

Aleksija Milošević (2002), Beograd, učenica 3. razreda Prve beogradske gimnazije
Vesna Milošević (2002), Beograd, učenica 3. razreda Četrnaeste beogradske gimnazije

Mentori:

Damnjan Milić, student osnovnih studija astrofizike, Matematički fakultet Univerziteta u Beogradu

Dr Atila Čeki, Astronomska opservatorija Beograd

Klasifikacija višestrukih zvezdanih sistema na osnovu izgleda O-C dijagrama

Apstrakt

U ovom radu je izvršena klasifikacija eklipsno dvojnih sistema zvezda prema faktorima koji utiču na promenu njihovog orbitalnog perioda. Promena perioda može biti posledica postojanja trećeg pratioca (zvezde ili planete), ili protoka mase koji se javlja u tesno dvojnim sistemima. Analizom O-C (Observed - minus - Calculated) dijagrama tri eklipsno dvojna sistema AD And, XY UMa i KIC 5095269 uočena su tri različita trenda. Utvrđeno je da se u sistemu AD And nalazi zvezda minimalne mase od $1.29 \pm 0.02 M_{\odot}$ na ekscentričnoj orbiti sa periodom 4502 ± 9 dana. Nasuprot tome, u sistemu XY UMa ustanovljeno je da dolazi do protoka mase jer je pored sinusnog primećen i kvadratni trend na O-C dijagramu. Postojanje linije jonizovanog magnezijuma (MgII) u spektru ovog sistema je još jedna potvrda da se radi o tesno dvojnem sistemu. Kod sistema KIC 5095269 je na osnovu masene granice između planete i braon patuljka zaključeno da dobijena masa od $7.56 \pm 0.31 M_J$ odgovara planeti koja kruži oko ovog eklipsnog sistema.

Uvod

Eklipsno dvojne zvezde su zvezde koje orbitiraju oko zajedničkog centra mase i čija je ravan orbite orijentisana u odnosu na posmatrača tako da dolazi do međusobnog pomračenja komponenata. Pomračenje je moguće pratiti na krivoj sjaja koja predstavlja promenu ukupnog sjaja tokom vremena. U trenucima kada jedna komponenta zaklanja drugu, dolazi do smanjenja zračenja koje se detektuje, tokom kojeg se beleži najmanji intenzitet sjaja koji označava trenutak minimuma. Vremenski interval između dva uzastopna minimuma je orbitalni period eklipsno dvojnog sistema tj. vreme za koje zvezde izvrše revoluciju.

Kod većine dvojnih sistema orbitalni period je konstantan, zahvaljujući čemu je moguće predvideti kada će se sledeći trenutak minimuma desiti. Međutim, kod određenog broja eklipsno dvojnih sistema uočavaju se odstupanja. Predviđeni trenuci minimuma se ne poklapaju sa trenucima koji su detektovani (Erderm i Gudur, 1998).

Ovaj fenomen je moguće objasniti efektom svetlosnog kašnjenja (eng. light time effect) (Irwin, 1952), koji je razmatran u ovom radu. Pomenuti efekat nastaje usled prividne promene položaja centra mase dvojnog sistema. Uzrok je nepoklapanje centra mase dvojnog sistema sa centrom mase sistema kada se u njemu nalazi i treće telo. Takođe, do promene položaja centra mase može da dođe i usled transfera mase između komponenata tesno dvojnog sistema.

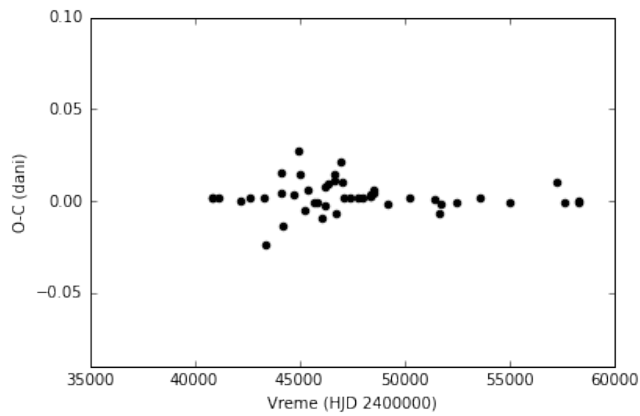
Cilj ovog rada je određivanje mase i perioda revolucije trećeg pratioca u eklipsno dvojnim sistemima kao i parametara koji definišu njegovu orbitu (ekscentričnost i proizvod velike poluose i sinusa inklinacije) ukoliko on postoji, odnosno detekcija tesno dvojnog sistema analizom promene orbitalnog perioda. Odabrani su sistemi kod kojih je poznato da promene nastaju usled efekta svetlosnog kašnjenja. Razmatrana su tri sistema: AD And, XY UMa i KIC 5095269. Kod svakog od sistema se ovaj efekat povezuje sa drugačijim uzrokom, u ovom slučaju postojanjem zvezde, planete i protoka mase, respektivno.

O-C dijagrami

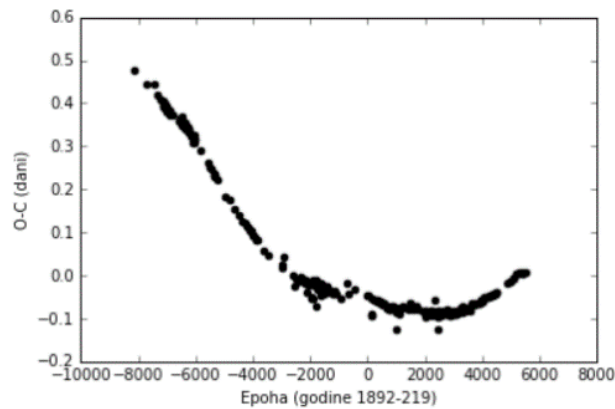
O-C (eng. Observed –minus– Calculated) dijagrami predstavljaju razliku između posmatranog (O) i predviđenog (C) trenutka minimuma. Ta razlika je prikazana na ordinati O-C dijagrama dok je na apscisi vreme ili epoha, odnosno broj ciklusa od trenutka minimuma koji je uzet kao početni.

U slučaju kada je orbitalni period konstantan, minimumi sjaja će se uvek detektovati kada je to i predviđeno, samim tim će razlika ovih vrednosti na O-C dijagramu biti konstanta (slika 1. a). Međutim, kod nekih sistema primećena su jasna odstupanja posmatranog od predviđenog trenutka minimuma, što se vidi na njihovim O-C dijagramima (slika 1. b).

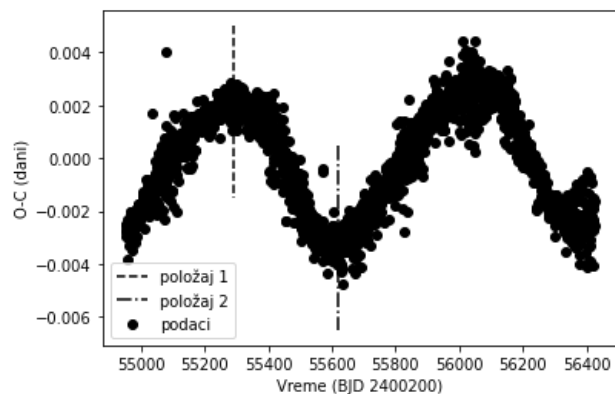
Kada je promena perioda uzrokovana efektom svetlosnog kašnjenja, na O-C dijagramu uočava se sinusni trend (slika 1. c). Ovaj efekat je moguće objasniti postojanjem trećeg pratioca, jer se centar mase trojnog sistema ne poklapa sa očekivanim položajem centra mase dvojnog sistema. Kada se treće telo nalazi najbliže posmatraču predviđeni centar mase dvojnog sistema je najudaljeniji. To kao posledicu ima da svetlost treba da pređe najduži put zbog čega stiže najkasnije. Ovo se na O-C dijagramu manifestuje kao maksimum (slika 1. c, položaj 1). U suprotnom slučaju, kada je treće telo najdalje od posmatrača, centar mase dvojnog sistema je najbliži i svetlost treba da pređe najkraći put. Iz tog razloga svetlost stiže najranije što se prikazuje kao minimum na O-C dijagramu (slika 1. c, položaj 2). Samim tim na osnovu analize promene perioda na O-C dijagramu moguće je steći uvid u orbitalne parametre trećeg pratioca.



a)



b)



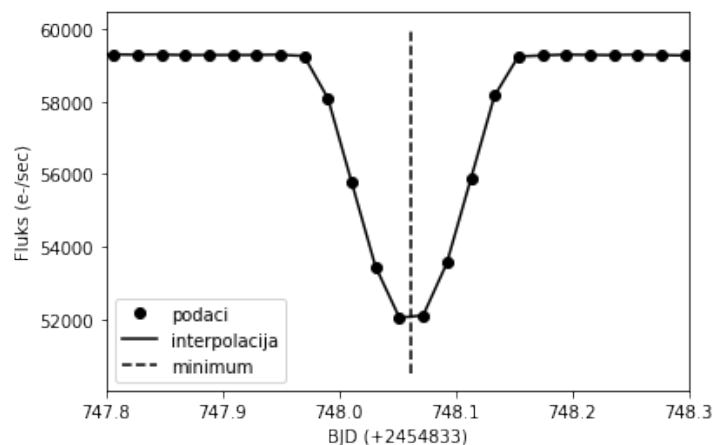
c)

Slika 1. Primeri O-C dijagrama sistema a) IT Cas (Web 1), b) WW Cyg (Web 1), c) KIC 4647652 (Web 2).
Figure 1. Examples of O-C diagrams a) IT Cas (Web 1), b) WW Cyg (Web 1), c) KIC 4647652 (Web 2).

Metod

Određivanje trenutaka minimuma

Da bi O-C dijagrami bili merodavni, potrebno je da se trenuci minimuma sjaja precizno odrede. U tu svrhu korišćen je Kwee i van Woerdenov metod (Kwee i van Woerden, 1956) odakle je poznato da se kriva sjaja najbolje može matematički opisati parabolom. Ovaj metod se zasniva na računanju najboljeg trenutka minimuma, koji predstavlja teme parabole kojom se opisiju podaci.



Slika 2. Kriva sjaja sistema KIC 5095269 i trenutak minimuma (isprekidana linija) koji je određen pomoću Kwee i van Woerdenove metode.

Figure 2. Light curve of KIC 5095269 and time of minimum (dashed line) determined using the Kwee and van Woerden method.

Greške pri određivanju trenutaka minimuma (σ_t) računata su prema (Deeg i Tingley, 2017):

$$\sigma_t = \frac{\sigma_{F_\nabla} T_\nabla}{2 \Delta F}. \quad (1)$$

σ_{F_∇} je šum snimanja koji nastaje u vremenskom intervalu trajanja pomračenja, T_∇ je vreme trajanja pomračenja i ΔF je dubina minimuma pomračenja.

Svi tako izračunati trenuci minimuma predstavljaju posmatrane O vrednosti od kojih treba oduzeti predviđene trenutke minimuma C koji su dobijeni prema sledećoj jednačini:

$$C(E) = t_0 + E \cdot P, \quad (2)$$

gde je t_0 trenutak detekcije prvog posmatranog minimuma, E epoha i P period eklipsno dvojnog sistema.

Analiza O-C dijagrama

U svrhu analize O-C dijagrama, odnosno fizičkih faktora koji utiču na njihov izgled korišćen je OCFit algoritam (Gajdoš i Parimucha, 2019) koji nudi različite modele opisivanja promena na O-C dijagramima. Za njihovo opisivanje korišćena je sledeća jednačina:

$$MinI = t_0 + P \cdot E + \Delta t + Q \cdot E^2, \quad (3)$$

gde je $MinI$ vreme minimuma a član Δt vremensko kašnjenje usled efekta svetlosnog kašnjenja u eklipsno dvojnem sistemu. Kvadratni član Q je dodat u slučaju opisivanja promena perioda kod tesno dvojnih sistema (Erdem i Güdür, 1998).

Vrednost Δt zavisi od orbitalnih parametara trećeg pratioca. U slučaju sistema u kojima se pretpostavlja da je treće telo zvezda korišćen je OCFit model koji određuje ovaj parametar prema sledećoj jednačini (Irwin, 1959):

$$\Delta t = \frac{a \sin i}{2.590 \cdot 10^{10}} \left\{ \frac{1 - e^2}{1 + e \cos \vartheta} \sin(\vartheta + \omega) + e \sin \omega \right\}, \quad (4)$$

gde je a velika poluosa orbite trećeg pratioca, i inklinacija orbite trećeg pratioca u odnosu na ravan dvojnog sistema, e ekscentričnost, ϑ prava anomalija i ω ugao između uzlaznog čvora i pravca perihela.

Još jedan od rezultata koji je dobijen OCFit modelom je funkcija mase $f(m)$. Ona omogućava da se odredi opseg u kom se nalazi masa trećeg pratioca u zavisnosti od masa ostalih komponenata. Samim tim je moguće odrediti masu trećeg tela prema (Gajdoš i Parimucha, 2019):

$$f(m) = \frac{(M_3 \sin i)^3}{(M_1 + M_2 + M_3)^2}, \quad (5)$$

gde su M_1, M_2, M_3 , mase primarne, sekundarne i tercijarne komponente sistema, respektivno. Kako je inklinaciju nemoguće izračunati iz datih podataka, uzima se vrednost od 90° jer je najveća verovatnoća nalaženja takvog sistema (Tokovinin, 2017).

Zbog pretpostavke da u sistemu KIC 5095269 postoji treći pratilac koji je planeta ili zvezda male mase (Getley i sar. 2017), nakon konstrukcije O-C dijagrama korišćen je AgolExPlanet model. On opisuje uticaj planete koja orbitira oko eklipsnog para. U ovom modelu parametar Δt prikazan je na sledeći način (Agol i sar. 2005):

$$\Delta t = \frac{\mu_3}{2\pi(1-\mu_3)} \frac{P^2}{P_3} (1-e^2)^{-3/2} (\vartheta_3 - l_3 + e \sin \vartheta_3), \quad (6)$$

gde je P_3 period trojnog sistema, μ_3 korekcija za masu trećeg tela i l_3 srednja anomalija. Uvođenjem korekcije mase moguće je da se kretanje trojnog sistema predstavi kao rotacija jednog objekta redukovane mase oko njegove ose rotacije. Korekcija mase je data sledećom jednačinom:

$$\mu_3 = \frac{M_3}{M_1 + M_2 + M_3}. \quad (7)$$

Ukoliko su poznate mase ostale dve komponente M_1 i M_2 ili samo njihov zbir moguće je dobiti masu planete M_3 u eklipsno dvojnog sistemu.

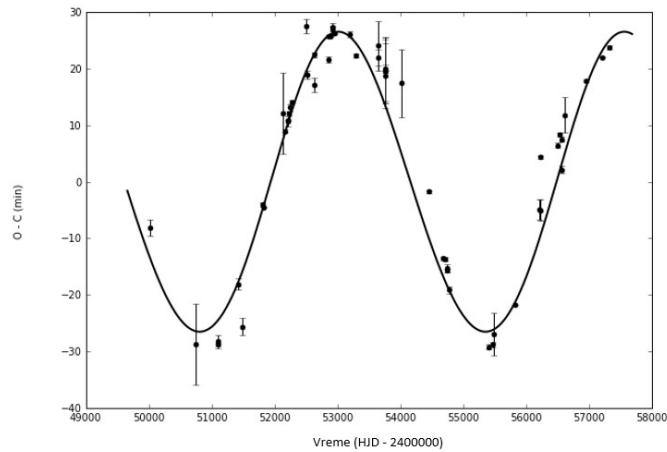
Rezultati

Za sisteme AD And i XY UMa korišćeni su O-C dijagrami preuzeti sa AAVSO (eng. American Association of Variable Star Observers) (Web 3) i O-C gateway baza (Web 1), respektivno. Ovi podaci obuhvataju veći broj revolucija sistema nego što je to predstavljeno u ranijim radovima. Primećeno je da veliki broj podataka kod sistema XY UMa nema vrednosti grešaka, tako da su u slučaju ovog sistema posmatračke nesigurnosti zanemarene.

U svrhu opisivanja sistema KIC 5095269 preuzete su krive sjaja iz Kepler kataloga eklipsno dvojnih zvezda (eng. Kepler Eclipsing Binary Catalog - Third Revision) (Web 2). Kod ovih podataka bilo je potrebno izračunati trenutke minimuma Kwee i van Woerdenovom metodom i potom konstruisati O-C dijagram koji je kasnije korišćen za dalju analizu.

AD And

Na O-C dijagramu AD Andromede (slika 3) uočava se sinusna promena. Svi izračunati rezultati navedeni su u tabeli 1 zajedno sa onima iz literature (Liao i Qian, 2009).



Slika 3. O-C dijagram sistema AD And.
Figure 3. O-C diagram of AD And.

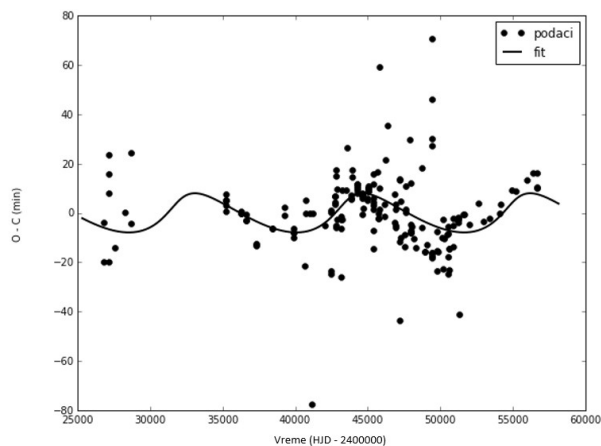
Tabela 1. Parametri dobijeni opisivanjem podataka na slici 3 i vrednosti dobijene u literaturi.
Table 1. Derived orbital parameters of the tertiary component in AD And and those derived from the literature.

AD And		
Parametar	Dobijena vrednost	Vrednost iz rada Liao i Qian (2009)
$a \sin i_3 [AJ]$	3.03 ± 0.01	3.24 ± 0.12
e_3	0.14 ± 0.01	0.30 ± 0.24
$m_3 [M_{\odot}]$	1.29 ± 0.02	1.76 ± 0.08
$P_3 [dani]$	4502 ± 9	5249

Iz poznate veze mase i luminoznosti $L \propto M^{4.4}$ (ibid.) zaključeno je da bi treći pratilac, ukoliko je zvezda, trebalo da bude detektovan sa Zemlje, što nije slučaj. U navedenom radu su obrazložene dve mogućnosti za tumačenje ovakvih rezultata. Prva je da je treći pratilac neutronska zvezda male mase i slabog sjaja. Ovo objašnjenje se u radu iz literature odbacuje jer se mase svih neutronske zvezde u dvojnim sistemima nalaze u opsegu između 1.1 i $1.4 M_{\odot}$ (Stairs, 2004). Međutim, analizom O-C dijagrama u ovom radu dobijena je masa od $1.29 M_{\odot}$ što može da odgovara neutronske zvezdi. Drugo moguće objašnjenje jeste da je treći pratilac i sam dvojni sistem sa masama komponenti od $0.64 M_{\odot}$. U radu (Liao i Qian, 2009) se navodi da dve zvezde ovih masa ne bi bilo moguće detektovati sa Zemlje, što se poklapa sa posmatranjima. To bi značilo da je ceo sistem AD And višestruki sistem sa četiri zvezde.

XY UMa

Opisana je promena na O-C dijagramu korišćenjem jednačine 3 sa kvadratnim članom (slika 4). Dobijeni su rezultati koji su u tabeli 2 prikazani i upoređeni sa onima iz rada (Erderm i Gudur, 1998).



Slika 4. O-C dijagram sistema XY UMa za čije opisivanje je korišćena jednačina 2 sa kvadratnim članom.
Figure 4. O-C diagram of XY UMa against equation 2 with quadratic term.

Tabela 2. Parametri dobijeni opisivanjem podataka na slici 4 i vrednosti dobijene u literaturi.
Table 2. Derived orbital parameters of the tertiary component in XY UMa and those derived from the literature.

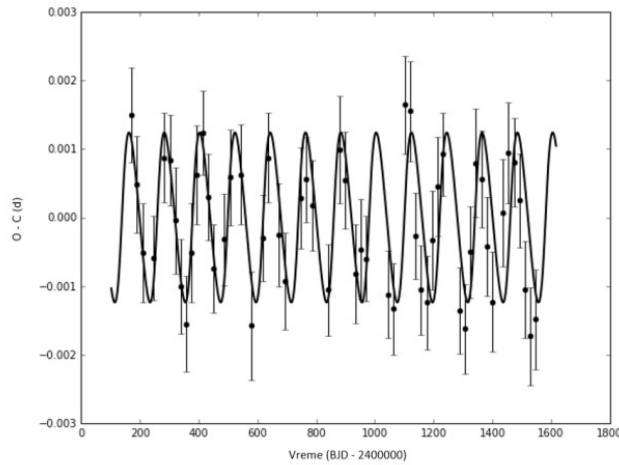
XY UMa		
Parametar	Dobijena vrednost	Vrednost iz rada Erderm i Gudur (1998)
$a \sin i_3 [AJ]$	1.01	1.50 ± 0.10
e_3	0.39	0.41 ± 0.09
$m_3 [M_J]$	0.15	0.22
$P_3 [dani]$	11570	11831 ± 549

Prema funkciji luminoznosti koja povezuje bolometrijsku magnitudu posmatrane zvezde i njenu masu $M_b = 5.84 - 6.54 \log M$ (Demircan i Kahraman, 1991) dobijena masa trećeg tela od $0.15 M_\odot$ odgovara zvezdi apsolutne bolometrijske magnituda koja iznosi $M_b = 11.^m 23$. U radu (Erderm i Gudur, 1998) je fotometrijskom analizom dobijeno da je apsolutna magnituda sistema XY UMa $4.^m 68$. Usled velike razlike u sjaju sistema i sjaju koji odgovara trećem telu skoro je nemoguće njegovo direktno posmatranje što ovu hipotezu čini neproverljivom.

U radu Erderm i Gudur (1998) je objašnjeno da kvadratni trend koji se uočava na slici 4 nastaje jer je u ovom sistemu jedna komponenta 92% popunila svoj Rošov oval (Geyer, 1977). Zbog toga dolazi do većeg protoka mase što uslovljava veću prividnu promenu centra mase dvojnog sistema i samim tim promenu orbitalnog perioda. Još jedna od potvrda da je pomenuti sistem tesno dvojni je prisustvo linije jonizovanog magnezijuma (MgII) u spektru ovog sistema (Gurzadyan i Cholakyan, 1995). Ova linija se javlja samo na jako visokim temperaturama koje se dostižu usled padanja materije na akrecioni disk jedne od komponenata. Iz svih tih razloga zaključeno je da uzrok promene perioda nije treće telo sa dobijenim orbitalnim parametrima već da se radi o tesno dvojnog sistemu.

KIC 5095269

Na O-C dijagramu KIC 5095269 sistema na slici 5 primećuje se sinusna promena koja ukazuje na moguće postojanje trećeg pratioca. Dobijeni rezultati upoređeni su sa podacima iz rada (Getley i sar. 2017) koji su zajedno sa njima priloženi u tabeli 3.



Slika 5. O-C dijagram sistema KIC 5095269.
Figure 5. O-C diagram of KIC 5095269.

Tabela 3. Parametri dobijeni opisivanjem podataka na slici 5 i vrednosti dobijene u literaturi.
Table 3. Derived orbital parameters of the tertiary component in KIC 5095269 and those derived from the literature.

KIC 5095269		
Parametar	Dobijena vrednost	Vrednost iz rada Getley i sar. (2017)
e_3	0.21 ± 0.01	0.06 ± 0.01
$m_3 \sin i_3$	7.56 ± 0.31	7.69 ± 0.05
P_3 [dani]	120.4 ± 0.3	237.7 ± 0.1

Na osnovu predložene granice između mase planete i braon patuljka (Burgasser, 2008) od $13 M_J$ (gde je M_J masa Jupitera), pretpostavlja se da dobijena masa od $7.24 M_J$ odgovara planeti koja kruži oko eklipsnog sistema.

Diskusija i zaključak

Ako se uzme u obzir vremenska skala u kojima se promene orbitalnog perioda dešavaju kod dvojnih sistema, mogu se razlikovati dugoročne od kratkoročnih promena. Kratkoročne su karakteristične za vremenski period reda veličine decenija, dok dugoročne karakteriše duži vremenski period zvezdane evolucije (Borkovits i sar. 2005). Neki od dugoperiodičnih promena mogu biti uzrokovane zvezdanim vetrovima (Van't Veer i Maceroni, 1989) ili transferom mase u tesno dvojnim sistemima. Osim uticaja trećeg tela, kratkoročne promene mogu biti uzrokovane i magnetnom aktivnošću tesno dvojnih sistema kao što je navedeno u radu (Borkovits i sar. 2005).

Pretpostavlja se da je moguće da do odstupanja u periodu od 747 dana kod sistema AD And dolazi usled korišćenja većeg broja podataka od onog korišćenog u poredbenoj literaturi (Liao i Qian, 2009) i stoga boljeg opisivanja ove promene. Da bi se potvrdilo da je ovo uzrok odstupanja, obrađeni su i samo oni podaci koji zahvataju vremenski interval iz literature. Na taj način je dobijen period od 2301 ± 1 dana koji se za 52 dana razlikuje od onog iz rada (Liao i Qian, 2009). Takođe, ukoliko se opišu novi podaci dodati u ovom radu sa tako dobijenim periodom dolazi do nepoklapanja podataka i opisane promene. Na osnovu svega toga pretpostavlja se da su novi podaci omogućili da se dobiju tačniji orbitalni parametri trećeg tela. U ovom radu dobijena je masa koja se značajno razlikuje od one iz literature i koja može da odgovara masi neutronske zvezde, što bi značilo da tu opciju ne treba isključiti.

Podaci korišćeni u ovom radu su, u slučaju sistema XY UMa, dopuna onima iz rada (Erderm i Gudur, 1998) za period od 18 godina posmatranja. I pored toga nema velike razlike u rezultatima sa onima dobijenim 1998. godine što potvrđuje tada opisanu promenu orbitalnog perioda.

Kod sistema KIC 5095269, dobijeni period odstupa od onog iz rada Getley i sar. (2017). U ovom radu, orbitalni period trećeg tela odgovara periodu promene na O-C dijagramu. U radu iz 2017. godine konstruisani su posmatrački i teorijski O-C dijagram koji je izrađen od teorijski generisanih krivih sjaja, za koje je kasnije određen trenutak minimuma. Pri izradi teorijskih minimuma, korišćena je opšta teorija relativnosti i smatra se da razlika u rešenjima proizilazi iz ove pretpostavke. Iz tog razloga se u literaturi ne poklapaju period promene na O-C dijagramu i period trećeg tela.

Analizom O-C dijagrama tri eklipsno dvojna sistema određena su tri različita uzroka promena orbitalnog perioda. U sistemu AD And rezultati ukazuju na postojanje treće komponente koja je višestruki sistem ili neutronska zvezda. Kako je kod sistema XY UMa hipoteza o postojanju trećeg pratioca neproverljiva i kako postoji kvadratni trend na O-C dijagramu kao i zbog pronađene linije jonizovanog magnezijuma, pretpostavlja se da se radi o tesno dvojnog sistemu. Analizom promene orbitalnog perioda sistema KIC 5095269 zaključeno je da se u sistemu nalazi treći pratilac i da je reč o planeti.

Razlog za to da se izaberu tri sistema koja imaju različite uzroke promena u orbitalnom periodu jeste da bi se stekao uvid u to kako različiti faktori utiču na te promene i kako se to manifestuje na O-C dijagramima dvojnih sistema. To je od velike važnosti kako bi u kasnijem istraživanju bilo moguće obradom velikog seta podataka klasifikovati sisteme i uraditi statističku analizu rezultata. Da bi se izvršila analiza što većeg broja sistema koristili bi se podaci za krive sjaja, jer za mnoge sisteme nisu konstruisani O-C dijagrami.

5. Reference

- Agol E., Steffen J., Sari R., Clarkson W. 2005. On detecting terrestrial planets with timing of giant planet transits. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 359, 567:579.
- Borkovits T., Elkhateeb M. M., Csizmadia Sz., Nuspl J., Bíró I. B., Hegedüs T., Csorvási R. 2005. Indirect evidence for short period magnetic cycles in W UMa stars. Period analysis of five overcontact systems. *Astronomy and Astrophysics*, vol. 441, 1087:1097.
- Burgasser A. J. 2008. Brown dwarfs: Failed stars, super Jupiters. *Physics Today*, vol. 61, 70:71.
- Deeg H. J., Tingley B. 2017. TEE, an estimator for the precision of eclipse and transit minimum times. *Astronomy & Astrophysics*, vol. 599, 93:100.
- Demircan O., Kahraman G. 1991. Stellar Mass / Luminosity and Mass / Radius Relations. *Astrophysics and Space Science*, vol. 181, 313:322.
- Erdem A., Güdür N. 1998. The orbital period study and photometric analysis of XY Ursae Majoris. *Astronomy and Astrophysics Supplement*, vol.127, 257:267.
- Gajdoš P., Parimucha Š. 2019. New tool with GUI for fitting O-C diagrams. *Proceedings of the 50th Conference on Variable Stars Research*, vol. 197, 71:77.
- Getley A. K., Carter B., King R., O'Toole S. 2017. Evidence for a planetary mass third body orbiting the binary star KIC 5095269. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 468, 2932:2937.
- Geyer E. H. 1977. Remarks on Erratic Period Fluctuations of Detached Close Binaries and the Constancy of the Orbital Period of XY UMa. *Astrophysics and Space Science*, vol. 48, 137:144.
- Gurzadyan G. A., Cholakyan V. G. 1995. On the Intercomponent Emission in Close Binary Systems. *Astrophysics and Space Science*, vol. 229, 185:202.
- Irwin J. B. 1952. The Determination of a Light-Time Orbit. *Astrophysical Journal*, vol. 116, 211:217.
- Irwin J. B. 1959. Standard light-time curves. *Astronomical Journal*, vol.64, 149:155.
- Kwee K. K., van Woerden H. 1956. A method for computing accurately the epoch of minimum of an eclipsing variable. *Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands*, vol. 12, 327:330.
- Liao W., Qian S. 2009. Detection of a tertiary companion in the eclipsing binary AD Andromeda. *New Astronomy*, vol. 14(3), 249:253.
- Stairs I.H. 2004. Pulsars in Binary Systems: Probing Binary Stellar Evolution and General Relativity. *Science*, vol. 304, 547:552.
- Tokovinin A. 2017. Orbit Alignment in Triple Stars. *The Astrophysical Journal*, vol. 844
- van't Veer F., Maceroni C. 1989. The angular momentum loss for late-type stars. *Astronomy and Astrophysics*, vol. 220, 128:134.
- Web 1:
<http://var2.astro.cz/ocgate/>
- Web 2:
<http://keplerebs.villanova.edu/>
- Web 3:
<https://www.aavso.org/bob-nelsons-o-c-files>

Classification of multiple star systems based on O-C diagrams

In this paper, the eclipse binary star systems are classified based on variations in their orbital period. The change of period could be consequence of existence of a third companion (star or planet) or mass transfer that occurs in close binary systems. Through analysis of O-C (Observed - minus - Calculated) diagrams of three eclipse binary systems AD And, XY UMa as well as KIC 5095269 three different trends are revealed. It was determined that in the AD And system there is a third star with a minimum mass of $1.29 \pm 0.02 M_{\odot}$ in an eccentric orbit with a period of 4502 ± 9 days. In contrast, in the XY UMa system, mass transfer was found to occur because a square trend was observed in addition to the sine wave on the O-C diagram. Another confirmation that this is a close binary is the line of ionized magnesium (MgII) found in spectrum. In the system KIC 5095269, based on the proposed boundary between the mass of the planet and the brown dwarf, it was concluded that the obtained mass of $7.56 \pm 0.31 M_j$ corresponds to the planet orbiting around eclipsing system.