

Καμπύλη φωτός του ΕΕ Κηφέα από την έκλειψη του 2014

Γρηγόρης Μαραβέλιας^{1,2}, Εμμανουήλ Βουρλιώτης¹, Κρινιώ Μαρούδα¹,
Εμμανουήλ (Μάνος) Καρδάσης¹, Ιάκωβος-Μάριος Στρίκης¹

¹ Σύλλογος Ερασιτεχνικής Αστρονομίας, Σολομωνίδου 1, Καισαριανή, 16121, Αθήνα

² Astronomical Institute, Czech Academy of Sciences, Frícova 298, 251 65, Ondřejov, Τσεχία

Περίληψη

Το ΕΕ Κηφέα αποτελεί ένα εκλειπτικό σύστημα με περίοδο περίπου 5.5 ετών, με την έκλειψη να προκαλείται από ένα αινιγματικό αντικείμενο με τη μορφή δίσκου. Η τελευταία του έκλειψη τον Αύγουστο του 2014 αποτέλεσε μια ακόμη ευκαιρία για διερεύνηση των ιδιοτήτων του. Παρουσιάζουμε τις ψηφιακές (CCD) φωτομετρικές παρατηρήσεις στο φωτομετρικό φίλτρο (V), που μας επιτρέπουν να παράγουμε την καμπύλη φωτός κατά την διάρκεια της έκλειψης του 2014. Από την ανάλυσή μας προκύπτει ότι η έκλειψη κράτησε συνολικά 40 ± 3 μέρες ξεκινώντας στις 30 Ιουλίου 2014. Το σύστημα παρουσιάζει μια συνολική απώλεια 0.655 ± 0.025 mag από την μέση τιμή 10.826 mag που βρίσκουμε εκτός έκλειψης. Παρατηρούμε επίσης το σχηματισμό ενός πλατό στο ελάχιστο της έκλειψης (11.481 mag) της τάξης των 5 ημερών, με κέντρο τις 23 Αυγούστου 2014. Συζητάμε περαιτέρω τα αποτελέσματά μας καθώς και την μορφή της ασύμμετρης καμπύλης φωτός σε σχέση με τις προηγούμενες εκλείψεις.

Εισαγωγή

Το ΕΕ Κηφέα (ΕΕ Cep, R.A.: 22 09 22.757, Dec.: +55 45 24.184, J2000.0) είναι ένα μεταβλητό άστρο με περίοδο 2050 ημερών (περίπου 5.6 χρόνια, Meinunger 1976), και διάρκεια έκλειψης περίπου 40 μέρες. Η ανακάλυψη της μεταβλητότητάς του έγινε το 1952 από τον Romano (1956) και τα επόμενα χρόνια πραγματοποιήθηκαν παρατηρήσεις για τον προσδιορισμό του φασματικού τύπου (Meinunger 1976, Barbier et al. 1973), ο οποίος σήμερα θεωρείται ότι είναι Be5 III (Mikolajewski & Graczyk 1999, Mikolajewski et al. 2005).

Από τις πρώτες κιάλας εκλείψεις, οι φωτομετρικές παρατηρήσεις στο ορατό για το άστρο αποκάλυψαν μια περίπλοκη δομή του συστήματος, η οποία έχρηζε ιδιαίτερης ανάλυσης. Το 1958, οι Romano & Perissinotto (1966), παρόλο που δεν κατάφεραν να πάρουν πολλές και πολύ ακριβείς μετρήσεις, εντόπισαν μεταβολή στο ελάχιστο μεγαλύτερη από 1.5 mag (μέγιστο κοντά στο 11.1 mag και ελάχιστο αμυδρότερο από 13.0 mag). Η επόμενη έκλειψη έγινε το 1963 και έμοιαζε μορφολογικά με αυτή του 1958 με μικρότερη όμως διάρκεια έκλειψης, περίπου 30 μέρες (Graczyk et al. 2003). Στις επόμενες εκλείψεις, παρατηρήθηκαν αυξομειώσεις στη διάρκεια της περιόδου με ελάχιστη διάρκεια έως και 22 μέρες το 1992 και μέγιστη διάρκεια έως και 90 μέρες το 2003 και 2008/2009 (Galan et al. 2012), ενώ υπήρξαν και αυξομειώσεις στο βάθος του ελαχίστου με μέγιστο βάθος 1.61 mag το 1997 και ελάχιστο βάθος 0.65 mag το 1969 (Graczyk et al. 2003).

Η συστηματική παρατήρηση του ΕΕ Κηφέα ξεκίνησε από την έκλειψη του 2003 και μετά με την οργάνωση Διεθνών Εκστρατειών Παρατήρησης το 2003, 2009, και 2014 (Galan et al. 2012, 2014). Οι

υψηλής ανάλυσης παρατηρήσεις αυτών των εκλείψεων, οι οποίες είχαν πολύ ρηχά ελάχιστα σε σχέση με τις προηγούμενες, έδωσαν τη δυνατότητα για πιο λεπτομερή μελέτη του προφίλ των εκλείψεων του ΕΕ Κηφέα. Χαρακτηριστικά της καμπύλης φωτός του συστήματος είναι (Romano & Perissinotto 1966, Galan et al. 2012):

- Τα πιο βαθιά ελάχιστα είναι και πιο στενά (μικρής διάρκειας ελάχιστο) ενώ τα πιο ρηχά ελάχιστα είναι και πιο φαρδιά (μεγάλης διάρκειας ελάχιστο).
- Υπάρχει ασυμμετρία εκατέρωθεν του ελαχίστου. Η μείωση της έντασης του φωτός προς το ελάχιστο είναι πιο αργή σε σχέση με την αύξηση της έντασης του φωτός προς το μέγιστο (εκτός έκλειψης δηλαδή), όπου η κλίση της καμπύλης είναι μεγαλύτερη.
- Μερικές μέρες πριν το ελάχιστο παρουσιάζεται μια μικρή μείωση στο V μέγεθος (περίπου 30 μέρες πριν το ελάχιστο) και μια μικρή αύξηση στο $V-Ic$ χρώμα (περίπου 10 μέρες πριν το ελάχιστο).

Ήδη από το 1999, οι ασυμμετρίες και οι διαφοροποιήσεις της διάρκειας των εκλείψεων που παρουσίαζε το ΕΕ Κηφέα έδωσαν τη δυνατότητα να αποκληθούν συμβατικά ουράνια σώματα ως το δεύτερος μέλος του συστήματος και να έρθουν στο προσκήνιο υποθέσεις για την ύπαρξη ενός δίσκου γύρω από το πρωτεύον αστέρι, το οποίο θεωρείται πως είναι ένα $B5III\pm II$ αστέρι με απόλυτη λαμπρότητα $M_v = -3.1$, θερμοκρασία $T_{eff} = 14300$ K, ακτίνα $10 R_{\odot}$ και μάζα που κυμαίνεται μεταξύ $4.5 < M < 14 M_{\odot}$ (Mikolajewski & Graczyk 1999). Η επικρατέστερη θεωρία, η οποία διατυπώθηκε αρχικά με βάση το μοντέλο του ϵ Ηνίοχου (epsilon Aurigae), υποθέτει την ύπαρξη ενός αδιαφανούς και παχύ δίσκου που βρίσκεται γύρω από το δευτερεύον, το οποίο, σε αυτό το πλαίσιο, θεωρείται ένα άστρο μικρής μάζας ή ένα πολύ κοντινό διπλό σύστημα (Mikolajewski & Graczyk 1999). Η υπόθεση αυτή εξηγεί ως ένα βαθμό την ασυμμετρία της καμπύλης φωτός, την εξάρτηση της διάχυσης του φωτός από το μήκος κύματος, και το φαινόμενο σκοτεινού χείλους (limb darkening) του πρωτεύοντος. Μια μικρή κλίση στο δίσκο μπορεί να δικαιολογήσει και το διαφορετικό βάθος και τη διαφορετική διάρκεια των εκλείψεων.

Επόμενες εργασίες πάνω στο ίδιο θέμα προώθησαν την ιδέα για ένα δακτύλιο, αντί για δίσκο, προκειμένου να εξηγήσουν: (α) τα διαφορετικά ελάχιστα στα διαφορετικά χρώματα που εμφανίζονται, (β) το σημείο απότομης αλλαγής κλίσης που συμβαίνει μερικές μέρες πριν το κύριο μέγιστο, (γ) και να ελέγξουν με αριθμητικά μοντέλα προβλέψεις του μοντέλου (Galan et al. 2012). Πλέον, το μοντέλο του δακτυλίου έχει επικρατήσει και η θεωρία πολλαπλών δακτυλίων στους οποίους δημιουργούνται πλανήτες αποτελεί την καλύτερη εξήγηση για μια τέτοια δομή (Galan et al. 2010, Mamajek et al. 2012).

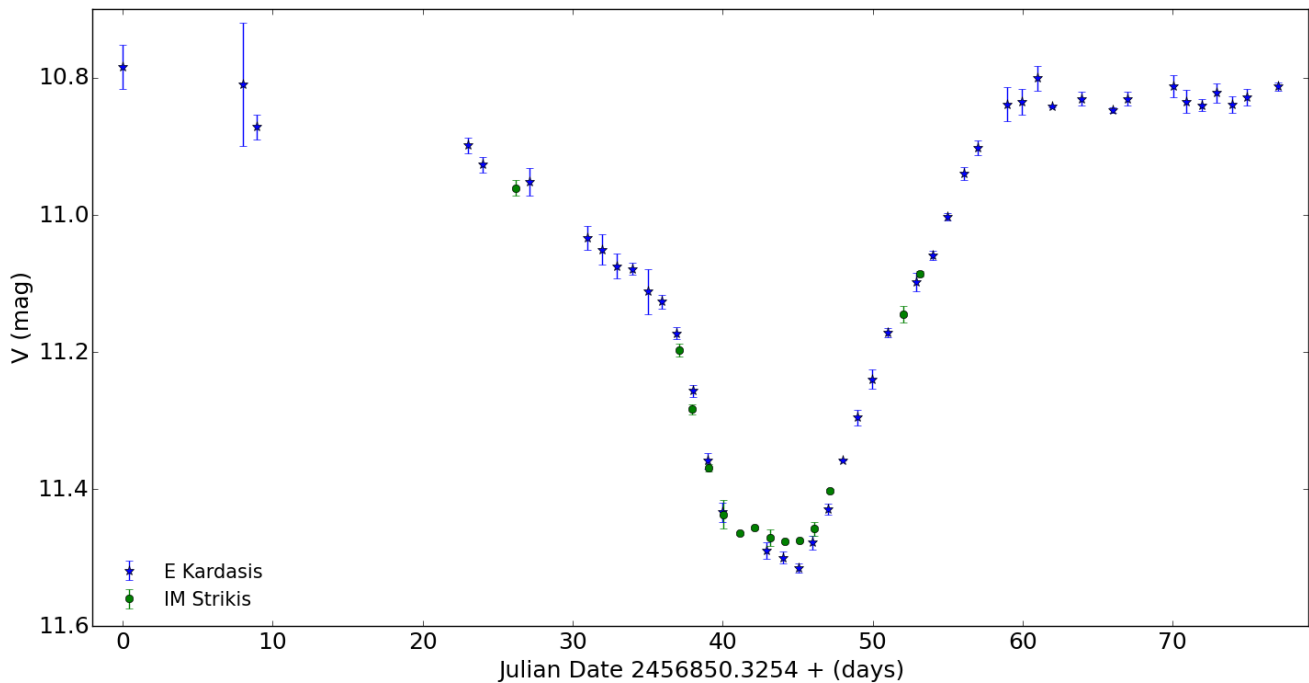
Παρατηρήσεις και Επεξεργασία

Η έκλειψη του ΕΕ Κηφέα καλύφθηκε από 58 ψηφιακές παρατηρήσεις συνολικά από τις 11 Ιουλίου μέχρι και τις 26 Σεπτεμβρίου, 2014. Ο ΕΚ πραγματοποίησε 44 παρατηρήσεις χρησιμοποιώντας δύο συστήματα: (α) Celestron 11” (διαμέτρου ~ 28 cm) εξοπλισμένο με την κάμερα QHY9, από την Γλυφάδα, Αττικής (34 νύχτες), (β) iTelescope 7 (διαμέτρου 43 cm) εξοπλισμένο με την κάμερα SBIG STL-11000M, από την περιοχή Nerpio, Ισπανίας¹ (10 νύχτες). Ο ΙΜΣ πραγματοποίησε 14 παρατηρήσεις χρησιμοποιώντας ένα ED80 (διαμέτρου 8 cm) εξοπλισμένο με την κάμερα Atik 16 HR, από τον Κορυδαλλό, Αττικής. Όλες οι παρατηρήσεις έγιναν μέσω φωτομετρικού φίλτρου V Johnson.

Η επεξεργασία των λήψεων περιλαμβάνει τα συνήθη βήματα για ψηφιακές παρατηρήσεις: (α) την αφαίρεση του ηλεκτρονικού (bias) και θερμικού θορύβου (dark), (β) την ομογενοποίηση των εικόνων

1 Απομακρυσμένη πρόσβαση μέσω της πλατφόρμας <http://www.itelescope.net>.

για διαφορές μεταξύ των εικονοστοιχείων (flat-fielding), (γ) την πρόσθεση μεμονωμένων λήψεων (15 – 30 εικόνες ανά νύχτα) σε μία τελική εικόνα για την βελτίωση του λόγου σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio), ώστε να προκύπτει ένα σημείο ανά νύχτα παρατήρησης. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε φωτομετρία διαφράγματος (aperture photometry, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα MaxImDL²) του στόχου ΕΕ Κηφέα καθώς και γνωστών άστρων σύγκρισης προτεινόμενα από την Διεθνή Καμπάνια Παρατήρησης του ΕΕ Κηφέα³. Σημειώνουμε ότι στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε διόρθωση ως προς την ατμοσφαιρική απορρόφηση μόνο στις παρατηρήσεις του ΙΜΣ (οι παρατηρήσεις του ΕΚ θα διορθωθούν περαιτέρω σε μελλοντική δουλειά). Στο Σχήμα 1 παρουσιάζουμε τις μετρήσεις λαμπρότητας τους συστήματος (με μπλε “αστεράκια” παρατηρήσεις του ΕΚ και με πράσινες “κουκκίδες” παρατηρήσεις του ΙΜΣ) συναρτήσει του αριθμού ημερών μετά την πρώτη παρατήρηση, η οποία πραγματοποιήθηκε στις 11 Ιουλίου 2014 (19:48 UT, JD⁴ 2456850.3254). Η σύμβαση αυτής μας επιτρέπει να προσδιορίσουμε πιο εύκολα χρονικές στιγμές, ενώ ταυτόχρονα, μας δίνει γρήγορα μια αίσθηση της διάρκειας του κάθε τμήματος.



Σχήμα 1: Η καμπύλη φωτός της έκλειψης του 2014 για το ΕΕ Κηφέα, όπως διαμορφώνεται από τις παρατηρήσεις μας στο V (Johnson) φωτομετρικό φίλτρο. Ο άξονας των ημερομηνιών είναι σε μέρες από την πρώτη παρατήρηση που πραγματοποιήθηκε στις 11 Ιουλίου 2014 (19:48 UT, JD 2456850.3254). Με μπλε “αστεράκια” και πράσινες “κουκκίδες” τα δεδομένα από τον Ε. Καρδάση και τον Ι.Μ. Στρίκη, αντίστοιχα.

2 http://www.cyanogen.com/maxim_main.php

3 <https://sites.google.com/site/eecep2014campaign/>

και σε συνεργασία με την American Association of Variable Star Observers και τα ενημερωτικά δελτία:

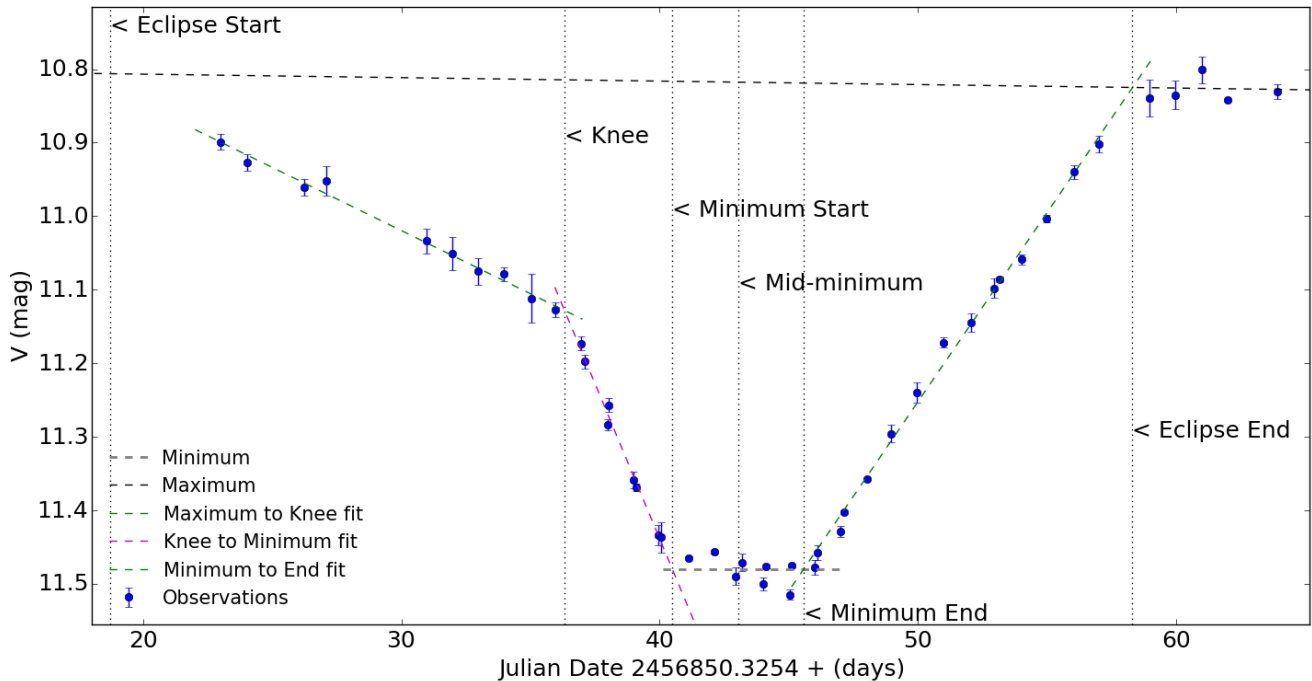
Alert Notice #502: <https://www.aavso.org/aavso-alert-notice-502> και

Special Notice #387: <https://www.aavso.org/aavso-special-notice-387>

4 Η συντόμηση JD αναφέρεται στο Julian Date (Ιουλιανή Ημερομηνία) που είναι απλά μια συνεχόμενη αρίθμηση ημερών και κλασμάτων (της ημέρας) με αρχική ημερομηνία την 1η Ιανουαρίου 4713 π.Χ., και επιτρέπει την άμεση σύγκριση παρατηρήσεων από διαφορετικά μέρη και σε διαφορετικούς χρόνους.

Αποτελέσματα

Σε αυτή την εργασία παρουσιάζουμε μια προκαταρκτική ανάλυση της καμπύλης φωτός, για τον προσδιορισμό κάποιων χαρακτηριστικών της. Χρησιμοποιήσαμε μια απλή γραμμική προσαρμογή τμημάτων της καμπύλης για να προσδιορίσουμε χρόνους, μεγέθη, και ρυθμούς αλλαγής μεγέθους. Η γραμμική αυτή προσέγγιση αποτελεί μια πρώτης τάξης ανάλυση, καθώς δεν αποτελεί - ταυτόχρονα με την χρήση μεγεθών - την ιδανική μέθοδο μελέτης του φυσικού φαινομένου που δημιουργεί την έκλειψη (κάτι που δεν αποτελεί και σκοπό αυτής της εργασίας). Στο Σχήμα 2 παρουσιάζουμε το κεντρικό κομμάτι της έκλειψης μαζί με τις γραμμικές προσεγγίσεις και τις χαρακτηριστικές ημερομηνίες συνολικά που προκύπτουν από την ανάλυσή μας.



Σχήμα 2: Το κεντρικό κομμάτι της έκλειψης (βλ. και Σχήμα 1), όπου παρουσιάζουμε: (α) τις παρατηρήσεις σαν μπλε “κουκκίδες”, (β) με μαύρη διακεκομμένη γραμμή το μέγιστο (λαμπρότερο) μέγεθος εκτός έκλειψης (Maximum), (γ) με γκρι διακεκομμένη γραμμή το ελάχιστο (αμυδρότερο) μέγεθος (Minimum), (δ) με σκούρα πράσινη διακεκομμένη γραμμή την γραμμική προσέγγιση από το μέγιστο μέγεθος στο σημείο “γόνατο” (Maximum to Knee fit), (ε) με ματζέντα διακεκομμένη γραμμή την γραμμική προσέγγιση από το σημείο “γόνατο” στο ελάχιστο (Knee to Minimum fit), (στ) με ανοιχτή πράσινη γραμμή την γραμμική προσέγγιση από το ελάχιστο στην έξοδο από την έκλειψη (Minimum to End fit). Ταυτόχρονα, παρουσιάζουμε σημαντικές χρονικές στιγμές σαν κάθετες διακεκομμένες γραμμές όπως προκύπτουν από την ανάλυση (βλ. κείμενο για περισσότερα): (α) η είσοδος στην έκλειψη (Eclipse Start), (β) το σημείο “γόνατο” (Knee), (γ) η είσοδος στο ελάχιστο (Minimum Start), (δ) το μέσο του ελάχιστου (Mid-minimum), (ε) η έξοδος από το ελάχιστο (Minimum End), (στ) η έξοδος από την έκλειψη (Eclipse End).

Η οπτική επισκόπηση της καμπύλης μας δείχνει κατευθείαν μια ασυμμετρία μεταξύ της εισόδου (ingress) και εξόδου (egress) της έκλειψης. Η είσοδος εμφανίζει μια διαφοροποίηση, ένα σημείο “γόνατο”, στο οποίο αλλάζει απότομα ο ρυθμός με τον οποίο μειώνεται η λαμπρότητα του συστήματος. Επίσης, εμφανίζεται ένα πλατό ελάχιστης λαμπρότητας. Δυστυχώς, και ενώ οι

παρατηρήσεις του συστήματος ξεκίνησαν πριν εισέλθει σε έκλειψη, η πυκνότητά τους δεν καλύπτει επαρκώς την ημερομηνία εισόδου, σε αντίθεση με την έξοδο, όπου περισσότερες παρατηρήσεις μας επιτρέπουν καλύτερο προσδιορισμό της αντίστοιχης ημερομηνίας.

Ξεκινάμε την ανάλυσή μας προσδιορίζοντας το λαμπρότερο (εκτός έκλειψης) και το αμυδρότερο (κατά το ελάχιστο) μέγεθος. Για το πρώτο χρησιμοποιούμε τις παρατηρήσεις εκτός έκλειψης, δηλαδή τις 3 πρώτες (μέχρι και τις 20 Ιουλίου, JD 2456859) και τις 14 τελευταίες μετρήσεις (από τις 8 Σεπτεμβρίου, JD 2456859, και μετά). Παίρνοντας τον μέσο όρο και την τυπική απόκλιση του δείγματος⁵ βρίσκουμε ότι η μέγιστη λαμπρότητα είναι: $10.826 \pm 0.017 \text{ mag}$.

Για τον προσδιορισμό του ελάχιστου θα πρέπει να είμαστε πιο προσεχτικοί για να συμπεριλάβουμε τα σωστά σημεία. Παρατηρούμε ότι το ελάχιστο του συστήματος εμφανίζει ένα πλατό, δηλαδή το μέγεθος του παραμένει σχεδόν σταθερό για μερικές μέρες, μεταξύ της 41ης και 45ης μέρας μετά την αρχική (21 – 26 Αυγούστου, JD 2456891 – 2456896). Υπάρχει μια διαφοροποίηση μεταξύ των παρατηρήσεων του ΕΚ και του ΙΣΜ, με τον πρώτο να εμφανίζει συστηματικά πιο αμυδρό το σύστημα, κάτι που ενδεχόμενα να οφείλεται στο γεγονός ότι οι συγκεκριμένες παρατηρήσεις δεν έχουν διορθωθεί ως προς την ατμοσφαιρική απορρόφηση. Παρόλο αυτό, οι παρατηρήσεις του καθένα ξεχωριστά, μέσα στα αντίστοιχα σφάλματα των μετρήσεών τους, δείχνουν ότι πράγματι το σύστημα σταθεροποιείται κατά την διάρκεια αυτής της περιόδου. Οπότε οποιαδήποτε επίδραση της ατμοσφαιρικής διόρθωσης, πέρα των ίδιων των αριθμών, δεν θα οδηγήσει σε ουσιαστική αμφισβήτηση ότι όντως υπάρχει πλατό κατά το ελάχιστο. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω σημεία υπολογίσουμε το ελάχιστο μέγεθος: $11.481 \pm 0.018 \text{ mag}$. Ξέροντας τις δύο τιμές (εκτός έκλειψης και ελάχιστο) μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε το βάθος της έκλειψης σε $0.655 \pm 0.025 \text{ mag}$.

Στη συνέχεια εξετάζουμε τους ρυθμούς αλλαγής λαμπρότητας κατά την είσοδο της έκλειψης, χρησιμοποιώντας την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων για τον προσδιορισμό ευθείας της μορφής $MAG = \alpha \times DATE + \beta$. Αρχικά προσδιορίζουμε το κομμάτι από την αρχή της έκλειψης μέχρι και το σημείο “γόνατο” (μεταξύ 23ης και 36ης ημέρας, δηλαδή μεταξύ 3 και 16 Αυγούστου, JD 2456873 - 2456886), στο οποίο παρατηρείται αλλαγή της κλίσης. Σε αυτό το κομμάτι υπολογίζουμε την κλίση: $0.0172 \pm 0.0007 \text{ mag/ημέρα}$ (αναλυτικότερα η σχέση παρουσιάζεται στον Πίνακα 1). Στη συνέχεια προσδιορίζουμε την γραμμική σχέση στο κομμάτι από το “γόνατο” μέχρι το ελάχιστο (μεταξύ 36ης και 40ης ημέρας, δηλαδή μεταξύ 17 και 20 Αυγούστου, JD 2456887 - 2456890), όπου η κλίση αλλάζει σημαντικά σε $0.0843 \pm 0.0041 \text{ mag/ημέρα}$. Έχοντας γνωστές τις δύο αυτές ευθείες μπορούμε να υπολογίσουμε⁶ τα χαρακτηριστικά του σημείου “γόνατο”. Η αλλαγή της κλίσης εμφανίζεται 36 ± 3 ημέρες μετά την πρώτη παρατήρηση, δηλαδή στις 17 Αυγούστου (JD 2456887), με μέγεθος $11.13 \pm 0.35 \text{ mag}$. Φυσικά, αυτό δεν σημαίνει ότι έχουμε μια απόλυτη αλλαγή κλίσης αλλά η περίοδος στην οποία συμβαίνει αυτή η μετάβαση έχει σαν κέντρο τη συγκεκριμένη ημερομηνία. Επιπλέον, γνωρίζοντας τη γραμμική σχέση που συνδέει τις ημερομηνίες και τα μεγέθη μπορούμε να υπολογίσουμε ημερομηνίες συγκεκριμένων μεγεθών. Έτσι, υπολογίζουμε την ημερομηνία εισόδου της έκλειψης 19 ± 2 ημέρες μετά την πρώτη παρατήρηση, που αντιστοιχεί στις 30 Ιουλίου (JD 2456869), και την ημερομηνία εισόδου στο ελάχιστο στις 41 ± 3 ημέρες, δηλαδή στις 21 Αυγούστου (JD 2456891)⁷.

Ο ρυθμός εξόδου από την έκλειψη δεν δείχνει σημαντική αλλαγή όπως αυτός της εισόδου. Έτσι, χρησιμοποιώντας τις παρατηρήσεις μεταξύ 46ης και 57ης ημέρας (μεταξύ 26 Αυγούστου και 6 Σεπτεμβρίου 2014, JD 2456896 - 2456907) προσδιορίζουμε την κλίση $-0.0504 \pm 0.0012 \text{ mag/ημέρα}$.

5 Δηλαδή: $\sigma = \sqrt{[\sum_i (\text{mag}_i - \text{mag_mean})^2 / (N-1)]}$, όπου N ο συνολικός αριθμός μετρήσεων, mag_i η κάθε μέτρηση, mag_mean ο μέσος όρος όλων των μετρήσεων.

6 Στο σημείο δηλαδή που τέμνονται αυτές οι ευθείες.

7 Που βρίσκονται αν βάλουμε τις τιμές του μέγιστου (10.826 mag) και ελάχιστου (11.481 mag) μεγέθους, αντίστοιχα, στη γραμμική σχέση που ορίζεται για αυτό το κομμάτι.

Αντίστοιχα, υπολογίζουμε τις ημερομηνίες εξόδου από το ελάχιστο στις 46 ± 2 ημέρες, δηλαδή στις 26 Αυγούστου (JD 2456896), και από την ίδια την έκλειψη στις 59 ± 2 ημέρες, δηλαδή στις 8 Σεπτεμβρίου (JD 2456909).

Έχοντας υπολογίσει ημερομηνίες εισόδου και εξόδου, μπορούμε εύκολα να προσδιορίσουμε την διάρκεια του ελάχιστου σε 5 ± 3 ημέρες με κεντρική ημερομηνία την 46η ημέρα, δηλαδή στις 23 Αυγούστου (JD 2456893). Αντίστοιχα, υπολογίζουμε ότι η συνολική διάρκεια της έκλειψης είναι 40 ± 3 ημέρες.

Πίνακας 1: Βασικά αποτελέσματα από την ανάλυση των παρατηρήσεων της έκλειψης του ΕΕ Κηφέα για το 2014.

Λαμπρότητα εκτός έκλειψης	10.826 ± 0.017 mag
Ελάχιστο έκλειψης	11.481 ± 0.018 mag
Βάθος έκλειψης	0.655 ± 0.025 mag
Μέγεθος στο σημείο “γόνατο”	11.13 ± 0.35 mag
Προσέγγιση είσοδος -- σημείο “γόνατο”	Κλίση α : 0.0172 ± 0.0007 mag/ημέρα Σταθερά β : 10.504 ± 0.022 mag
Προσέγγιση σημείο “γόνατο” -- ελάχιστο	Κλίση α : 0.0843 ± 0.0041 mag/ημέρα Σταθερά β : 8.07 ± 0.16 mag
Προσέγγιση ελάχιστο -- έξοδος	Κλίση α : -0.0504 ± 0.0012 mag/ημέρα Σταθερά β : 13.826 ± 0.058 mag
Ημερομηνία εισόδου στην έκλειψη	30 Ιουλίου / JD 2456869
Ημερομηνία σημείου “γόνατο”	17 Αυγούστου / JD 2456887
Ημερομηνία εισόδου στο ελάχιστο	21 Αυγούστου / JD 2456891
Κεντρική ημερομηνία στο ελάχιστο	23 Αυγούστου / JD 2456893
Ημερομηνία εξόδου από το ελάχιστο	26 Αυγούστου / JD 2456896
Ημερομηνία εξόδου από την έκλειψη	8 Σεπτεμβρίου / JD 2456909
Διάρκεια έκλειψης	40 ± 3 ημέρες
Διάρκεια ελαχίστου	5 ± 3 ημέρες

Συζήτηση

Από την ανακάλυψή του μέχρι σήμερα έχουν παρατηρηθεί 10 εκλείψεις (συν μία το 1947 για την οποία όμως υπάρχουν μόνο πληροφορίες για το ελάχιστο και όχι για τη μορφή και τη διάρκεια της έκλειψης, Graczyk et al. 2003; Galan et al. 2012, 2014), και η πιο πρόσφατη του 2014 αποτελεί μόλις την 11η σε αυτό το σπάνιο σύστημα. Τυπικά χαρακτηριστικά της έκλειψης είναι χρονική διάρκεια περίπου 40 ημερών και βάθος έκλειψης περίπου 1.5 mag, όπως αυτές των 1975, 1980, και 1997 (Graczyk et al. 2003). Κάποιες από αυτές όμως αποκλίνουν από αυτό το μοτίβο, παρουσιάζοντας είτε διαφορετική διάρκεια είτε διαφορετικό βάθος. Η διάρκεια της έκλειψης αλλάζει από το ελάχιστο των 22 και 30 ημερών το 1992 και το 1964, αντίστοιχα, ως και τις ~90 ημέρες το 2003 και 2008/2009, ενώ ένα βάθος 0.6 mag έχει παρατηρηθεί στις εκλείψεις του 1969, 2003 και 2008/2009 (Graczyk et al. 2003; Galan et al. 2012).

Το βάθος της έκλειψης που υπολογίζουμε από τις παρατηρήσεις μας κατά την τελευταία έκλειψη του συστήματος το 2014 είναι 0.655 mag που δεν αποτελεί την “τυπική” τιμή. Ωστόσο, αυτό είναι ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον αποτέλεσμα καθώς προβλεπόταν βάθος της τάξης των 2 mag (Galan et al. 2012, 2014), οπότε η διαφοροποίηση είναι σημαντική. Επιπλέον, συστηματικά οι τελευταίες 3 εκλείψεις (2003, 2008/2009, 2014) παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές, αλλά διαφορετικές μορφές καμπύλης.

Χαρακτηριστικό αυτής της έκλειψης είναι η παρουσία του πλατό στο ελάχιστο. Αντίστοιχο πλατό έχει παρατηρηθεί μόνο το 1969. Ενώ η καμπύλη του 2014 μοιάζει αρκετά σε αυτή όσον αφορά στη μορφή, διαφοροποιείται στη διάρκεια. Η έκλειψη του 1969 διήρκεσε 60 ημέρες (Graczyk et al. 2003) ενώ εμείς υπολογίζουμε την έκλειψη του 2014 σε 40 ημέρες, που ταυτίζεται με την τυπική τιμή.

Από την ανάλυσή μας προκύπτει ότι η ημερομηνία του ελαχίστου είναι η 23η Αυγούστου (JD 2456893) κάτι που έρχεται σε απόλυτη συμφωνία με την προβλεπόμενη ημερομηνία (Galan et al. 2014). Αυτό επιβεβαιώνει ότι γνωρίζουμε αρκετά καλά την περίοδο των εκλείψεων, οπότε και μπορούν να γίνουν ασφαλείς προβλέψεις σχετικά με τους χρόνους εμφάνισής τους (Mikolajewski & Graczyk 1999).

Συνολικά, και η έκλειψη του 2014 φαίνεται να έχει ένα δικό της χαρακτήρα. Αν και το μοντέλο του δίσκου/δακτυλίου περιλαμβάνει επίσης και μετάπτωση του άξονα του δίσκου/δακτυλίου της τάξης των 65 χρόνων για να ερμηνεύσει τα διαφορετικά βάθη των εκλείψεων του ΕΕ Κηφέα (Mikolajewski & Graczyk 1999, Galan et al. 2012), φαίνεται ότι δεν έχουμε ακόμα την πλήρη εικόνα. Περαιτέρω δουλειά απαιτείται τόσο σε θεωρητικό επίπεδο όσο και στο παρατηρησιακό μια και συστήματα σαν το ΕΕ Κηφέα είναι εξαιρετικά σπάνια και η μεγάλη τους περίοδος δυσκολεύει τη συγκέντρωση περισσότερο δεδομένων. Η επόμενη έκλειψη του ΕΕ Κηφέα τοποθετείται τον Απρίλιο του 2020.

Σύνοψη

Κατά την διάρκεια της τελευταίας έκλειψης του ΕΕ Κηφέα το 2014 πραγματοποιήθηκαν 58 ψηφιακές (CCD) παρατηρήσεις στο φωτομετρικό V (Johnson) φίλτρο, που καλύπτουν την περίοδο 11 Ιουλίου με 26 Σεπτεμβρίου. Τα αποτελέσματα μια πρώτης ανάλυσής αυτών των παρατηρήσεων παρουσιάζονται συνολικά στον Πίνακα 1.

Από την ανάλυση μας προκύπτει ότι το σύστημα εισήλθε στην έκλειψη του 2014 στις 30 Ιουλίου (JD 2456869) και εξήλθε στις 8 Σεπτεμβρίου (JD 2456909), με διάρκεια 40 ± 3 ημερών, κοντά στην τυπική διάρκεια των προηγούμενων εκλείψεων. Το βάθος της έκλειψης είναι 0.655 ± 0.018 mag, που απέχει τόσο από την τυπική τιμή των ~ 1.5 mag όσο και από την προβλεπόμενη τιμή για αυτή την έκλειψη που ήταν κοντά στα 2 mag (Galan et al. 2012, 2014). Παρατηρούμε ότι η καμπύλη και σε αυτή την έκλειψη είναι ασύμμετρη με ένα πιο αργό ρυθμό απώλειας λαμπρότητας στην αρχή της και ένα πιο γρήγορο μετά τις 17 Αυγούστου (JD 2456887, στα 11.13 ± 0.35 mag) ενώ αντίθετα η έξοδος από την έκλειψη δεν εμφανίζει κάποια σημαντική αλλαγή. Χαρακτηριστικό αυτής της έκλειψης αποτελεί το γεγονός ότι το ελάχιστο εμφανίζει ένα πλατό διάρκειας 5 ± 3 ημερών, κάτι που έχει παρατηρηθεί μόνο στην έκλειψη του 1969 (Graczyk et al. 2003). Η κεντρική ημερομηνία που υπολογίζουμε για αυτό το ελάχιστο είναι η 23 Αυγούστου (JD 2456893) σε απόλυτη συμφωνία με την προβλεπόμενη (Galan et al. 2014).

Ευχαριστίες

Στην εργασία αυτή έγινε χρήση του NASA's Astrophysics Data System, του matplotlib⁸, μιας βιβλιοθήκης Python για γραφικά (Hunter 2007), καθώς και η διαδικτυακή εφαρμογή υπολογισμού JD της AAVSO⁹.

Αναφορές

- Barbier, M. et al., 1973, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 27, p. 421
- Mamajek, E.E., Quillen, A.C., Pecaut, M.J., et al., 2012, *The Astronomical Journal*, vol. 143, p. 72
- Meinunger, L., 1976, *Mitteilungen ueber Veraenderliche Sterne*, vol. 7, p. 97
- Mikolajewski, M. & Graczyk, D., 1999, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 303, p. 521
- Mikolajewski, M, Tomov, T, Hajduk, M., Cikala, M., et al., 2005, *Astrophysics and Space Science*, vol. 296, p. 451
- Gałań, C., Mikołajewski, M., Tomov, T., et al. 2010, *Astronomical Society of the Pacific Conference series*, vol. 435, p. 423
- Gałań, C., Mikołajewski, M., Tomov, T., Graczyk, D., et al., 2012, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 544, p. 53
- Gałań, C., Wychudzki, P., Mikołajewski, M., Tomov, T., Dimitrov, D., 2014, *Information Bulletin On Variable Stars*, no. 6111, p. 1
- Graczyk, D., Mikołajewski, M., Tomov, T., Kolev, D., and Iliev, I., 2003, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 403, p. 1089
- Hunter, J.D., 2007, *Computing in Science & Engineering*, vol. 9, p. 90
- Romano, G., 1956, *Coelum Periodico Bimestrale per la Divulgazione dell'Astronomia*, vol. 24, p. 135
- Romano, G. & Perissinotto, M., 1966, *Memorie della Societa Astronomia Italiana*, vol. 37, p. 255

8 <http://matplotlib.org/>

9 <https://www.aavso.org/jd-calculator>