέρων να υπολογιστούν διάφορα άλλα μεγέθη (π.χ. η μεταβολή τους συναρτήσει του χρόνου).

3.1.1. Διαφορική φωτομετρία διαφράγματος

Η παρούσα διατριβή πραγματεύεται μεταβλητούς αστέρες, επομένως το κύριο ενδιαφέρον εστιάζεται σε μετρήσεις μεταβολής της λαμπρότητας του αστέρα συναρτήσει του χρόνου. Τονίζεται ότι στόχος είναι ο υπολογισμός του πλάτους της μεταβολής και η διάρκειά της και όχι ο υπολογισμός του φαινομένου μεγέθους της πηγής. Γι' αυτόν τον λόγο χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της διαφορικής φωτομετρίας διαφράγματος με το λογισμικό MUNIWIN v.1.26-v.1.29 (Hroch 1998).

Διαφράγματα

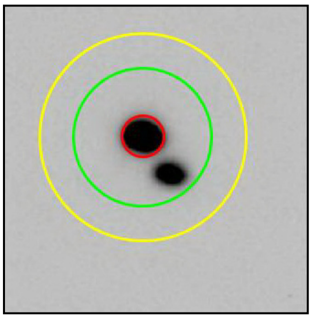
Τα διαφράγματα χρησιμοποιούνται για να καθοριστούν οι προς μελέτη πηγές ακτινοβολίας. Ως πηγές ακτινοβολίας θεωρούνται οι αστέρες και γενικά όλα τα ουράνια αντικείμενα, τα οποία βρίσκονται στο πεδίο παρατήρησης, αλλά και η *ακτινοβολία υποβάθρου ή θόρυβος υποβάθρου*, ο οποίος πρέπει να ληφθεί υπόψη και να αφαιρεθεί από τις μετρήσεις. Οι κυριότερες πηγές του θορύβου υποβάθρου είναι:

- Το διάχυτο φως από όλες τις πηγές του σύμπαντος
- Το Σεληνόφως
- Οι κοντινές τεχνητές πηγές φωτός (π.χ. λάμπες, φωτορύπανση)
- Το ζωδιακό φως
- Η κοσμική ακτινοβολία
- Το σέλας (κοντά σε πολικές περιοχές)

Στη μέθοδο της φωτομετρίας διαφράγματος ορίζονται τρία ομόκεντρα διαφράγματα, κοινά για όλους τους αστέρες που επιλέγονται για φωτομέτρηση, τα οποία με τη σειρά τους ορίζουν δύο ομόκεντρους δακτυλίους. Συγκεκριμένα, τα διαφράγματα είναι:

1. Διάφραγμα αστέρα (star aperture): Περιλαμβάνει <u>ολόκληρο</u> και <u>μόνο</u> τον αστέρα, του οποίου πρέπει να μετρηθεί η διακύμανση της λαμπρότητάς του
2. Εσωτερικό διάφραγμα για το υπόβαθρο (sky annulus in)
3. Εξωτερικό διάφραγμα για το υπόβαθρο (sky annulus out).

Το εσωτερικό διάφραγμα για το υπόβαθρο και το διάφραγμα του αστέρα ορίζουν έναν «νεκρό» δακτύλιο γύρω από τον αστέρα, μέσα στον οποίο μπορεί να τοποθετηθεί κάποια κοντινή πηγή φωτός που δεν πρέπει να ληφθεί υπόψη. Το εσωτερικό και εξωτερικό διάφραγμα ορίζουν έναν δεύτερο δακτύλιο μέσα στον οποίο καταμετράται το φωτεινό υπόβαθρο του ουρανού (διάχυτο φως που προέρχεται από κάθε φωτεινή πηγή του ουρανού). Τα παραπάνω παρουσιάζονται σχηματικά στην εικ. 3.1.



Εικόνα 3.1. Τα διαφράγματα που χρησιμοποιούνται στη φωτομετρία διαφράγματος. Ο κόκκινος κύκλος αντιστοιχεί στο διάφραγμα του αστέρα, και ο πράσινος και κίτρινος στο εσωτερικό και εξωτερικό διάφραγμα για το υπόβαθρο, αντίστοιχα.

Διαφορική μέτρηση

Στη σχέση (2.4) (βλ. §2.2.1) υπάρχει η σταθερά μηδενικού σημείου, η οποία είναι πολύ δύσκολο να υπολογιστεί. Επομένως, χρησιμοποιώντας πηγές οι οποίες είναι φωτομετρικά σταθερές συναρτήσει του χρόνου, μπορούν να υπολογιστούν μεταβολές στη λαμπρότητα άλλων πηγών με απλή σύγκριση των ροών ακτινοβολίας τους. Συγκεκριμένα, η αφαίρεση των ροών των αστέρων μεταξύ τους απαλείφει τη σταθερά. Επιπροσθέτως, με αυτόν τον τρόπο αφαιρούνται από τον τελικό υπολογισμό και οι απορροφήσεις της ακτινοβολίας λόγω της αέριας μάζας[1], αλλά και τυχόν παροδικές απορροφήσεις (π.χ. αραιή νέφωση), αφού αυτές συμβαίνουν ταυτόχρονα στις ακτινοβολίες όλων των αστέρων του πεδίου.

Στην εικόνα του αστρικού πεδίου επιλέγονται οι αστέρες προς φωτομέτρηση. Απαιτείται η επιλογή τουλάχιστον τριών αστέρων. Συγκεκριμένα, επιλέγεται ο μεταβλητός αστέρας (V), ο αστέρας σύγκρισης (C), ο οποίος πρέπει να έχει σταθερή λαμπρότητα και συγκρίσιμη με εκείνη του μεταβλητού και ο αστέρας ελέγχου (K), ο οποίος χρησιμοποιείται για να ελεγχθεί η σταθερότητα της λαμπρότητας του αστέρα σύγκρισης. Οι αστέρες συγκρίσεως C και ελέγχου K πρέπει να ικανοποιούν τα εξής κριτήρια:

- Να είναι περίπου ίδιου φασματικού τύπου με τον μεταβλητό
- 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).

[1]Εκφράζει την απόσταση που διανύει η ακτινοβολία μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα κι εξαρτάται από το ύψος του αστέρα στον τόπο. Για ύψη αστέρων με ζενίθια απόσταση $Z=0°$ η αέρια μάζα X είναι η ελάχιστη δυνατή. Όπου $X=(\cos Z)^{-1}$.

Η ερυθρή και υπέρυθρη ακτινοβολία παρουσιάζουν μεγάλη διαφορά στην απορρόφηση από τη γήινη ατμόσφαιρα σε σχέση με τα άλλα μήκη κύματος στα οποία γίνονται οι παρατηρήσεις (*B* και *V*). Επομένως, οι ερυθροί αστέρες (φασματικού τύπου K, M) είναι πιθανόν να δείξουν μεταβολές, οι οποίες δεν σχετίζονται με τη φύση του αστέρα, άρα θεωρούνται ακατάλληλοι για σύγκριση. Τα παραπάνω κριτήρια, εκτός από αυτό που σχετίζεται με τη μεταβλητότητα, δεν είναι πολύ αυστηρά, αλλά σε κάθε περίπτωση πρέπει να ικανοποιούνται όσο το δυνατόν περισσότερο.

Το πρόγραμμα μετράει σε κάθε αστέρα της κάθε εικόνας τη ροή της ακτινοβολίας από τα διαφράγματα των αστέρων (F_V, F_C, F_K) και από τους δακτυλίους του υποβάθρου F_S και υπολογίζει τις διαφορές φαινομένου μεγέθους $V-C$ και $K-C$ βάσει της σχέσης (2.4), οπότε και προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$\mathrm{V-C = m_V - m_C = 2.5\log\left(\frac{F_C - F_S}{F_V - F_S}\right)} \tag{3.1}$$

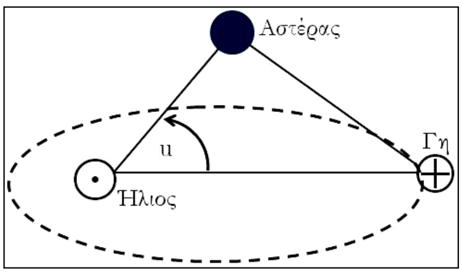
$$\mathrm{K-C = m_K - m_C = 2.5\log\left(\frac{F_C - F_S}{F_K - F_S}\right)} \tag{3.2}$$

3.1.2. Ηλιοκεντρική διόρθωση

Για αντικειμενικότητα στους χρόνους λήψης των δεδομένων πρέπει να αφαιρείται ο παράγοντας «τροχιά της Γης» από τις παρατηρήσεις. Λόγω της περιφοράς της Γης γύρω από τον Ήλιο και της πεπερασμένης ταχύτητας του φωτός, παρατηρήσεις του ίδιου αστέρα σε διαφορετικές χρονικές στιγμές θα δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα όσον αφορά τον χρόνο των ελαχίστων/μεγίστων (βλ. §3.1.4) και της περιόδου της μεταβολής. Για τον παραπάνω λόγο, θεωρείται, ότι οι παρατηρήσεις γίνονται από τον Ήλιο. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση περιφοράς της Γης γύρω από τον Ήλιο και τις συντεταγμένες του αστέρα, μπορούν να υπολογιστούν για κάθε χρονική στιγμή οι γωνίες που σχηματίζουν η οπτική ευθεία Γης - Ηλίου και η ευθεία Ηλίου – αστέρα. Ως μονάδα μέτρησης χρόνου για τους μεταβλητούς αστέρες έχει επικρατήσει η *Ιουλιανή ημέρα* (Julian Day - JD), η οποία έχει ως αρχή μέτρησης τη μέση μεσημβρία της 1ης Ιανουαρίου του 4713 π.Χ. Η αναγωγή του χρόνου σε ηλιοκεντρικό (Heliocentric Julian Day - HJD) βασίζεται στην παρακάτω σχέση:

$$\mathrm{T_{\odot} = T_{\oplus} - \Delta t} \tag{3.3}$$

όπου $T_{\oplus}$ ο ακριβής χρόνος (π.χ. χρόνος ρολογιού του Η/Υ) κάποιου ουράνιου φαινομένου το οποίο καταγράφεται στη Γη, $T_{\odot}$ ο ακριβής χρόνος του ίδιου ουράνιου φαινομένου το οποίο θα κατέγραφε παρατηρητής που θα βρισκόταν στον Ήλιο και Δt η διαφορά των δύο αυτών χρόνων.



Εικόνα 3.2. Το τρίγωνο Ήλιου – Γης – αστέρα.

Η χρονική διαφορά Δt υπολογίζεται από τη σφαιρική τριγωνομετρία:

$$\Delta \mathrm{t = 0.00578\cos u\ \ [days]} \tag{3.4}$$

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 (εικ. 3.2) και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\cos u = \sin\delta \sin l_{\odot} \sin\varepsilon + \cos\delta \cos\alpha \cos l_{\odot} + \cos\delta \sin\alpha \sin l_{\odot} \cos\varepsilon \quad (3.5)$$

όπου *a*, *δ* οι ουρανογραφικές συντεταγμένες του αστέρα, *ε* η κλίση του άξονα της Γης ως προς το επίπεδο της τροχιάς της και $l_{\odot}$ το ηλιογραφικό μήκος το οποίο δίνεται από τη σχέση:

$$l_{\odot} = L + (1.915° - 0.0048°\ T)\sin M + 0.020°\ \sin 2M \quad (3.6)$$

όπου *L*, *M* το ηλιογραφικό μήκος και πλάτος σε εκλειπτικές συντεταγμένες, αντίστοιχα:

$$L = 280.46° + 36000.722°\ T \quad (3.7)$$

$$M = 357.528° + 35999.050°\ T \quad (3.8)$$

και *T* ο Ιουλιανός αιώνας:

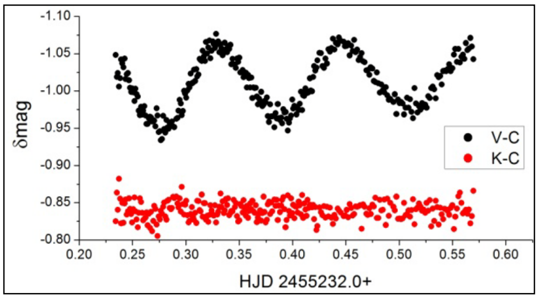
$$T = \frac{JD - 2451545}{36525} \quad (3.9)$$

3.1.3. Καμπύλες φωτός περιοδικού μεταβλητού αστέρα

Ως καμπύλη φωτός ενός ουράνιου αντικειμένου ορίζεται το διάγραμμα μεταβολής της λαμπρότητάς του συναρτήσει του χρόνου. Η αντιπροσωπευτική χρονική στιγμή κάθε σημείου σε μια τέτοια καμπύλη προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$T = HJD + \frac{e.t.}{2} \quad (3.10)$$

όπου *HJD* η ηλιοκεντρική ημερομηνία (βλ. §3.1.2) κατά τη χρονική στιγμή της έναρξης της έκθεσης και *e.t.* ο χρόνος έκθεσης της εικόνας. Η σχετική μεταβολή της λαμπρότητας της πηγής (βλ. §3.1.1) θα δίνεται σε διαφορά φαινόμενων μεγεθών *Δm* σύμφωνα με τις σχέσεις (3.1) και (3.2).



Εικόνα 3.3. Καμπύλη φωτός του αστέρα BI CMi (Liakos & Niarchos 2011k), όπου φαίνεται η μεταβολή του BI CMi σε σχέση με τον αστέρα σύγκρισης (*V*−*C*) και η μεταβολή του αστέρα σύγκρισης σε σχέση με τον αστέρα ελέγχου (*K*−*C*).

Αστρονομική εφημερίδα

Η αστρονομική εφημερίδα ενός περιοδικού μεταβλητού αστέρα υπολογίζει τις χρονικές στιγμές κατά τις οποίες ο αστέρας παρουσιάζει κάποιο ιδιάζον φαινόμενο. Για τους μεταβλητούς δι' εκλείψεων έχει καθιερωθεί σαν ορόσημο η χρονική στιγμή ενός φωτομετρικού πρωτεύοντος ελαχίστου, ενώ για τους παλλόμενους αστέρες η χρονική στιγμή ενός φωτομετρικού μεγίστου. Η γενική μαθηματική σχέση η οποία δίνει την αστρονομική εφημερίδα ενός μεταβλητού αστέρα είναι η:

$$T = T_0 + PE\ [HJD] \quad (3.11)$$

όπου *T* η χρονική στιγμή παρατήρησης, T_0 ένας προηγούμενος χρόνος πρωτεύοντος ελαχίστου για εκλειπτικό σύστημα ή μεγίστου για παλλόμενο αστέρα, *P* η περίοδος της μεταβολής εκφρασμένη σε days και *E* ένας ακέραιος αριθμός $\gtrless 1$) , ο οποίος εκφράζει τους κύκλους περιοδικότητας της μεταβολής, και καλείται «τροχιακός κύκλος».

Οι αστρονομικές εφημερίδες προκύπτουν από τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων από πληθώρα χρόνων ελαχίστων/μεγίστων, οι οποίοι έχουν καταγραφεί, αφού η σχέση (3.11) έχει τη μορφή ευθείας με σταθερό όρο τον χρόνο T_0 και κλίση την περίοδο P. Επομένως, εάν υπολογιστούν αυτές τις δύο παράμετροι, μπορεί να προβλεφθεί κάθε μελλοντική χρονική στιγμή φωτομετρικού ελαχίστου/μεγίστου του μεταβλητού. Φυσικά, αυτό προϋποθέτει ότι η περίοδος της μεταβολής είναι σταθερή συναρτήσει του χρόνου. Αυτό όμως δε συμβαίνει πάντα, διότι η περίοδος μπορεί να αλλάζει εξαιτίας διάφορων φυσικών μηχανισμών (βλ. §4.2) οι οποίοι επιδρούν στον αστέρα, με αποτέλεσμα οι αστρονομικές εφημερίδες να δίνονται με επιπλέον όρους στο δεύτερο μέλος. Σε τέτοιες περιπτώσεις μπορούν και πάλι να δοθούν γραμμικές εφημερίδες, οι οποίες, όμως, δεν έχουν μακροπρόθεσμη ισχύ και χρησιμοποιούνται κυρίως για την κατασκευή διαγραμμάτων περιγραφής της καμπύλης φωτός (βλ. παρακάτω).

Διάγραμμα φάσης περιοδικού μεταβλητού αστέρα

Το διάγραμμα φάσης ενός δι' εκλείψεων μεταβλητού αστέρα μας πληροφορεί για τη γεωμετρική θέση των αστέρων του συστήματος σε σχέση με την οπτική ευθεία παρατήρησης για κάθε χρονική στιγμή της περιόδου τους. Ο όρος *φάση* υπεισέρχεται για να αντικαταστήσει τη χρονική εξάρτηση από την HJD με τη γωνία που σχηματίζεται από την ευθεία που συνδέει τα κέντρα των αστέρων και την οπτική ευθεία παρατήρησης. Η στιγμή του πρωτεύοντος ελαχίστου, όπου αυτές οι δύο νοητές ευθείες ταυτίζονται, ορίζεται ως αρχή μέτρησης της περιφοράς του συστήματος, δηλαδή μηδενική γωνιακή φάση. Προφανώς, μετά από μια πλήρη περιφορά του συστήματος γύρω από το κέντρο μάζας η γωνία αυτή θα έχει γίνει ίση με 2π και θα βρίσκεται ξανά στο μηδενικό σημείο. Για λόγους ευκολίας, οι φάσεις ενός διπλού συστήματος εκφράζονται ως κλάσματα της γωνίας 2π. Παρακάτω δίνεται η σχέση υπολογισμού των φάσεων Φ:

$$\Phi = \frac{\mathrm{T}-\mathrm{T}_0}{\mathrm{P}} - \mathrm{INTEGER}\left(\frac{\mathrm{T}-\mathrm{T}_0}{\mathrm{P}}\right) \tag{3.12}$$

Όπου T_0 και P η αστρονομική εφημερίδα του αστέρα και T μια τυχαία χρονική στιγμή παρατήρησης του συστήματος.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι αντιστοιχίες μεταξύ των τιμών φάσης – λαμπρότητας συστήματος – γεωμετρικής θέσης αστέρων για ένα εκλειπτικό σύστημα.

Πίνακας 3.1. Αντιστοιχίες μεταξύ της φάσης – λαμπρότητας – γεωμετρικής θέσης των αστέρων ενός εκλειπτικού συστήματος αστέρων.

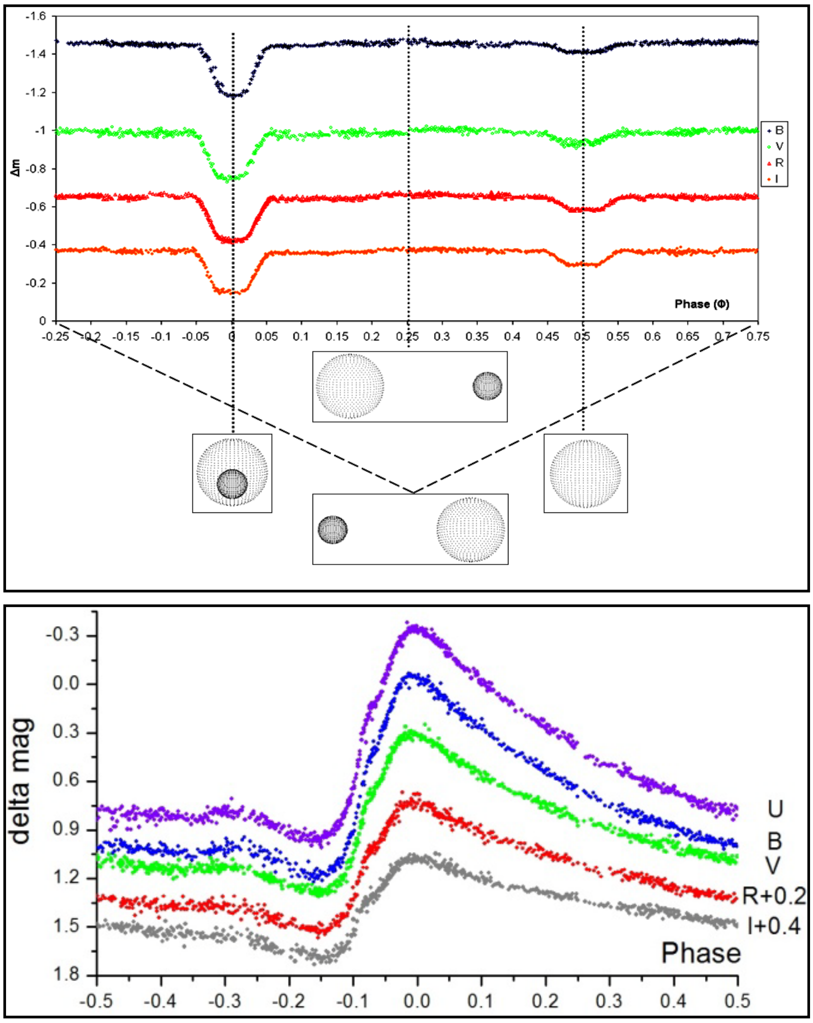
Γωνιακή φάση [rad]	Κανον/νη φάση (2π)	Ολική λαμπρότητα συστήματος	Γεωμετρική θέση αστέρων
0	0.00	Πρωτεύον ελάχιστο	Έκλειψη του θερμότερου μέλους
π/2	0.25^{α}	Πρωτεύον μέγιστο	Μέγιστη απόσταση των μελών
π	0.50	Δευτερεύον ελάχιστο	Έκλειψη του ψυχρότερου μέλους
3π/2	0.75^{α}	Δευτερεύον μέγιστο	Μέγιστη απόσταση των μελών
2π	1.00	Πρωτεύον ελάχιστο	Έκλειψη του θερμότερου μέλους

$^{\alpha}$Αντιδιαμετρική θέση των αστέρων

Η εφημερίδα των δι' εκλείψεων μεταβλητών αστέρων στηρίζεται σε παρατηρήσεις στο οπτικό μέρος του Η/Μ φάσματος όπου και θεωρείται ότι το φως προέρχεται από τις φωτόσφαιρες των αστέρων. Το ίδιο σύστημα λοιπόν, εάν παρατηρηθεί σε άλλη φασματική περιοχή, μπορεί να παρουσιάσει ακόμα και αντίθετη συμπεριφορά, όσον αφορά το βάθος των ελαχίστων, λόγω του ότι το φως προέρχεται από άλλες περιοχές των αστέρων (π.χ. στο *EUV* λαμβάνεται ακτινοβολία κυρίως από τη χρωμόσφαιρα και το στέμμα των αστέρων). Επιπροσθέτως, εάν κάποιος εκ των δύο αστέρων εκπέμπει ελάχιστα στο μέρος του Η/Μ φάσματος που γίνονται οι παρατηρήσεις, τότε, λόγω του φασματικού του τύπου, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να μην ανιχνεύεται. Γι' αυτό λοιπόν, σαν σημείο αναφοράς ορίζεται το οπτικό μέρος του Η/Μ φάσματος και, επιπλέον, θεωρείται ότι το γεωμετρικό ελάχιστο ταυτίζεται με το ελάχιστο της λαμπρότητας του συστήματος.

Σχεδόν με τον ίδιο τρόπο ορίζεται και η φάση ενός παλλόμενου αστέρα, με την ειδοποιό διαφορά ότι το μέγιστο αντιστοιχεί στη φάση 0 ή 1 (2π), ενώ το ελάχιστο δεν εμφανίζεται στην ίδια φάση σε όλους τους παλλόμενους.

Η μετατροπή της HJD σε φάση μας αποδεσμεύει από τον ημερολογιακό χρόνο των παρατηρήσεων, αφού, παρατηρήσεις οι οποίες απέχουν μεταξύ τους μεγάλα χρονικά διαστήματα, μπορούν να συνδυαστούν στο ίδιο διάγραμμα. Στην εικ. 3.4 δίνονται διαγράμματα φάσης ενός εκλειπτικού συστήματος αστέρων και ενός παλλόμενου αστέρα.



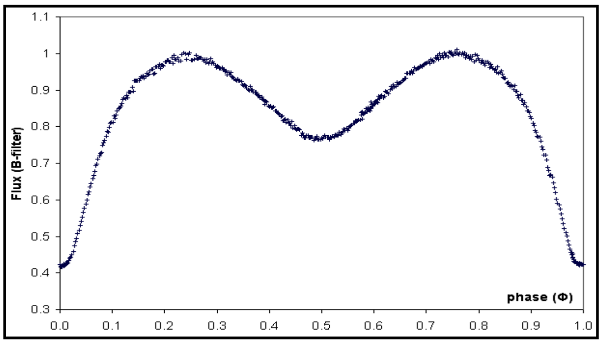
Εικόνα 3.4. Καμπύλες φωτός σε διάγραμμα φάσης του εκλειπτικού συστήματος αστέρων GSC 4589-2999 (επάνω), όπου απεικονίζονται και οι γεωμετρικές θέσεις των μελών γύρω από το κοινό κέντρο μάζας (Liakos et al. 2011b) και του παλλόμενου αστέρα TU UMa (κάτω) (Liakos & Niarchos 2011m).

Διάγραμμα ροής μεταβλητού αστέρα

Το διάγραμμα ροής δίνει πληροφορίες για τη φωτομετρική μεταβολή ενός μεταβλητού αστέρα, όμως, αυτήν τη φορά όχι σαν μεταβολή της λαμπρότητάς του αλλά σαν μείωση της συνολικής ροής του. Σε περιοδικούς μεταβλητούς αστέρες υπάρχει η δυνατότητα να υπολογιστεί η τιμή της μέγιστης λαμπρότητάς τους, όπου για λόγους ευκολίας κανονικοποιείται στη μονάδα. Έτσι, όλες οι άλλες τιμές της λαμπρότητας θα εκφράζονται σαν κλάσματα της μεγίστης. Υπολογίζοντας από το διάγραμμα φάσης την τιμή που αντιστοιχεί στο μέγιστο της λαμπρότητας του μεταβλητού, δηλαδή τη $(V-C)_{\max}$, η σχέση (3.1) παίρνει τη μορφή:

$$L = 2.512^{[(V-C)_{\max}-\Delta m]} \tag{3.14}$$

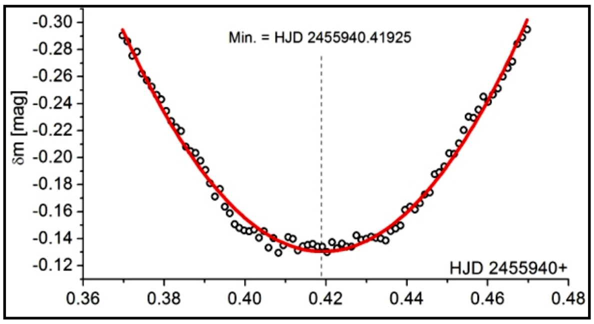
όπου Δm η διαφορά του φαινόμενου μεγέθους του μεταβλητού αστέρα και του αστέρα συγκρίσεως σε κάθε χρονική στιγμή.



Εικόνα 3.5. Καμπύλη φωτός σε διάγραμμα ροής του εκλειπτικού συστήματος αστέρων EG Cep (Pazhouhesh et al. 2009). Παρατηρείται ότι κατά το πρωτεύον ελάχιστο η συνολική λαμπρότητα του συστήματος μειώθηκε κατά ~58%, ενώ κατά το δευτερεύον κατά ~25%.

3.1.4. Υπολογισμός χρόνου φωτομετρικού ελαχίστου/μεγίστου περιοδικού μεταβλητού αστέρα

Ο υπολογισμός των χρόνων ελαχίστου/μεγίστου μεταβλητού περιοδικού αστέρα μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Ουσιαστικά, η καμπύλη φωτός ενός τέτοιου αστέρα μπορεί να περιγραφεί με μια πολύπλοκη συνάρτηση της οποίας μπορούν να βρεθούν τα ακρότατα. Για να απλουστευθεί η μορφή αυτής της συνάρτησης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέρος των δεδομένων και συγκεκριμένα αυτά που βρίσκονται εκατέρωθεν του ελαχίστου/μεγίστου.



Εικόνα 3.6. Υπολογισμός του χρόνου δευτερεύοντος φωτομετρικού ελαχίστου του δι' εκλείψεων μεταβλητού αστέρα V868 Mon από φωτομετρικές παρατηρήσεις (σημεία) με τη χρήση μιας παραβολής (κόκκινη γραμμή) ως συνάρτηση προσαρμογής. Οι παρατηρήσεις έγιναν από τον συγγραφέα.

Η πλέον διαδεδομένη μέθοδος υπολογισμού ελαχίστου/μεγίστου μεταβλητών είναι η μέθοδος των Kwee & van Woerden (1956), όμως μπορεί να γίνει και μέσω εύρεσης των ακρότατων μιας συνάρτησης (π.χ. παραβολής ή ημιτόνου) που προσαρμόζεται στα δεδομένα (εικ. 3.6).

Συνήθως, οι παρατηρήσεις γίνονται σε περισσότερα από ένα φωτομετρικά φίλτρα. Επομένως, στο τέλος θα είναι διαθέσιμες περισσότερες από μια καμπύλες φωτός, κάτι το οποίο σημαίνει, ότι για την ίδια γεωμετρική στιγμή (π.χ. έκλειψη) υπολογίζονται παραπάνω από ένας χρόνος ελαχίστου/μεγίστου. Λόγω διαφορετικού χρόνου έκθεσης των εικόνων για το κάθε φίλτρο, οι εικόνες στα διάφορα φωτομετρικά φίλτρα απέχουν μεταξύ τους χρονικά, οπότε και οι χρόνοι ελαχίστων/μεγίστων που προκύπτουν από την επεξεργασία των δεδομένων για κάθε φίλτρο διαφέρουν μεταξύ τους. Επομένως, για λόγους ακριβείας, ο χρόνος ελαχίστου/μεγίστου προκύπτει από τη μέση τιμή των χρόνων ελαχίστου/μεγίστου που προκύπτουν για κάθε φίλτρο. Οι υπολογισμοί των χρόνων ελαχίστου/μεγίστου μεταβλητών αστέρων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή έγινε με το λογισμικό MINIMA (Nelson 2009) και παρατίθενται στο Παρ. Β.

3.1.5. Διαγράμματα μεταβολής της τροχιακής περιόδου εκλειπτικών συστημάτων αστέρων

Αυτά τα διαγράμματα είναι ευρέως γνωστά ως διαγράμματα **O**bserved−**C**alculated (O−C). Μας πληροφορούν για την κατανομή των χρονικών διαφορών μεταξύ των παρατηρηθέντων (T_{observed}) και των υπολογιζόμενων ($T_{\text{calculated}}$), από τις αστρονομικές εφημερίδες, χρόνων ελαχίστου του συστήματος συναρτήσει του τροχιακού κύκλου E. Χρόνοι παρατηρηθέντων ελαχίστων ενός μεγάλου αριθμού εκλειπτικών συστημάτων υπάρχουν είτε στη βιβλιογραφία είτε σε βάσεις δεδομένων[1,2,3] και συνήθως καλύπτουν αρκετές δεκαετίες παρατηρήσεων. Βάσει της αστρονομικής εφημερίδας ενός δι' εκλείψεων μεταβλητού αστέρα (σχέση 3.11) μπορούν να προβλεφθούν οι χρονικές στιγμές των μελλοντικών ελαχίστων του.

Παρόλα αυτά, οι παρατηρήσεις έχουν δείξει ότι σε πολλά τέτοια συστήματα υπάρχει μεταβολή της τροχιακής περιόδου από φυσικούς μηχανισμούς, οι οποίοι αναγνωρίζονται από την ανάλυση των O−C διαγραμμάτων τους (βλ. §4.2). Είναι προφανές, ότι η κατανομή των O−C σημείων ενός «συνήθους» εκλειπτικού συστήματος (απομονωμένο, χωρίς ανταλλαγή μάζας μεταξύ των συνοδών και με κυκλική τροχιά) είναι ευθεία (O−C=0). Σε κάθε άλλη περίπτωση, στο διάγραμμα O−C παρουσιάζονται ιδιαιτερότητες (π.χ. ημιτονοειδής συμπεριφορά των σημείων), οι οποίες απαιτούν ειδική ανάλυση ώστε να ερμηνευτούν.

Η κατασκευή του O−C διαγράμματος ενός εκλειπτικού συστήματος γίνεται με την παρακάτω μέθοδο: Αρχικά, επιλύεται η σχέση (3.11) ως προς τον τροχιακό κύκλο E:

$$\mathrm{E} = \frac{\mathrm{T_{obs}} - \mathrm{T_0}}{\mathrm{P}} \tag{3.14}$$

Είναι γνωστό ότι οι ακέραιες τιμές του τροχιακού κύκλου αντιστοιχούν σε χρόνους πρωτεύοντος ελαχίστου του συστήματος, ενώ οι ημι-ακέραιες τιμές σε χρόνους δευτερεύοντος ελαχίστου (πίνακας 3.1). Βάσει της σχέσης (3.14) υπολογίζεται για κάθε παρατηρηθέντα χρόνο ελαχίστου (T_{obs}) του συστήματος η τιμή του E. Οι τιμές του E που προκύπτουν είναι πολύ κοντά σε ακέραιες ή ημι-ακέραιες τιμές. Αυτές οι τιμές μετατρέπονται σε ακέραιες ή ημι-ακέραιες, έτσι ώστε να αντιστοιχούν ακριβώς σε χρόνους πρωτευόντων ή δευτερευόντων ελαχίστων βάσει της αστρονομικής εφημερίδας, η οποία

[1]http://www.as.up.krakow.pl/o-c/index.php3
[2]http://var.astro.cz/ocgate/
[3]http://www.oa.uj.edu.pl/ktt/krttk_dn.html

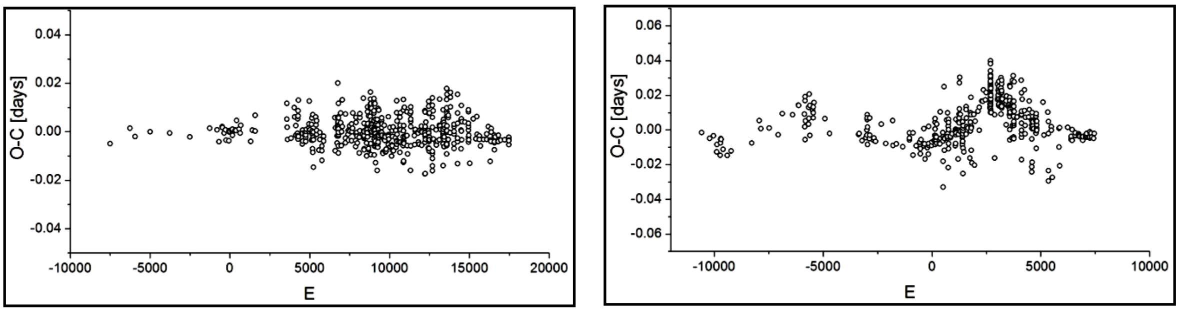
χρησιμοποιήθηκε. Με αυτήν τη διαδικασία, προκύπτουν νέες τιμές του E, οι οποίες ονομάζονται E_{fixed} για κάθε T_{obs}. Βάσει αυτών των νέων τιμών υπολογίζονται οι αντίστοιχοι χρόνοι υπολογιζόμενων ελαχίστων T_{cal} από τη σχέση (3.11) ως εξής:

$$\mathrm{T_{cal}} = \mathrm{T_0} + \mathrm{PE_{fixed}} \tag{3.15}$$

Επομένως, η διαφορά O−C υπολογίζεται από τους παρατηρηθέντες χρόνους ελαχίστου και τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από τη σχέση (3.15). Ένα παράδειγμα υπολογισμού O−C σημείων δίνεται στον πίνακα 3.2, ενώ αντίστοιχα διαγράμματα που δείχνουν διαφορετικές O−C κατανομές δίνονται στην εικ. 3.7.

Πίνακας 3.2. Υπολογισμός των O−C τιμών για δύο χρόνους ελαχίστου του εκλειπτικού συστήματος RY Aqr (Liakos & Niarchos 2009c) βάσει της εφημερίδας T=2440824.3724+1.966609E (Kreiner et al. 2001).

T_{obs} [HJD]	E	E_{fixed}	T_{cal} [HJD]	O−C [days]
2454297.4658	6850.927	6851.0	2454297.6096	-0.1438
2454361.3731	6883.423	6883.5	2454361.5244	-0.1513



Εικόνα 3.7. O−C διαγράμματα των εκλειπτικών συστημάτων CM Lac (αριστερά), όπου τα σημεία είναι συμμετρικά κατανεμημένα ως προς τον οριζόντιο άξονα και TX Her (δεξιά), όπου τα σημεία δείχνουν εμφανώς μια περιοδική κατανομή (Πηγή: O−C gateway).

3.2. Επεξεργασία φασματοσκοπικών δεδομένων

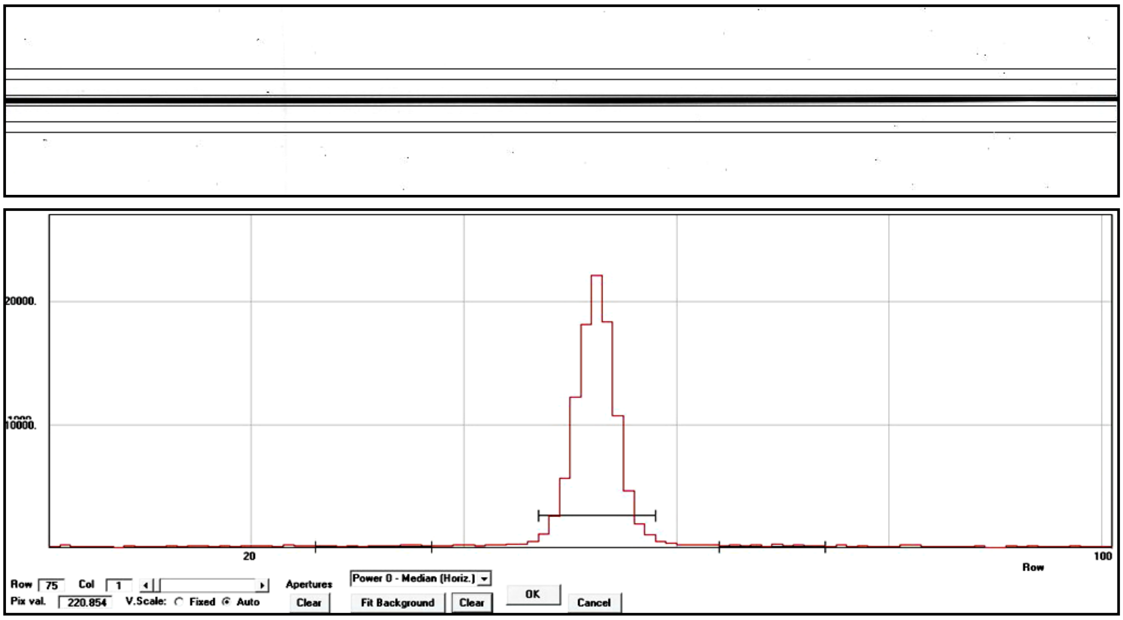
Ως φασματοσκοπικά δεδομένα ορίζονται οι εικόνες CCD που περιέχουν το φάσμα μιας φωτεινής πηγής (π.χ. αστέρας). Βάσει αυτών των δεδομένων δύναται να μελετηθεί η χημική σύσταση της πηγής και με τη βοήθεια του νόμου του Doppler να υπολογιστεί η ακτινική της ταχύτητα. Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζεται μια περιγραφή της επεξεργασίας φασματοσκοπικών δεδομένων από παρατηρήσεις εκλειπτικών συστημάτων αστέρων.

3.2.1. Σχηματισμός και βαθμονόμηση φάσματος

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.2.2, τα φασματοσκοπικά δεδομένα λαμβάνονται με μια κάμερα CCD, η οποία είναι τοποθετημένη στην εστία του οπτικού συστήματος του φασματογράφου. Για αυτές τις εικόνες ακολουθείται η συνηθισμένη διαδικασία διόρθωσης από ηλεκτρονικούς θορύβους, λαμβάνοντας τις εικόνες dark και bias, αλλά και από την ανομοιόμορφη απόκριση των εικονοστοιχείων (βλ. §2.1.2). Στην περίπτωση όμως της φασματοσκοπίας, οι εικόνες απόκρισης (Flat-field) λαμβάνονται με λάμπα συνεχούς λευκού φωτισμού, η οποία είναι είναι τοποθετημένη στο εσωτερικό του φασματογράφου, και όχι στον ουρανό, καθώς το αναλυμένο φως του ουρανού είναι το φάσμα του Ήλιου με γραμμές απορρόφησης της γήινης ατμόσφαιρας. Η επεξεργασία των φασμάτων, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή, έγινε με τα λογισμικά Radial Velocity Reductions - RAVERE v.2.1 (Nelson 2009) και AIP4WIN V.2.2.0 (Berry & Burnell 2005).

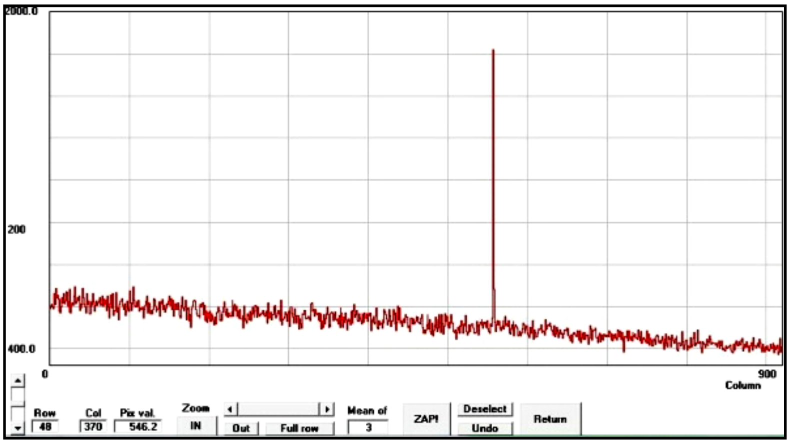
Όπως στην περίπτωση της φωτομετρίας διαφράγματος, έτσι και στη φασματοσκοπία υπεισέρχονται διάφοροι θόρυβοι υποβάθρου, οι οποίοι πρέπει να αφαιρεθούν από το τελικό φάσμα της πηγής. Επιπλέον, η καμπύλη του Gauss, η οποία εκφράζει την κατανομή της έντασης επάνω σε πλήθος εικονοστοιχείων (βλ. εικ. 2.3), αφορά πλέον πλήθος γραμμών εικονοστοιχείων, καθώς το φάσμα μιας πηγής καλύπτει όλες τις στήλες του CCD. Πρακτικά, πρόκειται για πολλές οριζόντια παράλληλες καμπύλες Gauss. Ορίζονται τρία διαφράγματα τα οποία, σε αντίθεση με τη φωτομετρία, έχουν σχήμα ορθογώνιου παραλληλεπιπέδου (εικ. 3.8):

1. Διάφραγμα του φάσματος: Περιλαμβάνει τις γραμμές εικονοστοιχείων επάνω στις οποίες εντοπίζεται το φάσμα
2. Άνω διάφραγμα υποβάθρου: Περιλαμβάνει γραμμές εικονοστοιχείων επάνω από το φάσμα της πηγής στις οποίες δεν υπάρχει φως από την πηγή.
3. Κάτω διάφραγμα υποβάθρου: Ομοίως με το (2) αλλά κάτω από το φάσμα της πηγής.



Εικόνα 3.8. Επιλογή διαφραγμάτων του φάσματος και του υποβάθρου σε γραφικό περιβάλλον (επάνω), όπου το φάσμα απεικονίζεται στη μέση της εικόνας, και σε περιβάλλον εντολών (κάτω) όπου το φάσμα απεικονίζεται σαν καμπύλη Gauss δύο διαστάσεων με τον οριζόντιο άξονα να αναφέρεται στις γραμμές του CCD.

Επιπροσθέτως, λόγω του συνήθους μεγάλου χρόνου έκθεσης που χρησιμοποιείται για τη λήψη φασμάτων (τάξεως αρκετών λεπτών), πληθώρα κοσμικών ακτινών προσπίπτει στην εικόνα, και φυσικά επάνω και στο φάσμα. Η απεικόνιση τέτοιων περιπτώσεων φαίνεται στην εικ. 3.9, όπου με τη χρήση του λογισμικού δίνεται η δυνατότητα να ελεγχθούν μια προς μια οι γραμμές στις οποίες αντιστοιχεί το φάσμα της πηγής και να αφαιρεθούν τα σημεία του φάσματος στα οποία προσέπεσαν κοσμικές ακτίνες.



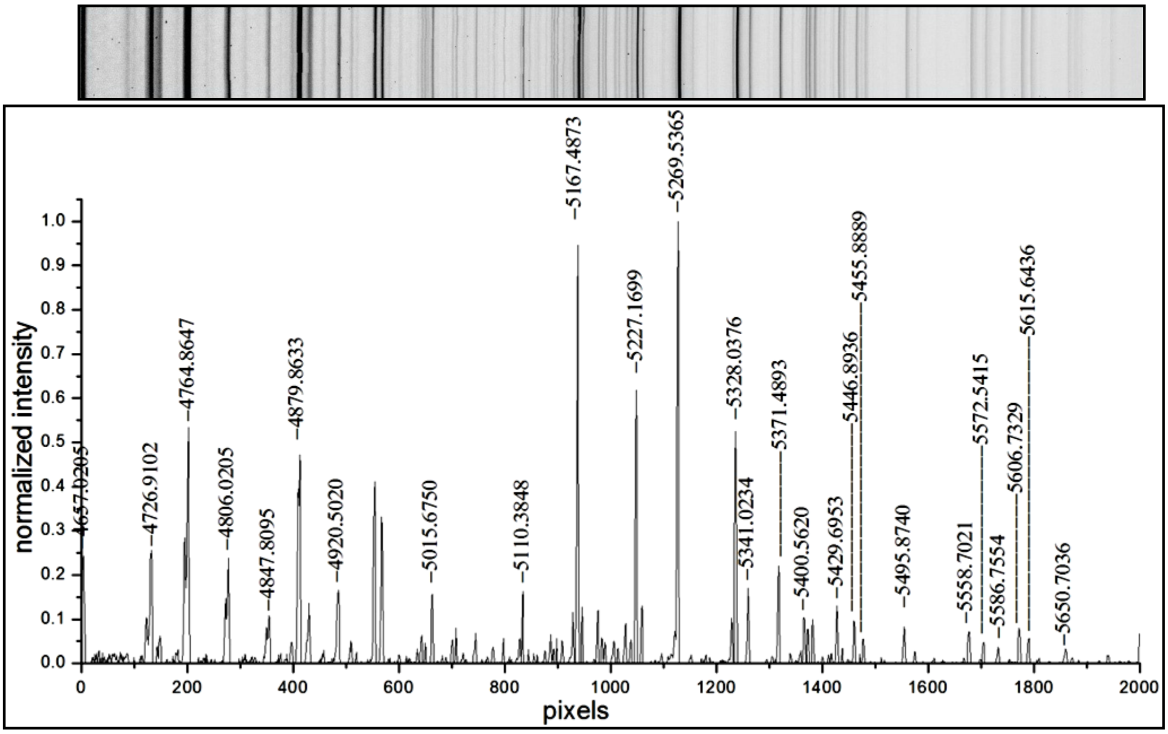
Εικόνα 3.9. Αποτέλεσμα της πτώσης μιας κοσμικής ακτίνας σε ένα εικονοστοιχείο του CCD κατά την έκθεση.

Μετά τον «καθαρισμό» της CCD εικόνας από ηλεκτρονικούς θορύβους και κοσμικές ακτίνες παράγεται το τελικό φάσμα της πηγής ως εξής: Το λογισμικό προσθέτει τις γραμμές που εσωκλείονται στο διάφραγμα του φάσματος, έτσι ώστε να αυξηθεί ο λόγος σήματος προς θόρυβο (S/N) του τελικού φάσματος της πηγής. Από τα διαφράγματα του υποβάθρου προκύπτει μια μέση τιμή θορύβου, η οποία και αφαιρείται από το φάσμα της πηγής. Τέλος, ως αποτέλεσμα προκύπτει μια μονοδιάστατη εικόνα, όπου το κάθε εικονοστοιχείο της έχει το άθροισμα της «φωτοακτινοβολίας» από όλα τα εικονοστοιχεία της στήλης στην οποία ανήκει και βρίσκονταν στο διάφραγμα του φάσματος.

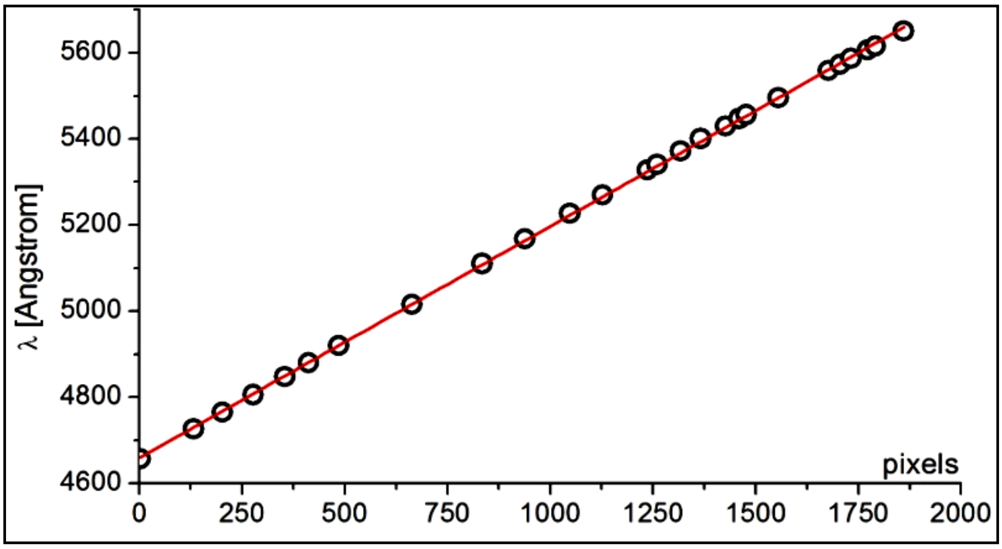
Τα αστρικά φάσματα είναι κομμάτι των καμπυλών Planck των αστέρων. Επομένως, για να μπορεί να γίνει υπολογισμός των βαθών των γραμμών απορρόφησης αλλά και σύγκριση φασμάτων αστέρων κοντινών φασματικών τύπων, πρέπει όλα τα φάσματα αφενός να κανονικοποιηθούν και αφετέρου να τους αφαιρεθεί η κλίση τους λόγω της κατανομής μέλανος σώματος. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής: Προσαρμόζεται ένα πολυώνυμο (συνήθως 4^{ου}-5^{ου} βαθμού) σε διάφορα σημεία του συνεχούς[1] του φάσματος και εφόσον βρεθούν οι συντελεστές των όρων του, αφαιρείται από όλα τα παρατηρησιακά σημεία δίνοντας το φάσμα σε μια ευθεία οριζόντια γραμμή.

Επιπροσθέτως, απαιτείται και μια παραπάνω διαδικασία, η οποία καλείται «βαθμονόμηση φάσματος». Κατά τη διάρκεια των παρατηρήσεων ο φασματογράφος υφίσταται κάμψεις λόγω της διαφορετικής κατανομής βάρους ολόκληρου του οργάνου στις διάφορες γωνίες παρατήρησης του τηλεσκοπίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, οι προερχόμενες, από το φράγμα περίθλασης, δέσμες φωτός των μονοχρωματικών ακτινοβολιών να μην προσπίπτουν καθ' όλη τη διάρκεια των παρατηρήσεων ακριβώς στα ίδια εικονοστοιχεία. Επομένως, απαιτείται η εύρεση της κατανομής των ακτινοβολιών στα εικονοστοιχεία. Γι' αυτόν τον λόγο, κάθε φασματογράφος είναι εφοδιασμένος με λάμπες που περιέχουν αέρια (συνήθως Ne, He, Ar) των οποίων είναι γνωστά με πολύ μεγάλη ακρίβεια τα μήκη κύματος, τα οποία αντιστοιχούν στις γραμμές εκπομπής τους. Πριν και μετά την έκθεση για το φάσμα του αντικειμένου λαμβάνονται οι *εικόνες βαθμονόμησης* (arc spectra) με τη χρήση των λαμπών (εικ. 3.10), έτσι ώστε να προκύψει η αντιστοιχία εικονοστοιχείων-μηκών κύματος για το συγκεκριμένο φάσμα σύμφωνα με την *καμπύλη βαθμονόμησης* του φάσματος (εικ. 3.11).

[1]Ως συνεχές τμήμα του φάσματος (continuum) ορίζεται το τμήμα εκείνο όπου δεν υπάρχουν γραμμές απορρόφησης ή εκπομπής και συχνά καλείται και «θόρυβος».



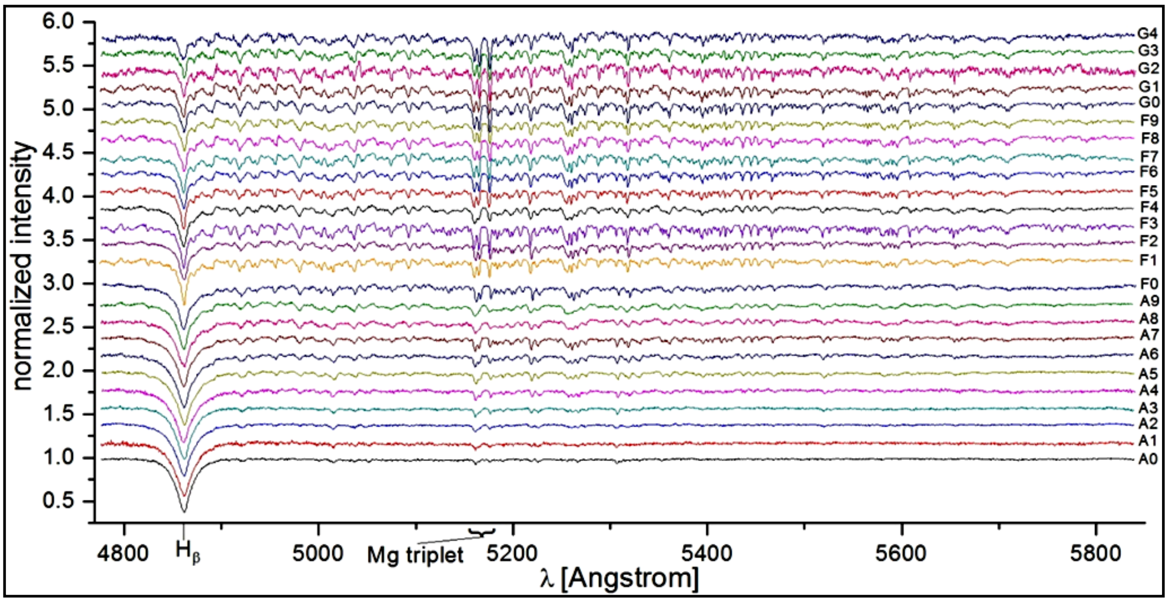
Εικόνα 3.10. Πρωτότυπο φάσμα εκπομπής των λαμπών βαθμονόμησης (επάνω) και η γραφική αναπαράστασή τους (κάτω) όπου έχουν αναγνωριστεί οι γραμμές εκπομπής των στοιχείων Ne, He, Ar. Το φάσμα ελήφθη από τον συγγραφέα στο αστεροσκοπείο Σκίνακα.



Εικόνα 3.11. Καμπύλη βαθμονόμησης φάσματος. Τα σημεία αντιστοιχούν στα εικονοστοιχεία, στα οποία εντοπίστηκαν τα κέντρα των γραμμών εκπομπής των λαμπών και η κόκκινη γραμμή είναι η προσαρμοσμένη ευθεία που εκφράζει τη βαθμονόμηση: λ= 4660(2)+0.537(1) pixel.

3.2.2. Φασματική ταξινόμηση αστέρων

Γενικά, η φασματική ταξινόμηση των αστέρων γίνεται είτε για τη μελέτη της χημικής σύστασης της αστρικής ατμόσφαιρας είτε για να υπολογιστεί η ενεργός θερμοκρασία του αστέρα. Η αντιστοιχία ενεργών θερμοκρασιών-φασματικών τύπων δίνεται από τους πίνακες του Cox (2000) (βλ. Παρ. Ε). Η φασματική ταξινόμηση αστέρων μπορεί να γίνει με σύγκριση των φασμάτων του άγνωστου αστέρα είτε με άλλα πρότυπα (standard) φάσματα είτε με θεωρητικά (συνθετικά) φάσματα που στηρίζονται στα μοντέλα αστρικών ατμοσφαιρών του Kurucz, χρησιμοποιώντας το λογισμικό SPECTRUM[1] (Gray & Corbally 1994). Η χρήση της πρώτης μεθόδου θεωρείται κατά την κρίση μας επαρκής για φασματική ταξινόμηση, καθότι τα συστηματικά σφάλματα των οργάνων (π.χ. σφάλμα στη CCD κάμερα ή στον φασματογράφο) μπορούν να απαλειφθούν συγκρίνοντας φάσματα που ελήφθησαν ακριβώς με τα ίδια όργανα. Επομένως, στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε αυτή η μέθοδος για την ταξινόμηση των αστέρων. Κατά τις φασματοσκοπικές παρατηρήσεις μας, πάντα λαμβάνονταν φάσματα προτύπων αστέρων, οι οποίοι δίνονται στους καταλόγους του αστεροσκοπείου *Gemini*[2], και καλύπτουν πλήρως το εύρος φασματικών τύπων από A0 έως G4, όπου μέσα σε αυτό βρίσκονταν και οι αστέρες-στόχοι της διατριβής (εικ. 3.12).



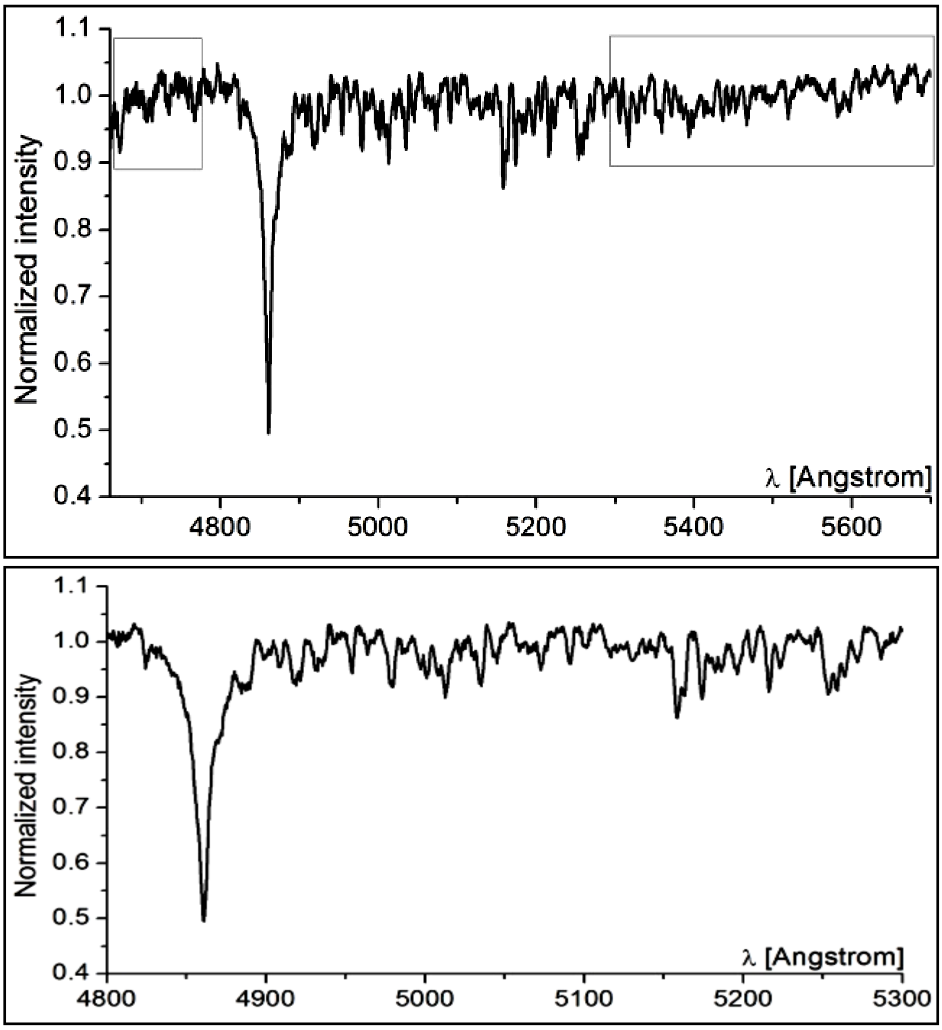
Εικόνα 3.12. Φάσματα προτύπων αστέρων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για φασματική ταξινόμηση αστέρων διπλών συστημάτων. Δεξιά δίνονται οι φασματικοί τύποι, ενώ έχουν σημειωθεί οι θέσεις της γραμμής H_β και της τριπλέτας του MgI. Τα φάσματα ελήφθησαν στο αστεροσκοπείο Σκίνακα (βλ. §2.3.3) από τον συγγραφέα.

Ακολουθώντας την τεχνική που παρουσιάζεται παρακάτω, τα φάσματα των μεταβλητών συγκρίνονταν με αυτά των προτύπων αστέρων. Οι μεταβλητοί, οι οποίοι παρατηρήθηκαν, ήταν εκλειπτικά συστήματα, άρα το φάσμα τους είναι το άθροισμα των φασμάτων των αστέρων-μελών. Ένα σύνθετο φάσμα δεν είναι πάντα εύκολο να συγκριθεί με κάποιο πρότυπο, καθώς τα βάθη των γραμμών απορρόφησης επηρεάζονται κι από τους δύο συνοδούς. Γι’ αυτόν τον λόγο, γινόταν πάντα προσπάθεια να λαμβάνονται τα φάσματα κατά τη διάρκεια της δευτερεύουσας έκλειψης του συστήματος (βλ. §3.1.3), όπου η φωτομετρική συμμετοχή του δευτερεύοντα αστέρα είναι η ελάχιστη δυνατή, οπότε με πολύ καλή προσέγγιση το τελικό φάσμα αφορά στον θερμότερο συνοδό. Επιπλέον, τονίζεται, ότι στα συστήματα τα οποία αναλύθηκαν στην παρούσα διατριβή, οι αστέρες-μέλη είχαν σχετικά μεγάλες διαφορές στη θερμοκρασία τους και τα φάσματα

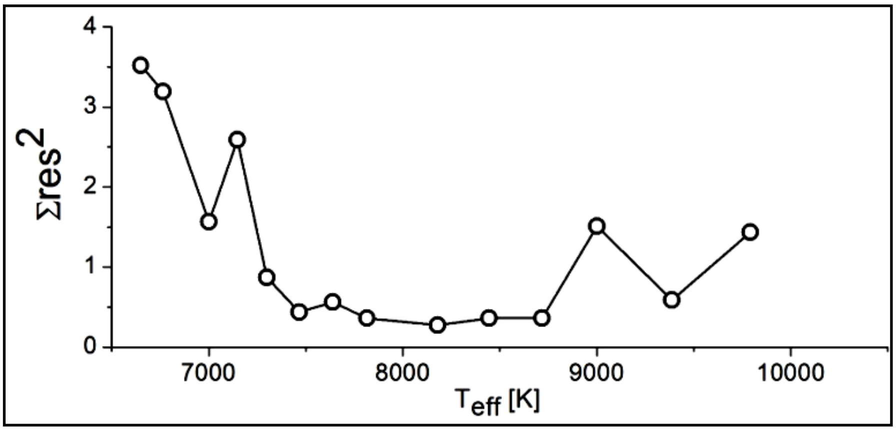
[1]http://www1.appstate.edu/dept/physics/spectrum/spectrum.html
[2]http://www.gemini.edu

λαμβάνονταν με κέντρο τα ~5200Å, όπου η φωτομετρική συνεισφορά των θερμότερων συνοδών είναι έτσι κι αλλιώς πολύ μεγαλύτερη.

Η σύγκριση των φασμάτων γίνεται με μια απλή αφαίρεση του φάσματος του μεταβλητού-άγνωστου αστέρα από όλα τα διαθέσιμα φάσματα προτύπων αστέρων (εικ. 3.12-3.13), αφού φυσικά έχουν γίνει σε όλα τα φάσματα όλα τα βήματα που περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Κάθε αφαίρεση φασμάτων αφήνει υπόλοιπο. Έχοντας λοιπόν όλα τα υπόλοιπα από όλες τις αφαιρέσεις φασμάτων είναι δυνατόν να κατασκευαστεί το διάγραμμα (εικ. 3.14) των τετραγωνικών υπολοίπων (sum of squared residuals-Σres^2) και από το ελάχιστό του να εκτιμηθεί ο φασματικός τύπος του αστέρα. Λόγω των πολύ μικρών διαφορών μεταξύ των βαθών των γραμμών απορρόφησης αστέρων διαδοχικών υποτάξεων ενός φασματικού τύπου, εκτιμάται ότι το σφάλμα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι μια υποτάξη. Αυτό το σφάλμα μπορεί φυσικά να δοθεί και σε μονάδες θερμοκρασίας, αλλά αυτό εξαρτάται από τον φασματικό τύπο του αστέρα, καθώς οι υποτάξεις έχουν διαφορετική απόσταση σε μονάδες θερμοκρασίας ανάλογα τον φασματικό τύπο.



Εικόνα 3.13. Επάνω: Πρωτότυπο φάσμα πρότυπου αστέρα F0. Τα πλαίσια περικλείουν τα μέρη του φάσματος με πολύ ασθενείς φασματικές γραμμές (χαμηλό S/N) και πολύ θόρυβο. Κάτω: «κομμένο» φάσμα του ίδιου αστέρα όπου έχει κρατηθεί μόνο το κομμάτι όπου υπάρχουν τόσο η H_β όσο και πληθώρα μεταλλικών γραμμών που διακρίνονται ξεκάθαρα. Το φάσμα ελήφθη στο αστεροσκοπείο Σκίνακα από τον συγγραφέα.



Εικόνα 3.14. Διάγραμμα υπολοίπων φασματικής σύγκρισης ενός μεταβλητού αστέρα, όπου η μικρότερη τιμή προέκυψε 8200 K και αντιστοιχεί σε φασματικό τύπο A5. Λόγω του εκτιμώμενου σφάλματος, συμπεραίνεται ότι ο αστέρας είναι φασματικού τύπου A4-A6 και θερμοκρασίας 8200 +250/−200 K.

3.2.3. Καμπύλες ακτινικών ταχυτήτων αστέρων διπλών συστημάτων

Ως καμπύλη ακτινικών ταχυτήτων συστήματος διπλών αστέρων ορίζεται το διάγραμμα μεταβολής της ακτινικής ταχύτητας του/των αστέρα/ων συναρτήσει του χρόνου ή της γεωμετρικής φάσης (βλ. §3.1.3). Η φωτομετρική συμμετοχή του κάθε αστέρα-μέλους του συστήματος στο σύνθετο φάσμα είναι καθοριστική για τον εντοπισμό των γραμμών απορρόφησής του. Από τον υπολογισμό των μετατοπίσεων των γραμμών απορρόφησης του αστέρα, σύμφωνα με τον νόμο του Doppler, προκύπτει η ακτινική του ταχύτητα. Σε συστήματα όπου οι αστέρες-μέλη έχουν μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας (π.χ. συστήματα τύπου Algol) είναι δύσκολο να αναγνωριστούν (από το λογισμικό) οι γραμμές απορρόφησης του ψυχρότερου αστέρα, επομένως, υπολογίζονται οι ακτινικές ταχύτητες μόνο του πρωτεύοντα. Εδώ πρέπει να τονισθεί, ότι εκτός της κίνησης των αστέρων γύρω από το κοινό κέντρο μάζας τους, ολόκληρο το σύστημα, λόγω της περιφοράς του γύρω από το κέντρο του Γαλαξία, κινείται ως προς τον παρατηρητή με ταχύτητα η οποία ονομάζεται «συστημική ακτινική ταχύτητα» *γ*.

Μια επιπλέον δυσκολία υπολογισμού των ακτινικών ταχυτήτων και των δύο αστέρων-μελών οφείλεται και στο γεγονός ότι οι γραμμές των αστέρων στο σύνθετο φάσμα παρουσιάζονται πεπλεγμένες, επομένως, αντί για δύο οξείες γραμμές απορρόφησης ενός στοιχείου (μια από τον κάθε αστέρα), συνήθως προκύπτει μια πεπλατυσμένη. Το πλάτος της «κοινής» γραμμής εξαρτάται από την ταχύτητα περιφοράς των αστέρων γύρω από το κοινό κέντρο μάζας (δηλαδή την περίοδό τους) αλλά και από την ταχύτητα ιδιοπεριστροφής τους (για ασύγχρονα συστήματα). Γενικά, από τεχνικής άποψης, αυτή η δυσκολία μπορεί να αντιμετωπισθεί με φασματογράφο όσο το δυνατόν μεγαλύτερης διακριτικής ικανότητας. Φυσικά, αυτό δεν είναι πάντα εφικτό, καθώς προκύπτουν και άλλοι περιορισμοί, όπως η διάμετρος του τηλεσκοπίου, το εύρος της σχισμής, ο χρόνος έκθεσης των φασμάτων κ.α., οι οποίοι καθιστούν τον εντοπισμό του ψυχρότερου συνοδού πρακτικά αδύνατο. Παρόλα αυτά, έχουν γίνει προσπάθειες υπέρβασης του προβλήματος με την κατασκευή λογισμικών που καταφέρνουν, μέχρις ενός σημείου, να ξεχωρίζουν τις γραμμές των συνοδών.

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των ακτινικών ταχυτήτων αστέρων στην παρούσα διατριβή ονομάζεται "Broadening Function" (BF), αναπτύχθηκε από τον Rucinski (1992, 1999, 2002) και διατίθεται σαν λογισμικό είτε στην προσωπική του ιστοσελίδα[1] είτε από τον Nelson (2009). Παρακάτω, παρουσιάζεται συνοπτικά η μέθοδος BF: Η συνάρτηση BF μετασχηματίζει ένα γραμμικό φάσμα απορρόφησης με οξείες και ευκρινείς γραμμές σε ένα φάσμα με μετατοπισμένες (λόγω φαινομένου Doppler) και διευρυμένες γραμμές (π.χ. λόγω ταχείας ιδιοπεριστροφής του αστέρα ή περιφοράς του γύρω από κάποιο κέντρο μάζας διπλού συστήματος). Η μέθοδος στηρίζεται στη σύγκριση μεταξύ ενός φάσματος αναφοράς (reference spectrum), το οποίο είναι το φάσμα κάποιου πρότυπου αστέρα, και του σύνθετου φάσματος του διπλού συστήματος. Ορίζεται σαν διανυσματικός πίνακας-στήλη **p** το σύνθετο φάσμα του διπλού συστήματος με n-γραμμές όσες και οι γραμμές των εικονοστοιχείων της εικόνας CCD. Τα εικονοστοιχεία συγχωνεύονται έτσι ώστε να υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ μηκών κύματος και ταχύτητας (π.χ. 1 Å → 5 km/sec). Επίσης, χρειάζεται να βρεθεί ο πίνακας-στήλη γραμμικού μετασχηματισμού **b** με m-γραμμές (m<n), ο οποίος θα μετασχηματίσει το καλά καθορισμένο (από άποψης οξύτητας γραμμών) φάσμα-πίνακα **S** διαστάσεων $(n-m+1)\times m$ του πρότυπου αστέρα στον πίνακα **p** όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση:

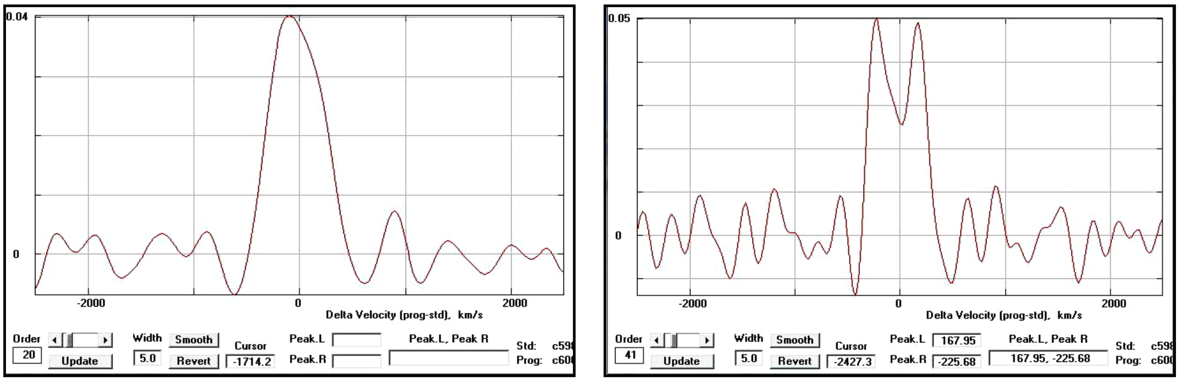
$$\mathbf{p} = \mathbf{S}\bullet\mathbf{b} \tag{3.16}$$

Κάθε γραμμή του πίνακα **S** περιέχει το φάσμα του πρότυπου αστέρα ελαφρώς μετατοπισμένο και με διευρυμένες γραμμές κατά ΔV από την υπερκείμενη γραμμή. Επομένως, μέσα σε αυτόν τον πίνακα βρίσκονται τα φάσματα του κάθε αστέρα του συστήματος ξεχωριστά, αφού ο κάθε αστέρας έχει διαφορετική ακτινική ταχύτητα ως προς τον παρατηρητή. Υποθέτουμε λοιπόν, ότι το φάσμα του πρωτεύοντα αστέρα (αυτό που θα είχε σαν μεμονωμένος αστέρας) αντιστοιχεί π.χ. στην πρώτη γραμμή του πίνακα **S**, η οποία περιέχει το φάσμα του πρότυπου αστέρα μετατοπισμένο και διευρυμένο κατά ΔV_1, και αντίστοιχα ότι το φάσμα του δευτερεύοντος αστέρα αντιστοιχεί π.χ. στη m-γραμμή του πίνακα και έχει μετατοπιστεί κατά ΔV_2. Πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέλη της σχέσης (3.16) με τον ανάστροφο πίνακα του **S**, τον $\mathbf{S^T}$ (σχέση 3.17), προκύπτει η συνάρτηση **b**, από την οποία προκύπτουν οι μετατοπίσεις Doppler των δύο αστέρων, που είναι και το ζητούμενο. Ο πίνακας **b** θα εφαρμοστεί σε όλα τα φάσματα τα οποία αφορούν το σύστημα ως εξής:

$$\mathbf{b} = \mathbf{S^T}\bullet\mathbf{p} \tag{3.17}$$

Η παραπάνω μέθοδος εύρεσης του καταλληλότερου ανάστροφου πίνακα, η οποία θα δώσει την καταλληλότερη συνάρτηση **b**, είναι γνωστή ως "singular value decomposition" (SVD). Τονίζεται ιδιαίτερα ότι ο πρότυπος αστέρας πρέπει να είναι περίπου ίδιου φασματικού τύπου με το σύνθετο φάσμα του συστήματος, ενώ για μεγαλύτερη αντικειμενικότητα προτείνεται η διαδικασία να επαναλαμβάνεται με όσο το δυνατόν περισσότερους πρότυπους αστέρες. Ανάλογα με την ποιότητα του φάσματος, ως προς τον λόγο σήματος προς θόρυβο, οι κορυφές που θα αντιστοιχούν στις ακτινικές ταχύτητες είναι πιθανό να μην είναι ευδιάκριτες. Με τη μέθοδο BF υπάρχει η δυνατότητα εξομάλυνσης του σήματος (smoothing order), έτσι ώστε να αποκαλυφθεί η πληροφορία (εικ. 3.15). Εφόσον αποκαλυφθούν οι κορυφές των ταχυτήτων των αστέρων, τότε το λογισμικό προσαρμόζει καμπύλες Gauss σε κάθε μια από αυτές και υπολογίζει με ακρίβεια τα κέντρα τους, οι τιμές των οποίων αντιστοιχούν στις ακτινικές ταχύτητες των αστέρων.

[1]http://www.astro.utoronto.ca/~rucinski/SVDcookbook.html



Εικόνα 3.15. Αριστερά: Καμπύλη ταχυτήτων ενός φάσματος διπλού συστήματος αστέρων με τη μέθοδο BF, όπου έχει επιλεγεί πολύ μικρός βαθμός εξομάλυνσης με αποτέλεσμα να διακρίνεται μια ενιαία κορυφή. Δεξιά: Το ίδιο με την αριστερή εικόνα, αλλά με τη διαφορά ότι έχει επιλεγεί μεγαλύτερος βαθμός εξομάλυνσης και πλέον η διπλή κορυφή, η οποία αντιστοιχεί στις ταχύτητες των αστέρων, διακρίνεται ξεκάθαρα και είναι δυνατόν να υπολογιστούν οι ακτινικές τους ταχύτητες με την προσαρμογή δύο καμπυλών Gauss.

Όπως και στα φωτομετρικά δεδομένα, έτσι και στα φασματοσκοπικά, τα οποία αφορούν ακτινικές ταχύτητες αστέρων, πρέπει να αφαιρεθεί ο παράγοντας «τροχιά της Γης». Για τον προσδιορισμό του χρόνου λήψης της κάθε εικόνας φάσματος γίνεται η ηλιοκεντρική διόρθωση (βλ. §3.1.2) και χρησιμοποιείται η σχέση (3.10). Όμως, καθότι η Γη εκτελεί κίνηση γύρω από τον Ήλιο με ταχύτητα ~30 km/sec, μια επιπλέον μετατόπιση Doppler υπεισέρχεται στις μετρούμενες μετατοπίσεις των φασματικών γραμμών. Επίσης, η μέθοδος BF υπολογίζει μεν τις ακτινικές ταχύτητες των αστέρων ενός διπλού συστήματος, αλλά σε σχέση με τον πρότυπο αστέρα, ο οποίος έχει και αυτός τη δική του ακτινική ταχύτητα ως προς τον Ήλιο. Όλα τα παραπάνω πρέπει να ληφθούν υπόψη για να προκύψουν οι πραγματικές ακτινικές ταχύτητες των αστέρων του συστήματος. Τίθενται τα εξής σύμβολα που χρησιμοποιούνται για τις σχετικές ακτινικές ταχύτητες στις παρακάτω σχέσεις: Η→Ήλιος, Γ→Γη, Π→Πρότυπος αστέρας και Μ→Μεταβλητός αστέρας. Αρχικά, υπολογίζεται η σχετική ακτινική ταχύτητα του πρότυπου αστέρα ως προς τη Γη στην κατεύθυνση του πρότυπου αστέρα. Οι ηλιοκεντρικές ακτινικές ταχύτητες των προτύπων αστέρων $V_{\Pi H}$ είναι διαθέσιμες στη βιβλιογραφία.

$$V_{\Pi\Gamma} = V_{\Pi H} - V_{H\Gamma} \tag{3.18}$$

και

$$V_{M\Gamma} = V_{M\Pi} + V_{\Pi\Gamma} \tag{3.19}$$

όπου η $V_{M\Pi}$ είναι η ταχύτητα του αστέρα από τη μέθοδο BF.

Τελικά, η ηλιοκεντρική ταχύτητα V_{MH} προκύπτει από τη σχέση:

$$V_{MH} = V_{M\Gamma} + V_{H\Gamma'} \tag{3.20}$$

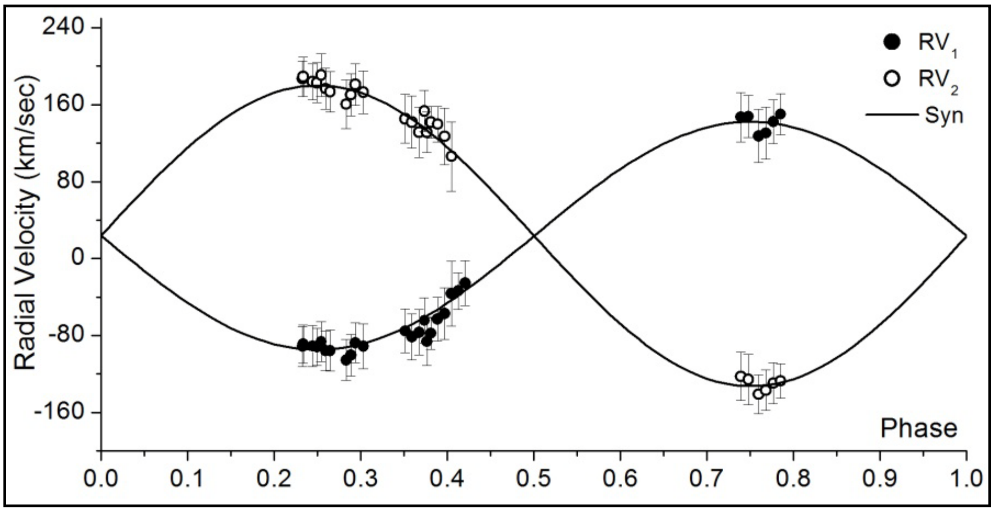
όπου $V_{H\Gamma}$ και $V_{H\Gamma'}$ οι συνιστώσες της σχετικής ακτινικής ταχύτητας Ήλιου-Γης κατά τη διεύθυνση του προτύπου αστέρα τη στιγμή λήψης του φάσματος και κατά τη διεύθυνση του μεταβλητού αστέρα τη στιγμή λήψης του δικού του φάσματος, αντίστοιχα.

Η διόρθωση στις παραπάνω ταχύτητες $V_{H\Gamma}$ και $V_{H\Gamma'}$ δίνεται από τη σχέση:

$$V_{cor} = -V\cos\beta\,\sin(\lambda_{\odot} - \lambda) + V\,e\sin(\Gamma - \lambda)\cos\beta \tag{3.21}$$

όπου λ, β οι εκλειπτικές συντεταγμένες του αστέρα ως προς τον οποίο θέλουμε να υπολογίσουμε τη συνιστώσα της ταχύτητας V, $\lambda_{\odot}$ το εκλειπτικό μήκος του Ήλιου, Γ εκλειπτικό το μήκος του Ήλιου κατά το περίγειο, e η εκκεντρότητα της τροχιάς της Γης και V= 29.974 km/sec η σχετική ταχύτητα Ηλίου-Γης κατά μήκος της τροχιάς της Γης.

Τέλος, αφού οι παραπάνω διαδικασίες επαναληφθούν για όλα τα φάσματα του διπλού συστήματος, βάσει της αστρονομικής του εφημερίδας κατασκευάζονται οι καμπύλες ακτινικών ταχυτήτων του. Είναι προφανές, ότι οι ακτινικές ταχύτητες παρουσιάζουν περιοδικές μεταβολές, επομένως μπορούν να υπολογιστούν τα πλάτη τους με την προσαρμογή ημιτονοειδών συναρτήσεων (εικ. 3.16).



Εικόνα 3.16. Ακτινικές ταχύτητες των αστέρων του εκλειπτικού συστήματος CM Lac (γεμάτοι κύκλοι για τον πρωτεύοντα αστέρα και κενοί για τον συνοδό), στις οποίες έχουν προσαρμοστεί ημιτονοειδείς συναρτήσεις (συνεχείς γραμμές) ώστε να υπολογιστούν τα πλάτη των ταχυτήτων K_1 και K_2 και η συστημική ταχύτητα γ. Οι παρατηρήσεις του συστήματος έλαβαν χώρα στο αστεροσκοπείο Σκίνακα από τον συγγραφέα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Ανάλυση δεδομένων και θεωρητικά μοντέλα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι τεχνικές ανάλυσης των δεδομένων, τα οποία προέκυψαν από την επεξεργασία τόσο των φωτομετρικών όσο και των φασματοσκοπικών παρατηρήσεων. Η ανάλυση των δεδομένων γίνεται με ειδικά λογισμικά, τα οποία προσαρμόζουν θεωρητικές καμπύλες στα παρατηρησιακά δεδομένα. Οι θεωρητικές αυτές καμπύλες προκύπτουν από συναρτήσεις, οι οποίες εμπεριέχουν έναν μεγάλο αριθμό παραμέτρων, μπορούν να καθοριστούν με βάση τα θεωρητικά μοντέλα και να περιγράψουν ποιοτικά και ποσοτικά τα παρατηρησιακά δεδομένα. Αρχικά, παρουσιάζεται το επικρατέστερο μοντέλο περιγραφής καμπυλών φωτός εκλειπτικών συστημάτων αστέρων, σύμφωνα με το οποίο εξάγονται οι απόλυτες παράμετροι των αστέρων-μελών. Επιπλέον, και καθώς αποτελούν κύριο αντικείμενο της διατριβής, παρουσιάζονται οι φυσικοί μηχανισμοί που μπορούν να επηρεάσουν την τροχιακή περίοδο ενός διπλού συστήματος, κάτι που έχει συνέπειες και στην εξελικτική κατάσταση των αστέρων-μελών του. Τέλος, παρουσιάζεται η τεχνική ανάλυσης των δεδομένων παλλόμενων αστέρων, καθώς χρησιμοποιείται για την ανάλυση των διπλών συστημάτων, όπου το ένα μέλος είναι παλλόμενος αστέρας τύπου δ Sct (βλ. Κεφ. 7).

4.1. Ανάλυση δεδομένων και μοντέλα περιγραφής εκλειπτικών συστημάτων αστέρων

Το επικρατέστερο μοντέλο περιγραφής διπλών εκλειπτικών συστημάτων αστέρων είναι ο κώδικας των Wilson-Devinney (W-D) (Wilson & Devinney 1971, Wilson 1979, 1990), ο οποίος βασίζεται στη γεωμετρία Roche και περιγράφεται συνοπτικά από τους Kallrath & Milone (1999). Ο κώδικας διατίθεται σε γραφικό περιβάλλον μέσω του λογισμικού PHOEBE[1] v.0.29d (Prša & Zwitter 2005). Παρακάτω παρατίθενται τα βασικά χαρακτηριστικά του κώδικα W-D.

Ο κώδικας λαμβάνει υπόψη συστήματα με έκκεντρη τροχιά εκκεντρότητας e και μεγάλου ημιάξονα τροχιάς a. Η απόσταση μεταξύ των αστέρων d εξαρτάται από τη φάση Φ. Η πιθανή ασύγχρονη περιστροφή των μελών υπεισέρχεται με τον παράγοντα συγχρονισμού F (λόγος γωνιακής ταχύτητας ιδιοπεριστροφής προς τη γωνιακή ταχύτητα περιφοράς γύρω από το κοινό κέντρο μάζας). Οι ισοδυναμικές επιφάνειες των αστέρων υπολογίζονται από τη γεωμετρία Roche (βλ. §1.2.2) ως εξής:

$$\Omega(\mathrm{r};\mathrm{q},\mathrm{F},\mathrm{d}) = \frac{1}{\mathrm{r}} + \mathrm{q}\left[\frac{1}{\sqrt{\mathrm{d}^2 - 2\mathrm{d}\lambda\mathrm{r} + \mathrm{r}^2}} - \frac{\lambda\mathrm{r}}{\mathrm{d}^2}\right] + \frac{\mathrm{q}+1}{2}\mathrm{F}^2\mathrm{r}^2(1-\nu^2) \qquad (4.1)$$

όπου q ο λόγος μαζών των αστέρων και $\mathbf{r}_{ij} = \mathbf{r}_{ij}(\theta_i\ \varphi_j;\ q,\ F,\ \Omega,\ d)$ τα ακτινικά διανύσματα, τα οποία προσδιορίζονται για κάθε αστέρα-μέλος για συγκεκριμένες τιμές των θ και φ και καθιερώνουν ένα σύστημα επιφανειακών σημείων r_s. Τα δυναμικά Ω_1 και Ω_2 μετρώνται στο σύστημα αναφοράς του πρωτεύοντα αστέρα.

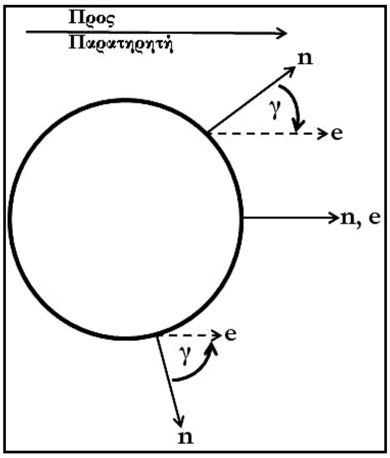
Η ολική ροή ακτινοβολίας l συναρτήσει της γωνιακής φάσης Φ των αστέρων ενός διπλού συστήματος δίνεται από τη σχέση:

[1] http://phoebe.fiz.uni-lj.si/

$$l(\Phi) = l_1(\Phi) + l_2(\Phi) + l_3 \tag{4.2}$$

όπου οι δείκτες 1 και 2 αναφέρονται στον πρωτεύοντα και στο δευτερεύοντα αστέρα του συστήματος, αντίστοιχα, ενώ ο δείκτης 3 αναφέρεται σε κοντινό τρίτο μέλος, του οποίου η φωτομετρική συνεισφορά είναι ανεξάρτητη της φάσης *Φ*. Στην παρακάτω σχέση δίνεται ο ορισμός της μονοχρωματικής ροής *l* ακτινοβολίας *λ* του συνοδού *j* που φεύγει από την επιφάνεια του αστέρα:

$$l_j(\Phi) = \int_0^{\pi}\int_0^{2\pi} X(r_s)\, I(\cos\gamma; g, T, \lambda)\, \frac{\cos\gamma}{\cos\beta} r^2 \sin\theta \, d\varphi \, d\theta \tag{4.3}$$



Εικόνα 4.1. Η γωνία *γ* μεταξύ της οπτικής ευθείας (e) και της πορείας της ακτινοβολίας από την επιφάνεια του αστέρα (n).

όπου *I* η ένταση της ακτινοβολίας και είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας *T*, του συντελεστή αμαύρωσης χείλους λόγω βαρύτητας *g*, ο οποίος με τη σειρά του εξαρτάται από τη γωνία μεταξύ της οπτικής ευθείας του παρατηρητή και της πορείας της ακτινοβολίας από την αστρική επιφάνεια όπως φαίνεται στην εικ. 4.1. Στο ολοκλήρωμα περιλαμβάνεται και η γωνία *γ*. Η ολοκλήρωση λαμβάνει χώρα σε ολόκληρη την αστρική επιφάνεια (*φ* αζιμουθιακή και *θ* πολική γωνία). Όμως, η τιμή της ροής εξαρτάται από την τιμή της συνάρτησης $X(r_s)$ του στοιχειώδους σημείου επιφανείας r_s που ορίζεται στην παρακάτω σχέση:

$$X(r_s) \coloneqq \begin{cases} 1, \text{εάν } r_s \text{ ορατό} \\ 0, \text{εάν } r_s \text{ αόρατο} \end{cases} \tag{4.4}$$

όπου με τη σειρά της η συνάρτηση $X(r_s)$ παράγεται από δύο χαρακτηριστικές συναρτήσεις $X^A(r_s)$ και $X^B(r_s)$, οι οποίες ονομάζονται συναρτήσεις «ορίζοντα» και «εκλείψεων», αντίστοιχα, και ορίζονται ως εξής:

$$X^A(r_s) \coloneqq \begin{cases} 1, \text{εάν } \cos\gamma < 0 \ (\text{ή } \gamma > 90°) \\ 0, \text{εάν } \cos\gamma > 0 \ (\text{ή } \gamma < 90°) \end{cases} \tag{4.5}$$

και

$$X^B(r_s) \coloneqq \begin{cases} 1, \text{εάν το } r_s \text{ δεν αποκρύπτεται από τον συνοδό} \\ 0, \text{εάν το } r_s \text{ αποκρύπτεται από τον συνοδό} \end{cases} \tag{4.6}$$

Απλούστερα, η σχέση (4.3) γίνεται:

$$l_j(\Phi) = I \sum_{\varphi=0}^{2\pi}\sum_{\theta=0}^{\pi} \left\{ GRD \frac{\cos\gamma}{\cos\beta} r^2 \sin\theta \, \Delta\varphi\Delta\theta \right\} \tag{4.7}$$

Όπου οι αδιάστατοι λόγοι $G_j = G_j(r_S)$, $R_j = R_j(r_S)$ και $D_j = D_j(r_S)$ αντιστοιχούν στο φαινόμενο αμαύρωσης λόγω βαρύτητας, στο φαινόμενο ανάκλασης και στο φαινόμενο αμαύρωσης χείλους, αντίστοιχα, και δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

Φαινόμενο αμαύρωσης χείλους (limb darkening):

$$D_\lambda(\gamma) = 1 - x_\lambda(1 - \cos\gamma) \tag{4.8}$$

όπου x_λ οι συντελεστές αμαύρωσης χείλους και εξαρτώνται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, άρα κατ' επέκταση και από τη θερμοκρασία και έχουν υπολογιστεί από τον van Hamme (1993).

Φαινόμενο αμαύρωσης χείλους λόγω βαρύτητας (gravity darkening):

$$G = \frac{F_l}{F_p} = \left(\frac{g_l}{g_p}\right)^g \tag{4.9}$$

όπου

$$g = \begin{cases} 1, \text{για αστέρες με ζώνη ακτινοβολίας (von Zeipel 1924)} \\ 0.32, \text{για αστέρες με ζώνη μεταφοράς (Lucy 1967)} \end{cases} \tag{4.10}$$

Όπου g ο συντελεστής αμαύρωσης λόγω βαρύτητας και F_l και F_p η βολομετρική ροή σε τυχαίο σημείο της αστρικής επιφάνειας (l) και στον πόλο του αστέρα (p), αντίστοιχα.

Φαινόμενο ανάκλασης (reflection effect):

$$R = 1 + A_t \frac{F_S}{F_t} \tag{4.11}$$

όπου F_S η βολομετρική ροή ακτινοβολίας εξερχόμενη από τον έναν αστέρα, F_t η τοπική «αδιατάραχτη» ροή του συνοδού στον οποίο προσπίπτει η ακτινοβολία, και A_t ο βολομετρικός συντελεστής ανάκλασης του αστέρα στον οποίο προσπίπτει η ακτινοβολία (συνοδού) και προσδιορίζει τον τοπικό λόγο της επανακτινοβολούμενης προς την προσπίπτουσα ενέργεια σε όλα τα μήκη κύματος. Όπου:

$$A = \begin{cases} 1, \text{για αστέρες με ζώνη ακτινοβολίας (von Zeipel 1924)} \\ 0.5, \text{για αστέρες με ζώνη μεταφοράς (Rucinski 1969)} \end{cases} \tag{4.12}$$

Εδώ πρέπει να τονιστεί, ότι ο συντελεστής ανάκλασης μπορεί να πάρει και τιμές μεταξύ 0.5 και 1, σε περιπτώσεις όπου οι αστέρες του συστήματος έχουν πολύ μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας, και το ημισφαίριο του ψυχρότερου αστέρα που βρίσκεται προς το μέρος του θερμότερου θερμαίνεται πολύ παραπάνω και εκπέμπει περισσότερη ακτινοβολία από τη θεωρητική.

Ο κώδικας W-D περιέχει πληθώρα παραμέτρων, οι οποίοι σχετίζονται είτε με την ακτινοβολία είτε με τη γεωμετρία των αστέρων του συστήματος. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται όλες οι παράμετροι του κώδικα W-D, όπως παρουσιάζονται στο λογισμικό PHOEBE με μια σύντομη επεξήγηση.

Πίνακας 4.1. Οι παράμετροι του κώδικα W-D όπως παρουσιάζονται στο λογισμικό PHOEBE.

Σχετικά με το σύστημα	
HJD_0	Χρόνος πρωτεύοντος ελαχίστου
PERIOD - P	Περίοδος του συστήματος
DPDT	Πρώτη παράγωγος της περιόδου
PSHIFT – Φ_0	Μετατόπιση της καμπύλης φωτός σε φάση
SMA - α	Ημιάξονας της σχετικής τροχιάς
RM – q ($=m_2/m_1$)	Λόγος μαζών των αστέρων
INCL – i	Κλίση του τροχιακού επιπέδου του συστήματος ως προς το επίπεδο του ουρανού
VGA – γ	Συστημική ακτινική ταχύτητα
Σχετικά με τους αστέρες	
TAVH – T_1	Θερμοκρασία του πρωτεύοντα αστέρα
TAVC – T_2	Θερμοκρασία του δευτερεύοντα αστέρα

Πίνακας 4.1. (συν.)

PHSV - Ω_1	Δυναμικό επιφανείας του πρωτεύοντα αστέρα
PCSV - Ω_2	Δυναμικό επιφανείας του δευτερεύοντα αστέρα
$\log g_1$	Επιτάχυνση της βαρύτητας του πρωτεύοντα αστέρα
$\log g_2$	Επιτάχυνση της βαρύτητας του δευτερεύοντα αστέρα
MET 1	Μεταλλικότητα του πρωτεύοντα αστέρα
MET 2	Μεταλλικότητα του δευτερεύοντα αστέρα
Σχετικά με την τροχιά του συστήματος	
e	Σχετική εκκεντρότητα του δευτερεύοντα αστέρα
PERR0 - ω	Όρισμα του περιάστρου της σχετικής τροχιάς
DPERDT	Πρώτη παράγωγος του ορίσματος του περιάστρου της σχετικής τροχιάς
F_1	Συντελεστής συγχρονισμού του πρωτεύοντα αστέρα
F_2	Συντελεστής συγχρονισμού του δευτερεύοντα αστέρα
Σχετικά με τις φωτεινότητες των αστέρων	
Primary level luminosity/filter	Φωτεινότητα του πρωτεύοντα αστέρα ανά φίλτρο
Secondary level luminosity/filter	Φωτεινότητα του δευτερεύοντα αστέρα ανά φίλτρο
3^{rd} light level/filter – l_3	Συνεισφορά της φωτεινότητας του τρίτου σώματος είτε σε ποσοστό επί της ολικής φωτεινότητας είτε στη ροή ανά φίλτρο
Σχετικά με το φαινόμενο 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 ανά φίλτρο στις μονοχρωματικές καμπύλες φωτός
RV Monochromatic Limb darkening coefficients/filter	Συντελεστές του φαινομένου αμαύρωσης χείλους ανά φίλτρο στις μονοχρωματικές καμπύλες ακτινικών ταχυτήτων
Σχετικά με την επιφάνεια των αστέρων	
ALB 1 – A_1	Συντελεστής ανάκλασης του πρωτεύοντα αστέρα
ALB 2 – A_2	Συντελεστής ανάκλασης του δευτερεύοντα αστέρα
GR 1 – g_1	Φαινόμενο αμαύρωσης λόγω βαρύτητας του πρωτεύοντα αστέρα
GR 2 – g_2	Φαινόμενο αμαύρωσης λόγω βαρύτητας του δευτερεύοντα αστέρα
Spots on primary star	Αριθμός κηλίδων στον πρωτεύοντα αστέρα με παραμέτρους το αστρογραφικό τους πλάτος και μήκος, τη θερμοκρασία τους και την ακτίνα τους
Spots on secondary star	Αριθμός κηλίδων στον δευτερεύοντα αστέρα με παραμέτρους το αστρογραφικό τους πλάτος και μήκος, τη θερμοκρασία τους και την ακτίνα τους

Μέθοδος επίλυσης

Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί τη μέθοδο των «διαφορικών διορθώσεων» κάθε φορά όπου συγκλίνει σε νέες παραμέτρους. Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην αντικατάσταση των μερικών παραγώγων με πεπερασμένες διαφορές. Χρησιμοποιείται επίσης η μέθοδος των πολλαπλών υποσυνόλων (multiple subsets) των παραμέτρων (Wilson & van Hamme 2003), το οποίο σημαίνει, ότι σε κάθε επανάληψη προσαρμογής νέας θεωρητικής καμπύλης (iteration) θα αφήνονται ελεύθερες προς σύγκλιση ορισμένες μόνο παράμετροι, ενώ οι υπόλοιπες θα παραμένουν σταθερές. Τα υποσύνολα παραμέτρων περιέχουν πάντα παραμέτρους, οι οποίες δεν αλληλοσχετίζονται. Συγκεκριμένα, τα υποσύνολα (σε γενική χρήση του προγράμματος) είναι:

I. Φ_0, i, T_2 και

II. L_1, Ω_1, Ω_2, (q), (a), (γ), l_3.

Από τη βιβλιογραφία ή τη θεωρία χρησιμοποιούνται σταθερές τιμές για τις υπόλοιπες παραμέτρους (π.χ. T_1[1], A_1, A_2, g_1, g_2, x_1, x_2) και έτσι το πρόγραμμα με κατάλληλες επιλογές των παραμέτρων, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στις επαναλήψεις, κατασκευάζει νέα θεωρητική καμπύλη και συγκλίνει σε νέα λύση. Από το άθροισμα των τετραγώνων των υπολοίπων (Σres^2) αλλά και από την προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης στα παρατηρησιακά δεδομένα ανά φίλτρο, ο χρήστης μπορεί να κρίνει εάν θα συνεχίσει τις επαναλήψεις προκειμένου να βρει νέα λύση. Οι παράμετροι, οι οποίες είναι εντός παρενθέσεων στο δεύτερο υποσύνολο, αφήνονται ελεύθερες μόνο εάν διατίθενται και καμπύλες ακτινικών ταχυτήτων. Το πρόγραμμα διαθέτει έτοιμα γεωμετρικά μοντέλα με σταθερές τιμές κάποιων παραμέτρων, έτσι ώστε να φτάνει γρηγορότερα σε λύση. Τα μοντέλα αυτά ονομάζονται "Modes" και το καθένα έχει διαφορετικές τιμές σταθερών παραμέτρων (πίνακας 4.2).

Πίνακας 4.2. Παραμετροποίηση των modes στον κώδικα W-D.

Mode	Παράμετρος
0: General Binary	Όλες ελεύθερες
1: Overcontact binary not in thermal contact (σύστημα σε υπερεπαφή όχι σε θερμική ισορροπία)	$\Omega_1=\Omega_2<\Omega_C$, $T_1\neq T_2$
2: Detached binary (αποχωρισμένοι αστέρες)	Ω_1, $\Omega_2>\Omega_C$
3: Overcontact binary of W UMa type (σύστημα σε υπερεπαφή τύπου EW)	$\Omega_1=\Omega_2<\Omega_C$, $T_1=T_2$, $x_1=x_2$, $g_1=g_2$
4: Semi - Detached Binary, primary star fills Roche Lobe (ημιαποχωρισμένο σύστημα όπου ο πρωτεύων αστέρας γεμίζει τον λοβό Roche του)	$\Omega_1=\Omega_C$
5: Semi - Detached Binary, secondary star fills Roche Lobe (ημιαποχωρισμένο σύστημα όπου ο δευτερεύων αστέρας γεμίζει τον λοβό Roche του)	$\Omega_2=\Omega_C$
6: Double contact binary (οι αστέρες είναι σε οριακή επαφή)	$\Omega_1=\Omega_2=\Omega_C$

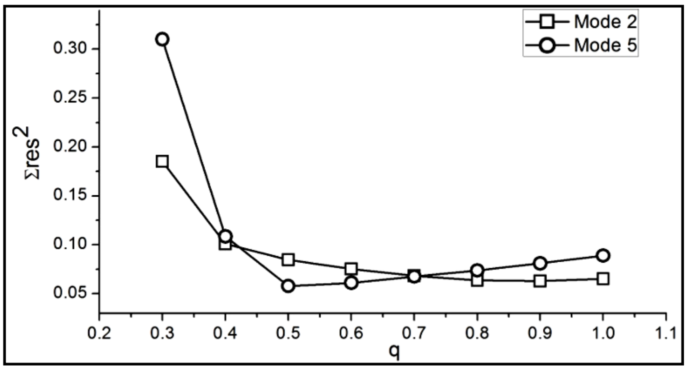
Ω_C: Κρίσιμο δυναμικό Roche (η ακτίνα του αστέρα φτάνει την κρίσιμη τιμή της ακτίνας Roche)

[1]Η τιμή της θερμοκρασίας βασίζεται στον φασματικό τύπο του αστέρα ή του συστήματος, με την αντιστοιχία να δίνεται στους πίνακες του Cox (2000) (βλ. Παρ. Ε).

Εύρεση του λόγου μαζών από φωτομετρικές παρατηρήσεις

Ο λόγος μαζών *q* είναι μια πολύ ευαίσθητη αλλά και κρίσιμη παράμετρος για το μοντέλο. Σε περιπτώσεις όπου δεν είναι διαθέσιμες οι καμπύλες ακτινικών ταχυτήτων των αστέρων, και στην παρούσα διατριβή τα περισσότερα συστήματα είναι τέτοιες περιπτώσεις, ο λόγος μαζών προσδιορίζεται μόνο από την επίλυση των καμπυλών φωτός, με τη μέθοδο «ανίχνευσης του λόγου μαζών» (*q*-search). Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην εύρεση της καλύτερης δυνατής λύσης (ελάχιστο Σres^2) σε ένα εύρος τιμών του *q*. Σε κάθε "Mode" του κώδικα W-D δοκιμάζεται να επιτευχθεί επίλυση των καμπυλών φωτός. Η τιμή του *q* διατηρείται σταθερή και επιλέγονται, σύμφωνα με τη μέθοδο των υποσυνόλων των παραμέτρων, προς σύγκλιση οι υπόλοιπες παράμετροι. Αφού ο κώδικας φτάσει σε σύγκλιση, δηλαδή στο ελάχιστο Σres^2 για τη δεδομένη τιμή του *q*, τότε το *q* μεταβάλλεται κατά ένα σταθερό βήμα (π.χ. 0.1) και επαναλαμβάνεται η διαδικασία από την αρχή. Επομένως, σε κάθε "Mode" και για κάθε τιμή του *q* έχει προκύψει το αντίστοιχο Σres^2. Τοποθετώντας όλες αυτές τις τιμές σε ένα διάγραμμα βρίσκεται η τιμή του *q* και το "Mode" στο οποίο επιτεύχθηκε το ελάχιστο Σres^2. Εν συνεχεία, η διαδικασία σύγκλισης των παραμέτρων επαναλαμβάνεται, αλλά αυτή τη φορά με το *q* ως ελεύθερη παράμετρο ξεκινώντας με αρχική τιμή αυτή για την οποία προέκυψε το ελάχιστο Σres^2.

Είναι προφανές, ότι αυτή η μέθοδος εύρεσης του *q* δεν αποδίδει τόσο βέβαια αποτελέσματα, σε σύγκριση με την περίπτωση που διατίθενται οι ακτινικές ταχύτητες των αστέρων. Όμως, σύμφωνα με τους Kallrath & Milone (1999, βλ. §4.1.1.1) ο φωτομετρικός λόγος μαζών (q_{ph}) μπορεί να προσδιοριστεί με μεγάλη βεβαιότητα όταν το σύστημα είναι ημιαποχωρισμένο ή σε υπερεπαφή. Επιπλέον, μεγάλη βεβαιότητα στον προσδιορισμό του *q* μόνο από επίλυση των καμπυλών φωτός υπάρχει στις περιπτώσεις συστημάτων τα οποία παρουσιάζουν τουλάχιστον μια ολική έκλειψη (Kallrath & Milone 1999-§4.1.1.1, Terrell & Wilson 2005).



Εικόνα 4.2. Διάγραμμα ανίχνευσης του *q* σε δύο Modes για το εκλειπτικό σύστημα AW Vul. Η καλύτερη λύση επιτεύχθηκε στο Mode 5 με τιμή q_{ph}=0.5.

4.2. Ανάλυση και ερμηνεία των μεταβολών της τροχιακής περιόδου εκλειπτικών συστημάτων αστέρων

Η μελέτη των O−C διαγραμμάτων (βλ. §3.1.5) παρουσιάζει εξαιρετικό αστροφυσικό ενδιαφέρον, διότι προσφέρει πληροφορίες για τις μεταβολές της περιόδου ενός εκλειπτικού συστήματος αστέρων. Από την ανάλυση των κατανομών των σημείων των O−C διαγραμμάτων είναι δυνατόν να βρεθούν τα αίτια που προκαλούν αυτές τις μεταβολές και με τη χρήση ειδικών λογισμικών να υπολογιστούν οι παράμετροί τους. Όπως αναφέρθηκε ήδη, σε ένα διπλό εκλειπτικό σύστημα αστέρων, το οποίο δεν παρουσιάζει τροχιακές μεταβολές, η μορφή του O−C διαγράμματός του είναι η ευθεία O−C=0. Όμως, σε κάποια συστήματα η ύπαρξη ενός τρίτου σώματος ή άλλα φαινόμενα επηρεάζουν τις κατανομές των O−C διαγραμμάτων τους, μέσω των οποίων μπορεί να αποσαφηνιστεί η κατάσταση που επικρατεί στο σύστημα. Γενικά, σε ένα σύστημα αστέρων μπορούν να λαμβάνουν χώρα περισσότεροι από ένας μηχανισμοί διαμόρφωσης της τροχιακής περιόδου με αποτέλεσμα να προκύπτει μια πιο πολύπλοκη κατανομή O−C σημείων. Οπότε, ο αναλυτής των δεδομένων πρέπει να συνδυάσει θεωρητικά μοντέλα διαφόρων φυσικών μηχανισμών προκειμένου να καταλήξει στο πληρέστερο μοντέλο περιγραφής του συστήματος. Τα συστήματα τα οποία αναλύονται στην παρούσα διατριβή επιλέχθηκαν ως επί το πλείστον λόγω της εμφάνισης ιδιαζόντων κατανομών στα O−C διαγράμματά τους.

Μέθοδος ανάλυσης των O−C διαγραμμάτων

Η ανάλυση των O−C διαγραμμάτων γίνεται με τη χρήση ενός υπολογιστικού κώδικα (Zasche et al. 2009) στο λογισμικό MATLAB, ο οποίος προσαρμόζει, βάσει της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων με στατιστικά βάρη, θεωρητικές καμπύλες στα σημεία O−C. Στον κώδικα έχουν εισαχθεί υπορουτίνες, οι οποίες αντιστοιχούν στους μηχανισμούς διαμόρφωσης της τροχιακής περιόδου ενός εκλειπτικού συστήματος αστέρων. Ο χρήστης, ανάλογα με την κατανομή των O−C σημείων, μπορεί να επιλέξει όποια υπορουτίνα ή συνδυασμό υπορουτίνων θεωρεί ότι θα περιγράψει πιο ικανοποιητικά την κατανομή. Στόχος των προσαρμογών των θεωρητικών καμπύλων είναι η εύρεση των παραμέτρων των μηχανισμών. Τα στατιστικά βάρη στα O−C σημεία δίνονται ανάλογα με την αξιοπιστία του τρόπου παρατήρησης του φωτομετρικού ελαχίστου. Συγκεκριμένα, για χρόνους ελαχίστων που υπολογίστηκαν βάσει οπτικών παρατηρήσεων δίνεται βάρος 1, για φωτογραφικές παρατηρήσεις δίνεται 5 και για φωτοηλεκτρικές και CCD δίνεται 10. Στις εικόνες των O−C διαγραμμάτων των κεφαλαίων 5-7 όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος των συμβόλων τόσο μεγαλύτερο στατιστικό βάρος τους έχει δοθεί. Τα «άδεια» σύμβολα αντιστοιχούν σε χρόνους δευτερευόντων ελαχίστων και τα «γεμάτα» σε χρόνους πρωτευόντων ελαχίστων. Η αστρονομική εφημερίδα (σχέση 3.11), η οποία δίνεται ως αρχική παράμετρος στον κώδικα, και οι χρόνοι παρατηρηθέντων ελαχίστων, βάσει των οποίων προκύπτουν τα O−C σημεία (βλ. §3.1.5), λαμβάνονται από βάσεις δεδομένων (βλ. §3.1.5) χρόνων ελαχίστων και O−C διαγραμμάτων. Παρακάτω, παρουσιάζονται οι επικρατέστεροι φυσικοί μηχανισμοί, οι οποίοι είναι ικανοί να επηρεάσουν την τροχιακή περίοδο ενός εκλειπτικού συστήματος αστέρων.

4.2.1. Light-Time Effect

Το Light-Time Effect (εφεξής LITE) αναφέρεται στις περιοδικές μεταβολές της τροχιακής περιόδου ενός εκλειπτικού συστήματος αστέρων λόγω ύπαρξης ενός τρίτου σώματος σε τροχιά γύρω από αυτό. Το διπλό σύστημα περιφέρεται γύρω από το κοινό κέντρο μάζας των τριών σωμάτων, με αποτέλεσμα η απόστασή του από τον παρατηρητή να αυξομειώνεται περιοδικά. Επομένως, οι προβλεπόμενοι χρόνοι παρατήρησης των φωτομετρικών ελαχίστων μεταβάλλονται και αυτοί.

Η θεωρία του LITE εισήχθη από τον Irwin (1959), όμως, ο πρώτος που ανέφερε το LITE ως πιθανή αιτία μεταβολής της τροχιακής περιόδου του Algol ήταν ο Chandler (1888a, 1888b, 1888c), ενώ ο πρώτος που υπολόγισε μαθηματικά αυτό το φαινόμενο ήταν ο Woltjer (1922). Αργότερα, το LITE προτάθηκε πολλές φορές ως ερμηνεία για εκλειπτικά συστήματα αστέρων, τα οποία παρουσίαζαν περιοδικές μεταβολές 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 εκλειπτικά συστήματα αστέρων, ώστε να ερμηνευτούν οι περιοδικές μεταβολές των σημείων των O−C διαγραμμάτων τους με το LITE:

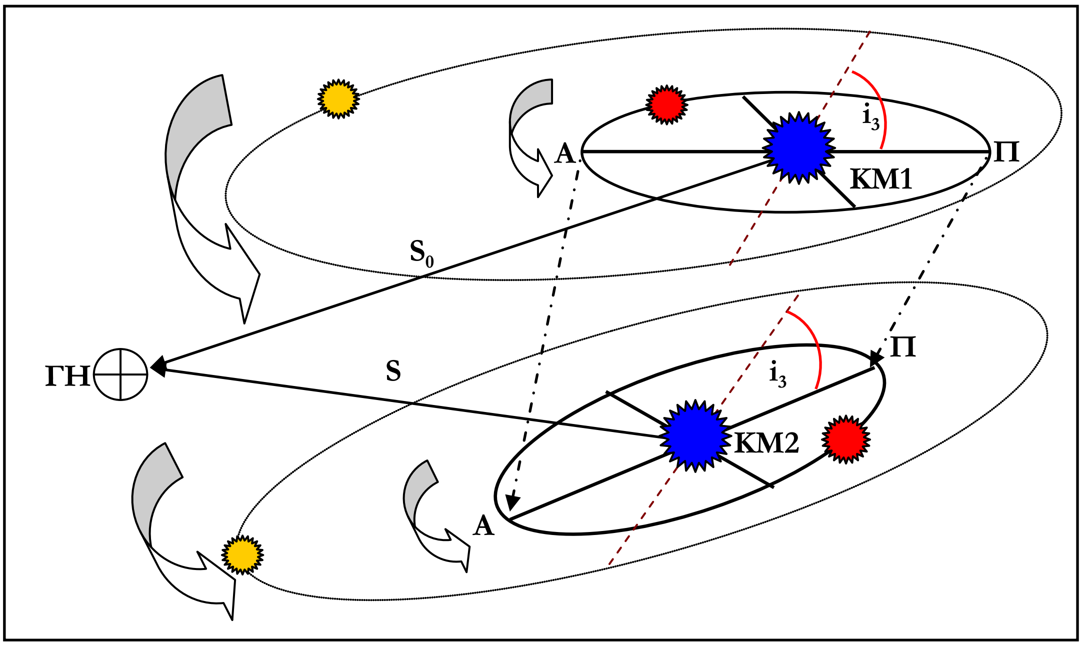
- Συμφωνία των O−C σημείων με τη θεωρητική καμπύλη του LITE
- Τα σημεία O−C που αντιστοιχούν σε δευτερεύοντα ελάχιστα να έχουν ταυτοτική συμπεριφορά με αυτά των πρωτευόντων
- Λογική τιμή της συνάρτησης μάζας (συγκρίσιμη με τις μάζες των αστέρων του εκλειπτικού συστήματος), ώστε να αποδεικνύεται η ύπαρξη του τρίτου αστέρα
- Αντίστοιχες μεταβολές στις ακτινικές ταχύτητες των αστέρων του εκλειπτικού συστήματος.

Το μαθηματικό μοντέλο του LITE

Η παρουσία ενός τρίτου σώματος στη γειτονιά του εκλειπτικού συστήματος αστέρων προκαλεί μετατόπιση του κέντρου μάζας του. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η χρονική διαφορά μεταξύ των φωτεινών σημάτων που λαμβάνει ο παρατηρητής και γίνεται αντιληπτή μέσω των διαφορών μεταξύ παρατηρηθέντων και προβλεπομένων χρόνων ελαχίστων. Κύριο χαρακτηριστικό αυτού του φαινομένου είναι η περιοδικότητα των O−C σημείων. Το κέντρο μάζας του διπλού συστήματος διαγράφει ομοιόθετη ελλειπτική τροχιά προς εκείνη του τρίτου σώματος. Η απόστασή του S από τον παρατηρητή σε τυχαία χρονική στιγμή t δίνεται από τη σχέση (Martynov 1973):

$$\mathrm{S} = \mathrm{S}_0 + \mathrm{U}_{0b}(\mathrm{t} - \mathrm{T}_0) + \alpha_{1,2}\left(1 - e_{1,2}\cos\varepsilon_3\right)\sin \mathrm{i}_3 \sin(\nu_3 + \omega_3) \qquad (4.13)$$

όπου S_0 η απόσταση του κέντρου μάζας του συστήματος από τον παρατηρητή τη χρονική στιγμή T_0, U_{0b} η συνιστώσα της ταχύτητας του διπλού συστήματος στη διεύθυνση της ευθείας παρατήρησης, $a_{1,2}$ το μήκος του ημιάξονα της τροχιάς του κέντρου μάζας του



Εικόνα 4.3. Γεωμετρία ενός εκλειπτικού συστήματος αστέρων (κόκκινος και μπλε κύκλος) με την παρουσία ενός τρίτου αστέρα (κίτρινος κύκλος) και η μετατόπιση του κέντρου μάζας (ΚΜ) του διπλού συστήματος (από ΚΜ1 στο ΚΜ2). Επίσης, έχει σχεδιαστεί και η διαφορά των οπτικών δρόμων S και S_0 και η γραμμή των αψίδων (ΠΑ).

διπλού συστήματος ως προς το κέντρο βάρους του τριπλού συστήματος, $e_{1,2}$ η εκκεντρότητα της τροχιάς του κέντρου μάζας του διπλού συστήματος, i_3 η κλίση της τροχιάς του τρίτου αστέρα ως προς το τροχιακό επίπεδο του εκλειπτικού συστήματος, ω_3 το μήκος του περιάστρου της τροχιάς του και v_3, ε_3 η αληθής και έκκεντρη ανωμαλία, αντίστοιχα, του τρίτου αστέρα σε τυχαία χρονική στιγμή.

Οι παρατηρούμενες O−C μεταβολές λόγω LITE δίνονται από τη σχέση:

$$\mathrm{O-C} = \frac{\mathrm{A}}{\sqrt{1-\mathrm{e}_3^2\cos^2\omega_3}}\left[\frac{1-\mathrm{e}_3^2}{1+e_3\cos\nu_3}\sin(\nu_3+\omega_3)+\mathrm{e}_3\sin\omega_3\right]\ [\mathrm{days}] \quad (4.14)$$

όπου v_3 η αληθινή ανωμαλία, e_3 η εκκεντρότητα, ω_3 το όρισμα του περιάστρου του τρίτου σώματος και A το ημιπλάτος της καμπύλης του LITE που δίνεται από τη σχέση:

$$\mathrm{A} = \frac{1}{2}[(\mathrm{O-C})_{\max} - (\mathrm{O-C})_{\min}] = \frac{\alpha_{1,2}\sin\mathrm{i}_3\sqrt{1-\mathrm{e}_3^2\cos^2\omega_3}}{173.145}\ [\mathrm{days}] \quad (4.15)$$

όπου $a_{1,2}$ ο ημιάξονας της τροχιάς του διπλού συστήματος γύρω από το βαρύκεντρο του τριπλού συστήματος και υπολογίζεται από τον τρίτο νόμο του Kepler:

$$\alpha_{1,2} = \left(\frac{(\mathrm{m}_3\sin\mathrm{i}_3)^3\,\mathrm{P}_3^2}{(\mathrm{m}_1+\mathrm{m}_2+\mathrm{m}_3)^2}\right)^{\frac{1}{3}}\ [\mathrm{AU}] \quad (4.16)$$

όπου P_3 η περίοδος του τρίτου σώματος γύρω από το κοινό κέντρο μάζας εκφρασμένη σε yrs και m οι μάζες των αστέρων σε ηλιακές μονάδες.

Η συνάρτηση μάζας του τρίτου σώματος θα δίνεται από τη σχέση (Torres et al. 2010):

$$\mathrm{f(m_3)} = \frac{\left(\alpha_{1,2}\sin\mathrm{i}_3\right)^3}{\mathrm{P}_3^2} = \frac{(\mathrm{m}_3\sin\mathrm{i}_3)^3}{(\mathrm{m}_1+\mathrm{m}_2+\mathrm{m}_3)^2} = \frac{1}{\mathrm{P}_3^2}\left[\frac{173.145\ \mathrm{A}}{\sqrt{1-\mathrm{e}_3^2\cos^2\omega_3}}\right]^3\ [\mathrm{M}_\odot] \quad (4.17)$$

βάσει της οποίας προκύπτει η μάζα του τρίτου σώματος m_3. Στην περίπτωση όπου οι τροχιές του εκλειπτικού συστήματος αστέρων και του τρίτου σώματος είναι συνεπίπεδες (i_3=90°), τότε προκύπτει η ελάχιστη τιμή μάζας του τρίτου σώματος $m_{3,\min}$ και ο ημιάξονας της τροχιάς του a_3:

$$\alpha_3 = \frac{\mathrm{m}_1+\mathrm{m}_2}{\mathrm{m}_3}\,\alpha_{1,2}\ [\mathrm{AU}] \quad (4.18)$$

Στην περίπτωση όπου η απόσταση D του εκλειπτικού συστήματος αστέρων από τον παρατηρητή έχει καθοριστεί, τότε μπορεί να υπολογιστεί η γωνιώδης απόσταση a, η οποία συνήθως εκφράζεται σε milli arcsecond (mas), από τη σχέση:

$$\mathrm{a} = \tan^{-1}\frac{\alpha_{\max}}{\mathrm{D}}\ [\mathrm{mas}] \quad (4.19)$$

όπου $a_{\max}$ το άθροισμα των ημιαξόνων των τροχιών του εκλειπτικού συστήματος αστέρων και του τρίτου σώματος από το βαρύκεντρο του τριπλού συστήματος (εικ. 4.4), αντίστοιχα:

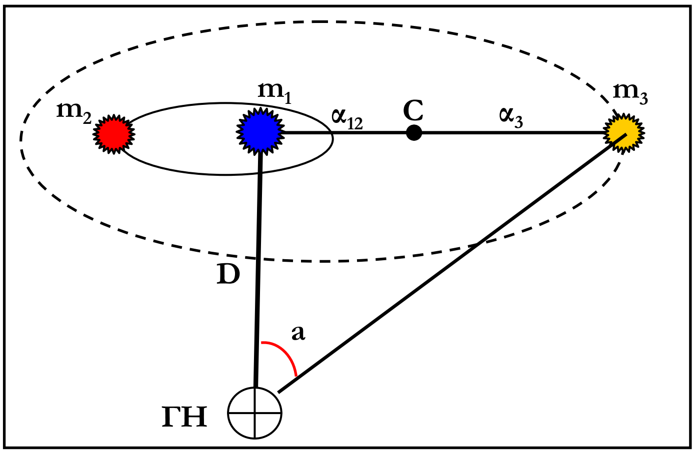
$$\alpha_{\max} = \alpha_{1,2} + \alpha_3 \quad (4.20)$$

Λόγω της ύπαρξης του τρίτου σώματος παρατηρείται και μεταβολή στις ακτινικές ταχύτητες V_r των αστέρων του εκλειπτικού συστήματος, λόγω της κίνησής τους γύρω από το βαρύκεντρο του τριπλού, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$\mathrm{V_r} = \mathrm{K}\,[\cos(\nu_3+\omega_3)+\mathrm{e}_3\cos\omega_3] \quad (4.21)$$

όπου ο όρος K δίνεται από τη σχέση:

$$\mathrm{K} = \frac{\mathrm{A}}{\mathrm{P}_3} \frac{5156}{\sqrt{(1-\mathrm{e}_3^2)(1-\mathrm{e}_3^2\cos^2\omega_3)}} \tag{4.22}$$



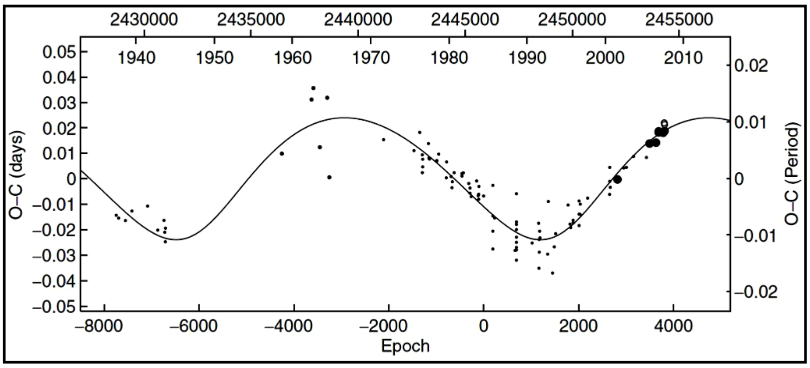
Εικόνα 4.4. Τριπλό σύστημα αστέρων, όπου οι αστέρες m_1 και m_2 αποτελούν ένα διπλό εκλειπτικό σύστημα και ο αστέρας m_3 είναι απομακρυσμένος. Με C συμβολίζεται το βαρύκεντρο του τριπλού συστήματος που απέχει απόσταση D από τον παρατηρητή.

Τέλος, η δυναμική ευστάθεια τέτοιου είδους τριπλών συστημάτων μπορεί να ελεγχθεί από τη συνθήκη του Harrington (1977):

$$\frac{\alpha_{1,2}}{\alpha_3} < \frac{\kappa \log(3/2)}{\log\left[1 + \frac{\mathrm{m}_3}{\mathrm{m}_1 + \mathrm{m}_2}\right]} \tag{4.23}$$

όπου κ σταθερά, η οποία έχει προσδιοριστεί εμπειρικά και παίρνει τις τιμές:

$$\kappa = \begin{cases} 0.28, & \text{εάν οι αστέρες περιφέρονται ομοιόθετα} \\ 0.36, & \text{εάν οι αστέρες περιφέρονται αντίθετα} \end{cases} \tag{4.24}$$



Εικόνα 4.5. Το O−C διάγραμμα του εκλειπτικού συστήματος αστέρων UZ Sge. Στα σημεία έχει προσαρμοστεί η θεωρητική καμπύλη του LITE (Liakos & Niarchos 2008b).

4.2.2. Μεταφορά και απώλεια μάζας-στροφορμής

Η μεταφορά μάζας μεταξύ των μελών ενός διπλού συστήματος λαμβάνει χώρα όταν ο ένας εκ των δύο ή και οι δύο αστέρες του συστήματος γεμίσει/ουν τον/τους λοβό/ούς Roche του/τους. Αντίθετα, απώλεια μάζας από το σύστημα μπορεί να πραγματοποιηθεί και ανεξάρτητα από την πλήρωση των λοβών. Στις παρακάτω υποπαραγράφους αναπτύσσονται οι μηχανισμοί μεταφοράς και απώλειας μάζας καθώς και ο τρόπος με τον οποίο μπορούν να υπολογιστούν οι παράμετροί τους.

Μεταφορά μάζας μεταξύ των μελών του συστήματος

Στην περίπτωση των ημιαποχωρισμένων συστημάτων (βλ. §1.2.3–B2), ο ένας εκ των δύο αστέρων-μελών γεμίζει τον λοβό Roche του (βλ. §1.2.2) και μπορεί να μεταφέρει μάζα στον συνοδό του μέσω του λαγκρατζιανού σημείου L_1. Οι αστέρες των συστημάτων σε επαφή (βλ. §1.2.3–B3) γεμίζουν και οι δύο τους λοβούς Roche τους και μπορούν να μεταφέρουν μάζα ο ένας στον άλλον.

Στην απλούστερη περίπτωση (συντηρητική), ο ένας εκ των δύο αστέρων μεταφέρει μάζα στον συνοδό του, ο οποίος τη δέχεται χωρίς απώλειες. Οπότε, η ολική μάζα του συστήματος $m_{ολ}$ παραμένει σταθερή και η ολική στροφορμή $J_{ολ}$ διατηρείται. Παρακάτω οι δείκτες 1 και 2 αναφέρονται στον αποδέκτη και στον δότη μάζας αστέρα, αντίστοιχα:

$$\mathrm{m_1 + m_2 = m_{ο λ} = σταθ.} \tag{4.25}$$

και

$$\mathrm{dm_1 = -dm_2} \tag{4.26}$$

και η ολική στροφορμή δίνεται από τη σχέση:

$$\mathrm{J_{ο λ}} = \sqrt{\frac{\mathrm{G\, m_1^2\, m_2^2\, α\, (1 - e^2)}}{\mathrm{m_{ο λ}}}} = \mathrm{σταθ.} \tag{4.27}$$

Από τη σχέση (4.27) προκύπτει ότι ο ημιάξονας της τροχιάς *a* δίνεται από τη σχέση:

$$α = \frac{\mathrm{σταθ.}}{(\mathrm{m_1 m_2})^2} \tag{4.28}$$

και από τον τρίτο νόμο του Kepler ισχύει:

$$\mathrm{G\, m_{ο λ}} = 4π^2 \frac{α^3}{\mathrm{P^2}} \tag{4.29}$$

Επομένως, από τις σχέσεις (4.28) και (4.29) φαίνεται ότι στη συντηρητική περίπτωση μεταφοράς μάζας, αφού μεταβάλλεται ο ημιάξονας του συστήματος, μεταβάλλεται και η τροχιακή περίοδός του. Ορίζονται σαν m_{1i}, m_{2i}, P_i οι αρχικές τιμές των μαζών των αστέρων και της τροχιακής περιόδου του συστήματος, αντίστοιχα, πριν ξεκινήσει η μεταφορά μάζας, και τα ίδια μεγέθη χωρίς τον δείκτη (i) για μεταγενέστερη τυχαία χρονική στιγμή. Άρα, μετά την έναρξη της μεταφοράς μάζας και βάσει του συνδυασμού των σχέσεων (4.28) και (4.29) προκύπτει ότι για κάθε χρονική στιγμή θα ισχύει:

$$\frac{\mathrm{P}}{\mathrm{P_i}} = \left(\frac{\mathrm{m_{1i}\, m_{2i}}}{\mathrm{m_1\, m_2}}\right)^3 \tag{4.30}$$

Διαφορίζοντας τη σχέση (4.30) και βάσει της σχέσης (4.26) προκύπτει (Kruszewski 1966, Hilditch 2001):

$$\frac{\dot{\mathrm{P}}}{\mathrm{P}} = \frac{3\, \dot{\mathrm{m}}_1 (\mathrm{m_1 - m_2})}{\mathrm{m_1\, m_2}} = 3 \frac{1 - \mathrm{q}^2}{\mathrm{q\, (m_1 + m_2)}} \dot{\mathrm{m}} \tag{4.31}$$

Η σχέση (4.31) υπολογίζει τον ρυθμό μεταβολής της περιόδου $\dot{P}$ συναρτήσει του ρυθμού μεταφοράς μάζας $\dot{m} > 0$. Επομένως, ανάλογα με τη φορά της ροής μάζας (π.χ. από τον μεγαλύτερης προς τον μικρότερης μάζας αστέρα) και τις τιμές των μαζών των αστέρων η περίοδος του συστήματος μπορεί είτε να αυξάνεται είτε να μειώνεται. Στα ημιαποχωρισμένα συστήματα, όπου ο λόγος μαζών *q* ορίζεται συνήθως μικρότερος της μονάδας, οι δείκτες 1 και 2 αναφέρονται στον μεγαλύτερης και μικρότερης μάζας αστέρα, αντίστοιχα, οι οποίοι ταυτίζονται αντιστοίχως με τον θερμότερο και τον ψυχρότερο.

Απώλεια μάζας και στροφορμής από το σύστημα

Η συνηθέστερη περίπτωση που συναντάται σε διπλά συστήματα αστέρων είναι η μεταφορά μέρους της μάζας και στροφορμής από τον δότη στον αποδέκτη αστέρα, ενώ η υπόλοιπη χάνεται από το σύστημα. Οι πιθανότεροι φυσικοί μηχανισμοί (μη-διατήρησης της ολικής μάζας και στροφορμής) είναι οι ακόλουθοι:

- Απώλεια μάζας από το σύστημα μέσω αστρικών ανέμων, ανεξάρτητα από το εάν κάποιος από τους αστέρες έχει γεμίσει τον λοβό Roche του
- Υπερπλήρωση του λοβού Roche με αποτέλεσμα την ταχεία μεταφορά μάζας (RLOF)
- Ξαφνική απώλεια μάζας εάν το σύστημα γίνει καινοφανής ή ένα από τα μέλη του υπερκαινοφανής
- Απώλεια μάζας από το σύστημα λόγω μαγνητικής πέδησης.

Απώλεια μάζας λόγω αστρικών ανέμων

Η πιο απλή περίπτωση από τις παραπάνω είναι αυτή της συμμετρικής απώλειας μάζας μέσω αστρικού ανέμου από κάποιον μαγνητικά ενεργό αστέρα, χωρίς απαραίτητα να υπάρχει αλληλεπίδραση με τον συνοδό. Συμβολίζοντας με τον δείκτη 1 τον αστέρα ο οποίος χάνει τη μάζα και με 2 τον συνοδό του προκύπτουν οι συνθήκες:

$$\dot{m}_1 < 0 \text{ και } \dot{m}_2 = 0 \tag{4.32}$$

Διαφορίζοντας τον τρίτο νόμο του Kepler (σχέση 1.2) προκύπτει:

$$\frac{\dot{P}}{P} = \frac{1}{2(m_1 + m_2)}\left[\frac{3\dot{\alpha}\,(m_1 + m_2)}{\alpha} - \dot{m}_1\right] \tag{4.33}$$

Για να υπολογιστεί ο λόγος $\dot{\alpha}/\alpha$ και για να είναι σταθερή η γραμμική ταχύτητα του δότη αστέρα, πρέπει να ικανοποιείται η συνθήκη:

$$\frac{2\pi\alpha_1}{P} = \text{σταθ.} \tag{4.34}$$

όπου a_1 ο ημιάξονας της τροχιάς του δότη αστέρα στο σύστημα του κοινού κέντρου μάζας του συστήματος, για το οποίο ισχύει:

$$\alpha_1 = \frac{\alpha\, m_2}{m_1 + m_2} \tag{4.35}$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις (4.33-4.35) με τον τρίτο νόμο του Kepler προκύπτει:

$$\frac{m_2}{m_1 + m_2}\sqrt{\frac{G\,(m_1 + m_2)}{\alpha}} = \text{σταθ.} \tag{4.36}$$

οπότε, προκύπτουν με τη σειρά τους οι σχέσεις:

$$\alpha\,(m_1 + m_2) = \text{σταθ.} \tag{4.37}$$

και

$$\dot{\alpha}\,(m_1 + m_2) + \alpha\,\dot{m}_1 = 0 \tag{4.38}$$

Τελικά, προκύπτει η απλή σχέση (Hilditch 2001):

$$\frac{\dot{P}}{P} = -\frac{2\,\dot{m}_1}{m_1 + m_2} \tag{4.39}$$

Από τη σχέση (4.39) και βάσει της συνθήκης (4.32) συμπεραίνεται ότι στην περίπτωση απώλειας μάζας λόγω αστρικών ανέμων από κάποιον εκ των συνοδών (ή ακόμα και από τους δύο) ενός διπλού συστήματος, τότε υποχρεωτικά η περίοδος του συστήματος αυξάνεται.

Εξελιγμένοι ψυχροί αστέρες διπλών συστημάτων (π.χ. υπογίγαντες, ερυθροί γίγαντες) παρουσιάζουν εντονότερο ρυθμό απώλειας μάζας λόγω αστρικών ανέμων όσο πλησιάζουν στο όριο της ακτίνας Roche, ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση (Tout & Hall 1991):

$$\dot{\mathrm{m}} = -4 \times 10^{-13} \frac{\mathrm{R\,L}}{\mathrm{m}} \left[1 + 10^4 \left(\frac{\mathrm{R}}{\mathrm{R_L}}\right)^6\right] \tag{4.40}$$

όπου *R*, *L*, *m* και R_L η ακτίνα, η φωτεινότητα, η μάζα και η ακτίνα Roche του αστέρα, αντίστοιχα, σε ηλιακές μονάδες.

Απώλεια μάζας και στροφορμής λόγω μαγνητικής πέδησης

Μαγνητική πέδηση (magnetic braking) είναι το φαινόμενο κατά το οποίο η γωνιακή ταχύτητα ιδιοπεριστροφής *Ω* ενός μαγνητικά ενεργού αστέρα μειώνεται λόγω της ροπής που αναπτύσσεται από την αζιμουθιακή συνιστώσα της δύναμης Lorentz ως συνέπεια της στρέβλωσης των δυναμικών γραμμών (Νανούρης 2011) και προτάθηκε για πρώτη φορά από τον Schatzman (1962).

Σε περιπτώσεις διπλών συστημάτων όπου ο ένας εκ των δύο αστέρων είναι μαγνητικά ενεργός και προκειμένου να διατηρηθεί η ιδιοστροφορμή του, απάγεται τροχιακή στροφορμή από το σύστημα και ταυτόχρονα ο αστέρας χάνει μάζα. Οι van't Veer & Maceroni (1992) έδειξαν ότι ο ρυθμός μεταβολής της περιόδου ενός διπλού συστήματος αστέρων στην περίπτωση ύπαρξης μαγνητικής πέδησης δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{\dot{\mathrm{P}}}{\mathrm{P}} = 3\mathrm{xm}(\mathrm{kR})^2 \alpha \Omega^{\beta} \tag{4.41}$$

όπου x είναι η πιθανότητα ο αστέρας να περιστρέφεται σαν στερεό σώμα (x=1) και γενικά ισχύει x<1, *m* η μάζα του αστέρα, *a* ο ημιάξονας της τροχιάς του συστήματος, k*R* η γυροσκοπική ακτίνα του αστέρα, *Ω* η γωνιακή ταχύτητα ιδιοπεριστροφής του και *β* σταθερά, η οποία καθορίζεται από τη γραμμική ταχύτητα περιστροφής V_{rot} (β=3 για V_{rot}=10 km/s και β~0-0.5 για 200 > V_{rot}>20 km/s).

Οι Erdem et al. (2005) για τον ίδιο μηχανισμό, αλλά με απώλεια μάζας από τον αστέρα λόγω μαγνητικής πέδησης κατέληξαν στη σχέση:

$$\frac{\dot{\mathrm{P}}}{\mathrm{P}} = 3\left(\frac{\mathrm{kr_A}}{\alpha}\right)^2 \frac{\mathrm{m_1 + m_2}}{\mathrm{m_1 m_2}} \dot{\mathrm{m}} \tag{4.42}$$

όπου r_A η ακτίνα Alfvén του μαγνητικά ενεργού αστέρα, με $\kappa^2 \cong 0.1$ και $r_A \sim 10$R να θεωρούνται τυπικές τιμές (Soydugan et al. 2011). Επομένως, από τη σχέση (4.42) προκύπτει το συμπέρασμα, ότι σε περίπτωση ύπαρξης μαγνητικής πέδησης η περίοδος του συστήματος μειώνεται.

Παρατηρούμενες μεταβολές στα O−C διαγράμματα

Έως τώρα έχει αναπτυχθεί η φυσική που διέπει ένα διπλό σύστημα στις περιπτώσεις όπου λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της μεταφοράς ή της απώλειας μάζας. Όμως, ο ρυθμός μεταφοράς/απώλειας μάζας δεν είναι πάντα εύκολο να υπολογιστεί. Στις περιπτώσεις όπου μελετώνται εκλειπτικά συστήματα, η περίοδός τους δύναται να υπολογιστεί με πολύ μεγάλη ακρίβεια, επομένως μπορεί εύκολα να προκύψει και ο ρυθμός μεταβολής της, βάσει του οποίου μπορεί να υπολογιστεί ο ρυθμός μεταφοράς/απώλειας μάζας όπως φαίνεται από τις σχέσεις (4.31), (4.39) και (4.42).

Παρακάτω, παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να υπολογιστεί μέσω των O−C διαγραμμάτων ο ρυθμός μεταβολής της περιόδου (Kalimeris et al. 1994). Ορίζεται μια γραμμική αστρονομική εφημερίδα (βλ. σχέση 3.11) για την πρόβλεψη των εκλείψεων του συστήματος. Από τον ορισμό του O−C (βλ. §3.1.5) ισχύει:

$$\mathrm{O-C = T_{Obs} - T_{Cal} = \Delta T(E) = T_{Obs} - T_0 - EP \Longrightarrow}$$
$$\mathrm{T_{Obs} = \Delta T(E) + T_{Cal}} \tag{4.43}$$

όπου ο προβλεπόμενος χρόνος ελαχίστου T_{cal} υπολογίζεται από μια γραμμική εφημερίδα, η οποία περιέχει μια σταθερή τιμή της περιόδου P_{le}, δηλαδή:

$$\mathrm{T_{Cal} = T_0 + P_{le}\,E} \tag{4.44}$$

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

$$\mathrm{P(E) = T_{Obs}(E) - T_{Obs}(E-1) = P_{le} + \Delta T(E) - \Delta T(E-1)} \tag{4.45}$$

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

$$\mathrm{\Delta T(E)} = \sum_{j=0}^{n} c_j E^j \tag{4.46}$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (4.45)-(4.46) προκύπτει:

$$\mathrm{P(E)} = \mathrm{P_{le}} \sum_{j=0}^{n} c_j E^j - \sum_{j=0}^{n} c_j (E-1)^j \tag{4.47}$$

Διαφορίζοντας τη σχέση (4.47) και διαιρώντας με dE, προκύπτει:

$$\frac{\mathrm{dP(E)}}{\mathrm{dE}} = \sum_{j=0}^{n} c_j j E^{j-1} - \sum_{j=0}^{n} c_j j (E-1)^{j-1} \tag{4.48}$$

Επιλύοντας τη σχέση (4.44) ως προς E και διαφορίζοντάς την προκύπτει:

$$\frac{\mathrm{dE}}{\mathrm{dT_{Cal}}} = \frac{1}{\mathrm{P_{le}}} \tag{4.49}$$

Από τον κανόνα της «αλυσίδας», το πρώτο μέλος της σχέσης (4.48) μπορεί να πάρει τη μορφή:

$$\frac{\mathrm{dP(E)}}{\mathrm{dE}} = \frac{\mathrm{dP(E)}}{\mathrm{dT_{Cal}}} \frac{\mathrm{dT_{Cal}}}{\mathrm{dE}} \tag{4.50}$$

Οπότε, συνδυάζοντας τις σχέσεις (4.49) και (4.50) προκύπτει:

$$\frac{\mathrm{dP(E)}}{\mathrm{dT_{Cal}}} = \dot{\mathrm{P}} = \frac{1}{\mathrm{P_{le}}} \frac{\mathrm{dP(E)}}{\mathrm{dE}} \tag{4.51}$$

Πλέον, δύναται να προσδιοριστεί η εξίσωση μεταβολής της τροχιακής περιόδου του συστήματος, αρκεί να οριστεί ο αριθμός των όρων που θα κρατηθούν στη σχέση (4.48). Ουσιαστικά, πρόκειται για διόρθωση της γραμμικής εφημερίδας τοποθετώντας επιπλέον όρους, οι οποίοι αποβλέπουν στη βελτίωση της πρόβλεψης των χρόνων ελαχίστων του εκλειπτικού συστήματος. Η σχέση (4.48) δεν έχει περιορισμούς όσον αφορά το πλήθος των όρων που μπορούν να συμπεριληφθούν στο ανάπτυγμα του πολυωνύμου. Μια πολύ καλή προσέγγιση των O−C διαφορών θα είναι ένα τριώνυμο, όπως φαίνεται και στην παρακάτω σχέση:

$$\Delta T(E) = O - C = c_0 + c_1 E + c_2 E^2 \tag{4.52}$$

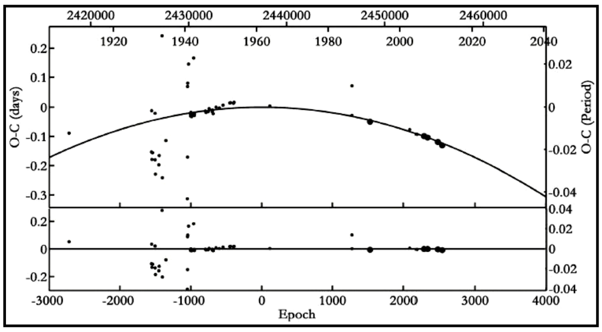
Αναπτύσσοντας τη σχέση (4.48) μέχρι τάξης E^2 (j=3) και κρατώντας τους όρους c_0, c_1 και c_2, προκύπτει:

$$\frac{dP(E)}{dE} = 2c_2 \tag{4.53}$$

Τέλος, συνδυάζοντας τις σχέσεις (4.51) και (4.53) προκύπτει, ότι ο συντελεστής του παραβολικού όρου E^2 και κατ' επέκταση ο ρυθμός μεταβολής της τροχιακής περιόδου θα δίνεται από τη σχέση:

$$c_2 = \frac{P_{le}\dot{P}}{2} \Rightarrow \dot{P} = \frac{2c_2}{P_{le}} \tag{4.54}$$

Σε περιπτώσεις όπου τα σημεία του O−C διαγράμματος ενός εκλειπτικού συστήματος αστέρων παρουσιάζουν παραβολική συμπεριφορά, μπορεί να βρεθεί ο συντελεστής του παραβολικού όρου, μέσω προσαρμογής μιας παραβολικής καμπύλης, και κατ' επέκταση οι ρυθμοί μεταβολής της περιόδου, μεταφοράς μάζας και απώλειας μάζας.



Εικόνα 4.6. Το O−C διάγραμμα του εκλειπτικού συστήματος αστέρων QY Aql. Στα σημεία έχει προσαρμοστεί μια παραβολή, όπου ο συντελεστής της είναι ίσος με -1.91×10^{-8} days/cycle και αντιστοιχεί σε ρυθμό μεταβολής της τροχιακής περιόδου ίσο με -1.9×10^{-6} days/yr.

4.2.3. Μετάθεση της γραμμής των αψίδων

Ως γραμμή των αψίδων ορίζεται η νοητή ευθεία που συνδέει το άπαστρο με το περίαστρο της τροχιάς ενός διπλού συστήματος περνώντας από τα κέντρα μαζών των αστέρων (εικ. 4.3). Είναι προφανές, ότι για να υπάρχει μετάθεση της γραμμής των αψίδων, απαραίτητη προϋπόθεση είναι ο δευτερεύων αστέρας του συστήματος να έχει έκκεντρη τροχιά. Σε περιπτώσεις συστημάτων τα οποία παρουσιάζουν περιστροφή της γραμμής των αψίδων, η τροχιακή περίοδος τους δεν αλλάζει, αλλά μεταβάλλεται ο προσανατολισμός της ελλειπτικής τροχιάς τους. Επομένως, η χρονική διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών φωτομετρικών ελαχίστων θα δίνεται από τη σχέση:

$$T_2 - T_1 = \frac{P}{2} + \frac{P}{\pi} e \cos\omega \left(1 + \frac{1}{\sin^2 i}\right) \tag{4.55}$$

όπου ω το όρισμα του περιάστρου, e η εκκεντρότητα της τροχιάς του δευτερεύοντος αστέρα και P και i η περίοδος και η κλίση του συστήματος, αντίστοιχα.

Από τη σχέση (4.55) παρατηρείται ότι $T_2 - T_1 \propto \cos\omega$, δηλαδή οι χρονικές διαφορές μεταξύ πρωτευόντων και δευτερευόντων ελαχίστων αποτελούν μια περιοδική συνάρτηση του χρόνου. Η μεταβολή του ορίσματος του περιάστρου $\dot{\omega}$ δίνεται από τη σχέση:

$$\omega = \omega_0 + \dot{\omega}E \tag{4.56}$$

Επομένως, οι O−C μεταβολές, οι οποίες αντιστοιχούν σε πρωτεύοντα και δευτερεύοντα φωτομετρικά ελάχιστα, θα δίνονται από το συνδυασμό των σχέσεων (4.55)-(4.56) (Martynov 1973):

$$(\mathrm{O}-\mathrm{C})_{\mathrm{Min.I}} = -\frac{\mathrm{P}}{2\pi}\mathrm{e}\left(1+\frac{1}{\sin^2 \mathrm{i}}\right)\cos(\omega_0+\dot{\omega}\mathrm{E}) \tag{4.57}$$

και

$$(\mathrm{O}-\mathrm{C})_{\mathrm{Min.II}} = \frac{\mathrm{P}}{2\pi}\mathrm{e}\left(1+\frac{1}{\sin^2 \mathrm{i}}\right)\cos(\omega_0+\dot{\omega}\mathrm{E}) \tag{4.58}$$

Ο συντελεστής του συνημίτονου αντιστοιχεί στο πλάτος της κατανομής, το οποίο λόγω του ημιτονικού όρου θα έχει περιοδική μεταβολή.

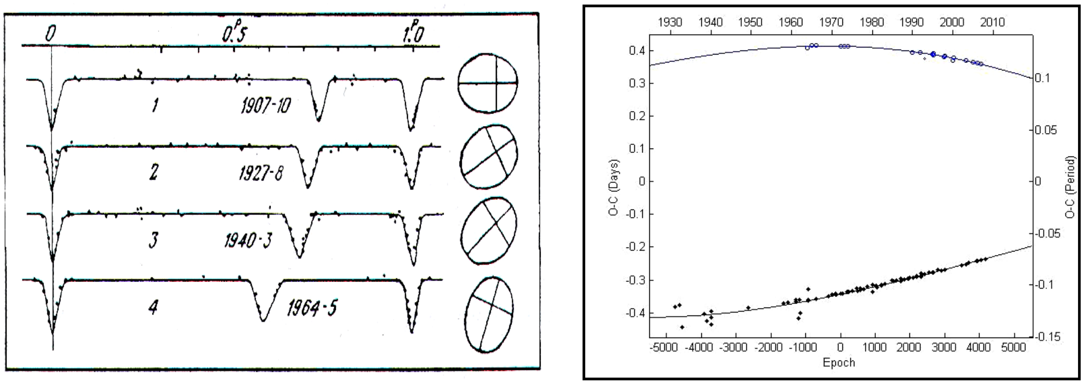
Τέλος, συμπεραίνεται, ότι η γραμμή των αψίδων περιστρέφεται αργά γύρω από το κέντρο μάζας του συστήματος, με την περίοδο περιφοράς της U να υπολογίζεται από τη σχέση (Kopal 1959):

$$\mathrm{U} = \frac{2\pi}{\dot{\omega}}\mathrm{P}_\alpha \tag{4.59}$$

όπου P_α 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:

$$\mathrm{P} = \mathrm{P}_\alpha\left(1-\frac{\dot{\omega}}{360°}\right) \tag{4.60}$$

Η μεταβολή του περιάστρου, και κατ' επέκταση η μετάθεση της γραμμής των αψίδων, μπορεί να οφείλεται: α) σε ύπαρξη τρίτου αστέρα γύρω από το εκλειπτικό σύστημα, β) σε παλιρροιακή αλληλεπίδραση μεταξύ των μελών και γ) σε σχετικιστικά φαινόμενα.



Εικόνα 4.7. Αριστερά: Μετάθεση της γραμμής των αψίδων ενός εκλειπτικού συστήματος αστέρων σε διαφορετικά έτη και οι παρατηρούμενες αλλαγές στην καμπύλη φωτός (Martynov 1973). Δεξιά: Προσαρμογή ημιτονικών καμπυλών στα O−C σημεία του συστήματος FT Ori (Λιάκος 2008) όπου η περίοδος της μετάθεσης βρέθηκε ίση με ~529 yrs. Τα μαύρα σημεία αντιστοιχούν σε χρόνους πρωτευόντων και τα μπλε σε χρόνους δευτερευόντων ελαχίστων.

4.2.4. Μηχανισμός Applegate

Ο Applegate (1992) πρότεινε μια εναλλακτική εξήγηση για πιθανή διαμόρφωση των O−C διαγραμμάτων από τη μαγνητική δραστηριότητα κάποιου εκ των δύο αστέρων του συστήματος. Σύμφωνα με αυτή τη θεωρία, περιοδικές μεταβολές της τροχιακής περιόδου ενός διπλού συστήματος της τάξεως των δεκαετιών είναι πιθανόν να προέρχονται από τη μαγνητική δραστηριότητα ενός εκ των δύο αστέρων μελών. Γι' αυτόν τον μηχανισμό, απαιτείται παρουσία ζώνης μεταφοράς στο εσωτερικό του αστέρα για την ύπαρξη του μαγνητικού δυναμό. Προφανώς, μεταβολές στην τροχιακή περίοδο λόγω αυτού του μηχανισμού μπορούν να παρουσιάσουν τα συστήματα εκείνα, στα οποία τουλάχιστον ο ένας αστέρας έχει βαθιά ζώνη μεταφοράς και από την οποία εξαρτάται η ένταση του μαγνητικού του πεδίου.

Σύμφωνα με τον μηχανισμό Applegate (1992), οι μεταβολές της τροχιακής περιόδου του συστήματος οφείλονται στη μεταβολή της τετραπολική ροπής (quadruple moment variation) ΔQ του μαγνητικά ενεργού αστέρα, λόγω της οποίας ο αστέρας γίνεται πεπλατυσμένος στο ισημερινό του επίπεδο και εξαρτάται από τον ρυθμό περιστροφής των εξωτερικών στρωμάτων του. Η μεταφορά ιδιοστροφορμής από το εσωτερικό προς τα εξωτερικά στρώματα του αστέρα προκαλεί ιδιοπεριστροφή με μεγαλύτερη γωνιακή ταχύτητα και κατ' επέκταση ολοένα και μεγαλύτερη πλάτυνση. Ωστόσο, εάν με τη σειρά τους τα εξωτερικά στρώματα χάνουν στροφορμή (π.χ. λόγω αστρικού ανέμου), τότε η πλάτυνση μειώνεται. Εφόσον ο σημαντικότερος παράγοντας ανάπτυξης και διατήρησης του δυναμό είναι το μαγνητικό πεδίο του αστέρα, η διαφορική περιστροφή του παίζει σημαντικότατο ρόλο. Ποσοτικά, εάν το μαγνητικό πεδίο κάτω από τη φωτόσφαιρα του αστέρα είναι της τάξης των μερικών KG, τότε δύναται να μεταφέρει την απαιτούμενη ποσότητα στροφορμής στα εξωτερικά στρώματα και να ικανοποιεί τις παρατηρούμενες μεταβολές στην περίοδο του συστήματος.

Οι μεταβολές στην τροχιακή περίοδο ενός συστήματος ΔP και η μεταβολή της τετραπολική ροπής του ΔQ συνδέονται με τη σχέση (Applegate & Patterson 1987):

$$\frac{\Delta P}{P} = -9\left(\frac{R}{\alpha}\right)^2 \frac{\Delta Q}{MR^2} = -9\frac{\Delta Q}{M\alpha^2} \tag{4.61}$$

όπου M και R η μάζα και η ακτίνα του μαγνητικά ενεργού αστέρα, αντίστοιχα, και a ο ημιάξονας της τροχιάς του συστήματος.

Η τροχιακή στροφορμή ΔJ που πρέπει να μεταφερθεί από το εσωτερικό προς το εξωτερικό του μαγνητικά ενεργού αστέρα ώστε να προκύψει μεταβολή στην περίοδο του συστήματος ΔP δίνεται από τη σχέση (Applegate 1992):

$$\Delta J = -\frac{GM^2}{R}\left(\frac{\alpha}{R}\right)^2 \frac{\Delta P}{6\pi} \tag{4.62}$$

ενώ η ενέργεια που χάνεται λόγω της παραπάνω μεταφοράς στροφορμής είναι ίση με (Applegate 1992):

$$\Delta E = \Omega_{dr}\Delta J + \frac{\Delta J^2}{2I_{eff}} \tag{4.63}$$

όπου Ω_{dr} η γωνιακή ταχύτητα της διαφορικής περιστροφής και I_{eff} η ενεργός ροπή αδράνειας.

Αυτή η απώλεια ενέργειας οδηγεί στη μεταβολή της φωτεινότητας ΔL του συστήματος σύμφωνα με τη σχέση (Applegate 1992):

$$\Delta L = \pi\frac{\Delta E}{P_{mod}} \tag{4.64}$$

όπου P_{mod} η περίοδος της μεταβολής της τροχιακής περιόδου P του συστήματος.

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου B του αστέρα μεταβάλλεται σύμφωνα με τη σχέση (Applegate 1992):

$$B^2 \sim 10 \frac{GM^2}{R} \left(\frac{\alpha}{R}\right)^2 \frac{\Delta P}{P_{mod}} \tag{4.65}$$

Τέλος, η μεταβολή της τροχιακής περιόδου *ΔP* υπολογίζεται από τη σχέση (Rovithis-Livaniou et al. 2000):

$$\Delta P = A \sqrt{2\left[1 - \cos\left(2\pi \frac{P}{P_{mod}}\right)\right]} \tag{4.66}$$

όπου *A* το πλάτος της O−C μεταβολής, το οποίο μαζί με την περίοδο της μεταβολής μπορούν να προσδιοριστούν μέσω προσαρμογής μιας ημιτονικής συνάρτησης στα O−C σημεία.

Οι Lanza & Rodonò (2002) απέδειξαν ότι η τροχιακή περίοδος ενός διπλού συστήματος δύναται να επηρεαστεί από τη μεταβολή της τετραπολικής ροπής κάποιου εκ των μελών του μόνο όταν αυτή βρίσκεται μεταξύ του εύρους 10^{50}-10^{51} gr cm^2.

4.3. Ανάλυση δεδομένων και μοντέλα περιγραφής παλλόμενων αστέρων

Στόχος της ανάλυσης παρατηρήσεων παλλόμενων αστέρων είναι ο εντοπισμός των συχνοτήτων ταλάντωσης *f* του αστέρα και η αναγνώριση της προέλευσής τους. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 1.3, οι ακτινικές αναπάλσεις ξεκινούν από τα εσωτερικά στρώματα του αστέρα, ενώ οι μη-ακτινικές λαμβάνουν χώρα στην επιφάνειά του. Οι περιοδικές αναπάλσεις είναι άθροισμα ταλαντώσεων, επομένως, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι εξισώσεις των κυμάτων ώστε να περιγραφεί η μεταβολή της λαμπρότητας ενός παλλόμενου αστέρα συναρτήσει του χρόνου. Στην περίπτωση ύπαρξης μιας μόνο συχνότητας ταλάντωσης το φαινόμενο μέγεθος του αστέρα θα δίνεται από τη σχέση:

$$m = Z + A \sin[2\pi(\omega t + \Phi)] \tag{4.67}$$

όπου *A* το πλάτος και *ω* η γωνιακή ταχύτητα της ανάπαλσης (όπου $\omega=2\pi f$), *t* ο χρόνος, *Φ*[1] η φάση και *Z* μια σταθερά, η οποία αντιστοιχεί σε μια μέση λαμπρότητα του αστέρα (για $A=0$).

Όμως, οι περισσότεροι παλλόμενοι αστέρες παρουσιάζουν παραπάνω από μια συχνότητες ταλάντωσης, δηλαδή αναπάλσεις διαφορετικής περιόδου και πλάτους, είτε διότι έχουν διαφορετικές προελεύσεις (π.χ. ακτινικές και τύπου-p) είτε διότι συνυπάρχει η κύρια συχνότητα με μια πληθώρα αρμονικών[2] συχνοτήτων της. Για τον εντοπισμό των συχνοτήτων ταλάντωσης ενός παλλόμενου αστέρα χρησιμοποιείται η μέθοδος της ανάλυσης Fourier, μέσω του λογισμικού προγράμματος PERIOD04[3] v.1.2, σύμφωνα με την οποία στα πειραματικά σημεία προσαρμόζεται ένα πλήθος αρμονικών συναρτήσεων (εικ. 4.8). Επομένως, στην περίπτωση που αστέρας εκτελεί παραπάνω από μια αρμονικές ταλαντώσεις (οποιασδήποτε φύσεως), η σχέση (4.67) παίρνει τη μορφή:

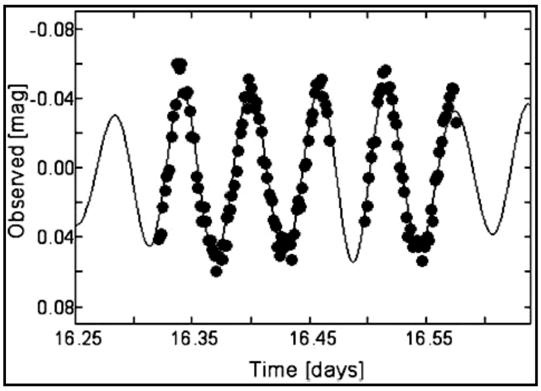
$$m = Z + \sum_{i=1}^{N} A_i \sin[2\pi(\omega_i t + \Phi_i)] \tag{4.68}$$

[1]Η φάση της ταλάντωσης δεν πρέπει να συγχέεται με τη γεωμετρική φάση του αστέρα (βλ. §3.1.3).

[2]Αρμονικές ονομάζονται οι συχνότητες με ακέραιες πολλαπλάσιες τιμές της Κυρίας συχνότητας, και με τιμές πλατών μικρότερες από αυτήν της Κυρίας συχνότητας.

[3]http://www.univie.ac.at/tops/Period04/

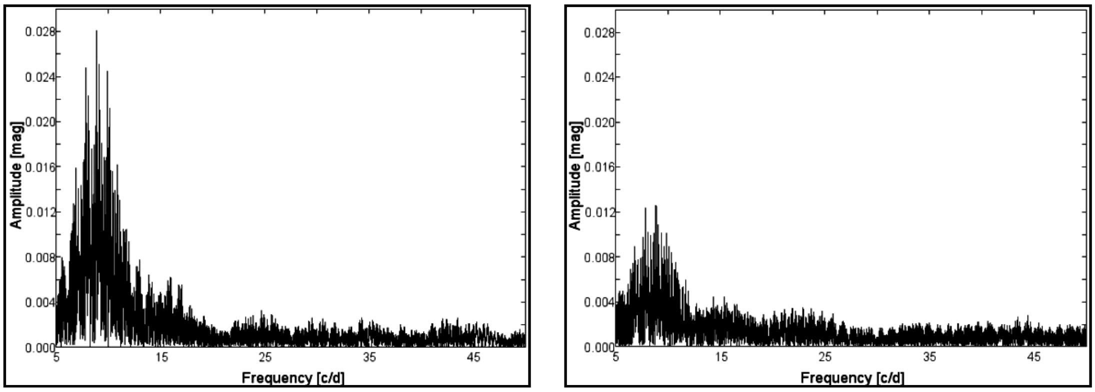
Ως αποτέλεσμα επίλυσης της σχέσης (4.68) προκύπτουν οι τιμές των συχνοτήτων ταλάντωσης και τα πλάτη και οι φάσεις που αντιστοιχούν σε κάθε μια από αυτές.



Εικόνα 4.8. Προσαρμογή θεωρητικής καμπύλης Fourier, όπου περιέχονται πέντε συχνότητες, στα παρατηρηθέντα σημεία του αστέρα TYC 4559-2536-1 (Liakos & Niarchos 2011f).

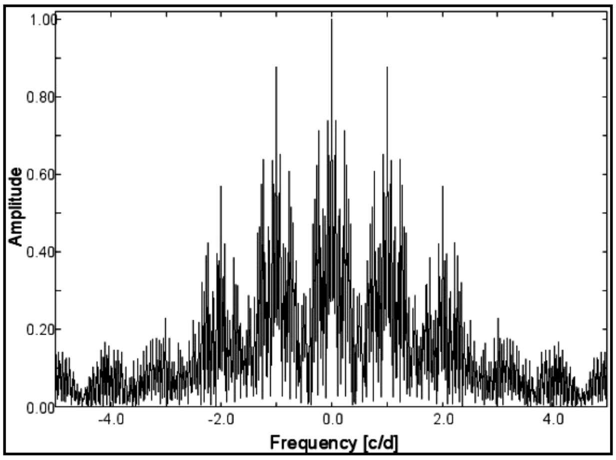
Ο εντοπισμός μιας συχνότητας εξαρτάται από την ποιότητα των δεδομένων, δηλαδή από το φωτομετρικό σφάλμα των σημείων καθώς και από τη χρονική διακριτική ικανότητα των παρατηρήσεων (για υψηλές συχνότητες). Το λογισμικό θεωρεί αξιόπιστο το αποτέλεσμα εύρεσης μιας συχνότητας ανάπλασης, όταν αυτό ξεπερνά το 4-σ, δηλαδή ο λόγος του σήματος προς θόρυβο (S/N) στην περιοχή της συχνότητας να είναι ίσος ή μεγαλύτερος του 4.

Εδώ πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερα, ότι τα δεδομένα, από τα οποία εντοπίζονται οι συχνότητες ανάπαλσης, πρέπει να έχουν ληφθεί όλα με το ίδιο φίλτρο παρατήρησης, διότι οι αστέρες δεν εκπέμπουν το ίδιο ποσό ενέργειας σε όλα τα μήκη κύματος. Οπότε, αναμένεται τα πλάτη των αναπάλσεων να διαφέρουν μεταξύ παρατηρήσεων σε διαφορετικά τμήματα του Η/Μ φάσματος. Επομένως, η ανάλυση Fourier πρέπει να γίνεται ξεχωριστά για τα δεδομένα του κάθε φίλτρου παρατήρησης. Χρησιμοποιώντας διαφορετικά φίλτρα κατά τη διάρκεια των παρατηρήσεων μπορούν τόσο να εντοπιστούν οι «μη-φυσικές» συχνότητες όσο και να βρεθεί ο λόγος των πλατών της ανάπαλσης, ο οποίος εξυπηρετεί, όπως θα δειχθεί παρακάτω, στην εκτίμηση του τρόπου διέγερσης της ταλάντωσης. Ως μη-φυσικές συχνότητες ορίζονται οι συχνότητες οι οποίες, αν και έχουν S/N≥4, δεν εντοπίζονται στα δεδομένα όλων των φίλτρων και οφείλονται είτε σε ατμοσφαιρικά φαινόμενα είτε ακόμα και σε τεχνικά σφάλματα. Επιπροσθέτως, στην περίπτωση όπου οι καμπύλες φωτός έχουν ήδη υποστεί μια προσαρμογή θεωρητικής καμπύλης (π.χ. μοντέλο εκλειπτικού συστήματος) και η ανάλυση Fourier εφαρμόζεται στα υπόλοιπα (residuals) μετά την αφαίρεση αυτής της θεωρητικής καμπύλης, τότε αποκλείεται η προσαρμογή να είναι ακριβώς ίδια στα σημεία διαφορετικών φίλτρων. Επομένως, το λογισμικό είναι πιθανό να εντοπίσει διαφορετικές συχνότητες στα δεδομένα διαφορετικών φίλτρων, οι οποίες πρέπει να αφαιρεθούν από το τελικό μοντέλο. Ανάλογα με το είδος των παλλόμενων αστέρων που μελετώνται, υπάρχει πάντα μια αίσθηση για την περιοχή όπου αναμένεται να βρεθούν συχνότητες ανάπλασης, κι έτσι ελαχιστοποιείται η πιθανότητα να παραβλεφθεί μια συχνότητα, η οποία εντοπίστηκε στα δεδομένα διαφορετικών φίλτρων λόγω μεγάλης διαφοράς πλάτους (εικ. 4.9). Το τελικό μοντέλο αποτελείται από τις συχνότητες, οι οποίες εντοπίστηκαν στα δεδομένα όλων των φίλτρων παρατήρησης. Συγκεκριμένα, οι αστέρες δ Sct, για τους οποίους γίνεται ειδική μνεία στο 7^{ο} κεφάλαιο της παρούσας διατριβής, παρουσιάζουν συχνότητες από 20 min έως 8 hrs ήτοι 3-80 c/d (Breger 2000, Soydugan et al. 2006b).



Εικόνα 4.9. Φάσμα συχνοτήτων του αστέρα BI CMi στο εύρος 5-80 c/d για τα δεδομένα του φίλτρου *B* (αριστερά) και *I* (δεξιά). Η συχνότητα που εντοπίστηκε έχει τιμή ~8.867 c/d και πλάτος 26.2 mmag στο *B* φίλτρο και 12.5 mmag στο *I*-φίλτρο (Liakos & Niarchos 2011k).

Ένα άλλο φαινόμενο το οποίο μπορεί να προκαλέσει τον εντοπισμό μη-φυσικών συχνοτήτων είναι το “alias”. Στην επεξεργασία σήματος το “aliasing” αναφέρεται σε μια επίδραση που προκαλεί τον μη-διαχωρισμό διαφορετικών σημάτων από το λογισμικό, τα οποία προέρχονται από διαφορετικό δείγμα δεδομένων (π.χ. δεδομένα που ελήφθησαν σε διαφορετικές νύκτες παρατηρήσεων). Επίσης, το “aliasing” μπορεί να προκαλέσει διαστρέβλωση των συχνοτήτων ή ακόμα και να δημιουργήσει νέες τεχνητές (artifact) με απόσταση ~1 c/d από την πραγματική, όταν η ανάλυση Fourier γίνεται ταυτόχρονα σε δεδομένα που ελήφθησαν με χρονική διαφορά[1]. Μια εκτίμηση για την ύπαρξη αυτού του φαινομένου στα δεδομένα μπορεί να γίνει με το «διάγραμμα του φασματικού παραθύρου» (spectral window plot) στο οποίο μπορεί να υπολογιστεί η ισχύς των συχνοτήτων alias και να συγκριθεί με την ισχύ της κύριας συχνότητας (εικ. 4.10). Επίσης, πολύ κοντινές συχνότητες ανάπαλσης (<1 c/d) είναι πιθανό να προκαλούνται από αυτό το φαινόμενο. Ένα κριτήριο για την αξιοπιστία συχνοτήτων τέθηκε από τους Loumos & Deeming (1978). Το κριτήριο ορίζει ότι η απόσταση δύο κοντινών συχνοτήτων δεν μπορεί να είναι μικρότερη από $1.5/T$, όπου T η χρονική απόσταση σε days μεταξύ του πρώτου και του τελευταίου σημείου του δείγματος.



Εικόνα 4.10. Φασματικό παράθυρο των δεδομένων του αστέρα BI CMi. Οι συχνότητες λόγω alias ±1 c/d έχουν ~90% της ισχύος της κεντρικής κορυφής (Liakos & Niarchos 2011k).

Οι μη-ακτινικές ταλαντώσεις (p και g-modes, βλ. §1.3.1) περιγράφονται από τα πραγματικά μέρη των συναρτήσεων των σφαιρικών αρμονικών $Y_l^m(\theta,\varphi)$, όπου l ακέραιος αριθμός, ονομάζεται κομβικός κύκλος και ορίζει τον αριθμό θερμότερων και ψυχρότερων περιοχών στην επιφάνεια του αστέρα, και $|m|$ (όπου $m=2l+1$, μεταξύ $-l$ και l) ο αριθμός των ταλαντώσεων που κατευθύνονται από τον ισημερινό του αστέρα προς τους πόλους. Η

[1]Για την αντιμετώπιση του φαινομένου “alias” συνίσταται η συνεχής παρατήρηση του αστέρα με τη συνεργασία διαφόρων αστεροσκοπείων ανά τον κόσμο (βλ. §1.3.2) ή από διαστημικά τηλεσκόπια.

ακτινική ταλάντωση είναι μια ειδική περίπτωση και εκφράζεται από τις σφαιρικές αρμονικές όταν $m=l=0$. Αν $m\neq0$, τότε οι ταλαντώσεις έχουν κατεύθυνση παράλληλη προς τον αστρικό ισημερινό.

Ένα αξιοσημείωτο πλεονέκτημα της αστεροσεισμολογίας σε εκλειπτικά συστήματα αστέρων, τα οποία αποτελούν κύριο αντικείμενο της διατριβής, είναι η δυνατότητα της αναγνώρισης των τρόπων ανάπαλσης (pulsation modes), χρησιμοποιώντας σαν γεωμετρικό χωρικό φίλτρο των μη-ακτινικών αναπάλσεων τις εκλείψεις του συστήματος (Mkrtichian et al. 2005). Ο συνοδός αστέρας παίζει τον ρόλο ενός γεωμετρικού περιοδικού χωρικού φίλτρου και προκαλεί συγκεκριμένες μεταβολές στα πλάτη και στις φάσεις των μη-ακτινικών αναπάλσεων, οι οποίες εξαρτώνται μόνο από τους κβαντικούς αριθμούς m, l και τη γεωμετρία της έκλειψης (κλίση του τροχιακού επιπέδου). Συγκρίνοντας λοιπόν τα δεδομένα, τα οποία ελήφθησαν μεταξύ και κατά τη διάρκεια των εκλείψεων, είναι δυνατόν να προκύψει η δισδιάστατη πληροφορία (m, l) για τις μη-ακτινικές αναπάλσεις. Όμως, για τον προσδιορισμό των αριθμών m, l απαιτούνται δεδομένα μεγάλης φωτομετρικής ή/και φασματοσκοπικής ακριβείας, συνεχείς χρονικά παρατηρήσεις του συστήματος καθώς και πολλές παρατηρήσεις κατά τη διάρκεια των εκλείψεων, κάτι το οποίο δεν είναι πάντα εφικτό.

Για την αναγνώριση των l-αριθμών (l-degrees) των συχνοτήτων των δ Sct αστέρων-μελών διπλών συστημάτων, όπου μελετώνται στο 7ο κεφάλαιο της παρούσας διατριβής, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό FAMIAS[1] v.1.01 (Zima 2008). Η μέθοδος αναγνώρισης των l-αριθμών των συχνοτήτων στηρίζεται στους λόγους των πλατών και φάσεων μιας δεδομένης συχνότητας ανάπαλσης στα διάφορα φωτομετρικά φίλτρα (Balona & Stobie 1979, Watson 1988, Cugier et al. 1994). Η μέθοδος αυτή επιτυγχάνει αναγνώριση των l-αριθμών έως $l=6$. Ο προσδιορισμός των l-αριθμών βασίζεται σε μοντέλα στατικών αστρικών ατμοσφαιρών του Kurucz με επίπεδα-παράλληλα στρώματα (static plane-parallel models) και σε γραμμικά μη-αδιαβατικά μοντέλα αναπάλσεων. Αυτά τα μοντέλα παρέχονται υπό μορφή προ-υπολογισμένων πλεγμάτων (grids) και χρησιμοποιούνται για να βρεθούν οι καταλληλότερες τιμές των παραμέτρων. Οι θεωρητικές τιμές των λόγων πλατών και φάσεων σε ένα φίλτρο εξαρτώνται από τη συχνότητα ανάπαλσης. Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν ονομάζονται "δ Scuti MAD models" (Montalban & Dupret 2007). Τέλος, βάσει αυτών των μοντέλων και έχοντας εισάγει το πλάτος και τη φάση μιας δεδομένης συχνότητας ανάπαλσης για κάθε φωτομετρικό φίλτρο και τις φυσικές παραμέτρους του παλλόμενου αστέρα (M, T, log$g$, μεταλλικότητα), το λογισμικό υπολογίζει τους l-αριθμούς της συχνότητας.

4.4. Συνδυασμός πληροφοριών από διαφορετικές μεθόδους ανάλυσης

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα και μια πιο συνεκτική εικόνα ενός εκλειπτικού συστήματος αστέρων από τα αποτελέσματα των επιμέρους αναλύσεων που παρουσιάστηκαν στις παραγράφους 4.1-4.3. Συνοπτικά, υπενθυμίζεται, ότι από την επίλυση των καμπυλών φωτός προκύπτουν ποσοτικά αποτελέσματα για τη γεωμετρία του συστήματος αλλά και για την ύπαρξη ή μη επιπρόσθετου μέλους σε τροχιά γύρω από το κοινό κέντρο μάζας. Εν συνεχεία, προκύπτουν οι απόλυτες παράμετροι των μελών, των οποίων μπορεί να εκτιμηθεί τόσο το παρελθόν όσο και το μέλλον της εξελικτικής τους

[1]http://www.ster.kuleuven.be/~zima/famias/

πορείας βάσει της τωρινής τους κατάστασης. Από την ανάλυση των O−C διαγραμμάτων προκύπτει ο μηχανισμός ή ο συνδυασμός μηχανισμών που μεταβάλλουν την τροχιακή περίοδο του συστήματος. Τέλος, η ανάλυση Fourier χρησιμοποιείται μόνο στην περίπτωση ύπαρξης παλλόμενου αστέρα στο σύστημα, και βάσει αυτής προκύπτουν τα χαρακτηριστικά των αναπάλσεων.

Από την επίλυση των καμπυλών φωτός προκύπτει η γεωμετρία του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, μπορεί να βρεθεί εάν κάποιος εκ των μελών του συστήματος γεμίζει τον λοβό Roche του, κάτι που αυτόματα τον μετατρέπει δυνητικά σε αστέρα-δότη μάζας. Σύμφωνα με τη συντηρητική μεταφορά μάζας, η μάζα που εξέρχεται από το ένα μέλος προσπίπτει στο άλλο. Φυσικά, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 4.2.2, η πιο πιθανή περίπτωση είναι να μη φτάσει όλη η μάζα στον αστέρα-δέκτη, αλλά ένα μέρος της να χαθεί από το σύστημα. Από την άλλη μεριά, από την ανάλυση του O−C διαγράμματος του συστήματος προκύπτει ποιοτική, αλλά και ποσοτική πληροφορία για τη μεταφορά/απώλεια μάζας μέσω της παραβολικής συμπεριφοράς των O−C σημείων. Επομένως, συνδυάζοντας αυτές τις ανεξάρτητες πληροφορίες από τις δύο αναλύσεις προκύπτει η επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων της επίλυσης των καμπυλών φωτός, όσον αφορά τη γεωμετρία του συστήματος, αλλά και ο ρυθμός μεταφοράς/απώλειας μάζας. Εν κατακλείδι, η πληροφορία από την O−C ανάλυση αναφορικά με τη μεταφορά/απώλεια μάζας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιλογή του "Mode" (βλ. §4.1) στην επίλυση των καμπυλών φωτός.

Συγκεκριμένα, όπως αποδείχτηκε στην παράγραφο 4.2, μια κυρτή παραβολή (αύξηση της τροχιακής περιόδου) μπορεί να περιγράφει την κατανομή των O−C σημείων μόνο όταν υπάρχει μεταφορά μάζας από τον αστέρα μικρότερης προς τον αστέρα μεγαλύτερης μάζας ή εάν υπάρχει έντονη απώλεια μάζας λόγω αστρικών ανέμων από κάποιον εκ των αστέρων-μελών. Επομένως, στην πρώτη περίπτωση ο αστέρας μικρότερης μάζας πρέπει να έχει γεμίσει τον λοβό Roche του, δηλαδή το σύστημα να είναι ημιαποχωρισμένο (Mode 5). Στην αντίθετη περίπτωση, δηλαδή εάν η κατανομή των O−C σημείων περιγράφεται από κοίλη παραβολή, τότε υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί, οι οποίοι μπορούν να λάβουν χώρα (π.χ. μεταφορά μάζας από τον μεγαλύτερης προς τον μικρότερης μάζας αστέρα ή απώλεια μάζας και στροφορμής) και πρέπει να εξεταστούν ξεχωριστά, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τη γεωμετρία του συστήματος όσο και την εξελικτική κατάσταση των μελών (π.χ. οι γίγαντες παρουσιάζουν έντονους αστρικούς ανέμους). Ακόμα και στην περίπτωση όπου φαινομενικά δεν υπάρχουν αξιοσημείωτες O−C μεταβολές, η γεωμετρία του συστήματος μπορεί να οδηγήσει στην ανάδειξη ύπαρξης μηχανισμών μεταφοράς και απώλειας μάζας (Νανούρης 2011), οι οποίοι έχουν περίπου τους ίδιους ρυθμούς.

Η πιο ακραία περίπτωση αντίφασης των αποτελεσμάτων από τις παραπάνω αναλύσεις είναι αυτή κατά την οποία ο αστέρας μικρότερης μάζας γεμίζει τον λοβό Roche του, άρα αναμένεται μεταφορά μάζας προς τον αστέρα μεγαλύτερη μάζας και κατ' επέκταση κυρτή παραβολική συμπεριφορά των O−C σημείων, αλλά παρόλα αυτά η παραβολή προκύπτει κοίλη, που αντιστοιχεί σε μείωση της τροχιακής περιόδου. Αυτή η περίπτωση συναντάται αρκετά συχνά σε συστήματα τύπου Algol κι εξηγείται με τη διαφορά μεταξύ του ρυθμού απώλειας μάζας λόγω μαγνητικής πέδησης ή έντονων αστρικών ανέμων, μηχανισμοί οι οποίοι προκαλούν μείωση της περιόδου και του ρυθμού μεταφοράς μάζας από τον αστέρα μικρότερης προς τον αστέρα μεγαλύτερης μάζας. Ποσοτικά, συνδυάζοντας τις σχέσεις (4.31), (4.39) και (4.42) προκύπτει η σχέση:

$$\frac{\dot{P}}{P} = \frac{3\,(m_1 - m_2)}{m_1\,m_2}\dot{m}_{tr} - \frac{2}{(m_1 + m_2)}\,\dot{m}_{SW} + 3\left(\frac{k\,r_A}{\alpha}\right)^2 \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2}\dot{m}_{MB} \qquad (4.69)$$

όπου $\dot{m}_{tr} > 0$ ο ρυθμός μεταφοράς μάζας, $\dot{m}_{SW} < 0$ ο ρυθμός απώλειας μάζας λόγω αστρικών ανέμων και $\dot{m}_{MB} < 0$ ο ρυθμός απώλειας μάζας λόγω μαγνητικής πέδησης.

Από τη σχέση (4.69) είναι εμφανές, ότι οι δύο πρώτοι όροι του δεξιού μέλους προκαλούν αύξηση της περιόδου, ενώ ο τελευταίος μείωση. Επομένως, σε ένα εκλειπτικό σύστημα αστέρων μπορούν να λαμβάνουν χώρα και οι τρεις μηχανισμοί με την κυρτότητα της παραβολής στο O−C διάγραμμα να εξαρτάται από τους εκάστοτε ρυθμούς μεταφοράς/απώλειας μάζας. Φυσικά, ανάλογα με τη γεωμετρία του συστήματος, αλλά και την εξελικτική κατάσταση των μελών, μπορεί να αποσαφηνιστεί, συνδυάζοντας όλα τα παραπάνω, η κατάσταση που επικρατεί στο σύστημα.

Στις περιπτώσεις περιοδικών μεταβολών της τροχιακής περιόδου δύο είναι οι μηχανισμοί που μπορούν να υφίστανται, ανεξάρτητα από τη γεωμετρία του συστήματος: Το LITE (βλ. §4.2.1) και ο μηχανισμός του Applegate (βλ. §4.2.4). Ο πρώτος μηχανισμός προϋποθέτει την ύπαρξη τρίτου μέλους στο σύστημα. Τότε όμως, το τρίτο μέλος αναμένεται να συμμετέχει τόσο φωτομετρικά στην καμπύλη φωτός του συστήματος όσο και φασματοσκοπικά (π.χ. με γραμμές απορρόφησης). Κατά την επίλυση των καμπυλών φωτός, αφήνοντας σαν ελεύθερη παράμετρο τη φωτομετρική ροή από ένα πιθανό τρίτο μέλος, είναι δυνατόν να υπολογιστεί η παρατηρούμενη ποσοστιαία συνεισφορά του στην ολική ροή του τριπλού συστήματος σύμφωνα με τη σχέση:

$$L_{3,LC}(\%) = 100\frac{L_3}{L_1 + L_2 + L_3} \qquad (4.70)$$

όπου L_i η φωτεινότητα του αστέρα και με τον δείκτη i να παίρνει τιμές 1, 2 ή 3, οι οποίες αντιστοιχούν στους αστέρες του συστήματος.

Από την άλλη μεριά, από την ανάλυση του O−C διαγράμματος, και συγκεκριμένα από τη συνάρτηση μάζας (σχέση 4.17) προκύπτει η μάζα του τρίτου αστέρα M_3, η οποία είναι συνάρτηση της τροχιακής κλίσης του i_3 ως προς το τροχιακό επίπεδο του διπλού συστήματος και εξαρτάται από τις τιμές των μαζών των αστέρων του εκλειπτικού συστήματος, οι οποίες υπολογίζονται από την επίλυση των καμπυλών φωτός. Υποθέτοντας ότι ο τρίτος αστέρας ανήκει στην ΚΑ, τότε, σύμφωνα με την προσεγγιστική σχέση μάζας-φωτεινότητας $L{\sim}M^{3.5}$, μπορεί να εκτιμηθεί η βολομετρική φωτεινότητά του L_3. Όμως, σύμφωνα με την επίλυση των καμπυλών φωτός και τον υπολογισμό των απόλυτων παραμέτρων του συστήματος, δύναται να υπολογιστούν και οι απόλυτες τιμές των φωτεινοτήτων των αστέρων του εκλειπτικού συστήματος L_1 και L_2. Επομένως, μπορεί να υπολογιστεί το αναμενόμενο ποσοστό συνεισφοράς του τρίτου σώματος στη φωτομετρική καμπύλη από τη σχέση:

$$L_{3,O-C}(\%) = 100\frac{M_3^{3.5}}{L_1 + L_2 + M_3^{3.5}} \qquad (4.71)$$

Τονίζεται ότι ο λόγος σύγκρισης των ποσοστών της φωτομετρικής συμμετοχής του τρίτου αστέρα και όχι των απολύτων τιμών των L_3, οι οποίες προέκυψαν από την κάθε μέθοδο, είναι ότι στην κάθε περίπτωση οι φωτεινότητες δεν έχουν τις ίδιες μονάδες, ενώ τα ποσοστά είναι αδιάστατα μεγέθη. Στη σχέση (4.70) οι φωτεινότητες έχουν αυθαίρετες μονάδες και ως μέγιστη τιμή λαμβάνουν το 4π, ενώ στη σχέση (4.71) δίνονται σε ηλιακές μονάδες. Τέλος, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των σχέσεων (4.70) και (4.71) είναι δυνατόν να βρεθεί η μάζα του τρίτου αστέρα και η κλίση της τροχιάς του ώστε να ικανοποιείται η παρατηρούμενη συνεισφορά. Φυσικά, η υπόθεση ότι ο τρίτος αστέρας ανήκει στην ΚΑ μπορεί να μην ευσταθεί πάντα, αλλά είναι ο μόνος τρόπος να γίνει μια εκτίμηση για τα χαρακτηριστικά του.

Η προέλευση των περιοδικών τροχιακών μεταβολών λόγω του μηχανισμού του Applegate (1992) μπορεί να ελεγχθεί: α) σύμφωνα με το κριτήριο των Lanza & Rodonò (2002) (βλ. §4.2.4), χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (4.61) και (4.66) και αφού προηγουμένως, από την επίλυση των καμπυλών φωτός, έχουν υπολογιστεί οι απόλυτες παράμετροι του συστήματος και του μαγνητικά ενεργού αστέρα και β) από την περιοδική μεταβολή της φαινόμενης λαμπρότητας του συστήματος, κάτι όμως που απαιτεί μακροχρόνιες παρατηρήσεις υψηλής φωτομετρικής ακριβείας.

Υπάρχουν πολλές περιπτώσεις όπου ο μηχανισμός του Applegate αποδεικνύεται ανεπαρκής για την εξήγηση περιοδικών μεταβολών (π.χ. λόγω έλλειψης ψυχρών αστέρων στο σύστημα) και ταυτόχρονα το LITE δεν μπορεί να εντοπιστεί μέσω της επίλυσης των καμπυλών φωτός (π.χ. μηδενική συνεισφορά φωτομετρικής ροής από το τρίτο μέλος). Σε τέτοιες περιπτώσεις πρέπει να επανεξεταστούν τόσο η υπόθεση της εξελικτικής κατάστασης του τρίτου σώματος, όσο και αν πραγματικά είναι μόνο ένας αστέρας. Συγκεκριμένα, εάν δεν εντοπίζεται επιπρόσθετη φωτομετρική συνεισφορά στην ανάλυση των καμπυλών φωτός ή στα φασματοσκοπικά δεδομένα, εντούτοις, από τη συνάρτηση μάζας του τρίτου σώματος βάσει του LITE προκύπτει μάζα συγκρίσιμη με αυτές των αστέρων του εκλειπτικού συστήματος, τότε, η πιο απλή εξήγηση είναι ότι στην πραγματικότητα το τρίτο σώμα είναι και αυτό διπλό ή ακόμα και πολλαπλό σύστημα αστέρων. Το σύστημα αυτό θα πρέπει να αποτελείται από αστέρες συνολικής μάζας ίσης με αυτήν που υπολογίστηκε από τη σχέση (4.17), άρα και ψυχρότερους, εάν είναι αστέρες της ΚΑ, επομένως, η φωτεινότητα των αστέρων του εκλειπτικού συστήματος θα υπερσκιάζει τη δική τους φωτομετρική συνεισφορά. Εναλλακτική εξήγηση μπορεί να αποτελέσει η «εξωτική» φύση του τρίτου αστέρα, ο οποίος έχει μεν μάζα ικανή να μεταβάλλει την τροχιακή περίοδο του συστήματος, αλλά ταυτόχρονα εκπέμπει ελάχιστα στο οπτικό μέρος του Η/Μ φάσματος. Τέτοιοι αστέρες μπορούν να είναι είτε μελανές οπές είτε αστέρες νετρονίων ή ακόμα και λευκοί νάνοι. Σε τέτοιες περιπτώσεις πρέπει να λαμβάνεται υπόψη τόσο η μάζα του τρίτου σώματος όσο και η ηλικία του εκλειπτικού συστήματος, ώστε να γίνεται έλεγχος για το κατά πόσο είναι λογικό το τρίτο σώμα να εξελίχθηκε πιο γρήγορα από τους αστέρες-μέλη του εκλειπτικού συστήματος, υποθέτοντας πάντα την ταυτόχρονη γέννηση όλων των μελών.

Η μετάθεση της γραμμής των αψίδων μπορεί να εντοπιστεί με ευκολία τόσο από την επίλυση των καμπυλών φωτός όσο και από την ανάλυση του O−C διαγράμματος. Η εκκεντρότητα, το όρισμα της τροχιάς του περιάστρου και η μεταβολή του είναι παράμετροι, οι οποίες προκύπτουν απ' ευθείας τόσο από το φωτομετρικό μοντέλο όσο και από τις θεωρητικές καμπύλες που στηρίζονται στις σχέσεις (4.57)-(4.60).

Η ανάλυση Fourier σε περιπτώσεις παλλόμενων αστέρων μπορεί να δώσει πληροφορίες για τις συχνότητες ανάπαλσης. Από την άλλη μεριά, η ανάλυση των καμπυλών φωτός παρέχει τις απόλυτες τιμές των παραμέτρων του παλλόμενου αστέρα. Ο συνδυασμός των αποτελεσμάτων αυτών των αναλύσεων δύναται να καταλήξει σε συσχετισμό μεταξύ βασικών αστρικών χαρακτηριστικών και συχνοτήτων ανάπαλσης, κάτι το οποίο είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον, καθώς, όπως είναι γνωστό, οι αναπάλσεις είναι μεταβατικό εξελικτικό στάδιο και διαρκούν λίγο σε σχέση με τη ζωή του αστέρα στην ΚΑ. Τέτοιες συσχετίσεις και μοντέλα εξέλιξης αστέρων τύπου δ Sct, οι οποίοι είναι μέλη διπλών συστημάτων, παρουσιάζονται εκτενώς στο 7ο κεφάλαιο της παρούσας διατριβής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Μελέτη αποχωρισμένων εκλειπτικών συστημάτων

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται ποσοτικά αποτελέσματα για δέκα αποχωρισμένα εκλειπτικά συστήματα αστέρων. Τα αποτελέσματα παρήχθησαν από τις αναλύσεις των καμπυλών φωτός τους, και σε ορισμένες περιπτώσεις και από τις καμπύλες ακτινικών ταχυτήτων τους, και τις αναλύσεις των μεταβολών της τροχιακής περιόδου τους. Επίσης, παρουσιάζεται ποιοτική ερμηνεία των αποτελεσμάτων αλλά και ποσοτική σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων. Η επιλογή των συστημάτων έγινε με βάση: α) την απουσία σύγχρονων (CCD) παρατηρήσεων, β) την ανυπαρξία πλήρων καμπυλών φωτός σε διάφορα φωτομετρικά φίλτρα και ως επί το πλείστον γ) την ιδιάζουσα κατανομή των O−C σημείων. Στόχος είναι ο προσδιορισμός των απόλυτων παραμέτρων των αστέρων-μελών, η εξελικτική τους πορεία και η ερμηνεία των μεταβολών της τροχιακής περιόδου τους.

Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3) του κάθε συστήματος, πάνω στην οποία βασίστηκε η κατασκευή του διαγράμματος φάσης ή του διαγράμματος ροής, υπολογίστηκε είτε από χρόνους ελαχίστων που προέκυψαν από δικές μας παρατηρήσεις είτε από τους πιο πρόσφατους της βιβλιογραφίας.

Στις περιπτώσεις των συστημάτων, για τα οποία δεν έχει βρεθεί φασματοσκοπικός λόγος μαζών, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ανίχνευσης του q (q-search-βλ. §4.1) για να προσδιοριστεί ο φωτομετρικός λόγος μαζών. Είναι προφανές ότι σε όλα τα παρακάτω συστήματα η καλύτερη δυνατή λύση επιτεύχθηκε στον "mode 2" (αποχωρισμένο σύστημα, βλ. §4.1).

Για τον υπολογισμό των απόλυτων παραμέτρων των αστέρων-μελών του εκάστοτε συστήματος χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις (1.10)-(1.26) με τιμές που υπολογίστηκαν από την επίλυση των καμπυλών φωτός και σε ορισμένες περιπτώσεις από την ανάλυση των καμπυλών ακτινικών ταχυτήτων. Τα σφάλματά τους υπολογίστηκαν με τη μέθοδο διάδοσης σφαλμάτων. Τα απόλυτα στοιχεία των αστέρων χρησιμοποιήθηκαν για να εντοπιστεί η θέση τους στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας ($M-R$). Σε αυτό το διάγραμμα δίνονται, για πιο άμεση αντίληψη της εξελικτικής κατάστασης των αστέρων, δύο συνεχείς γραμμές, οι οποίες αντιστοιχούν στην Κύρια Ακολουθία Μηδενικής Ηλικίας (ZAMS) και στην Κύρια Ακολουθία Τερματικής Ηλικίας (TAMS) και έχουν ληφθεί από τους Niarchos & Manimanis (2003).

5.1. Το σύστημα AD And

Ιστορική αναδρομή

Η μεταβλητότητα του συστήματος αναφέρθηκε από τον Lacchini (1927). Η πρώτη φωτομετρική μελέτη, βασισμένη σε οπτικές παρατηρήσεις, έγινε από τους Taylor & Alexander (1940), ενώ ο Rucinski (1966) δημοσίευσε την πρώτη καμπύλη φωτός βάσει φωτοηλεκτρικών παρατηρήσεων. Ο Cannon (1934) ταξινόμησε το σύστημα ως τύπου F, αλλά αργότερα, οι Hill et al. (1975) τοποθέτησαν τον φασματικό τύπο του συστήματος στο εύρος φασματικών τύπων B8-A0. Οι Frieboes-Conde & Herczeg (1973) ερμήνευσαν τις περιοδικές μεταβολές της τροχιακής περιόδου του συστήματος βασιζόμενοι στο LITE (βλ. §4.2.1), αλλά κατέληξαν σε αναξιόπιστη τιμής της μάζας του τρίτου μέλους. Οι δείκτες Strömgren του συστήματος υπολογίστηκαν από τους Hilditch & Hill (1975). Οι Giuricin & Mardirossian (1981a) δημοσίευσαν ανανεωμένα φωτομετρικά στοιχεία του συστήματος, το οποίο, αργότερα, συμπεριελήφθηκε από τον Hegedus (1988) σε λίστα συστημάτων με πιθανή έκκεντρη τροχιά. Ο Samolyk (1997) ανέλυσε την τροχιακή περίοδο του συστήματος καταλήγοντας στην ανυπαρξία φαινόμενων μεταβολών. Αντίθετα, οι Liao & Qian (2009), επαναλαμβάνοντας την O−C ανάλυση του συστήματος, εντόπισαν μεταβολές της τροχιακής περιόδου με περίοδο 14.38 yrs.

Οι Liakos et al. (2012a) πραγματοποίησαν νέες φωτομετρικές παρατηρήσεις του συστήματος, ανέλυσαν εκ νέου το O−C διάγραμμά του και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι παρατηρήσεις του συστήματος έλαβαν χώρα στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1) με τη χρήση του τηλεσκοπίου των 40 cm και της CCD ST-8XMEI και διήρκεσαν πέντε νύκτες εντός του χρονικού διαστήματος Αύγουστος-Σεπτέμβριος 2008. Στον πίνακα 5.1 δίνονται: Οι αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία (βλ. §3.1.1) και τα φαινόμενα μεγέθη τους m_V στο φίλτρο V, ο αριθμός των σημείων N ανά φίλτρο παρατήρησης και το μέσο φωτομετρικό σφάλμα τους *s.d.* εκφρασμένο σε mmag.

Πίνακας 5.1. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους.

Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για κάθε φίλτρο παρατήρησης							
AD And	Μεταβλητός	11.2[a]	B		V		R		I	
TYC 3641-45-1	Σύγκρισης	10.85[b]	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.
TYC 3641-37-1	Ελέγχου	11.26[b]	358	4.8	344	5.0	349	4.9	349	4.2

[a]Watson et al. (2006), [b]Høg et al. (2000)

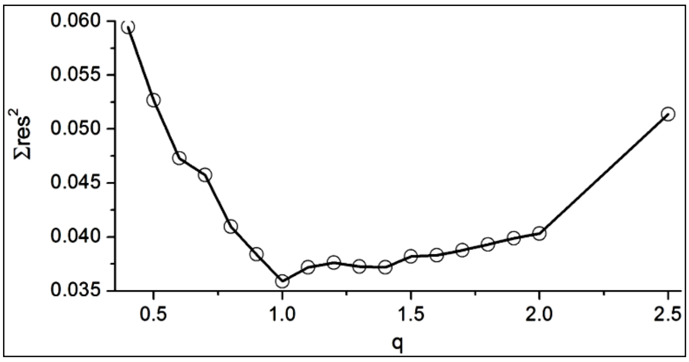
Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2454711.51042 + 0.98617^{\mathrm{d}}\ \mathrm{E} \tag{5.1}$$

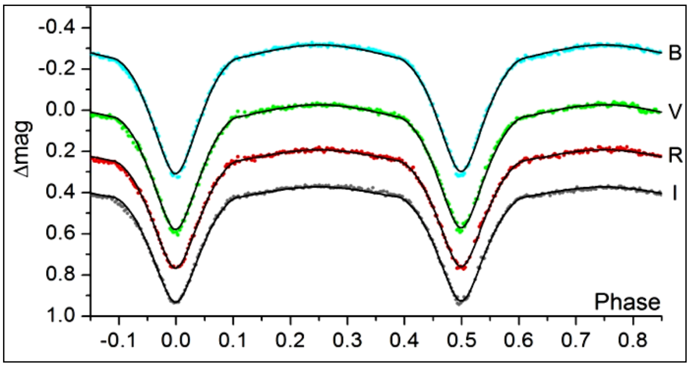
και υπολογίστηκε από τον χρόνο ελαχίστου (Πίνακας Β1), ο οποίος προέκυψε από τα δεδομένα μας και τους πιο πρόσφατους της βιβλιογραφίας.

Ανάλυση των καμπυλών φωτός

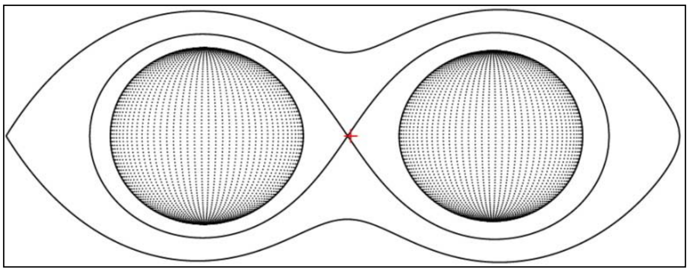
Η ανάλυση των καμπυλών φωτός βασίζεται στη μέθοδο που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.1. Η θερμοκρασία του πρωτεύοντα αστέρα τέθηκε ίση με 9800 K, βάσει του πιθανότερου φασματικού τύπου του συστήματος (A0-Hill et al. 1975, Skiff 2010). Λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων (βλ. παρακάτω), η οποία δύναται να ερμηνευτεί με το LITE (§4.2.1), η παράμετρος της φωτομετρικής συνεισφοράς από ένα πιθανό τρίτο μέλος στο σύστημα l_3 αφέθηκε ελεύθερη προς σύγκλιση. Λόγω ανυπαρξίας φασματοσκοπικά προσδιορισμένου λόγου μαζών των αστέρων του συστήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ανίχνευσης του *q* (*q*-search - βλ. §4.1) και το αντίστοιχο διάγραμμα παρουσιάζεται στην εικ. 5.1. Στην εικ. 5.2 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 5.3 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος, ενώ στον πίνακα 5.2 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος.



Εικόνα 5.1. Διάγραμμα ανίχνευσης του *q* για το σύστημα AD And. Η τιμή του *q* που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή των $\sum res^2$ βρέθηκε ίση με 1.



Εικόνα 5.2. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες φωτός στα φίλτρα *B*, *V*, *R*, *I* του συστήματος AD And.



Εικόνα 5.3. Η γεωμετρία Roche του συστήματος AD And στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό.

Πίνακας 5.2. Παράμετροι του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα AD And.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή			
i [°]	82.6 (3)	Φίλτρο:	B	V	R	I
q_{ph}	0.97 (1)	x_1	0.492	0.418	0.353	0.281
T_1 [K]	9800[a,b]	x_2	0.493	0.419	0.354	0.281
T_2 [K]	9790 (45)	L_1/L_T	0.475 (3)	0.472 (3)	0.460 (3)	0.457 (4)
Ω_1	4.31 (4)	L_2/L_T	0.516 (3)	0.514 (3)	0.500 (3)	0.497 (3)
Ω_2	4.14 (3)	L_3/L_T	0.009 (4)	0.014 (3)	0.040 (4)	0.045 (5)
A_1=A_2	1[a]	$\langle L_3/L_T \rangle$ (%)	2.7 (4)			
g_1=g_2	1[a]	$\sum res^2$	0.062			

[a]σταθερή τιμή, [b]υπόθεση

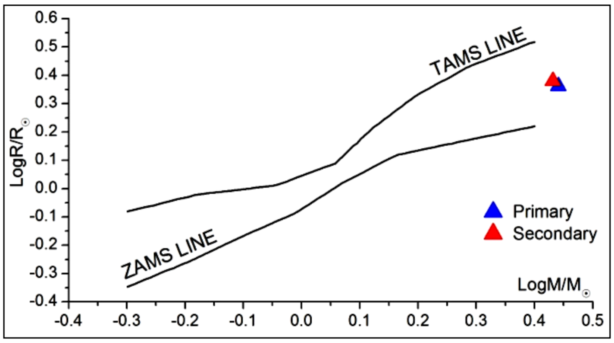
Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Η τιμή της μάζας M_1 του πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος υποτέθηκε από τον φασματικό του τύπο ως αστέρας της ΚΑ (βλ. Παρ. Ε), και οι τιμές των υπολοίπων παραμέτρων δίνονται στον πίνακα 5.3. Η εικ. 5.4 δείχνει τις θέσεις των αστέρων στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.

Πίνακας 5.3. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος AD And.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [$M_\odot$]	2.76[a]	2.70 (8)	log$g$ [cm/s^2]	4.2 (1)	4.1 (1)
R [$R_\odot$]	2.3 (2)	2.4 (2)	α [$R_\odot$]	3.7 (5)	3.8 (1)
L [$L_\odot$]	44 (5)	47 (6)	M_{bol} [mag]	1 (2)	1 (2)

[a]υπόθεση



Εικόνα 5.4. Θέσεις των αστέρων του συστήματος AD And (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

Ανάλυση των μεταβολών της τροχιακής περιόδου

Η κατασκευή του O−C διαγράμματος του συστήματος AD And βασίστηκε σε 54 χρόνους ελαχίστων, 16 εκ των οποίων προέκυψαν από φωτοηλεκτρικές και 38 από CCD παρατηρήσεις. Οι χρόνοι που υπολογίστηκαν βάσει προσωπικών παρατηρήσεων δίνονται στον πίνακα Β1 (Παρ. Β). Στη βιβλιογραφία υπάρχουν ακόμα άλλοι 195 χρόνοι ελαχίστων βασισμένοι σε οπτικές (δια γυμνού οφθαλμού) ή σε φωτογραφικές παρατηρήσεις. Αυτοί οι χρόνοι ελαχίστων, πιθανότατα λόγω των μεθόδων παρατήρησης, προσέθεταν πολύ θόρυβο στην O−C κατανομή αποκρύπτοντας εν μέρει την περιοδική μεταβολή και δεν ελήφθησαν υπόψη στην παρακάτω ανάλυση. Το O−C διάγραμμα του συστήματος που περιλαμβάνει όλα τα φωτομετρικά ελάχιστα είναι διαθέσιμο σε βάση δεδομένων[1] O−C διαγραμμάτων (Kreiner et al. 2001). Ως αρχική παράμετρος χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω αστρονομική εφημερίδα (Kreiner et al. 2001):

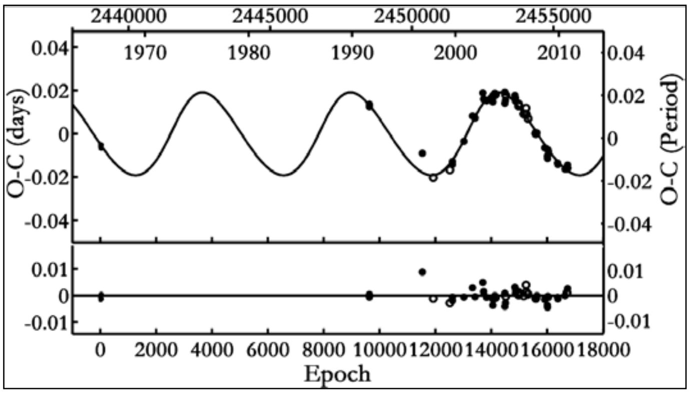
$$\text{Min. I} = \text{HJD } 2439002.445 + 0.9861944^{\text{d}}\text{E} \qquad (5.2)$$

Εφόσον και οι δύο αστέρες του συστήματος είναι σχετικά θερμοί, υπό την έννοια ότι δεν μπορεί να έχουν περίβλημα μεταφοράς που θα μπορούσε να δημιουργήσει μεταβολές στην τετραπολική ροπή (Applegate 1992), η μόνη πιθανή ερμηνεία για τις περιοδικές μεταβολές των O−C σημείων είναι το LITE. Η μέθοδος ανάλυσης και η επεξήγηση των συμβόλων αναφέρονται στην παράγραφο 4.2. Ο πίνακας 5.4 περιέχει τις τιμές των παραμέτρων του LITE, ενώ στην εικ. 5.5 παρουσιάζεται η προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης στα O−C σημεία.

[1]http://www.as.up.krakow.pl/o-c/data/getdata.php3?AD%20and

Πίνακας 5.4. Παράμετροι της O−C ανάλυσης του συστήματος AD And.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
Εκλειπτικό σύστημα		3^o σώμα	
JD_0 [HJD−2400000]	39002.458 (6)	P_3 [yr]	14.3 (1)
P [d]	0.9861924 (4)	e_3	0.17 (5)
LITE		ω_3 [°]	25 (11)
T_0 [HJD−2400000]	47012 (175)	$f(m_3)$ [$M_\odot$]	0.183 (1)
A [d]	0.019 (1)	$M_{3,min}$ [$M_\odot$]	2.21 (1)
Σres^2	0.0026		



Εικόνα 5.5. Προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης του LITE στα O−C σημεία του συστήματος AD And (επάνω) και τα υπόλοιπα (residuals) μετά την αφαίρεση της θεωρητικής καμπύλης (κάτω).

Συμπεράσματα

Οι αστέρες-μέλη του αποχωρισμένου συστήματος AD And βρίσκονται επάνω στην ΚΑ (εικ. 5.4), έχουν περίπου όμοιες απόλυτες παραμέτρους και είναι σχετικά κοντά στην πλήρωση των λοβών Roche τους. Κατόπιν τούτου, και λαμβάνοντας υπ' όψιν τους φασματικούς τους τύπους (A0) πρόκειται για αστέρες μικρής ηλικίας και δεν διαφαίνεται από κάποιο στοιχείο ότι έχει λάβει χώρα ανταλλαγή μάζας μεταξύ των μελών ή απώλεια μάζας από το σύστημα. Επομένως, τα πιθανότερα σενάρια εξέλιξης είναι η περίπτωση Β ή Γ (βλ. §1.2.4).

Από την O−C ανάλυση του συστήματος προέκυψε ότι η τροχιακή περίοδος μεταβάλλεται περιοδικά κάθε ~14 yrs, κάτι που έρχεται σε οριακή συμφωνία με τα αποτελέσματα των Liao & Qian (2009). Η μεταβολή της περιόδου οφείλεται στην παρουσία ενός επιπλέον μέλους στο σύστημα, του οποίου η ελάχιστη μάζα υπολογίστηκε ίση με ~2.2 $M_\odot$. Βάσει αυτής της τιμής υπολογίζεται (σχέση 4.71) ότι η φωτομετρική συνεισφορά του τρίτου μέλους, εάν αυτό είναι αστέρας της ΚΑ, θα είναι $L_{3,O-C}$ ~15%. Από την άλλη πλευρά, από την ανάλυση των καμπυλών φωτός βρέθηκε επιπρόσθετη φωτομετρική συνεισφορά μόλις $L_{3,LC}$~3%. Αυτή η μεγάλη διαφορά μεταξύ αναμενόμενης και παρατηρούμενης φωτομετρικής συνεισφοράς οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι το τρίτο μέλος δεν είναι ένας αστέρας, αλλά ένα διπλό σύστημα του οποίου οι αστέρες-μέλη έχουν συνολική μάζα περίπου όση αυτή που υπολογίστηκε από την O−C ανάλυση. Όμως, η θερμοκρασία τους θα πρέπει να είναι μικρότερη (εάν ανήκουν στην ΚΑ), επομένως μπορούν να επηρεάζουν την τροχιακή περίοδο, αλλά δεν εντοπίζονται εύκολα φωτομετρικά. Επίσης, βάσει της σχέσης 4.23 βρέθηκε, ότι το κριτήριο της δυναμικής ευστάθειας (Harrington 1977) ενός τέτοιου πολλαπλού συστήματος ικανοποιείται μόνο, εάν το επιπρόσθετο μέλος (διπλό σύστημα εν προκειμένω) περιφέρεται αντίθετα από τη φορά περιστροφής των αστέρων του εκλειπτικού συστήματος.

5.2. Το σύστημα AV CMi

Ιστορική αναδρομή

Το σύστημα AV CMi ανακαλύφθηκε από τον Hoffmeister (1968), οποίος υπολόγισε την περίοδό του σε ~1.13 days, τιμή που δεν είχε αλλάξει μέχρι πρόσφατα. Η πραγματική τιμή είναι η διπλάσια της αρχικής (Malkov et al. 2006), ενώ η σύγχυση πιθανόν οφείλεται στο σχεδόν ίδιο φωτομετρικό βάθος των ελαχίστων. Δεν υπήρχαν πλήρεις καμπύλες φωτός του συστήματος, ενώ η μοναδική πληροφόρηση για τον φασματικό του τύπο (F0) προέρχεται από τους Svechnikov & Kuznetsova (1990). Ωστόσο, μετρήσεις των δεικτών $B-V$ που δίνονται σε διάφορους καταλόγους (π.χ. NOMAD, NPM2, ASCC-2.5 v.3) κυμαίνονται μεταξύ 0.14-0.2.

Οι Liakos & Niarchos (2010) και οι Liakos et al. (2012c) διεξήγαγαν συστηματικές παρατηρήσεις για το σύστημα, στο οποίο εντόπισαν και τρίτο μέλος, υπολόγισαν τα απόλυτα μεγέθη των μελών και εκτίμησαν τη φύση του επιπρόσθετου συνοδού. Εκτός από τα αποτελέσματα των δύο τελευταίων εργασιών, παρακάτω παρουσιάζεται και η ανάλυση του O−C διαγράμματος του συστήματος.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι παρατηρήσεις του συστήματος πραγματοποιήθηκαν στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1) με τη χρήση του τηλεσκοπίου των 40 cm και των CCD ST-8XMEI και ST-10XME. Για την πλήρη κάλυψη της καμπύλης φωτός οι παρατηρήσεις διήρκεσαν 21 νύκτες στο διάστημα Δεκέμβριος 2007-Μάρτιος 2008. Οι συστηματικές παρατηρήσεις για τον εντοπισμό της διάβασης του τρίτου μέλους μπροστά από κάποιο εκ των μελών του εκλειπτικού συστήματος έλαβαν χώρα στα χρονικά διαστήματα Νοέμβριος 2008-Μάρτιος 2009, Νοέμβριος 2009-Μάρτιος 2010 και Νοέμβριος 2010-Μάρτιος 2011 για μεγάλο αριθμό νυκτών και μόνο στο φίλτρο *I*. Στον πίνακα 5.5 δίνονται οι λεπτομέρειες για τις παρατηρήσεις και τη φωτομετρία, όπως και στον πίνακα 5.1, και αφορούν μόνο τις παρατηρήσεις για την κάλυψη της καμπύλης φωτός. Ωστόσο, οι υπόλοιπες παρατηρήσεις (*I*-φίλτρο) είχαν φωτομετρικό σφάλμα παραπλήσιο (±5%) με αυτό του δίνεται στον πίνακα 5.5 για το ίδιο φίλτρο.

Πίνακας 5.5. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους (*N*=αριθμός σημείων, *s.d.*=σφάλμα).

Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για κάθε φίλτρο παρατήρησης					
AV CMi	Μεταβλητός	11.5[a]	V		R		I	
GSC 770-929	Σύγκρισης	12.16[b]	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.
TYC 770-911-1	Ελέγχου	10.99[c]	694	5.0	672	4.8	695	4.3

[a]Watson et al. (2006), [b]Zacharias et al. (2004), [c]Høg et al. (2000)

Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2453364.9467 + 2.27775^{\mathrm{d}}\ \mathrm{E} \quad (5.3)$$

και υπολογίστηκε από τους πιο πρόσφατους χρόνους πρωτευόντων ελαχίστων της βιβλιογραφίας.

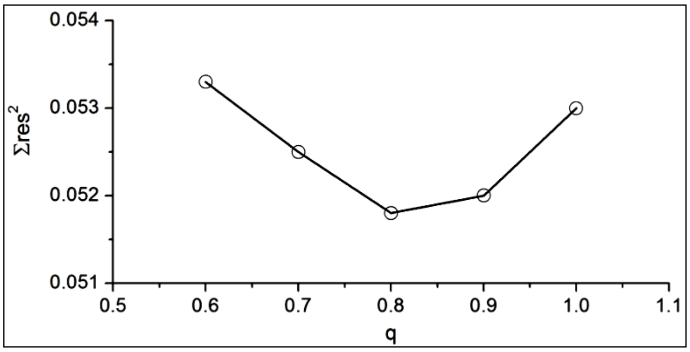
Ανάλυση των καμπυλών φωτός

Δύο μοντέλα έχουν γίνει για το σύστημα, καθώς ακόμα και σήμερα υπάρχει αβεβαιότητα για τον φασματικό του τύπο. Λόγω ανυπαρξίας φασματοσκοπικά προσδιορισμένου λόγου μαζών των αστέρων του συστήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ανίχνευσης του q (βλ. §4.1). Τα δύο μοντέλα βασίστηκαν σε διαφορετική θερμοκρασία του πρωτεύοντα αστέρα και τελικά ως τελικό παρουσιάζεται αυτό που παρήγαγε τη μικρότερη τιμή $\sum res^2$. Σε αυτό το μοντέλο η θερμοκρασία του πρωτεύοντα αστέρα τέθηκε ίση με 7900 K, τιμή η οποία υποστηρίζεται από τους δείκτες $B-V$. Λόγω εντοπισμού διάβασης ενός τρίτου μέλους μπροστά από κάποιον από τους συνοδούς του εκλειπτικού συστήματος η παράμετρος της φωτομετρικής συνεισφοράς ενός τρίτου μέλους στο σύστημα l_3 αφέθηκε ελεύθερη προς σύγκλιση. Επίσης, λόγω μετατόπισης του δευτερεύοντος ελαχίστου από τη φάση 0.5 στη φάση ~0.57, οι παράμετροι της εκκεντρότητας e και του ορίσματος του περιάστρου ω αφέθηκαν και αυτές ελεύθερες. Το διάγραμμα ανίχνευσης του q παρουσιάζεται στην εικ. 5.6. Στην εικ. 5.7 παρουσιάζονται οι θεωρητικές και οι παρατηρούμενες καμπύλες φωτός, στην εικ. 5.8 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος, ενώ στον πίνακα 5.6 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος.

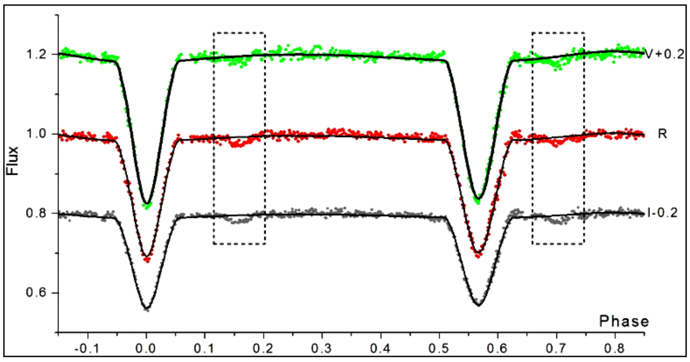
Πίνακας 5.6. Παράμετροι του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα AV CMi.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή		
i [°]	83.6 (1)	Φίλτρο:	V	R	I
q_{ph}	0.84 (1)	x_1	0.527	0.443	0.353
T_1 [K]	7900[a,b]	x_2	0.522	0.444	0.357
T_2 [K]	7897 (8)	L_1/L_T	0.654 (2)	0.646 (2)	0.634 (2)
e	0.11 (1)	L_2/L_T	0.341 (1)	0.337 (1)	0.331 (1)
ω [°]	17.2 (6)	L_3/L_T	0.004 (2)	0.016 (2)	0.036 (3)
Ω_1	5.73 (1)	$\langle L_3/L_T \rangle$ (%)		1.9 (3)	
Ω_2	6.76 (1)	$\sum res^2$		0.217	
$A_1=A_2$	1[a]				
$g_1=g_2$	1[a]				

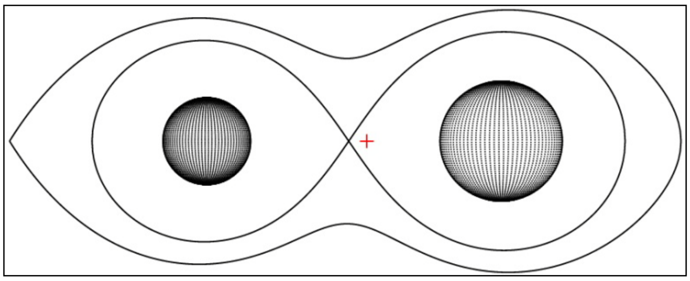
[a]σταθερή τιμή, [b]υπόθεση



Εικόνα 5.6. Διάγραμμα ανίχνευσης του q για το σύστημα AV CMi. Η τιμή του q που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή των $\sum res^2$ βρέθηκε ίση με 0.8.



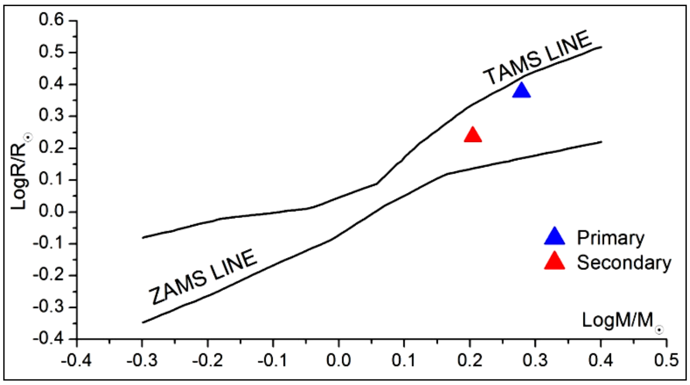
Εικόνα 5.7. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες φωτός στα φίλτρα *V*, *R*, *I* του συστήματος AV CMi. Τα πλαίσια εσωκλείουν τα μέρη της καμπύλης φωτός όπου σημειώθηκε μείωση της ολικής ροής λόγω της διάβασης του τρίτου μέλους μπροστά από κάποιον από τα μέλη του εκλειπτικού συστήματος.



Εικόνα 5.8. Η γεωμετρία Roche του συστήματος AV CMi στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό.

Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Η τιμή της μάζας M_1 του πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος υποτέθηκε από τον φασματικό του τύπο ως αστέρας της ΚΑ (βλ. Παρ. Ε) και δίνεται μαζί με τις τιμές των υπολοίπων παραμέτρων στον πίνακα 5.7. Η εικ. 5.9 δείχνει τις θέσεις των αστέρων στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.



Εικόνα 5.9. Θέσεις των αστέρων του συστήματος AV CMi (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

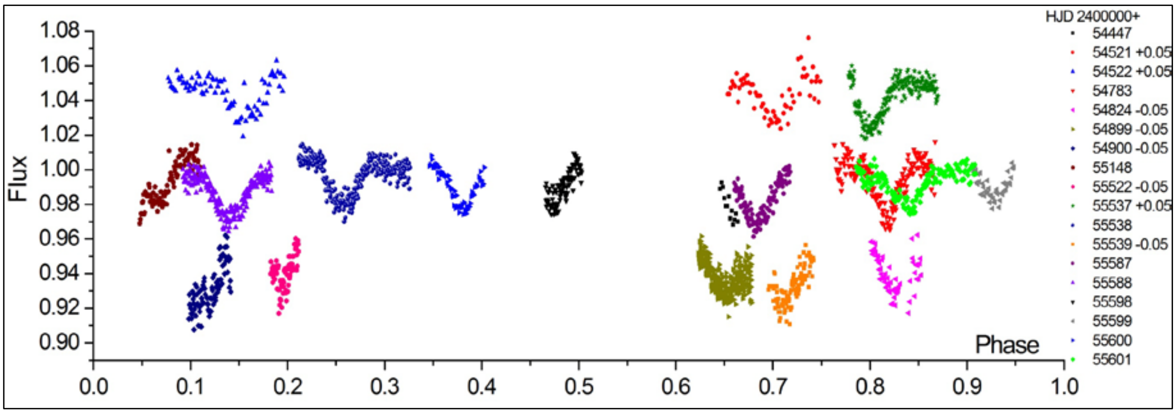
Πίνακας 5.7. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος AV CMi.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [$M_\odot$]	1.90[a]	1.60 (1)	log*g* [cm/s^2]	3.96 (2)	4.17 (2)
R [$R_\odot$]	2.38 (5)	1.72 (4)	α [$R_\odot$]	5.2 (2)	6.2 (1)
L [$L_\odot$]	19.8 (8)	10.3 (4)	M_{bol} [mag]	1.5 (5)	2.2 (4)

[a]υπόθεση

Ανάλυση των καμπυλών φωτός των διαβάσεων του τρίτου μέλους

Οι παρατηρήσεις για την καταγραφή των διαβάσεων του τρίτου μέλους μπροστά από κάποιο εκ των μελών του εκλειπτικού συστήματος έγιναν μόνο στο φίλτρο *I*, διότι σε αυτό είχαμε το μικρότερο φωτομετρικό σφάλμα (βλ. πίνακα 5.5) αλλά και μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ο μικρότερος χρόνος έκθεσης που κατ' επέκταση προσέφερε τη μέγιστη δυνατή χρονική διακριτική ικανότητα. Οι διαβάσεις του τρίτου μέλους δεν εμφανίζονταν στην ίδια γεωμετρική φάση του εκλειπτικού συστήματος, γεγονός το οποίο, τουλάχιστον αρχικά, δυσκόλεψε πολύ τον εντοπισμό και την καταγραφή τους. Ωστόσο, παρατηρήσεις διαβάσεων σε δύο διαδοχικές ημέρες είχαν δώσει μια πρώτη αίσθηση για την περίοδό τους. Στο χρονικό διάστημα Νοέμβριος 2008-Μάρτιος 2011 παρατηρήθηκαν 18 διαβάσεις, εκ των οποίων μόνο σε 5 καταγράφηκε ολόκληρο το φαινόμενο. Στην εικόνα 5.10 παρουσιάζονται οι καμπύλες φωτός των 18 διαβάσεων.



Εικόνα 5.10. Καμπύλες φωτός των διαβάσεων του τρίτου σώματος μπροστά από κάποιο εκ των μελών του εκλειπτικού συστήματος. Τα χρώματα συμβολίζουν διαφορετική νύκτα παρατηρήσεων.

Στην εικ. 5.10 φαίνεται ότι η μείωση της φωτεινότητας του συστήματος κατά τη διάρκεια των διαβάσεων κυμαίνεται μεταξύ 2%-3.5%, κάτι το οποίο σημαίνει ότι δεν είναι σταθερή συναρτήσει του χρόνου. Επιπροσθέτως το σχήμα του ελαχίστου και η διάρκεια του φαινομένου διαφέρει. Ωστόσο, βάσει των χρόνων ελαχίστων των διαβάσεων (βλ. Παρ. Β-πίνακας Β4) προέκυψε η εφημερίδα:

$$T_{\mathrm{transit}} = \mathrm{HJD}\ 2454899.354\ (1) + 0.519215\ (1)^{\mathrm{d}}\ \mathrm{E} \qquad (5.4)$$

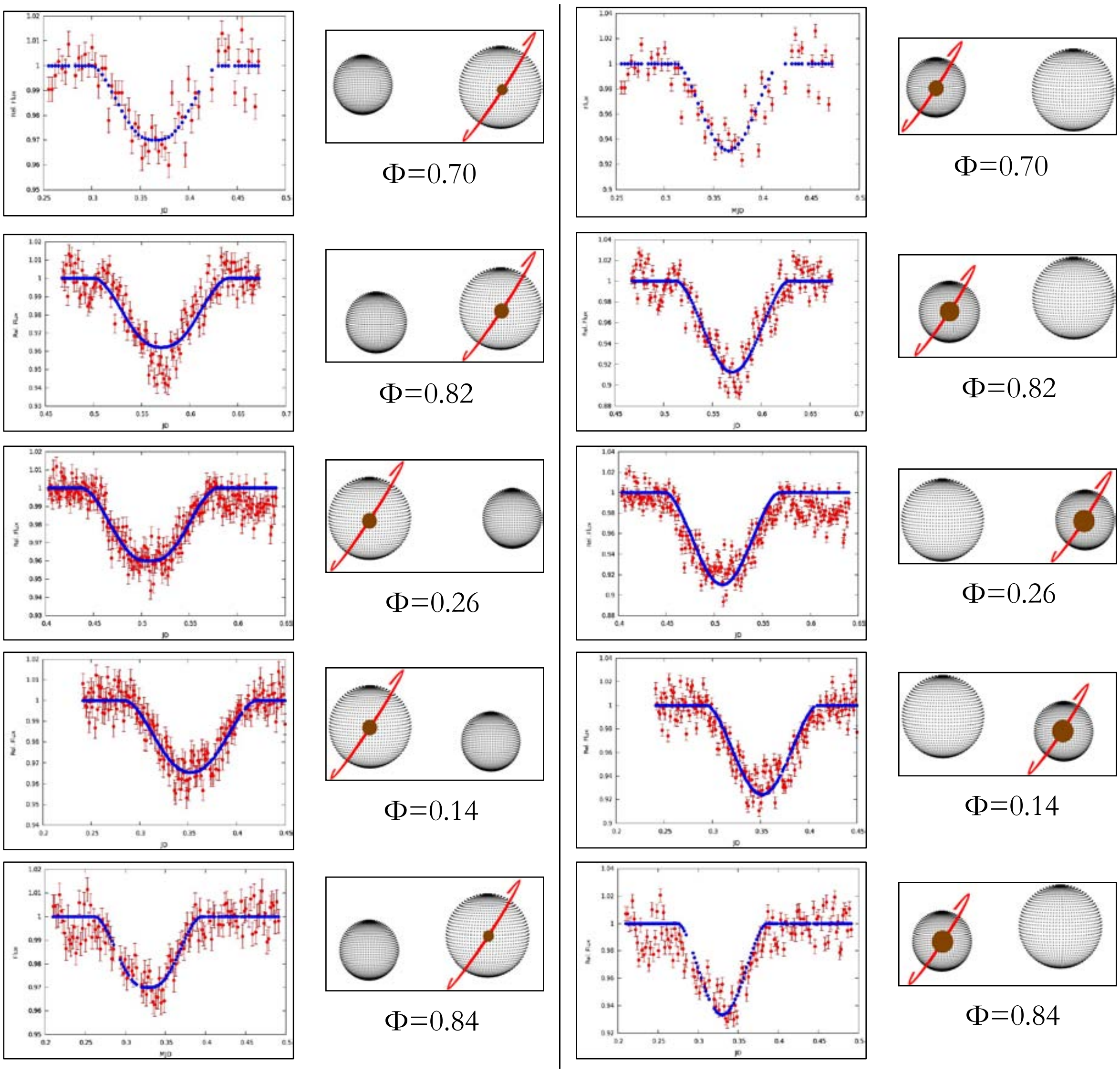
Επομένως, είναι αμέσως αντιληπτό ότι το τρίτο σώμα, εφόσον έχει περίοδο περιφοράς μικρότερη από αυτήν του εκλειπτικού συστήματος, περιφέρεται γύρω από κάποιον συνοδό και όχι γύρω από το σύστημα.

Οι καμπύλες φωτός των πέντε πλήρων διαβάσεων αναλύθηκαν με το λογισμικό PHOS-T[1] (Mislis et al. 2012). Για να υπολογιστούν προσεγγιστικά οι παράμετροι του τρίτου σώματος διακρίνονται δύο περιπτώσεις: Το τρίτο σώμα να περιφέρεται γύρω από (Α) τον πρωτεύοντα και (Β) τον δευτερεύοντα αστέρα. Σε κάθε περίπτωση, και βάσει των φωτομετρικών συνεισφορών που βρέθηκαν (πίνακας 5.6), η ροή ακτινοβολίας του αστέρα γύρω από τον οποίο δεν περιφέρεται το τρίτο σώμα αφαιρέθηκε από τη συνολική η οποία επανακανονικοποιήθηκε στη μονάδα. Αυτή η αφαίρεση προκαλεί αλλαγή του βάθους των ελαχίστων, όπως φαίνεται στην εικ. 5.11. Οι μάζες των αστέρων και η περίοδος των διαβάσεων χρησιμοποιήθηκαν για να υπολογιστεί η τιμή του μεγάλου ημιάξονα της τροχιάς του τρίτου σώματος a_3 (θεωρήθηκε κυκλική), βάσει του τρίτου νόμου του Kepler (σχέση 1.2) με τη μάζα του αστέρα να θεωρείται πολύ μεγαλύτερη από αυτήν του τρίτου μέλους (α_3=0.016 AU για την περίπτωση Α και α_3=0.015 AU για την περίπτωση Β). Η

[1]http://www.ast.cam.ac.uk/~misldim/page10/page10.html

περίοδος περιφοράς και ο μεγάλος ημιάξονας της τροχιάς του τρίτου σώματος, η ακτίνα του αστέρα και οι συντελεστές της αμαύρωσης χείλους (Claret 2004) κρατήθηκαν σταθερές κατά την επίλυση των καμπυλών φωτός των διαβάσεων, ενώ η ακτίνα R_3 και η τροχιακή κλίση i_3 του τρίτου σώματος αφέθηκαν ελεύθερες. Στην εικόνα 5.11 παρουσιάζεται η προσαρμογή των θεωρητικών καμπύλων επάνω στις παρατηρούμενες και η γεωμετρική εικόνα του τριπλού συστήματος για κάθε διάβαση που παρατηρήθηκε και για κάθε περίπτωση. Στον πίνακα 5.8 δίνονται οι παράμετροι του κάθε μοντέλου.

Περίπτωση Α   Περίπτωση Β



Εικόνα 5.11. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες φωτός των διαβάσεων του τρίτου μέλους του συστήματος AV CMi και η γεωμετρική εικόνα του τριπλού συστήματος. Επίσης, δίνεται η φάση *Φ* (του εκλειπτικού συστήματος) κατά τη χρονική στιγμή του φωτομετρικού ελαχίστου της διάβασης και η τροχιά (κόκκινη γραμμή) του τρίτου μέλους (καφέ κύκλος) γύρω από τον αστέρα σε κάθε περίπτωση.

Πίνακας 5.8. Παράμετροι των μοντέλων των διαβάσεων για τις περιπτώσεις A και B. Η ακτίνα του τρίτου σώματος δίνεται σε ηλιακές μονάδες αλλά και σε ακτίνες Δία για άμεση σύγκριση.

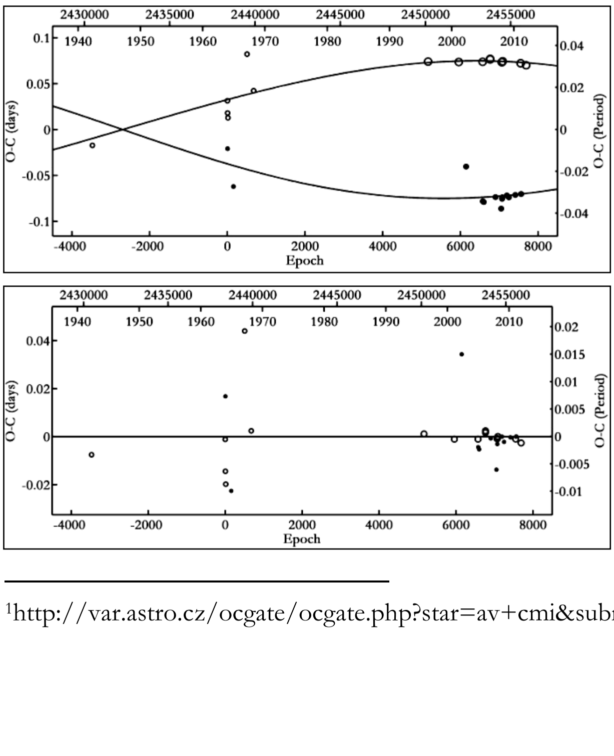
$T_{transit}$ [HJD]	Φ	Περίπτωση	R_3 [R_{Jup}]	R_3 [$R_{\odot}$]	i_3 [°]	χ^2
2454521.3614	0.70	A	4.1	0.4	55.5	2.14
		B	5.4	0.6	61.9	9.13
2454783.5696	0.82	A	4.6	0.5	56.1	2.70
		B	6.1	0.6	62.3	7.36
2455538.5093	0.26	A	4.7	0.5	56.8	2.14
		B	6.9	0.7	60.0	9.96
2455588.3496	0.14	A	4.7	0.5	53.7	1.29
		B	6.9	0.7	58.1	5.52
2455601.3373	0.84	A	4.1	0.4	55.6	1.32
		B	6.6	0.7	57.7	6.01

Ανάλυση των μεταβολών της τροχιακής περιόδου του εκλειπτικού συστήματος

Η κατασκευή του O−C διαγράμματος του συστήματος AV CMi βασίστηκε σε 30 χρόνους ελαχίστων, 8 εκ των οποίων προέκυψαν από φωτογραφικές παρατηρήσεις και 22 από CCD. Οι χρόνοι που υπολογίστηκαν από προσωπικές παρατηρήσεις δίνονται στον πίνακα B1 (Παρ. B). Από την κατανομή των O−C σημείων, αλλά και από την εκκεντρότητα που βρέθηκε από την επίλυση των καμπυλών φωτός, είναι προφανές ότι ο μηχανισμός της μετάθεσης των αψίδων (βλ. §4.2.3) είναι υπεύθυνος για τις μεταβολές της τροχιακής περιόδου. Ως εισαγωγική παράμετρος χρησιμοποιήθηκε η εφημερίδα από βάση δεδομένων[1] O−C διαγραμμάτων:

$$\text{Min. I} = \text{HJD } 2438379.68 + 2.277755^{\text{d}}\text{E} \tag{5.5}$$

Ο πίνακας 5.9 περιέχει τις τιμές των παραμέτρων της μετάθεσης της γραμμής των αψίδων, ενώ στην εικ. 5.12 παρουσιάζεται η προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης στα O−C σημεία.



Εικόνα 5.12. Προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης της μετάθεσης της γραμμής των αψίδων στα O−C σημεία του συστήματος AV CMi (επάνω) και τα υπόλοιπα (residuals) μετά την αφαίρεση της θεωρητικής καμπύλης (κάτω).

[1]http://var.astro.cz/ocgate/ocgate.php?star=av+cmi&submit=Submit&lang=en

Πίνακας 5.9. Παράμετροι της O−C ανάλυσης του συστήματος AV CMi.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
JD_0 [HJD−2400000]	38379.71 (2)	$\dot{\omega}$ [°/cycle]	0.010 (1)
P [d]	2.277750 (4)	U [yr]	217 (8)
e	0.10 (3)	P_α [d]	2.288300 (4)
ω [°]	298 (7)		
Σres^2		0.031	

Συμπεράσματα

Οι αστέρες-μέλη του αποχωρισμένου συστήματος AV CMi βρίσκονται στην ΚΑ (εικ. 5.9), είναι πολύ εντός των λοβών Roche τους και παρουσιάζουν μικρή διαφορά στην εξελικτική τους κατάσταση. Συγκεκριμένα, ο πρωτεύων αστέρας είναι λίγο πιο εξελιγμένος και πολύ κοντά στην TAMS, ενώ ο δευτερεύων είναι περίπου στη μέση των γραμμών ZAMS-TAMS. Αυτό έρχεται σε συμφωνία με τη θεωρία της αστρικής εξέλιξης, αφού ο αστέρας μεγαλύτερης μάζας βρέθηκε να είναι πιο εξελιγμένος από τον αστέρα μικρότερης μάζας. Επομένως, αναμένεται ότι ο πρωτεύων θα γεμίσει πρώτος τον λοβό του και θα αρχίσει να μεταφέρει μάζα προς τον δευτερεύοντα. Επομένως, τα πιθανότερα σενάρια εξέλιξης είναι η περίπτωση Β ή Γ (βλ. §1.2.4).

Η τροχιά του συστήματος είναι έκκεντρη, κάτι που προέκυψε τόσο από την ανάλυση των καμπυλών φωτός όσο και από την O−C ανάλυση του συστήματος. Όμως, το πιο ενδιαφέρον σημείο της παρούσας ανάλυσης αφορά τις διαβάσεις του τρίτου μέλους μπροστά από κάποιον εκ των συνοδών του εκλειπτικού συστήματος, φαινόμενο το οποίο είναι σπάνιο. Πολύ πιθανόν η έκκεντρη τροχιά να οφείλεται στην παρουσία του τρίτου μέλους.

Η φύση του τρίτου μέλους έχει έως τώρα συστηματικά αποφευχθεί να καθοριστεί, καθώς αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα. Στην ανάλυση των καμπυλών φωτός βρέθηκε φωτομετρική συνεισφορά ~2% από το τρίτο μέλος. Εδώ τονίζεται, ότι λόγω της μικρότερης περιόδου περιφοράς του τρίτου σώματος από αυτήν του εκλειπτικού συστήματος, δεν είναι δυνατόν να εντοπιστούν μεταβολές στο O−C διάγραμμα, οι οποίες να οφείλονται στο τρίτο σώμα, καθώς, η ελάχιστη χρονική απόσταση των O−C σημείων είναι το μισό της περιόδου του εκλειπτικού συστήματος, τιμή η οποία υπερβαίνει και πάλι την περίοδο περιφοράς του τρίτου σώματος. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων των καμπυλών φωτός των διαβάσεων έδειξαν ότι τόσο η τροχιακή κλίση όσο και η ακτίνα του τρίτου σώματος για κάθε περίπτωση ποικίλλουν. Εντούτοις, τα σφάλματα των παρατηρηθέντων σημείων είναι σχετικά μεγάλα, και επιπροσθέτως πρέπει να ληφθεί υπόψη, ότι τα μέλη του εκλειπτικού συστήματος, και ειδικά ο πρωτεύων αστέρας, δεν είναι τέλειες σφαίρες λόγω των παλιρροιακών αλληλεπιδράσεων. Ως εκ τούτου, αυτό μπορεί να έχει επιπτώσεις τόσο στη διάρκεια όσο στο βάθος της διάβασης, αφού αυτές παρατηρούνται σε διαφορετικές φάσεις του εκλειπτικού συστήματος. Ωστόσο, για μια πρώτη προσέγγιση της φύσης του τρίτου σώματος υπολογίστηκαν μερικές από τις απόλυτες παραμέτρους του. Η μέση τιμή της ακτίνας του βρέθηκε ίση με 4.4 R_{Jup} και 6.4 R_{Jup} για τις περιπτώσεις Α και Β, αντίστοιχα. Όμως, η τιμή του χ^2 της περίπτωσης Β ήταν συστηματικά μεγαλύτερη από αυτήν της περίπτωσης Α για όλες τις καμπύλες φωτός, επομένως, η περίπτωση Α θεωρείται ως πιο ρεαλιστική. Η πιθανότητα το τρίτο σώμα να είναι πλανήτης τύπου Δία (Hot Jupiter) φαίνεται να περιορίζεται τόσο από τις τιμές των ακτίνων που υπολογίστηκαν όσο και από την υψηλή σχετικά (για πλανήτες) φωτομετρική συνεισφορά που βρέθηκε. Από την άλλη μεριά, το επικρατέστερο σενάριο για τη φύση του τρίτου μέλους φαίνεται να είναι ο φαιός νάνος (brown dwarf), αν και πάλι οι τυπικές τιμές ακτίνων τέτοιων αστέρων (~R_{Jup}) είναι μικρότερες από αυτή η οποία υπολογίστηκε.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν εδώ, αν και αποτελούν το πρώτο βήμα για την κατανόηση της φύσης του τρίτου μέλους του AV CMi, δεν μπορούν να καταλήξουν σε τελικά συμπεράσματα. Η απάντηση αναφορικά με το ποιος από τους αστέρες-μέλη έχει σε τροχιά γύρω του το τρίτο μέλος, αναμένεται να δοθεί από μελλοντικές παρατηρήσεις κατά τη διάρκεια φωτομετρικών ελαχίστων του εκλειπτικού συστήματος, για τα οποία ο χρόνος διάβασης θα ταυτίζεται σχεδόν με κάποιον από τους χρόνους ελαχίστων, κάτι όμως που δεν είναι εύκολο να συμβεί. Πάντως, με αυτόν τον τρόπο μπορούν να ελεγχθούν τα βάθη των ελαχίστων και να προκύψουν συμπεράσματα για τη τροχιά του τρίτου μέλους. Τέλος, αναμένεται ότι φασματοσκοπικές παρατηρήσεις για τον υπολογισμό των ακτινικών ταχυτήτων των μελών θα βοηθήσουν στην κατασκευή ενός ακριβέστερου μοντέλου περιγραφής για το εκλειπτικό σύστημα, οπότε θα μπορεί να γίνει και ακριβέστερη εκτίμηση για τις παραμέτρους του τρίτου σώματος.

5.3. Το σύστημα V405 Cep

Ιστορική αναδρομή

Η μεταβλητότητα του συστήματος ανακαλύφθηκε από τη διαστημική αποστολή "Hipparcos" (ESA 1997). Δεν υπήρχε διαθέσιμη καμπύλη φωτός του συστήματος, ενώ η μόνη πληροφορία στη βιβλιογραφία αφορά τον φασματικό του τύπο A2, ο οποίος δίνεται σε διάφορους καταλόγους (Wright et al. 2003, Kharchenko 2001). Το σύστημα είχε συμπεριληφθεί στη λίστα υποψηφίων συστημάτων με παλλόμενο συνοδό (Soydugan et al. 2006b).

Οι Liakos et al. (2012b) παρατήρησαν το σύστημα λόγω της υποψηφιότητάς του για αναπάλσεις τύπου δ Sct, αλλά λόγω απουσίας τέτοιας συμπεριφοράς, οι Liakos & Niarchos (2012b) πραγματοποίησαν παρατηρήσεις ώστε να καλυφθεί η καμπύλη φωτός και να εκτιμηθούν για πρώτη φορά οι απόλυτες παράμετροι των αστέρων-μελών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Πέντε νύκτες παρατηρήσεων τον Οκτώβριο του 2009 απαιτήθηκαν για την πλήρη κάλυψη των καμπυλών φωτός του συστήματος. Οι παρατηρήσεις έγιναν στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1) με τη χρήση του τηλεσκοπίου των 40 cm και της CCD ST-10XME. Στον πίνακα 5.10 δίνονται λεπτομέρειες που αφορούν τις παρατηρήσεις και την επεξεργασία των δεδομένων.

Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2455126.55405 + 1.37374^{\mathrm{d}}\ \mathrm{E} \tag{5.6}$$

και υπολογίστηκε από χρόνους ελαχίστων, οι οποίοι προέκυψαν από τα δεδομένα μας (Πίνακας B1) και τους πιο πρόσφατους της βιβλιογραφίας.

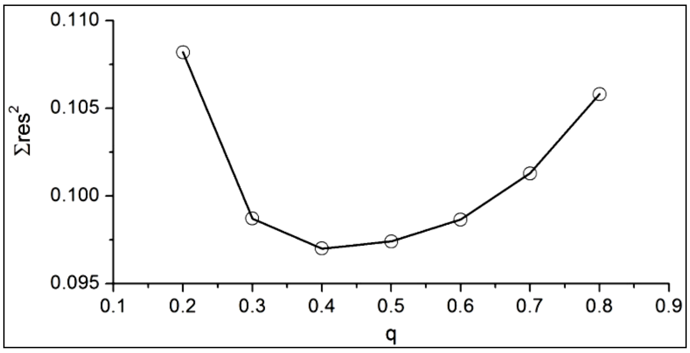
Πίνακας 5.20. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους (*N*=αριθμός σημείων, *s.d.*=σφάλμα).

Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για κάθε φίλτρο παρατήρησης							
V405 Cep	Μεταβλητός	8.75[a]	B		V		R		I	
TYC 4516-0540-1	Σύγκρισης	9.65[b]	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.
TYC 4516-1224-1	Ελέγχου	12.3[b]	937	2.4	933	2.4	929	2.3	934	3.9

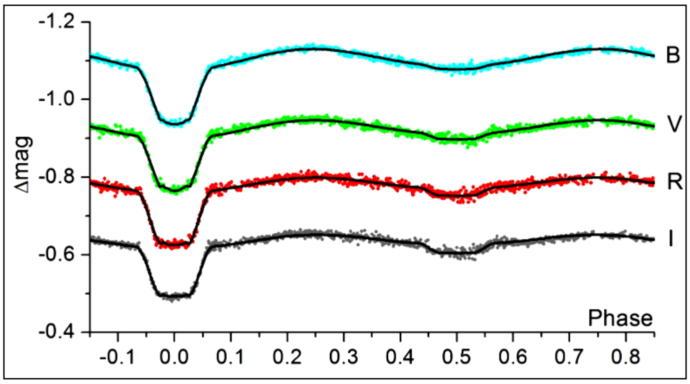
[a]Watson et al. (2006), [b]Høg et al. (2000)

Ανάλυση των καμπυλών φωτός

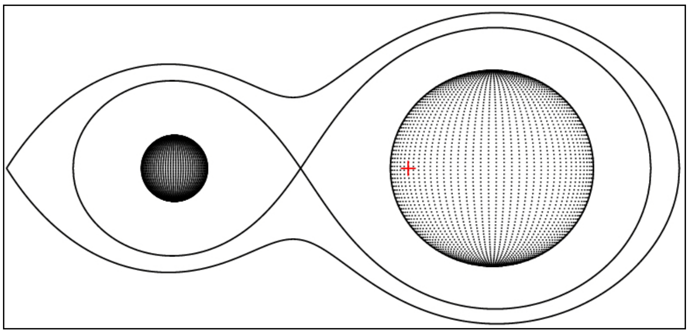
Η θερμοκρασία του πρωτεύοντα αστέρα τέθηκε ίση με 9000 K βάσει του φασματικού τύπου του συστήματος-A2. Λόγω ανυπαρξίας φασματοσκοπικά προσδιορισμένου λόγου μαζών των αστέρων του συστήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ανίχνευσης του q (βλ. §4.1) και το αντίστοιχο διάγραμμα παρουσιάζεται στην εικ. 5.13. Στην εικ. 5.14 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 5.15 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος, ενώ στον πίνακα 5.11 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος.



Εικόνα 5.13. Διάγραμμα ανίχνευσης του q για το σύστημα V405 Cep. Η τιμή του q που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή των $\sum res^2$ βρέθηκε ίση με 0.4.



Εικόνα 5.14. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες φωτός στα φίλτρα *B*, *V*, *R*, *I* του συστήματος V405 Cep.



Εικόνα 5.15. Η γεωμετρία Roche του συστήματος V405 Cep στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό.

Πίνακας 5.11. Παράμετροι (Παρ.) του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα V405 Cep.

Παρ.	Τιμή	Παρ.	Τιμή	Παρ.	Τιμή			
i [°]	83 (1)	A_1	1[a]	Φίλτρο:	B	V	R	I
q_{ph}	0.36 (2)	A_2	0.5[a]	x_1	0.540	0.456	0.379	0.298
T_1 [K]	9000[a,b]	g_1	1[a]	x_2	0.935	0.789	0.676	0.569
T_2 [K]	4513 (90)	g_2	0.32[a]	L_1/L_T	0.998 (1)	0.994 (3)	0.991 (1)	0.988 (1)
Ω_1	3.6 (1)			L_2/L_T	0.002 (1)	0.006 (1)	0.009 (1)	0.012 (1)
Ω_2	4.8 (2)			Σres^2	0.062			

[a]σταθερή τιμή, [b]υπόθεση

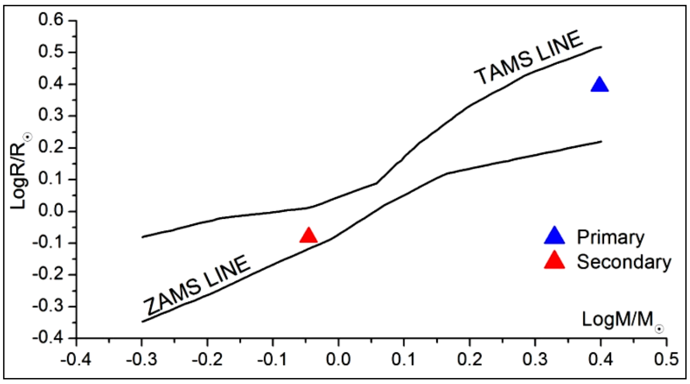
Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Η τιμή της μάζας M_1 του πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος υποτέθηκε από τον φασματικό του τύπο ως αστέρας της ΚΑ (βλ. Παρ. Ε) και δίνεται μαζί με τις τιμές των υπολοίπων παραμέτρων στον πίνακα 5.12. Η εικ. 5.16 δείχνει τις θέσεις των αστέρων στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.

Πίνακας 5.12. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος V405 Cep.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [$M_\odot$]	2.50[a]	0.90 (4)	log$g$ [cm/s^2]	4.0 (1)	4.6 (1)
R [$R_\odot$]	2.5 (1)	0.8 (1)	α [$R_\odot$]	2.1 (1)	5.9 (2)
L [$L_\odot$]	38 (3)	0.3 (1)	M_{bol} [mag]	0.8 (1)	6 (1)

[a]υπόθεση



Εικόνα 5.16. Θέσεις των αστέρων του συστήματος V405 Cep (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

Συμπεράσματα

Ο πρωτεύων αστέρας του συστήματος είναι σχεδόν στη μέση των ορίων ZAMS-TAMS, αλλά ελαφρώς πιο κοντά στην TAMS. Από την άλλη μεριά, ο δευτερεύων είναι μεν αστέρας της ΚΑ αλλά είναι πολύ κοντά στη ZAMS. Οι τιμές των μαζών και των εξελικτικών καταστάσεων συμφωνούν με τις θεωρίες της αστρικής εξέλιξης, αφού ο μεγαλύτερης μάζας αστέρας είναι πιο εξελιγμένος από τον αστέρα μικρότερης μάζας. Ωστόσο, πρέπει να παρατηρηθεί (εικ. 5.15) ότι ο πρωτεύων αστέρας είναι σχετικά κοντά στην πλήρωση του λοβού Roche, ενώ η ακτίνα του δευτερεύοντα είναι πολύ μικρότερη από την ακτίνα του δικού του λοβού Roche. Σύμφωνα με αυτό, το πιθανότερο σενάριο εξέλιξης είναι η περίπτωση Β (βλ. §1.2.4), βάσει του οποίου ο πρωτεύων αστέρας θα γεμίσει πρώτος τον λοβό του όταν ακόμα είναι στην ΚΑ και θα αρχίσει να μεταφέρει μάζα στον δευτερεύοντα.

Το σύστημα, λόγω της σχετικά πρόσφατης ανακάλυψής του, δεν έχει παρατηρηθεί αρκετά, κι έτσι δεν υπάρχουν αρκετοί χρόνοι ελαχίστων στη βιβλιογραφία ώστε να μπορεί να γίνει μελέτη για πιθανές μεταβολές της περιόδου του. Για την ακρίβεια, υπάρχουν μόνο τέσσερις χρόνοι ελαχίστου μεταξύ 1991-2009, δύο εκ των οποίων προέκυψαν από τις δικές μας παρατηρήσεις (πίνακας Β1).

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, το σύστημα ήταν υποψήφιο να περιέχει μέλος τύπου δ Sct, επομένως πραγματοποιήθηκε ανάλυση Fourier (§4.3) στα υπόλοιπα της αφαίρεσης των θεωρητικών από τις παρατηρούμενες καμπύλες φωτός. Από τα αποτελέσματα δεν προέκυψε η ύπαρξη κάποια συχνότητας μεταξύ 3-80 c/d και με S/N>4, επομένως, δεν υπάρχει κάποια υπόνοια ανάπαλσης.

Ο λόγος μαζών (q=0.36) του συστήματος είναι σχεδόν από τους πιο μικρούς για αποχωρισμένα συστήματα, σύμφωνα με το δείγμα πολύ καλά μελετημένων συστημάτων των İbanoğlu et al. (2006). Ωστόσο, το δείγμα περιέχει μόλις 74 συστήματα, επομένως είναι λογικό να βρίσκονται συνεχώς συστήματα που να αποκλίνουν από την κατανομή. Επιπροσθέτως, πρέπει να τονιστεί, ότι η καμπύλη φωτός περιέχει ολικές εκλείψεις (εικ. 5.14-*I* φίλτρο) και σύμφωνα με τους Terrell & Wilson (2005) ο προσδιορισμός του λόγου μαζών μπορεί να θεωρηθεί αρκετά αξιόπιστος.

5.4. Το σύστημα AL Gem

Ιστορική αναδρομή

Η μεταβολή της λαμπρότητας του συστήματος πρωτοαναφέρθηκε από τους Guthnick & Prager (1928) και η πρώτη φωτοηλεκτρική καμπύλη φωτός παρατηρήθηκε από τον Koch (1963). Ο φασματικός τύπος του υπολογίστηκε μεταξύ F4-F6 από τους Hill et al. (1975), ενώ οι Hilditch & Hill (1975) υπολόγισαν τους δείκτες χρώματός του. Οι Cester et al. (1979), οι Hall & Neff (1979), οι Brancewicz & Dworak (1980) και οι Svechnikov & Kuznetsova (1990) υπολόγισαν τις απόλυτες παραμέτρους των αστέρων-μελών. Ο Popper (1996) επαναπροσδιόρισε τον φασματικό τύπο του συστήματος ως F5, ενώ οι Budding et al. (2004) αναφέρουν ότι ο πρωτεύων αστέρας είναι φασματικού τύπου F5 και ο δευτερεύων K7. CCD παρατηρήσεις του συστήματος πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο του προγράμματος "ASAS" (Pojmanski et al. 2005), αλλά δεν καλύπτουν ολόκληρη την καμπύλη φωτός. Το σύστημα είναι υποψήφιο να περιέχει και τρίτο μέλος (Hoffman et al. 2006), αλλά έως τώρα δεν έχει αποδειχτεί ή απορριφθεί αυτό το σενάριο.

Οι Liakos et al. (2011a) διεξήγαγαν συστηματικές παρατηρήσεις για το σύστημα, από τις οποίες προέκυψαν πλήρεις καμπύλες φωτός, υπολόγισαν τις απόλυτες παραμέτρους των μελών του και ερμήνευσαν τις μεταβολές τις τροχιακής περιόδου του μέσω της ανάλυσης του O−C διαγράμματός του. Τα αποτελέσματα δίνονται στις επόμενες παραγράφους.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι παρατηρήσεις για την κάλυψη των καμπυλών φωτός διήρκεσαν 14 νύκτες στο χρονικό διάστημα από 31/1 έως 3/4 του 2010, ενώ κατά τα έτη 2008 και 2009 είχαν και πάλι πραγματοποιηθεί παρατηρήσεις, οι οποίες αφορούσαν όμως στην κάλυψη μόνο των φωτομετρικών ελαχίστων. Όλες οι παρατηρήσεις έλαβαν χώρα στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1) με τη χρήση του τηλεσκοπίου των 40 cm και των CCD ST-8XMEI (2008-2009) και ST-10XME (2010). Στον πίνακα 5.13 δίνονται λεπτομέρειες που αφορούν τις παρατηρήσεις και την επεξεργασία των δεδομένων για το έτος 2010. Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2455246.26932 + 1.39135^{\mathrm{d}}\ \mathrm{E} \tag{5.7}$$

και υπολογίστηκε από χρόνους ελαχίστων, οι οποίοι προέκυψαν από τα δεδομένα μας (Πίνακας Β1).

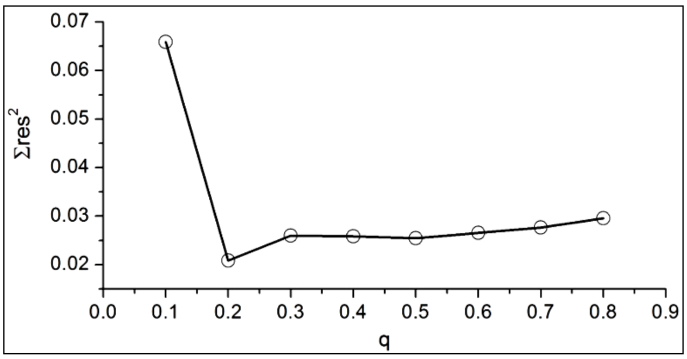
Πίνακας 5.33. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους (*N*=αριθμός σημείων, *s.d.*=σφάλμα).

Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για κάθε φίλτρο παρατήρησης							
AL Gem	Μεταβλητός	9.8[a]	B		V		R		I	
TYC 1356-1240-1	Σύγκρισης	9.72[b]	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.
TYC 1356-0980-1	Ελέγχου	10.81[b]	734	2.4	734	4.0	724	3.8	738	3.1

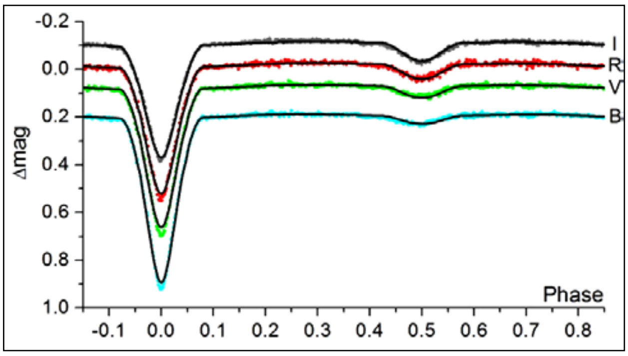
[a]Watson et al. (2006), [b]Høg et al. (2000)

Ανάλυση των καμπυλών φωτός

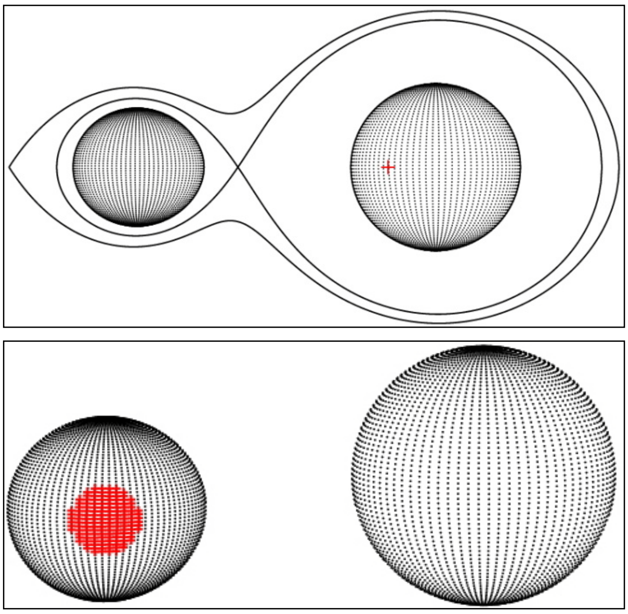
Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, ο φασματικός τύπος του συστήματος είναι F5V, επομένως η θερμοκρασία του πρωτεύοντα αστέρα τέθηκε ίση με 6650 K. Λόγω ανυπαρξίας φασματοσκοπικά προσδιορισμένου λόγου μαζών των αστέρων του συστήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ανίχνευσης του *q* (βλ. §4.1) και το αντίστοιχο διάγραμμα παρουσιάζεται στην εικ. 5.17. Εδώ πρέπει να τονιστεί, ότι επίλυση των καμπυλών φωτός επιτυγχάνεται και στον “mode” 5 (§4.1) με λίγο μικρότερη τιμή του *q*. Όμως, η λύση στον “mode” 2 παρήγαγε ελαφρώς μικρότερη τιμή των $\sum \mathrm{res}^2$, και ως εκ τούτου επιλέχθηκε ως τελικό μοντέλο περιγραφής, το οποίο, όπως θα φανεί παρακάτω, συμφωνεί και με τα αποτελέσματα της O−C ανάλυσης. Επιπλέον, λόγω ασυμμετρίας των μεγίστων της καμπύλης φωτός (O’ Connell effect), και σύμφωνα με τους φασματικούς τύπους των αστέρων-μελών, βάσει των οποίων συμπεραίνεται ότι οι αστέρες έχουν ζώνη μεταφοράς και άρα δύνανται να έχουν μαγνητική δραστηριότητα, οι παράμετροι μιας κηλίδας στον ψυχρότερο αστέρα αφέθηκαν ελεύθερες προς σύγκλιση. Λόγω πιθανής ύπαρξης τρίτου μέλους στο σύστημα, το οποίο προκαλεί μεταβολές στην τροχιακή περίοδό του, η παράμετρος l_3 αφέθηκε και αυτή ελεύθερη. Στην εικ. 5.18 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 5.19 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος, ενώ στον πίνακα 5.14 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος.



Εικόνα 5.17. Διάγραμμα ανίχνευσης του *q* για το σύστημα AL Gem. Η τιμή του *q* που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή των $\sum \mathrm{res}^2$ βρέθηκε ίση με 0.2.



Εικόνα 5.18. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες φωτός στα φίλτρα *B*, *V*, *R*, *I* του συστήματος AL Gem.



Εικόνα 5.19. Η γεωμετρία Roche του συστήματος AL Gem στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό (επάνω) και στη φάση 0.80 (κάτω), όπου διακρίνεται η ψυχρή κηλίδα στην επιφάνεια του δευτερεύοντος αστέρα.

Πίνακας 5.44. Παράμετροι του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα AL Gem.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή			
i [°]	83.0 (1)	Φίλτρο:	B	V	R	I
q_{ph}	0.189 (1)	x_1	0.633	0.516	0.438	0.362
T_1 [K]	$6650^{a,b}$	x_2	0.968	0.828	0.737	0.604
T_2 [K]	4080 (10)	L_1/L_T	0.952 (2)	0.850 (2)	0.798 (2)	0.728 (2)
Ω_1	3.77 (1)	L_2/L_T	0.023 (1)	0.036 (1)	0.049 (1)	0.064 (1)
Ω_2	2.35 (3)	L_3/L_T	0.025 (1)	0.113 (2)	0.153 (1)	0.208 (1)
A_1	0.5^a	$<L_3/L_T>$ (%)	12.5 (1)			
A_2	0.5^a		Κηλίδες			
g_1	0.32^a	Co-lat [°]	90 (2)			
g_2	0.32^a	Co-long [°]	234 (6)			
		R [°]	21 (1)			
Σres^2	0.085	T_f (T_{sp}/T_{sur})	0.89 (5)			

[a]σταθερή τιμή, [b]υπόθεση

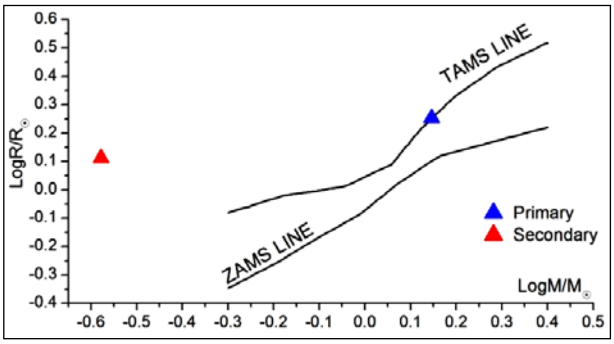
Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Η τιμή της μάζας M_1 του πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος υποτέθηκε από τον φασματικό του τύπο ως αστέρας της ΚΑ (βλ. Παρ. Ε) και δίνεται μαζί με τις τιμές των υπολοίπων παραμέτρων στον πίνακα 5.15. Η εικ. 5.20 δείχνει τις θέσεις των αστέρων στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.

Πίνακας 5.15. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος AL Gem.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [$M_\odot$]	1.4[a]	0.26 (1)	log$g$ [cm/s^2]	4.08 (2)	3.64 (2)
R [$R_\odot$]	1.79 (4)	1.29 (3)	α [$R_\odot$]	1.0 (1)	5.35 (4)
L [$L_\odot$]	5.6 (3)	0.42 (3)	M_{bol} [mag]	2.9 (5)	5.7 (3)

[a]υπόθεση



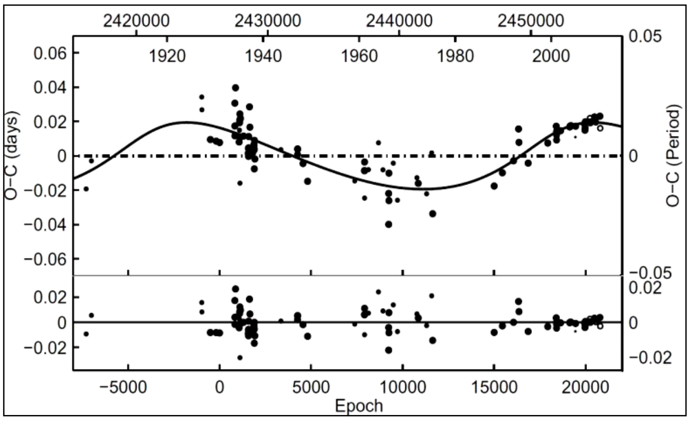
Εικόνα 5.20. Θέσεις των αστέρων του συστήματος AL Gem (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

Ανάλυση των μεταβολών της τροχιακής περιόδου

Το O−C διαγράμματος του συστήματος βασίστηκε σε 94 χρόνους ελαχίστων, 48 εκ των οποίων προέκυψαν από οπτικές, 18 από φωτογραφικές, 3 από φωτοηλεκτρικές και 25 από CCD παρατηρήσεις καλύπτουν μια χρονική περίοδο ~100 έτη. Ως αρχική παράμετρος χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω αστρονομική εφημερίδα (Kreiner et al. 2001):

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2426324.4424 + 1.3913400^{\mathrm{d}}\mathrm{E} \tag{5.8}$$

Λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων, θεωρητικά μπορεί τόσο ο μηχανισμός Applegate (1992) (βλ. §4.2.4) όσο και το LITE (βλ. §4.2.1) να περιγράψουν τις μεταβολές της τροχιακής περιόδου. Επομένως, μια περιοδική συνάρτηση LITE προσαρμόστηκε στα O−C σημεία (εικ. 5.21) και τα αποτελέσματα και για τους δύο μηχανισμούς δίνονται στον πίνακα 5.16.



Εικόνα 5.21. Προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης του LITE στα O−C σημεία του συστήματος Al Gem (επάνω) και τα υπόλοιπα (residuals) μετά την αφαίρεση της θεωρητικής καμπύλης (κάτω).

Πίνακας 5.16. Παράμετροι της O−C ανάλυσης του συστήματος AL Gem.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή
Εκλειπτικό σύστημα			$3^{ο}$ σώμα	
JD_0 [HJD−2400000]	26324.432 (4)		P_3 [yr]	85 (6)
P [d]	1.3913414 (3)		e_3	0.3 (2)
Μεταβολή της τετραπολικής ροπής			ω_3 [°]	35 (37)
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	$f(m_3)$ [$M_\odot$]	0.006 (1)
ΔQ [$\times 10^{50}$ g cm^2]	2.32	0.43	$M_{3,min}$ [$M_\odot$]	0.28 (2)
LITE				
T_0 [HJD−2400000]	51427 (2521)			
A [d]	0.019 (2)		Σres^2	0.060

Συμπεράσματα

Ο πρωτεύων αστέρας του συστήματος είναι αστέρας της ΚΑ (εικ. 5.20), αλλά έχει φτάσει πολύ κοντά στη TAMS, ενώ η ακτίνα είναι ακόμα αρκετά μικρότερη από την ακτίνα του λοβού Roche του. Αντίθετα, ο δευτερεύων αστέρας είναι πιο εξελιγμένος και βρίσκεται στο στάδιο των υπογιγάντων και έχει σχεδόν γεμίσει τον λοβό Roche του. Όμως, σύμφωνα με τα παραπάνω, βλέπουμε ότι ο αστέρας μικρότερης μάζας είναι πιο εξελιγμένος από αυτόν με τη μεγαλύτερη μάζα. Συμπεραίνεται λοιπόν, ότι στο παρελθόν υπήρχε ροή μάζας από τον δευτερεύοντα προς τον πρωτεύοντα. Βέβαια, δεν μπορεί να υπολογιστεί ακριβώς πότε άρχισε και σταμάτησε η μεταφορά, αλλά φαίνεται ότι ο δευτερεύων έχει ήδη χάσει μεγάλο μέρος της μάζας του, ενώ ο πρωτεύων έχει αρχίσει να περνά από την ΚΑ στο επόμενο στάδιο εξέλιξης. Επομένως, με την εξαίρεση ότι αυτή τη στιγμή δεν πρέπει να υπάρχει μεταφορά μάζας, το σύστημα είναι κλασσικός Algol[1]. Η παύση της μεταφοράς μάζας υποστηρίζεται και από την απουσία παραβολικής συμπεριφοράς των O−C σημείων (βλ. §4.2.2).

Ωστόσο, από την O−C ανάλυση προέκυψε η περιοδική μεταβολή της περιόδου με περίοδο ~85 yr. Από την άλλη πλευρά, η ανάλυση των καμπυλών φωτός ανέδειξε τη πιθανή φωτομετρική συμμετοχή ενός τρίτου μέλους $L_{3,LC}$ κατά ~12.5% (σχέση 4.70) στη συνολική φωτεινότητα του συστήματος. Το τρίτο σώμα, σύμφωνα με την ελάχιστη μάζα του $M_{3,min}$ που υπολογίστηκε (~0.28 $M_\odot$), εάν είναι αστέρας της ΚΑ, θα έπρεπε να συνεισφέρει κατά (σχέση 4.71) $L_{3,O\text{-}C}$~0.19%, τιμή η οποία είναι κατά πολύ μικρότερη από την παρατηρούμενη. Αυτή η διαφορά μπορεί να εξηγηθεί υποθέτοντας ότι το τρίτο μέλος είτε δεν είναι αστέρας της ΚΑ, αλλά πιο εξελιγμένος (π.χ. γίγαντας) είτε ότι είναι μεν στην ΚΑ αλλά η τροχιακή του κλίση είναι μικρότερη από 90°, επομένως έχει τελικά μεγαλύτερη μάζα. Φυσικά, η πραγματικότητα μπορεί να είναι συνδυασμός των παραπάνω υποθέσεων. Το κριτήριο της δυναμικής ευστάθειας (Harrington 1977) ενός τέτοιου πολλαπλού συστήματος ικανοποιείται τόσο για ομοιόθετη όσο και για αντίθετη τροχιακή κίνηση του τρίτου μέλους.

Εναλλακτικά, από τις τιμές των μεταβολών της τετραπολικής ροπής όπου υπολογίστηκαν (πίνακας 5.16), φαίνεται ότι μόνο ο πρωτεύων αστέρας δύναται να προκαλέσει περιοδικές μεταβολές της περιόδου, καθώς μόνο για αυτόν ικανοποιείται το κριτήριο των Lanza & Rodonò (2002) (βλ. §4.2.4).

[1]Εδώ ο όρος αναφέρεται στην εξελικτική κατάσταση του συστήματος και όχι στη μορφή της καμπύλης φωτός, παρ' όλο που η μορφή της είναι αυτού του τύπου.

Φασματοσκοπικές παρατηρήσεις θα συνεισφέρουν στον εντοπισμό ή μη του τρίτου μέλους και αναμένεται ότι θα ξεκαθαρίσουν το ζήτημα. Επιπροσθέτως, ακτινικές ταχύτητες των μελών θα βοηθήσουν στην κατηγοριοποίηση του συστήματος βάσει της γεωμετρίας Roche, καθώς βρέθηκε ότι ικανοποιητική φωτομετρική λύση μπορεί να επιτευχθεί και στην περίπτωση όπου το σύστημα είναι ημιαποχωρισμένο. Επιπλέον, συγκρίνοντας τις τιμές των αστέρων-μελών του εκλειπτικού συστήματος με αυτές των καλά μελετημένων συστημάτων (αποχωρισμένων και ημιαποχωρισμένων) των İbanoğlu et al. (2006) φαίνεται να «ταιριάζουν» περισσότερο με αυτές των ημιαποχωρισμένων. Παρ' όλα αυτά, όπως και στην περίπτωση του V405 Cep, οι αποκλίσεις δεν μπορούν να αποκλειστούν λόγω του μικρού δείγματος συστημάτων που περιέχεται στην προαναφερόμενη μελέτη.

5.5. Το σύστημα GSC 4589-2999

Ιστορική αναδρομή

Δεν υπάρχει βιβλιογραφική αναφορά για τη μεταβλητότητα του συστήματος, παρά μόνο η ανακάλυψή του από τους Liakos & Niarchos (2007) στο πεδίο του μεταβλητού αστέρα EG Cep. Εν συνεχεία, οι Liakos et al. (2011b) διεξήγαγαν τόσο συστηματικές φωτομετρικές παρατηρήσεις, ώστε να καλυφθεί ολόκληρη η καμπύλη φωτός, όσο και φασματοσκοπικές, από τις οποίες προέκυψαν οι φασματικοί τύποι και οι ακτινικές ταχύτητες των αστέρων-μελών του συστήματος.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι φωτομετρικές παρατηρήσεις για την κάλυψη των καμπυλών φωτός διήρκεσαν 44 νύκτες μεταξύ Ιουνίου-Οκτωβρίου 2007 και 12 νύκτες μεταξύ Ιουνίου-Ιουλίου 2008 και έγιναν στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1) με τη χρήση του τηλεσκοπίου των 40 cm και της CCD ST-8XMEI. Στον πίνακα 5.17 δίνονται λεπτομέρειες που αφορούν τις φωτομετρικές παρατηρήσεις και την επεξεργασία των δεδομένων για το έτος 2009, βάσει των οποίων κατασκευάστηκε το φωτομετρικό μοντέλο του συστήματος. Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2454642.4992 + 1.688653^{\mathrm{d}}\ \mathrm{E} \tag{5.9}$$

και υπολογίστηκε από χρόνους ελαχίστων, οι οποίοι προέκυψαν από τα δεδομένα μας (Πίνακας B1).

Πίνακας 5.57. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους (*N*=αριθμός σημείων, *s.d.*=σφάλμα).

Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για κάθε φίλτρο παρατήρησης							
GSC 4589-2999	Μεταβλητός	10.61[a]	B		V		R		I	
GSC 4589-2984	Σύγκρισης	10.93[a]	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.
GSC 4589-2842	Ελέγχου	11.6[a]	619	5.5	591	5.9	611	5.9	599	5.8

[a]Høg et al. (2000)

Οι φασματοσκοπικές παρατηρήσεις έλαβαν χώρα στο Αστεροσκοπείο του Σκίνακα (βλ. §2.3.3) τον Σεπτέμβριο 2007, τον Σεπτέμβριο 2008 και τον Μάιο 2009. Για τη φασματική ταξινόμηση (2007 και 2008) χρησιμοποιήθηκε φασματογράφος χαμηλής ανάλυσης με φράγμα περίθλασης 1302 lines/mm, το οποίο προσέδιδε κλίμακα 1.04 Å/pixel, ενώ επιλέγονταν φασματικό εύρος τέτοιο ώστε να περιλαμβάνονται οι γραμμές Balmer $H_α$ και $H_β$. Για τη μέτρηση των ακτινικών ταχυτήτων (2009) χρησιμοποιήθηκε φράγμα περίθλασης με 2400 lines/mm, το οποίο προσέδιδε κλίμακα 0.55 Å/pixel και το εύρος επιλέχθηκε έτσι ώστε να περικλείεται η τριπλέτα του MgI και άλλες μεταλλικές γραμμές. Στον πίνακα 5.18 δίνονται αναλυτικά οι ημερομηνίες των παρατηρήσεων, ο χρόνος λήψης του φάσματος UT, η γεωμετρική φάση *Φ* του συστήματος εκείνη τη χρονική στιγμή, ο χρόνος έκθεσης *E.T.* που χρησιμοποιήθηκε και το φασματικό εύρος.

Πίνακας 5.68. Λεπτομέρειες που αφορούν τις φασματοσκοπικές παρατηρήσεις του συστήματος GSC 4589-2999.

Ημερομηνία [ΗΗ/Μ/ΕΕΕΕ]	UT	Φ	E.T. [sec]	Εύρος [Å]
29-9-2007	17:36	0.544	300	4728–6828
29-9-2007	17:42	0.547	300	4728–6828
29-9-2007	19:28	0.590	300	4728–6828
29-9-2007	19:35	0.593	300	4728–6828
03-9-2008	01:44	0.497	600	4713–6792
12-5-2009	23:54	0.688	1800	4535–5621
13-5-2009	21:19	0.216	1800	4535–5621
14-5-2009	20:09	0.780	1800	4535–5621
14-5-2009	20:49	0.795	1800	4535–5621

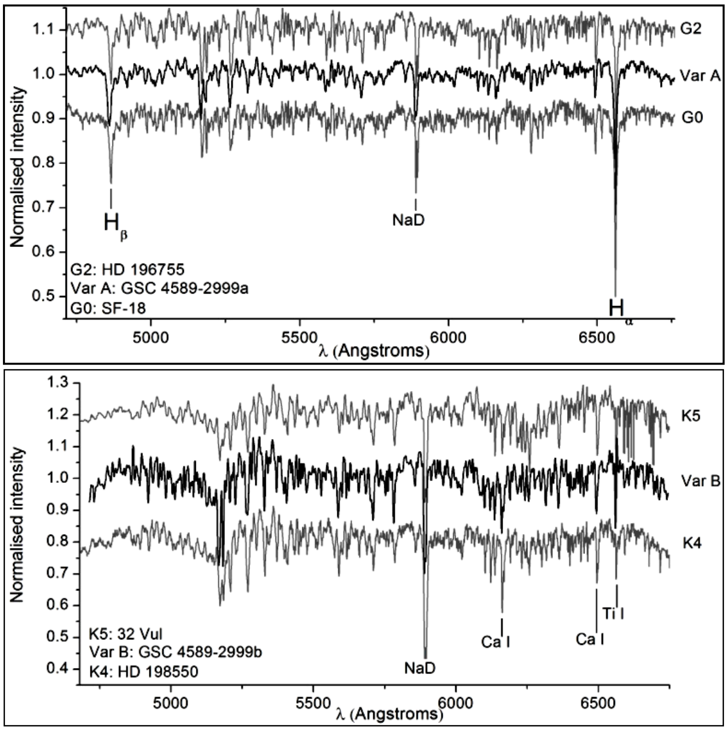
Ανάλυση φασματοσκοπικών δεδομένων

Οι φασματοσκοπικές παρατηρήσεις του 2007 έγιναν στον ανερχόμενο κλάδο του δευτερεύοντος ελαχίστου, επομένως απεικονίζουν το σύνθετο φάσμα του συστήματος. Όμως, οι παρατηρήσεις του 2008 έλαβαν χώρα εντός της δευτερεύουσας έκλειψης του συστήματος, η οποία όπως φαίνεται και στην εικ. 5.23 είναι ολική, άρα το φάσμα αυτό αντιπροσωπεύει πρακτικά μόνο τον θερμότερο συνοδό του συστήματος. Για να «αποκαλυφθεί» και το φάσμα του ψυχρότερου συνοδού, αφαιρέθηκαν τα δύο προηγούμενα, αφού προηγουμένως είχαν κανονικοποιηθεί στη μονάδα.

Για τη φασματική ταξινόμηση των αστέρων μελών χρησιμοποιήθηκαν τα φάσματα των ετών 2007-2008, όπως περιγράφηκε προηγουμένως, και τα φάσματα από 44 πρότυπους αστέρες διαφόρων φασματικών τύπων στο εύρος O8-M6 που είχαν παρατηρηθεί ακριβώς με την ίδια διάταξη είτε κατά τη διάρκεια των παρατηρήσεων του συστήματος είτε από τους Hatzidimitriou et al. (2006). Η επεξεργασία των δεδομένων έγινε με το λογισμικό *IRAF*[1] 2.13-Beta 2 (2006) βάσει της υπορουτίνας "apextract". Η φασματική ταξινόμηση έγινε σε δύο βήματα: α) Σύγκριση των φασμάτων των αστέρων του συστήματος με τα φάσματα των 44 προτύπων αστέρων με τη μέθοδο που περιγράφεται από τους Hatzidimitriou et al. (2006) βάσει της οποίας επιτυγχάνεται ακρίβεια 0.3-0.4 του φασματικού τύπου (Bonfini et al. 2009), και β) σύγκριση μεταξύ των γραμμών

[1]http://iraf.noao.edu/

απορρόφησης των φασμάτων των αστέρων του συστήματος και των πρότυπων αστέρων κοντινού φασματικού τύπου με αυτό που βρέθηκε στο βήμα (α). Στην εικ. 5.22 δίνονται τα φάσματα των αστέρων-μελών του συστήματος σε σύγκριση με φάσματα προτύπων αστέρων. Τέλος, σύμφωνα με τη μέθοδο που περιγράφηκε εκτιμάται ότι ο πρωτεύων αστέρας του συστήματος είναι φασματικού τύπου G1.5±0.5V και ο δευτερεύων K4±1V.



Εικόνα 5.22. Φάσματα των αστέρων μελών του συστήματος GSC 4589-2999 (μαύρες γραμμές) και προτύπων αστέρων (γκρίζες γραμμές). Το επάνω διάγραμμα αφορά τον πρωτεύοντα (Var A) και το κάτω τον δευτερεύοντα αστέρα του εκλειπτικού συστήματος (Var B). Επίσης, έχουν σημειωθεί τα ονόματα των πρότυπων αστέρων με φασματικούς τύπους παραπλήσιους αυτών των αστέρων-μελών του συστήματος, καθώς και χαρακτηριστικές φασματικές γραμμές.

Οι ακτινικές ταχύτητες των αστέρων-μελών του συστήματος υπολογίστηκαν με τη μέθοδο που περιγράφεται στην παράγραφο 3.2.3 και δίνονται στον πίνακα Γ1. Ως πρότυποι αστέρες στη μέθοδο BF χρησιμοποιήθηκαν οι HIP 40497, HIP 61317 και HIP 65721, οι οποίοι είναι φασματικών τύπων F7, G0, και G5, αντίστοιχα. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα μέρη των φασμάτων που περιείχαν οξείες μεταλλικές φασματικές γραμμές απορρόφησης, και συγκεκριμένα το εύρος 4865-5355 Å. Οι ακτινικές ταχύτητες αναλύθηκαν μαζί με τις καμπύλες φωτός και το διάγραμμά τους δίνεται στην επόμενη παράγραφο.

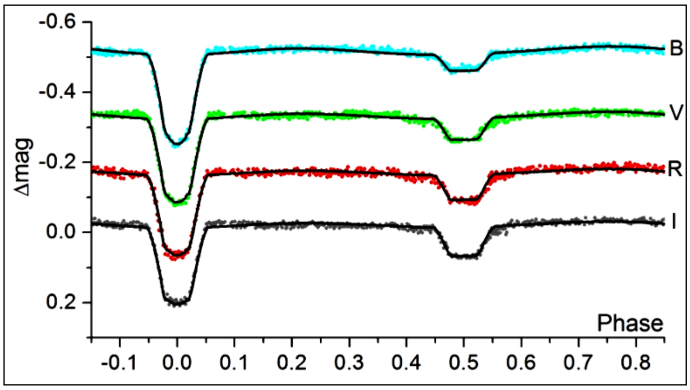
Ανάλυση των καμπυλών φωτός και των καμπυλών ακτινικών ταχυτήτων

Σύμφωνα με τη φασματική ταξινόμηση των αστέρων-μελών του συστήματος, η θερμοκρασία του πρωτεύοντα T_1 τέθηκε ίση με 5830 K, ενώ αρχικά του δευτερεύοντα ίση με T_2=4550 K. Όμως, κατά τη διάρκεια της επίλυσης η T_2 αφέθηκε ελεύθερη προς σύγκλιση, αλλά με τιμή πάντα εντός των ορίων του φασματοσκοπικού σφάλματος, εν προκειμένω ±140 K. Βέβαια, θα μπορούσε να αφεθεί ελεύθερη η T_1, αντί της T_2, αλλά λόγω του μικρότερου σφάλματός της (±40 K) θεωρήθηκε πιο ακριβής. Οι καμπύλες των ακτινικών ταχυτήτων συμπεριλήφθησαν στην ανάλυση και επιλύθηκαν ταυτόχρονα με τις καμπύλες φωτός. Επιπλέον, λόγω εμφάνισης ασυμμετριών πριν και μετά τους επικλινείς κλάδους του δευτερεύοντος ελαχίστου, και βάσει των φασματικών τύπων των αστέρων, οι οποίοι δύνανται να έχουν μαγνητική δραστηριότητα, οι παράμετροι μιας κηλίδας στον ψυχρότερο αστέρα αφέθηκαν ελεύθερες προς σύγκλιση. Εδώ πρέπει να σημειωθεί, ότι η επιλογή του αστέρα, στον οποίο τοποθετείται η κηλίδα, είναι αυθαίρετη και ελαφρώς πιθανολογική, καθώς απλά επιλέχθηκε ο ψυχρότερος αστέρας. Θα μπορούσε να προκύψει παρόμοια λύση, όσο αναφορά τις απόλυτες και τις γεωμετρικές παραμέτρους των αστέρων (βλ. παρακάτω), ακόμα κι εάν η κηλίδα εθεωρείτο ότι βρίσκεται στην επιφάνεια του πρωτεύοντα. Στην εικ. 5.23 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 5.24 οι προσαρμογές ημιτονικών καμπυλών επάνω στις καμπύλες ακτινικών ταχυτήτων, στην εικ. 5.25 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος, ενώ στον πίνακα 5.19 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος.

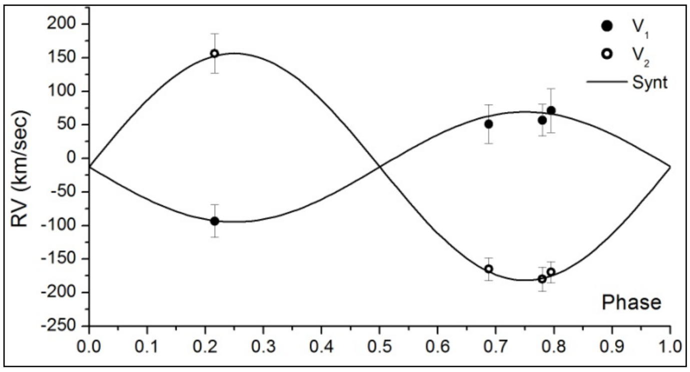
Πίνακας 5.79. Παράμετροι του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα GSC 4589-2999.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή			
i [°]	86.3 (2)	Φίλτρο:	B	V	R	I
q_{sp}	0.46 (3)	x_1	0.731	0.597	0.514	0.434
T_1 [K]	5830[a] (40)	x_2	0.898	0.758	0.658	0.549
T_2 [K]	4616 (116)	L_1/L_T	0.961 (1)	0.949 (1)	0.940 (1)	0.929 (1)
Ω_1	4.59 (1)	L_2/L_T	0.039 (1)	0.051 (1)	0.060 (1)	0.071 (1)
Ω_2	5.75 (2)					
A_1=A_2	0.5[a]	Κηλίδες				
g_1=g_2	0.32[a]	Co-lat [°]	86 (6)			
K_1 [km/sec]	78 (3)	Co-long [°]	44 (2)			
K_2 [km/sec]	169 (1)	R [°]	20 (6)			
γ [km/sec]	-13 (3)	T_f (T_{sp}/T_{sur})	0.6 (2)			
α [$R_\odot$]	8.3 (3)	Σres^2	0.003			

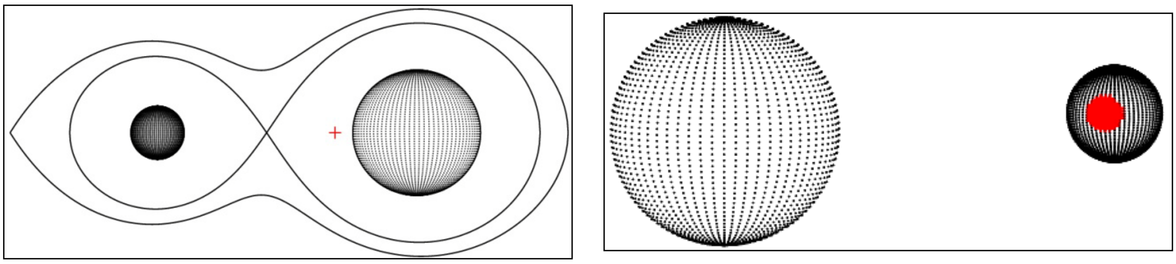
[a]σταθερή τιμή



Εικόνα 5.23. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες φωτός στα φίλτρα *B*, *V*, *R*, *I* του συστήματος GSC 4589-2999. Η δευτερεύουσα έκλειψη είναι ολική, ενώ οι ασυμμετρίες πριν και μετά από αυτήν είναι πιο ευδιάκριτες στα φίλτρα *R* και *I*.



Εικόνα 5.24. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες ακτινικών ταχυτήτων του συστήματος GSC 4589-2999. Οι «γεμάτοι» κύκλοι αναφέρονται στον πρωτεύοντα και οι «άδειοι» στον δευτερεύοντα αστέρα του συστήματος.



Εικόνα 5.25. Η γεωμετρία Roche του συστήματος GSC 4589-2999 στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό (αριστερά) και στη φάση 0.34 (δεξιά), όπου διακρίνεται η κηλίδα στην επιφάνεια του δευτερεύοντα αστέρα.

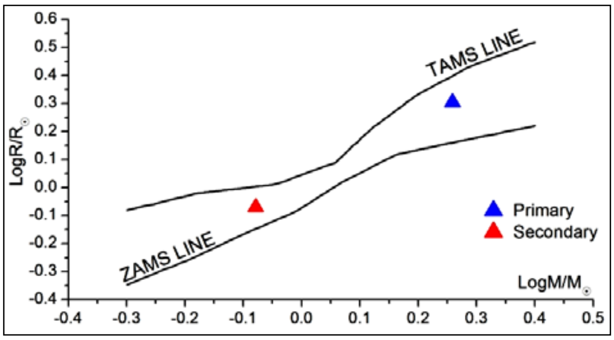
Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Στον πίνακα 5.20 δίνονται οι απόλυτες παράμετροι των αστέρων-μελών και η εικ. 5.26 δείχνει τη θέση των αστέρων στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.

Πίνακας 5.20. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος GSC 4589-2999.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [$M_\odot$]	1.8 (1)	0.8 (1)	log$g$ [cm/s^2]	4.1 (1)	4.5 (1)
R [$R_\odot$]	2.02 (4)	0.85 (2)	α [$R_\odot$]	2.6 (1)	5.7 (1)
L [$L_\odot$]	4.2 (2)	0.3 (1)	M_{bol} [mag]	3.2 (3)	6.1 (8)

[a]υπόθεση



Εικόνα 5.26. Θέσεις των αστέρων του συστήματος GSC 4589-2999 (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

Συμπεράσματα

Το σύστημα GSC 4589-2999 αποτελείται από αστέρες της ΚΑ, με τον πρωτεύοντα να βρίσκεται κοντά στη γραμμή TAMS, του οποίου οι απόλυτες παράμετροι (M, R) δεν συμφωνούν με τη θερμοκρασία του (~5800 K) για ηλιακού τύπου αστέρα. Εφόσον, ο αστέρας μεγαλύτερης μάζας είναι πιο εξελιγμένος από τον αστέρα μικρότερης μάζας, κάτι που έρχεται σε συμφωνία με τις γνώσεις μας για την αστρική εξέλιξη, συμπεραίνεται ότι δεν πρέπει έως τώρα να έχει γίνει μεταφορά μάζας μεταξύ των μελών. Όμως, αναμένεται ότι ο πρωτεύων αστέρας θα γεμίσει πρώτος τον λοβό του, και το σύστημα θα εξελιχθεί σύμφωνα με την περίπτωση Β ή Γ (§1.2.4).

Είναι προφανές ότι λόγω της πρόσφατης ανακάλυψης του συστήματος δεν υπάρχουν διαθέσιμοι χρόνοι ελαχίστων ώστε να μπορεί να γίνει μελέτη της τροχιακής περιόδου του. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχει πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των τιμών θερμοκρασίας του δευτερεύοντα αστέρα (μέσα στα όρια των σφαλμάτων), οι οποίες προέκυψαν από τη φασματική ταξινόμηση (K4→T_2~4550 K) και από το μοντέλο περιγραφής (T_2~4615 K).

5.6. Το σύστημα V948 Her

Ιστορική αναδρομή

Το σύστημα ανακαλύφθηκε από τη διαστημική αποστολή "Hipparcos" (ESA 1997). Η μόνη διαθέσιμη πληροφορία από τη βιβλιογραφία αφορά στον φασματικό του τύπο F2 (Wright et al. 2003, Budding et al. 2004). Επίσης, ήταν υποψήφιο να περιέχει μέλος τύπου δ Sct (Soydugan et al. 2006b).

Οι Liakos et al. (2012b) παρατήρησαν το σύστημα λόγω της υποψηφιότητας του για αναπάλσεις, αλλά λόγω έλλειψης τέτοιας συμπεριφοράς, οι Liakos & Niarchos (2012b) πραγματοποίησαν παρατηρήσεις ώστε να καλυφθεί η καμπύλη φωτός και να εκτιμηθούν για πρώτη φορά οι απόλυτες παράμετροι των αστέρων-μελών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι παρατηρήσεις διήρκεσαν 8 νύκτες στο χρονικό διάστημα Ιούνιος-Ιούλιος 2010 και έγιναν στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1) με τη χρήση του τηλεσκοπίου των 40 cm και της CCD ST-10XME. Στον πίνακα 5.21 δίνονται λεπτομέρειες που αφορούν τις παρατηρήσεις και την επεξεργασία των δεδομένων. Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2454943.4551 + 1.27521^{\mathrm{d}}\ \mathrm{E} \qquad (5.10)$$

και υπολογίστηκε από χρόνους ελαχίστων, οι οποίοι προέκυψαν από τα δεδομένα μας (Πίνακας Β1) και τους πιο πρόσφατους της βιβλιογραφίας.

Πίνακας 5.21. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους (*N*=αριθμός σημείων, *s.d.*=σφάλμα).

Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για κάθε φίλτρο παρατήρησης							
V948 Her	Μεταβλητός	9.02[a]	B		V		R		I	
TYC 2086-0950-1	Σύγκρισης	10.18[b]	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.
TYC 2086-1298-1	Ελέγχου	12.1[b]	458	3.5	478	3.6	466	3.3	475	2.2

[a]Watson et al. (2006), [b]Høg et al. (2000)

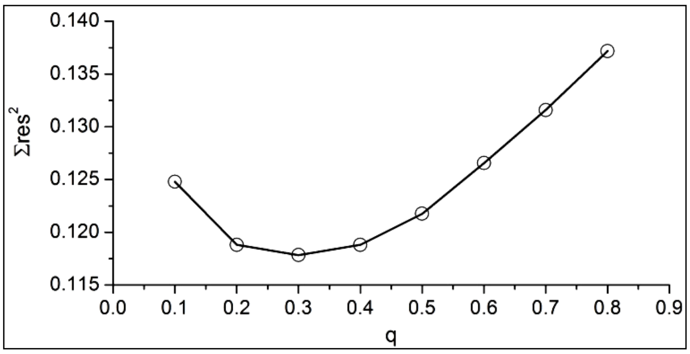
Ανάλυση των καμπυλών φωτός

Η θερμοκρασία του πρωτεύοντα αστέρα τέθηκε ίση με 7000 K βάσει του φασματικού τύπου του συστήματος-F2. Λόγω ανυπαρξίας φασματοσκοπικού λόγου μαζών των αστέρων του συστήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ανίχνευσης του *q* (βλ. §4.1) και το αντίστοιχο διάγραμμα παρουσιάζεται στην εικ. 5.27. Στην εικ. 5.28 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 5.29 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος, ενώ στον πίνακα 5.22 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος.

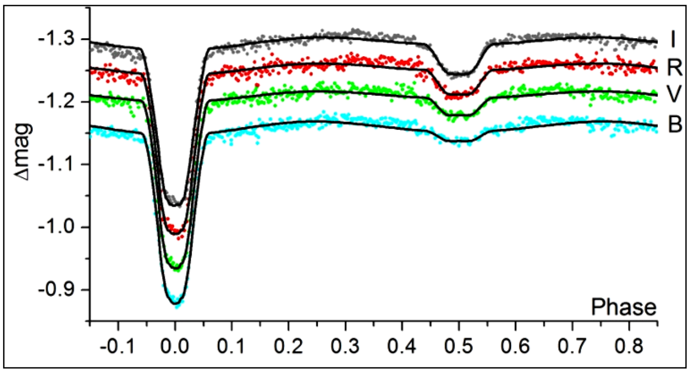
Πίνακας 5.22. Παράμετροι (Παρ.) του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα V948 Her.

Παρ.	Τιμή	Παρ.	Τιμή	Παρ.	Τιμή			
i [°]	84.4 (6)	A_1	1[a]	Φίλτρο:	B	V	R	I
q_{ph}	0.27 (3)	A_2	0.5[a]	x_1	0.595	0.494	0.417	0.341
T_1 [K]	7000[a,b]	g_1	1[a]	x_2	0.860	0.790	0.682	0.567
T_2 [K]	4310 (63)	g_2	0.32[a]	L_1/L_T	0.991 (2)	0.981 (2)	0.972 (2)	0.966 (2)
Ω_1	4.2 (1)			L_2/L_T	0.009 (1)	0.019 (1)	0.028 (1)	0.034 (1)
Ω_2	3.7 (2)			$\sum res^2$	0.106			

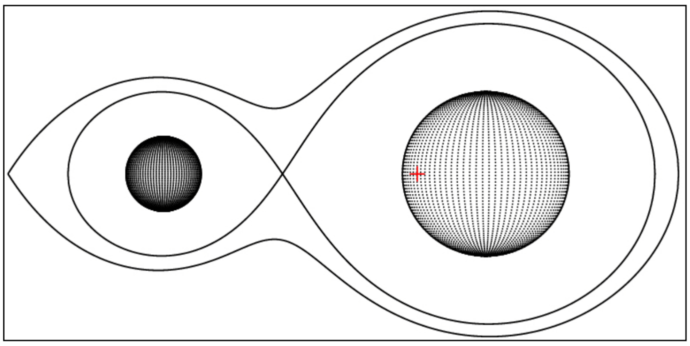
[a]σταθερή τιμή, [b]υπόθεση



Εικόνα 5.27. Διάγραμμα ανίχνευσης του q για το σύστημα V948 Her. Η τιμή του q που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή των $\sum res^2$ βρέθηκε ίση με 0.3.



Εικόνα 5.28. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες φωτός στα φίλτρα *B*, *V*, *R*, *I* του συστήματος V948 Her.



Εικόνα 5.29. Η γεωμετρία Roche του συστήματος V948 Her στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό.

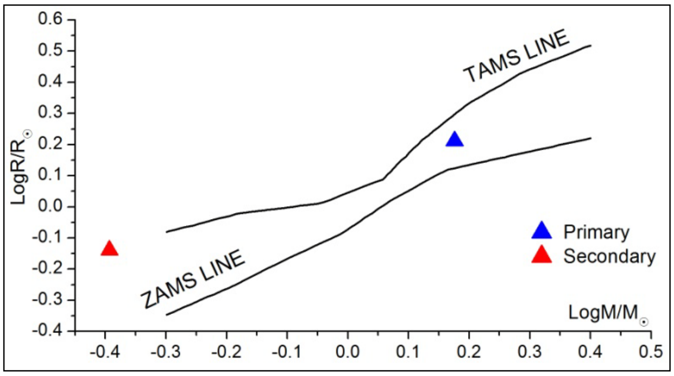
Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Η τιμή της μάζας M_1 του πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος υποτέθηκε από τον φασματικό του τύπο ως αστέρας της ΚΑ (βλ. Παρ. Ε) και δίνεται μαζί με τις τιμές των υπολοίπων παραμέτρων στον πίνακα 5.23. Η εικ. 5.30 δείχνει τις θέσεις των αστέρων στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.

Πίνακας 5.23. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος V948 Her.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [$M_\odot$]	1.5 (2)	0.40 (7)	log$g$ [cm/s^2]	4.2 (1)	4.3 (1)
R [$R_\odot$]	1.6 (1)	0.73 (3)	α [$R_\odot$]	1.3 (7)	4.9 (2)
L [$L_\odot$]	6 (1)	0.2 (1)	M_{bol} [mag]	2.9 (2)	7 (1)

[a]υπόθεση



Εικόνα 5.30. Θέσεις των αστέρων του συστήματος V948 Her (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

Συμπεράσματα

Και οι δύο αστέρες του συστήματος είναι ελαφρώς εξελιγμένοι, πλησιάζουν την TAMS, αλλά είναι ακόμα μακριά από την πλήρωση των λοβών Roche τους. Σημειώνεται ότι, παρά το γεγονός ότι και τα δύο μέλη βρίσκονται σχεδόν στο ίδιο στάδιο εξέλιξης (logg_1~logg_2), έχουν πολύ μεγάλη διαφορά στις τιμές των μαζών τους. Αυτό το αποτέλεσμα έρχεται σε αντίφαση με τις γνώσεις μας για την αστρική εξέλιξη, υποθέτοντας ταυτόχρονη γέννηση των αστέρων και όχι βαρυτική σύλληψη. Αυτή η αντίφαση εξηγείται είτε με το σενάριο της παρελθούσας μεταφοράς μάζας από τον δευτερεύοντα προς τον πρωτεύοντα αστέρα είτε με την απώλεια μάζας από τον δευτερεύοντα αστέρα (π.χ. λόγω ισχυρών αστρικών ανέμων). Όμως, σε αντίθεση με όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις που μελετήθηκαν έως τώρα, φαίνεται, λόγω του ότι ο δευτερεύων είναι ακόμα στην ΚΑ, ότι το σύστημα εξελίχθηκε σύμφωνα με την περίπτωση Α (βλ. §1.2.4).

Δεν υπάρχουν αρκετοί χρόνοι ελαχίστων στη βιβλιογραφία ώστε να μπορεί να γίνει μελέτη για πιθανές μεταβολές της περιόδου του. Για την ακρίβεια, υπάρχουν μόνο πέντε χρόνοι ελαχίστου μεταξύ 1991-2010, δύο εκ των οποίων προέκυψαν από τις δικές μας παρατηρήσεις (πίνακας Β1).

Το σύστημα ήταν υποψήφιο να περιέχει μέλος τύπου δ Sct, επομένως πραγματοποιήθηκε ανάλυση Fourier (§4.3) στα υπόλοιπα της αφαίρεσης των θεωρητικών από τις παρατηρούμενες καμπύλες φωτός. Τα αποτελέσματα έδειξαν την ανυπαρξία συχνοτήτων ανάπαλσης μεταξύ 3-80 c/d και με S/N>4, επομένως συμπεραίνεται ότι ο θερμότερος αστέρας δεν βρίσκεται σε στάδιο ανάπαλσης.

Αν και ο λόγος μαζών (q=0.27) του συστήματος είναι σχετικά μικρός για αποχωρισμένα συστήματα, σύμφωνα με το δείγμα των İbanoğlu et al. (2006), παρ' όλα αυτά μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστος, όπως και στην περίπτωση του V405 Cep, καθώς η δευτερεύουσα έκλειψη είναι ολική και άρα η τιμή του θα είναι πολύ κοντά στη φασματοσκοπική (Terrell & Wilson 2005).

5.7. Το σύστημα CM Lac

Ιστορική αναδρομή

Η μεταβολή της λαμπρότητας του συστήματος ανακαλύφθηκε από τον Wachmann (1931), ο οποίος δημοσίευσε και την πρώτη καμπύλη φωτός βασιζόμενος σε φωτογραφικές παρατηρήσεις (Wachmann 1938). Οι ακτινικές ταχύτητες του πρωτεύοντα αστέρα υπολογίστηκαν από τον Sanford (1934a), ενώ οι Dugan & Wright (1939) έκαναν την πρώτη μελέτη της τροχιακής του περιόδου. Αργότερα, ο Roman (1956) ταξινόμησε τον πρωτεύοντα αστέρα ως τύπου A7. Φωτοηλεκτρικές καμπύλες φωτός έχουν δημοσιευτεί από τους Popper (1957), Alexander (1958), Barnes et al. (1968), ενώ φωτογραφικές από τον Masnauskas (1960). Επιπροσθέτως, οι Barnes et al. (1968) βρήκαν ότι οι αστέρες του συστήματος ανήκουν στην ΚΑ και είναι φασματικών τύπων A2 και A8, για τον πρωτεύοντα και τον δευτερεύοντα, αντίστοιχα. Ο Popper (1968), βασιζόμενος σε φωτογραφικές παρατηρήσεις, κατάφερε να μετρήσει τις ακτινικές ταχύτητες και των δύο μελών, και υπολόγισε τις μάζες τους ως M_1=1.87sin^3i M$_\odot$ και M_2=1.47 sin^3i M$_\odot$. Ο Linnell (1973) ανέλυσε τις καμπύλες φωτός του συστήματος και υπολόγισε τις απόλυτες παραμέτρους των μελών. Οι Alexander & Alexander (1976) χρησιμοποιώντας τον κώδικα W-D πρότειναν την ύπαρξη τρίτου φωτός. Ο Olson (1984) υπολόγισε τις ταχύτητες ιδιοπεριστροφής των μελών και κατέληξε ότι το σύστημα έχει ασύγχρονη τροχιά. Παρ' ότι υπάρχουν πολλές παρατηρήσεις για το σύστημα, οι θερμοκρασίες (ή οι φασματικοί τύποι) των μελών του δεν έχουν ακόμη καθοριστεί επακριβώς. Πάντως, το SIMBAD αναφέρει το σύστημα ως φασματικού τύπου A3. Τέλος, οι Soydugan et al. (2006b) αναφέρουν ότι το σύστημα είναι πιθανόν να περιέχει αστέρα τύπου δ Sct.

Οι Liakos & Niarchos (2012c) διεξήγαγαν νέες φωτομετρικές παρατηρήσεις, οι οποίες κάλυψαν για πρώτη φορά ολόκληρη την καμπύλη φωτός και σε διαφορετικά μέρη του Η/Μ φάσματος, και φασματοσκοπικές, οι οποίες επέτρεψαν να υπολογιστούν με καλύτερη ακρίβεια οι απόλυτες παράμετροι των μελών και να εκτιμηθεί η εξελικτική τους κατάσταση.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι φωτομετρικές παρατηρήσεις για την κάλυψη των καμπυλών φωτός του συστήματος διήρκεσαν 10 νύκτες μεταξύ Αυγούστου-Σεπτεμβρίου 2009 και έλαβαν χώρα στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1) με τη χρήση του τηλεσκοπίου των 40 cm και της CCD ST-10XME. Στον πίνακα 5.24 δίνονται λεπτομέρειες που αφορούν τις φωτομετρικές παρατηρήσεις και την επεξεργασία των δεδομένων. Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2454652.6832 + 1.60469^{\mathrm{d}}\ \mathrm{E} \tag{5.11}$$

και υπολογίστηκε από χρόνους ελαχίστων, οι οποίοι προέκυψαν από τα δεδομένα μας (Πίνακας B1) και τους πιο πρόσφατους από τη βιβλιογραφία.

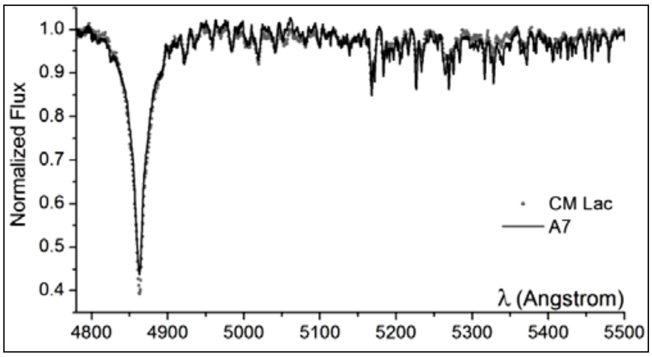
Οι φασματοσκοπικές παρατηρήσεις έλαβαν χώρα στο Αστεροσκοπείο του Σκίνακα (βλ. §2.3.3) μεταξύ 3-6 Οκτωβρίου 2010 με σκοπό τον υπολογισμό των ακτινικών ταχυτήτων των αστέρων-μελών. Το φασματικό εύρος ήταν μεταξύ 4775 Å και 5858 Å. Οι μέθοδοι επεξεργασίας των φασμάτων και υπολογισμού των ακτινικών ταχυτήτων περιγράφεται στην παράγραφο 3.2.

Για τη φασματική ταξινόμηση συγκρίθηκε το κομμάτι του φάσματος μεταξύ 4800-5350 Å όπου βρίσκονται η $H_β$ και πλήθος μεταλλικών γραμμών με ικανοποιητικό S/N. Λόγω ανυπαρξίας ολικής έκλειψης στο σύστημα δεν ήταν δυνατόν να προσδιοριστούν ξεχωριστά οι φασματικοί τύποι των αστέρων-μελών. Επομένως προέκυψε ο σύνθετος φασματικός τύπος ως A7 (για λεπτομέρειες της μεθόδου βλ. §3.2.2) βάσει του φάσματος το οποίο ελήφθη κατά τη γεωμετρική φάση ~0.25. Στην εικ. 5.31 παρουσιάζεται η σύγκριση του σύνθετου φάσματος του CM Lac με το φάσμα του πρότυπου αστέρα, για το οποίο προέκυψε η μικρότερη τιμή των $\sum res^2$.

Πίνακας 5.24. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους (*N*=αριθμός σημείων, *s.d.*=σφάλμα).

Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για κάθε φίλτρο παρατήρησης							
CM Lac	Μεταβλητός	8.18[a]	B		V		R		I	
TYC 3210-925-1	Σύγκρισης	8.58[b]	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.
TYC 3210-1381-1	Ελέγχου	11.2[b]	2730	2.5	2719	2.9	2731	3.1	2717	3.1

[a]Watson et al. (2006), [b]Høg et al. (2000)



Εικόνα 5.31. Σύγκριση του σύνθετου φάσματος του συστήματος CM Lac (γκρίζα σημεία) με το φάσμα του πρότυπου αστέρα HIP 116928 (μαύρη γραμμή) φασματικού τύπου A7.

Για τη μέθοδο BF (βλ. §3.2.3) χρησιμοποιήθηκαν τα φάσματα των προτύπων αστέρων HIP 109427 (A2), HIP 6193 (A3), HIP4283 (A4) και HIP 23781 (A5), τα οποία ελήφθησαν ακριβώς με την ίδια μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για τα φάσματα του CM Lac. Οι ακτινικές ταχύτητες των αστέρων-μελών δίνονται στον πίνακα Γ1 και οι αντίστοιχες καμπύλες παρουσιάζονται στην επόμενη παράγραφο.

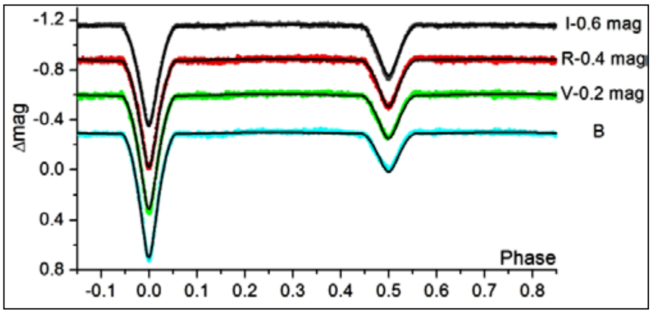
Ανάλυση των καμπυλών φωτός και των καμπυλών ακτινικών ταχυτήτων

Οι καμπύλες φωτός και ακτινικών ταχυτήτων του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν ταυτόχρονα για την εύρεση του καλύτερου μοντέλου περιγραφής του. Καθότι δεν επιτεύχθηκε ο καθορισμός του φασματικού τύπου των αστέρων, αλλά και επειδή στη βιβλιογραφία υπάρχει πληθώρα πιθανών τιμών, δοκιμάστηκαν διάφορες τιμές για την T_1, αλλά στο εύρος τιμών που αντιστοιχεί στους φασματικούς τύπους A3 (άνω όριο-SIMBAD) και A7 (κάτω όριο-σύνθετο φάσμα), ήτοι 8700 K – 7800 K. Λόγω βιβλιογραφικής πληροφορίας για πιθανή φωτομετρική συνεισφορά από τρίτο μέλος, η παράμετρος l_3 αφέθηκε ελεύθερη προς σύγκλιση. Παρομοίως, αφέθηκαν ελεύθερες και οι παράμετροι συγχρονισμού των συνοδών F_1, F_2. Ως τελικό μοντέλο παρουσιάζεται αυτό το οποίο παρήγαγε τη μικρότερη τιμή των $\sum res^2$ και οι παράμετροί του δίνονται στον πίνακα 5.25. Στην εικ. 5.32 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 5.33 οι προσαρμογές ημιτονοειδών καμπυλών επάνω στις καμπύλες ακτινικών ταχυτήτων και στην εικ. 5.34 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος.

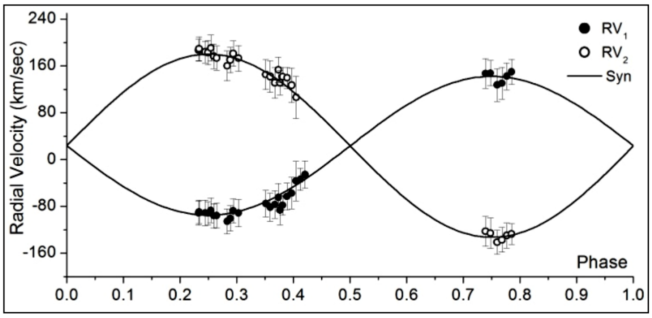
Πίνακας 5.25. Παράμετροι του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα CM Lac.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή			
i [°]	86.9 (1)	K_1 [km/sec]	119 (2)			
q_{sp}	0.76 (2)	K_2 [km/sec]	156 (2)			
T_1 [K]	8700[a]	γ [km/sec]	24 (1)			
T_2 [K]	7034 (7)	α [$R_\odot$]	8.9 (1)			
Ω_1	6.55 (1)	Φίλτρο:	B	V	R	I
Ω_2	5.40 (1)	x_1	0.547	0.471	0.396	0.316
A_1	1[a]	x_2	0.599	0.494	0.415	0.338
A_2	0.5[a]	L_1/L_T	0.703 (2)	0.667 (2)	0.645 (2)	0.623 (1)
g_1	1[a]	L_2/L_T	0.297 (1)	0.333 (1)	0.355 (1)	0.377 (1)
g_2	0.32[a]	L_3/L_T	0	0	0	0
F_1	1.1 (2)					
F_2	0.88 (4)	Σres^2	0.043			

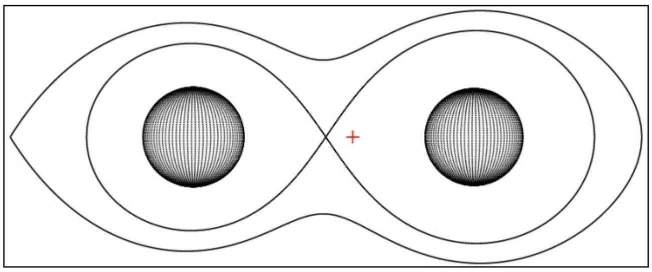
[a]σταθερή τιμή



Εικόνα 5.32. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες φωτός στα φίλτρα *B*, *V*, *R*, *I* του συστήματος CM Lac.



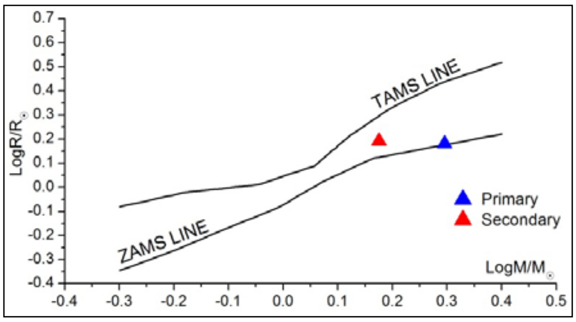
Εικόνα 5.33. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες ακτινικών ταχυτήτων του συστήματος CM Lac. Οι «γεμάτοι» κύκλοι αναφέρονται στον πρωτεύοντα και οι «κενοί» στον δευτερεύοντα αστέρα του συστήματος.



Εικόνα 5.34. Η γεωμετρία Roche του συστήματος CM Lac στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό.

Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Στον πίνακα 5.26 δίνονται οι απόλυτες παράμετροι των αστέρων-μελών και η εικ. 5.35 δείχνει τις θέσεις τους στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.



Εικόνα 5.35. Θέσεις των αστέρων του συστήματος CM Lac (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

Πίνακας 5.26. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος CM Lac.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [M☉]	1.98 (6)	1.50 (10)	log$g$ [cm/s^2]	4.37 (2)	4.23 (3)
R [R☉]	1.51 (3)	1.55 (3)	α [R☉]	3.77 (6)	4.97 (6)
L [L☉]	11.8 (4)	5.3 (2)	M_{bol} [mag]	2.1 (2)	2.9 (2)

Συμπεράσματα

Οι αστέρες του συστήματος έχουν περίπου ίδιες τιμές μαζών αλλά διαφορετικές ακτίνες, ενώ ταυτόχρονα βρίσκονται στο ίδιο στάδιο εξέλιξης (logg_1~logg_2). Αυτά τα αποτελέσματα έρχονται σε αντίθεση με τη θεωρία της αστρικής εξέλιξης, εφόσον ο αστέρας με τη μικρότερη μάζα είναι ελαφρώς πιο εξελιγμένος από τον αστέρα μεγαλύτερης μάζας, ο οποίος, επιπροσθέτως, φαίνεται να έχει μόλις μπει στην ΚΑ. Επομένως, εύλογα τροφοδοτείται το σενάριο της μεταφοράς μάζας από τον δευτερεύοντα προς τον πρωτεύοντα αστέρα κατά την περίοδο όπου ο πρωτεύων ήταν εκτός ΚΑ, δηλαδή το σύστημα εξελίχθηκε σύμφωνα με την περίπτωση Α (βλ. §1.2.4). Στην παρούσα φάση, και πιο συγκεκριμένα από το O−C διάγραμμα[1] του συστήματος, δεν διαφαίνεται καμία απολύτως μεταβολή της τροχιακής περιόδου και γι' αυτόν τον λόγο δεν παρουσιάστηκε τέτοια ανάλυση. Επομένως, τώρα το σύστημα είναι σε φάση χαλάρωσης (relaxation phase), αλλά και σε ασύγχρονη τροχιά, κάτι που συνηθίζεται στα αποχωρισμένα συστήματα.

Το σύστημα ήταν υποψήφιο να περιέχει μέλος τύπου δ Sct, επομένως πραγματοποιήθηκε ανάλυση Fourier (§4.3) στα υπόλοιπα της αφαίρεσης των θεωρητικών από τις παρατηρούμενες καμπύλες φωτός. Τα αποτελέσματα δεν ανέδειξαν καμία συχνότητα ανάπαλσης μεταξύ 3-80 c/d και με S/N>4.

Οι τιμές των απόλυτων παραμέτρων, οι οποίες προέκυψαν από την ανάλυσή μας, είναι σε πολύ καλή συμφωνία με τα αποτελέσματα των Popper (1968) και Linnell (1973). Αντίθετα, ούτε στην ανάλυση των καμπυλών φωτός ούτε και στα φάσματα του συστήματος εντοπίστηκε φωτομετρική συνεισφορά από τρίτο μέλος, άρα το σενάριο της πιθανής πολλαπλότητας του συστήματος, όπως προτάθηκε από τους Alexander & Alexander (1976) και Hoffman (2006) δεν επιβεβαιώνεται από την παρούσα μελέτη.

[1]Διατίθεται στην παρακάτω βάση δεδομένων: http://www.as.up.krakow.pl/o-c/data/getdata.php3?CM%20lac

5.8. Το σύστημα UU Leo

Ιστορική αναδρομή

Το σύστημα ανακαλύφθηκε από τον Hoffmeister (1934) και η περίοδός του υπολογίστηκε από τους Prager & Shapley (1941). Στη βιβλιογραφία, αν και υπάρχουν διαθέσιμοι πολλοί χρόνοι ελαχίστων, δεν υπήρχε έως τώρα πλήρης καμπύλη φωτός. Οι Brancewicz & Dworak (1980) και ο Budding (1984) αναφέρουν ότι ο φασματικός τύπος του συστήματος είναι A2, ενώ οι Svechnikov & Kuznetsova (1990) έδειξαν ότι αυτός ο φασματικός τύπος αφορά μόνο τον πρωτεύοντα συνοδό και, επιπροσθέτως, εκτίμησαν ότι ο δευτερεύων είναι τύπου G1. Το σύστημα είναι υποψήφιο να περιέχει τρίτο μέλος (Hoffman et al. 2006) όσο και να περιέχει αστέρα τύπου δ Sct (Soydugan et al. 2006b). Οι Erdem et al. (2007) ανέλυσαν τις μεταβολές της τροχιακής περιόδου του συστήματος και κατέληξαν ότι λαμβάνουν χώρα ο μηχανισμός της μεταφοράς μάζας μεταξύ των μελών και ο μηχανισμός Applegate (1992).

Οι Liakos et al. (2011a) διεξήγαγαν συστηματικές παρατηρήσεις για το σύστημα, από τις οποίες προέκυψαν πλήρεις καμπύλες φωτός, υπολόγισαν τις απόλυτες παραμέτρους των μελών του και ερμήνευσαν τις μεταβολές της τροχιακής περιόδου του μέσω της ανάλυσης του O−C διαγράμματός του. Τα αποτελέσματα δίνονται στις επόμενες παραγράφους.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι παρατηρήσεις του συστήματος για την κάλυψη των καμπυλών διήρκεσαν 12 νύκτες στο χρονικό διάστημα Φεβρουάριος-Μάρτιος 2010 και μερικές νύκτες στα αντίστοιχα διαστήματα μεταξύ 2007-2009 για την κάλυψη φωτομετρικών ελάχιστων. Οι παρατηρήσεις έγιναν στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1) με τη χρήση του τηλεσκοπίου των 40 cm και των CCD ST-10XME (το 2010) και ST-8XMEI (2007-2009). Στον πίνακα 5.27 δίνονται λεπτομέρειες που αφορούν τις παρατηρήσεις και την επεξεργασία των δεδομένων.

Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2454891.51230 + 1.67972^{\mathrm{d}}\ \mathrm{E} \tag{5.12}$$

και υπολογίστηκε από χρόνους ελαχίστων, οι οποίοι προέκυψαν από τα δεδομένα μας (Πίνακας B1) και τους πιο πρόσφατους της βιβλιογραφίας.

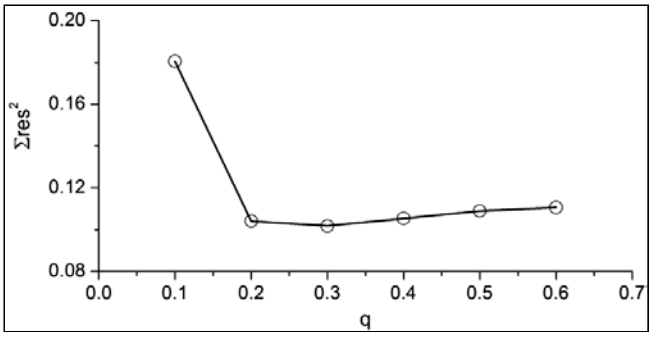
Πίνακας 5.27. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους (*N*=αριθμός σημείων, *s.d.*=σφάλμα).

Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για κάθε φίλτρο παρατήρησης							
UU Leo	Μεταβλητός	11.70[a]	B		V		R		I	
TYC 0834-0788-1	Σύγκρισης	11.11[b]	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.
TYC 0834-1173-1	Ελέγχου	12.83[c]	307	3.7	313	3.5	318	3.8	318	3.5

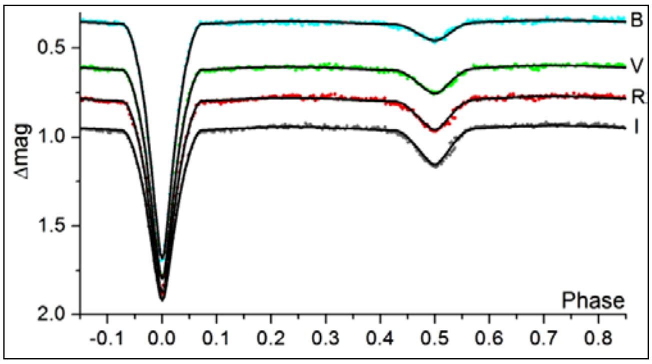
[a]Soydugan et al. (2006b), [b]Høg et al. (2000), [c]Zacharias et al. (2004)

Ανάλυση των καμπυλών φωτός

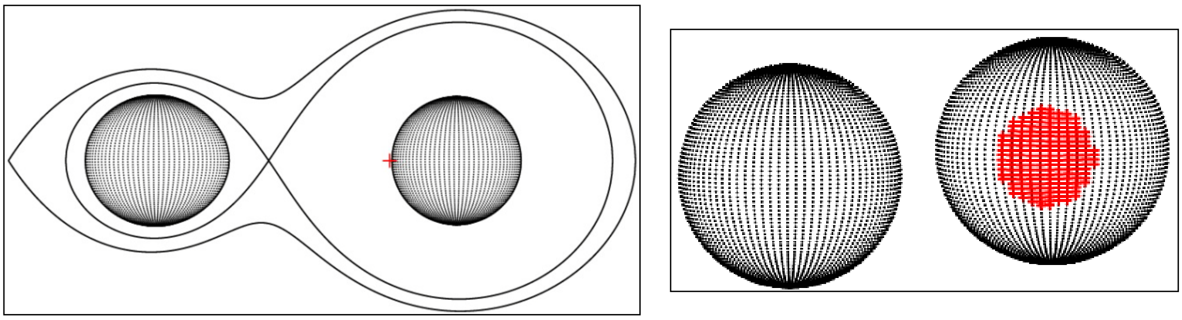
Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, ο φασματικός τύπος του συστήματος είναι A2V, επομένως η θερμοκρασία του πρωτεύοντα αστέρα τέθηκε ίση με 9000 K. Λόγω ανυπαρξίας φασματοσκοπικά προσδιορισμένου λόγου μαζών των αστέρων του συστήματος, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ανίχνευσης του q (βλ. §4.1) και το αντίστοιχο διάγραμμα παρουσιάζεται στην εικ. 5.36. Εδώ πρέπει να τονιστεί, ότι επίλυση των καμπυλών φωτός επιτυγχάνεται και στον "mode" 5 (§4.1) με μικρότερη τιμή του q (~0.1). Όμως, η λύση στον "mode" 2 παρήγαγε μικρότερη τιμή των $\sum res^2$, και ως εκ τούτου επιλέχθηκε ως τελικό μοντέλο περιγραφής, το οποίο, όπως θα φανεί παρακάτω, συμφωνεί και με τα αποτελέσματα της O−C ανάλυσης. Επιπλέον, λόγω ασυμμετρίας της καμπύλης φωτός πριν και μετά από τους επικλινείς κλάδους του δευτερεύοντος ελαχίστου, οι παράμετροι μιας ψυχρής κηλίδας στην επιφάνεια του δευτερεύοντα αστέρα, ο οποίος είναι ο μόνος που μπορεί να έχει μαγνητική δραστηριότητα λόγω της μικρότερης θερμοκρασίας του, αφέθηκαν ελεύθερες προς σύγκλιση. Επίσης, λόγω περιοδικής μεταβολής της περιόδου του συστήματος, όπως θα παρουσιαστεί σε επόμενη παράγραφο, η φωτομετρική συνεισφορά από ένα πιθανό τρίτο μέλος l_3 αφέθηκε και αυτή ελεύθερη. Στην εικ. 5.37 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 5.38 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος, ενώ στον πίνακα 5.28 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος.



Εικόνα 5.36. Διάγραμμα ανίχνευσης του q για το σύστημα UU Leo. Η τιμή του q που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή των $\sum res^2$ βρέθηκε ίση με 0.3.



Εικόνα 5.37. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες φωτός στα φίλτρα *B*, *V*, *R*, *I* του συστήματος UU Leo.



Εικόνα 5.38. Η γεωμετρία Roche του συστήματος UU Leo στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό (αριστερά) και στη φάση 0.42 (δεξιά), όπου διακρίνεται η ψυχρή κηλίδα στην επιφάνεια του δευτερεύοντα αστέρα.

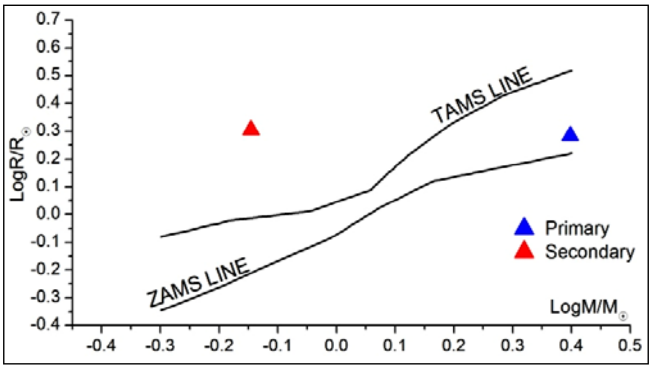
Πίνακας 5.28. Παράμετροι του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα UU Leo.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή			
i [°]	86.8 (1)	Φίλτρο:	B	V	R	I
q_{ph}	0.286 (2)	x_1	0.535	0.460	0.381	0.301
T_1 [K]	9000[a,b]	x_2	0.754	0.613	0.527	0.444
T_2 [K]	5688 (10)	L_1/L_T	0.794 (3)	0.747 (3)	0.712 (3)	0.666 (3)
Ω_1	4.98 (2)	L_2/L_T	0.103 (1)	0.144 (1)	0.173 (4)	0.204 (1)
Ω_2	2.65 (1)	L_3/L_T	0.104 (2)	0.109 (2)	0.115 (3)	0.130 (3)
A_1	1[a]	$<L_3/L_T>$ (%)	11.5 (3)			
A_2	0.5[a]	Κηλίδες				
g_1	1[a]	Co-lat [°]	90 (2)			
g_2	0.32[a]	Co-long [°]	28 (3)			
		R [°]	24 (2)			
Σres^2	0.153	T_f (T_{sp}/T_{sur})	0.88 (3)			

[a]σταθερή τιμή, [b]υπόθεση

Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Η τιμή της μάζας M_1 του πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος υποτέθηκε από τον φασματικό του τύπο ως αστέρας της ΚΑ (βλ. Παρ. Ε) και δίνεται μαζί με τις τιμές των υπολοίπων παραμέτρων στον πίνακα 5.29. Η εικ. 5.39 δείχνει τις θέσεις των αστέρων στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.



Εικόνα 5.39. Θέσεις των αστέρων του συστήματος UU Leo (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

Πίνακας 5.29. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος UU Leo.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [$M_\odot$]	2.5[a]	0.72 (1)	log*g* [cm/s^2]	4.29 (3)	3.67 (3)
R [$R_\odot$]	1.92 (5)	2.02 (5)	α [$R_\odot$]	2.0 (2)	7.0 (1)
L [$L_\odot$]	22 (1)	3.8 (2)	M_{bol} [mag]	1.4 (6)	3.3 (6)

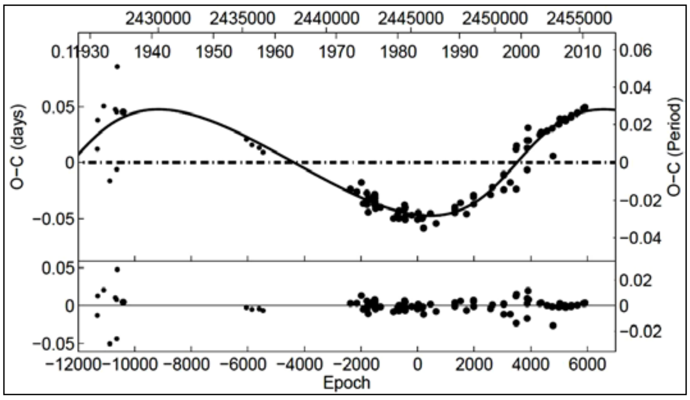
[a]υπόθεση

Ανάλυση των μεταβολών της τροχιακής περιόδου

Το O−C διάγραμμα του συστήματος βασίστηκε σε 99 χρόνους ελαχίστων, 57 εκ των οποίων προέκυψαν από οπτικές, 12 από φωτογραφικές και 30 από CCD παρατηρήσεις καλύπτουν μια χρονική περίοδο ~100 έτη. Ως αρχική παράμετρος χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω αστρονομική εφημερίδα (Kreiner et al. 2001):

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2445397.472 + 1.6797467^{\mathrm{d}}\mathrm{E} \tag{5.13}$$

Λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων, θεωρητικά μπορεί τόσο ο μηχανισμός Applegate (1992) (βλ. §4.2.4) όσο και το LITE (βλ. §4.2.1) να περιγράψουν τις μεταβολές της τροχιακής περιόδου. Επομένως, μια περιοδική συνάρτηση LITE προσαρμόστηκε στα O−C σημεία (εικ. 5.40) και τα αποτελέσματα και για τους δύο μηχανισμούς δίνονται στον πίνακα 5.30.



Εικόνα 5.40. Προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης του LITE στα O−C σημεία του συστήματος UU Leo (επάνω) και τα υπόλοιπα (residuals) μετά την αφαίρεση της θεωρητικής καμπύλης (κάτω).

Πίνακας 5.30. Παράμετροι της O−C ανάλυσης του συστήματος UU Leo.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
Εκλειπτικό σύστημα		3^o σώμα	
JD_0 [HJD−2400000]	45397.507 (4)	P_3 [yr]	72 (1)
P [d]	1.6797524 (8)	e_3	0.3 (1)
Μεταβολή της τετραπολικής ροπής		ω_3 [°]	0 (11)
ΔQ [$\times 10^{50}$ g cm^2]	6.9	$f(m_3)$ [$M_\odot$]	0.129 (1)
LITE		$M_{3,min}$ [$M_\odot$]	1.40 (9)
T_0 [HJD−2400000]	24839 (862)		
A [d]	0.048 (2)	Σres^2	0.080

Συμπεράσματα

Σε αυτό το σύστημα υπάρχει μεγάλη διαφορά στην εξελικτική κατάσταση των μελών του. Συγκεκριμένα, ο πρωτεύων αστέρας ανήκει στην ΚΑ και είναι σχετικά κοντά στη ZAMS, κάτι που μας δείχνει ότι είναι σχετικά μικρής ηλικίας. Από την άλλη πλευρά, ο δευτερεύων έχει φύγει από την ΚΑ και βρίσκεται στο στάδιο των υπογιγάντων. Σύμφωνα με τις τιμές των μαζών των αστέρων-μελών, ο μικρότερης μάζας αστέρας είναι πολύ πιο εξελιγμένος από τον αστέρα μεγαλύτερης μάζας. Επίσης, σύμφωνα και με τη γεωμετρία του συστήματος είναι πολύ πιθανόν η μεταφορά μάζας να έχει σταματήσει σχετικά πρόσφατα, αφού φαίνεται ότι η ακτίνα του δευτερεύοντα είναι πολύ λίγο μικρότερη από αυτήν του λοβού Roche του. Επομένως, από εξελικτικής σκοπιάς και μόνο συμπεραίνεται ότι το σύστημα ήταν τύπου Algol και τώρα η μεταφορά μάζας έχει σταματήσει και βρίσκεται σε φάση χαλάρωσης. Η απουσία της μεταφοράς μάζας μεταξύ των μελών υποστηρίζεται και από την απουσία παραβολικής συμπεριφοράς των O−C σημείων (βλ.

§4.2.2). Υπενθυμίζεται όμως, ότι μπορεί να επιτευχθεί φωτομετρική λύση και σύμφωνα με τη γεωμετρία ενός ημιαποχωρισμένου συστήματος. Επιπροσθέτως, οι τιμές των παραμέτρων αστέρων του UU Leo φαίνεται να ταιριάζουν καλύτερα με τα χαρακτηριστικά των ημιαποχωρισμένων συστημάτων από το δείγμα των İbanoğlu et al. (2006), αλλά οι αποκλίσεις από αυτό το δείγμα δεν πρέπει να αποκλείονται. Επομένως, μελλοντικές φασματοσκοπικές παρατηρήσεις ακτινικών ταχυτήτων των μελών αναμένεται να δώσουν σαφή απάντηση για τη γεωμετρία του συστήματος.

Σε εξαιρετική συμφωνία για την ύπαρξη τρίτου μέλους στο σύστημα κατέληξαν τα αποτελέσματα από την Ανάλυση των καμπυλών φωτός και την O−C ανάλυση. Συγκεκριμένα, η παρατηρούμενη φωτομετρική συνεισφορά βρέθηκε ίση με $L_{3,LC}$~11.5%, ενώ η αναμενόμενη από έναν αστέρα ΚΑ μάζας $M_{3,\min}$=1.4 $M_{\odot}$ προκύπτει $L_{3,O-C}$~11%. Το κριτήριο της δυναμικής ευστάθειας (Harrington 1977) για το πιθανόν τριπλό σύστημα ικανοποιείται οριακά μόνο, εάν το επιπρόσθετο μέλος περιφέρεται αντίθετα από τη φορά περιστροφής των αστέρων του εκλειπτικού συστήματος. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι και ο μηχανισμός Applegate (1992), όπως άλλωστε υποστηρίζουν και οι Erdem et al. (2007), περιγράφει εξίσου ικανοποιητικά τις περιοδικές μεταβολές της περιόδου. Όμως, τόσο το μεγάλο ποσοστό φωτομετρικής συνεισφοράς όσο και η μάζα του τρίτου σώματος αναμένεται να επηρεάζουν το φάσμα του συστήματος. Επομένως, και πάλι η φασματοσκοπία αναμένεται να αποτελέσει τον «τελικό κριτή» για τον μηχανισμό διαμόρφωσης της περιόδου.

Το σύστημα ήταν υποψήφιο να περιέχει παλλόμενο μέλος (Soydugan et al. 2006b), επομένως πραγματοποιήθηκε ανάλυση Fourier (§4.3) στα υπόλοιπα της αφαίρεσης των θεωρητικών από τις παρατηρούμενες καμπύλες φωτός. Τα αποτελέσματα έδειξαν την ανυπαρξία συχνοτήτων ανάπαλσης μεταξύ 3-80 c/d και με S/N>4, επομένως συμπεραίνεται ότι ο θερμότερος αστέρας δεν βρίσκεται σε στάδιο ανάπαλσης.

5.9. Το σύστημα KR Mon

Ιστορική αναδρομή

Η μεταβλητότητα του συστήματος ανακαλύφθηκε από τον Zinner (1952). Η μόνη διαθέσιμη πληροφορία αφορά τον φασματικό του τύπο G3V όπως δίνεται στους καταλόγους GCVS (Samus et al. 2011) και MK Catalogue of Stellar Spectral Classifications (Skiff 2010). Καμπύλες φωτός δίνονται για τα φίλτρα V και I από το πρόγραμμα “ASAS” (Pojmanski et al. 2005), άλλα έως τώρα δεν είχε γίνει ανάλυση.

Οι Liakos & Niarchos (2012b) διεξήγαγαν συστηματικές παρατηρήσεις για το σύστημα, από τις οποίες προέκυψαν πλήρεις καμπύλες φωτός, και υπολόγισαν τις απόλυτες παραμέτρους των μελών του. Τα αποτελέσματα δίνονται στις επόμενες παραγράφους.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι παρατηρήσεις για την κάλυψη της καμπύλης φωτός διήρκεσαν 9 νύκτες στο χρονικό διάστημα Νοέμβριος 2008-Μάρτιος 2009, ενώ για την κάλυψη μόνο των φωτομετρικών ελαχίστων διήρκεσαν μερικές νύκτες κατά τον Ιανουάριο, Μάρτιο, Δεκέμβριο του 2007 και Ιανουάριο 2008. Οι παρατηρήσεις έγιναν στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1) με τη χρήση του τηλεσκοπίου των 40 cm και της CCD ST-8XMEI. Στον πίνακα 5.31 δίνονται λεπτομέρειες που αφορούν τις παρατηρήσεις και την επεξεργασία των δεδομένων, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την κάλυψη της καμπύλης φωτός. Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2454165.42321 + 1.150961^{\mathrm{d}}\ \mathrm{E} \tag{5.14}$$

και υπολογίστηκε από χρόνους ελαχίστων, οι οποίοι προέκυψαν από τα δεδομένα μας (Πίνακας Β1).

Πίνακας 5.31. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους (*N*=αριθμός σημείων, *s.d.*=σφάλμα).

Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για κάθε φίλτρο παρατήρησης			
KR Mon	Μεταβλητός	11.8[a]	V		R	
TYC 4833-1488	Σύγκρισης	12.35[a]	N	s.d.	N	s.d.
USNO-A2.0 0825-5761727	Ελέγχου	12.41[a]	369	4.3	360	4.6

[a]Zacharias et al. (2004)

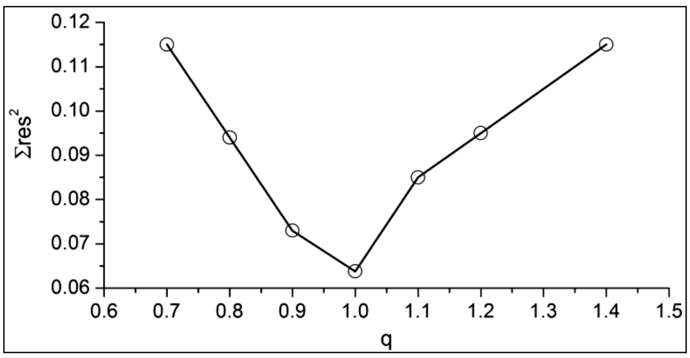
Ανάλυση των καμπυλών φωτός

Η θερμοκρασία του πρωτεύοντα αστέρα τέθηκε ίση με 5700 K βάσει του φασματικού τύπου του συστήματος-G3V. Λόγω ανυπαρξίας φασματοσκοπικού λόγου μαζών των αστέρων του συστήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ανίχνευσης του q (βλ. §4.1) και το αντίστοιχο διάγραμμα παρουσιάζεται στην εικ. 5.41. Στην εικ. 5.42 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 5.43 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος, ενώ στον πίνακα 5.32 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος.

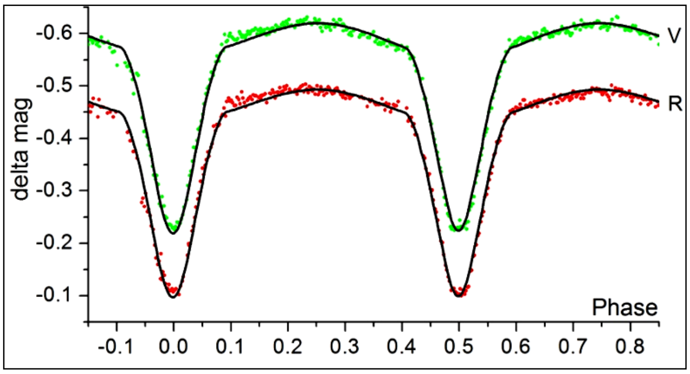
Πίνακας 5.32. Παράμετροι του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα KR Mon.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή	
i [°]	77.1 (1)	A_1	0.5[a]	Φίλτρο:	V	R
q_{ph}	0.97 (1)	A_2	0.5[a]	x_1	0.611	0.610
T_1 [K]	5700[a,b]	g_1	0.32[a]	x_2	0.526	0.525
T_2 [K]	5705 (20)	g_2	0.32[a]	L_1/L_T	0.446 (2)	0.554 (2)
Ω_1	4.66 (1)			L_2/L_T	0.446 (2)	0.554 (2)
Ω_2	4.25 (1)			Σres^2	0.060	

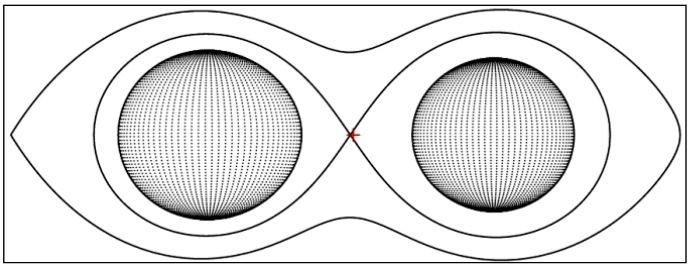
[a]σταθερή τιμή, [b]υπόθεση



Εικόνα 5.41. Διάγραμμα ανίχνευσης του q για το σύστημα KR Mon. Η τιμή του q που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή των $\sum res^2$ βρέθηκε ίση με 1.



Εικόνα 5.42. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες φωτός στα φίλτρα V και R του συστήματος KR Mon.



Εικόνα 5.43. Η γεωμετρία Roche του συστήματος KR Mon στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό.

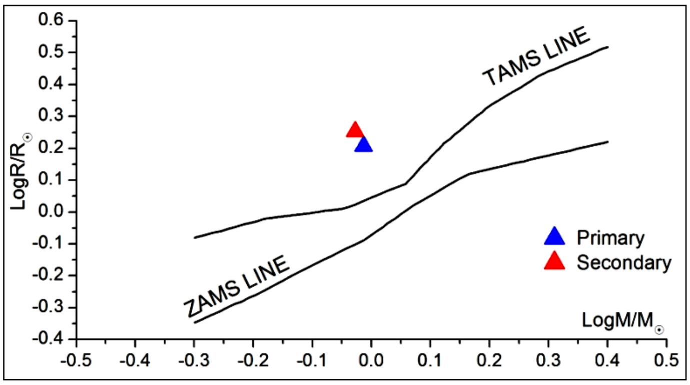
Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Η τιμή της μάζας M_1 του πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος υποτέθηκε από τον φασματικό του τύπο ως αστέρας της ΚΑ (βλ. Παρ. Ε) και δίνεται μαζί με τις τιμές των υπολοίπων παραμέτρων στον πίνακα 5.33. Η εικ. 5.44 δείχνει τις θέσεις των αστέρων στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.

Πίνακας 5.33. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος KR Mon.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [$M_\odot$]	0.97[a]	0.9 (1)	log$g$ [cm/s^2]	4.0 (1)	3.9 (1)
R [$R_\odot$]	1.6 (1)	1.8 (1)	α [$R_\odot$]	2.9 (3)	3.0 (1)
L [$L_\odot$]	2.5 (2)	3.0 (3)	M_{bol} [mag]	3.8 (9)	4 (1)

[a]υπόθεση



Εικόνα 5.44. Θέσεις των αστέρων του συστήματος KR Mon (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

Συμπεράσματα

Οι αστέρες του συστήματος είναι σχεδόν πανομοιότυποι, όσο αναφορά τις διαστάσεις τους, και επιπλέον βρίσκονται στην ίδια εξελικτική κατάσταση. Δεν υπάρχουν στοιχεία που να δείχνουν κάποια μεταφορά μάζας στο παρελθόν μεταξύ των μελών, αλλά το γεγονός ότι και οι δύο εξελίσσονται, υπό την έννοια ότι αυξάνει η ακτίνα τους, και βάσει του βαθμού πλήρωσης των λοβών Roche τους (εικ. 5.43), το πιθανότερο σενάριο είναι να έρθουν σε επαφή στον μέλλον, οπότε και θα αρχίσει η μεταφορά μάζας. Επομένως, το πιθανότερο σενάριο εξέλιξης είναι η περίπτωση Γ (βλ. §1.2.4).

Το O−C διάγραμμα[1] του συστήματος δεν αναλύθηκε λόγω έλλειψης αρκετών χρόνων ελαχίστου. Συγκεκριμένα, υπάρχουν μόλις 12 διαθέσιμοι χρόνοι ελαχίστων στο χρονικό διάστημα 1999-2011, βάσει των οποίων δεν μπορεί ακόμα να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα για ενδεχόμενη μεταβολή της περιόδου.

5.10. Το σύστημα CF Tau

Ιστορική αναδρομή

Ο πρώτος που εντόπισε μεταβολές στη λαμπρότητα του συστήματος ήταν ο Morgenroth (1934), ενώ ο Szafraniec (1960) δημοσίευσε την πρώτη καμπύλη φωτός βάσει οπτικών παρατηρήσεων. Οι Wood & Forbes (1963) υπολόγισαν την πρώτη αστρονομική εφημερίδα του συστήματος με σχετική ακρίβεια, οι Hilditch & Hill (1975) υπολόγισαν τους Strömgen δείκτες χρώματος του και οι Brancewicz & Dworak (1980), βάσει της μεθόδου των φωτομετρικών παραλλάξεων, υπολόγισαν τις απόλυτες παραμέτρους του. Οι Hilditch & Hill (1975) ταξινόμησαν το σύστημα ως τύπου G0, κάτι που αναφέρεται επίσης και στους καταλόγους Henry Draper Catalogue identifications for Tycho-2 stars (Fabricius et al. 2002) και $T_{\rm eff}$ and metallicities for Tycho-2 stars (Ammons et al. 2006) catalogue. Σε συμφωνία με τα παραπάνω, οι Svechnikov & Kuznetsova (1990) εκτίμησαν ότι οι αστέρες του συστήματος αντιστοιχούν σε φασματικούς τύπους G0 και K2, για τον πρωτεύοντα και τον δευτερεύοντα, αντίστοιχα. Ο Lacy (1992) διεξήγαγε φωτοηλεκτρικές παρατηρήσεις στα φίλτρα U, B, V σε διάφορες γεωμετρικές φάσεις του συστήματος και υπολόγισε τους δείκτες χρώματός του. Το LITE προτάθηκε από τους Albayrak et al. (2006) ως η πιθανότερη ερμηνεία για τις μεταβολές της τροχιακής περιόδου του συστήματος. Οι πιο σύγχρονες καμπύλες φωτός προέρχονται από το πρόγραμμα "ASAS" (Pojmanski et al. 2005-μερική κάλυψη) και "SWASP" (Pollacco et al. 2006-πλήρης κάλυψη).

Οι Liakos et al. (2011a) παρουσίασαν το φωτομετρικό μοντέλο του συστήματος, υπολόγισαν τις απόλυτες παραμέτρους των μελών του και ερμήνευσαν τις μεταβολές τις τροχιακής περιόδου του μέσω της ανάλυσης−του O C διαγράμματός του. Τα αποτελέσματα δίνονται στις επόμενες παραγράφους.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Λόγω της καλής ποιότητας των δεδομένων από το πρόγραμμα "SWASP" (Pollacco et al. 2006) και της ελεύθερης διαθεσιμότητάς τους δεν έγιναν νέες παρατηρήσεις για το σύστημα, και χρησιμοποιήθηκαν οι υπάρχουσες, οι οποίες έλαβαν χώρα στο διάστημα Ιούλιος 2004-Φεβρουάριος 2008. Σε αυτό το πρόγραμμα παρατηρήσεων δεν χρησιμοποιούνταν φωτομετρικά φίλτρα, κάτι όμως που δεν επηρεάζει σημαντικά την παρακάτω ανάλυση. Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

[1]Διατίθεται στην παρακάτω βάση δεδομένων: http://var.astro.cz/ocgate/ocgate.php?star=kr+mon&submit=Submit&lang=en

$$\mathrm{Min.\,I} = \mathrm{HJD}\ 2454842.3397 + 2.755881^{\mathrm{d}}\ \mathrm{E} \tag{5.15}$$

και υπολογίστηκε από τους πιο πρόσφατους χρόνους ελαχίστων της βιβλιογραφίας.

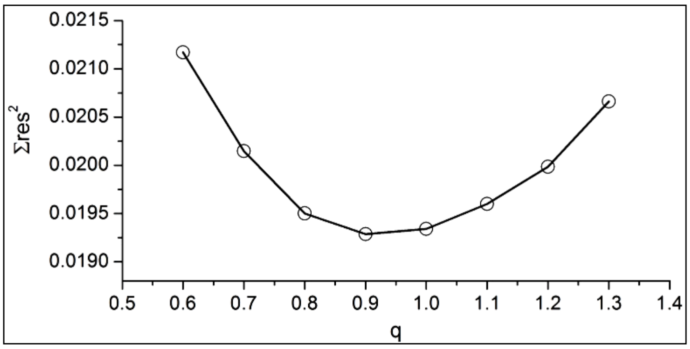
Ανάλυση των καμπυλών φωτός

Η θερμοκρασία του πρωτεύοντα αστέρα τέθηκε ίση με 5950 K βάσει του φασματικού του τύπου-G0. Επειδή τα δεδομένα ελήφθησαν χωρίς φωτομετρικά φίλτρα, στους συντελεστές αμαύρωσης χείλους δόθηκαν οι βολομετρικές τιμές, που θεωρούνται η καλύτερη προσέγγιση σε τέτοιες περιπτώσεις. Λόγω της πιθανής παρουσίας τρίτου μέλους στο σύστημα (βλ. παρακάτω την O−C ανάλυση), η φωτομετρική συνεισφορά l_3 αφέθηκε ελεύθερη προς σύγκλιση. Λόγω ανυπαρξίας φασματοσκοπικού λόγου μαζών των αστέρων του συστήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ανίχνευσης του q (βλ. §4.1) και το αντίστοιχο διάγραμμα παρουσιάζεται στην εικ. 5.45. Στην εικ. 5.46 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 5.47 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος, ενώ στον πίνακα 5.34 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος.

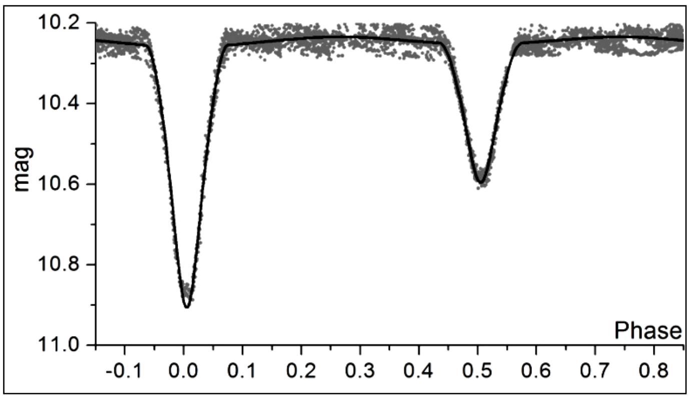
Πίνακας 5.34. Παράμετροι του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα CF Tau.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
i [°]	84.2 (1)	A_1	0.5[a]	x_1	0.579
q_{ph}	0.940 (4)	A_2	0.5[a]	x_2	0.668
T_1 [K]	5950[a,b]	g_1	0.32[a]	L_1/L_T	0.560 (2)
T_2 [K]	5308 (5)	g_2	0.32[a]	L_2/L_T	0.397 (1)
Ω_1	5.84 (1)			L_3/L_T	0.043 (2)
Ω_2	5.22 (1)			$\sum res^2$	0.806

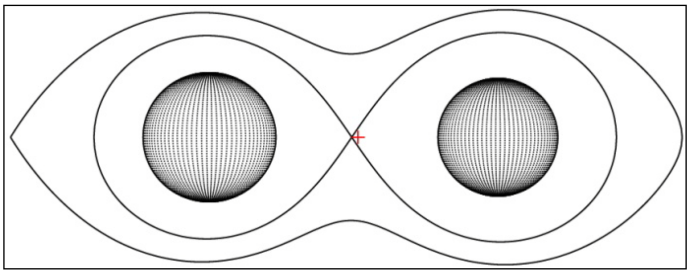
[a]σταθερή τιμή, [b]υπόθεση



Εικόνα 5.45. Διάγραμμα ανίχνευσης του q για το σύστημα CF Tau. Η τιμή του q που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή των $\sum res^2$ βρέθηκε ίση με 0.9.



Εικόνα 5.46. Θεωρητική (συνεχής γραμμή) και παρατηρούμενη (σημεία) καμπύλη φωτός του συστήματος CF Tau.



Εικόνα 5.47. Η γεωμετρία Roche του συστήματος CF Tau στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό.

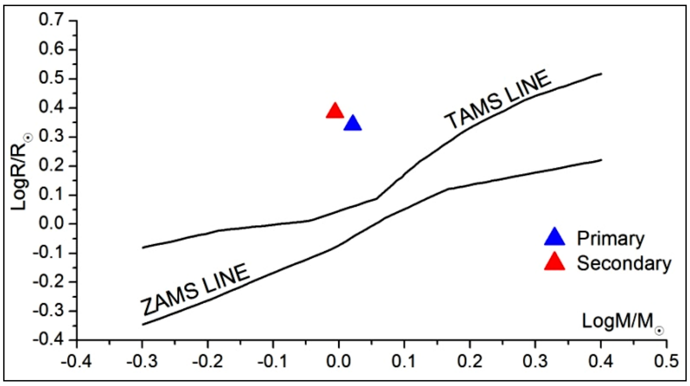
Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Η τιμή της μάζας M_1 του πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος υποτέθηκε από τον φασματικό του τύπο ως αστέρας της ΚΑ (βλ. Παρ. Ε) και δίνεται μαζί με τις τιμές των υπολοίπων παραμέτρων στον πίνακα 5.35. Η εικ. 5.48 δείχνει τις θέσεις των αστέρων στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.

Πίνακας 5.35. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος CF Tau.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [$M_\odot$]	1.05[a]	0.99 (1)	log$g$ [cm/s^2]	3.77 (2)	3.66 (2)
R [$R_\odot$]	2.20 (5)	2.42 (5)	α [$R_\odot$]	5.2 (2)	5.5 (1)
L [$L_\odot$]	5.4 (2)	4.2 (2)	M_{bol} [mag]	2.9 (5)	3.2 (6)

[a]υπόθεση



Εικόνα 5.48. Θέσεις των αστέρων του συστήματος CF Tau (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

Ανάλυση των μεταβολών της τροχιακής περιόδου

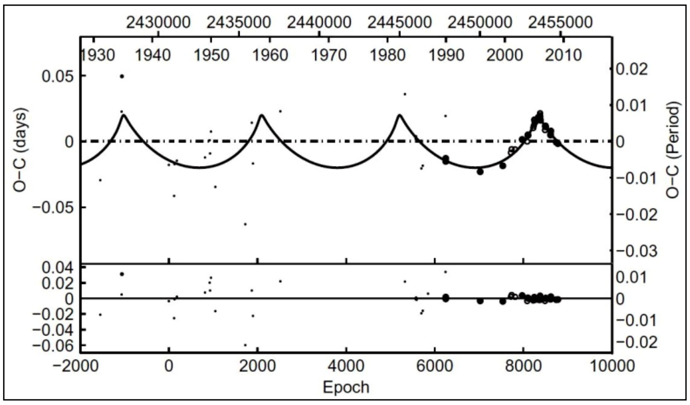
Το O−C διάγραμμα του συστήματος βασίστηκε σε 58 χρόνους ελαχίστων, 20 εκ των οποίων προέκυψαν από οπτικές, 4 από φωτογραφικές και 34 από CCD παρατηρήσεις καλύπτουν το χρονικό διάστημα 1930-2010. Ως αρχική παράμετρος χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω αστρονομική εφημερίδα (Kreiner et al. 2001):

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2430651.242 + 2.7558772^{\mathrm{d}}\mathrm{E} \quad (5.16)$$

Λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων, θεωρητικά μπορεί τόσο ο μηχανισμός Applegate (1992) (βλ. §4.2.4) όσο και το LITE (βλ. §4.2.1) να περιγράψουν τις μεταβολές της τροχιακής περιόδου. Επομένως, μια περιοδική συνάρτηση LITE προσαρμόστηκε στα O−C σημεία (εικ. 5.49) και τα αποτελέσματα και για τους δύο μηχανισμούς δίνονται στον πίνακα 5.36.

Πίνακας 5.36. Παράμετροι της O−C ανάλυσης του συστήματος CF Tau.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή
Εκλειπτικό σύστημα			3^o σώμα	
JD_0 [HJD−2400000]	30651.248 (5)		P_3 [yr]	23.5 (3)
P [d]	2.7558776 (8)		e_3	0.8 (1)
Μεταβολή της τετραπολικής ροπής			ω_3 [°]	72 (24)
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	$f(m_3)$ [$M_\odot$]	0.084 (5)
ΔQ [$\times 10^{50}$ g cm^2]	18.9	17.7	$M_{3,min}$ [$M_\odot$]	0.89 (2)
LITE				
T_0 [HJD−2400000]	53533 (208)			
A [d]	0.020 (3)		Σres^2	0.012



Εικόνα 5.49. Προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης του LITE στα O−C σημεία του συστήματος CF Tau (επάνω) και τα υπόλοιπα (residuals) μετά την αφαίρεση της θεωρητικής καμπύλης (κάτω).

Συμπεράσματα

Το σύστημα αποτελείται από δύο σχεδόν πανομοιότυπους αστέρες, αναφορικά με τις διαστάσεις τους αλλά και τη μάζα τους, οι οποίοι βρίσκονται σχεδόν στην ίδια εξελικτική κατάσταση. Δεν υπάρχουν στοιχεία που να δείχνουν ότι στο παρελθόν υπήρξε κάποια μεταφορά μάζας μεταξύ των μελών (π.χ. διαφορετικές μάζες και άλλη εξελικτική κατάσταση). Φυσικά, εφόσον πλέον είναι στο στάδιο των υπογιγάντων, η ακτίνα τους θα συνεχίσει να αυξάνει και το πιθανότερο σενάριο είναι να έρθουν σε επαφή στον μέλλον, οπότε και θα αρχίσει η μεταφορά μάζας. Προς το παρόν, οι ακτίνες τους είναι αρκετά μικρότερες από τις αντίστοιχες ακτίνες Roche (εικ. 5.48). Επομένως, το πιθανότερο σενάριο εξέλιξης είναι η περίπτωση Γ (βλ. §1.2.4).

Και οι δύο αστέρες είναι σε θέση να έχουν μαγνητική δραστηριότητα, καθώς έχουν περίβλημα μεταφοράς, επομένως, δυνητικά μπορούν να μεταβάλλουν την τετραπολική ροπή (βλ. §4.2.4) τους και προκαλέσουν μεταβολές στην τροχιακή περίοδο του συστήματος, σύμφωνα με τον μηχανισμό Applegate (1992). Όμως, υπενθυμίζεται ότι ο μηχανισμός αυτός προβλέπει και μεταβολές της συνολικής λαμπρότητας του συστήματος. Εφόσον οι παρατηρήσεις καλύπτουν ~4 yrs, ενώ η μεταβολή της περιόδου βρέθηκε να έχει περίοδο 23.5 yrs, θα έπρεπε να έχουν παρατηρηθεί μεταβολές, κάτι όμως που δεν επιβεβαιώνεται. Επιπροσθέτως, οι τιμές που προέκυψαν για τις τετραπολικές ροπές των αστέρων είναι ελαφρώς επάνω από το όριο του κριτηρίου των Lanza & Rodonò (2002). Από την άλλη πλευρά, η παρατηρούμενη φωτομετρική συνεισφορά από το πιθανό τρίτο μέλος προέκυψε $L_{3,LC}$=4.3%, ενώ η αναμενόμενη από έναν αστέρα της ΚΑ με μάζα ~0.9

$M_{\odot}$ είναι $L_{3,O-C}$~6.5%. Ποιοτικά, αλλά οριακά και ποσοτικά τα αποτελέσματα συμπίπτουν, επομένως, η ύπαρξη του τρίτου σώματος, σε συνδυασμό με την αδυναμία του μηχανισμού Applegate να περιγράψει τις μεταβολές, είναι η πλέον επικρατέστερη ερμηνεία των μεταβολών της τροχιακής περιόδου του συστήματος. Το κριτήριο της δυναμικής ευστάθειας (Harrington 1977) του τριπλού συστήματος ικανοποιείται οριακά μόνο εάν η τροχιακή κίνηση του τρίτου μέλους είναι αντίθετη από τη φορά περιστροφής των αστέρων του εκλειπτικού συστήματος.

5.11. Συγκρίσεις με θεωρητικά μοντέλα

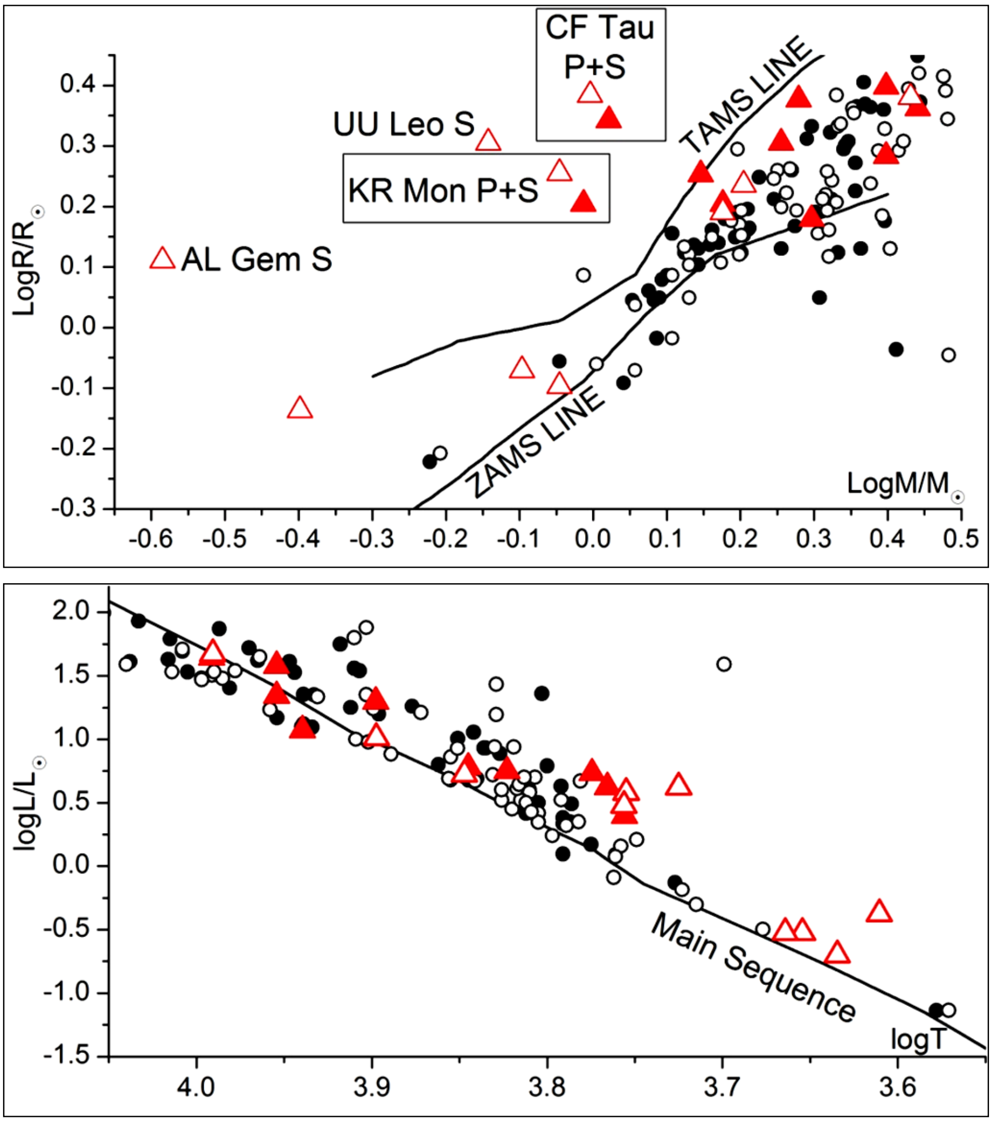
Στην παρούσα παράγραφο τοποθετούνται οι αστέρες όλων των συστημάτων, οι οποίοι αναλύθηκαν έως τώρα, σε κοινά διαγράμματα $M-R$ και Hertzsprung-Russell μαζί με το δείγμα των αποχωρισμένων, φασματοσκοπικά διπλών και εκλειπτικών συστημάτων αστέρων των İbanoğlu et al. (2006). Η σύγκριση γίνεται τόσο για να δούμε την ακρίβεια των μεθόδων που ακολουθήθηκαν για τον υπολογισμό των απόλυτων παραμέτρων των αστέρων, αλλά και να εντοπιστούν και να ερμηνευτούν τυχόν αποκλίσεις. Το δείγμα αποτελείται από μόλις 74 συστήματα, οπότε σε καμία περίπτωση δεν θεωρείται πανάκεια, αλλά όμως μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο μέτρο σύγκρισης.

Στο διάγραμμα $M-R$ φαίνεται ότι έξι αστέρες (δύο πρωτεύοντες και τέσσερις δευτερεύοντες) από τους είκοσι συνολικά που μελετήθηκαν αποκλίνουν των κατανομών του δείγματος. Το κοινό των τεσσάρων συστημάτων, στα οποία ανήκουν οι αποκλίνοντες της κατανομής αστέρες, είναι η απουσία ολικών εκλείψεων στις καμπύλες φωτός τους, κάτι που είναι πιθανόν να αμφισβητήσει τη λύση τους.

Τα συστήματα CF Tau και KR Mon έχουν και τα δύο τους μέλη εξελιγμένα στο στάδιο των υπογιγάντων, κάτι που τα κάνει ιδιαίτερα ενδιαφέροντα για περαιτέρω μελέτη. Τονίζεται ότι για αυτά τα συστήματα δεν βρέθηκε κάποια άλλη εναλλακτική φωτομετρική λύση. Επομένως, συμπεραίνεται ότι η απόκλισή τους, εάν αυτή δεν προέρχεται από κάποια λανθασμένη υπόθεση (π.χ. μάζα του πρωτεύοντα αστέρα), δεν είναι τυχαία, άρα η εξελικτική τους κατάσταση ταυτόχρονα με τη γεωμετρική κατανομή τους τα κατατάσσει σε ιδιάζοντα συστήματα.

Παρομοίως, οι δευτερεύοντες αστέρες των συστημάτων AL Gem και UU Leo είναι εξελιγμένοι. Υπενθυμίζεται ότι για τα συστήματα AL Gem και UU Leo προέκυψε λύση και στον "mode 5" (ημιαποχωρισμένο σύστημα όπου ο δευτερεύων αστέρας γεμίζει τον λοβό Roche του). Όμως, η ανάλυση των μεταβολών της τροχιακής περιόδου δεν ανέδειξε πιθανή μεταφορά μάζας. Αυτό φυσικά δεν αποτελεί και απόδειξη ότι τα συστήματα αυτά δεν είναι ημιαποχωρισμένα, αφού μεταφορά μάζας με πολύ μικρό ρυθμό δεν είναι πάντα εύκολο να εντοπιστεί. Από την άλλη πλευρά, γνωρίζοντας ότι κάποια στιγμή η μεταφορά μάζας σταματά, ενώ, όπως φαίνεται από τις τιμές των απόλυτων παραμέτρων αυτών των συστημάτων, είχε λάβει χώρα στο παρελθόν, δεν αποκλείεται καθόλου η περίπτωση κατά την οποία αυτήν τη στιγμή τα συστήματα να είναι σε φάση χαλάρωσης, με τις ακτίνες των δευτερευόντων αστέρων να μειώθηκαν (λόγω έντονης απώλειας μάζας), και τώρα να είναι μικρότερες από τις ακτίνες των λοβών Roche.

Τα υπόλοιπα έξι συστήματα φαίνεται ότι ακολουθούν καλά τις κατανομές του δείγματος και στα δύο διαγράμματα. Για τα συστήματα GSC 4589-2999 και CM Lac, υπήρχαν διαθέσιμες και οι καμπύλες ακτινικών ταχυτήτων, οπότε η ακρίβεια των αποτελεσμάτων ήταν αναμενόμενη. Οι καμπύλες φωτός των συστημάτων V405 Cep και V948 Her περιείχαν ολικές εκλείψεις, επομένως οι φωτομετρικές τους λύσεις μπορούν να θεωρηθούν ακριβείς. Τέλος, για τα συστήματα AD And και AV CMi, αν και υπήρχε έλλειψη πληροφορίας, όπως και για τα τέσσερα τα οποία αποκλίνουν της κατανομής, φαίνεται ότι τα τελικά μοντέλα περιγραφής τους είναι άκρως ρεαλιστικά, χωρίς πάντως να αποκλείονται και λύσεις με ελαφρώς διαφορετικό λόγο μαζών.



Εικόνα 5.50. Διαγράμματα $M\!-\!R$ (επάνω) και Hertzsprung-Russell (κάτω). Οι μαύροι κύκλοι αντιπροσωπεύουν τους αστέρες των αποχωρισμένων συστημάτων του δείγματος των İbanoğlu et al. (2006) και τα κόκκινα τρίγωνα τους αστέρες που αναλύθηκαν στην παρούσα διατριβή. Τα κενά σύμβολα αναφέρονται στους πρωτεύοντες (P) και τα γεμάτα στους δευτερεύοντες (S) αστέρες. Στο διάγραμμα $M\!-\!R$ σημειώνονται οι αποκλίσεις από το δείγμα.

Κοιτώντας συνολικά τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτού του κεφαλαίου φαίνεται ότι η φυσική εξέλιξη των αποχωρισμένων συστημάτων δεν είναι μονόδρομος και η μεταφορά μάζας παίζει καθοριστικό ρόλο. Για τα συστήματα που αναλύθηκαν, τα επικρατέστερα σενάρια εξέλιξης είναι οι περιπτώσεις Β ή/και Γ (βλ. §1.2.4).

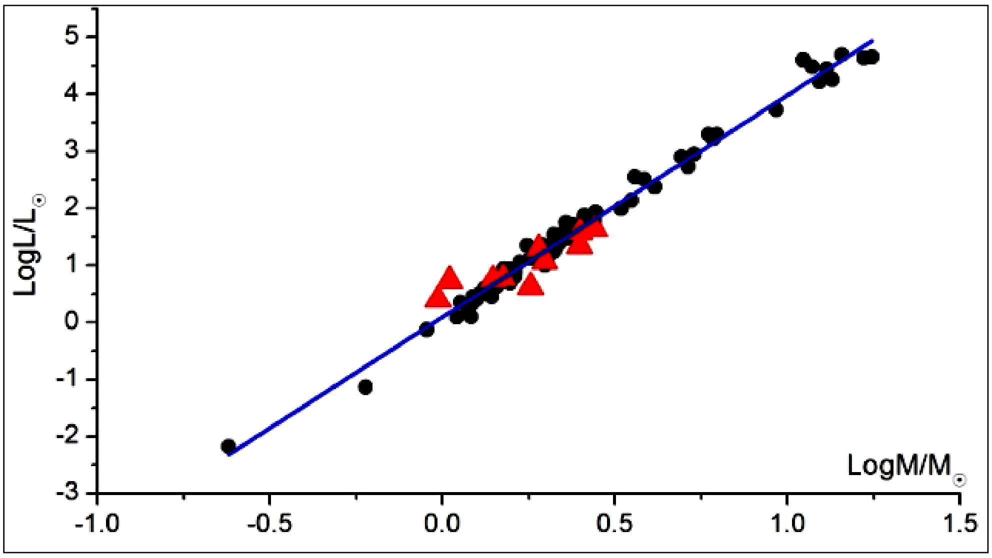
Επιπλέον, συνδυάζοντας τα αποτελέσματα των αστέρων των συστημάτων που αναλύθηκαν στην παρούσα διατριβή με αυτά των İbanoğlu et al. (2006), προκύπτουν ανανεωμένες σχέσεις μάζας-φωτεινότητας για τους πρωτεύοντες και δευτερεύοντες αστέρες των αποχωρισμένων συστημάτων.

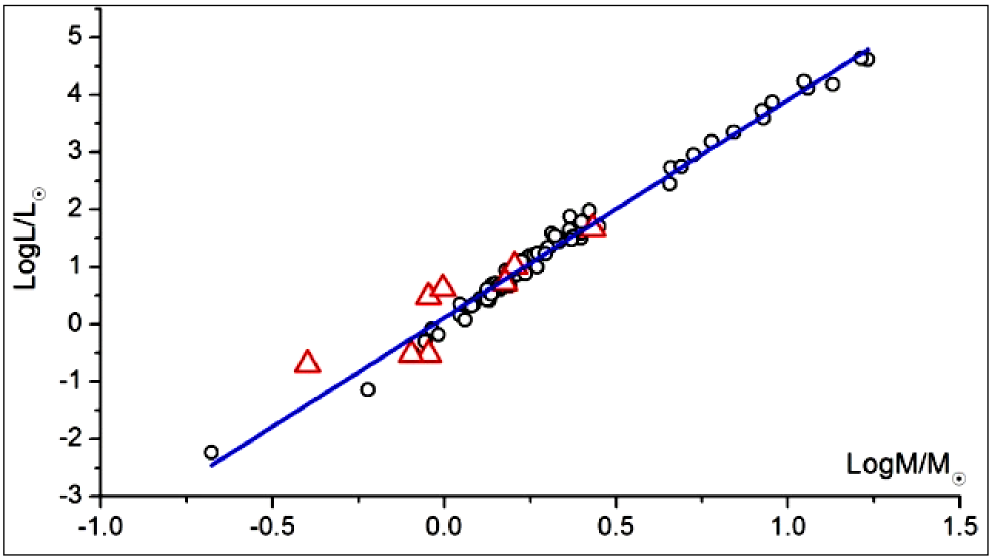
Στο ανανεωμένο δείγμα των δευτερευόντων αστέρων δεν συμπεριελήφθησαν οι δευτερεύοντες αστέρες των συστημάτων AL Gem και UU Leo, για λόγους που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Τέλος, από τις γραμμικές προσαρμογές (εικ. 5.51) με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$L_1 = M_1^{3.89(5)} \tag{5.17}$$

$$L_2 = M_2^{3.79(6)} \tag{5.18}$$

οι οποίες είναι σε πολύ καλή συμφωνία με τις αντίστοιχες των İbanoğlu et al. (2006) (βλ. σχέσεις 1.37 και 1.38).





Εικόνα 5.51. Διαγράμματα $M\!-\!L$ για τους πρωτεύοντες (επάνω) και τους δευτερεύοντες (κάτω) αστέρες αποχωρισμένων συστημάτων. Τα σύμβολα είναι τα ίδια με αυτά της εικ. 5.50. Η μπλε γραμμή αναφέρεται στην καλύτερη γραμμική προσαρμογή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Μελέτη ημιαποχωρισμένων εκλειπτικών συστημάτων

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται ποσοτικά αποτελέσματα για δώδεκα ημιαποχωρισμένα εκλειπτικά συστήματα αστέρων. Ο τρόπος επιλογής των συγκεκριμένων συστημάτων, καθώς και οι στόχοι της μελέτης είναι ίδιοι με αυτούς που παρουσιάστηκαν στην εισαγωγή του 5^{ου} κεφαλαίου της παρούσας διατριβής. Ίδιες είναι και οι τεχνικές ανάλυσης που εφαρμόστηκαν στα δεδομένα, με τη μόνη διαφορά στην επιλογή του καλύτερου "mode" στην ανάλυση των καμπυλών φωτός. Για τα συστήματα που παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο βρέθηκε ότι η καλύτερη δυνατή λύση στην ανάλυση των καμπυλών φωτός δίνεται από τον "mode 5" (ημιαποχωρισμένο σύστημα), όπου ο δευτερεύων αστέρας έχει γεμίσει τον λοβό Roche του (βλ. §4.1). Επιπροσθέτως, ο φωτομετρικός λόγος μαζών, ο οποίος υπολογίστηκε για τις περισσότερες από τις παρακάτω περιπτώσεις, μπορεί να θεωρηθεί αρκετά αξιόπιστος σύμφωνα με τους Terrell & Wilson (2005) λόγω της πλήρωσης του λοβού Roche του δευτερεύοντα αστέρα.

6.1. Το σύστημα AL Cam

Ιστορική αναδρομή

Το σύστημα ανακαλύφθηκε ως μεταβλητός από τον Strohmeier (1958b), ο οποίος δημοσίευσε την πρώτη καμπύλη φωτός βασιζόμενος σε φωτογραφικές παρατηρήσεις. Οι Quester & Braune (1965) υπολόγισαν μια ανανεωμένη εφημερίδα του συστήματος, ενώ οι Hilditch & Hill (1975) υπολόγισαν τους Strömgen δείκτες χρώματός του. Η φασματική ταξινόμηση των Hill et al. (1975) έδειξε ότι ο φασματικός τύπος του συστήματος κυμαίνεται στο εύρος A4V-A7V. Ο Srivastava (1991) μελέτησε το O−C διάγραμμα του συστήματος και κατέληξε ότι υπάρχουν μεταβολές στην περίοδό του, ενώ ο Samolyk (1996) δημοσίευσε νέα εφημερίδα. Τέλος, το σύστημα συμπεριλαμβάνεται σε λίστα υποψηφίων συστημάτων (Soydugan et al. 2006b) να περιέχουν παλλόμενο μέλος.

Οι Liakos et al. (2012a) πραγματοποίησαν νέες φωτομετρικές και φασματοσκοπικές παρατηρήσεις του συστήματος, ανέλυσαν το O−C διάγραμμά του και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι φωτομετρικές παρατηρήσεις του συστήματος έγιναν στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1) με τη χρήση του τηλεσκοπίου των 40 cm και της CCD ST-8XMEI και διήρκεσαν επτά νύκτες εντός του χρονικού διαστήματος Φεβρουάριος-Απρίλιος 2008. Στον πίνακα 6.1 δίνονται: Οι αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία (βλ. §3.1.1) και τα φαινόμενα μεγέθη τους m_V στο φίλτρο V, ο αριθμός των σημείων N ανά φίλτρο παρατήρησης και το μέσο φωτομετρικό σφάλμα τους *s.d.* εκφρασμένο σε mmag. Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\mathrm{Min.\,I} = \mathrm{HJD}\ 2454516.36690 + 1.32833^{\mathrm{d}}\ \mathrm{E} \tag{6.1}$$

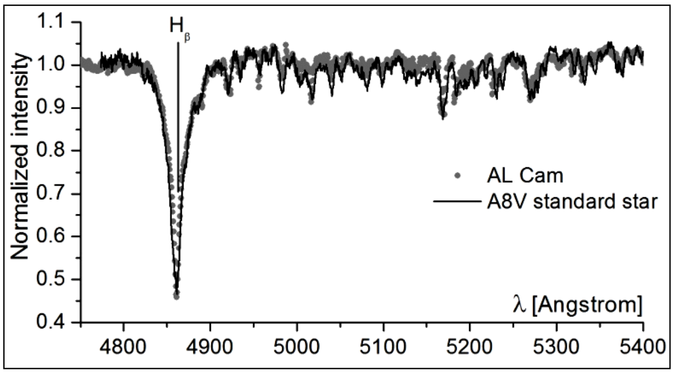
και υπολογίστηκε από τους χρόνους ελαχίστων (Πίνακας B1), οι οποίοι προέκυψαν από τα δεδομένα μας και τους πιο πρόσφατους της βιβλιογραφίας.

Πίνακας 6.1. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους.

Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για κάθε φίλτρο παρατήρησης			
AL Cam	Μεταβλητός	10.5[a]	B		V	
TYC 4556-163-1	Σύγκρισης	9.92[b]	N	s.d.	N	s.d.
TYC 4556-871-1	Ελέγχου	9.45[b]	1304	4.2	1297	4.9

[a]Watson et al. (2006), [b]Høg et al. (2000)

Η φασματοσκοπική παρατήρηση έλαβε χώρα στο Αστεροσκοπείο του Σκίνακα (βλ. §2.3.3) στις 8 Μαΐου 2009 και ελήφθη μόνο ένα φάσμα στο φασματικό εύρος 4534-5622 Å. Όμως, η χρονική στιγμή λήψης του φάσματος επιλέχθηκε προσεκτικά ώστε να αφορά ως επί το πλείστον τον πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος. Το φάσμα ελήφθη εντός της δευτερεύουσας έκλειψης, και συγκεκριμένα στη φάση 0.524 με χρόνο έκθεσης 1800 sec. Για τη φασματική ταξινόμηση συγκρίθηκε το κομμάτι του φάσματος μεταξύ 4800-5350 Å, όπου βρίσκονται η H_β και πλήθος μεταλλικών γραμμών με ικανοποιητικό S/N, με φάσματα προτύπων αστέρων. Στην εικ. 6.1 παρουσιάζεται η σύγκριση του φάσματος του AL Cam, το οποίο με ικανοποιητική προσέγγιση αφορά μόνο τον πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος, με το φάσμα του πρότυπου αστέρα, για το οποίο προέκυψε η μικρότερη τιμή των $\sum res^2$ (για λεπτομέρειες της μεθόδου βλ. §3.2.2).

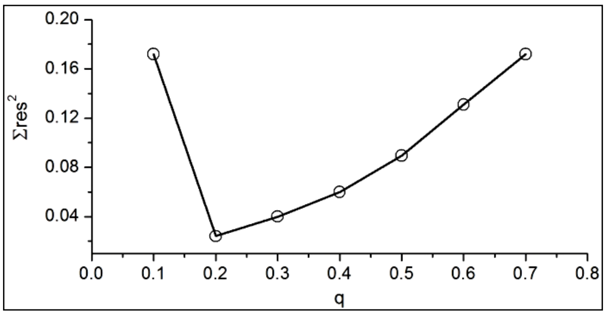


Εικόνα 6.1. Σύγκριση του σύνθετου φάσματος του συστήματος AL Cam (γκρίζα σημεία) με το φάσμα του πρότυπου αστέρα HIP 21273 (μαύρη γραμμή) φασματικού τύπου A8.

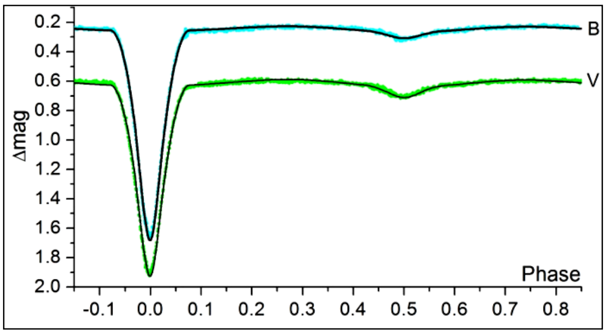
Ανάλυση των καμπυλών φωτός

Η θερμοκρασία του πρωτεύοντα αστέρα τέθηκε ίση με 7600 K, βάσει της φασματικής ταξινόμησης που παρουσιάστηκε προηγουμένως. Λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων (βλ. παρακάτω), η οποία δύναται να ερμηνευτεί με το LITE (§4.2.1), η παράμετρος της φωτομετρικής συνεισφοράς από ένα πιθανό τρίτο μέλος στο σύστημα l_3 αφέθηκε ελεύθερη προς σύγκλιση. Επιπλέον, λόγω εμφάνισης ασυμμετριών πριν και μετά τους επικλινείς κλάδους του δευτερεύοντος ελαχίστου, και βάσει της θερμοκρασίας του δευτερεύοντα αστέρα (βλ. παρακάτω), ο οποίος δύναται να έχει μαγνητική δραστηριότητα, οι παράμετροι μιας κηλίδας στην επιφάνειά του αφέθηκαν ελεύθερες προς σύγκλιση. Λόγω ανυπαρξίας φασματοσκοπικά προσδιορισμένου λόγου μαζών των αστέρων του συστήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ανίχνευσης του q (q-search - βλ. §4.1) και το αντίστοιχο διάγραμμα παρουσιάζεται στην εικ. 6.2. Στην εικ. 6.3

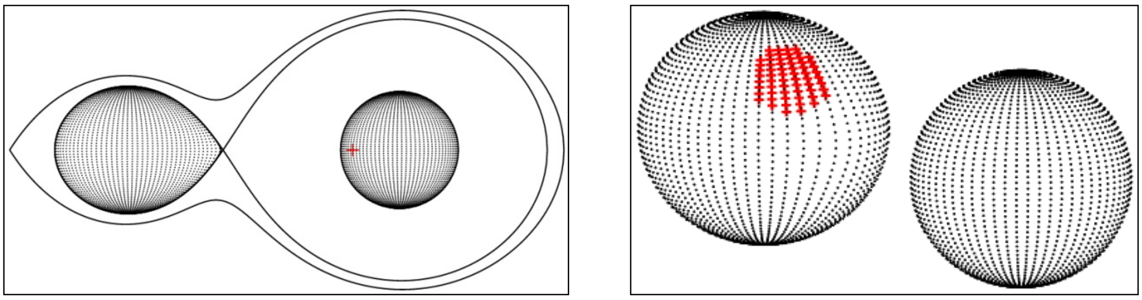
παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 6.4 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος, ενώ στον πίνακα 6.2 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος.



Εικόνα 6.1. Διάγραμμα ανίχνευσης του *q* για το σύστημα AL Cam. Η τιμή του *q* που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή των $\sum res^2$ βρέθηκε ίση με 0.2.



Εικόνα 6.2. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες φωτός στα φίλτρα *B*, *V* του συστήματος AL Cam.



Εικόνα 6.3. Η γεωμετρία Roche του συστήματος AL Cam στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό (αριστερά) και στη φάση 0.59 (δεξιά) όπου φαίνεται η ψυχρή κηλίδα στην επιφάνεια του δευτερεύοντα αστέρα.

Πίνακας 6.2. Παράμετροι του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα AL Cam.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή	
i [°]	83.3 (4)	Φίλτρο:	B	V
q_{ph}	0.21 (1)	x_1	0.568	0.491
T_1 [K]	7600 (170)	x_2	0.943	0.794
T_2 [K]	4520 (32)	L_1/L_T	0.930 (4)	0.886 (4)
Ω_1	4.83 (6)	L_2/L_T	0.070 (4)	0.114 (4)
Ω_2	2.27[a]	L_3/L_T	-	-
A_1	1[a]	Κηλίδες		
A_2	0.5[a]	Co-lat [°]	60 (11)	
g_1	1[a]	Co-long [°]	342 (8)	
g_2	0.32[a]	R [°]	18 (2)	
Σres^2	0.072	T_f (T_{sp}/T_{sur})	0.8 (1)	

[a]σταθερή τιμή

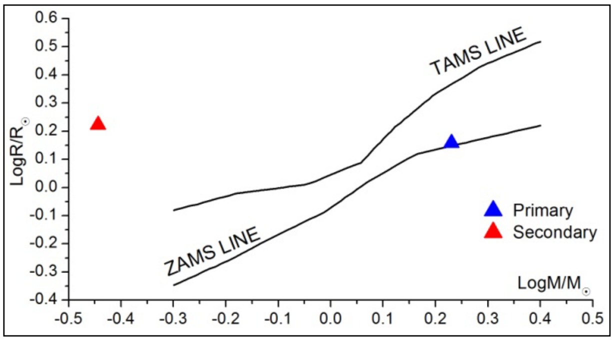
Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Η τιμή της μάζας M_1 του πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος υποτέθηκε από τον φασματικό του τύπο ως αστέρας της ΚΑ (βλ. Παρ. Ε), και οι τιμές των υπολοίπων παραμέτρων δίνονται στον πίνακα 6.3. Η εικ. 6.4 δείχνει τις θέσεις των αστέρων στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.

Πίνακας 6.3. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος AD And.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [M$_\odot$]	1.7[a]	0.36 (2)	log$g$ [cm/s^2]	4.4 (1)	3.5 (1)
R [R$_\odot$]	1.4 (1)	1.7 (1)	α [R$_\odot$]	1.1 (5)	5.5 (2)
L [L$_\odot$]	6 (1)	1.0 (2)	M$_{bol}$ [mag]	3 (1)	5 (1)

[a]υπόθεση



Εικόνα 6.4. Θέσεις των αστέρων του συστήματος AL Cam (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

Ανάλυση των μεταβολών της τροχιακής περιόδου

Για την κατασκευή του O−C διαγράμματος του συστήματος AL Cam χρησιμοποιήθηκαν 143 χρόνοι ελαχίστων, 110 εκ των οποίων προέκυψαν από οπτικές παρατηρήσεις, 3 από φωτογραφικές, 5 από φωτοηλεκτρικές και 25 από CCD παρατηρήσεις, οι οποίοι καλύπτουν χρονικό εύρος από το 1965 έως και σήμερα. Υπάρχουν και άλλοι χρόνοι ελαχίστων από φωτογραφικές παρατηρήσεις πριν το 1965, εντούτοις, λόγω πολύ μεγάλης διασποράς δεν χρησιμοποιήθηκαν. Το O−C διάγραμμα του συστήματος που περιλαμβάνει όλα τα φωτομετρικά ελάχιστα είναι διαθέσιμο σε βάση δεδομένων[1] O−C διαγραμμάτων (Kreiner et al. 2001). Ως αρχική παράμετρος χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω αστρονομική εφημερίδα (Kreiner et al. 2001):

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2426411.5337 + 1.3283318^{\mathrm{d}}\mathrm{E} \quad (6.2)$$

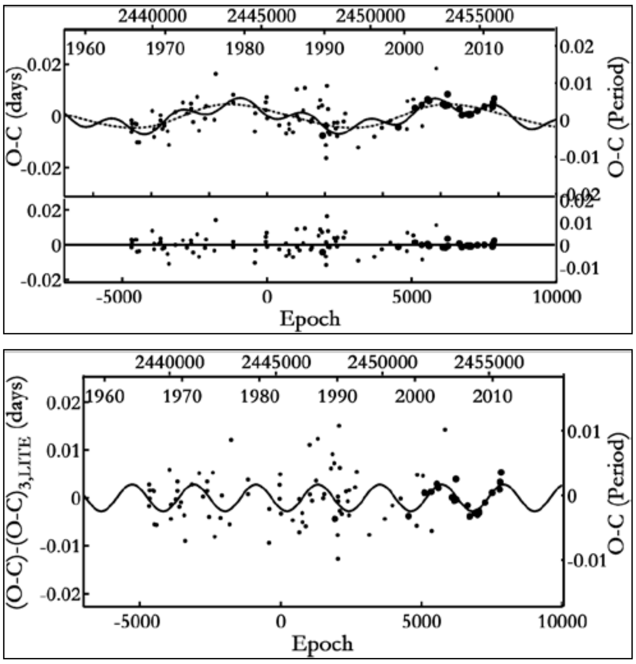
Αρχικά, ως συνάρτηση προσαρμογής δοκιμάστηκε η παραβολή, λόγω πιθανής μεταφοράς μάζας, και μια καμπύλη LITE, λόγω της εμφανούς περιοδικής κατανομής των O−C σημείων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο συντελεστής της παραβολής είναι αμελητέος, επομένως δεν συμπεριλαμβάνεται στο τελικό μοντέλο. Όμως, μετά την αφαίρεση της θεωρητικής καμπύλης, τα O−C σημεία της τελευταίας δεκαετίας έδειχναν και πάλι μια περιοδική κατανομή. Επομένως, μια δεύτερη καμπύλη LITE προσαρμόστηκε για να περιγράψει αυτήν τη μεταβολή. Εφόσον ο δευτερεύων αστέρας του συστήματος είναι ψυχρός, υπό την έννοια ότι μπορεί να έχει περίβλημα μεταφοράς που θα μπορούσε να δημιουργήσει μεταβολές στην τετραπολική ροπή (βλ. §4.2.4),

[1]http://www.as.up.krakow.pl/o-c/data/getdata.php3?AL%20cam

ελέγχθηκε η πιθανή ύπαρξη του μηχανισμού Applegate (1992). Η μέθοδος ανάλυσης και η επεξήγηση των συμβόλων αναφέρονται στην παράγραφο 4.2. Ο πίνακας 6.4 περιέχει τις τιμές των παραμέτρων των θεωρητικών καμπυλών, ενώ στην εικ. 6.5 παρουσιάζεται η προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης στα O−C σημεία.

Πίνακας 6.4. Παράμετροι της O−C ανάλυσης του συστήματος AL Cam.

Παράμετρος	Τιμή	
Εκλειπτικό σύστημα		
JD_0 [HJD−2400000]	45252.593 (1)	
P [d]	1.3283300 (2)	
	3^o σώμα	4^o σώμα
T_0 [HJD−2400000]	51386 (2000)	53677 (7000)
ω [°]	357 (67)	192 (82)
A [d]	0.005 (1)	0.002 (1)
P [yr]	28 (2)	8.0 (2)
e	0.20 (3)	0.04 (1)
f(m) [$M_\odot$]	0.0010 (3)	0.0010 (1)
M_{min} [$M_\odot$]	0.15 (1)	0.18 (1)
Μεταβολή της τετραπολικής ροπής		
ΔQ [$\times 10^{50}$ g cm^2]	0.48	0.68
Σres^2	0.003	



Εικόνα 6.5. Επάνω: Προσαρμογή δύο θεωρητικών καμπυλών LITE (η διακεκομμένη γραμμή αναφέρεται στον πρώτο όρο LITE και η συνεχής στον δεύτερο) στα O−C σημεία του συστήματος AL Cam (επάνω) και τα υπόλοιπα (residuals) μετά την αφαίρεση της συνολικής συνάρτησης (κάτω). Κάτω: Προσαρμογή της δεύτερης καμπύλης LITE στα O−C υπόλοιπα έπειτα από την αφαίρεση της πρώτης καμπύλης LITE.

Συμπεράσματα

Όπως αναμένεται για ένα κλασσικό σύστημα τύπου Algol, ο δευτερεύων αστέρας είναι πολύ πιο εξελιγμένος από τον πρωτεύοντα, αν και έχει πολύ μικρότερη τιμή μάζας. Από την άλλη μεριά, ο πρωτεύων αστέρας έχει ακτίνα αρκετά μικρότερη από την ακτίνα Roche του. Από την O−C ανάλυση δεν εντοπίστηκε η μεταφορά μάζας, επομένως είτε στο σύστημα έχει σταματήσει αυτή η διαδικασία είτε έχει πλέον πολύ μικρό ρυθμό για να εντοπιστεί σε ένα εύρος ~40 ετών που καλύπτουν οι χρόνοι ελαχίστων. Το πιθανότερο σενάριο εξέλιξης του συστήματος είναι η περίπτωση Β (βλ. §1.2.4).

Η φασματική ταξινόμηση ως τύπου Α8 του πρωτεύοντα αστέρα είναι σε οριακή συμφωνία με τα αποτελέσματα των Hill et al. (1975). Όμως, η δική μας μέθοδος βασίζεται εξ ολοκλήρου σε φασματοσκοπικά δεδομένα. Επίσης, το φάσμα ελήφθη κατά τη δευτερεύουσα έκλειψη του συστήματος, η οποία αν και δεν είναι ολική αποκόπτει το μεγαλύτερο μέρος του φωτός του δευτερεύοντα αστέρα. Στα μέγιστα της καμπύλης φωτός, ο δευτερεύων συνεισφέρει μόλις ~9% στη συνολική φωτεινότητα, ποσοστό το οποίο είναι πολύ μικρότερο κατά τη δευτερεύουσα έκλειψη, επομένως, πρακτικά, το φάσμα μας αναφέρεται στον πρωτεύοντα αστέρα.

Το πιο ενδιαφέρον σημείο της ανάλυσης αυτού συστήματος είναι η ερμηνεία των δύο περιοδικών μεταβολών της τροχιακής περιόδου. Καμία από τις δύο μεταβολές δεν δύναται να ερμηνευτεί με τον μηχανισμό Applegate (1992), καθώς η τιμή της τετραπολικής ροπής του δευτερεύοντα αστέρα για καθέναν από τους δύο περιοδικούς όρους δεν ικανοποιεί το κριτήριο των Lanza & Rodonò (2002) (βλ. §4.2.4). Επομένως, το LITE φαίνεται να είναι ο μοναδικός υποψήφιος μηχανισμός. Όμως, στην ανάλυση των καμπυλών φωτός, αν και δοκιμάστηκε, δεν προέκυψε επιπρόσθετη φωτομετρική συνεισφορά. Εντούτοις, αυτό δεν πρέπει να φαίνεται παράδοξο, εάν ληφθούν υπόψη οι ελάχιστες μάζες των επιπλέον αστέρων (M_3~0.15 $M_\odot$ και M_4~0.18 $M_\odot$) που προέκυψαν από την O−C ανάλυση και συγκριθούν με αυτές των μελών του εκλειπτικού συστήματος. Θεωρώντας ότι αυτοί οι δύο επιπρόσθετοι αστέρες ανήκουν στην ΚΑ,, τότε υπολογίζεται ότι θα έπρεπε να συνεισφέρουν στη συνολική φωτεινότητα του συστήματος κατά μόλις $L_{3,4,O-C}$~0.1%, κάτι που είναι απίθανο να εντοπιστεί τόσο φωτομετρικά όσο και φασματοσκοπικά. Επιπλέον, και για τους δύο αστέρες βρέθηκε ότι ικανοποιούν το κριτήριο της δυναμικής ευστάθειας του Harrington (1977).

Λόγω της υποψηφιότητας του συστήματος για αναπάλσεις (Soydugan et al. 2006b), πραγματοποιήθηκε ανάλυση Fourier (§4.3) στα υπόλοιπα της αφαίρεσης των θεωρητικών από τις παρατηρούμενες καμπύλες φωτός. Όμως, δεν προέκυψαν συχνότητες ανάπαλσης μεταξύ 3-80 c/d και με S/N>4 και ως εκ τούτου συμπεραίνεται ότι ο θερμότερος αστέρας δεν βρίσκεται σε στάδιο ανάπαλσης.

6.2. Το σύστημα DP Cep

Ιστορική αναδρομή

Το σύστημα DP Cep αναγνωρίστηκε ως μεταβλητός από τον Ashbrook (1952), ο οποίος προσδιόρισε και την περίοδό του. Οι Rosino et al. (1976) βασιζόμενοι σε φωτογραφικές παρατηρήσεις δημοσίευσαν την πρώτη καμπύλη φωτός του συστήματος, υπολόγισαν ακριβέστερα την περίοδό του και σύμφωνα με τον δείκτη χρώματος $B–V$ το ταξινόμησαν ως τύπου F0. Οι Budding et al. (2004) υπολόγισαν τον λόγο μαζών του συστήματος (0.6) και ταξινόμησαν τα μέλη του ως F0 και G0, για τον πρωτεύοντα και τον δευτερεύοντα, αντίστοιχα. Η πρώτη CCD καμπύλη φωτός παρατηρήθηκε από τον δορυφόρο "INTEGRAL" (INTErnational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory) mission (Mas-Hesse et al. 2004) χρησιμοποιώντας το όργανο OMC (Optical Monitoring Camera), ενώ ο Zasche (2009) παρουσίασε μια προκαταρκτική ανάλυση αυτής της καμπύλης φωτός.

Οι Liakos et al. (2011a) ανέλυσαν εκ νέου τις καμπύλες φωτός του συστήματος, βασιζόμενοι σε στοιχεία τα οποία αφορούν στην ύπαρξη ενός τρίτου μέλους, υπολόγισαν τις απόλυτες παραμέτρους των μελών του και ερμήνευσαν τις μεταβολές τις τροχιακής περιόδου του μέσω της ανάλυσης του O C διαγράμματός του. Τα αποτελέσματα δίνονται στις επόμενες παραγράφους.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

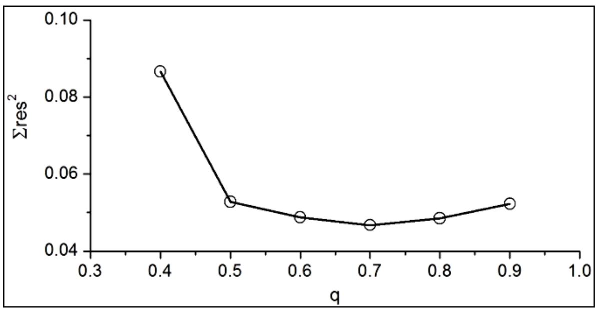
Λόγω της καλής ποιότητας των δεδομένων από τον δορυφόρο INTEGRAL (Mas-Hesse et al. 2004) και της ελεύθερης διαθεσιμότητάς τους δεν έγιναν νέες παρατηρήσεις για το σύστημα, και χρησιμοποιήθηκαν οι υπάρχουσες, οι οποίες έλαβαν χώρα στο διάστημα Ιανουάριος 2003-Αύγουστος 2006. Σε αυτό το πρόγραμμα παρατηρήσεων χρησιμοποιήθηκε μόνο το φωτομετρικό φίλτρο *V*, κάτι όμως που δεν επηρεάζει σημαντικά την παρακάτω ανάλυση. Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2453357.48665 + 1.26997^{\mathrm{d}}\ \mathrm{E} \tag{6.3}$$

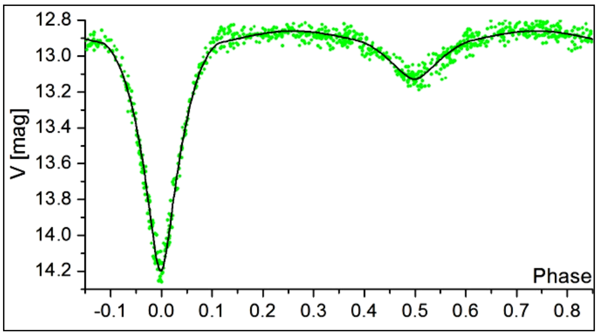
και υπολογίστηκε από τους πιο πρόσφατους χρόνους ελαχίστων της βιβλιογραφίας.

Ανάλυση των καμπυλών φωτός

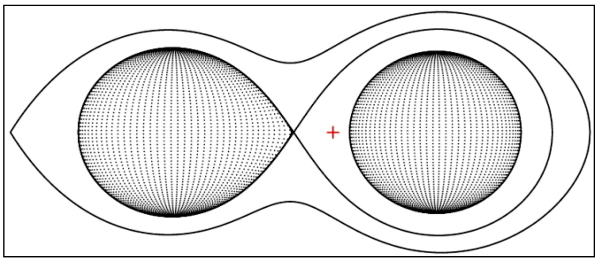
Η θερμοκρασία του πρωτεύοντα αστέρα τέθηκε ίση με 7300 K, βάσει του φασματικού τύπου του συστήματος. Λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων (βλ. παρακάτω), πιθανόν προερχόμενη από την ύπαρξη τρίτου μέλους, η παράμετρος της φωτομετρικής συνεισφοράς από ένα επιπλέον μέλος στο σύστημα l_3 αφέθηκε ελεύθερη προς σύγκλιση. Λόγω έλλειψης φασματοσκοπικού λόγου μαζών των αστέρων του συστήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ανίχνευσης του *q* (*q*-search - βλ. §4.1) και το αντίστοιχο διάγραμμα παρουσιάζεται στην εικ. 6.6. Στην εικ. 6.7 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 6.8 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος, ενώ στον πίνακα 6.5 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος.



Εικόνα 6.6. Διάγραμμα ανίχνευσης του *q* για το σύστημα DP Cep. Η τιμή του *q* που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή των $\sum \mathrm{res}^2$ βρέθηκε ίση με 0.7.



Εικόνα 6.7. Θεωρητική (συνεχής γραμμή) και παρατηρούμενη (σημεία) καμπύλη φωτός του συστήματος DP Cep.



Εικόνα 6.8. Η γεωμετρία Roche του συστήματος DP Cep στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό.

Πίνακας 6.5. Παράμετροι του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα DP Cep.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
i [°]	85.2 (2)	A_1	1^a	x_1	0.498
q_{ph}	0.65 (2)	A_2	0.5^a	x_2	0.712
T_1 [K]	$7300^{a,b}$	g_1	1^a	L_1/L_T	0.59 (2)
T_2 [K]	5049 (42)	g_2	0.32^a	L_2/L_T	0.36 (5)
Ω_1	3.87 (3)			L_3/L_T	0.05 (1)
Ω_2	3.16			$\sum res^2$	0.953

[a]σταθερή τιμή, [b]υπόθεση

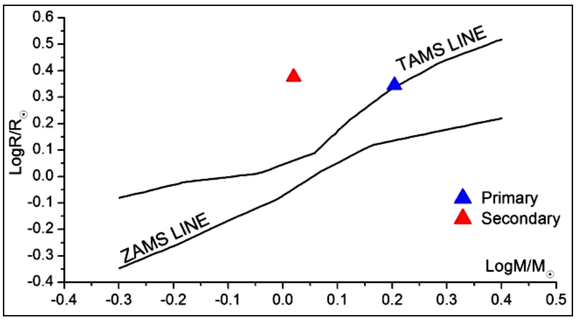
Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Η τιμή της μάζας M_1 του πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος υποτέθηκε από τον φασματικό του τύπο ως αστέρας της ΚΑ (βλ. Παρ. Ε) και δίνεται μαζί με τις τιμές των υπολοίπων παραμέτρων στον πίνακα 6.6. Η εικ. 6.9 δείχνει τις θέσεις των αστέρων στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.

Πίνακας 6.6. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος DP Cep.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [$M_\odot$]	1.6^a	1.05 (3)	log$g$ [cm/s^2]	3.95 (5)	3.70 (5)
R [$R_\odot$]	2.2 (1)	1.79 (4)	α [$R_\odot$]	2.8 (4)	4.22 (3)
L [$L_\odot$]	12 (1)	3.3 (4)	M_{bol} [mag]	2 (1)	3 (2)

[a]υπόθεση



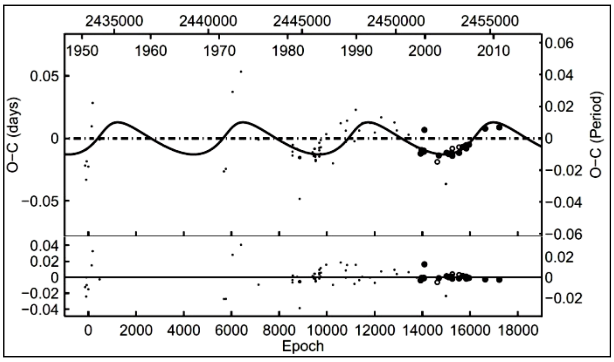
Εικόνα 6.9. Θέσεις των αστέρων του συστήματος DP Cep (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

Ανάλυση των μεταβολών της τροχιακής περιόδου

Το O−C διάγραμμα του συστήματος περιέχει σε 78 χρόνους ελαχίστων, 44 εκ των οποίων προέκυψαν από οπτικές, 12 από φωτογραφικές και 22 από CCD παρατηρήσεις καλύπτουν χρονικό διάστημα ~60 έτη. Ως αρχική παράμετρος χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω αστρονομική εφημερίδα (Kreiner et al. 2001):

$$\mathrm{Min.\,I} = \mathrm{HJD}\ 2433622.268 + 1.26996323^{\mathrm{d}}\mathrm{E} \tag{6.4}$$

Λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων, θεωρητικά μπορεί τόσο ο μηχανισμός Applegate (1992) (βλ. §4.2.4), λόγω του φασματικού τύπου του δευτερεύοντα αστέρα, όσο και το LITE (βλ. §4.2.1) να περιγράψουν τις μεταβολές της τροχιακής περιόδου. Επομένως, μια περιοδική συνάρτηση LITE προσαρμόστηκε στα O−C σημεία (εικ. 6.10) και τα αποτελέσματα και για τους δύο μηχανισμούς δίνονται στον πίνακα 6.7.



Εικόνα 6.10. Προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης του LITE στα O−C σημεία του συστήματος DP Cep (επάνω) και τα υπόλοιπα (residuals) μετά την αφαίρεση της θεωρητικής καμπύλης (κάτω).

Πίνακας 6.7. Παράμετροι της O−C ανάλυσης του συστήματος DP Cep.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
Εκλειπτικό σύστημα		3^{o} σώμα	
JD_0 [HJD−2400000]	33622.279 (5)	P_3 [yr]	18.3 (4)
P [d]	1.2699625 (4)	e_3	0.4 (3)
Μεταβολή της τετραπολικής ροπής		ω_3 [°]	33 (36)
ΔQ [$\times 10^{50}$ g cm^2]	6.6	$f(m_3)$ [$M_\odot$]	0.040 (1)
LITE		$M_{3,min}$ [$M_\odot$]	0.77 (1)
T_0 [HJD−2400000]	47861 (613)		
A [d]	0.013 (2)	Σres^2	0.015

Συμπεράσματα

Το σύστημα αποτελείται από δύο ελαφρά εξελιγμένους αστέρες. Συγκεκριμένα, ο δευτερεύων αστέρας είναι στο στάδιο των υπογιγάντων, ενώ ο πρωτεύων στα όρια της TAMS. Λόγω της διαφοράς στις τιμές των μαζών τους συμπεραίνεται ότι κατά το παρελθόν πρέπει να είχε γίνει μεταφορά μάζας από τον δευτερεύοντα στον πρωτεύοντα, καθώς ο μικρότερης μάζας αστέρας είναι ελαφρώς πιο εξελιγμένος. Αν και το σύστημα μπορεί να θεωρηθεί κλασσικός Algol, εντούτοις, δεν εντοπίστηκαν ίχνη παρούσας μεταφοράς μάζας στο σύστημα από την O−C ανάλυση. Φυσικά, αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί είτε με μικρό ρυθμό μεταφοράς μάζας είτε με το σενάριο της παύσης της. Όμως, ο πρωτεύων αστέρας, λόγω εξέλιξης, αναμένεται να γεμίσει τον λοβό Roche του, επομένως, μελλοντικά, και λαμβάνοντας υπόψη ότι ο δευτερεύων έχει ήδη γεμίσει τον δικό του λοβό Roche, οι αστέρες αναμένεται να έρθουν σε επαφή.

Στην ανάλυση των καμπυλών φωτός εντοπίστηκε πιθανή φωτομετρική συνεισφορά $L_{3,LC}$~5%, ενώ αν θεωρήσουμε ότι ο τρίτος αστέρας ανήκει στην ΚΑ και σύμφωνα με την ελάχιστη μάζα που υπολογίστηκε, τότε αναμένεται μια συνεισφορά της τάξης του

$L_{3,O-C}$~2.5%, τιμή πολύ κοντά στην παρατηρούμενη. Αυτή η μικρή διαφορά μπορεί να δικαιολογηθεί με την μη παραλληλία μεταξύ των τροχιακών επιπέδων του τρίτου σώματος και του εκλειπτικού συστήματος γύρω από το κοινό κέντρο μάζας, αλλά αυτά να σχηματίζουν γωνία i_3~65°, τιμή η οποία σύμφωνα με τη συνάρτηση μάζας προσδίδει μια μάζα για το τρίτο μέλος ίση με ~0.95 $M_{\odot}$. Επιπροσθέτως, η δυναμική ευστάθεια του συστήματος ελέγχθηκε και βρέθηκε να ικανοποιεί το κριτήριο του Harrington (1977).

Ωστόσο, βρέθηκε ότι και η τιμή της τετραπολικής ροπής του δευτερεύοντα αστέρα είναι ικανή να μεταβάλλει περιοδικά την τροχιακή περίοδο του συστήματος. Όμως καθότι οι παρατηρήσεις καλύπτουν μεγάλο χρονικό εύρος, εάν λάμβανε χώρα ο μηχανισμός Applegate (1992), τότε θα έπρεπε να παρατηρούνταν και φωτομετρικές μεταβολές στην καμπύλη φωτός, κάτι, όμως που δεν συνέβη.

6.3. Το σύστημα EG Cep

Ιστορική αναδρομή

Η μεταβλητότητα του συστήματος ανακαλύφθηκε από τον Strohmeier (1958a). Φωτοηλεκτρικές καμπύλες φωτός έχουν παρατηρηθεί από τους Geyer (1961), Wood (1971), Van der Wal et al. (1972), Kałużny & Semeniuk (1984), Erdem et al. (1993), Chochol et al. (1998) και Erdem et al. (2005), και τα αποτελέσματα έχουν δείξει ότι πρόκειται για ημιαποχωρισμένο σύστημα. Φασματοσκοπικές παρατηρήσεις έχουν γίνει από τους Etzel & Olson (1993), οι οποίοι υπολόγισαν την ταχύτητα ιδιοπεριστροφής του πρωτεύοντα αστέρα και από τους Rucinski et al. (2008), οι οποίοι υπολόγισαν τον φασματοσκοπικό λόγο μαζών του συστήματος (q_{sp}=0.465 (5)). Ο φασματικός τύπος του συστήματος κυμαίνεται μεταξύ A2-A7, σύμφωνα με τις προηγούμενες μελέτες. Μελέτη της τροχιακής περιόδου έχει γίνει από τους Ahnert (1975), Hopp et al. (1983), Kałużny & Semeniuk (1984), Wolf & Diethelm (1992), Erdem et al. (1993), Chochol et al. (1998), Erdem et al. (2005) και Zhu et al. (2009). Τα αποτελέσματα από όλες σχεδόν τις παραπάνω εργασίες έδειξαν μια αύξηση της περιόδου του συστήματος, η οποία ερμηνεύεται με τον μηχανισμό μεταφοράς μάζας από τον δευτερεύοντα προς τον πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος, ενώ μόνο οι Erdem et al. (2005) και οι Zhu et al. (2009) κατάφεραν να διακρίνουν την ημιτονοειδή συμπεριφορά των O−C σημείων, την οποία και ερμήνευσαν ως ύπαρξη τρίτου μέλους στο σύστημα με ελάχιστη μάζα ~0.11 $M_{\odot}$. Το σύστημα είναι υποψήφιο να περιέχει τόσο τρίτο μέλος (Hoffman et al. 2006) όσο και παλλόμενο συνοδό (Soydugan et al. 2006b). Οι Vamvatira-Nakou et al. (2008) και οι Pazhouhesh et al. (2010), βάσει νέων φωτομετρικών CCD παρατηρήσεων, έλαβαν υπόψη τους την πιθανότητα ύπαρξης τρίτου μέλους στην ανάλυση των καμπυλών φωτός.

Στην παρούσα ανανεωμένη ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες καμπύλες φωτός με αυτές των Vamvatira-Nakou et al. (2008) (Liakos, A-co-author) και Pazhouhesh et al. (2010) (Liakos, A-co-author), αλλά ελήφθησαν υπόψη τόσο ο φασματοσκοπικός λόγος μαζών όσο και η φασματική ταξινόμηση των Rucinski et al. (2008). Επιπροσθέτως, υπολογίστηκαν οι απόλυτες παράμετροι των αστέρων μελών και αναλύθηκε εκ νέου το O−C διάγραμμα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι παρατηρήσεις έλαβαν χώρα στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1) με τη χρήση του τηλεσκοπίου των 40 cm και της CCD ST-

8XMEI και διήρκεσαν επτά νύκτες μεταξύ Ιουνίου-Αυγούστου 2007. Στον πίνακα 6.8 δίνονται: Οι αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία (βλ. §3.1.1) και τα φαινόμενα μεγέθη τους m_V στο φίλτρο V, ο αριθμός των σημείων N ανά φίλτρο παρατήρησης και το μέσο φωτομετρικό σφάλμα τους *s.d.* εκφρασμένο σε mmag. Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\mathrm{Min.\,I} = \mathrm{HJD}\ 2454264.5537 + 0.54462^{\mathrm{d}}\ \mathrm{E} \qquad (6.5)$$

και υπολογίστηκε από τους χρόνους ελαχίστων (Πίνακας Β1), οι οποίοι προέκυψαν από τα δεδομένα μας και τους πιο πρόσφατους της βιβλιογραφίας.

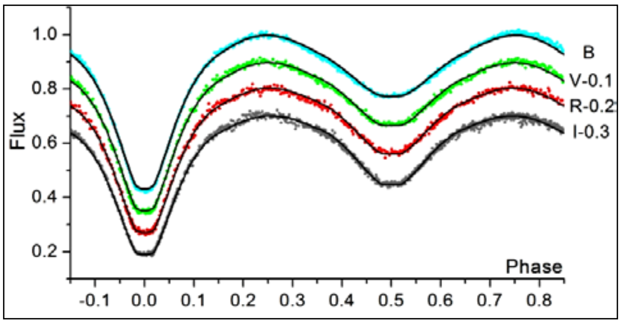
Πίνακας 6.8. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους.

Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για κάθε φίλτρο παρατήρησης							
EG Cep	Μεταβλητός	10.21[a]	B		V		R		I	
TYC 4585-413-1	Σύγκρισης	9.62[b]	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.
TYC 4585-165-1	Ελέγχου	11.24[c]	741	5.7	760	6.4	760	6.8	755	6.4

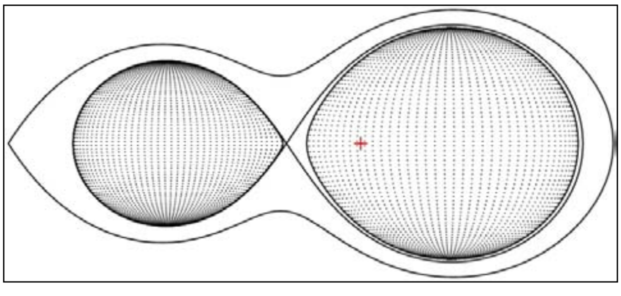
[a]Watson et al. (2006), [b]Høg et al. (2000), [c]Zacharias et al. (2004)

Ανάλυση των καμπυλών φωτός

Η θερμοκρασία του πρωτεύοντα αστέρα τέθηκε ίση με 7800 K (Rucinski et al. 2008). Λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων (βλ. παρακάτω), η οποία δύναται να προκαλείται από τρίτο μέλος στο σύστημα, η παράμετρος της φωτομετρικής συνεισφοράς από ένα επιπλέον μέλος στο σύστημα l_3 αφέθηκε ελεύθερη προς σύγκλιση. Ο φασματοσκοπικός λόγος μαζών χρησιμοποιήθηκε ως αρχική τιμή και μετά αφέθηκε ελεύθερος να συγκλίνει, πάντα όμως σε τιμή μέσα στα όρια του σφάλματός του. Στην εικ. 6.11 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 6.12 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος, ενώ στον πίνακα 6.9 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος.



Εικόνα 6.11. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες φωτός στα φίλτρα B, V, R, I του συστήματος EG Cep.



Εικόνα 6.12. Η γεωμετρία Roche του συστήματος EG Cep στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό.

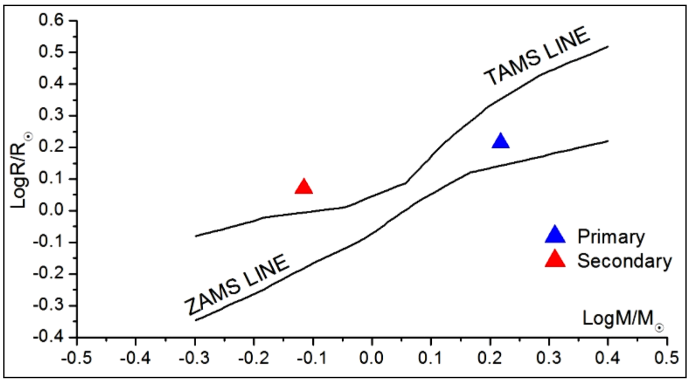
Πίνακας 6.9. Παράμετροι του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα EG Cep.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή			
i [°]	86.6 (6)	Φίλτρο:	B	V	R	I
q_{ph}	0.46 (1)	x_1	0.603	0.527	0.449	0.363
T_1 [K]	$7800^{a,b}$	x_2	0.827	0.684	0.591	0.496
T_2 [K]	5231 (7)	L_1/L_T	0.938 (2)	0.912 (2)	0.892 (2)	0.860 (2)
Ω_1	2.86 (1)	L_2/L_T	0.062 (1)	0.088 (1)	0.108 (1)	0.133 (2)
Ω_2	2.80^a	L_3/L_T	-	-	-	0.008 (2)
A_1	1^a	$<L_3/L_T>$ (%)	0.20 (4)			
A_2	0.5^a	K_1^b [km/sec]	111 (1)			
g_1	1^a	K_2^b [km/sec]	239 (1)			
g_2	0.32^a	Σres^2	0.085			

[a]σταθερή τιμή, [b]Rucinski et al. (2008)

Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Στον πίνακα 6.10 δίνονται οι απόλυτες παράμετροι των αστέρων-μελών και η εικ. 6.13 δείχνει τις θέσεις τους στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.



Εικόνα 6.13. Θέσεις των αστέρων του συστήματος EG Cep (σύμβολα) στο διάγραμμα M–R.

Πίνακας 6.10. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος EG Cep.

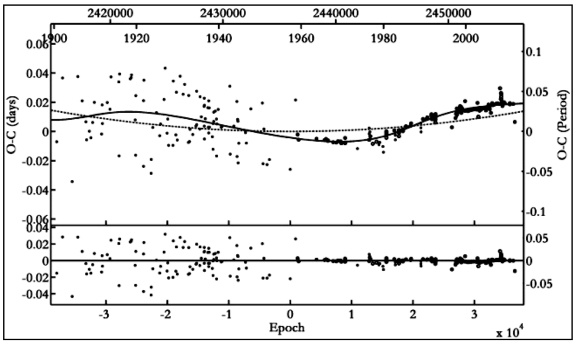
Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [$M_\odot$]	1.7 (2)	0.8 (2)	log$g$ [cm/s^2]	4.2 (1)	4.2 (1)
R [$R_\odot$]	1.64 (4)	1.18 (3)	α [$R_\odot$]	1.19 (4)	2.57 (9)
L [$L_\odot$]	8.9 (5)	0.9 (1)	M_{bol} [mag]	2.4 (3)	4.8 (3)

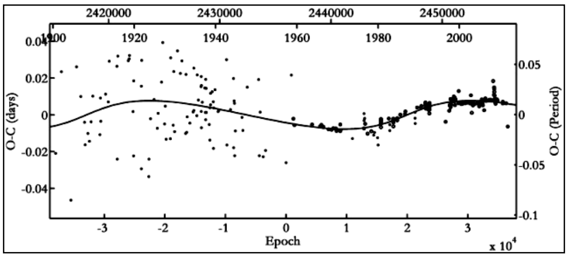
Ανάλυση των μεταβολών της τροχιακής περιόδου

Το O−C διάγραμμα του EG Cep περιέχει 284 χρόνους ελαχίστων, 119 εκ των οποίων προέκυψαν από φωτογραφικές, 86 από φωτοηλεκτρικές και 79 από CCD παρατηρήσεις και καλύπτουν χρονικό εύρος από το 1900 έως και σήμερα. Υπάρχουν και άλλοι χρόνοι ελαχίστων από οπτικές παρατηρήσεις, αλλά δεν λήφθηκαν υπόψη καθώς δεν καλύπτουν κάποιο χρονικό εύρος στο οποίο δεν έχουμε πληροφορία από άλλες μεθόδους παρατήρησης και γενικά θεωρούνται αναξιόπιστα. Ωστόσο, το O−C διάγραμμα του συστήματος που περιλαμβάνει όλα τα φωτομετρικά ελάχιστα είναι διαθέσιμο σε βάση δεδομένων[1] O−C διαγραμμάτων (Kreiner et al. 2001). Ως αρχική παράμετρος χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω αστρονομική εφημερίδα (Kreiner et al. 2001):

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2445580.558 + 0.5446215^{\mathrm{d}}\mathrm{E} \tag{6.6}$$

Αρχικά, ως συνάρτηση προσαρμογής δοκιμάστηκε η παραβολή, λόγω πιθανής μεταφοράς μάζας, και μια καμπύλη LITE, λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων, η οποία είναι ιδιαίτερα εμφανής στα πιο σύγχρονα O−C σημεία. Εφόσον ο δευτερεύων αστέρας του συστήματος λόγω θερμοκρασίας δύναται να έχει περίβλημα μεταφοράς που θα μπορούσε να δημιουργήσει μεταβολές στην τετραπολική ροπή (βλ. §4.2.4), ελέγχθηκε η πιθανή ύπαρξη του μηχανισμού Applegate (1992). Η μέθοδος ανάλυσης και η επεξήγηση των συμβόλων αναφέρονται στην παράγραφο 4.2. Ο πίνακας 6.11 περιέχει τις τιμές των παραμέτρων των θεωρητικών καμπυλών, ενώ στην εικ. 6.14 παρουσιάζεται η προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης στα O−C σημεία.





Εικόνα 6.14. Αριστερά: Προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης LITE και μιας παραβολής (συνεχής γραμμή) στα O−C σημεία του συστήματος EG Cep (επάνω) και τα υπόλοιπα (residuals) μετά την αφαίρεση της συνολικής συνάρτησης (κάτω). Η διακεκομμένη γραμμή αναφέρεται στην παραβολή. Δεξιά: Προσαρμογή της καμπύλης LITE στα O−C υπόλοιπα έπειτα από την αφαίρεση της παραβολής.

Πίνακας 6.11. Παράμετροι της O−C ανάλυσης του συστήματος EG Cep.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
Εκλειπτικό σύστημα		3ο σώμα	
JD_0 [HJD−2400000]	35956.544 (1)	ω_3 [°]	0 (30)
P [d]	0.5446213 (4)	P_3 [yr]	79 (3)
C_2 [$\times10^{-10}$ d/cycle]	0.096 (1)	e_3	0.3 (2)
$\dot{P}$ [$\times10^{-7}$ d/yr]	0.128 (1)	$f(m_3)$ [$M_\odot$]	0.0005 (1)
$\dot{M}_{tr}$ [$\times10^{-8}$ $M_\odot$/yr]	1.110 (1)	$M_{3,min}$ [$M_\odot$]	0.14 (1)
LITE		Μεταβολή της τετραπολικής ροπής	
T_0 [HJD−2400000]	75675 (2300)	ΔQ [$\times10^{50}$ g cm^2]	0.37
A [d]	0.008 (1)	Σres^2	0.161

Συμπεράσματα

Ο δευτερεύων αστέρας έχει γεμίσει τον λοβό Roche του και σύμφωνα με τα αποτελέσματα της O−C ανάλυσης ακόμα μεταφέρει μάζα στον πρωτεύοντα, ο οποίος

[1]http://www.as.up.krakow.pl/o-c/data/getdata.php3?EG%20cep

είναι επάνω στην ΚΑ, με ρυθμό ~1.1×10^{-8} $M_{\odot}$/yr. Ο δευτερεύων αστέρας είναι πάνω από την ΚΑ και είναι ελαφρώς πιο εξελιγμένος, κάτι που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι έχει ήδη χάσει αρκετό μέρος της μάζας του. Σύμφωνα με τον βαθμό πλήρωσης του λοβού Roche του πρωτεύοντα αστέρα και την συνεχή εξέλιξή του, αλλά και την πολύ μικρή περίοδο του συστήματος, φαίνεται ότι οι αστέρες σχετικά σύντομα θα έρθουν σε επαφή. Το πιθανότερο σενάριο εξέλιξης είναι η περίπτωση Α (§βλ. 1.2.4).

Η περιοδική μεταβολή της τροχιακής περιόδου δεν μπορεί να προκαλείται από τον μηχανισμό Applegate (1992), καθώς δεν ικανοποιείται το κριτήριο των Lanza & Rodonò (2002) (βλ. §4.2.4). Αντίθετα, η ύπαρξη ενός τρίτου μέλους φαίνεται πιο πιθανή. Η τιμή της φωτομετρικής συνεισφοράς που εντοπίστηκε στην ανάλυση των καμπυλών φωτός είναι πάρα πολύ μικρή και βρέθηκε μόνο στο *I*-φίλτρο. Εντούτοις, η ελάχιστη μάζα (0.14 $M_{\odot}$) για το τρίτο σώμα που υπολογίστηκε από την O−C ανάλυση δείχνει ότι αυτό το αποτέλεσμα είναι εύλογο, καθώς η αναμενόμενη φωτομετρική συνεισφορά από έναν αστέρα ΚΑ τέτοιας μάζας θα ήταν $L_{3,O-C}$~0.01%. Επιπλέον, η ικανοποίηση του κριτηρίου της δυναμικής ευστάθειας (Harrington 1977) δείχνει ότι ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να ευσταθεί.

Καθότι το σύστημα είναι υποψήφιο για αναπάλσεις (Soydugan et al. 2006b), πραγματοποιήθηκε ανάλυση Fourier (§4.3) στα υπόλοιπα της αφαίρεσης των θεωρητικών από τις παρατηρούμενες καμπύλες φωτός. Δεν βρέθηκαν όμως συχνότητες ανάπαλσης μεταξύ 3-80 c/d και με S/N>4, επομένως συμπεραίνεται ότι ο θερμότερος αστέρας δεν είναι τύπου δ Sct.

6.4. Το σύστημα RW CrB

Ιστορική αναδρομή

Το σύστημα ανακαλύφθηκε από τον Hoffmeister (1915). Ο Sanford (1934b) υπολόγισε τα φασματοσκοπικά στοιχεία του συστήματος και την καμπύλη ακτινικών ταχυτήτων του πρωτεύοντα αστέρα. Οι Carr (1971) και Binnendijk (1972) δημοσίευσαν φωτοηλεκτρικές καμπύλες του συστήματος και οι Moon & Dworetsky (1985), βασιζόμενοι σε μετρήσεις στα φίλτρα *UVBYβ*, προσδιόρισαν τη θερμοκρασία του συστήματος σε ~8300 K. Ο Qian (2000a) έκανε την πρώτη ανάλυση της τροχιακής περιόδου του συστήματος, καταλήγοντας ότι στο σύστημα μπορεί να υπάρχει απώλεια μάζας. Το σύστημα είναι υποψήφιο να περιέχει παλλόμενο συνοδό (Soydugan et al. 2006b). Τέλος, οι Ulaş et al. (2009) παρουσίασαν, βασιζόμενοι σε νέες CCD παρατηρήσεις, το φωτομετρικό μοντέλο του συστήματος και νέα ανάλυση του O−C διαγράμματός του.

Στις παρακάτω παραγράφους παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των Ulaş et al. (2009), αλλά καθώς προέκυψαν νέα στοιχεία για τη μεταβολή της περιόδου του συστήματος, τόσο τα αποτελέσματα της O−C ανάλυσης όσο και το φωτομετρικό μοντέλο διαφέρουν.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι παρατηρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1) με τη χρήση του τηλεσκοπίου των 40 cm και της CCD ST-8XMEI και διήρκεσαν οκτώ νύκτες μεταξύ Μαρτίου-Μαΐου 2007. Στον πίνακα 6.12

δίνονται: Οι αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία (βλ. §3.1.1) και τα φαινόμενα μεγέθη τους m_V στο φίλτρο V, ο αριθμός των σημείων N ανά φίλτρο παρατήρησης και το μέσο φωτομετρικό σφάλμα τους *s.d.* εκφρασμένο σε mmag. Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2440751.7302 + 0.726411^{\mathrm{d}}\ \mathrm{E} \tag{6.7}$$

και υπολογίστηκε από τους χρόνους ελαχίστων (Πίνακας Β1), οι οποίοι προέκυψαν από τα δεδομένα μας και τους πιο πρόσφατους της βιβλιογραφίας.

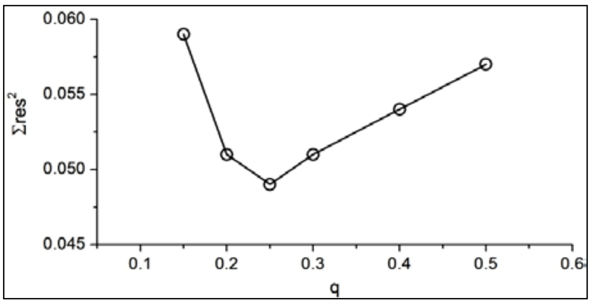
Πίνακας 6.12. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους.

Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για κάθε φίλτρο παρατήρησης			
RW CrB	Μεταβλητός	10.22[a]	R		I	
TYC 2039-004-1	Σύγκρισης	12.49[b]	N	s.d.	N	s.d.
TYC 2039-390-1	Ελέγχου	13.04[c]	1448	9.8	464	9.5

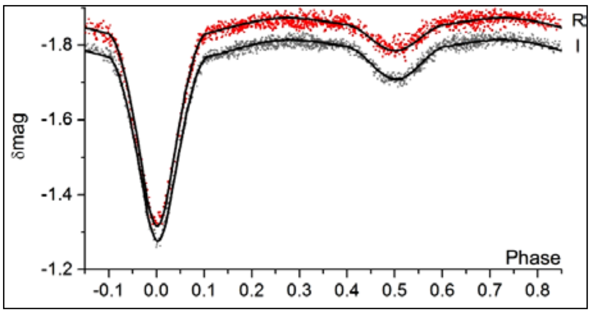
[a]Watson et al. (2006), [b]Høg et al. (2000), [c]Zacharias et al. (2004)

Ανάλυση των καμπυλών φωτός

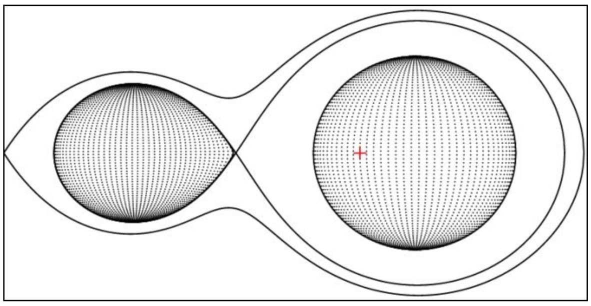
Η θερμοκρασία του πρωτεύοντα αστέρα τέθηκε ίση με 8300 K, σύμφωνα με τους Moon & Dworetsky (1985). Λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων (βλ. παρακάτω), πιθανόν προερχόμενη από την ύπαρξη τρίτου μέλους, η παράμετρος της φωτομετρικής συνεισφοράς από ένα επιπλέον μέλος στο σύστημα l_3 αφέθηκε ελεύθερη προς σύγκλιση. Λόγω απουσίας φασματοσκοπικού λόγου μαζών των αστέρων του συστήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ανίχνευσης του q (q-search - βλ. §4.1) και το αντίστοιχο διάγραμμα παρουσιάζεται στην εικ. 6.15. Στην εικ. 6.16 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 6.17 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος, ενώ στον πίνακα 6.13 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος.



Εικόνα 6.15. Διάγραμμα ανίχνευσης του q για το σύστημα RW CrB. Η τιμή του q που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή των $\sum res^2$ βρέθηκε ίση με 0.25.



Εικόνα 6.16. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες φωτός του συστήματος RW CrB στα φίλτρα *R* και *I*.



Εικόνα 6.17. Η γεωμετρία Roche του συστήματος RW CrB στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό.

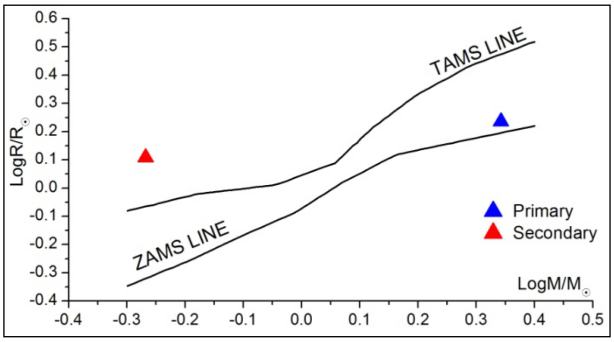
Πίνακας 6.13. Παράμετροι του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα RW CrB.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή	
i [°]	77.2 (1)	A_1	1[a]	Φίλτρο:	R	I
q_{ph}	0.245 (1)	A_2	0.5[a]	x_1	0.420	0.337
T_1 [K]	8300[a,b]	g_1	1[a]	x_2	0.712	0.589
T_2 [K]	4363 (10)	g_2	0.32[a]	L_1/L_T	0.952 (3)	0.931 (3)
Ω_1	3.13 (2)			L_2/L_T	0.045 (1)	0.064 (1)
Ω_2	2.34[a]			L_3/L_T	0.003 (2)	0.005 (2)
		Σres^2	0.144	$<L_3/L_T>$ (%)	0.40 (2)	

[a]σταθερή τιμή, [b]υπόθεση

Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Η τιμή της μάζας M_1 του πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος υποτέθηκε από τον φασματικό του τύπο ως αστέρας της ΚΑ (βλ. Παρ. Ε) και δίνεται μαζί με τις τιμές των υπολοίπων παραμέτρων στον πίνακα 6.14. Η εικ. 6.18 δείχνει τις θέσεις των αστέρων στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.



Εικόνα 6.18. Θέσεις των αστέρων του συστήματος RW CrB (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

Πίνακας 6.14. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος RW CrB.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [$M_\odot$]	2.2[a]	0.54 (5)	log$g$ [cm/s^2]	4.31 (2)	3.95 (5)
R [$R_\odot$]	1.72 (4)	1.28 (3)	α [$R_\odot$]	0.96 (3)	3.9 (1)
L [$L_\odot$]	12.6 (7)	0.54 (3)	M_{bol} [mag]	2.0 (5)	5.4 (4)

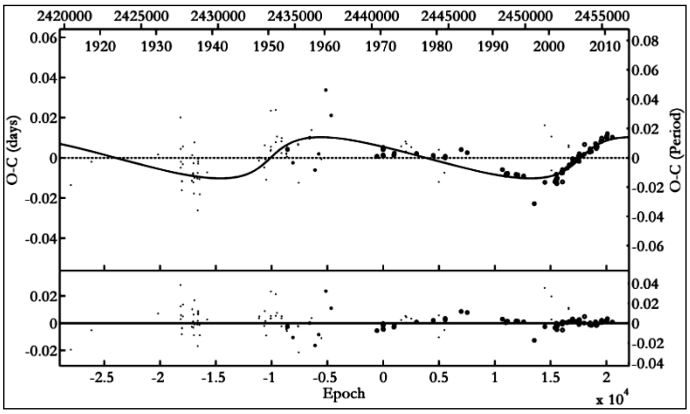
[a]υπόθεση

Ανάλυση των μεταβολών της τροχιακής περιόδου

Το O−C διάγραμμα του RW CrB κατασκευάστηκε από 159 χρόνους ελαχίστων, 71 εκ των οποίων προέκυψαν από οπτικές, 6 από φωτογραφικές, 11 από φωτοηλεκτρικές και 71 από CCD παρατηρήσεις και καλύπτουν χρονικό εύρος από το 1915 έως και σήμερα. Ως αρχική παράμετρος χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω αστρονομική εφημερίδα (Kreiner et al. 2001):

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2440751.7283 + 0.726411^{\mathrm{d}}\mathrm{E} \tag{6.8}$$

Αρχικά, ως συνάρτηση προσαρμογής δοκιμάστηκε τόσο η κυρτή παραβολή, λόγω πιθανής μεταφοράς μάζας, όσο και η κοίλη σύμφωνα με τα αποτελέσματα των Qian (2000a). Επιπλέον, δοκιμάστηκε και μια καμπύλη LITE, λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων, η οποία είναι ιδιαίτερα εμφανής στα πιο σύγχρονα O−C σημεία. Εφόσον ο δευτερεύων αστέρας του συστήματος λόγω θερμοκρασίας δύναται να έχει περίβλημα μεταφοράς, που θα μπορούσε να δημιουργήσει μεταβολές στην τετραπολική ροπή (βλ. §4.2.4), ελέγχθηκε η πιθανή ύπαρξη του μηχανισμού Applegate (1992). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η καμπύλη LITE περιγράφει ικανοποιητικά τα O−C σημεία και δεν απαιτείται η χρήση παραβολής, καθώς ο παραβολικός όρος προέκυπτε πάντα πολύ μικρός. Η μέθοδος ανάλυσης και η επεξήγηση των συμβόλων αναφέρονται στην παράγραφο 4.2. Ο πίνακας 6.15 περιέχει τις τιμές των παραμέτρων των θεωρητικών καμπυλών, ενώ στην εικ. 6.19 παρουσιάζεται η προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης στα O−C σημεία.



Εικόνα 6.19. Προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης του LITE στα O−C σημεία του συστήματος RW CrB (επάνω) και τα υπόλοιπα (residuals) μετά την αφαίρεση της θεωρητικής καμπύλης (κάτω).

Πίνακας 6.15. Παράμετροι της O−C ανάλυσης του συστήματος RW CrB.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
Εκλειπτικό σύστημα		3^{ο} σώμα	
JD_0 [HJD−2400000]	40751.729 (1)	P_3 [yr]	55.3 (9)
P [d]	0.7264107 (1)	e_3	0.6 (1)
Μεταβολή της τετραπολικής ροπής		ω_3 [°]	0 (10)
ΔQ [$\times 10^{50}$ g cm^2]	0.4	$f(m_3)$ [$M_\odot$]	0.003 (1)
LITE		$M_{3,min}$ [$M_\odot$]	0.31 (1)
T_0 [HJD−2400000]	53608 (430)		
A [d]	0.010 (1)	Σres^2	0.019

Συμπεράσματα

Ο πρωτεύων αστέρας του συστήματος είναι επάνω στην ΚΑ και συγκεκριμένα λίγο μετά την TAMS, υποδεικνύοντας την σχετικά μικρή του ηλικία. Από την άλλη μεριά, ο δευτερεύων αστέρας, αν και έχει μικρότερη μάζα από τον πρωτεύοντα, εντούτοις, είναι πιο εξελιγμένος και έχει σχεδόν εισχωρήσει στο στάδιο των υπογιγάντων. Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι το σύστημα εξελίχθηκε σύμφωνα με την περίπτωση Α (βλ. §1..2.4). Αν και ο δευτερεύων αστέρας έχει γεμίσει τον λοβό του, φαίνεται ότι είτε η μεταφορά μάζας έχει σταματήσει είτε έχει πολύ μικρό ρυθμό ώστε να ανιχνευθεί από την O−C ανάλυση του συστήματος.

Αν και οι Qian (2000a) και οι Ulaş et al. (2009) εντόπισαν κοίλη παραβολή στο O−C διάγραμμα, την οποία ερμήνευσαν σαν απώλεια στροφορμής από το σύστημα, εντούτοις, δεν είχαν τη δυνατότητα, λόγω έλλειψης χρόνων ελαχίστων, να ερμηνεύσουν τις μεταβολές της περιόδου που υπάρχουν τα τελευταία έτη. Τα O−C σημεία μεταξύ 2000-2011 δείχνουν μια σαφή αυξητική τάση της τροχιακής περιόδου. Σύμφωνα με το μοντέλο που παρουσιάστηκε εδώ, αυτή η τάση μπορεί να συνδυαστεί με την παλαιότερη κατανομή των O−C σημείων και να περιγραφεί με μια ημιτονοειδή καμπύλη LITE. Βρέθηκε λοιπόν, ότι ένα τρίτο σώμα με ιδιαίτερα έκκεντρη τροχιά και ελάχιστης μάζας ~0.3 $M_{\odot}$ μπορεί να ευθύνεται για τις περιοδικές μεταβολές της τροχιακής περιόδου. Αυτό ελήφθη υπόψη και στην ανάλυση των καμπυλών φωτός, αλλά η τιμή που προέκυψε είναι σχεδόν μηδενική $L_{3,\mathrm{LC}}$~0.4% και εντός των ορίων του σφάλματος. Όμως, ένα επιπρόσθετο μέλος με τόσο μικρή μάζα και με την υπόθεση να είναι αστέρας της ΚΑ αναμένεται να συνεισφέρει στη συνολική φωτεινότητα του συστήματος μόλις $L_{3,\mathrm{O-C}}$~0.1%. Οι τιμές της αναμενόμενης και της παρατηρούμενης φωτομετρικής συνεισφοράς, αν και φαίνεται να υποστηρίζουν την ύπαρξη ενός τρίτου σώματος, είναι πολύ μικρές, άρα το αποτέλεσμα δεν μπορεί να θεωρηθεί ιδιαίτερα αξιόπιστο. Πάντως, το κριτήριο της δυναμικής ευστάθειας (Harrington 1977) ικανοποιείται. Μελλοντικοί χρόνοι ελαχίστων (στα επόμενα 10-15 έτη) αναμένεται να ξεκαθαρίσουν το ζήτημα. Επίσης, ελέγχθηκε κατά πόσο είναι δυνατόν να λαμβάνει χώρα ο μηχανισμός Applegate (1992) και βρέθηκε ότι η μεταβολή της τετραπολικής ροπής του δευτερεύοντα αστέρα έχει τιμή μικρότερη από αυτήν που απαιτείται σύμφωνα με τους Lanza & Rodonò (2002) (βλ. §4.2.4), ώστε να επηρεάσει την τροχιακή περίοδο.

Το σύστημα είναι υποψήφιο να περιέχει παλλόμενο συνοδό (Soydugan et al. 2006b), επομένως, πραγματοποιήθηκε ανάλυση Fourier (§4.3) στα υπόλοιπα της αφαίρεσης των θεωρητικών καμπυλών φωτός από τις αντίστοιχες παρατηρούμενες. Όμως, δεν πραγματοποιήθηκαν παρατηρήσεις στα φίλτρα *B* ή/και *V*, στα οποία αναμένεται να διακρίνονται καλύτερα οι αναπάλσεις. Επιπροσθέτως, το φωτομετρικό σφάλμα των παρατηρησιακών σημείων είναι σχετικά μεγάλο, καθώς ο αστέρας σύγκρισης είναι πολύ πιο αμυδρός από το σύστημα RW CrB, αλλά δυστυχώς δεν υπήρχε στο πεδίο άλλος καλύτερος. Πάντως, στα δεδομένα που ελήφθησαν, δεν βρέθηκαν συχνότητες ανάπαλσης μεταξύ 3-80 c/d και με S/N>4, επομένως συμπεραίνεται ότι ο θερμότερος αστέρας δεν παρουσιάζει αναπάλσεις. Συνίσταται όμως η επανεξέτασή του συστήματος γι' αυτό το φαινόμενο, με τηλεσκόπιο το οποίο να παρέχει μεγαλύτερο οπτικό πεδίο, εντός του οποίου πιθανόν να βρεθεί καλύτερος αστέρας σύγκρισης και να μπορούν να γίνουν παρατηρήσεις στα φίλτρα *B* ή/και *V*.

6.5. Το σύστημα RZ Dra

Ιστορική αναδρομή

Το σύστημα ανακαλύφθηκε ως μεταβλητός από τον Ceraski (1907) και επιβεβαιώθηκε από τον Ichinohe (1907, 1908). Ως εκλειπτικό σύστημα τύπου Algol προτάθηκε από τους Haynes & Shapley (1911), αλλά ο Pickering (1912) το κατέταξε ως τύπου β Lyrae. Ο φασματικός τύπος του συστήματος δημοσιεύτηκε από τους Shapley (1913) και ο Schneller (1941) ως τύπου Ap και αργότερα ο Struve (1946) το επαναταξινόμησε ως τύπου A5 και επιπλέον υπολόγισε τις ακτινικές ταχύτητες του πρωτεύοντα αστέρα. Οι Lucy & Sweeney (1971) υπολόγισαν τη φασματοσκοπική τροχιά του συστήματος και πρότειναν την πιθανή ύπαρξη εκκεντρότητας. Οι Rucinski et al. (2000) δημοσίευσαν τις καμπύλες ακτινικών ταχυτήτων και των δύο μελών και υπολόγισαν τον φασματοσκοπικό λόγο μαζών του συστήματος (q_{sp}~0.4). Φωτομετρικές μελέτες του συστήματος έχουν γίνει από τους Chou (1969), Mallama (1980a), Zhai & Huang (1981), Leung et al. (1982), Kreiner et al. (1994), Shaw et al. (1998), Pazhouhesh et al. (2010) και Erdem et al. (2011). Ανάλυση των μεταβολών της τροχιακής περιόδου έχουν γίνει από τους Woodward (1943), Mallama (1975), (1980a), Zhai & Huang (1981), Leung et al. (1982), Kreiner et al. (1994), Šimon (1995), Pazhouhesh et al. (2010) και Erdem et al. (2011), αλλά τα αποτελέσματα διέφεραν σημαντικά μεταξύ των διαφόρων αναλύσεων. Το σύστημα είναι υποψήφιο να περιέχει παλλόμενο συνοδό (Soydugan et al. 2006b).

Στις παρακάτω παραγράφους παρουσιάζονται οι καμπύλες φωτός του συστήματος, το φωτομετρικό του μοντέλο, οι απόλυτες παράμετροι των μελών του και η ανάλυση του O−C διαγράμματός του, όπως δόθηκαν από τους Pazhouhesh et al. (2010) (Liakos, A-co-author).

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι παρατηρήσεις έλαβαν χώρα στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1) με τη χρήση του τηλεσκοπίου των 40 cm και της CCD ST-8XMEI και διήρκεσαν επτά νύκτες μεταξύ Απριλίου-Μαΐου 2007 για την πλήρη κάλυψη των καμπυλών φωτός στα φίλτρα *R* και *I* και μια νύκτα τον Ιούνιο του ίδιου έτους για την πιθανή εύρεση αναπάλσεων στο φίλτρο *B*. Στον πίνακα 6.16 δίνονται: Οι αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία (βλ. §3.1.1) και τα φαινόμενα μεγέθη τους m_V στο φίλτρο *V*, ο αριθμός των σημείων *N* ανά φίλτρο παρατήρησης και το μέσο φωτομετρικό σφάλμα τους *s.d.* εκφρασμένο σε mmag.

Πίνακας 6.16. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους.

Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για κάθε φίλτρο παρατήρησης			
RZ Dra	Μεταβλητός	10.11[a]	R		I	
TYC 3916-1889-1	Σύγκρισης	10.29[b]	N	s.d.	N	s.d.
TYC 3916-1825-1	Ελέγχου	11.95[c]	741	5.8	735	5.2

[a]Watson et al. (2006), [b]Høg et al. (2000), [c]Zacharias et al. (2004)

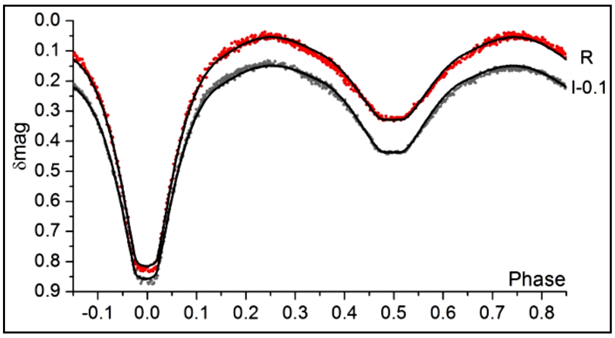
Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2452500.1944 + 0.55088^{d}\ \mathrm{E} \tag{6.9}$$

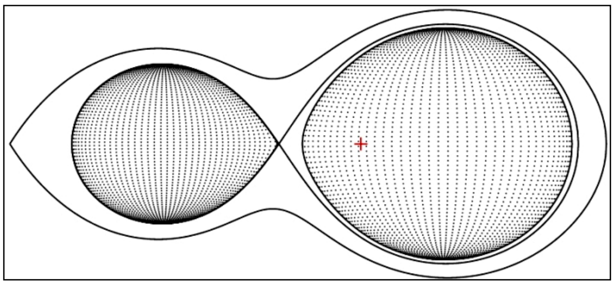
και υπολογίστηκε από τους χρόνους ελαχίστων (Πίνακας B1), οι οποίοι προέκυψαν από τα δεδομένα μας και τους πιο πρόσφατους της βιβλιογραφίας.

Ανάλυση των καμπυλών φωτός

Η θερμοκρασία του πρωτεύοντα αστέρα τέθηκε ίση με 8000 K (Rucinski et al. 2000). Λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων (βλ. παρακάτω), η οποία δύναται να προκαλείται από τρίτο μέλος στο σύστημα, η παράμετρος της φωτομετρικής συνεισφοράς από ένα επιπλέον μέλος στο σύστημα l_3 αφέθηκε ελεύθερη προς σύγκλιση. Ο φασματοσκοπικός λόγος μαζών (Rucinski et al. 2000) χρησιμοποιήθηκε ως αρχική τιμή και αφέθηκε ελεύθερος να συγκλίνει, πάντα όμως με τιμή μέσα στα όρια του σφάλματός του. Στην εικ. 6.20 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 6.21 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος, ενώ στον πίνακα 6.17 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος.



Εικόνα 6.20. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες φωτός στα φίλτρα *R* και *I* του συστήματος RZ Dra.



Εικόνα 6.21. Η γεωμετρία Roche του συστήματος RZ Dra στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό.

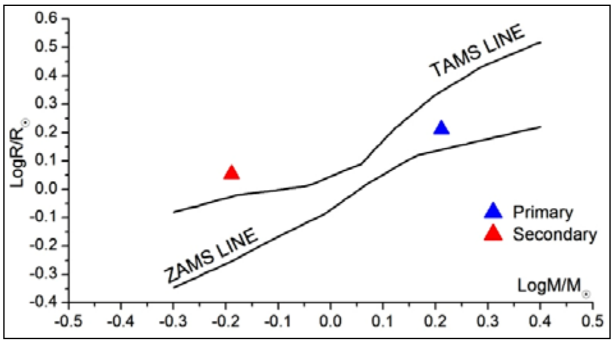
Πίνακας 6.17. Παράμετροι του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα RZ Dra.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή	
i [°]	86.8 (8)	Φίλτρο:	R	I
q_{ph}	0.418 (1)	x_1	0.438	0.352
T_1 [K]	$8000^{a,b}$	x_2	0.581	0.488
T_2 [K]	5303 (10)	L_1/L_T	0.897 (3)	0.864 (3)
Ω_1	2.795 (1)	L_2/L_T	0.100 (1)	0.123 (1)
Ω_2	2.717^{a}	L_3/L_T	0.003 (2)	0.013 (2)
A_1	1^{a}	$<L_3/L_T>$ (%)	0.8 (1)	
A_2	0.5^{a}	K_1^{b} [km/sec]	97 (2)	
g_1	1^{a}	K_2^{b} [km/sec]	245 (4)	
g_2	0.32^{a}	Σres^2	0.078	

[a]σταθερή τιμή, [b]Rucinski et al. (2000)

Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Στον πίνακα 6.18 δίνονται οι απόλυτες παράμετροι των αστέρων-μελών και η εικ. 6.22 δείχνει τις θέσεις τους στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.



Εικόνα 6.22. Θέσεις των αστέρων του συστήματος RZ Dra (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

Πίνακας 6.18. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος RZ Dra.

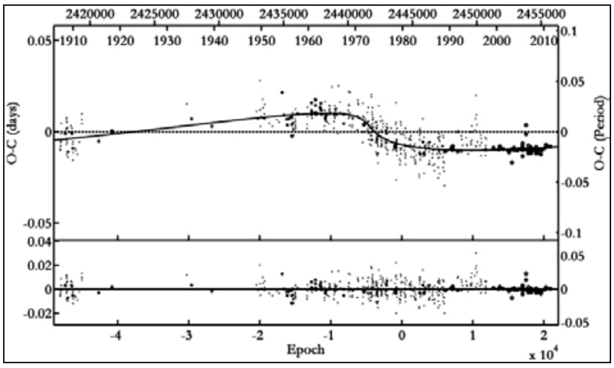
Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [$M_\odot$]	1.6 (2)	0.7 (2)	log$g$ [cm/s^2]	4.2 (1)	4.1 (2)
R [$R_\odot$]	1.63 (6)	1.13 (4)	α [$R_\odot$]	1.1 (1)	2.7 (1)
L [$L_\odot$]	9.8 (7)	0.9 (1)	M_{bol} [mag]	2.3 (4)	4.9 (4)

Ανάλυση των μεταβολών της τροχιακής περιόδου

Το O−C διάγραμμα του συστήματος βασίζεται σε 554 χρόνους ελαχίστων, 451 εκ των οποίων προέκυψαν από οπτικές, 31 από φωτογραφικές, 7 από φωτοηλεκτρικές και 65 από CCD παρατηρήσεις και καλύπτουν χρονικό εύρος από τις αρχές του 20^{ου} αι. έως και σήμερα. Ως αρχική παράμετρος χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω αστρονομική εφημερίδα (Kreiner et al. 2001):

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2444177.5609 + 0.5508762^{\mathrm{d}}\mathrm{E} \qquad (6.10)$$

Αρχικά, ως συνάρτηση προσαρμογής δοκιμάστηκε τόσο η κυρτή παραβολή, λόγω πιθανής μεταφοράς μάζας, όσο και η κοίλη σύμφωνα με τα αποτελέσματα άλλων ερευνητών και μια καμπύλη LITE, λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων. Εφόσον ο δευτερεύων αστέρας του συστήματος λόγω φασματικού τύπου είναι πιθανόν να έχει περίβλημα μεταφοράς, που θα μπορούσε να δημιουργήσει μεταβολές στην τετραπολική ροπή (βλ. §4.2.4), ελέγχθηκε η πιθανή ύπαρξη του μηχανισμού Applegate (1992).



Εικόνα 6.23. Προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης του LITE στα O−C σημεία του συστήματος RZ Dra (επάνω) και τα υπόλοιπα (residuals) μετά την αφαίρεση της θεωρητικής καμπύλης (κάτω).

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η καμπύλη LITE περιγράφει ικανοποιητικά τα O−C σημεία και δεν απαιτείται η χρήση παραβολής, καθώς ο παραβολικός όρος προέκυπτε πάντα πολύ μικρός και επομένως παραλείφθηκε. Η μέθοδος ανάλυσης και η επεξήγηση των συμβόλων αναφέρονται στην παράγραφο 4.2. Ο πίνακας 6.19 περιέχει τις τιμές των παραμέτρων των θεωρητικών καμπυλών, ενώ στην εικ. 6.23 παρουσιάζεται η προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης στα O−C σημεία.

Πίνακας 6.19. Παράμετροι της O−C ανάλυσης του συστήματος RZ Dra.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
Εκλειπτικό σύστημα		$3^{ο}$ σώμα	
JD_0 [HJD−2400000]	44177.5645 (4)	P_3 [yr]	123 (2)
P [d]	0.550876 (3)	e_3	0.8 (1)
Μεταβολή της τετραπολικής ροπής		ω_3 [°]	169 (3)
ΔQ [$\times 10^{50}$ g cm^2]	0.13	$f(m_3)$ [$M_\odot$]	0.0018 (1)
LITE		$M_{3,min}$ [$M_\odot$]	0.23 (1)
T_0 [HJD−2400000]	41623 (183)		
A [d]	0.0101 (4)	Σres^2	0.027

Συμπεράσματα

Από τους αστέρες του συστήματος μόνο ο δευτερεύων έχει γεμίσει τον λοβό Roche του. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της O−C ανάλυσης δεν εντοπίστηκε παραβολικός όρος, ο οποίος να οδηγεί στο συμπέρασμα για παρούσα μεταφορά μάζας στο σύστημα. Παρ' όλα αυτά, ο ρυθμός της μεταφοράς μάζας είναι πιθανόν να είναι πολύ μικρός για να εντοπιστεί ή να έχει προς το παρόν σταματήσει. Ο δευτερεύων αστέρας είναι πάνω από την ΚΑ και είναι ελαφρώς πιο εξελιγμένος, κάτι που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι έχει ήδη χάσει αρκετό μέρος της μάζας του. Σύμφωνα με το ποσοστό πλήρωσης του λοβού Roche του πρωτεύοντα αστέρα και την συνεχή εξέλιξή του, αλλά και την πολύ μικρή περίοδο του συστήματος, φαίνεται ότι οι αστέρες σχετικά σύντομα θα έρθουν σε επαφή. Το πιθανότερο σενάριο εξέλιξης είναι η περίπτωση Α (§βλ. 1.2.4).

Ο έλεγχος για την πιθανή ύπαρξη του μηχανισμού Applegate (1992) έδειξε, ότι η τιμή της τετραπολικής ροπής του δευτερεύοντα αστέρα δεν είναι εντός των ορίων που θέτει το κριτήριο των Lanza & Rodonò (2002) (βλ. §4.2.4). Αντίθετα, η ύπαρξη ενός τρίτου μέλους φαίνεται πιο πιθανή. Η τιμή της φωτομετρικής συνεισφοράς που εντοπίστηκε στην ανάλυση των καμπυλών φωτός είναι πάρα πολύ μικρή ($L_{3,LC}$~1%). Εντούτοις, η ελάχιστη μάζα (0.23 $M_\odot$) για το τρίτο σώμα που υπολογίστηκε από την O−C ανάλυση δείχνει ότι αυτό το αποτέλεσμα είναι εύλογο, καθώς η αναμενόμενη φωτομετρική συνεισφορά από έναν αστέρα ΚΑ τέτοιας μάζας θα ήταν $L_{3,O-C}$~0.1%. Αν και οι τιμές τόσο της παρατηρούμενης όσο και της αναμενόμενης φωτομετρικής συνεισφοράς από ένα τρίτο σώμα είναι πολύ μικρές και μέσα στα όρια του σφάλματος, εντούτοις δεν ταυτίζονται. Όμως, εάν το τρίτο σώμα διέθετε μάζα ~0.5 $M_\odot$ ήτοι τα τροχιακά επίπεδα του τρίτου σώματος και του εκλειπτικού συστήματος να σχημάτιζαν γωνία ~30°, τότε οι δύο τιμές της συνεισφοράς θα ταυτίζονταν. Ωστόσο, η μάζα και η περίοδος του τρίτου σώματος ικανοποιούν το κριτήριο της δυναμικής ευστάθειας (Harrington 1977).

Για την πιθανή εύρεση αναπάλσεων στο σύστημα (Soydugan et al. 2006b), πραγματοποιήθηκε ανάλυση Fourier (§4.3) στα υπόλοιπα της αφαίρεσης των θεωρητικών από τις παρατηρούμενες καμπύλες φωτός τόσο στα *R* και *I* φίλτρα αλλά και στα σημεία του *B* φίλτρου, όπου αναμένεται το μέγιστο της ανάπαλσης για αστέρες τύπου δ Sct. Όμως, τα αποτελέσματα δεν ανέδειξαν συχνότητες ανάπαλσης μεταξύ 3-80 c/d και με S/N>4, επομένως συμπεραίνεται ότι ο θερμότερος αστέρας δεν είναι παλλόμενος.

6.6. Το σύστημα FG Gem

Ιστορική αναδρομή

Το σύστημα ανακαλύφθηκε από τον Hoffmeister (1944). Εκτός από μερικούς χρόνους ελαχίστων δεν υπήρχε πλήρης καμπύλη φωτός του συστήματος έως την αρχή της δεκαετίας του 2000. Η πρώτη καμπύλη φωτός παρατηρήθηκε από το πρόγραμμα "ASAS" (Pojmanski et al. 2005), ενώ λίγα χρόνια αργότερα οι Jungbluth & Agerer (2008) έκαναν παρατηρήσεις στα φίλτρα *B* και *V* και παρουσίασαν το πρώτο φωτομετρικό μοντέλο του συστήματος. Οι φασματικοί τύποι των μελών του συστήματος υπολογίστηκαν προσεγγιστικά ως F7 και K3 για το πρωτεύον και το δευτερεύον, αντίστοιχα, από τους Svechnikov & Kuznetsova (1990). Όμως, ο φασματικός τύπος του συστήματος παραμένει ακόμα και σήμερα αμφίβολος, αφού πολλοί κατάλογοι δίνουν διαφορετικές πληροφορίες για τους δείκτες χρώματός του (π.χ. Hanson et al. 2004, Kharchenko 2001, Høg et al. 2000). Στον κατάλογο "$T_{\rm eff}$ and metallicities for Tycho-2 stars" (Ammons et al. 2006), εκτός του δείκτη $B-V$, ο δείκτης $V-K$ και η μεταλλικότητα του συστήματος ελήφθησαν υπόψη στη φασματική ταξινόμηση. Σύμφωνα με αυτόν τον κατάλογο, η θερμοκρασία του συστήματος είναι 7700+4800/−590 K.

Οι Liakos et al. (2011a) έκαναν το φωτομετρικό μοντέλο του συστήματος, υπολόγισαν τις απόλυτες παραμέτρους των μελών του και ερμήνευσαν τις μεταβολές της τροχιακής περιόδου του μέσω της ανάλυσης του O C διαγράμματός του. Τα αποτελέσματα δίνονται στις επόμενες παραγράφους.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Λόγω της καλής ποιότητας των δεδομένων από το πρόγραμμα "ASAS" (Pojmanski et al. 2005) και της ελεύθερης διαθεσιμότητάς τους, δεν έγιναν νέες παρατηρήσεις για το σύστημα και χρησιμοποιήθηκαν οι υπάρχουσες, οι οποίες έλαβαν χώρα στο διάστημα Δεκέμβριος 2002-Νοέμβριος 2009. Σε αυτό το πρόγραμμα παρατηρήσεων χρησιμοποιόταν μόνο το φωτομετρικό φίλτρο *V*, κάτι όμως που δεν επηρεάζει σημαντικά την παρακάτω ανάλυση. Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2454745.5129 + 0.819128^{\mathrm{d}}\ \mathrm{E} \tag{6.11}$$

και υπολογίστηκε από τους πιο πρόσφατους χρόνους ελαχίστων της βιβλιογραφίας.

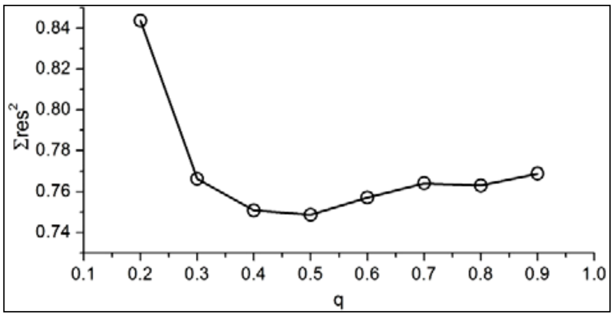
Ανάλυση των καμπυλών φωτός

Η θερμοκρασία του πρωτεύοντα αστέρα τέθηκε ίση με 7700 K βάσει του πιο αξιόπιστου προσδιορισμού της (Ammons et al. 2006). Λόγω της πιθανής παρουσίας τρίτου μέλους στο σύστημα (βλ. παρακάτω την O−C ανάλυση), η φωτομετρική συνεισφορά l_3 αφέθηκε ελεύθερη προς σύγκλιση. Λόγω ανυπαρξίας φασματοσκοπικού λόγου μαζών των αστέρων του συστήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ανίχνευσης του q (βλ. §4.1) και το αντίστοιχο διάγραμμα παρουσιάζεται στην εικ. 6.24. Στην εικ. 6.25 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 6.26 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος, ενώ στον πίνακα 6.20 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος.

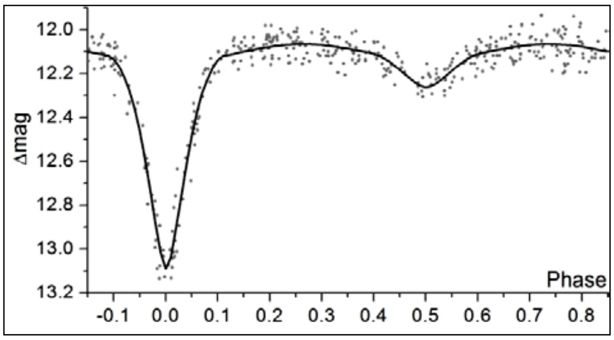
Πίνακας 6.20. Παράμετροι του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα FG Gem.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
i [°]	84 (1)	A_1	1^a	x_1	0.476
q_{ph}	0.41 (3)	A_2	0.5^a	x_2	0.711
T_1 [K]	$7700^{a,b}$	g_1	1^a	L_1/L_T	0.83 (2)
T_2 [K]	5068 (88)	g_2	0.32^a	L_2/L_T	0.117 (2)
Ω_1	3.5 (1)			L_3/L_T	0.05 (2)
Ω_2	2.69^a			$\sum res^2$	0.745

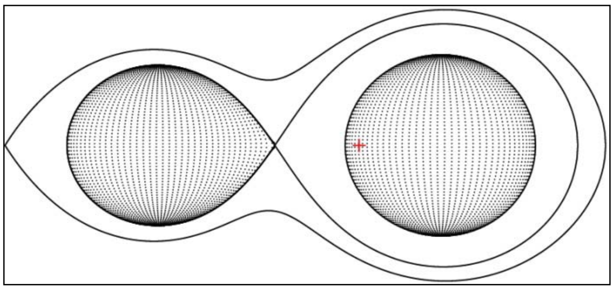
[a]σταθερή τιμή, [b]υπόθεση



Εικόνα 6.24. Διάγραμμα ανίχνευσης του q για το σύστημα FG Gem. Η τιμή του q που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή των $\sum res^2$ βρέθηκε ίση με 0.5.



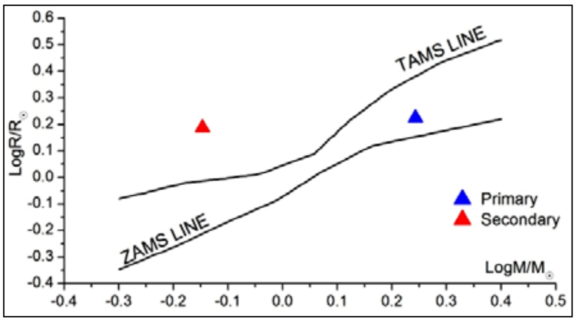
Εικόνα 6.25. Θεωρητική (συνεχής γραμμή) και παρατηρούμενη (σημεία) καμπύλη φωτός του συστήματος FG Gem στο *V* φίλτρο.



Εικόνα 6.26. Η γεωμετρία Roche του συστήματος FG Gem στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό.

Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Η τιμή της μάζας M_1 του πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος υποτέθηκε από τον φασματικό του τύπο ως αστέρας της ΚΑ (βλ. Παρ. Ε) και δίνεται μαζί με τις τιμές των υπολοίπων παραμέτρων στον πίνακα 6.21. Η εικ. 6.27 δείχνει τις θέσεις των αστέρων στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.



Εικόνα 6.27. Θέσεις των αστέρων του συστήματος FG Gem (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

Πίνακας 6.21. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος FG Gem.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [M☉]	1.75[a]	0.71 (6)	log$g$ [cm/s^2]	4.2 (1)	3.9 (1)
R [R☉]	1.7 (2)	1.5 (1)	α [R☉]	1.5 (5)	3.6 (1)
L [L☉]	9 (1)	1.4 (3)	M_{bol} [mag]	2.4 (2)	4.4 (2)

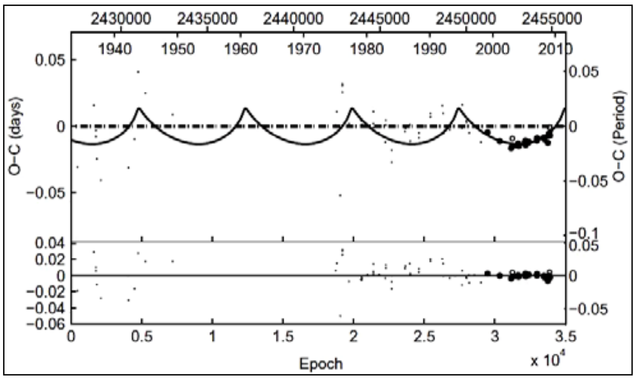
[a]υπόθεση

Ανάλυση των μεταβολών της τροχιακής περιόδου

Το O−C διάγραμμα του συστήματος κατασκευάστηκε από 88 χρόνους ελαχίστων, 49 εκ των οποίων προέκυψαν από οπτικές, 13 από φωτογραφικές και 26 από CCD παρατηρήσεις και καλύπτουν χρονικό εύρος από το 1930 έως και σήμερα. Ως αρχική παράμετρος χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω αστρονομική εφημερίδα (Kreiner et al. 2001):

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2427102.4135 + 0.8191281^{\mathrm{d}}\mathrm{E} \qquad (6.12)$$

Αρχικά, ως συνάρτηση προσαρμογής δοκιμάστηκε η κυρτή παραβολή, λόγω πιθανής μεταφοράς μάζας και μια καμπύλη LITE, λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων. Ο δευτερεύων αστέρας του συστήματος λόγω θερμοκρασίας είναι πιθανόν να μπορεί να δημιουργήσει μεταβολές στην τετραπολική του ροπή, επομένως ελέγχθηκε η πιθανή υπόσταση του μηχανισμού Applegate (1992). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η καμπύλη LITE περιγράφει ικανοποιητικά τα O−C σημεία και δεν απαιτείται η χρήση παραβολής, καθώς ο παραβολικός όρος ήταν σχεδόν μηδενικός και επομένως παραλείφθηκε. Η μέθοδος ανάλυσης και η επεξήγηση των συμβόλων αναφέρονται στην παράγραφο 4.2. Ο πίνακας 6.22 περιέχει τις τιμές των παραμέτρων των θεωρητικών καμπυλών, ενώ στην εικ. 6.28 παρουσιάζεται η προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης στα O−C σημεία.



Εικόνα 6.28. Προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης του LITE στα O−C σημεία του συστήματος FG Gem (επάνω) και τα υπόλοιπα (residuals) μετά την αφαίρεση της θεωρητικής καμπύλης (κάτω).

Πίνακας 6.22. Παράμετροι της O−C ανάλυσης του συστήματος FG Gem.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
Εκλειπτικό σύστημα		$3^{ο}$ σώμα	
JD_0 [HJD−2400000]	27102.427 (4)	P_3 [yr]	16.9 (3)
P [d]	0.8191276 (2)	e_3	0.8 (2)
Μεταβολή της τετραπολικής ροπής		$ω_3$ [°]	68 (36)
ΔQ [$\times 10^{50}$ g cm^2]	2.5	$f(m_3)$ [$M_\odot$]	0.052 (7)
LITE		$M_{3,min}$ [$M_\odot$]	0.82 (5)
T_0 [HJD−2400000]	33650 (315)		
A [d]	0.013 (2)	Σres^2	0.017

Συμπεράσματα

Το σύστημα αποτελείται από έναν αστέρα της ΚΑ (πρωτεύων) και έναν πιο εξελιγμένο (δευτερεύων), ο οποίος έχει γεμίσει τον λοβό Roche του. Σύμφωνα με τις τιμές των μαζών των αστέρων και την εξελικτική τους κατάσταση φαίνεται ότι στο παρελθόν υπήρξε μεταφορά μάζας από τον δευτερεύοντα προς τον πρωτεύοντα. Όμως, από την O−C ανάλυση του συστήματος δεν προέκυψε ύπαρξη μεταφοράς μάζας, κάτι όμως που δεν έρχεται κατ' ανάγκη σε αντίφαση με την πλήρωση του λοβού Roche του δευτερεύοντα, καθώς είναι πολύ πιθανό είτε να έχει σταματήσει είτε να μην ανιχνεύεται λόγω πολύ μικρού ρυθμού.

Η ύπαρξη του τρίτου μέλους επιβεβαιώνεται τόσο από την ανάλυση των καμπυλών φωτός όσο και από την O−C ανάλυση του συστήματος. Η παρατηρούμενη φωτομετρική συνεισφορά βρέθηκε ίση με $L_{3,LC}$~5%, ενώ η αναμενόμενη από έναν αστέρα της ΚΑ με μάζα ~0.8 $M_\odot$ είναι $L_{3,O-C}$~4.8%. Είναι προφανές, ότι αυτές οι δύο τιμές είναι σε εκπληκτική συμφωνία. Από την άλλη μεριά, αν και η τετραπολική ροπή του δευτερεύοντα αστέρα δύναται να δημιουργήσει τις παρατηρούμενες μεταβολές της τροχιακής περιόδου, οι παρατηρήσεις, οι οποίες καλύπτουν μεγάλο χρονικό εύρος, δεν παρουσιάζουν τις αναμενόμενες μεταβολές λαμπρότητας που προβλέπονται από τον μηχανισμό Applegate (1992). Τελικά, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η πιθανότερη ερμηνεία για τις περιοδικές μεταβολές της περιόδου είναι η ύπαρξη ενός τρίτου σώματος σε τροχιά γύρω από το εκλειπτικό σύστημα.

6.7. Το σύστημα CC Her

Ιστορική αναδρομή

Το σύστημα ανακαλύφθηκε από τον Wachmann (1929). Ο Kreiner (1971) τόνισε για πρώτη φορά ότι στο σύστημα συμβαίνουν τροχιακές μεταβολές, ενώ οι Soydugan et al. (2006c) έκαναν O−C ανάλυση και κατέληξαν στην πιθανότητα ύπαρξης τρίτου μέλους στο σύστημα με μάζα 2.69 $M_\odot$. Έχουν γίνει πολλές προσπάθειες φασματικής ταξινόμησης του συστήματος (π.χ. Malkov et al. 2006, Halbedel 1984, Fabricius et al. 2002) και κατέληξαν στο εύρος A0-A2. Η βάση δεδομένων SIMBAD αναφέρει ότι το σύστημα είναι τύπου A2. Το σύστημα είναι υποψήφιο να περιέχει παλλόμενο συνοδό (Soydugan et al. 2006b), αλλά και να περιέχει τρίτο μέλος (Hoffman 2006).

Οι Liakos & Niarchos (2012c) διεξήγαγαν νέες φωτομετρικές παρατηρήσεις, οι οποίες κάλυψαν για πρώτη φορά ολόκληρη την καμπύλη φωτός και σε διαφορετικά μέρη του Η/Μ φάσματος, και φασματοσκοπικές, οι οποίες επέτρεψαν να υπολογιστούν οι απόλυτες παράμετροι των μελών και να εκτιμηθεί η εξελικτική τους κατάσταση. Τα αποτελέσματα της τελευταίας εργασίας παρουσιάζονται παρακάτω.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι φωτομετρικές παρατηρήσεις για την κάλυψη των καμπυλών φωτός του συστήματος διήρκεσαν 13 νύκτες μεταξύ Απριλίου-Ιουνίου 2009 και έλαβαν χώρα στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1) με τη χρήση του τηλεσκοπίου των 40 cm και της CCD ST-10XME. Στον πίνακα 6.23 δίνονται λεπτομέρειες που αφορούν τις φωτομετρικές παρατηρήσεις και την επεξεργασία των δεδομένων. Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2454584.43505 + 1.73405^{\mathrm{d}}\ \mathrm{E} \tag{6.13}$$

και υπολογίστηκε από χρόνους ελαχίστων, οι οποίοι προέκυψαν από τα δεδομένα μας (Πίνακας Β1) και τους πιο πρόσφατους από τη βιβλιογραφία.

Πίνακας 6.23. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους (*N*=αριθμός σημείων, *s.d.*=σφάλμα).

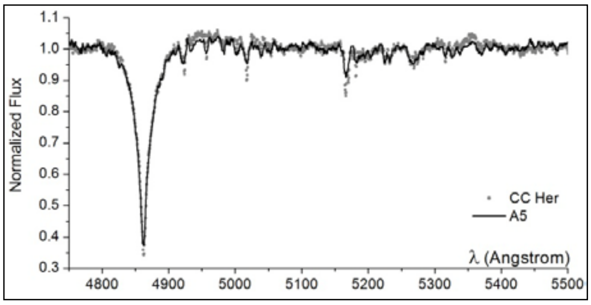
Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για κάθε φίλτρο παρατήρησης							
CC Her	Μεταβλητός	9.95[a]	B		V		R		I	
TYC 946-0103-1	Σύγκρισης	10.05[b]	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.
TYC 946-1286-1	Ελέγχου	11.20[b]	734	2.8	706	3.1	732	3.6	730	3.3

[a]Watson et al. (2006), [b]Høg et al. (2000)

Οι φασματοσκοπικές παρατηρήσεις έλαβαν χώρα στο Αστεροσκοπείο του Σκίνακα (βλ. §2.3.3) μεταξύ 12-14 Μαΐου 2009 με σκοπό τον υπολογισμό των ακτινικών ταχυτήτων των αστέρων-μελών. Το φασματικό εύρος ήταν μεταξύ 4534 Å και 5622 Å. Οι μέθοδοι επεξεργασίας των φασμάτων και υπολογισμού των ακτινικών ταχυτήτων περιγράφεται στην παράγραφο 3.2.

Για τη φασματική ταξινόμηση συγκρίθηκε το κομμάτι του φάσματος μεταξύ 4800-5350 Å όπου βρίσκονται η H_β και πλήθος μεταλλικών γραμμών με ικανοποιητικό S/N. Επειδή δεν υπάρχει ολική έκλειψη στο σύστημα δεν ήταν δυνατόν να προσδιοριστούν ξεχωριστά οι φασματικοί τύποι των αστέρων-μελών. Επομένως προέκυψε ο σύνθετος φασματικός τύπος ως A5 (για λεπτομέρειες της μεθόδου βλ. §3.2.2) βάσει του φάσματος το οποίο ελήφθη κατά τη γεωμετρική φάση ~0.25. Στην εικ. 6.29 παρουσιάζεται η σύγκριση του σύνθετου φάσματος του CC Her με το φάσμα του πρότυπου αστέρα, για το οποίο προέκυψε η μικρότερη τιμή των $\sum \mathrm{res}^2$.

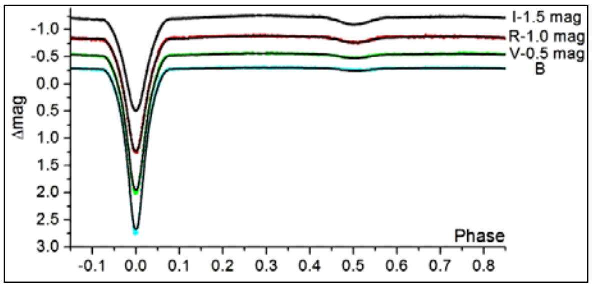
Για τη μέθοδο BF (βλ. §3.2.3) χρησιμοποιήθηκαν τα φάσματα των προτύπων αστέρων HIP 53910 (A1), HIP 77233 (A3), HIP 70400 (A5) και HIP 89935 (A7), τα οποία ελήφθησαν ακριβώς με την ίδια μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για τα φάσματα του CC Her. Οι ακτινικές ταχύτητες των αστέρων-μελών δίνονται στον πίνακα Γ1 και οι αντίστοιχες καμπύλες παρουσιάζονται στην επόμενη παράγραφο.



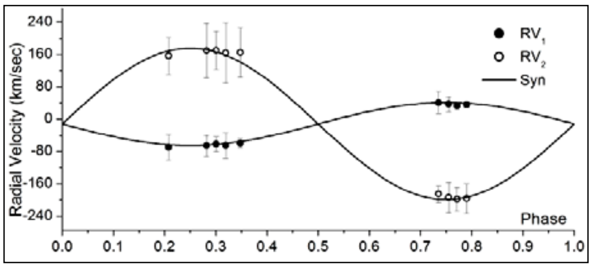
Εικόνα 6.29. Σύγκριση του σύνθετου φάσματος του συστήματος CC Her (γκρίζα σημεία) με το φάσμα του πρότυπου αστέρα HIP 70400 (μαύρη γραμμή) φασματικού τύπου A5.

Ανάλυση των καμπυλών φωτός και των καμπυλών ακτινικών ταχυτήτων

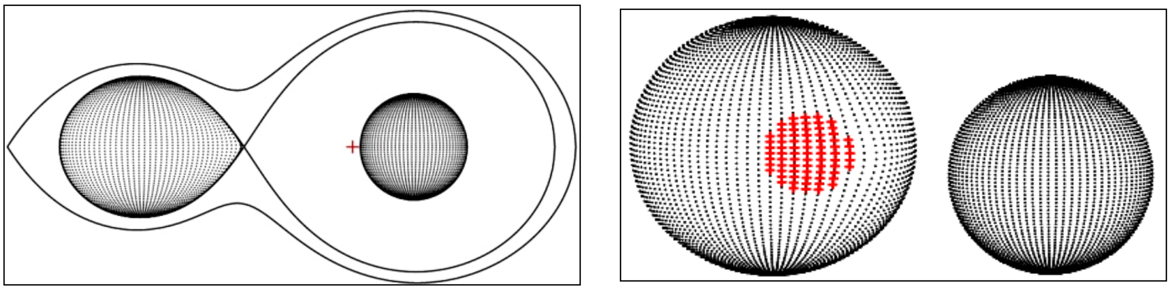
Οι καμπύλες φωτός και ακτινικών ταχυτήτων χρησιμοποιήθηκαν ταυτόχρονα για την εύρεση του καλύτερου μοντέλου περιγραφής του συστήματος. Καθότι δεν επετεύχθη ο καθορισμός του φασματικού τύπου των αστέρων, αλλά και επειδή στη βιβλιογραφία υπάρχει πληθώρα πιθανών τιμών, δοκιμάστηκαν διάφορες τιμές για την T_1 αλλά στο εύρος τιμών που αντιστοιχεί στους φασματικούς τύπους A2 (άνω όριο-SIMBAD) και A5 (κάτω όριο-σύνθετο φάσμα), ήτοι 9000 K – 8200 K. Λόγω βιβλιογραφικής πληροφορίας για πιθανή φωτομετρική συνεισφορά από τρίτο μέλος, η παράμετρος l_3 αφέθηκε ελεύθερη προς σύγκλιση. Εξαιτίας της μετατόπισης των μεγίστων της λαμπρότητας από τις φάσεις 0.25 και 0.75, η οποία είναι πολύ πιθανό να προέρχεται από φαινόμενα ανάκλασης στην επιφάνεια του δευτερεύοντα αστέρα, η παράμετρος ανάκλασης A_2 αφέθηκε ελεύθερη. Επιπροσθέτως, λόγω ασυμμετριών εκατέρωθεν των επικλινών κλάδων του δευτερεύοντος ελαχίστου, τοποθετήθηκε μια ψυχρή κηλίδα στην επιφάνεια του δευτερεύοντα αστέρα και οι παράμετροί της αφέθηκαν ελεύθερες. Εναλλακτικά, δοκιμάστηκε και η ύπαρξη θερμής κηλίδας επάνω στον πρωτεύοντα, η οποία θα μπορούσε να αποτελεί το σημείο πτώσης της μάζας που προέρχεται από τον δευτερεύοντα, αφού αυτός γεμίζει τον λοβό Roche του. Η σύγκριση των δύο προηγουμένων σεναρίων βάσει των $\sum res^2$ για δεδομένη T_1 έδειξε περίπου ~10% καλύτερη θεωρητική προσαρμογή για την περίπτωση της ψυχρής κηλίδας. Ως τελικό μοντέλο παρουσιάζεται αυτό στο οποίο προέκυψε η μικρότερη τιμή των $\sum res^2$ και οι παράμετροί του δίνονται στον πίνακα 6.24. Στην εικ. 6.30 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 6.31 οι προσαρμογές ημιτονοειδών καμπυλών επάνω στις καμπύλες ακτινικών ταχυτήτων, στην εικ. 6.32 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος.



Εικόνα 6.30. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες φωτός στα φίλτρα *B*, *V*, *R*, *I* του συστήματος CC Her.



Εικόνα 6.31. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες ακτινικών ταχυτήτων του συστήματος CC Her. Οι «γεμάτοι» κύκλοι αναφέρονται στον πρωτεύοντα και οι «κενοί» στον δευτερεύοντα αστέρα του συστήματος.



Εικόνα 6.32. Η γεωμετρία Roche του συστήματος CC Her στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό (αριστερά) και στη φάση 0.60 (δεξιά), όπου διακρίνεται η κηλίδα στην επιφάνεια του δευτερεύοντα αστέρα.

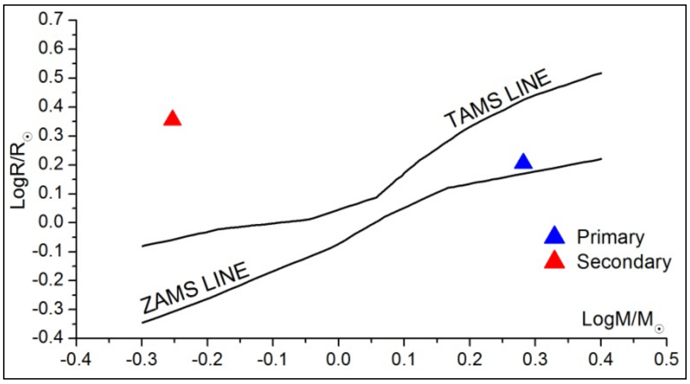
Πίνακας 6.30. Παράμετροι του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα CC Her.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή			
i [°]	86.1 (1)	Φίλτρο:	B	V	R	I
q_{sp}	0.29 (1)	x_1	0.538	0.458	0.380	0.299
T_1 [K]	9000[a]	x_2	0.939	0.790	0.679	0.565
T_2 [K]	4586 (5)	L_1/L_T	0.933 (1)	0.889 (2)	0.838 (2)	0.771 (2)
Ω_1	5.42 (1)	L_2/L_T	0.056 (1)	0.104 (1)	0.146 (1)	0.199 (1)
Ω_2	2.447	L_3/L_T	0.011 (1)	0.007 (1)	0.016 (1)	0.031 (2)
A_1	1[a]	$<L_3/L_T>$ (%)	1.7 (1)			
A_2	0.75		Κηλίδες			
g_1	1[a]	Co-lat [°]	89 (2)			
g_2	0.32[a]	Co-long [°]	339 (2)			
K_1 [km/sec]	54 (1)	R [°]	15 (2)			
K_2 [km/sec]	185 (2)	T_f (T_{sp}/T_{sur})	0.80 (3)			
γ [km/sec]	-12 (2)					
α [R□]	8.2 (1)	Σres^2	0.860			

[a]σταθερή τιμή

Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Στον πίνακα 6.31 δίνονται οι απόλυτες παράμετροι των αστέρων-μελών και η εικ. 6.33 δείχνει τις θέσεις τους στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.



Εικόνα 6.33. Θέσεις των αστέρων του συστήματος CC Her (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

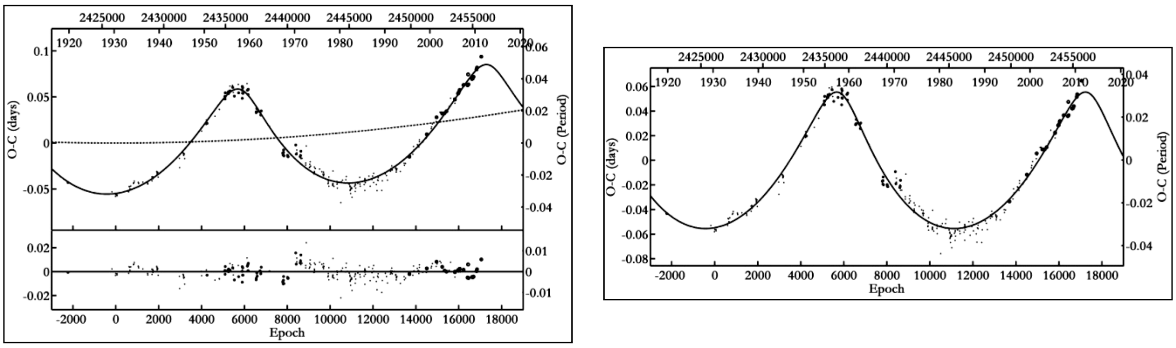
Πίνακας 6.31. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος CC Her.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [$M_\odot$]	1.91 (6)	0.56 (4)	log$g$ [cm/s^2]	4.31 (2)	3.47 (3)
R [$R_\odot$]	1.61 (2)	2.27 (3)	α [$R_\odot$]	1.85 (4)	6.35 (7)
L [$L_\odot$]	15.2 (5)	2.0 (1)	M_{bol} [mag]	1.8 (2)	4.0 (2)

Ανάλυση των μεταβολών της τροχιακής περιόδου

Το O−C διάγραμμα του CC Her περιέχει 283 χρόνους ελαχίστων, 207 εκ των οποίων προέκυψαν από οπτικές, 48 από φωτογραφικές και 28 από CCD παρατηρήσεις και καλύπτουν χρονικό εύρος από το 1920 έως και σήμερα. Ως αρχική παράμετρος χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω αστρονομική εφημερίδα (Kreiner et al. 2001):

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2426120.477 + 1.7340179^{\mathrm{d}}\mathrm{E} \qquad (6.14)$$



Εικόνα 6.34. Αριστερά: Προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης LITE και μιας παραβολής (συνεχής γραμμή) στα O−C σημεία του συστήματος CC Her (επάνω) και τα υπόλοιπα (residuals) μετά την αφαίρεση της συνολικής συνάρτησης (κάτω). Η διακεκομμένη γραμμή αναφέρεται στην παραβολή. Δεξιά: Προσαρμογή της καμπύλης LITE στα O−C υπόλοιπα έπειτα από την αφαίρεση της παραβολής.

Πίνακας 6.32. Παράμετροι της O−C ανάλυσης του συστήματος CC Her.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
Εκλειπτικό σύστημα		3^o σώμα	
JD_0 [HJD−2400000]	26120.474 (2)	ω_3 [°]	101 (2)
P [d]	1.7340174 (1)	P_3 [yr]	54.4 (2)
C_2 [$\times10^{-10}$ d/cycle]	1.018 (1)	e_3	0.47 (1)
$\dot{P}$ [$\times10^{-8}$ d/yr]	4.29 (1)	f(m_3) [$M_\odot$]	0.2913 (1)
$\dot{M}_{tr}$ [$\times10^{-7}$ $M_\odot$/yr]	6.53 (2)	$M_{3,min}$ [$M_\odot$]	1.72 (1)
LITE		Μεταβολή της τετραπολικής ροπής	
T_0 [HJD−2400000]	36213 (114)	ΔQ [$\times10^{50}$ g cm^2]	6.96
A [d]	0.0548 (4)	Σres^2	0.017

Αρχικά, ως συνάρτηση προσαρμογής δοκιμάστηκε η παραβολή, λόγω πιθανής μεταφοράς μάζας, και μια καμπύλη LITE, λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων, η οποία είναι ιδιαίτερα εμφανής στα πιο σύγχρονα O−C σημεία. Εφόσον ο δευτερεύων αστέρας του συστήματος λόγω θερμοκρασίας δύναται να έχει περίβλημα μεταφοράς που θα μπορούσε να δημιουργήσει μεταβολές στην τετραπολική ροπή (βλ. §4.2.4), ελέγχθηκε η πιθανή ύπαρξη του μηχανισμού Applegate (1992). Η μέθοδος ανάλυσης και η επεξήγηση των συμβόλων αναφέρονται στην παράγραφο 4.2. Ο πίνακας 6.32 περιέχει τις τιμές των παραμέτρων των θεωρητικών καμπυλών, ενώ στην εικ. 6.34 παρουσιάζεται η προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης στα O−C σημεία.

Συμπεράσματα

Το σύστημα είναι ένας κλασσικός Algol, όπου ο πρωτεύων αστέρας είναι μικρής ηλικίας (τοποθετείται λίγο μετά την TAMS) και ο δευτερεύων στο στάδιο των υπογιγάντων. Σύμφωνα με την O−C ανάλυση του συστήματος, ο δευτερεύων αστέρας ακόμα και σήμερα συνεχίζει να μεταφέρει μάζα στον πρωτεύοντα με ρυθμό ~6.5 $M_{\odot}$/yr. Σύμφωνα με τα παραπάνω, και λαμβάνοντας υπόψη τις εξελικτικές καταστάσεις των μελών, το σύστημα πρέπει να εξελίσσεται σύμφωνα με την A ή B περίπτωση (βλ. §1.2.4).

Οι Soydugan et al. (2006c) ερμήνευσαν τις περιοδικές μεταβολές της τροχιακής περιόδου σύμφωνα με το LITE και συγκεκριμένα με ένα τρίτο σώμα μάζας 2.69 $M_{\odot}$. Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν εδώ συμφωνούν ποιοτικά με αυτήν την εξήγηση, αλλά διαφέρουν ποσοτικά. Συγκεκριμένα, από την O−C ανάλυση της παρούσας εργασίας βρέθηκε ότι η ελάχιστη μάζα του τρίτου σώματος πρέπει να είναι 1.72 $M_{\odot}$. Αυτή η διαφορά προέκυψε λόγω λανθασμένης υπόθεσης των Soydugan et al. (2006c) περί των μαζών των αστέρων του εκλειπτικού συστήματος, ενώ στη παρούσα εργασία αυτές προέκυψαν από τη μέτρηση των ακτινικών ταχυτήτων των μελών. Όμως, στο φωτομετρικό μοντέλο εντοπίστηκε συνεισφορά μόλις $L_{3,\mathrm{LC}}$~1.7%, ενώ στα φασματοσκοπικά δεδομένα δεν υπήρξε ένδειξη επιπλέον φασματικών γραμμών. Από την άλλη μεριά, η αναμενόμενη φωτομετρική συνεισφορά από έναν αστέρα της ΚΑ με μάζα 1.72 $M_{\odot}$ είναι $L_{3,\mathrm{O-C}}$~30%. Αυτή η τεράστια διαφορά μεταξύ παρατηρούμενης και αναμενόμενης φωτομετρικής συνεισφοράς οδηγεί στην απόρριψη του σεναρίου για έναν απλό αστέρα της ΚΑ ως τρίτο μέλος. Το πρώτο εναλλακτικό σενάριο είναι αυτό κατά το οποίο το τρίτο σώμα δεν είναι ένας αστέρας, αλλά διπλό ή πολλαπλό σύστημα, το οποίο αποτελείται από αστέρες της ΚΑ μικρότερης θερμοκρασίας, αλλά συνολικής μάζας ίσης με αυτή που υπολογίστηκε. Επομένως, τα επιπλέον μέλη δεν μπορούν να συνεισφέρουν φωτομετρικά. Το δεύτερο σενάριο βασίζεται στην εξελικτική κατάσταση του τρίτου σώματος. Το τρίτο σώμα όντας πρακτικά απομονωμένος αστέρας κι έχοντας τη συγκεκριμένη τιμή μάζας, αλλά λαμβάνοντας υπόψη ότι το εκλειπτικό σύστημα έχει ήδη έναν εξελιγμένο αστέρα-μέλος και υποθέτοντας την ταυτόχρονη γέννηση όλων των μελών του τριπλού συστήματος, θα μπορούσε να είναι ακόμα πιο εξελιγμένος, δηλαδή να έχει γίνει είτε αστέρας νετρονίων είτε ακόμα και μελανή οπή. Αυτά τα δύο σενάρια χρειάζονται επιπλέον παρατηρήσεις (αστρομετρικές ή σε άλλα θερμότερα μήκη κύματος) ώστε να προκύψει το αληθές. Το τρίτο σενάριο βασίζεται στον μηχανισμό Applegate (1992). Η τιμή της τετραπολικής ροπής του δευτερεύοντα αστέρα, η οποία ικανοποιεί το κριτήριο των Lanza & Rodonò (2002) (βλ. §4.2.4), θα μπορούσε να είναι υπαίτια των περιοδικών μεταβολών της τροχιακής περιόδου. Εξαιτίας του σχετικά μεγάλου ημιπλάτους του φαινομένου, αναμένεται ότι η φωτομετρική λαμπρότητα θα παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις μέσα σε μια πλήρη περίοδο, επομένως απαιτούνται πολλές παρατηρήσεις στα επόμενα χρόνια ώστε να αποδειχθεί η ύπαρξη αυτού του μηχανισμού.

Λόγω της υποψηφιότητας του συστήματος για αναπάλσεις (Soydugan et al. 2006b), πραγματοποιήθηκε ανάλυση Fourier (§4.3) στα υπόλοιπα της αφαίρεσης των θεωρητικών από τις παρατηρούμενες καμπύλες φωτός. Δεν προέκυψαν συχνότητες ανάπαλσης μεταξύ 3-80 c/d και με S/N>4 και ως εκ τούτου συμπεραίνεται ότι ο θερμότερος αστέρας δεν είναι παλλόμενος.

6.8. Το σύστημα V338 Her

Ιστορική αναδρομή

Το σύστημα ανακαλύφθηκε από τον Hoffmeister (1949). Λίγο αργότερα, ο Tsesevitch (1951) δημοσίευσε τα πρώτα φωτομετρικά στοιχεία του συστήματος βασιζόμενος σε οπτικές και φωτογραφικές παρατηρήσεις. Η πρώτη φωτοηλεκτρική καμπύλη φωτός του συστήματος και η πρώτη ανάλυση των μεταβολών της τροχιακής του περιόδου δημοσιεύτηκαν από τον Vetešnik (1968), ενώ τα γεωμετρικά στοιχεία των αστέρων-μελών του υπολογίστηκαν από τον Walter (1969). Οι Hill et al. (1975) ταξινόμησαν το σύστημα στο εύρος φασματικών τύπων F0V-F2V. Οι Yang et al. (2010) ανέλυσαν τις καμπύλες φωτός του V338 Her και κατέληξαν ότι το σύστημα είναι σχεδόν ημιαποχωρισμένο, ενώ εντόπισαν μια περιοδική μεταβολή της τροχιακής περιόδου.

Οι Liakos et al. (2012a) πραγματοποίησαν νέες φωτομετρικές και φασματοσκοπικές παρατηρήσεις του συστήματος, ανέλυσαν το O−C διάγραμμά του και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι φωτομετρικές παρατηρήσεις του συστήματος έγιναν στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1) με τη χρήση του τηλεσκοπίου των 40 cm και της CCD ST-8XMEI και διήρκεσαν δεκατρείς νύκτες εντός του χρονικού διαστήματος Μάιος-Αύγουστος 2008. Στον πίνακα 6.33 δίνονται: Οι αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία (βλ. §3.1.1) και τα φαινόμενα μεγέθη τους m_V στο φίλτρο V, ο αριθμός των σημείων N ανά φίλτρο παρατήρησης και το μέσο φωτομετρικό σφάλμα τους *s.d.* εκφρασμένο σε mmag. Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2452501.0064 + 1.30575^{\mathrm{d}}\ \mathrm{E} \tag{6.15}$$

και υπολογίστηκε από τους χρόνους ελαχίστων (Πίνακας Β1), οι οποίοι προέκυψαν από τα δεδομένα μας και τους πιο πρόσφατους της βιβλιογραφίας.

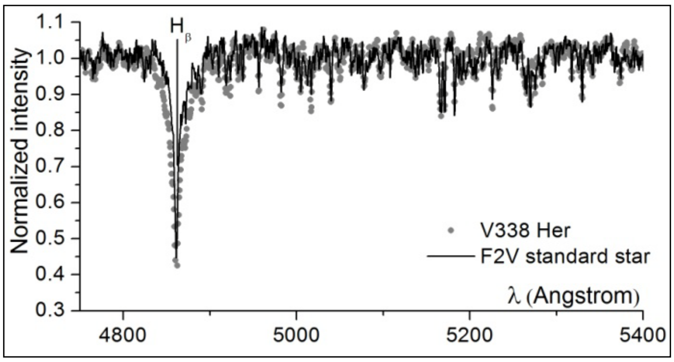
Πίνακας 6.33. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους.

Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για κάθε φίλτρο παρατήρησης							
V338 Her	Μεταβλητός	10.07[a]	B		V		R		I	
TYC 3101-995-1	Σύγκρισης	10.76[b]	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.
TYC 3101-1186-1	Ελέγχου	12.24[b]	742	4.6	756	4.5	743	4.9	759	4.5

[a]Watson et al. (2006), [b]Høg et al. (2000)

Η φασματοσκοπική παρατήρηση έλαβε χώρα στο Αστεροσκοπείο του Σκίνακα (βλ. §2.3.3) στις 14 Μαΐου 2009 και ελήφθη μόνο ένα φάσμα στο φασματικό εύρος 4534-5622

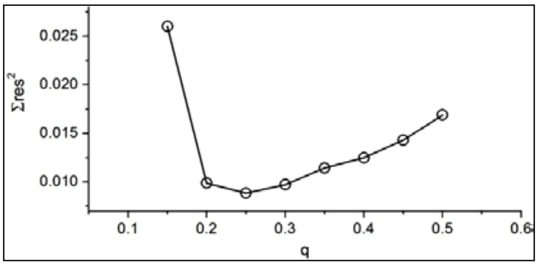
Å. Το φάσμα ελήφθη με χρόνο έκθεσης 1800 sec εντός της δευτερεύουσας έκλειψης, και συγκεκριμένα στη φάση 0.497. Στη συγκεκριμένη χρονική στιγμή, η φωτομετρική συνεισφορά του δευτερεύοντα αστέρα είναι η ελάχιστη δυνατή, επομένως με πολύ καλή προσέγγιση το φάσμα αφορά μόνο τον πρωτεύοντα αστέρα. Για τη φασματική ταξινόμηση συγκρίθηκε το κομμάτι του φάσματος μεταξύ 4800-5350 Å, όπου βρίσκονται η H_β και πλήθος μεταλλικών γραμμών με ικανοποιητικό S/N, με φάσματα προτύπων αστέρων. Στην εικ. 6.35 παρουσιάζεται η σύγκριση του φάσματος του V338 Her με το φάσμα του πρότυπου αστέρα, για το οποίο προέκυψε η μικρότερη τιμή των $\sum res^2$ (για λεπτομέρειες της μεθόδου βλ. §3.2.2).



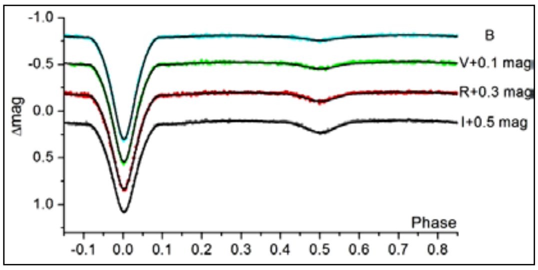
Εικόνα 6.35. Σύγκριση του σύνθετου φάσματος του συστήματος V338 Her (γκρίζα σημεία) με το φάσμα του πρότυπου αστέρα HIP 82020 (μαύρη γραμμή) φασματικού τύπου F2.

Ανάλυση των καμπυλών φωτός

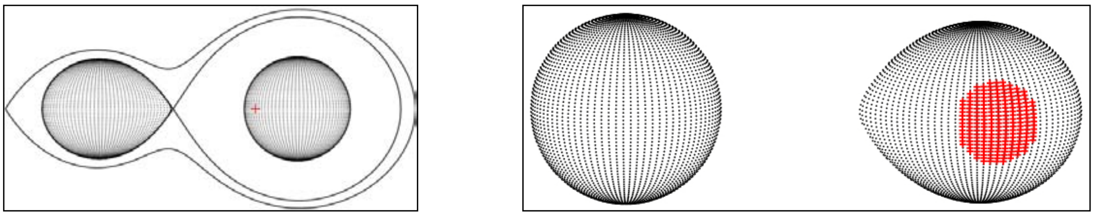
Η θερμοκρασία του πρωτεύοντα αστέρα τέθηκε ίση με 7000 K, βάσει της φασματικής ταξινόμησης που παρουσιάστηκε προηγουμένως. Λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων (βλ. παρακάτω), η οποία δύναται να ερμηνευτεί με το LITE (§4.2.1), η παράμετρος της φωτομετρικής συνεισφοράς από ένα πιθανό τρίτο μέλος στο σύστημα l_3 αφέθηκε ελεύθερη προς σύγκλιση. Επιπλέον, λόγω ασυμμετριών πριν και μετά τους επικλινείς κλάδους του δευτερεύοντος ελαχίστου, και βάσει της θερμοκρασίας του δευτερεύοντα αστέρα (βλ. παρακάτω), ο οποίος δύναται να έχει μαγνητική δραστηριότητα, οι παράμετροι μιας κηλίδας στην επιφάνειά του αφέθηκαν ελεύθερες προς σύγκλιση. Σαν εναλλακτική λύση, δοκιμάστηκε και η ύπαρξη θερμής κηλίδας στην επιφάνεια του πρωτεύοντα, η οποία θα μπορούσε να αποτελεί το σημείο πρόσπτωσης της ύλης που προέρχεται από τον δευτερεύοντα (βλ. παρακάτω). Η σύγκριση των δύο προηγουμένων υποθέσεων βάσει των $\sum res^2$ έδειξε περίπου ~15% καλύτερη προσαρμογή των θεωρητικών καμπυλών στις παρατηρούμενες για την περίπτωση της ψυχρής κηλίδας. Λόγω ανυπαρξίας φασματοσκοπικά προσδιορισμένου λόγου μαζών των αστέρων του συστήματος, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ανίχνευσης του q (q-search - βλ. §4.1) και το αντίστοιχο διάγραμμα παρουσιάζεται στην εικ. 6.36. Στην εικ. 6.37 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 6.38 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος, ενώ στον πίνακα 6.34 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος.



Εικόνα 6.36. Διάγραμμα ανίχνευσης του q για το σύστημα V338 Her. Η τιμή του q που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή των $\sum res^2$ βρέθηκε ίση με 0.25.



Εικόνα 6.37. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες φωτός στα φίλτρα *B*, *V*, *R*, *I* του συστήματος V338 Her.



Εικόνα 6.38. Η γεωμετρία Roche του συστήματος V338 Her στη φάση 0.75 75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό (αριστερά) και στη φάση 0.24 (δεξιά) όπου φαίνεται η ψυχρή κηλίδα στην επιφάνεια του δευτερεύοντα αστέρα.

Πίνακας 6.34. Παράμετροι του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα V338 Her.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή			
i [°]	82.1 (2)	Φίλτρο:	B	V	R	I
q_{ph}	0.27 (1)	x_1	0.595	0.494	0.417	0.343
T_1 [K]	7000 (130)	x_2	0.947	0.815	0.734	0.601
T_2 [K]	3994 (68)	L_1/L_T	0.931 (3)	0.910 (4)	0.893 (4)	0.857 (4)
Ω_1	4.05 (2)	L_2/L_T	0.030 (2)	0.056 (2)	0.083 (2)	0.120 (4)
Ω_2	2.41 (1)	L_3/L_T	0.039 (1)	0.034 (1)	0.024 (2)	0.023 (2)
A_1	1[a]	$<L_3/L_T>$ (%)	3.0 (2)			
A_2	0.5[a]		Κηλίδες			
g_1	1[a]	Co-lat [°]	89 (3)			
g_2	0.32[a]	Co-long [°]	105 (5)			
		R [°]	26 (7)			
Σres^2	0.098	T_f (T_{sp}/T_{sur})	0.9 (1)			

[a]σταθερή τιμή

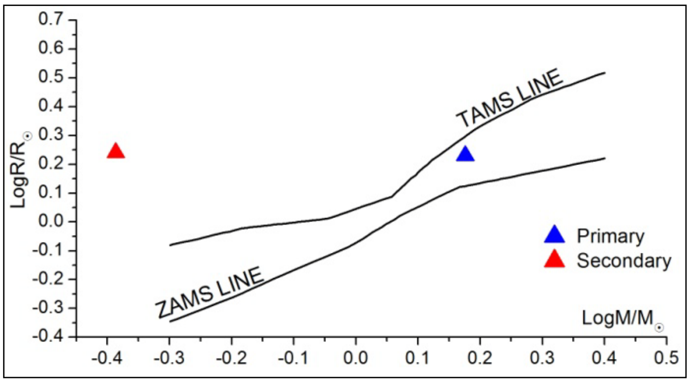
Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Η τιμή της μάζας M_1 του πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος υποτέθηκε από τον φασματικό του τύπο ως αστέρας της ΚΑ (βλ. Παρ. Ε), και οι τιμές των υπολοίπων παραμέτρων δίνονται στον πίνακα 6.35. Η εικ. 6.39 δείχνει τις θέσεις των αστέρων στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.

Πίνακας 6.35. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος V338 Her.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [$M_\odot$]	1.5[a]	0.41 (1)	log*g* [cm/s^2]	4.1 (1)	3.6 (1)
R [$R_\odot$]	1.7 (1)	1.7 (1)	α [$R_\odot$]	1.4 (3)	5.0 (4)
L [$L_\odot$]	6 (1)	0.7 (1)	M_{bol} [mag]	3 (1)	5 (1)

[a]υπόθεση



Εικόνα 6.39. Θέσεις των αστέρων του συστήματος V338 Her (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

Ανάλυση των μεταβολών της τροχιακής περιόδου

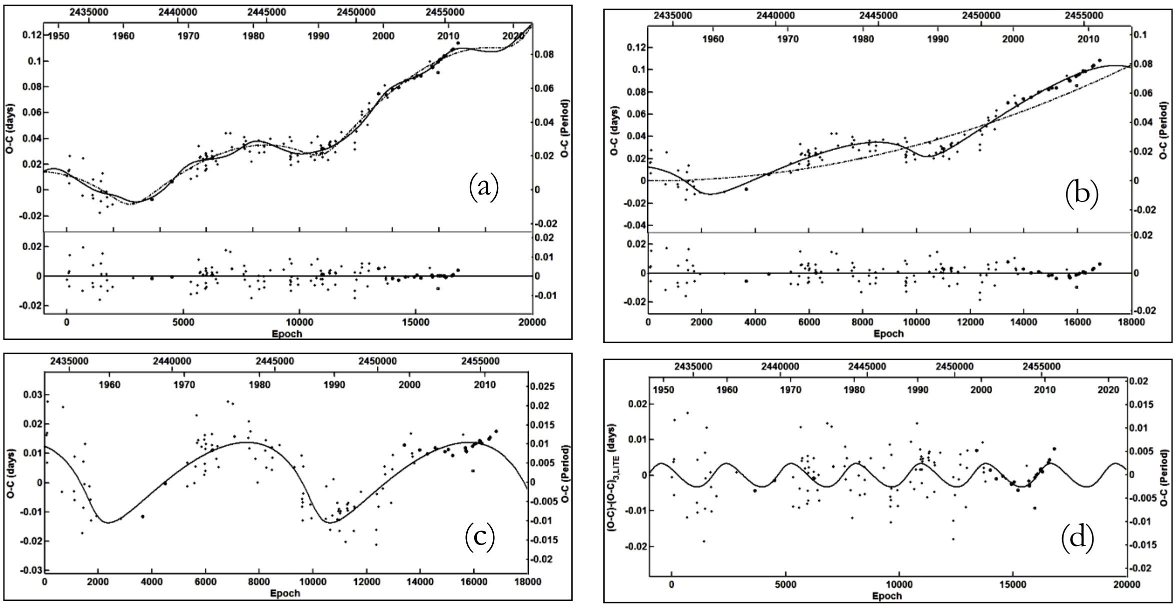
Για την κατασκευή του O−C διαγράμματος του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν 161 χρόνοι ελαχίστων, 124 εκ των οποίων προέκυψαν από οπτικές παρατηρήσεις, 10 από φωτογραφικές, 6 από φωτοηλεκτρικές και 21 από CCD παρατηρήσεις, οι οποίοι καλύπτουν χρονικό εύρος από το 1950 έως και σήμερα. Ως αρχική παράμετρος χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω αστρονομική εφημερίδα (Kreiner et al. 2001):

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2433771.3652 + 1.3057454^{\mathrm{d}}\mathrm{E} \qquad (6.16)$$

Αρχικά, ως συνάρτηση προσαρμογής δοκιμάστηκε η παραβολή, λόγω πιθανής μεταφοράς μάζας, και μια καμπύλη LITE, λόγω της εμφανούς περιοδικής κατανομής των O−C σημείων. Όμως, μετά την αφαίρεση της θεωρητικής καμπύλης, τα O−C σημεία της τελευταίας δεκαετίας έδειχναν και πάλι μια περιοδική κατανομή. Επομένως, μια δεύτερη καμπύλη LITE προσαρμόστηκε για να περιγράψει αυτήν τη μεταβολή. Εφόσον ο δευτερεύων αστέρας του συστήματος είναι ψυχρός, υπό την έννοια ότι μπορεί να έχει περίβλημα μεταφοράς που θα μπορούσε να δημιουργήσει μεταβολές στην τετραπολική ροπή (βλ. §4.2.4), ελέγχθηκε η πιθανή ύπαρξη του μηχανισμού Applegate (1992) και για τις δύο περιοδικές μεταβολές . Η μέθοδος ανάλυσης και η επεξήγηση των συμβόλων αναφέρονται στην παράγραφο 4.2. Ο πίνακας 6.36 περιέχει τις τιμές των παραμέτρων των θεωρητικών καμπυλών, ενώ στην εικ. 6.40 παρουσιάζεται η προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης στα O−C σημεία.

Πίνακας 6.36. Παράμετροι της O−C ανάλυσης του συστήματος V338 Her.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή	
Εκλειπτικό σύστημα			3^{o} σώμα	4^{o} σώμα
JD_0 [HJD−2400000]	33771.369 (9)	T_0 [HJD−2400000]	49111 (658)	33963 (1040)
P [d]	1.305742 (1)	ω_3 [°]	293 (23)	49 (94)
C_2 [$\times10^{-10}$ d/cycle]	3.404 (1)	A [d]	0.014 (1)	0.004 (1)
$\dot{P}$ [$\times10^{-7}$ d/yr]	1.904 (1)	P [yr]	29.6 (7)	11.7 (3)
$\dot{M}_{tr}$ [$\times10^{-8}$ $M_\odot$/yr]	2.743 (1)	e	0.38 (13)	0.28 (20)
		f(m) [$M_\odot$]	0.0155 (2)	0.0021 (1)
		M_{min} [$M_\odot$]	0.44 (1)	0.24 (1)
		Μεταβολή της τετραπολικής ροπής		
Σres^2	0.0065	ΔQ [$\times10^{50}$ g cm^2]	1.4	0.93



Εικόνα 6.40. (a): (επάνω): Προσαρμογή δύο θεωρητικών καμπυλών LITE και μιας παραβολής (συνεχής γραμμή) στα O−C σημεία. Η διακεκομμένη γραμμή αναφέρεται στον πρώτο όρο LITE και στην παραβολή. (κάτω) Τα O−C υπόλοιπα έπειτα από την αφαίρεση όλων των συναρτήσεων. (b): (επάνω) Προσαρμογή μόνο της πρώτης θεωρητικής καμπύλης LITE και της παραβολής στα O−C σημεία (συνεχής γραμμή). Η διακεκομμένη γραμμή αναφέρεται στην παραβολή. (κάτω): Τα O−C υπόλοιπα έπειτα από την αφαίρεση αυτών συναρτήσεων, όπου διακρίνεται η δεύτερη περιοδικότητα μετά το 1995. (c): Προσαρμογή της πρώτης καμπύλης LITE στα O−C σημεία, έπειτα από την αφαίρεση της παραβολής και πριν την προσαρμογή του δεύτερου όρου LITE. (d): Προσαρμογή μόνο της δεύτερης καμπύλης LITE στα O−C σημεία, έπειτα από την αφαίρεση της παραβολής και της πρώτης συνάρτησης LITE.

Συμπεράσματα

Ο πρωτεύων αστέρας του συστήματος ανήκει στην ΚΑ, αλλά οδεύει προς την TAMS, ενώ ο δευτερεύων είναι πιο εξελιγμένος και βρίσκεται στο στάδιο των υπογιγάντων. Ακόμα και σήμερα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της O−C ανάλυσης, υπάρχει μεταφορά μάζας από τον δευτερεύοντα προς τον πρωτεύοντα αστέρα με ρυθμό ~2.7×10^{-8} $M_{\odot}$/yr. Το σύστημα είναι κλασσικός Algol και η εξέλιξή του φαίνεται να συμφωνεί με την περίπτωση B (βλ. §1.2.4).

Τα αποτελέσματά της O−C ανάλυσης, αναφορικά με τον πρώτο περιοδικό όρο μεταβολής της τροχιακής περιόδου, συμφωνούν ποσοτικά με αυτά των Yang et al. (2010), όμως η ερμηνεία του διαφέρει. Οι Yang et al. (2010) υποστήριξαν ότι η περιοδικότητα των O−C προέρχεται από τη μαγνητική δραστηριότητα του δευτερεύοντα αστέρα, κάτι που όντως δεν μπορεί να αποκλειστεί σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, αλλά αυτό το σενάριο έρχεται σε αντίφαση με την φωτομετρική συνεισφορά που βρέθηκε στις καμπύλες φωτός που παρουσιάστηκαν εδώ. Συγκεκριμένα, οι δύο περιοδικές μεταβολές που βρέθηκαν από την παρούσα O−C ανάλυση του συστήματος, ερμηνεύτηκαν σύμφωνα με το LITE και προέκυψε η πιθανότητα ύπαρξης δύο επιπλέον μελών με ελάχιστες μάζες 0.4 $M_{\odot}$ και 0.2 $M_{\odot}$, αντίστοιχα. Βάσει της υπόθεσης ότι αυτοί οι δύο αστέρες ανήκουν στην ΚΑ, τότε η αναμενόμενη συνεισφορά τους στην ολική φωτεινότητα του συστήματος θα ήταν $L_{3+4,\mathrm{O-C}}$~1%, ενώ η παρατηρούμενη προέκυψε ίση με $L_{3,\mathrm{LC}}$~3%. Είναι προφανές, ότι η διαφορά μεταξύ αυτών των δύο τιμών είναι πάρα πολύ μικρή και μπορούν άνετα να ταυτιστούν, εάν το τροχιακό επίπεδο κάποιου ή και των δύο επιπλέον μελών σχηματίζει γωνία ελαφρώς μεγαλύτερη από 0° με αυτό του εκλειπτικού συστήματος (μη παράλληλη περιφορά γύρω από το κοινό κέντρο μάζας). Με αυτόν τον τρόπο η μάζα τους παίρνει μεγαλύτερες τιμές και η φωτεινότητα τους μπορεί να φτάσει την παρατηρούμενη. Επιπλέον, και για τα δύο επιπλέον μέλη ικανοποιείται το κριτήριο στης δυναμικής ευστάθειας (Harrington 1977). Εναλλακτικά, και οι δύο περιοδικοί όροι μπορούν να ερμηνευτούν με τον μηχανισμό Applegate (1992) λαμβάνοντας υπόψη ότι ο δευτερεύων συνοδός είναι μαγνητικά δραστήριος. Ένα ακόμα πιθανό σενάριο είναι η ύπαρξη και των δύο μηχανισμών στο σύστημα. Ο πρώτος περιοδικός όρος θα μπορούσε να ερμηνευτεί με το LITE, αλλά η τροχιά του τρίτου σώματος θα σχημάτιζε μεγάλη γωνία με το τροχιακό επίπεδο του εκλειπτικού συστήματος, ενώ ο δεύτερος όρος θα μπορούσε να ερμηνευτεί με τον μηχανισμό Applegate (1992). Μελλοντικές φωτομετρικές παρατηρήσεις θα δείξουν εάν στο σύστημα λαμβάνουν χώρα και μεταβολές της λαμπρότητάς του, όπως προβλέπονται από τον μηχανισμό Applegate (1992).

Λόγω της υποψηφιότητας του συστήματος για αναπάλσεις (Soydugan et al. 2006b), πραγματοποιήθηκε ανάλυση Fourier (§4.3) στα υπόλοιπα της αφαίρεσης των θεωρητικών από τις παρατηρούμενες καμπύλες φωτός. Αν και εντοπίστηκε μια συχνότητα με τιμή 5.9 c/d στα υπόλοιπα του *B*-φίλτρου, λόγω του πολύ μικρού ημιπλάτους της (1.6 mmag) και της οριακής τιμής του S/N (~4) και λαμβάνοντας υπόψη ότι το φωτομετρικό σφάλμα των δεδομένων ήταν 4.6 mmag, πιθανότατα δεν είναι φυσικής προέλευσης, αλλά ατμοσφαιρικής. Επίσης, η τιμή που βρέθηκε είναι πολύ οριακή για παλλόμενο αστέρα τύπου δ Sct και αποκλίνει πολύ των τιμών που έχουν βρεθεί για αστέρες με περίπου ίδια φυσικά χαρακτηριστικά (βλ. κεφ. 7). Ωστόσο, νέες παρατηρήσεις με κατάλληλο εξοπλισμό (π.χ. μεγαλύτερο τηλεσκόπιο), ο οποίος θα προσδίδει καλύτερο S/N, αναμένεται να δώσουν τελικές απαντήσεις.

6.9. Το σύστημα VZ Leo

Ιστορική αναδρομή

Η πρώτη βιβλιογραφική αναφορά, στην οποία αναφέρεται η μεταβλητότητα του συστήματος, δίνεται από τον Sandig (1947). Ο Qian (2001) έκανε ανάλυση της τροχιακής περιόδου του συστήματος και κατέληξε σε ότι η περίοδος μειώνεται και ως πιθανότερη ερμηνεία πρότεινε την απώλεια τροχιακής στροφορμής. Η μόνη πληροφορία για τον φασματικό τύπο του VZ Leo ως A5 προέρχεται από τον κατάλογο "Catalogue of Stellar Spectral Classifications" (Skiff 2010). Το σύστημα είναι υποψήφιο να περιέχει τόσο τρίτο μέλος (Hoffman et al. 2006) όσο και παλλόμενο συνοδό (Soydugan et al. 2006b). Τέλος, οι Ulaş et al. (2009) παρουσίασαν, βασιζόμενοι σε νέες CCD παρατηρήσεις, το φωτομετρικό μοντέλο του συστήματος και νέα ανάλυση του O−C διαγράμματός του.

Στις παρακάτω παραγράφους παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των Ulaş et al. (2009) (Liakos, A.-co-author), αλλά καθώς προέκυψαν νέα στοιχεία για τη μεταβολή της περιόδου του συστήματος, τόσο τα αποτελέσματα της O−C ανάλυσης όσο και το φωτομετρικό μοντέλο διαφέρουν.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι φωτομετρικές παρατηρήσεις του συστήματος έγιναν στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1) με τη χρήση του τηλεσκοπίου των 40 cm και της CCD ST-8XMEI και διήρκεσαν δέκα νύκτες εντός του χρονικού διαστήματος Μάρτιος-Απρίλιος 2007. Στον πίνακα 6.37 δίνονται: Οι αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία (βλ. §3.1.1) και τα φαινόμενα μεγέθη τους m_V στο φίλτρο V, ο αριθμός των σημείων N ανά φίλτρο παρατήρησης και το μέσο φωτομετρικό σφάλμα τους *s.d.* εκφρασμένο σε mmag. Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2453387.4371 + 1.08991^{\mathrm{d}}\ \mathrm{E} \tag{6.17}$$

και υπολογίστηκε από τους χρόνους ελαχίστων (Πίνακας Β1), οι οποίοι προέκυψαν από τα δεδομένα μας και τους πιο πρόσφατους της βιβλιογραφίας.

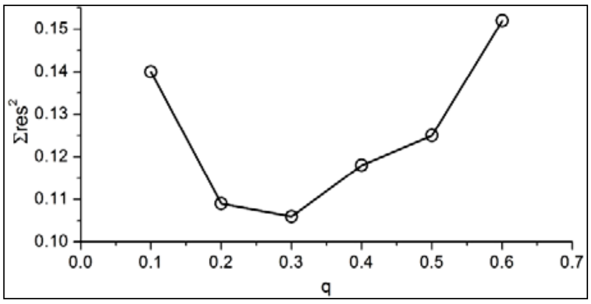
Πίνακας 6.37. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους.

Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για κάθε φίλτρο παρατήρησης			
VZ Leo	Μεταβλητός	11.8[a]	R		I	
TYC 1403-1558-1	Σύγκρισης	11.62[b]	N	s.d.	N	s.d.
TYC 1403-799-1	Ελέγχου	12.99[c]	1176	11.1	1168	13.1

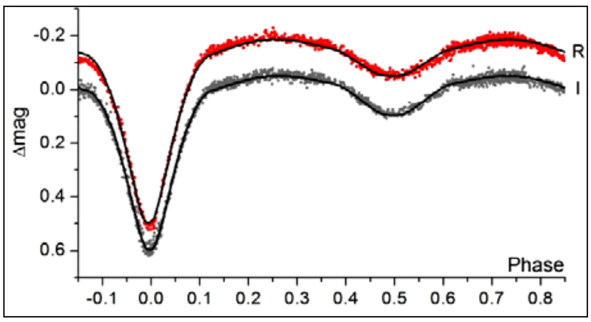
[a]Watson et al. (2006), [b]Høg et al. (2000), [c]Zacharias et al. (2004)

Ανάλυση των καμπυλών φωτός

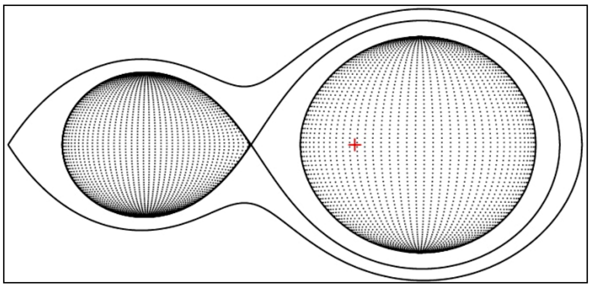
Η θερμοκρασία του πρωτεύοντα αστέρα τέθηκε ίση με 8200 K βάσει της μοναδικής διαθέσιμης πληροφορίας (Skiff 2010). Λόγω της πιθανής παρουσίας τρίτου μέλους στο σύστημα (βλ. παρακάτω την O−C ανάλυση), η φωτομετρική συνεισφορά l_3 αφέθηκε ελεύθερη προς σύγκλιση. Λόγω μη διαθέσιμου φασματοσκοπικού λόγου μαζών των αστέρων του συστήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ανίχνευσης του q (βλ. §4.1) και το αντίστοιχο διάγραμμα παρουσιάζεται στην εικ. 6.41. Στην εικ. 6.42 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 6.43 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος, ενώ στον πίνακα 6.38 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος.



Εικόνα 6.41. Διάγραμμα ανίχνευσης του q για το σύστημα VZ Leo. Η τιμή του q που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή των $\sum res^2$ βρέθηκε ίση με 0.3.



Εικόνα 6.42. Θεωρητική (συνεχής γραμμή) και παρατηρούμενη (σημεία) καμπύλη φωτός του συστήματος VZ Leo στα φίλτρα *R* και *I*.



Εικόνα 6.43. Η γεωμετρία Roche του συστήματος VZ Leo στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό.

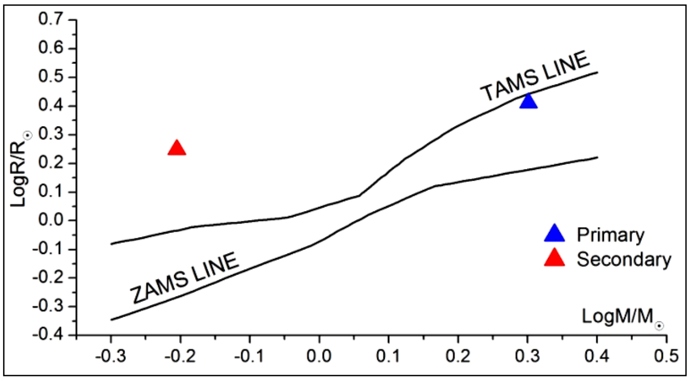
Πίνακας 6.38. Παράμετροι του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα VZ Leo.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή	
i [°]	81.9 (1)	A_1	1[a]	Φίλτρο:	R	I
q_{ph}	0.312 (3)	A_2	0.5[a]	x_1	0.425	0.340
T_1 [K]	8000[a,b]	g_1	1[a]	x_2	0.703	0.584
T_2 [K]	4404 (11)	g_2	0.32[a]	L_1/L_T	0.934 (4)	0.903 (2)
Ω_1	2.83 (1)			L_2/L_T	0.041 (1)	0.057 (1)
Ω_2	2.487[a]			L_3/L_T	0.026 (3)	0.039 (2)
		Σres^2	0.211	$<L_3/L_T>$ (%)	3.3 (2)	

[a]σταθερή τιμή, [b]υπόθεση

Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Η τιμή της μάζας M_1 του πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος υποτέθηκε από τον φασματικό του τύπο ως αστέρας της ΚΑ (βλ. Παρ. Ε) και δίνεται μαζί με τις τιμές των υπολοίπων παραμέτρων στον πίνακα 6.39. Η εικ. 6.44 δείχνει τις θέσεις των αστέρων στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.



Εικόνα 6.44. Θέσεις των αστέρων του συστήματος VZ Leo (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

Πίνακας 6.39. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος VZ Leo.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [$M_\odot$]	2.0[a]	0.62 (1)	log$g$ [cm/s^2]	3.92 (3)	3.74 (5)
R [$R_\odot$]	2.58 (1)	1.77 (1)	α [$R_\odot$]	1.50 (1)	4.80 (1)
L [$L_\odot$]	27 (1)	1.1 (1)	M_{bol} [mag]	1.2 (1)	4.7 (1)

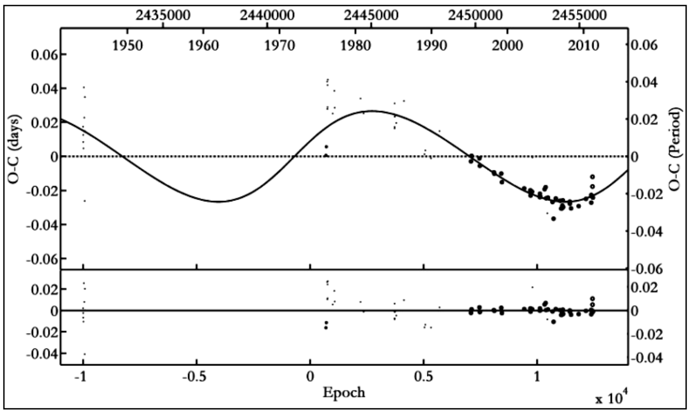
[a]υπόθεση

Ανάλυση των μεταβολών της τροχιακής περιόδου

Το O−C διάγραμμα του VZ Leo βασίζεται σε 77 χρόνους ελαχίστων, 35 εκ των οποίων προέκυψαν από οπτικές, 2 από φωτογραφικές και 40 από CCD παρατηρήσεις και καλύπτουν χρονικό εύρος από το 1945 έως και σήμερα. Ως αρχική παράμετρος χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω αστρονομική εφημερίδα (Kreiner et al. 2001):

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2431164.3238 + 1.089904\ ^{\mathrm{d}}\mathrm{E} \qquad (6.18)$$

Αρχικά, ως συνάρτηση προσαρμογής δοκιμάστηκε τόσο η κυρτή παραβολή, λόγω πιθανής μεταφοράς μάζας, όσο και η κοίλη σύμφωνα με τα αποτελέσματα των Qian (2001) και των Ulaş et al. (2009). Επιπλέον, δοκιμάστηκε και μια καμπύλη LITE, λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων, η οποία είναι ιδιαίτερα εμφανής στα πιο σύγχρονα O−C σημεία. Εφόσον ο δευτερεύων αστέρας του συστήματος, λόγω θερμοκρασίας, δύναται να έχει περίβλημα μεταφοράς που θα μπορούσε να δημιουργήσει μεταβολές στην τετραπολική ροπή (βλ. §4.2.4), ελέγχθηκε η πιθανή ύπαρξη του μηχανισμού Applegate (1992). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η καμπύλη LITE περιγράφει ικανοποιητικά τα O−C σημεία και δεν απαιτείται η χρήση παραβολής, καθώς ο παραβολικός όρος προέκυπτε πάντα πολύ μικρός και επομένως παραλείφθηκε. Η μέθοδος ανάλυσης και η επεξήγηση των συμβόλων αναφέρονται στην παράγραφο 4.2. Ο πίνακας 6.40 περιέχει τις τιμές των παραμέτρων των θεωρητικών καμπυλών, ενώ στην εικ. 6.45 παρουσιάζεται η προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης στα O−C σημεία.



Εικόνα 6.45. Προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης του LITE στα O−C σημεία του συστήματος VZ Leo (επάνω) και τα υπόλοιπα (residuals) μετά την αφαίρεση της θεωρητικής καμπύλης (κάτω).

Πίνακας 6.40. Παράμετροι της O−C ανάλυσης του συστήματος VZ Leo.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
Εκλειπτικό σύστημα		$3^{ο}$ σώμα	
JD_0 [HJD−2400000]	2442063.350 (4)	P_3 [yr]	46 (2)
P [d]	1.089905 (4)	e_3	0.2 (1)
Μεταβολή της τετραπολικής ροπής		ω_3 [°]	355 (40)
ΔQ [$\times 10^{50}$ g cm^2]	2.62	$f(m_3)$ [$M_\odot$]	0.049 (6)
LITE		$M_{3,min}$ [$M_\odot$]	0.84 (8)
T_0 [HJD−2400000]	57777 (1853)		
A [d]	0.027 (2)	Σres^2	0.014

Συμπεράσματα

Και οι δύο αστέρες του συστήματος είναι εξελιγμένοι. Ο πρωτεύων είναι μεν επάνω στην ΚΑ, αλλά πολύ κοντά στην TAMS. Από την άλλη πλευρά, ο δευτερεύων αστέρας είναι κοντά στο στάδιο των υπογιγάντων και έχει γεμίσει τον λοβό Roche του. Λαμβάνοντας υπόψη τόσο την εξελικτική κατάσταση των μελών όσο και τις τιμές των μαζών τους, συμπεραίνεται ότι κατά το παρελθόν υπήρξε μεταφορά μάζας από τον δευτερεύοντα προς τον πρωτεύοντα, έτσι ο δευτερεύων εξελίχθηκε ταχύτερα. Όμως, από την O−C ανάλυση του συστήματος δεν προέκυψε ότι αυτήν τη στιγμή λαμβάνει χώρα μεταφορά μάζας. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί θεωρώντας είτε μικρό ρυθμό μεταφοράς είτε προσωρινή παύση της. Επίσης, η περίοδος του συστήματος είναι πολύ μικρή για τέτοιου τύπου αστέρες, επομένως, κρίνοντας και από το γεγονός ότι ο πρωτεύων αστέρας έχει σχεδόν γεμίσει τον λοβό Roche του, είναι πολύ πιθανό το σύστημα να έλθει σε επαφή μελλοντικά. Το σύστημα εξελίσσεται πιθανότατα σύμφωνα με την περίπτωση Β (βλ. §1.2.4).

Το πιο ενδιαφέρον σημείο της O−C ανάλυσης είναι η ασυμφωνία των παρόντων αποτελεσμάτων με αυτά του Qian (2001) και των Ulaş et al. (2009), οι οποίοι είχαν καταλήξει στο αποτέλεσμα μείωσης της τροχιακής περιόδου και απώλειας στροφορμής από το σύστημα, κάτι που συναντάται συχνά σε τέτοια συστήματα. Το κρίσιμο σημείο όμως, το οποίο αλλάζει ριζικά τη λύση είναι οι πρόσφατοι χρόνοι ελαχίστου και συγκεκριμένα αυτοί μετά το 2008. Αυτά τα O−C σημεία δείχνουν ξεκάθαρα μια αυξητική τάση της περιόδου και αποκλίνουν πολύ από την προσαρμογή της κοίλης παραβολής που δοκίμασαν ο Qian (2001) και οι Ulaş et al. (2009). Αυτή η αυξητική τάση των O−C σημείων, καθώς και η υποψηφιότητα του συστήματος για ύπαρξη τρίτου μέλους (Hoffman et al. 2006), οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι μια περιοδική καμπύλη είναι πιθανόν να περιγράψει τις μεταβολές της τροχιακής περιόδου με καλύτερη ακρίβεια. Όντως, από την παρούσα ανάλυση προέκυψε ότι το σύστημα μπορεί να περιέχει και τρίτο μέλος, ενώ η ελάχιστη τιμή της μάζας του υπολογίστηκε ίση με 0.84 $M_\odot$. Αυτό το αποτέλεσμα ελήφθη υπόψη στην ανάλυση των καμπυλών φωτός, από την οποία προέκυψε φωτομετρική συνεισφορά $L_{3,\mathrm{LC}}$~3.3%. Από την άλλη πλευρά, εάν το τρίτο σώμα είναι αστέρας της ΚΑ, τότε αναμένεται να συνεισφέρει $L_{3,\mathrm{O-C}}$~2% στην ολική φωτεινότητα του συστήματος. Η πολύ αυτή μικρή διαφορά μεταξύ αναμενόμενης και παρατηρούμενης φωτομετρικής συνεισφοράς μπορεί να ξεπεραστεί με τη ρεαλιστική υπόθεση ότι τα τροχιακά επίπεδα του τρίτου σώματος και του εκλειπτικού συστήματος σχηματίζουν μικρή γωνία (~15°-20°), έτσι η τιμή της μάζας του τρίτου αστέρα προκύπτει μεγαλύτερη, προσδίδοντας κατ' επέκταση μεγαλύτερη φωτομετρική συνεισφορά που ικανοποιεί την παρατηρούμενη. Για την ελάχιστη μάζα που υπολογίστηκε δεν ικανοποιείται το κριτήριο της δυναμικής ευστάθειας (Harrington 1977). Εναλλακτικά, εάν υποθέσουμε ότι η επιπρόσθετη φωτομετρική συνεισφορά είναι αστοχία του φωτομετρικού μοντέλου, τότε οι περιοδικές μεταβολές της τροχιακής περιόδου μπορούν να ερμηνευτούν με τον μηχανισμό Applegate (1992).

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, το σύστημα ήταν υποψήφιο να περιέχει μέλος τύπου δ Sct, επομένως πραγματοποιήθηκε ανάλυση Fourier (§4.3) στα υπόλοιπα της αφαίρεσης των θεωρητικών από τις παρατηρούμενες καμπύλες φωτός. Από τα αποτελέσματα δεν προέκυψε η ύπαρξη κάποιας συχνότητας μεταξύ 3-80 c/d και με S/N>4, επομένως, δεν υπάρχει κάποια υπόνοια ανάπαλσης.

6.10. Το σύστημα AT Peg

Ιστορική αναδρομή

Το σύστημα ανακαλύφθηκε από τον Sohneller (1931), ενώ έχει παρατηρηθεί φωτομετρικά από πολλούς ερευνητές (Cristaldi & Walter 1963, Hill & Barnes 1972, Giuricin et al. 1981, Gülmen et al. 1993, Margrave 1981, Güdür et al. 1987). Οι Maxted et al. (1994) έκαναν φασματοσκοπικές παρατηρήσεις, υπολόγισαν τις ακτινικές ταχύτητες των μελών του συστήματος, εκτίμησαν ότι ο πρωτεύων αστέρας είναι φασματικού τύπου A4 και συνδυάζοντας τα αποτελέσματά τους με την καμπύλη φωτός των Cristaldi & Walter (1963) υπολόγισαν τις απόλυτες παραμέτρους των μελών του.

Οι Liakos et al. (2012d) πραγματοποίησαν CCD παρατηρήσεις, από τις οποίες προέκυψαν νέες καμπύλες φωτός στα φίλτρα *B* και *R*, και ανέλυσαν τις τροχιακές μεταβολές του συστήματος. Τα αποτελέσματα δίνονται στις επόμενες παραγράφους.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι παρατηρήσεις έλαβαν χώρα στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1) με τη χρήση του τηλεσκοπίου των 20 cm και της CCD ST-8XMEI και διήρκεσαν έξι νύκτες μεταξύ Αυγούστου-Σεπτεμβρίου 2010. Στον πίνακα 6.41 δίνονται: Οι αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία (βλ. §3.1.1) και τα φαινόμενα μεγέθη τους m_V στο φίλτρο *V*, ο αριθμός των σημείων *N* ανά φίλτρο παρατήρησης και το μέσο φωτομετρικό σφάλμα τους *s.d.* εκφρασμένο σε mmag.

Πίνακας 6.41. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους.

Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για κάθε φίλτρο παρατήρησης			
AT Peg	Μεταβλητός	8.97[a]	B		R	
TYC 1136-1084-1	Σύγκρισης	8.37[b]	N	s.d.	N	s.d.
TYC 1137-673-1	Ελέγχου	10.71[b]	1077	3.6	1081	3.8

[a]Watson et al. (2006), [b]Høg et al. (2000)

Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\mathrm{Min.I} = 2455447.45841 + 1.14564^{\mathrm{d}}\,\mathrm{E} \tag{6.19}$$

και υπολογίστηκε από τους χρόνους ελαχίστων (Πίνακας B1), οι οποίοι προέκυψαν από τα δεδομένα μας και τους πιο πρόσφατους της βιβλιογραφίας.

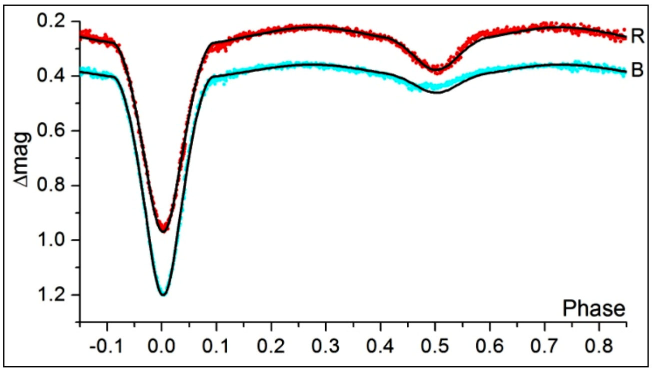
Ανάλυση των καμπυλών φωτός

Η θερμοκρασία του πρωτεύοντα αστέρα τέθηκε ίση με 8400 K (Maxted et al. 1994). Λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων (βλ. παρακάτω), η οποία δύναται να προκαλείται από τρίτο μέλος στο σύστημα, η παράμετρος της φωτομετρικής συνεισφοράς από ένα επιπλέον μέλος στο σύστημα l_3 αφέθηκε ελεύθερη προς σύγκλιση. Ο φασματοσκοπικός λόγος μαζών (Maxted et al. 1994) χρησιμοποιήθηκε ως αρχική τιμή και αφέθηκε ελεύθερος να συγκλίνει, πάντα όμως με τιμές εντός των ορίων του σφάλματός του. Στην εικ. 6.46 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 6.47 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος, ενώ στον πίνακα 6.42 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος.

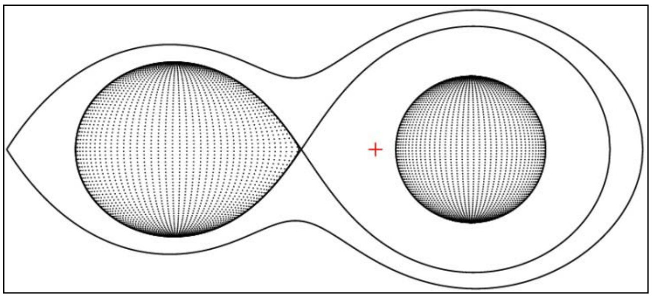
Πίνακας 6.42. Παράμετροι του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα AT Peg.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή	
i [°]	77.54 (5)	A_1	1[a]	Φίλτρο:	B	R
q_{ph}	0.478 (3)	A_2	0.5[a]	x_1	0.556	0.413
T_1 [K]	8400[a,b]	g_1	1[a]	x_2	0.834	0.596
T_2 [K]	5189 (7)	g_2	0.32[a]	L_1/L_T	0.809 (2)	0.727 (2)
Ω_1	4.49 (1)	K_1[b] [km/sec]	94.1 (7)	L_2/L_T	0.115 (1)	0.212 (1)
Ω_2	2.83[a]	K_2[b] [km/sec]	199 (4)	L_3/L_T	0.076 (2)	0.062 (2)
Σres^2	0.089			$<L_3/L_T>$ (%)	6.9 (1)	

[a]σταθερή τιμή, [b]Maxted et al. (1994)



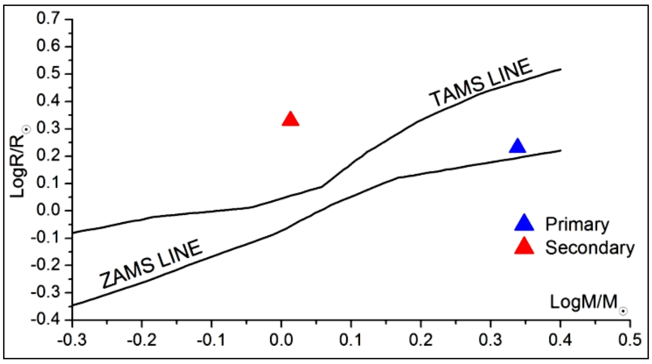
Εικόνα 6.46. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες φωτός στα φίλτρα *B* και *R* του συστήματος AT Peg.



Εικόνα 6.47. Η γεωμετρία Roche του συστήματος AT Peg στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό.

Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Στον πίνακα 6.43 δίνονται οι απόλυτες παράμετροι των αστέρων-μελών και η εικ. 6.48 δείχνει τις θέσεις τους στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.



Εικόνα 6.48. Θέσεις των αστέρων του συστήματος AT Peg (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

Πίνακας 6.43. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος AT Peg.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [$M_\odot$]	2.2 (1)	1.0 (1)	log$g$ [cm/s^2]	4.31 (3)	3.79 (3)
R [$R_\odot$]	1.70 (3)	2.14 (3)	α [$R_\odot$]	2.18 (3)	4.61 (9)
L [$L_\odot$]	13.0 (4)	3.0 (1)	M_{bol} [mag]	2.0 (2)	3.6 (2)

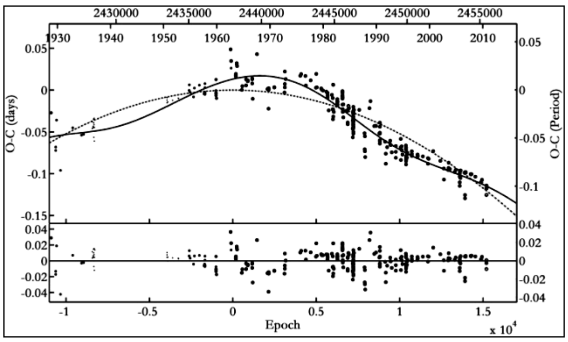
Ανάλυση των μεταβολών της τροχιακής περιόδου

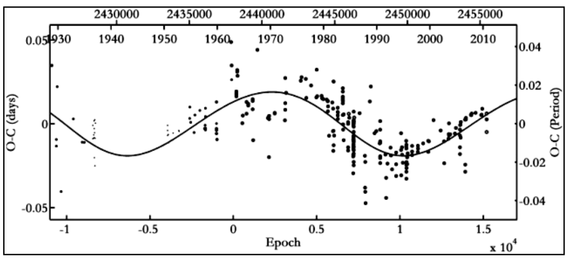
Το O−C διάγραμμα του AT Peg περιέχει 276 χρόνους ελαχίστων, 23 εκ των οποίων προέκυψαν από οπτικές, 24 από φωτογραφικές, 5 από φωτοηλεκτρικές και 224 από CCD παρατηρήσεις και καλύπτουν χρονικό εύρος από το 1930 έως και σήμερα. Ως αρχική παράμετρος χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω αστρονομική εφημερίδα (Kreiner et al. 2001):

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2445640.459\ + 1.1460901^{\mathrm{d}}\mathrm{E} \qquad (6.20)$$

Αρχικά, ως συνάρτηση προσαρμογής δοκιμάστηκε η παραβολή, λόγω πιθανής μεταφοράς μάζας, και μια καμπύλη LITE, λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων, η οποία είναι ιδιαίτερα εμφανής στα πιο σύγχρονα O−C σημεία. Εφόσον ο δευτερεύων αστέρας του συστήματος λόγω θερμοκρασίας δύναται να έχει περίβλημα μεταφοράς που θα μπορούσε να δημιουργήσει μεταβολές στην τετραπολική ροπή (βλ. §4.2.4), ελέγχθηκε η πιθανή ύπαρξη του μηχανισμού Applegate (1992).

Η O−C ανάλυση ανέδειξε την ύπαρξη μιας κοίλης παραβολής που οδηγεί σε μείωση της περιόδου και η οποία έρχεται σε αντίφαση με την αναμενόμενη (κυρτή), καθώς η μεταφορά μάζας πρέπει να έχει φορά από τον δευτερεύοντα προς τον πρωτεύοντα αστέρα (βλ. §4.2.2). Αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να ερμηνευτεί με απώλεια στροφορμής και μάζας από το σύστημα λόγω μαγνητικής πέδησης (βλ. §4.2.2). Συγκεκριμένα, για να γίνει μια πρώτη εκτίμηση του ρυθμού απώλειας μάζας, χρησιμοποιήθηκε η σχέση (4.69), μη λαμβάνοντας υπόψη απώλεια μάζας λόγω αστρικών ανέμων, αφού προκαλεί αύξηση της περιόδου, ενώ υποτέθηκε μια τυπική τιμή μεταφοράς μάζας (10^{-8} $M_\odot$/yr) για ένα τέτοιο σύστημα. Οι σταθερές του όρου της μαγνητικής πέδησης της σχέσης (4.69) είναι ίδιες με αυτές των Soydugan et al. (2011) (βλ. επίσης σχέση 4.42).





Εικόνα 6.49. Αριστερά: Προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης LITE και μιας παραβολής (συνεχής γραμμή) στα O−C σημεία του συστήματος AT Peg (επάνω) και τα υπόλοιπα (residuals) μετά την αφαίρεση της συνολικής συνάρτησης (κάτω). Η διακεκομμένη γραμμή αναφέρεται στην παραβολή. Δεξιά: Προσαρμογή της καμπύλης LITE στα O−C υπόλοιπα έπειτα από την αφαίρεση της παραβολής.

Η μέθοδος ανάλυσης και η επεξήγηση των συμβόλων αναφέρονται στην παράγραφο 4.2. Ο πίνακας 6.49 περιέχει τις τιμές των παραμέτρων των θεωρητικών καμπυλών, ενώ στην εικ. 6.44 παρουσιάζεται η προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης στα O−C σημεία.

Πίνακας 6.44. Παράμετροι της O−C ανάλυσης του συστήματος AT Peg.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
Εκλειπτικό σύστημα		3º σώμα	
JD_0 [HJD−2400000]	38030.447 (1)	ω_3 [°]	204 (37)
P [d]	1.1460905 (2)	P_3 [yr]	49.7 (9)
C_2 [$\times10^{-10}$ d/cycle]	-5.590 (1)	e_3	0.1 (1)
$\dot{P}$ [$\times10^{-7}$ d/yr]	-3.563 (1)	$f(m_3)$ [$M_\odot$]	0.0129 (3)
$\dot{M}_{tr}$ [$\times10^{-8}$ $M_\odot$/yr]	1[a]	$M_{3,min}$ [$M_\odot$]	0.57 (1)
$\dot{M}_{loss}$ [$\times10^{-8}$ $M_\odot$/yr]	-7.7 (2)		
LITE		Μεταβολή της τετραπολικής ροπής	
T_0 [HJD−2400000]	46308 (1796)	ΔQ [$\times10^{50}$ g cm^2]	2.99
A [d]	0.018 (1)	Σres^2	0.321

[a]υπόθεση

Συμπεράσματα

Το εκλειπτικό σύστημα αποτελείται από έναν αστέρα της ΚΑ (πρωτεύων), ο οποίος είναι κοντά τη ZAMS και έναν εξελιγμένο (δευτερεύων), ο οποίος φαίνεται να έχει φτάσει στο στάδιο των υπογιγάντων. Ο δευτερεύων αστέρας φαίνεται να έχει χάσει ήδη το μεγαλύτερο μέρος της μάζας του και κρίνοντας από το εξελικτικό στάδιο του πρωτεύοντα το σύστημα φαίνεται να εξελίσσεται σύμφωνα με την περίπτωση Α (βλ. §1.2.4).

Δεν εντοπίστηκε συνεχής αύξηση της περιόδου, όπως αναμενόταν, λόγω πιθανής μεταφοράς μάζας από τον δευτερεύοντα στον πρωτεύοντα, αλλά αντ' αυτού βρέθηκε ότι η περίοδος του συστήματος μειώνεται. Πιθανότατα, ο δευτερεύων αστέρας του συστήματος, λόγω φασματικού τύπου, μπορεί και μεταβάλλει την περίοδο του συστήματος σύμφωνα με το φαινόμενο της μαγνητικής πέδησης. Η απώλεια μάζας λόγω αυτού του μηχανισμού και κατ' επέκταση η μείωση της τροχιακής περιόδου δύναται να αποκρύπτει την αναμενόμενη αύξηση της περιόδου λόγω μεταφοράς μάζας από τον δευτερεύοντα στον πρωτεύοντα.

Από την O−C ανάλυση προέκυψε η πιθανότητα ύπαρξης ενός τρίτου σώματος, το οποίο, εάν είναι αστέρας της ΚΑ, αναμένεται να συνεισφέρει $L_{3,O-C}$~1%. Από την άλλη πλευρά, από την ανάλυση των καμπυλών φωτός εντοπίστηκε φωτομετρική συνεισφορά $L_{3,LC}$~7%. Η διαφορά μεταξύ αυτών των τιμών είναι μεγάλη, αλλά μπορεί να ερμηνευτεί: α) με το σενάριο της μη παραλληλίας των τροχιακών επιπέδων εκλειπτικού συστήματος και τρίτου σώματος. Συγκεκριμένα, εάν το τροχιακό επίπεδο του τρίτου μέλους σχηματίζει γωνία ~78° με το αντίστοιχο του εκλειπτικού, τότε η μάζα του γίνεται ~2 $M_\odot$ και ικανοποιεί, ως αστέρας της ΚΑ, την παρατηρούμενη φωτομετρική συνεισφορά. β) Με το σενάριο της εξελικτικής κατάστασης του τρίτου μέλους. Συγκεκριμένα, υποθέτοντας ότι το τρίτο μέλος είναι πιο εξελιγμένος αστέρας (π.χ. γίγαντας ή υπογίγαντας) τότε μπορεί να συνεισφέρει περισσότερο από έναν αστέρα ίδιας μάζας ο οποίος ανήκει στην ΚΑ. Για την ελάχιστη μάζα που υπολογίστηκε ικανοποιείται το κριτήριο της δυναμικής ευστάθειας (Harrington 1977). Ο μηχανισμός Applegate (1992) μπορεί να ερμηνεύσει τις μεταβολές της τροχιακής περιόδου, αλλά όχι και την επιπρόσθετη φωτομετρική συνεισφορά.

Το σύστημα είναι υποψήφιο να περιέχει παλλόμενο συνοδό (Soydugan et al. 2006b), επομένως, πραγματοποιήθηκε ανάλυση Fourier (§4.3) στα υπόλοιπα της αφαίρεσης των θεωρητικών από τις παρατηρούμενες καμπύλες φωτός. Δεν βρέθηκαν όμως συχνότητες ανάπαλσης μεταξύ 3-80 c/d και με S/N>4, επομένως συμπεραίνεται ότι ο θερμότερος αστέρας δεν παρουσιάζει αναπάλσεις.

6.11. Το σύστημα X Tri

Ιστορική αναδρομή

Η μεταβλητότητα του συστήματος ανακαλύφθηκε από τον Walker (1921) και επιβεβαιώθηκε από τον Neujmin (1922). Οι Giuricin et al. (1983) δημοσίευσαν την πιο πρόσφατη ταξινόμηση των μελών του ως A3 και K0 για τον πρωτεύοντα και τον δευτερεύοντα αστέρα, αντίστοιχα. Οι μεταβολές της τροχιακής περιόδου έχουν μελετηθεί από διάφορους ερευνητές (Irwin 1959, Frieboes-Conde & Herczeg 1973), οι οποίοι τις ερμήνευσαν με το LITE, τη μεταφορά μάζας μεταξύ των μελών και άλλους μη-περιοδικούς μηχανισμούς. Το σύστημα είναι υποψήφιο να περιέχει τόσο τρίτο μέλος (Hoffman et al. 2006) όσο και παλλόμενο συνοδό (Soydugan et al. 2006b).

Οι Liakos et al. (2010) διεξήγαγαν νέες φωτομετρικές παρατηρήσεις για το σύστημα, οι οποίες κάλυψαν για πρώτη φορά ολόκληρη την καμπύλη φωτός και σε διαφορετικά μέρη του Η/Μ φάσματος, υπολόγισαν τις απόλυτες παραμέτρους των μελών του και ανέλυσαν εκ νέου το O−C διάγραμμά του. Τα αποτελέσματά της τελευταίας εργασίας παρουσιάζονται παρακάτω.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι παρατηρήσεις έλαβαν χώρα στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1) με τη χρήση του τηλεσκοπίου των 40 cm και της CCD ST-8XMEI και διήρκεσαν πέντε νύκτες μεταξύ Οκτωβρίου 2008-Ιανουαρίου 2009. Στον πίνακα 6.45 δίνονται: Οι αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία (βλ. §3.1.1) και τα φαινόμενα μεγέθη τους m_V στο φίλτρο V, ο αριθμός των σημείων N ανά φίλτρο παρατήρησης και το μέσο φωτομετρικό σφάλμα τους *s.d.* εκφρασμένο σε mmag. Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\mathrm{Min.\,I} = \mathrm{HJD}\ 2454764.39477 + 0.97152^{\mathrm{d}}\ \mathrm{E} \tag{6.21}$$

και υπολογίστηκε από τους χρόνους ελαχίστων (Πίνακας B1), οι οποίοι προέκυψαν από τα δεδομένα μας και τους πιο πρόσφατους της βιβλιογραφίας.

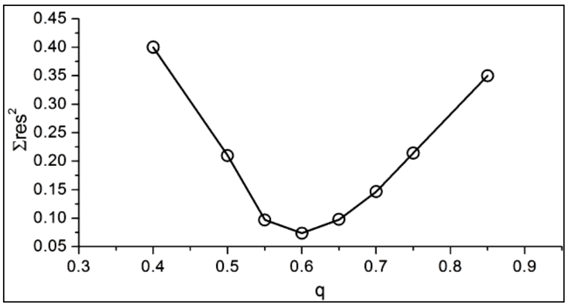
Πίνακας 6.45. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους.

Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για κάθε φίλτρο παρατήρησης							
X Tri	Μεταβλητός	8.55[a]	B		V		R		I	
TYC 1763-1881-1	Σύγκρισης	8.69[b]	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.
TYC 1763-2015-1	Ελέγχου	10.75[b]	914	5.7	914	8.2	916	9.1	919	8.5

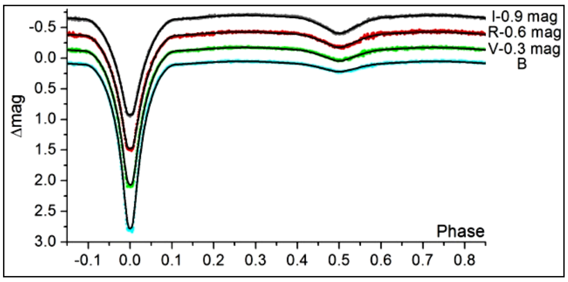
[a]Watson et al. (2006), [b]Høg et al. (2000)

Ανάλυση των καμπυλών φωτός

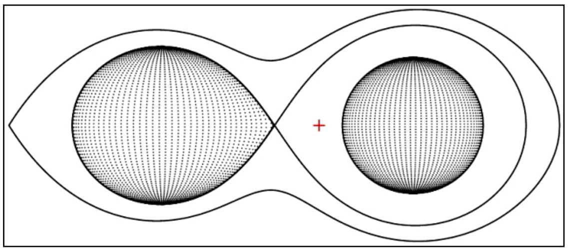
Η θερμοκρασία του πρωτεύοντα αστέρα τέθηκε ίση με 8600 K (Giuricin et al. 1983). Λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων (βλ. παρακάτω), η οποία δύναται να προκαλείται από επιπλέον μέλη στο σύστημα, η παράμετρος της επιπρόσθετης φωτομετρικής συνεισφοράς l_3 αφέθηκε ελεύθερη προς σύγκλιση. Λόγω ανυπαρξίας φασματοσκοπικού λόγου μαζών των αστέρων του συστήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ανίχνευσης του q (βλ. §4.1) και το αντίστοιχο διάγραμμα παρουσιάζεται στην εικ. 6.50. Στην εικ. 6.51 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 6.52 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος, ενώ στον πίνακα 6.46 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος.



Εικόνα 6.50. Διάγραμμα ανίχνευσης του q για το σύστημα X Tri. Η τιμή του q που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή των $\sum res^2$ βρέθηκε ίση με 0.6.



Εικόνα 6.51. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες φωτός του συστήματος X Tri στα φίλτρα *B*, *V*, *R*, *I*.



Εικόνα 6.52. Η γεωμετρία Roche του συστήματος X Tri στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό.

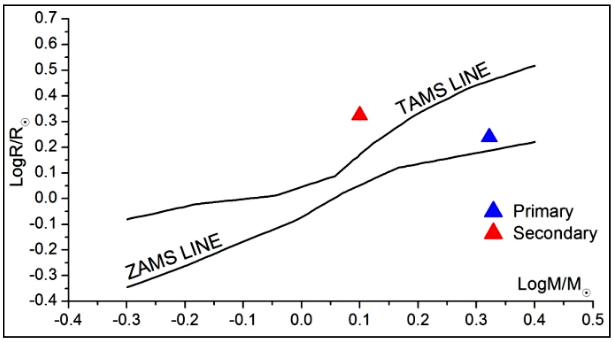
Πίνακας 6.46. Παράμετροι του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα X Tri.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή			
i [°]	87.9 (1)	Φίλτρο:	B	V	R	I
q_{ph}	0.599 (2)	x_1	0.551	0.478	0.402	0.322
T_1 [K]	8600[a,b]	x_2	0.835	0.692	0.597	0.503
T_2 [K]	5188 (4)	L_1/L_T	0.893 (2)	0.839 (2)	0.795 (2)	0.739 (1)
Ω_1	4.27 (1)	L_2/L_T	0.107 (1)	0.160 (2)	0.201 (2)	0.246 (3)
Ω_2	3.06[a]	L_3/L_T	0.000 (1)	0.000 (1)	0.004 (1)	0.015 (2)
A_1	1[a]	$\langle L_3/L_T \rangle$ (%)	0.5 (1)			
A_2	0.5[a]					
g_1	1[a]					
g_2	0.32[a]	Σres^2	1.278			

[a]σταθερή τιμή, [b]υπόθεση

Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Η τιμή της μάζας M_1 του πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος υποτέθηκε από τον φασματικό του τύπο ως αστέρας της ΚΑ (βλ. Παρ. Ε) και δίνεται μαζί με τις τιμές των υπολοίπων απολύτων παραμέτρων στον πίνακα 6.47. Η εικ. 6.53 δείχνει τις θέσεις τους στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.



Εικόνα 6.53. Θέσεις των αστέρων του συστήματος X Tri (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

Πίνακας 6.47. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος X Tri.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [M☉]	2.1[a]	1.26 (4)	log$g$ [cm/s^2]	4.28 (2)	3.87 (2)
R [R☉]	1.74 (4)	2.15 (5)	α [R☉]	2.37 (1)	3.96 (1)
L [L☉]	14.9 (1)	2.9 (1)	M_{bol} [mag]	1.8 (1)	3.6 (1)

[a]υπόθεση

Ανάλυση των μεταβολών της τροχιακής περιόδου

Για την κατασκευή του O−C διαγράμματος του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν 571 χρόνοι ελαχίστων, 450 εκ των οποίων προέκυψαν από οπτικές παρατηρήσεις, 42 από φωτογραφικές, 35 από φωτοηλεκτρικές και 44 από CCD παρατηρήσεις, οι οποίοι καλύπτουν χρονικό εύρος από το 1950 έως και σήμερα. Ως αρχική παράμετρος χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω αστρονομική εφημερίδα (Kreiner et al. 2001):

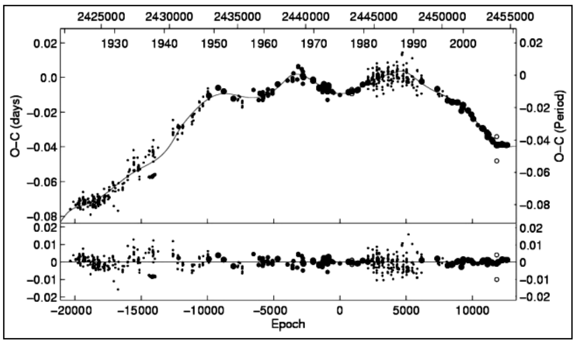
$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2422722.285 + 0.9715341^{\mathrm{d}}\mathrm{E} \tag{6.22}$$

Αρχικά, ως συνάρτηση προσαρμογής δοκιμάστηκε η παραβολή, λόγω πιθανής μεταφοράς μάζας, και μια καμπύλη LITE, λόγω της εμφανούς περιοδικής κατανομής των O−C σημείων. Όμως, τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι μόνο η ύπαρξη μιας κοίλης παραβολής που οδηγεί σε μείωση της περιόδου μπορεί να περιγράψει την κατανομή των O−C σημείων, ενώ η ερμηνεία και παραδοχές που έγιναν για το σύστημα X Tri είναι ίδιες με τα αυτές που παρουσιάστηκαν για το σύστημα AT Peg (βλ. §6.10). Επιπλέον, μετά την αφαίρεση της θεωρητικής καμπύλης (καμπύλη LITE και κοίλη παραβολή) τα O−C σημεία έδειχναν και πάλι μια περιοδική κατανομή. Επομένως, μια δεύτερη καμπύλη LITE προσαρμόστηκε για να την περιγράψει. Το ίδιο ακριβώς συνέβη και μετά την αφαίρεση αυτής της νέας λύσης (2 καμπύλες LITE και κοίλη παραβολή), οπότε και πάλι προσαρμόστηκε μια νέα καμπύλη LITE. Εφόσον ο δευτερεύων αστέρας δύναται να έχει περίβλημα μεταφοράς, καθότι είναι ψυχρός, κάτι το οποίο θα μπορούσε να δημιουργήσει μεταβολές στην τετραπολική του ροπή, ελέγχθηκε η πιθανή ύπαρξη του μηχανισμού Applegate (1992) και για τις τρεις περιοδικές μεταβολές. Η μέθοδος ανάλυσης και η επεξήγηση των συμβόλων αναφέρονται στην παράγραφο 4.2. Ο πίνακας 6.48 περιέχει τις τιμές των παραμέτρων των θεωρητικών καμπυλών, ενώ στην εικ. 6.54 παρουσιάζεται η προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης στα O−C σημεία.

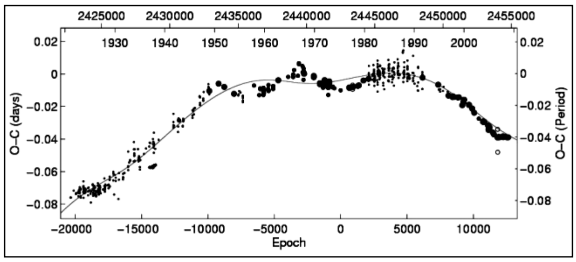
Πίνακας 6.48. Παράμετροι της O−C ανάλυσης του συστήματος X Tri.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή		
Εκλειπτικό σύστημα			3^o σώμα	4^o σώμα	5^o σώμα
JD_0 [HJD[a]]	42502.731 (2)	T_0 [HJD[a]]	52916 (373)	55069 (335)	-
P [d]	0.9715318 (2)	ω_3 [°]	220 (98)	34 (13)	-
C_2 [$\times 10^{-10}$ d/cycle]	-2.0308 (2)	A [d]	0.0052 (3)	0.0040 (4)	0.003 (2)
$\dot{P}$ [$\times 10^{-7}$ d/yr]	-1.5269 (2)	P [yr]	36.9 (5)	22.4 (3)	16.8 (4)
$\dot{M}_{tr}$ [$\times 10^{-8}$ $M_\odot$/yr]	1^b	e	0.2 (2)	0.5 (1)	-
$\dot{M}_{loss}$ [$\times 10^{-8}$ $M_\odot$/yr]	-3.364 (2)	f(m) [$M_\odot$]	0.0006 (1)	0.0009 (1)	0.0007 (3)
		M_{min} [$M_\odot$]	0.18 (1)	0.24 (1)	0.22 (1)
			Μεταβολή της τετραπολικής ροπής		
Σres^2	0.012	ΔQ [gcm^2]	1.06×10^{50}	1.34×10^{50}	1.71×10^{50}

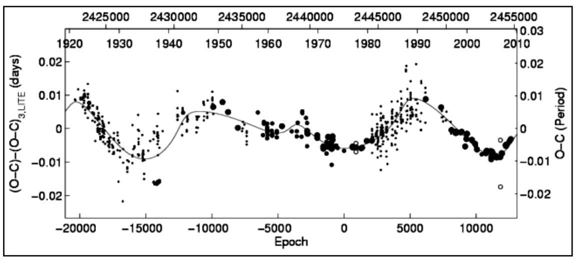
[a]-2400000, [b]υπόθεση



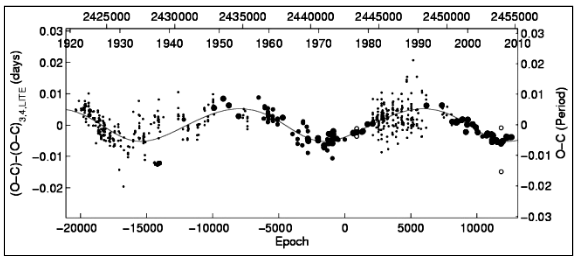
(a)



(b)



(c)



(d)

Εικόνα 6.54. (a): Προσαρμογή τριών θεωρητικών καμπυλών LITE και μιας παραβολής (συνεχής γραμμή) στα O−C σημεία (επάνω) και τα O−C υπόλοιπα έπειτα από την αφαίρεση όλων των συναρτήσεων (κάτω). (b): Προσαρμογή μόνο της πρώτης θεωρητικής καμπύλης LITE και της παραβολής στα O−C σημεία (συνεχής γραμμή). (c): Προσαρμογή της δεύτερης καμπύλης LITE στα O−C σημεία, έπειτα από την αφαίρεση της παραβολής και της πρώτης καμπύλης LITE και πριν την προσαρμογή του τρίτου όρου LITE. (d): Προσαρμογή μόνο της τρίτης καμπύλης LITE στα O−C σημεία, έπειτα από την αφαίρεση της παραβολής και δύο πρώτων συναρτήσεων LITE.

Συμπεράσματα

Ο πρωτεύων αστέρας του συστήματος ανήκει στην ΚΑ και βρίσκεται σχετικά κοντά στη ZAMS, ενώ ο δευτερεύων είναι πιο εξελιγμένος και έχει φύγει από την TAMS. Λόγω της διαφοράς των τιμών των μαζών των δύο αστέρων-μελών, αλλά και της σχετικά μικρής ηλικίας του πρωτεύοντα, συνεπάγεται ότι ο δευτερεύων, ο οποίος βρέθηκε να έχει γεμίσει τον λοβό Roche του, έχει χάσει ήδη μεγάλο μέρος της μάζας του, επομένως το πιθανότερο σενάριο εξέλιξης του συστήματος είναι η περίπτωση Α (βλ. §1.2.4).

Ο μηχανισμός της μαγνητικής πέδησης (βλ. §4.2.2), ο οποίος λαμβάνει χώρα στον δευτερεύοντα αστέρα, φαίνεται να ευθύνεται για την απώλεια μάζας και στροφορμής από το σύστημα. Μάλιστα, φαίνεται ότι ο ρυθμός απώλειας μάζας έχει τέτοια τιμή που υπερκαλύπτει τον ρυθμό μεταφοράς μάζας (εάν αυτή λαμβάνει χώρα), και προκαλεί μείωση της τροχιακής περιόδου.

Τρεις περιοδικοί όροι εντοπίστηκαν στην κατανομή των O−C σημείων. Και οι τρεις μπορούν να ερμηνευτούν με το LITE και ικανοποιούν το κριτήριο της δυναμικής ευστάθειας (Harrington 1977). Όμως, μπορούν επίσης να εξηγηθούν και με τον μηχανισμό Applegate (1992). Είναι λοιπόν προφανές, ότι το σύστημα περιέχει τουλάχιστον δύο ακόμα μέλη, εάν υποθέσουμε ότι κάποιος από τους περιοδικούς όρους οφείλεται στη μεταβολή της τετραπολικής ροπής. Όμως, οι ελάχιστες τιμές μάζας που βρέθηκαν για τα τρία επιπρόσθετα μέλη κυμαίνονται μεταξύ 0.18-0.24 $M_{\odot}$ κάτι που κάνει τη φωτομετρική (και τη φασματοσκοπική) ανίχνευσή τους σχεδόν αδύνατη. Συγκεκριμένα, η αναμενόμενη φωτομετρική συνεισφορά και των τριών μελών μαζί δεν υπερβαίνει το 0.1%, ενώ, από την ανάλυση των καμπυλών φωτός, εντοπίστηκε συνεισφορά $L_{3,\mathrm{LC}}$~0.5%, τιμή που είναι στα πλαίσια του σφάλματος.

Το σύστημα μέσω της ανάλυσης Fourier (§4.3) στα υπόλοιπα της αφαίρεσης των θεωρητικών από τις παρατηρούμενες καμπύλες φωτός ελέγχθηκε και για την ύπαρξη αναπάλσεων. Όμως, τα αποτελέσματα δεν ανέδειξαν καμία συχνότητα ανάπαλσης μεταξύ 3-80 c/d και με S/N>4, επομένως συμπεραίνεται ότι ο θερμότερος αστέρας δεν είναι παλλόμενος.

6.12. Το σύστημα AW Vul

Ιστορική αναδρομή

Το σύστημα ανακαλύφθηκε από τον Hoffmeister (1930), ενώ οι Prager & Shapley (1941) και οι Wood & Forbes (1963) υπολόγισαν την εφημερίδα του. Οι Brancewicz & Dworak (1980), οι Budding (1984) και οι Svechnikov & Kuznetsova (1990) υπολόγισαν τις απόλυτες παραμέτρους του συστήματος, αλλά συμφωνούν μόνο για τον φασματικό του τύπο ως F0. Η πρώτη καμπύλη φωτός του συστήματος, βασισμένη σε οπτικές παρατηρήσεις, δημοσιεύτηκε από τον Sasselov (1982), ενώ η μόνη υπάρχουσα, αλλά μερικώς κεκαλυμμένη, από CCD παρατηρήσεις δημοσιεύτηκε από τους Schmidt & Reiswig (1993). Ο Shaw (1994) ταξινόμησε το σύστημα σαν F0 και προσδιόρισε την απόστασή του στα 440 pc. Το σύστημα είναι υποψήφιο να περιέχει τρίτο μέλος (Hoffman et al. 2006), ενώ το θερμότερο μέλος του είναι υποψήφιο για αναπάλσεις (Soydugan et al. 2006b).

Οι Liakos et al. (2011a) έκαναν το φωτομετρικό μοντέλο του συστήματος, βασιζόμενοι σε νέες παρατηρήσεις, υπολόγισαν τις απόλυτες παραμέτρους των μελών του και ερμήνευσαν τις μεταβολές τις τροχιακής περιόδου του μέσω της ανάλυσης του O–C διαγράμματός του. Τα αποτελέσματα δίνονται στις επόμενες παραγράφους.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι παρατηρήσεις έλαβαν χώρα στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1) με τη χρήση του τηλεσκοπίου των 20 cm και της CCD ST-8XMEI και διήρκεσαν οκτώ νύκτες τον Ιούλιο του 2010. Στον πίνακα 6.49 δίνονται: Οι αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία (βλ. §3.1.1) και τα φαινόμενα μεγέθη τους m_V στο φίλτρο *V*, ο αριθμός των σημείων *N* ανά φίλτρο παρατήρησης και το μέσο φωτομετρικό σφάλμα τους *s.d.* εκφρασμένο σε mmag. Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\mathrm{Min.\,I} = \mathrm{HJD}\ 2454723.3545 + 0.806451^{\mathrm{d}}\ \mathrm{E} \tag{6.23}$$

και υπολογίστηκε από τους χρόνους ελαχίστων (Πίνακας Β1), οι οποίοι προέκυψαν από τα δεδομένα μας και τους πιο πρόσφατους της βιβλιογραφίας.

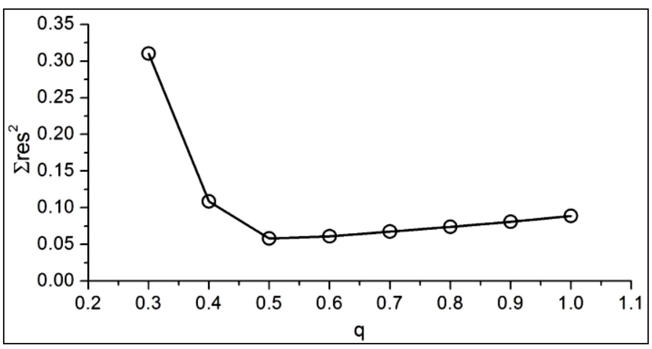
Πίνακας 6.49. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους.

Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για κάθε φίλτρο παρατήρησης							
			B		V		R		I	
			N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.
AW Vul	Μεταβλητός	10.80[a]	218	14.4	229	17.2	223	13.8	215	15.3
TYC 2160-983-1	Σύγκρισης	10.53[b]								
TYC 2160-868-1	Ελέγχου	11.29[b]								

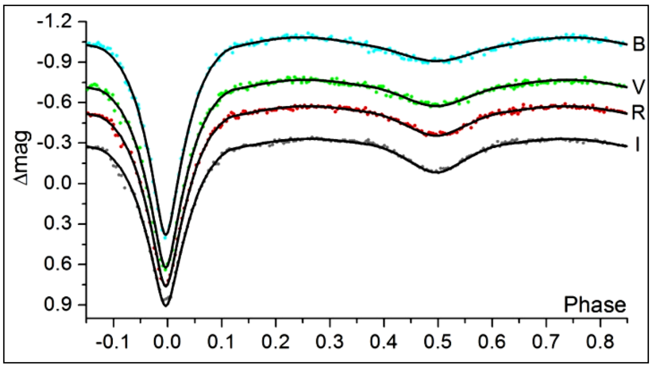
[a]Watson et al. (2006), [b]Høg et al. (2000)

Ανάλυση των καμπυλών φωτός

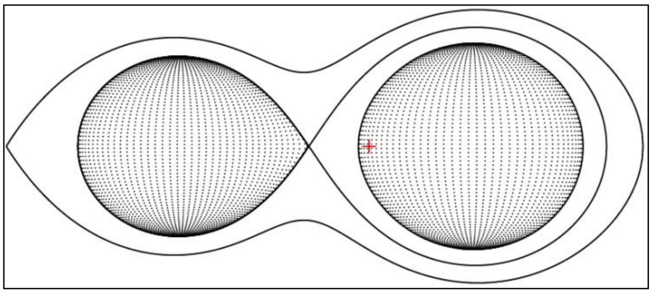
Η θερμοκρασία του πρωτεύοντα αστέρα τέθηκε ίση με 7300 K σύμφωνα με την επικρατέστερη φασματική ταξινόμηση του συστήματος. Λόγω πιθανής ύπαρξης τρίτου μέλους στο σύστημα (βλ. παρακάτω), η παράμετρος της επιπρόσθετης φωτομετρικής συνεισφοράς l_3 αφέθηκε ελεύθερη προς σύγκλιση. Λόγω μη ύπαρξης φασματοσκοπικού λόγου μαζών των αστέρων του συστήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ανίχνευσης του *q* (βλ. §4.1) και το αντίστοιχο διάγραμμα παρουσιάζεται στην εικ. 6.55. Στην εικ. 6.56 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 6.57 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος, ενώ στον πίνακα 6.50 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος.



Εικόνα 6.55. Διάγραμμα ανίχνευσης του *q* για το σύστημα AW Vul. Η τιμή του *q* που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή των $\sum res^2$ βρέθηκε ίση με 0.5.



Εικόνα 6.56. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες φωτός του συστήματος AW Vul στα φίλτρα *B*, *V*, *R*, *I*.



Εικόνα 6.57. Η γεωμετρία Roche του συστήματος AW Vul στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό.

Πίνακας 6.50. Παράμετροι του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα AW Vul.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή			
i [°]	86.2 (4)	Φίλτρο:	B	V	R	I
q_{ph}	0.55 (1)	x_1	0.591	0.496	0.417	0.338
T_1 [K]	7300[a,b]	x_2	0.958	0.809	0.704	0.583
T_2 [K]	4394 (21)	L_1/L_T	0.923 (5)	0.902 (6)	0.884 (7)	0.849 (8)
Ω_1	3.36 (2)	L_2/L_T	0.039 (1)	0.066 (1)	0.092 (1)	0.123 (1)
Ω_2	2.96[a]	L_3/L_T	0.038 (4)	0.031 (5)	0.024 (5)	0.028 (6)
A_1	1[a]	$\langle L_3/L_T\rangle$ (%)	3.0 (5)			
A_2	0.5[a]					
g_1	1[a]					
g_2	0.32[a]	Σres^2	0.099			

[a]σταθερή τιμή, [b]υπόθεση

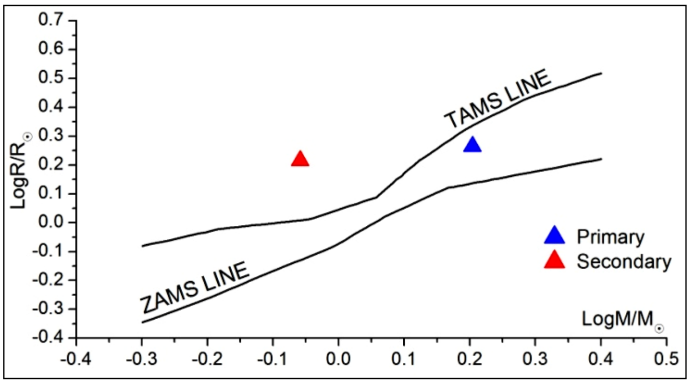
Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Η τιμή της μάζας M_1 του πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος υποτέθηκε από τον φασματικό του τύπο ως αστέρας της ΚΑ (βλ. Παρ. Ε) και δίνεται μαζί με τις τιμές των υπολοίπων απόλυτων παραμέτρων στον πίνακα 6.47. Η εικ. 6.58 δείχνει τις θέσεις τους στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.

Πίνακας 6.47. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος AW Vul.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [$M_\odot$]	1.6[a]	0.87 (1)	log$g$ [cm/s^2]	4.11 (4)	3.95 (4)
R [$R_\odot$]	1.84 (8)	1.65 (7)	α [$R_\odot$]	1.8 (2)	3.3 (1)
L [$L_\odot$]	8.6 (8)	0.9 (1)	M_{bol} [mag]	2.4 (9)	4.7 (9)

[a]υπόθεση



Εικόνα 6.58. Θέσεις των αστέρων του συστήματος AW Vul (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

Ανάλυση των μεταβολών της τροχιακής περιόδου

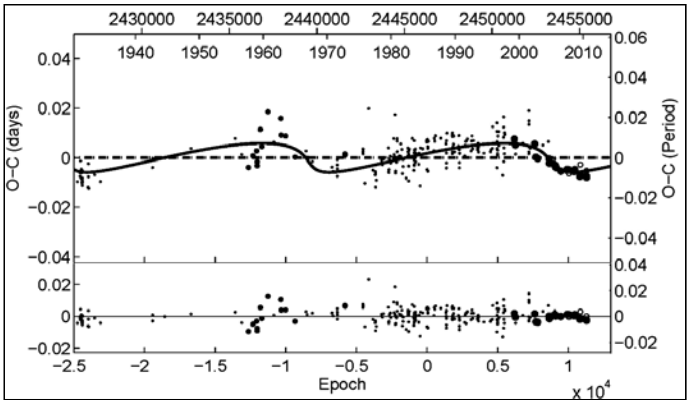
Το O−C διάγραμμα του συστήματος κατασκευάστηκε από 236 χρόνους ελαχίστων, 192 εκ των οποίων προέκυψαν από οπτικές, 14 από φωτογραφικές και 30 από CCD παρατηρήσεις και καλύπτουν χρονικό εύρος από το 1930 έως και σήμερα. Ως αρχική παράμετρος χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω αστρονομική εφημερίδα (Kreiner et al. 2001):

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2446285.4653 + 0.80645\ ^{\mathrm{d}}\mathrm{E} \quad (6.24)$$

Αρχικά, ως συνάρτηση προσαρμογής δοκιμάστηκε η κυρτή παραβολή, λόγω πιθανής μεταφοράς μάζας και μια καμπύλη LITE, λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων, η οποία είναι ιδιαίτερα εμφανής στα πιο σύγχρονα O−C σημεία. Εφόσον ο δευτερεύων αστέρας του συστήματος λόγω θερμοκρασίας δύναται να έχει περίβλημα μεταφοράς, που θα μπορούσε να δημιουργήσει μεταβολές στην τετραπολική ροπή (βλ. §4.2.4), ελέγχθηκε η πιθανή ύπαρξη του μηχανισμού Applegate (1992). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η καμπύλη LITE περιγράφει ικανοποιητικά τα O−C σημεία και δεν απαιτείται η χρήση παραβολής, καθώς ο παραβολικός όρος προέκυπτε πάντα πολύ μικρός και επομένως αγνοήθηκε. Η μέθοδος ανάλυσης και η επεξήγηση των συμβόλων αναφέρονται στην παράγραφο 4.2. Ο πίνακας 6.48 περιέχει τις τιμές των παραμέτρων των θεωρητικών καμπυλών, ενώ στην εικ. 6.59 παρουσιάζεται η προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης στα O−C σημεία.

Πίνακας 6.48. Παράμετροι της O−C ανάλυσης του συστήματος AW Vul.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
Εκλειπτικό σύστημα		3^{ο} σώμα	
JD_0 [HJD−2400000]	46285.463 (1)	P_3 [yr]	38 (1)
P [d]	0.8064510 (1)	e_3	0.7 (2)
Μεταβολή της τετραπολικής ροπής		ω_3 [°]	197 (9)
ΔQ [$\times 10^{50}$ g cm^2]	0.64	$f(m_3)$ [M$_\odot$]	0.0019 (1)
LITE		$M_{3,min}$ [M$_\odot$]	0.24 (1)
T_0 [HJD−2400000]	39585 (436)		
A [d]	0.006 (1)	Σres^2	0.008



Εικόνα 6.59. Προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης του LITE στα O−C σημεία του συστήματος AW Vul (επάνω) και τα υπόλοιπα (residuals) μετά την αφαίρεση της θεωρητικής καμπύλης (κάτω).

Συμπεράσματα

Ο πρωτεύον αστέρας του συστήματος βρέθηκε να είναι ελαφρώς εξελιγμένος, αλλά προς το παρόν είναι επάνω στην ΚΑ, αλλά πολύ κοντά στην TAMS. Από την άλλη μεριά, ο δευτερεύων βρίσκεται καθοδόν προς το στάδιο των υπογιγάντων. Η μεταφορά μάζας φαίνεται είτε να έχει σταματήσει είτε να έχει πολύ μικρό ρυθμό ώστε να μπορεί να ανιχνευθεί από την O−C ανάλυση. Σύμφωνα με τη σχετικά κοντινή εξελικτική κατάσταση των μελών, φαίνεται ότι το σύστημα βρίσκεται πλέον σε φάση χαλάρωσης και εξελίσσεται σύμφωνα με την περίπτωση B (βλ. §1.2.4).

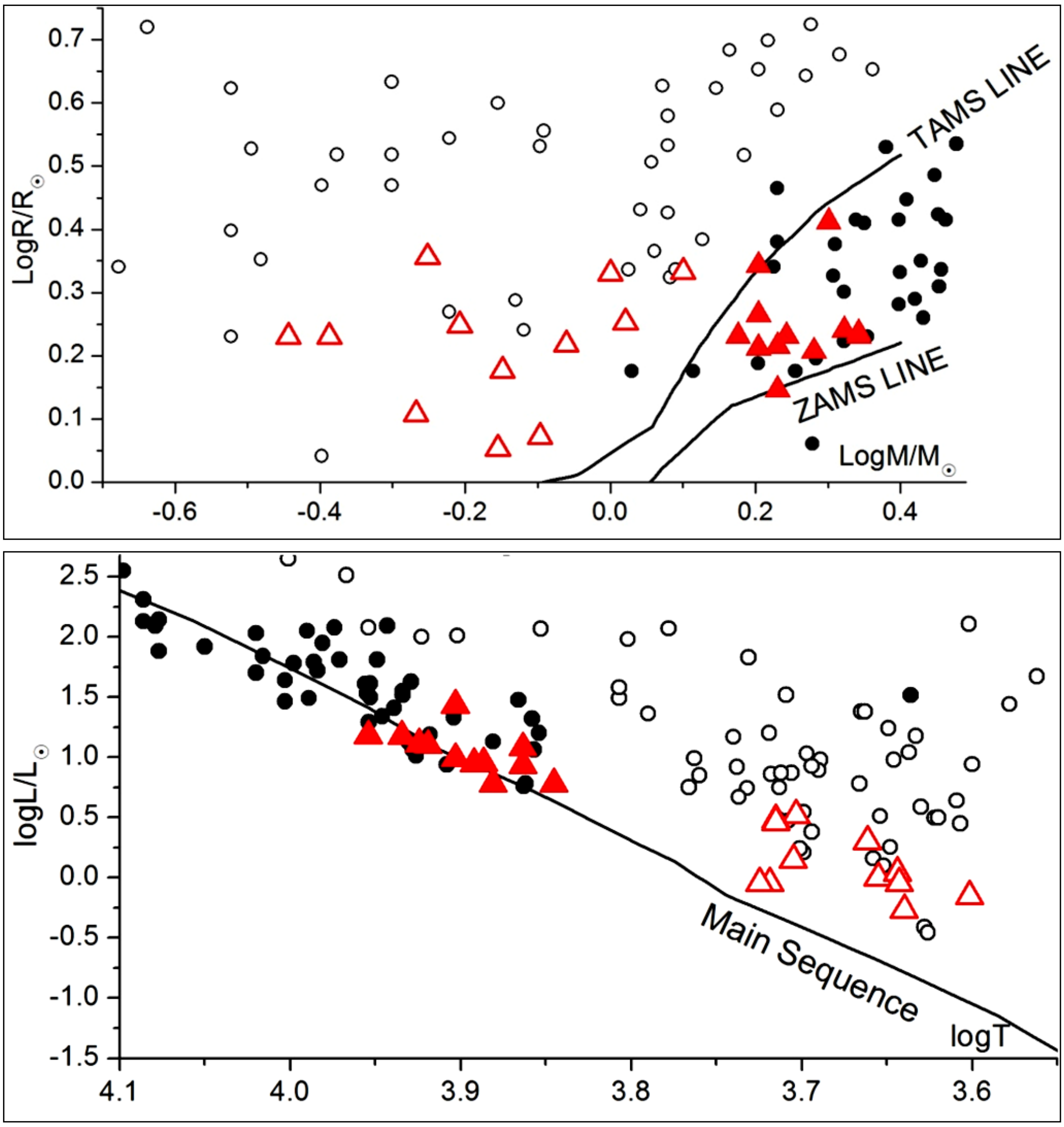
Οι περιοδικές μεταβολές της περιόδου ερμηνεύονται σύμφωνα με το LITE, καθώς ο μηχανισμός Applegate (1992) είναι ανεπαρκής στη συγκεκριμένη περίπτωση. Όμως, ενώ η ανάλυση των καμπυλών φωτός ανέδειξε την ύπαρξη επιπρόσθετης φωτομετρικής συνεισφοράς $L_{3,LC}$~3%, από την άλλη πλευρά, και σύμφωνα με την τιμή της ελάχιστης μάζας του τρίτου σώματος και με την υπόθεση ότι είναι αστέρας της ΚΑ, η αναμενόμενη συνεισφορά είναι μόλις $L_{3,O-C}$~0.1%. Η ψαλίδα μεταξύ αυτών των τιμών μπορεί να κλείσει με την υπόθεση των μη-παράλληλων τροχιακών επιπέδων του τρίτου σώματος και του εκλειπτικού συστήματος. Συγκεκριμένα, εάν η γωνία μεταξύ αυτών των επιπέδων είναι ~25°, τότε προκύπτει ότι η μάζα του τρίτου σώματος έχει τιμή 0.7 $M_{\odot}$, η οποία μπορεί να ικανοποιήσει την παρατηρούμενη φωτεινότητα. Επιπλέον, η μάζα και η περίοδος του τρίτου σώματος ικανοποιούν το κριτήριο στης δυναμικής ευστάθειας (Harrington 1977).

Το σύστημα ήταν υποψήφιο να περιέχει μέλος τύπου δ Sct, επομένως πραγματοποιήθηκε ανάλυση Fourier (§4.3) στα υπόλοιπα της αφαίρεσης των θεωρητικών από τις παρατηρούμενες καμπύλες φωτός. Από τα αποτελέσματα δεν προέκυψε η ύπαρξη κάποια συχνότητας μεταξύ 3-80 c/d και με S/N>4, επομένως, δεν υπάρχει κάποια υπόνοια ανάπαλσης.

6.13. Συγκρίσεις με θεωρητικά μοντέλα

Στην παρούσα παράγραφο, όπως έγινε και για τα αποχωρισμένα συστήματα στην παράγραφο 5.11, τοποθετούνται οι αστέρες όλων των συστημάτων, οι οποίοι αναλύθηκαν έως τώρα, σε κοινά διαγράμματα $M-R$ και Hertzsprung-Russell μαζί με το δείγμα των ημιαποχωρισμένων, φασματοσκοπικά διπλών και εκλειπτικών συστημάτων αστέρων των İbanoğlu et al. (2006). Η σύγκριση γίνεται τόσο για να δούμε την ακρίβεια των μεθόδων που ακολουθήθηκαν για τον υπολογισμό των απόλυτων παραμέτρων των αστέρων, αλλά και να εντοπιστούν και να ερμηνευτούν τυχόν αποκλίσεις. Το δείγμα αποτελείται από μόλις 61 συστήματα και μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο μέτρο σύγκρισης, όμως τυχόν αποκλίσεις δεν πρέπει κατ' ανάγκη να θεωρηθούν ως εσφαλμένα αποτελέσματα.

Στην εικ. 6.60 είναι ξεκάθαρη η πολύ καλή συμφωνία των αποτελεσμάτων μας με το δείγμα των İbanoğlu et al. (2006). Οι αστέρες που αναλύθηκαν στην παρούσα διατριβή είναι σχετικά μικρότερης μάζας και κατ' επέκταση μικρότερης θερμοκρασίας από αυτούς του δείγματος, γι' αυτό εντοπίζονται στα κάτω όρια των αστέρων του δείγματος. Αυτό είναι πιο εμφανές κυρίως για τους δευτερεύοντες αστέρες των συστημάτων, καθώς εμφανίζονται λιγότερο εξελιγμένοι από τους αντίστοιχους του δείγματος. Αυτό φαίνεται εύλογο, καθώς, εφόσον έχουν μικρότερη μάζα, η εξέλιξή τους γίνεται με βραδύτερους ρυθμούς, ενώ λόγω και της σχετικά μικρής μάζας των πρωτευόντων, οι ρυθμοί μεταφοράς μάζας θα είναι μικρότεροι κατά τη διάρκεια της ζωής αυτών των συστημάτων συγκριτικά αυτούς των συστημάτων του δείγματος.



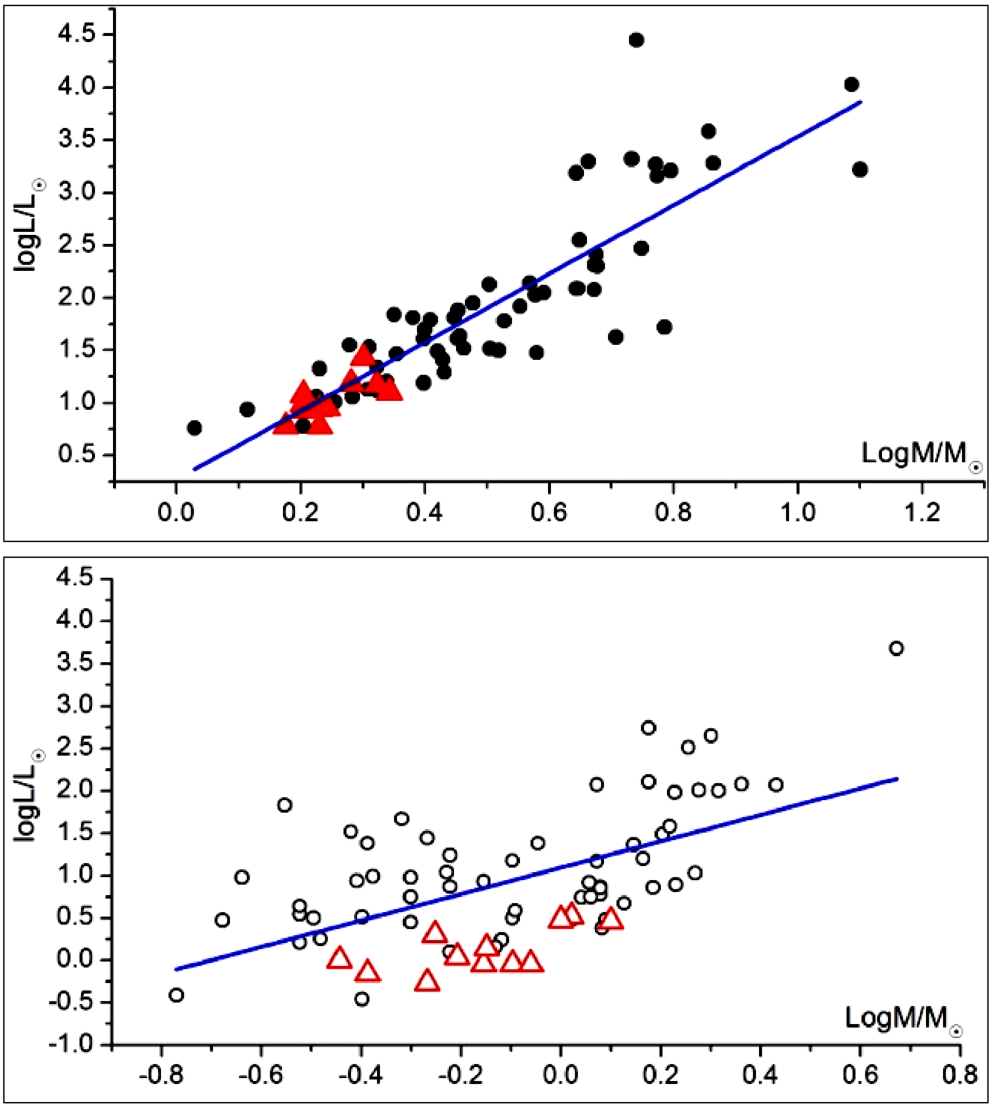
Εικόνα 6.60. Διαγράμματα $M-R$ (επάνω) και Hertzsprung-Russell (κάτω). Οι μαύροι κύκλοι αντιπροσωπεύουν τους αστέρες των ημιαποχωρισμένων συστημάτων του δείγματος των İbanoğlu et al. (2006) και τα κόκκινα τρίγωνα τους αστέρες που αναλύθηκαν στην παρούσα διατριβή. Τα κενά σύμβολα αναφέρονται στους πρωτεύοντες και τα γεμάτα στους δευτερεύοντες αστέρες.

Επιπλέον, συνδυάζοντας τα αποτελέσματα των αστέρων των συστημάτων που αναλύθηκαν στην παρούσα διατριβή με εκείνα των İbanoğlu et al. (2006), προκύπτουν ανανεωμένες σχέσεις μάζας-φωτεινότητας για τους πρωτεύοντες και δευτερεύοντες αστέρες των ημιαποχωρισμένων συστημάτων. Από τις γραμμικές προσαρμογές (εικ. 6.61) με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$L_1 = M_1^{3.3(2)} \tag{6.25}$$

$$L_2 = M_2^{1.6(3)} \tag{6.26}$$

οι οποίες είναι σε πολύ καλή συμφωνία με τις αντίστοιχες των İbanoğlu et al. (2006) (βλ. σχέσεις 1.39 και 1.40).



Εικόνα 6.61. Διαγράμματα $M{-}L$ για τους πρωτεύοντες (επάνω) και τους δευτερεύοντες (κάτω) αστέρες ημιαποχωρισμένων συστημάτων. Τα σύμβολα είναι τα ίδια με αυτά της εικ. 6.60. Η μπλε γραμμή αναφέρεται στην καλύτερη γραμμική προσαρμογή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Μελέτη εκλειπτικών συστημάτων με παλλόμενο μέλος

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της έρευνάς μας σε εκλειπτικά συστήματα υποψήφια να περιέχουν ως μέλος έναν παλλόμενο αστέρα τύπου δ Sct. Παρουσιάζεται η ιστορία αυτής της νέας υποκατηγορίας εκλειπτικών συστημάτων, καθώς και τα αποτελέσματα που αφορούν 18 μεμονωμένες περιπτώσεις. Τέλος, παρουσιάζονται σχέσεις που συνδέουν βασικές ιδιότητες των αστέρων (π.χ. εξελικτική κατάσταση, τροχιακή περίοδος) τέτοιων συστημάτων, οι οποίες πρόεκυψαν από τα έως τώρα γνωστά συστήματα.

Κατά τη διάρκεια της έρευνάς μας ανακαλύφθηκαν 13 νέα τέτοιου τύπου συστήματα, ενώ παρατηρήθηκαν και άλλα ήδη γνωστά για τα οποία υπήρχε περιορισμένη γνώση τόσο για τις απόλυτες παραμέτρους των αστέρων-μελών τους όσο και για τις ιδιότητες των αναπάλσεών τους. Η συνεισφορά της έρευνάς μας αφορά κυρίως σε νέες ανακαλύψεις, οι οποίες αντιστοιχούν στο ~16.5% του συνολικού δείγματος (13 από 79) τέτοιων συστημάτων που υπάρχει έως σήμερα, αλλά και σε παρατηρήσεις ήδη γνωστών, από τις οποίες προέκυψαν οι πλήρεις καμπύλες φωτός και η, σε πολλές περιπτώσεις, πολύμηνη παρακολούθηση του συστήματος (παρατηρήσεις με χρονικό εύρος μερικών μηνών), κάτι που είναι πολύ σημαντικό για το μοντέλο του παλλόμενου αστέρα (βλ. §4.3)

Οι τεχνικές ανάλυσης των καμπυλών φωτός, ακτινικών ταχυτήτων και των μεταβολών της τροχιακής περιόδου περιγράφονται αναλυτικά στο 4^{ο} κεφάλαιο της παρούσας διατριβής και είναι οι ίδιες με αυτές που εφαρμόστηκαν στα συστήματα που παρουσιάστηκαν στο 5^{ο} και στο 6^{ο} κεφάλαιο. Επιπλέον, στα συστήματα που παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο έγινε ανάλυση Fourier (βλ. §4.3) στα υπόλοιπα της αφαίρεσης των θεωρητικών από τις παρατηρούμενες καμπύλες φωτός, ώστε να υπολογιστούν οι παράμετροι των συχνοτήτων ανάπαλσης.

7.1. Εισαγωγή, ιστορικά στοιχεία και προηγούμενες έρευνες

Γενικά, τα διπλά συστήματα αστέρων και ειδικά τα εκλειπτικά συστήματα είναι αντικείμενα στα οποία σχετικά εύκολα μπορούν να προσδιοριστούν οι απόλυτες παράμετροι και η εξελικτική κατάσταση των αστέρων-μελών τους απευθείας από φωτομετρικές και/ή φασματοσκοπικές παρατηρήσεις. Οι μεμονωμένοι αστέρες τύπου δ Sct (βλ. §1.3.2) εντοπίζονται κυρίως στην ΚΑ, ή κινούνται από αυτήν προς τον οριζόντιο κλάδο των γιγάντων. Από την άλλη πλευρά, οι δ Sct αστέρες-μέλη διπλών συστημάτων έχουν βραδύτερη εξέλιξη κατά τη διάρκεια παραμονής τους στην ΚΑ, επομένως, αποτελούν χρήσιμα «εργαλεία» για τη μελέτη αυτού του προσωρινού σταδίου της αστρικής εξέλιξης. Αυτή η διαφορά στην εξέλιξη μεταξύ των μεμονωμένων και των μελών διπλών συστημάτων αστέρων τύπου δ Sct σχετίζεται με τη μεταφορά μάζας και τις παλιρροϊκές αλληλεπιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στα διπλά συστήματα κατά τη διάρκεια παραμονής των αστέρων τους στην ΚΑ (Mkrtichian et al. 2003, Soydugan et al. 2006a). Τελικά, οι μεμονωμένοι και τα μέλη διπλών συστημάτων δ Sct αστέρες, παρόλο που έχουν παρόμοιες ιδιότητες ανάπαλσης, δεν πρέπει να θεωρούνται ότι είναι ίδιου τύπου, λόγω διαφορετικής εξέλιξης.

Ειδικότερα, οι δ Sct αστέρες μέλη συστημάτων τύπου Algol παρουσιάζουν μεταβολές στις αναπάλσεις τους λόγω της εναπόθεσης μάζας στις επιφάνειές τους (Mkrtichian et al. 2004, 2007), η οποία προέρχεται από τους συνοδούς τους. Η μεταφορά μάζας είναι υπεύθυνη για τις μεταβολές στους μηχανισμούς διέγερσης των αναπάλσεων (βλ. §1.3.1), όπως π.χ. οι αναπάλσεις που οφείλονται στον μηχανισμό-κ και οι αναπάλσεις που προκαλούνται από παλιρροϊκές αλληλεπιδράσεις. Επιπλέον, ο υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων και η εύρεση των κυρίων χαρακτηριστικών των αναπάλσεων ενός δ Sct αστέρα προσφέρουν μια πιο λεπτομερή εικόνα του αστέρα. Είναι προφανές, ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός τέτοιων συστημάτων, τα οποία θα μας παρέχουν τις παραπάνω πληροφορίες, τόσο πιο ξεκάθαρα συμπεράσματα μπορούν να προκύψουν από τη στατιστική μελέτη των ιδιοτήτων τους.

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 2000, το ενδιαφέρον της αστροφυσικής κοινότητας για τέτοιου τύπου συστήματα έχει αυξηθεί εντονότατα, ενώ έχουν ανακαλυφθεί ήδη μερικές δεκάδες. Οι Mkrtichian et al. (2004) εισήγαγαν πρώτοι την ιδέα ότι αυτά τα συστήματα πρέπει να αποτελούν μια νέα υποκατηγορία ημιαποχωρισμένων συστημάτων, την οποία και ονόμασαν «συστήματα τύπου oEA». Σε αυτήν ανήκουν τα εκλειπτικά συστήματα τύπου Algol[1] που περιέχουν παλλόμενο αστέρα-μέλος[2], του οποίου ο φασματικός τύπος κυμαίνεται μεταξύ (B)A-F, βρίσκεται στην ΚΑ και είναι ο δέκτης της μεταφερόμενης μάζας στο σύστημα. Οι Soydugan et al. (2006a) βασιζόμενοι σε ένα δείγμα 20 συστημάτων, τα οποία περιείχαν αστέρα-μέλος τύπου δ Sct, επιχείρησαν να βρουν συσχέτιση μεταξύ της τροχιακής περιόδου και της συχνότητας ανάπαλσης και κατέληξαν σε μια γραμμική εξάρτηση μεταξύ αυτών των ποσοτήτων. Οι Soydugan et al. (2006b) δημοσίευσαν μια λίστα με αποχωρισμένα και ημιαποχωρισμένα συστήματα, τα οποία, λόγω του ότι περιέχουν αστέρες φασματικού τύπου μεταξύ (B)A-F, αυτόματα θεωρήθηκαν υποψήφια να περιέχουν αστέρα τύπου δ Sct. Ο Zhou (2010) δημοσίευσε μια λίστα με 89 συστήματα, τα οποία περιέχουν παλλόμενο μέλος, και τα διαχώρισε ανάλογα με τον τύπο ανάπαλσής τους. Οι Soydugan et al. (2011) δημοσίευσαν μια παρεμφερή λίστα, η οποία περιείχε μόνο τα 43 συστήματα που έχουν μέλος αστέρα τύπου δ Sct. Οι διαστημικές αποστολές όπως π.χ. "CoRot" και "Kepler" έχουν προσφέρει ιδιαίτερα τόσο σε νέες ανακαλύψεις τέτοιων συστημάτων, λόγω της εκπληκτικής φωτομετρικής τους ακρίβειας (~0.1 mmag), όσο και στην εύρεση μεγάλου αριθμού συχνοτήτων ανάπαλσης ανά περίπτωση (Damiani et al. 2010, Southworth et al. 2011). Έρευνα εντοπισμού νέων συστημάτων τέτοιου τύπου έχει γίνει από τον Dvorak (2009), ο οποίος παρατήρησε 35 υποψήφια συστήματα και εντόπισε αναπάλσεις τύπου δ Sct σε 3, ενώ μικρότερης έκτασης έρευνες έχουν γίνει και από άλλους ερευνητές.

Η παρούσα διατριβή περιέχει τα αποτελέσματα της συστηματικής έρευνας (Liakos & Niarchos 2009a, 2012b, 2012d, Liakos et al. 2012b) για ανεύρεση συστημάτων με μέλος αστέρα τύπου δ Sct. Η έρευνα ξεκίνησε στις αρχές του 2007 και έως τώρα έχουν παρατηρηθεί 106 εκλειπτικά συστήματα, τα οποία ως επί το πλείστον επιλέχθηκαν από τις λίστες των Soydugan et al. (2006b). Προσεγγιστικά εκτιμάται, ότι για όλη την έρευνα διατέθηκαν περίπου 500 νύκτες παρατηρήσεων, που αντιστοιχούν σε περισσότερες από 2500 hrs. Οι μέθοδοι που ακολουθήθηκαν ήταν οι εξής:

[1]Εδώ ο όρος Algol χρησιμοποιείται για να τονίσει τόσο την εξελικτική κατάσταση των μελών όσο και τη μεταφορά μάζας από τον δευτερεύοντα στον πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος.
[2]Ως παλλόμενο μέλος δεν θεωρείται μόνο αστέρας τύπου δ Sct, αλλά και άλλοι παλλόμενοι αστέρες φασματικού τύπου (B)A-F (π.χ. τύπου γ Dor, β Cep).

Για τα υποψήφια συστήματα

- **i.** Ο ελάχιστος χρόνος παρατήρησης του κάθε συστήματος ήταν 3 hrs, καθώς, αναμένονταν συχνότητες ανάπαλσης στο εύρος 20 min – 8 hrs.
- **ii.** Το φίλτρο *B* ή/και *V* χρησιμοποιόταν πάντα, καθώς, λόγω του φασματικού τύπου των δ Sct αστέρων (A-F) το μέγιστο πλάτος της ανάπαλσης αναμένεται σε αυτά τα μήκη κύματος.
- **iii.** Ο αστέρας σύγκρισης ήταν σχεδόν ίδιας λαμπρότητας με εκείνη του συστήματος και παραπλήσιου φασματικού τύπου (βλ. §3.1.1).
- **iv.** Οι παρατηρήσεις πραγματοποιούνταν όταν το σύστημα βρισκόταν σε φάση εκτός της κύριας έκλειψης, καθώς ο υποψήφιος για αναπάλσεις αστέρας ήταν και ο θερμότερος του συστήματος.
- **v.** Χρησιμοποιούνταν πάντα οι ελάχιστοι δυνατοί χρόνοι έκθεσης και επιλεγόταν η καταλληλότερη συγχώνευση εικονοστοιχείων (binning - βλ. §2.1.1), ώστε να επιτυγχάνεται ο μέγιστος δυνατός λόγος σήματος προς θόρυβο (S/N), αλλά και η βέλτιστη χρονική διακριτική ικανότητα (γενικά <60 sec).

Για τα συστήματα στα οποία εντοπίζονταν αναπάλσεις

- **i.** Πραγματοποιούνταν παρατηρήσεις για την πλήρη κάλυψη της καμπύλης φωτός τουλάχιστον στο φίλτρο *B*, ενώ, εάν η ελάχιστη απαιτούμενη χρονική διακριτική ικανότητα (εξαρτάται από τη λαμπρότητα του συστήματος) το επέτρεπε, τότε χρησιμοποιούνταν και άλλα φίλτρα. Ο στόχος ήταν πάντα να γίνονται παρατηρήσεις σε όσο το δυνατόν περισσότερα φίλτρα, αλλά χωρίς να χάνεται η πληροφορία για τις αναπάλσεις.
- **ii.** Οι παρατηρήσεις λάμβαναν χώρα σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό εύρος, ανεξάρτητα αν είχε ήδη καλυφθεί η καμπύλη φωτός, για τον εντοπισμό κοντινών συχνοτήτων ανάπαλσης (βλ. §4.3) αλλά και για την αύξηση του S/N της κάθε συχνότητας ανάπαλσης στην ανάλυση συχνοτήτων των δεδομένων.

Στον πίνακα Δ1 (βλ. Παρ. Δ) παρουσιάζονται τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν στη έρευνά μας, ενώ τα 106 συστήματα που παρατηρήθηκαν παρατίθενται στον πίνακα Δ2 (βλ. Παρ. Δ) με όλες τις λεπτομέρειες που αφορούν τις παρατηρήσεις. Στον πίνακα 7.1 δίνονται στατιστικά στοιχεία της έρευνάς μας και στον πίνακα 7.2 δίνεται η αναλυτική λίστα των συστημάτων που παρατηρήθηκαν και βρέθηκαν να έχουν ως μέλος αστέρα τύπου δ Sct.

Στις παρακάτω παραγράφους παρουσιάζεται η πλήρης ανάλυση των 18 από τα 21 συστημάτων του πίνακα 7.2. Τα υπόλοιπα δεν παρουσιάζονται καθώς δεν έχουν ακόμα ολοκληρωθεί οι παρατηρήσεις.

Πίνακας 7.1. Στατιστικά δεδομένα που αφορούν τις μακροχρόνιες παρατηρήσεις σε υποψήφια και γνωστά συστήματα να περιέχουν αστέρα-μέλος τύπου δ Sct.

Συνολικά συστήματα που παρατηρήθηκαν	106
Νέα συστήματα που ανακαλύφθηκαν	13
Αμφίβολες περιπτώσεις	5
Γνωστά συστήματα για τα οποία υπήρχε ελλιπής γνώση	8

Πίνακας 7.2. Τα 21 εκλειπτικά συστήματα που παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια της μακροχρόνιας έρευνάς μας και τα οποία περιέχουν δ Sct αστέρα.

Όνομα	Σχόλιο	N	Hrs	Όνομα	Σχόλιο	N	Hrs	Όνομα	Σχόλιο	N	Hrs
Aqr CZ	Νέο	10	25+	Dra HL	Νέο	17	60+	Lep RR	Γνωστό	9	30
Aql QY	Νέο	36	211	Dra HZ	Νέο	8	25+	Lyn CL	Νέο	12	80+
Cap TY	Νέο	11	35+	Dra TZ	Γνωστό	6	30+	Peg BG	Γνωστό	15	100+
Cep XX	Γνωστό	1	4	Eri TZ	Γνωστό	26	80+	Per IU	Γνωστό	11	40+
Cet WY	Νέο	16	50+	Her BO	Γνωστό	25	125	Sge UZ	Νέο	11	60+
Cyg UW	Νέο	26	90+	Her LT	Νέο	10	50+	UMa IO	Νέο	47	150+
Del BW	Νέο	18	86	Lac AU	Νέο	19	80+	UMa VV	Γνωστό	7	25+

7.1. Το σύστημα CZ Aqr

Ιστορική αναδρομή

Οι περιοδικές μεταβολές της λαμπρότητας του συστήματος ανακαλύφθηκαν από τον Hoffmeister (1933), ενώ η πρώτη εφημερίδα δόθηκε από τους Wood & Forbes (1963). Έως τώρα έχουν παρατηρηθεί μια φωτογραφική (Gaposchkin 1953), δύο οπτικές (Tsesevitch 1953, Szafraniec 1970) και μια φωτοηλεκτρική (Bruton 1986) καμπύλες φωτός. Ο Bruton (1986) ανέλυσε τις τροχιακές μεταβολές του συστήματος και κατέληξε σε μια αύξηση της περιόδου. Ο φασματικός τύπος του συστήματος, βάσει του δείκτη χρώματός του $B-V$ που μετρήθηκε από την αποστολή "HIPPARCOS" (Perryman 1997), είναι A5.

Οι Liakos et al. (2012b), βάσει νέων παρατηρήσεων, ανέδειξαν την ύπαρξη αναπάλσεων του πρωτεύοντα αστέρα, ανέλυσαν τις καμπύλες φωτός, υπολόγισαν τα απόλυτα στοιχεία των αστέρων-μελών και επιπλέον ανέλυσαν το O−C διάγραμμα του συστήματος. Τα αποτελέσματα δίνονται στις αμέσως επόμενες παραγράφους.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι παρατηρήσεις έλαβαν χώρα στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1) με τη χρήση του τηλεσκοπίου των 40 cm και της CCD ST-10XME και διήρκεσαν δέκα νύκτες σε εύρος 38 ημερών μεταξύ Νοεμβρίου-Δεκεμβρίου 2010. Στον πίνακα 7.3 δίνονται: Οι αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία (βλ. §3.1.1) και τα φαινόμενα μεγέθη τους m_v στο φίλτρο V, ο αριθμός των σημείων N ανά φίλτρο παρατήρησης και το μέσο φωτομετρικό σφάλμα τους *s.d.* εκφρασμένο σε mmag.

Πίνακας 7.3. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους.

Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για το *B* φίλτρο	
			N	s.d.
CZ Aqr	Μεταβλητός	10.7[a]		
TYC 6396-1024-1	Σύγκρισης	10.65[b]	1450	2.9
TYC 6396-872-1	Ελέγχου	11.51[b]		

[a]Watson et al. (2006), [b]Høg et al. (2000)

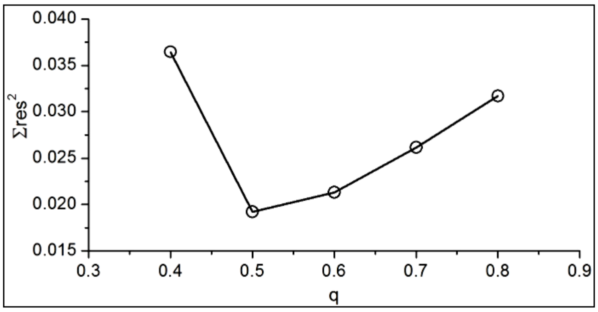
Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2454702.839 + 0.86275^{\mathrm{d}}\ \mathrm{E} \qquad (7.1)$$

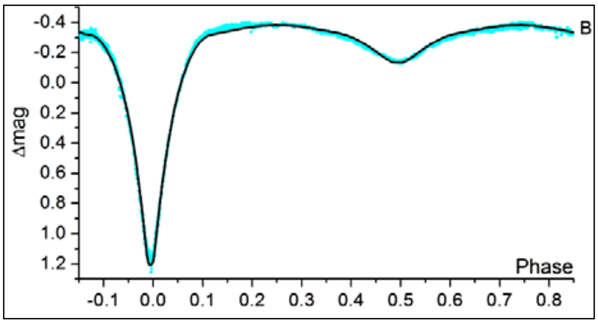
και υπολογίστηκε από τους χρόνους ελαχίστων (Πίνακας Β1), οι οποίοι προέκυψαν από τα δεδομένα μας και τους πιο πρόσφατους της βιβλιογραφίας.

Ανάλυση των καμπυλών φωτός

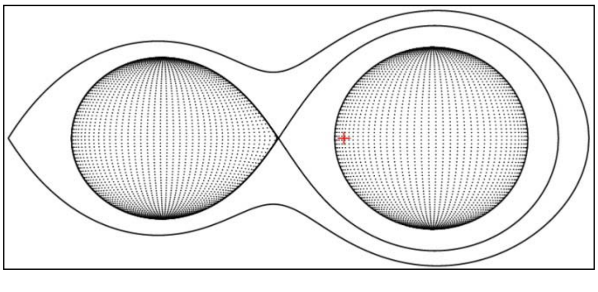
Η θερμοκρασία του πρωτεύοντα αστέρα τέθηκε ίση με 8200 K (Perryman 1997). Λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων (βλ. παρακάτω), η οποία πιθανόν να προέρχεται από την ύπαρξη τρίτου μέλους, η παράμετρος της φωτομετρικής συνεισφοράς από ένα επιπλέον μέλος στο σύστημα l_3 αφέθηκε ελεύθερη προς σύγκλιση. Λόγω απουσίας φασματοσκοπικού λόγου μαζών των αστέρων του συστήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ανίχνευσης του q (q-search - βλ. §4.1) στους "modes" 2 και 5 (βλ. §4.1). Το μοντέλο στον "mode" 5 (συμβατικό[1] ημιαποχωρισμένο σύστημα) βρέθηκε να περιγράφει καλύτερα τις παρατηρήσεις. Η παράμετρος l_3 προέκυπτε πάντα αρνητική, κάτι που δεν έχει φυσική σημασία, επομένως αγνοήθηκε στην τελική λύση. Το αντίστοιχο διάγραμμα παρουσιάζεται στην εικ. 7.1. Στην εικ. 7.2 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 7.3 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος, ενώ στον πίνακα 7.4 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος.



Εικόνα 7.1. Διάγραμμα ανίχνευσης του q στον mode 5 για το σύστημα CZ Aqr. Η τιμή του q που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή των $\sum \mathrm{res}^2$ βρέθηκε ίση με 0.5.



Εικόνα 7.2. Θεωρητική (συνεχής γραμμή) και παρατηρούμενη (σημεία) καμπύλη φωτός του συστήματος CZ Aqr στο φίλτρο *B*.



Εικόνα 7.3. Η γεωμετρία Roche του συστήματος CZ Aqr στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό.

[1]Ο όρος «συμβατικό» ημιαποχωρισμένο σύστημα αναφέρεται στη συνηθέστερη περίπτωση ημιαποχωρισμένων συστημάτων, όπου ο δευτερεύων αστέρας έχει γεμίσει τον λοβό Roche του.

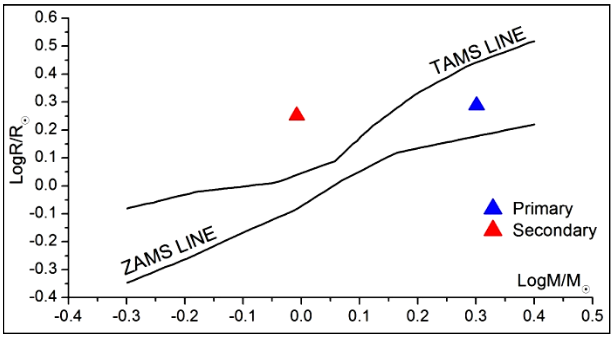
Πίνακας 7.4. Παράμετροι του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα CZ Aqr.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
i [°]	89.7 (1)	A_1	1[a]	**Φίλτρο:**	B
q_{ph}	0.49 (1)	A_2	0.5[a]	x_1	0.584
T_1 [K]	8200[a,b]	g_1	1[a]	x_2	0.760
T_2 [K]	5650 (12)	g_2	0.32[a]	L_1/L_T	0.878 (2)
Ω_1	3.44 (1)			L_2/L_T	0.122 (2)
Ω_2	2.86[a]	Σres^2	0.256	L_3/L_T	-

[a]σταθερή τιμή, [b]υπόθεση

Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Η τιμή της μάζας M_1 του πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος υποτέθηκε από τον φασματικό του τύπο ως αστέρας της ΚΑ (βλ. Παρ. Ε) και δίνεται μαζί με τις τιμές των υπολοίπων παραμέτρων στον πίνακα 7.5. Η εικ. 7.4 δείχνει τις θέσεις των αστέρων στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.



Εικόνα 7.4. Θέσεις των αστέρων του συστήματος CZ Aqr (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

Πίνακας 7.5. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος CZ Aqr.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [$M_\odot$]	2.0[a]	0.98 (1)	log$g$ [cm/s^2]	4.16 (1)	3.93 (1)
R [$R_\odot$]	1.9 (1)	1.8 (1)	α [$R_\odot$]	1.9 (2)	3.8 (1)
L [$L_\odot$]	15.3 (9)	2.9 (2)	M_{bol} [mag]	1.8 (6)	3.6 (6)

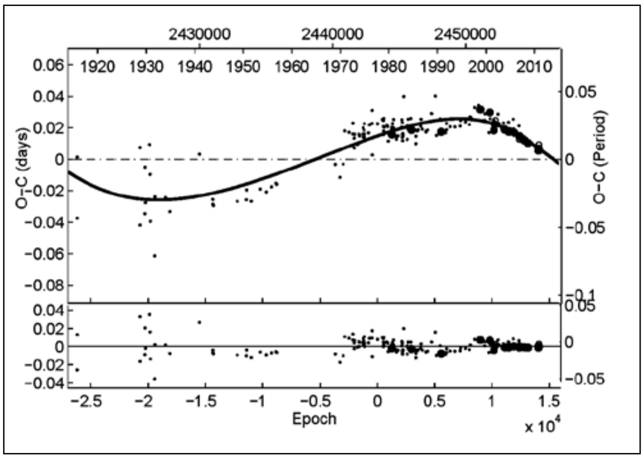
[a]υπόθεση

Ανάλυση των μεταβολών της τροχιακής περιόδου

Το O−C διάγραμμα του CZ Aqr κατασκευάστηκε από 168 χρόνους ελαχίστων, 131 εκ των οποίων προέκυψαν από οπτικές, 13 από φωτογραφικές, 2 από φωτοηλεκτρικές και 22 από CCD παρατηρήσεις και καλύπτουν χρονικό εύρος από το ~1930 έως και σήμερα. Ως αρχική παράμετρος χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω αστρονομική εφημερίδα (Kreiner et al. 2001):

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2443371.4632 + 0.8627537^{\mathrm{d}}\mathrm{E} \qquad (7.2)$$

Αρχικά, ως συνάρτηση προσαρμογής δοκιμάστηκε τόσο η κυρτή παραβολή, λόγω πιθανής μεταφοράς μάζας και μια καμπύλη LITE, λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων. Εφόσον ο δευτερεύων αστέρας του συστήματος, λόγω θερμοκρασίας, δύναται να έχει περίβλημα μεταφοράς, που θα μπορούσε να δημιουργήσει μεταβολές στην τετραπολική ροπή (βλ. §4.2.4), ελέγχθηκε η πιθανή ύπαρξη του μηχανισμού Applegate (1992). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η καμπύλη LITE περιγράφει ικανοποιητικά τα O−C σημεία και δεν απαιτείται η χρήση παραβολής, καθώς ο παραβολικός όρος προέκυπτε πάντα πολύ μικρός και επομένως αμελήθηκε. Η μέθοδος ανάλυσης και η επεξήγηση των συμβόλων αναφέρονται στην παράγραφο 4.2. Ο πίνακας 7.6 περιέχει τις τιμές των παραμέτρων των θεωρητικών καμπυλών, ενώ στην εικ. 7.5 παρουσιάζεται η προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης στα O−C σημεία.



Εικόνα 7.5. Προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης του LITE στα O−C σημεία του συστήματος CZ Aqr (επάνω) και τα υπόλοιπα (residuals) μετά την αφαίρεση της θεωρητικής καμπύλης (κάτω).

Πίνακας 7.6. Παράμετροι της O−C ανάλυσης του συστήματος CZ Aqr.

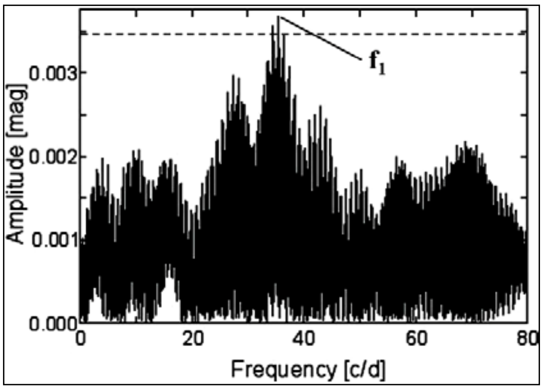
Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
Εκλειπτικό σύστημα		$3^{ο}$ σώμα	
JD_0 [HJD−2400000]	43371.449 (2)	P_3 [yr]	103 (5)
P [d]	0.862752 (3)	e_3	0.3 (2)
Μεταβολή της τετραπολικής ροπής		ω_3 [°]	166 (22)
ΔQ [$\times 10^{50}$ g cm^2]	1.4	$f(m_3)$ [$M_\odot$]	0.010 (2)
LITE		$M_{3,min}$ [$M_\odot$]	0.49 (6)
T_0 [HJD−2400000]	55535 (8000)		
A [d]	0.026 (4)	Σres^2	0.014

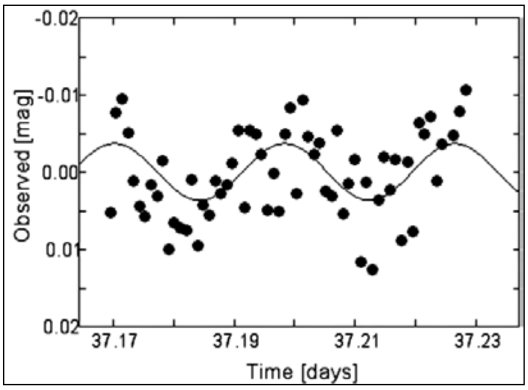
Εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης

Η μέθοδος για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης και η επεξήγηση των συμβόλων παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.3. Στα δεδομένα εντοπίστηκε μόνο μια συχνότητα ανάπαλσης με S/N>4, ενώ, λόγω του ότι οι παρατηρήσεις έγιναν μόνο στο *B* φίλτρο, δεν υπολογίστηκαν οι αριθμοί-*l*. Στον πίνακα 7.7 δίνονται οι παράμετροι της ανάπαλσης, ενώ στην εικ. 7.6 παρουσιάζεται το φάσμα συχνοτήτων και η προσαρμογή της συνάρτησης Fourier σε τμήμα των παρατηρησιακών δεδομένων.

Πίνακας 7.7. Αποτελέσματα της ανάλυσης για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης του συστήματος CZ Aqr στο *B* φίλτρο.

No.	f [c/d]	A [mmag]	Φ [°]	S/N
f_1	35.508 (2)	3.7 (5)	329 (7)	8.5





Εικόνα 7.6. Αριστερά: Φάσμα συχνοτήτων του παλλόμενου αστέρα του συστήματος CZ Aqr, στο οποίο σημειώνεται η συχνότητα ανάπαλσης που εντοπίστηκε και το κατώτερο όριο (4σ) αξιόπιστων συχνοτήτων ανάπαλσης (διακεκομμένη γραμμή). Δεξιά: Προσαρμογή της καμπύλης Fourier στα φωτομετρικά σημεία της νύκτας με τη μεγαλύτερη διάρκεια παρατήρησης.

Συμπεράσματα

Το σύστημα είναι κλασσικός Algol, ενώ ο πρωτεύων αστέρας είναι τύπου δ Sct με συχνότητα ανάπαλσης ~35.5 c/d και βρίσκεται ακόμη στην ΚΑ (εικ. 7.4). Επομένως, σύμφωνα με τον ορισμό των Mkrtichian et al. (2004) μπορεί να συμπεριληφθεί στην υποκατηγορία των oEA συστημάτων. Ο δευτερεύων αστέρας είναι λίγο πιο εξελιγμένος, γεμίζει τον λοβό Roche του και έχει ήδη φύγει από την ΚΑ. Βάσει της σύγκρισης των μαζών και της εξελικτικής κατάστασης των αστέρων του συστήματος συμπεραίνεται, ότι κατά το παρελθόν πρέπει να υπήρξε μεταφορά μάζας από τον δευτερεύοντα προς τον πρωτεύοντα, και άρα το σύστημα πιθανότατα εξελίσσεται σύμφωνα με την περίπτωση Β (βλ. §1.2.4).

Από την O−C ανάλυση του συστήματος δεν προέκυψε συνεχής μεταβολή της περιόδου, κάτι το οποίο αναμενόταν λόγω πιθανής μεταφοράς μάζας. Όμως, αυτό δεν είναι κάτι ασύνηθες, αφού ο ρυθμός της μεταφοράς είτε μπορεί να είναι πολύ μικρός για να εντοπιστεί από το παρόν δείγμα των O−C σημείων είτε η μεταφορά μάζας να έχει σταματήσει και το σύστημα να βαίνει προς τη φάση χαλάρωσης (slow mass accretion stage; Mkrtichian et al. 2003). Βέβαια, αναμένεται ότι, καθώς ο πρωτεύων εξελίσσεται και είναι ήδη κοντά στην πλήρωση του λοβού Roche του, οι αστέρες να έρθουν σε επαφή. Οι περιοδικές μεταβολές της τροχιακής περιόδου μπορούν να ερμηνευτούν είτε με τον μηχανισμό Applegate (1992) είτε με το LITE. Η δεύτερη περίπτωση συνιστά ύπαρξη τρίτου μέλους με ελάχιστη μάζα 0.49 $M_\odot$, το οποίο, εάν είναι αστέρας της ΚΑ, αναμένεται να συνεισφέρει στη συνολική φωτεινότητα $L_{3,O-C}$<1%. Από την άλλη πλευρά, δεν εντοπίστηκε φωτομετρική συνεισφορά στην ανάλυση των καμπυλών φωτός, κάτι όμως που φαίνεται λογικό. Ωστόσο, η ικανοποίηση του κριτηρίου της δυναμικής ευστάθειας (Harrington 1977) δείχνει ότι ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να ευσταθεί.

7.3. Το σύστημα QY Aql

Ιστορική αναδρομή

Το σύστημα ανακαλύφθηκε ως μεταβλητός αστέρας από τον Ross (1928). Το πλάτος της καμπύλης ακτινικών ταχυτήτων του πρωτεύοντα αστέρα K_1 και η συνάρτηση μάζας του συστήματος *f*(*m*) υπολογίστηκαν από τον Struve (1946) και τους Lucy & Sweeney

(1971), οι οποίοι κατέληξαν στις τιμές K_1=36 km/s και *f(m)*=0.035 $M_\odot$, αντίστοιχα. Οι Giuricin & Mardirossian (1981b), βασιζόμενοι στις φωτογραφικές καμπύλες φωτός του Whitney (1945, 1948), υπολόγισαν τα φωτομετρικά στοιχεία του συστήματος, αλλά αμφέβαλλαν για τις προηγούμενες τιμές των K_1 και *f(m)*, καθώς οι αστέρες-μέλη του συστήματος προέκυπταν πολύ μεγάλης μάζας, κάτι που ερχόταν σε αντίθεση με τη θερμοκρασία τους. Ο φασματικός τύπος του συστήματος είναι F0 (Budding et al. 2004, Malkov et al. 2006), ενώ οι απόλυτες παράμετροι των μελών του υπολογίστηκαν από τον Budding (1985) και τους Svechnikov & Kuznetsova (1990), αλλά έχουν μεγάλες διαφορές. Η πιο πρόσφατη CCD καμπύλη φωτός έχει προκύψει από τις παρατηρήσεις του προγράμματος "ASAS" (Pojmanski et al. 2005), αλλά είναι χαμηλής ποιότητας.

Οι Liakos et al. (2012b) ανακοίνωσαν την ύπαρξη αναπάλσεων στο σύστημα, ενώ οι Liakos & Niarchos (2012d) παρουσίασαν το φωτομετρικό μοντέλο του συστήματος και την ανάλυση του O−C διαγράμματός του, υπολόγισαν εκ νέου τις απόλυτες παραμέτρους των μελών του και βρήκαν τις παραμέτρους των αναπάλσεων. Τα αποτελέσματα δίνονται παρακάτω.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Η ύπαρξη αναπάλσεων στο σύστημα προέκυψε από παρατηρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στον Αστρονομικό σταθμό Κρυονερίου (§2.3.2) τον Ιούνιο του 2011. Οι συστηματικές και μεγάλης διάρκειας παρατηρήσεις έλαβαν χώρα στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1) με τη χρήση του τηλεσκοπίου των 40 cm και της CCD ST-10XME και διήρκεσαν 36 νύκτες σε εύρος 79 ημερών μεταξύ Ιουνίου-Σεπτεμβρίου 2011. Στον πίνακα 7.8 δίνονται: Οι αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία (βλ. §3.1.1) και τα φαινόμενα μεγέθη τους m_V στο φίλτρο *V*, ο αριθμός των σημείων *N* ανά φίλτρο παρατήρησης και το μέσο φωτομετρικό σφάλμα τους *s.d.* εκφρασμένο σε mmag.

Πίνακας 7.8. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους.

Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για κάθε φίλτρο παρατήρησης					
QY Aql	Μεταβλητός	11.4[a]	B		V		I	
TYC 1618-1286-1	Σύγκρισης	11.28[b]	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.
TYC 1618-790-1	Ελέγχου	11.17[b]	3255	3.8	3136	3.4	3159	3.2

[a]Watson et al. (2006), [b]Høg et al. (2000)

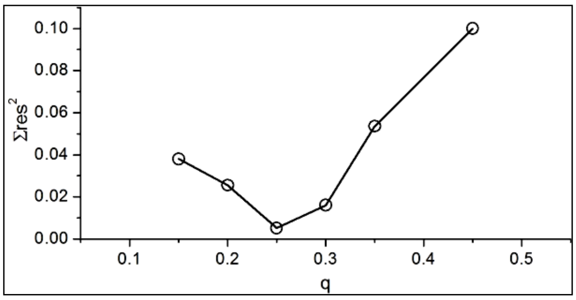
Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2455794.48023 + 7.22954^{\mathrm{d}}\ \mathrm{E} \tag{7.3}$$

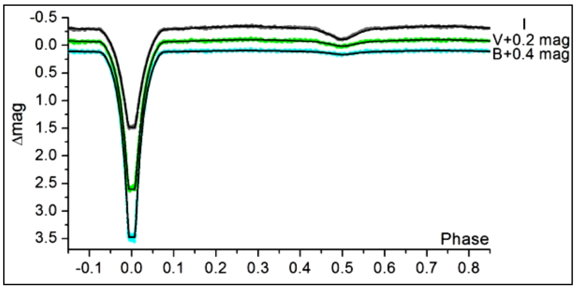
και υπολογίστηκε από τους χρόνους ελαχίστων (Πίνακας Β1), οι οποίοι προέκυψαν από τα δεδομένα μας και τους πιο πρόσφατους της βιβλιογραφίας.

Ανάλυση των καμπυλών φωτός

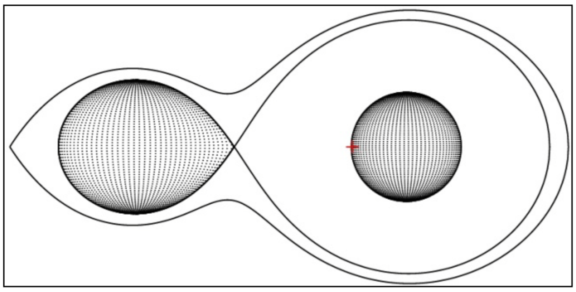
Η θερμοκρασία του πρωτεύοντα αστέρα τέθηκε ίση με 7300 K, σύμφωνα με τον φασματικό τύπο του συστήματος. Λόγω απουσίας φασματοσκοπικού λόγου μαζών των αστέρων του συστήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ανίχνευσης του *q* (*q*-search - βλ. §4.1) στους “modes” 2 και 5, όπου στον τελευταίο (συμβατικό ημιαποχωρισμένο σύστημα) προέκυψε η μικρότερη τιμή των $\sum res^2$. Το διάγραμμα ανίχνευσης του *q* παρουσιάζεται στην εικ. 7.7. Στην εικ. 7.8 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 7.9 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος, ενώ στον πίνακα 7.9 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος.



Εικόνα 7.7. Διάγραμμα ανίχνευσης του *q* για το σύστημα QY Aql. Η τιμή του *q* που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή των $\sum res^2$ βρέθηκε ίση με 0.25 στον “mode” 5.



Εικόνα 7.8. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες φωτός του συστήματος QY Aql στα φίλτρα *B, V* και *I*.



Εικόνα 7.9. Η γεωμετρία Roche του συστήματος QY Aql στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό.

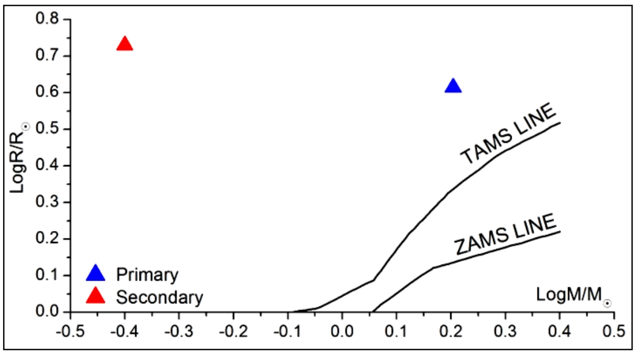
Πίνακας 7.9. Παράμετροι (Παρ.) του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα QY Aql.

Παρ.	Τιμή	Παρ.	Τιμή	Παρ.	Τιμή		
i [°]	88.6 (5)	A_1	1[a]	Φίλτρο:	B	V	I
q_{ph}	0.25 (1)	A_2	0.5[a]	x_1	0.669	0.569	0.385
T_1 [K]	7300[a,b]	g_1	1[a]	x_2	1.010	0.856	0.584
T_2 [K]	4244 (122)	g_2	0.32[a]	L_1/L_T	0.942 (1)	0.896 (1)	0.773 (1)
Ω_1	5.19 (6)			L_2/L_T	0.058 (1)	0.104 (1)	0.227 (1)
Ω_2	2.34[a]			Σres^2		0.634	

[a]σταθερή τιμή, [b]υπόθεση

Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Η τιμή της μάζας M_1 του πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος υποτέθηκε από τον φασματικό του τύπο ως αστέρας της ΚΑ (βλ. Παρ. Ε) και δίνεται μαζί με τις τιμές των υπολοίπων παραμέτρων στον πίνακα 7.10. Η εικ. 7.10 δείχνει τις θέσεις των αστέρων στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.



Εικόνα 7.10. Θέσεις των αστέρων του συστήματος QY Aql (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

Πίνακας 7.10. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος QY Aql.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [$M_\odot$]	1.6[a]	0.4 (1)	log$g$ [cm/s^2]	3.4 (1)	2.6 (1)
R [$R_\odot$]	4.1 (2)	5.4 (2)	α [$R_\odot$]	4.0 (2)	16.3 (7)
L [$L_\odot$]	43 (3)	8 (1)	M_{bol} [mag]	0.7 (2)	2.5 (4)

[a]υπόθεση

Ανάλυση των μεταβολών της τροχιακής περιόδου

Για την κατασκευή του O−C διαγράμματος του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν 62 χρόνοι ελαχίστων, 15 εκ των οποίων προέκυψαν από οπτικές παρατηρήσεις, 42 από φωτογραφικές και 5 από CCD παρατηρήσεις, οι οποίοι καλύπτουν χρονικό εύρος από το 1910 έως και σήμερα. Ως αρχική παράμετρος χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω αστρονομική εφημερίδα (Kreiner et al. 2001):

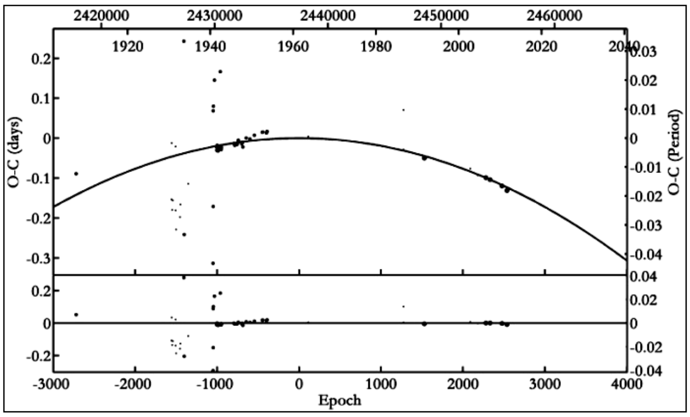
$$\text{Min. I} = \text{HJD } 2430223.5988 + 7.229595^{\text{d}}\text{E} \tag{7.4}$$

Αρχικά, ως συνάρτηση προσαρμογής δοκιμάστηκε η παραβολή, λόγω πιθανής μεταφοράς μάζας, όμως, τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι μόνο η ύπαρξη μιας κοίλης παραβολής που οδηγεί σε μείωση της περιόδου μπορεί να περιγράψει την κατανομή των O−C σημείων. Όπως και στις περιπτώσεις των συστημάτων AT Peg και X Tri (βλ. §6.10 και §6.11), καθώς το αποτέλεσμα έρχεται σε πλήρη αντίφαση με το αναμενόμενο, ο πιθανότερος μηχανισμός διαμόρφωσης της περιόδου είναι η μαγνητική πέδηση (βλ. §4.2.2), ενώ οι παραδοχές που έγιναν για το σύστημα προκειμένου να υπολογιστεί ο ρυθμός απώλειας μάζας από τη σχέση (4.69) είναι ίδιες με τα αυτές που παρουσιάστηκαν για τα άλλα δύο προαναφερόμενα συστήματα (επίσης βλ. σχέση 4.42). Η μέθοδος ανάλυσης και η επεξήγηση των συμβόλων αναφέρονται στην παράγραφο 4.2. Ο πίνακας 7.11 περιέχει τις τιμές των παραμέτρων της λύσης, ενώ στην εικ. 7.11 παρουσιάζεται η προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης στα O−C σημεία.

Πίνακας 7.11. Παράμετροι της O−C ανάλυσης του συστήματος QY Aql.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
JD_0 [HJD−2400000]	37453.205 (1)	$\dot{P}$ [$\times 10^{-6}$ d/yr]	−1.9 (1)
P [d]	7.229560 (1)	$\dot{M}_{tr}$ [$\times 10^{-8}$ $M_\odot$/yr]	1[a]
C_2 [$\times 10^{-8}$ d/cycle]	−1.91 (8)	$\dot{M}_{loss}$ [$\times 10^{-8}$ $M_\odot$/yr]	−3.2 (1)
Σres^2	1.718		

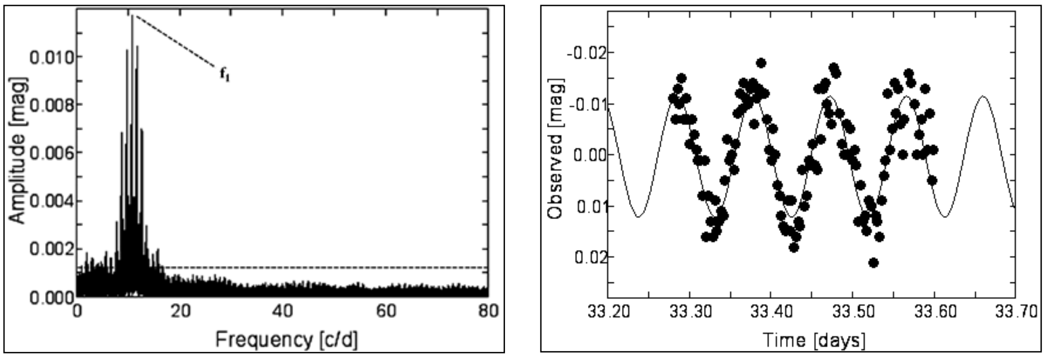
[a]υπόθεση



Εικόνα 7.11. Προσαρμογή μιας κοίλης παραβολής στα O−C σημεία του συστήματος QY Aql (επάνω) και τα υπόλοιπα (residuals) μετά την αφαίρεσή της (κάτω).

Εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης

Η μέθοδος για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης και η επεξήγηση των συμβόλων παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.3. Εντοπίστηκε μόνο μια συχνότητα ανάπαλσης με S/N>4, αλλά σε όλα τα φίλτρα στα οποία έγιναν οι παρατηρήσεις. Στον πίνακα 7.12 δίνονται οι παράμετροι της ανάπαλσης, ενώ στην εικ. 7.12 παρουσιάζεται το φάσμα συχνοτήτων και η προσαρμογή της συνάρτησης Fourier σε τμήμα των παρατηρησιακών δεδομένων.



Εικόνα 7.12. Αριστερά: Φάσμα συχνοτήτων του παλλόμενου αστέρα του συστήματος QY Aql, στο οποίο σημειώνεται η συχνότητα ανάπαλσης που εντοπίστηκε και το κατώτερο όριο (4σ) αξιόπιστων συχνοτήτων ανάπαλσης (διακεκομμένη γραμμή). Δεξιά: Προσαρμογή της καμπύλης Fourier στα φωτομετρικά σημεία της νύκτας με τη μεγαλύτερη διάρκεια παρατήρησης.

Πίνακας 7.12. Αποτελέσματα της ανάλυσης για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης του συστήματος QY Aql.

No.	l	Φίλτρο	f	A	Φ	S/N
			[c/d]	[mmag]	[°]	
		B	10.6561 (1)	11.8 (2)	23 (1)	35.8
f_1	1	V	10.6562 (2)	9.4 (2)	26 (1)	17.7
		I	10.6560 (3)	5.1 (2)	22 (2)	11.5

Συμπεράσματα

Ο πρωτεύων αστέρας του συστήματος βρίσκεται πάνω από την TAMS (εικ. 7.10) και αναπάλλεται με συχνότητα ~10.656 c/d, η οποία, σύμφωνα με τους Liakos et al. (2012b) (επίσης βλ. §7.21.5), είναι σχετικά μικρή για έναν αστέρα δ Sct. Κατ' αναλογία με τους μεμονωμένους, έτσι και για τους δ Sct αστέρες σε διπλά συστήματα, οι συχνότητες ανάπαλσης έχουν μια τάση μείωσης καθώς οι αστέρες συνεχίζουν να εξελίσσονται. Εύλογα λοιπόν συμπεραίνεται, ότι ο πρωτεύων αστέρας του συστήματος, σύμφωνα και με την εξελικτική του κατάσταση, βαίνει προς τον οριζόντιο κλάδο των γιγάντων. Από την άλλη πλευρά, ο δευτερεύων αστέρας έχει ήδη εξελιχθεί σε γίγαντα, ενώ γεμίζει και τον λοβό Roche του.

Σύμφωνα με την πλήρωση του λοβού Roche, δυνητικά ο δευτερεύων μεταφέρει μάζα στον πρωτεύοντα. Όμως, τα αποτελέσματα της O−C ανάλυσης έδειξαν μείωση της τροχιακής περιόδου, η οποία ερμηνεύτηκε σύμφωνα με τον μηχανισμό της μαγνητικής πέδησης από τον δευτερεύοντα αστέρα. Η μαγνητική πέδηση με τη σειρά της προκαλεί απώλεια μάζας και στροφορμής από το σύστημα με ρυθμό μεγαλύτερο από αυτόν της πιθανής μεταφοράς μάζας. Ο ρυθμός απώλειας μάζας εκτιμήθηκε $\sim 3.3\times10^{-8}$ $M_{\odot}$/yr και είναι τυπικός για ερυθρούς γίγαντες αστέρες (Hilditch 2001).

7.4. Το σύστημα TY Cap

Ιστορική αναδρομή

Το σύστημα ανακαλύφθηκε από τον Hoffmeister (1933). Οι Wood & Forbes (1963) δημοσίευσαν την πρώτη αστρονομική εφημερίδα του συστήματος, ενώ ο Mallama (1980b) παρουσίασε μια νέα ανανεωμένη. Ο Halbedel (1984), βασιζόμενος σε φασματοσκοπικές παρατηρήσεις, ταξινόμησε το σύστημα ως τύπου A2/3. Σύμφωνα όμως με τον δείκτη χρώματός του $B-V$=0.16, όπως δίνεται από τον κατάλογο "HIPPARCOS and TYCHO catalogues" (Perryman 1997), ο φασματικός τύπος του συστήματος είναι A5.

Οι Liakos & Niarchos (2009a) εντόπισαν αναπάλσεις στο σύστημα. Οι Liakos et al. (2012b), βάσει νέων φασματοσκοπικών παρατηρήσεων, προσδιόρισαν τον φασματικό τύπο του συστήματος, παρουσίασαν το φωτομετρικό μοντέλο του και την ανάλυση του O−C διαγράμματός του, υπολόγισαν εκ νέου τις απόλυτες παραμέτρους των μελών του και βρήκαν τις παραμέτρους των αναπάλσεων. Τα αποτελέσματα δίνονται στις επόμενες παραγράφους.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι φωτομετρικές παρατηρήσεις του συστήματος για την πλήρη κάλυψη των καμπυλών φωτός έγιναν στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1) με τη χρήση του τηλεσκοπίου των 40 cm και της CCD ST-8XMEI και διήρκεσαν 11 νύκτες σε χρονικό εύρος 26 ημερών εντός του Σεπτεμβρίου 2008. Με τον ίδιο εξοπλισμό κατά το χρονικό εύρος Ιούλιος-Σεπτέμβριος 2007 παρατηρήθηκαν 4 φωτομετρικά ελάχιστα του συστήματος στο R φίλτρο. Στον πίνακα 7.13 δίνονται: Οι αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία (βλ. §3.1.1) και τα φαινόμενα μεγέθη τους m_V στο φίλτρο V, ο αριθμός των σημείων N ανά φίλτρο παρατήρησης και το μέσο φωτομετρικό σφάλμα τους *s.d.* εκφρασμένο σε mmag. Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2454373.32822 + 1.42346^{\mathrm{d}}\ \mathrm{E} \qquad (7.5)$$

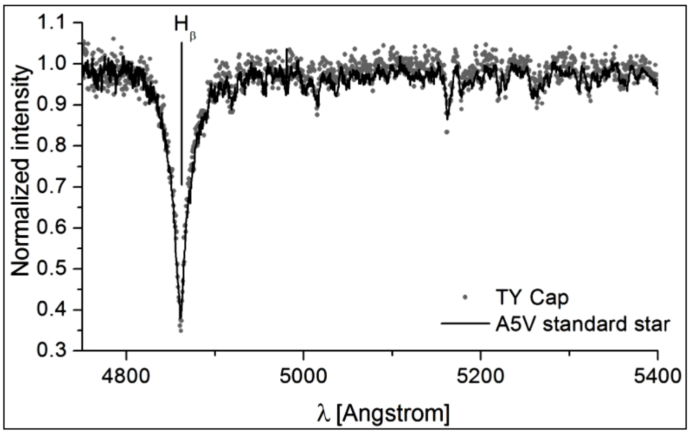
και υπολογίστηκε από τους χρόνους ελαχίστων (Πίνακας B1), οι οποίοι προέκυψαν από τα δεδομένα μας και τους πιο πρόσφατους της βιβλιογραφίας.

Πίνακας 7.13. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους.

Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για κάθε φίλτρο παρατήρησης							
TY Cap	Μεταβλητός	10.5[a]	B		V		R		I	
TYC 5749-2167-1	Σύγκρισης	10.64[b]	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.
TYC 5749-1557-1	Ελέγχου	10.37[b]	553	5.2	550	5.7	548	4.9	546	5.3

[a]Watson et al. (2006), [b]Høg et al. (2000)

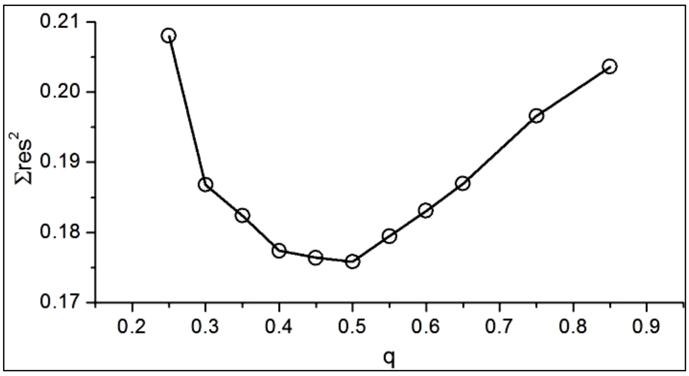
Η φασματοσκοπική παρατήρηση έλαβε χώρα στο Αστεροσκοπείο του Σκίνακα (βλ. §2.3.3) στις 24 Σεπτεμβρίου 2011 και ελήφθη μόνο ένα φάσμα στο φασματικό εύρος 4660-5714 Å. Δυστυχώς, δεν κατέστη δυνατόν η λήψη του φάσματος να γίνει κατά τη διάρκεια της δευτερεύουσας έκλειψης, αλλά κατά τη φάση 0.822 με χρόνο έκθεσης 1800 sec. Για τη φασματική ταξινόμηση συγκρίθηκε το κομμάτι του φάσματος μεταξύ 4800-5350 Å, όπου βρίσκονται η H_β και πλήθος μεταλλικών γραμμών με ικανοποιητικό S/N, με φάσματα προτύπων αστέρων. Όπως φαίνεται και από την παρακάτω ανάλυση των καμπυλών φωτός, ο πρωτεύων αστέρας κυριαρχεί στο φάσμα σε αυτό το εύρος μηκών κύματος (συνεισφορά >90%), επομένως πρακτικά το φάσμα που ελήφθη αντιπροσωπεύει με πολύ καλή προσέγγιση μόνο αυτόν. Το φάσμα του συστήματος, βάσει συγκρίσεων με φάσματα προτύπων αστέρων, προέκυψε ως τύπου A5. Στην εικ. 7.13 παρουσιάζεται η σύγκριση του φάσματος του TY Cap με το φάσμα του πρότυπου αστέρα, για το οποίο προέκυψε η μικρότερη τιμή των $\sum res^2$ (για λεπτομέρειες της μεθόδου βλ. §3.2.2).



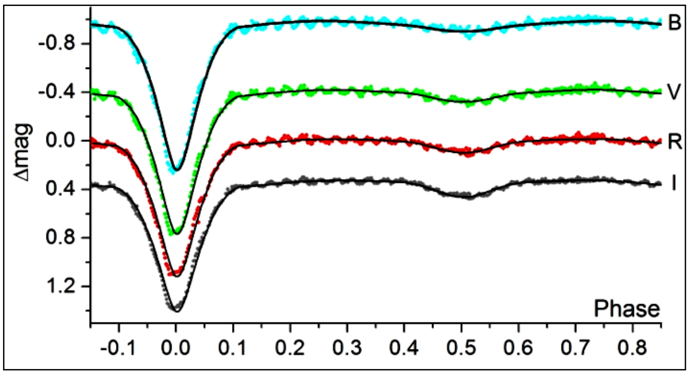
Εικόνα 7.13. Σύγκριση του σύνθετου φάσματος του συστήματος TY Cap (γκρίζα σημεία) με το φάσμα του πρότυπου αστέρα HIP 109521 (μαύρη γραμμή) φασματικού τύπου A5.

Ανάλυση των καμπυλών φωτός

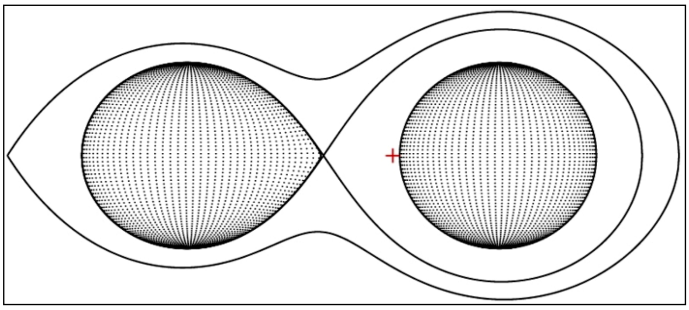
Η θερμοκρασία του πρωτεύοντα αστέρα τέθηκε ίση με 8200 K, βάσει της φασματικής ταξινόμησης που παρουσιάστηκε προηγουμένως. Λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων (βλ. παρακάτω), η οποία δύναται να ερμηνευτεί με το LITE (§4.2.1), η παράμετρος της φωτομετρικής συνεισφοράς από ένα πιθανό τρίτο μέλος στο σύστημα l_3 αφέθηκε ελεύθερη προς σύγκλιση. Λόγω ανυπαρξίας φασματοσκοπικά προσδιορισμένου λόγου μαζών των αστέρων του συστήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ανίχνευσης του q (q-search - βλ. §4.1) στους "modes" 2 και 5, και η καλύτερη λύση επιτεύχθηκε στον "mode" 5. Το αντίστοιχο διάγραμμα παρουσιάζεται στην εικ. 7.14. Στην εικ. 7.15 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 7.16 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος, ενώ στον πίνακα 7.14 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος.



Εικόνα 7.14. Διάγραμμα ανίχνευσης του q στον "mode" 5 για το σύστημα TY Cap. Η τιμή του q που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή των $\sum res^2$ βρέθηκε ίση με 0.5.



Εικόνα 7.15. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες φωτός στα φίλτρα *B*, *V*, *R*, *I* του συστήματος TY Cap.



Εικόνα 7.16. Η γεωμετρία Roche του συστήματος TY Cap στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό.

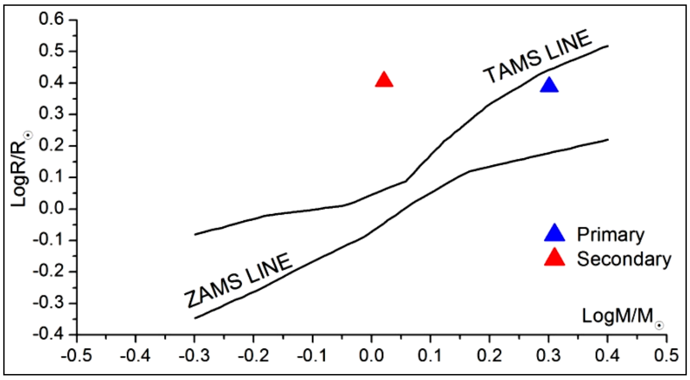
Πίνακας 7.14. Παράμετροι του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα TY Cap.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή			
i [°]	80.4 (2)	Φίλτρο:	B	V	R	I
q_{ph}	0.52 (1)	x_1	0.614	0.510	0.424	0.331
T_1 [K]	8200 (200)[a]	x_2	1.004	0.850	0.738	0.606
T_2 [K]	4194 (120)	L_1/L_T	0.953 (4)	0.938 (6)	0.914 (8)	0.887 (10)
Ω_1	3.80 (1)	L_2/L_T	0.018 (1)	0.037 (1)	0.056 (1)	0.084 (2)
Ω_2	2.93[a]	L_3/L_T	0.029 (3)	0.025 (4)	0.030 (6)	0.029 (8)
A_1	1[a]	$\langle L_3/L_T \rangle$ (%)	2.8 (1)			
A_2	0.5[a]					
g_1	1[a]					
g_2	0.32[a]	Σres^2	1.087			

[a]σταθερή τιμή

Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Η τιμή της μάζας M_1 του πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος υποτέθηκε από τον φασματικό του τύπο ως αστέρας της ΚΑ (βλ. Παρ. Ε) και δίνεται μαζί με τις τιμές των υπολοίπων παραμέτρων στον πίνακα 7.15. Η εικ. 7.17 δείχνει τις θέσεις των αστέρων στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.



Εικόνα 7.17. Θέσεις των αστέρων του συστήματος TY Cap (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

Πίνακας 7.15. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος TY Cap.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [M☉]	2.0[a]	1.05 (1)	log$g$ [cm/s^2]	3.96 (1)	3.65 (1)
R [R☉]	2.5 (1)	2.5 (1)	α [R☉]	2.7 (3)	5.2 (1)
L [L☉]	24.3 (8)	1.8 (2)	M_{bol} [mag]	1.3 (1)	4.1 (1)

[a]υπόθεση

Ανάλυση των μεταβολών της τροχιακής περιόδου

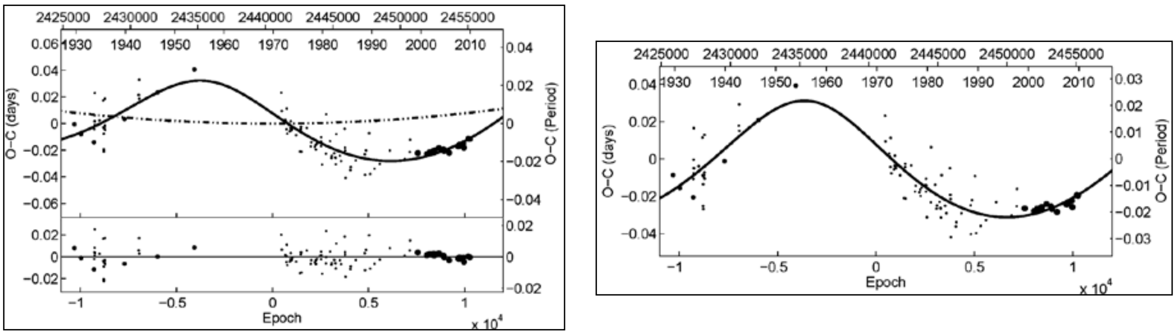
Το O−C διάγραμμα του TY Cap περιέχει 107 χρόνους ελαχίστων, 83 εκ των οποίων προέκυψαν από οπτικές, 5 από φωτοηλεκτρικές και 19 από CCD παρατηρήσεις και καλύπτουν χρονικό εύρος από το 1930 έως και σήμερα. Ως αρχική παράμετρος χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω αστρονομική εφημερίδα (Kreiner et al. 2001):

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2444793.4527 + 1.4234561^{\mathrm{d}}\mathrm{E} \tag{7.6}$$

Πίνακας 7.16. Παράμετροι της O−C ανάλυσης του συστήματος TY Cap.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
Εκλειπτικό σύστημα		3^o σώμα	
JD_0 [HJD−2400000]	40523.095 (2)	ω_3 [°]	99 (41)
P [d]	1.423458 (2)	P_3 [yr]	80 (3)
C_2 [$\times10^{-10}$ d/cycle]	0.7 (2)	e_3	0.2 (1)
$\dot{P}$ [$\times10^{-7}$ d/yr]	0.39 (1)	f(m_3) [M☉]	0.019 (7)
$\dot{M}_{tr}$ [$\times10^{-8}$ M☉/yr]	2.50 (6)	$M_{3,min}$ [M☉]	0.64 (6)
LITE		Μεταβολή της τετραπολικής ροπής	
T_0 [HJD−2400000]	65187 (4000)	ΔQ [$\times10^{50}$ g cm^2]	4.4
A [d]	0.029 (2)	Σres^2	0.010

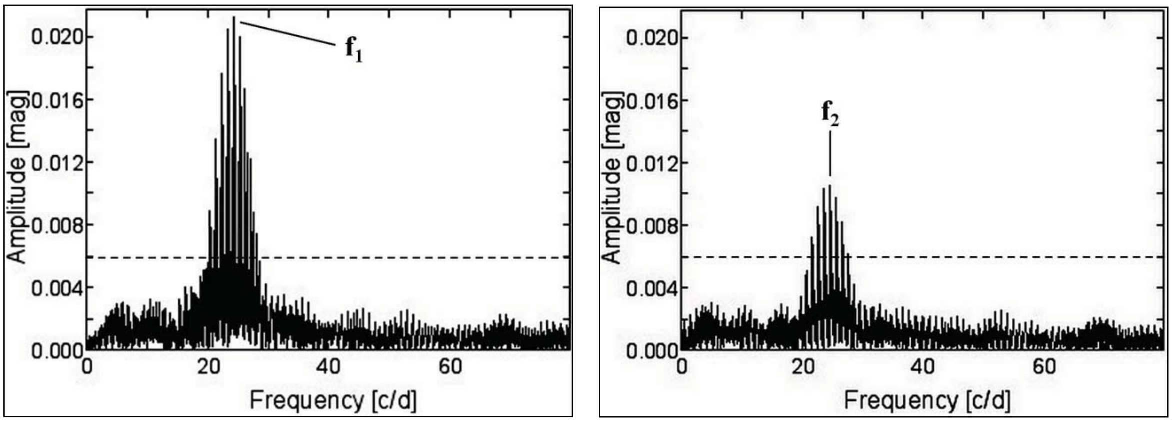
Αρχικά, ως συνάρτηση προσαρμογής δοκιμάστηκε η παραβολή, λόγω πιθανής μεταφοράς μάζας, και μια καμπύλη LITE, λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων. Εφόσον ο δευτερεύων αστέρας του συστήματος λόγω θερμοκρασίας δύναται να έχει περίβλημα μεταφοράς που θα μπορούσε να δημιουργήσει μεταβολές στην τετραπολική ροπή (βλ. §4.2.4), ελέγχθηκε η πιθανή ύπαρξη του μηχανισμού Applegate (1992). Η μέθοδος ανάλυσης και η επεξήγηση των συμβόλων αναφέρονται στην παράγραφο 4.2. Ο πίνακας 7.16 περιέχει τις τιμές των παραμέτρων των θεωρητικών καμπυλών, ενώ στην εικ. 7.18 παρουσιάζεται η προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης στα O−C σημεία.



Εικόνα 7.18. Αριστερά: Προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης LITE και μιας παραβολής (συνεχής γραμμή) στα O−C σημεία του συστήματος TY Cap (επάνω) και τα υπόλοιπα (residuals) μετά την αφαίρεση της συνολικής συνάρτησης (κάτω). Η διακεκομμένη γραμμή αναφέρεται στην παραβολή. Δεξιά: Προσαρμογή της καμπύλης LITE στα O−C υπόλοιπα έπειτα από την αφαίρεση της παραβολής.

Εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης

Η μέθοδος για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης και η επεξήγηση των συμβόλων παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.3. Εντοπίστηκαν δύο συχνότητες ανάπαλσης σε όλα τα φίλτρα στα οποία έγιναν οι παρατηρήσεις. Στον πίνακα 7.17 δίνονται οι παράμετροι της ανάπαλσης, ενώ στις εικ. 7.19-7.21 παρουσιάζονται τα φάσματα συχνοτήτων και η προσαρμογή της συνάρτησης Fourier σε τμήμα των παρατηρησιακών δεδομένων, αντίστοιχα.



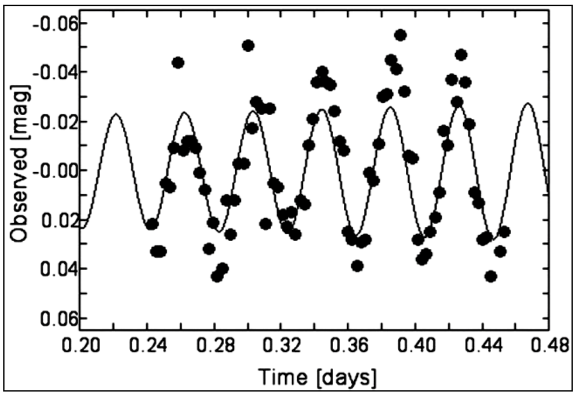
Εικόνα 7.19. Φάσματα συχνοτήτων στο *B* φίλτρο του παλλόμενου αστέρα του συστήματος TY Cap, στα οποία σημειώνονται οι συχνότητες ανάπαλσης που εντοπίστηκαν και το κατώτερο όριο (4σ) αξιόπιστων συχνοτήτων ανάπαλσης (διακεκομμένη γραμμή).

Πίνακας 7.17. Αποτελέσματα της ανάλυσης για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης του συστήματος TY Cap.

No.	l	Φίλτρο	f [c/d]	A [mmag]	Φ [°]	S/N
f_1	2	B	24.222 (1)	18.5 (7)	143 (2)	8.5
		V	24.224 (1)	15.6 (7)	142 (2)	7.2
		R	24.225 (2)	11.2 (6)	145 (3)	8.6
		I	24.226 (1)	9.4 (5)	142 (3)	10.1
f_2	-	B	24.590 (1)	11.3 (7)	93 (4)	5.0
		V	24.596 (1)	7.1 (7)	85 (5)	3.3
		R	24.585 (1)	6.5 (6)	114 (5)	5.5
		I	24.597 (1)	5.0 (5)	76 (5)	5.3

Πίνακας 7.17. Αποτελέσματα της ανάλυσης για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης του συστήματος TY Cap.

No.	l	Φίλτρο	f [c/d]	A [mmag]	Φ [°]	S/N
f_1	2	B	24.222 (1)	18.5 (7)	143 (2)	8.5
		V	24.224 (1)	15.6 (7)	142 (2)	7.2
		R	24.225 (2)	11.2 (6)	145 (3)	8.6
		I	24.226 (1)	9.4 (5)	142 (3)	10.1
f_2	-	B	24.590 (1)	11.3 (7)	93 (4)	5.0
		V	24.596 (1)	7.1 (7)	85 (5)	3.3
		R	24.585 (1)	6.5 (6)	114 (5)	5.5
		I	24.597 (1)	5.0 (5)	76 (5)	5.3



Εικόνα 7.20. Προσαρμογή της καμπύλης Fourier στα φωτομετρικά σημεία της νύκτας με τη μεγαλύτερη διάρκεια παρατήρησης.

Συμπεράσματα

Ο πρωτεύων αστέρας του συστήματος είναι επάνω στην ΚΑ και καθώς είναι ο θερμότερος εκ των δύο μελών είναι και ο τύπου δ Sct. Εντοπίστηκαν δύο συχνότητες ανάπαλσης, οι οποίες, αν και έχουν κοντινές τιμές (απέχουν ~0.4 c/d), εντούτοις έχουν διαφορά που ικανοποιεί το κριτήριο των Loumos & Deeming (1978) (επίσης βλ. §4.3) αναφορικά με την ελάχιστη «απόσταση» που πρέπει να έχουν οι συχνότητες, ώστε να μπορούν να διακριθούν σαν δύο ξεχωριστές. Στην περίπτωση αυτή βρέθηκε ότι το κατώτερο όριο διάκρισης είναι 0.06 c/d. Ο δευτερεύων αστέρας είναι πιο εξελιγμένος και γεμίζει τον λοβό Roche του. Επομένως, το σύστημα μπορεί να θεωρηθεί τύπου oEA. Από την O−C ανάλυση του συστήματος προέκυψε ότι υπάρχει ακόμη μεταφορά μάζας από τον πρωτεύοντα στον δευτερεύοντα, η οποία προκαλεί αύξηση της περιόδου του συστήματος. Επομένως, σύμφωνα και με τις τιμές των μαζών των αστέρων-μελών αλλά και της τωρινής εξελικτικής τους κατάστασης, το σύστημα πρέπει να εξελίσσεται σύμφωνα με την περίπτωση B (βλ. §1.2.4).

Από την ανάλυση των καμπυλών φωτός βρέθηκε φωτομετρική συνεισφορά από τρίτο μέλος ίση με $L_{3,LC}$~3%, ενώ από την O−C ανάλυση βρέθηκε ότι γύρω από το σύστημα πιθανόν περιφέρεται τρίτος αστέρας με ελάχιστη μάζα 0.64 $M_\odot$. Όμως, εάν αυτός ο αστέρας ανήκει στην KA, τότε αναμένεται φωτομετρική συνεισφορά $L_{3,O-C}$~1%. Αυτή η μικρή διαφορά μπορεί να μηδενιστεί υποθέτοντας ότι το τροχιακό επίπεδο του τρίτου αστέρα δεν είναι συνεπίπεδο με αυτό του εκλειπτικού συστήματος, αλλά σχηματίζουν γωνία ~35°. Επομένως, η μάζα του τρίτου μέλους, σύμφωνα με τη συνάρτηση μάζας (βλ. σχέση 4.17), προκύπτει ~0.9 $M_\odot$ και δύναται να ικανοποιήσει την παρατηρούμενη συνεισφορά. Επιπλέον, η ύπαρξη ενός τρίτου μέλους με αυτήν τη μάζα ικανοποιεί και το κριτήριο της δυναμικής ευστάθειας του Harrington (1977). Εναλλακτικά, ο μηχανισμός Applegate (1992) μπορεί να περιγράψει τις περιοδικές μεταβολές της τροχιακής περιόδου.

7.5. Το σύστημα WY Cet

Ιστορική αναδρομή

Το σύστημα ανακαλύφθηκε από τον Strohmeier (1962), ο οποίος υπολόγισε και την πρώτη εφημερίδα του. Οι Wolf & Kern (1983) περιέλαβαν το σύστημα στις uvbyβ φωτομετρικές παρατηρήσεις τους και υπολόγισαν το φαινόμενο μέγεθός του. Οι Strohmeier & Knigge (1969), βασιζόμενοι στις φωτοηλεκτρικές παρατηρήσεις του προγράμματος "Bamberg Southern Hemisphere Sky patrol", υπολόγισαν μια ακριβέστερη εφημερίδα του συστήματος, το ταξινόμησαν ως τύπου EA, ενώ εκτίμησαν ότι ο φασματικός του τύπος είναι A2. Οι Giuricin et al. (1984) ταξινόμησαν τα μέλη του συστήματος ως A2 και A4 για το πρωτεύον και το δευτερεύον, αντίστοιχα. Από την αποστολή "HIPPARCOS" (Adelman 2001) ο φασματικός τύπος προσδιορίστηκε ως F0V.

Οι Liakos & Niarchos (2009a) ανακάλυψαν ότι στο σύστημα υπάρχει παλλόμενο μέλος. Οι Liakos et al. (2012b), κάνοντας νέες φασματοσκοπικές παρατηρήσεις, προσδιόρισαν τον φασματικό τύπο του συστήματος και βάσει νέων CCD φωτομετρικών παρατηρήσεων, παρουσίασαν το φωτομετρικό μοντέλο του και ανέλυσαν το O−C διάγραμμά του. Επιπλέον, υπολόγισαν τις απόλυτες παραμέτρους των μελών του συστήματος και βρήκαν τις παραμέτρους των αναπάλσεων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι φωτομετρικές παρατηρήσεις του συστήματος έλαβαν χώρα στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1) με τη χρήση του τηλεσκοπίου των 40 cm και της CCD ST-8XMEI και διήρκεσαν 16 νύκτες σε χρονικό εύρος 52 ημερών μεταξύ των μηνών Σεπτεμβρίου-Νοεμβρίου 2008. Στον πίνακα 7.18 δίνονται: Οι αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία (βλ. §3.1.1) και τα φαινόμενα μεγέθη τους m_V στο φίλτρο *V*, ο αριθμός των σημείων *N* ανά φίλτρο παρατήρησης και το μέσο φωτομετρικό σφάλμα τους *s.d.* εκφρασμένο σε mmag.

Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2454766.45182 + 1.93969^{\mathrm{d}}\ \mathrm{E} \tag{7.7}$$

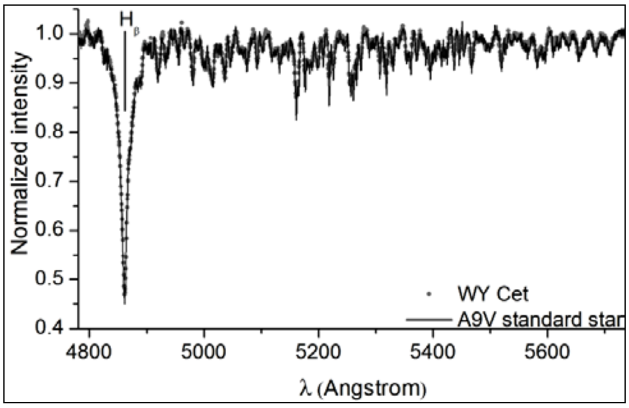
και υπολογίστηκε από τους χρόνους ελαχίστων (Πίνακας Β1), οι οποίοι προέκυψαν από τα δεδομένα μας και τους πιο πρόσφατους της βιβλιογραφίας.

Η φασματοσκοπική παρατήρηση έλαβε χώρα στο Αστεροσκοπείο του Σκίνακα (βλ. §2.3.3) στις 6 Οκτωβρίου 2010 και ελήφθη μόνο ένα φάσμα στο φασματικό εύρος 4782-5864 Å. Η χρονική στιγμή λήψης του φάσματος επιλέχθηκε προσεκτικά ώστε να αφορά ως επί το πλείστον τον πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος. Το φάσμα ελήφθη εντός της δευτερεύουσας έκλειψης, και συγκεκριμένα στη φάση 0.506 με χρόνο έκθεσης 900 sec. Για τη φασματική ταξινόμηση συγκρίθηκε το κομμάτι του φάσματος μεταξύ 4800-5350 Å, όπου βρίσκονται η H_β και πλήθος μεταλλικών γραμμών με ικανοποιητικό S/N, με φάσματα προτύπων αστέρων. Στην εικ. 7.21 παρουσιάζεται η σύγκριση του φάσματος του WY Cet, το οποίο με ικανοποιητική προσέγγιση αφορά μόνο τον πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος, με το φάσμα του πρότυπου αστέρα, για το οποίο προέκυψε η μικρότερη τιμή των $\sum res^2$ (για λεπτομέρειες της μεθόδου βλ. §3.2.2).

Πίνακας 7.18. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους.

Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για κάθε φίλτρο παρατήρησης							
WY Cet	Μεταβλητός	9.6[a]	B		V		R		I	
TYC 5279-352-1	Σύγκρισης	8.69[b]	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.
TYC 5279-617-1	Ελέγχου	12.12[b]	1846	2.8	1747	3.5	1784	3.7	1824	4.0

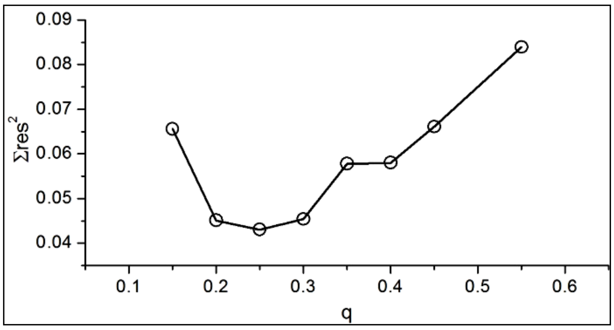
[a]Watson et al. (2006), [b]Høg et al. (2000)



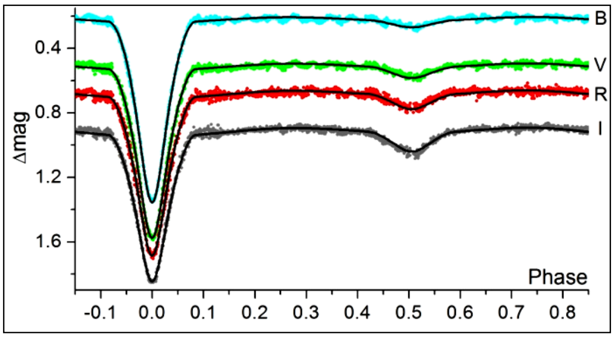
Εικόνα 7.21. Σύγκριση του σύνθετου φάσματος του συστήματος WY Cet (γκρίζα σημεία) με το φάσμα του πρότυπου αστέρα HIP 11678 (μαύρη γραμμή) φασματικού τύπου A9.

Ανάλυση των καμπυλών φωτός

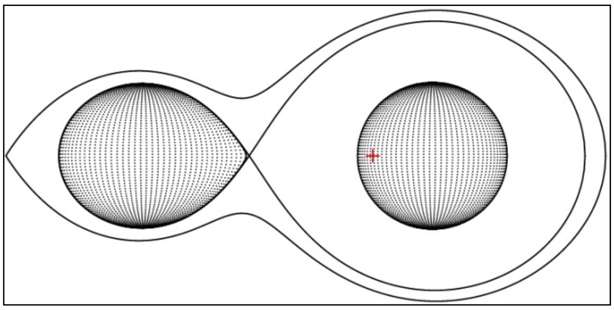
Η θερμοκρασία του πρωτεύοντα αστέρα τέθηκε ίση με 7500 K, βάσει της φασματικής ταξινόμησης που παρουσιάστηκε προηγουμένως. Λόγω της πιθανής ύπαρξης τρίτου μέλους στο σύστημα (βλ. παρακάτω), η παράμετρος της επιπρόσθετης φωτομετρικής συνεισφοράς l_3 αφέθηκε ελεύθερη προς σύγκλιση. Λόγω ανυπαρξίας φασματοσκοπικού λόγου μαζών των αστέρων του συστήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ανίχνευσης του *q* (*q*-search - βλ. §4.1) στους "modes" 2 και 5, όπου στον τελευταίο βρέθηκε η καλύτερη δυνατή λύση. Το αντίστοιχο διάγραμμα παρουσιάζεται στην εικ. 7.22. Στην εικ. 7.23 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 7.24 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος, ενώ στον πίνακα 7.19 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος.



Εικόνα 7.22 Διάγραμμα ανίχνευσης του *q* στον "mode" 5 για το σύστημα WY Cet. Η τιμή του *q* που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή των $\sum res^2$ βρέθηκε ίση με 0.25.



Εικόνα 7.23. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες φωτός στα φίλτρα *B*, *V*, *R*, *I* του συστήματος WY Cet.



Εικόνα 7.24. Η γεωμετρία Roche του συστήματος WY Cet στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό.

Πίνακας 7.19. Παράμετροι του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα WY Cet.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή			
i [°]	81.8 (1)	Φίλτρο:	B	V	R	I
q_{ph}	0.26 (1)	x_1	0.701	0.570	0.476	0.367
T_1 [K]	7500 (150)[a]	x_2	0.968	0.822	0.708	0.586
T_2 [K]	4347 (80)	L_1/L_T	0.946 (2)	0.915 (2)	0.883 (2)	0.843 (3)
Ω_1	4.18 (1)	L_2/L_T	0.044 (1)	0.076 (1)	0.106 (2)	0.144 (3)
Ω_2	2.40[a]	L_3/L_T	0.010 (1)	0.009 (2)	0.010 (2)	0.013 (2)
A_1	1[a]	$\langle L_3/L_T \rangle$ (%)	1.1 (1)			
A_2	0.5[a]					
g_1	1[a]					
g_2	0.32[a]	Σres^2	0.783			

[a]σταθερή τιμή

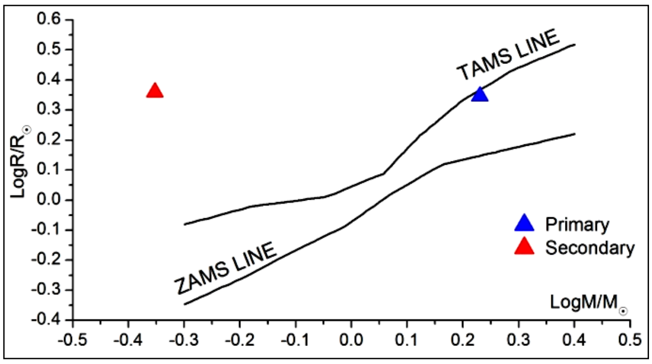
Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Η τιμή της μάζας M_1 του πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος υποτέθηκε από τον φασματικό του τύπο ως αστέρας της ΚΑ (βλ. Παρ. Ε) και δίνεται μαζί με τις τιμές των υπολοίπων παραμέτρων στον πίνακα 7.20. Η εικ. 7.25 δείχνει τις θέσεις των αστέρων στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.

Πίνακας 7.20. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος WY Cet.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [$M_\odot$]	1.7[a]	0.44 (1)	log$g$ [cm/s^2]	3.98 (1)	3.37 (1)
R [$R_\odot$]	2.2 (1)	2.3 (1)	α [$R_\odot$]	1.8 (3)	6.9 (1)
L [$L_\odot$]	14.0 (9)	1.7 (1)	M_{bol} [mag]	1.9 (8)	4.2 (8)

[a]υπόθεση

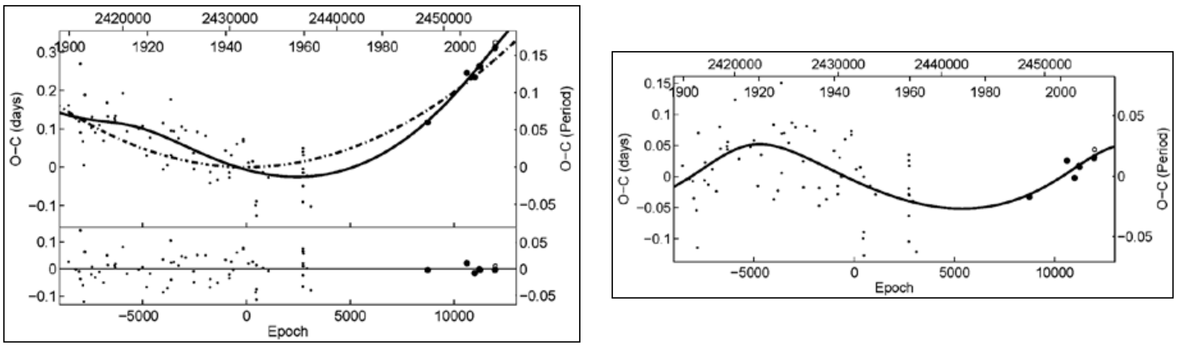


Εικόνα 7.25. Θέσεις των αστέρων του συστήματος WY Cet (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

Ανάλυση των μεταβολών της τροχιακής περιόδου

Το O−C διάγραμμα του WY Cet περιέχει 75 χρόνους ελαχίστων, 67 εκ των οποίων προέκυψαν από φωτογραφικές και 8 από CCD παρατηρήσεις και καλύπτουν χρονικό εύρος ~110 έτη. Ως αρχική παράμετρος χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω αστρονομική εφημερίδα (Kreiner et al. 2001):

$$\text{Min. I} = \text{HJD } 2426619.382 + 1.9396855^{\text{d}}\text{E} \quad (7.8)$$



Εικόνα 7.26. Αριστερά: Προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης LITE και μιας παραβολής (συνεχής γραμμή) στα O−C σημεία του συστήματος WY Cet (επάνω) και τα υπόλοιπα (residuals) μετά την αφαίρεση της συνολικής συνάρτησης (κάτω). Η διακεκομμένη γραμμή αναφέρεται στην παραβολή. Δεξιά: Προσαρμογή της καμπύλης LITE στα O−C υπόλοιπα έπειτα από την αφαίρεση της παραβολής.

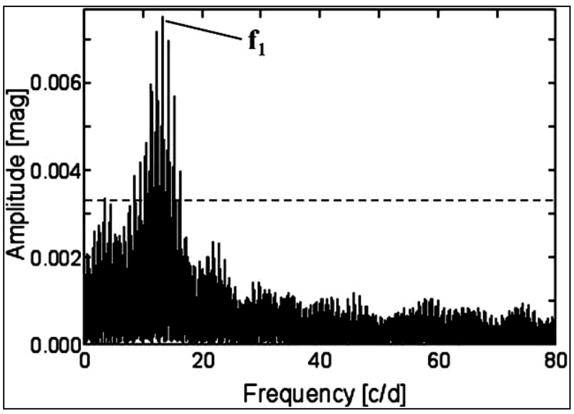
Πίνακας 7.21. Παράμετροι της O−C ανάλυσης του συστήματος WY Cet.

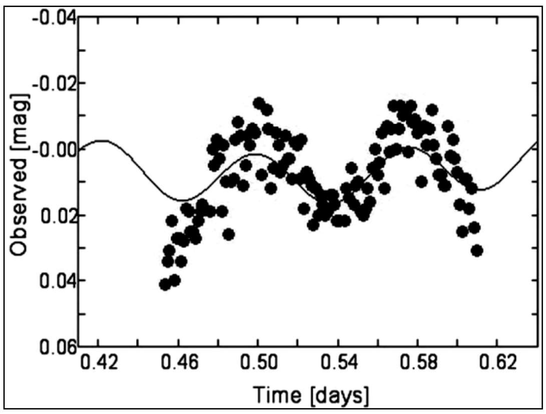
Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
Εκλειπτικό σύστημα		3^o σώμα	
JD_0 [HJD−2400000]	31553.889 (9)	ω_3 [°]	60 (6)
P [d]	1.939689 (1)	P_3 [yr]	98 (6)
C_2 [$\times 10^{-9}$ d/cycle]	1.958 (1)	e_3	0.3 (1)
$\dot{P}$ [$\times 10^{-7}$ d/yr]	7.37 (1)	$f(m_3)$ [$M_\odot$]	0.078 (9)
$\dot{M}_{tr}$ [$\times 10^{-8}$ $M_\odot$/yr]	7.52 (1)	$M_{3,min}$ [$M_\odot$]	0.89 (7)
LITE		Μεταβολή της τετραπολικής ροπής	
T_0 [HJD−2400000]	20356 (5000)	ΔQ [$\times 10^{50}$ g cm^2]	3.2
A [d]	0.052 (1)	Σres^2	0.189

Αρχικά, ως συνάρτηση προσαρμογής δοκιμάστηκε μια κυρτή παραβολή, λόγω πιθανής μεταφοράς μάζας, και μια καμπύλη LITE, λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων. Εφόσον ο δευτερεύων αστέρας του συστήματος λόγω θερμοκρασίας δύναται να έχει περίβλημα μεταφοράς που θα μπορούσε να δημιουργήσει μεταβολές στην τετραπολική ροπή (βλ. §4.2.4), ελέγχθηκε η πιθανή ύπαρξη του μηχανισμού Applegate (1992). Η μέθοδος ανάλυσης και η επεξήγηση των συμβόλων αναφέρονται στην παράγραφο 4.2. Ο πίνακας 7.21 περιέχει τις τιμές των παραμέτρων των θεωρητικών καμπυλών, ενώ στην εικ. 7.26 παρουσιάζεται η προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης στα O−C σημεία.

Εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης

Η μέθοδος για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης και η επεξήγηση των συμβόλων παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.3. Εντοπίστηκε μια συχνότητα ανάπαλσης σε όλα τα φίλτρα στα οποία έγιναν οι παρατηρήσεις. Στον πίνακα 7.22 δίνονται οι παράμετροι της ανάπαλσης, ενώ στην εικ. 7.27 παρουσιάζεται το φάσμα συχνοτήτων και η προσαρμογή της συνάρτησης Fourier σε τμήμα των παρατηρησιακών δεδομένων, αντίστοιχα.





Εικόνα 7.27. Αριστερά: Φάσμα συχνοτήτων στο *B* φίλτρο του παλλόμενου αστέρα του συστήματος WY Cet, στο οποίο σημειώνεται η συχνότητα ανάπαλσης που εντοπίστηκε και το κατώτερο όριο (4σ) αξιόπιστων συχνοτήτων ανάπαλσης (διακεκομμένη γραμμή). Δεξιά: Προσαρμογή της καμπύλης Fourier στα φωτομετρικά σημεία της νύκτας με τη μεγαλύτερη διάρκεια παρατήρησης.

Πίνακας 7.22. Αποτελέσματα της ανάλυσης για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης του συστήματος WY Cet.

No.	l	Φίλτρο	f [c/d]	A [mmag]	Φ [°]	S/N
f_1	0 ή 1	B	13.211 (1)	7.7 (3)	56 (2)	6
		V	13.212 (1)	5.2 (4)	55 (5)	4.6
		R	13.210 (1)	4.5 (5)	57 (6)	4.8
		I	13.213 (1)	3.7 (4)	40 (7)	4.2

Συμπεράσματα

Ο πρωτεύων αστέρας του συστήματος βρίσκεται στα όρια της ΚΑ (εικ. 7.25), είναι τύπου δ Sct και αναπάλλεται με συχνότητα ~13.2 c/d, τιμή που είναι σχετικά μικρή για τέτοιου τύπου αστέρες (Liakos et al. 2012b, επίσης βλ. §7.21.5). Ο συνδυασμός των παραπάνω οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο αστέρας βρίσκεται προς το τέλος της φάσης των αναπάλσεων τύπου δ Sct. Παρ' όλα αυτά, και εφόσον ο δευτερεύων είναι πάνω από την ΚΑ και ακόμη μεταφέρει μάζα στον πρωτεύοντα (βλ. αποτελέσματα ανάλυσης O−C) το σύστημα είναι τύπου oEA με πιθανότερο σενάριο εξέλιξης την περίπτωση Β (βλ. §1.2.4).

Οι περιοδικές μεταβολές της τροχιακής περιόδου μπορούν να ερμηνευτούν σύμφωνα με το LITE, από το οποίο προέκυψε ύπαρξη τρίτου μέλους με ελάχιστη μάζα ~0.9 $M_{\odot}$. Εάν αυτός ο αστέρας ανήκει στην ΚΑ, τότε αναμένεται φωτομετρική συνεισφορά $L_{3,O-C}$~4%, ενώ από την ανάλυση των καμπυλών φωτός προέκυψε επιπρόσθετη συνεισφορά μόλις $L_{3,LC}$~1%. Η διαφορά μεταξύ αυτών των τιμών είναι σχετικά μεγάλη, επομένως το σενάριο του τρίτου αστέρα της ΚΑ δεν ευσταθεί. Αντ' αυτού όμως, εάν θεωρηθεί ότι το τρίτο σώμα είναι στην πραγματικότητα διπλό σύστημα με αστέρες-μέλη μικρότερης θερμοκρασίας ή είναι πολύ πιο εξελιγμένος αστέρας (π.χ. αστέρας νετρονίων), τότε η απουσία φωτομετρικής συνεισφοράς στο οπτικό μέρος του Η/Μ φάσματος είναι εύλογη, ενώ ταυτόχρονα ερμηνεύονται και οι περιοδικές μεταβολές της περιόδου. Ωστόσο, το κριτήριο της δυναμικής ευστάθειας (Harrington 1977) ικανοποιείται μόνο στην περίπτωση όπου οι φορές των τροχιών των αστέρων του εκλειπτικού συστήματος και του τρίτου σώματος είναι αντίθετες. Ως εναλλακτική ερμηνεία αυτών των μεταβολών είναι ο μηχανισμός Applegate (1992), καθώς η μεταβολή της τετραπολικής ροπής του δευτερεύοντα αστέρα δύναται να προκαλέσει τέτοιου είδους μεταβολές.

7.6. Το σύστημα UW Cyg

Ιστορική αναδρομή

Η μεταβλητότητα του συστήματος ανακαλύφθηκε από τον Williams (1901) με τη χρήση φωτογραφικών πλακών, ενώ η πρώτη ακριβής περίοδός του ανακοινώθηκε από τους Pickering et al. (1902) βάσει φωτογραφικών παρατηρήσεων. Ο Fetlaar (1930) παρατήρησε την πρώτη καμπύλη φωτός του συστήματος και υπολόγισε τα φωτομετρικά του στοιχεία και αργότερα οι Wood & Forbes (1963) δημοσίευσαν την αστρονομική εφημερίδα του. Ο Qian (2000b) ανέλυσε το O−C διάγραμμα του συστήματος και εντόπισε περιοδική μεταβολή της περιόδου με περίοδο 49.2 yrs. Ο φασματικός τύπος του αναφέρεται ως A5 στους καταλόγους "All-sky Compiled Catalogue of 2.5 million stars" (Kharchenko 2001) και "The Tycho-2 Spectral Type Catalogue" (Wright et al. 2003).

Η πιο πρόσφατη, αλλά προκαταρκτική Ανάλυση των καμπυλών φωτός έγινε από τον Zasche (2011).

Οι Liakos et al. (2012b), βάσει νέων εκτεταμένων CCD παρατηρήσεων, ανέδειξαν την ύπαρξη αναπάλσεων του πρωτεύοντα αστέρα, ανέλυσαν τις καμπύλες φωτός του συστήματος, υπολόγισαν τα απόλυτα στοιχεία των αστέρων-μελών του και ανέλυσαν το O−C διάγραμμά του. Επιπλέον, βάσει των φασματοσκοπικών παρατηρήσεων τους κατέστη δυνατή η φασματική ταξινόμηση του πρωτεύοντα αστέρα. Τα αποτελέσματα δίνονται στις επόμενες παραγράφους.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι φωτομετρικές παρατηρήσεις του συστήματος έγιναν στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1) με τη χρήση του τηλεσκοπίου των 40 cm και της CCD ST-10XME και διήρκεσαν 26 νύκτες σε χρονικό εύρος 55 ημερών μεταξύ των μηνών Ιουνίου-Αυγούστου 2010. Στον πίνακα 7.23 δίνονται: Οι αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία (βλ. §3.1.1) και τα φαινόμενα μεγέθη τους m_V στο φίλτρο V, ο αριθμός των σημείων N ανά φίλτρο παρατήρησης και το μέσο φωτομετρικό σφάλμα τους *s.d.* εκφρασμένο σε mmag.

Πίνακας 7.23. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους.

Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για κάθε φίλτρο παρατήρησης					
UW Cyg	Μεταβλητός	10.7[a]	B		V		I	
TYC 3164-83-1	Σύγκρισης	11.0[b]	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.
TYC 3164-269-1	Ελέγχου	10.7[b]	3350	6.5	3090	7.0	3031	8.1

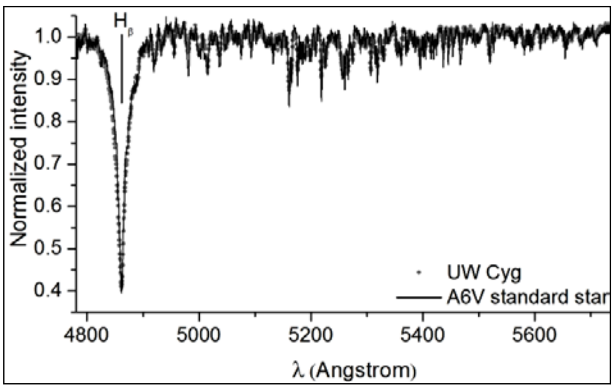
[a]Watson et al. (2006), [b]Høg et al. (2000)

Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2453928.5256 + 3.45078^{\mathrm{d}}\ \mathrm{E} \tag{7.9}$$

και υπολογίστηκε από τους χρόνους ελαχίστων (Πίνακας Β1), οι οποίοι προέκυψαν από τα δεδομένα μας και τους πιο πρόσφατους της βιβλιογραφίας.

Η φασματοσκοπική παρατήρηση πραγματοποιήθηκε στο Αστεροσκοπείο του Σκίνακα (βλ. §2.3.3) στις 6 Οκτωβρίου 2010 και ελήφθη μόνο ένα φάσμα στο φασματικό εύρος 4782-5864 Å. Η χρονική στιγμή λήψης του φάσματος επιλέχθηκε έτσι ώστε να

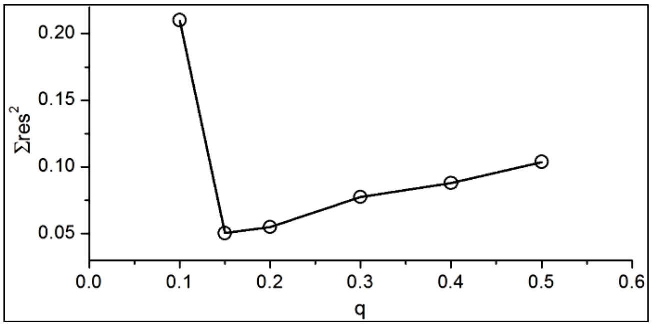


Εικόνα 7.28. Σύγκριση του σύνθετου φάσματος του συστήματος UW Cyg (γκρίζα σημεία) με το φάσμα του πρότυπου αστέρα HIP 21589 (μαύρη γραμμή) φασματικού τύπου Α6.

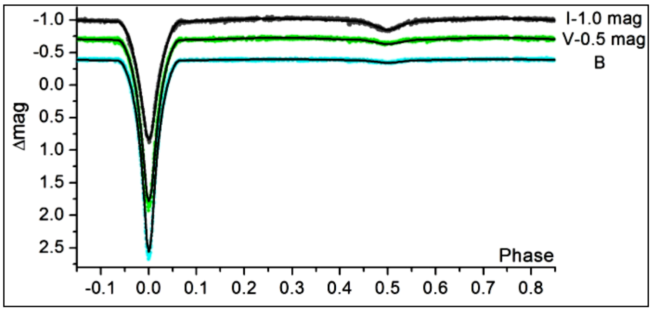
αφορά κυρίως τον πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος. Το φάσμα ελήφθη εντός της δευτερεύουσας έκλειψης, και συγκεκριμένα στη φάση 0.509 με χρόνο έκθεσης 2000 sec. Για τη φασματική ταξινόμηση συγκρίθηκε το τμήμα του φάσματος μεταξύ 4800-5350 Å, όπου βρίσκονται η H_β και πλήθος μεταλλικών γραμμών με ικανοποιητικό S/N, με φάσματα προτύπων αστέρων. Στην εικ. 7.28 παρουσιάζεται η σύγκριση του φάσματος του UW Cyg με το φάσμα του πρότυπου αστέρα, για το οποίο προέκυψε η μικρότερη τιμή των $\sum res^2$ (για λεπτομέρειες της μεθόδου βλ. §3.2.2).

Ανάλυση των καμπυλών φωτός

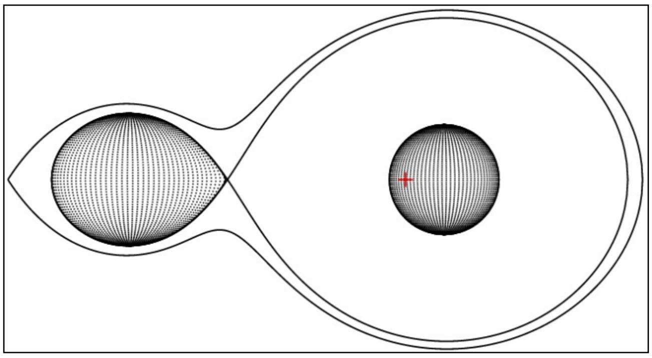
Η θερμοκρασία του πρωτεύοντα αστέρα τέθηκε ίση με 8000 K, βάσει της φασματικής ταξινόμησης που παρουσιάστηκε προηγουμένως. Λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων (βλ. παρακάτω), η παράμετρος της φωτομετρικής συνεισφοράς από ένα πιθανό τρίτο μέλος στο σύστημα l_3 αφέθηκε ελεύθερη προς σύγκλιση. Λόγω ανυπαρξίας φασματοσκοπικού λόγου μαζών των αστέρων του συστήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ανίχνευσης του *q* (*q*-search - βλ. §4.1) στους "modes" 2 και 5, με τον "mode" 5 να δίνει την καλύτερη δυνατή λύση. Το αντίστοιχο διάγραμμα παρουσιάζεται στην εικ. 7.29. Στην εικ. 7.30 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 7.31 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος, ενώ στον πίνακα 7.24 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος.



Εικόνα 7.29. Διάγραμμα ανίχνευσης του *q* στον "mode" 5 για το σύστημα UW Cyg. Η τιμή του *q* που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή των $\sum res^2$ βρέθηκε ίση με 0.15.



Εικόνα 7.30. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες φωτός στα φίλτρα *B*, *V*, *I* του συστήματος UW Cyg.



Εικόνα 7.31. Η γεωμετρία Roche του συστήματος UW Cyg στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό.

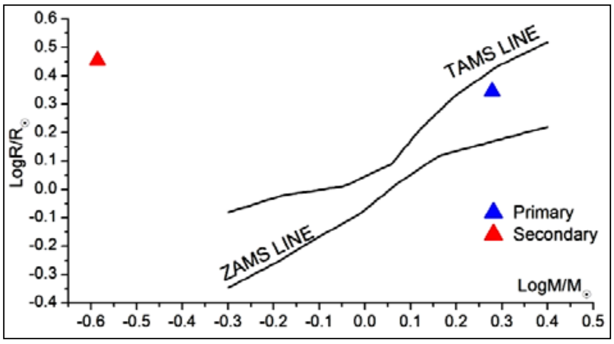
Πίνακας 7.24. Παράμετροι (παρ.) του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα UW Cyg.

Παρ.	Τιμή	Παρ.	Τιμή	Παρ.	Τιμή		
i [°]	87.1 (1)	A_1	1[a]	Φίλτρο:	B	V	I
q_{ph}	0.14 (1)	A_2	0.5[a]	x_1	0.596	0.517	0.351
T_1 [K]	8000 (200)[a]	g_1	1[a]	x_2	0.971	0.820	0.591
T_2 [K]	4347 (98)	g_2	0.32[a]	L_1/L_T	0.945 (2)	0.902 (3)	0.802 (4)
Ω_1	5.89 (1)			L_2/L_T	0.051 (1)	0.093 (2)	0.180 (1)
Ω_2	2.07[a]			L_3/L_T	0.004 (1)	0.005 (1)	0.018 (1)
Σres^2	1.475			$<L_3/L_T>$ (%)		0.9 (3)	

[a]σταθερή τιμή

Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Η τιμή της μάζας M_1 του πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος υποτέθηκε από τον φασματικό του τύπο ως αστέρας της ΚΑ (βλ. Παρ. Ε) και δίνεται μαζί με τις τιμές των υπολοίπων παραμέτρων στον πίνακα 7.5. Η εικ. 7.4 δείχνει τις θέσεις των αστέρων στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.



Εικόνα 7.32. Θέσεις των αστέρων του συστήματος UW Cyg (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

Πίνακας 7.25. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος UW Cyg.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [$M_\odot$]	1.9[a]	0.26 (1)	log$g$ [cm/s^2]	4.03 (2)	2.94 (3)
R [$R_\odot$]	2.2 (1)	2.9 (1)	α [$R_\odot$]	1.5 (2)	11.2 (1)
L [$L_\odot$]	18.0 (9)	2.6 (1)	M_{bol} [mag]	1.6 (4)	3.7 (6)

[a]υπόθεση

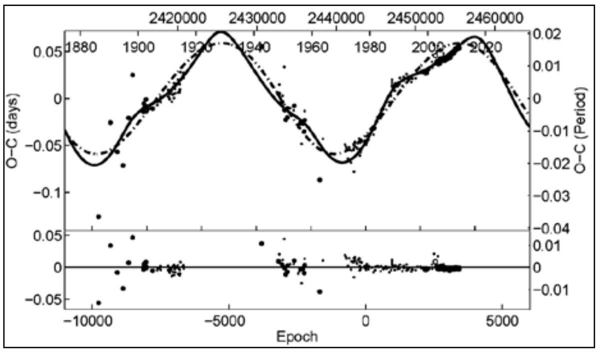
Ανάλυση των μεταβολών της τροχιακής περιόδου

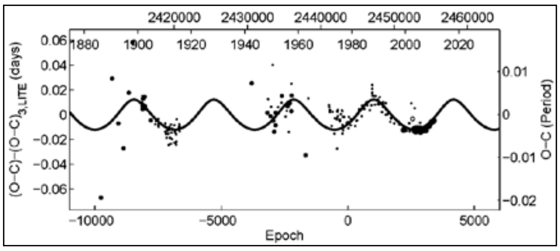
Για την κατασκευή του O−C διαγράμματος του συστήματος UW Cyg χρησιμοποιήθηκαν 193 χρόνοι ελαχίστων, 148 εκ των οποίων προέκυψαν από οπτικές παρατηρήσεις, 31 από φωτογραφικές και 14 από CCD παρατηρήσεις, οι οποίοι καλύπτουν χρονικό εύρος ~120 έτη. Ως αρχική παράμετρος χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω αστρονομική εφημερίδα (Kreiner et al. 2001):

$$\text{Min. I} = \text{HJD } 2443690.0667 + 3.4507624^{\text{d}}\text{E} \quad (7.10)$$

Αρχικά, ως συνάρτηση προσαρμογής δοκιμάστηκε η παραβολή, λόγω πιθανής μεταφοράς μάζας, και μια καμπύλη LITE, λόγω της εμφανούς περιοδικής κατανομής των

O−C σημείων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο συντελεστής της παραβολής είναι αμελητέος, επομένως δεν συμπεριλαμβάνεται στο τελικό μοντέλο. Όμως, μετά την αφαίρεση της θεωρητικής καμπύλης, τα O−C υπόλοιπα έδειχναν και πάλι μια περιοδική κατανομή. Επομένως, μια δεύτερη καμπύλη LITE προσαρμόστηκε για να περιγράψει αυτήν τη μεταβολή. Εφόσον ο δευτερεύων αστέρας του συστήματος είναι ψυχρός, υπό την έννοια ότι μπορεί να έχει περίβλημα μεταφοράς που θα μπορούσε να δημιουργήσει μεταβολές στην τετραπολική ροπή (βλ. §4.2.4), ελέγχθηκε η πιθανή ύπαρξη του μηχανισμού Applegate (1992). Η μέθοδος ανάλυσης και η επεξήγηση των συμβόλων αναφέρονται στην παράγραφο 4.2. Ο πίνακας 7.26 περιέχει τις τιμές των παραμέτρων των θεωρητικών καμπυλών, ενώ στην εικ. 7.33 παρουσιάζεται η προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης στα O−C σημεία.





Εικόνα 7.33. Αριστερά: Προσαρμογή δύο θεωρητικών καμπυλών LITE (συνεχής γραμμή) στα O−C σημεία του συστήματος UW Cyg (επάνω) και τα υπόλοιπα (residuals) μετά την αφαίρεση της συνολικής συνάρτησης (κάτω). Η διακεκομμένη γραμμή αναφέρεται στον πρώτο όρο LITE. Δεξιά: Προσαρμογή της δεύτερης καμπύλης LITE στα O−C υπόλοιπα έπειτα από την αφαίρεση της πρώτης καμπύλης LITE.

Πίνακας 7.26. Παράμετροι της O−C ανάλυσης του συστήματος UW Cyg.

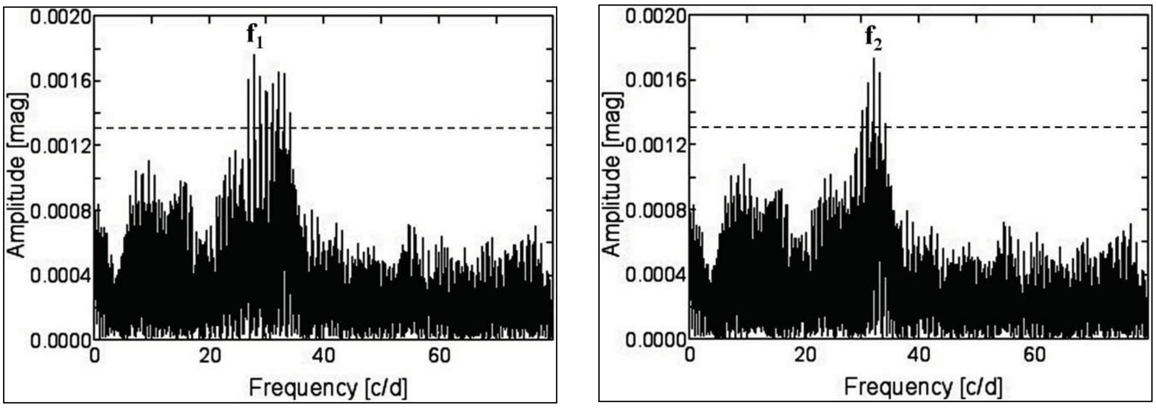
Παράμετρος	Τιμή	
	Εκλειπτικό σύστημα	
JD_0 [HJD−2400000]	43690.082 (3)	
P [d]	3.450759 (1)	
	3^o σώμα	4^o σώμα
T_0 [HJD−2400000]	35563 (1000)	36101 (878)
ω [°]	213 (13)	78 (34)
A [d]	0.061 (2)	0.013 (1)
P [yr]	82 (2)	30 (1)
e	0.2 (1)	0.4 (2)
f(m) [$M_\odot$]	0.184 (1)	0.013 (1)
M_{min} [$M_\odot$]	1.30 (1)	0.59 (1)
	Μεταβολή της τετραπολικής ροπής	
ΔQ [$\times 10^{50}$ g cm^2]	3.5 (1)	2.0 (5)
Σres^2	0.061	

Εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης

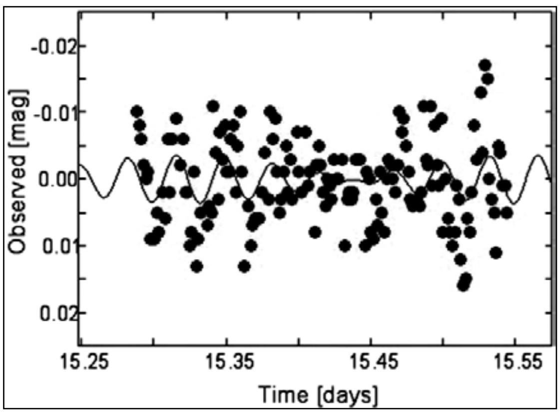
Η μέθοδος για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης και η επεξήγηση των συμβόλων παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.3. Η ανάλυση έγινε μόνο στα δεδομένα του *B* φίλτρου, διότι στα υπόλοιπα φίλτρα λόγω μεγάλου φωτομετρικού σφάλματος δεν ήταν δυνατόν να εντοπιστούν συχνότητες ανάπαλσης. Τελικά, εντοπίστηκαν δύο συχνότητες ανάπαλσης, ενώ οι αριθμοί *l*, λόγω της χρήσης δεδομένων μόνο από ένα φίλτρο, δεν προσδιορίστηκαν. Στον πίνακα 7.27 δίνονται οι παράμετροι των αναπάλσεων, ενώ στις εικ. 7.34 και 7.35 παρουσιάζονται τα φάσματα συχνοτήτων και η προσαρμογή της συνάρτησης Fourier σε τμήμα των παρατηρησιακών δεδομένων, αντίστοιχα.

Πίνακας 7.27. Αποτελέσματα της ανάλυσης στο *B* φίλτρο για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης του συστήματος UW Cyg.

	f [c/d]	A [mmag]	Φ [°]	S/N
f_1	27.841 (2)	1.9 (2)	132 (6)	4.4
f_2	32.087 (2)	1.7 (2)	111 (6)	4.1



Εικόνα 7.34. Φάσματα συχνοτήτων στο *B* φίλτρο του παλλόμενου αστέρα του συστήματος UW Cyg, στα οποία σημειώνονται οι συχνότητες ανάπαλσης που εντοπίστηκαν και το κατώτερο όριο (4σ) αξιόπιστων συχνοτήτων ανάπαλσης (διακεκομμένη γραμμή).



Εικόνα 7.35. Προσαρμογή της καμπύλης Fourier στα φωτομετρικά σημεία της νύκτας με τη μεγαλύτερη διάρκεια παρατήρησης.

Συμπεράσματα

Το σύστημα είναι ημιαποχωρισμένο με τον πρωτεύοντα αστέρα πολύ καλά εντός του λοβού Roche του, αλλά κοντά στην TAMS (εικ. 7.32), και με τον δευτερεύοντα να είναι στο στάδιο των γιγάντων και να έχει γεμίσει τον λοβό Roche του. Βάσει των τιμών των μαζών των αστέρων-μελών συμπεραίνεται ότι ο δευτερεύων έχει ήδη χάσει πολύ μεγάλο μέρος της μάζας του, και πιθανότατα το σύστημα εξελίχθηκε σύμφωνα με την περίπτωση B (§1.2.4). Ο πρωτεύων αστέρας είναι τύπου δ Sct και εντοπίστηκαν δύο συχνότητες ανάπαλσης. Επομένως, το σύστημα ανήκει στην κατηγορία των αστέρων τύπου oEA. Από την O−C ανάλυση του συστήματος δεν προέκυψε μεταφορά μάζας, αλλά είναι πολύ πιθανόν είτε να έχει σταματήσει είτε ο ρυθμός να είναι πολύ μικρός για να εντοπιστεί (slow mass accretion stage; Mkrtichian et al. 2003).

Από την ανάλυση των καμπυλών φωτός προέκυψε μια πολύ μικρή φωτομετρική συνεισφορά της τάξης του 1%. Από την άλλη πλευρά, οι περιοδικές μεταβολές της τροχιακής περιόδου, εάν ερμηνευτούν με το LITE, συνιστούν την ύπαρξη δύο αστέρων με ελάχιστες μάζες ~1.3 $M_{\odot}$ και ~0.6 $M_{\odot}$. Όμως, η αναμενόμενη φωτομετρική συνεισφορά δύο αστέρων της ΚΑ με τέτοιες μάζες είναι $L_{3+4,O-C}$~10%. Είναι προφανές, ότι οι τιμές αναμενόμενης και παρατηρούμενης φωτομετρικής συνεισφοράς δεν μπορούν να εξισωθούν. Ωστόσο, βρέθηκε ότι ο μηχανισμός Applegate (1992) μπορεί να ερμηνεύσει και τις δύο περιοδικές μεταβολές. Εάν υποθέσουμε ότι ο μηχανισμός Applegate (1992) αφορά μόνο τον πρώτο περιοδικό όρο με περίοδο 82 έτη, ενώ ο δεύτερος προκαλείται από το LITE λόγω τρίτου σώματος με μάζα ~0.6 $M_{\odot}$, τότε η αναμενόμενη συνεισφορά από αυτό το μέλος είναι <1%, όσο δηλαδή περίπου και η παρατηρούμενη. Επιπλέον, το κριτήριο της δυναμικής ευστάθειας (Harrington 1977) δεν ικανοποιείται στην περίπτωση τετραπλού συστήματος, παρά μόνο στην περίπτωση του τριπλού.

7.7. Το σύστημα BW Del

Ιστορική αναδρομή

Το σύστημα ανακαλύφθηκε από τον Hoffmeister (1935) και οι Wood & Forbes (1963) υπολόγισαν την πρώτη εφημερίδα του. Οι Brancewicz & Dworak (1980) υπολόγισαν τις απόλυτες παραμέτρους τους συστήματος, βάσει της μεθόδου των φωτομετρικών παραλλάξεων. Εκτός από πολλούς χρόνους ελαχίστων, η μόνη διαθέσιμη πληροφορία για το σύστημα προέρχεται από τους καταλόγους "The NPM2 Catalogue of Absolute Proper Motions" (Hanson et al. 2004) και "Catalogue of Stellar Spectral Classification" (Skiff 2010) και αφορά στον φασματικό τύπο του συστήματος ως F2.

Οι Liakos & Niarchos (2012d) παρουσίασαν το φωτομετρικό μοντέλο του συστήματος και την ανάλυση του O−C διαγράμματός του, υπολόγισαν τις απόλυτες παραμέτρους των μελών του και βρήκαν τις παραμέτρους των αναπάλσεων. Τα αποτελέσματα δίνονται παρακάτω.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Η ανακάλυψη των αναπάλσεων στο σύστημα προήλθε από παρατηρήσεις που έγιναν στο αστεροσκοπείο Κρυονερίου (βλ. §2.3.2) στις 25 Αυγούστου 2011. Οι συστηματικές παρατηρήσεις έλαβαν χώρα στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1) με τη χρήση του τηλεσκοπίου των 40 cm και της CCD ST-10XME και διήρκεσαν 18 νύκτες σε εύρος 55 ημερών μεταξύ Σεπτεμβρίου-Οκτωβρίου 2011. Στον πίνακα 7.28 δίνονται: Οι αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία (βλ. §3.1.1) και τα φαινόμενα μεγέθη τους m_v στο φίλτρο V, ο αριθμός των σημείων N ανά φίλτρο παρατήρησης και το μέσο φωτομετρικό σφάλμα τους *s.d.* εκφρασμένο σε mmag.

Πίνακας 7.28. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους.

Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για κάθε φίλτρο παρατήρησης			
BW Del	Μεταβλητός	11.4[a]	B		V	
TYC 1635-1273-1	Σύγκρισης	11.38[b]	N	s.d.	N	s.d.
TYC 1635-1027-2	Ελέγχου	11.36[b]	1791	3.8	1760	5.0

[a]Watson et al. (2006), [b]Høg et al. (2000)

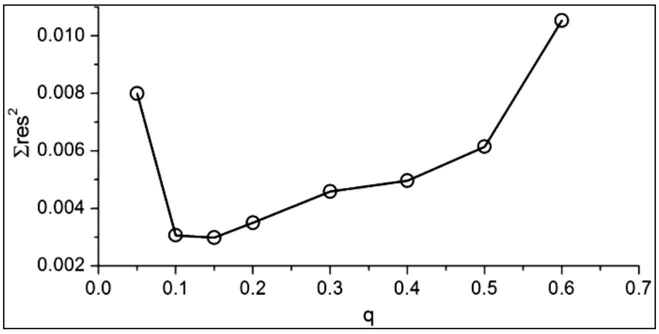
Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\text{Min. I} = \text{HJD } 2455813.31149 + 2.42319^{\text{d}} \text{ E} \tag{7.11}$$

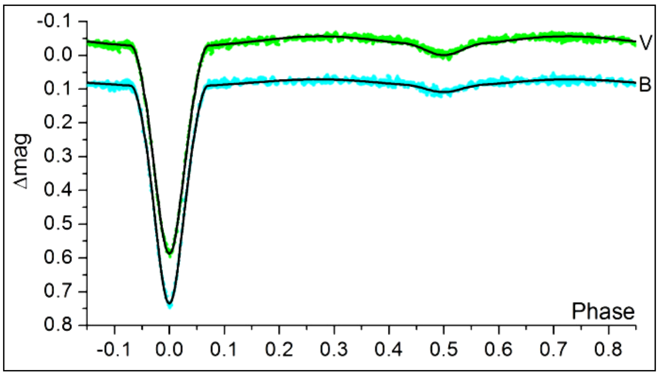
και υπολογίστηκε από τον χρόνους ελαχίστου (Πίνακας Β1), ο οποίος προέκυψε από τα δεδομένα μας και τους πιο πρόσφατους της βιβλιογραφίας.

Ανάλυση των καμπυλών φωτός

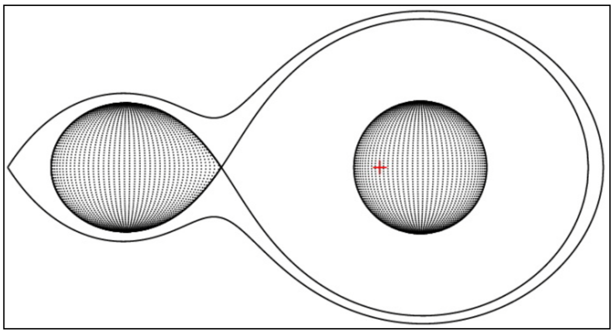
Η θερμοκρασία του πρωτεύοντα αστέρα τέθηκε ίση με 7000 K, σύμφωνα με τον φασματικό τύπο του συστήματος. Λόγω απουσίας φασματοσκοπικού λόγου μαζών των αστέρων του συστήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ανίχνευσης του *q* (*q*-search - βλ. §4.1) στους “modes” 2 και 5, όπου στον τελευταίο (συμβατικό ημιαποχωρισμένο σύστημα) προέκυψε η μικρότερη τιμή των $\sum \text{res}^2$. Το διάγραμμα ανίχνευσης του *q* παρουσιάζεται στην εικ. 7.36. Στην εικ. 7.37 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 7.38 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος, ενώ στον πίνακα 7.29 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος.



Εικόνα 7.36. Διάγραμμα ανίχνευσης του *q* για το σύστημα BW Del. Η τιμή του *q* που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή των $\sum \text{res}^2$ βρέθηκε ίση με 0.25 στον “mode” 5.



Εικόνα 7.37. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες φωτός του συστήματος BW Del στα φίλτρα *B* και *V*.



Εικόνα 7.38. Η γεωμετρία Roche του συστήματος BW Del στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό.

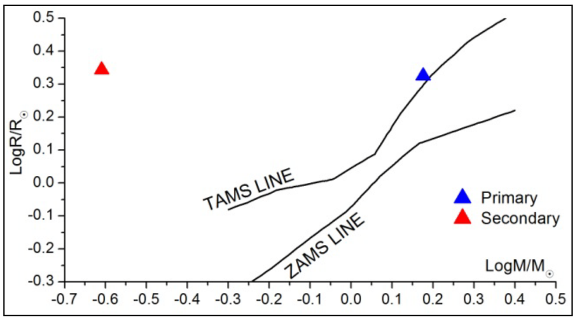
Πίνακας 7.29. Παράμετροι του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα BW Del.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή	
i [°]	78.6 (4)	A_1	1[a]	Φίλτρο:	B	V
q_{ph}	0.16 (1)	A_2	0.5[a]	x_1	0.592	0.493
T_1 [K]	7000[a,b]	g_1	1[a]	x_2	0.957	0.823
T_2 [K]	4061 (30)	g_2	0.32[a]	L_1/L_T	0.963 (1)	0.932 (1)
Ω_1	4.61 (6)			L_2/L_T	0.037 (2)	0.068 (1)
Ω_2	2.14[a]			Σres^2	0.129	

[a]σταθερή τιμή, [b]υπόθεση

Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Η τιμή της μάζας M_1 του πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος υποτέθηκε από τον φασματικό του τύπο ως αστέρας της ΚΑ (βλ. Παρ. Ε) και δίνεται μαζί με τις τιμές των υπολοίπων παραμέτρων στον πίνακα 7.30. Η εικ. 7.39 δείχνει τις θέσεις των αστέρων στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.



Εικόνα 7.39. Θέσεις των αστέρων του συστήματος BW Del (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

Πίνακας 7.30. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος BW Del.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [$M_\odot$]	1.5[a]	0.25 (4)	log$g$ [cm/s^2]	4.0 (1)	3.1 (1)
R [$R_\odot$]	2.1 (1)	2.2 (1)	α [$R_\odot$]	1.3 (1)	8.0 (4)
L [$L_\odot$]	9.6 (8)	1.2 (1)	M_{bol} [mag]	2.3 (1)	4.6 (1)

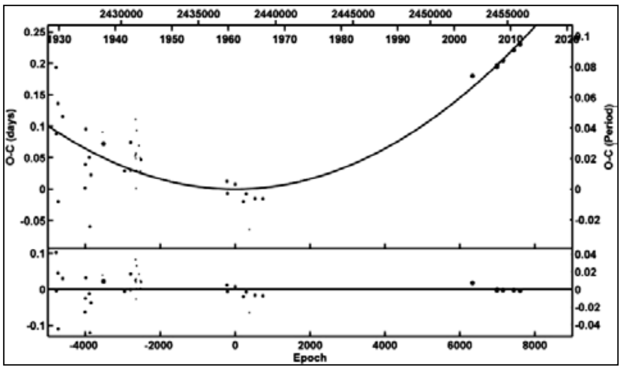
[a]υπόθεση

Ανάλυση των μεταβολών της τροχιακής περιόδου

Για την κατασκευή του O−C διαγράμματος του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν 48 χρόνοι ελαχίστων, 20 εκ των οποίων προέκυψαν από οπτικές παρατηρήσεις, 22 από φωτογραφικές και 6 από CCD παρατηρήσεις, οι οποίοι καλύπτουν χρονικό εύρος από το 1930 έως και σήμερα. Ως αρχική παράμετρος χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω αστρονομική εφημερίδα (Kreiner et al. 2001):

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2425795.3548 + 2.4231313^{\mathrm{d}}\mathrm{E} \qquad (7.12)$$

Ως συνάρτηση προσαρμογής δοκιμάστηκε η κυρτή παραβολή, λόγω πιθανής μεταφοράς μάζας. Η μέθοδος ανάλυσης και η επεξήγηση των συμβόλων αναφέρονται στην παράγραφο 4.2. Ο πίνακας 7.31 περιέχει τις τιμές των παραμέτρων της λύσης, ενώ στην εικ. 7.40 παρουσιάζεται η προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης στα O−C σημεία.



Εικόνα 7.40. Προσαρμογή μιας κυρτής παραβολής στα O−C σημεία του συστήματος BW Del (επάνω) και τα υπόλοιπα (residuals) μετά την αφαίρεσή της (κάτω).

Πίνακας 7.31. Παράμετροι της O−C ανάλυσης του συστήματος BW Del.

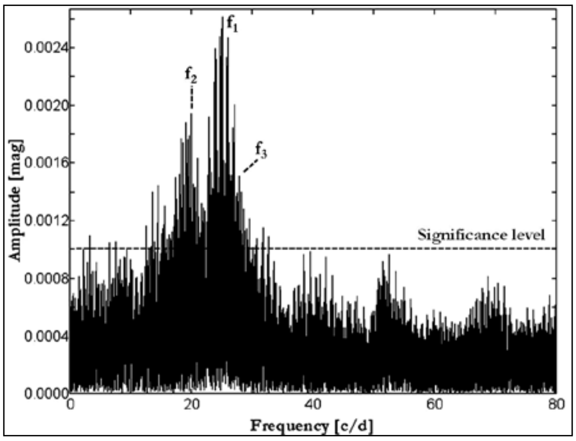
Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
JD_0 [HJD−2400000]	37375.460 (1)	$\dot{P}$ [$\times10^{-6}$ d/yr]	1.2 (2)
P [d]	2.423133 (3)	$\dot{M}_{tr}$ [$\times10^{-8}$ $M_\odot$/yr]	5.0 (6)
C_2 [$\times10^{-9}$ d/cycle]	4.0 (5)	Σres^2	0.292

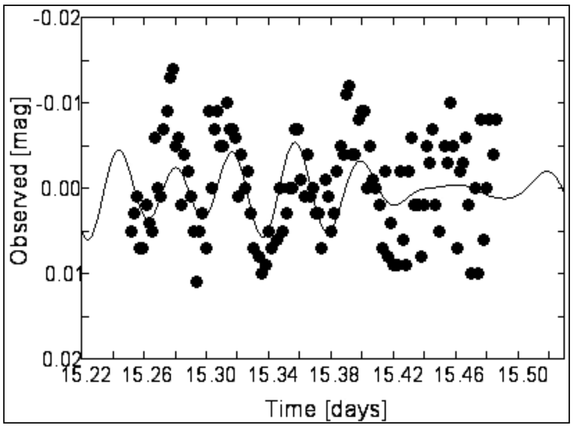
Εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης

Η μέθοδος για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης και η επεξήγηση των συμβόλων παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.3. Εντοπίστηκαν τρεις συχνότητες ανάπαλσης σε όλα τα φίλτρα στα οποία έγιναν οι παρατηρήσεις. Καθώς δεν υπάρχουν θεωρητικά μοντέλα (MAD-βλ. §4.3) για την τιμή της μάζας του πρωτεύοντα αστέρα, οι αριθμοί-*l* των αναπάλσεων υπολογίστηκαν βάσει του πλησιέστερου μοντέλου MAD που αντιστοιχούσε σε τιμή μάζας 1.6 $M_\odot$. Στον πίνακα 7.32 δίνονται οι παράμετροι της ανάπαλσης, ενώ στην εικ. 7.41 παρουσιάζεται το φάσμα συχνοτήτων και η προσαρμογή της συνάρτησης Fourier σε τμήμα των παρατηρησιακών δεδομένων, αντίστοιχα.

Πίνακας 7.32. Αποτελέσματα της ανάλυσης για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης του συστήματος BW Del.

No.	l	Φίλτρο	f [c/d]	A [mmag]	Φ [°]	S/N
f_1	1 ή 3	B	25.100 (1)	2.9 (2)	74 (4)	5.1
		V	25.100 (1)	1.8 (2)	89 (6)	4.7
f_2	0 ή 2	B	19.641 (1)	1.9 (2)	46 (6)	4.5
		V	19.643 (1)	1.2 (2)	26 (9)	4.4
f_3	1 ή 2	B	27.608 (1)	1.7 (2)	324 (7)	4.1
		V	27.608 (1)	1.3 (2)	328 (9)	4.5





Εικόνα 7.41. Αριστερά: Φάσμα συχνοτήτων στο *B* φίλτρο του παλλόμενου αστέρα του συστήματος BW Del, στο οποίο σημειώνονται οι συχνότητες ανάπαλσης που εντοπίστηκαν και το κατώτερο όριο (4σ) αξιόπιστων συχνοτήτων ανάπαλσης (διακεκομμένη γραμμή). Δεξιά: Προσαρμογή της καμπύλης Fourier στα φωτομετρικά σημεία της νύκτας με τη μεγαλύτερη διάρκεια παρατήρησης.

Συμπεράσματα

Το σύστημα είναι ημιαποχωρισμένο με τον δευτερεύοντα αστέρα να έχει γεμίσει τον λοβό Roche του. Ο πρωτεύων αστέρας είναι τύπου δ Sct, αναπάλλεται σε τρεις συχνότητες με την κυρίαρχη στους 25.1 c/d και είναι ελαφρώς εξελιγμένος, υπό την έννοια ότι βρίσκεται στα όρια της TAMS (εικ. 7.39). Ωστόσο, σύμφωνα με τις τιμές της θερμοκρασίας και της φωτεινότητάς του βρίσκεται στο «ερυθρό» άκρο της ζώνης αστάθειας των δ Sct αστέρων (Soydugan et al. 2006a) και κάτω από την TAMS. Επιπροσθέτως, δεν υπήρχαν θεωρητικά μοντέλα MAD για αυτήν την τιμή μάζας, άρα, βάσει των παραπάνω, συμπεραίνεται ότι η τιμή της μάζας του πρωτεύοντα ίσως να είναι λίγο μεγαλύτερη από αυτήν που υποτέθηκε, επομένως, μελλοντικές φασματοσκοπικές παρατηρήσεις για τον υπολογισμό των ακτινικών ταχυτήτων αναμένεται να δώσουν τελικές απαντήσεις. Ο δευτερεύων αστέρας οδεύει προς το στάδιο των γιγάντων. Από την τιμή της μάζας του, αλλά και από τον ρυθμό μεταφοράς μάζας προς τον πρωτεύοντα, ο οποίος υπολογίστηκε από την O−C ανάλυση, προκύπτει ότι έχει χάσει ήδη μεγάλο μέρος της μάζας του. Το πιθανότερο σενάριο εξέλιξης του συστήματος είναι η περίπτωση B (§1.2.4).

7.8. Το σύστημα HL Dra

Ιστορική αναδρομή

Το σύστημα ανακαλύφθηκε ως μεταβλητός σχετικά πρόσφατα από την αποστολή "HIPPARCOS" (Woitas 1997). Οι Grenier et al. (1999) μέτρησαν τη συστημική ακτινική ταχύτητα γ=−23.1 km/sec, ενώ οι Pribulla et al. (2006) υπολόγισαν τις ακτινικές ταχύτητες του πρωτεύοντα αστέρα, και εκτίμησαν τον φασματικό τύπο του ως A5.

Οι Liakos et al. (2012b), βάσει νέων παρατηρήσεων, ανέδειξαν την ύπαρξη αναπάλσεων του πρωτεύοντα αστέρα, ανέλυσαν τις καμπύλες φωτός του συστήματος και υπολόγισαν τα απόλυτα στοιχεία των αστέρων-μελών του. Τα αποτελέσματα δίνονται στις επόμενες παραγράφους.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι φωτομετρικές παρατηρήσεις του συστήματος έλαβαν χώρα στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1) με τη χρήση του τηλεσκοπίου των 40 cm και της CCD ST-10XME και διήρκεσαν 17 νύκτες σε χρονικό εύρος 65 ημερών μεταξύ των μηνών Ιουλίου-Σεπτεμβρίου 2010. Στον πίνακα 7.33 δίνονται: Οι αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία (βλ. §3.1.1) και τα φαινόμενα μεγέθη τους m_V στο φίλτρο V, ο αριθμός των σημείων N ανά φίλτρο παρατήρησης και το μέσο φωτομετρικό σφάλμα τους *s.d.* εκφρασμένο σε mmag.

Πίνακας 7.33. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους.

Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για κάθε φίλτρο παρατήρησης							
HL Dra	Μεταβλητός	7.33[a]	B		V		R		I	
TYC 3913-1029-1	Σύγκρισης	8.55[b]	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.
TYC 3913-901-1	Ελέγχου	10.05[b]	2364	2.1	2217	2.4	1512	1.9	1494	2.1

[a]Watson et al. (2006), [b]Høg et al. (2000)

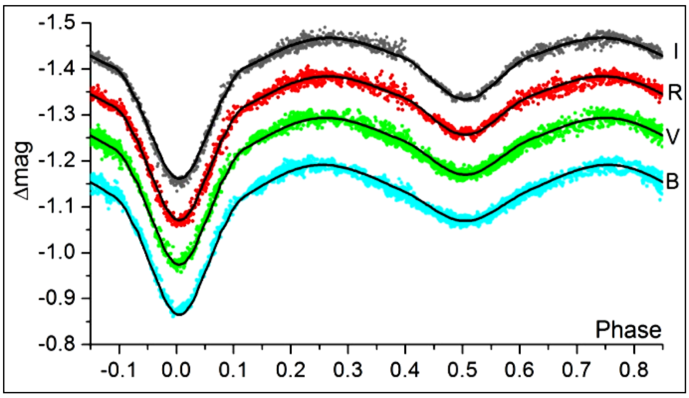
Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\text{Min. I} = \text{HJD } 2455408.51571 + 0.94428^{\text{d}}\ \text{E} \qquad (7.13)$$

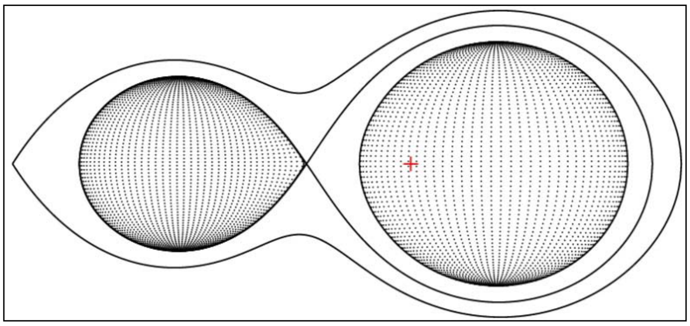
και υπολογίστηκε από τους χρόνους ελαχίστων (Πίνακας Β1), οι οποίοι προέκυψαν από τα δεδομένα μας και τους πιο πρόσφατους της βιβλιογραφίας.

Ανάλυση των καμπυλών φωτός

Η θερμοκρασία του πρωτεύοντα αστέρα τέθηκε ίση με 8200 K, βάσει της φασματικής ταξινόμησης των Pribulla et al. (2006), ενώ στην ανάλυση χρησιμοποιήθηκε και η καμπύλη ακτινικών ταχυτήτων του πρωτεύοντα αστέρα (Pribulla et al. 2006), η οποία περιόρισε δραστικά το εύρος τιμών του q στη μέθοδο ανίχνευσης του (q-search - βλ. §4.1) στους "modes" 2 και 5. Το εύρος τιμών του q ήταν μεταξύ 0.35-0.45, ενώ η καλύτερη δυνατή λύση βρέθηκε στον "mode" 5. Στην εικ. 7.42 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 7.43 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος, ενώ στον πίνακα 7.34 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος.



Εικόνα 7.42. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες φωτός στα φίλτρα *B*, *V*, *R*, *I* του συστήματος HL Dra.



Εικόνα 7.43. Η γεωμετρία Roche του συστήματος HL Dra στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό.

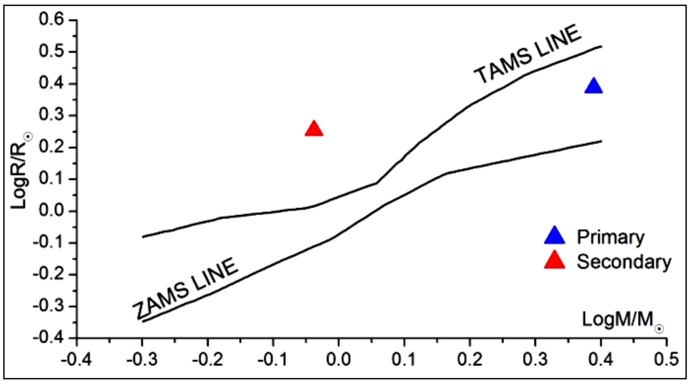
Πίνακας 7.34. Παράμετροι του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα HL Dra.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή			
i [°]	66.5 (1)	Φίλτρο:	B	V	R	I
q_{ph}	0.37 (1)	x_1	0.596	0.509	0.426	0.338
T_1 [K]	8200[a,b]	x_2	0.853	0.708	0.611	0.513
T_2 [K]	5074 (8)	L_1/L_T	0.956 (1)	0.932 (1)	0.912 (1)	0.888 (1)
Ω_1	2.93 (1)	L_2/L_T	0.044 (2)	0.068 (2)	0.088 (2)	0.112 (2)
Ω_2	2.63[a]	g_1	1[a]			
A_1	1[a]	g_2	0.32[a]			
A_2	0.5[a]	Σres^2	0.688			

[a]σταθερή τιμή, [b]Pribulla et al. (2006)

Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Στον πίνακα 7.35 δίνονται οι απόλυτες παράμετροι των αστέρων-μελών και η εικ. 7.44 δείχνει τις θέσεις τους στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.



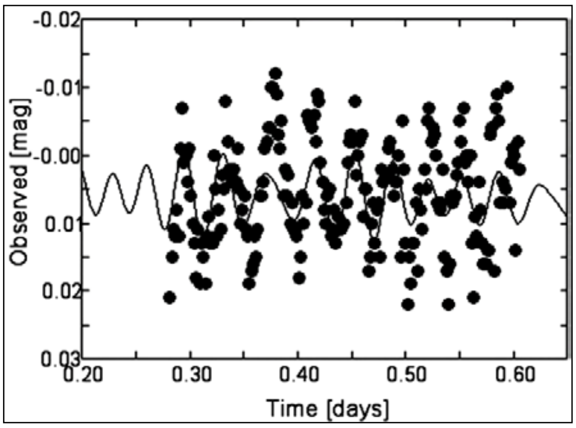
Εικόνα 7.44. Θέσεις των αστέρων του συστήματος HL Dra (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

Πίνακας 7.35. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος HL Dra.

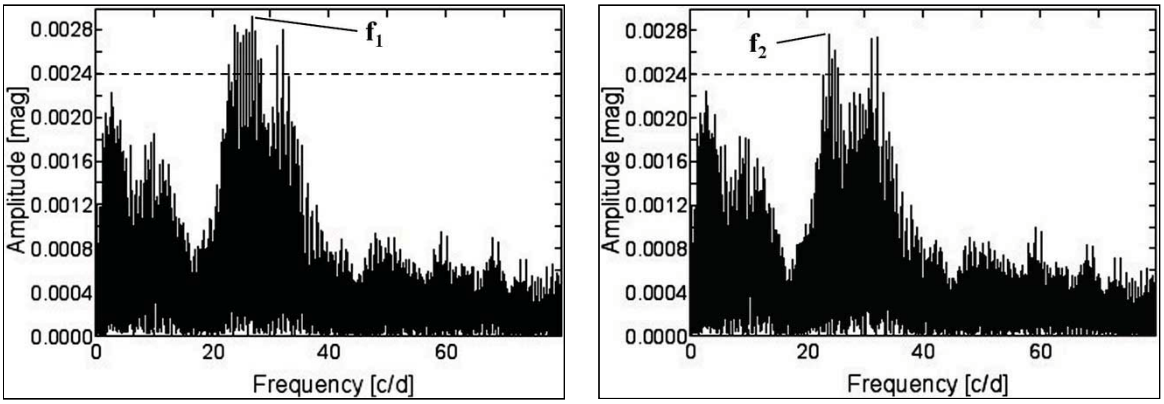
Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [M☉]	2.5 (2)	0.9 (2)	log$g$ [cm/s^2]	4.05 (1)	3.89 (1)
R [R☉]	2.45 (4)	1.79 (3)	α [R☉]	1.65 (3)	4.41 (8)
L [L☉]	24 (1)	1.9 (1)	M_{bol} [mag]	1.3 (2)	4.1 (2)

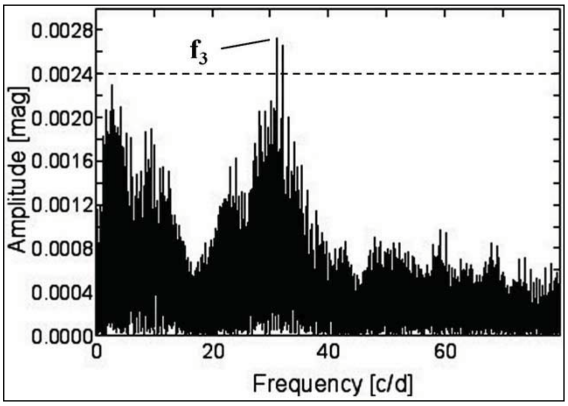
Εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης

Η μέθοδος για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης και η επεξήγηση των συμβόλων παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.3. Εντοπίστηκαν τρεις συχνότητες ανάπαλσης σε όλα τα φίλτρα στα οποία έγιναν οι παρατηρήσεις. Σε κάποια φίλτρα οι συχνότητες που εντοπίστηκαν είχαν S/N<4, αλλά καθώς οι ίδιες συχνότητες στα υπόλοιπα φίλτρα παρουσίασαν S/N>4, συμπεραίνεται ότι πρόκειται για φυσικές, επομένως παρουσιάζονται στο τελικό μοντέλο. Καθώς δεν υπάρχουν θεωρητικά μοντέλα (MAD-βλ. §4.3) για την τιμή της μάζας του πρωτεύοντα αστέρα, οι αριθμοί-*l* των αναπάλσεων υπολογίστηκαν βάσει του πλησιέστερου μοντέλου MAD που αντιστοιχούσε σε τιμή μάζας 2 $M_{\odot}$. Στον πίνακα 7.36 δίνονται οι παράμετροι της ανάπαλσης, ενώ στις εικ. 7.45 και 7.46 παρουσιάζεται η προσαρμογή της συνάρτησης Fourier σε τμήμα των παρατηρησιακών δεδομένων και τα φάσματα συχνοτήτων, αντίστοιχα.



Εικόνα 7.45. Προσαρμογή της καμπύλης Fourier στα φωτομετρικά σημεία της νύκτας με τη μεγαλύτερη διάρκεια παρατήρησης.





Εικόνα 7.46. Φάσματα συχνοτήτων στο *B* φίλτρο του παλλόμενου αστέρα του συστήματος HL Dra, στα οποία σημειώνονται οι συχνότητες ανάπαλσης που εντοπίστηκαν και το κατώτερο όριο (4σ) αξιόπιστων συχνοτήτων ανάπαλσης (διακεκομμένη γραμμή).

Πίνακας 7.36. Αποτελέσματα της ανάλυσης για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης του συστήματος HL Dra.

No.	l	Φίλτρο	f [c/d]	A [mmag]	Φ [°]	S/N
f_1	2	B	26.914 (1)	3.0 (2)	248 (4)	5.0
		V	26.914 (1)	2.8 (3)	245 (11)	5.0
		R	26.911 (1)	1.9 (3)	261 (10)	2.9
		I	26.916 (1)	1.9 (3)	224 (8)	4.0
f_2	1 ή 2	B	23.795 (1)	2.7 (2)	319 (5)	5.1
		V	23.795 (1)	2.1 (3)	318 (12)	4.5
		R	23.793 (1)	1.5 (3)	317 (13)	3.0
		I	23.796 (1)	1.4 (3)	308 (10)	2.8
f_3	-	B	31.072 (1)	2.7 (2)	221 (5)	4.8
		V	31.072 (1)	1.5 (3)	225 (7)	2.7
		R	31.071 (1)	1.5 (3)	228 (13)	3.2
		I	31.072 (1)	2.0 (3)	239 (7)	4.0

Συμπεράσματα

Ο πρωτεύων αστέρας του συστήματος είναι τύπου δ Sct και βρίσκεται επάνω στην ΚΑ (εικ. 7.44), ενώ ο δευτερεύων είναι ελαφρώς εξελιγμένος και έχει γεμίσει τον λοβό Roche του. Σύμφωνα με αυτά τα στοιχεία το σύστημα κατατάσσεται στην κατηγορία αστέρων τύπου oEA. Προς το παρόν, δεν υπάρχει κάποιο στοιχείο που να αποδεικνύει μεταφορά μάζας στο σύστημα, καθώς λόγω της πρόσφατης ανακάλυψης του συστήματος δεν υπάρχει O−C διάγραμμα διαθέσιμο ώστε να εντοπιστεί κάποια πιθανή μεταβολή της περιόδου του. Ωστόσο, εφόσον το σύστημα είναι ημιαποχωρισμένο, ο δευτερεύων αστέρας είναι δυνητικά δότης μάζας, αν και από τη σύγκριση των τιμών των μαζών των αστέρων, αλλά και της εξελικτικής τους κατάστασης φαίνεται ότι κατά το παρελθόν υπήρξε μεταφορά μάζας. Επομένως, το επικρατέστερο σενάριο εξέλιξης είναι η περίπτωση Β (βλ. §1.2.4). Για τον παλλόμενο αστέρα του συστήματος εντοπίστηκαν τρεις συχνότητες ανάπαλσης, αλλά η τιμή της μάζας του σε συνδυασμό με τις τιμές των συχνοτήτων του δεν βρέθηκαν στα θεωρητικά μοντέλα MAD (βλ. §4.3). Ο λόγος συχνοτήτων f_2/f_3 είναι ~0.75 και είναι τυπικός για τη θεμελιώδη συχνότητα ακτινικής ανάπαλσης και τη συχνότητα του πρώτου απόηχου (first overtone; βλ. §1.3.1).

7.9. Το σύστημα HZ Dra

Ιστορική αναδρομή

Όπως και το προηγούμενο σύστημα, έτσι και το σύστημα HZ Dra ανακαλύφθηκε από την αποστολή "HIPPARCOS". Οι Fehrenbach et al. (1997) υπολόγισαν τη συστημική ακτινική ταχύτητα $\gamma = -6$ km/sec. Ο φασματικός τύπος του συστήματος δίνεται ως A0 σε διάφορους καταλόγους (Kharchenko 2001, Fabricius et al. 2002, Wright et al. 2003).

Οι Liakos et al. (2012b), βάσει νέων φωτομετρικών και φασματοσκοπικών παρατηρήσεων, ανέδειξαν την ύπαρξη αναπάλσεων του πρωτεύοντα αστέρα, ανέλυσαν τις καμπύλες φωτός του συστήματος και υπολόγισαν τα απόλυτα στοιχεία των αστέρων-μελών του. Τα αποτελέσματα δίνονται στις επόμενες παραγράφους.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι φωτομετρικές παρατηρήσεις για την κάλυψη των καμπυλών φωτός του συστήματος διήρκεσαν οκτώ νύκτες μεταξύ Μαΐου-Ιουνίου 2010 και έλαβαν χώρα στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1) με τη χρήση του τηλεσκοπίου των 40 cm και της CCD ST-10XME. Στον πίνακα 7.37 δίνονται λεπτομέρειες που αφορούν τις φωτομετρικές παρατηρήσεις και την επεξεργασία των δεδομένων. Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2455360.55956 + 0.77294^{\mathrm{d}}\ \mathrm{E} \tag{7.14}$$

και υπολογίστηκε από χρόνους ελαχίστων, οι οποίοι προέκυψαν από τα δεδομένα μας (Πίνακας Β1) και τους πιο πρόσφατους από τη βιβλιογραφία.

Πίνακας 7.37. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους (*N*=αριθμός σημείων, *s.d.*=σφάλμα).

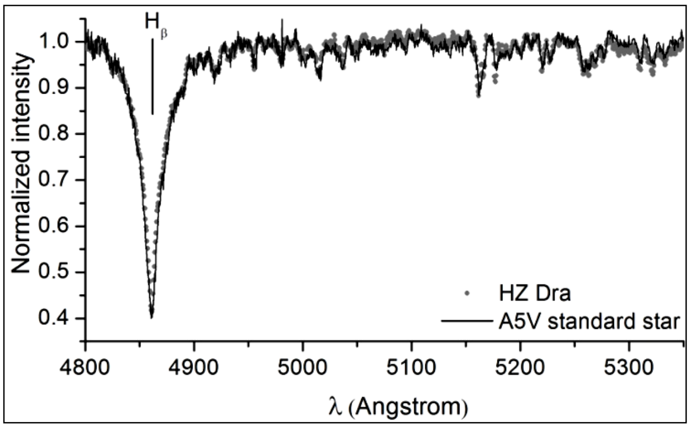
Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για κάθε φίλτρο παρατήρησης							
HZ Dra	Μεταβλητός	8.16[a]	B		V		R		I	
TYC 4449-1574-1	Σύγκρισης	8.52	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.
TYC 4449-1053-1	Ελέγχου	9.34[b]	1459	2.7	915	3.5	821	3.4	896	2.8

[a]Watson et al. (2006), [b]Høg et al. (2000)

Οι φασματοσκοπικές παρατηρήσεις έλαβαν χώρα στο Αστεροσκοπείο του Σκίνακα (βλ. §2.3.3) μεταξύ 20-24 Σεπτεμβρίου 2011 με σκοπό τον υπολογισμό των ακτινικών ταχυτήτων των αστέρων-μελών. Το φασματικό εύρος ήταν μεταξύ 4782 Å και 5864 Å. Οι μέθοδοι επεξεργασίας των φασμάτων και υπολογισμού των ακτινικών ταχυτήτων περιγράφεται στην παράγραφο 3.2.

Για τη φασματική ταξινόμηση συγκρίθηκε το κομμάτι του φάσματος μεταξύ 4800-5350 Å, όπου βρίσκονται η H_β και πλήθος μεταλλικών γραμμών με ικανοποιητικό S/N. Λόγω ανυπαρξίας ολικής έκλειψης στο σύστημα δεν ήταν δυνατόν να προσδιοριστούν ξεχωριστά οι φασματικοί τύποι των αστέρων-μελών. Επομένως προέκυψε ο σύνθετος φασματικός τύπος ως Α5 (για λεπτομέρειες της μεθόδου βλ. §3.2.2) βάσει του φάσματος το οποίο ελήφθη κατά τη γεωμετρική φάση ~0.75. Στην εικ. 7.47 παρουσιάζεται η σύγκριση του σύνθετου φάσματος του HZ Dra με το φάσμα του πρότυπου αστέρα, για το οποίο προέκυψε η μικρότερη τιμή των $\sum res^2$.

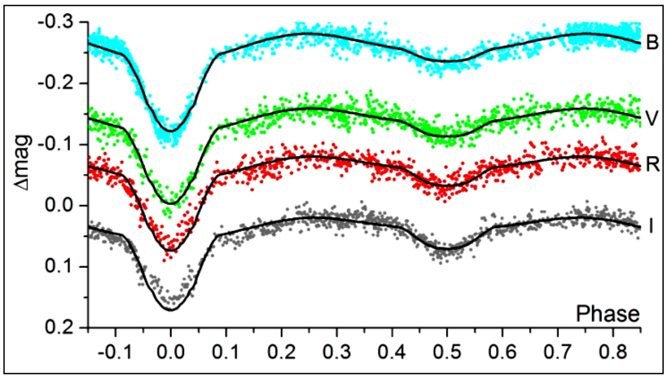
Για τη μέθοδο BF (βλ. §3.2.3) χρησιμοποιήθηκαν τα φάσματα των προτύπων αστέρων HIP 101867 (A0), HIP 111884 (A2), HIP 16599 (A3), HIP 116876 (A4), HIP 109521 (A5), HIP 111259 (A6) και HIP 102253 (A8) τα οποία ελήφθησαν ακριβώς με την ίδια μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για τα φάσματα του HZ Dra. Δυστυχώς, λόγω της κυριαρχίας του φωτός του πρωτεύοντα αστέρα στο φάσμα, δεν κατέστη δυνατόν να υπολογιστούν οι ακτινικές ταχύτητες του συνοδού. Οι ακτινικές ταχύτητες του πρωτεύοντα αστέρα δίνονται στον πίνακα Γ1 και η αντίστοιχη καμπύλη παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο.



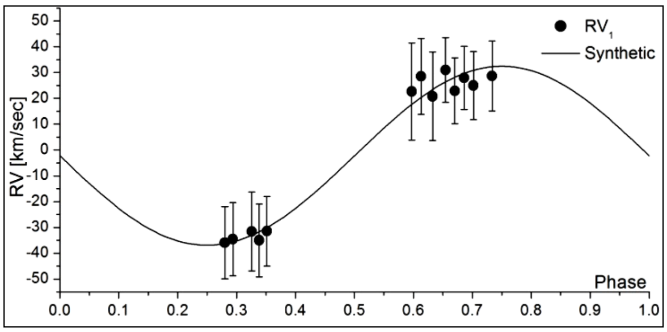
Εικόνα 7.47. Σύγκριση του σύνθετου φάσματος του συστήματος HZ Dra (γκρίζα σημεία) με το φάσμα του πρότυπου αστέρα HIP 109521 (μαύρη γραμμή) φασματικού τύπου A5.

Ανάλυση των καμπυλών φωτός και των καμπυλών ακτινικών ταχυτήτων

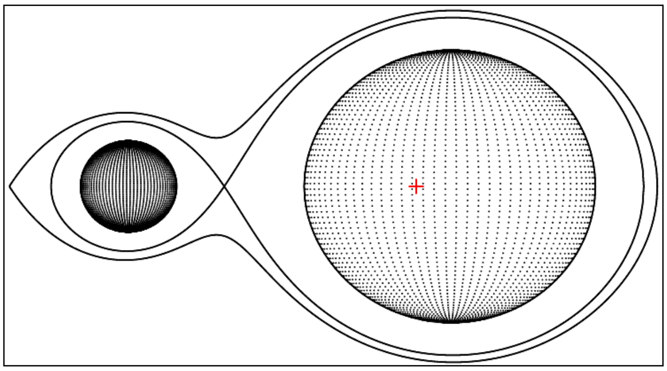
Οι καμπύλες φωτός και ακτινικών ταχυτήτων του πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν ταυτόχρονα για την εύρεση του καλύτερου μοντέλου περιγραφής του. Καθότι δεν επιτεύχθηκε ο καθορισμός του φασματικού τύπου των αστέρων, αλλά και επειδή στη βιβλιογραφία ο φασματικός τύπος αναφέρεται ως A0, δοκιμάστηκαν διάφορες τιμές για την T_1, αλλά στο εύρος τιμών που αντιστοιχεί στους φασματικούς τύπους A0 (βιβλιογραφία) και A5 (παρούσα φασματική ταξινόμηση), ήτοι 9800 K – 8200 K. Η καμπύλη ακτινικών ταχυτήτων περιόρισε το εύρος τιμών του q στη μέθοδο ανίχνευσης του (q-search - βλ. §4.1) στους “modes” 2 και 5. Το εύρος τιμών του q ήταν μεταξύ 0.1-0.2, ενώ η καλύτερη δυνατή λύση επιτεύχθηκε στον “mode” 2 (αποχωρισμένο σύστημα). Ως τελικό μοντέλο, αναφορικά με την αρχική T_1, παρουσιάζεται αυτό το οποίο παρήγαγε τη μικρότερη τιμή των $\sum res^2$ και οι παράμετροί του δίνονται στον πίνακα 7.38. Στην εικ. 7.48 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 7.49 η προσαρμογή ημιτονοειδούς καμπύλης επάνω στην καμπύλη ακτινικών ταχυτήτων και στην εικ. 7.50 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος.



Εικόνα 7.48. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες φωτός στα φίλτρα *B*, *V*, *R*, *I* του συστήματος HZ Dra.



Εικόνα 7.49. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες ακτινικών ταχυτήτων του πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος HZ Dra.



Εικόνα 7.50. Η γεωμετρία Roche του συστήματος HZ Dra στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό.

Πίνακας 7.38. Παράμετροι του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα HZ Dra.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή			
i [°]	72.0 (3)	K_1 [km/sec]	36 (1)			
q_{sp}	0.12 (4)	γ [km/sec]	−2 (1)			
T_1 [K]	9800[a]	α [$R_\odot$]	5.3 (1)			
T_2 [K]	5015 (68)	Φίλτρο:	B	V	R	I
Ω_1	2.48 (1)	x_1	0.491	0.418	0.353	0.281
Ω_2	2.28 (1)	x_2	0.862	0.721	0.622	0.523
A_1	1[a]	L_1/L_T	0.995 (1)	0.992 (1)	0.988 (1)	0.984 (1)
A_2	0.5[a]	L_2/L_T	0.005 (3)	0.008 (3)	0.012 (3)	0.016 (3)
g_1	1[a]					
g_2	0.32[a]	Σres^2	0.345			

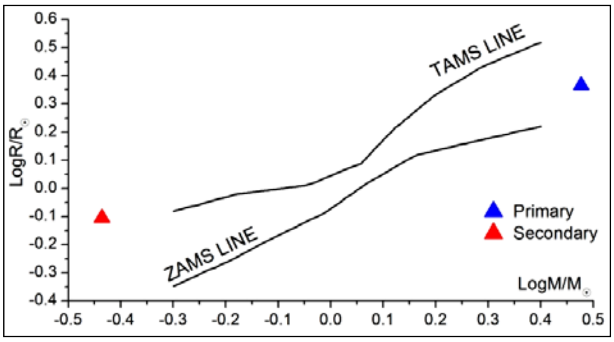
[a]σταθερή τιμή

Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Στον πίνακα 7.39 δίνονται οι απόλυτες παράμετροι των αστέρων-μελών και η εικ. 7.51 δείχνει τις θέσεις τους στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.

Πίνακας 7.39. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος HZ Dra.

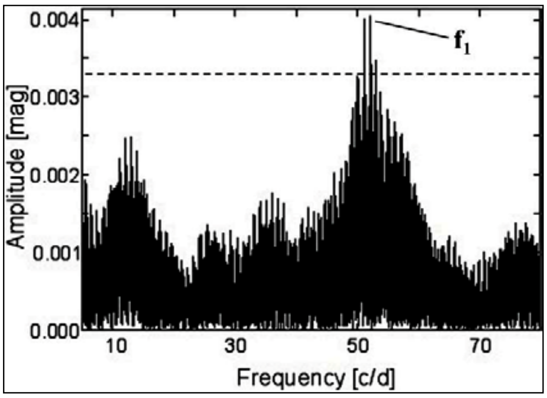
Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [$M_\odot$]	3.0 (3)	0.37 (8)	log*g* [cm/s^2]	4.2 (1)	4.2 (1)
R [$R_\odot$]	2.32 (8)	0.79 (3)	α [$R_\odot$]	0.58 (5)	4.7 (2)
L [$L_\odot$]	45 (3)	0.35 (2)	M_{bol} [mag]	0.63 (2)	5.9 (3)

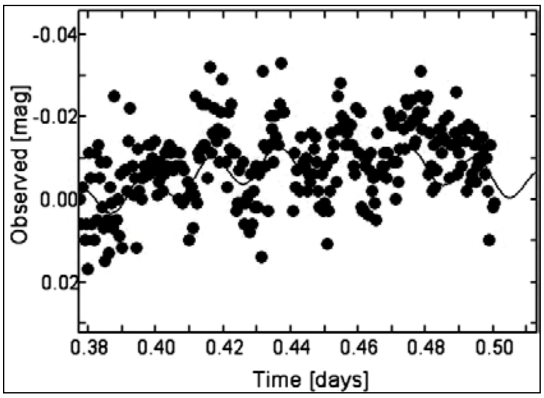


Εικόνα 7.51. Θέσεις των αστέρων του συστήματος HZ Dra (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

Εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης

Η μέθοδος για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης και η επεξήγηση των συμβόλων παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.3. Η ανάλυση αφορά μόνο τα δεδομένα του *B* φίλτρου, διότι στα υπόλοιπα φίλτρα, λόγω πολύ μικρού πλάτους των συχνοτήτων (εν συγκρίσει με τα υπόλοιπα συστήματα), δεν ήταν δυνατόν να εντοπιστούν συχνότητες ανάπαλσης. Τελικά, εντοπίστηκε μόνο μια συχνότητα ανάπαλσης, ενώ οι αριθμοί *l*, λόγω της χρήσης δεδομένων μόνο από ένα φίλτρο, δεν προσδιορίστηκαν. Στον πίνακα 7.40 δίνονται οι παράμετροι της ανάπαλσης, ενώ στην εικ. 7.52 παρουσιάζεται το φάσμα συχνοτήτων και η προσαρμογή της συνάρτησης Fourier σε τμήμα των παρατηρησιακών δεδομένων.





Εικόνα 7.52. Αριστερά: Φάσμα συχνοτήτων του παλλόμενου αστέρα του συστήματος HZ Dra, στο οποίο σημειώνεται η συχνότητα ανάπαλσης που εντοπίστηκε και το κατώτερο όριο (4σ) αξιόπιστων συχνοτήτων ανάπαλσης (διακεκομμένη γραμμή). Δεξιά: Προσαρμογή της καμπύλης Fourier στα φωτομετρικά σημεία της νύκτας με τη μεγαλύτερη διάρκεια παρατήρησης.

Πίνακας 7.40. Αποτελέσματα της ανάλυσης για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης του συστήματος HZ Dra στο *B* φίλτρο.

No.	f [c/d]	A [mmag]	Φ [°]	S/N
f_1	51.068 (2)	4.0 (4)	170 (6)	6.5

Συμπεράσματα

Το σύστημα HZ Dra είναι αποχωρισμένο με τον πρωτεύοντα αστέρα επάνω στην ΚΑ και πιο κοντά στη ZAMS (εικ. 7.51), ενώ ο δευτερεύων είναι στα όρια της TAMS. Λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των μαζών των μελών αλλά και τις εξελικτικές τους καταστάσεις, συμπεραίνεται ότι κατά το παρελθόν υπήρξε μεταφορά μάζας από τον δευτερεύοντα προς τον πρωτεύοντα αστέρα, αλλά αυτή τη στιγμή το σύστημα είναι σε φάση χαλάρωσης (Mkrtichian et al. 2003). Επομένως, το σύστημα πρέπει να εξελίσσεται σύμφωνα με την περίπτωση Α (βλ. §1.2.4). Το O−C διάγραμμα του συστήματος, λόγω της σχετικά πρόσφατης ανακάλυψής του, δεν είναι διαθέσιμο.

Ο πρωτεύων αστέρας είναι τύπου δ Sct και εντοπίστηκε μόλις μια συχνότητα ανάπαλσης, η οποία είχε σχετικά μικρό πλάτος, αλλά είναι σχετικά μεγάλη (~51 c/d). Σύμφωνα με τη μάζα και την εξελικτική κατάστασή του, και λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση μεταξύ συχνότητας ανάπαλσης και log*g* (Liakos et al. 2012b, επίσης βλ. §7.21.5) συμπεραίνεται ότι ο αστέρας έχει πρόσφατα εισχωρήσει στη φάση των αναπάλσεων.

7.10. Το σύστημα TZ Dra

Ιστορική αναδρομή

Δεν υπάρχει ακριβής αναφορά για την ανακάλυψη του συστήματος, αλλά υπάρχουν χρόνοι ελαχίστων από το 1906. Ο φασματικός του τύπος εκτιμήθηκε ως A7 από τον Herbig (1960) και οι απόλυτες παράμετροι των μελών του υπολογίστηκαν από τους Brancewicz & Dworak (1980) και τους Svechnikov & Kuznetsova (1990), αλλά κατάληξαν σε διαφορετικά αποτελέσματα. Οι Rovithis-Livaniou & Rovithis (1990) διαπίστωσαν ότι η τροχιακή περίοδος του συστήματος υφίσταται μεταβολές. Οι Rovithis-Livaniou et al. (2003) βρήκαν ότι στο σύστημα λαμβάνουν χώρα μικρές φωτομετρικές μεταβολές και λίγο αργότερα, οι Rovithis-Livaniou et al. (2005), Mkrtichian et al. (2005) και οι Mkrtichian et al. (2006) επιβεβαίωσαν την ύπαρξη αστέρα τύπου δ Sct με περίοδο ανάπαλσης ~28 min.

Οι Liakos & Niarchos (2012d) παρουσίασαν το φωτομετρικό μοντέλο του συστήματος και την ανάλυση του O−C διαγράμματός του, υπολόγισαν τις απόλυτες παραμέτρους των μελών του και προσδιόρισαν τις παραμέτρους των αναπάλσεων. Τα αποτελέσματα δίνονται παρακάτω.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι φωτομετρικές παρατηρήσεις του συστήματος έλαβαν χώρα στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1) με τη χρήση του τηλεσκοπίου των 40 cm και της CCD ST-8XMEI. Διήρκεσαν έξι νύκτες σε χρονικό εύρος 18 ημερών τον Ιούλιο του 2008 στα φίλτρα *B* και *V* και άλλες 11 στο διάστημα Απρίλιος-Ιούνιος 2007 στα φίλτρα *R* και *I*. Όμως, στην παρακάτω ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα δεδομένα του 2008 για το φωτομετρικό μοντέλο, καθώς στα δεδομένα του 2007 δεν εντοπίστηκαν συχνότητες ανάπαλσης, λόγω του ότι δεν συμπεριελήφθη το φίλτρο *B*. Επιπλέον, στα δεδομένα του 2007 υπήρχε εμφανής διαφορά μεταξύ των φωτομετρικών μεγίστων (O' Connell effect) κάτι που δυσχέραινε ιδιαίτερα την ταυτόχρονη επίλυση όλων των καμπυλών φωτός. Στον πίνακα 7.41 δίνονται: Οι αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία (βλ. §3.1.1) και τα φαινόμενα μεγέθη τους m_v στο φίλτρο *V*, ο αριθμός των σημείων *N* ανά φίλτρο παρατήρησης και το μέσο φωτομετρικό σφάλμα τους *s.d.* εκφρασμένο σε mmag.

Πίνακας 7.41. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους.

Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για κάθε φίλτρο παρατήρησης			
TZ Dra	Μεταβλητός	9.6[a]	B		V	
TYC 3529-0198-1	Σύγκρισης	9.51[b]	N	s.d.	N	s.d.
TYC 3529-0039-1	Ελέγχου	11.6[b]	2108	4.3	2107	3.5

[a]Watson et al. (2006), [b]Høg et al. (2000)

Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\mathrm{Min.\,I} = \mathrm{HJD}\ 2454214.51971 + 0.86603^{\mathrm{d}}\ \mathrm{E} \tag{7.15}$$

και υπολογίστηκε από τους χρόνους ελαχίστων (Πίνακας Β1), οι οποίοι προέκυψαν από τα δεδομένα μας και τους πιο πρόσφατους της βιβλιογραφίας.

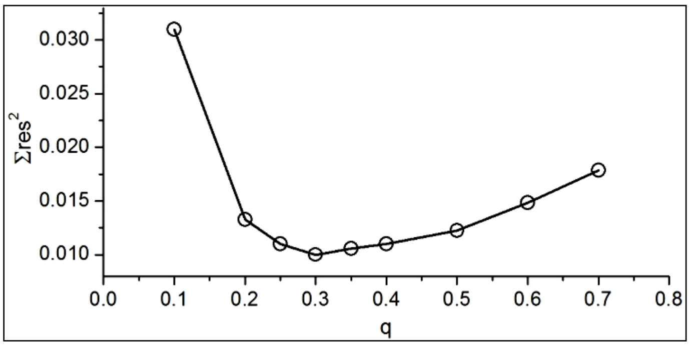
Ανάλυση των καμπυλών φωτός

Η θερμοκρασία του πρωτεύοντα αστέρα τέθηκε ίση με 7800 K, βάσει της φασματικής ταξινόμησης του Herbig (1960). Λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων (βλ. παρακάτω), η παράμετρος της φωτομετρικής συνεισφοράς από ένα πιθανό τρίτο μέλος στο σύστημα l_3 αφέθηκε ελεύθερη προς σύγκλιση, αλλά κατά την επίλυση η τιμή της προέκυπτε αρνητική, κάτι που δεν έχει φυσική σημασία, επομένως, δεν συμπεριλαμβάνεται στην τελική λύση. Λόγω ανυπαρξίας φασματοσκοπικού λόγου μαζών των αστέρων του συστήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ανίχνευσης του q (q-search - βλ. §4.1) στους “modes” 2 και 5, με τον “mode” 5 να δίνει την καλύτερη δυνατή λύση. Το αντίστοιχο διάγραμμα παρουσιάζεται στην εικ. 7.53. Στην εικ. 7.54 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 7.55 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος, ενώ στον πίνακα 7.42 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος.

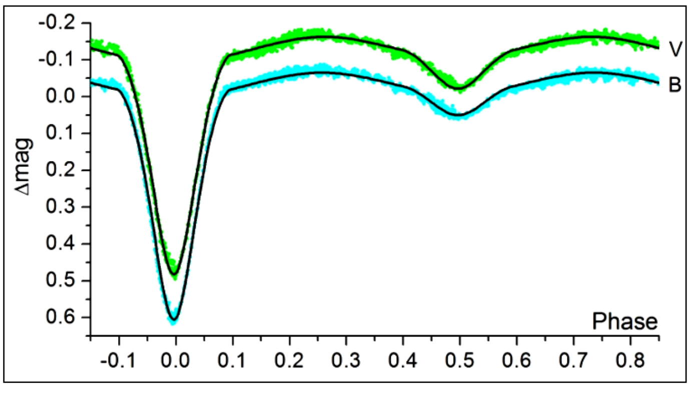
Πίνακας 7.42. Παράμετροι του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα TZ Dra.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή	
i [°]	77.6 (1)	A_1	1[a]	Φίλτρο:	B	V
q_{ph}	0.31(1)	A_2	0.5[a]	x_1	0.595	0.523
T_1 [K]	7800[a,b]	g_1	1[a]	x_2	0.850	0.707
T_2 [K]	5088 (55)	g_2	0.32[a]	L_1/L_T	0.924 (1)	0.889 (1)
Ω_1	3.46 (1)			L_2/L_T	0.076 (1)	0.111 (1)
Ω_2	2.49[a]	$\sum res^2$	0.254			

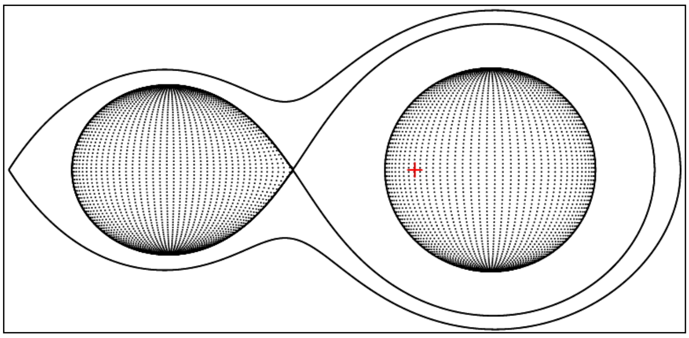
[a]σταθερή τιμή, [b]υπόθεση



Εικόνα 7.53. Διάγραμμα ανίχνευσης του q στον “mode” 5 για το σύστημα TZ Dra. Η τιμή του q που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή των $\sum res^2$ βρέθηκε ίση με 0.3.



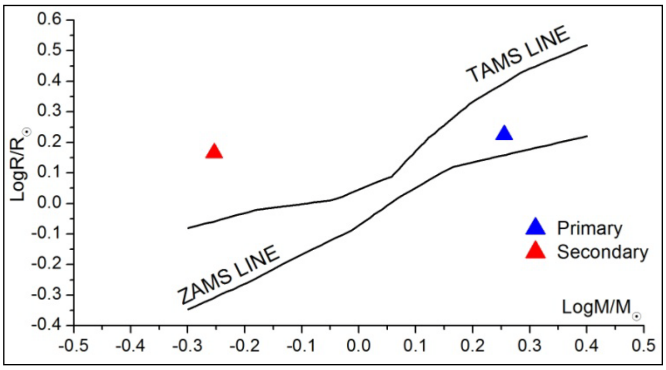
Εικόνα 7.54. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες φωτός στα φίλτρα *B* και *V* του συστήματος TZ Dra.



Εικόνα 7.55. Η γεωμετρία Roche του συστήματος TZ Dra στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό.

Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Η τιμή της μάζας M_1 του πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος υποτέθηκε από τον φασματικό του τύπο ως αστέρας της ΚΑ (βλ. Παρ. Ε) και δίνεται μαζί με τις τιμές των υπολοίπων παραμέτρων στον πίνακα 7.43. Η εικ. 7.56 δείχνει τις θέσεις των αστέρων στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.



Εικόνα 7.56. Θέσεις των αστέρων του συστήματος TZ Dra (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

Πίνακας 7.43. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος TZ Dra.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [M$_\odot$]	1.8[a]	0.6 (1)	log$g$ [cm/s^2]	4.2 (2)	3.9 (1)
R [R$_\odot$]	1.7 (1)	1.5 (1)	α [R$_\odot$]	1.2 (1)	4.0 (1)
L [L$_\odot$]	9.3 (6)	1.3 (1)	M_{bol} [mag]	2.3 (6)	4.5 (5)

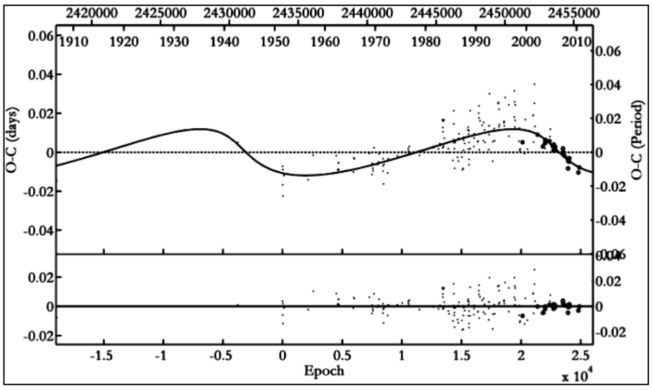
[a]υπόθεση

Ανάλυση των μεταβολών της τροχιακής περιόδου

Το O−C διάγραμμα του συστήματος περιέχει σε 171 χρόνους ελαχίστων, 120 εκ των οποίων προέκυψαν από οπτικές, 7 από φωτογραφικές, 18 από φωτοηλεκτρικές και 26 από CCD παρατηρήσεις και καλύπτουν χρονικό διάστημα ~110 ετών. Ως αρχική παράμετρος χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω αστρονομική εφημερίδα (Kreiner et al. 2001):

$$\text{Min. I} = \text{HJD } 2433852.3331 + 0.8660345^{\text{d}}\text{E} \qquad (7.16)$$

Λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων, θεωρητικά μπορεί τόσο ο μηχανισμός Applegate (1992) (βλ. §4.2.4), λόγω του φασματικού τύπου του δευτερεύοντα αστέρα, όσο και το LITE (βλ. §4.2.1) να περιγράψουν τις μεταβολές της τροχιακής περιόδου. Επομένως, μια περιοδική συνάρτηση LITE προσαρμόστηκε στα O−C σημεία (εικ. 7.57) και τα αποτελέσματα και για τους δύο μηχανισμούς δίνονται στον πίνακα 7.44.



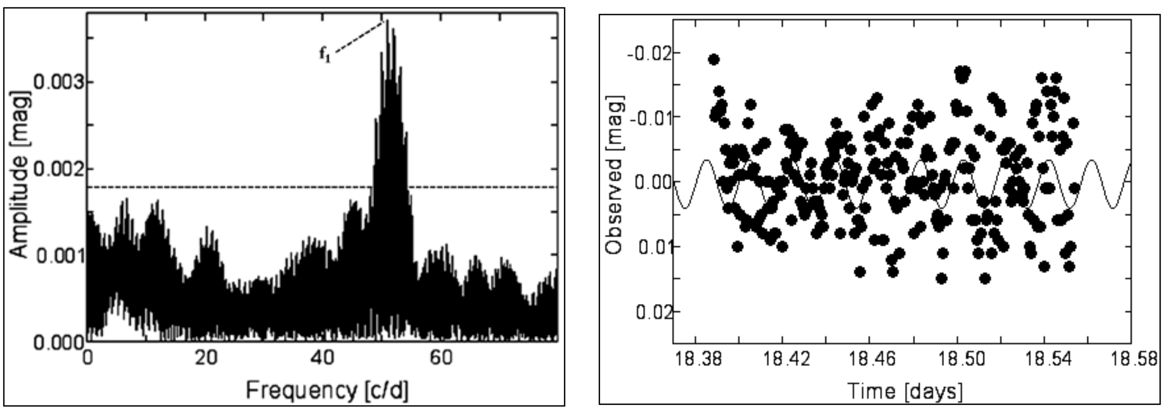
Εικόνα 7.57. Προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης του LITE στα O−C σημεία του συστήματος TZ Dra (επάνω) και τα υπόλοιπα (residuals) μετά την αφαίρεση της θεωρητικής καμπύλης (κάτω).

Πίνακας 7.44. Παράμετροι της O−C ανάλυσης του συστήματος TZ Dra.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
Εκλειπτικό σύστημα		$3^{ο}$ σώμα	
JD_0 [HJD−2400000]	33852.346 (2)	P_3 [yr]	62 (3)
P [d]	0.866033 (1)	e_3	0.5 (1)
Μεταβολή της τετραπολικής ροπής		ω_3 [°]	167 (10)
ΔQ [$\times 10^{50}$ g cm^2]	1.1	$f(m_3)$ [$M_\odot$]	0.0036 (1)
LITE		$M_{3,min}$ [$M_\odot$]	0.29 (1)
T_0 [HJD−2400000]	53466 (480)		
A [d]	0.012 (1)	Σres^2	0.010

Εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης

Η μέθοδος για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης και η επεξήγηση των συμβόλων παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.3. Εντοπίστηκε μόνο μια συχνότητα ανάπαλσης με S/N>4, αλλά σε όλα τα φίλτρα στα οποία έγιναν οι παρατηρήσεις. Στον πίνακα 7.45 δίνονται οι παράμετροι της ανάπαλσης, ενώ στην εικ. 7.58 παρουσιάζεται το φάσμα συχνοτήτων και η προσαρμογή της συνάρτησης Fourier σε τμήμα των παρατηρησιακών δεδομένων.



Εικόνα 7.58. Αριστερά: Φάσμα συχνοτήτων του παλλόμενου αστέρα του συστήματος TZ Dra, στο οποίο σημειώνεται η συχνότητα ανάπαλσης που εντοπίστηκε και το κατώτερο όριο (4σ) αξιόπιστων συχνοτήτων ανάπαλσης (διακεκομμένη γραμμή). Δεξιά: Προσαρμογή της καμπύλης Fourier στα φωτομετρικά σημεία της νύκτας με τη μεγαλύτερη διάρκεια παρατήρησης.

Πίνακας 7.45. Αποτελέσματα της ανάλυσης για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης του συστήματος TZ Dra.

No.	l	Φίλτρο	f [c/d]	A [mmag]	Φ [°]	S/N
f_1	1 ή 3	B	50.993 (2)	3.7 (2)	82 (4)	6.9
		V	50.995 (3)	2.8 (2)	70 (5)	7.0

Συμπεράσματα

Το σύστημα είναι ημιαποχωρισμένο με τον δευτερεύοντα αστέρα να γεμίζει τον λοβό Roche του, ενώ ο πρωτεύων αστέρας βρίσκεται επάνω στην ΚΑ και είναι τύπου δ Sct. Επομένως, σύμφωνα με αυτά τα στοιχεία το σύστημα μπορεί να θεωρηθεί τύπου oEA. Ο πρωτεύων αστέρας είναι σχετικά μικρής ηλικίας, καθώς είναι πολύ κοντά στη ZAMS (εικ. 7.56), ενώ ο δευτερεύων είναι εξελιγμένος και εντοπίζεται πέρα από την TAMS. Κρίνοντας από τις τιμές των μαζών και τις εξελικτικές καταστάσεις των αστέρων, κατά το παρελθόν πρέπει να υπήρξε μεταφορά μάζας από τον δευτερεύοντα προς τον πρωτεύοντα, και λόγω της μικρής ηλικίας του πρωτεύοντα, συμπεραίνεται ότι το σύστημα εξελίσσεται σύμφωνα με την περίπτωση Α (βλ. §1.2.4). Όπως και ο παλλόμενος αστέρας του συστήματος HZ Dra (βλ. §7.9), έτσι και σε αυτήν την περίπτωση, λόγω της μικρής ηλικίας του πρωτεύοντα και σύμφωνα με τη σχέση $\log P_{\mathrm{puls}}$-$\log g$ των Liakos et al. (2012b) (επίσης βλ. §7.21.5), συμπεραίνεται ότι ο αστέρας έχει εισέλθει σχετικά πρόσφατα στη φάση των αναπάλσεων. Τα τωρινά αποτελέσματα αναφορικά με τη συχνότητα ανάπαλσης είναι σε πολύ καλή συμφωνία με αυτά των Mkrtichian et al. (2005).

Από την O−C ανάλυση του συστήματος δεν προέκυψε κάποια μεταβολή της περιόδου, η οποία να σχετίζεται με την ύπαρξη πιθανής μεταφοράς μάζας. Είναι πολύ πιθανόν είτε να έχει σταματήσει είτε να έχει πολύ μικρό ρυθμό (slow mass accretion stage; Mkrtichian et al. 2003) ώστε να εντοπιστεί από τους διαθέσιμους χρόνους ελαχίστων. Οι περιοδικές μεταβολές της τροχιακής περιόδου μπορούν να ερμηνευτούν με το LITE, βάσει του οποίου προέκυψε η ύπαρξη τρίτου σώματος με ελάχιστη μάζα 0.32 $M_{\odot}$. Εάν αυτό το σώμα είναι αστέρας της ΚΑ, τότε η αναμενόμενη φωτομετρική συνεισφορά του είναι $L_{3,\mathrm{O-C}}$~0.1%, τιμή η οποία είναι πολύ μικρή για να εντοπιστεί φωτομετρικά ή/και φασματοσκοπικά. Αυτό το αποτέλεσμα έρχεται σε συμφωνία με την μη-εύρεση επιπρόσθετης φωτομετρικής συνεισφοράς στην ανάλυση των καμπυλών φωτός. Η ύπαρξη ενός τρίτου μέλους με αυτήν τη μάζα ικανοποιεί το κριτήριο της δυναμικής ευστάθειας του Harrington (1977). Ωστόσο, η μεταβολή της τετραπολικής ροπής του δευτερεύοντα αστέρα δύναται να προκαλέσει τις περιοδικές μεταβολές της περιόδου σύμφωνα με τον μηχανισμό Applegate (1992).

7.11. Το σύστημα TZ Eri

Ιστορική αναδρομή

Το σύστημα ανακαλύφθηκε ως μεταβλητός αστέρας από τον Hoffmeister (1929) και η πρώτη φασματική ταξινόμηση ως τύπου F έγινε από Cannon (1934). Οι Brancewicz & Dworak (1980) βάσει της μεθόδου των φωτομετρικών παραλλάξεων υπολόγισαν τις απόλυτες παραμέτρους των αστέρων-μελών και ταξινόμησαν εκ νέου το σύστημα ως τύπου F8. Οι Kaitchuck & Park (1988) και οι Yoon et al. (1994) ταξινόμησαν τον δευτερεύοντα αστέρα ως τύπου K0. Επιπλέον, οι Kaitchuck & Park (1988), βασιζόμενοι στις φασματικές γραμμές H_β και H_γ κατά τη διάρκεια των εκλείψεων, πρότειναν την ύπαρξη ενός δίσκου προσαύξησης γύρω από τον πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος. Οι Barblan et al. (1998) παρατήρησαν φωτομετρικά το σύστημα σε επτά φίλτρα και από τις φασματοσκοπικές τους παρατηρήσεις υπολόγισαν τις ακτινικές ταχύτητες των μελών, από τις οποίες προέκυψε ο φασματοσκοπικός λόγος μαζών. Οι ίδιοι ερευνητές ταξινόμησαν εκ νέου, βάσει των δεικτών $B-V$ εντός των εκλείψεων, τους αστέρες-μέλη ως A5-6V και K0/1III για τον πρωτεύοντα και τον δευτερεύοντα, αντίστοιχα. Επιπροσθέτως, έκαναν την ανάλυση του O−C διαγράμματος του συστήματος και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι υπάρχει μεταφορά μάζας από τον δευτερεύοντα προς τον πρωτεύοντα αστέρα. Οι Mkrtichian et al. (2005) ανέφεραν για πρώτη φορά ότι ο πρωτεύων αστέρας του συστήματος είναι τύπου δ Sct και βρήκαν την κυρίαρχη συχνότητα ανάπαλσης ~77 min. Οι Zasche et al. (2008) επανεξέτασαν τις τροχιακές μεταβολές της περιόδου και, εκτός της μεταφοράς μάζας, πρότειναν επιπλέον και την ύπαρξη ενός τρίτου σώματος γύρω από το εκλειπτικό σύστημα με ελάχιστη μάζα 1.3 $M_\odot$.

Οι Liakos et al. (2008), βάσει μακροπρόθεσμων φωτομετρικών παρατηρήσεων, παρουσίασαν το φωτομετρικό μοντέλο του συστήματος λαμβάνοντας υπόψη την πιθανή ύπαρξη τρίτου μέλους, υπολόγισαν εκ νέου τις απόλυτες παραμέτρους των αστέρων-μελών του και προσδιόρισαν με μεγάλη ακρίβεια τις παραμέτρους των αναπάλσεων του παλλόμενου αστέρα. Τα αποτελέσματα αναφέρονται τις επόμενες παραγράφους, όπου παρατίθεται και η επικαιροποιημένη ανάλυση του O−C διαγράμματος, η οποία συμπεριλαμβάνει και πιο πρόσφατους χρόνους ελαχίστων.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι φωτομετρικές παρατηρήσεις για την κάλυψη των καμπυλών φωτός του συστήματος διήρκεσαν 26 νύκτες μεταξύ Δεκεμβρίου 2007-Φεβρουαρίου 2008 και έλαβαν χώρα στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1) με τη χρήση του τηλεσκοπίου των 40 cm και της CCD ST-8XMEI. Στον πίνακα 7.46 δίνονται λεπτομέρειες που αφορούν τις φωτομετρικές παρατηρήσεις και την επεξεργασία των δεδομένων. Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\mathrm{Min.\,I} = \mathrm{HJD}\ 2454368.55806 + 2.60610^{\mathrm{d}}\ \mathrm{E} \tag{7.17}$$

και υπολογίστηκε από χρόνους ελαχίστων, οι οποίοι προέκυψαν από τα δεδομένα μας (Πίνακας B1) και τους πιο πρόσφατους από τη βιβλιογραφία.

Πίνακας 7.46. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους.

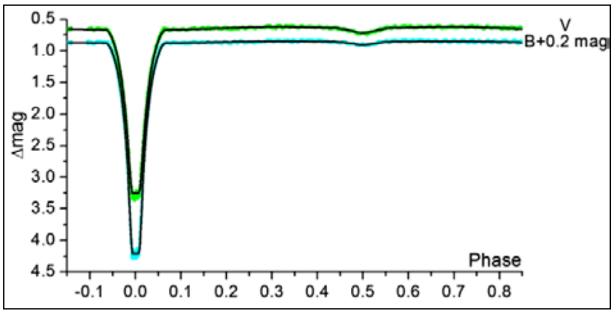
Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για κάθε φίλτρο παρατήρησης			
TZ Eri	Μεταβλητός	9.8[a]	B		V	
TYC 4733-951-1	Σύγκρισης	8.98[b]	N	s.d.	N	s.d.
TYC 4733-1292-1	Ελέγχου	12.52[b]	2988	2.8	3200	3.8

[a]Watson et al. (2006), [b]Høg et al. (2000)

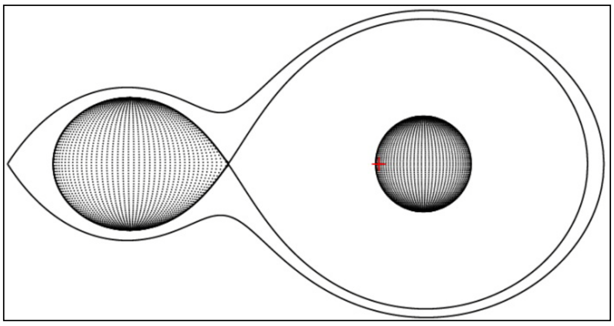
Ανάλυση των καμπυλών φωτός

Η φασματική ταξινόμηση των Barblan et al. (1998) βασίστηκε στους δείκτες χρώματος $B-V$ εντός των εκλείψεων. Σύμφωνα με τις καμπύλες φωτός του συστήματος, η πρωτεύουσα έκλειψη είναι ολική, ενώ η δευτερεύουσα μερική. Επομένως, θεωρήθηκε πιο αξιόπιστη η ταξινόμηση του δευτερεύοντος αστέρα, αφού κατά την πρωτεύουσα έκλειψη το φως προέρχεται μόνο από αυτόν. Η θερμοκρασία του δευτερεύοντα αστέρα τέθηκε ίση με 4562 K, ενώ η T_1 αφέθηκε ελεύθερη. Λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων (βλ. παρακάτω), η παράμετρος της φωτομετρικής συνεισφοράς από ένα πιθανό τρίτο μέλος στο σύστημα l_3 αφέθηκε ελεύθερη προς σύγκλιση. Ο φασματοσκοπικός λόγος μαζών του συστήματος (q_{sp}=0.19 (1); Barblan et al. 1998) χρησιμοποιήθηκε ως αρχική τιμή και μετά αφέθηκε ελεύθερος να συγκλίνει σε τιμές μέσα στο πλαίσιο του σφάλματός του.

Στις καμπύλες φωτός εντοπίστηκε μετατόπιση των μεγίστων από τις φάσεις 0.25 και 0.75 προς το δευτερεύον ελάχιστο, η οποία πιθανότατα προκαλείται από το φαινόμενο ανάκλασης στην επιφάνεια του δευτερεύοντα αστέρα λόγω μεγάλης διαφοράς θερμοκρασίας των αστέρων-μελών. Επομένως, ο συντελεστής ανάκλασης του δευτερεύοντα αστέρα A_2 χρησιμοποιήθηκε ως ελεύθερη παράμετρος.



Εικόνα 7.59. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες φωτός στα φίλτρα *B* και *V* του συστήματος TZ Eri.



Εικόνα 7.60. Η γεωμετρία Roche του συστήματος TZ Eri στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό.

Πίνακας 7.47. Παράμετροι του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα TZ Eri.

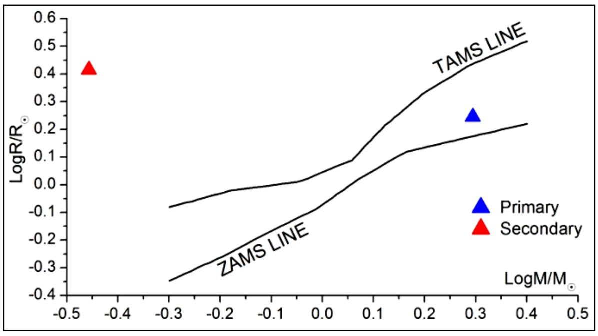
Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή	
i [°]	87.7 (1)	A_1	1[a]	Φίλτρο:	B	V
q_{ph}	0.18 (1)	A_2	1[a]	x_1	0.500	0.500
T_1 [K]	9307 (21)	g_1	1[a]	x_2	0.940	0.792
T_2 [K]	4562[a]	g_2	0.32[a]	L_1/L_T	0.941 (1)	0.890 (1)
Ω_1	6.32 (1)			L_2/L_T	0.053 (4)	0.099 (4)
Ω_2	2.18[a]			L_3/L_T	0.006 (4)	0.011 (4)
Σres^2	0.499			$<L_3/L_T>$ (%)	0.9 (3)	

[a]σταθερή τιμή

Η καλύτερη δυνατή λύση επιτεύχθηκε στον "mode" 5. Στην εικ. 7.59 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 7.60 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος, ενώ στον πίνακα 7.47 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος.

Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Στον πίνακα 7.48 δίνονται οι απόλυτες παράμετροι των αστέρων-μελών και η εικ. 7.61 δείχνει τις θέσεις τους στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.



Εικόνα 7.61. Θέσεις των αστέρων του συστήματος TZ Eri (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

Πίνακας 7.48. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος TZ Eri.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [M☉]	1.97 (6)	0.35 (2)	log$g$ [cm/s^2]	4.24 (1)	3.16 (3)
R [R☉]	1.76 (2)	2.60 (5)	α [R☉]	1.6 (1)	9.2 (1)
L [L☉]	20.9 (5)	2.6 (1)	M_{bol} [mag]	1.5 (2)	3.7 (3)

Ανάλυση των μεταβολών της τροχιακής περιόδου

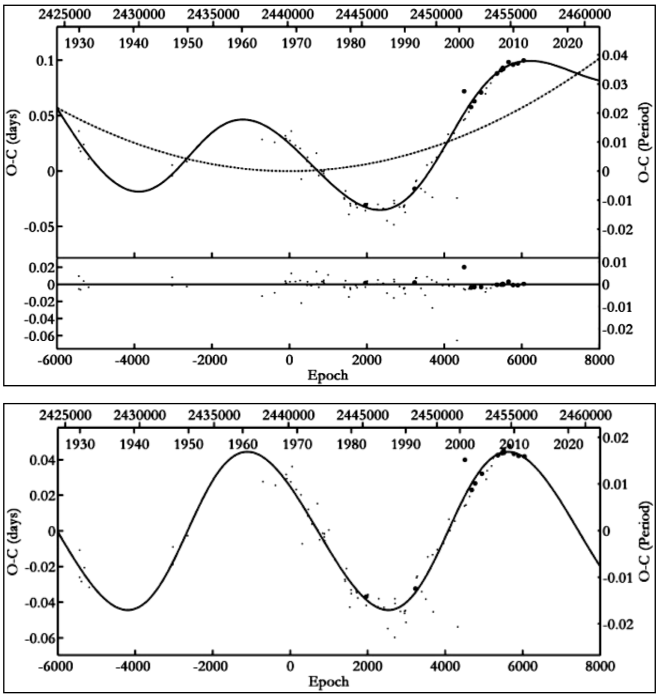
Το O−C διάγραμμα του TZ Eri περιέχει 93 χρόνους ελαχίστων, 75 εκ των οποίων προέκυψαν από οπτικές, 1 από φωτοηλεκτρικές και 17 από CCD παρατηρήσεις και καλύπτουν χρονικό εύρος από το 1930 έως και σήμερα. Ως αρχική παράμετρος χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω αστρονομική εφημερίδα (Kreiner et al. 2001):

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2442414.2693 + 2.6061010^{\mathrm{d}}\mathrm{E} \tag{7.18}$$

Πίνακας 7.49. Παράμετροι της O−C ανάλυσης του συστήματος TZ Eri.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
Εκλειπτικό σύστημα		3^o σώμα	
JD_0 [HJD−2400000]	40120.895 (5)	ω_3 [°]	0 (20)
P [d]	2.606104 (2)	P_3 [yr]	48.0 (7)
C_2 [$\times10^{-9}$ d/cycle]	1.59 (1)	e_3	0.13 (7)
$\dot{P}$ [$\times10^{-7}$ d/yr]	4.45 (1)	$f(m_3)$ [M☉]	0.202 (1)
$\dot{M}_{tr}$ [$\times10^{-8}$ M☉/yr]	2.42 (1)	$M_{3,min}$ [M☉]	1.42 (1)
LITE		Μεταβολή της τετραπολικής ροπής	
T_0 [HJD−2400000]	63806 (3000)	ΔQ [$\times10^{50}$ g cm^2]	6.9
A [d]	0.044 (2)	Σres^2	0.013

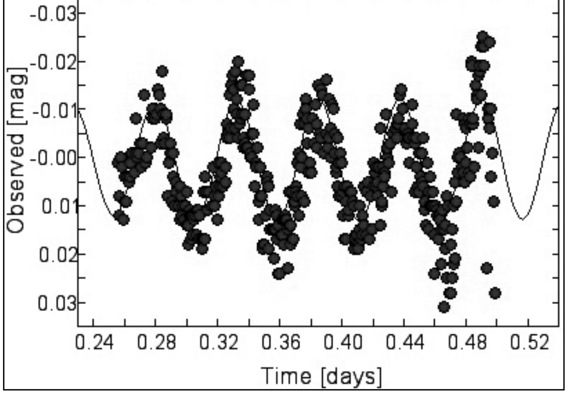
Αρχικά, ως συνάρτηση προσαρμογής δοκιμάστηκε η παραβολή, λόγω πιθανής μεταφοράς μάζας, και μια καμπύλη LITE, λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων. Εφόσον ο δευτερεύων αστέρας του συστήματος λόγω θερμοκρασίας δύναται να έχει περίβλημα μεταφοράς που θα μπορούσε να δημιουργήσει μεταβολές στην τετραπολική ροπή (βλ. §4.2.4), ελέγχθηκε η πιθανή ύπαρξη του μηχανισμού Applegate (1992). Η μέθοδος ανάλυσης και η επεξήγηση των συμβόλων αναφέρονται στην παράγραφο 4.2. Ο πίνακας 7.49 περιέχει τις τιμές των παραμέτρων των θεωρητικών καμπυλών, ενώ στην εικ. 7.62 παρουσιάζεται η προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης στα O−C σημεία.



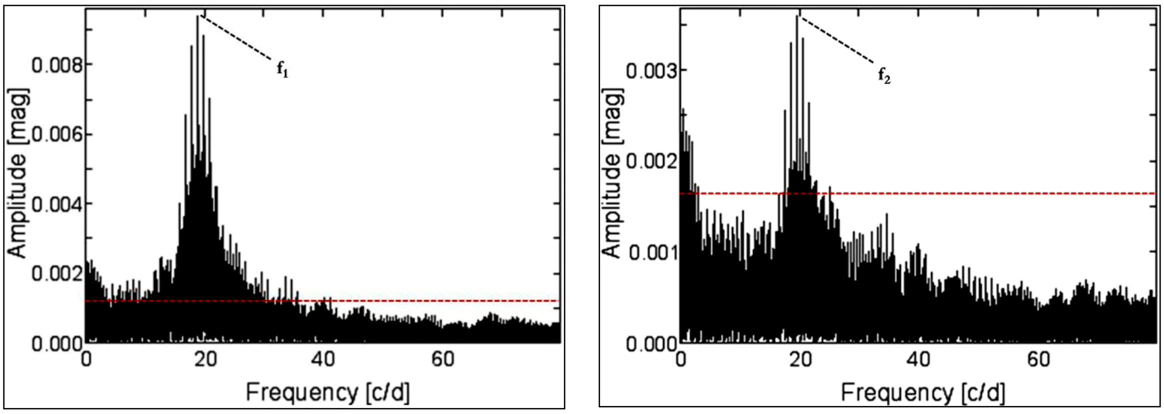
Εικόνα 7.62. Επάνω: Προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης LITE και μιας παραβολής (συνεχής γραμμή) στα O−C σημεία του συστήματος TZ Eri (επάνω) και τα υπόλοιπα (residuals) μετά την αφαίρεση της συνολικής συνάρτησης (κάτω). Η διακεκομμένη γραμμή αναφέρεται στην παραβολή. Κάτω: Προσαρμογή της καμπύλης LITE στα O−C υπόλοιπα έπειτα από την αφαίρεση της παραβολής.

Εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης

Η μέθοδος για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης και η επεξήγηση των συμβόλων παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.3. Εντοπίστηκαν δύο συχνότητες ανάπαλσης σε όλα τα φίλτρα στα οποία έγιναν οι παρατηρήσεις. Καθώς δεν υπάρχουν θεωρητικά μοντέλα (MAD-βλ. §4.3) για την τιμή της μάζας του πρωτεύοντα αστέρα, οι αριθμοί-*l* των αναπάλσεων υπολογίστηκαν βάσει του πλησιέστερου μοντέλου MAD που αντιστοιχούσε σε τιμή μάζας 2.1 $M_{\odot}$.



Εικόνα 7.62. Προσαρμογή της καμπύλης Fourier στα φωτομετρικά σημεία της νύκτας με τη μεγαλύτερη διάρκεια παρατήρησης.



Εικόνα 7.63. Φάσματα συχνοτήτων στο *B* φίλτρο του παλλόμενου αστέρα του συστήματος TZ Eri, στα οποία σημειώνονται οι συχνότητες ανάπαλσης που εντοπίστηκαν και το κατώτερο όριο (4σ) αξιόπιστων συχνοτήτων ανάπαλσης (διακεκομμένη γραμμή).

Στον πίνακα 7.50 δίνονται οι παράμετροι της ανάπαλσης, ενώ στις εικ. 7.62-7.63 παρουσιάζεται η προσαρμογή της συνάρτησης Fourier σε τμήμα των παρατηρησιακών δεδομένων και τα φάσματα συχνοτήτων, αντίστοιχα.

Πίνακας 7.50. Αποτελέσματα της ανάλυσης για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης του συστήματος TZ Eri.

No.	l	Φίλτρο	f [c/d]	A [mmag]	Φ [°]	S/N
f_1	3	B	18.7181 (2)	9.0 (2)	200 (1)	27.2
		V	18.7182 (2)	7.8 (2)	196 (1)	24.8
f_2	1 ή 2	B	19.6133 (4)	3.7 (2)	64 (3)	11.1
		V	19.6121 (5)	2.8 (2)	84 (3)	7.6

Συμπεράσματα

Ο πρωτεύων αστέρας του συστήματος βρίσκεται στην ΚΑ (εικ. 7.61) και συγκεκριμένα κοντά στη ZAMS, ενώ ο δευτερεύων είναι στο στάδιο των γιγάντων. Ο πρωτεύων αστέρας είναι τύπου δ Sct και καθώς εντοπίστηκε από την O−C ανάλυση ότι ο δευτερεύων είναι δότης μάζας, το σύστημα πληροί όλα τα κριτήρια των αστέρων τύπου oEA. Εντοπίστηκαν δύο συχνότητες ανάπαλσης για τον πρωτεύοντα, ενώ η τιμή της κυρίαρχης (~18.7 c/d) είναι σχετικά μικρή αναλογικά με την ηλικία του αστέρα (βλ. §7.21.5) και έρχεται σε απόλυτη συμφωνία με τα αποτελέσματα των Mkrtichian et al. (2005). Είναι πολύ πιθανό οι αναπάλσεις να έχουν επηρεαστεί έντονα από τη μεταφορά μάζας, κάτι όμως που απαιτεί μακροχρόνιες παρατηρήσεις ώστε να εντοπιστούν μεταβολές στο πλάτος των αναπάλσεων. Σύμφωνα με τις τιμές των μαζών και της εξελικτικής κατάστασης των αστέρων προκύπτει το συμπέρασμα ότι το σύστημα εξελίσσεται σύμφωνα με την περίπτωση Α (βλ. §1.2.4).

Ένα πολύ ενδιαφέρον σημείο της ανάλυσης αφορά την ύπαρξη ενός τρίτου σώματος γύρω από το εκλειπτικό σύστημα. Η τιμή της ελάχιστης μάζας προέκυψε ίση με 1.4 $M_{\odot}$, η οποία έρχεται σε πολύ καλή συμφωνία με τα αποτελέσματα των Zasche et al. (2008). Ένας αστέρας της ΚΑ με τέτοια μάζα θα έπρεπε να συνεισφέρει στην ολική φωτεινότητα ~13%, κάτι όμως που έρχεται σε μεγάλη αντίθεση με την παρατηρούμενη, η οποία προέκυψε <1% από την ανάλυση των καμπυλών φωτός. Επομένως, ένα σενάριο ερμηνείας είναι αυτό κατά το οποίο το τρίτο σώμα αποτελείται από περισσότερους από έναν αστέρες (π.χ. διπλό ή πολλαπλό σύστημα) συνολικής μάζας 1.4 $M_{\odot}$, αλλά λόγω μικρότερης θερμοκρασίας η φωτεινότητά τους υπερκαλύπτεται από τη φωτεινότητα του εκλειπτικού συστήματος. Το δεύτερο σενάριο στηρίζεται στην ηλικία του εκλειπτικού συστήματος, το οποίο περιέχει έναν γίγαντα αστέρα. Βάσει αυτού, ένας αστέρας ελάχιστης μάζας 1.4 $M_{\odot}$ έχει προλάβει να εξελιχθεί και έχει φτάσει στο στάδιο είτε του λευκού νάνου είτε του αστέρα νετρονίων (αν έχει λίγο μεγαλύτερη μάζα), επομένως η φωτομετρική απουσία του στο ορατό φάσμα είναι εύλογη. Μια εναλλακτική ερμηνεία για τις περιοδικές μεταβολές της περιόδου είναι και ο μηχανισμός Applegate (1992), ενώ η μεταβολή της τετραπολικής ροπής του δευτερεύοντα αστέρα βρέθηκε ότι δύναται να προκαλέσει αυτές τις μεταβολές. Μελλοντικές αστρομετρικές παρατηρήσεις φαίνεται ότι θα είναι ο τελικός «κριτής» για την ύπαρξη ενός τρίτου μέλους στο σύστημα.

7.12. Το σύστημα BO Her

Ιστορική αναδρομή

Το σύστημα ανακαλύφθηκε από τον Hoffmeister (1928b) και ο φασματικός του τύπος προσδιορίστηκε ως A7V από τον Halbedel (1984). Οι Brancewicz & Dworak (1980), ο Budding (1984) και οι Svechnikov & Kuznetsova (1990) υπολόγισαν τις απόλυτες παραμέτρους του συστήματος, αλλά κατέληξαν σε διαφορετικές τιμές. Η ανακάλυψη των αναπάλσεων στο σύστημα με περίοδο ~1.7871 hrs έγινε από τους Sumter & Beaky (2007).

Οι Liakos & Niarchos (2012d) βασιζόμενοι σε νέες και πλήρεις καμπύλες φωτός παρουσίασαν το φωτομετρικό μοντέλο του συστήματος και την ανάλυση του O−C διαγράμματός του, υπολόγισαν εκ νέου τις απόλυτες παραμέτρους των μελών του και εντόπισαν νέες συχνότητες ανάπαλσης. Τα αποτελέσματα δίνονται παρακάτω.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι φωτομετρικές παρατηρήσεις του συστήματος έγιναν στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1) με τη χρήση του τηλεσκοπίου των 40 cm και της CCD ST-10XME και διήρκεσαν 25 νύκτες σε χρονικό εύρος 39 ημερών μεταξύ των μηνών Μαΐου-Ιουλίου 2011. Στον πίνακα 7.51 δίνονται: Οι αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία (βλ. §3.1.1) και τα φαινόμενα μεγέθη τους m_V στο φίλτρο *V*, ο αριθμός των σημείων *N* ανά φίλτρο παρατήρησης και το μέσο φωτομετρικό σφάλμα τους *s.d.* εκφρασμένο σε mmag.

Πίνακας 7.51. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους.

Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για κάθε φίλτρο παρατήρησης					
BO Her	Μεταβλητός	10.7[a]	B		V		I	
TYC 2111-124-1	Σύγκρισης	11.3[b]	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.
TYC 2111-128-1	Ελέγχου	12.3[b]	1992	3.8	1920	3.5	1881	3.3

[a]Watson et al. (2006), [b]Høg et al. (2000)

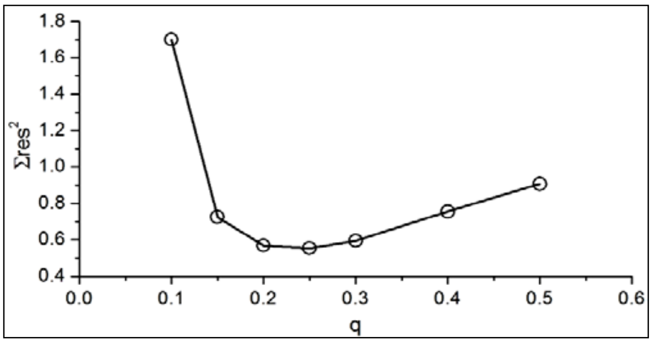
Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\mathrm{Min.\,I} = \mathrm{HJD}\ 2455711.48861 + 4.27281^{\mathrm{d}}\ \mathrm{E} \tag{7.19}$$

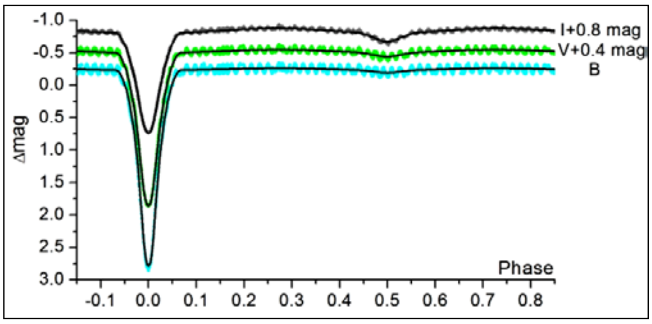
και υπολογίστηκε από τους χρόνους ελαχίστων (Πίνακας Β1), οι οποίοι προέκυψαν από τα δεδομένα μας και τους πιο πρόσφατους της βιβλιογραφίας.

Ανάλυση των καμπυλών φωτός

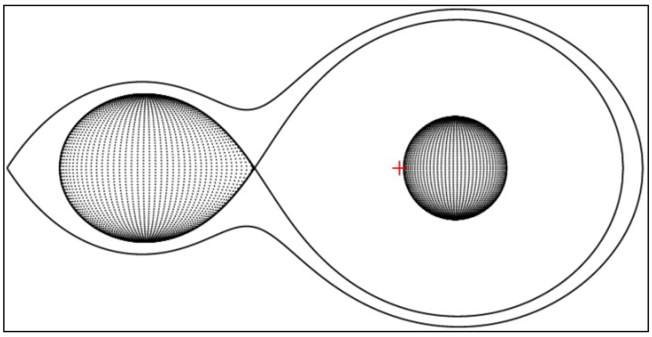
Η θερμοκρασία του πρωτεύοντα αστέρα τέθηκε ίση με 7800 K (Halbedel 1984). Λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων (βλ. παρακάτω), η παράμετρος της φωτομετρικής συνεισφοράς από ένα πιθανό τρίτο μέλος στο σύστημα l_3 αφέθηκε ελεύθερη προς σύγκλιση, όμως, καθώς προέκυπτε πάντα αρνητική, παραλείφθηκε στην τελική λύση. Λόγω ανυπαρξίας φασματοσκοπικού λόγου μαζών των αστέρων του συστήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ανίχνευσης του q (q-search - βλ. §4.1) στους "modes" 2 και 5, με τον "mode" 5 να δίνει την καλύτερη δυνατή λύση. Το αντίστοιχο διάγραμμα παρουσιάζεται στην εικ. 7.64. Στην εικ. 7.65 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 7.66 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος, ενώ στον πίνακα 7.52 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος.



Εικόνα 7.64. Διάγραμμα ανίχνευσης του q στον "mode" 5 για το σύστημα BO Her. Η τιμή του q που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή των $\sum \mathrm{res}^2$ βρέθηκε ίση με 0.25.



Εικόνα 7.65. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες φωτός στα φίλτρα B, V, I του συστήματος BO Her.



Εικόνα 7.66. Η γεωμετρία Roche του συστήματος BO Her στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό.

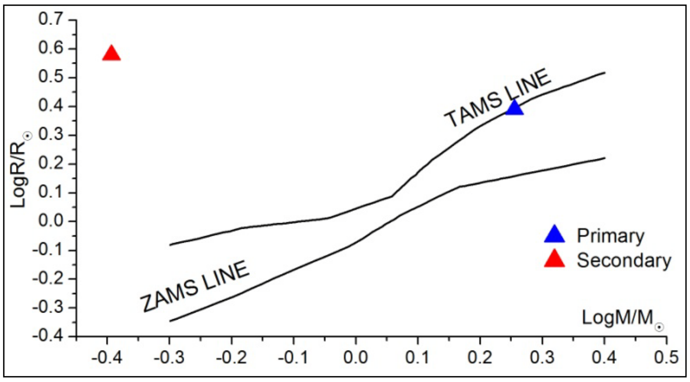
Πίνακας 7.52. Παράμετροι (Παρ.) του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα BO Her.

Παρ.	Τιμή	Παρ.	Τιμή	Παρ.	Τιμή		
i [°]	85.4 (4)	A_1	1[a]	Φίλτρο:	B	V	I
q_{ph}	0.22 (1)	A_2	0.5[a]	x_1	0.609	0.529	0.361
T_1 [K]	7800[a]	g_1	1[a]	x_2	0.990	0.835	0.581
T_2 [K]	4344 (68)	g_2	0.32[a]	L_1/L_T	0.923 (6)	0.866 (5)	0.730 (3)
Ω_1	6.24 (1)			L_2/L_T	0.077 (1)	0.134 (1)	0.270 (1)
Ω_2	2.29[a]	Σres^2	8.810				

[a]σταθερή τιμή

Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Η τιμή της μάζας M_1 του πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος υποτέθηκε από τον φασματικό του τύπο ως αστέρας της ΚΑ (βλ. Παρ. Ε) και δίνεται μαζί με τις τιμές των υπολοίπων παραμέτρων στον πίνακα 7.53. Η εικ. 7.67 δείχνει τις θέσεις των αστέρων στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.



Εικόνα 7.67. Θέσεις των αστέρων του συστήματος BO Her (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

Πίνακας 7.53. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος BO Her.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [M☉]	1.8[a]	0.4 (1)	log$g$ [cm/s^2]	3.9 (1)	2.9 (1)
R [R☉]	2.5 (1)	3.8 (1)	α [R☉]	2.7 (1)	12.1 (5)
L [L☉]	20 (1)	4.6 (4)	M_{bol} [mag]	1.5 (1)	3.1 (2)

[a]υπόθεση

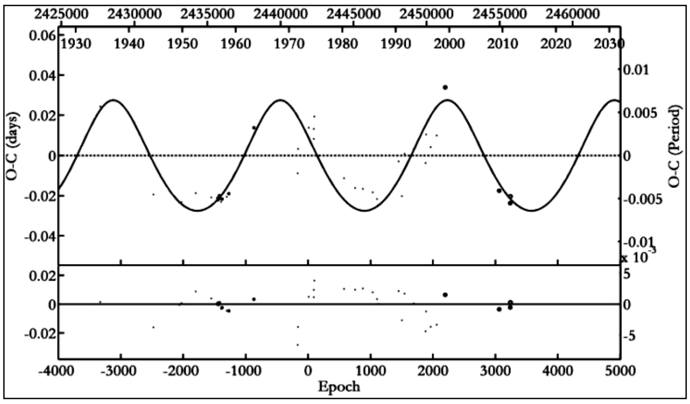
Ανάλυση των μεταβολών της τροχιακής περιόδου

Το O−C διάγραμμα του συστήματος περιέχει σε 40 χρόνους ελαχίστων, 29 εκ των οποίων προέκυψαν από οπτικές, 7 από φωτογραφικές και 4 από CCD παρατηρήσεις και καλύπτουν χρονικό διάστημα από το 1933 έως και σήμερα. Ως αρχική παράμετρος χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω αστρονομική εφημερίδα (Kreiner et al. 2001):

$$\mathrm{Min.\,I} = \mathrm{HJD}\ 2434193.507 + 4.2728353^{\mathrm{d}}\mathrm{E} \quad (7.20)$$

Λόγω της πιθανής μεταφοράς μάζας από τον δευτερεύοντα προς τον πρωτεύοντα αστέρα, επιλέχθηκε για προσαρμογή μια κυρτή παραβολή, όμως η τιμή του συντελεστή του παραβολικού όρου προέκυπτε πολύ μικρή και τελικά εξαιρέθηκε από την τελική λύση.

Λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων, θεωρητικά μπορεί τόσο ο μηχανισμός Applegate (1992) (βλ. §4.2.4), λόγω του φασματικού τύπου του δευτερεύοντα αστέρα, όσο και το LITE (βλ. §4.2.1) να περιγράψουν τις μεταβολές της τροχιακής περιόδου. Επομένως, μια περιοδική συνάρτηση LITE προσαρμόστηκε στα O−C σημεία (εικ. 7.68) και τα αποτελέσματα και για τους δύο μηχανισμούς δίνονται στον πίνακα 7.54.



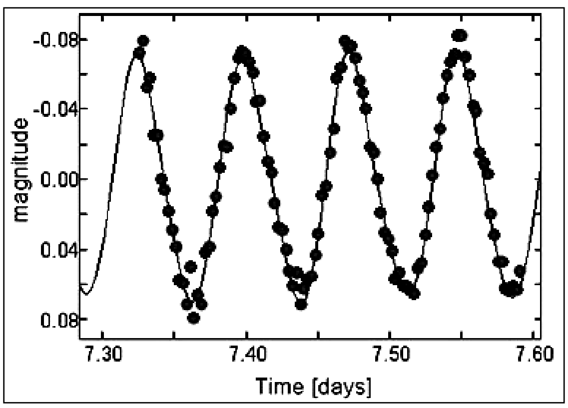
Εικόνα 7.68. Προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης του LITE στα O−C σημεία του συστήματος BO Her (επάνω) και τα υπόλοιπα (residuals) μετά την αφαίρεση της θεωρητικής καμπύλης (κάτω).

Πίνακας 7.54. Παράμετροι της O−C ανάλυσης του συστήματος BO Her.

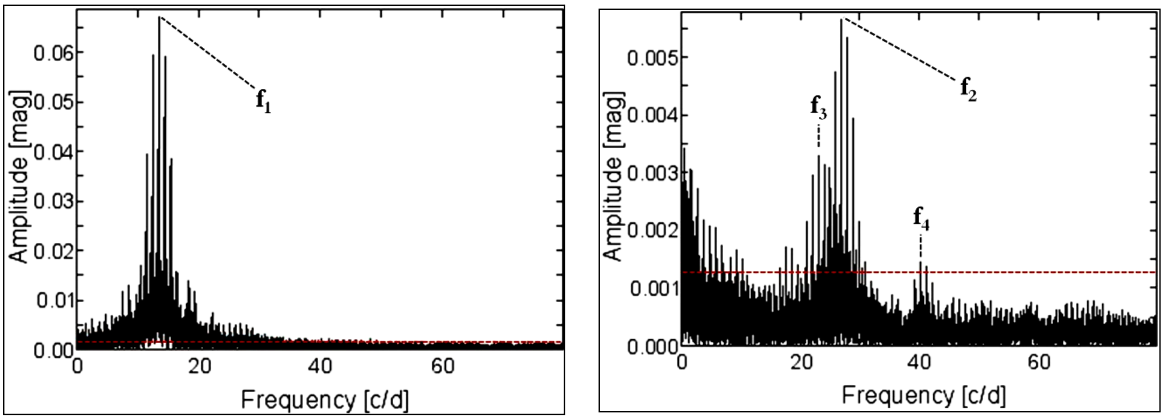
Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
Εκλειπτικό σύστημα		$3^{ο}$ σώμα	
JD_0 [HJD−2400000]	41884.620 (2)	P_3 [yr]	31.3 (7)
P [d]	4.272834 (2)	e_3	0.2 (1)
Μεταβολή της τετραπολικής ροπής		ω_3 [°]	76 (40)
ΔQ [$\times 10^{50}$ g cm^2]	14	$f(m_3)$ [$M_\odot$]	0.111 (1)
LITE		$M_{3,min}$ [$M_\odot$]	1.06 (1)
T_0 [HJD−2400000]	51000 (1247)		
A [d]	0.028 (2)	Σres^2	0.004

Εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης

Η μέθοδος για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης και η επεξήγηση των συμβόλων παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.3. Εντοπίστηκαν δύο συχνότητες ανάπαλσης και δύο αρμονικές της κυρίαρχης στα φίλτρα *B* και *V*, ενώ το φίλτρο *I* βρέθηκε μόνο η κυρίαρχη και η πρώτη αρμονική της.



Εικόνα 7.69. Προσαρμογή της καμπύλης Fourier στα φωτομετρικά σημεία της νύκτας με τη μεγαλύτερη διάρκεια παρατήρησης.



Εικόνα 7.70. Φάσματα συχνοτήτων στο *B* φίλτρο του παλλόμενου αστέρα του συστήματος BO Her, στα οποία σημειώνονται οι συχνότητες ανάπαλσης που εντοπίστηκαν και το κατώτερο όριο (4σ) αξιόπιστων συχνοτήτων ανάπαλσης (διακεκομμένη γραμμή).

Πίνακας 7.55. Αποτελέσματα της ανάλυσης για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης του συστήματος BO Her.

No.	l	Φίλτρο	f [c/d]	A [mmag]	Φ [°]	S/N
f_1	3	B	13.430 (1)	68.0 (3)	137 (1)	173.8
		V	13.429 (1)	50.8 (3)	138 (1)	58.8
		I	13.429 (1)	25.6 (3)	137 (1)	39.8
$f_2=2f_1$		B	26.860 (1)	5.6 (3)	65 (3)	12.5
		V	26.860 (1)	4.5 (3)	77 (4)	10.4
		I	26.859 (2)	2.4 (3)	77 (8)	6.4
f_3	0 ή 1	B	23.057 (1)	3.2 (3)	227 (5)	9.0
		V	23.058 (2)	2.2 (3)	228 (7)	5.0
$f_4=3f_1$		B	40.293 (3)	1.3 (3)	231 (11)	5.5
		V	40.296 (4)	1.1 (3)	176 (15)	4.0

Στον πίνακα 7.55 δίνονται οι παράμετροι της ανάπαλσης, ενώ στις εικ. 7.69-7.70 παρουσιάζεται η προσαρμογή της συνάρτησης Fourier σε τμήμα των παρατηρησιακών δεδομένων και τα φάσματα συχνοτήτων και αντίστοιχα.

Συμπεράσματα

Ο πρωτεύων αστέρας του συστήματος είναι τύπου δ Sct και εντοπίστηκαν δύο συχνότητες ανάπαλσης, με την κυρίαρχη ίση με ~13.43 c/d. Αυτή η τιμή έρχεται σε πολύ καλή συμφωνία με τα αποτελέσματα των Sumter & Beaky (2007). Ο πρωτεύων βρίσκεται στα όρια της TAMS (εικ. 7.67) και, λαμβάνοντας υπόψη τη χαμηλή τιμή της κυρίαρχης συχνότητας, συμπεραίνεται ότι βρίσκεται προς το τέλος της φάσης των αναπάλσεων τύπου δ Sct (Liakos et al. 2012b, επίσης βλ. §7.21.5). Ο δευτερεύων αστέρας είναι στο στάδιο των γιγάντων και γεμίζει τον λοβό Roche του. Επομένως, το σύστημα μπορεί να θεωρηθεί τύπου oEA. Από την O−C ανάλυση δεν προέκυψε μεταβολή της περιόδου, η οποία να μπορεί να συσχετιστεί με μεταφορά μάζας, όμως σύμφωνα με τις μάζες και την εξελικτική κατάσταση των αστέρων σίγουρα είχε συμβεί στο παρελθόν με κατεύθυνση από τον δευτερεύοντα προς τον πρωτεύοντα. Η μεταφορά μάζας είτε έχει σταματήσει είτε έχει πολύ μικρό ρυθμό για να εντοπιστεί (slow mass accretion stage; Mkrtichian et al. 2003). Το πιθανότερο σενάριο εξέλιξης του συστήματος είναι η περίπτωση Β (§1.2.4).

Από την O−C ανάλυση προέκυψε όμως περιοδική μεταβολή της τροχιακής περιόδου η οποία μπορεί να ερμηνευτεί μόνο σύμφωνα με το LITE, καθώς, για τη συγκεκριμένη περίπτωση, ο μηχανισμός Applegate (1992) είναι ανεπαρκής. Σύμφωνα με το LITE, ένα τρίτο μέλος με ελάχιστη μάζα ~1.1 $M_{\odot}$ δύναται να περιφέρεται γύρω από το εκλειπτικό σύστημα. Όμως, εάν αυτός ο αστέρας ανήκει στην ΚΑ, τότε θα έπρεπε να συνεισφέρει στη συνολική φωτεινότητα συστήματος ~4.7%, κάτι όμως που δεν επιβεβαιώθηκε από την ανάλυση των καμπυλών φωτός. Επομένως, το τρίτο σώμα είτε είναι πολλαπλό σύστημα αστέρων μικρότερης θερμοκρασίας, οπότε το φως του υπερκαλύπτεται από αυτό του εκλειπτικού συστήματος, είτε είναι πολύ πιο εξελιγμένος αστέρας (π.χ. λευκός νάνος ή αστέρας νετρονίων) και δεν συνεισφέρει σχεδόν καθόλου στο μέρος του Η/Μ φάσματος στο οποίο έγιναν οι παρατηρήσεις. Ωστόσο, ένα τέτοιο πολλαπλό σύστημα, σύμφωνα με το κριτήριο του Harrington (1977) δεν είναι ευσταθές. Μελλοντικές φασματοσκοπικές ή/και αστρομετρικές παρατηρήσεις είναι πιθανόν να αναδείξουν εάν το εκλειπτικό σύστημα κινείται γύρω από κάποιο άλλο κέντρο μάζας κάτι που θα σημαίνει την ύπαρξη επιπλέον μελών.

7.13. Το σύστημα AU Lac

Ιστορική αναδρομή

Το σύστημα ανακαλύφθηκε από τον Hoffmeister (1928a). Η πρώτη καμπύλη φωτός, βασισμένη σε οπτικές παρατηρήσεις, δημοσιεύτηκε από τον Szafraniec (1971) και η πρώτη ακριβής εφημερίδα υπολογίστηκε από τον Mallama (1980b). Η μόνη πληροφορία για τον φασματικό τύπο του συστήματος δίνεται από τους Budding et al. (2004) ως Α5.

Οι Liakos et al. (2012b), βάσει νέων παρατηρήσεων, ανέδειξαν την ύπαρξη αναπάλσεων του πρωτεύοντα αστέρα, ανέλυσαν τις καμπύλες φωτός και υπολόγισαν τα απόλυτα στοιχεία των αστέρων-μελών του συστήματος. Τα αποτελέσματα δίνονται στις αμέσως επόμενες παραγράφους.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι φωτομετρικές παρατηρήσεις μεγάλης φωτομετρικής ακρίβειας στο *B* φίλτρο του συστήματος πραγματοποιήθηκαν στο αστεροσκοπείο Κρυονερίου (βλ. §2.3.2) και διήρκεσαν οκτώ νύκτες σε χρονικό εύρος 104 ημερών στο χρονικό διάστημα Ιούλιος-Νοέμβριος 2010. Στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1), με τη χρήση του τηλεσκοπίου των 40 cm και της CCD ST-10XME, έγιναν πρόσθετες παρατηρήσεις σε όλα τα διαθέσιμα φωτομετρικά φίλτρα προκειμένου να γίνει ακριβέστερη ανάλυση των καμπυλών φωτός. Αυτές οι παρατηρήσεις διήρκεσαν 11 νύκτες σε χρονικό εύρος 20 ημερών μεταξύ των μηνών Αυγούστου-Σεπτεμβρίου 2010. Στον πίνακα 7.56 δίνονται: Οι αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία (βλ. §3.1.1) και τα φαινόμενα μεγέθη τους m_V στο φίλτρο *V*, ο αριθμός των σημείων *N* ανά φίλτρο παρατήρησης και το μέσο φωτομετρικό σφάλμα τους *s.d.* εκφρασμένο σε mmag. Η συντομογραφία "Kry" αναφέρεται στις παρατηρήσεις από το αστεροσκοπείο Κρυονερίου. Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2455406.4665 + 1.39259^{\mathrm{d}}\ \mathrm{E} \qquad (7.21)$$

και υπολογίστηκε από τους χρόνους ελαχίστων (Πίνακας Β1), οι οποίοι προέκυψαν από τα δεδομένα μας και τους πιο πρόσφατους της βιβλιογραφίας.

Πίνακας 7.56. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους.

Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για κάθε φίλτρο παρατήρησης					
AU Lac	Μεταβλητός	12.0[a]	B-Kry		B		V	
TYC 3610-231-1	Σύγκρισης	11.07[b]	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.
TYC 3913-901-1	Ελέγχου	11.66[b]	2667	2.0	567	6.8	542	7.4
			R		I			
			543	8.0	563	7.3		

[a]Watson et al. (2006), [b]Høg et al. (2000)

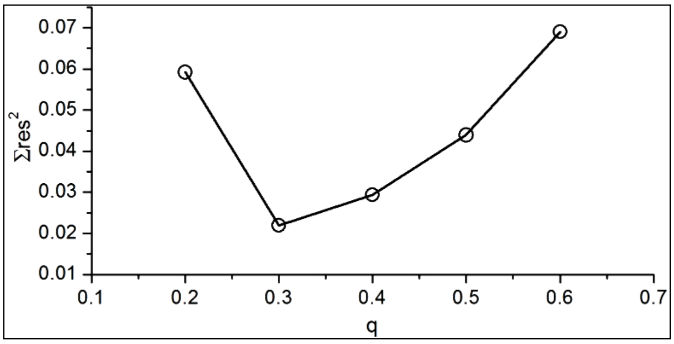
Ανάλυση των καμπυλών φωτός

Η θερμοκρασία του πρωτεύοντα αστέρα τέθηκε ίση με 8200 K (Budding et al. 2004). Λόγω ανυπαρξίας φασματοσκοπικού λόγου μαζών των αστέρων του συστήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ανίχνευσης του q (q-search - βλ. §4.1) στους "modes" 2 και 5, αλλά στον "mode" 5 επιτεύχθηκε η καλύτερη λύση. Το αντίστοιχο διάγραμμα παρουσιάζεται στην εικ. 7.71. Στην εικ. 7.72 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 7.73 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος, ενώ στον πίνακα 7.57 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος.

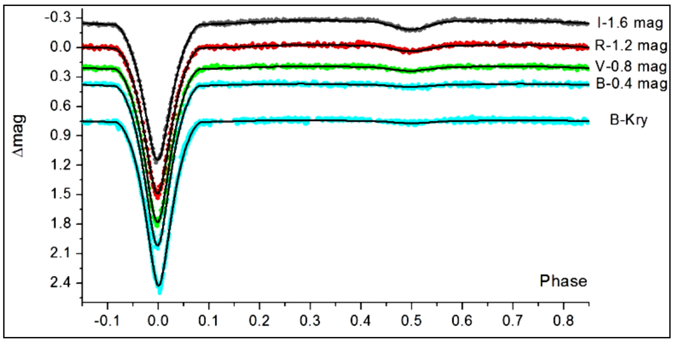
Πίνακας 7.57. Παράμετροι (Παρ.) του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα AU Lac.

Παρ.	Τιμή	Παρ.	Τιμή	Παρ.	Τιμή			
i [°]	83 (1)	A_1	1[a]	Φίλτρο:	B	V	R	I
q_{ph}	0.30 (1)	A_2	0.5[a]	x_1	0.540	0.474	0.402	0.327
T_1 [K]	8200[a,b]	g_1	1[a]	x_2	0.831	0.747	0.691	0.564
T_2 [K]	3784 (15)	g_2	0.32[a]	L_1/L_T	0.987 (1)	0.969 (1)	0.948 (2)	0.916 (2)
Ω_1	4.51 (2)			L_2/L_T	0.013 (1)	0.031 (1)	0.052 (2)	0.084 (2)
Ω_2	2.46[a]			Σres^2	0.200			

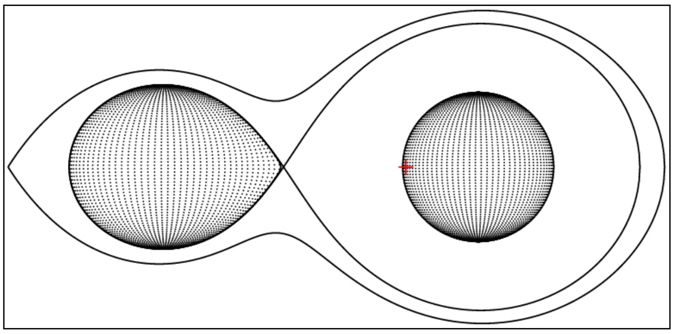
[a]σταθερή τιμή, [b]υπόθεση



Εικόνα 7.71. Διάγραμμα ανίχνευσης του q στον "mode" 5 για το σύστημα AU Lac. Η τιμή του q που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή των $\sum res^2$ βρέθηκε ίση με 0.3.



Εικόνα 7.72. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες φωτός στα φίλτρα *B*, *V*, *R*, *I* του συστήματος AU Lac.



Εικόνα 7.73. Η γεωμετρία Roche του συστήματος AU Lac στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό.

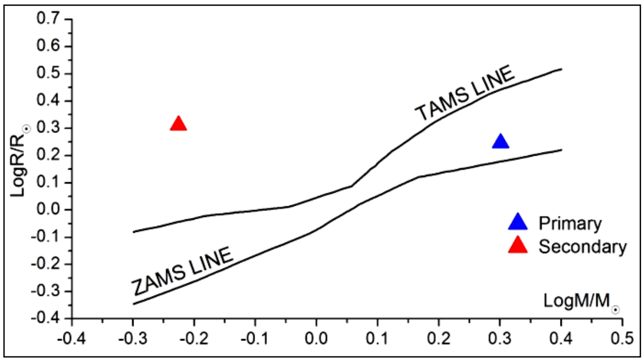
Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Η τιμή της μάζας M_1 του πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος υποτέθηκε από τον φασματικό του τύπο ως αστέρας της ΚΑ (βλ. Παρ. Ε) και δίνεται μαζί με τις τιμές των υπολοίπων παραμέτρων στον πίνακα 7.58. Η εικ. 7.74 δείχνει τις θέσεις των αστέρων στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.

Πίνακας 7.58. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος AU Lac.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [$M_\odot$]	2.0[a]	0.60 (1)	log$g$ [cm/s^2]	4.25 (2)	3.59 (1)
R [$R_\odot$]	1.8 (1)	2.1 (1)	α [$R_\odot$]	1.7 (2)	5.7 (1)
L [$L_\odot$]	12.6 (7)	0.8 (1)	M_{bol} [mag]	2.0 (6)	5.0 (7)

[a]υπόθεση

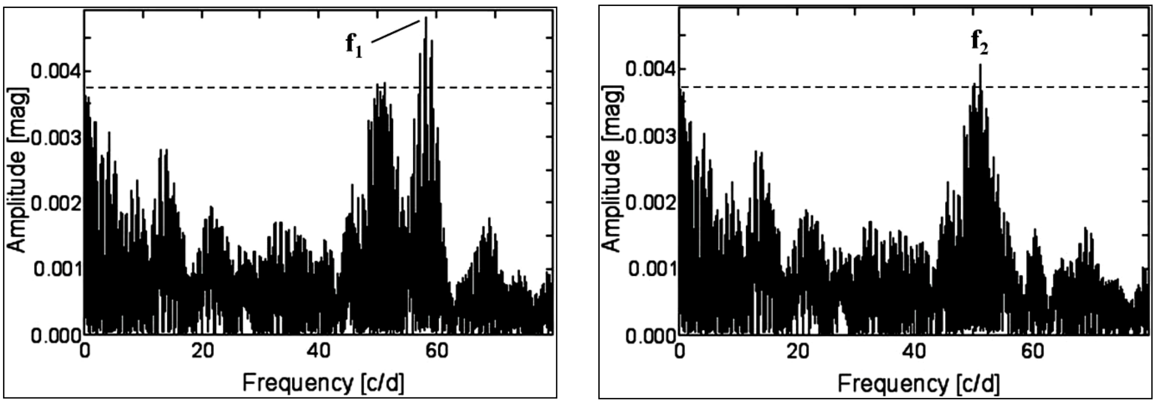


Εικόνα 7.74. Θέσεις των αστέρων του συστήματος AU Lac (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

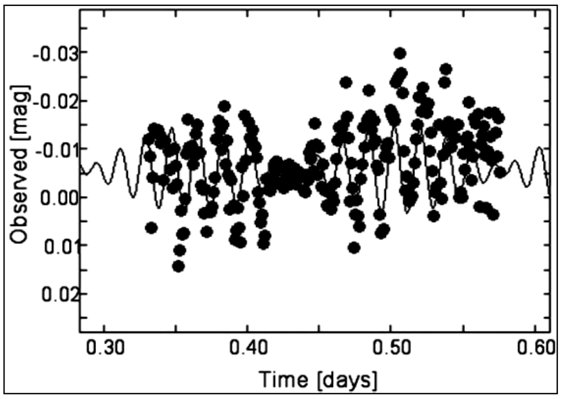
Εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης

Η μέθοδος για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης και η επεξήγηση των συμβόλων παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.3. Η ανάλυση αφορά μόνο τα δεδομένα του

B φίλτρου, τα οποία ελήφθησαν στο αστεροσκοπείο Κρυονερίου, καθόσον τα δεδομένα που ελήφθησαν στο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο είχαν μεγάλο φωτομετρικό σφάλμα και σε συνδυασμό με το μικρό πλάτος των συχνοτήτων (εν συγκρίσει με τα υπόλοιπα συστήματα) δεν επέτρεπαν να εντοπιστούν συχνότητες ανάπαλσης. Τελικά, από την ανάλυση των δεδομένων που ελήφθησαν στο αστεροσκοπείο Κρυονερίου εντοπίστηκαν δύο συχνότητες ανάπαλσης, ενώ οι αριθμοί *l*, λόγω της χρήσης δεδομένων μόνο από ένα φίλτρο, δεν προσδιορίστηκαν. Στον πίνακα 7.59 δίνονται οι παράμετροι της ανάπαλσης, ενώ στις εικ. 7.75-7.76 παρουσιάζονται τα φάσματα συχνοτήτων και η προσαρμογή της συνάρτησης Fourier σε τμήμα των παρατηρησιακών δεδομένων.



Εικόνα 7.75. Φάσματα συχνοτήτων στο *B* φίλτρο του παλλόμενου αστέρα του συστήματος AU Lac, στα οποία σημειώνονται οι συχνότητες ανάπαλσης που εντοπίστηκαν και το κατώτερο όριο (4σ) αξιόπιστων συχνοτήτων ανάπαλσης (διακεκομμένη γραμμή).



Εικόνα 7.76. Προσαρμογή της καμπύλης Fourier στα φωτομετρικά σημεία της νύκτας με τη μεγαλύτερη διάρκεια παρατήρησης.

Πίνακας 7.59. Αποτελέσματα της ανάλυσης για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης του συστήματος AU Lac στο *B* φίλτρο.

No.	f	A	Φ	S/N
	[c/d]	[mmag]	[°]	
f_1	58.217 (1)	5.0 (3)	177 (3)	11.9
f_2	51.298 (1)	4.1 (3)	356 (4)	4.0

Συμπεράσματα

Το σύστημα είναι ημιαποχωρισμένο με τον δευτερεύοντα αστέρα να γεμίζει τον λοβό Roche του. Ο πρωτεύων αστέρας βρίσκεται στην ΚΑ και είναι τύπου δ Sct. Επομένως, σύμφωνα με τον ορισμό των συστημάτων τύπου oEA (βλ. §7.1), το σύστημα ανήκει σε αυτήν την κατηγορία. Για τον πρωτεύοντα αστέρα εντοπίστηκαν δύο συχνότητες ανάπαλσης με την κυρίαρχη στους ~58.2 c/d, η οποία είναι σχετικά υψηλή, συγκριτικά με τα υπόλοιπα συστήματα που αναλύθηκαν έως τώρα, ενώ λαμβάνοντας υπόψη ότι ο αστέρας είναι σχετικά μικρής ηλικίας (εικ. 7.74), συμπεραίνεται ότι έχει εισχωρήσει σχετικά πρόσφατα στη φάση των αναπάλσεων (βλ. §7.21.5). Επιπροσθέτως, εφόσον ο δευτερεύων αστέρας είναι πολύ πιο εξελιγμένος και με πολύ μικρότερη μάζα από τον πρωτεύοντα, προκύπτει ότι στο παρελθόν υπήρξε μεταφορά μάζας από τον δευτερεύοντα προς τον πρωτεύοντα, επομένως, λόγω της μικρής ηλικίας του πρωτεύοντα το πιθανότερο σενάριο εξέλιξης του συστήματος είναι η περίπτωση Α (βλ. §1.2.4).

Αν και το σύστημα έχει ανακαλυφθεί εδώ και περίπου 90 έτη, και υπάρχει πληθώρα χρόνων ελαχίστων διαθέσιμη, ωστόσο η κατανομή των O−C σημείων δεν δείχνει κάποια ιδιαίτερη κατανομή, η οποία θα μπορούσε να ερμηνευτεί ως μεταβολή της τροχιακής περιόδου. Γι' αυτόν τον λόγο, το O−C διάγραμμα του συστήματος δεν αναλύθηκε, όμως είναι διαθέσιμο σε βάση δεδομένων O−C διαγραμμάτων[1].

7.14. Το σύστημα RR Lep

Ιστορική αναδρομή

Το σύστημα ανακαλύφθηκε από τον Hoffmeister (1931), η πρώτη εκτίμηση για τον φασματικό του τύπο ως A2 έγινε από την Payne-Gaposchkin (1952) και οι Wood & Forbes (1963) υπολόγισαν την πρώτη αστρονομική του εφημερίδα. Οι Brancewicz & Dworak (1980) και οι Svechnikov & Kuznetsova (1990) υπολόγισαν τις απόλυτες παραμέτρους των αστέρων-μελών, αλλά κατέληξαν σε διαφορετικές τιμές. Φωτοηλεκτρικές καμπύλες φωτός και φωτομετρικά μοντέλα του συστήματος δημοσιεύτηκαν από τους Bookmyer et al. (1986), Abhyankar & Vyas (1989), Vyas & Abhyankar (1989) και Samec et al. (1989). Οι Samec et al. (1989) εντόπισαν μια φωτομετρική μεταβολή με περίοδο ~45 min, αλλά δεν κατάφεραν να την ερμηνεύσουν. Πολύ αργότερα ο Dvorak (2009) ανακοίνωσε την ύπαρξη αναπάλσεων στο σύστημα με κυρίαρχη συχνότητα ~31.87 c/d ήτοι ~45 min. Το σύστημα εμπεριέχεται σε λίστα υποψήφιων συστημάτων να περιέχουν τρίτο μέλος (Hoffman et al. 2006). Η πιο πρόσφατη καμπύλη φωτός στο *V* φίλτρο προέκυψε από το πρόγραμμα "ASAS" (Pojmanski et al. 2005), αλλά δεν είναι καλής ποιότητας. Ο φασματικός τύπος του συστήματος, ακόμα και σήμερα, δεν έχει καθοριστεί με ακρίβεια, καθώς υπάρχουν αντιφατικές πληροφορίες σε διάφορους καταλόγους που τον προσδιορίζουν από A0 έως και A7 (π.χ. Malkov et al. 2006 (A2), Fabricius et al. 2002 (A0), Wright et al. 2003 (A4), Surkova & Svechnikov 2004 (A7)).

Οι Liakos & Niarchos (2012d) παρουσίασαν το φωτομετρικό μοντέλο του συστήματος, υπολόγισαν τις απόλυτες παραμέτρους των μελών του και προσδιόρισαν τις παραμέτρους των αναπάλσεων. Τα αποτελέσματα δίνονται παρακάτω.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι φωτομετρικές παρατηρήσεις για την κάλυψη των καμπυλών φωτός του συστήματος διήρκεσαν εννέα νύκτες μεταξύ Ιανουαρίου-Μαρτίου 2012 και έλαβαν χώρα στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1) με τη χρήση του

[1]http://www.as.up.krakow.pl/o-c/data/getdata.php3?AU%20lac

τηλεσκοπίου των 40 cm και της CCD ST-10XME. Στον πίνακα 7.60 δίνονται λεπτομέρειες που αφορούν τις φωτομετρικές παρατηρήσεις και την επεξεργασία των δεδομένων. Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2455953.26741 + 0.91543^{\mathrm{d}}\ \mathrm{E} \qquad (7.22)$$

και υπολογίστηκε από τον χρόνο ελαχίστου, ο οποίος προέκυψε από τα δεδομένα μας (Πίνακας B1) και τους πιο πρόσφατους από τη βιβλιογραφία.

Πίνακας 7.60. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους.

Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για κάθε φίλτρο παρατήρησης			
RR Lep	Μεταβλητός	10.2[a]	B		V	
TYC 5342-22-1	Σύγκρισης	9.56[b]	N	s.d.	N	s.d.
TYC 5342-128-1	Ελέγχου	10.43[b]	1035	2.8	991	2.7

[a]Watson et al. (2006), [b]Høg et al. (2000)

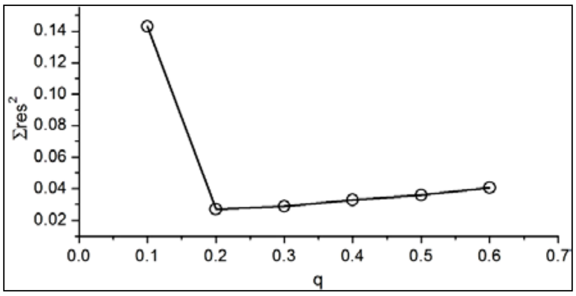
Ανάλυση των καμπυλών φωτός

Λόγω ανυπαρξίας φασματοσκοπικού λόγου μαζών των αστέρων του συστήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ανίχνευσης του q (q-search - βλ. §4.1) στους "modes" 2 και 5, με τον "mode" 5 να δίνει την καλύτερη δυνατή λύση. Καθώς δεν υπάρχει ακριβής φασματική ταξινόμηση για το σύστημα, δοκιμάστηκαν διάφορες θερμοκρασίες ως αρχικές τιμές της T_1 στο εύρος 9800 K - 7800 K (βλ. ιστορική αναδρομή) και επιλέχθηκε ως τελική εκείνη για την οποία προέκυψε η μικρότερη τιμή των $\sum \mathrm{res}^2$. Λόγω πιθανότητας ύπαρξης τρίτου μέλους στο σύστημα (Hoffman et al. 2006), η παράμετρος της φωτομετρικής συνεισφοράς από ένα πιθανό τρίτο μέλος στο σύστημα l_3 αφέθηκε ελεύθερη προς σύγκλιση, όμως, καθώς προέκυπτε πάντα αρνητική, παραλείφθηκε στην τελική λύση. Το διάγραμμα ανίχνευσης του q παρουσιάζεται στην εικ. 7.77. Στην εικ. 7.78 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 7.79 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος, ενώ στον πίνακα 7.61 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος.

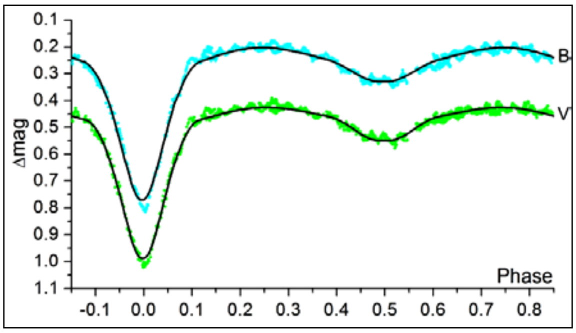
Πίνακας 7.61. Παράμετροι του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα RR Lep.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή	
i [°]	80.3 (9)	A_1	1[a]	Φίλτρο:	B	V
q_{ph}	0.23 (1)	A_2	0.5[a]	x_1	0.600	0.525
T_1 [K]	7800[a]	g_1	1[a]	x_2	0.866	0.746
T_2 [K]	4925 (96)	g_2	0.32[a]	L_1/L_T	0.964 (3)	0.952 (2)
Ω_1	2.74 (2)			L_2/L_T	0.036 (1)	0.048 (1)
Ω_2	2.32[a]	$\sum \mathrm{res}^2$	0.159			

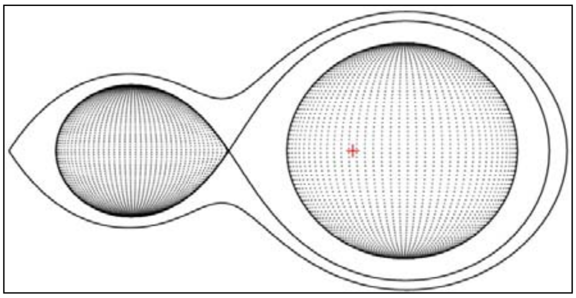
[a]σταθερή τιμή



Εικόνα 7.77. Διάγραμμα ανίχνευσης του q στον “mode” 5 για το σύστημα RR Lep. Η τιμή του q που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή των $\sum res^2$ βρέθηκε ίση με 0.2.



Εικόνα 7.78. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες φωτός στα φίλτρα *B* και *V* του συστήματος RR Lep.



Εικόνα 7.79. Η γεωμετρία Roche του συστήματος RR Lep στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό.

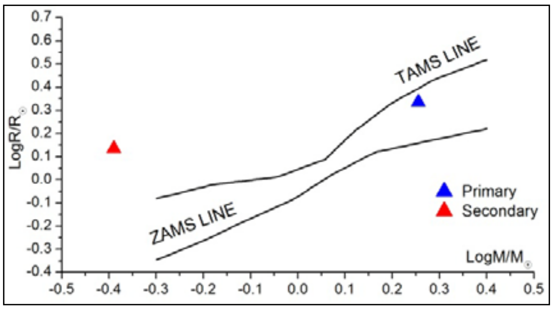
Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Η τιμή της μάζας M_1 του πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος υποτέθηκε από τον φασματικό του τύπο ως αστέρας της ΚΑ (βλ. Παρ. Ε) και δίνεται μαζί με τις τιμές των υπολοίπων παραμέτρων στον πίνακα 7.62. Η εικ. 7.80 δείχνει τις θέσεις των αστέρων στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.

Πίνακας 7.62. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος RR Lep.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [$M_\odot$]	1.8[a]	0.41 (2)	log$g$ [cm/s^2]	4.02 (1)	3.78 (3)
R [$R_\odot$]	2.17 (3)	1.36 (2)	α [$R_\odot$]	0.98 (5)	4.31 (3)
L [$L_\odot$]	15.6 (4)	1.0 (0.1)	M_{bol} [mag]	1.8 (4)	4.8 (7)

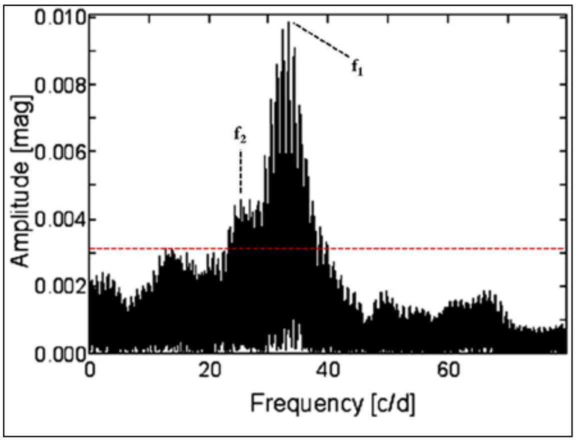
[a]υπόθεση

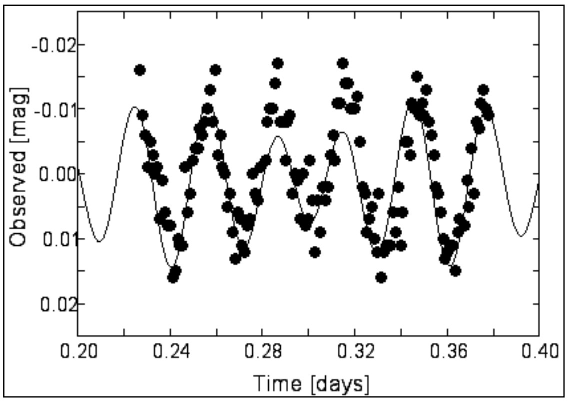


Εικόνα 7.80. Θέσεις των αστέρων του συστήματος RR Lep (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

Εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης

Η μέθοδος για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης και η επεξήγηση των συμβόλων παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.3. Εντοπίστηκαν δύο συχνότητες ανάπαλσης και στα δύο φίλτρα στα οποία έγιναν οι παρατηρήσεις. Ο λόγος των συχνοτήτων f_2/f_1 είναι ~0.75 και είναι τυπικός για τη θεμελιώδη συχνότητα ακτινικής ανάπαλσης και τη συχνότητα του πρώτου απόηχου (first overtone; βλ. §1.3.1). Στον πίνακα 7.63 δίνονται οι παράμετροι της ανάπαλσης, ενώ στην εικ. 7.81 παρουσιάζονται τα φάσματα συχνοτήτων και η προσαρμογή της συνάρτησης Fourier σε τμήμα των παρατηρησιακών δεδομένων, αντίστοιχα.





Εικόνα 7.81. Αριστερά: Φάσμα συχνοτήτων του παλλόμενου αστέρα του συστήματος RR Lep, στο οποίο σημειώνεται η συχνότητα ανάπαλσης που εντοπίστηκε και το κατώτερο όριο (4σ) αξιόπιστων συχνοτήτων ανάπαλσης (διακεκομμένη γραμμή). Δεξιά: Προσαρμογή της καμπύλης Fourier στα φωτομετρικά σημεία της νύκτας με τη μεγαλύτερη διάρκεια παρατήρησης.

Πίνακας 7.63. Αποτελέσματα της ανάλυσης για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης του συστήματος RR Lep.

No.	l	Φίλτρο	f [c/d]	A [mmag]	Φ [°]	S/N
f_1	3	B	33.2802 (4)	9.6 (4)	86 (2)	6.4
		V	33.2709 (5)	7.6 (4)	91 (3)	6.1
f_2	0 ή 1	B	24.318 (1)	3.5 (4)	149 (6)	4.0
		V	24.560 (11)	3.4 (4)	66 (7)	4.0

Συμπεράσματα

Το σύστημα είναι ημιαποχωρισμένο με τον δευτερεύοντα αστέρα να γεμίζει τον λοβό Roche του, ενώ ο πρωτεύων είναι επάνω στην ΚΑ και πολύ κοντά στην TAMS και είναι τύπου δ Sct. Επομένως, το σύστημα ανήκει στην κατηγορία συστημάτων τύπου oEA. Σύμφωνα με τις τιμές των μαζών και των εξελικτικών καταστάσεων των αστέρων συμπεραίνεται ότι κατά το παρελθόν υπήρξε μεταφορά μάζας από τον δευτερεύοντα στον πρωτεύοντα, άρα το πιθανότερο σενάριο εξέλιξης του συστήματος είναι η περίπτωση Β (βλ. §1.2.4). Καθώς ο πρωτεύων είναι πολύ κοντά στην πλήρωση του λοβού Roche του, αναμένεται ότι καθώς εξελίσσεται (αύξηση της ακτίνας του), θα έρθει σε επαφή με τον δευτερεύοντα. Δύο συχνότητες ανάπαλσης εντοπίστηκαν για τον πρωτεύοντα αστέρα, με την τιμή της κυρίαρχης να είναι σε καλή συμφωνία με τα αποτελέσματα του Dvorak (2009).

Αν και το σύστημα είναι γνωστό πάνω από 70 χρόνια, εντούτοις, τα O−C σημεία του παρουσιάζουν έντονη διασπορά και δεν μπορεί να προκύψει ασφαλές συμπέρασμα αναφορικά με μεταβολές της τροχιακής του περιόδου. Το O−C διάγραμμά του είναι διαθέσιμο σε βάση δεδομένων O−C διαγραμμάτων[1].

Φασματοσκοπικές παρατηρήσεις είναι απαραίτητες κυρίως για τη φασματική ταξινόμηση του συστήματος ή/και των αστέρων-μελών του, αλλά και για τον πιθανό εντοπισμό ενός τρίτου σώματος.

7.15. Το σύστημα CL Lyn

Ιστορική αναδρομή

Το σύστημα ανακαλύφθηκε ως μεταβλητός από την αποστολή "HIPPARCOS" και η μόνη διαθέσιμη πληροφορία για το σύστημα αφορά τον φασματικό του τύπο (A5), ο οποίος βασίζεται στον δείκτη χρώματος του $B-V$ (Adelman 2001).

Οι Liakos et al. (2012b), χρησιμοποιώντας νέες φωτομετρικές παρατηρήσεις, ανέδειξαν την ύπαρξη αναπάλσεων στον πρωτεύοντα αστέρα, ανέλυσαν τις καμπύλες φωτός του συστήματος και υπολόγισαν τα απόλυτα στοιχεία των αστέρων-μελών του. Επιπλέον, οι ίδιοι ερευνητές βάσει φασματοσκοπικών παρατηρήσεων εκτίμησαν τον φασματικό τύπο του συστήματος. Τα αποτελέσματα δίνονται στις επόμενες παραγράφους.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι φωτομετρικές παρατηρήσεις του συστήματος έγιναν στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1) με τη χρήση του τηλεσκοπίου των 25 cm και της CCD ST-8XMEI και διήρκεσαν 12 νύκτες σε χρονικό εύρος 35 ημερών στο χρονικό διάστημα Ιανουάριος-Φεβρουάριος 2011. Στον πίνακα 7.64 δίνονται: Οι αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία (βλ. §3.1.1) και τα φαινόμενα μεγέθη τους m_v στο φίλτρο V, ο αριθμός των σημείων N ανά φίλτρο παρατήρησης και το μέσο φωτομετρικό σφάλμα τους *s.d.* εκφρασμένο σε mmag. Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\text{Min. I} = \text{HJD } 2455588.25796 + 1.58606^{\text{d}}\ \text{E} \tag{7.23}$$

και υπολογίστηκε από τους χρόνους ελαχίστων (Πίνακας B1), οι οποίοι προέκυψαν από τα δεδομένα μας και τους πιο πρόσφατους της βιβλιογραφίας.

Οι φασματοσκοπικές παρατηρήσεις έλαβαν χώρα στο Αστεροσκοπείο του Σκίνακα (βλ. §2.3.3) στις 25 Σεπτεμβρίου 2011 και ελήφθη μόνο ένα φάσμα στο φασματικό εύρος 4660-5714 Å. Δυστυχώς, δεν κατέστη δυνατόν η λήψη του φάσματος να γίνει κατά τη διάρκεια της δευτερεύουσας έκλειψης, αλλά κατά τη φάση 0.167 με χρόνο έκθεσης 1500 sec. Για τη φασματική ταξινόμηση συγκρίθηκε το κομμάτι του φάσματος μεταξύ 4800-5350 Å, όπου βρίσκονται η H_β και πλήθος μεταλλικών γραμμών με ικανοποιητικό S/N, με φάσματα προτύπων αστέρων. Το φάσμα του συστήματος, βάσει συγκρίσεων με φάσματα προτύπων αστέρων, προέκυψε ως τύπου F0. Αν και η φωτομετρική συμμετοχή του δευτερεύοντα αστέρα είναι πολύ μικρή (βλ. παρακάτω), εντούτοις δεν μπορεί να

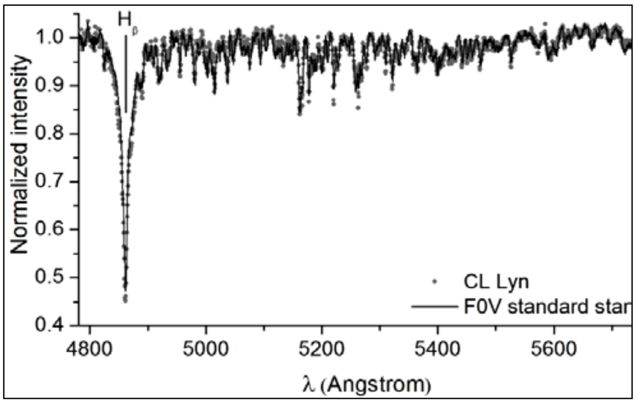
[1]http://www.as.up.krakow.pl/o-c/data/getdata.php3?RR%20lep

θεωρηθεί αμελητέα, καθώς οι γραμμές των μετάλλων παρουσιάζουν μεγαλύτερο βάθος από ότι αναμένεται για αστέρα τύπου F0. Στην εικ. 7.82 παρουσιάζεται η σύγκριση του φάσματος του CL Lyn με το φάσμα του πρότυπου αστέρα, για το οποίο προέκυψε η μικρότερη τιμή των $\sum res^2$ (για λεπτομέρειες της μεθόδου βλ. §3.2.2).

Πίνακας 7.64. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους.

Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για κάθε φίλτρο παρατήρησης					
CL Lyn	Μεταβλητός	9.78[a]	B		V		I	
TYC 3787-420 -1	Σύγκρισης	10.09[b]	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.
TYC 3783-649 -1	Ελέγχου	10.42[b]	1694	4.0	1125	4.8	1102	5.2

[a]Watson et al. (2006), [b]Høg et al. (2000)



Εικόνα 7.82. Σύγκριση του σύνθετου φάσματος του συστήματος CL Lyn (γκρίζα σημεία) με το φάσμα του πρότυπου αστέρα HIP 105769 (μαύρη γραμμή) φασματικού τύπου F0V.

Ανάλυση των καμπυλών φωτός

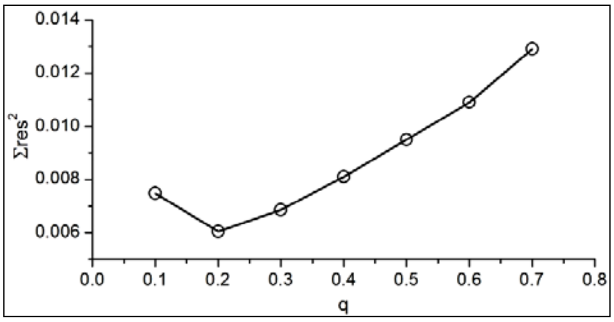
Από τις φασματοσκοπικές μας παρατηρήσεις δεν επιτεύχθηκε ο καθορισμός του φασματικού τύπου των αστέρων, παρά ο μόνο ο συνολικός φασματικός τύπος του συστήματος, ενώ στη βιβλιογραφία ο φασματικός τύπος αναφέρεται ως A5. Γι' αυτόν τον λόγο, δοκιμάστηκαν διάφορες τιμές για την T_1 εντός του εύρους των τιμών που αντιστοιχούν στους φασματικούς τύπους A5 (βιβλιογραφία) και F0 (παρούσα φασματική ταξινόμηση), ήτοι 8200 K – 7300 K. Εξαιτίας της απουσίας φασματοσκοπικά προσδιορισμένου λόγου μαζών των αστέρων του συστήματος, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ανίχνευσης του q (q-search - βλ. §4.1) στους "modes" 2 και 5.

Πίνακας 7.65. Παράμετροι (Παρ.) του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα CL Lyn.

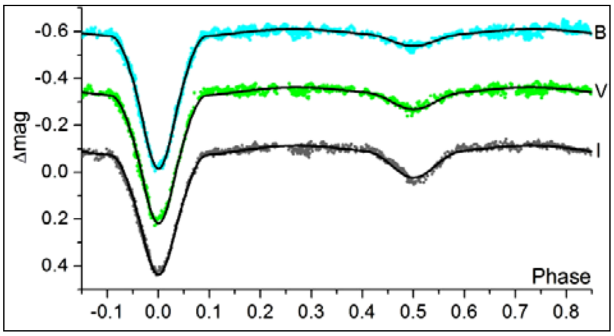
Παρ.	Τιμή	Παρ.	Τιμή	Παρ.	Τιμή		
i [°]	78.8 (1)	A_1	1[a]	Φίλτρο:	B	V	I
q_{ph}	0.19 (1)	A_2	0.5[a]	x_1	0.600	0.526	0.364
T_1 [K]	7800[a,b]	g_1	1[a]	x_2	0.909	0.762	0.550
T_2 [K]	4746 (14)	g_2	0.32[a]	L_1/L_T	0.962 (1)	0.938 (2)	0.892 (2)
Ω_1	3.35 (1)			L_2/L_T	0.038 (1)	0.062 (2)	0.108 (2)
Ω_2	2.204[a]			Σres^2		0.205	

[a]σταθερή τιμή, [b]υπόθεση

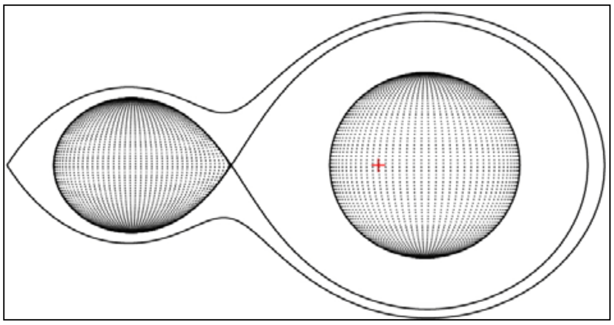
Το αντίστοιχο διάγραμμα παρουσιάζεται στην εικ. 7.83. Ως τελικό μοντέλο, αναφορικά με την αρχική T_1, παρουσιάζεται αυτό το οποίο παρήγαγε τη μικρότερη τιμή των $\sum res^2$ και οι παράμετροί του δίνονται στον πίνακα 7.65. Στην εικ. 7.84 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες και στην εικ. 7.85 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος.



Εικόνα 7.83. Διάγραμμα ανίχνευσης του q για το σύστημα CL Lyn. Η τιμή του q που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή των $\sum res^2$ βρέθηκε ίση με 0.2 στον "mode" 5.



Εικόνα 7.84. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες φωτός του συστήματος CL Lyn στα φίλτρα *B*, *V* και *I*.



Εικόνα 7.85. Η γεωμετρία Roche του συστήματος CL Lyn στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό.

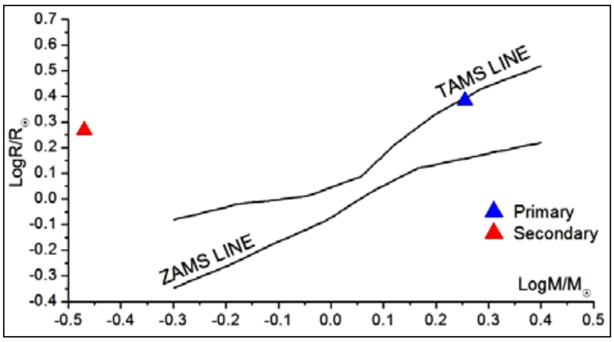
Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Η τιμή της μάζας M_1 του πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος υποτέθηκε από τον φασματικό του τύπο ως αστέρας της ΚΑ (βλ. Παρ. Ε) και δίνεται μαζί με τις τιμές των υπολοίπων παραμέτρων στον πίνακα 7.66. Η εικ. 7.86 δείχνει τις θέσεις των αστέρων στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.

Πίνακας 7.66. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος CL Lyn.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [$M_\odot$]	1.8[a]	0.34 (1)	log$g$ [cm/s^2]	3.93 (1)	3.43 (1)
R [$R_\odot$]	2.42 (1)	1.85 (1)	α [$R_\odot$]	1.20 (1)	6.35 (1)
L [$L_\odot$]	19.4 (2)	1.56 (2)	M_{bol} [mag]	1.5 (1)	4.3 (1)

[a]υπόθεση



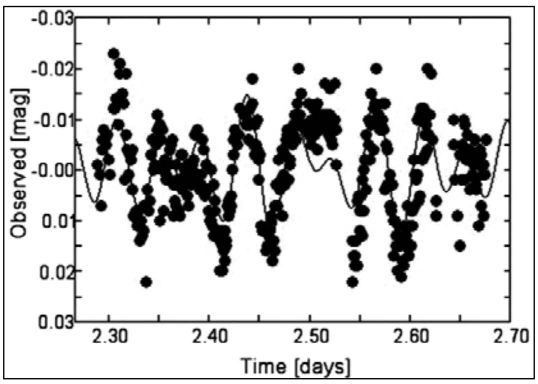
Εικόνα 7.86. Θέσεις των αστέρων του συστήματος CL Lyn (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

Εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης

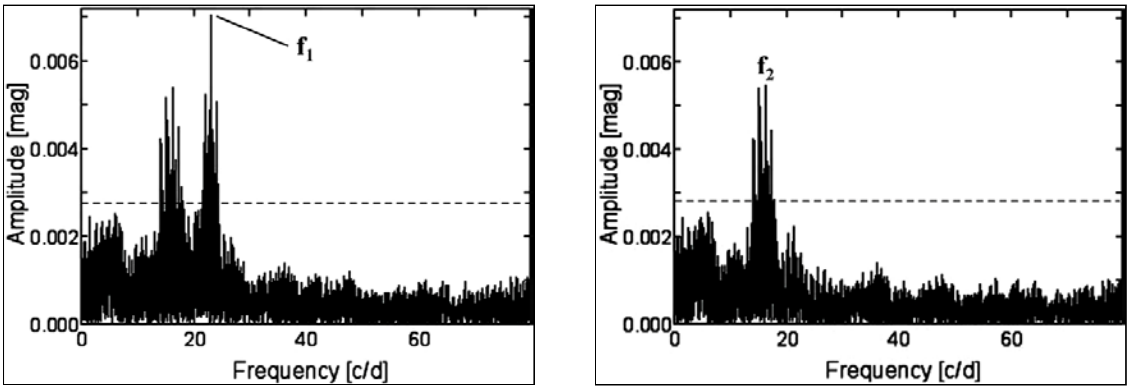
Η μέθοδος για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης και η επεξήγηση των συμβόλων παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.3. Εντοπίστηκαν τρεις συχνότητες ανάπαλσης σε όλα τα φίλτρα στα οποία έγιναν οι παρατηρήσεις, αν και στο φίλτρο *I* οι f_2 και η f_3 είχαν S/N<4. Ωστόσο, συμπεριλαμβάνονται στο τελικό μοντέλο καθότι εντοπίστηκαν στα άλλα δύο φίλτρα. Ο λόγος συχνοτήτων f_1/f_3 είναι ~0.75 και είναι τυπικός για τη θεμελιώδη συχνότητα ακτινικής ανάπαλσης και τη συχνότητα του πρώτου απόηχου (first overtone; βλ. §1.3.1). Στον πίνακα 7.67 δίνονται οι παράμετροι της ανάπαλσης, ενώ στις εικ. 7.87-7.88 παρουσιάζεται η προσαρμογή της συνάρτησης Fourier σε τμήμα των παρατηρησιακών δεδομένων και τα φάσματα συχνοτήτων, αντίστοιχα.

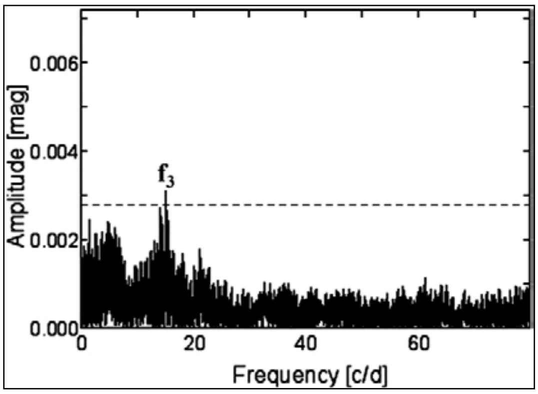
Πίνακας 7.67. Αποτελέσματα της ανάλυσης για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης του συστήματος CL Lyn.

No.	l	Φίλτρο	f [c/d]	A [mmag]	Φ [°]	S/N
f_1	2	B	23.051 (1)	7.3 (3)	196 (2)	13.8
		V	23.054 (1)	5.7 (4)	166 (4)	8.4
		I	23.055 (1)	3.2 (4)	156 (6)	6.8
f_2	0 ή 3	B	15.169 (1)	4.6 (3)	305 (3)	6.1
		V	15.159 (1)	3.6 (4)	320 (6)	6.7
		I	15.169 (1)	1.7 (4)	312 (12)	2.4
f_3	1	B	17.426 (1)	3.1 (3)	370 (5)	5.1
		V	17.435 (1)	3.5 (4)	356 (6)	5.3
		I	17.440 (1)	0.9 (4)	334 (24)	2.0



Εικόνα 7.87. Προσαρμογή της καμπύλης Fourier στα φωτομετρικά σημεία της νύκτας με τη μεγαλύτερη διάρκεια παρατήρησης.





Εικόνα 7.88. Φάσματα συχνοτήτων στο *B* φίλτρο του παλλόμενου αστέρα του συστήματος CL Lyn, στα οποία σημειώνονται οι συχνότητες ανάπαλσης που εντοπίστηκαν και το κατώτερο όριο (4σ) αξιόπιστων συχνοτήτων ανάπαλσης (διακεκομμένη γραμμή).

Συμπεράσματα

Ο πρωτεύων αστέρας του συστήματος βρίσκεται στα όρια της ΚΑ (εικ. 7.86) και αναπάλλεται με τρεις συχνότητες με κυρίαρχη την ~23.05 c/d. Ο δευτερεύων αστέρας είναι εξελιγμένος αστέρας και επιπροσθέτως γεμίζει τον λοβό Roche του. Λόγω της πρόσφατης ανακάλυψης του συστήματος (βλ. ιστορική αναδρομή), δεν είναι διαθέσιμο το O−C διάγραμμά του, ώστε να αποφανθούμε για την ύπαρξη μεταφοράς μάζας. Ωστόσο, κρίνοντας από τις μάζες και τις εξελικτικές καταστάσεις των αστέρων-μελών, ο δευτερεύων έχει ήδη χάσει μεγάλο μέρος της μάζας του. Εφόσον ο δευτερεύων αστέρας είναι δυνητικά δότης μάζας, το σύστημα συγκαταλέγεται στους oEA αστέρες. Το πιθανότερο σενάριο εξέλιξης του συστήματος είναι η περίπτωση B (βλ. §1.2.4).

7.16. Το σύστημα BG Peg

Ιστορική αναδρομή

Δεν υπάρχει ακριβής αναφορά της ανακάλυψης του συστήματος στη βιβλιογραφία. Οι Prager & Shapley (1941) ανέφεραν το σύστημα ως μεταβλητό αστέρα και παραπέμπουν για την ανακάλυψή του στον Zessewitsch (1931). Ο Budding (1984) υπολόγισε τον λόγο μαζών του συστήματος, ενώ οι Brancewicz & Dworak (1980) και οι Svechnikov & Kuznetsova (1990) υπολόγισαν τις απόλυτες παραμέτρους των αστέρων-μελών, αλλά κατέληξαν σε διαφορετικές τιμές. Ωστόσο, όλοι οι προηγούμενοι ερευνητές συμφωνούν για τον φασματικό τύπου του συστήματος ως A2. Σχεδόν ταυτόχρονα οι Soydugan et al. (2009) και ο Dvorak (2009) ανακοίνωσαν ότι στο σύστημα λαμβάνουν χώρα αναπάλσεις με κυρίαρχη συχνότητα ~25.5 c/d. Αργότερα, οι Soydugan et al. (2011) παρουσίασαν το φωτομετρικό μοντέλο του συστήματος και την ανάλυση Fourier χρησιμοποιώντας παρατηρήσεις στα φίλτρα *B* και *V*. Στην ίδια εργασία δημοσιεύτηκε και η ανάλυση των τροχιακών μεταβολών της περιόδου του συστήματος καταλήγοντας στην πιθανή ύπαρξη τρίτου μέλους, απώλεια μάζας από το σύστημα και μεταφορά μάζας μεταξύ των μελών του.

Οι Liakos & Niarchos (2011j) βασιζόμενοι σε νέες παρατηρήσεις σε τέσσερα φωτομετρικά φίλτρα, οι οποίες κάλυπταν μεγαλύτερο χρονικό εύρος από αυτές των Soydugan et al. (2011), εντόπισαν νέες συχνότητες ανάπαλσης, και επαναπροσδιόρισαν το φωτομετρικό μοντέλο του συστήματος. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους με την επικαιροποιημένη ανάλυση του O−C διαγράμματος του συστήματος.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι φωτομετρικές παρατηρήσεις του συστήματος πραγματοποιήθηκαν στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1) με τη χρήση τόσο του τηλεσκοπίου των 25 cm και της CCD ST-8XMEI όσο και με το τηλεσκόπιο των 40 cm και της CCD ST-10XME. Διήρκεσαν 15 νύκτες σε χρονικό εύρος 108 ημερών στο χρονικό διάστημα Αύγουστος-Νοέμβριος 2010. Στον πίνακα 7.68 δίνονται: Οι αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία (βλ. §3.1.1) και τα φαινόμενα μεγέθη τους m_V στο φίλτρο V, ο αριθμός των σημείων N ανά φίλτρο παρατήρησης και το μέσο φωτομετρικό σφάλμα τους *s.d.* εκφρασμένο σε mmag. Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2455446.47083 + 1.95267^{\mathrm{d}}\ \mathrm{E} \tag{7.24}$$

και υπολογίστηκε από τους χρόνους ελαχίστων (Πίνακας Β1), οι οποίοι προέκυψαν από τα δεδομένα μας και τους πιο πρόσφατους της βιβλιογραφίας.

Πίνακας 7.68. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους.

Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για κάθε φίλτρο παρατήρησης							
BG Peg	Μεταβλητός	10.5[a]	B		V		R		I	
TYC 1698-1148-1	Σύγκρισης	10.52[b]	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.
TYC 1698-1078-1	Ελέγχου	11.85[b]	1843	5.8	1571	6.1	1499	7.3	1568	8.6

[a]Watson et al. (2006), [b]Høg et al. (2000)

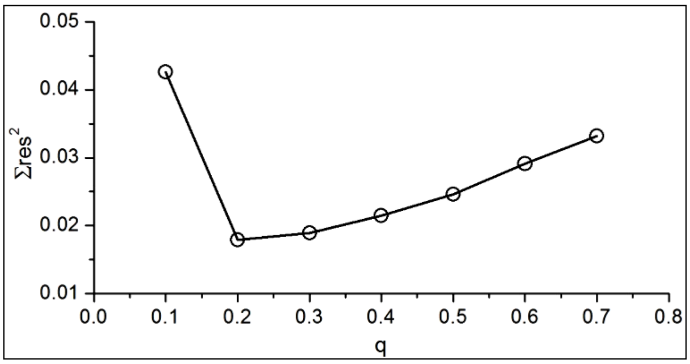
Ανάλυση των καμπυλών φωτός

Η θερμοκρασία του πρωτεύοντα αστέρα τέθηκε ίση με 9000 K (βλ. ιστορική αναδρομή). Λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων (βλ. παρακάτω την O−C ανάλυση), η παράμετρος της φωτομετρικής συνεισφοράς από ένα πιθανό τρίτο μέλος στο σύστημα l_3 αφέθηκε ελεύθερη προς σύγκλιση, αλλά κατά την επίλυση η τιμή της προέκυπτε αρνητική, επομένως, αγνοήθηκε. Λόγω απουσίας φασματοσκοπικού λόγου μαζών των αστέρων του συστήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ανίχνευσης του q (q-search - βλ. §4.1) στους "modes" 2 και 5, με τον "mode" 5 να δίνει την καλύτερη δυνατή λύση. Το αντίστοιχο διάγραμμα παρουσιάζεται στην εικ. 7.89. Στην εικ. 7.90 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 7.91 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος και στον πίνακα 7.69 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος.

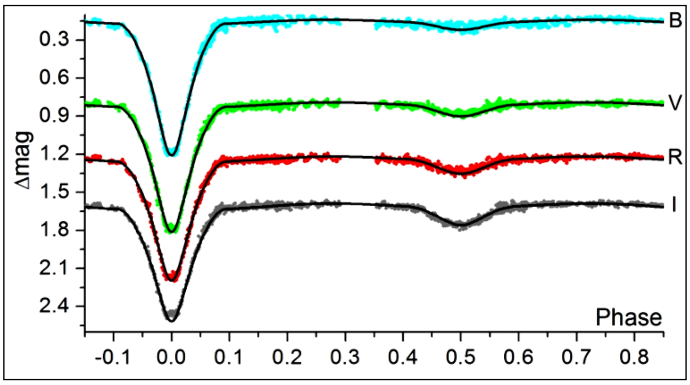
Πίνακας 7.69. Παράμετροι (παρ.) του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα BG Peg.

Παρ.	Τιμή	Παρ.	Τιμή	Παρ.	Τιμή			
i [°]	83.7 (1)	A_1	1[a]	Φίλτρο:	B	V	R	I
q_{ph}	0.22 (1)	A_2	0.5[a]	x_1	0.536	0.460	0.380	0.300
T_1 [K]	9000[a,b]	g_1	1[a]	x_2	0.849	0.706	0.609	0.512
T_2 [K]	5095 (12)	g_2	0.32[a]	L_1/L_T	0.955 (1)	0.927 (2)	0.903 (2)	0.873 (3)
Ω_1	3.67 (1)			L_2/L_T	0.045 (1)	0.073 (1)	0.097 (1)	0.127 (1)
Ω_2	2.28[a]	$\sum res^2$	0.638					

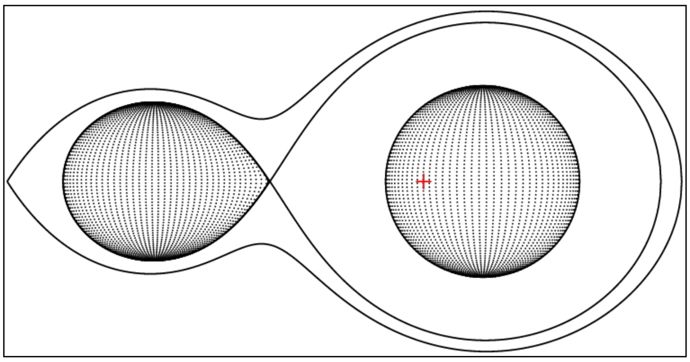
[a]σταθερή τιμή, [b]υπόθεση



Εικόνα 7.89. Διάγραμμα ανίχνευσης του q στον "mode" 5 για το σύστημα BG Peg. Η τιμή του q που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή των $\sum res^2$ βρέθηκε ίση με 0.2.



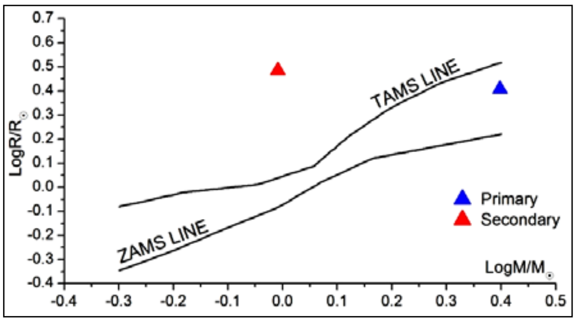
Εικόνα 7.90. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες φωτός στα φίλτρα *B, V, R, I* του συστήματος BG Peg.



Εικόνα 7.91. Η γεωμετρία Roche του συστήματος BG Peg στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό.

Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Η τιμή της μάζας M_1 του πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος υποτέθηκε από τον φασματικό του τύπο ως αστέρας της ΚΑ και δίνεται μαζί με τις τιμές των υπολοίπων παραμέτρων στον πίνακα 7.70. Η εικ. 7.92 δείχνει τις θέσεις των αστέρων στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.



Εικόνα 7.92. Θέσεις των αστέρων του συστήματος BG Peg (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

Πίνακας 7.70. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος BG Peg.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [$M_\odot$]	2.5[a]	0.97 (1)	log$g$ [cm/s^2]	3.89 (3)	3.60 (3)
R [$R_\odot$]	3.0 (1)	2.6 (1)	α [$R_\odot$]	2.9 (3)	7.3 (1)
L [$L_\odot$]	52 (3)	4.1 (3)	M_{bol} [mag]	0.5 (1)	3.2 (1)

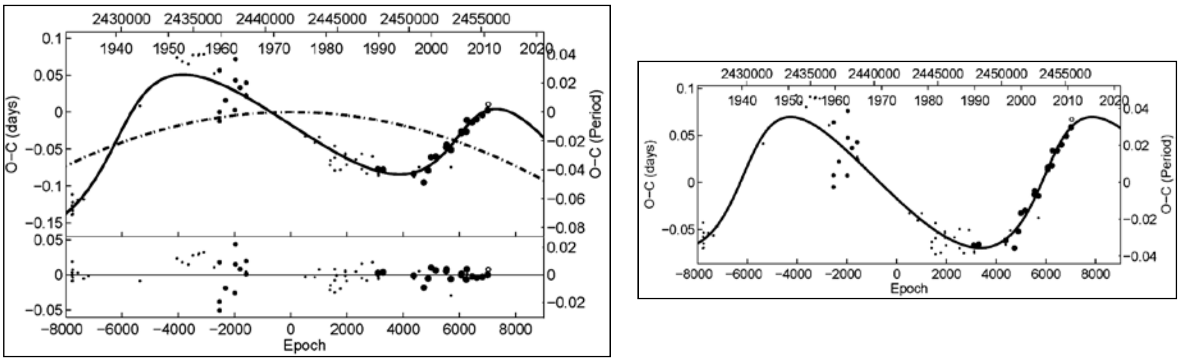
[a]υπόθεση

Ανάλυση των μεταβολών της τροχιακής περιόδου

Το O−C διάγραμμα του BG Peg περιέχει 86 χρόνους ελαχίστων, 52 εκ των οποίων προέκυψαν από οπτικές, 10 από φωτογραφικές και 24 από CCD παρατηρήσεις και καλύπτουν χρονικό διάστημα από το 1931 έως και σήμερα. Ως αρχική παράμετρος χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω αστρονομική εφημερίδα (Kreiner et al. 2001):

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2441764.011\ + 1.952444^{\mathrm{d}}\mathrm{E} \qquad (7.25)$$

Αρχικά, ως συνάρτηση προσαρμογής δοκιμάστηκε μια κυρτή παραβολή, λόγω πιθανής μεταφοράς μάζας, και μια καμπύλη LITE, λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων. Τελικά, όμως, προέκυψε ότι μια κοίλη παραβολή και μια συνάρτηση LITE περιγράφουν πιο ικανοποιητικά την κατανομή των σημείων. Όπως και στις περιπτώσεις των συστημάτων AT Peg, X Tri και QY Aql (βλ. §6.10, §6.11 και §7.3, αντίστοιχα), καθώς το αποτέλεσμα έρχεται σε πλήρη αντίφαση με το αναμενόμενο, ο πιθανότερος μηχανισμός διαμόρφωσης της περιόδου είναι η μαγνητική πέδηση (βλ. §4.2.2),



Εικόνα 7.93. Αριστερά: Προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης LITE και μιας παραβολής (συνεχής γραμμή) στα O−C σημεία του συστήματος BG Peg (επάνω) και τα υπόλοιπα (residuals) μετά την αφαίρεση της συνολικής συνάρτησης (κάτω). Η διακεκομμένη γραμμή αναφέρεται στην παραβολή. Δεξιά: Προσαρμογή της καμπύλης LITE στα O−C υπόλοιπα έπειτα από την αφαίρεση της παραβολής.

ενώ οι παραδοχές που έγιναν για το σύστημα προκειμένου να υπολογιστεί ο ρυθμός απώλειας μάζας από τη σχέση (4.69) είναι ίδιες με τα αυτές που παρουσιάστηκαν για τα άλλα προαναφερόμενα συστήματα (επίσης βλ. σχέση 4.42).

Εφόσον ο δευτερεύων αστέρας του συστήματος, λόγω της θερμοκρασίας του, δύναται να έχει περίβλημα μεταφοράς που θα μπορούσε να δημιουργήσει μεταβολές στην τετραπολική ροπή (βλ. §4.2.4), ελέγχθηκε η πιθανή ύπαρξη του μηχανισμού Applegate (1992). Η μέθοδος ανάλυσης και η επεξήγηση των συμβόλων αναφέρονται στην παράγραφο 4.2. Ο πίνακας 7.71 περιέχει τις τιμές των παραμέτρων των θεωρητικών καμπυλών, ενώ στην εικ. 7.93 παρουσιάζεται η προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης στα O−C σημεία.

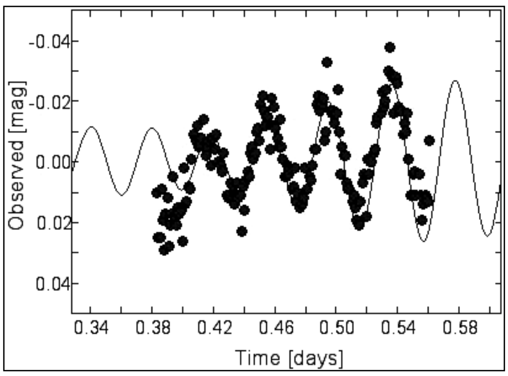
Πίνακας 7.71. Παράμετροι της O−C ανάλυσης του συστήματος BG Peg.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
Εκλειπτικό σύστημα		3^o σώμα	
JD_0 [HJD−2400000]	41764.003 (9)	ω_3 [°]	15 (7)
P [d]	1.952407 (1)	P_3 [yr]	65 (1)
C_2 [$\times10^{-9}$ d/cycle]	-1.1402 (3)	e_3	0.4 (1)
$\dot{P}$ [$\times10^{-7}$ d/yr]	-4.242 (1)	$f(m_3)$ [$M_\odot$]	0.55 (1)
$\dot{M}_{tr}$ [$\times10^{-8}$ $M_\odot$/yr]	1[a]	$M_{3,min}$ [$M_\odot$]	2.77 (2)
$\dot{M}_{loss}$ [$\times10^{-8}$ $M_\odot$/yr]	-7.163 (2)		
LITE		Μεταβολή της τετραπολικής ροπής	
T_0 [HJD−2400000]	53781 (364)	ΔQ [$\times10^{50}$ g cm^2]	19.5
A [d]	0.069 (3)	Σres^2	0.058

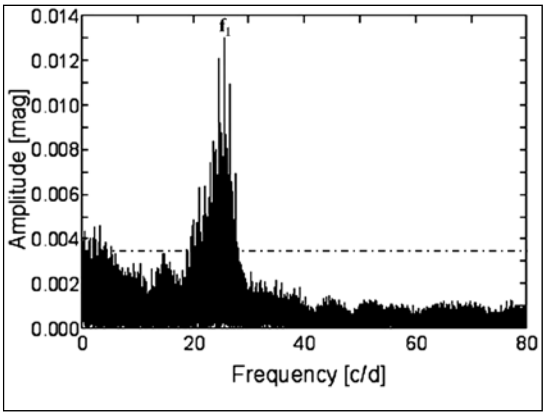
[a]υπόθεση

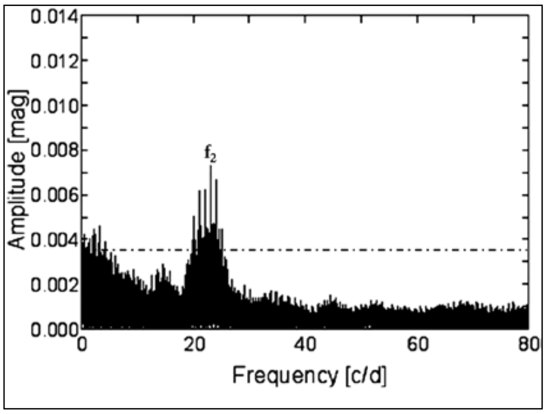
Εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης

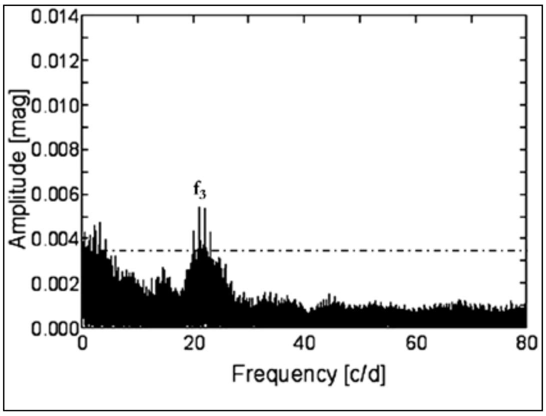
Η μέθοδος για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης και η επεξήγηση των συμβόλων παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.3. Εντοπίστηκαν τρεις συχνότητες ανάπαλσης σε όλα τα φίλτρα στα οποία έγιναν οι παρατηρήσεις. Καθώς δεν υπάρχουν θεωρητικά μοντέλα (MAD-βλ. §4.3) για την τιμή της μάζας του πρωτεύοντα αστέρα, οι αριθμοί-*l* των αναπάλσεων υπολογίστηκαν βάσει του πλησιέστερου μοντέλου MAD που αντιστοιχούσε σε τιμή μάζας 2.2 $M_\odot$. Στον πίνακα 7.72 δίνονται οι παράμετροι των αναπάλσεων, ενώ στις εικ. 7.94 και 7.95 παρουσιάζεται η προσαρμογή της συνάρτησης Fourier σε τμήμα των παρατηρησιακών δεδομένων και τα φάσματα συχνοτήτων, αντίστοιχα.



Εικόνα 7.94. Προσαρμογή της καμπύλης Fourier στα φωτομετρικά σημεία της νύκτας με τη μεγαλύτερη διάρκεια παρατήρησης.







Εικόνα 7.95. Φάσματα συχνοτήτων στο *B* φίλτρο του παλλόμενου αστέρα του συστήματος BG Peg, στα οποία σημειώνονται οι συχνότητες ανάπαλσης που εντοπίστηκαν και το κατώτερο όριο (4σ) αξιόπιστων συχνοτήτων ανάπαλσης (διακεκομμένη γραμμή).

Πίνακας 7.72. Αποτελέσματα της ανάλυσης για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης του συστήματος BG Peg.

No.	l	Φίλτρο	f [c/d]	A [mmag]	Φ [°]	S/N
f_1	2	B	25.5437 (2)	13.1 (6)	8 (3)	14.8
		V	25.5437 (3)	11.7 (6)	10 (3)	18.7
		R	25.544 (1)	8.3 (6)	359 (4)	9.8
		I	25.544 (1)	7.1 (6)	16 (5)	9.8
f_2	1 ή 2	B	23.0851 (4)	8.4 (6)	117 (4)	9.9
		V	23.085 (1)	6.3 (6)	118 (5)	10.4
		R	23.194 (1)	4.3 (6)	247 (8)	4.7
		I	23.085 (1)	4.0 (6)	111 (8)	5.4
f_3	1 ή 3	B	22.061 (1)	6.1 (6)	19 (6)	6.5
		V	22.061 (1)	6.1 (6)	8 (5)	9.0
		R	22.062 (1)	3.9 (6)	9 (9)	4.1
		I	22.060 (1)	3.3 (6)	19 (10)	4.7

Συμπεράσματα

Το σύστημα είναι ημιαποχωρισμένο με τον δευτερεύοντα αστέρα να γεμίζει τον λοβό Roche του. Ο πρωτεύων αστέρας είναι επάνω στην ΚΑ, αλλά πολύ κοντά στη ZAMS και είναι τύπου δ Sct. Επομένως, το σύστημα μπορεί να θεωρηθεί τύπου oEA. Τρεις συχνότητες ανάπαλσης εντοπίστηκαν με κυρίαρχη την ~25.5 c/d, τιμή η οποία είναι σε πολύ καλή συμφωνία με τα αποτελέσματα των Soydugan et al. (2009), των Dvorak (2009) και των Soydugan et al. (2011). Σύμφωνα με τις μάζες και την εξελικτική κατάσταση των μελών, προκύπτει ότι ο δευτερεύων έχει ήδη μεταφέρει μεγάλο μέρος της μάζας του στον πρωτεύοντα, αλλά, λαμβάνοντας υπόψη και τα αποτελέσματα της O−C ανάλυσης, προκύπτει ότι έχει χαθεί μάζα από το σύστημα, λόγω μαγνητικής πέδησης. Σύμφωνα με τα παραπάνω, το πιθανότερο σενάριο εξέλιξης είναι η περίπτωση B (βλ. §1.2.4).

Το πιο ενδιαφέρον σημείο της ανάλυσης είναι η ερμηνεία των περιοδικών μεταβολών της τροχιακής περιόδου. Αυτές οι μεταβολές μπορούν να ερμηνευτούν πολύ οριακά με τον μηχανισμό Applegate (1992), καθώς η μεταβολή της τετραπολικής ροπής του δευτερεύοντα βρέθηκε ίση με ~2×10^{51} g cm^2, τιμή η οποία είναι στα όρια του κριτηρίου των Lanza & Rodonò (2002) (10^{50}-10^{51} g cm^2). Από την άλλη πλευρά, η ερμηνεία βάσει του LITE απαιτεί την ύπαρξη τρίτου σώματος με ελάχιστη μάζα ~2.8 $M_{\odot}$, τιμή η οποία είναι πολύ κοντά στο άθροισμα των μαζών των αστέρων του εκλειπτικού συστήματος. Όμως, η Ανάλυση των καμπυλών φωτός δεν ανέδειξε την ύπαρξη επιπρόσθετης φωτομετρικής συνεισφοράς, ενώ η αναμενόμενη για έναν αστέρα της ΚΑ με τέτοια μάζα θα έπρεπε να είναι ~40%. Αυτή η ασυμφωνία μπορεί να αρθεί μόνο με την υπόθεση ότι το τρίτο μέλος είναι πολύ εξελιγμένος αστέρας (αστέρας νετρονίων ή μελανή οπή), επομένως η φωτομετρική συνεισφορά του στα μήκη κύματος που έγιναν οι παρατηρήσεις εύλογα προκύπτει μηδενική. Ο δευτερεύων αστέρας βρίσκεται στο στάδιο των υπογιγάντων, επομένως, φαίνεται ότι, αν και τα τρία μέλη γεννήθηκαν ταυτόχρονα, τότε υπήρξε ο απαραίτητος χρόνος ώστε το τρίτο μέλος, εφόσον έχει τη μεγαλύτερη μάζα, να εξελιχθεί γρηγορότερα. Επιπλέον, το σύστημα, βάσει του κριτηρίου του Harrington (1977), είναι δυναμικά ευσταθές. Μελλοντικές φασματοσκοπικές ή/και αστρομετρικές παρατηρήσεις αναμένεται να δώσουν απαντήσεις για την ύπαρξη του τρίτου μέλους. Επίσης, παρατηρήσεις σε «θερμότερα» μήκη κύματος (π.χ. ακτίνες-X) είναι πιθανόν να εντοπίσουν ίχνη ενός εξελιγμένου αστέρα.

7.17. Το σύστημα UZ Sge

Ιστορική αναδρομή

Το σύστημα ανακαλύφθηκε ως μεταβλητός από τους Guthnick & Schneller (1939). Ο φασματικός τύπος του συστήματος δίνεται είτε ως A3V (Halbedel 1984, Svechnikov & Kuznetsova 1990) είτε ως A0V (Brancewicz & Dworak 1980, Budding 1984). Οι Brancewicz & Dworak (1980) και οι Svechnikov & Kuznetsova (1990) υπολόγισαν τις απόλυτες παραμέτρους του συστήματος, αλλά κατέληξαν σε διαφορετικές τιμές. Οι Liakos & Niarchos (2008) και οι Zasche et al. (2008) ανέλυσαν τις μεταβολές της τροχιακής του περιόδου και κατέληξαν στην πιθανή ύπαρξη ενός τρίτου μέλους με ελάχιστη μάζα 0.7 $M_{\odot}$. Ο Buchheim (2009), χρησιμοποιώντας νέες καμπύλες φωτός στα φίλτρα *V* και *R*, παρουσίασε το φωτομετρικό μοντέλο του συστήματος και κατέληξε σε δύο πιθανές γεωμετρικές λύσεις με διαφορετικούς λόγους μαζών.

Οι Liakos & Niarchos (2012b) έκαναν νέες παρατηρήσεις για το σύστημα, ανακάλυψαν ότι ο πρωτεύων αστέρας είναι παλλόμενος, παρουσίασαν νέο φωτομετρικό μοντέλο του και υπολόγισαν τις παραμέτρους των αστέρων-μελών του. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω μαζί με την επικαιροποιημένη O−C ανάλυση.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι φωτομετρικές παρατηρήσεις για την πλήρη κάλυψη των καμπυλών φωτός του συστήματος έλαβαν χώρα στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1) με τη χρήση του τηλεσκοπίου των 40 cm και της CCD ST-10XME και διήρκεσαν 11 νύκτες σε χρονικό εύρος 12 ημερών τον Ιούλιο του 2009 στα φίλτρα *B* και *R*. Με το ίδιο τηλεσκόπιο, αλλά με την CCD ST8-XMEI, το σύστημα παρατηρήθηκε για άλλες 3 νύκτες στο διάστημα Ιούλιος-Αύγουστος 2007 και άλλες 5 στο διάστημα Ιούνιος-Ιούλιος 2008 στα φίλτρα *B*, *V* και *R*. Οι παρατηρήσεις των ετών 2007 και 2008 αποσκοπούσαν μόνο στον ακριβή υπολογισμό των χρόνων ελαχίστων του συστήματος. Στην παρακάτω ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα δεδομένα του 2009. Στον πίνακα 7.73 δίνονται: Οι αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία (βλ. §3.1.1) και τα φαινόμενα μεγέθη τους m_V στο φίλτρο *V*, ο αριθμός των σημείων *N* ανά φίλτρο παρατήρησης και το μέσο φωτομετρικό σφάλμα τους *s.d.* εκφρασμένο σε mmag.

Πίνακας 7.73. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους.

Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για κάθε φίλτρο παρατήρησης			
UZ Sge	Μεταβλητός	11.4[a]	B		R	
TYC 1626-1888-1	Σύγκρισης	10.93[b]	N	s.d.	N	s.d.
TYC 1626-1275-1	Ελέγχου	11.12[b]	1143	4.6	1143	4.9

[a]Watson et al. (2006), [b]Høg et al. (2000)

Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\mathrm{Min.\,I} = \mathrm{HJD}\ 2454314.49758 + 2.21574^{\mathrm{d}}\ \mathrm{E} \qquad (7.26)$$

και υπολογίστηκε από τους χρόνους ελαχίστων (Πίνακας B1), οι οποίοι προέκυψαν από τα δεδομένα μας και τους πιο πρόσφατους της βιβλιογραφίας.

Ανάλυση των καμπυλών φωτός

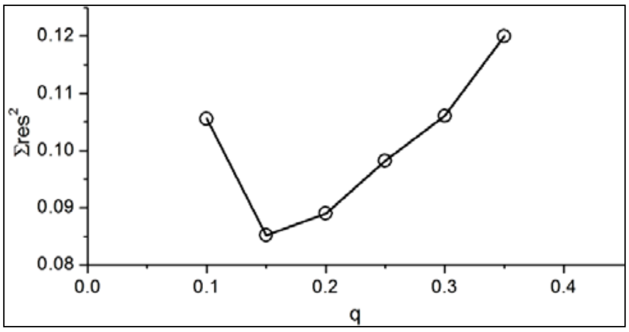
Η θερμοκρασία του πρωτεύοντα αστέρα τέθηκε ίση με 8700 K, σύμφωνα με την πιο αξιόπιστη φασματική ταξινόμηση της βιβλιογραφίας (Halbedel 1984). Λόγω απουσίας φασματοσκοπικού λόγου μαζών των αστέρων του συστήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθ-

Πίνακας 7.74. Παράμετροι του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα UZ Sge.

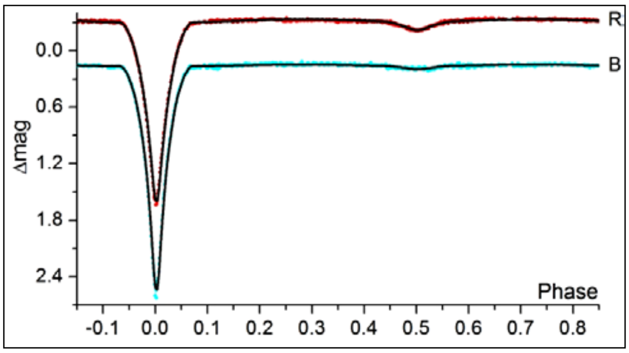
Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή	
i [°]	88.8 (1)	A_1	1[a]	Φίλτρο:	B	V
q_{ph}	0.14 (1)	A_2	0.5[a]	x_1	0.526	0.395
T_1 [K]	8700[a,b]	g_1	1[a]	x_2	0.928	0.687
T_2 [K]	4586 (60)	g_2	0.32[a]	L_1/L_T	0.887 (2)	0.819 (2)
Ω_1	5.26 (3)			L_2/L_T	0.043 (1)	0.098 (1)
Ω_2	2.08[a]			L_3/L_T	0.070 (2)	0.084 (2)
		Σres^2	0.066	$<L_3/L_T>$ (%)	7.7 (2)	

[a]σταθερή τιμή, [b]υπόθεση

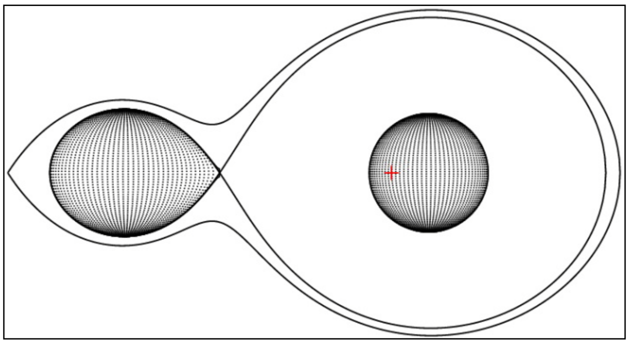
οδος ανίχνευσης του q (q-search - βλ. §4.1) στους “modes” 2 και 5, όπου στον τελευταίο προέκυψε η μικρότερη τιμή των $\sum res^2$. Το διάγραμμα ανίχνευσης του q παρουσιάζεται στην εικ. 7.96. Στην εικ. 7.97 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 7.98 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος, ενώ στον πίνακα 7.74 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος.



Εικόνα 7.96. Διάγραμμα ανίχνευσης του q για το σύστημα UZ Sge. Η τιμή του q που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή των $\sum res^2$ βρέθηκε ίση με 0.15 στον “mode” 5.



Εικόνα 7.97. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες φωτός του συστήματος UZ Sge στα φίλτρα *B* και *R*.



Εικόνα 7.98. Η γεωμετρία Roche του συστήματος UZ Sge στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό.

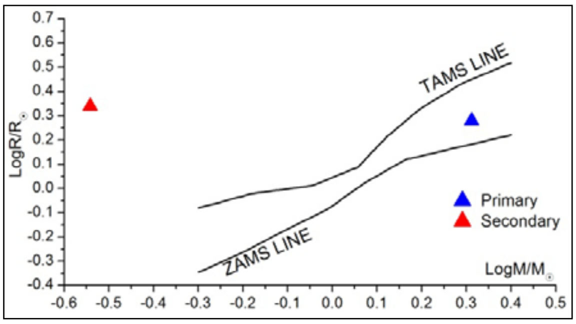
Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Η τιμή της μάζας M_1 του πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος υποτέθηκε από τον φασματικό του τύπο ως αστέρας της ΚΑ (βλ. Παρ. Ε) και δίνεται μαζί με τις τιμές των υπολοίπων παραμέτρων στον πίνακα 7.75. Η εικ. 7.99 δείχνει τις θέσεις των αστέρων στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.

Πίνακας 7.75. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος UZ Sge.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [$M_\odot$]	2.05[a]	0.29 (2)	log$g$ [cm/s^2]	4.2 (1)	3.2 (1)
R [$R_\odot$]	1.9 (2)	2.2 (2)	α [$R_\odot$]	1.2 (8)	8.6 (6)
L [$L_\odot$]	19 (4)	1.9 (4)	M_{bol} [mag]	1.6 (2)	4.0 (2)

[a]υπόθεση



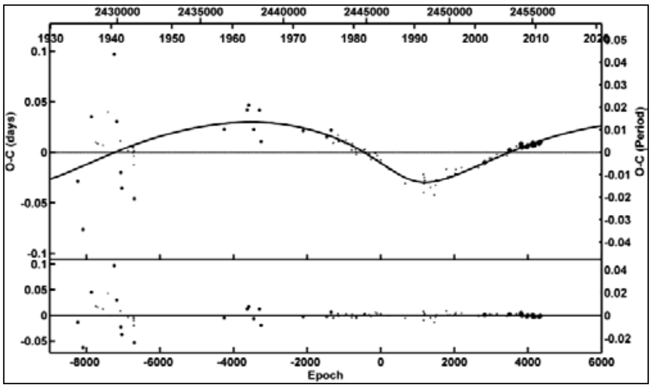
Εικόνα 7.99. Θέσεις των αστέρων του συστήματος UZ Sge (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

Ανάλυση των μεταβολών της τροχιακής περιόδου

Για την κατασκευή του O−C διαγράμματος του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν 102 χρόνοι ελαχίστων, 70 εκ των οποίων προέκυψαν από οπτικές παρατηρήσεις, 17 από φωτογραφικές και 15 από CCD παρατηρήσεις, οι οποίοι καλύπτουν χρονικό εύρος από το 1935 έως και σήμερα. Ως αρχική παράμετρος χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω αστρονομική εφημερίδα (Kreiner et al. 2001):

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2445861.4115\ + 2.2157426^{\mathrm{d}}\mathrm{E} \qquad (7.27)$$

Ως συνάρτηση προσαρμογής δοκιμάστηκε η κυρτή παραβολή, λόγω πιθανής μεταφοράς μάζας και μια καμπύλη LITE, λόγω της εμφανούς περιοδικής κατανομής των O−C σημείων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο συντελεστής της παραβολής είναι αμελητέος, επομένως δεν συμπεριλαμβάνεται στο τελικό μοντέλο. Η μέθοδος ανάλυσης και η επεξήγηση των συμβόλων αναφέρονται στην παράγραφο 4.2. Ο πίνακας 7.76 περιέχει τις τιμές των παραμέτρων της λύσης, ενώ στην εικ. 7.100 παρουσιάζεται η προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης στα O−C σημεία.



Εικόνα 7.100. Προσαρμογή μιας κυρτής παραβολής στα O−C σημεία του συστήματος UZ Sge (επάνω) και τα υπόλοιπα (residuals) μετά την αφαίρεσή της (κάτω).

Πίνακας 7.76. Παράμετροι της O−C ανάλυσης του συστήματος UZ Sge.

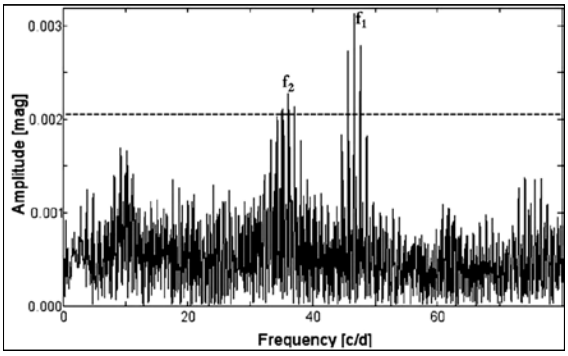
Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
Εκλειπτικό σύστημα		3° σώμα	
JD_0 [HJD−2400000]	45861.421 (2)	P_3 [yr]	65 (2)
P [d]	2.215746 (1)	e_3	0.5 (1)
Μεταβολή της τετραπολικής ροπής		ω_3 [°]	243 (23)
ΔQ [$\times 10^{50}$ g cm^2]	2.31	$f(m_3)$ [$M_\odot$]	0.03 (1)
LITE		$M_{3,min}$ [$M_\odot$]	0.7 (1)
T_0 [HJD−2400000]	47637 (1350)		
A [d]	0.030(3)	Σres^2	0.116

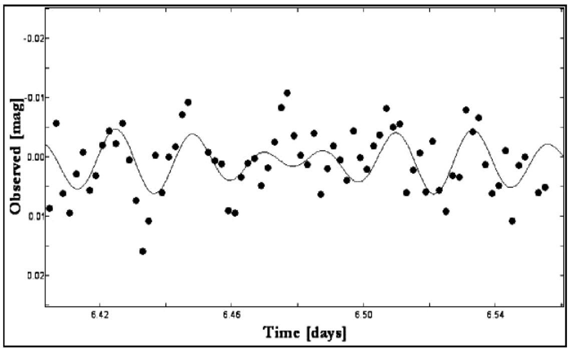
Εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης

Η μέθοδος για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης και η επεξήγηση των συμβόλων παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.3. Εντοπίστηκαν δύο συχνότητες ανάπαλσης σε όλα τα φίλτρα στα οποία έγιναν οι παρατηρήσεις. Ο λόγος συχνοτήτων f_2/f_1 είναι ~0.75 και είναι τυπικός για τη θεμελιώδη συχνότητα ακτινικής ανάπαλσης και τη συχνότητα του πρώτου απόηχου (first overtone; βλ. §1.3.1). Στον πίνακα 7.77 δίνονται οι παράμετροι της ανάπαλσης, ενώ στην εικ. 7.101 παρουσιάζονται τα φάσματα συχνοτήτων και η προσαρμογή της συνάρτησης Fourier σε τμήμα των παρατηρησιακών δεδομένων.

Πίνακας 7.77. Αποτελέσματα της ανάλυσης για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης του συστήματος UZ Sge.

No.	l	Φίλτρο	f [c/d]	A [mmag]	Φ [°]	S/N
f_1	3	B	46.652 (6)	3.1 (3)	354 (6)	7.1
		R	46.650 (14)	1.7 (3)	18 (11)	4.2
f_2	0 ή 1	B	34.319 (9)	2.0 (3)	195 (10)	4.0
		R	34.319 (9)	1.8 (3)	197 (10)	4.0





Εικόνα 7.101. Αριστερά: Φάσμα συχνοτήτων του παλλόμενου αστέρα του συστήματος UZ Sge, στο οποίο σημειώνεται η συχνότητα ανάπαλσης που εντοπίστηκε και το κατώτερο όριο (4σ) αξιόπιστων συχνοτήτων ανάπαλσης (διακεκομμένη γραμμή). Δεξιά: Προσαρμογή της καμπύλης Fourier στα φωτομετρικά σημεία της νύκτας με τη μεγαλύτερη διάρκεια παρατήρησης.

Συμπεράσματα

Το σύστημα είναι κλασσικός Algol με τον δευτερεύοντα αστέρα να γεμίζει τον λοβό Roche του. Ο πρωτεύων αστέρας είναι κοντά στη ZAMS (εικ. 7.99) και είναι τύπου δ Sct. Βάσει της τιμής της κυρίαρχης συχνότητας ανάπαλσής του, αλλά και της εξελικτικής του φάσης, συμπεραίνεται ότι η φάση αναπάλσεών του έχει ξεκινήσει σχετικά πρόσφατα (Liakos et al. 2012b, επίσης βλ. §7.21.5). Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, το σύστημα μπορεί συμπεριληφθεί στους αστέρες τύπου oEA, αν και δεν βρέθηκαν ίχνη μεταφοράς μάζας. Είναι όμως πολύ πιθανό η μεταφορά μάζας να έχει σταματήσει ή να έχει πολύ μικρό ρυθμό (slow mass accretion stage; Mkrtichian et al. 2003) για να εντοπιστεί από την O−C ανάλυση. Σύμφωνα με τις μάζες και την εξελικτική κατάσταση των μελών, εύλογα προκύπτει ότι ο δευτερεύων αστέρας έχει ήδη μεταφέρει μεγάλο μέρος της μάζας του στον πρωτεύοντα, επομένως το πιθανότερο σενάριο εξέλιξης είναι η περίπτωση Β (βλ. §1.2.4).

Από την O−C ανάλυση βρέθηκε ότι η τροχιακή περίοδος του συστήματος μεταβάλλεται περιοδικά μέσα σε ~65 έτη. Από την ανάλυση των καμπυλών φωτός προέκυψε η ύπαρξη επιπρόσθετης φωτομετρικής συνεισφοράς ίσης με $L_{3,LC}$~7.5%. Αν η μεταβολή της τροχιακής περιόδου προκαλείται από τρίτο σώμα ελάχιστης μάζας 0.7 $M_\odot$, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του LITE, και είναι αστέρας της ΚΑ, τότε αναμένεται να συνεισφέρει στη συνολική φωτεινότητα $L_{3,O-C}$~1.4%. Αυτή η μεγάλη διαφορά μεταξύ παρατηρούμενης και αναμενόμενης επιπρόσθετης φωτομετρικής συνεισφοράς αίρεται με την υπόθεση ότι οι τροχιές του εκλειπτικού συστήματος και του τρίτου μέλους δεν είναι συνεπίπεδες αλλά σχηματίζουν γωνία ~50°. Σύμφωνα με αυτήν την τιμή της γωνίας και τη συνάρτηση μάζας του τρίτου μέλους (βλ. σχέση 4.17), προκύπτει ότι η μάζα του είναι 1.2 $M_\odot$, η οποία μπορεί να ικανοποιήσει την παρατηρούμενη συνεισφορά του στην ολική φωτεινότητα. Ωστόσο, το σύστημα για M_3>0.85 $M_\odot$ προκύπτει δυναμικά ασταθές σύμφωνα με το κριτήριο του Harrington (1977). Εναλλακτικά, ο μηχανισμός Applegate (1992) δύναται να ερμηνεύσει τις τροχιακές μεταβολές. Φασματοσκοπικές ή/και αστρομετρικές παρατηρήσεις αναμένεται ότι θα δώσουν μελλοντικά τελικές απαντήσεις για το ζήτημα του μηχανισμού διαμόρφωσης της περιόδου του συστήματος.

7.18. Το σύστημα IO UMa

Ιστορική αναδρομή

Το σύστημα ανακαλύφθηκε από την αποστολή "HIPPARCOS" (ESA 1997). Οι Grenier et al. (1999) υπολόγισαν τη συστημική ταχύτητα (γ=10 km/sec) και εκτίμησαν τον φασματικό του τύπο ως A6III. Πολλοί κατάλογοι (π.χ. Budding et al. 2004, Kharchenko 2001, Wright et al. 2003) αναφέρουν τον φασματικό τύπο του συστήματος ως A3, αλλά οι Prugniel et al. (2007) βάσει φασματοσκοπικών παρατηρήσεων προσδιόρισαν τη θερμοκρασία του θερμότερου αστέρα του συστήματος ως 7600 K. Οι Liakos et al. (2012b) με νέες παρατηρήσεις ανακάλυψαν ότι στο σύστημα λαμβάνουν χώρα αναπάλσεις.

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζεται το φωτομετρικό μοντέλο του συστήματος, ο υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων των αστέρων-μελών του και οι παράμετροι των αναπάλσεων.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι φωτομετρικές παρατηρήσεις του συστήματος πραγματοποιήθηκαν στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1) με τη χρήση τόσο του τηλεσκοπίου των 20 cm και της CCD ST-8XMEI όσο και με το τηλεσκόπιο των 40 cm και της CCD ST-10XME. Διήρκεσαν 47 νύκτες σε χρονικό εύρος 86 ημερών στο χρονικό διάστημα Απρίλιος-Ιούνιος 2010. Στον πίνακα 7.78 δίνονται: Οι αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία (βλ. §3.1.1) και τα φαινόμενα μεγέθη τους m_V στο φίλτρο V, ο αριθμός των σημείων N ανά φίλτρο παρατήρησης και το μέσο φωτομετρικό σφάλμα τους *s.d.* εκφρασμένο σε mmag. Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\mathrm{Min.\,I} = \mathrm{HJD}\ 2455367.39453 + 5.52017^{\mathrm{d}}\ \mathrm{E} \tag{7.28}$$

και υπολογίστηκε από τους χρόνους ελαχίστων (Πίνακας B1), οι οποίοι προέκυψαν από τα δεδομένα μας και τους πιο πρόσφατους της βιβλιογραφίας.

Πίνακας 7.78. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους.

Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για κάθε φίλτρο παρατήρησης							
IO UMa	Μεταβλητός	8.19[a]	B		V		R		I	
TYC 3849-258-1	Σύγκρισης	8.81[b]	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.
TYC 3849-125-1	Ελέγχου	11.23[b]	4275	1.5	4246	1.6	4304	1.7	4288	1.7

[a]Watson et al. (2006), [b]Høg et al. (2000)

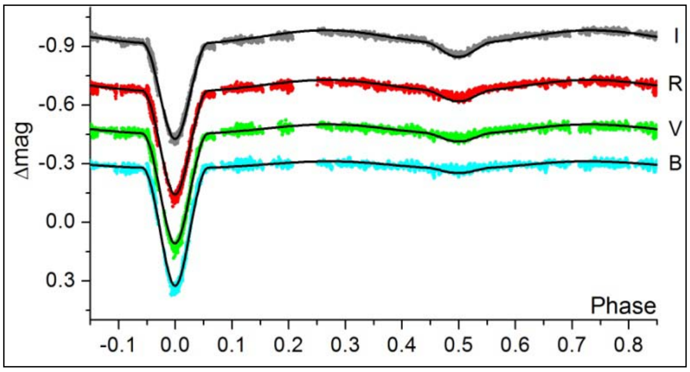
Ανάλυση των καμπυλών φωτός

Φασματοσκοπικές παρατηρήσεις έλαβαν χώρα από ερευνητική ομάδα στο Πανεπιστήμιο του Çanakkale με επικεφαλής την Dr. Esin Soydugan, αλλά έως τώρα δεν έχει προετοιμαστεί η σχετική εργασία. Ύστερα από προσωπική επικοινωνία μας δόθηκε ο φασματοσκοπικός λόγος μαζών (q_{sp}=0.145 (3)). Ο φασματικός τύπος του συστήματος κυμαίνεται μεταξύ A4-A8 και η επίλυση των καμπυλών φωτός πραγματοποιήθηκε με αρχικές θερμοκρασίες T_1 στο εύρος αυτών φασματικών τύπων ήτοι 8700 K-7600 K και στους "modes" 2 και 5, με τον "mode" 5 να δίνει την καλύτερη δυνατή λύση. Η τελική θερμοκρασία T_1 επιλέχθηκε βάσει της μικρότερης τιμής των $\sum res^2$. Στην εικ. 7.102 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 7.103 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος, ενώ στον πίνακα 7.79 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος.

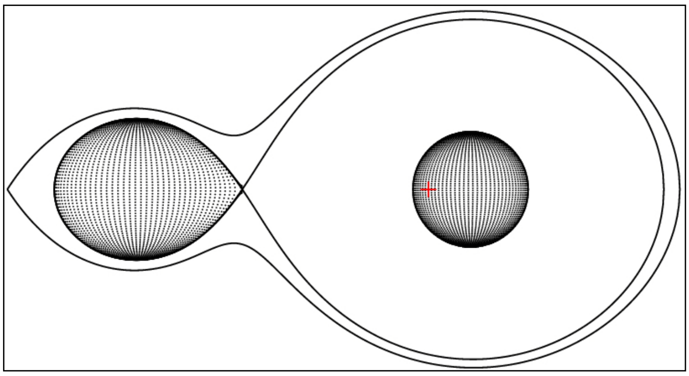
Πίνακας 7.79. Παράμετροι του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα IO UMa.

Παρ.	Τιμή	Παρ.	Τιμή	Παρ.	Τιμή			
i [°]	78.43 (1)	A_1	1[a]	Φίλτρο:	B	V	R	I
q_{sp}	0.145[a]	A_2	0.5[a]	x_1	0.526	0.474	0.407	0.335
T_1 [K]	8500[a,b]	g_1	1[a]	x_2	0.880	0.736	0.634	0.532
T_2 [K]	4907 (3)	g_2	0.32[a]	L_1/L_T	0.907 (1)	0.852 (1)	0.807 (1)	0.754 (1)
Ω_1	5.91 (1)			L_2/L_T	0.093 (1)	0.148 (1)	0.193 (1)	0.246 (1)
Ω_2	2.09			Σres^2	2.13			

[a]σταθερή τιμή, [b]υπόθεση



Εικόνα 7.102. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες φωτός στα φίλτρα *B*, *V*, *R*, *I* του συστήματος IO UMa.



Εικόνα 7.103. Η γεωμετρία Roche του συστήματος IO UMa στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό.

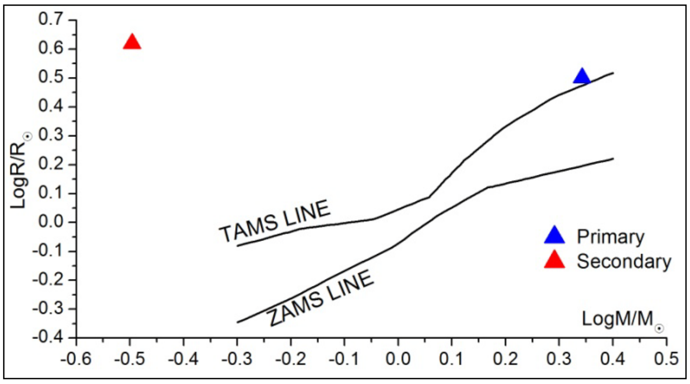
Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Η τιμή της μάζας M_1 του πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος υποτέθηκε από τον φασματικό του τύπο ως αστέρας της ΚΑ (βλ. Παρ. Ε) και δίνεται μαζί με τις τιμές των υπολοίπων παραμέτρων στον πίνακα 7.80 δίνονται οι απόλυτες παράμετροι των αστέρων-μελών και η εικ. 7.104 δείχνει τις θέσεις τους στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.

Πίνακας 7.80. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος IO UMa.

Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [$M_\odot$]	2.2[a]	0.32 (1)	log$g$ [cm/s^2]	3.78 (3)	2.70 (2)
R [$R_\odot$]	3.17 (2)	4.17 (1)	α [$R_\odot$]	2.32 (4)	15.99 (3)
L [$L_\odot$]	47 (1)	9.0 (1)	M_{bol} [mag]	0.57 (3)	2.39 (2)

[a]υπόθεση



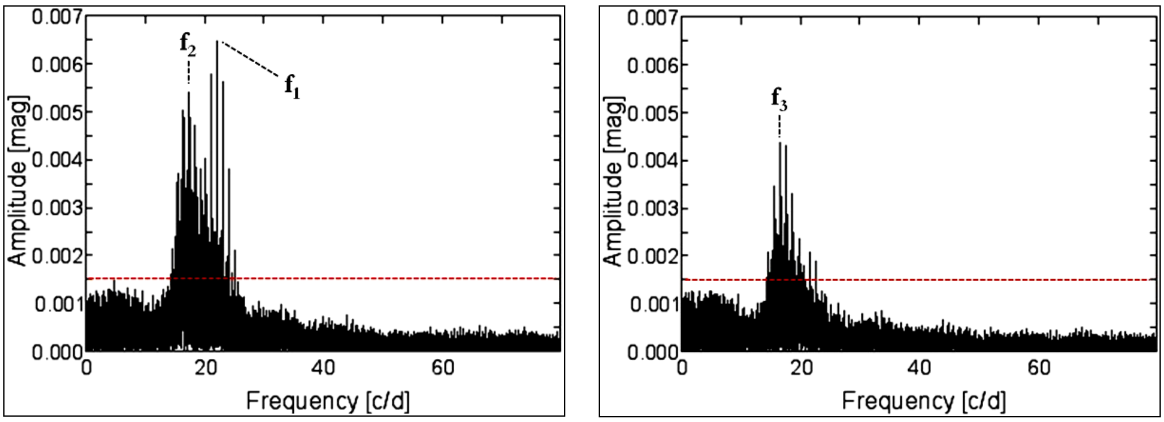
Εικόνα 7.104. Θέσεις των αστέρων του συστήματος IO UMa (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

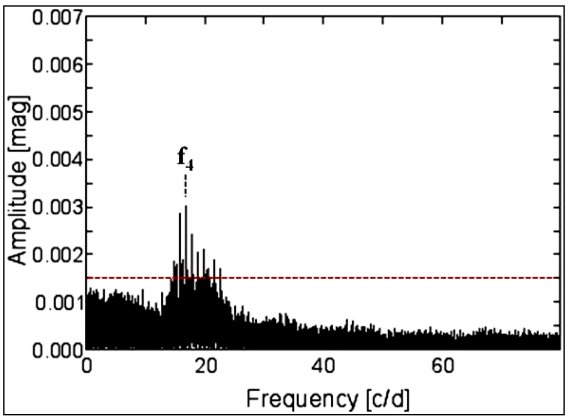
Εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης

Η μέθοδος για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης και η επεξήγηση των συμβόλων παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.3. Εντοπίστηκαν τέσσερις συχνότητες ανάπαλσης σε όλα τα φίλτρα στα οποία έγιναν οι παρατηρήσεις. Ο λόγος συχνοτήτων f_3/f_1 είναι ~0.75 και είναι τυπικός για τη θεμελιώδη συχνότητα ακτινικής ανάπαλσης και τη συχνότητα του πρώτου απόηχου (first overtone; βλ. §1.3.1). Στον πίνακα 7.81 δίνονται οι παράμετροι της ανάπαλσης, ενώ στις εικ. 7.105-7.106 παρουσιάζονται τα φάσματα συχνοτήτων και η προσαρμογή της συνάρτησης Fourier σε τμήμα των παρατηρησιακών δεδομένων, αντίστοιχα.

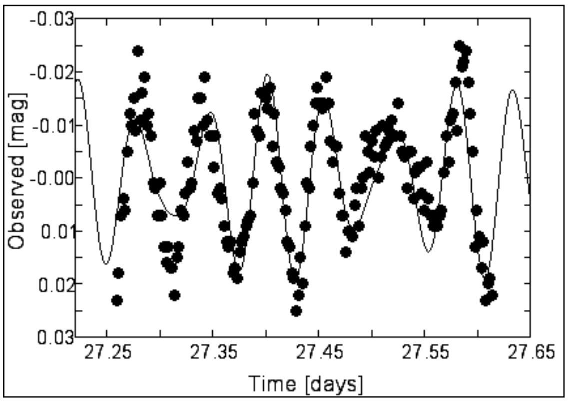
Πίνακας 7.81. Αποτελέσματα της ανάλυσης για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης του συστήματος IO UMa.

No.	l	Φίλτρο	f [c/d]	A [mmag]	Φ [°]	S/N
f_1	0	B	22.0153 (2)	6.4 (2)	171 (2)	10.9
		V	22.0158 (2)	4.9 (2)	164 (2)	9.8
		R	22.0145 (3)	3.9 (2)	186 (3)	8.5
		I	22.0164 (3)	3.1 (1)	170 (3)	9
f_2	2	B	17.3054 (2)	5.3 (2)	207 (2)	10.4
		V	17.3052 (3)	4.3 (2)	212 (2)	9.9
		R	17.3061 (4)	2.8 (2)	203 (4)	7.3
		I	17.3066 (5)	2.2 (1)	207 (4)	7.2
f_3	2 ή 3	B	16.5977 (2)	4.6 (2)	348 (3)	9.3
		V	16.5967 (3)	3.5 (2)	4 (3)	8.4
		R	16.5975 (5)	2.4 (2)	349 (4)	6.2
		I	16.5958 (5)	2.2 (1)	23 (4)	7.2
f_4	2 ή 3	B	16.8825 (3)	3.5 (2)	48 (3)	6.9
		V	16.8817 (4)	2.8 (2)	57 (4)	6.6
		R	16.8828 (6)	1.9 (2)	44 (5)	5.0
		I	16.8831 (8)	1.3 (1)	54 (6)	4.2





Εικόνα 7.105. Φάσματα συχνοτήτων στο *B* φίλτρο του παλλόμενου αστέρα του συστήματος IO UMa, στα οποία σημειώνονται οι συχνότητες ανάπαλσης που εντοπίστηκαν και το κατώτερο όριο (4σ) αξιόπιστων συχνοτήτων ανάπαλσης (διακεκομμένη γραμμή).



Εικόνα 7.106. Προσαρμογή της καμπύλης Fourier στα φωτομετρικά σημεία της νύκτας με τη μεγαλύτερη διάρκεια παρατήρησης.

Συμπεράσματα

Ο πρωτεύων αστέρας του συστήματος βρίσκεται λίγο πάνω από την TAMS (εικ. 7.104) και αναπάλλεται με τέσσερις συχνότητες με κυρίαρχη ~22.0156 c/d. Δύο εκ των συχνοτήτων (f_3 και f_4) έχουν κοντινές τιμές (απέχουν ~0.29 c/d) και η διαφορά τους ικανοποιεί το κριτήριο των Loumos & Deeming (1978) (επίσης βλ. §4.3) αναφορικά με την ελάχιστη «απόσταση» που πρέπει να έχουν ώστε να μπορούν να διακριθούν σαν δύο ξεχωριστές. Στην περίπτωση αυτή βρέθηκε ότι το κατώτερο όριο διάκρισης είναι 0.02 c/d. Ο δευτερεύων αστέρας έχει ήδη εξελιχθεί σε γίγαντα, ενώ γεμίζει και τον λοβό Roche του. Επομένως, το σύστημα μπορεί να θεωρηθεί τύπου oEA, αν και προς το παρόν, καθότι το σύστημα έχει ανακαλυφθεί πρόσφατα, δεν υπάρχει διαθέσιμο το O−C διάγραμμά του, ώστε να φανεί η πιθανή μεταφορά μάζας. Σύμφωνα και με τις τιμές των μαζών των αστέρων-μελών αλλά και της τωρινής εξελικτικής τους κατάστασης, το σύστημα πρέπει να εξελίσσεται σύμφωνα με την περίπτωση B (βλ. §1.2.4).

7.19. Το σύστημα VV UMa

Ιστορική αναδρομή

Το σύστημα ανακαλύφθηκε ως μεταβλητός από τον Gitz (1936). O Struve (1950) υπολόγισε τη συνάρτηση μάζας του συστήματος και το ταξινόμησε ως τύπου A0. O Wilson (1965) και οι Broglia & Conconi (1977) παρουσίασαν τις φωτοηλεκτρικές καμπύλες φωτός του συστήματος στα φίλτρα *U*, *B*, *V*, βάσει των οποίων ο Horak (1966) και ο Rafert (1990) έκαναν το φωτομετρικό του μοντέλο. Σύμφωνα με τη MK ταξινόμηση των Hilditch & Hill (1975) και των Hill et al. (1975) το σύστημα είναι τύπου A2V. O Šimon (1996) ανέλυσε το O−C διάγραμμά του και ερμήνευσε τις μεταβολές της περιόδου σύμφωνα με το LITE, αφήνοντας πάντως ανοιχτό το ενδεχόμενο να οφείλονται και στον μηχανισμό Applegate (1992). Οι Arévalo et al. (2001) παρουσίασαν τις πρώτες CCD παρατηρήσεις στα φίλτρα *B*, *V*, *R*. Οι Lázaro et al. (2001, 2002) ανέλυσαν τις καμπύλες φωτός στα φίλτρα *UBVYβ* και *BVRJK* και εντόπισαν φωτομετρικές μεταβολές μικρού πλάτους. Οι Kim et al. (2005a) ερμήνευσαν αυτές τις μεταβολές ως αναπάλσεις από τον θερμότερο αστέρα του συστήματος και εντόπισαν δύο συχνότητες.

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζεται το νέο φωτομετρικό μοντέλο του συστήματος, βάσει του οποίου προέκυψαν και οι απόλυτες παράμετροι των αστέρων-μελών του. Επιπροσθέτως, παρουσιάζονται τόσο η ανάλυση Fourier όσο και η επικαιροποιημένη ανάλυση του O−C διαγράμματός του.

Παρατηρήσεις και επεξεργασία των δεδομένων

Οι φωτομετρικές παρατηρήσεις του συστήματος έγιναν στο Γεροσταθοπούλειο πανεπιστημιακό αστεροσκοπείο (βλ. §2.3.1) με τη χρήση του τηλεσκοπίου των 40 cm σε δύο φάσεις: α) Τρεις νύκτες στο διάστημα 23-28 Δεκεμβρίου 2006 με τη χρήση της CCD ST-8XMEI στα φίλτρα *V*, *R*, *I* και β) επτά νύκτες στο διάστημα Μάρτιος-Απρίλιος 2010 με τη χρήση της CCD ST-10XME στο φίλτρο *B*. Στον πίνακα 7.82 δίνονται: Οι αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν στη φωτομετρία (βλ. §3.1.1) και τα φαινόμενα μεγέθη τους m_V στο φίλτρο *V*, ο αριθμός των σημείων *N* ανά φίλτρο παρατήρησης και το μέσο φωτομετρικό σφάλμα τους *s.d.* εκφρασμένο σε mmag. Η αστρονομική εφημερίδα (βλ. §3.1.3), η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του διαγράμματος φάσης, είναι η:

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2452500.0537 + 0.68738^{\mathrm{d}}\ \mathrm{E} \tag{7.29}$$

και υπολογίστηκε από τους χρόνους ελαχίστων (Πίνακας Β1), οι οποίοι προέκυψαν από τα δεδομένα μας και τους πιο πρόσφατους της βιβλιογραφίας.

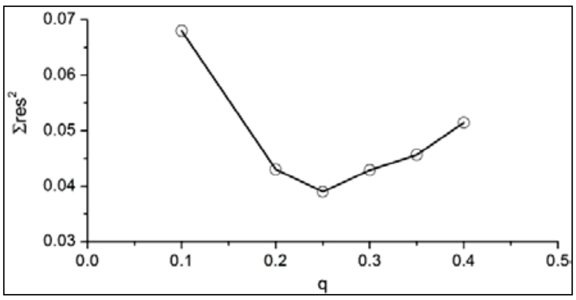
Πίνακας 7.82. Λεπτομέρειες αναφορικά με τους αστέρες που χρησιμοποιήθηκαν, τα παρατηρησιακά δεδομένα και την επεξεργασία τους.

Αστέρας	Χρήση στη φωτομετρία	m_V [mag]	Αριθμός σημείων και φωτομετρικό σφάλμα (mmag) για κάθε φίλτρο παρατήρησης							
VV UMa	Μεταβλητός	10.13[a]	B		V		R		I	
TYC 3810-1503-1	Σύγκρισης	10.19[b]	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.	N	s.d.
TYC 3810-1500-1	Ελέγχου	10.98[b]	1364	3.0	624	5.7	620	5.9	615	5.1

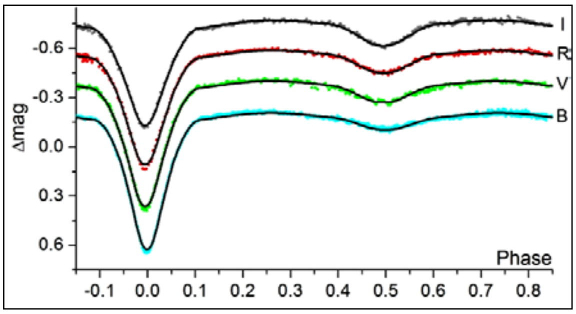
[a]Watson et al. (2006), [b]Høg et al. (2000)

Ανάλυση των καμπυλών φωτός

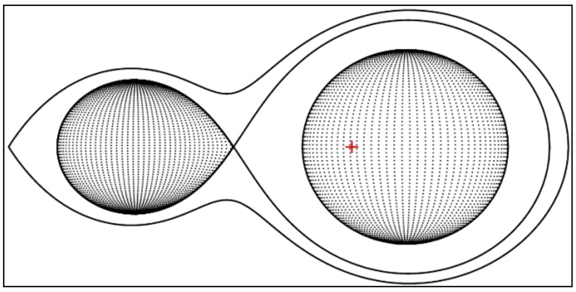
Αν και τα δεδομένα ελήφθησαν σε διαφορετικές χρονικές περιόδους, εντούτοις, καθώς δεν παρουσιάστηκαν ασυμμετρίες στις καμπύλες φωτός (π.χ. O'Connell effect), χρησιμοποιήθηκαν όλα σε μια κοινή ανάλυση. Η θερμοκρασία του πρωτεύοντα αστέρα τέθηκε ίση με 9000 K (Hilditch & Hill 1975, Hill et al. 1975). Λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων (βλ. παρακάτω), η οποία δύναται να ερμηνευτεί με το LITE (§4.2.1), η παράμετρος της φωτομετρικής συνεισφοράς από ένα πιθανό τρίτο μέλος στο σύστημα l_3 αφέθηκε ελεύθερη προς σύγκλιση. Λόγω ανυπαρξίας φασματοσκοπικά προσδιορισμένου λόγου μαζών των αστέρων του συστήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ανίχνευσης του *q* (*q*-search - βλ. §4.1) στους "modes" 2 και 5, και η καλύτερη λύση επιτεύχθηκε στον "mode" 5. Το αντίστοιχο διάγραμμα παρουσιάζεται στην εικ. 7.107. Στην εικ. 7.108 παρουσιάζονται οι προσαρμογές των θεωρητικών καμπυλών φωτός επάνω στις παρατηρούμενες, στην εικ. 7.109 η γεωμετρική εικόνα του συστήματος, ενώ στον πίνακα 7.83 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος.



Εικόνα 7.107. Διάγραμμα ανίχνευσης του *q* στον "mode" 5 για το σύστημα VV UMa. Η τιμή του *q* που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή των $\sum res^2$ βρέθηκε ίση με 0.5.



Εικόνα 7.108. Θεωρητικές (συνεχείς γραμμές) και παρατηρούμενες (σημεία) καμπύλες φωτός στα φίλτρα *B*, *V*, *R*, *I* του συστήματος VV UMa.



Εικόνα 7.109. Η γεωμετρία Roche του συστήματος VV UMa στη φάση 0.75 με το κέντρο μάζας του συστήματος να σημειώνεται με κόκκινο σταυρό.

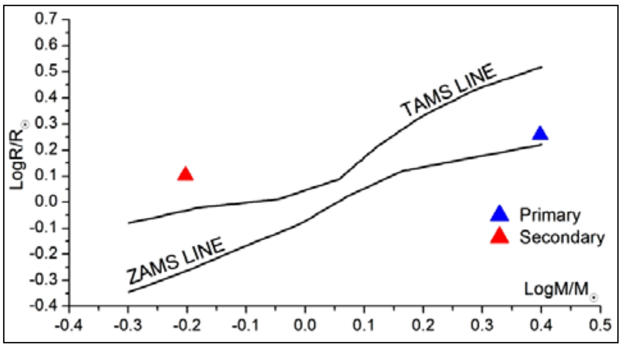
Πίνακας 7.83. Παράμετροι του μοντέλου καμπυλών φωτός για το σύστημα VV UMa.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή			
i [°]	83 (1)	Φίλτρο:	B	V	R	I
q_{ph}	0.25 (1)	x_1	0.537	0.458	0.380	0.299
T_1 [K]	9000[a]	x_2	0.821	0.670	0.595	0.507
T_2 [K]	5230 (75)	L_1/L_T	0.961 (2)	0.935 (4)	0.920 (4)	0.871 (4)
Ω_1	3.01 (4)	L_2/L_T	0.039 (2)	0.061 (2)	0.070 (2)	0.089 (2)
Ω_2	2.35[a]	L_3/L_T	0.000 (1)	0.003 (3)	0.010 (3)	0.040 (3)
A_1	1[a]	$\langle L_3/L_T \rangle$ (%)	1.4 (2)			
A_2	0.5[a]					
g_1	1[a]					
g_2	0.32[a]	Σres^2	0.085			

[a]σταθερή τιμή

Υπολογισμός των απόλυτων παραμέτρων

Η τιμή της μάζας M_1 του πρωτεύοντα αστέρα του συστήματος υποτέθηκε από τον φασματικό του τύπο ως αστέρας της ΚΑ (βλ. Παρ. Ε) και δίνεται μαζί με τις τιμές των υπολοίπων παραμέτρων στον πίνακα 7.66. Η εικ. 7.86 δείχνει τις θέσεις των αστέρων στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας.



Εικόνα 7.110. Θέσεις των αστέρων του συστήματος VV UMa (σύμβολα) στο διάγραμμα M−R.

Πίνακας 7.84. Απόλυτες παράμετροι των μελών του συστήματος VV UMa.

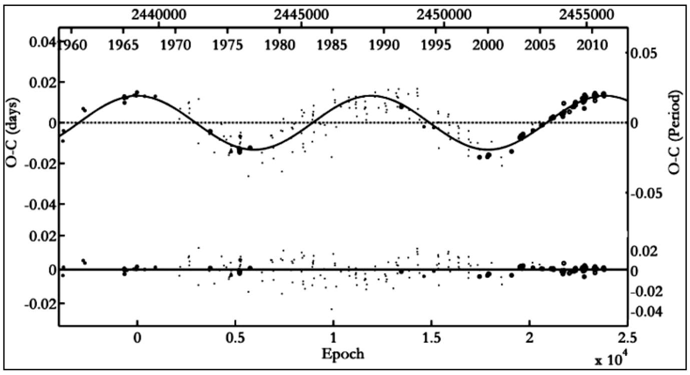
Παράμετρος	Τιμή		Παράμετρος	Τιμή	
Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον	Μέλος:	Πρωτεύον	Δευτερεύον
M [$M_\odot$]	2.5[a]	0.63 (2)	log$g$ [cm/s^2]	4.32 (1)	4.01 (1)
R [$R_\odot$]	1.81 (1)	1.30 (1)	α [$R_\odot$]	0.98 (2)	3.92 (1)
L [$L_\odot$]	19.4 (4)	1.14 (7)	M_{bol} [mag]	1.5 (2)	4.6 (4)

[a]υπόθεση

Ανάλυση των μεταβολών της τροχιακής περιόδου

Το O−C διάγραμμα του συστήματος περιέχει σε 238 χρόνους ελαχίστων, 140 εκ των οποίων προέκυψαν από οπτικές, 3 από φωτογραφικές, 19 από φωτοηλεκτρικές και 76 από CCD παρατηρήσεις και καλύπτουν χρονικό διάστημα από το 1960 έως και σήμερα. Υπάρχουν και άλλοι χρόνοι ελαχίστων πριν το 1960, οι οποίοι προέκυψαν από φωτογραφικές κυρίως παρατηρήσεις, αλλά λόγω της πολύ μεγάλης διασποράς που παρουσίαζαν επιλέχθηκε να αγνοηθούν από την ανάλυση. Ωστόσο, το πλήρες O−C διάγραμμα του συστήματος είναι διαθέσιμο σε βάση δεδομένων O−C διαγραμμάτων[1]. Ως αρχική παράμετρος χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω αστρονομική εφημερίδα (Kreiner et al. 2001):

$$\mathrm{Min.I} = \mathrm{HJD}\ 2439245.394 + 0.6873757^{\mathrm{d}}\mathrm{E} \tag{7.30}$$



Εικόνα 7.111. Προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης του LITE στα O−C σημεία του συστήματος VV UMa (επάνω) και τα υπόλοιπα (residuals) μετά την αφαίρεση της θεωρητικής καμπύλης (κάτω).

Πίνακας 7.85. Παράμετροι της O−C ανάλυσης του συστήματος VV UMa.

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
Εκλειπτικό σύστημα		3ο σώμα	
JD_0 [HJD−2400000]	39245.394 (1)	P_3 [yr]	22.5 (2)
P [d]	0.6873758 (1)	e_3	0.0
Μεταβολή της τετραπολικής ροπής		ω_3 [°]	-
ΔQ [$\times10^{50}$ g cm^2]	1.6	$f(m_3)$ [$M_\odot$]	0.024 (1)
LITE		$M_{3,min}$ [$M_\odot$]	0.71 (2)
T_0 [HJD−2400000]	-		
A [d]	0.013 (1)	Σres^2	0.008

[1]http://www.as.up.krakow.pl/o-c/data/getdata.php3?VV%20uma

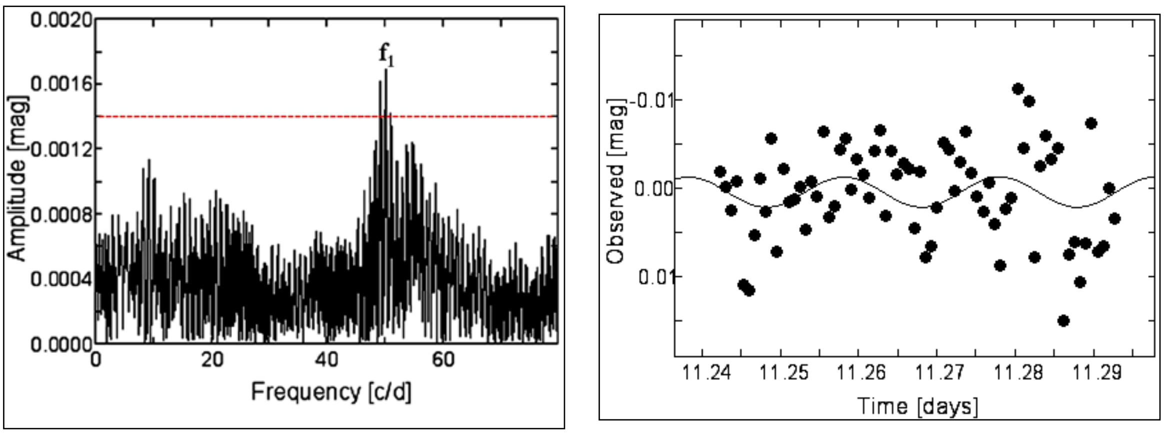
Λόγω της περιοδικής κατανομής των O−C σημείων, θεωρητικά μπορεί τόσο ο μηχανισμός Applegate (1992) (βλ. §4.2.4), λόγω του φασματικού τύπου του δευτερεύοντα αστέρα, όσο και το LITE (βλ. §4.2.1) να περιγράψουν τις μεταβολές της τροχιακής περιόδου. Επομένως, μια περιοδική συνάρτηση LITE προσαρμόστηκε στα O−C σημεία (εικ. 7.111) και τα αποτελέσματα και για τους δύο μηχανισμούς δίνονται στον πίνακα 7.85.

Εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης

Η μέθοδος για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης και η επεξήγηση των συμβόλων παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.3. Στα δεδομένα των φίλτρων *V*, *R*, *I* δεν εντοπίστηκαν συχνότητες ανάπαλσης, καθώς δεν υπήρχε η κατάλληλη χρονική διακριτική ικανότητα. Αντίθετα, στα δεδομένα του φίλτρου *B*, όπου επιτεύχθηκε ικανοποιητική χρονική διακριτική ικανότητα εντοπίστηκε μόνο μια συχνότητα ανάπαλσης με S/N>4, ενώ, λόγω του ότι οι παρατηρήσεις έγιναν μόνο στο *B* φίλτρο, δεν υπολογίστηκαν οι αριθμοί-*l*. Στον πίνακα 7.86 δίνονται οι παράμετροι της ανάπαλσης, ενώ στην εικ. 7.112 παρουσιάζεται το φάσμα συχνοτήτων και η προσαρμογή της συνάρτησης Fourier σε τμήμα των παρατηρησιακών δεδομένων.

Πίνακας 7.86. Αποτελέσματα της ανάλυσης για την εύρεση των συχνοτήτων ανάπαλσης του συστήματος VV UMa στο *B* φίλτρο.

No.	f [c/d]	A [mmag]	Φ [°]	S/N
f_1	51.299 (9)	1.7 (2)	167 (10)	4.0



Εικόνα 7.112. Αριστερά: Φάσμα συχνοτήτων του παλλόμενου αστέρα του συστήματος VV UMa, στο οποίο σημειώνεται η συχνότητα ανάπαλσης που εντοπίστηκε και το κατώτερο όριο (4σ) αξιόπιστων συχνοτήτων ανάπαλσης (διακεκομμένη γραμμή). Δεξιά: Προσαρμογή της καμπύλης Fourier στα φωτομετρικά σημεία της νύκτας με τη μεγαλύτερη διάρκεια παρατήρησης.

Συμπεράσματα

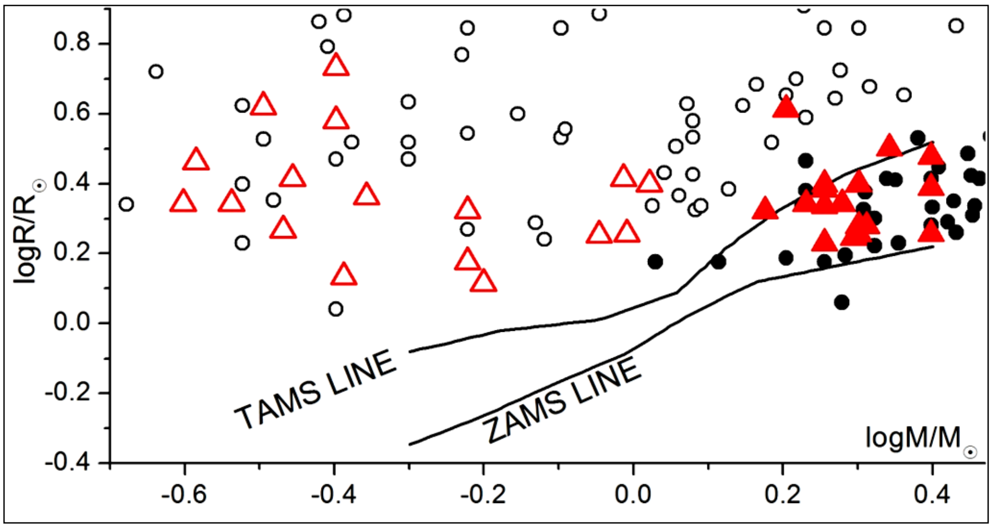
Το σύστημα είναι ημιαποχωρισμένο με τον δευτερεύοντα αστέρα να γεμίζει τον λοβό Roche του, ενώ ο πρωτεύων αστέρας βρίσκεται επάνω στην ΚΑ και είναι τύπου δ Sct. Επομένως, σύμφωνα με αυτά τα στοιχεία το σύστημα μπορεί να θεωρηθεί τύπου oEA. Ο πρωτεύων αστέρας είναι μικρής ηλικίας, καθώς είναι στο όριο της ZAMS (εικ. 7.111), ενώ ο δευτερεύων είναι πιο εξελιγμένος και εντοπίζεται λίγο μετά την TAMS. Κρίνοντας από τις τιμές των μαζών και τις εξελικτικές καταστάσεις των αστέρων, κατά το παρελθόν του συστήματος πρέπει να υπήρξε μεταφορά μάζας από τον δευτερεύοντα προς τον πρωτεύοντα, και λόγω της ηλικίας του πρωτεύοντα, συμπεραίνεται ότι το σύστημα εξελίσσεται σύμφωνα με την περίπτωση A (βλ. §1.2.4). Λόγω της μικρής ηλικίας του πρωτεύοντα, και σύμφωνα με τη σχέση log$P_{\rm puls}$-log$g$ των Liakos et al. (2012b) (επίσης βλ. §7.21.5) συμπεραίνεται ότι ο αστέρας έχει εισέλθει σχετικά πρόσφατα στη φάση των αναπάλσεων. Τα τωρινά αποτελέσματα αναφορικά με τη συχνότητα ανάπαλσης είναι σε πολύ καλή συμφωνία με εκείνα των Kim et al. (2005a).

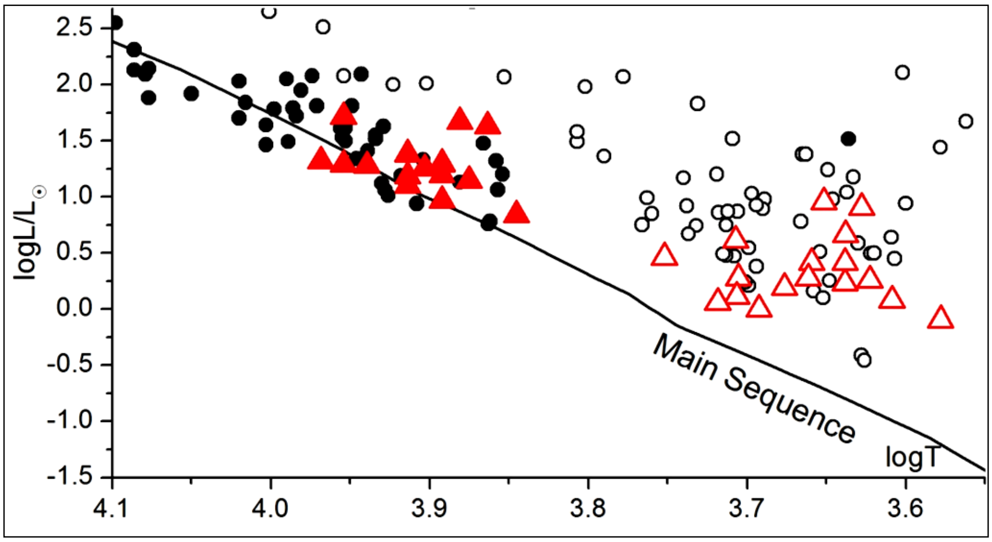
Από την O−C ανάλυση του συστήματος δεν προέκυψε κάποια μεταβολή της περιόδου, η οποία να σχετίζεται με την ύπαρξη πιθανής μεταφοράς μάζας. Είναι πολύ πιθανόν είτε να έχει σταματήσει είτε να έχει πολύ μικρό ρυθμό (slow mass accretion stage; Mkrtichian et al. 2003) ώστε να εντοπιστεί από τους διαθέσιμους χρόνους ελαχίστων. Το LITE είναι η πιθανότερη ερμηνεία των περιοδικών μεταβολών της τροχιακής περιόδου. Σύμφωνα με αυτόν τον μηχανισμό προέκυψε η ύπαρξη τρίτου σώματος με ελάχιστη μάζα ~0.7 $M_{\odot}$. Εάν αυτό το σώμα είναι αστέρας της ΚΑ, τότε η αναμενόμενη φωτομετρική συνεισφορά του είναι $L_{3,\rm O-C}$~1.4%. Από την ανάλυση των καμπυλών φωτός βρέθηκε μια επιπρόσθετη φωτομετρική συνεισφοράς της τάξης του $L_{3,\rm LC}$~1.4%. Επιπλέον, η ύπαρξη ενός τρίτου μέλους με αυτήν τη μάζα ικανοποιεί το κριτήριο της δυναμικής ευστάθειας του Harrington (1977). Ωστόσο, αν και οι τιμές της παρατηρούμενης και της αναμενόμενης φωτομετρικής συνεισφοράς από τρίτο μέλος στο σύστημα φαίνεται να αλληλοϋποστηρίζονται, εντούτοις είναι πολύ μικρές και εμπίπτουν στα όρια του σφάλματος της λύσης. Επομένως, συμπεραίνεται ότι η υπόθεση του τρίτου σώματος χρειάζεται επιπλέον επιβεβαίωση από άλλες μεθόδους (π.χ. αστρομετρία). Εναλλακτικά, ο μηχανισμός Applegate (1992) μπορεί να περιγράψει τις μεταβολές.

7.20. Συγκρίσεις με θεωρητικά μοντέλα και σχόλια

Κατ' αντιστοιχία με τα προηγούμενα δύο κεφάλαια, οι αστέρες-μέλη των συστημάτων που αναλύθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο αντιμετωπίζονται αρχικά ως κοινά διπλά συστήματα και συγκρίνονται με τους αστέρες του δείγματος των İbanoğlu et al. (2006). Στις εικ. 7.113-7.114 παρουσιάζονται οι θέσεις των αστέρων-μελών στα διαγράμματα $M-R$ και Hertzsprung-Russell.

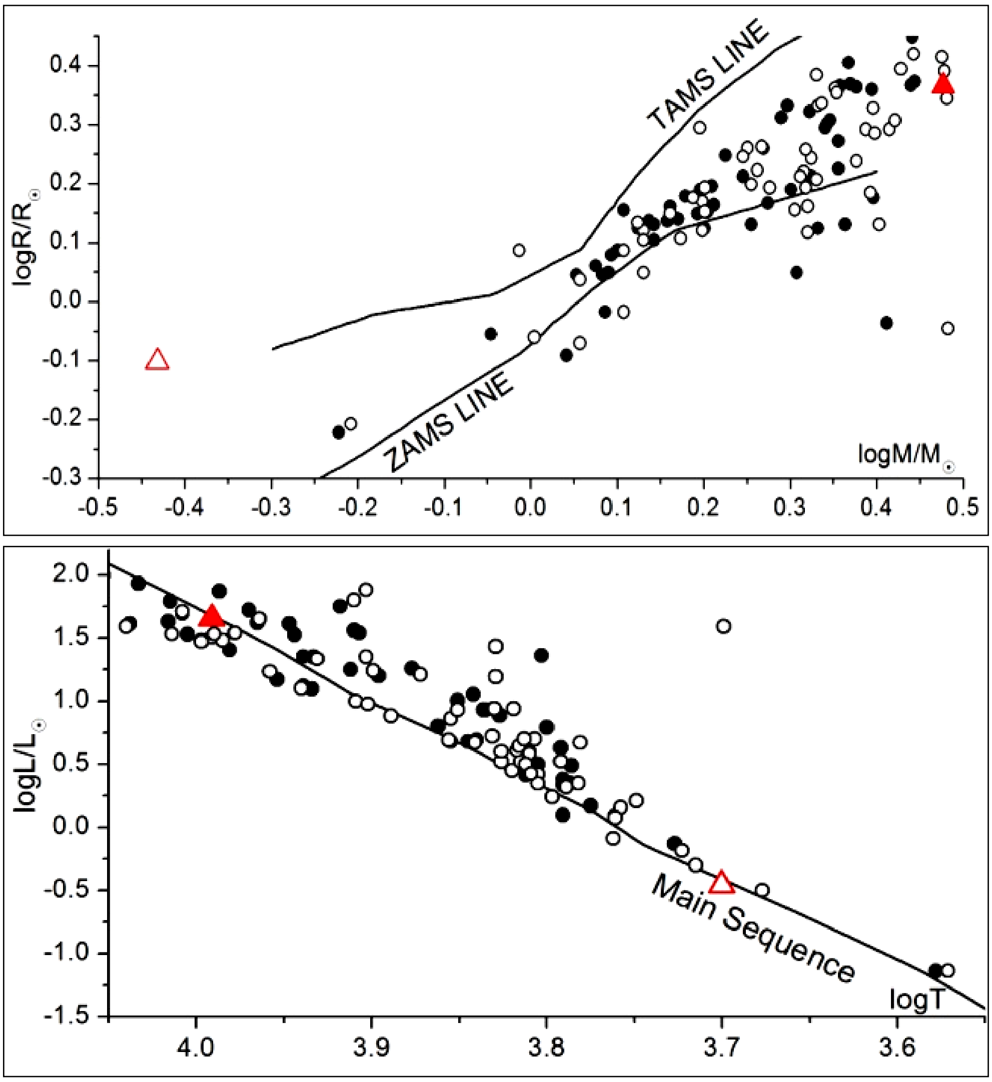
Στην εικ. 7.113 είναι ξεκάθαρη η πολύ καλή συμφωνία των αποτελεσμάτων μας, αναφορικά με τον υπολογισμό των απόλυτων παραμέτρων των αστέρων-μελών των ημιαποχωρισμένων συστημάτων που αναλύθηκαν, με εκείνα του δείγματος των İbanoğlu et al. (2006). Οι αστέρες που αναλύθηκαν στην παρούσα διατριβή είναι σχετικά μικρότερης μάζας και κατ' επέκταση μικρότερης θερμοκρασίας από αυτούς του προαναφερομένου δείγματος, γι' αυτό εντοπίζονται στα κάτω όρια των αστέρων του δείγματος, κατ' αντιστοιχία με τους αστέρες-μέλη των συστημάτων που παρουσιάστηκαν στο 6ο κεφάλαιο. Αυτό είναι πιο εμφανές κυρίως για τους δευτερεύοντες αστέρες των συστημάτων, καθώς εμφανίζονται λιγότερο εξελιγμένοι από τους αντίστοιχους του δείγματος των İbanoğlu et al. (2006). Αυτό φαίνεται εύλογο, καθώς, εφόσον έχουν μικρότερη μάζα, η εξέλιξή τους γίνεται με βραδύτερους ρυθμούς, ενώ λόγω και της σχετικά μικρής μάζας των πρωτευόντων, οι ρυθμοί μεταφοράς μάζας θα είναι μικρότεροι κατά τη διάρκεια της ζωής αυτών των συστημάτων συγκριτικά με αυτούς των συστημάτων του δείγματος των İbanoğlu et al. (2006).





Εικόνα 7.113. Διαγράμματα $M-R$ (επάνω) και Hertzsprung-Russell (κάτω). Οι μαύροι κύκλοι αντιπροσωπεύουν τους αστέρες των ημιαποχωρισμένων συστημάτων του δείγματος των İbanoğlu et al. (2006) και τα κόκκινα τρίγωνα τους αστέρες που αναλύθηκαν στο 7^{o} κεφάλαιο της παρούσας διατριβής. Τα κενά σύμβολα αναφέρονται στους πρωτεύοντες και τα γεμάτα στους δευτερεύοντες αστέρες.

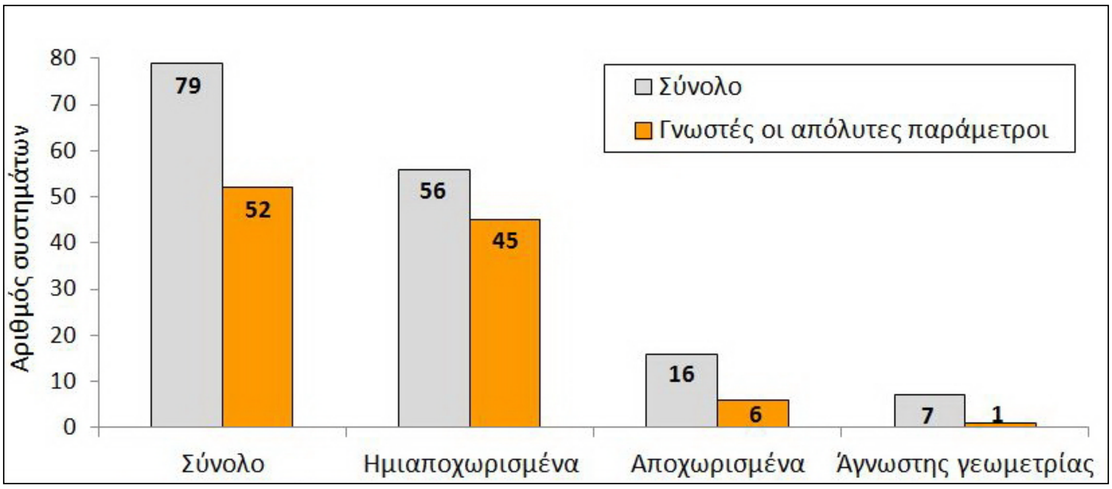
Στην εικ. 7.114 ο πρωτεύων αστέρας του συστήματος HZ Dra βρίσκεται στην ίδια περιοχή όπου συναντάται η πλειοψηφία των αστέρων του δείγματος των İbanoğlu et al. (2006), όμως, ο δευτερεύων είναι λίγο πιο εξελιγμένος σε σχέση με τους δευτερεύοντες αστέρες του ίδιου δείγματος. Υπενθυμίζεται ότι το σύστημα έχει περίοδο ~0.77 days, ενώ είναι πολύ πιθανό ότι έχει ήδη υπάρξει μεταφορά μάζας. Από την άλλη μεριά, η πλειονότητα των συστημάτων του προαναφερομένου δείγματος έχουν μεγαλύτερες περιόδους, και καθώς οι αστέρες-μέλη τους είναι περίπου της ίδιας εξελικτικής κατάστασης, συνεπάγεται ότι ακόμη δεν έχουν ανταλλάξει μάζα, κι επομένως προς το παρόν εξελίσσονται σχεδόν σαν μεμονωμένοι αστέρες. Σύμφωνα με τα παραπάνω, το σύστημα HZ Dra έχει πιθανότατα πολύ διαφορετικό παρελθόν από τα συστήματα του δείγματος, γι' αυτό και ο δευτερεύων αποκλίνει από την κατανομή.



Εικόνα 7.114. Το ίδιο με την εικόνα 7.113, αλλά για τους αστέρες των αποχωρισμένων συστημάτων. Σε αυτήν την περίπτωση το μόνο αποχωρισμένο σύστημα που αναλύθηκε στο παρόν κεφάλαιο είναι το HZ Dra.

7.21. Συσχετίσεις μεταξύ βασικών παραμέτρων

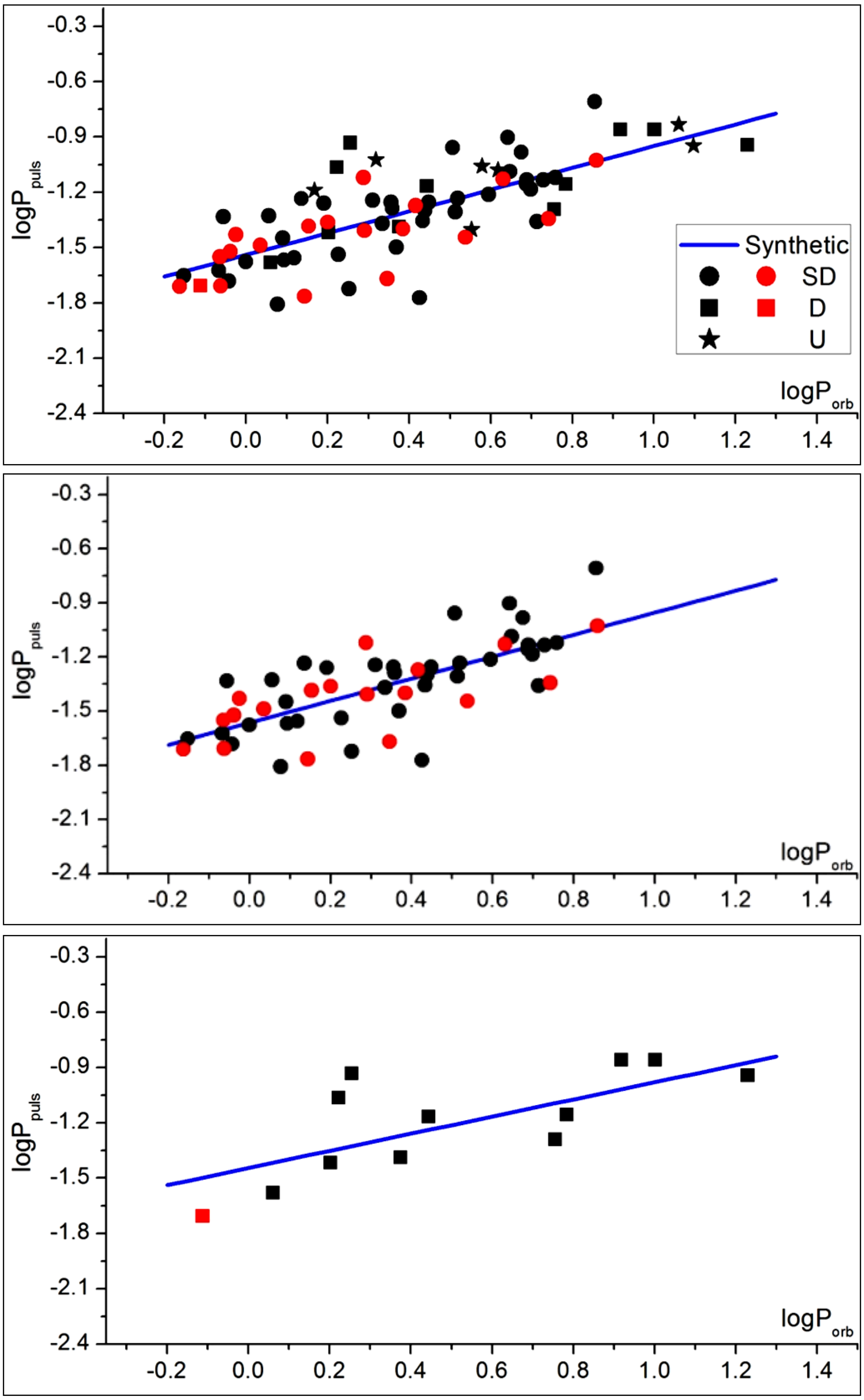
Σε αυτήν την παράγραφο λαμβάνεται υπόψη η ιδιάζουσα εξελικτική κατάσταση των πρωτευόντων αστέρων των συστημάτων που αναλύθηκαν στο παρόν κεφάλαιο, καθότι όλοι είναι τύπου δ Sct. Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 7.1, έχουν γίνει προσπάθειες συσχέτισης μεταξύ βασικών παραμέτρων για τα διπλά συστήματα με μέλος αστέρα τύπου δ Sct. Συγκεκριμένα, οι Soydugan et al. (2006a), χρησιμοποιώντας 20 τέτοια συστήματα, βρήκαν μια γραμμική συσχέτιση μεταξύ της τροχιακής περιόδου και της περιόδου ανάπαλσης. Καθότι το πλήθος αυτών των συστημάτων έχει πλέον σχεδόν τετραπλασιαστεί, οι Liakos et al. (2012b) βρήκαν νέες ανανεωμένες συσχετίσεις μεταξύ τόσο των προαναφερομένων περιόδων όσο και μεταξύ της περιόδου ανάπαλσης και της επιφανειακής επιτάχυνσης της βαρύτητας των αστέρων-μελών δ Sct. Η δεύτερη συσχέτιση δείχνει σαφώς τη διαφορά στην εξέλιξη μεταξύ μεμονωμένων και μελών διπλών συστημάτων αστέρων δ Sct. Επιπροσθέτως, πραγματοποιήθηκαν και συσχετίσεις μεταξύ της περιόδου ανάπαλσης και της θερμοκρασίας και της φωτεινότητας, αλλά και μεταξύ μάζας και φωτεινότητας. Για τις συσχετίσεις μεταξύ των ποσοτήτων χρησιμοποιήθηκαν όλα τα γνωστά έως τώρα διπλά συστήματα (εκλειπτικά, φασματοσκοπικά διπλά) με μέλος αστέρα τύπου δ Sct. Στον πίνακα Δ3 (βλ. Παρ. Δ) δίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά των αστέρων δ Sct που ανήκουν σε διπλά συστήματα πάνω στα οποία βασίζονται τα αποτελέσματα-συμπεράσματα των επόμενων υποπαραγράφων, ενώ στην εικ. 7.115 αποτυπώνεται η στατιστική τους.



Εικόνα 7.115. Στατιστική των διπλών συστημάτων που περιέχουν μέλος αστέρα τύπου δ Sct. Αναφέρεται το σύνολο των συστημάτων, το πλήθος τους ανάλογα με τη γεωμετρία Roche τους, αλλά και ο αριθμός των συστημάτων των οποίων έχουν υπολογιστεί οι απόλυτες παράμετροι.

7.21.1. Συσχέτιση μεταξύ τροχιακής περιόδου και περιόδου ανάπαλσης

Κατ' αντιστοιχία με τη συσχέτιση των Soydugan et al. (2006a) μεταξύ τροχιακής περιόδου του συστήματος και περιόδου ανάπαλσης του αστέρα-μέλους δ Sct, επιχειρήθηκε και στην παρούσα διατριβή μια παρόμοια εργασία. Όμως, καθώς το παρόν δείγμα είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό των Soydugan et al. (2006a) και επιπλέον το εύρος των τροχιακών περιόδων των συστημάτων είναι επίσης πολύ μεγαλύτερο, η συσχέτιση έγινε στις λογαριθμικές τιμές των περιόδων. Επίσης, καθώς συμπεριλαμβάνονται αστέρες που ανήκουν είτε σε αποχωρισμένα είτε σε ημιαποχωρισμένα συστήματα, και καθότι η μεταφορά μάζας παίζει κρίσιμο ρόλο στις συχνότητες ανάπαλσης (Mkrtichian et al. 2004, 2007), έγιναν επιπλέον συσχετίσεις βάσει της γεωμετρίας Roche των συστημάτων. Για τις παρακάτω σχέσεις χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές από τον πίνακα Δ3 που αφορούν την τροχιακή περίοδο του συστήματος P_{orb} και την κυρίαρχη περίοδο των αναπάλσεων P_{puls}. Τα συστήματα CPD-31°6830, CPD-41°5106, CPD-60°871 (Pigulski & Michalska 2007) δεν χρησιμοποιήθηκαν, καθώς τόσο οι παράμετροι των αναπάλσεων όσο και η γεωμετρία Roche τους είναι αμφιλεγόμενες. Παρομοίως, δεν χρησιμοποιήθηκε το σύστημα V1241 Tau, αφού, αν και αναφέρεται σαν τύπου oEA από τους Soydugan et al. (2006b), οι Arentoft et al. (2004) δεν εντόπισαν ίχνη αναπάλσεων. Επίσης, το σύστημα KIC4544587 (Hambleton et al. 2012) δεν χρησιμοποιήθηκε καθώς δεν έχει προσδιοριστεί ακόμα η κυρίαρχη συχνότητα ανάπαλσης. Επομένως, οι παρακάτω σχέσεις βασίζονται σε 74 συστήματα, εκ των οποίων τα 12 είναι αποχωρισμένα, τα 55 είναι ημιαποχωρισμένα και τα 7 είναι άγνωστης γεωμετρίας. Στην εικ. 7.116 παρουσιάζονται οι γραμμικές συσχετίσεις μεταξύ P_{orb} και P_{puls} για την κάθε γεωμετρική περίπτωση.



Εικόνα 7.116. Διαγράμματα συσχέτισης μεταξύ των τροχιακών περιόδων και των κυρίαρχων περιόδων ανάπαλσης (μπλε συνεχής γραμμή) για όλα (άνω), για τα ημιαποχωρισμένα (μεσαίο) και για τα αποχωρισμένα (κάτω) διπλά συστήματα που περιέχουν αστέρες τύπου δ Sct. Τα μαύρα σύμβολα αναφέρονται στους αστέρες των οποίων τα στοιχεία ελήφθησαν από τη βιβλιογραφία, ενώ τα κόκκινα στους αστέρες-μέλη των συστημάτων τα οποία αναλύθηκαν στην παρούσα διατριβή. Τα σύμβολα αντιστοιχούν στη διαφορετική γεωμετρία Roche του συστήματος (SD: ημιαποχωρισμένο, D: αποχωρισμένο, U: άγνωστης γεωμετρίας) στο οποίο ανήκει ο κάθε αστέρας.

Οι εμπειρικές σχέσεις που προέκυψαν βάσει της προσαρμογής ευθειών στο κάθε δείγμα είναι οι εξής:

Για όλα τα διπλά συστήματα

$$\log \mathrm{P_{puls}} = 0.59(6) \log \mathrm{P_{orb}} - 1.54(3) \tag{7.31}$$

με συντελεστή συσχέτισης r=0.74

Για τα ημιαποχωρισμένα διπλά συστήματα

$$\log \mathrm{P_{puls}} = 0.61(8) \log \mathrm{P_{orb}} - 1.56(3) \tag{7.32}$$

με συντελεστή συσχέτισης r=0.72

Για τα αποχωρισμένα διπλά συστήματα

$$\log \mathrm{P_{puls}} = 0.4(2) \log \mathrm{P_{orb}} - 1.4(1) \tag{7.33}$$

με συντελεστή συσχέτισης r=0.60

Αν και είναι ευδιάκριτη η γραμμική συσχέτιση μεταξύ P_{orb} και P_{puls}, εντούτοις δεν έχει προκύψει ακόμη θεωρητική θεμελίωση των παραπάνω ποσοτήτων, επομένως οι σχέσεις είναι εμπειρικές. Επίσης, είναι προφανές ότι η σχέση (7.31) είναι πολύ πιο κοντά στη σχέση (7.32) καθώς το δείγμα κυριαρχείται από αστέρες-μέλη ημιαποχωρισμένων συστημάτων. Οι συντελεστές της σχέσης (7.33) έχουν σχετικά μεγάλο σφάλμα, σε σύγκριση με τις άλλες δύο, και αυτό οφείλεται στο μικρό δείγμα αστέρων στο οποίο βασίζεται. Οι συντελεστές των λογαριθμικών ποσοτήτων των σχέσεων (7.32) και (7.33), αν και εκ πρώτης όψεως είναι διαφορετικοί, εντούτοις στο πλαίσιο των σφαλμάτων τους έρχονται σε πολύ καλή συμφωνία. Επομένως, από το παρόν δείγμα συμπεραίνεται ότι υπάρχει αναλογική σχέση μεταξύ P_{orb} και P_{puls}. Ωστόσο, το μικρό πλήθος του δείγματος των αστέρων-μελών αποχωρισμένων συστημάτων δεν επιτρέπει την ασφαλή εξαγωγή συμπεράσματος αναφορικά με την πιθανή διαφορετική συσχέτιση αυτών των ποσοτήτων σε συστήματα με διαφορετική γεωμετρία Roche.

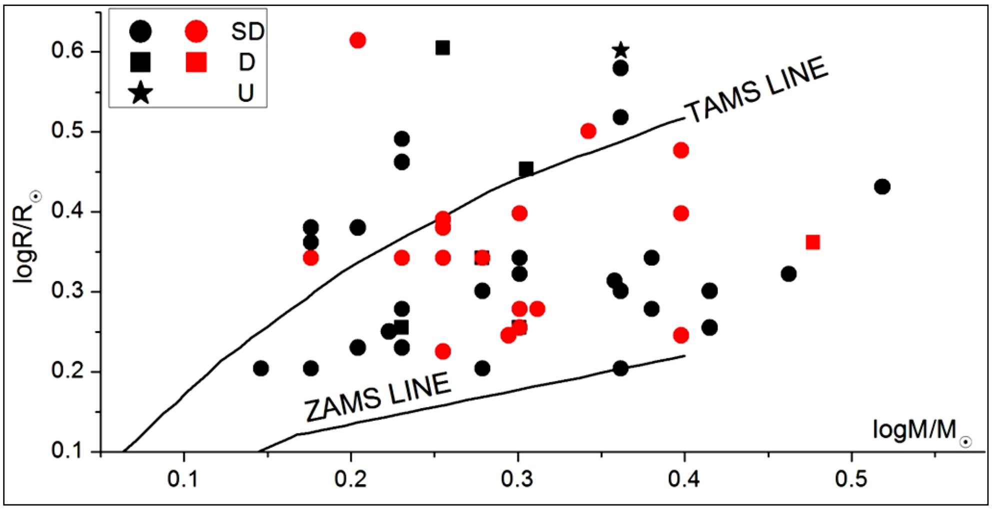
Θεωρητικά αναμένεται κάποιο είδος «συντονισμού» μεταξύ P_{orb} και P_{puls}, κάτι που θα έπρεπε να εντοπίζεται παρατηρησιακά. Οι μη-ακτινικές αναπάλσεις τύπου g (βλ. §1.3.1), οι οποίες δυνητικά μπορούν να οφείλονται στις παλιρροιακές επιδράσεις του συνοδού αστέρα, δεν εντοπίστηκαν στα συστήματα που μελετήθηκαν στο παρόν κεφάλαιο αν και έγινε έλεγχος για πολύ μικρές συχνότητες της τάξης της τροχιακής περιόδου του εκάστοτε συστήματος. Η πιθανότερη αιτία γι' αυτό φαίνεται να είναι η διακριτική ικανότητα του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε, καθώς αυτές οι αναπάλσεις έχουν πολύ μικρά πλάτη και ο εντοπισμός τους απαιτεί πολύ καλή φωτομετρική ακρίβεια αλλά και μεγάλη διάρκεια παρατήρησης την κάθε νύκτα.

7.21.2. Θέσεις των δ Sct αστέρων-μελών διπλών συστημάτων στα διαγράμματα $M\!-\!R$ και H−R

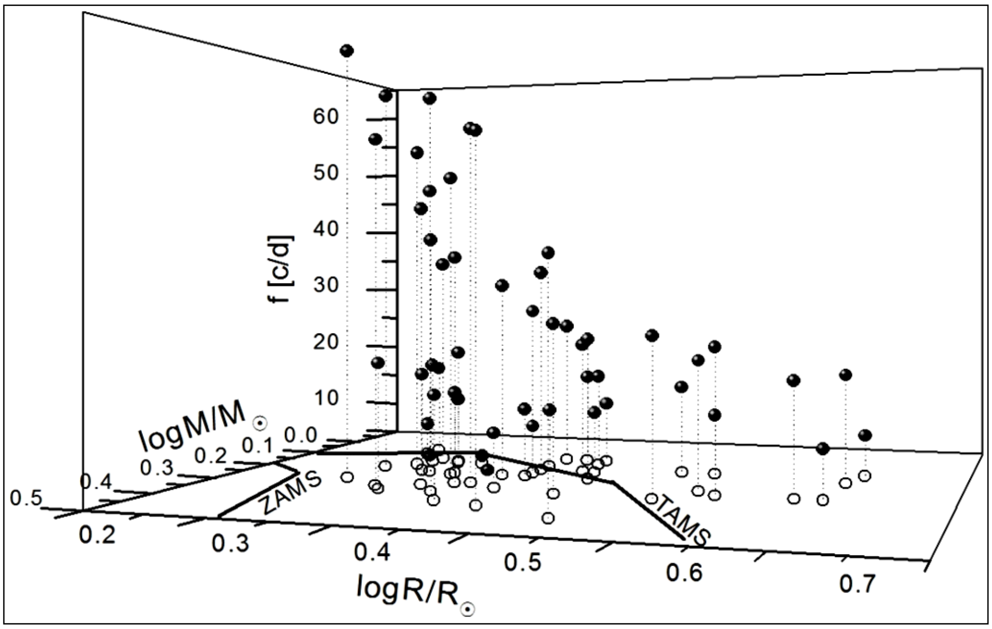
Για να προκύψουν συνολικά συμπεράσματα αναφορικά με την εξέλιξη των δ Sct αστέρων-μελών διπλών συστημάτων είναι χρήσιμο να παρουσιαστεί η κατανομή τους στα διαγράμματα *M*-*R* (εικ. 7.117) και H-R (εικ. 7.119). Επίσης, από την τρισδιάστατη κατανομή των αστέρων σε τρισδιάστατα διαγράμματα (εικ. 7.18 και 7.20) με κατακόρυφο άξονα τη συχνότητα ανάπαλσής τους προκύπτει επίσης πολύ ενδιαφέρουσα πληροφορία σχετικά με την εξέλιξη αυτών των αστέρων.

Από αυτά τα διαγράμματα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα για τους δ Sct αστέρες-μέλη διπλών συστημάτων:

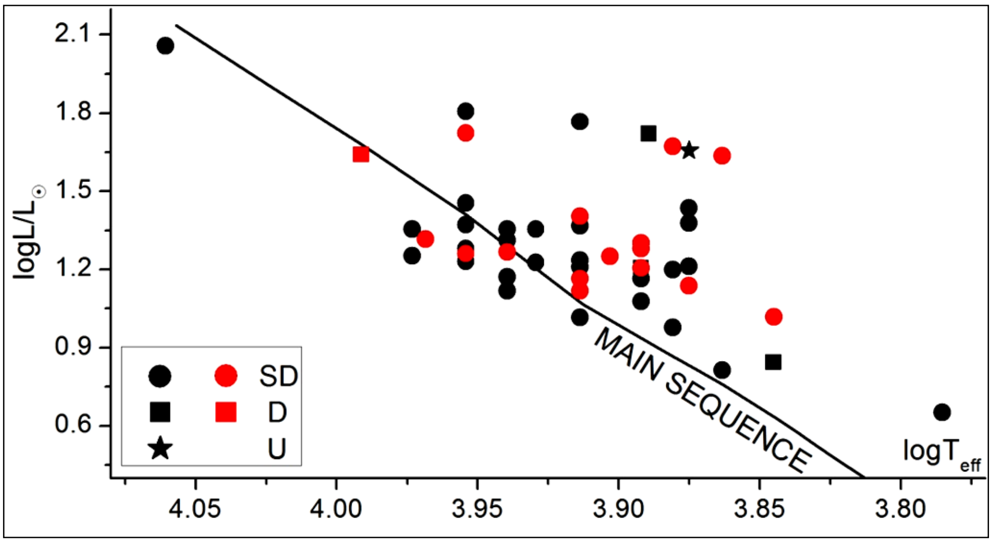
- Η πλειοψηφία τους είναι αστέρες της ΚΑ.
- Η φάση της ανάπαλσης ξεκινά από την αρχή της ζωής τους στην ΚΑ και μπορεί να συνεχιστεί ακόμα και όταν μεταβούν σε επόμενο εξελικτικό στάδιο (π.χ. υπογίγαντες). Όσο νεότερος είναι ο αστέρας τόσο μεγαλύτερη συχνότητα κυρίαρχης ανάπαλσης παρουσιάζει.



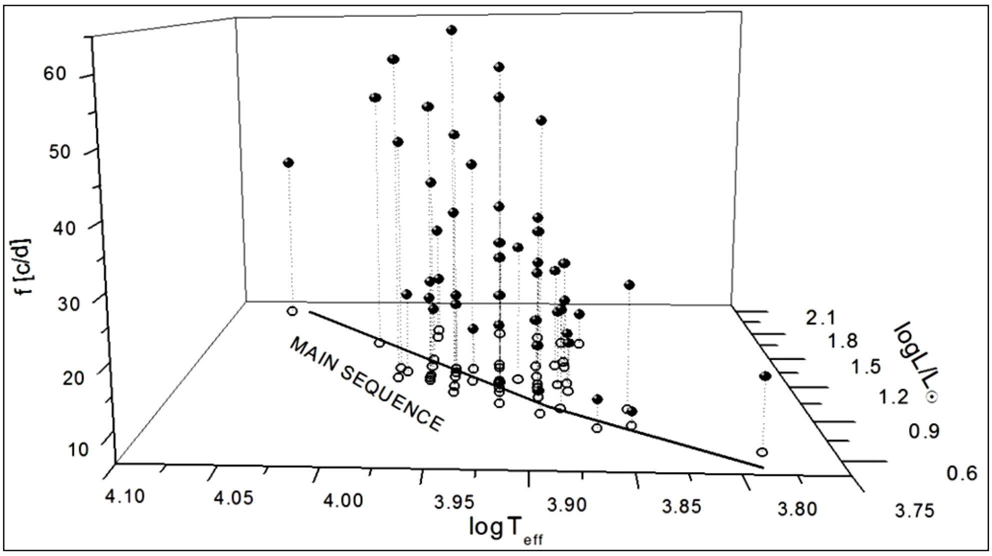
Εικόνα 7.117. Θέσεις των δ Sct αστέρων-μελών διπλών συστημάτων στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας. Η επεξήγηση των συμβόλων δίνεται στην εικ. 7.116.



Εικόνα 7.118. Τρισδιάστατη κατανομή των δ Sct αστέρων-μελών διπλών συστημάτων στο διάγραμμα μάζας-ακτίνας (οριζόντιο επίπεδο) με κατακόρυφο άξονα την κυρίαρχη συχνότητα ανάπαλσης. Τα σφαιρίδια αντιστοιχούν στις θέσεις των αστέρων στο τρισδιάστατο διάγραμμα, ενώ οι «άδειοι» κύκλοι είναι οι προβολές τους (διακεκομμένες γραμμές) στο οριζόντιο επίπεδο.



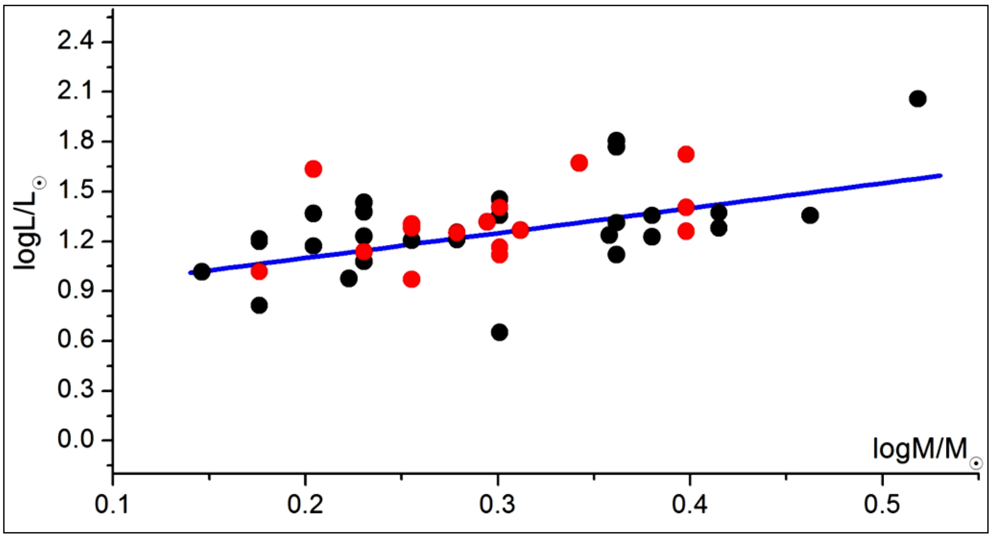
Εικόνα 7.119. Θέσεις των δ Sct αστέρων-μελών διπλών συστημάτων στο διάγραμμα Hertzsprung-Russell. Η επεξήγηση των συμβόλων δίνεται στην εικ. 7.116.



Εικόνα 7.120. Παρόμοια με την εικ. 7.118, αλλά στο οριζόντιο επίπεδο απεικονίζεται το διάγραμμα Hertzsprung-Russell.

7.21.3. Συσχέτιση μάζας-φωτεινότητας

Κατ' αναλογία με τις σχέσεις μάζας-φωτεινότητας για τους αστέρες των αποχωρισμένων και ημιαποχωρισμένων συστημάτων που παρουσιάστηκαν στα κεφάλαια 5 και 6 (βλ. §5.11 και §6.13), έτσι και σ' αυτήν την παράγραφο παρουσιάζεται η συσχέτιση μεταξύ αυτών των ποσοτήτων για τους δ Sct αστέρες-μέλη διπλών συστημάτων. Καθότι το δείγμα και πάλι κυριαρχείται από αστέρες που ανήκουν σε ημιαποχωρισμένα συστήματα, επιλέχθηκαν μόνο αυτοί για τη συσχέτιση, καθώς από τους αστέρες που ανήκουν σε αποχωρισμένα (4 στο σύνολο) δεν μπορεί να προκύψει αξιόλογη πληροφορία. Στην εικ. 7.121 παρουσιάζεται η γραμμική συσχέτιση *M-L*.



Εικόνα 7.121. Προσαρμογή ευθείας (μπλε συνεχής γραμμή) στα σημεία *M-L* των δ Sct αστέρων-μελών ημιαποχωρισμένων διπλών συστημάτων. Η επεξήγηση των συμβόλων δίνεται στην εικ. 7.116.

Από την προσαρμογή της ευθείας προκύπτει η σχέση:

$$\log \mathrm{L} = 1.5(4) \log \mathrm{M} + 0.8\ (1) \tag{7.34}$$

με συντελεστή συσχέτισης r=0.5, ενώ η ίδια σχέση απολογαριθμοποιημένη παίρνει τη μορφή:

$$\mathrm{L} = \mathrm{M}^{1.5(4)} \tag{7.35}$$

όπου τα μεγέθη *L* και *M* είναι σε ηλιακές μονάδες.

Αυτή η σχέση απέχει πολύ από τις αντίστοιχες σχέσεις που προέκυψαν για τους πρωτεύοντες (ομαλούς) αστέρες των αποχωρισμένων και ημιαποχωρισμένων συστημάτων (βλ. σχέσεις 5.17 και 6.25). Ωστόσο, είναι σε πολύ καλή συμφωνία με τη σχέση (6.26) που αφορά τους δευτερεύοντες αστέρες των ημιαποχωρισμένων συστημάτων. Πρέπει όμως να τονιστεί ότι το δείγμα αστέρων που χρησιμοποιήθηκε για τις σχέσεις (5.17), (6.25) και (6.26) είχε πολύ μεγαλύτερο εύρος μαζών (1.1-20 $M_{\odot}$) σε αντίθεση με αυτό της σχέσης (7.35), το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 1.4-4 $M_{\odot}$. Επομένως, είναι πολύ πιθανό η ομοιότητα των σχέσεων (6.26) και (7.35) να είναι συγκυριακή. Ωστόσο, είναι εμφανές, ότι οι δ Sct αστέρες-μέλη ημιαποχωρισμένων διπλών συστημάτων είναι λιγότερο φωτεινοί για δεδομένη τιμή μάζας από τους αντίστοιχους ομαλούς αστέρες που ανήκουν σε ιδίου τύπου συστήματα.

7.21.4. Συσχέτιση περιόδου ανάπαλσης, φωτεινότητας και θερμοκρασίας

Εφόσον η περίοδος ανάπαλσης συνδέεται με θερμοδυναμικές παραμέτρους (βλ. §1.3), θεωρήθηκε χρήσιμο να εξεταστεί η πιθανή συσχέτισή της με τη θερμοκρασία. Επιπροσθέτως, και καθώς υπάρχουν σχέσεις περιόδου-φωτεινότητας (απολύτου μεγέθους) για διαφόρους τύπων παλλόμενων αστέρων (π.χ. Κηφείδες), πραγματοποιήθηκε η συσχέτιση μεταξύ αυτών των ποσοτήτων και για τους δ Sct αστέρες-μέλη διπλών συστημάτων. Τα απόλυτα μεγέθη M_V των αστέρων υπολογίστηκαν βάσει της σχέσης (1.16) και της σχέσης:

$$\mathrm{M_V} = \mathrm{M_{bol}} - \mathrm{BC} \tag{7.36}$$

όπου M_{bol} το βολομετρικό μέγεθος και BC η βολομετρική διόρθωση, η οποία εξαρτάται από τη θερμοκρασία του αστέρα και λήφθηκε από τους πίνακες του Cox (2000).

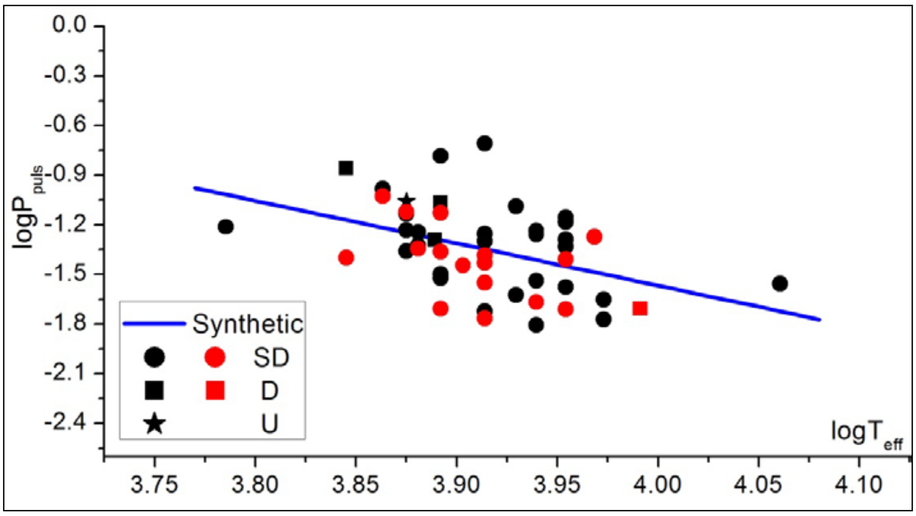
Στις παρακάτω εικόνες δίνονται τα διαγράμματα P_{puls}-T_{eff} και P_{puls}-L, ενώ από την προσαρμογή ευθειών στα αντίστοιχα σημεία προέκυψαν οι σχέσεις:

$$\log \mathrm{P_{puls}} = -2.6(7) \log \mathrm{T_{eff}} + 9(3) \tag{7.37}$$

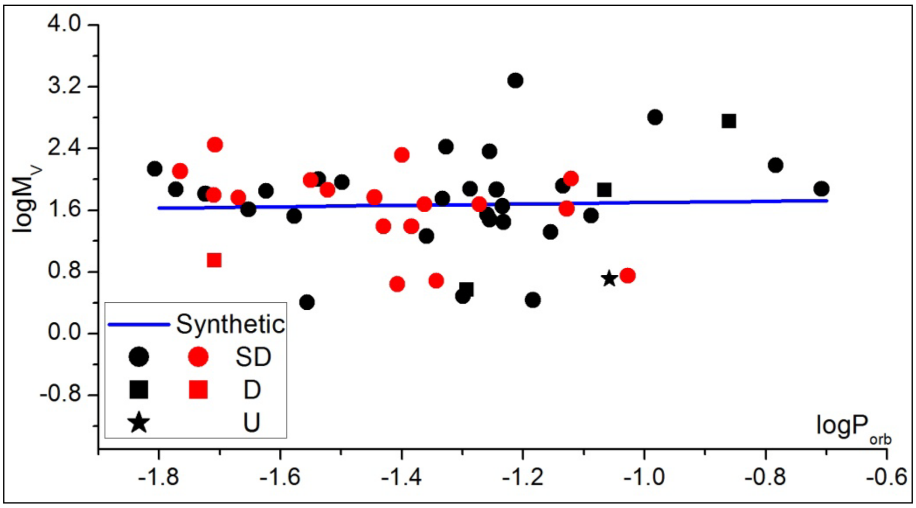
με συντελεστή συσχέτισης r=0.42, όπου η P_{puls} δίνεται σε days και η T_{eff} σε K, και

$$\mathrm{M_V} = 0.1(3) \log \mathrm{P_{puls}} + 1.8(5) \tag{7.38}$$

με συντελεστή συσχέτισης r=0.14.



Εικόνα 7.122. Διάγραμμα συσχέτισης κυρίαρχης περιόδου ανάπαλσης-θερμοκρασίας για τους δ Sct αστέρες-μέλη διπλών συστημάτων. Η καλύτερη δυνατή ευθεία προσαρμογής απεικονίζεται ως μπλε συνεχής γραμμή. Η επεξήγηση των συμβόλων δίνεται στην εικ. 7.116.

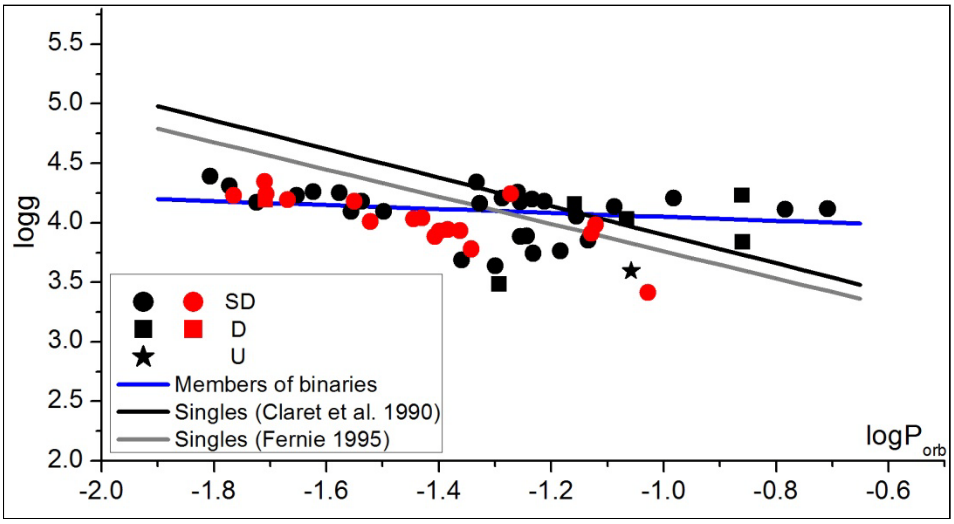


Εικόνα 7.123. Παρόμοια με την εικ. 7.122, αλλά εδώ απεικονίζεται το διάγραμμα κυρίαρχης περιόδου ανάπαλσης-απολύτου μεγέθους.

Η σχέση (7.38) έχει πολύ μικρό συντελεστή συσχέτισης, ο οποίος δηλώνει ότι οι ποσότητες είναι σχεδόν ανεξάρτητες μεταξύ τους, ενώ έχει μεγάλη διαφορά με τη σχέση (1.50) που αφορά στους μεμονωμένους δ Sct αστέρες.

7.21.5. Συσχέτιση περιόδου ανάπαλσης και εξελικτικής κατάστασης

Κατ' αντιστοιχία με τους μεμονωμένους δ Sct αστέρες, επιχειρήθηκε και για αυτούς που ανήκουν σε διπλά συστήματα συσχέτιση μεταξύ κυρίαρχης περιόδου ανάπαλσης P_{puls} και επιφανειακής επιτάχυνσης της βαρύτητας g, ώστε να προκύψουν συμπεράσματα σχετικά με την εξέλιξή τους. Στην εικ. 7.124 παρουσιάζεται το σχετικό διάγραμμα, ενώ για σύγκριση δίνονται οι θεωρητικές ευθείες που αφορούν τους μεμονωμένους δ Sct αστέρες (βλ. σχέσεις 1.52-1.53).



Εικόνα 7.124. Διάγραμμα συσχέτισης κυρίαρχης περιόδου ανάπαλσης-επιφανειακής επιτάχυνσης της βαρύτητας για τους δ Sct αστέρες-μέλη διπλών συστημάτων. Η καλύτερη δυνατή ευθεία προσαρμογής απεικονίζεται ως μπλε συνεχής γραμμή, ενώ η γκρίζα και η μαύρη γραμμή αντιστοιχούν στις αντίστοιχες σχέσεις για τους μεμονωμένους δ Sct αστέρες. Η επεξήγηση των συμβόλων δίνεται στην εικ. 7.116.

Από την παραπάνω προσαρμογή προκύπτει η σχέση:

$$\log g = -0.3(1) \log \mathrm{P_{puls}} + 3.6(2) \tag{7.39}$$

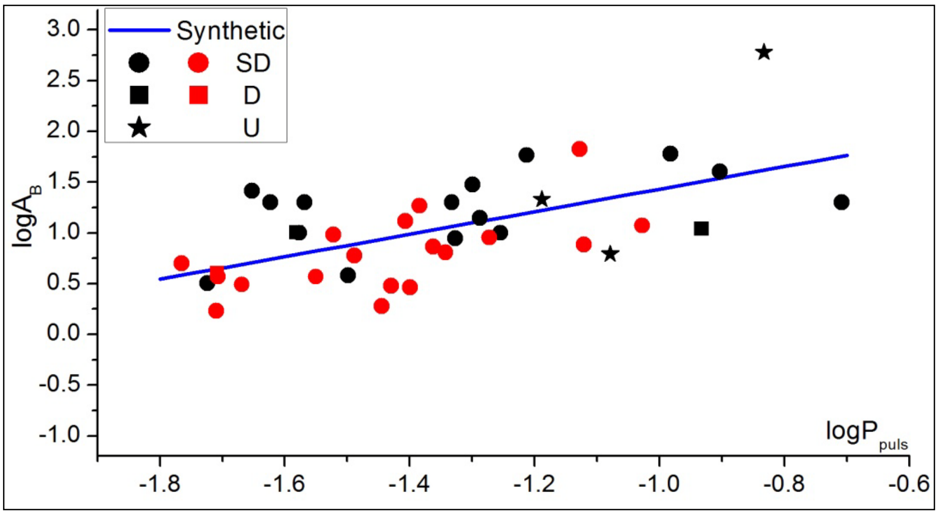
με συντελεστή συσχέτισης r=0.36, όπου η P_{puls} δίνεται σε days και η g σε cm/sec^2.

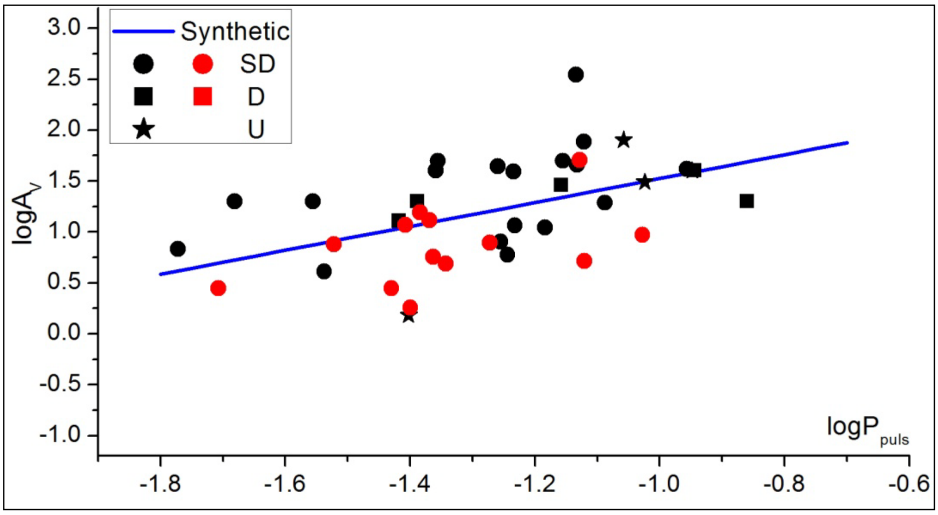
Η σχέση (7.39) διαφέρει από τις αντίστοιχες για τους μεμονωμένους δ Sct αστέρες, αν και πρέπει να τονιστεί ότι τα σημεία έχουν μεγάλη διασπορά, ενώ ο συντελεστής συσχέτισης δείχνει την οριακή συσχέτιση μεταξύ αυτών των ποσοτήτων. Στο εύρος $-1.4<\log P_{\text{puls}}<-1.0$ φαίνεται ότι υπάρχει η μεγαλύτερη διασπορά, ενώ για $\log P_{\text{puls}}>-1.0$ υπάρχουν πολύ λίγα σημεία. Εξετάστηκε επίσης η πιθανότητα ύπαρξης δύο κλάδων συσχέτισης, αλλά καθώς η πλειοψηφία των αστέρων ανήκει σε ημιαποχωρισμένα συστήματα δεν βρέθηκε κάποια φυσική σημασία.

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει και πάλι το συμπέρασμα ότι οι δ Sct αστέρες-μέλη διπλών συστημάτων εντοπίζονται κυρίως επάνω στην ΚΑ, αλλά και ότι η εξέλιξή τους είναι βραδύτερη από αυτήν των μεμονωμένων δ Sct. Η μόνη εξήγηση που φαίνεται να εξηγεί ποιοτικά αυτήν τη διαφορά, είναι η εισροή μάζας στην επιφάνεια των αστέρων που ανήκουν σε διπλά συστήματα, κάτι όμως που ακόμα δεν έχει θεμελιωθεί ποσοτικά, καθώς απαιτούνται πολλές δεκαετίες παρατηρήσεων ώστε να εντοπιστούν διαφορές στις αναπάλσεις. Εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση του συστήματος RZ Cas για το οποίο έχουν πραγματοποιηθεί ενδελεχείς φωτομετρικές και φασματοσκοπικές μελέτες που καλύπτουν παρατηρήσεις πολλών ετών (Rodríguez et al. 2004, Lehmann & Mkrtichian 2008, Tkachenko et al. 2009). Το σύστημα βρίσκεται σε φάση ταχείας μεταφοράς μάζας και βρέθηκε ότι τόσο το πλάτος όσο και η συχνότητα των αναπάλσεων μεταβάλλονται. Επίσης, η παραπάνω σχέση μπορεί να αποτελέσει κριτήριο για την εξέταση των γνωστών μεμονωμένων αστέρων δ Sct, οι οποίοι μπορεί να ανήκουν σε διπλά συστήματα.

7.21.6. Συσχέτιση περιόδου και ημιπλάτους ανάπαλσης

Για τη συσχέτιση μεταξύ περιόδου-ημιπλάτους ανάπαλσης χρησιμοποιήθηκαν οι αστέρες για τους οποίους υπήρχε πληροφορία για το ημιπλάτος των αναπάλσεών τους στα φίλτρα *B* ή/και *V*, δεδομένου ότι η πλειοψηφία των παρατηρήσεων γίνεται σε αυτά τα φίλτρα. Καθότι είναι γνωστό ότι το ημιπλάτος *A* των αναπάλσεων εξαρτάται από το φίλτρο παρατήρησης και κατ' επέκταση τη θερμοκρασία του αστέρα, έγιναν δύο συσχετίσεις μεταξύ των προαναφερομένων ποσοτήτων μια για κάθε φίλτρο και τα αντίστοιχα διαγράμματα παρουσιάζονται στην εικ. 7.125.





Εικόνα 7.125. Διάγραμματα συσχέτισης κυρίαρχης περιόδου-ημιπλάτους ανάπαλσης δ Sct αστέρων-μελών διπλών συστημάτων για τα φίλτρα *B* (επάνω) και *V* (κάτω). Η καλύτερη δυνατή ευθεία προσαρμογής απεικονίζεται ως μπλε συνεχής γραμμή. Η επεξήγηση των συμβόλων δίνεται στην εικ. 7.116.

Από τις προσαρμογές ευθειών στα σημεία των διαγραμμάτων προκύπτουν οι σχέσεις:

$$\log \mathrm{A_B} = 1.1(2)\log \mathrm{P_{puls}} + 2.5(3) \qquad (7.40)$$

με συντελεστή συσχέτισης r=0.60 και

$$\log \mathrm{A_V} = 1.2(3)\log \mathrm{P_{puls}} + 2.7(4) \qquad (7.41)$$

με συντελεστή συσχέτισης r=0.50, όπου η P_{puls} δίνεται σε days και το A σε mmag.

Οι παραπάνω σχέσεις, εντός των ορίων των σφαλμάτων τους, συμφωνούν απόλυτα. Επομένως, κρίνοντας και από τους αντίστοιχους συντελεστές συσχέτισης, φαίνεται ότι υπάρχει όντως σχέση μεταξύ αυτών των ποσοτήτων και συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερη είναι η περίοδος ανάπαλσης τόσο μεγαλύτερο είναι και το αντίστοιχο ημιπλάτος της. Συνδυάζοντας τις τελευταίες σχέσεις με τη σχέση (7.31), εύλογα προκύπτει ότι το ημιπλάτος ανάπαλσης αυτών των αστέρων σχετίζεται άμεσα και με την περίοδο περιφοράς του γύρω από το κέντρο μάζας του συστήματος στο οποίο ανήκει. Επομένως, επιβεβαιώνεται ότι και η κυρίαρχη ανάπαλση επηρεάζεται από την ύπαρξη του συνοδού αστέρα, ενώ έως τώρα εθεωρείτο ότι μόνο οι αναπάλσεις τύπου *g* οφείλονται σε παλιρροιακές αλληλεπιδράσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Συνεισφορά της έρευνας και μελλοντικές προοπτικές

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα από τη συνολική μελέτη μας, διατυπώνονται κάποια νέα ερωτήματα που προέκυψαν, καθώς δίνονται και οι μελλοντικές προοπτικές συνέχισης της μελέτης σε άλλα ή ακόμα και στα ίδια συστήματα που αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια.

8.1. Συμπεράσματα και ανοικτά ερωτήματα

Η παρούσα διατριβή περιλαμβάνει μελέτες για 40 εκλειπτικά συστήματα με σκοπό: α) τον υπολογισμό των απόλυτων παραμέτρων των αστέρων-μελών τους, κάτι που οδηγεί στη διερεύνηση της εξελικτικής τους κατάστασης, β) την ερμηνεία των μεταβολών των τροχιακών περιόδων τους και γ) τον υπολογισμό των παραμέτρων των αναπάλσεων σε συστήματα με αστέρα-μέλος τύπου δ Sct.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στον συνδυασμό αποτελεσμάτων που προέρχονταν από διαφορετικές μεθόδους, κάτι που πλέον πρέπει να θεωρείται απαραίτητο για την πληρέστερη εικόνα ενός εκλειπτικού συστήματος. Συγκεκριμένα, η ανάλυση των τροχιακών μεταβολών ενός συστήματος προσφέρει πληροφορία η οποία δεν είναι πάντα εύκολο να εντοπιστεί από άλλες μεθόδους ανάλυσης. Η μεταφορά μάζας μεταξύ των μελών του συστήματος ή/και η απώλεια μάζας από αυτό, η μαγνητική δραστηριότητα κάποιου εκ των δύο μελών και η παρουσία ενός ή/και περισσοτέρων μελών γύρω από το εκλειπτικό σύστημα είναι παράγοντες διαμόρφωσης της τροχιακής περιόδου και μπορούν να ανιχνευτούν σχετικά εύκολα από την ανάλυση του O−C διαγράμματος του συστήματος. Από την άλλη πλευρά, οι ίδιοι μηχανισμοί δεν είναι πάντα εφικτό να εντοπιστούν από την ανάλυση των καμπυλών φωτός ή/και των καμπυλών ακτινικών ταχυτήτων. Ωστόσο, η πληροφορία από την O−C ανάλυση χρησιμοποιείται τόσο για την επιλογή της πιθανότερης γεωμετρίας Roche του συστήματος όσο και για τον εντοπισμό μιας επιπρόσθετης φωτομετρικής συνεισφοράς από κοντινό αστέρα μέλος. Με αυτόν τον τρόπο το μοντέλο περιγραφής του συστήματος είναι πολύ πιο ακριβές και κατ' επέκταση η προκύπτουσα πληροφορία πολύ πιο αξιόπιστη. Φυσικά, βρέθηκαν και περιπτώσεις (π.χ. AT Peg, X Tri, BG Peg), όπου τα αποτελέσματα των μεθόδων έρχονταν εκ πρώτης όψεως σε αντίφαση, όμως, παρ' όλα αυτά, η ερμηνεία που δόθηκε είναι αρκετά ικανοποιητική και συμφωνεί με την τρέχουσα θεωρία. Επιπλέον, σε πολλές περιπτώσεις συστημάτων δόθηκε διπλή εξήγηση για τις περιοδικές μεταβολές της τροχιακής περιόδου τους (π.χ. CZ Aqr, TZ Eri), καθώς τα δεδομένα που υπήρχαν στη διάθεσή μας δεν επαρκούσαν για την οριστική ερμηνεία του μηχανισμού. Αντίθετα, σε άλλα συστήματα (π.χ. UU Leo, CF Tau) τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων ήρθαν σε πολύ καλή συμφωνία τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά. Βάσει όλων των παραπάνω συμπεραίνεται ότι ***ο συνδυασμός αποτελεσμάτων (α) από την επίλυση των καμπυλών φωτός και καμπυλών ακτινικών ταχυτήτων και (β) από την ανάλυση του O−C διαγράμματος είναι μείζονος σημασίας για την εξεύρεση του καλύτερου μοντέλου περιγραφής του συστήματος.***

Για τα περισσότερα συστήματα που αναλύθηκαν δεν υπήρχαν διαθέσιμες οι καμπύλες ακτινικών ταχυτήτων των αστέρων-μελών τους και αυτό θα μπορούσε να θέσει σε αμφισβήτηση τα αποτελέσματα που προέκυψαν. Γι' αυτόν τον λόγο αυτά τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αντίστοιχα που έχουν προκύψει από συστήματα, για τα οποία είχαν υπολογιστεί και οι φασματοσκοπικές παράμετροι. Η σύγκριση έδειξε ότι μόνο μερικοί από τους αστέρες αποχωρισμένων συστημάτων (βλ. §5.11) αποκλίνουν των κατανομών των καλά μελετημένων αστέρων, ενώ όλα τα υπόλοιπα έρχονται σε πολύ καλή συμφωνία (βλ. §5.11, §6.13 και §7.20). Τα συστήματα που μελετήθηκαν στα κεφάλαια 6 και 7 ήταν ημιαποχωρισμένα, ενώ κάποια από τα αποχωρισμένα (βλ. κεφάλαιο 5) είχαν ολικές εκλείψεις. Αυτοί οι δύο παράγοντες έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην επιτυχία των φωτομετρικών μοντέλων, καθώς σύμφωνα με τους Kallrath & Milone (1999-§4.1.1.1) και Terrell & Wilson (2005) σε αυτές τις περιπτώσεις συστημάτων ο φωτομετρικός λόγος μαζών είναι αρκετά αξιόπιστος. Φυσικά, αυτό δεν αποτελεί πανάκεια, και είναι προφανές ότι ***η χρήση των καμπυλών ακτινικών ταχυτήτων προσδίδει πολύ μεγαλύτερη βεβαιότητα στα αποτελέσματα, όμως και χωρίς αυτές είναι δυνατόν να προκύψει αξιόπιστη και ρεαλιστική λύση σε τέτοιου τύπου συστήματα.***

Σε όλα τα αποχωρισμένα συστήματα που μελετήθηκαν, εκτός των AL Gem και UU Leo, οι αστέρες-μέλη βρίσκονται περίπου στη ίδια εξελικτική κατάσταση δείχνοντας ότι προς το παρόν εξελίσσονται σαν μεμονωμένοι αστέρες. Φυσικά, αυτό δεν σημαίνει ότι η παρούσα διαπίστωση θα ισχύει επ' άπειρον, καθόσον οι περίοδοι αυτών των συστημάτων είναι σχετικά μικρές (<3 days), επομένως η πολύ ισχυρή παλιρροιακή αλληλεπίδραση, η οποία προς το παρόν επηρεάζει μόνο το σχήμα τους, αναμένεται να παίξει ουσιαστικό ρόλο στη μελλοντική εξέλιξή τους. Αυτό προβλέπεται από τη θεωρία (βλ. §1.2.4) και συμπεραίνεται ότι ***τα αποχωρισμένα συστήματα που μελετήθηκαν στην παρούσα διατριβή στο μέλλον θα μετατραπούν είτε σε ημιαποχωρισμένα είτε σε επαφή, αλλά δεν είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε σε ποιο στάδιο εξέλιξης θα έχουν φτάσει έως τότε.*** Τα πιθανότερα σενάρια εξέλιξης είναι η περίπτωση Β ή Γ (βλ. §1.2.4).

Στην πλειοψηφία τους οι αστέρες-μέλη των ημιαποχωρισμένων συστημάτων που παρουσιάστηκαν στα κεφάλαια 6 και 7 βρίσκονται σε διαφορετική εξελικτική κατάσταση. Στα περισσότερα ο πρωτεύων αστέρας είναι επάνω στην ΚΑ, ενώ ο δευτερεύων έχει εξελιχθεί σε υπογίγαντα και σε μερικές περιπτώσεις ακόμα και σε γίγαντα. Αν και στα περισσότερα δεν εντοπίστηκε μεταφορά μάζας από την O−C ανάλυση, εντούτοις η πολύ μεγάλη διαφορά στις τιμές των μαζών και των εξελικτικών καταστάσεων των αστέρων-μελών τους «προδίδουν» την ιστορία του συστήματος αναφορικά με τη μεταφορά μάζας από τον δευτερεύοντα προς τον πρωτεύοντα. Στα συστήματα που εντοπίστηκε μεταφορά μάζας μέσω της O−C ανάλυσης δεν βρέθηκε κάποιο το οποίο να βρίσκεται σε στάδιο ταχείας μεταφοράς. Επομένως, ***τα ημιαποχωρισμένα συστήματα που μελετήθηκαν είτε βαίνουν προς τη φάση χαλάρωσης είτε βρίσκονται στο στάδιο της βραδείας μεταφοράς μάζας.*** Κρίνοντας από τη θέση του πρωτεύοντα αστέρα στο διάγραμμα M-R, βρέθηκε ότι αυτά τα συστήματα εξελίσσονται σύμφωνα με την περίπτωση Α ή Β (βλ. §1.2.4).

Η σημαντικότερη συνεισφορά της παρούσας διατριβής αφορά στη μελέτη 18 συστημάτων με παλλόμενο μέλος, ενώ στη βιβλιογραφία υπάρχει διαθέσιμη η πλήρης μελέτη (πλήρεις καμπύλες φωτός) για άλλα 36. Η μελέτη επικεντρώθηκε στα συστήματα όπου έχουν μέλος παλλόμενο αστέρα τύπου δ Sct, ενώ όλα, εκτός από το HZ Dra, βρέθηκαν να είναι ημιαποχωρισμένα με τον δευτερεύοντα αστέρα να γεμίζει τον λοβό Roche του, κάτι που τα κατατάσσει στη νεοσύστατη υποκατηγορία των εκλειπτικών συστημάτων τύπου Algol με παλλόμενο μέλος (oEA). Σε αυτά τα συστήματα, εκτός των προαναφερομένων αναλύσεων (καμπυλών φωτός και O−C), έλαβε χώρα και η ανάλυση Fourier ώστε να υπολογιστούν οι παράμετροι των αναπάλσεων. ***Η πλειονότητα των δ Sct αστέρων των συστημάτων που μελετήθηκαν είναι πολυπεριοδικοί***, ενώ και αυτοί που βρέθηκαν να έχουν μόνο μια συχνότητα ανάπαλσης δεν είναι απίθανο να έχουν κι άλλες, οι οποίες, όμως, λόγω της δεδομένης φωτομετρικής ακρίβειας των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν δεν κατέστη δυνατόν να εντοπιστούν. Βάσει δείγματος 79 συστημάτων με έναν αστέρα-μέλος τύπου δ Sct, εκ των οποίων μόνο για τα 54 (συμπεριλαμβανομένων εκείνων που μελετήθηκαν στην παρούσα διατριβή) είναι γνωστές οι απόλυτες παράμετροι, έγιναν συσχετίσεις μεταξύ των βασικών αστρικών παραμέτρων των παλλόμενων αστέρων των συστημάτων και της κυρίαρχης περιόδου ανάπαλσής τους, από τις οποίες προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Η κυρίαρχη περίοδος ανάπαλσης είναι ανάλογη της περιόδου περιφοράς
- Εντοπίζονται κυρίως επάνω στην ΚΑ σε αντίθεση με τους μεμονωμένους δ Sct αστέρες, οι οποίοι βρίσκονται κυρίως μετά την ΚΑ και στο κάτω μέρος της ζώνης αστάθειας ή ακόμα και στο στάδιο των υπογιγάντων
- Η φάση των αναπάλσεων ξεκινά από πολύ νωρίς συγκριτικά με τους μεμονωμένους
- Η κυρίαρχη περίοδος ανάπαλσης είναι ανάλογη με την εξελικτική κατάσταση του αστέρα, υπό την έννοια ότι όσο πιο μικρή ηλικία έχει τόσο ταχύτερα αναπάλλεται
- Η εξέλιξή τους ως παλλόμενοι αστέρες είναι βραδύτερη σε σχέση με τους μεμονωμένους
- Υπάρχει αναλογική σχέση μεταξύ κυρίαρχης περιόδου και πλάτους ανάπαλσης
- Το πλάτος ανάπαλσης επηρεάζεται από την ύπαρξη του συνοδού αστέρα
- Η πλειοψηφία τους παρουσιάζει κυρίαρχη περίοδο ανάπαλσης μικρότερη από 2 hrs, ενώ των μεμονωμένων κυμαίνεται μεταξύ 1.2-3.6 hrs (Rodríguez et al. 2000)
- Δεν προέκυψε σχέση περιόδου ανάπαλσης-φωτεινότητας, και συγκεκριμένα φαίνεται ότι αυτές οι ποσότητες είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους
- Κυρίαρχη ερμηνεία για τις διαφορές τους με τους μεμονωμένους είναι η μεταφορά μάζας.

Η θεωρητική τεκμηρίωση των παραπάνω συμπερασμάτων και το εύλογο ερώτημα που προκύπτει: ***«πως η μεταφορά μάζας και εν γένει η ύπαρξη συνοδού αστέρα επηρεάζει τις αναπάλσεις και τον μηχανισμό διέγερσής τους;»*** αποτελούν πρόκληση για τους θεωρητικούς αστροφυσικούς,

Τέλος, καθότι η πλειοψηφία των πρωτευόντων αστέρων που μελετήθηκαν σε όλη τη διατριβή είναι φασματικού τύπου A-F, και η ιστορία των συστημάτων που ανήκουν φαίνεται παρόμοια αναφορικά με τις αλληλεπιδράσεις τους με τους συνοδούς, αυτόματα εγείρεται το ερώτημα-πρόκληση: ***«Ποιοι αστέρες τύπου A-F εξελίσσονται σε τύπου δ Sct και ποιοι μηχανισμοί επιδρούν σε αυτό;»***

8.2. Μελλοντική έρευνα

Τα εκλειπτικά συστήματα αστέρων πάντοτε ήταν και θα είναι μια συνεχής πηγή άντλησης πληροφοριών αναφορικά με τις απόλυτες παραμέτρους και την εξελικτική κατάσταση των αστέρων. Καθώς όμως η τεχνολογία εξελίσσεται, η ακρίβεια των αποτελεσμάτων αυξάνει και συνεχώς προκύπτουν νέες βελτιωμένες συσχετίσεις αστρικών παραμέτρων που βελτιώνουν εξαιρετικά τα θεωρητικά μοντέλα και πιθανόν να αλλάξουν τις απόψεις μας για την αστρική εξέλιξη, όπως είναι γνωστή περίπου 100 χρόνια τώρα.

Η δεκαετία του 2000 είναι το μεταίχμιο μεταξύ της εποχής της κλασσικής αστρονομικής παρατήρησης και του μεγάλου πλήθους δεδομένων που προέρχονται τόσο από διαστημικά τηλεσκόπια όσο και από επίγεια προγράμματα συνεχών παρατηρήσεων (π.χ ROTSE, ASAS). Οι αποστολές Kepler, Corot, Herschel δίνουν αποτελέσματα εξαιρετικής φωτομετρικής ακρίβειας και τεράστιο πλήθος δεδομένων καθημερινά (Maceroni et al. 2012), ενώ κάτι παρόμοιο αναμένεται και από την αποστολή JWST, που θα εκτοξευθεί το 2018. Καθώς ο όγκος δεδομένων δεν είναι δυνατόν να επεξεργαστεί από ανθρώπινο δυναμικό, πλέον αναπτύσσεται συνεχώς η τεχνολογία της αυτοματοποίησης της επεξεργασίας και ανάλυσης των παρατηρήσεων. Για τα εκλειπτικά συστήματα αστέρων έχει αναπτυχθεί ήδη το λογισμικό EBAI[1] (Prša et al. 2008), το οποίο συνεργάζεται με το λογισμικό PHOEBE[2] και επεξεργάζεται καμπύλες φωτός εκλειπτικών συστημάτων (αλλά και πιθανών εξωπλανητών) που προκύπτουν από δεδομένα μεγάλου όγκου. Με αυτόν τον τρόπο αναμένεται ότι οι παράμετροι χιλιάδων καμπυλών φωτός θα αναλύονται πολύ γρήγορα, αλλά πάντα με το μειονέκτημα ότι εν απουσία ανθρωπίνου παράγοντα ο κώδικας W-D μπορεί να αποκλίνει.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, προκύπτει σίγουρα το ερώτημα αν αξίζει κάποιος να διεξάγει επίγειες φωτομετρικές παρατηρήσεις. Η απάντηση είναι σίγουρα ότι αξίζει, αλλά για στόχους οι οποίοι χρειάζονται ειδική μεταχείριση στην παρατήρηση (π.χ. συγκεκριμένη χρονική διακριτική ικανότητα ή συγκεκριμένη χρονική στιγμή παρατήρησης). Η πολύμηνη ή ακόμα και η χρόνια παρακολούθηση ενός συγκεκριμένου συστήματος είναι παράγοντες για τους οποίους αξίζει κάποιος να πραγματοποιεί επίγειες παρατηρήσεις, όταν αυτές δεν καλύπτονται από κάποιο πρόγραμμα διαστημικών παρατηρήσεων. Ωστόσο, μεγάλο πλεονέκτημα των επίγειων παρατηρήσεων σε εκλειπτικά συστήματα είναι η παρατήρηση σε μεγάλο εύρος του Η/Μ φάσματος με τη χρήση των φωτομετρικών φίλτρων, παράγοντας ο οποίος είναι ιδιαίτερα κρίσιμος για το φωτομετρικό μοντέλο του συστήματος. Από την άλλη πλευρά, τα διαστημικά τηλεσκόπια είναι σε αυτόν τον τομέα πιο περιορισμένα. Τα μικρά τηλεσκόπια, τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως για φωτομετρικές παρατηρήσεις, αποφορτίζουν τα μεγαλύτερα και επιπλέον έχουν το πλεονέκτημα τόσο της συνεχούς αναβάθμισης όσο και της χρήσης νέων οργάνων. Σε καμία όμως περίπτωση δεν μπορεί να συγκριθεί η ποιότητα των δεδομένων από τις προαναφερθείσες διαστημικές αποστολές με αυτήν των επίγειων. Η σημαντικότερη όμως συνεισφορά των επίγειων παρατηρήσεων στα εκλειπτικά συστήματα είναι η φασματοσκοπία, η οποία είναι πολύ περιορισμένη από το διάστημα. Οι φασματοσκοπικές

[1]http://phoebe.fiz.uni-lj.si/?q=node/105
[2]http://phoebe.fiz.uni-lj.si/

παρατηρήσεις προσφέρουν ίσως πολύ περισσότερη πληροφορία από τις φωτομετρικές στον τομέα των διπλών συστημάτων και προσδίδουν ιδιαίτερη αξιοπιστία στα τελικά αποτελέσματα. Οι καμπύλες ακτινικών ταχυτήτων, οι φασματικοί τύποι και η μεταλλικότητα των αστέρων-μελών ενός εκλειπτικού συστήματος είναι καίριες παράμετροι για την πληρέστερη κατανόηση της φυσικής εξέλιξης του συστήματος. Φυσικά, δεν πρέπει να αγνοείται ή να υποβαθμίζεται η σημαντικότητα της φωτομετρίας, κυρίως στο κομμάτι που αφορά τον υπολογισμό περιόδων και κλίσεων των τροχιακών επιπέδων των συστημάτων. Η διαχρονική αξία της φωτομετρίας φαίνεται επίσης και από τα O−C διαγράμματα των συστημάτων, τα οποία είναι μείζονος σημασίας, όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 8.1. Η φωτομετρία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τη μελέτη παλλόμενων αστέρων και κυρίως αυτών με μεγάλες συχνότητες ανάπαλσης, ο εντοπισμός των οποίων εξαρτάται από τη χρονική διακριτική ικανότητα που προσδίδει ο εξοπλισμός. ***Εν κατακλείδι, εκτιμούμε ότι οι φωτομετρικές παρατηρήσεις από διαστημικά τηλεσκόπια και η υποστήριξή τους επίγεια αστεροσκοπεία με φασματοσκοπικές αλλά και, όπου απαιτείται, από φωτομετρικές παρατηρήσεις είναι το κλειδί του μέλλοντος για τη μελέτη των διπλών εκλειπτικών συστημάτων.***

Τα συστήματα που αναλύθηκαν στα κεφάλαια 5 και 6 της παρούσας διατριβής παρουσιάζουν αρκετό ενδιαφέρον, ιδίως αυτά στα οποία εντοπίστηκαν μεταβολές στην τροχιακή τους περίοδο λόγω της πιθανής ύπαρξης ενός τρίτου ή/και περισσοτέρων μελών. Οι παρατηρήσεις είναι πολύ καλής ποιότητας, ενώ μελλοντικά μπορούν να πραγματοποιηθούν είτε νέες φωτομετρικές ώστε να ελεγχθούν τυχόν αλλαγές στη φωτεινότητα τους είτε φασματοσκοπικές για τον υπολογισμό του φασματοσκοπικού λόγου μαζών και να ελεγχθούν με αυτόν τον τρόπο οι λύσεις που παρουσιάστηκαν εδώ.

Οι ιδιάζουσες περιπτώσεις των συστημάτων με αστέρα-μέλος τύπου δ Sct που μελετήθηκαν αλλά και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις συσχετίσεις μεταξύ της κυρίαρχης περιόδου ανάπαλσης και διαφόρων βασικών αστρικών παραμέτρων δύναται να αποτελέσουν τη βάση για μελλοντική ερμηνεία της φυσικής εξέλιξης των συστημάτων τύπου oEA. Είναι προφανές ότι το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των προαναφερθέντων συσχετίσεων είναι ακόμα πολύ μικρό, αλλά αυτό οφείλεται στη φωτομετρική ακρίβεια των έως τώρα παρατηρήσεων για τα συστήματα που περιέχουν αστέρες τύπου A-F. Πολλά από τα συστήματα στα οποία σήμερα έχουν βρεθεί παλλόμενοι αστέρες είχαν παρατηρηθεί και παλαιότερα, αλλά δεν είχαν εντοπιστεί αναπάλσεις λόγω του συνδυασμού μικρού ημιπλάτους ανάπαλσης-μεγάλου φωτομετρικού σφάλματος. Επομένως, ***όλα τα συστήματα που περιέχουν αστέρες A-F με τάξη φωτεινότητας IV-V πρέπει να εξεταστούν για την ύπαρξη αναπάλσεων.*** Σε αυτό το σημείο, τα μικρά τηλεσκοπία θα έχουν ιδιαίτερη συνεισφορά, καθώς είναι δυνατόν είτε να συνδυάζονται παρατηρήσεις για επιβεβαιωμένα συστήματα, υπό την έννοια της συνεχούς παρατήρησης με συγκεκριμένη χρονική διακριτική ικανότητα και σε προεπιλεγμένη φασματική περιοχή, είτε να οργανώνονται μεγάλης διάρκειας έρευνες σε τέτοιου τύπου συστήματα, αντίστοιχες με αυτή που παρουσιάστηκε στην παρούσα διατριβή. Στην εποχή των διαστημικών τηλεσκοπίων αλλά και της πολύ καλύτερης φωτομετρικής ακρίβειας των επίγειων τηλεσκοπίων αναμένεται ότι στα επόμενα χρόνια θα εντοπιστούν πάρα πολλά τέτοια συστήματα αυξάνοντας το συνολικό δείγμα, το οποίο με τη σειρά του θα αποδώσει πολύ καλύτερη στατιστική και πολύ ακριβέστερες συσχετίσεις. Επιπροσθέτως, μετά από μερικές δεκαετίες, χρησιμοποιώντας όλα τα έως τότε διαθέσιμα δεδομένα, είναι πολύ πιθανό να είμαστε σε θέση να ερμηνεύσουμε την επιρροή της μεταφοράς μάζας στις αναπάλσεις και να δώσουμε απαντήσεις για το παρελθόν και τη μελλοντική εξέλιξη αυτών των αστέρων συνδυάζοντας πληροφορίες από όλες τις διαθέσιμες μεθόδους παρατήρησης.

Συνοψίζοντας, μπορούμε να πούμε ότι τα αποτελέσματα που προέκυψαν τόσο για τα μεμονωμένα συστήματα που μελετήθηκαν όσο και τα συνολικότερα για τους δ Sct αστέρες-μέλη διπλών συστημάτων μπορούν να θεωρηθούν θεμέλιοι λίθοι για μελλοντική έρευνα, καθώς σύμφωνα με τη ρήση του αρχαίου φιλοσόφου Πυθαγόρα ***«Ἀρχὴ δέ τοι ἥμισυ του παντός»…***

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Ο πίνακας Α1 περιλαμβάνει συνοπτικά τα αποτελέσματα σχετικά με τις απόλυτες παραμέτρους των αστέρων-μελών όλων των συστημάτων που παρουσιάστηκαν στην παρούσα διατριβή, τον τύπο του συστήματος βάσει της γεωμετρίας Roche και κάποια επιπλέον σχόλια.

Πίνακας Α1. Τα βασικά χαρακτηριστικά των αστέρων-μελών των συστημάτων που αναλύθηκαν στην παρούσα διατριβή.

Όνομα	P_{orb} [days]	T_1 [K]	T_2 [K]	M_1 [$M_\odot$]	M_2 [$M_\odot$]	R_1 [$R_\odot$]	R_2 [$R_\odot$]	Τύπος	Σχόλιο
And AD	0.98617	9800	9790	2.8	2.7	2.3	2.4	D	πιθανή ύπαρξη τρίτου σώματος
Aqr CZ	0.86275	8200	5650	2.0	1.0	1.9	1.8	oEA	πιθανή ύπαρξη τρίτου σώματος ή του μηχανισμού Applegate
Aql QY	7.22954	7300	4244	1.6	0.4	4.1	5.4	oEA	μαγνητική πέδηση
Cam AL	1.32833	7600	4520	1.7	0.4	1.4	1.7	SD	πιθανή ύπαρξη τρίτου και τετάρτου σώματος
CMi AV	2.27775	7900	7897	1.9	1.6	2.4	1.7	D	πιθανή ύπαρξη τρίτου σώματος και μετάθεση της γραμμής των αψίδων
Cap TY	1.42346	8200	4194	2.0	1.1	2.5	2.5	oEA	πιθανή ύπαρξη τρίτου σώματος ή του μηχανισμού Applegate και μεταφορά μάζας
Cep DP	1.26996	7300	5049	1.6	1.1	2.2	1.8	SD	πιθανή ύπαρξη τρίτου σώματος
Cep EG	0.54462	7800	5231	1.7	0.8	1.6	1.2	SD	πιθανή ύπαρξη τρίτου σώματος και μεταφορά μάζας
Cep V405	1.37374	9000	4513	2.5	0.9	2.5	0.8	D	
Cet WY	1.93969	7500	4347	1.7	0.4	2.2	2.3	oEA	πιθανή ύπαρξη τρίτου σώματος ή του μηχανισμού Applegate και μεταφορά μάζας

Πίνακας Α1. (συν.)

Όνομα	P_{orb} [days]	T_1 [K]	T_2 [K]	M_1 [$M_\odot$]	M_2 [$M_\odot$]	R_1 [$R_\odot$]	R_2 [$R_\odot$]	Τύπος	Σχόλιο
CrB RW	0.72641	8300	4363	2.2	0.5	1.7	1.3	SD	πιθανή ύπαρξη τρίτου σώματος
Cyg UW	3.45078	8000	4347	1.9	0.3	2.2	2.9	oEA	πιθανή ύπαρξη τρίτου σώματος και τετάρτου σώματος ή/και του μηχανισμού Applegate
Del BW	2.42319	7000	4061	1.5	0.3	2.1	2.2	oEA	μεταφορά μάζας
Dra HL	0.94428	8200	5074	2.5	0.9	2.5	1.8	oEA	
Dra HZ	0.77294	9800	5015	3.0	0.4	2.3	0.8	D+δ Sct	SB1
Dra RZ	0.55088	8000	5303	1.6	0.7	1.6	1.1	SD	πιθανή ύπαρξη τρίτου σώματος
Dra TZ	0.86603	7800	5088	1.8	0.6	1.7	1.5	oEA	πιθανή ύπαρξη τρίτου σώματος ή του μηχανισμού Applegate
Eri TZ	2.60610	9300	4562	2.0	0.4	1.8	2.6	oEA	πιθανή ύπαρξη τρίτου σώματος ή του μηχανισμού Applegate και μεταφορά μάζας
Gem AL	1.39135	6650	4080	1.4	0.3	1.8	1.3	D	πιθανή ύπαρξη τρίτου σώματος ή του μηχανισμού Applegate
Gem FG	0.81913	7700	5068	1.8	0.7	1.7	1.5	SD	πιθανή ύπαρξη τρίτου σώματος
GSC 4589-2999	1.68865	5830	4616	1.8	0.8	2.0	0.9	D	SB2
Her BO	4.27281	7800	4344	1.8	0.4	2.5	3.8	oEA	πιθανή ύπαρξη τρίτου σώματος
Her CC	1.73405	9000	4586	1.9	0.6	1.6	2.3	SD	SB2, πιθανή ύπαρξη τρίτου σώματος ή του μηχανισμού Applegate και μεταφορά μάζας

Πίνακας Α1. (συν.)

Όνομα	P_{orb} [days]	T_1 [K]	T_2 [K]	M_1 [$M_\odot$]	M_2 [$M_\odot$]	R_1 [$R_\odot$]	R_2 [$R_\odot$]	Τύπος	Σχόλιο
Her V338	1.30575	7000	3994	1.5	0.4	1.7	1.7	SD	πιθανή ύπαρξη τρίτου σώματος και τετάρτου σώματος ή/και του μηχανισμού Applegate και μεταφορά μάζας
Her V948	1.27521	7000	4310	1.5	0.4	1.6	0.7	D	
Lac AU	1.39259	8200	3784	2.0	0.6	1.8	2.1	oEA	
Lac CM	1.60469	8700	7034	2.0	1.5	1.5	1.6	D	SB2
Leo UU	1.67972	9000	5688	2.5	0.7	1.9	2.0	D	πιθανή ύπαρξη τρίτου σώματος
Leo VZ	1.08991	8000	4404	2.0	0.6	2.6	1.8	SD	πιθανή ύπαρξη τρίτου σώματος ή του μηχανισμού Applegate
Lep RR	0.91543	7800	4925	1.8	0.4	2.2	1.4	oEA	
Lyn CL	1.58606	7800	4746	1.8	0.3	2.4	1.9	oEA	
Mon KR	1.15096	5700	5705	1.0	0.9	1.6	1.8	D	
Peg AT	1.14564	8400	5189	2.2	1.0	1.7	2.1	SD	πιθανή ύπαρξη τρίτου σώματος ή του μηχανισμού Applegate και μαγνητική πέδηση
Peg BG	1.95267	9000	5095	2.5	1.0	3.0	2.6	oEA	πιθανή ύπαρξη τρίτου σώματος και απώλεια μάζας
Sge UZ	2.21574	8700	4586	2.1	0.3	1.9	2.2	oEA	πιθανή ύπαρξη τρίτου σώματος ή του μηχανισμού Applegate
Tau CF	2.75588	5950	5308	1.1	1.0	2.2	2.4	D	πιθανή ύπαρξη τρίτου σώματος
Tri X	0.97152	8600	5188	2.1	1.3	1.7	2.2	SD	πιθανή ύπαρξη τρίτου, τετάρτου και πέμπτου σώματος ή/και του μηχανισμού Applegate και μαγνητική πέδηση
UMa IO	5.52017	7600	4483	2.2	0.3	3.2	4.2	oEA	

Πίνακας A1. (συν.)

Όνομα	P_{orb} [days]	T_1 [K]	T_2 [K]	M_1 [$M_\odot$]	M_2 [$M_\odot$]	R_1 [$R_\odot$]	R_2 [$R_\odot$]	Τύπος	Σχόλιο
UMa VV	0.68738	9000	5230	2.5	0.6	1.8	1.3	oEA	πιθανή ύπαρξη τρίτου σώματος ή του μηχανισμού Applegate
Vul AW	0.80645	7300	4394	1.6	0.9	1.8	1.7	SD	πιθανή ύπαρξη τρίτου σώματος

D=Αποχωρισμένο, SD=Συμβατικό ημιαποχωρισμένο, oEA=Συμβατικό ημιαποχωρισμένο με μέλος παλλόμενο αστέρα, SB1=Φασματοσκοπικά μονό, SB2=Φασματοσκοπικά διπλό.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Πίνακες χρόνων φωτομετρικών ελαχίστων και μεγίστων

Ο πίνακας Β1 αναφέρεται στα διπλά εκλειπτικά συστήματα τα οποία αποτέλεσαν αντικείμενο της διατριβής και ο πίνακας Β2 στους νέους μεταβλητούς αστέρες (βλ. Παρ. ΣΤ). Οι πίνακες περιέχουν: α) το όνομα του συστήματος, β) το χρόνο ελαχίστου T_{min}, γ) τον τύπο του T (βλ. §1.1.3) και δ) τα φίλτρα (Φίλ.) που χρησιμοποιήθηκαν στις παρατηρήσεις.

Ο πίνακας Β3 αναφέρεται στους παλλόμενους μεταβλητούς που βρίσκονταν εντός των πεδίων των μεταβλητών που αναλύθηκαν στην παρούσα διατριβή, και περιέχει: α) το όνομα του αστέρα, β) το χρόνο μεγίστου T_{max}, και γ) τα φίλτρα που χρησιμοποιήθηκαν στις παρατηρήσεις.

Ο πίνακας Β4 περιέχει τους χρόνους των διαβάσεων του τρίτου μέλους μπροστά από κάποιον από τους συνοδούς του εκλειπτικού συστήματος AV CMi.

Ο πίνακας Β5 αναφέρεται στους χρόνους ελαχίστων των συστημάτων W UMa (βλ. Παρ. Ζ) που παρατηρήθηκαν.

Οι μέθοδοι υπολογισμού ελαχίστων/μεγίστων αναφέρονται στην παράγραφο 3.1.4. Οι χρόνοι των παρακάτω πινάκων είναι διαθέσιμοι στη βιβλιογραφία (Liakos & Niarchos 2009c, 2010f, 2010g, 2011g, 2011i).

Πίνακας Β1. Χρόνοι ελαχίστων των διπλών συστημάτων που αναλύθηκαν στην παρούσα διατριβή.

Όνομα	T_{min} [HJD]	Τ.	Φίλ.	Όνομα	T_{min} [HJD]	Τ.	Φίλ.
AD And	2454711.5097 (2)	I	BVRI		2454373.3282 (1)	I	R
QY Aql	2455794.4802 (20)	I	BVI		2454716.3804 (4)	I	BVRI
CZ Aqr	2455504.3318 (2)	I	B	EG Cep	2454264.5537 (1)	I	RI
	2455505.1932 (3)	I	B		2454265.3706 (1)	II	RI
	2455536.2532 (1)	I	B		2454334.5376 (2)	II	BVR
	2455539.2757 (4)	II	B	V405 Cep	2455124.4902 (7)	II	BVRI
AL Cam	2454516.3669 (1)	I	BV		2455126.5541 (3)	I	BVRI
	2454526.3292 (4)	II	BV	WY Cet	2454766.4518 (1)	I	BVRI
AV CMi	2454107.4977 (2)	I	R	RW CrB	2454176.5330 (1)	I	I
	2454475.5015 (9)	II	VRI		2454193.6037 (3)	II	I
	2454492.4357 (3)	I	VRI	KR Cyg	2454696.3480 (1)	II	B
	2454772.6025 (4)	I	I	UW Cyg	2455393.3837 (11)	II	BVI
	2455599.4273 (2)	I	VI		2455398.5593 (2)	I	BVI
TY Cap	2454296.4612 (1)	I	R	BW Del	2455813.3112 (3)	I	BV
	2454363.3648 (1)	I	R	HL Dra	2455402.3768 (7)	II	BVRI

Πίνακας Β1. (συν.)

Όνομα	T_{min} [HJD]	Τ.	Φίλ.	Όνομα	T_{min} [HJD]	Τ.	Φίλ.
	2455408.5157 (3)	I	BVRI	V948 Her	2455360.4494 (5)	I	BVRI
	2455437.3170 (3)	II	BV		2455365.5491 (2)	I	B
	2455454.3142 (5)	II	BVRI		2455376.3885 (13)	II	BVRI
	2455461.3952 (3)	I	BVRI	AU Lac	2455404.3869 (3)	II	B
HZ Dra	2455343.5529 (3)	I	B		2455406.4674 (1)	I	B
	2455360.5596 (6)	I	BVRI		2455436.4096 (13)	II	BVRI
	2455367.5164 (4)	I	B		2455438.4932 (2)	I	BVRI
	2455376.4063 (7)	II	BVRI		2455441.2780 (6)	I	BVRI
RZ Dra	2454201.5764 (1)	II	R		2455450.3232 (18)	II	BVRI
	2454229.3945 (1)	I	RI		2455457.2910 (10)	II	BVRI
	2454232.4247 (2)	II	RI		2455507.4374 (3)	II	B
TZ Dra	2454204.5621 (2)	II	BI	CM Lac	2455063.4844 (1)	I	BVRI
	2454214.5197 (1)	I	BI		2455068.2982 (1)	I	BVRI
	2454658.3585 (4)	I	BV		2455072.3081 (2)	II	BVRI
	2454661.3878 (1)	I	BV	UU Leo	2454200.2862 (3)	II	R
TZ Eri	2454368.5581 (1)	I	R		2454520.2829 (1)	I	R
	2454475.4092 (2)	I	BV		2454891.5123 (2)	I	BVRI
	2454479.3194 (3)	II	V		2454907.4703 (24)	II	RI
	2454496.2583 (1)	I	B		2455249.3034 (4)	I	BVRI
AL Gem	2454491.4655 (3)	II	VR		2455285.4185 (12)	II	VRI
	2454544.3340 (3)	II	VR	VZ Leo	2454192.3330 (6)	II	RI
	2454887.3015 (1)	I	BVRI	RR Lep	2455953.2674 (4)	I	BV
	2454919.3025 (1)	I	V	CL Lyn	2455576.3657 (8)	II	I
	2454935.3010 (11)	II	BVRI		2455588.2580 (7)	I	BVI
	2455246.2693 (1)	I	BVRI		2455598.5568 (12)	II	VI
	2455273.3935 (9)	II	BVRI	KR Mon	2454108.4508 (1)	I	R
BO Her	2455711.4868 (1)	I	BVI		2454116.5072 (2)	I	R
	2455726.4452 (15)	II	VI		2454165.4234 (3)	II	R
CC Her	2454935.5805 (10)	II	I		2454437.6262 (1)	I	R
	2454988.4685 (1)	I	BVRI		2454486.5401 (4)	II	R
LT Her	2456050.4343 (2)	I	BV		2454791.5462 (3)	II	VR
	2456070.4840 (7)	II	BV		2454825.4988 (15)	I	VR
V338 Her	2454610.4417 (2)	II	B	FT Ori	2454457.5738 (1)	I	VR
	2454706.4237 (1)	I	BVRI	AT Peg	2455436.5775 (5)	II	BR

Πίνακας Β1. (συν.)

Όνομα	T_{min} [HJD]	Τ.	Φίλ.	Όνομα	T_{min} [HJD]	Τ.	Φίλ.
	2455439.4392 (4)	I	BR	IO UMa	2455298.3910 (13)	II	I
	2455442.2968 (8)	II	BR		2455309.4246 (10)	II	RI
	2455447.4616 (1)	I	BR		2455320.4844 (7)	II	I
BG Peg	2455443.5417 (15)	II	VRI		2455334.2764 (5)	I	BVRI
	2455446.4710 (3)	I	BVRI		2455345.3144 (16)	I	BVRI
	2455449.3997 (11)	II	VRI		2455356.3482 (18)	I	BVRI
	2455450.3762 (5)	I	BVRI		2455367.3954 (10)	I	BVRI
	2455494.3133 (13)	II	RI	VV UMa	2455276.3859 (1)	I	B
UZ Sge	2454293.4512 (2)	II	R		2455277.4173 (3)	II	B
	2454313.3922 (2)	II	R		2455284.2907 (4)	II	B
	2454314.4976 (1)	I	R	AW Vul	2455381.4155 (2)	I	BVRI
	2454662.3688 (2)	I	VR		2455383.4316 (11)	II	BVRI
	2455021.3218 (7)	I	BR		2455391.4986 (12)	II	BVRI
	2455022.4293 (8)	II	R		2455393.5121 (11)	I	BVRI
	2455023.5389 (2)	I	B		2455394.3186 (10)	I	BVRI
X Tri	2454764.3948 (1)	I	BVRI				

Πίνακας Β2. Χρόνοι ελαχίστων των διπλών συστημάτων που ανακαλύφθηκαν κατά τις παρατηρήσεις της παρούσας διατριβής.

Όνομα	T_{min} [HJD]	Τ.	Φίλ.	Όνομα	T_{min} [HJD]	Τ.	Φίλ.
2MASS	2455109.3990 (6)	II	B		2454783.5875 (8)	II	I
J00511854	2455138.2859 (7)	II	VI		2455149.6162 (5)	I	I
+5022580	2455140.2623 (4)	I	VI		2455155.5516 (9)	I	I
	2455140.4152 (4)	II	VI		2455158.5221 (7)	I	I
	2455156.2276 (4)	I	R	2MASS	2455380.5448 (15)	I	B
	2455156.3797 (2)	II	R	J20275736	2455384.5349 (27)	I	BI
	2455158.2029 (6)	I	B	+2453029	2455392.5100 (13)	I	BVRI
	2455158.3572 (4)	II	B		2455396.4925 (7)	I	R
2MASS	2454115.5301 (5)	I	R	2MASS	2455415.5027 (3)	I	B
J07083972	2454468.5781 (11)	II	V	J22514830	2455443.3424 (11)	II	BVRI
+1214429	2454477.4864 (17)	II	VR	+1532034	2455443.5315 (15)	I	BVRI
	2454492.5078 (18)	I	VRI		2455446.3653 (12)	I	BV
	2454522.3797 (16)	II	VRI		2455446.5509 (13)	II	BV
	2454773.5715 (7)	II	I		2455457.3707 (12)	I	BVRI

Πίνακας Β2. (συν.)

Όνομα	T_{min} [HJD]	Τ.	Φίλ.	Όνομα	T_{min} [HJD]	Τ.	Φίλ.
	2455457.5416 (13)	II	I		2455538.4351 (8)	II	I
	2455466.4338 (10)	II	BVRI		2455588.3515 (3)	I	I
	2455467.3184 (17)	I	BVRI		2455594.2338 (9)	II	VI
	2455502.2785 (23)	II	VRI		2455594.4523 (6)	I	VI
	2455505.3022 (20)	I	BVRI		2455599.2493 (7)	I	VI
GSC	2455632.360 (4)	I	I		2455599.4583 (7)	II	VI
0163-1415					2455600.3303 (6)	II	VI
GSC	2455228.3940 (6)	I	BVRI		2455601.4278 (6)	I	VI
0198-2061	2455231.3374 (5)	I	BVRI	GSC	2455013.4801 (12)	I	BI
	2455232.3812 (7)	II	BVRI	1025-1841	2455014.5168 (15)	II	BI
	2455246.4542 (15)	I	I	GSC	2455436.5809 (8)	I	BR
	2455254.4114 (10)	I	BVRI	1137-0293	2455437.3442 (5)	I	BR
	2455258.3992 (13)	II	BVRI		2455437.5266 (9)	II	BR
	2455271.4020 (6)	II	I		2455440.3694 (5)	I	BR
GSC	2455231.2721 (7)	I	BVRI		2455442.4410 (6)	II	BR
0199-2035	2455232.2829 (5)	I	BVRI		2455447.3567 (4)	II	BR
	2455245.4475 (6)	I	BVRI	GSC	2454609.3997 (2)	I	B
	2455246.4603 (27)	I	BVRI	3101-0683	2454610.3475 (1)	I	B
	2455271.2688 (6)	II	BVRI		2454610.5055 (2)	II	B
	2455272.2836 (5)	II	BVRI		2454611.4540 (2)	II	B
GSC	2454107.3902 (4)	II	R		2454699.3835 (3)	II	BVRI
0770-0523	2454107.6002 (5)	I	R		2454700.3326 (3)	II	BVRI
	2454115.4502 (5)	I	R		2454701.2817 (4)	II	BVRI
	2454477.4636 (9)	II	VR		2454701.4384 (4)	I	BVRI
	2454485.5262 (9)	I	VI		2454703.3363 (3)	I	BVRI
	2454486.4023 (9)	I	VRI		2454704.4433 (6)	II	BVRI
	2454492.5014 (11)	I	VI		2454706.3421 (3)	II	BVRI
	2454522.3624 (10)	II	VRI		2454707.4480 (4)	I	BVRI
	2455149.6158 (8)	II	I	GSC	2455383.5280 (5)	II	BI
	2455155.5060 (10)	I	I	3164-1558	2455392.4036 (2)	II	B
	2455158.5562 (5)	I	I		2455403.4968 (5)	II	BVI
	2455296.2998 (11)	I	I		2455412.3732 (4)	II	B
	2455522.5382 (3)	I	I	GSC	2455399.5143 (17)	II	B
	2455537.5631 (3)	II	I	3208-1986	2455400.5362 (7)	I	BVRI

Πίνακας Β2. (συν.)

Όνομα	T_{min} [HJD]	Τ.	Φίλ.	Όνομα	T_{min} [HJD]	Τ.	Φίλ.
	2455401.5482 (10)	II	BRI		2455570.3820 (7)	I	BV
	2455402.3560 (7)	II	BVRI		2455576.4544 (7)	II	VI
	2455402.5593 (3)	I	BVRI		2455576.5799 (5)	I	BVI
	2455410.4484 (4)	II	BVRI		2455577.2285 (7)	II	BI
	2455411.4593 (3)	I	BVRI		2455580.5832 (8)	II	BVI
GSC	2455399.4813 (5)	I	BVRI		2455581.3580 (10)	II	I
3208-2644	2455402.3817 (13)	II	BVRI		2455581.4859 (7)	I	BVI
GSC	2455490.4174 (6)	II	B		2455588.3333 (7)	II	BVI
3281-1359	2455493.2672 (9)	I	BVI		2455588.5905 (11)	II	BVI
	2455493.4887 (11)	II	BVI		2455598.2753 (7)	I	BVI
GSC	2455847.4869 (75)	I	VRI		2455598.4099 (8)	II	BVI
3332-0638	2455848.5258 (76)	II	VRI		2455598.5349 (4)	I	BVI
	2455852.6150 (94)	II	I		2455602.2830 (9)	II	BVI
	2455854.4571 (18)	I	I	GSC	2455157.6268 (6)	I	BVI
	2455855.4815 (24)	II	RI	3802-1986	2455158.3955 (12)	II	BVI
	2455856.5096 (68)	I	BVRI		2455538.4643 (4)	I	BVI
	2455866.3433 (50)	I	RI		2455568.2873 (4)	II	BVI
	2455867.3691 (19)	II	I	GSC	2455448.4226 (7)	II	B
	2455867.5653 (41)	I	I	3913-0160	2455454.4395 (9)	II	BR
	2455868.3816 (50)	I	RI		2455459.3952 (4)	I	BVRI
	2455869.4026 (24)	II	I		2455461.3330 (4)	II	BVRI
	2455874.3295 (30)	II	I		2455466.2811 (4)	I	BVRI
GSC	2455436.3573 (11)	I	BVR		2455467.3551 (13)	II	BVRI
3610-0124	2455436.5247 (12)	II	BVR	GSC	2455466.5356 (13)	I	B
	2455437.5703 (8)	II	BVR	4372-0831	2455469.5312 (11)	II	VI
	2455438.4306 (8)	I	BVR		2455502.5237 (10)	I	BVI
	2455444.3290 (16)	I	BVR		2455505.5377 (17)	II	VI
	2455448.3209 (9)	II	BVR	GSC	2455401.3630 (9)	II	VRI
	2455450.3960 (16)	II	BV	4465-1210	2455403.3954 (9)	II	UBVRI
	2455457.3278 (9)	II	BVR		2455408.4700 (7)	I	UBVRI
	2455457.4986 (9)	I	BVRI		2455410.4986 (5)	II	UBVRI
GSC	2455569.3530 (6)	I	B	GSC	2455123.4148 (12)	II	BVRI
3787-0502	2455569.4813 (2)	II	B	4516-2121	2455124.3793 (11)	II	BVRI
	2455569.6061 (7)	I	B		2455126.5573 (8)	I	BVRI

Πίνακας Β2. (συν.)

Όνομα	T_{min} [HJD]	Τ.	Φίλ.	Όνομα	T_{min} [HJD]	Τ.	Φίλ.
	2455149.3063 (7)	I	R		2455580.5809 (4)	I	VR
	2455149.5512 (5)	II	R		2455581.5516 (1)	I	R
	2455155.3601 (7)	II	I	USNO-	2455587.3472 (2)	I	I
GSC	2454290.4167 (3)	II	RI	A2.0 0975-	2455594.4133 (4)	I	VI
4589-2999	2454306.4601 (7)	I	BVRI	04721840	2455599.4591 (3)	I	VI
	2454312.3603 (5)	II	BV		2455600.4676 (4)	I	VI
	2454377.3822 (1)	I	R		2455601.2241 (4)	II	VI
	2454399.3354 (1)	I	R		2455601.4771 (3)	I	VI
	2454637.4327 (3)	I	BVRI		2455602.2334 (4)	II	VI
	2454642.4992 (1)	I	V		2455603.2420 (4)	II	VI
	2454691.4703 (2)	I	V	USNO-	2455818.5318 (19)	II	BVRI
GSC	2454437.6234 (2)	I	R	A2.0 1275-	2455819.5033 (17)	I	BVRI
4833-1209	2454791.6365 (8)	I	VR	01929590	2455833.4731 (35)	I	BVRI
	2454797.5610 (6)	II	VR		2455835.6033 (76)	II	BVRI
	2454798.6051 (4)	I	VR	USNO-	2455438.3775 (19)	I	BVRI
	2454824.3893 (9)	I	VR	A2.0 1350-	2455441.3060 (9)	II	B
	2454883.2778 (17)	II	VR	16136263	2455457.3195 (12)	I	BVRI
	2454886.4134 (6)	I	VR		2455537.3322 (12)	II	VRI
	2454906.2730 (14)	II	VR		2455538.3158 (5)	I	R
USNO-	2455602.3200 (6)	I	B		2455603.2420 (4)	II	VI
A2.0 0900-	2455603.4220 (18)	I	I	USNO-	2455439.5919 (14)	I	BV
04405532	2455630.2951 (9)	I	I	A2.0 1350-	2455441.3565 (10)	I	BVRI
	2455632.2900 (11)	II	VI	16144088	2455448.4193 (18)	I	BVRI
USNO	2455569.4588 (4)	II	B		2455450.4064 (18)	II	BVRI
A2.0 0900-	2455576.3915 (6)	I	VR		2455457.2512 (20)	I	B
05986449	2455576.5543 (6)	II	VR		2455457.4717 (12)	II	BVRI

Πίνακας Β3. Χρόνοι μεγίστων διάφορων παλλόμενων αστέρων που βρίσκονταν εντός των πεδίων άλλων γνωστών διπλών συστημάτων.

Όνομα	T_{max} [HJD]	Φίλ.	Όνομα	T_{max} [HJD]	Φίλ.
BX Del[a]	2455821.2972 (4)	BV		2455460.4890 (11)	BVRI
	2455822.3886 (11)	BV		2455467.5438 (21)	BVRI
	2455834.3970 (5)	BV		2455503.4367 (9)	BV
	2455856.2340 (4)	BV		2455505.3686 (12)	BVRI
BH Peg[b]	2455446.3910 (9)	BRI	TU UMa[b]	2455632.5084 (8)	UBVRI
	2455449.5890 (14)	BVRI		2455633.6232 (23)	UBVRI
	2455457.2877 (12)	BVRI		2455664.2930 (6)	UBVRI

[a]τύπου δ Cephei, [b]τύπου RR Lyrae

Πίνακας Β4. Χρόνοι ελαχίστων των διαβάσεων του τρίτου μέλους του συστήματος AV CMi.

$T_{transit}$ [HJD]	Φίλτρο	$T_{transit}$ [HJD]	Φίλτρο
2454521.3614 (20)	VRI	2455538.5093 (2)	I
2454522.3998 (16)	RI	2455539.5407 (12)	I
2454783.5696 (7)	I	2455587.3071 (4)	I
2454824.5947 (21)	I	2455588.3496 (3)	I
2454899.3555 (4)	I	2455599.2565 (3)	I
2455522.4190 (13)	I	2455600.2892 (9)	I
2455537.4665 (4)	I	2455601.3373 (7)	I

Πίνακας Β5. Χρόνοι ελαχίστων των συστημάτων W UMa που παρατηρήθηκαν.

Όνομα	T_{min} [HJD]	Τ.	Φίλ.	Όνομα	T_{min} [HJD]	Τ.	Φίλ.
And QX	2455882.3077 (5)	II	BVRI	Boo AC	2454572.3454 (2)	I	BVRI
	2455882.5141 (6)	I	BVRI		2454572.5224 (2)	II	BVRI
	2455884.3688 (4)	II	BVRI	Boo DN	2455666.3079 (5)	II	BVRI
	2455887.2533 (3)	II	BVRI		2455685.3286 (6)	I	BVRI
	2455887.4600 (3)	I	BVRI		2455685.5532 (14)	II	BVRI
BD+07 3142	2455695.4632 (2)	II	BVRI		2455688.4609 (7)	I	BVRI
	2455696.4281 (2)	I	BVRI		2455691.3714 (3)	II	BVRI
	2455697.3900 (2)	II	BVRI		2455693.3848 (5)	I	BVRI
	2455697.5287 (2)	I	BVRI	Boo EL	2455696.3621 (5)	I	BVRI
Boo 44(i)	2455272.3703 (7)	I	UBVRI		2455697.3952 (4)	II	BVRI
	2455272.5030 (5)	II	UBVRI		2455698.4311 (6)	I	BVRI

Πίνακας Β5. (συν.)

Όνομα	T_{min} [HJD]	Τ.	Φίλ.	Όνομα	T_{min} [HJD]	Τ.	Φίλ.
	2455699.4665 (7)	II	BVRI		2455662.3145 (1)	I	VI
	2455702.3606 (4)	II	BVRI		2455663.3821 (1)	II	BR
Boo TZ	2454099.6529 (1)	I	R		2455663.5014 (1)	I	VI
	2454102.6259 (1)	II	R	Com RZ	2454566.2706 (1)	I	VRI
	2454605.4207 (2)	I	BVRI		2454573.3789 (1)	I	BVRI
	2454608.3921 (2)	I	BVRI		2454573.5489 (2)	II	BVRI
	2454608.5435 (3)	II	BVRI	Cyg V1073	2455774.3275 (7)	I	BRI
	2454624.4384 (2)	II	BVRI		2455777.4684 (8)	I	UBVRI
Boo VW	2455698.4256 (2)	II	BVRI		2455779.4327 (2)	II	UBVRI
	2455702.5323 (3)	II	BVRI		2455793.5788 (3)	II	UBVRI
	2455703.3886 (2)	I	BVRI	Cyg V1191	2455833.3032 (2)	I	BVRI
	2455707.4961 (2)	I	BVRI		2455835.3382 (7)	II	BVRI
FN Cam	2455929.6065 (11)	II	BVRI		2455847.2473 (2)	II	BVRI
	2455930.2817 (15)	II	BVRI		2455848.3471 (3)	I	BVRI
	2455930.6240 (7)	I	BVRI	Dra HI	2455729.3917 (5)	II	BVRI
	2455935.3642 (2)	I	BVRI		2455731.4815 (5)	I	BVRI
Cnc TX	2455289.3403 (3)	I	BVRI		2455732.3786 (6)	II	BVRI
Cas V523	2455126.2678 (1)	II	BVI	Eri YY	2455891.4726 (1)	I	BVRI
	2455126.3843 (1)	I	BVI		2455894.5262 (1)	II	BVRI
Cep GK	2454114.2739 (1)	I	R	AK Her	2455343.4415 (2)	I	BVRI
	2454273.4225 (1)	I	VI		2455344.4973 (2)	II	BVRI
	2454279.5078 (1)	II	VI	Her V972	2455344.4602 (11)	I	UBVRI
	2455395.4022 (5)	II	UBVRI		2455368.3877 (2)	I	BV
	2455403.3591 (6)	I	UBVRI		2455374.3660 (9)	II	UBVRI
	2455408.5084 (5)	II	UBVRI	Hya DF	2454189.3453 (2)	II	R
Com RW	2455643.3269 (2)	I	BR		2454210.3381 (1)	I	R
	2455656.2618 (2)	II	BR		2455579.3760 (1)	I	BVRI
	2455656.3811 (1)	I	BR		2455579.5419 (1)	II	BVRI
	2455656.4988 (1)	II	BR	Leo XY	2455664.2666 (3)	II	BVRI
	2455659.3471 (1)	II	VI		2455664.4105 (2)	I	BVRI
	2455659.4665 (1)	I	VI		2455686.2868 (4)	I	BVRI
	2455659.5845 (1)	II	VI		2455688.2750 (2)	I	BVRI
	2455661.3650 (2)	I	BR		2455688.4164 (3)	II	BVRI
	2455661.4832 (1)	II	BR		2455689.2685 (3)	II	BVRI

Πίνακας Β5. (συν.)

Όνομα	T_{min} [HJD]	Τ.	Φίλ.	Όνομα	T_{min} [HJD]	Τ.	Φίλ.
Mon V868	2455939.4617 (2)	I	BVRI	Oph V2612	2455727.3963 (2)	I	BVRI
	2455940.4192 (2)	II	BVRI		2455729.4632 (2)	II	BVRI
	2455953.4923 (2)	I	BVRI	Ori ER	2455198.3340 (1)	II	BVRI
Oph V566	2454980.5158 (2)	II	BVRI		2455199.3924 (1)	I	BVRI
	2454982.3590 95)	I	BVRI		2455232.2062 (3)	II	BVRI
Oph V839	2454262.4460 (1)	I	BVRI		2455232.3864 (1)	I	BVRI
	2454263.4695 (1)	II	BVRI		2455580.2486 (3)	II	BVRI
	2454268.3780 (2)	I	BVRI		2455580.4600 (3)	I	BVRI
	2454269.3989 (1)	II	BVRI		2455581.3063 (1)	I	BVRI
	2454287.3945 (1)	I	BVRI	Ori V1387	2455898.3965 (6)	II	BVI
	2454288.4192 (1)	II	BVRI		2455904.5730 (9)	I	BVRI
	2454299.4619 (2)	II	BVRI	Peg V407	2455853.4082 (4)	I	BVRI
	2454300.4837 (2)	I	BVRI		2455854.3718 (4)	II	BVRI
	2454315.4129 (1)	II	BVRI		2455855.3207 (1)	I	BVRI
	2454316.4355 (1)	I	BVRI	Per V881	2455818.4056 (5)	I	BVRI
	2454654.4801 (1)	II	BVRI		2455818.5984 (3)	II	BVRI
	2454655.5019 (1)	I	BVRI		2455819.5681 (3)	I	BVRI
	2454666.3412 (1)	II	BVRI		2455820.5353 (4)	II	BVRI
	2454667.3625 (1)	I	BVRI		2455821.5049 (4)	I	BVRI
	2454685.3586 (1)	I	BVRI		2455833.5136 (3)	I	BVRI
	2454686.3825 (1)	II	BVRI		2455834.4814 (3)	II	BVRI
	2454985.3669 (2)	II	BVRI		2455835.4501 (3)	I	BVRI
	2454997.4323 (1)	I	BVRI	Ser AU	2455730.4918 (1)	II	BVRI
Oph V2388	2455746.4824 (5)	I	BVRI		2455731.4593 (1)	I	BVRI
	2455748.4894 (5)	II	BVRI		2455739.3809 (1)	II	BVRI
Oph V2610	2455712.5283 (6)	I	BVRI		2455740.3486 (1)	I	BVRI
	2455714.4490 (4)	II	BVRI	Sex XX	2455982.4356 (7)	II	BVRI
	2455719.5665 (8)	II	BVRI		2456006.4612 (3)	I	BVRI
	2455720.4206 (10)	II	BVI		2456008.3536 (2)	II	BVRI
	2455722.5504 (6)	II	BVRI	Tau RZ	2455505.5412 (2)	II	B
	2455723.4050 (7)	II	BVRI		2455536.2999 (2)	II	B
	2455727.4569 (12)	I	BVRI		2455536.5080 (1)	I	B
	2455741.5312 (11)	I	BVRI		2455537.3392 (1)	I	BVI
	2455744.5169 (8)	I	BVRI		2455537.5471 (2)	II	BVI

Πίνακας Β5. (συν.)

Όνομα	T_{min} [HJD]	Τ.	Φίλ.	Όνομα	T_{min} [HJD]	Τ.	Φίλ.
Tau V1128	2454426.4313 (1)	I	BVRI	UMa HX	2455975.4313 (2)	I	BVRI
	2454426.5844 (2)	II	BVRI		2455975.6226 (3)	II	BVRI
	2454438.3409 (2)	I	BVRI	UMi TU	2455276.4687 (9)	I	BVRI
	2454438.4937 (3)	II	BVRI		2455277.4066 (10)	II	BVRI
	2455127.4110 (2)	II	VRI		2455285.5216 (9)	I	BVRI
UMa AW	2455632.3045 (10)	II	UBVRI		2455289.4796 (12)	II	BVRI
	2455632.5286 (11)	I	UBVRI	Vir PY	2455690.3317 (2)	II	BVRI
	2455633.4050 (6)	I	UBVRI		2455699.3574 (3)	II	BVRI
	2455661.4833 (12)	I	BVRI		2455702.3154 (2)	I	BVRI
	2455664.3362 (5)	II	UBVRI				

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Πίνακας ακτινικών ταχυτήτων

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι ακτινικές ταχύτητες *RVs* (βλ. §3.2.3) των μελών των εκλειπτικών συστημάτων που αναλύθηκαν στην παρούσα διατριβή. Οι φασματοσκοπικές παρατηρήσεις έλαβαν χώρα στο Αστεροσκοπείο Σκίνακα (βλ. §2.3.3). Επίσης, ο πίνακας Γ1 περιέχει τον χρόνο και τη γεωμετρική φάση, βάσει της εφημερίδας του εκάστοτε συστήματος (βλ. τις παραγράφους των συστημάτων), που αντιστοιχεί στην κάθε *RV*.

Πίνακας Γ1. Ηλιοκεντρικές ακτινικές ταχύτητες των μελών των συστημάτων.

HJD (-2400000)	Φάση	RV$_1$ [km/s]	RV$_2$ [km/s]	HJD (-2400000)	Φάση	RV$_1$ [km/s]	RV$_2$ [km/s]
HZ Dra				54966.4147	0.2819	-66 (26)	170 (68)
55825.3099	0.2800	-36 (14)		54966.4472	0.3006	-62 (18)	170 (47)
55825.3204	0.2936	-35 (14)		54966.4792	0.3191	-65 (31)	163 (74)
55825.3451	0.3255	-32 (15)		54966.5293	0.3480	-60 (11)	165 (61)
55825.3549	0.3382	-35 (14)		CM Lac			
55825.3652	0.3515	-31 (13)		55473.2793	0.3736	-64 (24)	153 (21)
55829.4198	0.5972	23 (19)		55473.2912	0.3810	-78 (17)	142 (16)
55829.4321	0.6132	28 (15)		55473.3038	0.3889	-63 (23)	140 (18)
55829.4472	0.6327	21 (17)		55473.3167	0.3969	-57 (27)	127 (30)
55829.4641	0.6546	31 (13)		55473.3294	0.4048	-36 (34)	106 (36)
55829.4763	0.6703	23 (13)		55473.3420	0.4127	-34 (19)	
55829.4886	0.6862	28 (12)		55473.3546	0.4205	-26 (23)	
55829.5007	0.7019	25 (13)		55475.4708	0.7393	147 (26)	-123 (25)
55829.5251	0.7335	29 (14)		55475.4848	0.7480	148 (22)	-126 (26)
GSC 4589-2999				55475.5039	0.7599	128 (28)	-141 (20)
54964.505	0.6882	51 (29)	–165 (17)	55475.5175	0.7684	130 (27)	-137 (21)
54965.397	0.2163	–93 (24)	156 (29)	55475.5311	0.7768	142 (23)	-130 (21)
54966.349	0.7800	57 (24)	–180 (18)	55475.5447	0.7853	150 (21)	-127 (18)
54966.375	0.7951	71 (32)	–170 (16)	55476.2630	0.2329	-91 (21)	187 (19)
CC Her				55476.2638	0.2335	-89 (20)	189 (20)
54964.5518	0.2076	-69 (31)	156 (46)	55476.2812	0.2443	-91 (22)	184 (19)
54965.4666	0.7352	41 (27)	-185 (21)	55476.2892	0.2493	-92 (19)	183 (21)
54965.5007	0.7549	37 (18)	-194 (37)	55476.2973	0.2543	-87 (21)	190 (22)
54965.5291	0.7712	34 (9)	-198 (29)	55476.3054	0.2594	-96 (20)	177 (21)
54965.5619	0.7901	36 (8)	-197 (37)	55476.3137	0.2646	-96 (21)	173 (21)

Πίνακας Γ2. (συν.)

HJD (-2400000)	Φάση	RV_1 [km/s]	RV_2 [km/s]	HJD (-2400000)	Φάση	RV_1 [km/s]	RV_2 [km/s]
55476.3522	0.2886	-100 (22)	170 (22)	55476.4652	0.3590	-81 (24)	142 (27)
55476.3609	0.2940	-88 (21)	181 (22)	55476.4789	0.3675	-77 (24)	131 (26)
55476.3753	0.3030	-91 (23)	173 (22)	55476.4934	0.3765	-86 (25)	131 (21)
55476.4529	0.3513	-75 (23)	145 (25)				

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

Αποτελέσματα της μακράς διαρκείας έρευνας σε εκλειπτικά συστήματα υποψήφια να περιέχουν αστέρα τύπου δ Scuti

Ο πίνακας Δ1 περιλαμβάνει τους συνδυασμούς οργάνων (τηλεσκόπια και CCD) που χρησιμοποιήθηκαν κατά την έρευνά μας.

Ο πίνακας Δ2 περιέχει 106 εκλειπτικά συστήματα υποψήφια να περιέχουν παλλόμενο μέλος τύπου δ Sct, τα οποία παρατηρήθηκαν κατά την μακράς διαρκείας έρευνά μας (Liakos & Niarchos 2009a, 2012b, 2012d, Liakos et al. 2012b). Οι στήλες περιέχουν: α) το όνομα του συστήματος, β) το φαινόμενο μέγεθός του m_{max} στο μέγιστο της λαμπρότητάς του στο *B* φίλτρο, όπως δίνεται σε καταλόγους, γ) τον φασματικό τύπο του *Φ.Τ.*, δ) τα φίλτρα *Φ* που χρησιμοποιήθηκαν στις παρατηρήσεις, ε) τον αριθμό των νυκτών *D* που διατέθηκαν, στ) τις συνολικές ώρες παρατήρησης *hrs*, ζ) το μέσο φωτομετρικό σφάλμα των δεδομένων *s.d.*, η) τη φάση της φωτομετρικής καμπύλης που καλύφθηκε, θ) την κυρίαρχη συχνότητα ανάπαλσης f_{dom} και ι) το αντίστοιχο ημιπλάτος της στο *B* φίλτρο A_B και ια) τη συντομογραφία του εξοπλισμού *Εξ.* που χρησιμοποιήθηκε στις παρατηρήσεις, σύμφωνα με τον πίνακα Δ1. Με "?" σημειώνονται οι αμφίβολες περιπτώσεις, δηλαδή τα συστήματα για τα οποία υπήρχε υπόνοια ανάπαλσης αλλά το φωτομετρικό σφάλμα των δεδομένων ήταν μεγαλύτερο του ενδεχόμενου πλάτους ανάπαλσης. Οι πλήρεις αναλύσεις των συστημάτων των οποίων οι καμπύλες φωτός καλύφθηκαν πλήρως, αλλά δεν παρουσίαζαν αναπάλσεις, παρουσιάζονται στα κεφάλαια 5 και 6 της παρούσας διατριβής.

Ο πίνακας Δ3 περιέχει όλα τα γνωστά (79 έως τώρα) διπλά συστήματα στα οποία έχουν εντοπιστεί αστέρες-μέλη τύπου δ Sct. Αναλυτικά, οι στήλες περιλαμβάνουν: α) το όνομα του συστήματος, β) την τροχιακή του περίοδο P_{orb}, γ) την κυρίαρχη περίοδο ανάπαλσης P_{puls}, και δ) το ημιπλάτος της *A* σε συγκεκριμένο μέρος του Η/Μ φάσματος, ε) τη μάζα και στ) την ακτίνα του παλλόμενου αστέρα-μέλους, ζ) τον τύπο της γεωμετρίας Roche του συστήματος και η) τη βιβλιογραφική αναφορά.

Πίνακας Δ1. Εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τον εντοπισμό αστέρων τύπου δ Sct σε εκλειπτικά συστήματα αστέρων.

Τηλεσκόπιο (διάμετρος, εστιακός λόγος)	CCD	Τοποθεσία	Συντομογραφία
Cassegrain 0.4m, f/8	ST-8XMEI	Πανεπιστήμιο Αθηνών[1]	A1
Cassegrain 0.4m, f/8	ST-10XME	Πανεπιστήμιο Αθηνών[1]	A2
Νευτώνειο κατοπτρικό 0.2m, f/5	ST-8XMEI	Πανεπιστήμιο Αθηνών[1]	A3
Νευτώνειο κατοπτρικό 0.25m, f/4.7	ST-8XMEI	Πανεπιστήμιο Αθηνών[1]	A4
Cassegrain 1.2m, f/13	AP47p	Κρυονέρι Κορινθίας[2]	K

[1]βλ. §2.3.1, [2]βλ. §2.3.2

Πίνακας Δ2. Εκλειπτικά συστήματα αστέρων τα οποία παρατηρήθηκαν κατά την έρευνά μας για τον εντοπισμό πιθανών παλλόμενων μελών τύπου δ Scuti.

Όνομα	m_{max} [mag]	Φ.Τ	Φ.	D	Hrs	s.d. [mmag]	Φάση	f_{dom} [c/d]	A_B [mmag]	Εξ.
And AD	11.20	A0	BVRI	5	25+	4.8	0.00-1.00			A1
And CP	11.80	A5	B	1	6	5.8	0.20-0.26			A2
And TW	9.49	F0	B	2	6	2.2	0.78-0.81, 0.26-0.29			A2
And V342	7.98	A3	B	1	6.5	1.8	0.90-1.00			A3
And V363	9.29	A2	B	1	4	4.2	0.00-0.14			A3
Aqr CZ	11.20	A5	B	10	25+	2.9	0.00-1.00	35.508 (2)	3.7 (5)	A2
Aqr RY	8.86	A3	B	1	3	5.6	0.18-0.25			A1
Aql QY	11.40	F0	BVI	31	200+	3.8	0.00-1.00	10.656 (1)	11.8 (2)	A2
Aql V805	7.85	A3	B	1	4	1.3	0.82-0.88			A3
Aql V1461	9.00	A0	B	1	4.5	3.7	0.56-0.67			A3
Ari SZ	11.60	F0	V	1	3.5	3.6	0.51-0.60			A2
Aur V417	7.99	A0	BVRI	9	45+	1.5	0.00-1.00			A2
Boo UW	10.40	F0	B	1	5	5.1	0.43-0.63			A1
Cam AL	10.28	A4	BV	7	30+	4.2	0.00-1.00			A1
Cam AY	9.90	-	B	1	6	6	0.73-0.82			A1
Cam SS	10.93	G1	B	1	4	3.8	0.61-0.64			A2
Cap TY	10.30	A5	BVRI	11	35+	2.2	0.00-1.00	24.222 (1)	18.5 (7)	A1
Cas IS	12.10	A2	B	1	4	4.1	0.19-0.26			K
Cas V364	11.10	A7	B	1	4	3.4	0.15-0.26			A2
Cas V773	6.32	A3	B	1	4	2.1	0.45-0.59			A3
Cas V821	8.37	A0	B	1	4	1.5	0.60-0.68	?		A2
Cep EG	9.51	A3	BVRI	6	20+	5.7	0.00-1.00			A1
Cep EI	7.94	A5	B	1	4.5	1.4	0.22-0.24	?		A2
Cep V405	8.95	A2	BVRI	5	35	2.4	0.00-1.00			A2
Cep WX	9.38	A3	B	1	2.5	3.8	0.64-0.67			A2
Cep XX	9.47	A7	B	1	4	2.5	0.63-0.69	32.07 (4)	3.6 (4)	A2
Cet DP	7.01	A2	B	1	4	1.9	0.88-0.92			A3
Cet RW	10.40	A5	BVRI	1	6	4.5	0.69-0.92			A1
Cet WY	9.60	A2	BVRI	16	50+	3.6	0.00-1.00	13.211 (1)	7.7 (3)	A1
CrB RW	10.21	F0	RI	8	20+	9.8	0.00-1.00			A1
Cyg BR	9.94	B9	B	1	4	3.4	0.79-0.91			A1
Cyg KR	9.31	A1	B	2	11	4.1	0.18-0.36, 0.42-0.75			A1
Cyg MY	8.68	A3	B	3	13	2	0.21-0.29, 0.71-0.76			A2
Cyg UW	11.00	A5	BVI	26	90+	6.5	0.00-1.00	27.841 (2)	1.9 (2)	A2

Πίνακας Δ2. (συν.)

Όνομα	m_{max}	Φ.Τ	Φ.	D	Hrs	s.d. [mmag]	Φάση	f_{dom} [c/d]	A_B [mmag]	Εξ.
Cyg V345	11.30	A1	B	2	9	2	0.27-0.43			K
Cyg V456	10.80	A2	B	1	7.5	5.2	0.17-0.51			A1
Cyg V466	10.53	A3	B	4	22	2.8	0.15-0.50, 0.55-0.82			A1
Cyg V477	8.71	A1	BV	1	4	2.9	0.71-0.77			A2
Cyg V959	11.50	A5	B	1	4	3.4	0.49-0.61			K
Cyg V1034	9.60	A0	B	1	3	2.6	0.63-0.76			A1
Cyg V2083	7.13	A3	B	1	4	2.3	0.09-0.15			A3
Cyg V2154	8.18	F0	B	1	4	1.1	0.59-0.65			A2
Cyg VW	10.58	A3	B	1	4	3	0.20-0.22			A2
Del BW	11.40	F	BV	18	85.5	3.8	0.00-1.00	25.100 (1)	2.9 (2)	K&A2
Dra HL	7.52	A5	BVRI	17	60+	2.1	0.00-1.00	26.914 (1)	3.0 (2)	A2
Dra HZ	8.34	A0	BVRI	8	25+	2.7	0.00-1.00	51.068 (2)	4.0 (4)	A3
Dra RX	10.84	F0	B	2	11	5.4	0.38-0.45, 0.58-0.64			A2
Dra RZ	10.40	A5	BRI	8	20+	5.8	0.00-1.00			A1
Dra TZ	9.34	A7	BVRI	17	60+	4.3	0.00-1.00	50.993 (2)	3.7 (2)	A1
Dra Z	10.59	A5	V	1	2.5	4	0.68-0.77			A1
Eri TZ	9.67	A1	BV	26	60+	2.8	0.00-1.00	18.718 (1)	9.0 (2)	A1
Her AD	10.02	A4	B	1	4	4.2	0.63-0.65			A3
Her BO	10.70	A7	BVRI	25	130+	3.8	0.00-1.00	13.430 (1)	68 (3)	A2
Her CC	9.95	A2	BVRI	13	40+	2.8	0.00-1.00	?		A2
Her FN	10.50	A8	B	1	4.5	6	0.76-0.83			A2
Her HS	8.58	B6	BVI	4	4	3.8	0.20-0.30			A2
Her LT	10.70	A2	BV	10	50+	3.5	0.00-1.00	30.8 (3)	6.0 (6)	A2
Her MX	11.40	F5	B	2	12	4.5	0.59-0.67, 0.25-0.38			K
Her SZ	10.28	F0	B	1	4	2.8	0.20-0.29			A2
Her TX	8.12	A4	B	1	3.5	5.6	0.79-0.86			A1
Her UX	9.11	A0	B	1	4	3.6	0.73-0.82			A1
Her V338	10.21	F0	B	13	35	4.6	0.00-1.00			A1
Her V359	10.03	F0	BV	2	10	5.8	0.16-0.32, 0.58-0.65			A1
Her V948	9.26	F2	BVRI	10	35	3.5	0.00-1.00			A2
Her V1002	9.14	A0	B	1	4	3.5	0.13-0.23			A3
Hya DE	11.00	A2	B	1	4	3.9	0.28-0.32			A2
Lac AU	11.50	A5	BVRI	19	80+	2	0.00-1.00	58.217 (1)	5.0 (3)	K&A3
Lac CM	8.39	A3	BVRI	10	40+	2.6	0.00-1.00			A2

Πίνακας Δ2. (συν.)

Όνομα	m_{max}	Φ.Τ	Φ.	D	Hrs	s.d. [mmag]	Φάση	f_{dom} [c/d]	A_B [mmag]	Εξ.
Lac TW	11.50	A2	B	2	10	6.1	0.67-0.73			A2
Lac V364	8.54	A3	B	1	4	1.9	0.25-0.27			A3
Lac V398	8.87	A0	B	1	4	3.1	0.27-0.30			A3
Lac VX	10.83	F0	B	3	14	4.5	0.10-0.50			A2
Leo UU	11.70	A2	BVRI	12	40	3.7	0.00-1.00			A2
Leo VZ	10.60	A5	RI	14	25+	11.1	0.00-1.00			A1
Lep RR	10.20	A7	BV	9	30	2.8	0.00-1.00	33.280 (1)	9.6 (4)	A2
Lyn CL	10.05	A5	BVI	12	90+	4	0.00-1.00	23.051 (1)	7.3 (3)	A4
Lyn SX	10.00	A2	BVI	6	30	8.4	0.00-0.10, 0.48-0.65			A3
Lyr RV	11.50	A5	B	1	6	3.6	0.74-0.80			K
Mon EP	10.50	A3	B	1	4	3.6	0.20-0.34			A2
Mon HO	11.40	A5	B	1	5.5	3.9	0.18-0.21			A2
Oph V391	11.50	A1	B	1	5	4.5	0.56-0.65			K
Oph V456	10.37	A2	B	1	4	3.7	0.67-0.85			A1
Ori EY	10.21	A7	B	1	4	7.8	0.32-0.33			A4
Ori FK	11.80	A2	B	1	4	2	0.35-0.44			K
Ori FT	9.35	A0	B	1	4	2.7	0.72-0.77			A2
Ori V536	10.50	A2	B	1	3	3.1	0.46-0.50			A1
Peg AT	9.21	A3	BR	8	30	3.3	0.00-1.00			A3
Peg BG	10.50	A2	BVRI	15	102	5.8	0.00-0.29, 0.35-1.00	25.544 (1)	13.1 (6)	A2
Peg DM	11.80	A3	B	1	4	4.3	0.72-0.79	?		A2
Peg GH	9.10	A3	BVR	2	10.5	3.8	0.22-0.28, 0.63-0.74			A1
Peg OO	8.53	A2	B	1	4	2.9	0.79-0.83			A3
Per IQ	7.73	B8	BV	1	3	5.3	0.10-0.21			A1
Per IU	11.00	A4	BVRI	11	40+	7.6	0.00-1.00	43.097 (2)	4.0 (3)	A1
Per RV	11.40	A0	B	1	5	3.9	0.16-0.27			A2
Sge UZ	11.40	A3	BR	11	60+	4.6	0.00-1.00	46.651 (6)	3.1 (3)	A2
Tau AQ	12.00	A5	B	1	6	5.7	0.23-0.38			A2
Tau EW	11.70	--	B	1	4	3.1	0.59-0.62			K
Tau V1149	8.65	A0	B	1	4.5	2.1	0.63-0.67			A4
Tri RS	10.26	A5	B	1	8	3.5	0.12-0.18, 0.66-0.78			A1
Tri X	9.00	A3	B	5	25+	5.7	0.00-1.00			A1
UMa IO	8.44	A6	BVRI	47	150+	1.5	0.00-1.00	22.015 (2)	6.4 (1)	A2
UMa VV	10.13	A2	BVRI	10	25+	3.1	0.00-1.00	51.299 (9)	1.7 (2)	A1&A2

Πίνακας Δ2. (συν.)

Όνομα	m_{max}	Φ.Τ	Φ.	D	Hrs	s.d. [mmag]	Φάση	f_{dom} [c/d]	A_B [mmag]	Εξ.
UMi RT	11.10	F0	B	1	5	3.7	0.49-0.61			A2
Vul AW	10.00	F0	B	8	20+	4.4	0.00-1.00			A2
Vul BP	10.17	A7	B	1	3	2.5	0.24-0.30			A2
Vul RR	10.15	A2	B	2	6	2.7	0.16-0.18, 0.64-0.67	?		A2

Πίνακας Δ3. Τα 79 διπλά συστήματα αστέρων για τα οποία έχει επιβεβαιωθεί η ύπαρξη παλλόμενου αστέρα-μέλους τύπου δ Sct.

Όνομα	P_{orb} [days]	P_{puls} [days]	A [mmag]	M [$M_\odot$]	R [$R_\odot$]	T [K]	Τύπος	Αναφορά
Aqr CZ	0.86275	0.02816	3.7 (B)	2.0	1.9	8200	SD	LI12b
Aqr DY	2.15970	0.04275	13.0 (V)			9800	SD	SO09, ZA11
Aql QY	7.22954	0.09384	11.8 (B)	1.6	4.1	7300	SD	LI12b, LN12d
Aur KW	3.78900	0.08750	80.0 (V)	2.3	4.0	7500	U	HU71, APL99
Boo EW	0.90630	0.02083	20.0 (V)			9800	SD	SO08
Boo YY	3.93307	0.06128	58.4 (B)	2.0	1.9	6100	SD	HA10, SK90
Cam Y	3.30570	0.05860	11.6 (V)	1.7	2.9	7500	SD	SO08, KI03, SO06a
CMa R	1.13590	0.04710	8.8 (B)	1.7	1.8	7600	SD	SO06a, SO06b, BB11
Cap TY	1.42346	0.04128	18.5 (B)	2.0	2.5	8200	SD	LN09a, LI12b
Cas AB	1.36690	0.05830	39.2 (V)	2.3	2.0	8700	SD	SO06a, SO06b
Cas IV	0.99852	0.02650	10.0 (B)	2.6	2.0	9000	SD	SO06b
Cas RZ	1.19530	0.01560	13.0 (Y)	2.3	1.6	8700	SD	SO06a, SO06b
Cep XX	2.33732	0.03174	3.8 (B)	2.0	2.1	7800	SD	LE07, SO06b
Cet WY	1.93969	0.07569	7.7 (B)	1.7	2.2	7500	SD	LN09a, LI12b
Cha RS	1.66987	0.08600	16.8	1.9	2.2	7800	D	SO06b
CPD-31°6830[a]	0.88343	0.18304	54.1 (V)				D	PM07
CPD-41°5106[a]	2.13700	0.12125	20.2 (V)				D	PM07
CPD-60°871[a]	1.22096	0.21423	17.1 (V)			8200	D	PM07
Cyg UW	3.45080	0.03592	1.9 (B)	1.9	2.2	8000	SD	LI12b
Cyg V346	2.74330	0.05020	30.0 (B)	2.3	3.8	8200	SD	KI05b, SO06a, BU04
Cyg V469	1.31250	0.02780	20.0 (V)	3.3	2.7	11500	SD	SO06a, SK90
Del BW	2.42319	0.03984	2.9 (B)	1.5	2.2	7000	SD	LN12d
Dra GK	16.96000	0.11376	40.0 (V)			5900	D	DA02
Dra HL	0.94428	0.03716	3.0 (B)	2.5	2.5	8200	SD	LI12b
Dra HN	1.80075	0.11686	10.9 (B)			7000	D	CH04

Πίνακας Δ3. (συν.)

Όνομα	P_{orb} [days]	P_{puls} [days]	A [mmag]	M [$M_\odot$]	R [$R_\odot$]	T [K]	Τύπος	Αναφορά
Dra HZ	0.77294	0.01958	4.0 (B)	3.0	2.3	9800	D	LI12b
Dra SX	5.16957	0.04375	4.0 (V)	1.7	3.1	7500	SD	DI10, SS04
Dra TW	2.80690	0.05560	10.0 (B)	1.6	2.4	8200	SD	SO06a, SO06b
Dra TZ	0.86603	0.01961	3.7 (B)	1.8	1.7	7800	SD	SO06a, BU04, LN12d
Eri AS	2.66410	0.01690	6.8 (V)	1.9	1.6	9400	SD	SO06a
Eri TZ	2.60610	0.05342	9.0 (B)	1.97	1.8	9300	SD	SO06a, LI08
Gru RS	11.50000	0.14700	600.0 (B)			7500	U	DE09
GSC 3889-0202	2.71066	0.04410	50.0 (V)			7750	SD	DI08b
GSC 4293-0432	4.38440	0.12500	40.0 (B)			7750	SD	DI09a
GSC 4550-1408	1.23837	0.02703	20.0 (B)			8500	SD	DI08a
GSC 4558-0883	3.25855	0.04930	15.0 (R)			7650	SD	DI09a
HD 61199	3.57436	0.03959	1.5 (V)			7750	U	HA08
HD 62571	3.20865	0.11048	41.7 (V)			8200	SD	PM07
HD 99612	2.77876	0.06796				9000	D	PM07
HD 172189	5.70165	0.05100		1.8	4.0	8700	D	SO06a, CO07, CR09
HD 207651	1.47080	0.06479	21.4 (B)			7300	U	HE04
HD 220687	1.59425	0.03821	12.8 (V)			7800	D	PM07
Her BO	4.27281	0.07446	68.0 (B)	1.8	2.5	7800	SD	SB07, BU04, LI12b, LN12d
Her CT	1.78640	0.01889	3.2 (B)	2.3	2.1	8200	SD	SO06a, SK90, LA11
Her EF	4.72920	0.10420	60.0 (B)	1.5	1.6	7300	SD	SO06a, SK90
Her LT	1.08404	0.03247	6.0 (B)			9400	SD	LN12d
Her TU	2.26690	0.05560	8.0 (V)	1.4	1.6	8200	SD	SO06a, SS04
Her V944	2.08309	0.09467	31.0 (V)				U	DM05
HIP 7666	2.37232	0.04090	20.0 (V)			8200	D	SO06a
Hya AI	8.28970	0.13800	20.0 (V)	2.0	1.8	7000	D	SO06a
Hya RX	2.28170	0.05160	14.0 (B)	1.7	1.7	9000	SD	SO06a, KI03
KIC 3858884	10.04860	0.13830		2.0	2.8		D	CA10, LE12
KIC 4544587[a]	2.18911						D	HA12
KIC 10661783	1.23136	0.03554	4.0			8000	SD	SO11
Lac AU	1.39259	0.01718	5.0 (B)	2.0	1.8	8200	SD	LI12b
Leo DG	4.14675	0.08337	6.2 (B)			7800	U	LA05
Leo WY	4.98578	0.06550	11.0 (V)	2.3	3.3	9000	SD	DV09, BU04
Leo Y	1.68610	0.02900	4.1 (V)	1.6	1.7	8700	SD	TU08, SS04

Πίνακας Δ3. (συν.)

Όνομα	P_{orb} [days]	P_{puls} [days]	A [mmag]	M [$M_\odot$]	R [$R_\odot$]	T [K]	Τύπος	Αναφορά
Lep RR	0.91543	0.03005	9.6 (B)	1.8	2.2	7800	SD	DV09, SK90, LN12d
Lyn CL	1.58606	0.04338	7.3 (B)	1.8	2.4	7800	SD	LI12b
Lyn CQ	12.50736	0.11277	40.0 (V)			7300	U	CA02
Mic VY	4.43637	0.08174	19.4 (V)	2.4	2.2	8500	SD	PM07, BU04
Oph V577	6.07910	0.06950	28.9 (V)	1.7	1.8		D	SO06b, SK90
Oph V2365	4.86560	0.07000	50.0 (V)	2.0	2.2	9000	SD	IB08
Ori FL	1.55098	0.05501	44.0 (V)	2.9	2.1	8700	SD	ZA11, BU04
Pav MX	5.73084	0.07560	76.9 (V)			8200	SD	MA09
Peg BG	1.95267	0.03915	11.1 (B)	2.5	3.0	9000	SD	SO09, DV09, SO11, LN11j
Per AB	7.16030	0.19580	20.0 (B)	1.9	2.0	8200	SD	SO06a, SS04
Per IU	0.85700	0.02380	20.0 (B)	2.4	1.9	8500	SD	SO06a, BU04
Pyx XX	1.15000	0.02624	10.1 (B)			8500	D	AE02
Ser AO	0.87930	0.04650	20.0 (B)	2.6	1.8	9000	SD	SO06a
Sge UZ	2.21574	0.02144	3.1 (B)	2.1	1.9	8700	SD	LN12b
Tau AC	2.04340	0.05703	6.0 (V)	1.5	2.3	7600	SD	DV09, BU04
Tau V1241[a,b]	0.82327	0.16450	30	1.7	1.9	7800	SD	SO06b
Tel IZ	4.88022	0.07376	45.9 (V)			8000	SD	PM07
UNSW-V-500	5.35048	0.07340	350.0 (V)	1.5	2.4	7600	SD	CH07
UMa IO	5.52017	0.04542	6.4 (B)	2.2	3.2	8500	SD	LI12b, π.ε.
UMa VV	0.68738	0.01949	1.7 (B)	2.5	1.8	7500	SD	KI05a, π.ε.
Vel BF	0.70400	0.02225	26.0 (B)	2.0	1.8	9400	SD	MA09

[a]όχι καλά προσδιορισμένες παράμετροι, [b]WX Eri

D: Αποχωρισμένο σύστημα, SD: Ημιαποχωρισμένο, U: άγνωστης γεωμετρίας Roche

π.ε.: Παρούσα εργασία, (AE02) Aerts et al. (2002), (APL99) Allende Prieto & Lambert (1999), (BB11) Budding & Butland (2011), (BU04) Budding et al. (2004), (CA10) Catanzaro et al. (2012), (CA02) Carrier et al. (2002), (CH04) Chapellier et al. (2004), (CH07) Christiansen et al. (2007), (CO07) Costa et al. (2007), Creevey et al. (2009) (DA02) Dallaporta et al. (2002), (DM05) Dallaporta & Munari (2005), (DE09) Derekas et al. (2009), (DI08a) Dimitrov et al. (2008a), (DI08b) Dimitrov et al. (2008b), (DI09a) Dimitrov et al. (2009a), (DI09b) Dimitrov et al. (2009b), (DI10) Dimitrov et al. (2010), (DV09) Dvorak (2009), (HA12) Hambleton et al. (2012), (HA10) Hambsch et al. (2010), (HA08) Hareter et al. (2008), (HE04) Henry et al. (2004), (HU71) Hudson et al. (1971), (IB08) İbanoğlu et al. (2008), (KI03) Kim et al. (2003), (KI05a) Kim et al. (2005a), (KI05b) Kim et al. (2005b), (LA05) Lampens et al. (2005), (LA11) Lampens et al. (2011), (LE12) Lee et al. (2012), (LI08) Liakos et al. (2008), (LN09a) Liakos & Niarchos (2009a), (LN11j) Liakos & Niarchos (2011j), (LI12b) Liakos et al. (2012b), (LN12b) Liakos & Niarchos (2012b), (LN12d) Liakos & Niarchos (2012d), (LE07) Lee et al. (2007), (MA09) Manimanis et al. (2009), (PM07) Pigulski & Michalska (2007), (RO10) Rodríguez et al. (2010), (SO11) Southworth et al. (2011), (SO06a) Soydugan et al. (2006a), (SO06b) Soydugan et al. (2006b), (SO08) Soydugan et al. (2008), (SO09) Soydugan et al. (2009), (SO11) Soydugan et al. (2011), (KB07) Sumter & Beaky (2007), (SS04) Surkova & Svechnikov (2004), (SK90) Svechnikov & Kuznetsova (1990), (TU08) Turcu et al. (2008), (ZA11) Zasche (2011).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε

Πίνακας παραμέτρων των αστέρων Κύριας Ακολουθίας

Παρακάτω δίνονται οι βασικές παράμετροι των αστέρων της Κύριας Ακολουθίας, όπως δίνονται στους πίνακες του Cox (2000).

Πίνακας Ε1. Παράμετροι αστέρων της Κύριας Ακολουθίας.

Spectral Type	T_{eff} [K]	B−V [mag]	M_{bol} [mag]	M_V [mag]	M [$M_\odot$]	R [$R_\odot$]	log$g$ [cm/s^2]
O5	42000	-0.33	-10.10	-5.70	60.00	12.00	4.06
O6	39839	-0.33	-9.53	-5.40	37.00	10.00	4.01
O7	37789	-0.32	-8.97	-5.10	29.17	9.22	3.97
O8	35844	-0.32	-8.40	-4.80	23.00	8.50	3.94
O9	34000	-0.31	-7.83	-4.50	20.06	7.93	3.94
B0	30000	-0.30	-7.16	-4.00	17.50	7.40	3.94
B1	25040	-0.27	-5.98	-3.23	13.25	6.41	3.95
B2	20900	-0.24	-4.80	-2.45	10.04	5.55	3.95
B3	18795	-0.22	-4.09	-2.03	7.60	4.80	3.96
B4	16902	-0.19	-3.37	-1.62	6.70	4.33	3.99
B5	15200	-0.17	-2.66	-1.20	5.90	3.90	4.03
B6	13810	-0.15	-2.12	-0.88	5.10	3.57	4.04
B7	12547	-0.13	-1.59	-0.57	4.40	3.27	4.05
B8	11400	-0.11	-1.05	-0.25	3.80	3.00	4.06
B9	10564	-0.07	-0.35	0.20	3.32	2.68	4.10
A0	9790	-0.02	0.35	0.65	2.90	2.40	4.14
A1	9387	0.02	0.73	0.98	2.69	2.24	4.17
A2	9000	0.05	1.10	1.30	2.50	2.09	4.19
A3	8718	0.08	1.33	1.52	2.32	1.95	4.22
A4	8445	0.12	1.57	1.73	2.15	1.82	4.25
A5	8180	0.15	1.80	1.95	2.00	1.70	4.28
A6	7996	0.18	1.96	2.10	1.91	1.66	4.28
A7	7816	0.21	2.12	2.25	1.83	1.62	4.28
A8	7640	0.24	2.29	2.40	1.75	1.58	4.28
A9	7468	0.27	2.45	2.55	1.67	1.54	4.29
F0	7300	0.30	2.61	2.70	1.60	1.50	4.29
F1	7148	0.33	3.05	3.15	1.56	1.46	4.30
F2	7000	0.35	3.49	3.60	1.52	1.42	4.32
F3	6881	0.38	3.45	3.57	1.48	1.38	4.33

Πίνακας Ε2. (συν.)

Spectral Type	T_{eff} [K]	B−V [mag]	M_{bol} [mag]	M_V [mag]	M [$M_\odot$]	R [$R_\odot$]	log$g$ [cm/s^2]
F4	6765	0.41	3.40	3.53	1.44	1.34	4.34
F5	6650	0.44	3.36	3.50	1.40	1.30	4.36
F6	6514	0.47	3.52	3.67	1.32	1.26	4.36
F7	6381	0.49	3.68	3.83	1.25	1.22	4.36
F8	6250	0.52	3.84	4.00	1.18	1.18	4.37
F9	6093	0.55	4.03	4.20	1.11	1.14	4.37
G0	5940	0.58	4.22	4.40	1.05	1.10	4.38
G1	5865	0.61	4.36	4.55	1.02	1.06	4.40
G2	5790	0.63	4.50	4.70	1.00	1.02	4.41
G3	5712	0.65	4.63	4.83	0.97	0.99	4.43
G4	5636	0.66	4.76	4.97	0.94	0.95	4.45
G5	5560	0.68	4.89	5.10	0.92	0.92	4.47
G6	5475	0.70	4.96	5.23	0.89	0.91	4.47
G7	5392	0.72	5.03	5.37	0.87	0.89	4.47
G8	5310	0.74	5.10	5.50	0.84	0.88	4.48
G9	5229	0.78	5.35	5.70	0.81	0.86	4.48
K0	5150	0.81	5.59	5.90	0.79	0.85	4.48
K1	4987	0.86	5.79	6.15	0.76	0.82	4.49
K2	4830	0.91	5.98	6.40	0.74	0.80	4.51
K3	4686	0.99	6.20	6.72	0.72	0.77	4.52
K4	4546	1.07	6.41	7.03	0.69	0.74	4.53
K5	4410	1.15	6.63	7.35	0.67	0.72	4.55
K6	4290	1.20	6.79	7.64	0.63	0.69	4.56
K7	4172	1.25	6.95	7.93	0.60	0.67	4.56
K8	4059	1.30	7.10	8.22	0.57	0.65	4.57
K9	3948	1.35	7.26	8.51	0.54	0.62	4.58
M0	3840	1.40	7.42	8.80	0.51	0.60	4.59
M1	3677	1.45	7.72	9.35	0.45	0.55	4.61
M2	3520	1.49	8.01	9.90	0.40	0.50	4.64
M3	3399	1.54	8.53	10.70	0.32	0.41	4.73
M4	3283	1.59	9.05	11.50	0.26	0.33	4.81
M5	3170	1.64	9.57	12.30	0.21	0.27	4.90

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΤ

Ανακαλύψεις νέων μεταβλητών αστέρων

Στο παρόν παράρτημα παρουσιάζονται οι κατάλογοι των: α) 34 νέων μεταβλητών αστέρων που ανακαλύφθηκαν κατά τη διάρκεια των παρατηρήσεων σε γνωστούς εκλειπτικούς μεταβλητούς και για τους οποίους έχουν βρεθεί τόσο ο τύπος μεταβλητότητας όσο και η περίοδός τους, και β) 16 νέων μεταβλητών για τους οποίους είτε δεν έχει ολοκληρωθεί η φωτομετρική τους καμπύλη λόγω μεγάλης περιόδου (για τους περιοδικούς) είτε δεν έχει βρεθεί η τιμή της περιόδου, ή δεν έχει αναγνωριστεί ο τύπος μεταβλητότητάς τους.

Οι στήλες του Πίνακα ΣΤ1 περιέχουν: α) το όνομα του μεταβλητού, β) τον τύπο μεταβλητότητας (Κεφάλαιο 1), γ) το φαινόμενο μέγεθός του $m_{\max}$ κατά τη μέγιστη λαμπρότητά του σε κάποιο φωτομετρικό φίλτρο, όπως δίνεται σε καταλόγους, δ) τα φίλτρα στα οποία παρατηρήθηκε, ε) η περίοδός του P, στ) το όνομα του γνωστού αστέρα στο πεδίο του οποίου βρίσκεται και ζ) η βιβλιογραφική αναφορά.

Οι στήλες του Πίνακα ΣΤ2 περιέχουν τα ίδια στοιχεία με αυτές του Πίνακα ΣΤ1, εκτός του τύπου μεταβλητότητας, της περιόδου και της βιβλιογραφικής αναφοράς. Αντ' αυτών, η τελευταία στήλη περιέχει σχόλια για τα αποτελέσματα των παρατηρήσεων.

Πίνακας ΣΤ1. Νέοι μεταβλητοί αστέρες που ανακαλύφθηκαν κατά τις παρατηρήσεις.

Όνομα	Τύπος	m_{max} [mag]	Φίλτρα	P [d]	Πεδίο	Αναφορά*
2MASS J00511854+5022580	EW	14.4[a] (R)	BVRI	0.30408	V364 Cas	2010a
2MASS J07083972+1214429	EW	14.5[a] (R)	VRI	0.37104	AV CMi	2010a
2MASS J20275736+2453029	EB	13.7[a] (R)	V	0.79740	AW Vul	2010c
2MASS J22514830+1532034	EW	14.9[a] (R)	BVRI	0.35494	BG Peg	2011b
GSC 0163-1415	EW	13.4[a] (R)	I	0.72010	HO Mon	2012a
GSC 0198-2061	EB	14.9[a] (R)	BVRI	0.41958	YY CMi	2010e
GSC 0770-0523	EW	12.8[a] (R)	VRI	0.43590	AV CMi	2010a
GSC 1025-1841	EB	11.7[b] (P)	BI	0.68932	V456 Oph	2010a
GSC 1137-0293	EW	10.4[a] (R)	BR	0.37799	AT Peg	2011b
GSC 1270-0926	δ Sct	12.0[a] (B)	B	0.08744	V1149 Tau	2011a, 2011f
GSC 1626-1303	δ Sct	12.3[a] (B)	B	0.03108	UZ Sge	2009b, 2011f
GSC 2673-1583	δ Sct	11.1[c] (B)	B	0.09972	V466 Cyg	2008a, 2009a
GSC 3164-1517	δ Sct	10.9[c] (B)	BVI	0.13844	UW Cyg	2010d, 2011f

Πίνακας ΣΤ1. (συν.)

Όνομα	Τύπος	m_{max} [mag]	Φίλτρα	P [d]	Πεδίο	Αναφορά*
GSC 3164-1558	EA	12.8[a] (B)	BVI	4.43770	UW Cyg	2010d
GSC 3208-2644	EA	12.7[a] (B)	BVRI	1.15970	V407 Lac	2010d
GSC 3281-1359	EW	13.9[a] (B)	B	0.43860	CP And	2011b
GSC 3332-0388	δ Sct	10.8[a] (B)	BVRI	0.04504	V482 Per	2011e
GSC 3332-0638	EW	13.3[a] (R)	VRI	0.40971	V482 Per	2012a
GSC 3610-0124	EW	10.1[a] (R)	BVRI	0.34660	AU Lac	2011b
GSC 3641-0359	δ Sct	11.8[a] (B)	BVRI	0.11263	AD And	2008a, 2009a
GSC 3787-0502	EW	14.6[a] (R)	BV	0.25828	CL Lyn	2011d
GSC 3802-1986	EA	12.2[a] (B)	BVI	1.52946	SX Lyn	2011h
GSC 3987-1298	δ Sct	13.9[a] (B)	B	0.05332	TW Lac	2011e
GSC 4372-0831	EA	13.3[a] (B)	B	1.19992	SS Cam	2011a
GSC 4516-2121	EW	14.5[a] (R)	BVRI	0.48404	V405 Cep	2010a
GSC 4559-2536	δ Sct	12.7[a] (B)	B	0.06055	TU UMi	2010b, 2011f
GSC 4589-2999	EA	10.6[a] (R)	BVRI	1.68865	EG Cep	2007
USNO-A2.0 0900-04405532	EW	15.2[a] (R)	BR	0.44408	HO Mon	2011d
USNO-A2.0 0900-05986449	EW	15.4[a] (R)	VR	0.32243	DE Hya	2011d
USNO-A2.0 0975-04721840	EB	14.6[a] (R)	VI	0.50460	AV CMi	2011c
USNO-A2.0 1275-01165814	δ Sct	15.5[a] (R)	I	0.11637	QX And	2011e
USNO-A2.0 1275-01929590	EW	14.2[a] (R)	BVRI	0.38801	V881 Per	2012a
USNO-A2.0 1350-16136263	EB	13.9[a] (R)	BVRI	0.65321	AU Lac	2011a
USNO-A2.0 1350-16144088	EB	14.5[a] (R)	BVRI	0.44149	AU Lac	2010e

[a]Monet et al. (1998), [b]Morrison et al. (2001), [c]Høg et al. (1998), *Όλες οι αναφορές είναι από τους Liakos & Niarchos

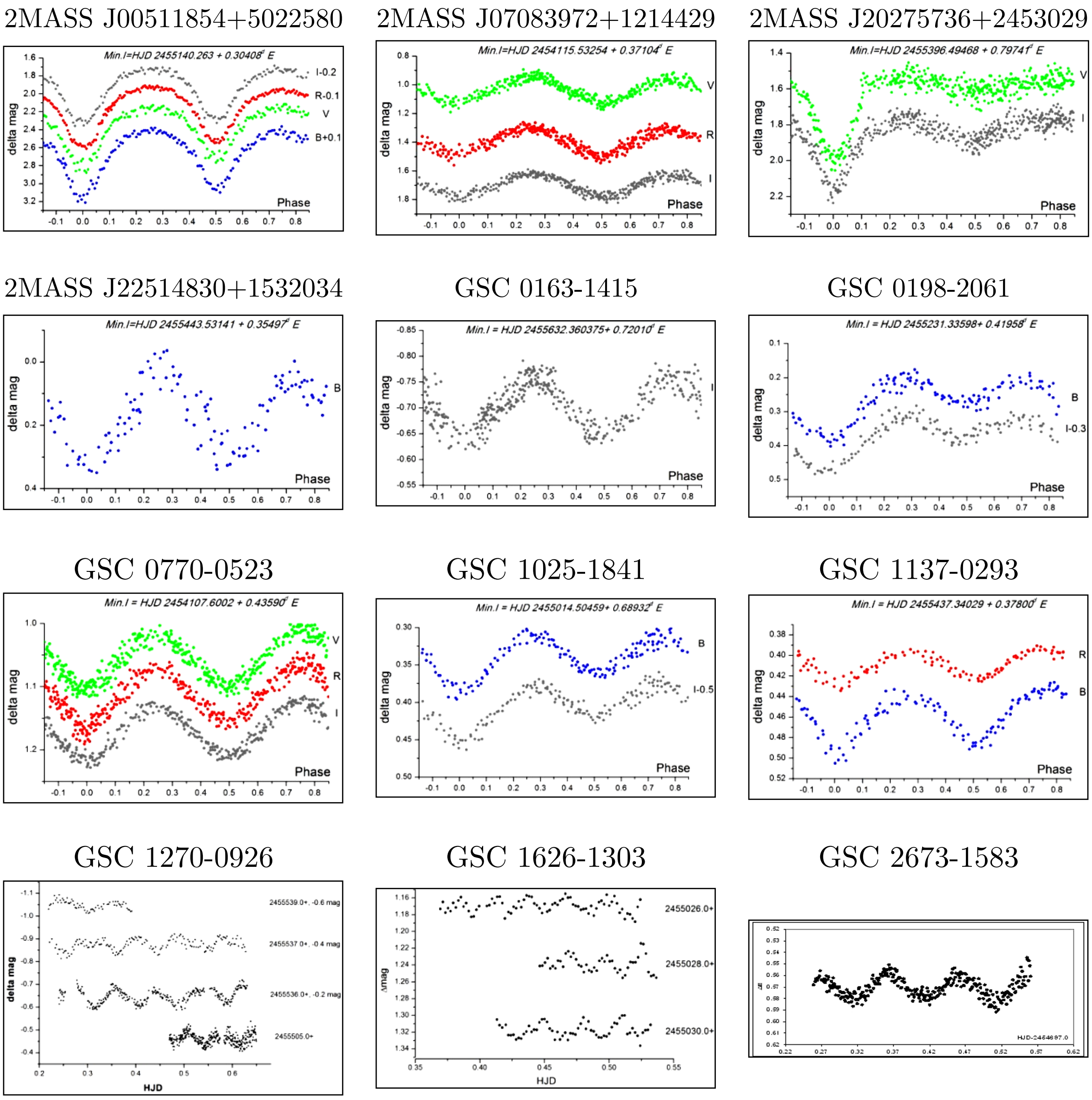
Πίνακας ΣΤ2. Νέοι μεταβλητοί αστέρες που ανακαλύφθηκαν κατά τις παρατηρήσεις για τους οποίους δεν έχει ολοκληρωθεί η φωτομετρική τους καμπύλη.

Όνομα	m_{max} [mag]	Φίλτρα	Πεδίο	Σχόλια
2MASS J17581372+0441250	15.9[a] (B)	B	V391 Oph	Είναι πιθανότατα τύπου EW με *P*=0.274[d] ή τύπου δ Sct με *P*=0.137[d] και έχει ημιπλάτος ~50 mmag.
GSC 0445-0903	12.0[a] (R)	BVRI	V2612 Oph	Είναι πιθανότατα τύπου EA, και έχει παρατηρηθεί ένα δευτερεύον ελάχιστο βάθους ~0.15 mag στο φίλτρο *I*.
GSC 0757-0651	11.5[a] (R)	VRI	AV CMi	Όχι σαφούς τύπου. Παρουσιάζει μεταβολές μερικών δεκάδων mmag σε διάστημα μηνών.
GSC 1025-0798	11.9[a] (B)	BVI	V456 Oph	Πιθανότατα κατακλυσμικός αστέρας.
GSC 2160-1143	11.4[a] (B)	B	AW Vul	Είναι πιθανότατα τύπου EA, και έχει παρατηρηθεί μέρος ενός φωτομετρικού ελαχίστου.
GSC 2816-2000	13.3[a] (R)	BVRI	QX And	Είναι πιθανότατα τύπου EA, και έχει παρατηρηθεί ένα φωτομετρικό ελάχιστο βάθους ~0.05 mag στο φίλτρο *I*.
GSC 3159-1188	13.5[b] (P)	BVRI	V1191 Cyg	Είναι πιθανότατα τύπου EA, και έχει παρατηρηθεί ένα φωτομετρικό ελάχιστο βάθους ~0.06 mag στο φίλτρο *B*.
GSC 3802-1680	12.2[a] (B)	BVRI	SX Lyn	Είναι πιθανότατα τύπου EA, και έχουν παρατηρηθεί δύο φωτομετρικά ελάχιστα, αλλά δεν έχει βρεθεί η περίοδος.
GSC 4320-1033	9.7[a] (B)	BVRI	AB Cas	Είναι πιθανότατα τύπου EA, και έχει παρατηρηθεί μέρος ενός φωτομετρικού ελαχίστου.
GSC 5330-1374	10.7[a] (R)	BVRI	ER Ori	Όχι σαφούς τύπου. Παρουσιάζει μεταβολές μερικών δεκάδων mmag σε διάστημα ωρών, αλλά όχι με σαφή περιοδικότητα.
USNO-A2.0 0975-04711370	13.9[a] (R)	I	AV CMi	Είναι πιθανότατα τύπου EA, και έχει παρατηρηθεί ένα φωτομετρικό ελάχιστο βάθους ~0.12 mag.
USNO-A2.0 1050-17346460	14.1[a] (B)	BV	BW Del	Είναι τύπου EA, και έχουν παρατηρηθεί μέρη τριών φωτομετρικών ελαχίστων. Η περίοδός του είναι πιθανότατα ~8.931[d].

Πίνακας ΣΤ2. Νέοι μεταβλητοί αστέρες που ανακαλύφθηκαν κατά τις παρατηρήσεις για τους οποίους δεν έχει ολοκληρωθεί η φωτομετρική τους καμπύλη.

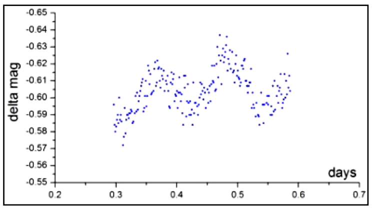
Όνομα	m_{max} [mag]	Φίλτρα	Πεδίο	Σχόλια
USNO-A2.0 1350-04394387	15.1[a] (R)	I	V482 Per	Είναι πιθανότατα τύπου EA, και έχουν παρατηρηθεί μέρη δύο φωτομετρικών ελαχίστων. Η περίοδός του είναι πιθανότατα ~2.332^d.
USNO-A2.0 1350-16132642	16.5[a] (R)	R	AU Lac	Όχι σαφούς τύπου. Έχει παρατηρηθεί ελάχιστο βάθους ~0.6 mag.

[a]Monet et al. (1998), [b]Morrison et al. (2001)

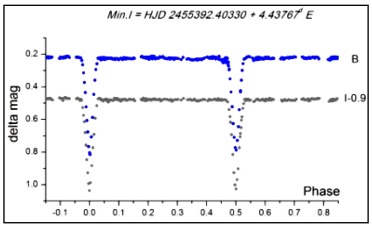


Εικόνα ΣΤ1. Καμπύλες φωτός των νέων μεταβλητών αστέρων

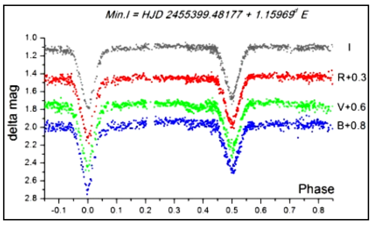
GSC 3164-1517



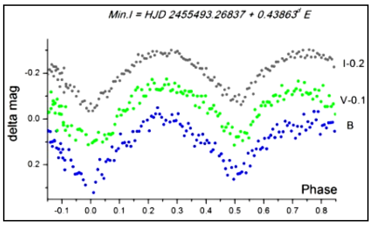
GSC 3164-1558



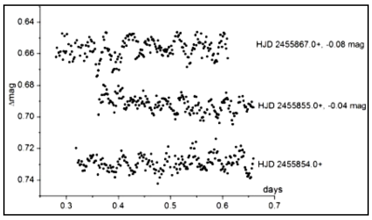
GSC 3208-2644



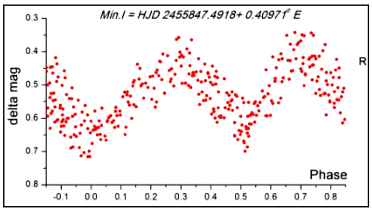
GSC 3281-1359



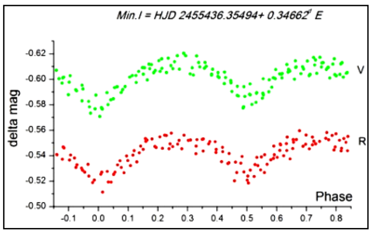
GSC 3332-0388



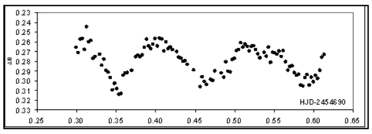
GSC 3332-0638



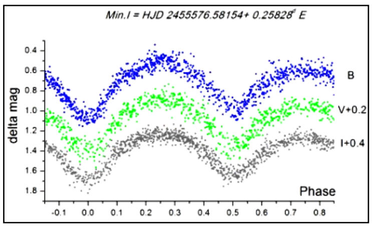
GSC 3610-0124



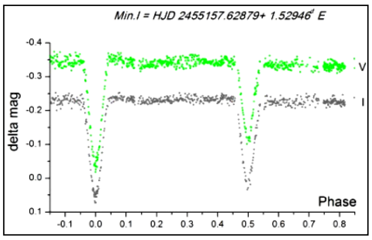
GSC 3641-0359



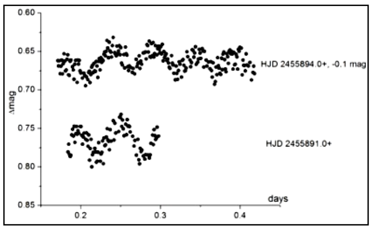
GSC 3787-0502



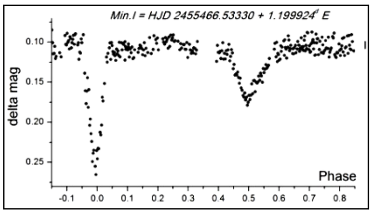
GSC 3802-1986



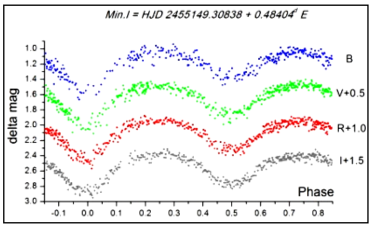
GSC 3987-1298



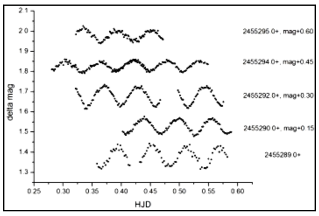
GSC 4372-0831



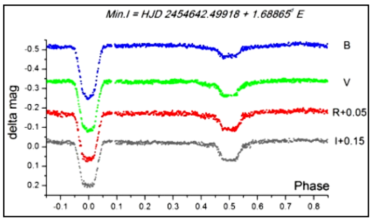
GSC 4516-2121



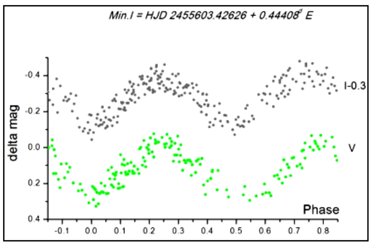
GSC 4559-2536



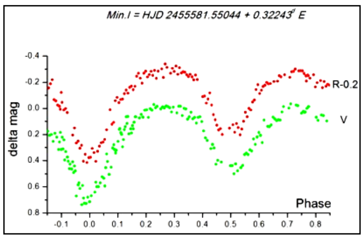
GSC 4589-2999



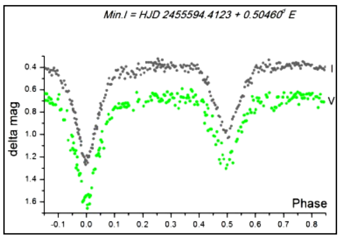
USNO-A2.0 0900-04405532



USNO-A2.0 0900-05986449

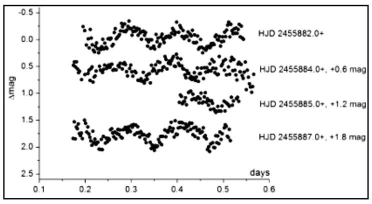


USNO-A2.0 0975-04721840

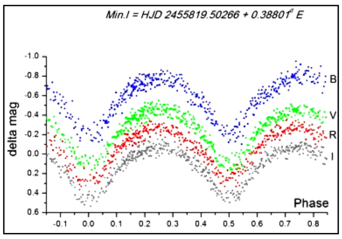


Εικόνα ΣΤ1. (συν.)

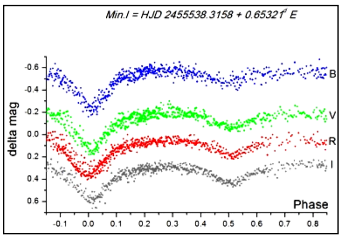
USNO-A2.0 1275-01165814



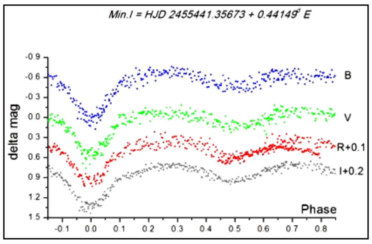
USNO-A2.0 1275-01929590



USNO-A2.0 1350-16136263



USNO-A2.0 1350-16144088



Εικόνα ΣΤ1. (συν.)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ζ

Παρατηρήσεις εκλειπτικών συστημάτων τύπου W UMa

Στο παρόν παράρτημα παρουσιάζονται οι καμπύλες φωτός 40 δι' εκλείψεων μεταβλητών αστέρων τύπου W UMa, οι οποίοι παρατηρήθηκαν παράλληλα με τους αστέρες που αναλύθηκαν στα κεφάλαια 5-7 της παρούσας διατριβής, αλλά για τους οποίους ακόμη δεν έχει γίνει ανάλυση, καθώς ήταν εκτός του πλαισίου της μελέτης. Παρ' όλα αυτά θεωρήθηκε χρήσιμο να παρουσιαστούν σε παράρτημα για μελλοντική χρήση.

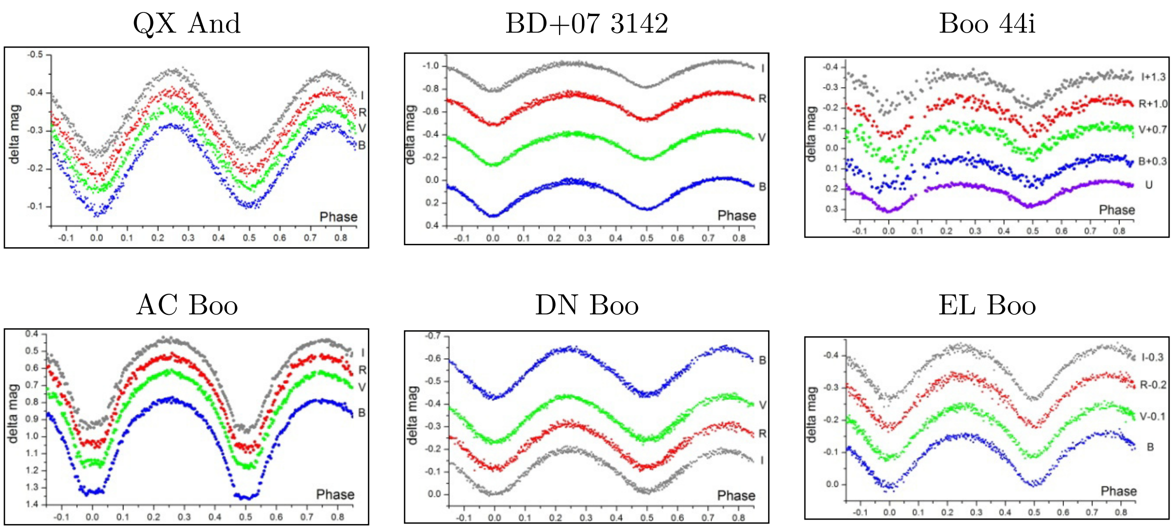
Οι στήλες του Πίνακα Ζ1 περιέχουν: α) το όνομα του μεταβλητού, β) το φαινόμενο μέγεθός του $m_{\rm max}$ στο μέγιστο της λαμπρότητάς του σε κάποιο φωτομετρικό φίλτρο, όπως δίνεται σε καταλόγους, δ) τα φίλτρα στα οποία παρατηρήθηκε, και ε) η αστρονομική του εφημερίδα (T_0 και P). Στον πίνακα Β5 δίνονται οι χρόνοι ελαχίστου που προέκυψαν από τα δεδομένα.

Πίνακας Ζ1. Συστήματα τύπου EW που παρατηρήθηκαν.

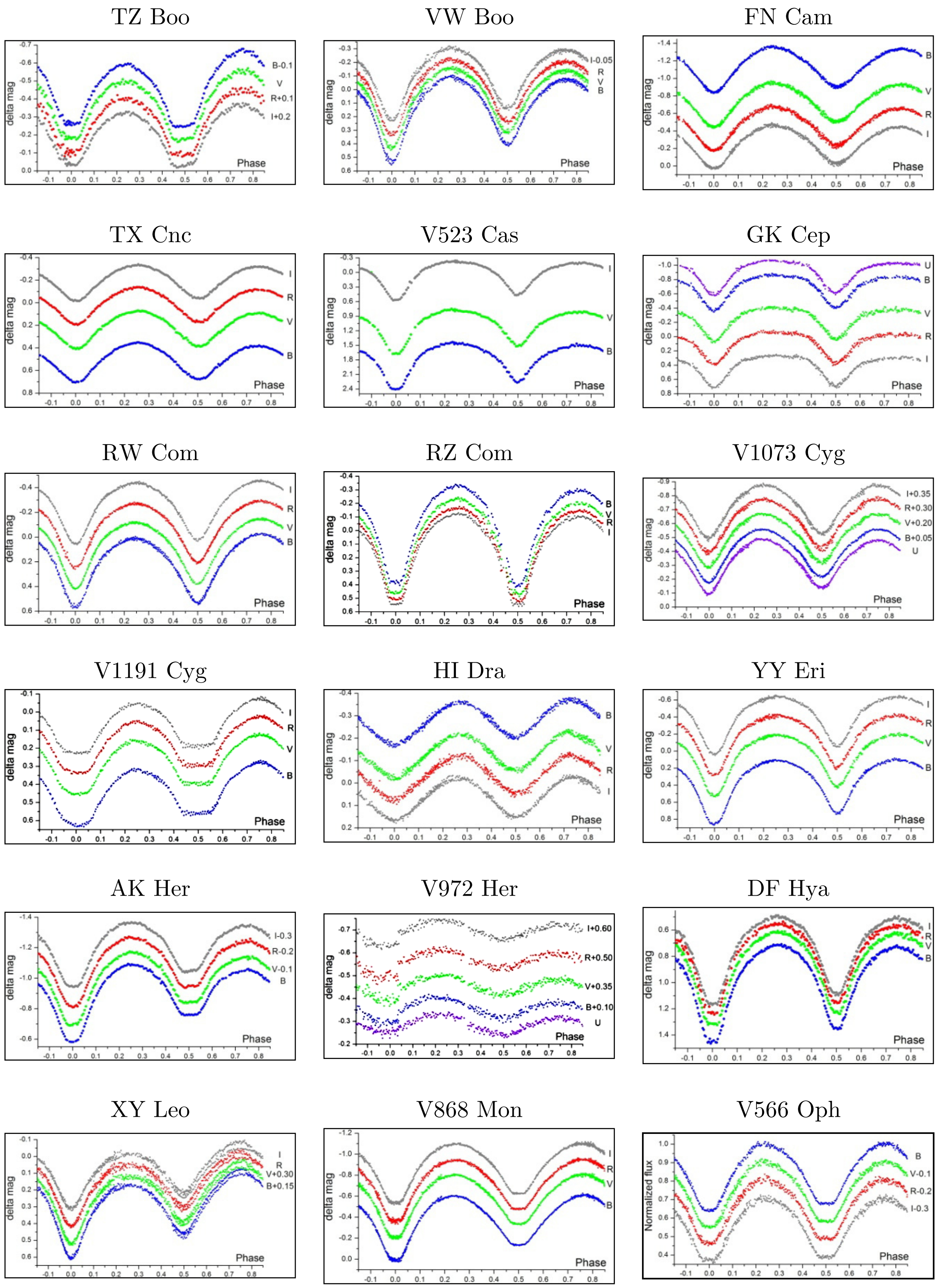
Όνομα	m_{max} [mag]	Φίλτρα	T_0 [HJD-2400000]	P [d]
And QX	11.28	BVRI	55882.51396	0.41215
BD+07 3142	9.76	BVRI	55696.42719	0.27531
Boo 44i	5.80	UBVRI	55272.36941	0.26782
Boo AC	10.00	BVRI	54572.34542	0.35245
Boo DN	11.17	BVRI	55685.32888	0.44755
Boo EL	9.20	BVRI	55696.36200	0.41374
Boo TZ	10.41	BVRI	54608.54350	0.29716
Boo VW	10.50	BVRI	55703.38852	0.34228
Cam FN	8.60	BVRI	55930.62231	0.67742
Cnc TX	10.00	BVRI	55289.34028	0.38288
Cas V523	10.62	BVI	55126.38433	0.23369
Cep GK	6.89	UBVRI	55403.35909	0.93616
Com RW	11.00	BVRI	55659.46611	0.23734
Com RZ	10.42	BVRI	54573.37885	0.33851
Cyg V1073	8.23	UBVRI	55774.32600	0.78581
Cyg V1191	10.82	BVRI	55833.30220	0.31341
Dra HI	9.02	BVRI	55731.48218	0.59733
Eri YY	8.10	BVRI	55891.47261	0.32143
Her AK	8.29	BVRI	55018.44820	0.42152
Her V972	6.73	BVRI	55344.46053	0.44306

Πίνακας Ζ1. (συν)

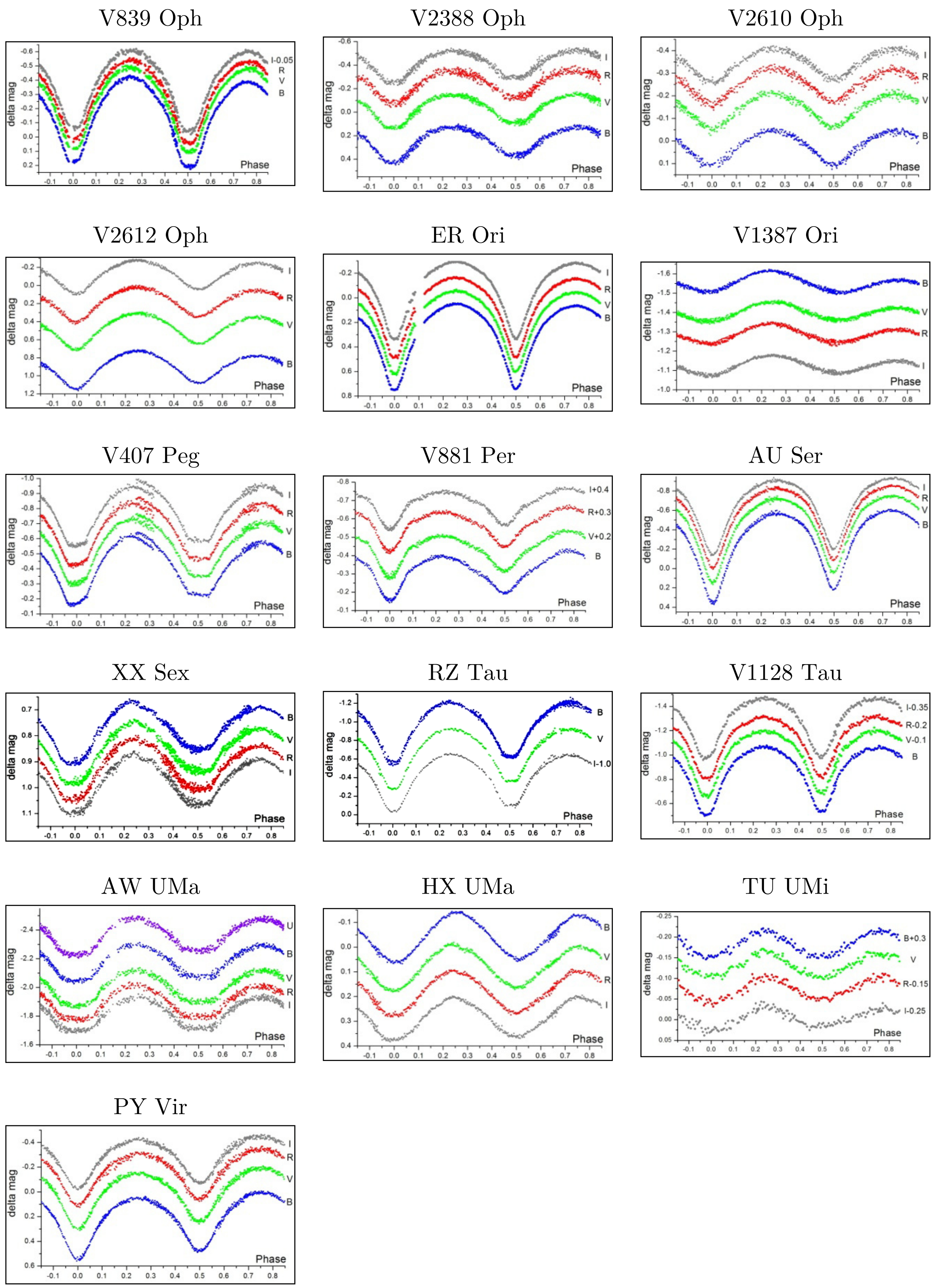
Όνομα	m_{max} [mag]	Φίλτρα	T_0 [HJD-2400000]	P [d]
Hya DF	10.60	BVRI	55579.37598	0.33060
Leo XY	9.45	BVRI	55664.40962	0.28411
Mon V868	8.90	BVRI	55939.46215	0.63774
Oph V566	7.46	BVRI	54982.35897	0.40966
Oph V839	8.80	BVRI	54262.44601	0.40901
Oph V2388	6.27	BVRI	55746.48289	0.80230
Oph V2610	9.20	BVRI	55712.52905	0.42650
Oph V2612	9.36	BVRI	55727.39700	0.37531
Ori ER	9.28	BVRI	55199.39242	0.42340
Ori V1387	8.77	BVRI	55904.58795	0.73017
Peg V407	9.28	BVRI	55855.32320	0.63750
Per V881	10.71	BVRI	55819.56752	0.38738
Ser AU	10.90	BVRI	55731.45856	0.38650
Sex XX	9.32	BVRI	56006.46510	0.54012
Tau RZ	10.08	BVI	55127.89540	0.41568
Tau V1128	9.65	BVRI	54083.49870	0.30537
UMa AW	6.83	UBVRI	55633.40411	0.43875
UMa HX	8.89	BVRI	55975.43182	0.37915
UMi TU	8.84	BVRI	55276.46653	0.37722
Vir PY	9.60	BVRI	55702.31496	0.31126



Εικόνα Ζ1. Καμπύλες φωτός αστέρων τύπου W UMa.



Εικόνα Ζ1. (συν.)



Εικόνα Z1. (συν.)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Πίνακας Βιβ.1. Επεξηγήσεις ακρωνυμίων των συχνότερα αναφερομένων επιστημονικών περιοδικών.

Περιοδικό	Ακρωνύμιο
Acta Astronomica	AcA
Astronomical Journal	AJ
Astronomical Society of the Pacific Conference series	ASPCS
Astronomische Nachrichten	AN
Astronomy & Astrophysics	A&A
Astronomy & Astrophysics Review	A&A Rev.
Astronomy & Astrophysics Supplement	A&AS
Astrophysical Journal	ApJ
Astrophysical Journal Supplement	ApJS
Astrophysics & Space Science	Ap&SS
Communications in Asteroseismology	CoAst
Information Bulletin on Variable Stars	IBVS
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	MNRAS
New Astronomy	NewA
Peremennye Zvezdy Prilozhenie	PzP
Publications of the Astronomical Society of Japan	PASJ
Publications of the Astronomical Society of the Pacific	PASP

Abhyankar, K. D., Vyas, M. L., 1989, Space Science Reviews, 50, 376

Abt, H. A., 1983, Lowell Observatory Bulletin, 167, 118

Adelman, S. J., 2001, Baltic Astronomy, 10, 589

Aerts, C., Handler, G., Arentoft, T., et al., 2002, MNRAS, 333, 35

Ahnert, P., 1975, Mitteilungen der Veränderliche Sterne, 7, 65

Albayrak, B., Selam, S. O., Yüce, K., Helvaci, M., Ak, T., 2006, Ap&SS, 304, 131

Alexander, R. S., 1958, AJ, 63, 106

Alexander, D. R., Alexander, R. S., 1976, Bulletin of the American Astronomical Society, 8, 305

Allende Prieto, C., Lambert, D. L., 1999, A&A, 352, 555

Ammons, S. M., Robinson, S. E., Strader, J., et al., 2006, ApJ, 638, 1004

Applegate, J. H., Patterson, J., 1987, ApJ, 322, 99

Applegate, J. H., 1992, ApJ, 385, 621

Arentoft, T., Lampens, P., Van Cauteren, P., et al., 2004, A&A, 418, 249

Arévalo, M. J., Lázaro, C., Domínguez, R. M., Martínez-Pais, I. G., 2001, IBVS, 5160, 1

Ashbrook, J., 1952, AJ, 57, 259

Baker, N., Kippenhahn, R., 1965, ApJ, 142, 868

Balona, L. A., Stobie, R. S., 1979, MNRAS, 189, 649

Barblan, F., Bartholdi, P., North, P., Burki, G., Olson, E. C., 1998, A&AS, 132, 367

Barnes, R. C., Hall, D. S., Hardie, R. H., 1968, PASP, 80, 69

Berry, R., Burnell, J., 2005, *The handbook of astronomical image processing*, 2nd ed. (Richmond, VA: Willmann-Bell)

Binnendijk, L., 1972, PASP, 94, 926

Blazhko, S. N., 1907, AN, 173, 325

Bonfini, P., Hatzidimitriou, D., Pietsch, W., Reig, P., 2009, A&A, 507, 705

Bookmyer, B. B., Faulkner, D. R., Samec, R. G., 1986, IBVS, 2873, 1

Brancewicz, H. K., Dworak, T. Z., 1980, AcA, 30, 501

Breger, M., 2000, in *δ Scuti and Related Stars: Reference Handbook and Proceedings of the 6th Vienna Workshop in Astrophysics*, edited by M. Breger & M. Montgomery, ASPCS, 210, 3

Broglia, P., Conconi, P., 1977, A&AS, 27, 285

Bruton, J. R., 1986, IBVS, 2865, 1

Buchheim, R., 2009, Society for Astronomical Sciences, 28, 181

Budding, E., 1984, Bulletin d' Information du Centre de Donnees Stellaires, 27, 91

Budding, E., 1985, PASP, 97, 584

Budding, E., Erdem, A., Çiçek, C., et al., 2004, A&A, 417, 263

Budding, E., Butland, R., 2011, MNRAS, 418, 1764

Cannon, A. J., 1934, Harvard College Observatory Bulletin, 897, 12

Carr, R. B., 1971, Publications of the Goodsell Observatory, 16

Carrier, F., Debernardi, Y., Udry, S., et al., 2002, A&A, 390, 1027
Catanzaro, G., Frasca, A., Molenda-Zakowicz, J., Marilli, E., 2010, A&A, 517, 3
Chapellier, E., Mathias, P., Garrido, R., et al., 2004, A&A, 426, 247
Ceraski, W., 1907, AN, 174, 285
Cester, B., Giuricin, G., Mardirossian, F., Mezzetti, M., Milano, L., 1979, A&AS, 36, 273
Chandler, S. C., 1888a, AJ, 7, 165
Chandler, S. C., 1888b, AJ, 7, 169
Chandler, S. C., 1888c, AJ, 7, 177
Chevalier, C., 1971, A&A, 14, 24
Chochol, D., Pribulla, T., Rovithis-Livaniou, H., Rovithis, P., Kranidiotis, A., 1998, Contributions of the Astronomical Observatory Skalnate Pleso, 28, 51
Chou, K. C., 1969, Journal of Korean Astronomical Society, 2, 10
Christiansen, J. L., Derekas, A., Ashley, M. C. B., et al., 2007, MNRAS, 382, 239
Claret, A., Rodríguez, E., Rolland, A., López de Coca, P., 1990, ASPCS, 11, 481
Claret, A., 2004, A&A, 428, 1001
Costa, J. E. S., Michel, E., Peña, J., et al., 2007, A&A, 468, 637
Cox, J. P., 1980, *Theory of Stellar Pulsation* (Princeton: Princeton University Press)
Cox, A. N., 2000, *Allen's Astrophysical Quantities*, 4th ed. (New York: Springer-Verlag)
Creevey, O. L., Uytterhoeven, K., Martín-Ruiz, S., et al., 2009, A&A, 507, 901
Cristaldi, S., Walter, K., 1963, AN, 287, 103
Cugier, H., Dziembowski, W. A., Pamyatnykh, A. A., 1994, A&A, 291, 143
Dallaporta, S., Tomov, T., Zwitter, T., Munari, U., 2002, IBVS, 5312, 1
Dallaporta, S., Munari, U., 2005, astro.ph.11399D
Damiani, C., Maceroni, C., Cardini, D., et al., 2010, Ap&SS, 328, 91
Derekas, A., Kiss, L. L., Bedding, T. R., et al., 2009, MNRAS, 394, 995
Dimitrov, D., Kraicheva, Z., Popov, V., 2008a, IBVS, 5842, 1
Dimitrov, D., Kraicheva, Z., Popov, V., 2008b, IBVS, 5856, 1
Dimitrov, D., Kraicheva, Z., Popov, V., 2009a, IBVS, 5883, 1
Dimitrov, D., Kraicheva, Z., Popov, V., 2009b, IBVS, 5892, 1
Dimitrov, D., Kraicheva, Z., Popov, V., Genkov, V., 2010, IBVS, 5925, 1
Dugan, R. S., Wright, F. W., 1939, Contributions from the Princeton University Observatory, 19, 57
Dvorak, S., 2009, CoAst, 160, 64
Eddington, A., 1919, MNRAS, 74, 177
Eggleton, P., 1983, ApJ, 268, 368
Erdem, A., Kilinc, B., Degirmenci, Ö. L., et al., 1993, IBVS, 3915, 1
Erdem, A., Budding, E., Demircan, O., et al., 2005, AN, 326, 332
Erdem, A., Doğru, S. S., Bakiş, V., Demircan, O., 2007, AN, 328, 543

Erdem, A., Zola, S., Winiarski, M., 2011, NewA, 16, 6

ESA, 1997, *The Hipparcos and Tycho Catalogues*, ESA SP-1200

Etzel, P. B., Olson, E. C., 1993, AJ, 106, 1200

Fabricius, C., Makarov, V. V., Knude, J., Wycoff, G. L., 2002, A&A, 386, 709

Fehrenbach, C., Duflot, M., Mannone, C., Burnage, R., Genty, V., 1997, A&AS 124, 255

Fernie, J. D., 1995, AJ, 110, 2361

Fetlaar, J., 1930, Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands, 6, 29

Frieboes-Conde, H., Herczeg, T., 1973, A&AS, 12, 1

Gaposchkin, S., 1953, Annals of the Astronomical Observatory of Harvard College, 133, 69

Geyer, E., 1961, Zeitschrift für Astrophysik, 51, 79

Gitz, H., 1936, Peremennye Zvezdy, 5, 65

Giuricin, G., Mardirossian, F., 1981a, A&AS, 45, 499

Giuricin, G., Mardirossian, F., 1981b, Ap&SS, 76, 111

Giuricin, G., Mardirossian, F., Predolin, F., 1981, A&AS, 43, 251

Giuricin, G., Mardirossian, F., Mezzetti, M., 1983, ApJS, 52, 35

Giuricin, G., Mardirossian, F., Mezzetti, M., 1984, ApJS, 54, 421

Gray, R. O., Corbally, C. J., 1994, AJ, 107, 742

Grenier, S., Baylac, M.-O., Rolland, L., et al., 1999, A&AS, 137, 451

Güdür, N., Sezer, C., Gülmen, Ö, 1987, IBVS, 2978, 1

Gülmen, Ö, Güdür, N., Sezer, C., 1993, Ap&SS, 206, 259

Guthnick, P., Prager, R., 1928, AN, 233, 35

Guthnick, P., Schneller, H., 1939, AN, 268, 165

Halbedel, E. M., 1984, IBVS, 2549, 1

Hall, D. S., Neff, S. G., 1979, AcA, 29, 641

Hambleton, K., Kurtz, D., Prša, A., Bloemen, S., Southworth, J., 2012, in proceedings of the International Astronomical Union Symposium 282: *"From Interacting Binaries to Exoplanets: Essential Modeling Tools"*, edited by M. T. Richards & I. Hubeny, IAU Symposium, 282, 77

Hambsch, F.-J., Lampens, P., Van Cauteren, P., et al., 2010, IBVS, 5949, 1

Hanson, R. B., Klemola, A. R., Jones, B. F., Monet, D. G., 2004, AJ, 128, 1430

Hareter, M., Kochukhov, O., Lehmann, H., et al., 2008, A&A, 492, 185

Harrington, R. S., 1977, Revista mexicana de astronomía y astrofísica, 3, 139

Hatzidimitriou, D., Pietsch, W., Misanovic, Z., Rieg, R., Haberl, F., 2006, A&A, 451, 835

Haynes, E. S., Shapley, H., 1911, Laws Observatory Bulletin-University of Missouri, 19, 33

Henry, G. W., Fekel, F. C., Henry, S. M., 2004, AJ, 127, 1720

Herbig, G. H., 1960, ApJ, 131, 632

Hilditch, R. W., Hill, G., 1975, Memoirs of the Royal Astronomical Society, 79, 101

Hilditch, R. W., 2001, *An Introduction to Close Binary Stars* (Cambridge: Cambridge University Press)

Hill, G., Barnes, J. V., 1972, PASP, 84, 430

Hill, G., Hilditch, R. W. Younger, F., Fisher, W. A., 1975, Memoirs of the Royal Astronomical Society, 79, 131

Hoffman, D. I., Harrison, T. E., McNamara, B. J., et al., 2006, AJ, 132, 2260

Hoffmeister, C., 1915, AN, 201, 879

Hoffmeister, C., 1928a, AN, 233, 33

Hoffmeister, C., 1928b, AN, 234, 33

Hoffmeister, C., 1929, AN, 236, 233

Hoffmeister, C., 1930, AN, 240, 193

Hoffmeister, C., 1931, AN, 242, 129

Hoffmeister, C., 1933, AN, 247, 281

Hoffmeister, C., 1934, AN, 253, 195

Hoffmeister, C., 1935, AN, 255, 401

Hoffmeister, C., 1944, AN, 274, 176

Hoffmeister, C., 1949, Ergänzungshefte zu den AN, 12, 1

Hoffmeister, C., 1968, AN, 290, 277

Høg, E., Kuzmin, A., Bastian, U., et al., 1998, A&A, 335, 65

Høg, E., Fabricius, C., Makarov, V. V., et al., 2000, A&A, 355, 27

Hopp, U., Geyer, E. H., Lentes, F.-Th., 1983, IBVS, 2327, 1

Horak, T., 1966, Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia, 17, 272

Hroch, F., 1998, in *29th Conference on Variable Star Research*, edited by J. Dusek & M. Zejda, 30

Hudson, K. I., Chiu, H. Y., Maran, S. P., et al., 1971, ApJ, 165, 273

İbanoğlu, C., Soydugan, F., Soydugan, E., Dervişoğlu, A., 2006, MNRAS, 373, 435

İbanoğlu, C., Evren, S., Taş, G., et al., 2008, MNRAS, 384, 331

Ichinohe, N., 1907, AN, 175, 203

Ichinohe, N., 1908, Annales de l' Observatoire astronomique de Tokyo, 3, 1

Irwin, J. B., 1959, AJ, 64, 149

Jungbluth, H., Agerer, F., 2008, BAV Rundbrief - Mitteilungsblatt der Berliner Arbeits-gemeinschaft für Veraenderliche Sterne, 57, 2

Kaitchuck, R. H., Park, E. A., 1988, ApJ, 325, 225

Kalimeris, A., Rovithis-Livaniou, H., Rovithis, P., 1994, A&A, 282, 775

Kallrath, J., Milone, E. F., 1999, *Eclipsing Binary Stars – Modeling and Analysis* (New York: Springer-Verlag)

Kałużny, J., Semeniuk, I., 1984, AcA, 34, 433

Kazarovets, E. V., Samus, N. N., Durlevich, O. V., IBVS, 4655, 1

Kharchenko, N. V., 2001, Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel., 17, 409

Kim, S.-L., Lee, J. W., Kwon, S.-G., et al., 2003, A&A, 405, 231
Kim, S.-L., Lee, J. W., Lee, C.-U., et al., 2005a, IBVS, 5598, 1
Kim, S.-L., Lee, J. W., Kang, Y. B., et al. 2005b, IBVS, 5628, 1
Kippenhahn, R., Weigert, A., 1967, Zeitschrift für Astrophysik, 65, 221
Koch, R. H., 1963, AJ, 68, 785
Kopal, Z., 1959, *Close Binary Systems* (London: Chapman & Hall)
Kreiner, J. M., 1971, AcA, 21, 365
Kreiner, J. M., Pajdosz, G., Tremko, J., Zola, S., 1994, A&A, 285, 459
Kreiner, J. M., Kim, C.-H., Nha, I.-S., 2001, *An Atlas of O−C Diagrams of Eclipsing Binary Stars* (Cracow: Wydawnictwo Naukowe Akademii Pedagogicznej)
Kruszewski, A., 1966, Advances in Astronomy and Astrophysics, 4, 233
Kukarkin, B. V., Kholopov, P. N., Artiukhina, N. M., et al., 1982, *New Catalogue of Suspected Variable Stars* (Moscow: Nauka Publishing House)
Kwee, K., van Woerden, H., 1956, Bulletin of the astronomical institutes of the Netherlands, 12, 464
Lacchini, G. B., 1927, AN, 230, 205
Lacy, D. H., 1992, AJ, 104, 801
Lampens, P., Frémat, Y., Garrido, R., et al., 2005, A&A, 438, 201
Lampens, P., Strigachev, A., Kim, S.-L., et al., 2011, A&A, 534, 111
Lanza, A. F., Rodonò, M., 2002, AN, 323, 424
Latham, D. W., Mazeh, T., Stefanik, R. P., et al., 1992, AJ, 104, 774
Lázaro, C., Arévalo, M. J., Claret, A., Rodríguez, E., Olivares, I., 2001, MNRAS, 325, 617
Lázaro, C., Arévalo, M. J., Martínez-Pais, I. G., Domínguez, R. M., 2002, AJ, 123, 2733
Lee, J. W., Kim, C.-H., Koch, R. H., 2007, MNRAS, 379, 1665
Lee, C.–U, Kim, S.-L., Lee, J. W., Pavlovski, K., Southworth, J., 2012, in proceedings of the International Astronomical Union Symposium 282: *"From Interacting Binaries to Exoplanets: Essential Modeling Tools"*, edited by M. T. Richards & I. Hubeny, IAU Symposium, 282, 327
Lehmann, H., Mkrtichian, D. E., 2008, A&A, 480, 247
Lenz, P., Breger, M., 2005, CoAst, 146, 53
Leung, K.-C., Zhai, D.-S., Huang, Y.-L., 1982, Acta Astrophysica Sinica, 2, 144
Liakos, A., Niarchos, P., 2007, IBVS, 5900, 2
Λιάκος, Α., 2008, *CCD φωτομετρία δι' εκλείψεων μεταβλητών αστέρων και μελέτη των O−C διαγραμμάτων τους, Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία*, Αθήνα 2008
Liakos, A., Niarchos, P., 2008a, IBVS, 5900, 10
Liakos, A., Niarchos, P., 2008b, in 5th SREAC's meeting: *"Latest progress in Astrophysics"*, edited by H. Rovithis-Livaniou, N. A. Popescu & V. Mioc, Romanian Astronomical Journal Supplement, 18, 67

Liakos, A., Ulaş, B., Gazeas, K., Niarchos, P., 2008, in Wrocław HELAS Workshop: *"Interpretation of Asteroseismic Data"*, edited by M. Breger, W. Dziembowski & M. Thompson, CoAst, 157, 336

Liakos, A., Niarchos, P., 2009a, CoAst, 160, 2

Liakos, A., Niarchos, P., 2009b, IBVS, 5998, 1

Liakos, A., Niarchos, P., 2009c, IBVS, 5897, 1

Liakos, A., Niarchos, P., 2010a, PzP, 10, 9

Liakos, A., Niarchos, P., 2010b, IBVS, 5998, 2

Liakos, A., Niarchos, P., 2010c, IBVS, 5998, 3

Liakos, A., Niarchos, P., 2010d, IBVS, 5998, 4

Liakos, A., Niarchos, P., 2010e, IBVS, 5998, 6

Liakos, A., Niarchos, P., 2010f, IBVS, 5943, 1

Liakos, A., Niarchos, P., 2010g, IBVS, 5958, 1

Liakos, A., Niarchos, P., 2010h, in *9th International Conference of the Hellenic Astronomical Society*, edited by K. Tsinganos, D. Hatzidimitriou & T. Matsakos, ASPCS, 424, 208

Liakos, A., Zasche, P., Niarchos, P., 2010, in *Binaries - Key to Comprehension of the Universe*, edited by A. Prša & M. Zejda, ASPCS, 435, 101

Liakos, A., Niarchos, P., 2011a, IBVS, 5998, 7

Liakos, A., Niarchos, P., 2011b, PzP, 11, 2

Liakos, A., Niarchos, P., 2011c, IBVS, 5998, 8

Liakos, A., Niarchos, P., 2011d, PzP, 11, 26

Liakos, A., Niarchos, P., 2011e, IBVS, 6100, 2

Liakos, A., Niarchos, P., 2011f, CoAst, 162, 51

Liakos, A., Niarchos, P., 2011g, IBVS, 5990, 1

Liakos, A., Niarchos, P., 2011h, IBVS, 5999, 5

Liakos, A., Niarchos, P., 2011i, IBVS, 6005, 1

Liakos, A., Niarchos, P., 2011j, CoAst, 162, 73

Liakos, A., Niarchos, P., 2011k, IBVS, 5967, 1

Liakos, A., Niarchos, P., 2011m, IBVS, 6099, 1

Liakos, A., Zasche, P., Niarchos, P., 2011a, NewA, 16, 530

Liakos, A., Bonfini, P., Niarchos, P., Hatzidimitriou, D., 2011b, AN, 332, 602

Liakos, A., Niarchos, P., 2012a, PzP, 12, 2

Liakos, A., Niarchos, P., 2012b, NewA, 17, 634

Liakos, A., Niarchos, P., 2012c, Ap&SS, in press

Liakos, A., Niarchos, P., 2012d, in prep.

Liakos, A., Niarchos, P., Budding, E., 2012a, A&A, 539, 129

Liakos, A., Niarchos, P., Soydugan, E., Zasche, P., 2012b, MNRAS, 422, 1250

Liakos, A., Mislis, D., Niarchos, P., 2012c, in proceedings of the International Astronomical Union Symposium 282: *"From Interacting Binaries to*

Exoplanets: Essential Modeling Tools", edited by M. T. Richards & I. Hubeny, IAU Symposium, 282, 57

Liakos, A., Niarchos, P., Budding, E., 2012d, in proceedings of the International Astronomical Union Symposium 282: *"From Interacting Binaries to Exoplanets: Essential Modeling Tools"*, edited by M. T. Richards & I. Hubeny, IAU Symposium, 282, 55

Liao, W., Qian, S., 2009, NewA, 14, 249

Linnell, A. P., 1973, Ap&SS, 22, 13

de Loore, C. W. H., Doom, C., 1992, *Structure and Evolution of Single and Binary Stars* (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers)

López de Coca, P., Rolland, A., Garrido, R., Rodríguez, E., 1990, Ap&SS, 169, 211

Loumos, G. L., Deeming, T. J., 1978, Ap&SS, 56, 285

Lucy, L. B., 1967, Zeitschrift für Astrophysik, 65, 89

Lucy, L. B., Sweeney, M. A., 1971, AJ, 76, 544

Maceroni, C., Gandolfi, D., Montalbán, J., Aerts, C., 2012, in proceedings of the International Astronomical Union Symposium 282: *"From Interacting Binaries to Exoplanets: Essential Modeling Tools"*, edited by M. T. Richards & I. Hubeny, IAU Symposium, 282, 41

Malkov, O. Yu, Oblak, E., Snegireva, E. A., Torra, J., 2006, A&A, 446, 785

Mallama, A. D., 1975, Journal of the American Association of Variable Star Observers, 4, 13

Mallama, A. D., 1980a, PASP, 92, 463

Mallama, A. D., 1980b, ApJS, 44, 241

Manimanis, V. N., Vamvatira-Nakou, C., Niarchos, P. G., 2009, Ap&SS, 323, 115

Margrave, T. E., 1981, IBVS, 1930, 1

Martynov, D. Ya, 1973, *Eclipsing variable stars* (New York: J. Wiley)

Mas-Hesse, J. M., Gimenez, A., Domingo, A., et al. and the OMC team 2004, in *5th INTEGRAL Workshop on the INTEGRAL Universe*, 552, 729

Masnauskas, J., 1960, Vilnius Astronomijos Observatorijos Biuletenis, 1, 3

Maxted, P. F. L., Hill, G., Hilditch, R. W., 1994, A&A, 285, 535

McNamara, D. H., Feltz, K. A. Jr., 1978, PASP, 90, 275

Mislis, D., Heller, R., Fernadez, J., et al., 2012, in *10th International Conference of the Hellenic Astronomical Society*, edited by I. Papadakis & A. Anastasiadis, 12

Mkrtichian, D. E., Nazarenko, V., Gamarova, A., et al., 2003, in *Interplay of Periodic, Cyclic and Stochastic Variability in Selected Areas of the H-R Diagram*, edited by C. Sterken, ASPCS, 292, 113

Mkrtichian, D. E., Kusakin, A. V., Rodríguez, E., et al., 2004, A&A, 419, 1015

Mkrtichian, D. E., Rodríguez, E., Olson, E. C., et al., 2005, in 3rd Granada Workshop: "*Stellar Structure Tidal Evolution and Oscillations in Binary Stars*", edited by A. Claret, A. Giménez & J.-P. Zahn, ASPCS, 333, 197

Mkrtichian, D. E., Kim, S.-L., Kusakin, A. V., et al., 2006, Ap&SS, 304, 169

Mkrtichian, D. E., Kim, S.-L., Rodríguez, E., et al., 2007, in *Solar and Stellar Physics Through Eclipses*, edited by O. Demircan, S. O. Selam & B. Albayrak, ASPCS, 370, 194

Monet, D., Bird, A., Canzian, B., et al., 1998, USNO-A V2.0, *A Catalogue of Astrometric standards*, U.S. Naval Observatory Flagstaff Station (USNOFS) and Universities Space Research Association (USRA) stationed at USNOFS

Montalban, J., Dupret, M.-A., 2007, A&A, 470, 991

Moon, T. T., Dworetsky, M. M., 1985, MNRAS, 217, 305

Morgenroth, O., 1934, AN, 252, 389

Morrison, J. E., Roeser, S., McLean, B., Bucciarelli, B., Lasker, B., 2001, AJ, 121, 1752

Νανούρης, Ν., 2011, *Μελέτη των μακροχρόνιων παρατηρούμενων μεταβολών της τροχιακής περιόδου στα διπλά εκλειπτικά συστήματα αστέρων*, Διδακτορική διατριβή, Αθήνα 2011

Nelson, R. H., 2009, Software by Bob Nelson, http://members.shaw.ca/bob.nelson/

Neujmin, G., 1922, AN, 217, 192

Niarchos, P. G., Manimanis, V. N., 2003, in 6th Pacific Rim Conference: *"Stellar astrophysics – a tribute to Helmut A. Abt",* edited by K. S. Cheng, K. C. Leung, & T. P. Li, Ap&SS Library, 298, 151

Olson, E. C., 1984, PASP, 96, 376

Payne-Gaposchkin, C., 1952, Annals of Harvard College Observatory, 118, 15

Pazhouhesh, R., Liakos, A., Niarchos, P., 2010, in *Binaries - Key to Comprehension of the Universe*, edited by A. Prša & M. Zejda, ASPCS, 435, 279

Perryman, M. A. C., 1997, A&A, 323, 49

Pickering, E. C., Parkhurst, J. A., Wendell, O. C., 1902, ApJ, 15, 229

Pickering, E. C., 1912, Harvard College Observatory Circular, 171, 1

Pigulski, A., Michalska, G., 2007, AcA, 57, 61

Pinfield, D. J., Dobbie, P. D., Jameson, R. F., et al., 2003, MNRAS, 342, 1241

Pojmanski, G., Pilecki, B., Szczygiel, D., 2005, AcA, 55, 275

Pollacco, D. L., Skillen, I., Cameron, A., et al., 2006, PASP, 118, 1407

Popper, D. M., 1957, ApJS, 3, 107

Popper, D. M., 1968, ApJ, 154, 191

Popper, D. M., 1996, ApJS, 106, 133

Prager, R., Shapley, H., 1941, Annals of the Astronomical Observatory of Harvard College, 111, 1

Pribulla, T., Rucinski, S. M., Lu, W., et al., 2006, AJ, 132, 769

Prša, A., Zwitter, T., 2005, ApJ, 628, 426
Prša, A., Guinan, E. F., Devinney, E. J., et al., 2008, ApJ, 687, 542
Prugniel, P., Soubiran, C., Koleva, M., Le Borgne, D., 2007, astro-ph/0703658
Qian, S., 2000a, AJ, 119, 901
Qian, S., 2000b, A&AS, 146, 377
Qian, S., 2001, AJ, 121, 1614
Quester, W., Braune, W., 1965, IBVS, 116, 1
Rafert, J. B., 1990, AJ, 100, 1253
Rodríguez, E., Lopez-Gonzalez, M. J., Lopez de Coca, P., 2000, A&AS, 144, 469
Rodríguez, E., Garcia, J. M., Gamarova, A. Y., et al., 2004, MNRAS, 353, 310
Rodríguez, E., Garcia, J. M., Costa, V., et al., 2010, MNRAS, 408, 2149
Roman, N. G., 1956, ApJ, 123, 246
Rosino, L., Bianchini, A., di Martino, D., 1976, A&AS, 24, 1
Ross, F. E., 1928, AJ, 38, 99
Rovithis-Livaniou, H., Rovithis, P., 1990, IBVS 3527, 1
Rovithis-Livaniou, H., Kranidiotis, A. N., Rovithis, P., Athanassiades, G., 2000, A&A, 354, 904
Rovithis-Livaniou, H., Georgopoulos, L., Rovithis, P., 2003, in *Interplay of Periodic, Cyclic and Stochastic Variability in Selected Areas of the H-R Diagram*, edited by C. Sterken, ASPCS, 292, 137
Rovithis-Livaniou, H., Rovithis, P., Georgopoulos, L., Mkrtichian, D., 2005, Romanian Astronomical Journal, 15, 171
Rucinski, S. M., 1966, AcA, 16, 307
Rucinski, S. M., 1969, AcA, 19, 245
Rucinski, S. M., 1992, AJ, 104, 1968
Rucinski, S. M., 1999, in IAU Colloquium 170: *"Precise Stellar Radial Velocities"*, edited by J. B. Hearnshaw & C. D. Scarfe, ASPCS, 185, 82
Rucinski, S. M., Lu, W., Mochnacki, S. W., 2000, AJ, 120, 1133
Rucinski, S. M., 2002, AJ, 124, 1746
Rucinski, S. M., Pribulla, T., Mochnacki, S. W., et al., 2008, AJ, 136, 586
Samec, R. G., Fuller, R. E., Bookmyer, B. B., Faulkner, D. R., 1989, PASP, 101, 180
Samolyk, G., 1997, The Journal of the American Association of Variable Star Observers, 26, 22
Samus, N. N., Durlevich, O. V., Kazarovets, E. V., et al., 2011, *General Catalogue of Variable Stars* (GCVS database, Version 2011 Jan), Institute of Astronomy of Russian Academy of Sciences and Sternberg State Astronomical Institute of the Moscow State University
Sandig, H.-U., 1947, AN, 275, 37
Sanford, R. F., 1934a, Contributions from the Mount Wilson Observatory and Carnegie Institution of Washington, 484, 1

Sanford, R. F., 1934b, AJ, 79, 89

Sasselov, D. D., 1982, Contributions of the Public Observatory and Planetarium in Brno, 23, 28

Schatzman, E., 1962, Annales d' Astrophysique, 25, 18

Schmidt, E. G., Reiswig, D. E., 1993, AJ, 106, 2429

Schneller, H., 1941, Kleine Veröffentlichungen der Universitätssternwarte zu Berlin Babelsberg, 6, 70

Shapley, H., 1913, ApJ, 38, 158

Shapley, H., 1914, ApJ, 40, 448

Shaw, J. S., 1994, Memoirs of the Royal Astronomical Society, 65, 95

Shaw, J. S., Ragona, T., McCook, G., 1998, International Amateur-Professional Photoelectric Photometry Communications, 73, 117

Šimon, V., 1995, Contributions of the Public Observatory and Planetarium in Brno, 31, 80

Šimon, V., 1996, A&A, 311, 915

Skiff, B. A., 2010, *MK Catalogue of Stellar Spectral Classifications* (Lowell Observatory September 2011)

Southworth, J., Zima, W., Aerts, C., et al., 2011, MNRAS, 414, 2413

Soydugan, E., İbanoğlu, C., Soydugan, F., Akan, M. C., Demircan, O., 2006a, MNRAS, 366, 1289

Soydugan, E. Soydugan, F., Demircan, O., İbanoğlu, C., 2006b, MNRAS, 370, 2013

Soydugan, F., Soydugan, E., İbanoğlu, C., Demircan, O., 2006c, AN, 327, 705

Soydugan, E., Tüysüz, M., Bakiş, V., et al., 2008, in Wrocław HELAS Workshop: *"Interpretation of Asteroseismic Data"*, edited by M. Breger, W. Dziembowski & M. Thompson, CoAst, 157, 379

Soydugan, E., Soydugan, F., Şenyüz, T., et al., 2009, IBVS, 5902, 1

Soydugan, E., Soydugan, F., Şenyüz, T., Püsküllü, Ç., Demircan, O., 2011, NewA, 16, 72

Srivastava, R. K., 1991, Ap&SS, 175, 247

Strohmeier, W., 1958a, Kleine Veröffentlichungen der Remeis-Sternwarte Bamberg, 21, 22

Strohmeier, W., 1958b, Kleine Veröffentlichungen der Remeis-Sternwarte Bamberg, 23

Strohmeier, W., 1962, IBVS, 9, 1

Strohmeier, W., Knigge, R., 1969, Monthly Notes of the Astronomical Society of South Africa, 28, 75

Struve, O., 1946, ApJ, 103, 76

Struve, O., 1950, ApJ, 112, 184

Sumter, G. C., Beaky, M. M., 2007, IBVS, 5798, 1

Surkova, L. P., Svechnikov, M. A, 2004, VizieR Online Data Catalog, 5115

Svechnikov, M. A., Kuznetsova, E. F., 1990, *Catalogue of Approximate Photometric and Absolute Elements of Eclipsing Variable Stars* (A. M. Gorky University of the Urals: Sverdlovsk)

Szafraniec, R., 1960, AcA, 10, 99

Szafraniec, R., 1970, AcA, 20, 29

Szafraniec, R., 1971, AcA, 21, 55

Taylor, P. H., Alexander, R. S., 1940, Publications of the Flower Astronomical Observatory, 6, 1

Terrell, D., Wilson, R. E., 2005, Ap&SS, 296, 221

Tkachenko, A., Lehmann, H., Mkrtichian, D. E., 2009, A&A, 504, 991

Torres, G., Andersen, J., Giménez, A., 2010, A&A Rev., 18, 67

Tout, A., Hall. S., 1991, MNRAS, 253, 9

Tsesevitch, V. P., 1951, Astronomicheskij Tsirkulyar USSR, 121, 3

Tsesevitch, W., 1953, Odessa Isvestia, 4, 56

Turcu, V., Pop, A., Moldovan, D., 2008, IBVS, 5826, 1

Ulaş, B., Niarchos, P., Lampens, P., Liakos, A., 2009, Ap&SS, 319, 55

Vamvatira-Nakou, C., Liakos, A., Manimanis, V., Niarchos, P., 2008, in 5th SREAC's meeting: *"Latest progress in Astrophysics"*, edited by H. Rovithis-Livaniou, N. A. Popescu & V. Mioc, Romanian Astronomical Journal Supplement, 18, 91

van Hamme, W., 1993, AJ, 106, 2096

van der Wal, P. B., Nagel, C., Voordes, H. R., Boer, K. S., 1972, A&AS, 6, 131

van't Veer, F., Maceroni, C., 1992, in *Workshop on Binaries as Tracers of Star Formation*, edited by A. Duquennoy & M. Mayor, Cambridge University Press, 237

Vetešnik, M., 1968, Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia, 19, 135

von Zeipel, H., 1924, MNRAS, 84, 665

Vyas, M. L., Abhyankar, K. D., 1989, A&AS, 81, 81

Wachmann, A. A., 1929, AN, 236, 279

Wachmann, A. A., 1931, AN, 244, 303

Wachmann, A. A., 1938, Mitteilungen der Hamburger Sternwarte in Bergedorf, 7, 213

Walker, A. D., 1921, Harvard College Observatory Circular, 225

Walter, K., 1969, AN, 291, 225

Watson, R. D., 1988, Ap&SS, 140, 255

Watson, C., Henden, A. A., Price A., 2006, Society for Astronomical Sciences, 25, 47

Whitney, B. S., 1945, ApJ, 102, 202

Whitney, B. S., 1948, ApJ, 108, 519

Williams, A. S., 1901, AN, 156, 313

Wilson, R. E., 1965, AJ, 70, 368
Wilson, R. E., Devinney, E. J., 1971, ApJ, 166, 605
Wilson, R. E., 1979, AJ, 234, 1054
Wilson, R. E., 1990, ApJ, 356, 613
Wilson, R. E., van Hamme, W., 2003, Computing Binary Star Observables
Woitas, J., 1997, IBVS, 4444, 1
Wolf, G. W., Kern, J. T., 1983, ApJS, 52, 429
Wolf, M., Diethelm, R., 1992, AcA, 42, 363
Woltjer, J. Jr., 1922, Bulletin of the Astronomical Institute of the Netherlands, 1, 93
Wood, D. B, Forbes, J. E., 1963, AJ, 68, 257
Wood, D. B., 1971, AJ, 76, 701
Woodward, E. J., 1943, Harvard College Observatory Bulletin, 917, 7
Wright, C., Egan, M., Kraemer, K., Price, S., 2003, AJ, 125, 359
Yang, Y.-G., Hu, S.-M., Guo, D.-F., Wei, J.-Y., Dai, H.-F., 2010, AJ, 139, 1360
Yoon, T. S., Honeycutt, R. K., Kaitchuck, R. H., Schlegel, E. M., 1994, PASP, 106, 239
Zacharias, N., Monet, D. G., Levine, S. E., et al., 2004, American Astronomical Society Meeting, 205, 4815
Zasche, P., Liakos, A., Wolf, M., Niarchos, P., 2008, NewA, 13, 405
Zasche, P., Liakos, A., Niarchos, P., et al., 2009, NewA, 14, 121
Zasche, P., 2009, NewA, 14, 129
Zasche, P., 2011, NewA, 16, 157
Zhai, D.-S., Huang, Y.-L., 1981, Chinese Astronomy & Astrophysics, 5, 90
Zhevakin, S. A., 1953, Russian Astronomical Journal, 30, 161
Zhevakin, S. A., 1963, A&A annual Rev., 1, 367
Zhou, A.-Y., 2010, arXiv:1002.2729v2
Zhu, L. Y., Qian, S. B., Liao, W. P., Zejda, M., Mikulášek, Z., 2009, PASJ, 61, 529
Zima, W., 2008, *User Manual for FAMIAS and DAS*, edited by W. Zima, CoAst, 155, 1
Zinner, E., 1952, AN, 281, 14

Synopsis

The present doctoral thesis presents new astrophysical information concerning absolute parameters and evolutionary status of 40 eclipsing binaries of EA, oEA and EB type. The systems were selected due to the lack of literature information concerning their complete light curves, absolute parameters and evolutionary status of their components. In addition, the majority of the systems were either candidate for including a pulsating component or they show peculiar orbital period changes.

All the categories of variable stars are presented in brief, but we focused mostly on the categories of the eclipsing binaries and δ Scuti type pulsators which they were of prime interest. The fundamental dynamical equations and the Roche geometry of eclipsing binaries as well as the physics (e.g. excitation mechanisms) of stellar pulsations are also presented.

We briefly describe the fundamentals of CCD and the general use of the CCD images in Astronomy. The main observing site for the data collection was the Gerostathopouleion observatory of the University of Athens (~95% of the total observations), while the Kryonerion observatory and the Skinakas observatory were used as additional observing sites for either fainter objects or for applying another observation technique.

Concerning our observational methods used, a detailed description is given for the CCD data reduction techniques of differential aperture photometry and slit spectroscopy for the eclipsing binaries and pulsating stars. In particular, we discuss in detail the steps that should be made using modern photometry and spectroscopy tools in order one to obtain a light curve of an eclipsing binary or a pulsating star, calculate the respective times of minima/maxima, obtain its radial velocity curve and classify the spectral type of the component(s).

The data analysis of the eclipsing binaries was based on the W-D code using the PHOEBE software. For the cases of eclipsing binaries including a δ Scuti component, their light curve residuals were furthermore analysed with the Fourier method, using the software PERIOD04, in order to calculate the pulsating frequencies and estimate the excitation modes. Given that the most of the selected systems show orbital period changes, the influence of the most possible physical mechanisms in the system's orbital period (i.e. Light-Time effect, mass exchange, mass loss, Applegate mechanism and apsidal motion) and their respective mathematical background are presented in full detail. It is shown that the results of the O−C diagram analysis can be combined with the results of the light and radial velocity curves solution in order to obtain a more comprehensive view of the system. Particularly, it is shown that it is feasible to find the best Roche geometry that describes the system (e.g. detached or semidetached configuration), or to conclude about the existence of a third body orbiting the system, if one compares qualitatively and/or quantitatively the results of these two independent methods of analysis.

The light curves of ten detached and twelve semidetached systems were analysed, while, since most of them have variable orbital period, an O−C analysis was also performed. The results of the light curve modelling were used to calculate the absolute parameters and estimate the present evolutionary status of their components. In the cases where orbital period modulation was detected, the results of light curve and O−C analyses were compared and the most possible explanations were proposed. In order to check the accuracy of the methods used, we compared our results with the sample of well studied detached and semidetached systems of İbanoğlu et al. (2006). The comparison showed that, except for a few members of some systems, all the components follow well the distributions of İbanoğlu et al. (2006) in the M-R and CM diagrams. In addition, since all systems have total mass less than 3 $M_{\odot}$, they can be considered as very useful information for this range of masses in the sample of İbanoğlu et al. (2006). Mass-Luminosity relations were calculated but they did not differ significantly from those of İbanoğlu et al. (2006).

The most significant part of this thesis, which offers very valuable astrophysical information, is the survey for the eclipsing systems with a pulsating component. Given that this field of Astrophysics combines the eclipsing binaries and the Asteroseismology and, in addition, that there only a few known such systems, our new observations, discoveries and results can be considered very important. We tested over a hundred candidate systems for including a δ Scuti component and we discovered thirteen new cases for which we performed systematic observations in order to cover the whole light curves and obtain the most possible detailed frequency study. In addition, we observed for the same reasons mentioned before eight already known such systems, which they were generally neglected so far. The steps of the analysis of these systems were the same with those described in the previous paragraph, but the Fourier method was also applied in order to perform the frequency search. Using the results of the 79 known so far such systems, new correlations between pulsation frequency and fundamental stellar characteristics were found, while the basic characteristics of the δ Scuti binary-members are now well distinguished from those of the single δ Scuti stars. However, through this investigation some of critical questions, such as e.g. how the mass transfer affects the pulsations or which mechanism plays a significant role for an A-F Main Sequence star to become a pulsator, remain still open.