

Επίγειες και δορυφορικές παρατηρήσεις αλληλεπιδρώντων διπλών αστέρων

Παναγιώτης Γ. Νιάρχος

*Τομέας Αστροφυσικής, Αστρονομίας και Μηχανικής
Τμήμα Φυσικής, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών*

Περίληψη

Παρατηρησιακά δεδομένα για αλληλεπιδρώντα διπλά συστήματα αστέρων, που έχουν ληφθεί σε διαφορετικές περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος από επίγεια και διαστημικά παρατηρητήρια, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό των φυσικών παραμέτρων των αλληλεπιδρώντων διπλών αστέρων καθώς και για τη μελέτη των αλληλεπιδράσεων και φυσικών διεργασιών που συμβαίνουν στα διπλά αυτά συστήματα αστέρων. Οι βάσεις δεδομένων από επίγειες και δορυφορικές παρατηρήσεις για τα συστήματα αυτά παρέχουν καμπύλες φωτός για χιλιάδες νέα διπλά συστήματα αστέρων για τα οποία μπορούν να γίνουν συστηματικές παρατηρήσεις μεγάλης ακρίβειας. Επί πλέον, στο πλαίσιο επίγειων και διαστημικών παρατηρησιακών προγραμμάτων, αναμένονται πολλές νέες ανακαλύψεις ενδιαφερόντων νέων διπλών συστημάτων, στα οποία συμπεριλαμβάνονται διπλά συστήματα αστέρων μικρής μάζας και συστήματα αστερά-πλανήτη. Παρουσιάζονται τα πλέον σημαντικά τρέχοντα και μελλοντικά προγράμματα παρατηρήσεων αλληλεπιδρώντων διπλών συστημάτων από τη Γη και το Διάστημα.

1. Εισαγωγή

Σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση του Hilditch (2001) τα διπλά συστήματα αστέρων περιλαμβάνουν: εκλειπτικά συστήματα (Eclipsing Binaries, EBs), μικρής μάζας διπλά συστήματα εκπομπής ακτίνων X (Low Mass X-ray Binaries, LMXBs), μεγάλης μάζας διπλά συστήματα εκπομπής ακτίνων X (High Mass X-ray Binaries, HMXBs), κατακλυσμικούς μεταβλητούς (Cataclysmic Variables, CVs), συμβιοτικούς αστέρες (Symbiotic stars), υπέρ-μαλακές πηγές ακτίνων X (Supersoft X-ray Sources), αστέρες τύπου RS CVn, αστέρες τύπου Z Aurigae, αστέρες τύπου W Serpentis, διπλά συστήματα παλμικών αστέρων (pulsar binaries), αστέρες τύπων Ba και CH.

Τα αλληλεπιδρώντα διπλά συστήματα αστέρων (Interacting Binaries, IBs) ή στενά διπλά συστήματα αστέρων (Close Binaries, CBs) είναι ζεύγη αστέρων στα οποία η εξελικτική πορεία των μελών δεν είναι ανεξάρτητη, αλλά η εξέλιξη του κάθε αστερά εξαρτάται από την παρουσία του συνοδού. Οι διαδικασίες αλληλεπίδρασης περιλαμβάνουν: βαρυτικά φαινόμενα, αμοιβαίο φωτισμό μεταξύ των δύο μελών,

ανταλλαγή μάζας μεταξύ των δύο αστερών και απώλεια μάζας από το σύστημα. Η μελέτη των στενών διπλών αστερών παρέχει τα μέσα για εμβάθυνση σε σχεδόν όλες τις περιοχές της αστροφυσικής, όπως π.χ. ατμόσφαιρες και εσωτερικά αστέρων, αστρική εξέλιξη, πυρηνοσύνθεση, φυσική πλάσματος, μαγνητικά δυναμό (σε ψυχρούς αστέρες), σχετικιστική φυσική, κ.α. Τελευταία, η μελέτη εκλειπτικών συστημάτων σε άλλους γαλαξίες και σμήνη αστερών έκανε δυνατή την περαιτέρω διερεύνηση της αστρικής εξέλιξης και τη διατύπωση του νόμου *μάζας-φωτεινότητας* για γαλαξίες με εντελώς διαφορετική εξελικτική και χημική ιστορία από εκείνη του δικού μας γαλαξία (όπως το Μικρό και Μεγάλο Νέφος του Μαγγελάνου). Επί πλέον, τα εκλειπτικά συστήματα αστερών αρχίζουν να παίζουν σημαντικό ρόλο και στην Κοσμολογία ως δείκτες αποστάσεων για κοντινούς γαλαξίες.

2. Μέθοδοι και τεχνικές παρατηρήσεων αλληλεπιδρώντων διπλών αστερών

Ο αιώτερος σκοπός των παρατηρήσεων είναι ο άμεσος προσδιορισμός των βασικών αστροφυσικών παραμέτρων των μελών του συστήματος (μάζες, ακτίνες, θερμοκρασίες και φωτεινότητες). Οι παράμετροι αυτές, που επίσης λέγονται και *απόλυτα στοιχεία*, μπορούν να εξαχθούν από την ανάλυση των καμπυλών φωτός και των καμπυλών ακτινικών ταχυτήτων, ανεξάρτητα από την απόσταση των συστημάτων από εμάς. Κατά τα τελευταία 30 χρόνια, δύο εξελίξεις στην περιοχή των στενών διπλών αστερών είχαν τεράστια συμβολή στον προσδιορισμό των αστροφυσικών παραμέτρων των συστημάτων αυτών. Η μία ήταν η καθιέρωση του μοντέλου του Roche για τη γεωμετρία των συστημάτων αυτών, και η δεύτερη ήταν η επινόηση νέων μεθόδων επεξεργασίας των φασματοσκοπικών παρατηρήσεων και υπολογισμού των ακτινικών ταχυτήτων των μελών του συστήματος.

2.1. Φωτομετρικές παρατηρήσεις

Οι φωτομετρικές παρατηρήσεις που γίνονται με σύγχρονους ανιχνευτές παρέχουν δεδομένα με ακρίβεια 1-2%, εάν επεξεργαστούν προσεκτικά και με τον κατάλληλο τρόπο. Οι καμπύλες φωτός αναλύονται με τα πλέον σύγχρονα πακέτα λογισμικού (Prsa & Zwitter, 2005) που βασίζονται στη γεωμετρία Roche και επιτρέπουν να υπολογιστούν οι φυσικές παράμετροι των στενών διπλών συστημάτων με μεγαλύτερη ακρίβεια. Οι χρησιμοποιούμενοι κώδικες παρέχουν τη δυνατότητα για ταυτόχρονη ανάλυση των καμπυλών φωτός και των καμπυλών ακτινικών ταχυτήτων. Μεταξύ των παραμέτρων είναι και ο λόγος μαζών των δύο μελών του ζεύγους, ο οποίος είναι απαραίτητος για τον υπολογισμό των απόλυτων στοιχείων για τα φασματοσκοπικά διπλά συστήματα που παρουσιάζουν μία φασματική γραμμή. Οι λόγοι μαζών που προσδιορίζονται μόνο με φωτομετρικές μεθόδους εξαρτώνται από το μοντέλο που χρησιμοποιείται για την ανάλυση των καμπυλών φωτός και στις περισσότερες περιπτώσεις επηρεάζονται πολύ λίγο από τη μορφή των καμπυλών φωτός. Μόνο για τα σε επαφή στενά διπλά συστήματα του τύπου W UMa που παρουσιάζουν ολικές εκλείψεις είναι δυνατόν να προσδιοριστεί ο λόγος μαζών με

μεγάλη ακρίβεια από την ανάλυση μόνο των καμπυλών φωτός (Terrell & Wilson, 2005).

2.2. Φασματοσκοπικές παρατηρήσεις

Οι φασματοσκοπικές παρατηρήσεις των στενών διπλών συστημάτων (CBs) αποσκοπούν στη φασματική τους ταξινόμηση, στην ανάλυση του προφίλ των φασματικών γραμμών και στον προσδιορισμό των ακτινικών ταχυτήτων των μελών του ζεύγους. Χαμηλή διακριτική ικανότητα ($R > 1000$) χρησιμοποιείται για τη φασματική ταξινόμηση, υψηλότερες διακριτικές ικανότητες για τον προσδιορισμό των ακτινικών ταχυτήτων, και πολύ μεγάλες ($R > 10^5$) για την ανάλυση του προφίλ των φασματικών γραμμών και στην έρευνα για την ανακάλυψη εξωηλιακών πλανητών. Γενικά, για τη μελέτη των στενών διπλών συστημάτων απαιτούνται μεγάλης ακρίβειας ακτινικές ταχύτητες. Η ακρίβεια που επιτυγχάνεται με την υπάρχουσα σήμερα τεχνολογία είναι 1m/s (π.χ. με το φασματογράφο HARPS στο ESO). Κατά τη διάρκεια των τελευταίων 30 ετών αναπτύχθηκαν νέες μέθοδοι για τη μελέτη των φασμάτων με ψηφιακές τεχνικές, όπως η Cross Correlation Technique (Mazeh & Zucker, 1994), η Broadening Function Approach (Rucinski, 2002) και η Spectral Disentangling (Hadrava, 2006). Ένας συνδυασμός φωτομετρικών και φασματοσκοπικών παρατηρήσεων παρέχει τα μέσα για τον ακριβή προσδιορισμό των βασικών φυσικών παραμέτρων (ακτίνων, μαζών, θερμοκρασιών, φωτεινοτήτων και αποστάσεων) των μελών των διπλών συστημάτων

2.3. Πολωσιμετρικές παρατηρήσεις

Σχεδόν κάθε κατηγορία διπλών αστερών (όπως εκλειπτικά συστήματα, κατακλυσμικοί μεταβλητοί αστέρες, στενά συστήματα σε επαφή, αστέρες τύπου Wolf-Rayet) μπορεί να παράξει παρατηρήσιμα πολωσιμετρικά φαινόμενα. Στα συστήματα αυτά, η πολωσιμετρία παρέχει τα μέσα για τον προσδιορισμό της γεωμετρίας της κατανομής της ύλης γύρω από τους αστέρες του ζεύγους ή/και γύρω από το διπλό σύστημα, την απόκτηση πληροφορίας για ασυμμετρίες ή ανισοτροπίες στο περιβάλλον του διπλού συστήματος, αναγνώριση μη ορατών πηγών, τη «χαρτογράφηση» των αστρικών κηλίδων, την ανίχνευση μαγνητικών πεδίων και τον υπολογισμό τροχιακών παραμέτρων, ιδιαίτερα της κλίσης του τροχιακού επιπέδου (ως προς την ευθεία παρατήρησης) που είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος για τον προσδιορισμό των μαζών του διπλού συστήματος.

2.4. Συμβολομετρία

Η απόσταση μεταξύ των δύο μελών στα αλληλεπιδρώντα διπλά συστήματα αστερών είναι της τάξεως των χιλιοστών του δευτερολέπτου του τόξου, και, επομένως, η μέτρηση αυτών των αποστάσεων στις διάφορες φασματικές περιοχές έχει μεγάλο ενδιαφέρον. Ευτυχώς, τα τελευταία χρόνια οι εξελίξεις στην οπτική συμβολομετρία έχουν βελτιώσει τη ικανότητά μας να ξεχωρίζουμε τα δύο μέλη στα συστήμα-

τα αυτά και να μπορούμε έτσι να υπολογίζουμε τις φυσικές παραμέτρους του συστήματος.

Η εφαρμογή συμβολομετρικών παρατηρήσεων στη μελέτη των διπλών αστέρων επιτρέπει τον υπολογισμό των αστρικών μαζών, των αποστάσεων των συστημάτων και παρέχει αξιόπιστα δεδομένα για τη διατύπωση του εμπειρικού νόμου *μάζας-φωτεινότητας* σε μία περιοχή που είναι ενδιάμεση μεταξύ των οπτικών και καθαρά φασματοσκοπικών δεδομένων. Επί πλέον, η συμβολομετρία speckle μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της γωνιακής διαμέτρου των (αστρικών) αντικειμένων, και η ανάπτυξη συμβολομετρικών τεχνικών μεγάλης βάσης επιτρέπει την επίτευξη πολύ μεγάλης γωνιακής διακριτικής ικανότητας, ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός των διαμέτρων των μελών ενός στενού διπλού συστήματος αστέρων (Zavala et al., 2010). Διακριτικές ικανότητες της τάξης του χιλιοστού του δευτερολέπτου ή και μικρότερες μπορούν να επιτευχθούν μόνο με ραδιοσυμβολομετρία πολύ μεγάλης βάσης ή με πολύ μεγάλης βάσης συμβολομετρικά όργανα στο οπτικό και το κοντινό υπέρυθρο, όπως π.χ. το CHARA array, το Palomar Testbed Interferometer, κ.α. Μόνο τα πολύ λαμπρά στενά διπλά συστήματα αστέρων μπορούν να παρατηρηθούν (και να μετρηθούν) με τέτοιες μεθόδους και όργανα (Coughlin et al., 2010).

3. Παρατηρήσεις σε διάφορες φασματικές περιοχές

Στη σύγχρονη αστροφυσική είναι απαραίτητη η μελέτη ενός ουρανού σώματος σε όλο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, αφού διάφορες φυσικές διεργασίες λαμβάνουν χώρα σε διάφορα μήκη κύματος. Στην οπτική περιοχή, χρήσιμες πληροφορίες μπορούν να συλλεγούν για το μέλος με τη μεγαλύτερη μάζα. Στα συστήματα με εκφυλισμένα μέλη, το συμπαγές αντικείμενο είναι υπεύθυνο για την εκπομπή φωτονίων μεγάλης ενέργειας (ακτίνες X και ακτίνες γ), ενώ παρατηρήσεις στο IR και UV παρέχουν πληροφορίες για το μεσοαστρικό περιβάλλον και για τη μεταφορά μάζας από το ένα μέλος στο άλλο. Σε μερικά συστήματα, όπως εκείνα που περιέχουν μια μελανή οπή, αναμένεται και εκπομπή ραδιοκυμάτων.

3.1. Παρατηρήσεις στο υπεριώδες (UV)

Η περιοχή του υπεριώδους είναι μεγάλης σημασίας για τη μελέτη των αλληλεπιδρώντων διπλών αστέρων καθώς ένα μεγάλο μέρος της φωτεινότητάς των ακτινοβολείται στη φασματική αυτή περιοχή, η οποία, επίσης, «φιλοξενεί» ένα μεγάλο αριθμό φασματικών γραμμών διαφόρων βαθμών ιονισμού που αντιστοιχούν σε διάφορα χημικά στοιχεία. Η φασματοσκοπία των αλληλεπιδρώντων διπλών αστέρων που έγινε με τα δορυφορικά παρατηρητήρια IUE, HST και FUSE έχει συμβάλει αποτελεσματικά στην κατανόηση των συστημάτων αυτών καθώς και των φυσικών διεργασιών που χαρακτηρίζουν την εκπομπή τους.

Αλλά είμαστε μόνο στην αρχή της αστρονομίας του υπεριώδους για τα αλληλεπιδρώντα διπλά συστήματα αστερών και πολλά κρίσιμα ερωτήματα παραμένουν αναπάντητα. Η φωτομετρία στο υπεριώδες έχει επιτρέψει να απομονώσουμε διπλά συστήματα αστερών και τα παράγωγα της εξέλιξης των διπλών συστημάτων σε γηραιούς αστρικούς πληθυσμούς, και επομένως να ελέγξουμε ευθέως τα μοντέλα εξέλιξης των διπλών συστημάτων μέσα σε πυκνά αστρικά συστήματα (Gansicke et al., 2008).

Με τη βοήθεια του μελλοντικού World Space Observatory-Ultraviolet (WSO-UV) (<http://wso.inasan.ru/>) θα μελετηθούν έντονες αστρικές εκλάμψεις, που δημιουργούνται από τις σύνθετες διαδικασίες αλληλεπίδρασης μεταξύ του δίσκου προσαύξεσης και του κεντρικού αστέρα, καθώς και άλλες ενεργητικές διαδικασίες που ακολουθούνται από ισχυρή ακτινοβολία στο υπεριώδες. Παρατηρήσεις εξωηλιακών πλανητών με το WSO-UV θα δώσουν σημαντικές πληροφορίες για τις ατμόσφαιρες των πλανητών και την αλληλεπίδρασή τους με τον κεντρικό αστέρα.

3.2. Παρατηρήσεις στις ακτίνες X

Τα διπλά συστήματα εκπομπής ακτίνων X (X-ray Binaries, XBs) παρουσιάζουν μεταβλητότητα σε διάφορες χρονικές κλίμακες και με διάφορους τρόπους: (α) Αναπάλσεις στις ακτίνες X: είναι περιοδικές με περίοδο ίση με εκείνη της περιστροφής, λόγω της προσαύξεσης ύλης στους πόλους από την παρουσία του μαγνητικού πεδίου, (β) flickering: ημπεριοδικές ταλαντώσεις που προκαλούνται από αστάθειες του δίσκου (θόρυβος), (γ) παροδικά φαινόμενα προσαύξεσης (υλικού): εναλλαγή μεταξύ φάσεων υψηλών και χαμηλών ρυθμών προσαύξεσης (υλικού) λόγω θερμικών μεταβολών στο δίσκο προσαύξεσης (ειδικά για μελανές οπές με χαμηλούς ρυθμούς προσαύξεσης και για κατακλυσμικούς αστέρες), και (δ) θερμοπυρηνικές εκρήξεις, όταν αρκετό καύσιμο H/He έχει αποκτηθεί από την προσαύξεση υλικού. Τα ενεργά διαστημικά παρατηρητήρια στις ακτίνες X είναι τα ESA XMM-Newton (0.1-15 keV), INTEGRAL (15-60 keV), και τα NASA Rossi X-ray Timing Explorer (RXTE), Swift and Chandra

3.4. Παρατηρήσεις στο Υπέρυθρο (IR)

Οι παρατηρήσεις στο υπέρυθρο παρέχουν ουσιώδεις πληροφορίες για τη θέση, τις διαστάσεις, την πυκνότητα και τη θερμοκρασία των συστατικών του αερίου και της σκόνης. Μέλη στενών διπλών συστημάτων αστερών με υψηλούς ρυθμούς απώλειας μάζας μπορούν να μεταβάλλουν το ρυθμό απώλειας μάζας, την ταχύτητα ροής ή το σχηματισμό των κόκκων της σκόνης. Αυτά τα φαινόμενα μπορούν να αλλάξουν τα χαρακτηριστικά της εκπομπής στο υπέρυθρο και η μελέτη τους επιτρέπει μια σε βάθος κατανόηση των κύριων μηχανισμών της απώλειας μάζας. Οι παρατηρήσεις στο υπέρυθρο από το διάστημα παρέχουν τα μέσα για να μελετήσουμε στο μέσο-υπέρυθρο τις ιδιότητες των συστημάτων με συμπαγή αντικείμενα. Άλλοι στόχοι είναι: η εύρεση της φασματικής κατανομής της ενέργειας στο μέσο-υπέρυθρο, η έρευνα για την ύπαρξη πιδάκων (ύλης), δίσκων ή μικρής μάζας πλα-

νητικών συνοδών, και μελέτη του τοπικού περιβάλλοντος αυτών των πηγών (Adame et al. 2011).

3.5. Παρατηρήσεις στα ραδιοκύματα

Οι παρατηρήσεις στα ραδιοκύματα με συμβολομετρικές διατάξεις παρέχουν τα βασικά εργαλεία για μια ολοκληρωμένη μελέτη και κατανόηση των διπλών συστημάτων εκπομπής ακτίνων X στο πλαίσιο των πηγών στο Σύμπαν που ενεργοποιούνται από το μηχανισμό της προσαύξησης ύλης. Μπορούμε να μάθουμε για την ανατομία των πηγών που εκπέμπουν στις ακτίνες X και γ . Οι πολύ ευαίσθητες συμβολομετρικές διατάξεις που είναι υπό κατασκευή θα μας επιτρέψουν να μελετήσουμε φαινόμενα αλληλεπίδρασης σχετικιστικών πιδάκων με το γαλαξιακό μεσοαστρικό μέσο. Επίσης, θα μπορούσαμε να μελετήσουμε τις εκτινάξεις ύλης από τα σχετικιστικά διπλά συστήματα εκπομπής ακτίνων X. Χρησιμοποιώντας τις παρατηρήσεις με τα ραδιοσυμβολόμετρα μπορούμε να αναπτύξουμε τα πρώτα ημιποσοτικά μοντέλα για να ερμηνεύσουμε πώς η δημιουργία-παραγωγή πιδάκων ή η εξασθένησή τους σχετίζεται με τις φασματικές καταστάσεις του δίσκου προσαύξησης και του στέμματος στο διπλό σύστημα (Miller-Jones, 2008).

4. Επίγειες παρατηρήσεις

Νέοι κατάλογοι διαφόρων κατηγοριών αλληλεπιδρώντων διπλών αστέρων έχουν συνταχθεί από παρατηρήσεις που έχουν γίνει από τη Γη και το Διάστημα. Ένας κατάλογος των CVs, LMXBs, and Related Objects (ROs), που περιέχει 98 LMXBs, 114 HMXBs, 880 CVs, 312 ROs (7th Edition, rev. 7.15, March 2011) δίνεται από τους Ritter & Kolb (2003), ενώ ένας κατάλογος με συμβιοτικούς αστέρες (188 επιβεβαιωμένους και 28 υποψήφιους) παρουσιάστηκε από τους Belczyński et al. (2000). Ένας ενημερωμένος κατάλογος, βασισμένος στο γενικό κατάλογο GCVS, με 6330 EBs παρουσιάστηκε από τους Malkon et al. (2006). Θα έχουμε μια τεράστια αύξηση του αριθμού αυτού στις επόμενες δύο δεκαετίες, καθόσον μικρής και μεγάλης κλίμακας παρατηρησιακά προγράμματα θα είναι σε εξέλιξη. Χιλιάδες νέα υποψήφια εκλειπτικά συστήματα (περισσότερα από 10^4 με φαινόμενο μέγεθος 13-14) έχουν ανακαλυφθεί στο πλαίσιο παρατηρησιακών προγραμμάτων που ανιχνεύουν φαινόμενα μικροεστίασης, όπως τα EROS, OGLE, MOA και MACHO, το πρόγραμμα DIRECT και άλλα που κάνουν έρευνες σε πυκνά αστρικά πεδία.

4.1. Προγράμματα Μικροεστίασης

Ο κύριο στόχος των προγραμμάτων αυτών είναι η ανίχνευση και μελέτη αστρικών σκοτεινών σωμάτων γνωστών ως «καστανών νάνων» ή MACHOs (Massive Compact Halo Objects) στο γαλαξία μας. Αυτό έγινε δυνατόν από τα φαινόμενα βαρυτικής μικροεστίασης που προκαλούν τα αντικείμενα αυτά σε αστέρες του Μικρού και Μεγάλου Νέφους του Μαγγελάνου. Τα προγράμματα αυτά είναι:

- EROS-1 (1990-1995) και EROS-2 (1996-2003). Τα προγράμματα αυτά έχουν εντοπίσει 251 εκλειπτικά διπλά συστήματα στο Μεγάλο Νέφος του Μαγγελάνου (LMC).
- MACHO (1993-2001). Το πρόγραμμα αυτό έδωσε ένα κατάλογο με ~ 4500 διπλά συστήματα στο LMC και 1500 στο Μικρό Νέφος του Μαγγελάνου (SMC). Περίπου 3000 είναι πραγματικά εκλειπτικά συστήματα.
- SuperMACHO project. Το πρόγραμμα αυτό έχει παρατηρήσει το LMC και το SMC μέχρι το μέγεθος ~23 στις φασματικές περιοχές V και R.
- OGLE (1992-). Με τις παρατηρήσεις του προγράμματος αυτού συντάχθηκαν δύο κατάλογοι, ένας με 1459 εκλειπτικά συστήματα που ανιχνεύτηκαν στο SMC και ένας με 2580 που ανακαλύφθηκαν στο LMC. Ένας κατάλογος με 10862 εκλειπτικά διπλά συστήματα, που ανακαλύφθηκαν στα αστρικά πεδία του γαλαξιακού εξογκώματος, παρουσιάστηκε στο πρόγραμμα OGLE II (Devor, 2005).
- MOA (1996-2004). Το πρόγραμμα έδωσε ένα κατάλογο με 167 εκλειπτικά συστήματα στο SMC (Bayne et al. 2002).
- Δύο άλλα προγράμματα μικροεστίασης στο γαλαξία M31 είναι: (α) το Wendelstein Calar Alto Pixellensing Project, (WeCAPP), (2000-2003) (Fliri et al. 2006), με το οποίο ανακαλύφθηκαν 31 εκλειπτικά συστήματα στον M31, και (β) το POINT-AGAPE Survey (1999-2001, INT+WFC) (An et al. 2004) το οποίο έδωσε ένα κατάλογο με ~35000 μεταβλητούς αστέρες, ανάμεσα στους οποίους υπάρχουν και εκλειπτικά συστήματα.

4.2. Άλλα μεγάλης κλίμακας προγράμματα

- The Robotic Optical Transient Search Experiment (ROTSE-I, -III)} (1998). Το πρόγραμμα αυτό σχεδιάστηκε για να ερευνηθεί για αντίστοιχα πανομοιότυπα στο οπτικό των εκρήξεων στις ακτίνες γ. Στη διάρκεια του προγράμματος ανακαλύφθηκαν πάνω από 1000 εκλειπτικά συστήματα (Gettel et al. 2006).
- ASAS (All Sky Automated Survey). Ο κατάλογος μεταβλητών αστερών του ASAS-3 περιέχει πάνω από 11099 εκλειπτικά διπλά συστήματα που βρέθηκαν ανάμεσα σε 17.000.000 αστέρες στον ουρανό νοτίως της απόκλισης +28° (Paczynski et al. 2006).
- SuperWASP photometric survey (Pollacco et al. 2006; Norton, A.J. et al. 2011): 48 εκλειπτικά συστήματα, εκ των οποίων 40 του τύπου W UMa.
- The Sloan Digital Sky Survey (SDSS). Τα αποτελέσματα έδωσαν ένα κατάλογο με περισσότερα από 1200 φασματοσκοπικά στενά διπλά συστήματα (Silvestri et al., 2007).
- The Panoramic Survey Telescope & Rapid Response System (Pan-STARRS) (2006). Ο στόχος του προγράμματος ήταν να ανακαλύψει και να χαρακτηρίσει αντικείμενα που πλησιάζουν τη Γη (αστεροειδείς, κομήτες).
- The Large Synoptic Survey Telescope (LSST) (Eyer et al. 2012).

4.3. Εξειδικευμένα προγράμματα

- The DIRECT project (1996-1999). Ο στόχος του προγράμματος (Stanek et al. 1998) ήταν να προσδιοριστούν οι αποστάσεις των κοντινών γαλαξιών M31, M33 παρατηρώντας Κηφείδες και αποχωρισμένα εκλειπτικά συστήματα σε αυτούς. Ανακαλύφθηκαν 89 εκλειπτικά συστήματα σε 6 πεδία στον M31, 237 εκλειπτικά συστήματα στον M33 και 437 στον M31 χρησιμοποιώντας το τηλεσκόπιο INT 2.5 m (Vilardell et al. 2006).
- The W UMa project (2004-σήμερα). Ο σκοπός του προγράμματος είναι ο προσδιορισμός με μεγάλη ακρίβεια των φυσικών παραμέτρων των αστέρων στα σε επαφή διπλά εκλειπτικά συστήματα του τύπου W UMa. Απαιτούνται υψηλής ποιότητας φωτομετρικές και φασματοσκοπικές παρατηρήσεις που γίνονται από διάφορα αστεροσκοπεία στη Γη. Τα συστήματα που θα παρατηρηθούν και θα μελετηθούν είναι > 150 (Kreiner et al. 2006).

5. Παρατηρήσεις από το Διάστημα

5.1. Προηγούμενες αποστολές

The Hipparcos mission (1989-1993, ESA). Στον κατάλογο της αποστολής αυτής, που δόθηκε τον Ιούνιο 1997, υπάρχουν 120.000 αστέρες με αστρομετρικές θέσεις προσδιορισμένες με ακρίβεια 1 milliarcsec. Από αυτούς 1034 είναι εκλειπτικά διπλά συστήματα με 117 περιπτώσεις αμφίβολες. Περίπου το 35% αυτών των εκλειπτικών συστημάτων ανακαλύφθηκαν για πρώτη φορά.

5.2. Διαστημικές αποστολές σε λειτουργία

- Η αποστολή COROT (CNES, ESA, Brazil) (launched 27/12/2006). Οι στόχοι της αποστολής είναι (α) έρευνα για την ύπαρξη μεγάλων γήινων εξωηλιακών πλανητών, και (β) αστεροσεισμολογία σε ηλιακού τύπου αστέρες. Επιλεγμένα διπλά συστήματα αστέρων θα παρατηρηθούν στο πλαίσιο του Additional Program ως στόχοι μακρών και συνεχών παρατηρήσεων συγκεκριμένων στόχων.
- Η αποστολή Kepler (launched in March 2009). Ο σκοπός της αποστολής είναι η ανακάλυψη εξωηλιακών πλανητών με ακτίνα ίση περίπου με μια γήινη ακτίνα στην κατοικήσιμη ζώνη ηλιακού-τύπου αστέρων. Η διάρκεια της αποστολής θα είναι τουλάχιστον 4 έτη.
- Η αποστολή MOST (Microvariability and Oscillations of STars telescope). Είναι μια αποστολή της Καναδικής Υπηρεσίας Διαστήματος που λειτουργεί από το 2003. Μέχρι τώρα έχουν ανακαλυφθεί 16 νέα εκλειπτικά συστήματα (Pribulla et al. 2010).
- Η αποστολή STEREO (Solar TERrestrial RELations Observatory) (2006-). Αν και η αποστολή αυτή έχει ως σκοπό να μελετήσει τα ηλιο-γήινα φαινόμενα, μέχρι τώρα έχουν ανακαλυφθεί 122 (!) νέα εκλειπτικά συστήματα και έχουν επί

πλέον παρατηρηθεί εκατοντάδες μεταβλητοί αστέρες με ένα νέο τρόπο (NASA, Press Release: 19 April, 2011).

5.3. Μελλοντικές διαστημικές αποστολές

Από τις πλέον σημαντικές είναι η αστρομετρική αποστολή Gaia. Η εκτόξευση σχεδιάζεται για το 2013. Ο κύριος στόχος της αποστολής είναι να κατασκευαστεί ένας κατάλογος από $\sim 10^9$ αστέρες με ακριβείς θέσεις, παραλλάξεις, ίδιες κινήσεις, (φωτομετρικά) μεγέθη και ακτινικές ταχύτητες. Ο κατάλογος θα περιέχει αστέρες μέχρι και $20^{\text{ου}}$ μεγέθους, χωρίς προεπιλεγμένους στόχους. Η μεγάλη σημασία της αποστολής αυτής για τα εκλειπτικά διπλά συστήματα έγκειται στους αριθμούς. Η αποστολή Gaia αναμένεται να παρατηρήσει $\sim 4 \times 10^5$ εκλειπτικά συστήματα λαμπρότερα του $15^{\text{ου}}$ μεγέθους (στο V) και $\sim 10^5$ από αυτά θα είναι φασματοσκοπικά διπλά συστήματα. Για μεγέθη $V \leq 13$ ο αριθμός των φασματοσκοπικά διπλών εκλειπτικών συστημάτων θα είναι περίπου 16.000, για τα οποία θα μπορούν να υπολογιστούν με ακρίβεια $\sim 2\%$ οι φυσικές παράμετροι των αστέρων-μελών των συστημάτων αυτών (Niarchos et al. 2006). Ο αριθμός αυτός είναι φανταστικός, αν συγκριθεί με τα λιγότερα από 100 συστήματα (με παρόμοια ακρίβεια στις φυσικές τους παραμέτρους τους) που έχουν παρατηρηθεί από τη Γη (Andersen 1991).

6. Περίληψη – Συμπεράσματα

Υπάρχουν πολλά θέματα, θεωρητικά και παρατηρησιακά, στην περιοχή των Διπλών Αστέρων που ουσιαστικά παραμένουν ανεξερεύνητα, αλλά εξακολουθούν να είναι πολύ ενδιαφέροντα και σημαντικά. Μεγάλες πρόοδοι στον παρατηρησιακό τομέα αναμένεται να γίνουν με τα μεγάλης κλίμακας προγράμματα φωτομετρικών και φασματοσκοπικών παρατηρήσεων (από τη Γη και το Διάστημα), καθώς και με μεγάλα συμβολόμετρα στο οπτικό και με ραδιοσυμβολόμετρα. Οι νέες προχωρημένες τεχνικές παρατήρησης θα επιτρέψουν να παρατηρηθούν «ρηχές» και οριακές αστρικές εκλείψεις που θα επιτρέψουν τη μελέτη σύνθετων φυσικών διεργασιών και φαινομένων στα συστήματα αυτά. Διπλά συστήματα αστέρων όλων των τύπων μπορούν πλέον να παρατηρηθούν σε όλα τα μήκη του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Νέες τεχνολογίες και όργανα στα μεγάλα παρατηρησιακά προγράμματα θα οδηγήσουν σε μια νέα εποχή στη μελέτη των διπλών αστέρων.

Βιβλιογραφία

- Adame, L. et al., 2011, ApJ, 726, L3.
Andersen, J., 1991, A&AR, vol. 3, No 2, 91.
An, J. H. et al., 2004, MNRAS, 351, 1071.
Bayne, G. et al., 2002, MNRAS, 331, 609.
Belczyński, K. et al., 2000, A&AS, 146, 407.

- Coughlin, J. L., Harrison, T. E., Gelino, D. M. 2010, ApJ, 723, 1351.
- Devor, J., 2005, ApJ, 628, 411.
- Eyer, L. et al., 2012, in: Richards, M.T. and Hubeny, I. (eds.), *From Interacting Binaries to exoplanets: Essential Modeling Tools*, (Proceedings of IAU Symposium 288, 18-22 July, 2011, Tatranska Lomnica, Slovakia, p. 33.
- Fliri, J. et al., 2006, MmSAI, 77, 332.
- Gansicke, B. T. et al., 2006, Ap&SS, 306, 177.
- Gettel, S. J., Geske, M. T., McKay, T. A., 2006, AJ, 131, 621.
- Hadrava, P., 2006, Ap&SS, 304, 337.
- Hilditch, R.W., 2001. *An Introduction to Close Binary Stars*. Cambridge University Press, 381 pp.
- Kreiner, J. M. et al., 2006, Ap&SS, 304, 71.
- Malkov, O., Yu. et al., 2006, A&A 446, 785.
- Mazeh, T., Zucker, S., 1994, Ap&SS, 212, 349.
- Miller-Jones, J. C. A., 2008, JPhCS, vol. 131, pp. 012057.
- Niarchos, P., Munari, U., Zwitter, T., 2007, in: Hartkopf, W.I., Guinan, E.F., and Harmanec, P. (eds.), *Binary Stars as Critical Tools & Tests in Contemporary Astrophysics*, (Proceedings of IAU Symposium 240, 22-25 August 2006, Prague), p. 244.
- Norton, A.J. et al., 2011, A&A, 528, 90.
- Paczynski, B. et al., 2006, MNRAS, 368, 1311.
- Pollacco, D. L. et al., 2006, PASP, 118, 1407.
- Pribulla, T. et al., 2010, AN, 331, 397.
- Prsa, A. and Zwitter, T., 2005, ApJ, 628, 426.
- Ritter, H., Kolb, U., 2003, A&A, 404, 301.
- Rucinski, S., 2002, AJ, 124, 1746.
- Silvestri, N. M. et al., 2007, AJ, 134, 741.
- Stanek, K. et al. 1998, AJ, 115, 1894.
- Terrell, D. and Wilson, R.E., 2005, Ap&SS, 296, 221.
- Vilardel, F., Ribas, I., Jordi, C., 2006, A&A 459, 321.
- Zavala, R. T. et al. 2010, ApJ 715, L44.