

Empirijska veza mase i luminoziteta zvijezda u galaktičkom skupu Hijade

Mesarić, Martina

Master's thesis / Diplomski rad

2014

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:699061>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-16**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

SMJER: DIPLOMIRANI INŽENJER FIZIKE

Martina Mesarić

Diplomski rad

**Empirijska veza mase i luminoziteta zvijezda
u galaktičkom skupu Hijade**

Voditelj diplomskog rada: Prof. dr. sc. Krešimir Pavlovski

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

4. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2014.

Zahvaljujem Dr. Johnu Southworthu, Astrophysics Group, Keele University, Staffordshire, UK za spektre snimljene na INT-u, te Dr. Karlu T. Wraightu, Department of Physical Sciences, Open University, Milton Keynes, UK i Dr. Danielle Bewsher, University of Central Lancashire, Preston, UK za STEREO fotometrijska mjerenja. Posebno zahvaljujem prof. Krešimiru Pavlovskom na pomoći i vođenju kroz ovaj rad.

Sažetak

Otvoreni galaktički skupovi važni su za proučavanje strukture i razvoja zvijezda. Zvijezde u skupu nastale iz istog molekulskog oblaka, što znači da imaju vrlo sličan kemijski sastav i da su približno iste starosti. Zvijezde unutar skupa razlikuju se po masi, koja je usko vezana uz ostale zvjezdane parametre. Masa je glavno svojstvo koje određuje razvojni put zvijezde, duljinu njezina trajanja na glavnom nizu HR dijagrama, te konačni stadij razvoja.

Mase zvijezda mogu se direktno mjeriti jedino u dvojnim ili višestrukim sustavima. Dvojne zvijezde su gravitacijski vezani sustavi dvije zvijezde koje se gibaju oko zajedničkog centra mase. Najvrjedniji su spektroskopski pomrčinski dvojni sustavi, u čijem su spektru vidljive spektralne linije obje komponente sustava. Iz spektroskopske i fotometrijske analize takvog sustava moguće je izračunati mase, polumjere i luminozitate zvijezda s velikom točnošću.

U ovome radu analizirana su spektroskopska i fotometrijska mjerenja dvojnog sustava V818 Tau u otvorenom skupu Hijade. U spektroskopskoj analizi korištena je metoda spektralnog raspetljavanja, koja iz niza kompozitnih spektara dvojne zvijezde daje individualne spektre komponenata, istodobno računajući orbitalne elemente sustava. Analiza spektara omogućuje određivanje atmosferskih parametara zvijezda: efektivne temperature, metalicitet i rotacijske brzine. U kombinaciji s analizom svjetlosnih krivulja dolazi se do mase, polumjera i luminoziteta zvijezda dvojnog sustava. Svjetlosna krivulja modelirana je pomoću Wilson-Devinney programa, koji koristi Rocheovu geometriju za opis sustava, zajedno s detaljnom obradom efekta refleksije i ostalih fizikalnih pojava.

V818 Tau jedina je pomrčinska dvojna zvijezda u skupu Hijade, te daje veliku težinu kod postavljanja relacije masa-luminozitet. U ovom radu relacija masa-luminozitet određena je pomoću 10 zvijezda, uz komponente V818 Tau iskorištene su još 4 interferometrijske dvojne zvijezde.

The empirical mass-luminosity relation in the galactic cluster Hyades

Abstract

Galactic open clusters are important for studying structure and evolution of stars. Stars in a cluster were formed from the same molecular cloud; hence they have very similar chemical composition and approximately the same age. Members of a cluster differ by their mass, which is tightly bound with other stellar parameters. Mass is the main property that determines the evolutionary path of a star, its main sequence lifetime and a final stage of the evolution.

Stellar mass can be measured directly only in binary or multiple systems. Binary stars are gravitationally bound systems of two components orbiting around their common center of mass. The most valuable are the eclipsing spectroscopic binaries, for which the spectral lines from both stars are visible in their spectrum. From spectroscopic and photometric analysis of such a system, it is possible to calculate masses, radii and luminosities with great accuracy.

In this work, the spectroscopic and photometric measurements of the binary system V818 Tau in Hyades star cluster are analyzed. The method of spectral disentangling is used in spectroscopic analysis, which enables separation of the individual spectra of the component stars from a time series of composite spectra, simultaneously deriving the system orbital elements. In turn, the spectral analysis gives the atmospheric parameters of both stars: effective temperatures, metallicity and rotational velocities. In combination with the light curve analysis the masses, radii and luminosities can be determined. The Wilson-Devinney code is used for light curve modeling, which implements Roche geometry and a detailed treatment of reflection and other physical effects.

V818 Tau is only eclipsing binary system in Hyades. Therefore is extremely important in anchoring the mass-luminosity relation for Hyades. In this work, the mass-luminosity relation is deduced from 10 stars, besides the components of V818 Tau another 4 interferometric binary stars were used.

Sadržaj

1. Uvod	3
2. Zvezdani skupovi	4
2.1. Otvoreni skupovi.....	5
2.2 Hertzprung-Russelov dijagram	6
2.2.1. Evolucija zvijezda u HR dijagramu	8
2.2.2. HR dijagram zvezdanog skupa	9
3. Jednadžbe strukture zvijezda	13
3.1. Relacija masa-luminozitet.....	16
3.2. Mase zvijezda	18
4. Dvojne zvijezde	20
4.1. Spektroskopske dvojne zvijezde.....	22
4.2. Pomrčinske dvojne zvijezde	28
5. Wilson-Devinney metoda.....	31
5.1. Wilson-Devinney program	31
5.2. Model svjetlosne krivulje.....	31
5.2.1. Gravitacijsko zatamnjene.....	33
5.2.2. Rubno zatamnjene.....	33
5.2.3. Efekt refleksije	34
6. Zvezdani skup Hijade	36
6.1. Dvojni sustavi u skupu Hijade	37
6.2. Sustav V818 Tau.....	41
7. Analiza dvojne zvijezde V818 Tau	46
7.1. Spektroskopska mjerenja	46
7.2. Spektroskopska analiza.....	47
7.3. Fotometrijska mjerenja	51
7.4. Analiza svjetlosne krivulje.....	54

7.5. Relacija masa-luminozitet za Hijade	59
7.6. Problem starosti i metaliciteta Hijada	60
8. Zaključak	62
9. Literatura	63

1. Uvod

Povezanost mase i luminoziteta zvijezda predstavlja jedan od osnovnih odnosa zvjezdanih svojstava. To je empirijska relacija dobivena na temelju promatranja, neovisno o modelima zvijezda. Vrijedi za zvijezde glavnog niza u koji spada većina zvijezda u galaksiji. Važnost ove relacije očituje se u činjenici da se mnogim zvijezdama masa ne može izravno mjeriti, te je njezina upotreba jedini način određivanja njihove mase. Zbog toga je vrlo bitno relaciju dobro kalibrirati.

Otkriće relacije masa-luminozitet razvijalo se kroz proučavanje dvojnih zvijezda, jedinih sustava iz čijih je mjerenja moguće odrediti mase komponentata. Prvu formulaciju ove relacije postavio je engleski astrofizičar Arthur S. Eddington u članku iz 1924. godine u sklopu teorije unutrašnje strukture zvijezda (Eddington 1924). Iz temeljnih je principa pokazao da prijenos energije zračenjem zahtjeva da luminozitet zvijezde L ovisi o njezinoj masi M približno kao $L \sim M^{3,5}$, mjereno u Sunčevim jedinicama. Iz podataka dobivenih opažanjem zvijezda jasno je, međutim, da se eksponent mijenja ovisno o načinu prijenosa energije kroz zvijezdu. Prijenos energije ovisi o temperaturi razvijenoj u zvijezdi, koja pak ovisi o njezinoj masi. Tako da za različite raspone masa zvijezda na glavnom nizu vrijedi ponešto drugačija relacija. Starost i kemijski sastav također utječu na luminozitet zvijezde, a time i na odnos mase i luminoziteta. Ovaj problem rješava promatranje zvijezda koje su članovi zvjezdanih skupova, što znači da su približno iste starosti i metaliciteta. Jedan od takvih skupova su Hijade, nama najbliži otvoreni zvjezdani skup i kao takav vrlo pogodan za proučavanje.

Za kalibraciju relacije masa-luminozitet potrebno je promatrati sustave u kojima je moguće izračunati mase zvijezda s velikom točnošću. Takvi sustavi su pomrčinske dvojne zvijezde, kod kojih se mase obje komponente mogu dobiti s vrlo malim pogreškama. U ovom radu predstavljena su fotometrijska i spektroskopska mjerenja dvojne zvijezde V818 Tau, jedine do sada otkrivene pomrčinske dvoje zvijezde u Hijadama. Provedena je analiza podataka u svrhu dobivanja apsolutnih veličina ovog sustava i određivanja relacije masa-luminozitet za Hijade, uz pomoć poznatih vrijednosti četiri izabrane spektroskopske dvojne zvijezde u skupu.

2. Zvezdani skupovi

Zvezdani skup je gravitacijski vezana i zatvorena skupina zvijezda. Međusobna udaljenost zvijezda u skupu znatno je manja nego udaljenost do zvijezda koje ne pripadaju skupu. Skupovi mogu sadržavati od tek nekoliko desetaka pa sve do par milijuna zvijezda, ovisno o kojem se tipu zvezdanog skupa radi. Glavna podjela skupova je na otvorene galaktičke skupove i kuglaste skupove. Kuglasti skupovi su mnogo kompaktniji, sferičnog oblika, sadrže znatno više zvijezda i mnogo su stariji. Zvijezde kuglastih skupova spadaju u populaciju II, koju čine zvijezde nastale tokom stvaranja galaksija i zbog toga malog metaliciteta. Zvijezde otvorenih skupova su populacije I, mnogo kasnije stvorene zvijezde bogatije metalima. Kuglasti skupovi se uglavnom nalaze u galaktičkom halou, u vrlo eliptičnim putanjama oko središta galaksije, a tek mali broj njih nalazi se u disku. Otvoreni skupovi nalaze se isključivo unutar diska ili u blizini galaktičke ravnine.

Posebnim vrstama skupova još pripadaju zvezdane asocijacije, pokretne grupe i ugniježdene grupe. Asocijacije su slabo povezane skupine, vrlo velikog promjera, ali mnogo manje gustoće zvijezda nego kod otvorenih skupova. Otvoreni skupovi se često mogu pronaći unutar samih asocijacija. Zvezdane asocijacije većinom nisu vezane zajedničkim gravitacijskim poljem, pa se takve skupine relativno brzo rasprše, što je i razlog zašto njihovu populaciju čine samo mlađe zvijezde, jer su one starije već napustile skupinu. Pokretne grupe su zapravo grupe zvijezda sa zajedničkim gibanjem. U njih spadaju zvijezde raštrkane po prostoru koje se gibaju vrlo sličnim brzinama, što može značiti da su nekada bile dio istog skupa ili zvezdane asocijacije. Najpoznatija pokretna grupa su Hijade. Čine ju brojne zvijezde na nebeskoj sferi gotovo iste brzine kao i zvezdani skup Hijade, iako većina ne dijeli isto podrijetlo sa skupom, već je uzrok njihovog jednakog gibanja galaktički plimni efekt. Zadnja vrsta skupova, ugniježdene grupe, skupine su vrlo mladih zvijezda još okruženih oblacima međuzvezdanog plina iz kojeg su nastale. Jedva su vidljive kroz oblake plina i prašine i najbolje se uočavaju u infracrvenom području. Pretpostavlja se da su ove grupe budući otvoreni zvezdani skupovi. Klasifikacija i obilježja navedenih skupova zvijezda prikazana su u tablici 2.1.

Tablica 2.1. Klasifikacija i svojstva zvjezdanih skupova.

	Kuglasti skupovi	Otvoreni skupovi	Zvjezdane asocijacije	Pokretne grupe	Ugniježdene grupe
Broj skupova					
Zabilježenih	147	1200	70	< 10	~ 25
Pret. ukupno	200	10^5	> 1000	—	—
Uobičajena veličina (pc)					
Srednji radijus jezgre	1.0	—	nevezane	nevezane	—
Srednji plimni radijus	35	—	nevezane	nevezane	—
Vidljivi promjer	—	4	> 100	—	1
Masa (M_{\odot})					
Minimum	10^4	10	1000	—	100
Maximum	10^6	10^4	10^4	—	> 1000
Starost (god)					
Minimum	8×10^9	2×10^6	5×10^6	—	< 10^6
Maximum	16×10^9	9×10^9	2×10^7	—	5×10^6
Metalicitet ([Fe/H])	-2.3 do +0.2	-0.7 do 0.3	Pop I	Pop I	Pop I

2.1. Otvoreni skupovi

Otvorene zvjezdane skupove čine nepravilne skupine od više desetaka do nekoliko tisuća zvijezda. Na nebu se očituju većom koncentracijom zvijezda od okolnog prostora. Nalaze se u ili blizu galaktičke ravnine. Do sada ih je evidentirano oko 1600, no smatra se da ih je u galaksiji mnogo više. Teže ih je otkriti nego znatno veće i masivnije kuglaste skupove, jer je riječ o nepravilnim skupinama zvijezda često skrivenih od pogleda međuzvjezdanom prašinom. Posebno je teško otkriti manje, udaljene skupove sastavljene od starijih zvijezda koje zrače mnogo slabije nego masivne, mlade zvijezde.

Neki od najpoznatijih otvorenih skupova sadrže upravo vrlo mlade, plave divove, kao Plejade (M45) i Kutija dragulja (NGC 4755). Starost otvorenih skupova kreće se od svega par milijuna, pa sve do nekoliko milijardi godina. Na primjer, skup NCG 2244 u maglici Rozete (slika 2.1, desno) jedan je od najmlađih poznatih skupova, star tek između 1 i 3 milijuna godina. Skup M67 (slika 2.1, lijevo) je primjer vrlo starog otvorenog skupa, s procjenom dobi između 3,2 i 5 milijardi godina.



Slika 2.1. Otvoreni skup M67 (lijevo) jedan je od najstarijih otvorenih skupova u našoj galaksiji, plave zvijezde u njemu nisu mlade zvijezde glavnog niza već tkz. 'plave lualice' ('blue stragglers') najvjerojatnije nastale stapanjem starijih zvijezda; otvoreni skup NGC 2244 (desno) u kojem prevladavaju mlade, plave zvijezde.

Otvoreni skupovi neprocjenjivi su za proučavanje evolucije zvijezda i razvoja same galaksije nakon formiranja galaktičkog diska (ovakvi skupovi nalaze se pretežno upravo u spiralnim galaksijama poput naše te manjim, nepravilnim galaksijama). Za zvijezde u skupu starije od desetak milijuna godina može se reći da su iste starosti, nastale u približno istom razdoblju, da imaju isti kemijski sastav i da su otprilike na istoj razdaljini od nas, jer su međusobne udaljenosti unutar skupa ipak mnogo manje od udaljenosti skupa od Sunca. Zvijezde istog skupa također imaju isto prostorno gibanje, tako da se mjerenjem stvarnog kutnog gibanja zvijezda može odrediti koja je zaista član skupa, a koja je samo prividno u skupu. Ono po čemu se zvijezde u skupu razlikuju je njihova masa. Upravo masa određuje evolucijski put pojedine zvijezde i duljinu njezinog trajanja (razvoja) na glavnom nizu HR dijagrama.

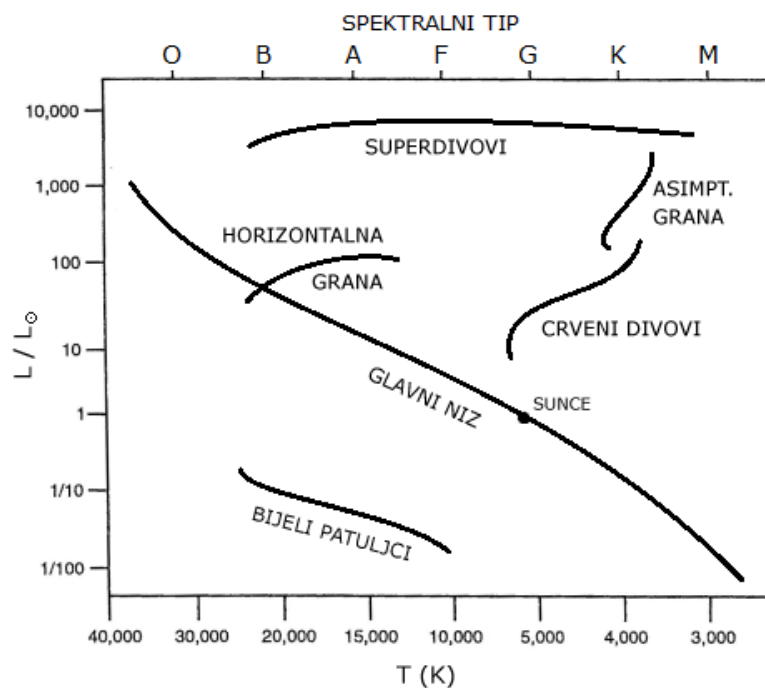
2.2. Hertzsprung-Russelov dijagram

Hertzsprung-Russelov dijagram (HR dijagram, HRD) prikazuje ovisnost između luminoziteta zvijezda i njihove efektivne temperature. Originalni dijagram, kojeg su osmislili astronomi E. Hertzsprung i H. N. Russel, prikazivao je ovisnost apsolutnog sjaja o spektralnom tipu zvijezde. Relaciju koja povezuje luminozitet L (ukupnu snagu zračenja) s

efektivnom temperaturom T i polumjerom R zvijezde dobivamo iz Stefan-Boltzmanova zakona:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4. \quad (2.1)$$

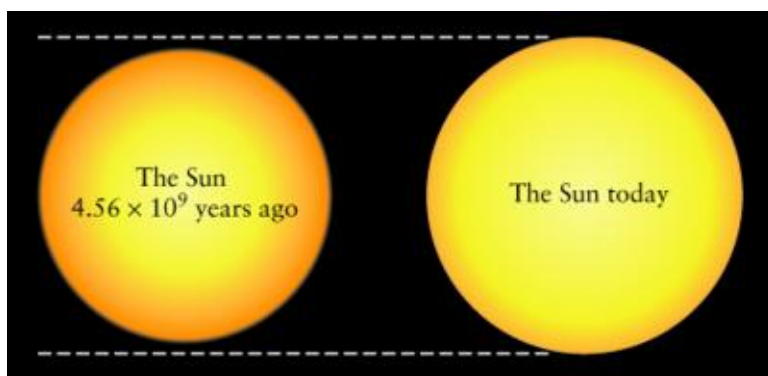
Većina od proizvoljno odabrane grupe zvijezda bit će smještena na glavnom nizu, karakteriziranog stabilnim zvijezdama u fazi gorenja vodika u jezgrama. Desno gore od glavnog niza, prema nižim temperaturama i višim luminozitetima, nalazi se grana crvenih divova, sljedeće važne faze u evoluciji zvijezde nakon napuštanja glavnog niza. Iznad nje, prema još većem luminozitetu, nalazi se grana superdivova koja se proteže preko cijelog raspona temperatura. Kod gornjeg kraja glavnog niza smještena je horizontalna grana, za zvijezde koje su u fazi gorenja helija u jezgri. Točno iznad grupe crvenih divova proteže se asimptotska grana divova, za crvene divove s jezgrom od ugljika i kisika, u kojima se fuzija preostalog helija odvija u jezgrinom omotaču. U području ispod glavnog niza nalazi se domena bijelih patuljaka, jedne od posljednjih faza razvoja zvijezda manjih masa. Ova je podjela i kategorizacija zvijezda u HR dijagramu prikazana na slici 2.2.



Slika 2.2. Općeniti izgled HR dijagrama s naznakama položaja glavnih zvjezdanih grupa. Spektralni tipovi zvijezda označeni slovima OBAFGKM (i između još brojevima 0-9) određeni su prema efektivnim temperaturama.

2.2.1. Evolucija zvijezda u HR dijagramu

Prema položaju zvijezde u dijagramu može se odrediti njezin evolucijski stadij. Iz faze protozvijezde, zvijezda pokretanjem nuklearnih reakcija započinje razvoj na glavnom nizu u točki koju određuje njezina masa (o kojoj ovisi i luminozitet i temperatura koju postigne), u području glavnog niza znanom kao ZAMS (zero age main sequence, glavni niz nulte starosti). Gorenje vodika u jezgri zvijezde, tj. faza glavnog niza traje najdulje u cjelokupnom razvoju zvijezde. Zvijezda se polako pomiče prema nešto većem luminozitetu tek kad potroši znatnu količinu vodika (slika 2.3). Promjene luminoziteta, rotacija i još neke pojave uzrokuju raspršenje zvijezda na glavnom nizu, tako da glavni niz nije linija, već ima izgled trake, s donje strane omeđene krivuljom ZAMS-a.



Slika 2.3. Sunce danas ima nešto veći polumjer i luminozitet nego prije 5 milijardi godina. Oko polovice zalihe vodika u jezgri Sunca je potrošeno.

Sljedeći stupanj u razvoju zvijezde je fuzija vodika u ljusci jezgre dok je jezgra od helija inertna. Zvijezda polako napušta glavni niz i prolazi fazu nestabilnosti, kada su česte pulsacije zvijezde i promjene sjaja. Kada se vodik potroši u tolikoj mjeri da više ne može zaustaviti tlak na jezgri, zvijezda postaje crveni div sažimanjem jezgre i širenjem vanjskih dijelova tako da površina zvijezde postaje mnogo veća i utoliko hladnija (crvenija). Sažimanje jezgre se odvija do trenutka kada elektronski plin postane degeneriran i spriječi daljnje urušavanje, dok temperatura jezgre i dalje može rasti. Ako dosegne 100 milijuna K, u jezgri počinje fuzija helijevih jezgri u ugljikove kroz trostruki alfa proces. Kako u jezgri-
nom omotaču još gori preostali vodik, površinska temperatura raste i zvijezda odlazi u horizontalnu granu divova. Kada se potroši i ukupna zaliha helija, jezgra zvijezde, većinom od ugljika i kisika, opet postaje degenerirani plin, a preostali helij gori u ljusci jezgre ispod ljuske od vodika. Vanjski dijelovi zvijezde opet se šire, temperatura pada i zvijezda odlazi

u asimptotsku granu crvenih divova. Da li će se doseći dovoljna središnja temperatura za fuziju ugljikovih jezgri ovisi o masi zvijezde.

Zvijezde manjih masa u asimptotskoj grani divova gube mnogo materijala zbog nastanka zvjezdanog vjetra koji otpuhuje vanjske slojeve atmosfere, što čini jezgru izloženom i efektivna temperatura raste. Na temperaturi od 30 000 K otpuhnuti oblak materijala sa zvijezde ioniziran je UV zračenjem i emitira svjetlost. To je faza planetarne maglice. Oblak materijala se naposljetku raspršuje, dok ogoljena degenerirana jezgra ostaje vrlo vruća, no malog polumjera, a time i mase i luminoziteta, te se polako hladi. U toj fazi zvijezda pripada grani bijelih patuljaka. Ova faza može potrajati milijarde godina sve dok zvijezda ne izgubi svoju energiju hlađenjem i postane kristalizirani crni patuljak, što označava kraj razvoja zvijezde manje mase. Zvijezde mase veće od 25 masa Sunca provode fuziju sve do željeza i svoju evoluciju završavaju kao supernove. Konačni rezultat je neutronska zvijezda ili crna rupa, ovisno o preostaloj masi.

2.2.2. HR dijagram zvjezdanog skupa

Umjesto prikaza HRD-a pomoću luminoziteta i efektivne temperature, za što ponajprije treba izračunati te dvije veličine, mogu se napraviti ekvivalentni dijagrami, npr. između boje i sjaja zvijezda (CMD, color-magnitude diagram). Osnovni indikator efektivne temperature zvijezde je njezina boja. Kako je zračenje zvijezde usporedivo zračenju crnog tijela, možemo iskoristiti Wienov zakon pomaka koji povezuje valnu duljinu maksimuma zračenja s temperaturom tijela, $\lambda_{\max} \propto T^{-1}$. Tako efektivna temperatura može biti reprezentirana razlikom sjaja zvijezde snimljenog kroz dva različita filtera koji propuštaju samo određene valne duljine, tj. pokazateljem (indeksom) boje. Uobičajen je B-V pokazatelj boje, razlika prividnog sjaja u B (blue, plavom) pojasu s efektivnom valnom duljinom 440 nm i V (visible, žuto-zelenom) pojasu efektivne valne duljine 550 nm. Što je B-V indeks veći, to je zvijezda crvenija, tj. niže efektivne temperature.

Ono što zapravo mjerimo je monokromatski tok zračenja sa zvijezde na udaljenosti r :

$$F_{\lambda} d\lambda = \frac{L_{\lambda}}{4\pi r^2} d\lambda, \quad (2.2)$$

ako pretpostavimo da nije bilo apsorpcije ni raspršenja svjetlosti na putu od izvora do detektora.

Kako razliku sjaja možemo izraziti kao:

$$m_B - m_V = -2,5 \log \frac{F_B}{F_V}, \quad (2.3)$$

slijedi da je indeks boje

$$B - V = -2,5 \log \frac{\int_0^\infty F_\lambda S_B d\lambda}{\int_0^\infty F_\lambda S_V d\lambda} + C_{B-V}, \quad (2.4)$$

gdje su S_B i S_V funkcije osjetljivosti B i V fotometrijskog pojasa, a $C_{B-V} = C_B - C_V$ razlika konstanti za pojase, čije su vrijednosti određene prema dogovoru da zvijezda Vega ima sjaj nulte magnitude kroz cijelu spektralnu raspodjelu. Integrali se mogu aproksimirati vrijednošću Planckove funkcije B_λ na efektivnoj valnoj duljini pomnoženoj sa širinom pojasa valnih duljina, pa jednadžbu (2.4) možemo pisati kao:

$$B - V = -2,5 \log \frac{B_{440} \Delta\lambda_B}{B_{550} \Delta\lambda_V} + C_{B-V}, \quad (2.5)$$

dok je Planckova funkcija zračenja crnog tijela

$$B_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}. \quad (2.6)$$

Ovo je samo aproksimacija, pošto stvarne zvijezde ne zrače kao idealno crno tijelo i $B - V$ indeks ovisan je o još nekoliko parametara, npr. metalicitetu. Također se moraju uzeti u obzir korekcije zbog međuzvjezdanog zacrvenjenja. Zbog prolaska zračenja kroz međuzvjezdanu prašinu, svjetlost manjih valnih duljina više se raspršuje od svjetlosti većih, što čini objekte crvenijima nego što zapravo jesu.

Umjesto luminoziteta možemo koristiti tok zračenja izmjeren, najčešće, kroz V pojas. Zvijezde istog skupa su približno na istoj udaljenosti od nas, pa možemo koristiti prividni sjaj promatranih zvijezda. No ukoliko su nam udaljenosti zvijezda poznate (tj. udaljenost skupa), koristimo skalu apsolutnog sjaja M_V definiranu izrazom:

$$M_V = m + 5 - 5 \log d, \quad (2.7)$$

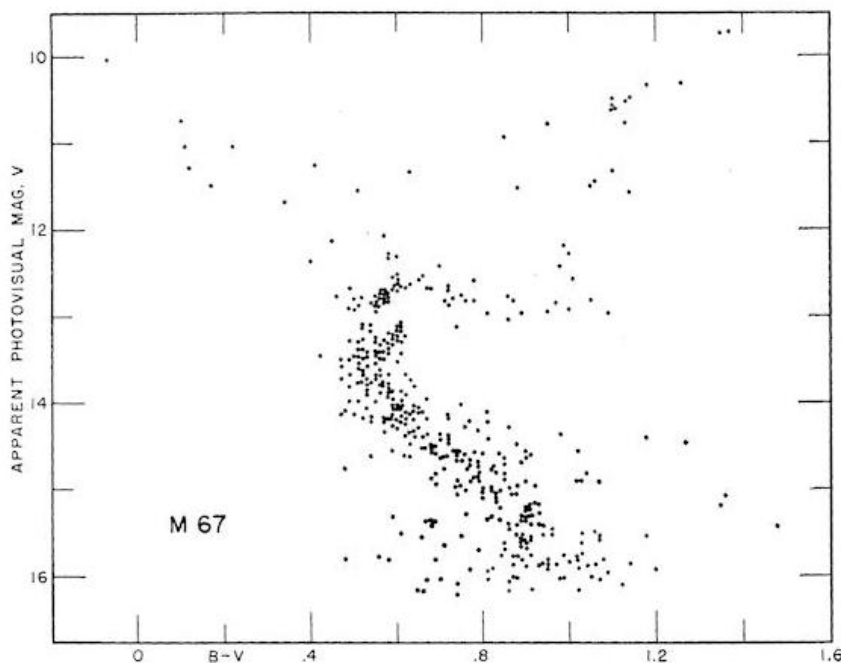
gdje je m prividni sjaj zvijezde izmjeren kroz V pojas, a d udaljenost u parsecima (pc).

Razlika prividnog i apsolutnog sjaja naziva se modul udaljenosti i često se koristi kao mjera udaljenosti do zvjezdanog skupa:

$$m - M_V = 5 \log \left(\frac{d}{10} \right). \quad (2.8)$$

Relaciju koja povezuje apsolutni sjaj i luminozitet možemo napisati u obliku:

$$M_V - M_{V\odot} = -2,5 \log \frac{L}{L_{\odot}}. \quad (2.9)$$

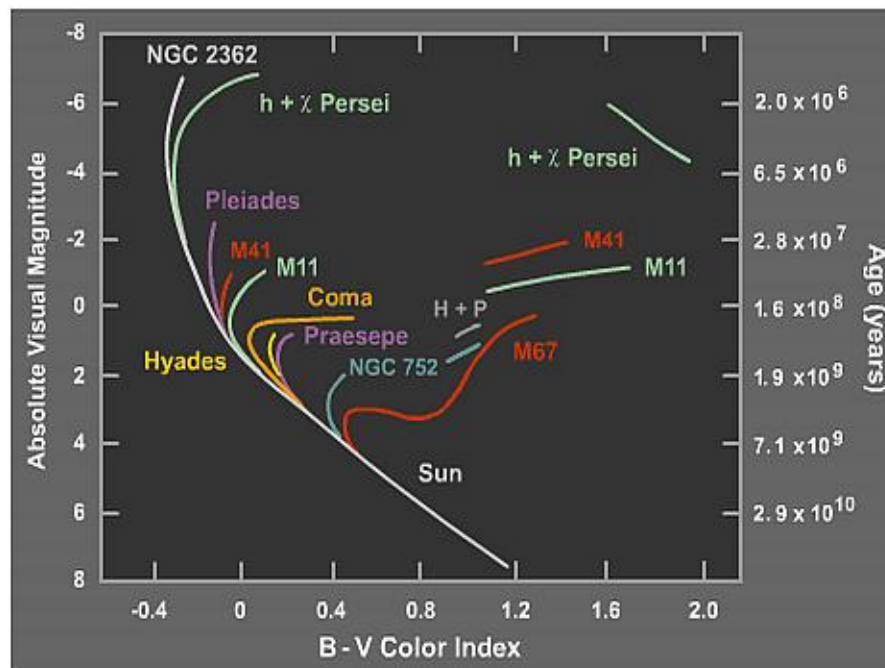


Slika 2.4. HR (CM) dijagram otvorenog zvjezdanog skupa M67. Jasno se vidi točka skretanja glavnog niza prema grani crvenih divova. Preuzeto iz *Astrophys. J.* (ApJ 1955_121_616).

CM dijagrami različitih skupova imat će sličan oblik, ali će biti pomaknuti u sjaju za iznose jednake razlikama u njihovoj međusobnoj udaljenosti. Može biti još i dodatnih pomaka zbog apsorpcije svjetlosti uzrokovane prolaskom zračenja kroz oblake plina i prašine i međuzvjezdanog zacrvenjenja. Primjer CM dijagrama zvjezdanog skupa prikazan je na slici 2.4.

Iako zvijezde veće mase imaju i više goriva na raspolaganju, one sagorijevaju vodik u jezgri mnogo brže te tako kraće ostaju na glavnom nizu nego zvijezde manjih masa. Što znači da će masivnija zvijezda u svakom trenutku biti na višem stupnju razvoja nego manje masivna zvijezda iste starosti. Prema tome možemo odrediti starost samog zvjezdanog

skupa. Zvijezde u skupu nastale su u približno isto vrijeme, te tako svaki skup ima definiranu svoju izohronu (krivulju iste starosti, ovisnu i o metalicitetu skupa). Za razliku od kuglastih zvjezdanih skupova, od kojih svi imaju vrlo kratak glavni niz i međusobno slične točke skretanja zbog velike starosti, otvoreni skupovi pokazuju različite izohrone u HR dijagramu. Ako se usporede, prema točkama skretanja glavnog niza jasno se razlikuju mlađi od starijih skupova. HR dijagram mladog skupa bit će sastavljen od zvijezda na glavnom nizu, dok će kod nešto starijeg biti vidljiv izostanak najmasivnijih zvijezda iz gornjeg dijela glavnog niza, a pojavit će se grana divova u koje su te zvijezde evoluirale. Još stariji skup imat će veću populaciju divova, a pojavit će se i bijeli patuljci u donjem lijevom dijelu dijagrama (ispod glavnog niza). Što je skup stariji, to će glavni niz biti kraći, a točka skretanja glavnog niza prema grani crvenih divova bit će izravni pokazatelj starosti skupa (slika 2.5). HR dijagrami se također često crtaju s logaritamskim veličinama, na primjer $\log T$ i $\log L/L_{\odot}$, te kao ovisnost efektivne temperature i površinskog gravitacijskog ubrzanja $\log g$.



Slika 2.5. HR dijagram s izohronama nekih otvorenih skupova. Što je točka skretanja glavnog niza niže, to je skup stariji. Hijade spadaju u srednje stare skupove.

3. Jednadžbe strukture zvijezda

Struktura zvijezda može se opisati s četiri diferencijalne jednadžbe. Rješenje tih jednadžbi daje model zvijezde, tj. promjenu fizikalnih veličina (mase, temperature, kemijskog sastava, opaciteta, elektronskog i plinskog tlaka) s polumjerom zvijezde.

Prva jednadžba unutarnje strukture zvijezda je **jednadžba hidrostatske ravnoteže**. Ona osigurava stabilnost zvijezde. Pretpostavimo li statičnu zvijezdu sferičnog oblika, hidrostatska ravnoteža znači da gravitacijsku silu koja djeluje prema središtu zvijezde, na bilo koji element mase u zvijezdi direktno poništava sila usmjerena prema van zbog gradijenta tlaka zvijezde,

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM_r \rho}{r^2}, \quad (3.1)$$

gdje je M_r masa unutar polumjera r , a ρ gustoća tvari. Derivacija je negativna jer tlak raste prema središtu zvijezde. Važno je napomenuti da se gustoća zvjezdane tvari također mijenja s polumjerom.

Druga fundamentalna jednadžba strukture zvijezda je zakon očuvanja mase. U sferno-simetričnoj zvijezdi gledamo tanku ljusku mase dM_r i debljine dr na udaljenosti $r \ll dr$ od središta, tako da je volumen ljuske $dV_r = 4\pi r^2 dr$. Ako je lokalna gustoća plina ρ , iz izraza koji povezuje gustoću, masu i volumen dobivamo **jednadžbu očuvanja mase**:

$$\frac{dM_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho. \quad (3.2)$$

Jednadžba pokazuje kako se masa mijenja s udaljenošću od središta zvijezde.

Stanje tvari u zvijezdi može se opisati jednadžbom stanja idealnog plina. To je pomoćna jednadžba koja povezuje tlak, gustoću i temperaturu. Tlak idealnog plina u termičkoj ravnoteži je $P = nkT$ za gustoću po prosječnoj masi čestica, $n = \rho/\bar{m}$. Ako definiramo srednju molekulsku masu kao omjer prosječne mase čestice i mase vodikovog atoma, $\mu = \bar{m}/m_H$, možemo pisati jednadžbu stanja plina:

$$P = \frac{\rho kT}{\mu m_H}. \quad (3.3)$$

Iako se krenulo od jednadžbe tlaka idealnog plina, ova jednadžba vrijedi za plin u zvijezdi. Stupanj ionizacije plina uključen je u srednju molekulsku masu, za čije izračunavanje treba poznavati relativni broj ionizacijskih stanja (Sahina jednadžba).

Za određivanje luminoziteta zvijezde potrebno je uzeti u obzir stvaranje i prijenos energije u zvijezdi. Doprinos luminozitetu može se povezati s ukupnom količinom energije stvorenoj po kilogramu u sekundi $\varepsilon = \varepsilon_{\text{nuklearna}} + \varepsilon_{\text{gravitacije}}$ koju stvara jedinična masa dm :

$$dL = \varepsilon dm . \quad (3.4)$$

S istim pretpostavkama kao za jednadžbu (3.2), luminozitet tanke radijalne ljuske u zvijezdi možemo napisati kao:

$$\frac{dL_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho \varepsilon , \quad (3.5)$$

gdje je L_r luminozitet zbog ukupne energije stvorene u unutrašnjosti polumjera r . Ovo je **jednadžba očuvanja energije** i treća osnovna jednadžba zvjezdane strukture.

Ono što nedostaje je jednadžba temperature T kao funkcije polumjera r . Ona je ovisna o načinu prijenosa energije iz unutrašnjosti do površine zvijezde. Energija u zvijezdi uglavnom se prenosi pomoću dva mehanizma: (1) zračenjem i (2) konvekcijom. Zračenje je prijenos energije fotonima i njihovim kretanjem kroz materijal zvijezde (apsorpcijom i ponovnom emisijom koji se ponavljaju mnogo puta do površine). Tako da učinkovitost zračenja ovisi o opacitetu. Konvekcija je prijenos energije miješanjem zvjezdanog materijala, kako se topliji plin uzdiže, a hladniji spušta. Vođenje topline (kondukcija) treći je način prijenosa i odnosi se na sudare čestica koji tako prenose kinetičku energiju. Ali kondukcija je zanemariva kroz veći dio razvoja zvijezde u usporedbi s druga dva načina prijenosa energije, zbog male gustoće plina u atmosferi zvijezde.

Za prijenos energije zračenjem, **jednadžba gradijenta temperature** glasi:

$$\frac{dT}{dr} = - \frac{3\kappa\rho}{16\sigma} \frac{L}{4\pi r^2 T^3} , \quad (3.6)$$

gdje je κ opacitet zvjezdane tvari, ρ gustoća, L luminozitet na udaljenosti r od središta zvijezde, σ Stefan-Boltzmanova konstanta $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$.

Za prijenos energije konvekcijom vrijedi jednadžba:

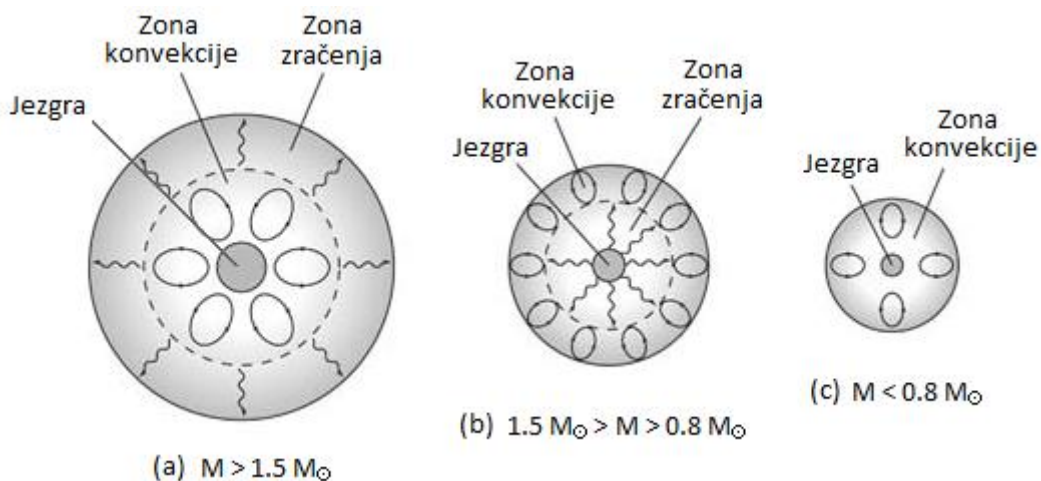
$$\frac{dT}{dr} = - \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) \frac{\gamma m_H}{k} \frac{GM_r}{r^2} , \quad (3.7)$$

gdje se pretpostavlja adijabatska promjena (plin koji putuje ne izmjenjuje toplinu s okolinom) i $\gamma = C_p/C_v$ omjer specifičnih toplina pri konstantnom tlaku i volumenu.

Zadnja jednačina vrijedi kada je:

$$\frac{d \ln P}{d \ln T} < \frac{\gamma}{\gamma - 1}$$

Za idealni monoatomni plin $\gamma = 5/3$. Prijenos energije konvekcijom događat će se u slučaju velikog opaciteta ili velike gustoće. Opacitet je vezan uz apsorpciju fotona. Zvijezde manjih masa imaju temperaturu vanjskih slojeva dovoljno nisku tako da vodik nije u ioniziranom stanju i lako apsorbira fotone visokih energija koji stižu iz unutrašnjosti. Znači da vanjski slojevi atmosfere imaju visoki opacitet, tako da je prijenos energije konvektivan. Za zvijezde veće mase, temperatura je viša i mnogo vodika je već ionizirano. Opacitet njihovih vanjskih slojeva je zbog toga manji i energija se kroz njih do površine prenosi zračenjem (slika 3.1).



Slika 3.1. Mehanički prijenos energije u zvijezdama različitih masa.

Drugačija je situacija u dubljim slojevima zvijezda, vezana uz proizvodnju energije i gradijent temperature. Zvijezde manjih masa proizvode energiju preko p-p lanca koji nije tako jako ovisan o temperaturi. U tom slučaju tok zračenja nije prevelik i energija u jezgri se može prenositi zračenjem. U zvijezdama jako malih masa prijenos je isključivo konvektivan. U jezgrama zvijezda većih masa energija se proizvodi CNO ciklusom s velikom ovisnošću u temperaturi i tok zračenja je vrlo jak. Zračenje nije dovoljno brzo za prijenos tolike energije i u unutrašnjosti zvijezde prevladava konvekcija. U masivnijim zvijezdama potrebno je obratiti pažnju na efekt prodiranja konvektivnog toka u više slojeve gdje prevladava zračenje (što se naziva 'overshooting'), koji može dodatno utjecati na luminozitet zvijezde.

3.1. Relacija masa-luminozitet

Uz kemijski sastav, najvažnija informacija koju možemo imati o nekoj zvijezdi je njezina masa. Russell-Vogtov teorem ističe da se iz samo te dvije informacije može izračunati sva ostala svojstva zvijezde. Iako je to pojednostavljeni prikaz, jer na svojstva zvijezde utječu i ostali parametri poput njezine rotacije i magnetizma, tvrdnja teorema je prilično točna. Način na koji će se zvijezda razvijati i mijenjati najviše ovisi o njezinoj početnoj masi, te postoje relacije koje povezuju polumjer, luminozitet, gustoću i temperaturu s masom.

Empirijska relacija između mase zvijezda i njihovih luminoziteta (ML relacija) vrijedi za zvijezde glavnog niza, znači one kojima u jezgri gori vodik, te predstavlja jedan od najvažnijih odnosa zvjezdanih parametara i temelj u stvaranju modela zvijezda. Prvi ju je predložio Arthur S. Eddington 1924. godine. Aproksimacija ovog odnosa može se izvesti jednostavnom analizom osnovnih jednadžbi koje opisuju unutrašnjost zvijezde. Ako pretpostavimo da se energija u zvijezdi prenosi isključivo zračenjem, temperatura će se s udaljenošću od središta mijenjati prema jednadžbi (3.6):

$$\frac{dT}{dr} = -\frac{3\kappa\rho}{16\sigma} \frac{L}{4\pi r^2 T^3}$$

Usporedimo li razliku između površine i središta zvijezde, iz gornje jednadžbe dobivamo

$$L \sim \frac{RT_c^4}{\kappa\rho} \quad (3.8)$$

za površinski luminozitet L , ukupni polumjer zvijezde R i temperaturu središta T_c , koja je neusporedivo veća od površinske temperature.

Iz jednadžbe očuvanja mase (3.2), dobivamo odnos mase i gustoće:

$$\rho \sim \frac{M}{R^3}. \quad (3.9)$$

Tako da izraz za luminozitet (3.8) možemo napisati kao

$$L \sim \frac{R^4 T_c^4}{M}, \quad (3.10)$$

uzevši i da je opacitet konstantan.

Zatim, iz jednadžbe hidrostatske ravnoteže (3.1), dobivamo da je tlak

$$p \sim \frac{M^2}{R^4}. \quad (3.11)$$

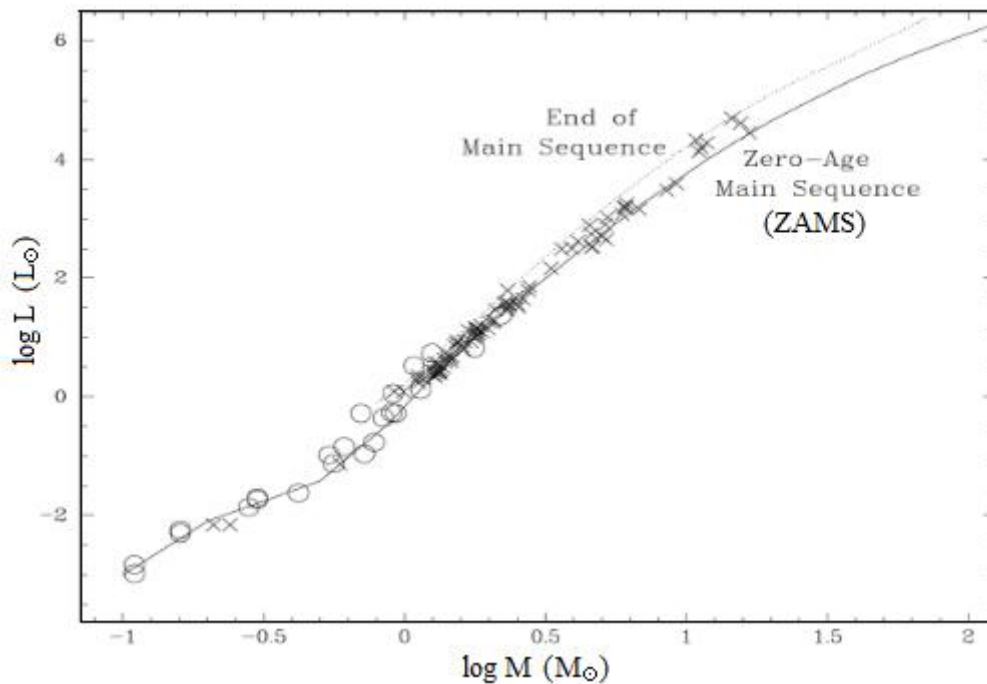
Uvedemo li pretpostavku da se zvjezdana tvar ponaša kao idealni plin, što znači $p \sim \rho T$, temperatura središta se može izraziti kao $T_c \sim M/R$. Uvrstimo li tu temperaturu u izraz (3.10), konačno dobivamo:

$$L \sim M^3. \quad (3.12)$$

Do izraza (3.12) vodi više aproksimacija, tako da realne zvijezde samo otprilike slijede tu relaciju. Izraz ovisi o načinu prijenosa energije i opacitetu zvijezde, što se mijenja s temperaturom koja opet ovisi o masi zvijezde. Tako da iz podataka dobivenih opažanjem zvijezda, pretpostavivši Sunčev kemijski sastav i uspoređujući s masom Sunca M_\odot , razlikujemo četiri relacije:

$$\begin{aligned} L &\sim M^{1,6}, M \approx 100 M_\odot \\ L &\sim M^{3,6}, 2 M_\odot < M < 20 M_\odot \\ L &\sim M^{4,5}, 0,5 M_\odot < M < 2 M_\odot \\ L &\sim M^{2,6}, 0,1 M_\odot < M < 0,5 M_\odot \end{aligned} \quad (3.13)$$

Zvjezdani parametri ponašaju se znatno drugačije kod zvijezda većih masa nego kod zvijezda manjih (Sunčevih) masa. Za veće mase ($M > 20 M_\odot$) ovisnost mase i luminoziteta postaje gotovo linearna, jer se tlaku idealnog plina pridodaje velik doprinos tlaka zračenja. Odnos mase i luminoziteta zvijezda s dobro određenim parametrima prikazan je na slici 3.2. Umjesto luminoziteta često se koristi skala apsolutnog vizualnog sjaja (jednadžba 2.9).



Slika 3.2. Odnos mase i luminoziteta kakav predviđaju zvjezdani modeli za zvijezde ZAMS-a (puna krivulja) i zvijezde pri kraju sagorijevanja vodika u jezgri (točkasta krivulja). Usporedba s dobivenim podacima od vizualnih dvojnih (krugovi) i spektroskopskih dvojnih zvijezda (križići).

3.2. Mase zvijezda

Mase zvijezda mogu se kretati u rasponu od 0,08 do oko 150 Sunčevih masa. Donja granica je oko $0,08 M_{\odot}$, jer zvijezda s još manjom masom ne može postići dovoljnu središnju temperaturu za pokretanje fuzijskih reakcija u jezgri i tako nikad neće dospjeti na glavni niz. Takvi objekti se nazivaju smeđi patuljci. Iako se prvotno smatralo da je gornja granica mase zvijezde oko $80 M_{\odot}$ (Eddingtonova granica) i da bi iznad nje tlak zračenja bio prejak da gravitacija održi zvijezdu stabilnom, postoje mehanizmi u zvijezdi koji se mogu oduprijeti tom efektu, prvenstveno zbog kemijskog sastava. Tako su otkrivene i zvijezde mase veće od $100 M_{\odot}$ (najveći superdivovi), iako se toliko masivne zvijezde mogu smatrati nestabilnima jer zbog snažnog zvjezdanog vjetra gube veliki udio mase (zvijezda s početnom masom od $120 M_{\odot}$ će tokom razvoja tako izgubiti oko 40% mase) i evoluiraju vrlo brzo. Uobičajene mase zvijezda glavnog niza kreću se do otprilike $60 M_{\odot}$.

Tablica 3.1. Karakteristike zvijezda različitih masa i vrijeme života na glavnom nizu (τ_{ms}). Zvijezda će tokom boravka na glavnom nizu vremenom malo promijeniti spektralni razred, jer će joj se smanjiti efektivna temperatura, a povećati polumjer i luminozitet. Ne vrijedi za zvijezde manjih masa.

Masa (M_{\odot})	τ_{ms}	Početak na glavnom nizu				Kraj na glavnom nizu			
		T_{eff} (K)	Spektralni tip	$\log L/L_{\odot}$	Radius (R_{\odot})	T_{eff} (K)	Spektralni tip	$\log L/L_{\odot}$	Radius (R_{\odot})
$120 M_{\odot}$	2.56 Mgod	53 300	O3 V	+6.25	16	32 900	O9 I	+6.34	48
$60 M_{\odot}$	3.45 Mgod	48 200	O4 V	+5.73	10	12 000	B7 I	+5.99	230
$25 M_{\odot}$	6.51 Mgod	37 900	O8 V	+5.29	6.5	29 000	B0 I	+5.29	18
$12 M_{\odot}$	16.0 Mgod	28 000	B0.2 V	+4.01	4.3	24 400	B0.5 I	+4.46	9.5
$5 M_{\odot}$	94.5 Mgod	17 200	B5 V	+2.74	2.7	15 100	B5 I	+3.15	5.5
$2.5 M_{\odot}$	585 Mgod	10 700	B9 V	+1.60	1.8	9000	A2 III	+1.92	3.8
$1.25 M_{\odot}$	4.91 Ggod	6380	F5 V	+0.32	1.2	6070	G0 V	+0.66	1.9
$1.0 M_{\odot}$	9.84 Ggod	5640	G8 V	-0.16	0.9	5790	G2 V	+0.22	1.3
$0.8 M_{\odot}$	25.0 Ggod	4860	K2 V	-0.61	0.7	5360	K0 V	-0.09	1.1
$0.5 M_{\odot}$	100 Ggod	3890	M0 V	-1.42	0.4	—	—	—	—
$0.2 M_{\odot}$	4000 Ggod	3300	M4 V	-2.2:	0.2	—	—	—	—
$0.1 M_{\odot}$	10 000 Ggod	2900	M7 V	-3.0:	0.1	—	—	—	—

4. Dvojne zvijezde

Zvijezde nastaju u skupinama u međuzvjezdanim molekulskim oblacima. Zbog toga nije neuobičajeno da formiraju gravitacijski povezane dvojne ili višestruke zvjezdane sustave. Procijenjeno je da se barem 50% zvijezda u našoj galaksiji nalazi u dvostrukim, trostrukim ili još složenijim sustavima. Dvojni sustav sastoji se od dvije zvijezde koje se u eliptičnoj putanji kreću oko zajedničkog centra mase i može se opisati Keplerovim zakonima gibanja. Ovakvi sustavi vrlo su bitni za mnoga istraživanja, izgradnju modela, proučavanje dinamike zvijezda i provjere fizikalnih parametara jer pružaju mogućnosti izračuna brojnih zvjezdanih svojstava. Mase pojedinih zvijezda mogu se, bez upotrebe neke dodatne kalibracije preko CM dijagrama ili *ML* relacije, izračunati jedino kod dvojnih zvijezda pomoću elemenata njihove orbite. Za proučavanje evolucije zvijezda koristi se prednost dvojnih zvijezda jer obje komponente imaju istu starost. Korisne su i za kalibriranje skale kozmičkih udaljenosti.

Dvojne sustave zvijezda općenito dijelimo na:

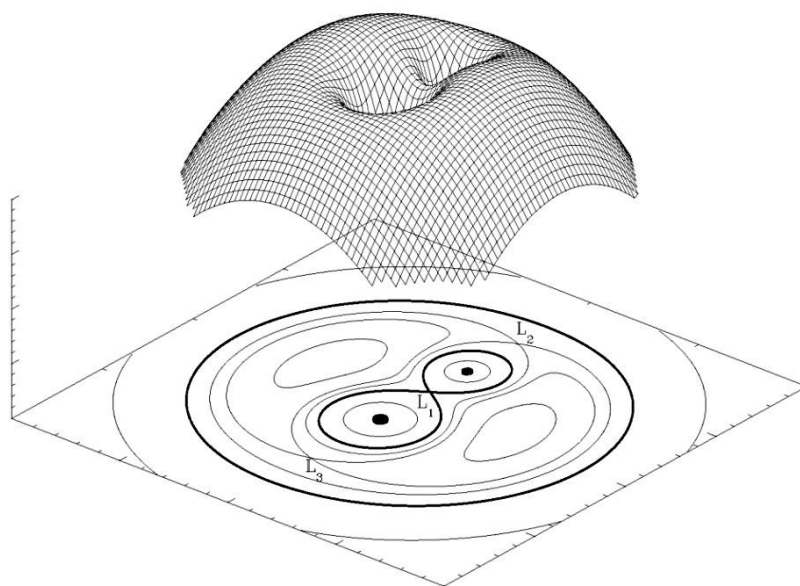
- **Vizualne dvojne zvijezde** – one čije komponente možemo vizualno razlučiti teleskopom ili interferometrijski, te ako možemo izmjeriti orbitu, možemo dobiti svojstva sustava;
- **Astrometrijske dvojne zvijezde** – samo jedna komponenta sustava je vidljiva te uočavamo njezine pravilne pomake na nebu, što znači da ima pratioca kojeg ne možemo vidjeti (mnogo manjeg sjaja nego primarna komponenta);
- **Spektroskopske dvojne zvijezde** – komponente ne možemo prostorno razlučiti, no njihovo orbitalno gibanje otkriva Dopplerov pomak spektralnih linija u spektru izvora.

Gledajući orijentaciju sustava s obzirom na Zemlju, imamo još **pomrčinske dvojne sustave** u kojima se zvijezde gibaju tako da s vremenom zaklanjaju jedna drugu potpuno, djelomično ili prstenasto, ovisno o veličini zvijezda i kutu inklinacije orbitalne ravnine i doglednice. Otkriva ih periodička promjena sjaja, tj. svjetlosna krivulja karakteristična za dvojni sustav (za razliku od krivulja zvijezda promjenjivog sjaja).

Na nebu se također mogu uočiti zvijezde koje su prividno blizu jedna drugoj i liče na vizualni dvojni sustav, gledajući sa Zemlje. No u stvarnosti te zvijezde mogu biti posve

neovisne i van međusobnog gravitacijskog utjecaja. Takve zvijezde nazivaju se optičke dvostruke, iako zapravo ne pripadaju dvojnim sustavima.

Morfološka podjela bliskih dvojnih zvijezda razlikuje odvojene, poluodvojene i kontaktne sustave (slika 4.2). Ovdje bitnu ulogu igra ekvipotencijalna površina oko svake zvijezde koja označava granicu volumena u kojem dominira gravitacijsko privlačenje te zvijezde i zove se Rocheova ovojnica (slika 4.1). Prijelaz materijala s jedne zvijezde na drugu može se dogoditi preko spojnice zvjezdanih ovojnica, ako zvijezda veličinom ispuni taj volumen. Veličina Rocheovih ovojnica ovisi o masi komponenata i njihovoj međusobnoj udaljenosti.

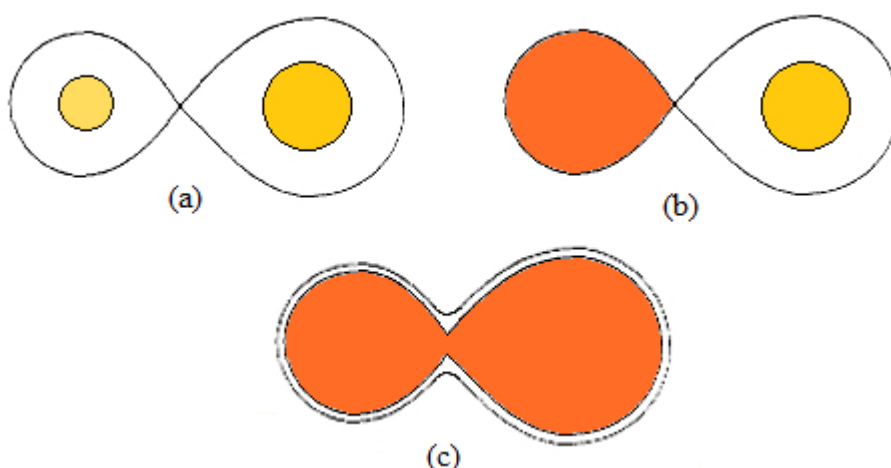


Slika 4.1. Primjer 3D Rocheovog potencijala, čije projekcije daju Rocheove ovojnice u dvojnog sustavu s omjerom masa 2:1 i tri Lagrangeove točke u kojima se sve sile poništavaju.

U slučaju odvojenog sustava zvijezde su unutar svojih Rocheovih ovojnica i sferičnog su oblika (ne računajući distorziju zbog vlastite rotacije). Kod poluodvojenog sustava jedna zvijezda ispunjava svoju Rocheovu ovojnicu i pojavljuju se izobličenja zvijezde zbog gravitacijskog utjecaja druge komponente, pa zvijezda može gubiti materijal kroz unutarnju Lagrangeovu točku L_1 (npr. dvojne zvijezde tipa Algol i kataklizmičke dvojne zvijezde). U kontaktnom sustavu obje komponente su veće od svojih ovojnica i interagiraju tako da čine sustav zajedničke ovojnice (npr. W UMa dvojne zvijezde). Za stabilnost ovakvih sustava potrebna je kružna orbita i sinkronizirana rotacija zvijezda. Specijalni slučaj je dvostruki kontakt, kada obje zvijezde točno ispunjavaju svoje Roche-

ove ovojnice (na periastronu) i kada se mogu ostvariti nesinkronizirane rotacije, a putanja može biti ekscentrična.

Pošto zvijezde tokom svog razvoja mogu znatno promijeniti veličinu, moguće je da bliski odvojeni sustav evoluiru u djelomično odvojeni ili kontaktni (npr. ako zvijezda ispunji ovojniciu kao crveni div).

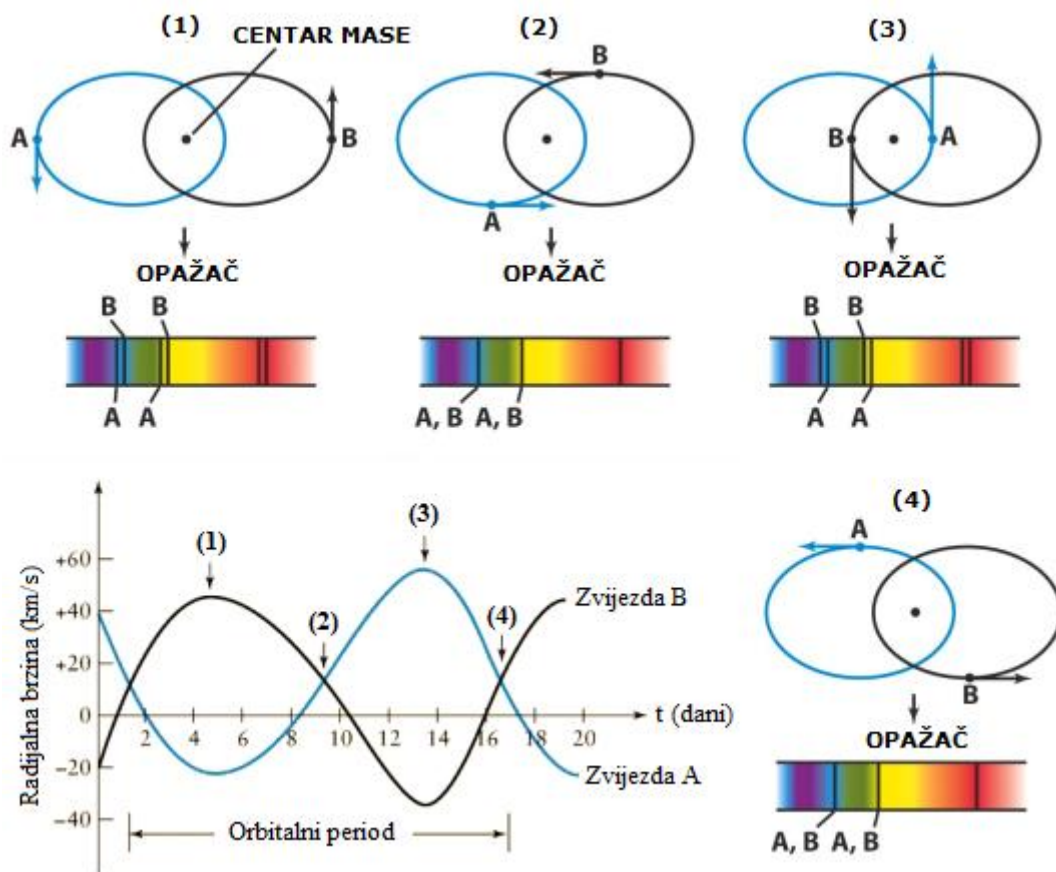


Slika 4.2. Bliski dvojni sustavi: (a) odvojeni sustav, obje zvijezde su unutar Rocheovih ovojnica; (b) poluodvojeni sustav, jedna zvijezda ispunjava svoju Rocheovu ovojniciu i materijal može prelaziti na drugu zvijezdu; (c) kontaktni sustav zajedničke ovojnice.

4.1. Spektroskopske dvojne zvijezde

Dvojne zvijezde otkrivene pomoću Dopplerovog pomaka apsorpcijskih linija jedne ili obje zvijezde u spektru nazivaju se spektroskopski dvojni sustavi. Opaženi pomaci rezultat su kombinacije radijalne brzine centra mase sustava i orbitalnog gibanja komponenti oko njega, kako se od nas približavaju ili udaljavaju (slika 4.3). Ako su zvijezde sličnog luminoziteta vidjet ćemo linije obje zvijezde u kompozitnom spektru i pomake koje možemo mjeriti (dvolinijski sustav, SB2). Ako su vidljive linije samo jedne komponente (u slučaju da je jedna zvijezda mnogo sjajnija od druge), govori se o jednolinijskom sustavu (SB1).

Periodi sustava kreću se u velikom rasponu, u skali od sata do godina. Neke podgrupe imaju vrlo kratke periode, te su komponente mnogo bliže jedna drugoj nego kod većine vizualnih dvojnih zvijezda, čiji periodi se mjere u nekoliko ili više godina.

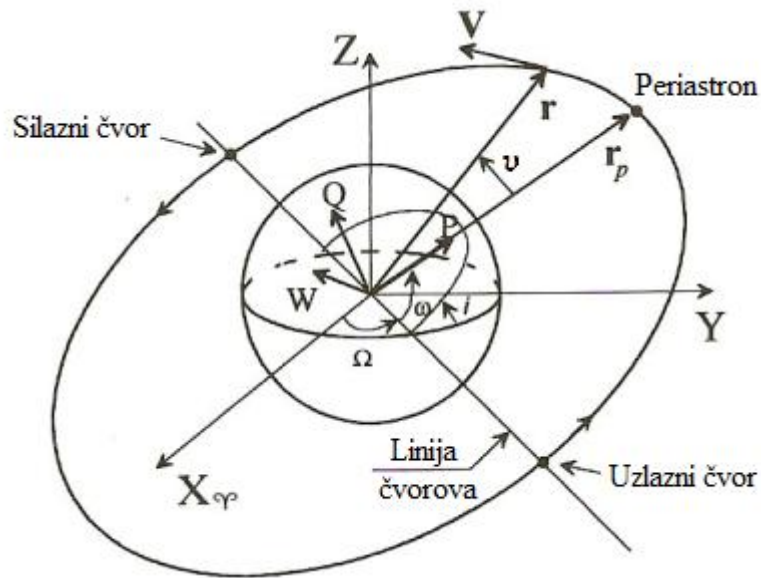


Slika 4.3. Spektroskopski dvojni sustav SB2. Dopplerovi pomaci apsorpcijskih linija obje zvijezde u spektru sustava i krivulje radijalnih brzina s naznačena 4 ključna trenutka orbitalnog gibanja.

Određivanje masa zvijezda najpouzdanije je u slučaju odvojenog dvojnog sustava, koji je dvolinijski i još k tome pomrčinski. U tu svrhu trebamo izračunati orbitalne elemente tog sustava. Prvo je najvažnije odrediti period P . Podaci se uobičajeno sastoje od niza spektroskopskih mjerenja radijalne brzine jedne ili obje zvijezde u različitim vremenima, te se iz dovoljnog broja podataka može izračunati period. Zatim se odredi faza $\phi = (t - t_0)/P$, gdje je t_0 referentno vrijeme. Tada je moguće nacrtati krivulju brzina, koju koristimo u određivanju ostalih elemenata orbite (tablica 4.1). Elementi orbite prikazani su na slici 4.4.

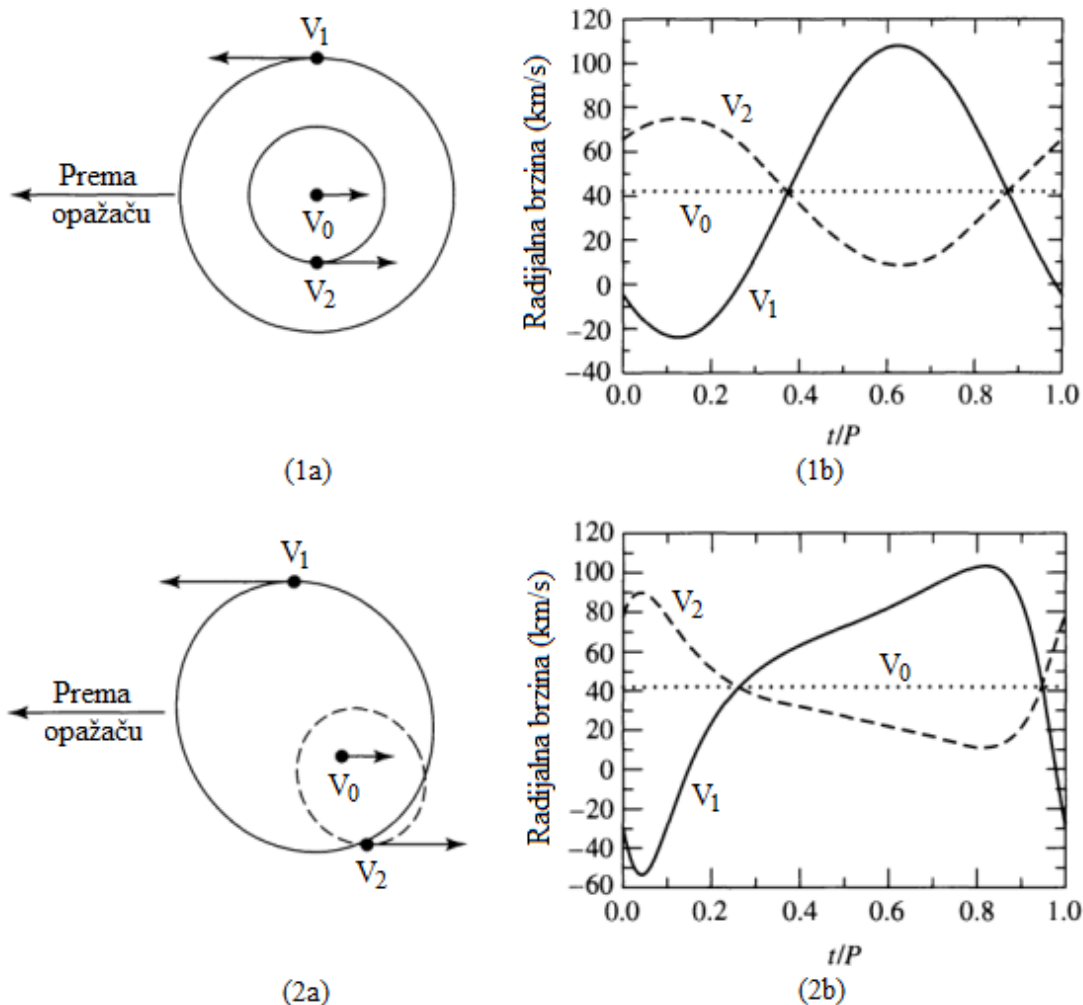
Tablica 4.1. Elementi koji određuju orbitu sustava

Element orbite	Opis
Ω	Duljina čvora, točka orbite u kojoj udaljavajuća zvijezda prijeđe ravninu neba
i	Kut inklinacije orbite, $i = 0^\circ$ u ravnini neba
ω	Argument periastrona, kut između smjera uzlaznog čvora i smjera periastrona
e	Ekscentricitet orbite, omjer udaljenosti fokusa i velike osi orbite
a	Velika poluos orbite
P	Orbitalni period
T	Vrijeme prolaska obje zvijezde kroz točku periastrona



Slika 4.4. Prikaz elemenata orbite za dvojni sustav. Opažač je u smjeru z-osi, a primarna komponenta u središtu koordinatnog sustava. Liniju čvorova definiraju točke sjecišta orbitalne i tangencijalne ravnine.

Oblik krivulje radijalnih brzina uvelike ovisi o ekscentricitetu i orijentaciji orbite s obzirom na opažača (slika 4.5). Kut inklinacije i je kut između orbitalne i tangencijalne ravnine (ravnine neba). O njemu ovisi poluamplituda radijalne brzine, ali ne i njezin oblik.



Slika 4.5. Orbite i radijalne brzine dvojnog sustava s masama zvijezda $M_1 = 1 M_\odot$ i $M_2 = 2 M_\odot$, orbitalnim periodom $P = 30$ dana i radijalnom brzinom centra mase $V_0 = 42$ km/s za dva slučaja: (1a) kružna orbita $e = 0$ s kutom $\omega = 0^\circ$ daje radijalne brzine sinusoidalnog oblika (1b); (2a) eliptična orbita s $e = 0,4$ i orijentacijom $\omega = 45^\circ$ daje izobličene krivulje brzina (2b).

Mase zvijezda u dvojnog sustavu moguće je dobiti pomoću sljedećih dviju jednadžbi. Iz 3. Keplerova zakona možemo izračunati sumu masa zvijezda:

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{G}{4\pi^2} (M_1 + M_2), \quad (4.1)$$

gdje je M_1 masa primarne, a M_2 sekundarne komponente, a velika poluos orbite. Želimo li gledati orbite svake zvijezde u odnosu na centar mase, pišemo zbroj velikih poluosi staza obje zvijezde $a = a_1 + a_2$ te iz momenata slijedi druga jednadžba, koja daje omjer masa:

$$q = \frac{M_2}{M_1} = \frac{a_1}{a_2} = \frac{K_1}{K_2}, \quad (4.2)$$

gdje su K_1 i K_2 poluamplitude radijalnih brzina komponente 1 i 2, za koje vrijedi:

$$K_j = \frac{2\pi a_j \sin i}{P\sqrt{(1-e^2)}}, j = 1, 2. \quad (4.3)$$

Jednadžba radijalne brzine komponente j dvojnog sustava je

$$V_j = V_0 + K_j [e \cos \omega + \cos(v + \omega)], \quad (4.4)$$

gdje je v prava anomalija (kut između smjera pericentra i smjera tijela u eliptičnoj orbiti, s vrhom u bližem žarištu), a V_0 brzina centra mase sustava. Kad imamo krivulju brzine možemo lako izračunati poluamplitudu. Uzmimo krivulju brzine komponente 1. Razlika maksimalne i minimalne radijalne brzine je:

$$V_{\max} - V_{\min} = V_0 + K_1(e \cos \omega + 1) - V_0 - K_1(e \cos \omega - 1) = 2K_1. \quad (4.5)$$

Isto vrijedi za komponentu 2. Znači ukoliko imamo SB2 sustav, možemo izračunati omjer poluamplituda, tj. omjer masa. Također se iz krivulja radijalnih brzina može odrediti V_0 (površine krivulje brzine ispod i iznad vrijednosti brzine centra mase moraju biti jednake). Iz izraza za brzine (4.5) možemo dobiti

$$e \cos \omega = \frac{V_{\max} + V_{\min}}{2K_1}, \quad (4.6)$$

dok kut ω i ekscentricitet e zasebno računamo usporedbom s teorijskim krivuljama. Iz izraza (4.3) tada imamo $a_1 \sin i$.

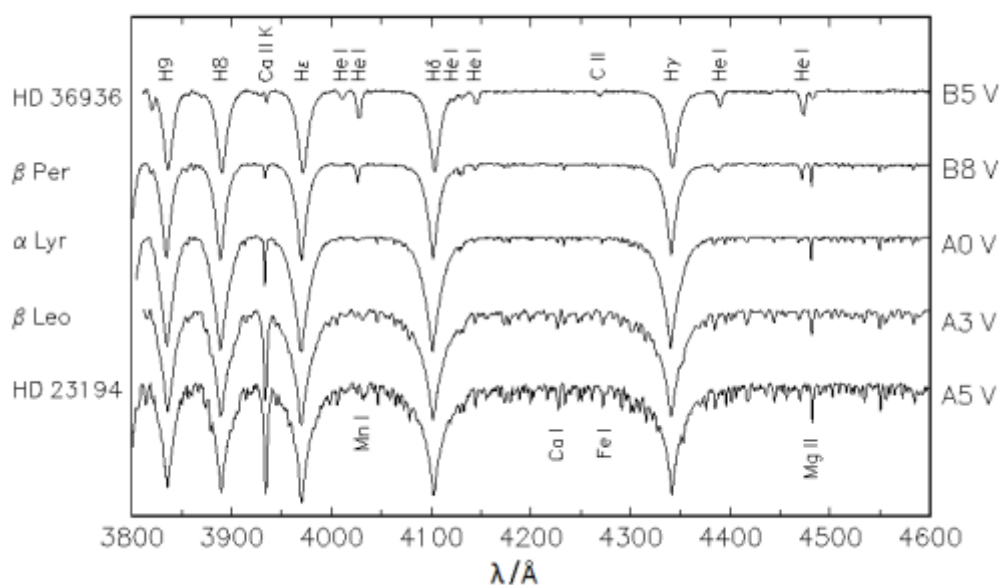
Bitno je poznavati kut inklinacije orbite, koji se treba odrediti iz fotometrijskih ili interferometrijskih mjerenja. Tada možemo odrediti $a = a_1 + a_2$ i zatim zbroj masa. Ukupna masa proporcionalna je a^3 , tj. K^3 tako da je važno što točnije odrediti te parametre, jer će greška u masi biti tri puta veća.

Ukoliko imamo jednolinijski SB1 sustav, nećemo moći dobiti ukupnu masu, ali može se definirati funkcija mase komponente 2 čije linije u spektru ne vidimo:

$$f(M_2) = \frac{M_2^3 \sin^3 i}{(M_1 + M_2)^2} = 1,0385 \times 10^{-7} (1 - e^2)^{3/2} K_1^3 P \quad (4.7)$$

koja daje donju granicu za masu M_2 , ali samo ako znamo M_1 ili omjer masa iz nekog drugog izvora.

Iz spektroskopskih mjerenja još možemo dobiti neke osnovne parametre, usporedbom mjerenoga sa sintetičkim spektrom metodom korelacije. Iz maksimuma spektralne energetske raspodjele te pojave i jačine određenih spektralnih linija može se odrediti efektivna temperatura T_{eff} (slika 4.6). Iz oblika spektralnih linija određuje se površinsko gravitacijsko ubrzanje, uobičajeno izraženo kao $\log g$, dok se iz prisutnosti linija metala X (svi elementni teži od helija) i njihove jačine može izmjeriti metalicitet $[X/H]$ najčešće izražen prema Sunčevom metalicitetu. Ukupni metalicitet je teško odrediti, pa ga se često procjenjuje pomoću zastupljenosti željeza $[Fe/H]$ koju je najlakše mjeriti, s obzirom na sveprisutnost linija željeza u spektrima zvijezda.

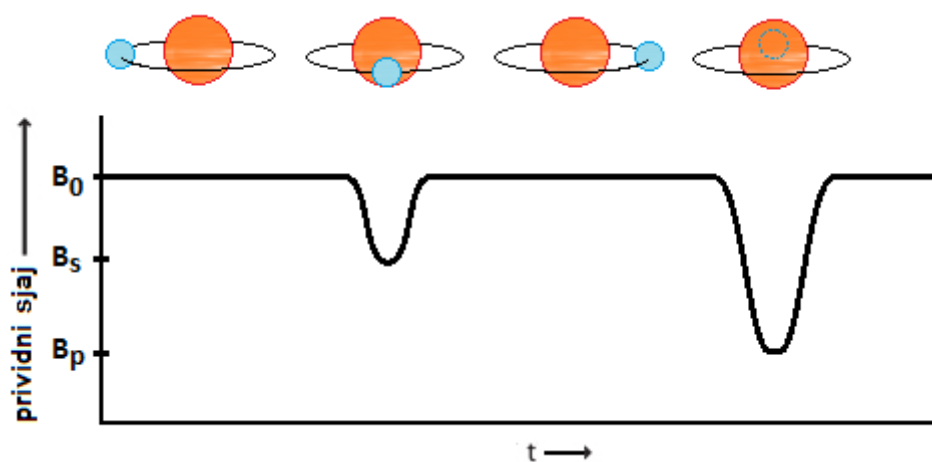


Slika 4.6. Dio spektra zvijezda glavnog niza različitih spektralnih tipova i ovisnost spektra o efektivnoj temperaturi. Vidi se nestanak linija helija i pojava sve izraženijih linija metala na nižim temperaturama. Ustupio R. O. Gray.

Određivanje što točnijih parametara u dvojnog sustavu glavni je problem, pošto SB2 sustav daje kompozitni spektar iz kojeg se trebaju dobiti rješenja za dvije komponente. Znači, želimo na neki način rastaviti (raspetljati) ta dva spektra da ih možemo analizirati odvojeno. Također, ograničenje spektroskopskih mjerenja je što nam Dopplerov pomak daje brzine komponenti u našem smjeru promatranja, dok su prave radijalne brzine ovisne o inklinaciji orbite. No kut između ravnine neba i orbitalne ravnine može se odrediti iz interferometrijskih mjerenja ili iz pomrčina, u slučaju pomrčinskih dvojnog sustava.

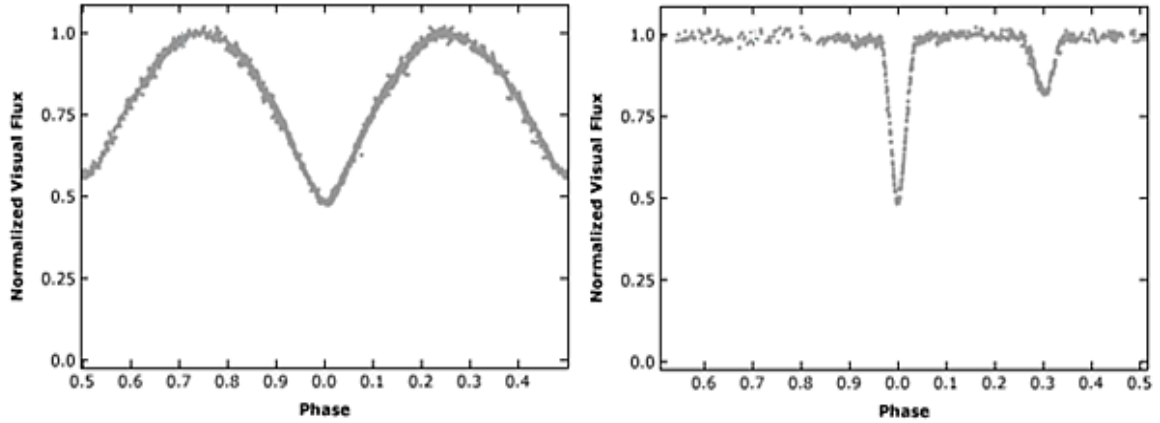
4.2. Pomrćinske dvojne zvijezde

Dvojne zvijezde čija je orbita orijentirana tako da uočavamo periodičko zaklanjanje jedne zvijezde drugom nazivamo pomrćinske dvojne zvijezde. Ovakvi sustavi daju najbolje rezultate u određivanju masa, luminoziteta te polumjera zvijezda. Najčešće se uočavaju obje pomrćine (slika 4.7), a oblik krivulje sjaja ovisi o vrsti pomrćina. Ako se zvijezde preklapaju samo djelomično, uočit će se karakteristični V oblik pomrćina u krivulji sjaja. Ako imamo potpuno prekrivanje jedne zvijezde drugom, oblik pomrćine bit će više pravokutnog oblika, jer će sjaj za vrijeme pomrćine biti konstantan sjaj samo jedne zvijezde. Slično vrijedi za prstenastu pomrćinu, kada manja zvijezda prelazi preko diska veće. Dubina i širina krivulje pomrćina ovisi o veličini zvijezda i omjeru njihovih efektivnih temperatura, te još nekoliko mogućih efekata (refleksija, gravitacijsko zatamnjenje, pojava površinskih pjega).



Slika 4.7. Pomrćinski dvojni sustav s većom i hladnijom te manjom, vrućom zvijezdom i jednostavni prikaz svjetlosne krivulje. Veći pad u sjaju uzima se kao primarna pomrćina, u ovome slučaju to je potpuna pomrćina manje zvijezde većom.

Izgled svjetlosne krivulje ovisit će i o morfološkom tipu dvojnog sustava (slika 4.8). Ukoliko imamo odvojeni pomrćinski sustav (dEB, detached eclipsing binary), između pomrćina postojat će vrijeme konstantnog sjaja i minimumi će biti potpuno odvojeni. U slučaju kontaktnog dvojnog sustava (cEB, contact eclipsing binary), svjetlosna krivulja više sliči sinusoidi, iako dubine pomrćina ne moraju biti iste.



Slika 4.8. Primjeri svjetlosnih krivulja pomrćinskih dvojnih sustava. *Lijevo:* kontaktni sustav AW Lacertae s dvije mlade masivne zvijezde sličnih temperatura, A0 i B tipa, kružne orbite i orbitalnim periodom od 1,14 dana, s primarnim i sekundarnim minimumom gotovo iste dubine. *Desno:* odvojeni sustav V477 Cygni s dvije zvijezde Sunčevih masa F i G tipa, ekscentrične orbite te periodom od 29,2 dana. Manji, sekundarni minimum označava totalnu pomrčinu manje i hladnije zvijezde većom i sjajnijom komponentom.

Pomrćinske dvojne su također i spektroskopske zvijezde. U tom slučaju može se lako odrediti kut inklinacije orbite na tangencijalnu plohu iz analize svjetlosne krivulje. Naravno, najbolja će situacija biti ako je $i \approx 90^\circ$, jer će pomrčine biti najdublje i $\sin i$ velik, te ako je orbita gotovo kružna $e \approx 0$, jer se kod eliptičnih orbita može dogoditi da se pomrčina dogodi na apastronu i bude vrlo slabo vidljiva. Srećom, kod bliskih dvojnih sustava orbite su zbog međusobnog utjecaja zvijezda često skoro kružne. Iz svjetlosne krivulje također se može odrediti period. Tako da iz SB2 pomrćinskog sustava možemo dobiti sve parametre potrebne za izračun masa zvijezda. Uz poznate brzine gibanja zvijezda i periode može se odrediti iznos opsega orbite, što u kombinaciji s trajanjem pomrčina daje apsolutne iznose polumjera zvijezda.

Želimo li dobiti omjer efektivnih temperatura, pretpostavimo da zvijezde zrače kao crna tijela i da nema efekta rubnog zatamnjenja. Površinski tok zračenja sa zvijezde je

$$F = \sigma T^4. \quad (4.8)$$

Izvan pomrčine detektiramo svjetlost obje zvijezde. Pretpostavimo sustav kao na slici 4.7, pa za ukupni sjaj vrijedi:

$$B_0 = k\pi R_1^2 F_1 + k\pi R_2^2 F_2, \quad (4.9)$$

gdje je k konstanta ovisna o udaljenosti do sustava, utjecaju prašine i plina između detektora i sustava te o svojstvima samog detektora, a R_1 i R_2 su polumjeri komponenata

sustava. Neka je komponenta 1 veća i hladnija zvijezda. Pri primarnoj pomrčini vidimo samo prvu komponentu, pa je sjaj:

$$B_p = k\pi R_1^2 F_1 . \quad (4.10)$$

Kada nastupi sekundarni minimum, imamo:

$$B_s = k(\pi R_1^2 - \pi R_2^2)F_1 + k\pi R_2^2 F_2 . \quad (4.11)$$

Ako označimo dubinu primarne pomrčine kao $D = B_0 - B_p$ i sekundarne kao $d = B_0 - B_s$ iz gornjih izraza slijedi:

$$\frac{D}{d} = \frac{F_2}{F_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^4 . \quad (4.12)$$

Znači da nam je za omjer efektivnih temperatura komponenata potreban samo omjer dubina pomrčina, u ovoj aproksimaciji s primjerom totalne i prstenaste pomrčine.

5. Wilson-Devinney metoda

5.1. Wilson-Devinney program

Wilson-Devinney (WD) program je program za analizu krivulja sjaja i radijalnih brzina dvojnih zvijezda. R. E. Wilson i E. J. Devinney (1970) razvili su kompjuterski kod koristeći opis komponenata u dvojnog sustavu pomoću Rocheovih potencijala. Kod je od tada prošao više ažuriranja i nadogradnji. Danas je najčešće korišten kod za fotometrijsku obradu dvojnih sustava jer ima mogućnost analize raznih vrsta dvojnih zvijezda (odvojene, poluodvojene, kontaktne, sustave s izvorom X-zračenja itd.). Također je našao primjenu u analizi planeta drugih zvijezda.

Sastoji se od dva glavna programa: LC (Light Curve) za generiranje svjetlosne krivulje, krivulje radijalnih brzina i profila spektralnih linija, te DC (Differential Corrections) programa za prilagodbu krivulje sjaja i brzina metodom najmanjih kvadrata. Iz zadanih parametara program modelira svjetlosnu krivulju koja odgovara podacima, a zatim program za diferencijalne korekcije poboljšava parametre krivulje kroz niz iteracija. Cilj je smanjiti odstupanja između teorijske i opažene svjetlosne krivulje. Program daje rješenje u obliku skupa parametara koji definiraju i opisuju svjetlosnu krivulju koja najbolje odgovara opaženoj (rješenje s najmanjim odstupanjem).

Program uključuje više od 30 parametara. Parametri se po potrebi mogu fiksirati ili ostati slobodni za prilagodbu. Ulazni parametri programa bit će objašnjeni u poglavlju 7.4.

5.2. Model svjetlosne krivulje

Wilson-Devinney metoda za računanje svjetlosne krivulje opisuje površine komponenata dvojnog sustava pomoću Rocheovih ekvipotencijalnih ploha, definiranih kao:

$$\Omega(\mathbf{r}; q, F, d) = \frac{1}{r} + q \left[\frac{1}{\sqrt{d^2 - 2d\lambda r + r^2}} - \frac{\lambda r}{d^2} \right] + \frac{1+q}{2} F^2 r^2 (1 - v^2), \quad (5.1)$$

gdje je $q = M_2/M_1$ omjer masa komponenata, $F = \omega_1/\omega$ omjer kutne brzine rotacije zvijezde 1 i kutne brzine orbitalnog gibanja (faktor nesinkronizirane rotacije), $d = d(\phi)$ udaljenost između komponenti ovisna u fazi (zbog ekscentričnih orbita), dok su $\lambda = \cos \varphi \sin \theta$ i $v = \cos \theta$ oznake za sferne koordinate. Položaj točaka površine predstavlja

vektor $\mathbf{r}(r, \theta, \varphi)$. Rocheov potencijal utemeljen je na pravom potencijalu sustava koji uključuje gravitacijske potencijale obje mase i centrifugalni potencijal zbog rotacije. Potencijal je izražen u koordinatnom sustavu zvijezde 1, pa za izračun potencijala druge zvijezde potrebno prijeći u njezin sustav.

Ovisno o ovome potencijalu, program računa diskretnu reprezentaciju površine zvijezde s točkama (θ_i, φ_j) , gdje su odgovarajući radij vektori $r_{ij}(\theta_i, \varphi_j; q, F, \Omega, d)$, za $j = 1, 2$ prvu i drugu komponentu.

Monokromatski tok svjetlosti komponente j dobiva se integracijom lokalnog intenziteta po površini zvijezde $S'(q, \Omega_0)$:

$$l_j(\phi) = \int_{S'} \chi(\mathbf{r}) I(\cos \gamma; g, T, \lambda) \cos \gamma d\sigma \quad (5.2)$$

gdje funkcija $\chi(r)$ poprima vrijednost 1 za točke na površini koju vidimo i 0 za točke koje ne vidimo (koje su iza horizonta ili zakrivene drugom zvijezdom prilikom pomrčine). Veličina g je gravitacijsko ubrzanje na površini zvijezde, T lokalna efektivna temperatura i λ valna duljina. Kut γ je kut između vektora normale na površinu i smjera prema opažaču, tako da je $\cos \gamma < 0$ za točke koje doprinose opaženoj svjetlosti. Prijeđe li se u sferne koordinate:

$$l_j(\phi) = \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \chi(\mathbf{r}) I(\cos \gamma; g, T, \lambda) \frac{\cos \gamma}{\cos \beta} r^2 \sin \theta d\theta d\varphi \quad (5.3)$$

gdje je β kut između radij vektora i normale na površinu. Wilson-Devinney program aproksimira ovaj integral, uzimajući u obzir da intenzitet zračenja sa zvijezde ovisi o nekoliko efekata:

$$l(\phi) = I \sum_{\varphi} \sum_{\theta} \left\{ GDR \frac{\cos \gamma}{\cos \beta} r^2 \sin \theta \Delta\varphi \Delta\theta \right\} \quad (5.4)$$

gdje je I intenzitet zračenja u smjeru normale na polu zvijezde i ne ovisi o kutevima, $G = G(\mathbf{r})$ je gravitacijsko zatamnjenje, $D = D(\mathbf{r})$ rubno zatamnjenje i $R = R(\mathbf{r})$ efekt refleksije.

5.2.1. Gravitacijsko zatamnjenje

Gravitacijsko zatamnjenje je omjer lokalnog intenziteta zračenja u smjeru normale negdje na površini zvijezde i intenziteta na polu. Rotacija zvijezde utječe na oblik zvijezde. Kao posljedica, površinsko gravitacijsko ubrzanje smanjivat će se od pola prema ekvatoru. Lokalni bolometrijski tok zračenja može se onda izraziti kao:

$$F_l = F_p \left(\frac{g_l}{g_p} \right)^g \quad (5.5)$$

gdje je koeficijent g jednak 1 za radijativne atmosfere (von Zeipel 1924) i 0,32 za konvektivnu atmosferu (Lucy 1967), a g_l i g_p gravitacijsko ubrzanje na površini zvijezde. Indeks l označava lokalnu, a indeks p veličinu na polu. Obzirom da je $g_p > g_l$ slijedi da je pol najsjajniji dio površine zvijezde, a gravitacijsko zatamnjenje se povećava prema ekvatoru. Iz izraza za površinski tok zračenja (4.8) može se dobiti izraz za temperaturu:

$$T_l = T_p \left(\frac{g_l}{g_p} \right)^\beta \quad (5.6)$$

gdje je koeficijent $\beta = \frac{g}{4}$. Tako da temperatura postiže najveću vrijednost na polu, dok je izmjerena T_{eff} prosječna temperatura površine.

U izraz gravitacijskog zatamnjenja $G(\mathbf{r})$ koji se računa ugrađena je i funkcija za model atmosfere koji se želi koristiti. Model atmosfere može biti zračenje crnog tijela, siva atmosfera ili, najčešće, neki specifični model. U najjednostavnijem slučaju koristi se model zračenja crnog tijela, kada je lokalni intenzitet jednak Planckovoj funkciji (2.6) lokalne efektivne temperature:

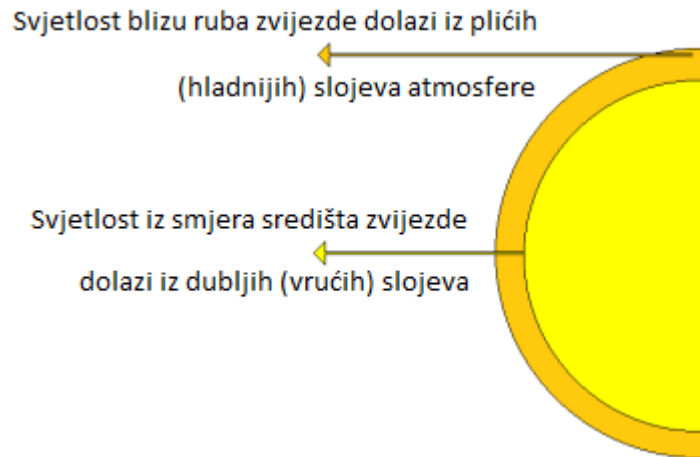
$$I_l(T_l, \lambda) = B_\lambda(T_l) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (5.7)$$

Iako zvijezde ne zrače kao idealno crno tijelo, ova aproksimacija se može koristiti uvede li se još i faktor rubnog zatamnjenja.

5.2.2. Rubno zatamnjenje

Zatamnjenje površine zvijezde prema rubu diska događa se zbog ovisnosti intenziteta zračenja o kutu između normale na površinu i smjera gledanja. Intenzitet je najjači u smjeru normale zbog doprinosa koje stvara viša temperatura u dubljim slojevima atmosfere.

re. Što je veći odmak od normale, to doglednica seže do plićih slojeva koji su hladniji, pa je i tok zračenja manji (slika 5.1).



Slika 5.1. Efekt rubnog zatamnjenja površine. Konačni rezultat je da se rubni dijelovi površine zvijezde čine tamnijima od središnjih.

Rubno zatamnjenje može se izraziti kao:

$$D_{\lambda}(\cos \gamma) = 1 - x_{\lambda} + x_{\lambda} \cos \gamma \quad (5.8)$$

za x_{λ} koeficijent rubnog zatamnjenja ovisan o valnoj duljini. Funkcija također može ovisiti o dva parametra umjesto jednome, npr. o x i y , te može uključivati nelinearnu ovisnost. WD program može koristiti logaritamsku ili korijensku ovisnost o kutu, uključujući parametre x i y , koji se svi svode na linearnu ovisnost za $y = 0$. Koja god se ovisnost koristi, intenzitet je uvijek:

$$I(\cos \gamma; g, T, \lambda) = D_{\lambda}(\cos \gamma) I(\cos \gamma = 1; g, T, \lambda) \quad (5.9)$$

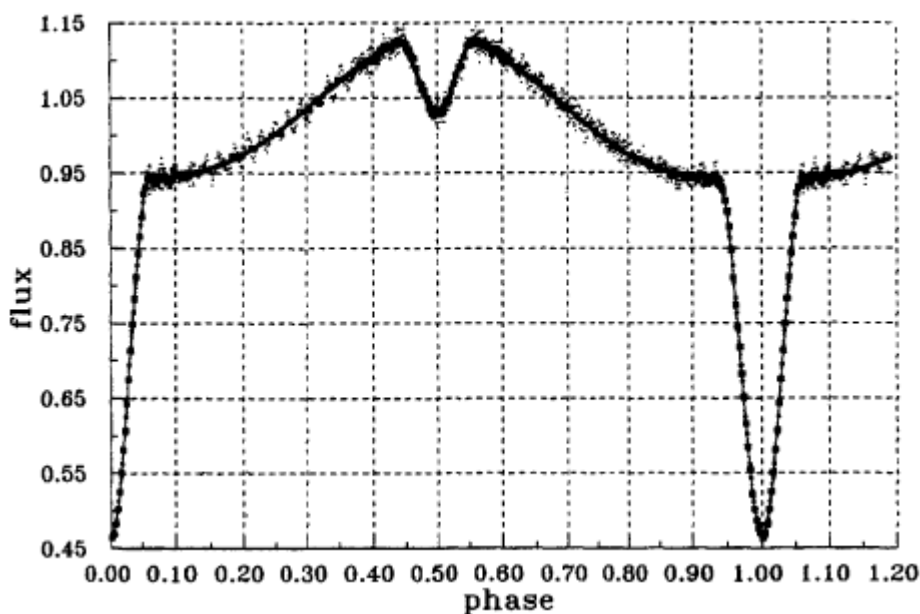
5.2.3. Efekt refleksije

Efekt refleksije je povećanje sjaja zvijezde zbog upadnog zračenja zvijezde pratioca koje dodatno zagrijava zvijezdu. U modelima je vezan uz albedo, čije se vrijednosti kreću između $0 \leq A \leq 1$. Za radijativnu ravnotežu vrijedi $A = 1$, dok se za konvektivnu ravnotežu koristi $A = 0,5$ (Rucinski 1969), jer se smatra da zvijezda s konvektivnom atmosferom lokalno reflektira otprilike polovicu dolazne toplinske energije.

Faktor refleksije računa se kao omjer lokalnog bolometrijskog toka zračenja kojemu je pribrojen reflektirani dio zračenja s druge zvijezde i toka zračenja bez utjecaja druge zvijezde. Za primarnu komponentu faktor refleksije je :

$$R_1 = \frac{F_1 + A_1 F_2}{F_1} \quad (5.10)$$

Efekt refleksije predstavlja dodatno (vanjsko) zagrijavanje zvijezde, sukladno povećanju njezine efektivne temperature. Posebno je izražen u bliskim dvojnim sustavima gdje jedna zvijezda ima vrlo visoku efektivnu temperaturu (zvijezda O ili B tipa), dok je druga komponenta mnogo hladnija. Efekt se tada jasno očituje u izgledu svjetlosne krivulje (slika 5.2).



Slika 5.2. Primjer efekta refleksije u izgledu svjetlosne krivulje dvojne zvijezde PG 1336-018 (Zola 2000). Temperatura primarne komponente je oko 35 000 K, a sekundarne tek oko 3000 K. Sjaj se povećava sve do sekundarnog minimuma (kada vruća zvijezda zakloni hladniju) zbog toga što se zračenje vruće zvijezde reflektira s hladnijeg pratioca.

6. Zvezdani skup Hijade

Otvoreni zvezdani skup Hijade (M25, slika 6.1) pozicioniran je, promatrano sa Zemlje, u zviježđu Taurus. Centar mase skupa nalazi se na udaljenosti od $46,34 \pm 0,27$ pc (Perryman i dr. 1997), što čini Hijade najbližim otvorenim skupom Sunčevom sustavu. Skup je umjerene gustoće, sadrži oko 300 – 400 zvijezda, masa mu je oko 400 Sunčevih masa, a procjenjena starost oko 625 ± 50 milijuna godina. Polumjer jezgre skupa, gdje su zvijezde najgušće pakirane, je oko 2,7 pc, plimni polumjer oko 10 pc (izvan tog polumjera zvijezde su najvjerojatnije u putanji napuštanja skupa), a prividni sjaj $V = 0,5$ mag. Točka skretanja skupa na HR dijagramu je nešto ispod $M_V = 2,5$ mag.



Slika 6.1. Zvezdani skup Hijade u zviježđu Taurus. Crveni div Aldebaran (α Tau, dolje desno) nije član skupa, već je mnogo bliže Zemlji. Dvojne zvijezde θ^1 Tau i θ^2 Tau čine optički dvojni sustav (nalaze se iznad Aldebarana). Ustupio R. B. Andreo (2011).

Hijade su nešto stariji otvoreni skup. Sve zvijezde veće od 3 Sunčeve mase (nekad spektralnog tipa O ili B na glavnom nizu) već su se razvile do faze divova (skupom dominiraju 4 crvena diva) ili bijelih patuljaka, kojih je u jezgri skupa otkriveno 8. Većina zvijezda ipak se nalazi na glavnom nizu, pretežno su to zvijezde tipa F (otkriveno oko 60), G (oko 50) i K (oko 50), te spektralnog tipa A (21 zvijezda) i M (oko 10 zvijezda). Do sada je u jezgri skupa pronađeno i 12 smeđih patuljaka.

Analiza spektra visoke rezolucije i velikog omjera S/N (signal/šum) nekoliko komponenti skupa omogućila je točno određivanje njihove efektivne temperature i me-

taliciteta. Iz pretpostavke da su sve zvijezde skupa iste građe, metalicitet skupa iznosi $[Fe/H] = +0,14 \pm 0,05$ dex (Cayrel de Strobel i dr. 1997), što znači da Hijade imaju veći udio metala od Sunca. Za razliku od metaliciteta, nađeno je da je zastupljenost helija manja od Sunčeve, oko $Y = 0,255 \pm 0,009$ (Lebreton i dr. 2001). Stupanj zacrvenjenja za Hijade vrlo je nizak, $E(B - V) = 0,003 \pm 0,002$ (Taylor 1980), pa prema tome nije potrebna korekcija sjaja zbog međuzvezdanog zacrvenjenja.

Zbog svoje blizine Sunčevom sustavu, podaci dobiveni s Hijada imaju jako značajnu ulogu u astrofizici, kako u kalibraciji apsolutnog sjaja, udaljenosti zvijezda u galaksiji te izvangalaktičkih udaljenosti, tako i u boljem saznanju o evoluciji i razvoju zvijezda preko relacije masa-luminozitet dostupne za dvojne sustave i određivanju samog položaja glavnog niza na HR dijagramu.

6.1. Dvojni sustavi u skupu Hijade

Proučavanje spektroskopskih dvojnih zvijezda u Hijadama i mjerenje njihove orbitalne paralakse omogućilo je vrlo točno određivanje udaljenosti ovog skupa, a pomoću njihovih masa moguće je proučavati evolucijske modele zvijezda. Uz određene mase, udaljenost svakog sustava i razlika sjaja između komponenti potrebni su za izračun luminoziteta svake od ovih zvijezda. Navest ćemo detalje pet dvojnih sustava ovog skupa.

Sustav θ^1 Tau (77 Tau, HD 28307, HIP 20885, vB71) je jednolinijska spektroskopska dvojna zvijezda (SB1), masivna zvijezda spektralnog tipa K0. Promjene radijalnih brzina otkrili su Griffin i Gunn (1977). Sekundarna komponenta se pokazala preslabom za spektroskopsku detekciju. Ima vrlo velik ekscentricitet orbite, $e = 0,57$ i orbitalni period od oko 16 godina. Mase obje komponente dobivene su usporedbom s rješenjima za θ^2 Tau (Torres i dr. 1997a) s nešto većim pogreškama od 18% i 10% za primarnu i sekundarnu zvijezdu.

Sustav θ^2 Tau (78 Tau, HD 28319, HIP 20894, vB72) je također otkrivena kao jednolinijska spektroskopski dvojna zvijezda. Modernim metodama detektirana je i sekundarna komponenta, s namjerom da se dobiju bolji iznosi radijalnih brzina (Torres i dr. 1997a). Morfološki je ovo odvojeni dvojni sustav, ima ekscentričnu orbitu s $e = 0,7$ i period od 140,7 dana. Pored toga, svjetlosna krivulja pokazuje pulsacije karakteristične za δ Scuti tip promjenjivih zvijezda. Primarna komponenta θ^2 Tau A je jedna od najsjajnijih

zvijezda u Hijadama, spektralnog tipa A7, što odgovara temperaturi od 8250 K, i nalazi se u kritičnoj točki skretanja glavnog niza skupa te znači da je započela ili je blizu postupka evoluiranja prema grani divova. Sekundarnu komponentu θ^2 Tau B jako je teško spektroskopski detektirati zbog velikog širenja spektralnih linija, jer obje komponente vrlo brzo rotiraju (primarna rotira brzinom od $v_A \sin i = 70$ km/s, sekundarna s oko $v_B \sin i = 110$ km/s). Efektivna temperatura Tau B vrlo je slična primarnoj, ali se zvijezda sporije razvija. θ^2 Tau je vizualno najsjajniji objekt u Hijadama. Mase su određene uz relativne pogreške od 12% i 8% za prvu i drugu komponentu sustava (Torres i dr. 1997a).

Sustav 51 Tau (HD 27167, HIP 20087, vB24) je dvolinijska spektroskopski dvojnja zvijezda (SB2), a usto i vizualna dvojnja otkrivena mrljastom interferometrijom (McAlister 1976). Orbitalni period joj je 11 godina. Kombinacijom astrometrijskih i spektroskopskih podataka uspjelo se dobiti orbitalne elemente i izračunati mase komponenta ovog sustava (s pogreškama od 7% i 12% za primarnu i sekundarnu komponentu). Izračunata orbitalna paralaksa sustava iskoristila se u određivanju udaljenosti skupa (Torres, Stefanik i Latham 1997b).

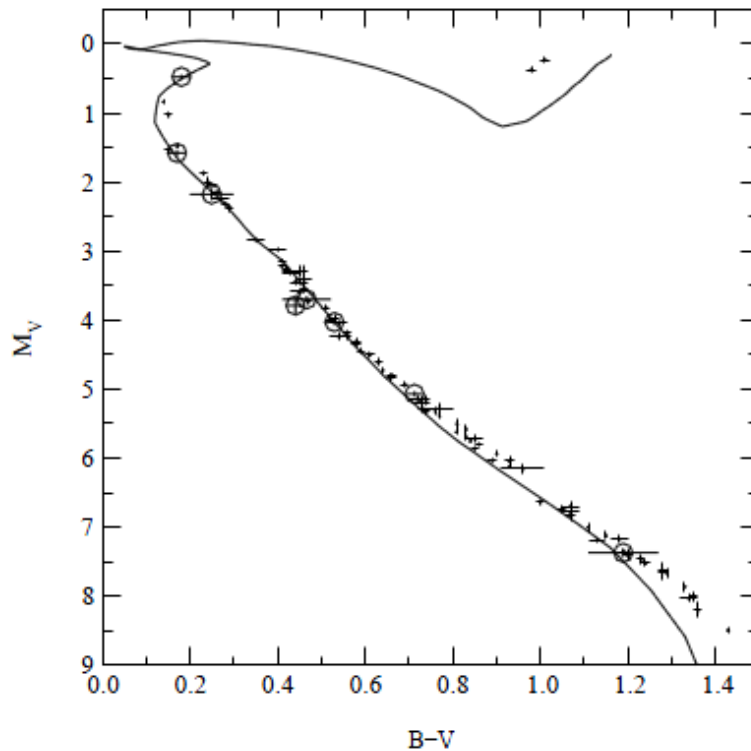
Sustav ϕ 342 (70 Tau, HD 27991, HIP 20661, vB57) je također SB2 dvojnja zvijezda s orbitalnim periodom od 6 godina. Iz vizualnih i interferometrijskih podataka te radialnih brzina uspješno se dobilo orbitalno rješenje za sustav i iz njega mase primarne i sekundarne komponente s pogreškama od 5% i 6%. Pomoću orbitalne paralakse sustava testiran je modul udaljenosti skupa i u odličnom je slaganju s vrijednosti dobivenom pomoću prethodnog sustava (Torres, Stefanik i Latham 1997c).

Sustav V818 Tau (HD 27130, HIP 20019, vB22) je spektroskopski dvojnja zvijezda otkrivena kao dvolinijska SP2 (McClure 1982). Jedina je pomrčinska dvojnja zvijezda u Hijadama i zbog toga od izuzetne važnosti. Moguće je detektirati i primarnu i sekundarnu djelomičnu pomrčinu. Zbog toga ima najtočnije određene mase komponenta (manje od 1% relativne pogreške), te vrlo točne polumjere (oko 2% pogreške). Objе zvijezde su na glavnom nizu. Primarna komponenta je žuta zvijezda G8 tipa s temperaturom i veličinom sličnom Suncu, dok je sekundarna narandžasti K-tip zvijezde. Sekundarna komponenta je posebno zanimljiva jer je među rijetkim zvijezdama manje masivnim od Sunca, a čija se masa uspjela tako točno odrediti. S takvim manjim masama, ovaj sustav nalazi se pri dnu glavnog niza skupa Hijada.

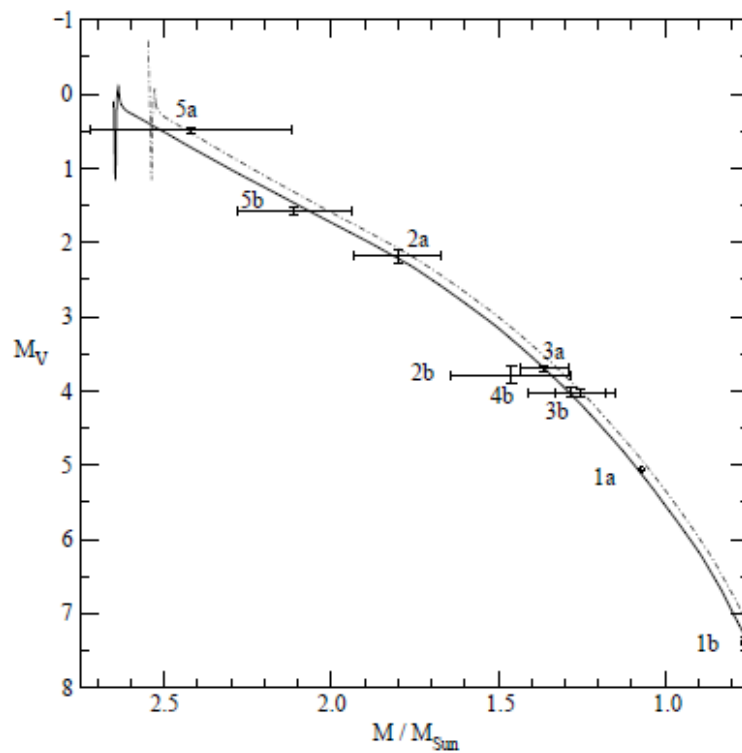
Svojstva ovih pet dvojnih sustava prikazana su u tablici 6.1. HR dijagram Hijada prikazan je na slici 6.2, a relacija masa-luminozitet zasnovana na podacima dvojnih sustava na slici 6.3. Naznačene su i odgovarajuće izohrone.

Tablica 6.1. Mase, apsolutni sjaj i pokazatelji boje za pet navedenih dvojnih sustava Hijada, te izračunati polumjeri vB22 (V818 Tau) sustava (Lebreton i dr. 2001).

name	M_A/M_\odot	R_A/R_\odot	V	$M_{V,A}$	$B - V$	$(B - V)_A$
	M_B/M_\odot	R_B/R_\odot	ΔV	$M_{V,B}$	$\Delta(B - V)$	$(B - V)_B$
vB22	1.072 ± 0.010	0.905 ± 0.029	8.319 ± 0.009	5.07 ± 0.04	-	0.713 ± 0.017
	0.769 ± 0.005	0.773 ± 0.015	2.3 ± 0.05	7.37 ± 0.06	-	1.19 ± 0.08
51 Tau	1.80 ± 0.13		5.65 ± 0.01	2.18 ± 0.09	0.28 ± 0.01	0.25 ± 0.05
	1.46 ± 0.18		1.61 ± 0.10	3.79 ± 0.12	0.19 ± 0.01	0.44 ± 0.02
ϕ 342	1.363 ± 0.073		6.46 ± 0.01	3.70 ± 0.05	0.49 ± 0.01	0.466 ± 0.056
	1.253 ± 0.075		0.34 ± 0.05	4.03 ± 0.05	0.05 ± 0.01	0.530 ± 0.020
θ^1 Tau	2.77 ± 0.50		3.84 ± 0.01	0.52 ± 0.04	0.95 ± 0.01	-
	1.28 ± 0.13		3.50 ± 0.05	4.02 ± 0.07	-	-
θ^2 Tau	2.42 ± 0.30		3.40 ± 0.02	0.48 ± 0.04	0.18 ± 0.01	0.18 ± 0.02
	2.11 ± 0.17		1.10 ± 0.01	1.58 ± 0.05	-0.006 ± 0.005	0.17 ± 0.02



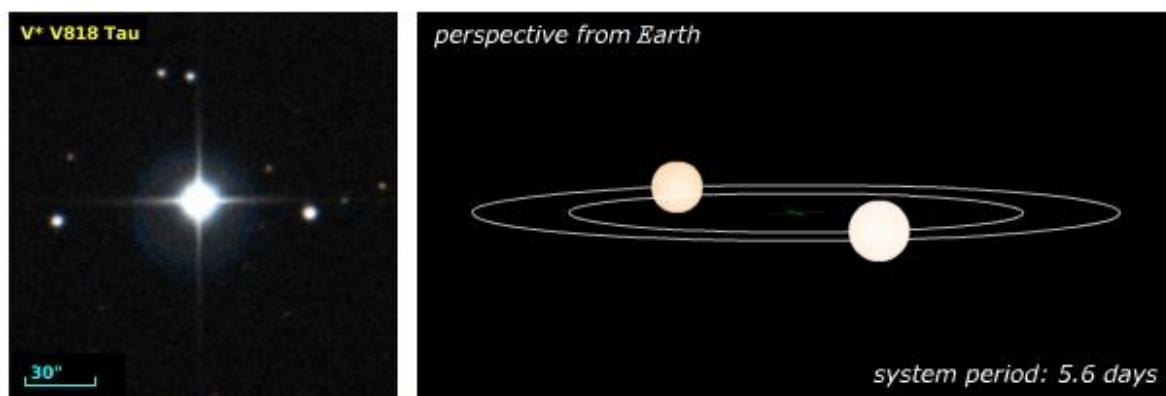
Slika 6.2. HR dijagram Hijada jednostukih zvijezda s naznačenim komponentama dvojnih sustava (kružići). Izohrona modela za starost 650 milijuna godina, sa metalicitetom Hijada $[Fe/H] = 0.14$ dex i zastupljenošću helija $Y = 0,26$ (Lebreton i dr. 2001).



Slika 6.3. *ML* relacija Hijada bazirana na podacima pet navedenih dvojnih sustava (bez primarne komponente θ^1 zbog prevelike greške u masi) iz tablice 4 i izohrone za starost 650 Mgod: puna linija za $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.14$ dex i $Y = 0.26$; iscrtkana linija za $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.14$ dex i Sunčevu zastupljenost helija $Y = 0.28$ (Lebreton i dr. 2001).

6.2. Sustav V818 Tau

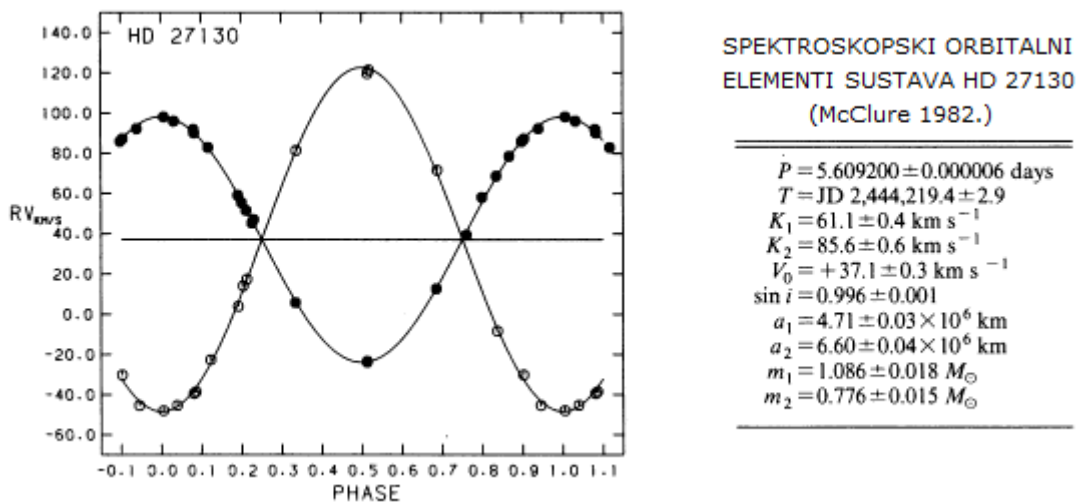
Pomrčinske dvojne zvijezde predstavljaju važan alat za testiranje teorije strukture i evolucije zvijezda. Na taj se način mogu poboljšati zvjezdani modeli i provjeriti točnost relacije masa-luminozitet. U galaktičkom skupu Hijade postoji veliki broj dvojnih zvijezda, ali su temeljni parametri određeni tek za 5 sustava. Samo su parametri V818 Tau, jedinog pomrčinskog dvojnog sustava u Hijadama, poznati s dovoljnom točnošću da mogu poslužiti za proučavanje teorijskih modela.



Slika 6.4. Dvojna zvijezda V818 Tau (slika lijevo, preuzeta iz DSS kataloga); prikaz zvijezda ovog sustava i izgled njihovih orbita s obzirom na promatrača sa Zemlje (slika desno). Obje zvijezde su manjih masa, inklinacija orbitalne ravnine je $i \approx 85^\circ$ i obje pomrčine su djelomične.

V818 Tau (HD 27130) je spektroskopski dvojni sustav s komponentama na glavnom nizu (slika 6.4). Otkriven je kao dvolinijska (SB2) i pomrčinska dvojna zvijezda (McClure 1982) s periodom od $P = 5,6$ dana. Više kriterija pokazuje da se radi o članu skupa Hijada: (1) vlastito gibanje sustava, (2) radijalne brzine i (3) spektroskopska i fotometrijska paralaksa. V818 Tau je odvojeni dvojni sustav, što znači da je razvoj komponentata neovisan. Zbog toga predstavljaju razvoj jednostrukih zvijezda skupa slične mase i luminoziteta. Primarna komponenta je spektralnog tipa G8 V i sliči Suncu kada je Sunce bilo iste starosti kao Hijade, jer i masa joj je tek nešto veća od Sunčeve. Spektralna klasifikacije sekundarne komponente nije toliko sigurna, te su mogući spektralni tipovi između K3 i K5. Manje je mase od Sunca i kao takva predstavlja bitan izvor informacija za zvijezde manjih masa na glavnom nizu, pošto su ovakve vrste dvojnih zvijezda s članom znatno hladnijim od Sunca rijetke. Starost Hijada od oko 650 milijuna godina ukazuje na to da su zvijezde glavnog niza u skupu još blizu granice ZAMS-a, što onda vrijedi i za ovaj sustav.

V818 Tau korištena je u svrhu kalibracije relacije masa-luminozitet (ML relacije) i izračuna udaljenosti do Hijada (McClure 1982), kombinacijom spektroskopskih mjerenja sustava s podacima vizualnih dvojnih zvijezda skupa. Masa i luminozitet primarne komponente dobiveni su iz fotometrije i analize krivulja radijalnih brzina (slika 6.5). Rješenje je dalo mase obje zvijezde bez da se prethodno morala postaviti udaljenost skupa. U prvim fotometrijskim mjerenjima krivulje sjaja bila je vidljiva samo primarna pomrčina, pošto je sekundarna bila preslaba za uočiti tadašnjim instrumentima.

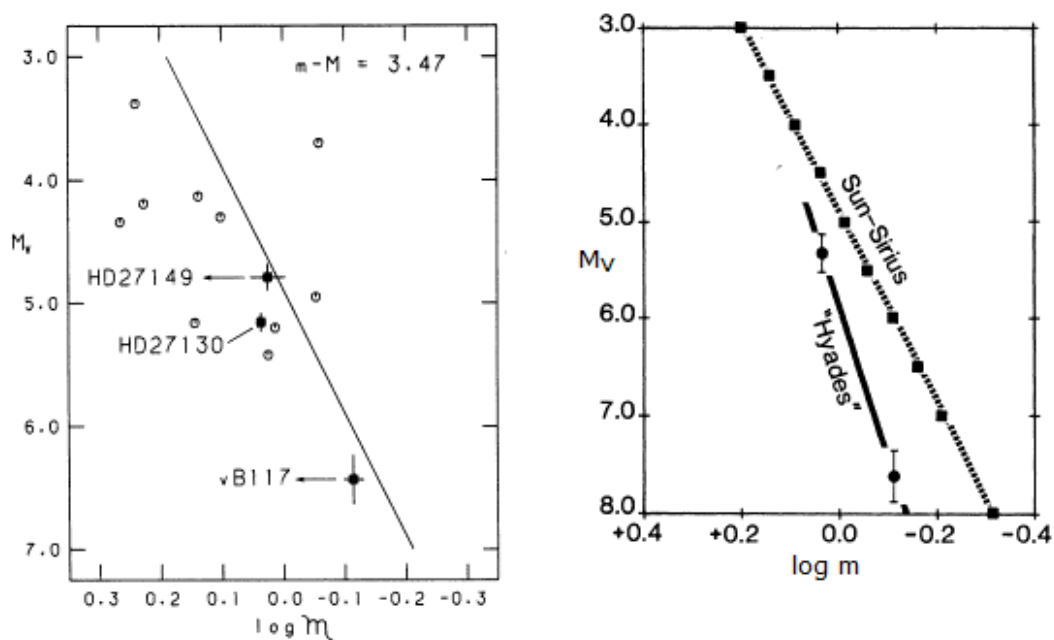


Slika 6.5. Lijevo: krivulje brzina sustava V818 (McClure 1982). Puni simboli označavaju brzine primarne, prazni sekundarne komponente. Desno: Spektroskopski podaci elemenata orbite. Kut inklinacije je oko 85° , a ekscentricitet orbite je određen na 0 (stvarna orbita je gotovo kružna).

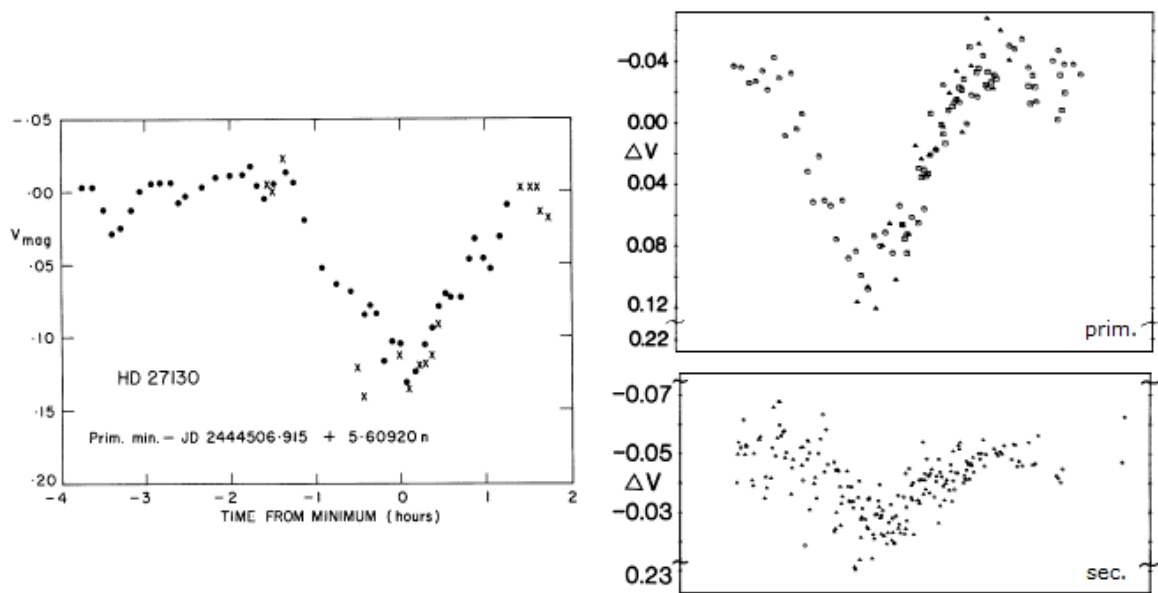
Uspoređujući rješenja ovog sustava s ML relacijom za zvijezde u Sunčevom susjedstvu, primjećeno je da obje ove zvijezde pokazuju veću masu od zvijezda u susjedstvu istog luminoziteta. Na ML relaciju utječe starost zvijezda i metalicitet. Tokom vremena zvijezde povećavaju luminozitet i udaljavaju se od ZAMS-a, pa relacija ovisi o starosti zvjezdanog skupa. Veći metalicitet utječe tako da smanjuje sjaj zvijezda. Na temelju ta dva parametra ML relacija Hijada leži oko 0,8 mag niže nego relacija za zvijezde Sunčevog susjedstva, jer Hijade su mlađe od Sunca i okolnih zvijezda, a još i bogatije metalima. Sukladno s time izračunat je modul udaljenosti od $m - M = 3,47 \pm 0,05$ mag (McClure 1982), uz pretpostavku Sunčeve zastupljenosti helija i pozicije V818 Tau u samoj blizini središta skupa Hijada.

Ovaj rezultat je revidiran korekcijom orbitalnih parametara pomoću vizualnih opažanja ϕ 342 dvojne zvijezde (Peterson i Solensky 1987). Dobiven je bolji rezultat za modul udaljenosti, $m - M = 3,36 \pm 0,05$ mag, što je mnogo bliže novijim rezultatima.

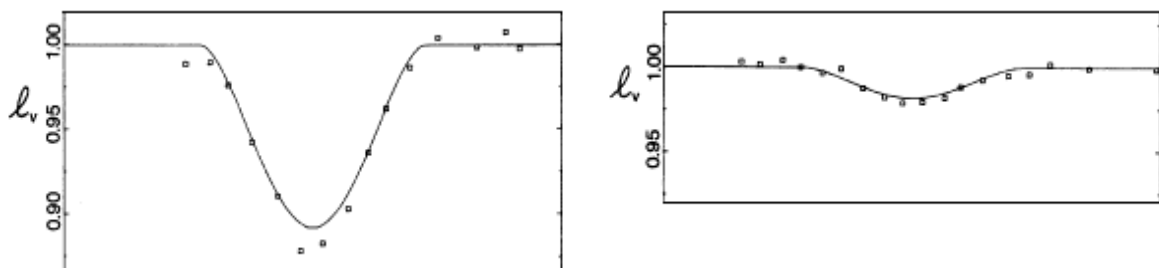
Korigiran je vizualni sjaj primarne zvijezde sa prijašnje $V = 8,59$ mag na $V = 8,44$ mag, te činjenica da je odnos mase i luminoziteta Hijada nešto drugačiji od relacije koja vrijedi za Sunčevo susjedstvo. Tome su pridonijela fotometrijska mjerenja sekundarne komponente, koja je odredila nagib ML relacije za zvijezde manjih masa u Hijadama (slika 6.6). Uspješno je detektirana i sekundarna pomrčina, te pomoću Wilson-Devinney programa dobiveno rješenje iz analize krivulje sjaja i radialnih brzina koje uključuje obje pomrčine (Schiller i Milone 1987). Izmjereni pad sjaja prilikom pomrčina prikazan je na slici 6.7, a odgovarajuća krivulja sjaja na slici 6.8.



Slika 6.6. Lijevo: ML relacija Hijada bazirana na relaciji za Sunčevo susjedstvo, sa naznačenim vizualnim dvojnim zvijezdama (prazni kružići) i spektroskopskim dvojnim zvijezdama (McClure 1982). Desno: usporedba ML relacije za Sunce-Sirius pojas zvijezda, tj. Sunčevo susjedstvo (Eggen 1965) i relacije za Hijade na temelju dvije komponente V818 sustava. Vidi se da je relacija za Hijade strmija jer su zvijezde glavnog niza Hijada još vrlo blizu ZAMS-a (Schiller i Milone 1987).



Slika 6.7. Lijevo: primarna pomrčina sustava V818 Tau (McClure 1982). Desno: primarna (gore) i sekundarna pomrčina (dolje; Schiller i Milone 1987).



Slika 6.8. Krivulje sjaja prilagođene primarnoj i sekundarnoj pomrčini pomoću Wilson-Devinney programa (Schiller i Milone 1987).

Fotometrijska mjerenja V818 Tau korištena su u provjeri evolucije zvijezda. Prilagodnom odgovarajućoj izohroni izvedene su teoretske mase komponenata s nešto većom pogreškom u slučaju primarne zvijezde (Lasternnet i dr. 1999). Iz izohrone prilagođene pomoću sličnog dvojnog sustava YY Gem dobivene su vrijednosti za mase sustava V818 Tau niže od dotadašnjih vrijednosti (Torres i Ribas 2002). Najbolje izračunatim masama ovog sustava smatrale su se vrijednosti $M_A = 1,072 \pm 0,010 M_\odot$ za primarnu i $M_B = 0,769 \pm 0,005 M_\odot$ za sekundarnu komponentu (Peterson i Solensky 1987). Noviji izračuni pokazuju nešto drugačije mase, $M_A = 1,059 \pm 0,006 M_\odot$ te $M_B = 0,761 \pm 0,006 M_\odot$

(Torres i Ribas 2002). U tablici 6.2 uspoređene su mase te ostale apsolutne veličine sustava iz dvije različite studije.

Vrijednosti apsolutnog sjaja poboljšana je točnost mjerenjem paralakse pomoću Hipparcos satelita. Time je dobivena i nova vrijednost udaljenosti sustava. S prijašnjim podacima mjerenja orbitalne paralakse izračunata udaljenost je bila $d = 50,4 \pm 1,9$ pc (Torres i dr. 1997), dok pomoću vrijednosti trigonometrijske paralakse izmjerene preko Hipparcos satelita iznosi $d = 46,7 \pm 2,7$ pc (Lastennet i dr. 1999).

Tablica 6.2. Apsolutne veličine dvojnog sustava V818 Tau iz dva različita izvora. [SM1987] stoji za izvor Schiller i Milone (1987), a [TR2002] za Torres i Ribas (2002). Oznaka * označava prilagođene vrijednosti efektivnih temperatura za ulazne parametre WD programa.

Veličina	Jedinica	[SM1987]	[TR2002]
M_A	M_{\odot}	$1,080 \pm 0,017$	$1,0591 \pm 0,0062$
M_B	M_{\odot}	$0,771 \pm 0,011$	$0,7605 \pm 0,0062$
R_A	R_{\odot}	$0,905 \pm 0,029$	$0,900 \pm 0,016$
R_B	R_{\odot}	$0,773 \pm 0,015$	$0,768 \pm 0,010$
L_A	L_{\odot}	$0,66 \pm 0,12$	$0,678 \pm 0,055$
L_B	L_{\odot}	$0,13 \pm 0,03$	$0,168 \pm 0,024$
M_{VA}	mag	$5,33 \pm 0,20$	$5,10 \pm 0,13$
M_{VB}	mag	$7,63 \pm 0,27$	$7,39 \pm 0,14$
$\log g_A$	[cgs]	$4,555 \pm 0,035$	$4,554 \pm 0,016$
$\log g_B$	[cgs]	$4,546 \pm 0,020$	$4,548 \pm 0,011$
$T_{\text{eff},A}$	K	5470*	5530 ± 100
$T_{\text{eff},B}$	K	3977*	4220 ± 150

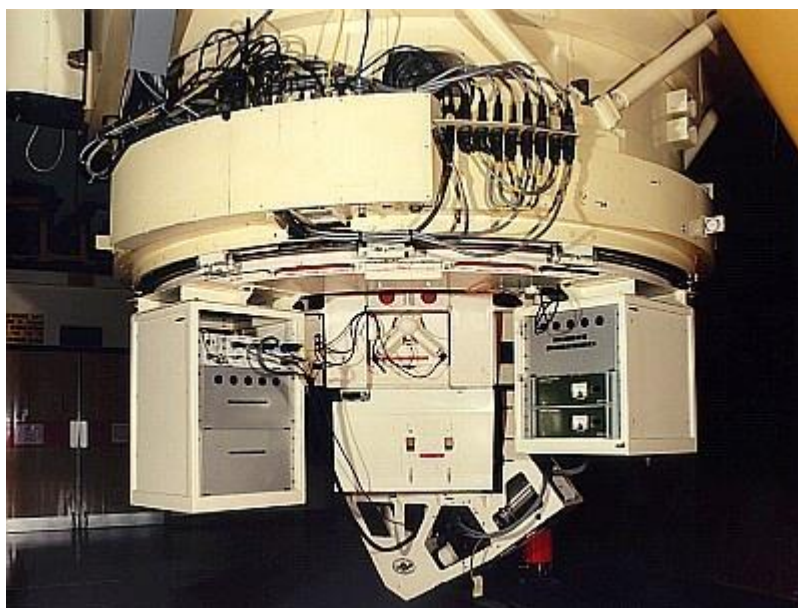
7. Analiza dvojne zvijezde V818 Tau

7.1. Spektroskopska mjerenja

Spektroskopski podaci za sustav V818 Tau prikupljeni su pomoću IDS spektrografa (Intermediate Dispersion Spectrograph) na Isaac Newton teleskopu (INT), smještenog u ORM opservatoriju (Roque de Los Muchachos Observatory) na La Palmi na Kanarskim otocima (slika 7.1). INT je Cassegrainov reflektor promjera primarnog zrcala 2,54 m i žarišne daljine 8,36 m. U $f/3,29$ primarnom fokusu nalazi se WFC kamera (Wide Field Camera), dok je u sekundarnom $f/15$ Cassegrainovom fokusu montiran IDS (slika 7.2).



Slika 7.1. Kupola Isaac Newton teleskopa (INT) na La Palmi.



Slika 7.2. IDS spektrograf montiran na INT.

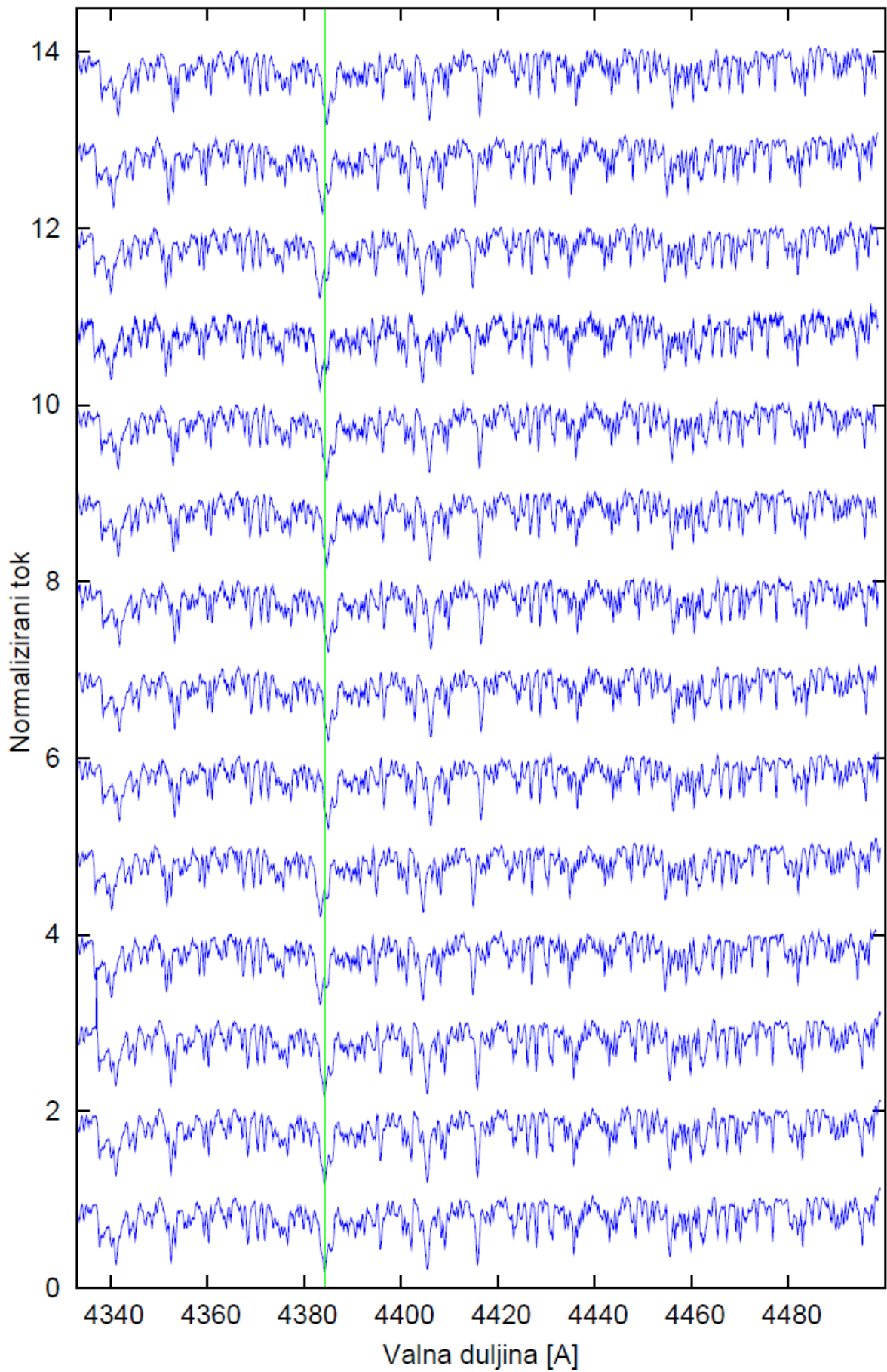
IDS spektrograf ima dvije kamere žarišnih daljina 235 i 500 mm. Nudi mogućnost 16 optičkih rešetki i 2 CCD čipa: EEV10 CCD (dimenzija 4096×2048 piksela) osjetljiv u plavom području, te RED+2 detektor (4096×2048 piksela), osjetljiv u crvenom. Kombinacije rešetki i detektora daju moguće disperzije od 0,24 do 4 Å/piksel.

Snimljeni spektri dvojne zvijezde V818 Tau pokrivaju raspon valnih duljina od 4250 Å do 4500 Å, centriranih na H γ liniju na 4340 Å. Ukupno je snimljeno 66 spektara. U njima je sadržana informacija o radijalnim brzinama i atmosferskim parametrima obje zvijezde sustava.

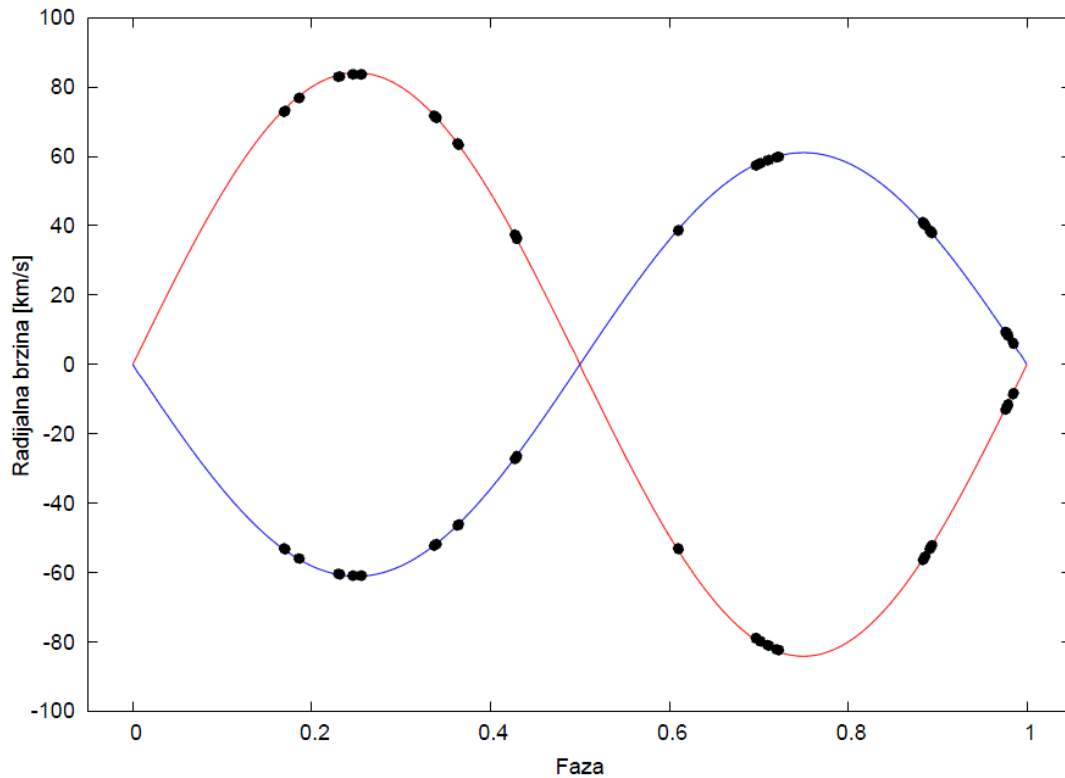
7.2. Spektroskopska analiza

Pomoću metode spektralnog raspetljavanja (eng. *spectral disentangling*) moguće je odvojiti individualne spektre komponenata, uz istovremeno određivanje orbitalnih parametara SB2 dvojnog sustava (Simon i Sturm 1994). Razdvojeni spektri komponenata omogućuju detaljnu spektroskopsku analizu (određivanje atmosferskih parametara T_{eff} , $\log g$, $v \sin i$), te što je posebno važno, detaljnu analizu sastava atmosfere i metaliciteta. U ovom je radu korišteno Fourierovo raspetljavanje pomoću kompjuterskog koda FDBinary (Ilijić i dr. 2004). Određena je krivulja radijalnih brzina obje komponente (slika 7.4). Iz poluamplituda K_1 i K_2 dobiven je omjer masa prema jednadžbi (4.2). Izračunati orbitalni elementi navedeni su u tablici 7.1.

Izdvojeni skup od 14 spektara prikazan na slici 7.3 dobro pokriva cijeli orbitalni period i ilustrira Dopplerov pomak, ali također pokazuje koliko je teško detektirati sekundarnu komponentu. Zbog toga se metoda spektralnog raspetljavanja smatra vrlo moćnom i učinkovitom.



Slika 7.3. Skup 14 od ukupno 66 snimljenih spektara sustava V818 Tau.

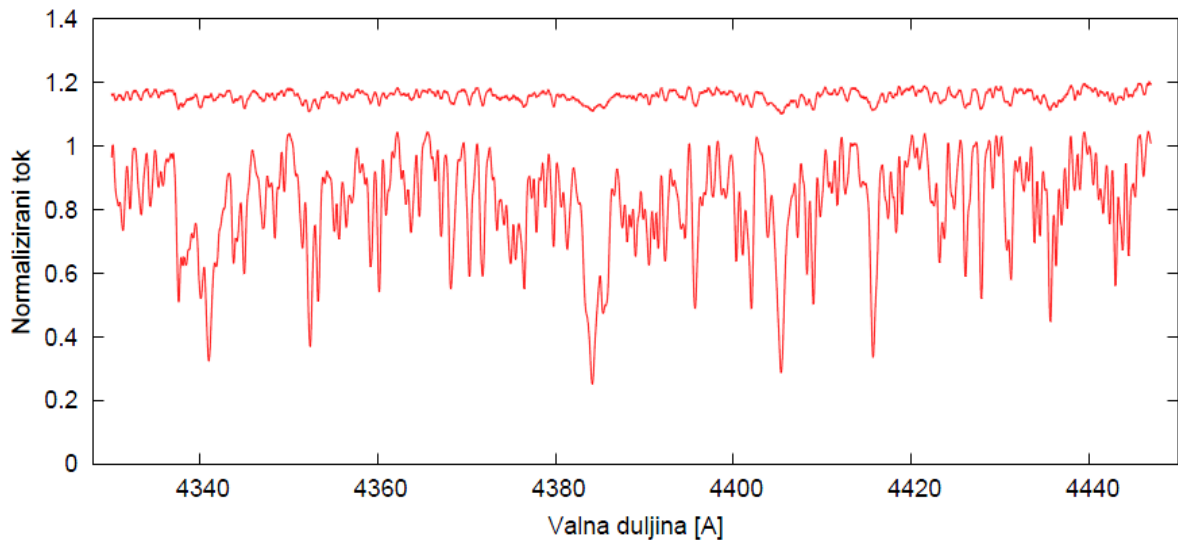


Slika 7.4. Krivulje radijalnih brzina za primarnu (plava) i sekundarnu komponentu (crvena).

Tablica 7.1. Spektroskopsko rješenje za V818 Tau.

Parametar	Jedinica	Vrijednost
Orbitalni period P	d	5.60920 ± 0.00001
Ekscentricitet orbite e		0.0 ± 0.0
Poluamplituda radijalne brzine K_A	km/s	60.88 ± 0.20
Poluamplituda radijalne brzine K_B	km/s	83.67 ± 0.30
Omjer masa q		0.728 ± 0.004

Pomoću programskog koda teorijski spektar prilagođavan je raspjetljanim spektrima u svrhu izračuna efektivnih temperatura, površinskog gravitacijskog ubrzanja, projekcije brzina $v \sin i$, svjetlosnih faktora l_1 i l_2 te Dopplerovih pomaka. Svjetlosni faktori l_1 i l_2 određuju udio svjetlosti određene valne duljine svake komponente u spektru. Bez poznavanja omjera l_1/l_2 nije moguće odrediti točnu dubinu apsorpcijskih linija u spektrima komponenata, jer je odnos njihovih kontinuum nepoznat. Omjer je moguće odrediti ukoliko imamo pomrčinsku dvojnu zvijezdu dEB, jer za vrijeme pomrčine odnos sjaja zvijezda više neće biti konstantan. U sustavu V818 Tau sekundarna komponenta doprinosi tek 5% ukupnom sjaju sustava (slika 7.5).

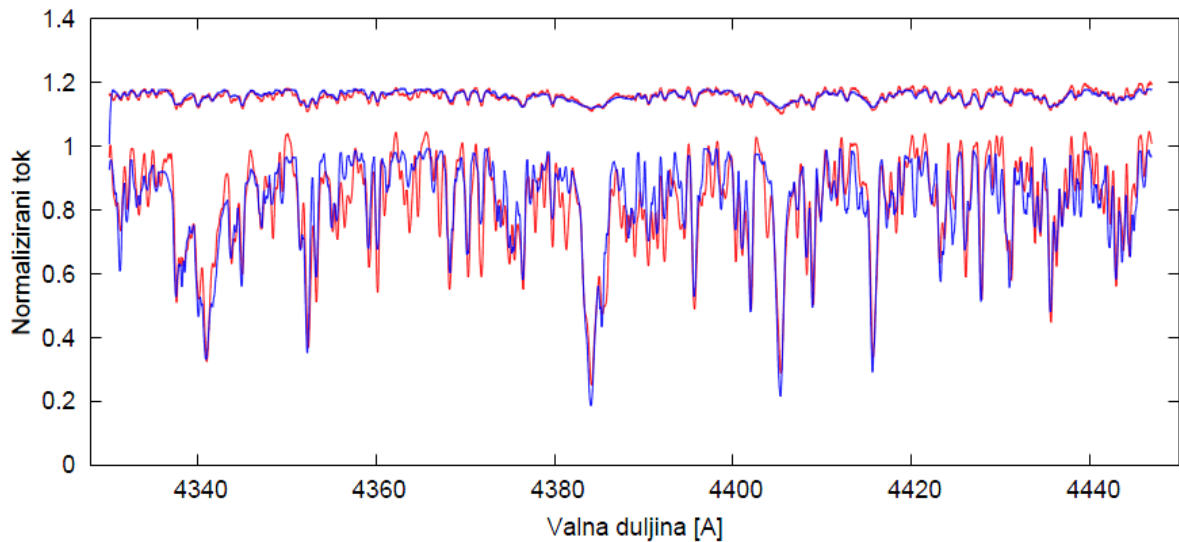


Slika 7.5. Raspetljani spektri primarne i sekundarne komponente. Spektar sekundarne zvijezde pomaknut je iznad zbog jasnoće. Primarna komponenta mnogo više doprinosi ukupnom toku zračenja nego sekundarna.

Prilagođavanje teorijskih (sintetiziranih) spektara raspetljanim spektrima komponenta napravljeno je kompjuterskim programom STARFIT. Kod je u okviru svoje doktorske disertacije izradio V. Kolbas. Program istovremeno usklađuje odvojene spektre komponenta na mrežu izračunatih teorijskih spektara uz uvjet $l_1 + l_2 = 1$ i omjer l_1/l_2 kao slobodni parametar, tkz. uvjetno prilagođavanje (Tamajo 2011). Raspon mogućih efektivnih temperatura bio je od 3500 K do 7000 K, a $\log g$ je varirao od 2,5 do 5,0 [cgs]. Također je uzeto u obzir proširenje apsorpcijskih linija zbog rotacije zvijezda. Indikator efektivne temperature bila je H_γ linija. Postupak određivanja efektivne temperature iz raspetljanih spektara detaljno je opisan u radovima: Pavlovski i Hensberge (2010) i Pavlovski i Southworth (2012). Konačni rezultat prikazan je na slici 7.6, a izračunati atmosferski parametri u tablici 7.2. Rješenja efektivnih temperatura su $T_A = 5560 \pm 100$ K za primarnu i $T_B = 4380 \pm 150$ K za sekundarnu komponentu. Ispalo je da je gravitacijsko ubrzanje g_B na površini sekundarne komponente veće od g_A primarne.

Tablica 7.2. Efektivne temperature i logaritmi gravitacijskog ubrzanja na površini primarne i sekundarne komponente sustava V818 Tau.

Parametar	Jedinica	Vrijednost
Efektivna temperatura T_A	K	5560 ± 100
Efektivna temperatura T_B	K	4380 ± 150
$\log g_A$	[cgs]	4.416 ± 0.012
$\log g_B$	[cgs]	4.613 ± 0.015



Slika 7.6. Spektri obje komponente (crveni) u usporedbi s odgovarajućim sintetičkim spektrom (plavi spektri).

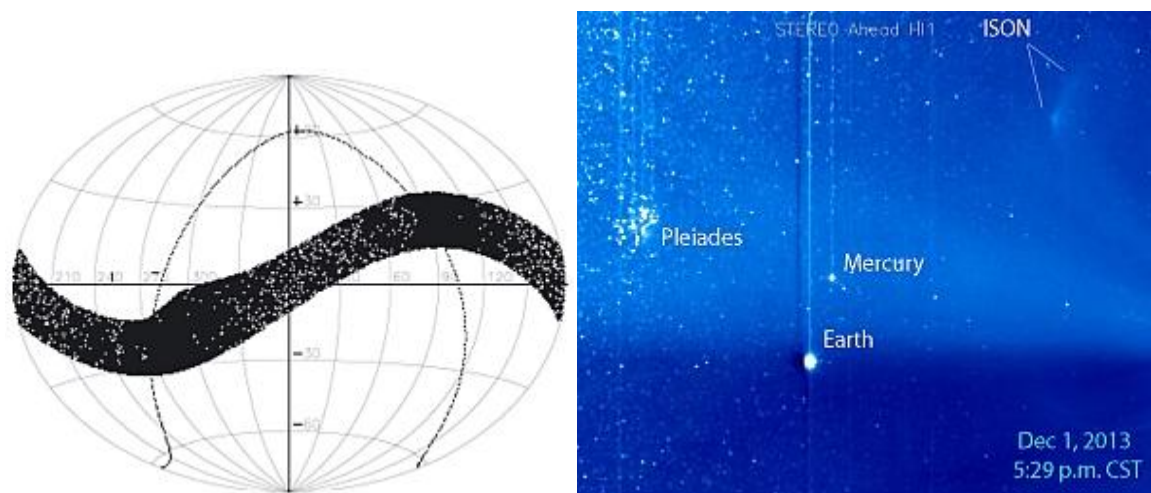
7.3. Fotometrijska mjerenja

Svjetlosna krivulja dvojne zvijezde V818 Tau snimljena je STEREO opservatorijem (Solar TERrestrial RELations Observatory) u orbiti oko Sunca (slika 7.7). STEREO se sastoji od dva satelita u malo različitim orbitama: letjelica A (Ahead) je u nešto nižoj orbiti od letjelice B (Behind), te je tako brža. Primarni zadatak ovih opservatorija je promatranje Sunca i proučavanje Sunčeve korone u tri dimenzije, posebno koronarnih izbačaja mase (CME) i njihovih utjecaja na Zemlju. Ali stabilnost, visoka rezolucija i kontinuirano snimanje njihovih HI (Heliospheric Imagers) kamera omogućuje precizno mjerenje sjaja zvijezda u njihovom vidokrugu.



Slika 7.7. Umjetnički prikaz STEREO satelita.

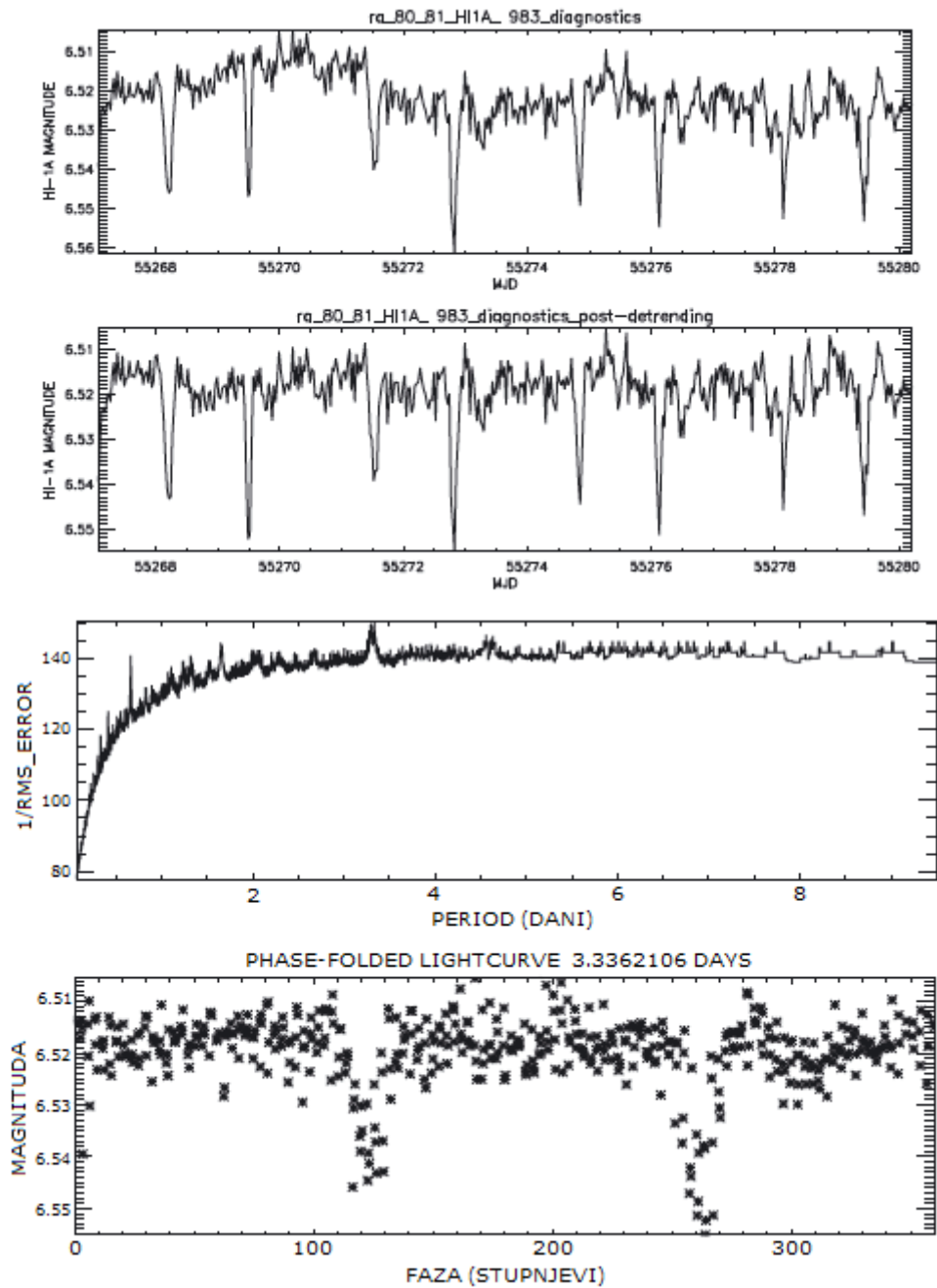
Kamera HI1-A (prva kamera letjelice A) korištena je za mjerenje sjaja zvijezda do $V \sim 12$ mag u vidnom polju kamere ($20^\circ \times 20^\circ$ od ravnine ekliptike) centrirane na 14° od središta Sunca (slika 7.8). Objektiv HI1-A sustava čini leća promjera 16 mm i žarišne daljine 78 mm. CCD čip je dimenzija 2048 x 2048, no binanje piksela je 2 x 2 zbog pojačanja signala i smanjenja očitanoog šuma, te je rezultatna slika matrica 1024 x 1024 px. Spektralni pojas ograničen je između 630 – 730 nm, s malim doprinosom na 400 i 950 nm.



Slika 7.8. Zvijezde u vidnom polju kamere HI1-A do 9. magnitude (lijevo). Primjer slike snimljene istom kamerom na STEREO-A, kada su u vidnom polju bili Zemlja, Merkur i komet ISON (desno).

STEREO može snimati isto područje kontinuirano do 20 dana, a tokom godine to snimanje i ponoviti. Svaka slika je rezultat 30 sumiranih ekspozicija od 40 s, tako da se slika stvara svakih 40 minuta. Prije početka same analize, slike prolaze kroz niz korekcija i kalibracija da bi se uklonili pozadinski šumovi i istaknuo signal kakav se traži (korekcija zbog nedostatka poklopca kamere, zatim flat field korekcija, oduzimanje pozadinskog osvjetljenja, kalibracija pozicije zvijezda, fotometrijska kalibracija, izdvajanje zasićenih piksela i nedovoljnih podataka). Zvijezde na granici detekcije ($V \sim 11,5$ mag) uklanjaju se iz analize zbog premalog omjera signal/šum. Zatim se odabrana očitana svjetlosna krivulja prilagođava polinomu 7. stupnja da se ukloni sva promjenjivost na duljoj vremenskoj skali, jer tražimo kraće periode (metoda *detrendinga*), te prolazi kroz kombinaciju visoko i niskofrekventnih filtera da se ukloni preostali šum. Prema izgledu i jačini signala krivulje određuje se najbolji mogući period. Primjer opisane obrade na podacima dvojne zvijezde HR 1750 prikazan je na slici 7.9. Ako je krivulja određena kao kandidat za svjetlosnu krivulju pomrčinske dvojne zvijezde, ide na vizualnu analizu gdje se utvrđuje da li je zaista

riječ o dvojnog sustavu. Iz prvih analiza 263 pomrčinske dvojne zvijezde snimljene STEREO satelitima, čak 122 su novootkrivene.



Slika 7.9. Glavne faze analize svjetlosne krivulje dvojne zvijezde HR 1750. Prva slika je početna svjetlosna krivulja dobivena iz jedne epohe snimanja. Druga prikazuje krivulju nakon detrendinga polinomom 7. stupnja. Treća slika je periodogram dobiven iz svjetlosne krivulje. Najdonja slika je faza prikazana u jednom periodu od oko 3,336 dana, sa primarnom i sekundarnom pomrčinom.

7.4. Analiza svjetlosne krivulje

Prije analize, fotometrijski podaci sa STEREO satelita su očišćeni tako da su uklonjene sve točke koje su znatno odstupale od ostalih (slika 7.10). Podaci su zatim usrednjeni u fazama orbitalnog ciklusa (postupak binanja) u svrhu smanjenja šuma. To je metoda sortiranja susjednih točaka u grupe (binove) i zamjena svih točaka u jednom binu njihovom srednjom vrijednošću. Zbog postizanja jednake težine u analizi svjetlosne krivulje, za faze primarnog i sekundarnog minimuma korišten je veći broj binova nego za faze izvan minimuma.

Analiza svjetlosne krivulje sustava V818 Tau provedena je pomoću Wilson-Devinney (WD) programa za obradu svjetlosnih krivulja dvojnih zvijezda. U programu postoji 8 modova rada, od kojih je svaki prilagođen različitom tipu sustava. Korišten je mod 2, namjenjen odvojenom dvojnomo sustavu bez ograničenja potencijala, dok je luminozitet sekundarne komponente L_2 ovisan o luminozitetu primarne L_1 i efektivnim temperaturama T_1 i T_2 obje komponente. Uzet je pojednostavljeni račun efekta refleksije te linearni zakon rubnog zatamnjenja. Veličina mreže (broj površinskih elemenata) stavljena je na 40×40 . Komponente ovog sustava su zvijezde manje mase i nižih temperatura, tako da se za obje pretpostavlja konvektivna atmosfera. U skladu s time, koeficijenti gravitacijskog zatamnjenja g_1 i g_2 postavljeni su na vrijednost 0,32, a albedo obje zvijezde na $A_1 = A_2 = 0,5$. Pretpostavlja se da su rotacije obje komponente sinkronizirane s orbitalnom, što vodi na vrijednosti mjere rotacije $F_1 = F_2 = 1$. Koeficijenti rubnog zatamnjenja su $x_1 = x_2 = 0,5$, dok su y vrijednosti 0 jer je korištena linearna funkcija rubnog zatamnjenja. Ekscentricitet orbite je 0, jer pretpostavljamo kružnu orbitu. Mogući treći izvor (treće svjetlo) nije uzet u obzir i vrijednost parametra je 0, obzirom da ranije analize nisu pokazale prisutnost treće komponente u sustavu. Omjer masa komponenata je fiksiran na spektroskopsku vrijednost $q = M_2/M_1 = 0,728$.

Optimizacija je uključivala sljedeće parametre: potencijale obje zvijezde Ω_1 i Ω_2 , kut inklinacije i , monokromatske luminozite L_1 i L_2 te efektivnu temperaturu sekundarne komponente T_2 . Frakcijski polumjeri zvijezda $r_1 = R_1/a$ i $r_2 = R_2/a$ određeni su Rocheovim potencijalima Ω_1 i Ω_2 . Iz dobivenih podataka izračunate su apsolutne fizičke veličine komponenata sustava. Iz vrijednosti poluamplituda radijalnih brzina K_1 i K_2 , kuta inklinacije i uzevši u obzir $e = 0$ dobiveni su a_1 i a_2 iz jednadžbe (4.3), te velika poluos a . Iz omjera masa određenog u ovom radu pomoću nove serije spektara i 3. Keplerova zakona (4.1) izračunale su se mase zvijezda M_A i M_B . Primarna komponenta označena je kao A,

sekundarna kao B. Iz frakcijskih polumjera i velike poluosi izračunati su pravi polumjeri obje zvijezde R_A i R_B . Sada su poznate sve veličine potrebne za izračun luminoziteta komponenta L_A i L_B , odnosno za određivanje ML relacije. Luminoziteti su izračunati iz efektivnih temperatura i polumjera, pomoću jednadžbe (2.1) izražene u Sunčevim jedinicama:

$$L = R^2 T^4. \quad (7.1)$$

Bolometrijski sjaj dobiven je pomoću jednadžbe:

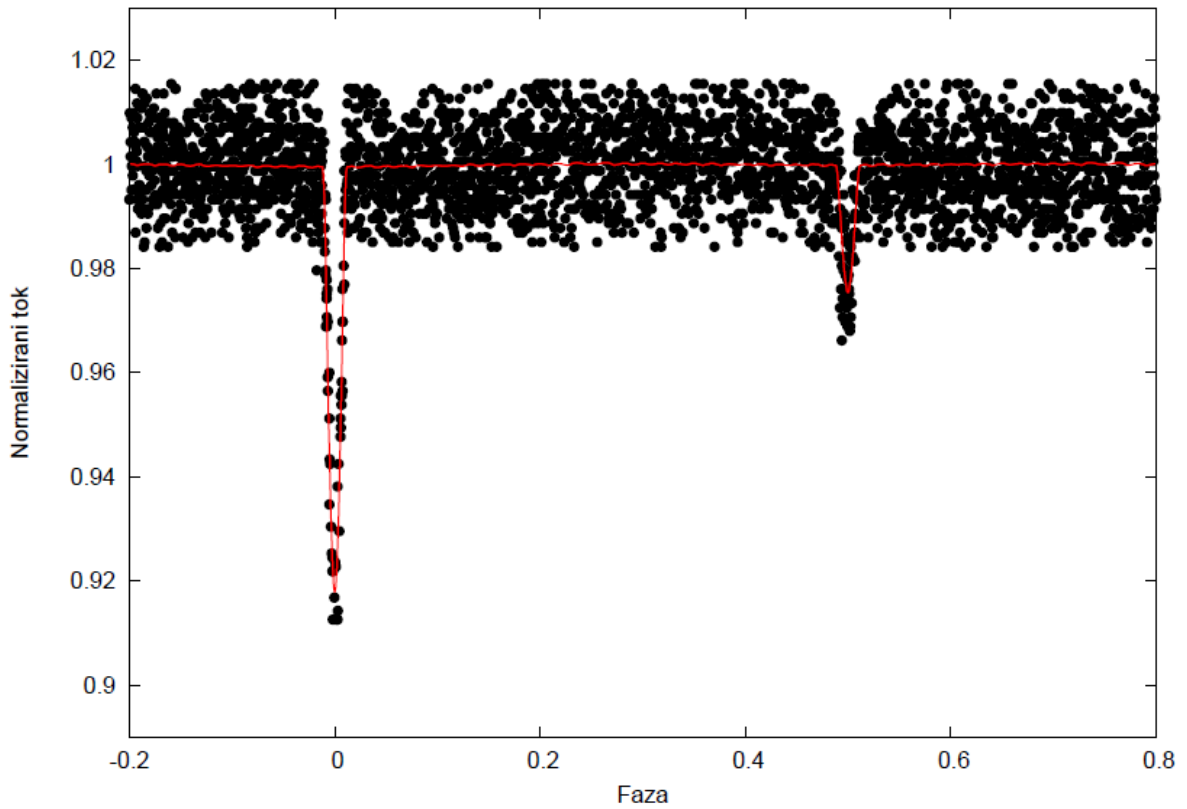
$$M_{\text{bol}} - M_{\text{bol}\odot} = -2,5 \log \frac{L}{L_{\odot}}, \quad (7.2)$$

gdje je uvrštena Sunčeva vrijednost $M_{\text{bol}\odot} = 4,83$ mag. Apsolutni vizualni sjaj računa se iz bolometrijskih vrijednosti preko:

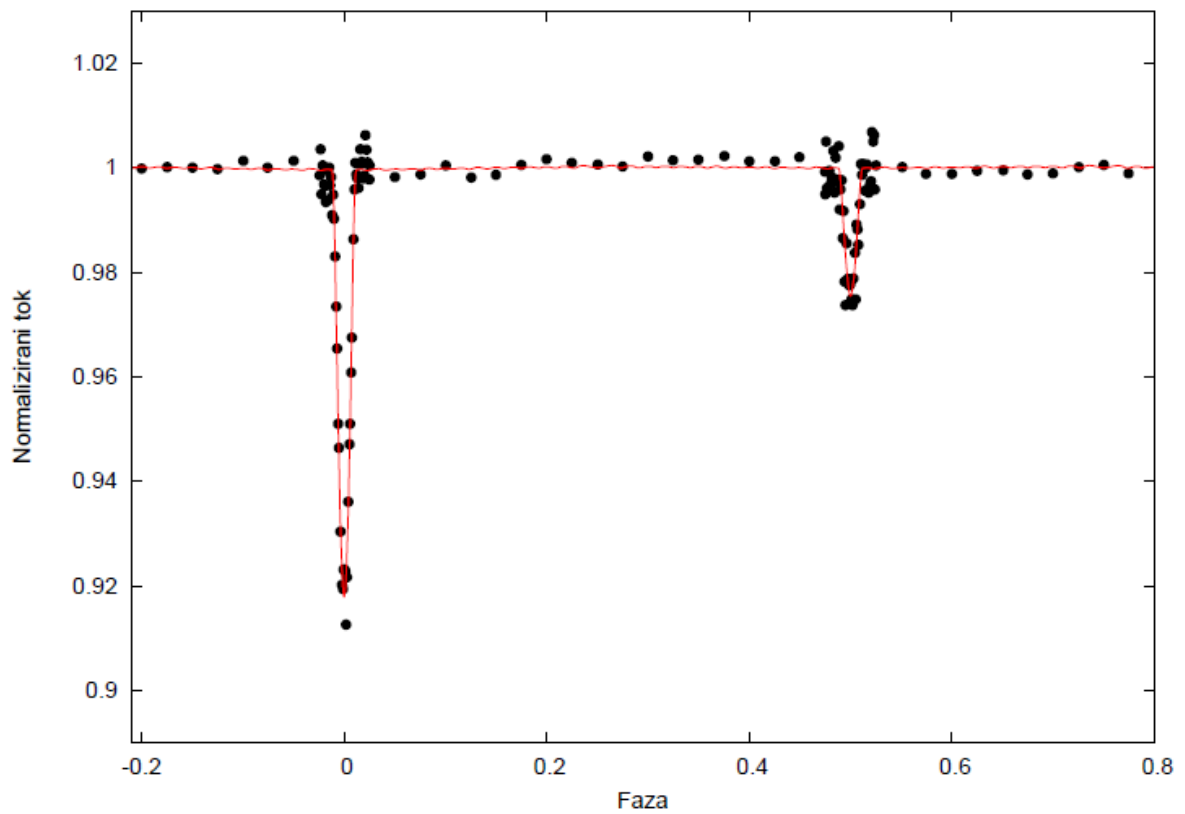
$$M_V = M_{\text{bol}} - BC, \quad (7.3)$$

gdje je BC bolometrijska korekcija ovisna o temperaturi zvijezde. Bolometrijske korekcije bile su $(BC)_1 = -0,10$ za primarnu i $(BC)_2 = -0,69$ za sekundarnu komponentu (Flower 1996).

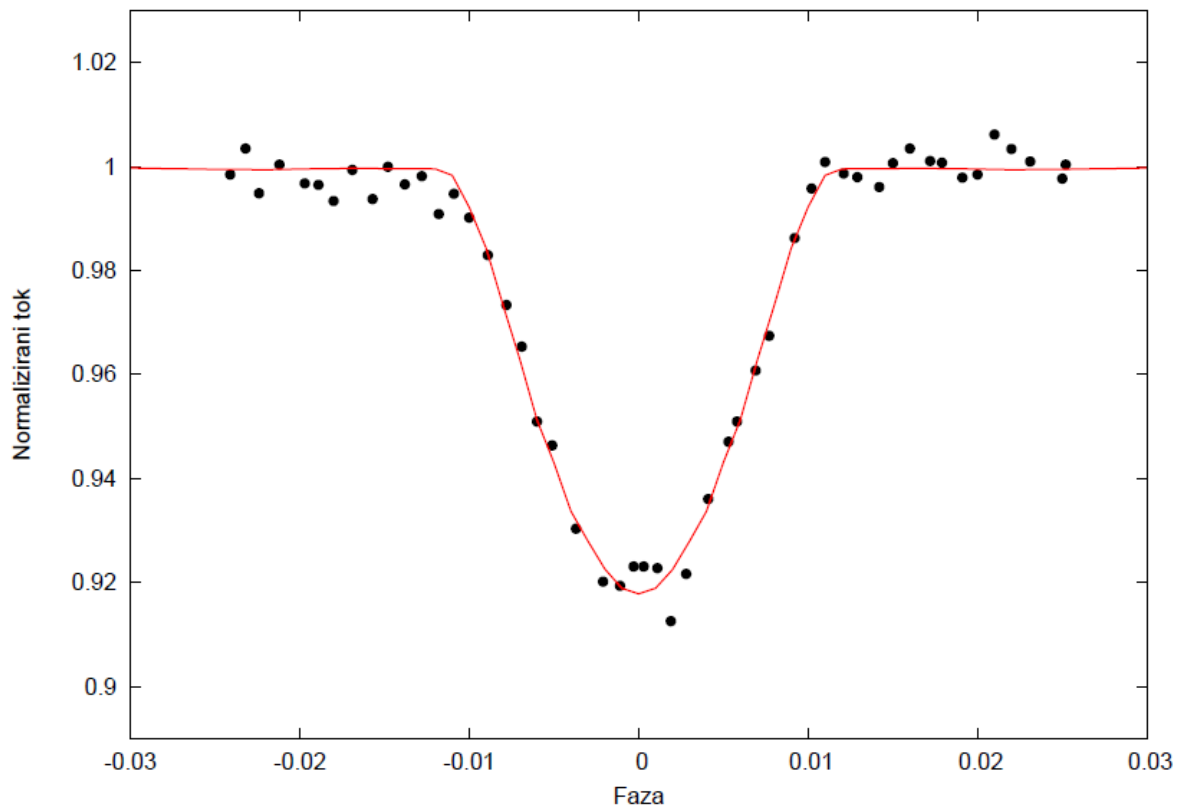
Konačno rješenje za krivulju sjaja i brzina nalazi se u tablicama 7.3 i 7.4, a izračunate apsolutne veličine sustava su u tablici 7.5. Prikaz cijele krivulje sjaja je na slici 7.11, dok slike 7.12 i 7.13 detaljno prikazuju oba minimuma. Izračunata masa i polumjer komponente V818 Tau A ponešto se razlikuju od prijašnjih rezultata. Masa $M_A = 1.026 \pm 0.008 M_{\odot}$ manja je od rješenja navedenih u tablici 6.2, dok je polumjer $R_A = 1.038 \pm 0.02 R_{\odot}$ veći. Masa i polumjer sekundarne komponente, $M_B = 0.747 \pm 0.006 M_{\odot}$ i $R_B = 0.706 \pm 0.01 R_{\odot}$ malo su manji od prijašnjih rezultata. Zanimljivo je da brzine kojima zvijezde rotiraju nisu posve sinkronizirane s orbitalnim periodom, izračunate su $V_{\text{sink}, A} = 9.65 \pm 0.14$ km/s za primarnu i $V_{\text{sink}, B} = 5.43 \pm 0.09$ km/s za sekundarnu komponentu. Brzine rotiranja zvijezda dvojnog sustava u pravilu se usklade s orbitalnim gibanjem prije nego što sustav postigne kružne orbite, za što je inače potrebno najviše vremena. U ovom sustavu, kružna orbita već je postignuta.



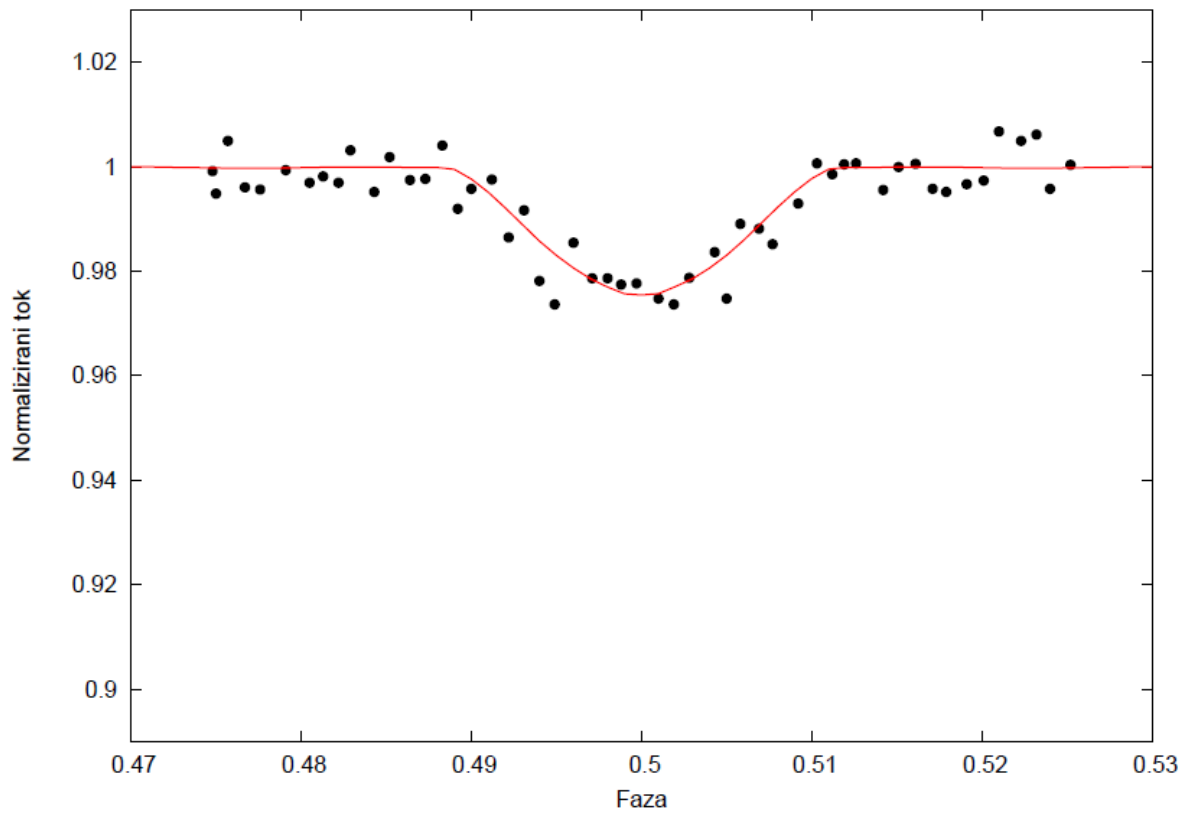
Slika 7.10. Normalizirani tok zračenja ovisan o fazi nakon čišćenja podataka (uklanjanja suvišnih, raspršenih točaka) i prije binanja. Prikazan je cijeli period, s primarnim minimumom na 0.



Slika 7.11. Normalizirani tok zračenja nakon binanja i rješenje krivulje sjaja.



Slika 7.12. Detaljni prikaz primarnog minimuma.



Slika 7.13. Detaljni prikaz sekundarnog minimuma.

Tablica 7.3. Kontrolni i ulazni parametri WD programa.

Kontrolni parametri	WD oznaka	Vrijednost
WD mod rada	MODE	2
Obrada refleksije	MREF	1 (jednostavna)
Broj refleksija	NREF	1
Zakon rubnog zatamnjnja	LD	1 (linearni)
Veličina rešetke	N1, N2	40
Ulazni parametri	WD oznaka	Vrijednost
Orbitalni period, P (d)	PERIOD	5.6092
Ekscentricitet orbite, e	ECC	0.0
Omjer masa, q	M2/M1	0.728
Efektivna temperatura zvijezde A, T_A (K)	TAVH	5560 ± 100
Efektivna temperatura zvijezde B, T_B (K)	TAVC	4380 ± 150
Mjera rotacije	F1, F2	1.0
Gravitacijsko zatamnjnje	G1, G2	0.32
Bolometrijski albedo	ALB1, ALB2	0.5
Bolometrijski koeficijent rubnog zatamnjnja	XBOL1, XBOL2	0.5
Treće svjetlo	EL3	0.0
U, V, B koeficijenti rubnog zatamnjnja	X2	0.5

Tablica 7.4. Optimizirani parametri WD programa

Optimizirani parametri	WD oznaka	Vrijednost
Potencijal primarne komponente, Ω_A	POT1	16.205 ± 0.235
Potencijal sekundarne komponente, Ω_B	POT2	17.659 ± 0.125
Inklinacija orbite i ($^\circ$)	INCL	85.31 ± 0.16
Monokromatski sjaj zvijezde A	L1	0.694 ± 0.020
Monokromatski sjaj zvijezde B	L2	0.094 ± 0.010
Frakcijski polumjer komponente A, r_A		0.0646 ± 0.0010
Frakcijski polumjer komponente B, r_B		0.0439 ± 0.0070

Tablica 7.5. Izračunate apsolutne veličine sustava V818 Tau.

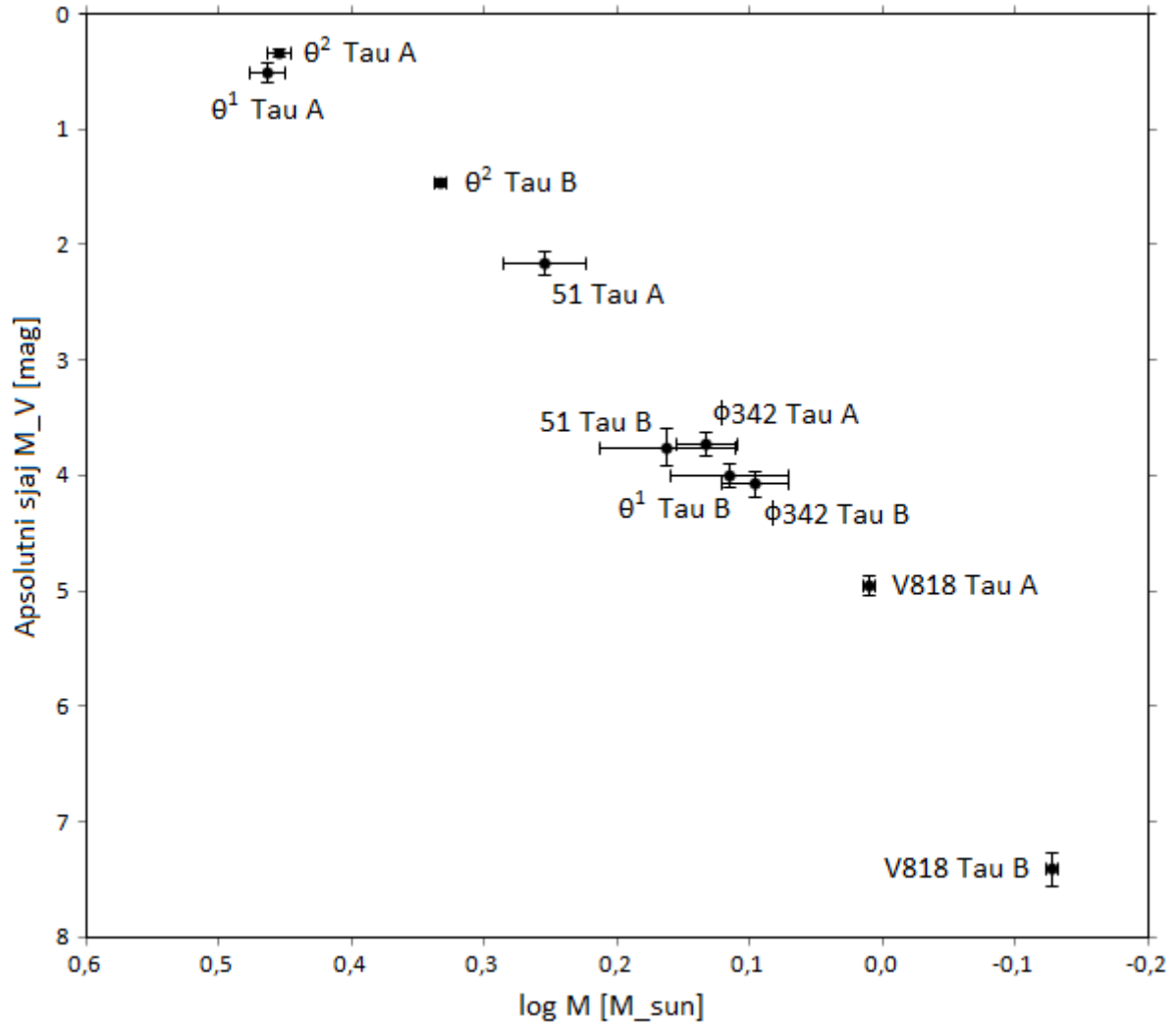
Apsolutne veličine	Jedinica	Vrijednost
Masa zvijezde A, M_A	M_\odot	1.026 ± 0.008
Masa zvijezde B, M_B	M_\odot	0.747 ± 0.006
Polumjer zvijezde A, R_A	R_\odot	1.038 ± 0.02
Polumjer zvijezde B, R_B	R_\odot	0.706 ± 0.01
Velika poluos orbite, a	R_\odot	16.07 ± 0.04
Luminozitet zvijezde A, L_A	L_\odot	0.9298 ± 0.0072
Luminozitet zvijezde B, L_B	L_\odot	0.1656 ± 0.0233
Brzina rotacije zvijezde A, $V_{\text{sink,A}}$	km/s	9.65 ± 0.14
Brzina rotacije zvijezde B, $V_{\text{sink,B}}$	km/s	5.43 ± 0.09
Apsolutni bol. sjaj, $M_{\text{bol,A}}$	mag	4.829 ± 0.085
Apsolutni bol. sjaj, $M_{\text{bol,B}}$	mag	6.702 ± 0.152
Apsolutni vizualni sjaj, $M_{V,A}$	mag	4.93 ± 0.09
Apsolutni vizualni sjaj, $M_{V,B}$	mag	7.39 ± 0.15

7.5. Relacija masa-luminozitet za Hijade

Za potvrdu relacije masa-luminozitet iskorišten je dijagram logaritma mase u ovisnosti o apsolutnom vizualnom sjaju. Uzeti su najnoviji podaci dvojnih sustava θ^1 Tau, θ^2 Tau, 51 Tau i ϕ 342, te vrijednosti dvojne zvijezde V818 Tau izračunate u ovom radu (tablica 7.6). Vrijednosti su prikazane na slici 7.14. Dobivene vrijednosti sustava V818 Tau u dobrom su slaganju s ostalim zvijezdama koje određuju ML relaciju Hijada.

Tablica 7.6. Vrijednosti masa i apsolutnog sjaja pet izabranih dvojnih sustava Hijada. Podaci su uzeti iz sljedećih izvora: [1] Torres i dr. 1997a, [2] Torres i dr. 1997b, [3] Torres i dr. 1997c, [4] Torres i dr. 2010, [5] ovaj rad.

Zvijezda	$M [M_\odot]$	$\log M$	M_V [mag]	Ref.
θ^1 Tau A	2.91 ± 0.09	0.464 ± 0.013	0.49 ± 0.09	[1]
θ^1 Tau B	1.31 ± 0.14	0.117 ± 0.044	3.99 ± 0.10	[1]
θ^2 Tau A	2.86 ± 0.06	0.456 ± 0.009	0.33 ± 0.03	[4]
θ^2 Tau B	2.16 ± 0.02	0.334 ± 0.004	1.44 ± 0.03	[4]
51 Tau A	1.80 ± 0.13	0.255 ± 0.031	2.14 ± 0.10	[2]
51 Tau B	1.46 ± 0.18	0.164 ± 0.051	3.75 ± 0.16	[2]
ϕ 342 A	1.363 ± 0.073	0.134 ± 0.023	3.71 ± 0.10	[3]
ϕ 342 B	1.253 ± 0.075	0.098 ± 0.025	4.05 ± 0.11	[3]
V818 Tau A	1.026 ± 0.008	0.011 ± 0.004	4.93 ± 0.09	[5]
V818 Tau B	0.747 ± 0.006	-0.127 ± 0.004	7.39 ± 0.15	[5]



Slika 7.14. Relacija mase i luminoziteta za Hijade, prikazana kroz odnos $\log M$ i M_V . Prikazane su vrijednosti pet dvojnih sustava navedenih u tablici 7.6.

7.6. Problem starosti i metaliciteta Hijada

Relacija masa-luminozitet za Hijade nekada se često uspoređivala s ML relacijom za Sunčevo susjedstvo. Međutim, pokazalo se da se članovi Hijada razlikuju od Sunca i susjednih zvijezda i po starosti, evolucijskom stupnju i metalicitetu, tako da postoji pomak u sjaju između ovih dviju grupa zvijezda. Najnovija istraživanja pokazuju da je metalicitet Hijada između $[Fe/H] = +0,09$ dex i $[Fe/H] = +0,20$ dex. Maksimalna starost skupa procjenjena je na 650 milijuna godina, prilagođavanjem teorijskih izohrona podacima pet dvojnih sustava Hijada, čije su apsolutne veličine izračunate s većom točnošću. Ovdje međutim postoji još prostora za prilagodbu. Potrebno je smanjiti pogreške u izračunu masa komponenata sustava 51 Tau, ϕ 342 i θ^1 Tau, koje još pokazuju odstupanja prevelika za ograničenje teorijskih

modela. Zadnji izračuni dali su još točnije vrijednosti za mase sustava θ^2 Tau, s manjim pogreškama (Torres i dr. 2010). Pokazalo se da je primarna komponenta θ^2 Tau A još masivnija (dobivena je čak oko 15% veća masa nego što se dobila u studiji Torres i dr. 1997). Sekundarna komponenta θ^2 Tau B isto pokazuje nešto veću masu od prijašnje. To je rezultiralo pomakom njihovih vrijednosti ispod proračunate izohrone Hijada za metalicitet $[Fe/H] = 0,14$ dex i starost od 650 milijuna godina. Prema novim izračunima sustava θ^1 Tau vrijednost mase primarne komponente također je veća, tako da su sve tri ove zvijezde sada ispod navedene izohrone. Kako ove zvijezde određuju gornji dio *ML* relacije (sustav θ^2 Tau nalazi se blizu točke skretanja), postoji mogućnost da bi starost skupa Hijada mogla biti manja od navedene, što pokazuju i najnoviji teorijski modeli.

Otvoreno je pitanje još i udio helija u zvijezdama Hijada. Ranije procjene uzimaju vrijednost zastupljenosti helija manju od Sunčeve, $Y = 0,26$ (za Sunce vrijedi $Y = 0,28$). No novijim izračunima mogu se prilagoditi modeli s $Y = 0,27$ i čak većim metalicitetom $[Fe/H] = 0,19$ dex (Torres i dr. 2010).

Sustav V818 Tau određuje donji dio *ML* relacije Hijada. Primarna komponenta V818 Tau A s vrlo točno određenom masom odličan je ograničavajući faktor teorijskih modela. Vrijednosti izračunate u ovom radu stavljaju zvijezdu nešto iznad izračunatih izohrona. U području nižih masa zvijezda javljaju se pogreške u modelima, pogotovo u proračunu polumjera zvijezda. To ukazuje na nužnost poboljšavanja postojećih modela kod zvijezda nižih temperatura i mase manje od 0,8 masa Sunca. U ovo područje spada sekundarna komponenta V818 Tau B, te se prilagođavanje staza prema njezinim vrijednostima ipak ne može smatrati preciznim.

Zaključak

Analizom novih spektroskopskih i fotometrijskih podataka pomrčinskog dvojnog sustava V818 Tau u zvjezdanom skupu Hijade dobivene su karakteristike obje zvijezde u sustavu. Izračunate su njihove mase, polumjeri, luminoziteti i apsolutni sjaj. Dobivene vrijednosti upotrijebljene su za postavu relacije mase i luminoziteta Hijada, uz pomoć otprije izračunatih podataka četiri izdvojena spektroskopska dvojna sustava. V818 Tau odredila je donji dio relacije za zvijezde manjih masa. Njezina primarna komponenta slična je Suncu, dok je sekundarna niže temperature i manje mase od Sunca i kao takva jedna od rijedih zvijezda među do sada otkrivenim članovima dvojnih sustava. Izračunate apsolutne veličine V818 Tau B u dobrom su slaganju s prijašnjim rezultatima, iako su masa i polumjer malo manji, dok je kod V818 Tau A prisutno malo veće odstupanje, što je moguća posljedica ponešto drugačijih vrijednosti dobivenih iz spektroskopske analize. Unatoč tim manjim razlikama, izračunate vrijednosti dobro se slažu s vrijednostima ostalih dvojnih zvijezda koje služe za određivanje relacije masa-luminozitet za Hijade.

Literatura

- de Bruijne, J. H. J., Hoogerwerf, R., de Zeeuw, P. T. 2000, *Astron. Astrophys.*, 367, 111
- Carroll, B. W., Ostlie, D. A., *An Introduction to Modern Astrophysics*, 2nd ed. Pearson Education, 2007.
- Cayrel de Strobel, G., Crifo, F., Lebreton, Y. 1997, *Hipparcos Venice '97*, ESA SP-402, 687
- Eddington, A. S. 1924, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 84, 308
- Eclipsing Binary Simulator, <http://astro.unl.edu/naap/ebs/animations/ebs.html>, 18.1.2014.
- Flower, P. J. 1996, *Astrophys. J.*, 469, 355
- Griffin, R. F., Gunn, J. E. 1977, *Astronom. J.*, 82, 176
- Hadrava, P. 1995, *Astron. Astrophys. Suppl.*, 114, 393
- Ilijić, S., Hensberge, H., Pavlovski, K., Freyhammer, L.M. 2004, *ASP Conf. Ser.*, 318, 111
- Isaac Newton Group of Telescopes, <http://www.ing.iac.es/Astronomy/instruments/ids/>, 10.2.2014.
- Kallrath, J., Milone, E. F., *Eclipsing Binary Stars: Modeling and Analysis*, Springer, 1999.
- Lastennet, E., Valls-Gabaud, D., Lejeune, T., Oblak, E. 1999, *Astron. Astrophys.*, 349, 485
- Lebreton, Y., Fernandes, J., Lejeune, T. 2001, *Astron. Astrophys.*, 374, 540
- McClure, R. D. 1982, *Astrophys. J.*, 254, 606
- Murdin, P., *Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics*, 1st ed. NPG, IOP, 2001.
- Pavlovski, K., *Predavanja iz Astrofizike I. Fizika zvijezda*, interna skripta, Zagreb, 1993.
- Pavlovski, K., Hensberge, H. 2010, *ASP Conf. Ser.*, 435, 207
- Pavlovski, K., Southworth, J. 2012, *IAU Symposium 282*, 327
- Perryman, M., Brown, A. G. A., Lebreton, Y. i dr. 1998, *Astron. Astrophys.*, 331, 81
- Peterson, D. M., Solensky, R. 1988, *Astrophys. J.*, 333, 256
- Schiller, S. J., Milone, E. F. 1987, *Astronom. J.*, 93, 1471
- Simon, K. P., Sturm, E. 1994, *Astron. Astrophys.*, 281, 286
- Southworth, J. 2012, arXiv:1201.1388

- The STEREO Mission, http://www.nasa.gov/mission_pages/stereo/main/index.html, 20.1.2014.
- Tamajo, E., Pavlovski, K., Southworth, J. 2011, *Astron. Astrophys.*, 526, A76
- Taylor, B. J., 1980, *Astronom. J.*, 85, 242
- Torres, G., Ribas, I. 2002, *Astrophys. J.*, 567, 1140
- Torres, G., Stefanik, R. P., Latham, D. W. 1997a, *Astrophys. J.*, 474, 256
- Torres, G., Stefanik, R. P., Latham, D. W. 1997b, *Astrophys. J.*, 479, 268
- Torres, G., Stefanik, R. P., Latham, D. W. 1997c, *Astrophys. J.*, 485, 167
- Torres, K. B. V., Lampens, P., Frémat, Y., Hensberge, H., Lebreton, Y., Škoda, P. 2011, *Astron. Astrophys.*, 525, A50
- Wilson, R. E. 1994, *ASP*, 106, 921
- Wilson, R. E., Devinney, E. J. 1971, *Astrophys. J.*, 166, 605
- Wilson, R. E., Van Hamme, W. 2004, *Computing Binary Stars Observables (Reference Manual to the Wilson-Devinney Program)*, Department of Astronomy, University of Florida, Gainesville, FL, 2004 edition
- Wright, K. T., Fossati, L., White, G. J., Bewsher, D., Norton, A. J. 2012, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 427, 2298
- Wright, K. T., White, G. J., Bewsher, D., Norton, A. J. 2011, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 416, 2477
- Zola, S. 2000, *Baltic Astron.*, vol 9, 197