Kemijska evolucija dvojnih zvijezda

Tamajo, Ettore

Doctoral thesis / Disertacija

2009

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:784785

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb

1. UVOD

1.1 Uloga dvojnih zvijezda

U neposrednoj blizini Sunca oko 60 % zvijezda nalazi se u dvojnim ili višestrukim sustavima. Dvojnim sustavom nazivamo par gravitacijski povezanih zvijezda, koje se gibaju oko zajedničkog središta masa. Dvojne su zvijezde izvor temeljnih astrofizičkih parametara: mase, polumjera, efektivne temperature i kemijske građe. Potpuno razumjevanje strukture i razvoja zvijezda nije moguće bez proučavanja dvojnih zvijezda. Današnje metode koje se koriste za analizu ovise uvelike o geometriji sistema, udaljenosti, te relativnim masama i luminozitetima komponenata. Opća klasifikacija dvojnih zvijezda temelji se na opažačkim svojstvima.

Mase se zvijezda direktno mogu izmjeriti jedino zvijezdama u dvojnim ili višestrukim sustavima. Naročito je to značajno za mase komponenata gdje interakcija komponenata nije tako izrazita. Ukoliko je dvojni sustav pomrčinski tada se iz svjetlosnih krivulja mogu odrediti polumjeri zvijezda i omjer njihovih efektivnih temperatura. Dvojne su zvijezde također dragocijen izvor informacija o unutarnjoj strukturi zvijezda, bilo proučavanjem apsidalnog gibanja kod ekscentričnih sustava, bilo kada zbog prijenosa tvari zvijezda-donor izgubi toliko tvari da se vidi ogoljela zvjezdana jezgra.

Spektroskopske dvojne zvijezde su najdragocjeniji tipovi dvojnih zvijezda, posebno ako se radi o pomrčinskom sustavu. Ukoliko se u složenom spektru 'vide' obje komponente, ne samo da se mogu odrediti mase komponenata, već se mogu izvesti i ostali fizikalni parametri (polumjeri zvijezda i omjer toka zračenja, odnosno omjer efektivnih temperatura komponenata). Ako je udaljenost dvojnog sustava velika, komponente se više vizualno ne mogu razlučiti. Međutim, njihovo periodičko kretanje oko zajedničkog središta masa imati će za posljedicu periodične pomake valnih duljina spektralnih linija. Zbog Dopplerove pojave, spektralne će linije komponenata biti pomaknute prema crvenom dijelu spektra, odnosno plavom dijelu spektra ovisno o tome da li se zvijezda udaljava ili približava od opažača.

Zvijezde glavnoga niza velikih masa, $M \geq 8\,M_{\odot}$ su vruće zvijezde spektralnog tipa O i B. Istraživanja ukazuju na pojavu dodatnog miješanja materije unutar tih tipova zvijezda (Lyubimkov 1996, Lyubimkov et al. 1997). U prilog takvoj pojavi doprinosi činjenica da kod zvijezda velikih masa dolazi do povećanja zastupljenosti He i N (uz smanjenu zastupljenost C i O) u atmosferama OB - zvijezda. Lyubimkov (1984, 1989) ukazuje da većina jednostrukih zvijezda ranog B - spektralnog tipa koje se nalaze na glavnom nizu imaju atmosferu obogaćenu He i N, i

da je takav porast zastupljenosti helija i dušika u vezi sa starosti i masom same zvijezde (što su kasnije potvrdili Gies & Lambert 1992). Činjenica da se u istraživanjima Lyubimkova i suradnika radi o jednostrukim zvijezdama, opravdava istraživanje zastupljenosti helija i drugih elemenata u dvojnim zvjezdanim sustavima.

Detaljnu i sistematičnu analizu kemijske zastupljenosti elemenata vrućih zvijezda velikih masa u dvojnim sustavima je načinio Leushin (1984, 1986, 1988). Njegova je analiza dvojnih sustava pokazala da komponente dvojnih zvjezdanih sustava imaju veću zastupljenost helija u atmosferi od pojedinačnih zvijezda. Dakle suprotno teorijskom očekivanju, povećanje zastuljenosti helija u atmosferi zvijezde započinje već za vrijeme boravka na glavnom nizu, što bi bilo moguće objasniti mješanjem materije unutar radijativnog omotača OB - zvijezda. Nedostatak istraživanja Leushina je taj što se koristio fotografskim spektrima slabe kvalitete što je dodatni poticaj da se daljnja istraživanja vrše na visoko rezolucijskim spektrima visokih vrijednosti signal/šum (u daljnjem tekstu S/N).

U novije se vrijeme evolucija zvijezda velikih masa uvelike objašnjava rotacijom i zvjezdanim vjetrom. Meynet et al. (1994) su pokazali da ako bi se već udvostručio gubitak mase zvijezde, značajno bi utjecalo na promjenu evolucijske trake razvoja zvijezde u HR dijagramu. Prema tome, kako bi se testirali različiti modeli zvjezdane evolucije, potrebno je imati vrlo precizno određene zvjezdane parametre. To je moguće ostvariti jedino proučavanjem dvojnih zvjezdanih sustava.

1.2 Dvojne zvijezde velikih masa

Nukleosinteza u jezgri zvijezde završava stvaranjem željeza. Teži elementi od željeza nastaju u kataklizmičkim procesima kao što je eksplozija supernova. Samo zvijezde velikih masa, u konačnici svojeg razvoja mogu, postati supernovae. Stoga su zvijezde velikih masa od velike važnosti pri proučavanju kemijske i kinetičke evolucije galaksija (Samland 1998). Veliki luminozitet takvih zvijezda može biti vrlo koristan prilikom određivanja udaljenosti bilo u galaktičkom bilo u kozmološkom kontekstu (Guinan et al. 1998; Ribas et al. 2005; Southworth et al. 2005, 2007). U posljednje vrijeme se pojavljuju novi teorijski modeli koji u sebi sadrže velik broj procesa koji su temeljni u proučavanju strukture i evolucije zvijezda velikih masa, kao što su primjerice konvektivno prebacivanje jezgre zvijezda, semikonvekcija, rotacijsko mješanje materije i gubitak mase. Od navedenih procesa, prebacivanje jezgre i rotacijsko mješanje mogu značajno utjecati na predviđeno vrijeme života i luminozitet zvijezda velikih masa (Maeder & Meynet 2000). Prema tome, empirijska ograničenja teško mogu zaobići takve procese unatoč napretku opažačkih mogućnosti i tehnika (Hilditch 2004). Pomrčinske dvojne zvijezde su idealni objekti za provjeru opažačkih ogra-

ničenja strukture i evolucije zvijezda velikih masa jer su glavni izvori direktno mjerljivih zvjezdanih veličina (Andersen 1991). Nažalost, precizne fizikalne veličine (2% ili bolje) dostupne su samo za nekoliko dvojnih pomrčinskih zvijezda. Međutim, nedostaju podaci o kemijskoj građi komponenata drugih sustava. Kemijsku zastupljenost elemenata nije lako naći iz spektara zvijezda velikih masa, iz nekoliko razloga. Prvo, spektar zvijezde sadrži malen broj spektralnih linija. Drugo, zbog velikih brzina rotacije, spektralne su linije proširene i plitke pa su nam potrebni spektri visokih rezolucija i velikih vrijednosti S/N-a kako bismo izračunali vjerodostojne parametre zvijezda. Na kraju, u spektrima pomrčinskih dvojnih zvijezda, spektralne se linije jedne komponente mogu i preklapati s linijama druge komponente (tzv. 'prekrivanje' linija). U pionirskom radu, Simon & Sturm (1994) razvili su tehniku za raspetljavanje složenih spektara dvojnih zvijezda. Individualni spektri komponenata dvojnog sustava dobivaju se iz vremenskog niza opaženih složenih spektara u nekom rasponu orbitalne faze. Ovakav postupak raspetljavanja nije pod utjecajem linijskog preklapanja, za razliku od metode kros-korelacije (Southworth & Clausen 2007). Individualni spektri komponenata koji su dobiveni ovom metodom raspetljavanja imaju i veću vrijednost S/N-a nego što ga posjeduju opaženi složeni spektri. Kao takvi vrlo su pogodni za analizu kemijske zastupljenosti elemenata. Nadalje, prisutna degeneracija između efektivne temperature ($T_{\rm eff}$) i površinskog ubrzanja ($\log g$) nije veliki problem kod pomrčinskih dvojnih zvijezda jer se površinska ubrzanja mogu izračunati vrlo precizno (0.01 dex ili bolje) za obje komponente dvojnog sustava. Vrlo detaljnu analizu takvih mogućnosti dali su Pavlovski & Hensberge (2005). Glavni cilj ove disertacije jest provjeriti predviđanja modela evolucije zvijezda velikih masa putem empirijskih ograničenja. To se jedino može postići proučavanjem pomrčinskih dvojnih zvijezda velikih masa, kod kojih se masa i polumjeri mogu odrediti do točnosti od 1 % i bolje. U takvom kontekstu, tehnika spektralnog raspetljavanja je od ključne važnosti pri određivanju kako mase tako i kemijske zastupljenosti elemenata u zvjezdanoj atmosferi komponenata dvojnih sustava. Upravo zbog preklapanja spektralnih linija, te činjenice da u spektrima OB pomrčinskih zvijezda velikih masa nema puno linija, nije jednostavno mjeriti radijalne brzine (RV) i mase.

Orbitalni elementi određeni iz radijalnih brzina koje su izmjerene prilagodbom Gaussovim profilima spektralnih linija pokazali su se manje preciznim negoli oni određeni postupkom spektralnog raspetljavanja (Simon et al. 1994; Sturm & Simon 1994; Hensberge, Pavlovski & Verschuren 2000, Hensberge & Pavlovski 2007). Prilikom određivanja radijalnih brzina putem kros-korelacije glavna je poteškoća nalaženje odgovarajućeg 'spektra obrasca' i preklapanje spektralnih linija, pa se javljaju sistematične pogreške koje se postupkom raspetljavanja mogu eliminirati. Takav se zaključak može dobiti pogotovo ako se radi o komponentama dvojnog sustava sličnih fizikalnih osobina.

1.3 Formulacija metode

U ovom se radu analizira zastupljenost kemijskih elemenata u spektrima dvojnih zvijezda velikih masa. Postupak koji se pri tome koristi je složen, te se koriste nove metode koje do sada nisu bile uvrštene u tako detaljne analize. U prvom su redu za takvu analizu vrlo bitni spektri dvojnih zvjezdanih sustava vrlo visoke kvalitete, što znači spektri velike spektralne rezolucije i s velikim omjerom S/N.

Prvi korak u analizi opažanih spektara je redukcija unutar standardnih procedura programskog paketa IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) kako bismo uopće mogli dalje vršiti bilo kakvu analizu spektara. Spektri koji se istražuju u ovome radu su opažani sa FOCES i FIES échelle spektrografima velike spektralne rezolucije u valnom području od 3600 - 9400 Å. Odziv spektrografa je u obliku zvonolikih redova iz kojih je potrebno ekstrahirati pojedine dijelove spektra (susjedni se redovi preklapaju).

Drugi je korak da se složeni spektri postupkom spektralnog raspetljavanja razdvoje na komponentne spektre pojedinih zvijezda dvojnog sustava i kao takvi dalje analiziraju zasebno za svaku od pojedinih komponenata. Ako postoje pouzdana fotometrijska mjerenja pojedinih dvojnih zvjezdanih sustava, onda ih koristimo za proračun doprinosa luminoziteta pojedine komponente dvojnog zvjezdanog sustava. To je postupak renormalizacije spektara komponenata dvojnog zvjezdanog sustava. Ako takva fotometrijska mjerenja nisu dostupna za dani zvjezdani sustav, tada se postupkom prilagodbe mogu izračunati pojedini doprinosi luminoziteta komponenata, što se pokazalo kao velika prednost. U postupku se spektralnog raspetljavanja bez obzira na dostupnost fotometrijskih mjerenja koristi činjenica da obje komponente jednako doprinose ukupnom luminozitetu dvojnog sustava tj. da su svjetlosni faktori jednaki 0.5 za svaku od pojedinih komponenata (tzv. generička varijanta), a zatim se ide u postupak renormalizacije komponentnih spektara sa stvarnim svjetlosnim faktorima pojedinih zvijezda (detaljno opisano u 3. poglavlju).

U ovoj se disertaciji koristi i novi način prilagodbe teorijskih na opažene spektre, pomoću implementacije genetičkog algoritma. Algoritam stvara nasumične generacije na temelju zakonitosti genetike i traži najbolje rješenje u smislu minimalizacije odstupanja u prostoru parametara koji razapinju matricu prostora. Takav je postupak vrlo učinkovit jer je program prilagodbe napisan na način da postoje niz mogućnosti blokiranja pojedinih parametara koje se u danom trenutku ne želi varirati.

Vrlo važna činjenica istraživanja je sinteza teorijskih spektara iz uspostavljenog modela zvjezdane atmosfere za dane fundamentalne parametre (efektivna temperatura i površinsko ubrzanje zvijezde), korištenjem što je moguće potpunijeg skupa podataka o zvijezdama. Za samo računanje

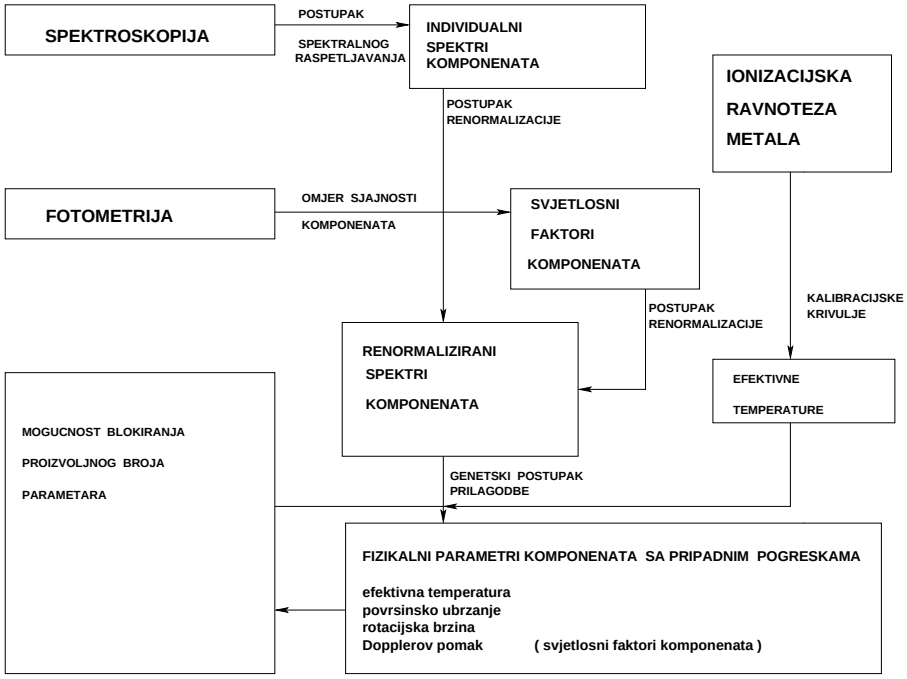
modela zvjezdanih atmosfera korišten je program ATLAS9 R. L. Kurucza sa Smithsonian Astrophysical Observatory u Cambridge-u, MA.

Stanje lokalne termodinamičke ravnoteže pretpostavlja da duboko u unutrašnjosti zvijezda vlada ravnoteža između zračenja i čestica tvari. Tada temperatura i tlak plina preko jednadžbe stanja idealnog plina određuju njegova ostala svojstva. Polje zračenja je izotropno i njegova se spektralna energetska raspodjela može opisati zračenjem crnog tijela (Planckovim zakonom). Raspodjela brzina čestica odgovara Maxwell-Boltzmanovoj raspodjeli. Naseljenosti atomskih razina određene su Boltzmannovom raspodjelom. Udio pojedinih stupnjeva ionizacije, a time i gustoća slobodnih elektrona, opisan je Sahinom jednadžbom. Pretpostavka se temelji na činjenici da je pri temperaturi i tlaku koje u zvjezdanoj unutrašnjosti očekujemo, srednji slobodni put fotona i čestica mnogo manji od udaljenosti na kojoj je uočljiva promjena temperature. To zapravo znači da su područja u kojima temperaturu možemo smatrati stalnom dovoljno velika za uspostavljanje stroge termodinamičke ravnoteže.

Napuštanjem zvjezdane unutrašnjosti stižemo u područje u kojem pretpostavka o termodinamičkoj ravnoteži više ne vrijedi. Padom temperature i tlaka, česticama raste srednji slobodni put. Polje zračenja više neće biti izotropno, niti će se moći opsati Planckovim zakonom. Polje zračenja više neće biti određeno temperaturom u danoj točki, nego će ovisiti o stanju plina u okolnom prostoru, pa je time narušena termodinamička ravnoteža. Novonastalo ravnotežno stanje, u kojem fotoni osjećaju gradijent temperature, a materijalne čestice i dalje slijede termodinamičku ravnotežu, zovemo stanjem lokalne termodinamičke ravnoteže.

Još dalje nalazimo područje zvijezde u kojem je gustoća materijalnih čestica toliko niska da njihovi međusobni sudari postaju rijetki u odnosu na učestalost interakcija sa zračenjem. Više ne možemo očekivati niti lokalnu termodinamičku ravnotežu, jer gustoća materijalnih čestica postaje zanemariva, i preostaje samo polje zračenja. Područje u kojem materijalne čestice još nisu potpuno iščezle, a postoji znatna vjerojatnost da foton bez daljnjih interakcija napusti zvijezdu, nazivamo zvjezdanom atmosferom. Glavno pitanje bi bilo, na kojoj dubini zvjezdane atmosfere nastane spektralna linija, i vrijede li uvjeti lokalne termodinamičke ravnoteže?

Kao metodu u ovoj se disertaciji koristi postupak kojim se parametri efektivnih temperatura zvijezda računaju iz ionizacijske ravnoteže metala. Naime, iz teorijski sintetiziranih zvjezdanih spektara na određenim temperaturama i vrijednostima površinskog ubrzanja računaju se omjeri ekvivalentnih širina iona metala koji onda određuju kalibracijske krivulje iz kojih se za danu vrijednost omjera iona metala realnoga spektra (mjere se ekvivalentne širine linija raspetljanih spektara) iščitavaju temperature komponenata dvojnog sustava. Shematski prikaz pojedinih faza računa su prikazani na sl. 1.1.



Slika 1.1: Shema računanja zvjezdanih parametara.

2. PRIPREMA SPEKTARA ZA ANALIZU

2.1 Uvod

Većina opaženih spektara koji su korišteni za istraživanje u ovoj disertaciji snimljeni su spektrografima FOCES (Fibre Optics Cassegrain Échelle Spectrograph) i FIES (Fibre-fed Échelle Spectrograf). FOCES se nalazi na 2.2 m teleskopu German-Spanish Astronomical Center na Calar Alto-u u Španjolskoj, a FIES na 2.5 m Nordic Optical Telescope na La Palmi, Španjolska. Tehnička karakteristika FOCES spektrografa je, da se sastoji od 100 μm optičkih vlakana. Spektralni je raspon od 380 - 750 nm prikazan u 70 spektralnih redova. Spektralna je razlučivost $R = 40\,600$ s rezolucijom od 2 piksela.

FIES je također visoko rezolucijski échelle spektrograf koji ima maksimalnu razlučivost od $R = 67\,000$. Spektralni je raspon od 370 - 730 nm. FIES spektrograf je montiran na NOT - ov teleskop pomoću pokretnog 45° zrcala unutar fokalne ravnine teleskopa. Odaziv échelle spektrografa je u obliku zvonolikih redova, kojih u cijelom spektralnom području ima oko 70 - tak (sl. 2.1). Funkcija zvonolikog reda ovisno o valnoj duljini poprima oblik:

$$R(\lambda) = \frac{sin^2 \pi \alpha X}{(\pi \alpha X)^2} \tag{2.1}$$

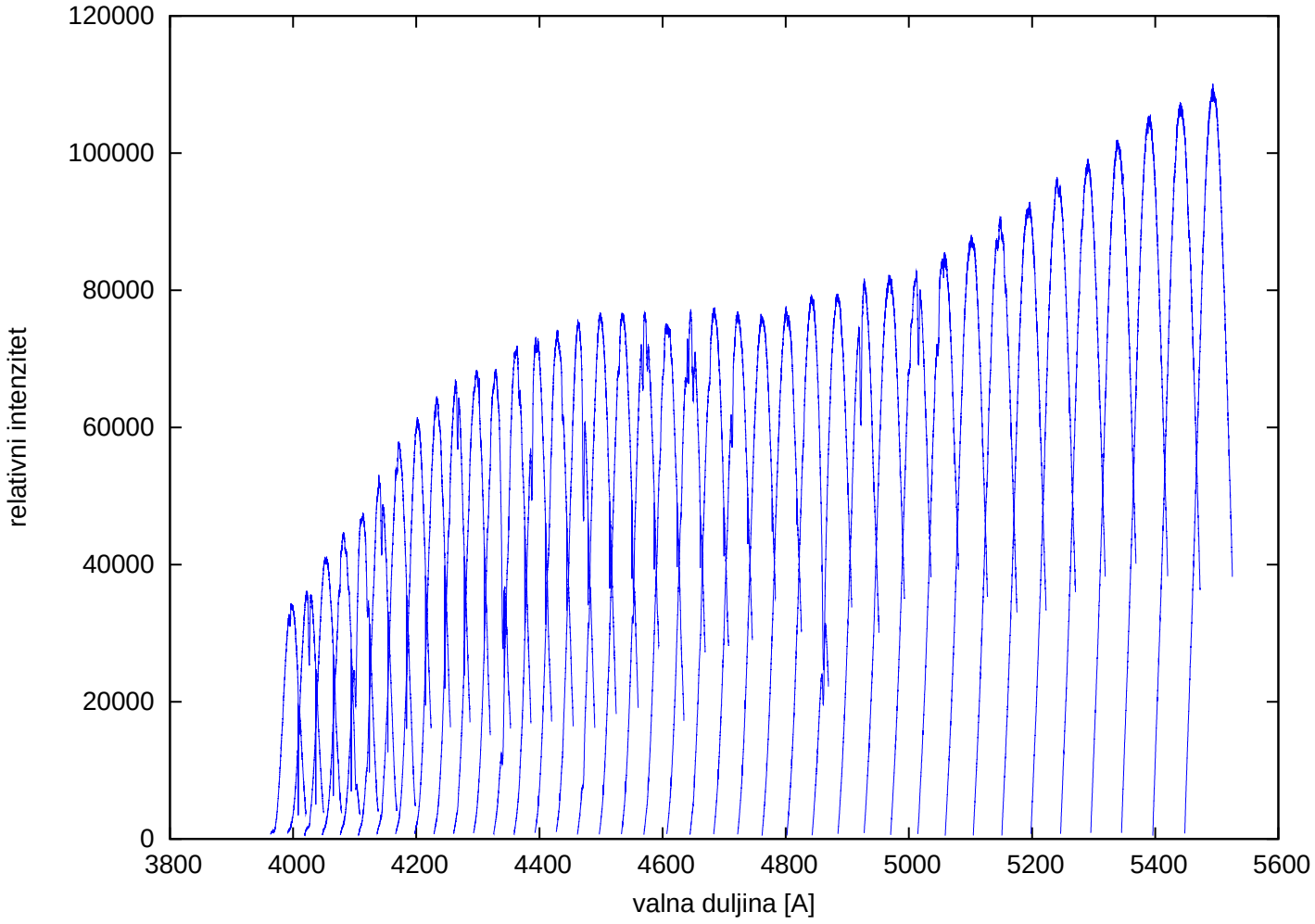
pri čemu je α konstanta rešetke s vrijednosti između 0.5 i 1, $X = m(1 - \lambda_c)$ gdje je m red zvona a λ_c valna duljina središta pojedinog zvona m. Oba su parametra vezana preko konstante rešetke k kao $k = m\lambda_c$. Međutim, samo ekstrahiranje spektara u ovom je radu napravljeno pomoću drugih metoda koje su se pokazale puno efikasnijima i bit će detaljno opisane u slijedećem podpoglavlju.

2.2 Rektifikacija échelle spektara

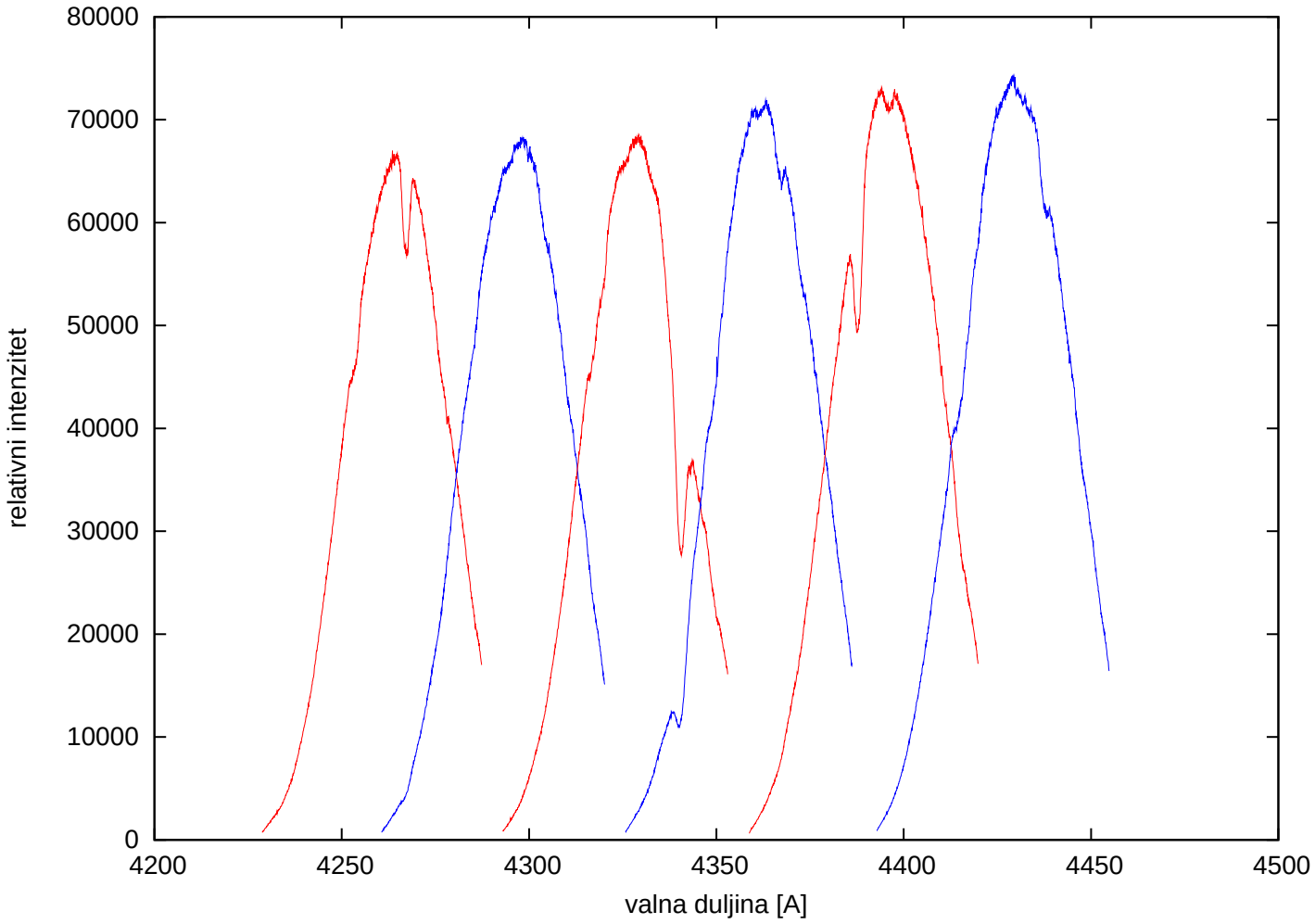
Za rektifikaciju échelle spektara na jediničnu skalu kontinuuma razvijeni su programi koji provlače polinome 7. 8. i 9. stupnja (ovisno o obliku pojedinog reda) kroz pojedinačne redove spektra. Naravno, odmah se nameće pitanje o načinu provlačenja polinoma kroz zadani red spektra. Za što vjerodostojniji odabir točaka u kontinuumu spektra, izračunat je pomoćni teorijski spektar kao predložak sličnih fizikalnih parametara. U spektru predlošku su odabrane točke za koje smo (relativno) sigurni da pripadaju kontinuumu, te ih preslikamo na opaženi spektar koji je još uvijek bio u relativnoj skali intenziteta i tipičnog oblika poluzvona ('blaze'). Kroz te se točke provlače

polinomi najčešće 7., 8. ili 9. stupnja, a pojedini su vrhovi polinoma usuglašeni polinomom 2. ili 3. stupnja (sl. 2.3). Kako bi rektifikacija bila što bolje provedena, rađeni su i 'master' polinomi koji su bili superponirani iz nekoliko daljnjih susjednih redova spektra upravo da bi što bolje očuvali opći trend pojedinih redova spektra. To nam je posebno pomoglo u rektifikaciji redova koji su sadržavali Balmerove linije vodika. One su posebno teške za rektifikaciju jer su vrlo duboke u odnosu na kontinuum, a širina im doseže značajan dio spektralnog reda.

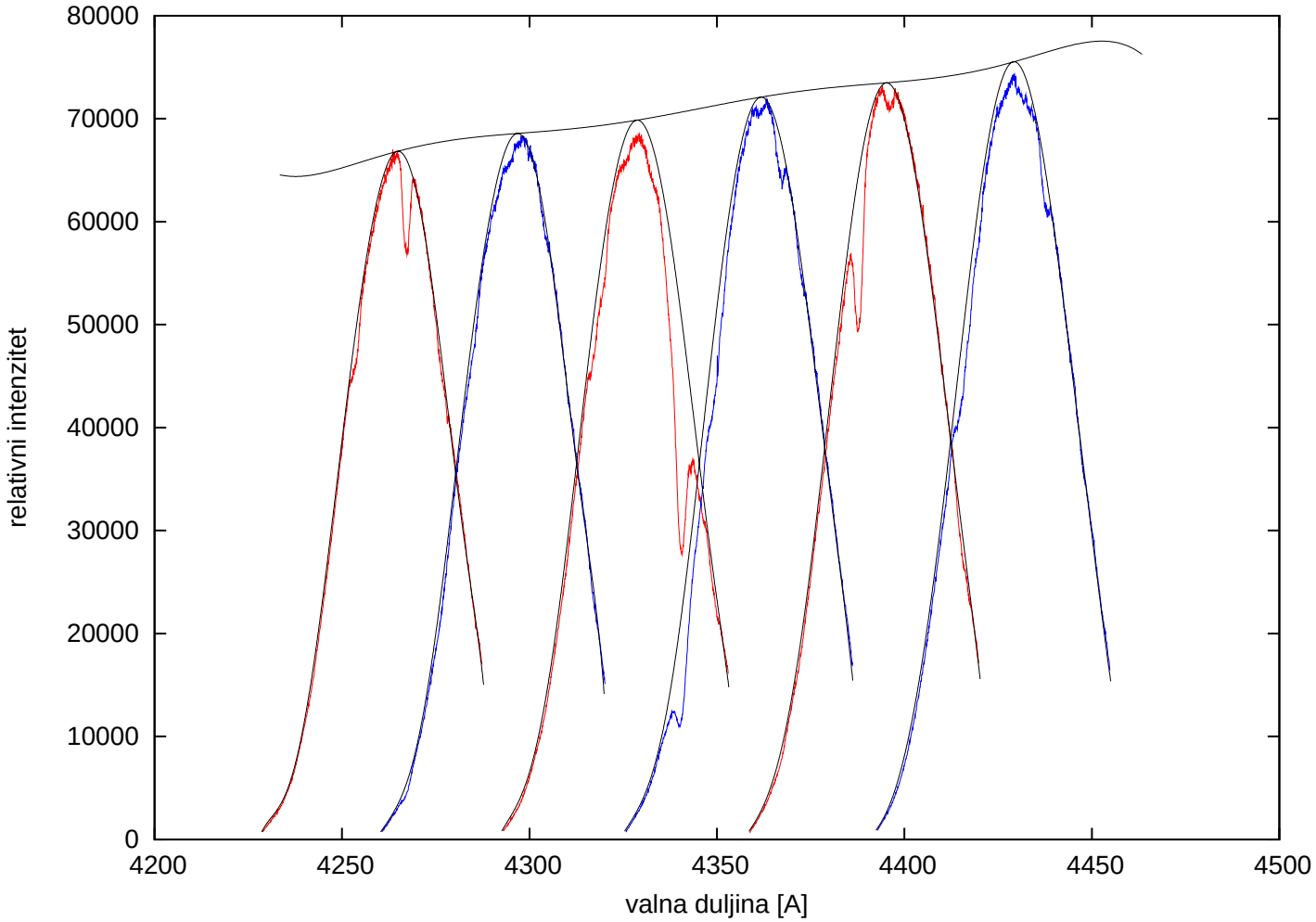
Na sl. 2.4 vidljivi su rektificirani susjedni redovi spektra oko H_γ linije. Posebno je važno naglasiti činjenicu kako je nakon rektificiranja preklapanje (razlika) usuglašeno do 0.5 % normaliziranog toka zračenja susjednih redova (sl. 2.5). Tako su rektificirani spektri dali dobru podlogu za daljnji postupak raspetljavanja složenih spektara i kasnije za renormalizaciju raspetljanih spektara pojedinih komponenata dvojnog sustava.



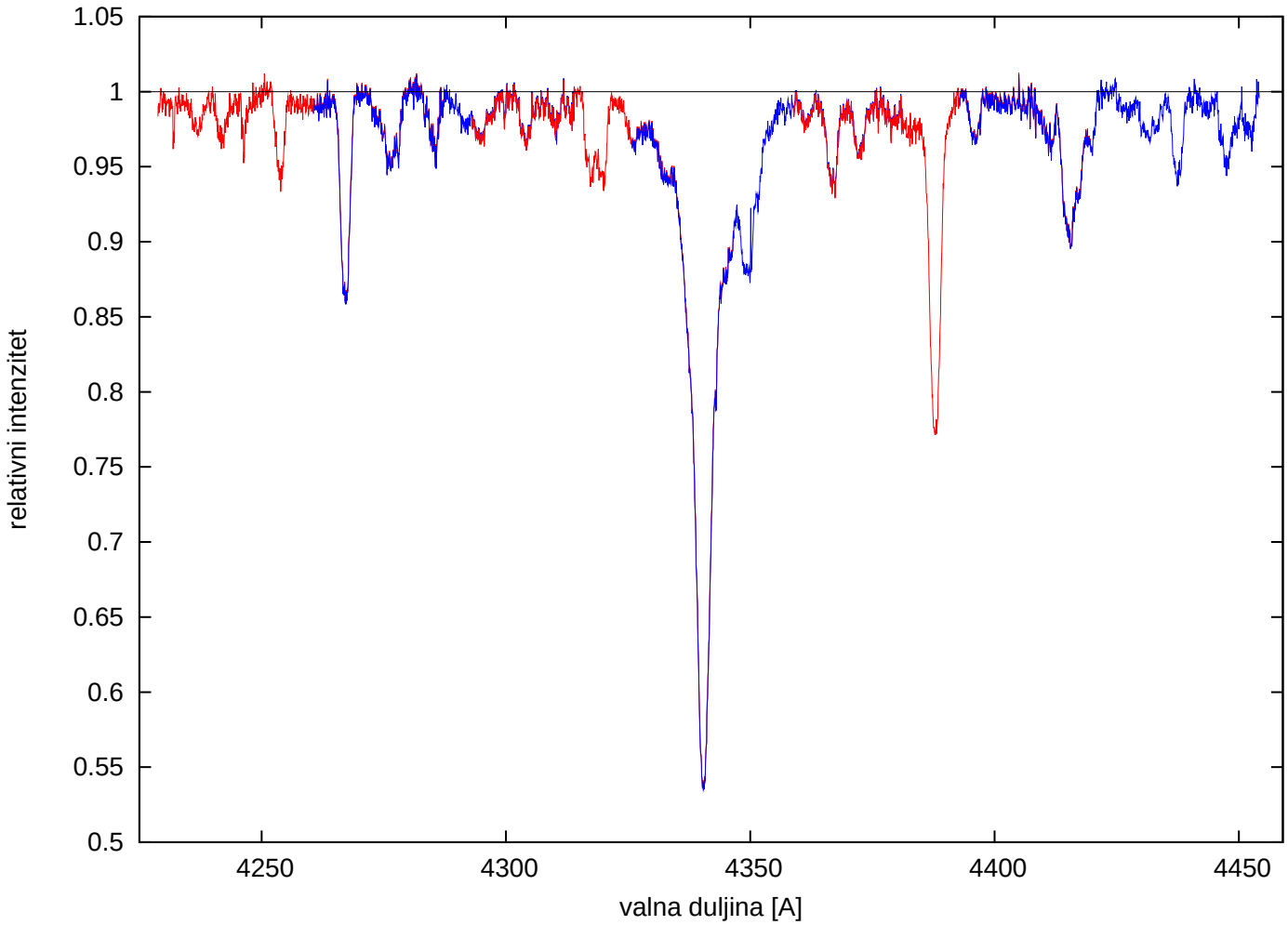
Slika 2.1: Reducirani opaženi redovi échelle spektra od 10. do 49. reda.



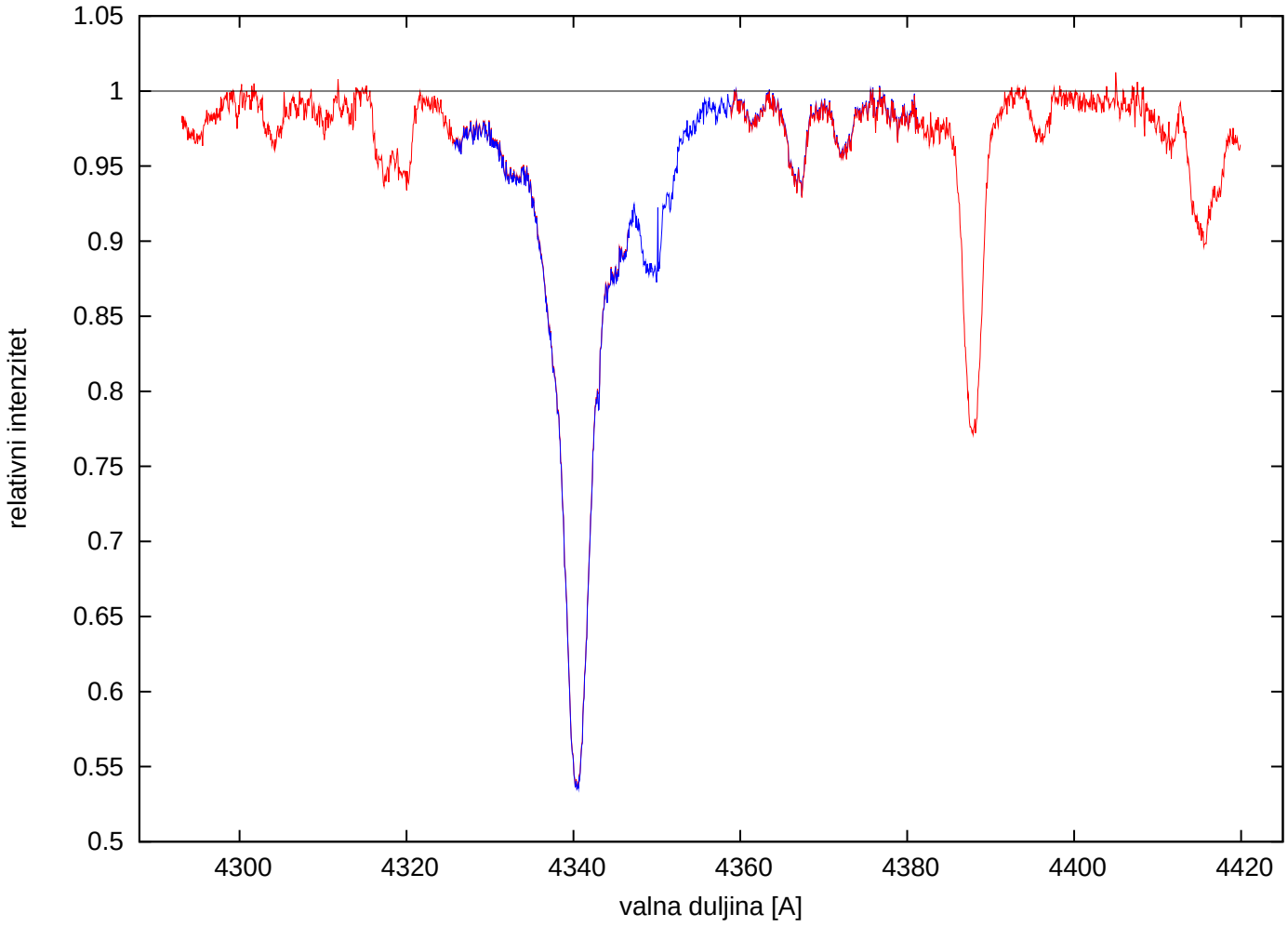
Slika 2.2: Susjedni redovi od 19. do 24., vidljivo je preklapanje susjednih redova ('blaze').



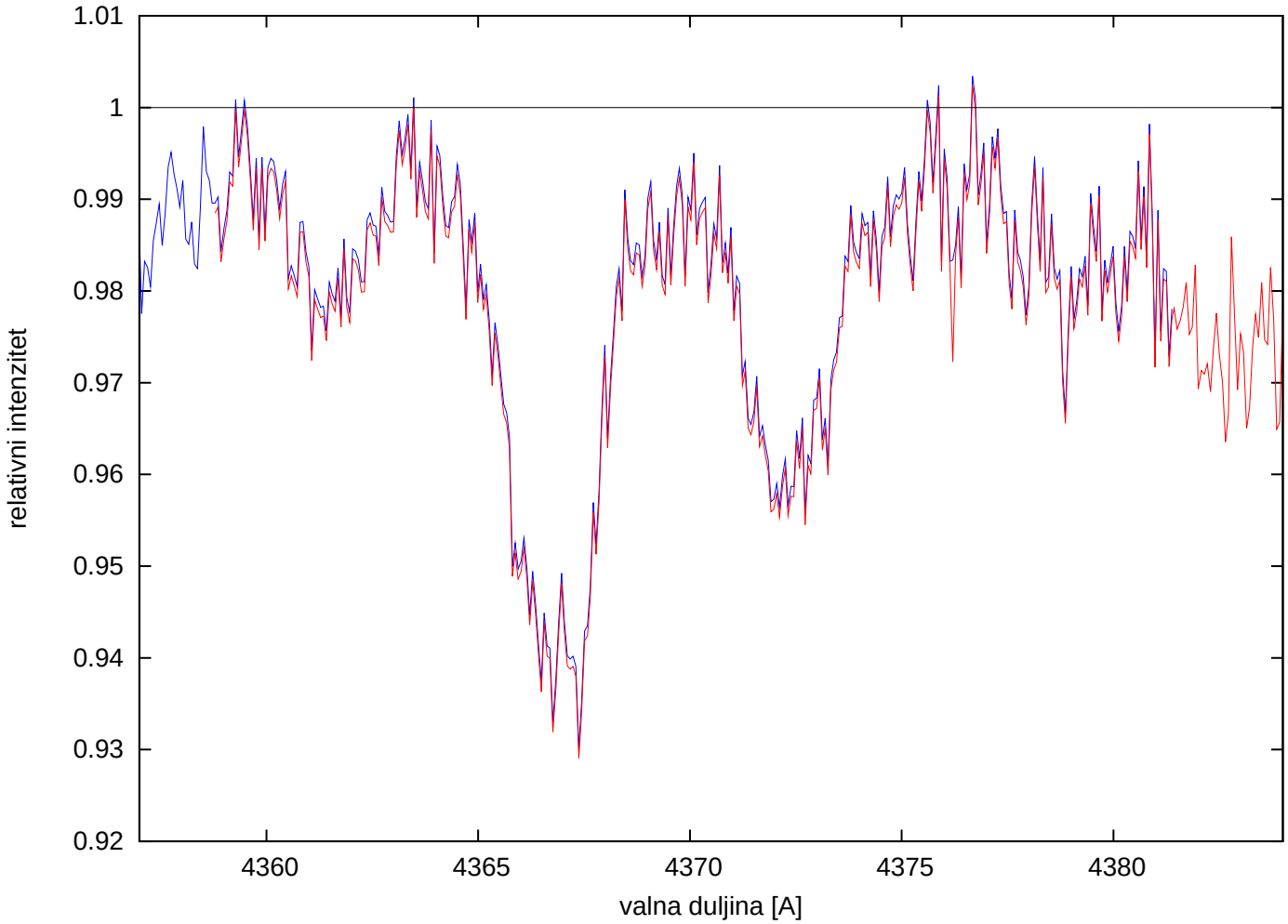
Slika 2.3: Polinomi 9. stupnja (crno) provučeni kroz redove 19. - 24. i 3. stupnja provučen kroz vrhove pojedinih polinoma.



Slika 2.4: Rektificirani susjedni redovi ('blaze'-ovi) 19. - 24., vidljiva je Balmerova H_γ linija na λ4340 Å.



Slika 2.5: Preklapanje rektificiranih susjednih 21., 22. i 23. reda échelle spektra.



Slika 2.6: Preklapanje rektificiranih susjednih 22. i 23. reda échelle spektra kako bi se uočila razlika dvaju susjednih redova koja iznosi manje od 0.5 % normaliziranog toka zračenja.

3. RASPETLJAVANJE SPEKTARA DVOJNIH ZVIJEZDA

3.1 Model složenog spektra

Spektar dvojnog zvjezdanog sustava složen je od spektara pojedinih komponenata. Model složenog spektra formulira se pod pretpostavkama da se kao prvo, zvijezde komponente sustava gibaju u orbiti oko zajedničkog središta mase i drugo, da su spektri komponenata podložni Dopplerovu pomaku uslijed orbitalnog gibanja zvijezda i faktoru koji opisuje plimna izobličenja komponente i eventualne pomrčine. Ni na koji drugi način spektri komponenata ne ovise o vremenu. Konačno, opaženi složeni spektri su linearna kombinacija spektara komponenata, i nisu podložni apsorpciji u međuzvjezdanoj sredini ili u atmosferi Zemlje. Prisutan je jedino slučajan šum opisan normalnom razdiobom.

Jednadžba koja se bavi formulacijom problema rastavljanja spektara prikazujući spektre kao funkcije kontinuirane varijable dana je kao:

$$\mathbf{Y_j}(\lambda) = \sum_k \epsilon_{kj} \mathbf{X}((1 - \beta_{kj})\lambda) \tag{3.1}$$

$\mathbf{Y}$ označava složeni spektar, $\mathbf{X}$ predstavlja pojedini spektar komponente preko parametra k a indeks j ide preko vremena t_j u kojima su spektri opaženi. Faktor pomrčine je oznake ϵ_{kj} za k-tu komponentu u vremenu t_j. Prilikom ulazne, izlazne ili djelomične pomrčine, parametar ϵ poprima vrijednosti [0,1], gdje je kod potpune pomrčine ϵ=0. β_{kj} je radijalna brzina k-te komponente u vremenu t_j. Slijedeći korak je da se jednadžbe pišu u diskretnoj formulaciji i to na način da se spektar zvijezde komponente dvojnog sustava koji je bio prikazan kao općenita funkcija kontinuirane varijable sada zamjenjuje funkcijom koja ovisi o valnoj duljini, a određena je velikim brojem slobodnih parametara. Ukoliko je ta funkcija linearna u parametrima, problem rastavljanja složenih spektara može se prikazati kao sustav linearnih jednadžbi. Standardna tehnika za rješavanje takvog problema jest kriterij najmanjih kvadrata.

3.2 Metoda raspetljavanja složenog spektra

Simon & Sturm (1994) koristili su ponešto pojednostavljenu formulaciju problema. Njihov pristup danas nazivamo 'rastavljanjem u domeni valnih duljina' ili rastavljanje u 'prostoru brzina'.

Osnovno pojednostavljenje sastoji se u tome da su svi opaženi spektri uzorkovani na mreži točaka ekvidistantnih u logaritmu valne duljine. Tako je Dopplerov pomak koji odgovara određenoj radijalnoj brzini, izražen brojem točaka, istim pri svim valnim duljinama. Nadalje, pretpostavlja se da pri svim valnim duljinama, pri danoj fazi, kontinuumi zvijezda komponenata jednako doprinose kontinuumu složenog spektra. Konačno, pretpostavlja se da su pogreške pri mjerenju amplituda jednake za sve spektre pri svim valnim duljinama. Zbog veličine, te zbog mogućih singularnosti, rješavanje tog sustava predstavlja ozbiljan problem. Kako bi se pravilno tretirala singularnost u toj jednadžbi, predloženo je korištenje razvoja matrice po singularnim vrijednostima. Spektre pojedinih komponenata označimo $\mathbf{x_k}$, k=1, 2. Matrica A se sastoji od blok-matrica $\mathbf{A_{jk}}$ gdje je svaka od njih odgovorna za prijenos amplituda pojedinog spektra komponente u jedan od složenih spektara sustava. Takva blok-matrica $\mathbf{A_{jk}}$ zapravo prebacuje $\mathbf{x_k}$ u $\mathbf{y_j}$ uzimajući u obzir radijalne brzine komponenata i pojedini doprinos komponenata kontinuumu složenih spektara. Matrična jednadžba je dana kao:

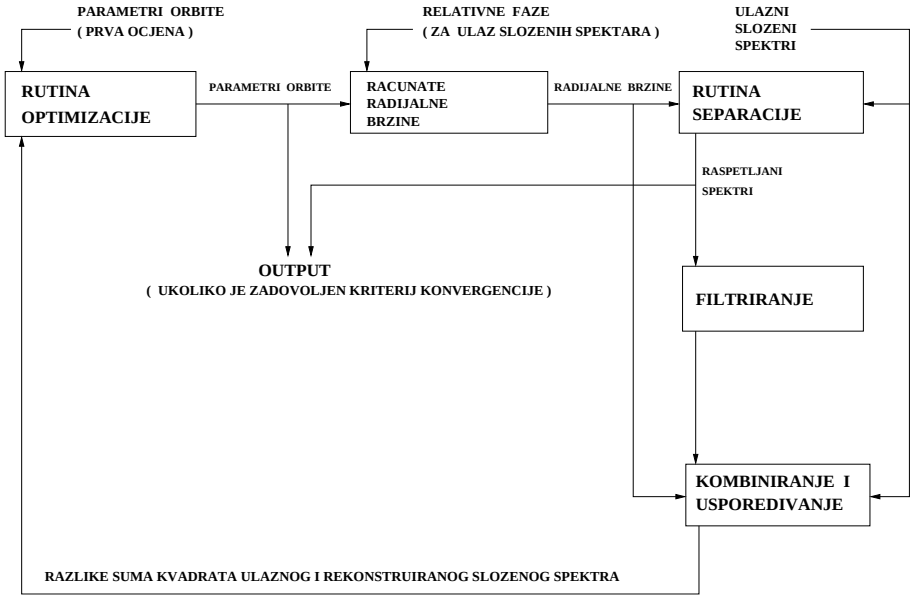
$$\mathbf{Ax} = \mathbf{y} \tag{3.2}$$

Kako bi jednadžba (3. 2) imala rješenje, moramo biti u stanju izračunati inverz matrice $\mathbf{A}$. Budući da matrica $\mathbf{A}$ nije nužno kvadratna, pribjegavamo već spomenutoj tehnici razvoja matrice po singularnim vrijednostima. Rješavanjem opisanog sustava linearnih jednadžbi provodimo prilagodbeni postupak u kojem se, kriterijem najmanjih kvadrata, model nastoji približiti opaženim spektrima. Prateći ovisnost zbroja kvadrata odstupanja modela dobivenog raspetljavanjem opaženih spektara o parametrima orbite (iz kojih slijede radijalne brzine) mogu se odrediti semiamplitude radijalnih brzina. Konačno rješenje sastoji se od spektara komponenata usaglašenih s parametrima orbite. Shematski prikaz postupka raspetljavanja složenih spektara je prikazan na sl. 3. 1.

3.3 Postupak renormalizacije raspetljanih spektara

Ako se složeni spektri raspetljaju uz pretpostavku da obje komponente dvojnog sustava jednako doprinose ukupnom luminozitetu tj. s vrijednostima svjetlosnih faktora 0.5 za obje komponente (zovemo ih 'generičkim' svjetlosnim faktorima $l_1 = l_2 = 0.5$), rezultat će biti dva 'kvazi' spektra koje možemo označiti z_{1i} te z_{2i}, pri čemu i=1,...,N za različite faze opaženog spektra. Uzevši omjer luminoziteta $L = (l_1/l_2)$, možemo definirati pojedinačne faktore luminoziteta kao:

$$l_1 = \frac{L}{L+1} \tag{3.3}$$



Slika 3.1: Shema postupka raspetljavanja složenih spektara

i

$$l_2 = \frac{1}{L+1} \tag{3.4}$$

za primarnu, odnosno sekundarnu komponentu dvojnog sustava. Složeni spektar je sada moguće dobiti kao:

$$0.5z_{1i} + 0.5z_{2i} = \text{slozeni spektar} \tag{3.5}$$

ili ako uvedemo slobodni parametar c dobijemo:

$$0.5(z_{1i} + c) + 0.5(z_{2i} - c) = \text{slozeni spektar} \tag{3.6}$$

također se izraz (3. 6) može pisati kao:

$$l_1\Big[\frac{0.5}{l_1}(z_{1i} + c)\Big] + l_2\Big[\frac{0.5}{l_2}(z_{2i} - c)\Big] = \text{slozeni spektar} \tag{3.7}$$

tako se novi raspetljani spektri s takvim svjetlosnim omjerom mogu napisati kao:

$$x_{1i} = \frac{L+1}{2L}(z_{1i} + c) \tag{3.8}$$

i

$$x_{2i} = \frac{L+1}{2}(z_{2i} - c) \tag{3.9}$$

Ograničenje na slobodni faktor c je taj da pojedinačni spektri x_{1i} i x_{2i} imaju pozitivne vrijednosti na cijelom području valnih duljina, te da na području kontinuuma ne prelaze vrijednost normalizacije. Prosjek vrijednosti amplituda u složenom spektru z_{av} definira faktor linijskog blokiranja b koji se može pisati kao:

$$b = 1 - z_{av} \tag{3.10}$$

Takva veličina zapravo definira linijsko blokiranje u složenim spektrima odnosno u 'kvazi' spektrima. U nastavku se definira i parametar omjera linijskog blokiranja B, koji predstavlja omjer usrednjenih linijskih blokiranja obaju raspetljanih spektara $\overline{x_{10}}$ i $\overline{x_{20}}$ kao:

$$B = \frac{1 - \overline{x_{10}}}{1 - \overline{x_{20}}} \tag{3.11}$$

Te se slobodni parametar c može pisati kao:

$$c = \frac{L-1}{L+1} - \frac{BL-1}{BL+1}b \tag{3.12}$$

Postupak renormalizacije se sada može privesti kraju putem 'generičkih' spektara dobivenih pomoću svjetlosnih faktora 0.5 za obje komponente. Također se računaju parametri b i B, i upotrebom stvarnih svjetlosnih faktora moguće je izračunati slobodni parametar c. Na kraju se postupka renormalizacije iz svih tih računatih parametara i stvarnih svjetlosnih faktora komponenata računaju raspetljani spektri x_{1i} i x_{2i} stvarnih svjetlosnih doprinosa.

4. POSTUPAK GENETIČKE PRILAGODBE

4.1 Genetički algoritam

Primjena genetičkog algoritma (Holland 1975) je vrlo široka, od područja učenja kod neuronskih mreža, problema raspoređivanja procesa pa do problema određivanja parametara sustava i optimiziranju upita nad bazom podataka. Genetski algoritam je heuristička metoda optimiziranja koja imitira prirodni evolucijski proces. Živa bića se tijekom evolucije prilagođavaju uvjetima u prirodi, tj. životnoj okolini. Analogija evolucije kao prirodnog procesa i genetskog algoritma kao metode optimiziranja, očituje se u procesu selekcije i genetskim operatorima. Mehanizam odabira nad nekom vrstom živih bića u evolucijskom procesu čine okolina i uvjeti u prirodi. U genetskom algoritmu ključ selekcije je funkcija cilja, gdje se na odgovarajući način predstavlja problem kojeg rješavamo.

Slično kao što su okolina i uvjeti u prirodi ključ selekcije nad nekom vrstom živih bića, tako je i funkcija cilja ključ selekcije nad populacijom rješenja u genetskom algoritmu. Naime, u prirodi jedinka koja je najbolje prilagođena uvjetima i okolini u kojoj živi ima najveću vjerojatnost preživljavanja, a time i prenošenja svojega genetskog materijala na svoje potomke. Za genetski algoritam svako rješenje je jedna jedinka. Selekcijom se odabiru dobre jedinke koje se prenose u slijedeću populaciju, a manipulacijom genetskog materijala stvaraju se nove jedinke. Takav ciklus selekcije, reprodukcije i manipulacije genetskim materijalom jedinki ponavlja se sve dok nije zadovoljen uvjet zaustavljanja evolucijskog procesa. Genetski algoritmi su se pokazali vrlo moćnim i u isto vrijeme općenitim alatom za rješavanje čitavog niza problema koji nastupaju u praksi. Po načinu djelovanja genetički se algoritmi ubrajaju u metode usmjerenog slučajnog pretraživanja prostora rješenja u potrazi za globalnim rješenjem.

Snaga tih algoritama najviše leži u činjenici da su oni sposobni odrediti položaj globalnog optimuma u prostoru s više lokalnih ekstrema. Klasične determinističke metode će se uvijek kretati prema lokalnom ekstremu, pri čemu on može biti i globalni što se ne može odrediti iz rezultata. Za rezultat rada genetskog algoritma nismo u mogućnosti reći predstavlja li rješenje globalni ili samo lokalni optimum, te je li isti određen sa željenom preciznošću. Od kada su genetski algoritmi nastali, velika se pažnja poklanja istraživanjima vezanim za povećanje djelotvornosti izvedbe. Prilikom inicijalizacije algoritma generira se početna populacija jedinki. Obično se početna populacija generira slučajnim odabirom rješenja iz domene. Slijedi proces koji se ponavlja

sve dok ne istekne zadano vrijeme ili je zadovoljen neki uvjet (npr. funkcija dobrote 95 % jedinki odstupa za manje od ϵ). Taj proces se sastoji od djelovanja genetskih operatora selekcije, križanja i mutacije nad populacijom jedinki. Tijekom selekcije loše jedinke odumiru, a bolje opstaju te se u slijedećem koraku, križanju, razmnožavaju. Takvim postupkom se postiže iz generacije u generaciju sve veća prosječna dobrota populacije.

4.2 Računski program prilagodbe GENFITT

Programski kod koristi genetički algoritam kako bi pronašao globalno rješenje, ali istovremeno koristi i gradijentnu metodu po cijelom prostoru (Goldberg 1989) kako bi se pronašao apsolutni optimum putem uvjeta minimalizacije vrijednosti χ^2 što rezultira pronalaskom funkcije prilagodbe koja najbolje opisuje raspetljane spektre. Raspetljane spektre treba korigirati za Dopplerov pomak zbog orbitalnog gibanja komponenata dvojnog zvjezdanog sustava oko centra mase. Usljed rotacije zvijezda spektralne su linije proširene. Treba uzeti u obzir da pojedine komponente sustava različito doprinose svojim luminozitetom. Prvo, napravljena je velika baza teorijskih spektara za različite vrijednosti $T_{\rm eff}$ (efektivnih temperatura) i $\log g$ (površinskih ubrzanja) zvijezda. Funkcija prilagodbe mora kompenzirati opisana intrinzična fizikalna svojstva spektara pa je dobivena funkcija s najmanjom vrijednosti χ^2. Proces prilagodbe je zapravo problem minimalizacije u prostoru razapetim velikim brojem parametara. Matrica koja sadrži vrijednosti svih parametara je velikih dimenzija, pa je tako i sam račun funkcije prilagodbe vremenski zahtjevan (računa se vrijednost za svaku pojedinu točku matrice). Za svaku se izračunatu točku matrice računa i pripadno odstupanje te se od svih odstupanja traži ona funkcija prilagodbe s najmanjim takvim odstupanjem.

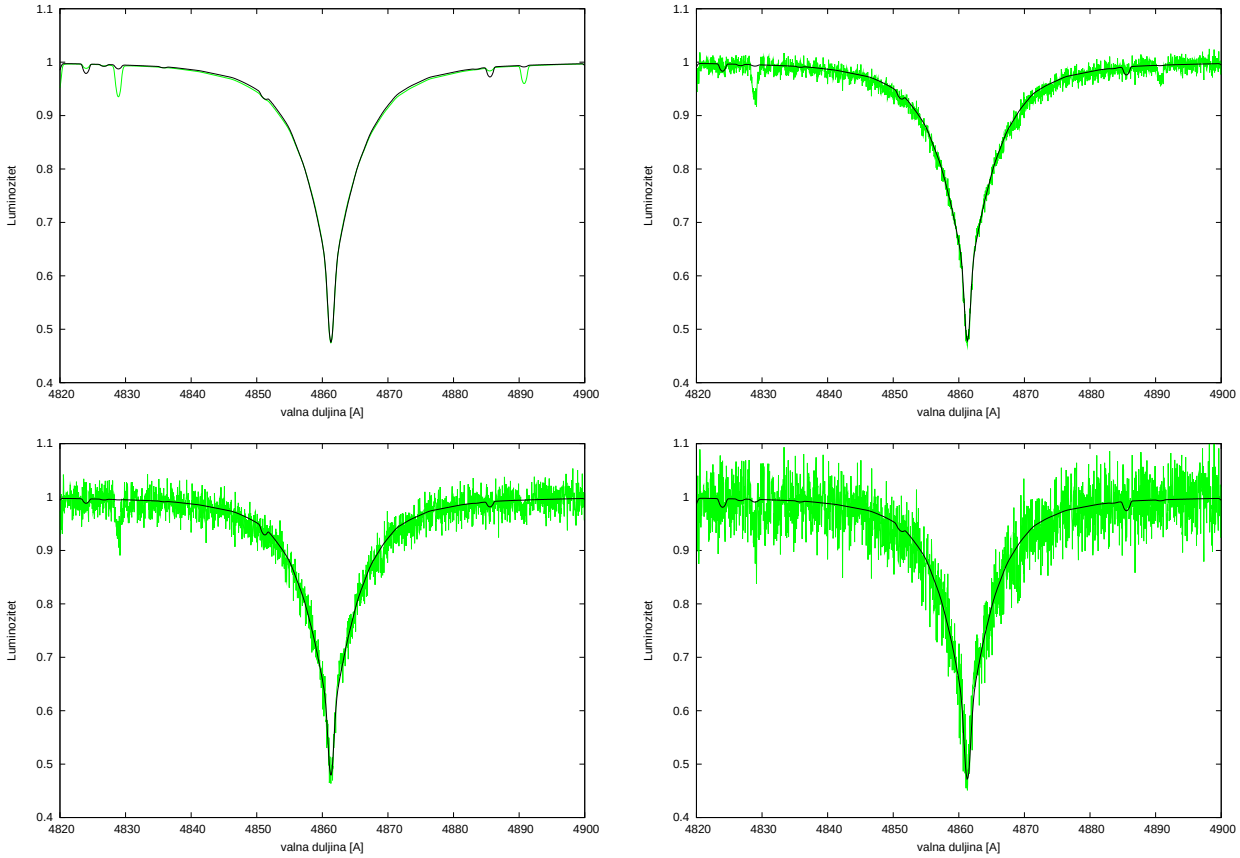
Računata je funkcija prilagodbe za opažene spektre iz baze teorijskih spektara za koje je efektivna temperatura bila u rasponu od $T_{\rm eff} = 10\,000$-$30\,000$ K (u koracima po 1 000 K), površinsko ubrzanje zvijezda u rasponu $\log g = 2.8$ - 4.5 dex (u koracima po 0.1 dex), projekcija rotacijske brzine u rasponu $v \sin i = 50$ - 150 kms^{-1} te iznos svjetlosnog faktora doprinosa luminozitetu za pojedinu komponentu u rasponu od 0 - 1. Pojedini koraci u rotacijskoj brzini i svjetlosnim faktorima mogu biti proizvoljni, pa stoga ako pomnožimo broj svih parametara u tako nastaloj matrici parametara, vrlo brzo shvatimo da se radi o velikom broju točaka vrijednosti za koje se računa prilagodbena funkcija, a naravno i pripadno odstupanje od raspetljanog spektra.

Program prilagodbe obzirom na parametarski prostor ima relativno dugo vrijeme računanja funkcije prilagodbe, dodatno ograničenje predstavlja činjenica da se pri računanju koriste jedino teorijski spektri iz baze. Stoga, se pokazala i potreba za dodatnim interpoliranjem u prostoru

efektivnih temperatura i površinskim ubrzanjima. Implementiran je genetički algoritam, tako da postupak prilagodbe ne računa vrijednost funkcije prilagodbe u svakoj točki parametarskog prostora, nego algoritam odabere neku kombinaciju parametara i onda na temelju međugeneracija i evolucije parametara računa najbolje rješenje u takvom parametarskom prostoru. U slijedećih nekoliko grafova i tablica, prikazana su grafički rješenja za različite uvjete na parametre koji se prilagođavaju i pripadne vrijednosti prilagodbe za razne vrijednosti S/N. Sl. 4.1 - 4.4 prikazuje prilagodbeni postupak genetičkim algoritmom za različite vrijednosti S/N. U prilagodbenim postupcima se redom mijenja vrsta fiksiranog parametra, te se istovremeno pokazuje kako se pri tome mijenja vrijednost χ^2 tab. 4.1 - 4.4. Također je proveden prilagodbeni postupak genetičkim algoritmom za slučaj da se prilagođavaju istovremeno primarna i sekundarna komponenta zvjezdanog sustava s uvjetom da je zbroj svjetlosnih faktora jednak jedinici što je velika prednost ako nisu dostupna fotometrijska mjerenja dvojnog sustava sl. 4.5 - 4.6 i tab. 4. 5.

Tablica 4.1: Rješenja prilagodbenog postupka za H_β liniju, pri svim parametrima slobodnim. U posljednjim kolonama su unesene vrijednosti razlika u odnosu na prave vrijednosti parametara.

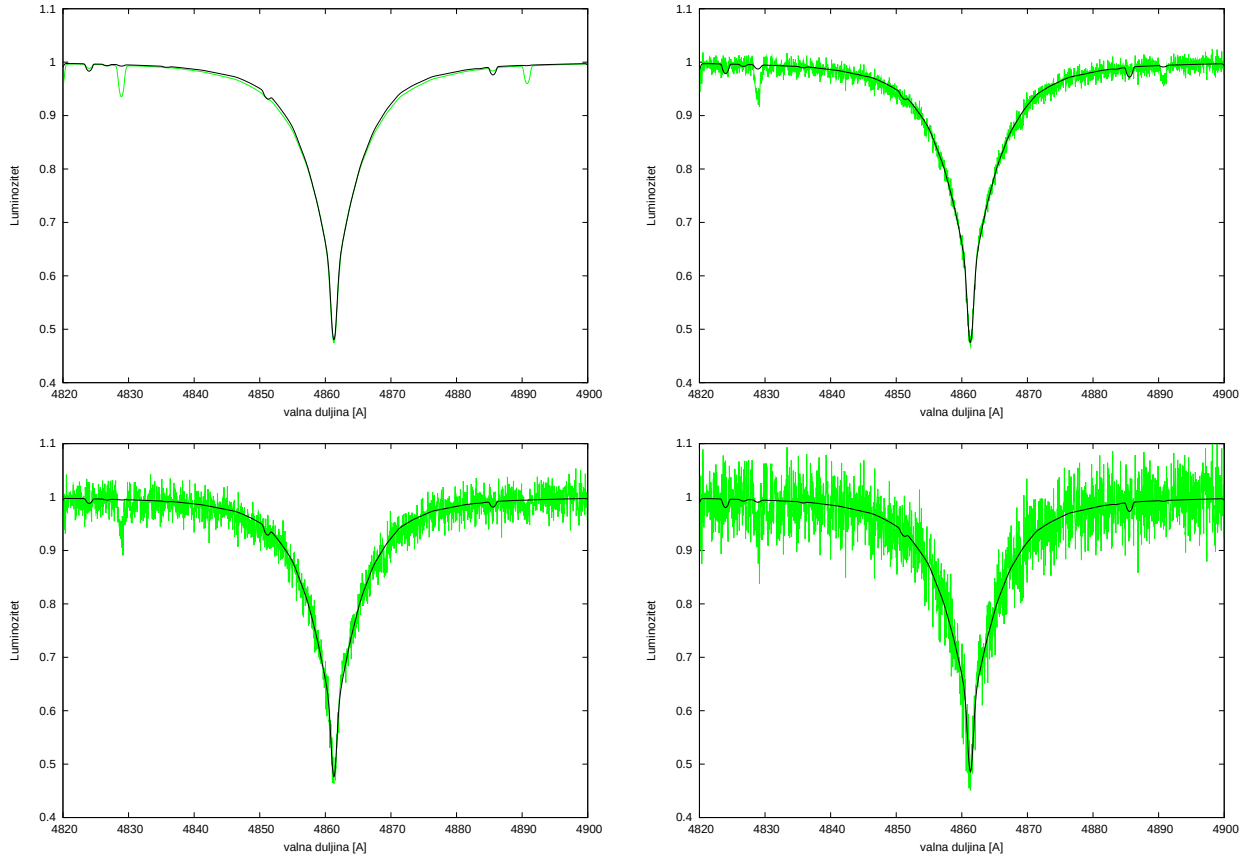
S/N	$T_{\rm eff}$ (K)	$\log g$ (dex)	v_{rot} ($\rm kms^{-1}$)	χ^2	$\Delta T_{\rm eff}$	$\Delta \log g$	Δv_{rot}
∞	15 750.3±71.0	3.912±0.021	36.002±0.021	0.0004445	9.7	0.008	-0.002
100	15 789.4±131.4	3.911±0.054	36.121±0.150	0.0015124	-129.4	0.009	0.121
50	15 832.4±142.3	3.939±0.095	36.947±0.284	0.0167240	-172.4	-0.019	-0.947
25	16 243.3±254.2	3.870±0.144	41.573±0.511	0.2792300	-483.3	0.05	-5.573



Slika 4.1: Spektar u području H_β linije (zeleno) i funkcija prilagodbe (crno) pri svim parametrima slobodnima, za različite vrijednosti S/N, (S/N = ∞ i S/N = 100 (gornje slike) te S/N = 50 i S/N = 25 (donje slike).

Tablica 4.2: Rješenja prilagodbenog postupka za H_β liniju, pri fiksiranom parametru v_{rot} = 36.0 kms^{-1}. U posljednjim kolonama su unesene vrijednosti razlika u odnosu na prave vrijednosti parametara.

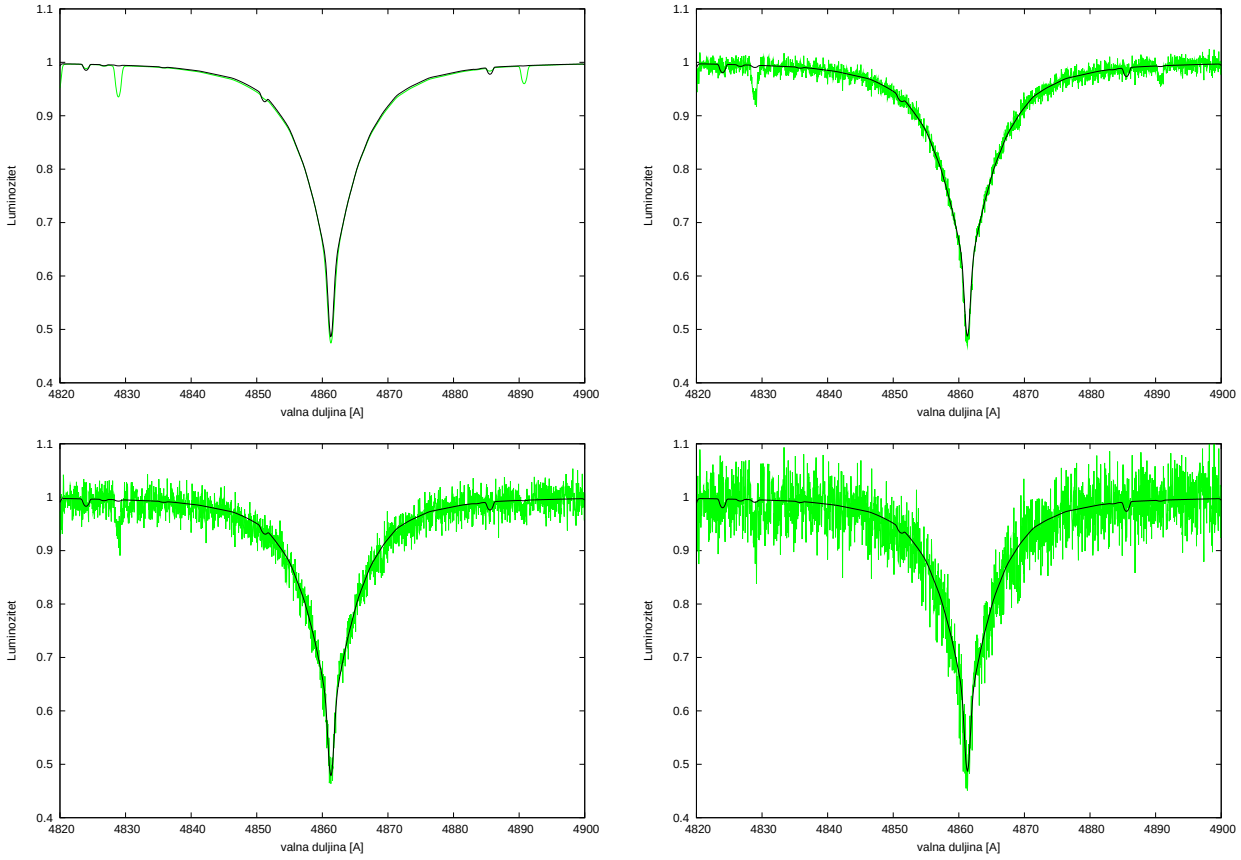
S/N	$T_{\rm eff}$ (K)	$\log g$ (dex)	χ^2	$\Delta T_{\rm eff}$	$\Delta \log g$
∞	15 759.2±79.0	3.904±0.021	0.0004601	0.8	0.016
100	15 866.5±121.2	3.899±0.042	0.0016921	-106.5	0.021
50	15 865.3±180.1	3.890±0.071	0.0176255	-105.3	0.030
25	15 990.1±341.1	3.832±0.142	0.2799100	-230.1	0.088



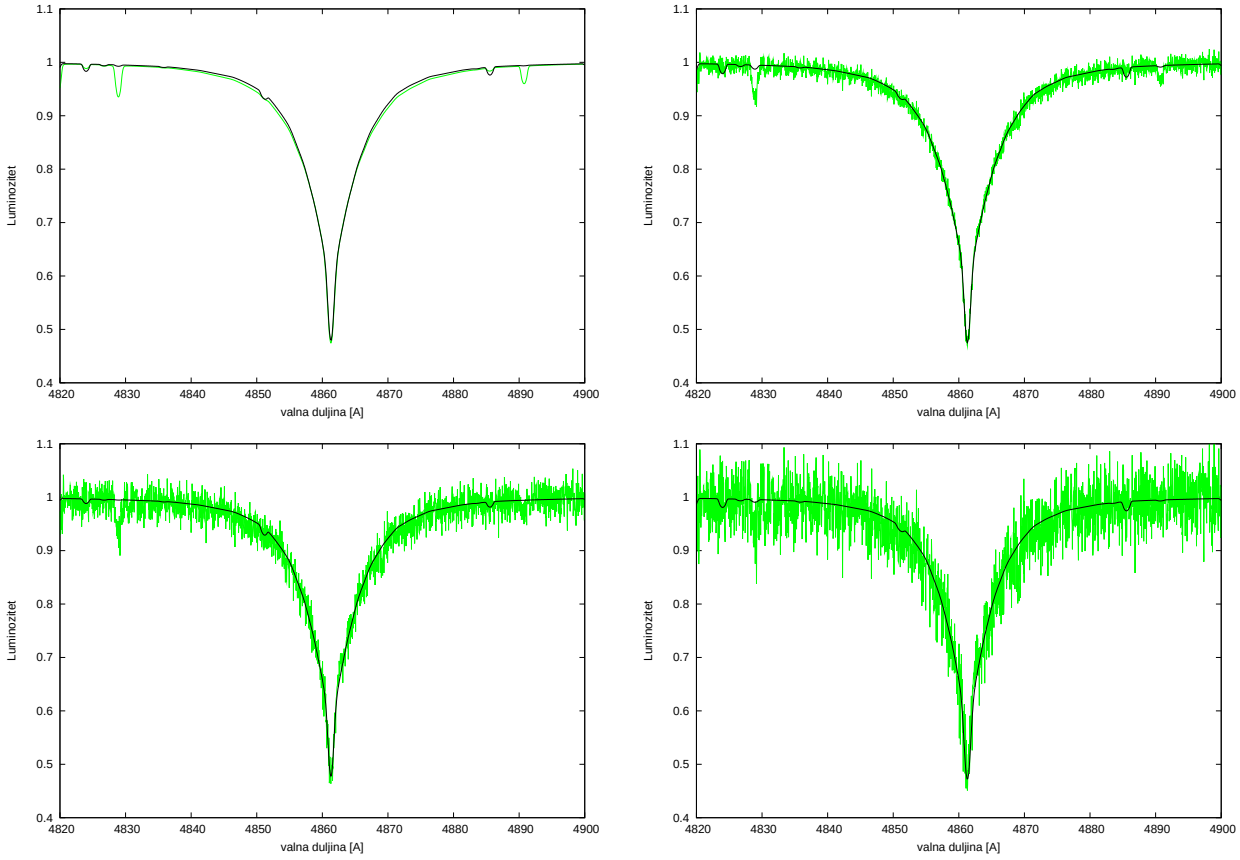
Slika 4.2: Spektar u području H_β linije (zeleno) i funkcija prilagodbe (crno) pri fiksiranim parametrima efektivne temperature i rotacijske brzine, za različite vrijednosti S/N, (S/N = ∞ i S/N = 100 (gornje slike) te S/N = 50 i S/N = 25 (donje slike).

Tablica 4.3: Rješenja prilagodbenog postupka za H_β liniju, pri fiksiranim parametrima v_{rot}=36.0 kms^{-1} i $\log g = 3.92$ dex. U posljednjoj koloni su unesene vrijednosti razlike u odnosu na pravu vrijednost paramatra.

S/N	T_{eff} (K)	χ^2	ΔT_{eff}
∞	15 765.2±81.3	0.0005295	-5.2
100	15 753.5±139.5	0.0018889	6.5
50	15 887.4±224.5	0.0174215	127.4
25	15 920.1±401.5	0.3592100	159.9



Slika 4.3: Spektar u području H_β linije (zeleno) i funkcija prilagodbe (crno) pri fiksiranim parametrima površinskog ubrzanja i rotacijske brzine, za različite vrijednosti S/N, ($S/N = \infty$ i $S/N = 100$ (gornje slike) te $S/N = 50$ i $S/N = 25$ (donje slike).



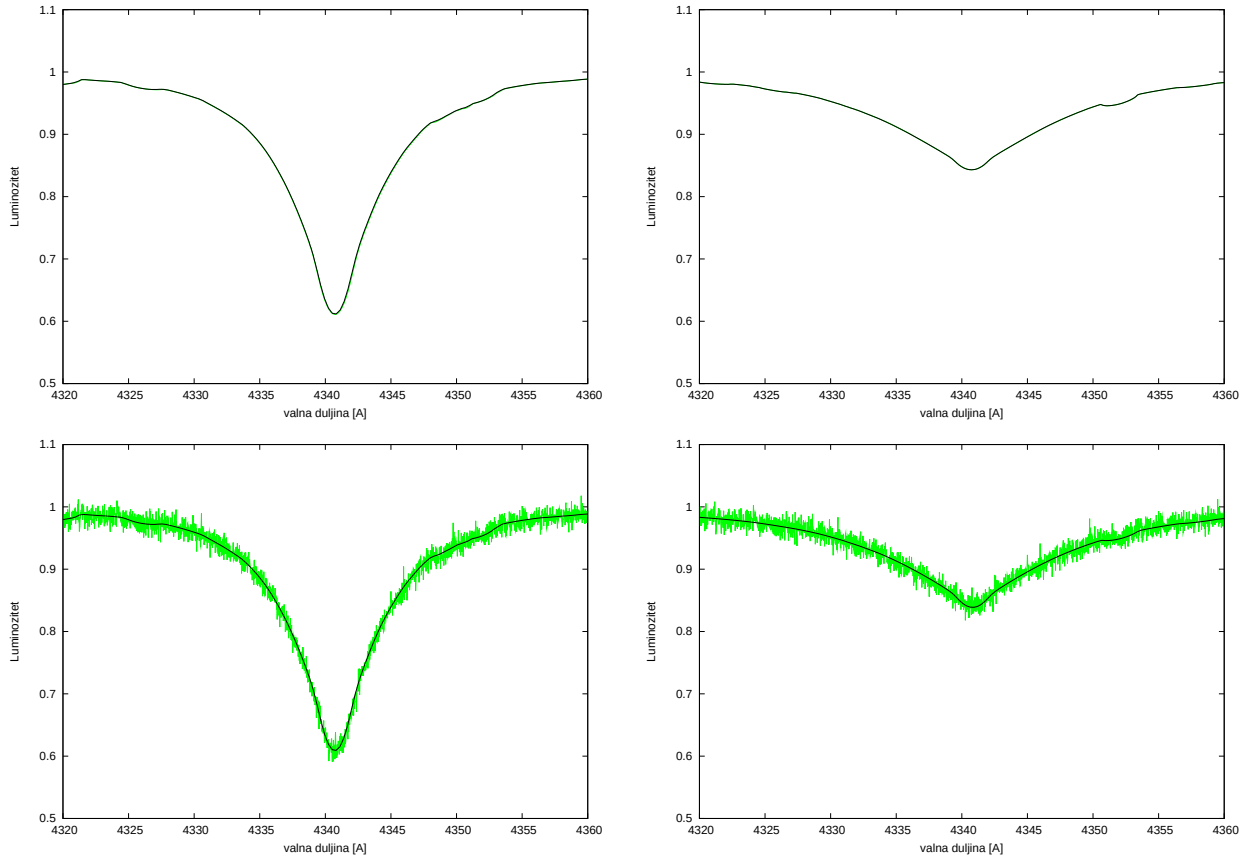
Slika 4.4: Spektar u području H_β linije (zeleno) i funkcija prilagodbe (crno) pri fiksiranom parametru rotacijske brzine, za različite vrijednosti S/N, ($S/N = \infty$ i $S/N = 100$ (gornje slike) te $S/N = 50$ i $S/N = 25$ (donje slike).

Tablica 4.4: Rješenja prilagodbenog postupka za H_β liniju, pri fiksiranim parametrima v_{rot}=36.0 kms^{-1} i $T_{\rm eff}$=15 760 K. U posljednjoj koloni su unesene vrijednosti razlike u odnosu na pravu vrijednost paramatra.

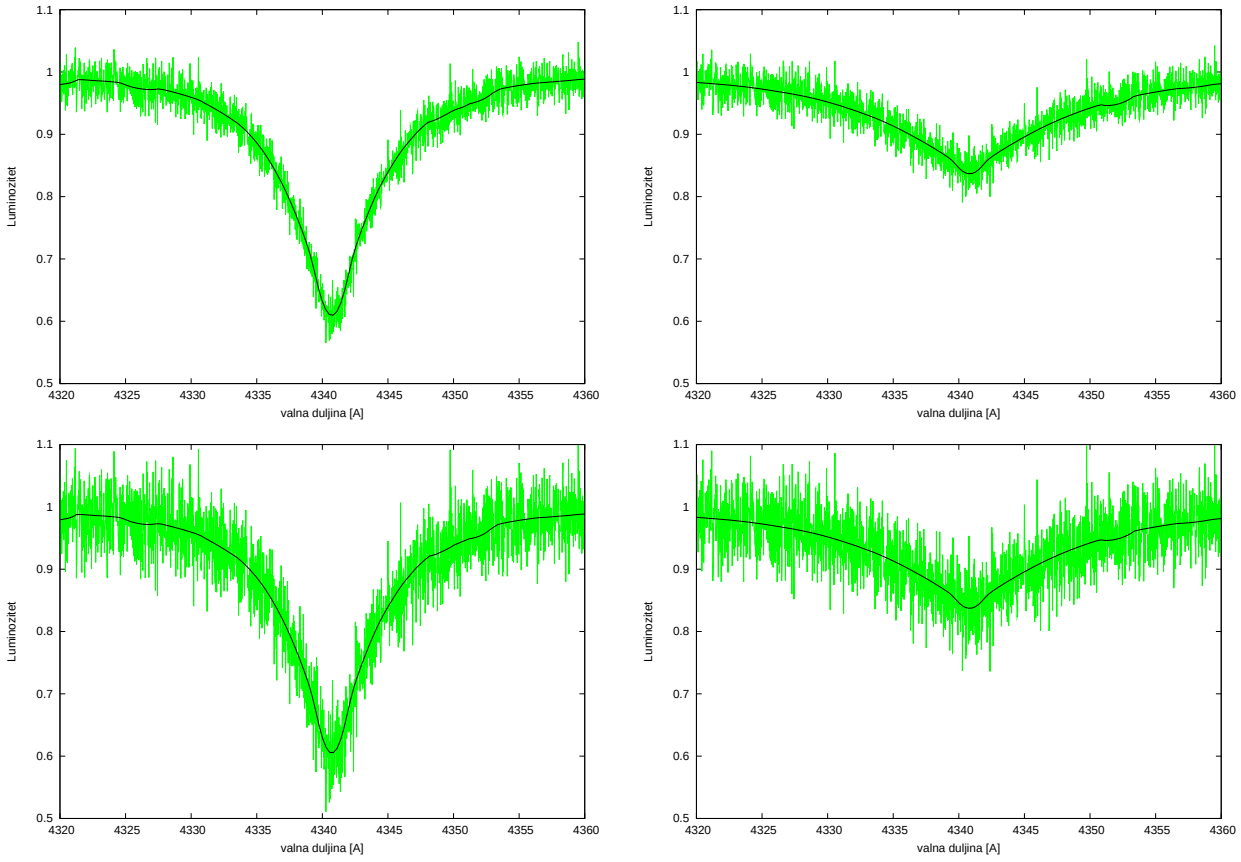
S/N	$\log g$ (dex)	χ^2	$\Delta \log g$
∞	3.908±0.022	0.0004932	0.012
100	3.921±0.082	0.0018112	-0.001
50	3.939±0.099	0.0162000	-0.019
25	3.959±0.289	0.3055400	-0.039

Tablica 4.5: Rješenja prilagodbenog postupka za primarnu komponentu parametara $T_{\rm eff}$= 18 000 K, $\log g$= 3.5, v_{rot}= 105.0 kms^{-1} i L_F= 0.78 te sekundarnu komponentu parametara $T_{\rm eff}$= 11 000 K, $\log g$= 4.0, v_{rot}= 95.0 kms^{-1} i L_F= 0.22. Slobodni parametri su $T_{\rm eff}$ i svjetlosni faktori. U posljednjoj koloni su unesene vrijednosti razlika u odnosu na prave vrijednosti paramatara.

Veličina	pril. vrijed. prim.	pril. vrijed. sek.	S/N	Raz. prim.	Raz. sek.
$T_{\rm eff}$ (K)	17 903.7±109.7	10 911.5±115.3	∞	96.3	88.5
L_F	0.78199±0.00428	0.21801±0.00624	∞	-0.00199	0.00199
χ^2	0.0011736	0.0013245	∞	-	-
$T_{\rm eff}$ (K)	17 764.5±111.7	10 802.4±119.4	100	235.5	197.6
L_F	0.77844±0.00454	0.22156±0.00661	100	0.00156	-0.00156
χ^2	0.0132764	0.0147211	100	-	-
$T_{\rm eff}$ (K)	17 018.9±121.2	10 032.4±162.3	50	981.1	967.6
L_F	0.75184±0.00475	0.24816±0.00693	50	0.02816	-0.02816
χ^2	0.5901631	0.6031272	50	-	-
$T_{\rm eff}$ (K)	17 068.2±154.3	10 089.5±202.5	25	931.8	910.5
L_F	0.75753±0.00495	0.24247±0.00743	25	0.02247	-0.02247
χ^2	1.3533115	1.5345117	25	-	-



Slika 4.5: Spektar u području H_γ linije (zeleno) i funkcija prilagodbe (crno) za različite vrijednosti S/N (S/N $= \infty$ gornje slike i S/N $= 100$ donje slike za primarnu (lijevo) i sekundarnu (desno) komponentu). U ovim se prilagodbama simultano prilagođavaju parametri obje komponente sustava s uvjetom da je zbroj svjetlosnih faktora komponenata jednak 1.



Slika 4.6: Spektar u području H_γ linije (zeleno) i funkcija prilagodbe (crno) za različite vrijednosti S/N (S/N = 50 gornje slike i S/N = 25 donje slike za primarnu (lijevo) i sekundarnu (desno) komponentu). U ovim se prilagodbama simultano prilagođavaju parametri obje komponente sustava s uvjetom da je zbroj svjetlosnih faktora komponenata jednak 1.

4.3 Analiza pogrešaka

Mjereni podaci općenito nisu egzaktni te podliježu pogreškama mjerenja. Stoga, tipično mjereni podaci nikada se ne mogu prilagoditi modelu koji ih želi opisati iako je model u potpunosti ispravan. Zbog toga postoji potreba za provjerom prilagodbe tih parametara. Vrlo važna činjenica koju valja istaknuti je, da funkcija prilagodbe ne mora biti jednoznačno određena te da može imati više ekstrema. Dakle, ne nameće se pitanje 'koliko je dobra prilagodba?' negoli pitanje 'kolika je sigurnost da negdje u parametarskom prostoru ne postoji još neka bolja prilagodba?'. Znači, procedura prilagodbe bi trebala prvo odrediti parametre prilagodbe, a drugo odrediti pogreške određivanja tih parametara i na kraju bi trebala dati statističku ocjenu same prilagodbe (Bevington 1969).

Funkcija koju želimo prilagoditi mjerenim podacima pomoću programa kojem je implementiran genetički algoritam je funkcija od više varijabli, tj. neka je to vektor varijabli $\mathbf{x}$ i neka je funkcija baze funkcija vektora $\mathbf{X_1}(\mathbf{x})$,...,$\mathbf{X_M}(\mathbf{x})$. Mjera funkcije χ^2 je tada:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N} \Big[\frac{y_i - \sum_{k=1}^{M} a_k X_k(x_i)}{\sigma_i}\Big]^2 \tag{4.1}$$

gdje se razmatra i slučaj prilagodbe u kojem model nelinearno ovisi o skupu M nepoznatih parametara a_k, k=1,2,...,M. Ako je sada određena mjera funkcije prilagodbe, ostaje nam odrediti najbolje parametre prilagodbe tako što minimiziramo samu mjeru funkcije prilagodbe. Uzimajući i nelinearne ovisnosti, minimizacija se provodi iterativno sve dok sama vrijednost χ^2 prestane padati. Vrlo blizu minimalne vrijednosti, očekujemo da se funkcija χ^2 može opisati kvadratnom formom. Ako nam je aproksimacija dobra, u mogućnosti smo prijeći s trenutačnih parametara a_{curr} na parametre minimalne mjere prilagodbe kao:

$$a_{min} = a_{curr} + D^{-1}[-\nabla\chi^2(a_{curr})] \tag{4.2}$$

pri čemu je D jedna M X M matrica. Dakle, kako bi koristili jednadžbu (4. 2) moramo biti u mogućnosti odrediti gradijent funkcije χ^2 za bilo koji skup parametara a, a ujedno trebamo znati i matricu D (Hessova matrica) koja predstavlja drugu derivaciju funkcije χ^2 za bilo koji skup parametara a. Model za prilagodbu sada poprima oblik:

$$y = y(x; a) \tag{4.3}$$

pri čemu je funkcija χ^2 dana kao:

$$\chi^2(a) = \sum_{i=1}^{N} \Big[\frac{y_i - y(x_i;a)}{\sigma_i}\Big]^2 \tag{4.4}$$

gradijent funkcije χ^2 obzirom na parametre a, koji mora biti nula u samom minimumu funkcije χ^2 ima komponente oblika:

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial a_k} = -2\sum_{i=1}^{N} \frac{[y_i - y(x_i;a)]}{{\sigma_i}^2} \frac{\partial y(x_i;a)}{\partial a_k} \qquad k = 1, 2, ..., M \tag{4.5}$$

još jednim parcijalnim deriviranjem dobivamo:

$$\frac{\partial^2 \chi^2}{\partial a_k \partial a_l} = 2\sum_{i=1}^{N} \frac{1}{{\sigma_i}^2} \Big[\frac{\partial y(x_i;a)}{\partial a_k} \frac{\partial y(x_i;a)}{\partial a_l} - [y_i - y(x_i;a)] \frac{\partial^2 y(x_i;a)}{\partial a_l \partial a_k}\Big] \tag{4.6}$$

ako zamjenimo

$$\beta_k \equiv -\frac{1}{2}\frac{\partial \chi^2}{\partial a_k} \qquad \alpha_{kl} \equiv \frac{1}{2}\frac{\partial^2 \chi^2}{\partial a_k \partial a_l} \tag{4.7}$$

u terminima najmanjih kvadrata, možemo urediti da matrica $[\alpha]=\frac{1}{2}D$ bude po iznosu jednaka polovini Hessove matrice (zovemo je matricom zakrivljenosti) pa napisati jednadžbu (4. 2) kao sustav linearnih jednadžbi:

$$\sum_{l=1}^{M} \alpha_{kl} \delta a_l = \beta_k \tag{4.8}$$

Taj je sustav jednadžbi riješen za inkremente δa_l koji, dodajući ih trenutačnoj aproksimaciji daju slijedeću aproksimaciju. Vrlo je bitno naglasiti da komponente α_{kl} Hessove matrice (4. 6) ovise o prvoj i drugoj derivaciji funkcije baze po danim parametrima. Druge se parcijalne derivacije pojavljuju jer gradijent (4. 5) već sam po sebi ovisi o $\partial y/\partial a_k$. Ako je slučaj da je doprinos druge derivacije dovoljno malen u usporedbi s doprinosom prve derivacije može ga se naravno zanemariti. Za uspješan model prilagodbe, taj doprinos zapravo predstavlja slučajnu pogrešku mjerenja svake pojedine točke, i može poprimiti oba predznaka. Zato se doprinosi druge derivacije prilikom sumiranja preko svih i međusobno ponište.

Sada preostaje jedino izračunati vrijednosti samih pogrešaka. Taj su postupak proveli Levenberg i Marquardt (Levenberg 1944; Marquardt 1963), pa se i sam postupak naziva po njima. U tom smislu uzmimo:

$$\lambda \alpha_{ll} \delta a_l = \beta_l \tag{4.9}$$

prijedlog Marquardt-a je bio da se kombiniraju izrazi (4. 8) i (4. 9) sa novom matricom α' slijedećeg oblika:

$$\alpha'_{jj} \equiv \alpha_{jj}(1+\lambda) \qquad i \qquad \alpha'_{jk} \equiv \alpha_{jk} \qquad za \quad (j \neq k) \tag{4.10}$$

pa je novi skup jednadžbi dan kao:

$$\sum_{l=1}^{M} \alpha'_{kl} \delta a_l = \beta_k \tag{4.11}$$

ukoliko je λ vrlo velik, matrica α' je dijagonalno dominantna, pa je jednadžba (4. 11) identična jednadžbi (4. 9). Naprotiv, kako se λ približava nuli, jednadžba (4. 11) prelazi u jednadžbu (4. 8). U praksi, iterativni se postupak prekida ako se vrijednost χ^2 smanjuje za neki zanemarivi iznos reda veličine 10^{-3}. Dosegnuvši željeni minimum, želimo urediti da je λ=0 i određujemo matricu:

$$[C] \equiv [\alpha]^{-1} \tag{4.12}$$

koja zapravo predstavlja kovarijantnu matricu standardnih pogrešaka parametara prilagodbe a. Pri samom kraju procedure, dijagonalizacija kovarijantne matrice predstavlja izračunate pogreške prilagođenih parametara a.

5. UTJECAJ ROTACIJE NA EVOLUCIJU ZVIJEZDA

5.1 Evolucija zvijezda

Efekt rotacije zvijezda u jednadžbama radijativne ravnoteže već se ranije pokušao uvrstiti u evolucijske modele upravo u svrhu provjere tih modela (Sandage & Schwarzschild 1952). Pokazalo se, da postoje značajna odstupanja postavljenih evolucijskih modela i opaženih vrijednosti. Posebno treba istaknuti zastupljenost helija i dušika u O i B zvijezdama velikih masa, te raspodjeli zvijezda u HR dijagramu za različite vrijednosti metaliciteta. Opažanja pokazuju da je uloga zvjezdane rotacije uvelike bila previđena. Svi izračuni evolucijskih modela kao što su starost zvijezda, trenutne mase, površinska zastupljenost elemenata, ukazuju na velik utjecaj zvjezdane rotacije, pa je pravilno kazati da je zvjezdana evolucija funkcija mase M, metaliciteta Z i kutne brzine Ω. Najveći utjecaj rotacije je na zvijezde u gornjem dijelu glavnog niza gdje se također mora uzeti u obzir i magnetska aktivnost zvijezde (Hartmann & Noyes 1987), te uloga rotacije u fazi evolucije prije glavnog niza, uključujući i akrecijske diskove (Bodenheimer 1995).

Efekte rotacijskog miješanja teorijski je razradio Zahn (1992). Prve detaljne evolucijske modele koji su uključivali rotacijske efekte napravili su Maeder & Meynet (2000) uključujući hidrostatske i efekte miješanja materije. Bitan zaključak koji je proizišao iz novih proračuna je da se ukoliko kutna brzina Ω naraste na 90 % površinske kritične brzine Ω_{crit}, vrijeme života zvijezda velikih masa (40 - 60 $M_\odot$) poveća se za 1 do 2 %. Na početku razvoja zvijezde u fazi glavnog niza (MS) zvijezda ima manji luminozitet u usporedbi sa statičkim modelom, kao da simuliraju evolucijske krivulje zvijezda manjih masa, i to umanjene za 0.5 do 2.5 $M_\odot$. Na sl. 5. 1 prikazani su interpolirani evolucijski modeli za statični slučaj početnih masa 3 - 15 $M_\odot$ (Schaller et al. 1992), te interpolirani evolucijski modeli za slučajeve s rotacijom za omjere kutnih brzina $\Omega/\Omega_{crit} = 0.1$, 0.3 i 0.5 (Ekström et al. 2008). Rotacijski modeli su teorijski izračunati samo za mase 3, 9, 20 i 60 $M_\odot$, sve ostale evolucijske trake koje su prisutne u dijagramu su interpolirane vrijednosti izračunatih modela.

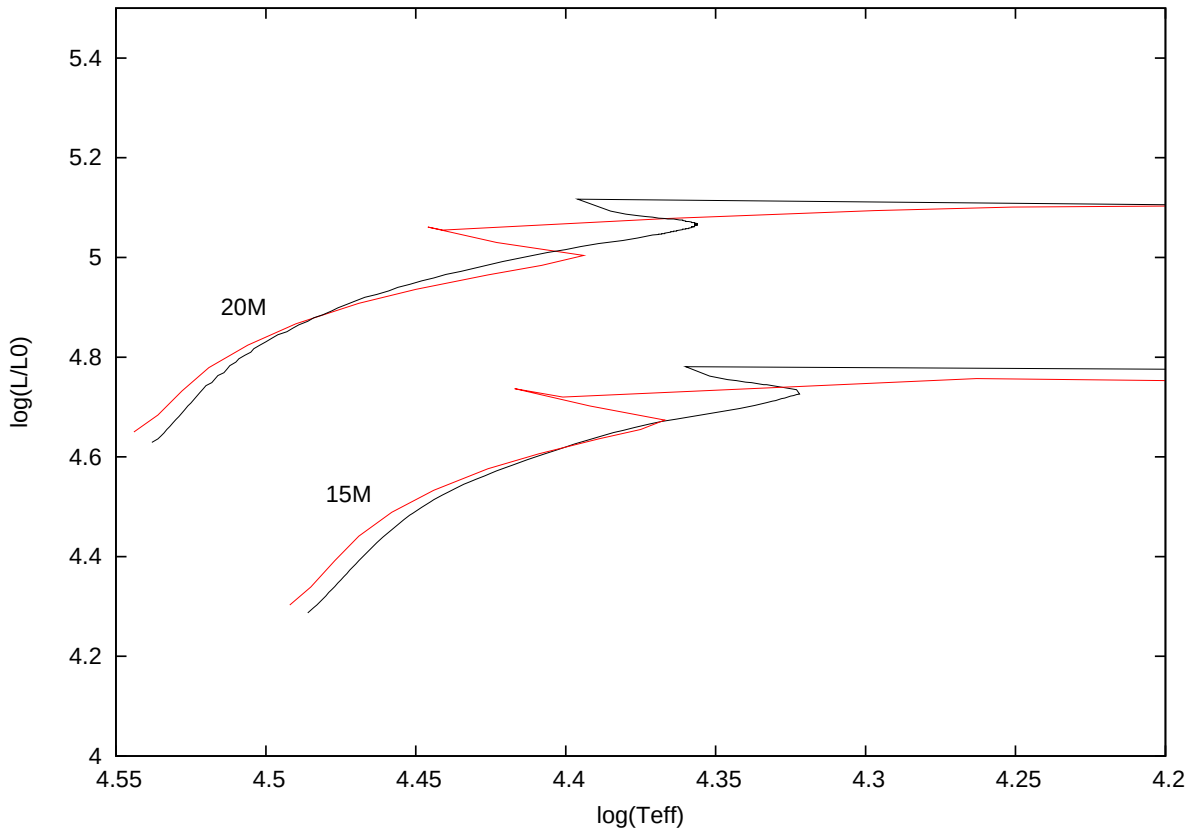
Druga je mogućnost da se i dalje primjenjuju spomenuti modeli koji uključuju rotacijske efekte za pojedinačne zvijezde. Pri tome moramo biti sigurni da u dvojnom sustavu koji se razmatra efekt izmjene materije s jedne komponente na drugu još uvijek nije toliko dominantan da bitno mjenja fizikalna svojstva komponenata. Očita je činjenica da budući modeli trebaju uključiti različite kriterije miješanja materije, ili trebaju uvrstiti razne difuzijske koeficijente u postojeće rotacijske modele da bi se bolje opisali opažačka mjerenja ili je fizika koja se koristi

u proračunima nepotpuna. Naravno, potpuni model evolucije se može realizirati tek ukoliko se napravi evolucijski model za dvojne zvijezde, koji očito mora u sebi sadržavati fiziku izmjene materije s jedne na drugu komponentu dvojnog sustava. Takvi modeli će zasigurno moći opisati izračunate vrijednosti iz opaženih spektara te dobro predvidjeti položaj pojedinih komponenti dvojnog sustava u HR dijagramu. Iznad određene vrijednosti rotacijske brzine vrlo su aktivni procesi miješanja koji mijenjaju zastupljenost elemenata kroz razvojni put zvijezde na glavnome nizu. Nakon faze glavnog niza, prisutni su i aktivni efekti kontrakcije jezgre zvijezde te širenja omotača koji znatno utječu na evoluciju kutnog momenta zvijezde. Zvijezde s masom ispod $12\,\mathrm{M}_{\odot}$ s velikom početnom rotacijskom brzinom, vrlo brzo dosegnu kritičnu površinsku brzinu na samom kraju faze glavnog niza. To može objasniti pojavu Be zvijezda. Za osrednju brzinu rotacije zvijezde, evolucijska traka u HR dijagramu modificira se kao u slučaju blagog konvektivnog prebacivanja jezgre zvijezde.

Općenito, osrednja brzina rotacije zvijezde zapravo povečava trajanje razvoja zvijezde na glavnome nizu za čak 30 %. Za fazu gorenja helija rotacijski efekt je nešto manji, i povećava trajanje razvoja za najviše 10 %. Uvođenjem rotacije, imamo i veliko neslaganje u relaciji masa - luminozitet za isti $\log g$ i $\log \mathrm{T}_{\mathrm{eff}}$, gdje razlike u masi mogu dosegnuti i do 30 %. Rotacija implicira i povečanje površinske zastupljenosti He i N. Zastupljenosti rastu s porastom mase i rotacijske brzine. Usporedba povećane zastupljenosti dušika za B i A superdivove ide u prilog zaključku istraživanja Venna (1995, 1999). Dakle, rotacijsko inducirano mješanje, preko turbulentne difuzije ima za poslijedicu značajne promjene u globalnim parametrima zvijezde kao što su luminozitet i promjene u kemijskoj zastupljenosti elemenata fotosfere prije nego zvijezda dosegne kraj razvoja na glavnom nizu (TAMS). Vrlo detaljna istraživanja za O zvijezde dali su Howarth & Smith (2001).

5.2 Utjecaj rotacije na zastupljenost elemenata

Kemijska zastupljenost elemenata u zvjezdanoj fotosferi predstavlja vrlo dobru provjeru unutrašnje evolucije zvijezde, i daje dokaz o postojanju dodadnih procesa miješanja materije kod OB zvijezda, te kod superdivova i divova manjih masa. Kemijska zastupljenost elemenata kod OB zvijezda u fazi glavnog niza, ukazuje na povećanu zastupljenost helija i dušika. Sve brzo rotirajuće O zvijezde također pokazuju povećanu zastupljenost helija (Herrero et al. 1992, 1998, 1999; Lyubimkov 1996). Postoji povezanost porasta zastupljenosti helija i dušika s relativnom starosti t/t_{MS} koje zvijezda provede na glavnome nizu kod ranih B zvijezda (Lyubimkov 1991, 1996; Gies & Lambert 1992; Denissenkov 1994). Lyubimkov (1996) tvrdi da je porast zastupljenosti $(\mathrm{He/H}) = 0.08$ -



Slika 5.1: Teorijski HR dijagram interpoliranih statičnih evolucijskih modela za Z = 0.02 prema Schaller et al. (1992) (sa faktorom prebacivanja jezgre α_{over}=d_{over}/H_p=0.20 - crveno) te interpolirani evolucijski model sa rotacijom (Ω/Ω_{crit}=0.9 - crno) Ekström et al. (2008). Uz evolucijske trake su naznačene mase u jedinicama mase Sunca. Vidljiv je manji luminozitet rotirajuće zvijezde u početku razvoja, dok je u daljnjem razvoju veći luminozitet rotirajuće zvijezde u odnosu na statičnu zvijezdu zbog manje rotacijske brzine.

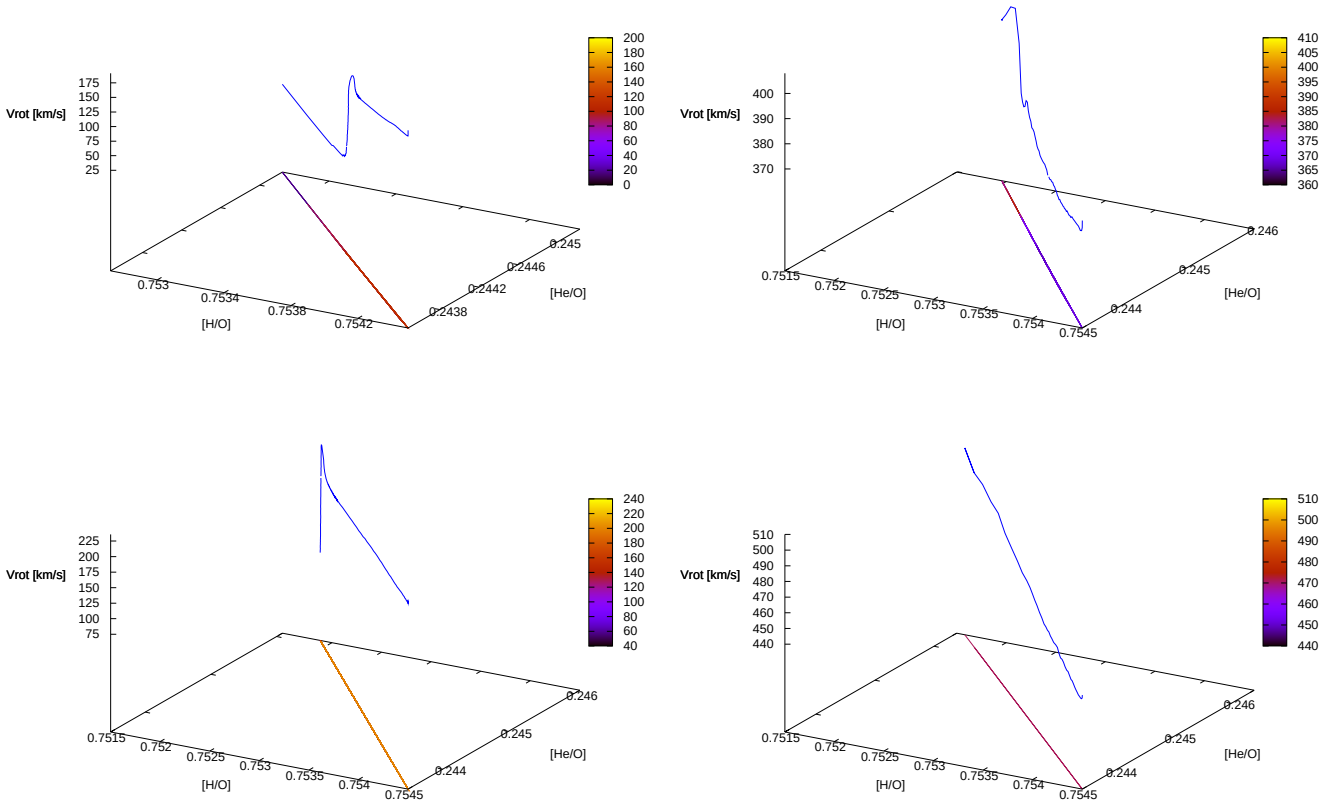
0.10 na 0.20 za O zvijezde ukoliko je $t/t_{MS} \geq 0.5$ - 0.7, dok je za B zvijezda takav porast 0.12 - 0.14. Što se tiče dušika, njegova zastupljenost je veća 3 puta za zvijezde od 14 $M_\odot$ te 2 puta za zvijezde od 10 $M_\odot$. Također imamo slučaj da rast zastupljenosti dušika za 2 - 3 puta (kod O zvijezda koje imaju srednju brzinu projekcije rotacijske brzine $v_{rot} = 200\,kms^{-1}$) ima za posljedicu porasta luminoziteta (Heger et al. 2000). Zaista, uključivanje efekta rotacije zvijezde omogućava da se fizikalno objasni prekomjerni luminozitet zvijezda i tako potkrijepi činjenica da novi modeli moraju uključivati u svoje račune fizikalne efekte i doprinose koji do sada nisu razmatrani.

Ako razmatramo zastupljenost kemijskih elemenata kod superdivova, opažanja ukazuju da povećanje zastupljenosti helija i dušika postaje gotovo pravilo među OB superdivovima. Određivanje zastupljenosti helija ovisi o upotrebljenoj brzini mikroturbulencije. Dokazi o visokoj aktivnosti CNO ciklusa postoje kod B superdivova u rasponu masa od 20 - 40 $M_\odot$. Zastupljenost [N/H] u iznosu od 0.6 dex pronađeni su kod B superdivova od 20 $M_\odot$ (Venn 1995 ab). Takve se vrijednosti zastupljenosti slažu s vrijednostima nađenim kod Supernove SN 1987 A. Vrijednosti zastupljenosti [N/H] za A superdivove pri 12 $M_\odot$ leže u rasponu 0 - 0.4 dex (Venn 1995 ab, 1999).

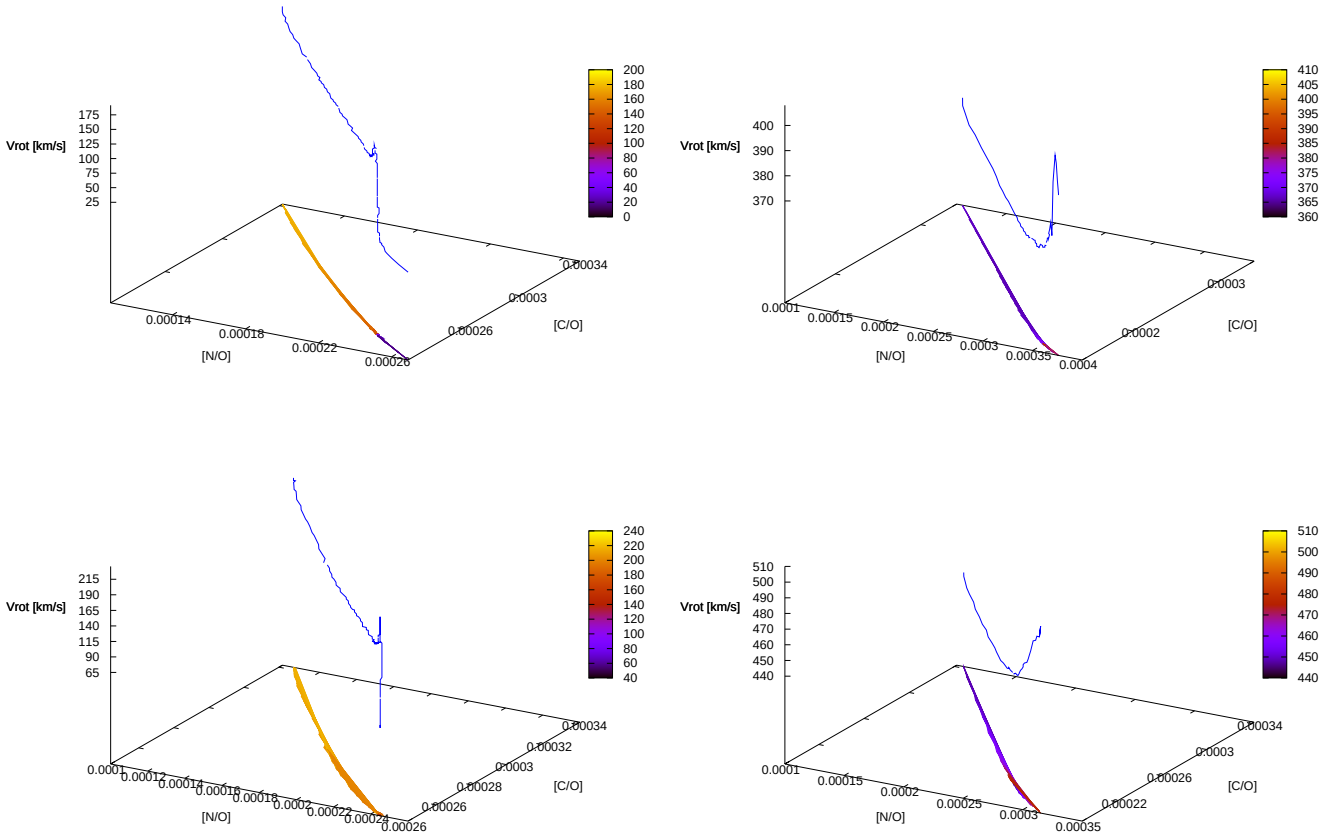
Kod zvijezda velikih masa u fazi glavnog niza i fazi poslije glavnog niza procesi miješanja materije su sve prisutniji kako je masa zvijezde veća. Za B i A zvijezde srednjih masa nema predviđanja da dolazi do miješanja materije. Za zvijezde koje ne rotiraju, porast zastupljenosti dušika nastupa jedino kada zvijezda dosegne fazu crvenih superdivova. Međutim, za zvijezde koje rotiraju, porast dušika se već javlja u evolucijskoj fazi glavnog niza te je porast veći što su rotacije brže i inicijalne mase zvijezda veće. Pri kraju faze glavnog niza za zvijezde Sunčevog metaliciteta $Z = 0.02$, predviđeno povečanje dušika je za faktor 3 - 4 za inicijalne brzine rotacije $v_{rot} = 200$ odnosno $300\,kms^{-1}$. Kod zvijezda nižih metaliciteta porast u zastupljenosti dušika u fazi glavnog niza je manji vjerojatno zbog manjeg gubitka mase. Dakle, možemo reći da je povećanje zastupljenosti dušika kod superdivova kasnog B - tipa gotovo za faktor 10 jer takve zvijezde provode dugo vremena u 'plavoj' fazi evolucije pa je dovoljno vremena da započne proces miješanja materije.

Evolucijski modeli koji uključuju rotacijsko mješanje (Ekström et al. 2008), kalibrirani su sa omjerima rotacijske brzine prema kritičnoj rotacijskoj brzini Ω/Ω_{crit}. Vrlo blizu kritične brzine rotiranja, materija zvijezde se giba prema ekvatorijalnom pojasu i tamo iščezne radijativnim procesima. U takvom bi slučaju zvjezdana evolucija napredovala uz gubitak mase putem zvjezdanih vjetrova induciranih rotacijom zvijezde. Takvo rotacijsko mješanje mijenja površinsku zastupljenost CNO elemenata i vodi prema povećanju opaciteta vanjskih slojeva atmosfere. Važno je poznavanje iznosa početne rotacijske brzine prilikom početka evolucijskog ciklusa zvjezde na ZAMS-u, kako bi se dalje mogla pratiti zastupljenost elemenata u razvoju zvijezde. Treba is-

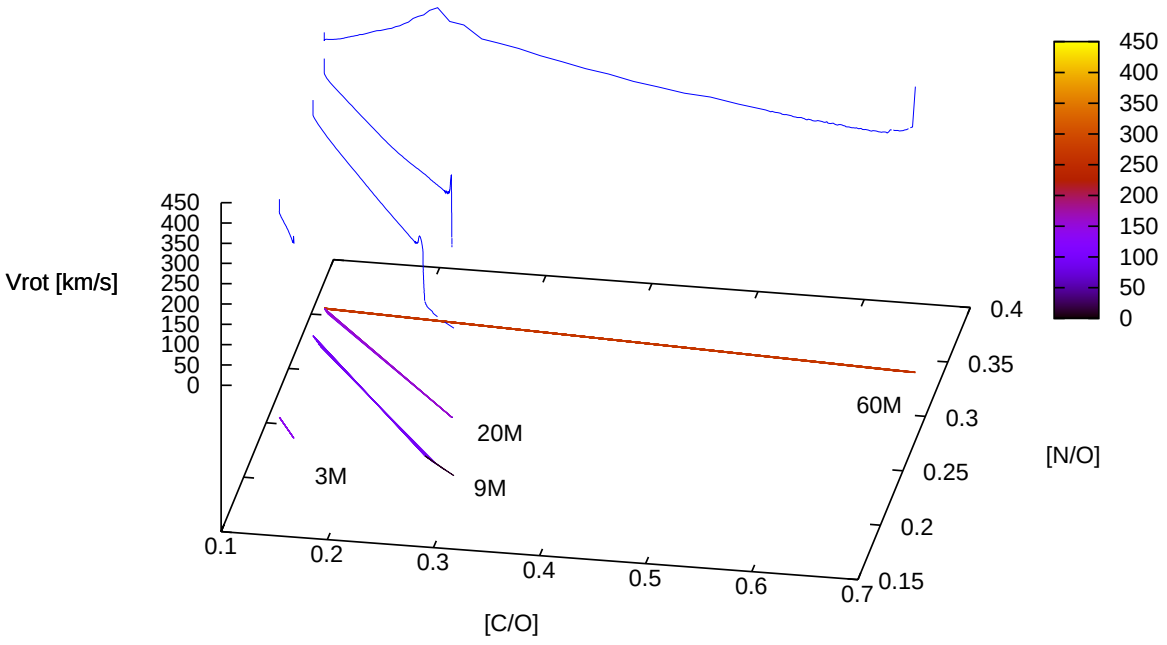
taknuti da rotacijsko mješanje kod zvijezda velikih masa nadmašuje fazu glavnog niza ovisno o inicijalnim rotacijskim brzinama. Na sl. 5. 2 i 5. 3 prikazane su zastupljenosti vodika prema heliju i dušika prema ugljiku u ovisnosti o iznosu projekcije rotacijske brzine za zvijezde $9\,M_\odot$ i $20\,M_\odot$ tijekom evolucije i to za omjere rotacijskih brzina prema kritičnoj rotacijskoj brzini $\Omega/\Omega_{crit} = 0.5$ i 0.9. Na sl. 5.4 prikazane su zastupljenosti dušika prema ugljiku u ovisnosti o iznosu projekcije rotacijske brzine za zvijezde $3\,M_\odot$, $9\,M_\odot$, $20\,M_\odot$ i $60\,M_\odot$ tijekom evolucije i to za omjere rotacijskih brzina prema kritičnoj rotacijskoj brzini $\Omega/\Omega_{crit} = 0.5$. Na sl. 5.1 je vidljivo kako je rotirajuća zvijezda na početku razvoja (ZAMS) manjeg luminoziteta nego statična zvijezda, te u daljnjem tijeku razvoja evolucijska traka rotirajuće zvijezde siječe traku zvijezde statičnog modela i na kraju postaje i sjajnija od zvijezde bez rotacije. Razlog svakako treba tražiti u činjenici da u početku razvoja zvijezda sa rotacijom ima sjajne polove i tamni ekvator pa je stoga luminozitet rotirajuće zvijezde manji. Kako pri razvoju zvijezde sa rotacijom u dvojnom zvjezdanom sustavu dolazi do efekta 'kočenja' (uslijed sinhronizacije) rotacijske brzine zvijezda, evolucijska traka zvijezde u rotaciji prelazi preko evolucijske trake zvijezde bez rotacije i postaje sjajnija. Ovakvo nam ponašanje zapravo želi reći, da je tijek razvoja zvijezda sa rotacijom (pogotovo u dvojnom zvjezdanom sustavu) potpuno drugačiji od razvoja pojedinačnih zvijezda bez rotacije.



Slika 5.2: Zastupljenosti elemenata vodika i helija u modelu evolucije sa rotacijom za zvijezdu mase $9\,\mathrm{M}_\odot$ (gornje slike) i $20\,\mathrm{M}_\odot$ (donje slike) pri omjerima $\Omega/\Omega_{crit} = 0.5$ (lijevo) i 0.9 (desno) iz baze Ekström et al. (2008), ovisno o iznosu projekcije rotacijske brzine $v \sin i$.



Slika 5.3: Zastupljenosti elemenata dušika i ugljika u modelu evolucije sa rotacijom za zvijezdu mase $9\,\mathrm{M}_\odot$ (gornje slike) i $20\,\mathrm{M}_\odot$ (donje slike) pri omjerima $\Omega/\Omega_{crit} = 0.5$ (lijevo) i 0.9 (desno) iz baze Ekström et al. (2008), ovisno o iznosu projekcije rotacijske brzine $v \sin i$.



Slika 5.4: Zastupljenosti elemenata dušika i ugljika u modelu evolucije sa rotacijom za zvijezdu mase $3\,M_\odot$, $9\,M_\odot$, $20\,M_\odot$ i $60\,M_\odot$ pri omjerima $\Omega/\Omega_{crit} = 0.5$ iz baze Ekström et al. (2008), ovisno o iznosu projekcije rotacijske brzine $v \sin i$.

6. MEHANIZAM TRANSPORTA ENERGIJE

6.1 Uvod

Stanje u kojoj se nalazi materija koja čini zvijezdu je plazma na visokim temperaturama, i u većini slučajeva, visokim tlakovima. Prijenos energije kroz takav medij od trenutka njenog nastanka u samoj jezgri zvijezde pa do samog trenutka napuštanja sa površine zvijezde je od fundamentalne važnosti za razumjevanje prirode procesa koji se odvijaju unutar i na površini zvijezde. Prijenos energije kroz unutrašnjost zvijezde fizikalno se može realizirati na više načina. Putem zračenja, procesom kondukcije (sudarima čestica se prenosi energija na susjedne čestice) i procesom konvekcije (mehaničkim mješanjem materije). Mehanizmi prijenosa energije putem zračenja opisani su jednadžbom prijenosa zračenja. Radijativna difuzija je proces koji dominira pri transportu energije ispod neke vrijednosti temperaturnog gradijenta. Prilikom prijenosa energije zračenjem, energija oslobođena nuklearnim reakcijama u unutrašnjosti zvijezde, prenosi se učestalom apsorpcijom i emisijom fotona, dok se mehanizmom prijenosa energije konvekcijom, energija prenosi procesima miješanja plina (topli plin se diže, oslobađa energiju, hladi se i spušta). Kako temperatura zvijezde opada prema van, tlak zračenja je niži na većim udaljenostima od središta. Gradijent tlaka zračenja proizvodi lagano gibanje fotona prema površini. Zbog toga je proces prijenosa energije zračenjem, proces koji uključuje sporu difuziju fotona u nasumičnom gibanju prema površini zvijezde kao odgovor na trenutačnu razliku u tlaku zračenja. Ako gradijent temperature postane prestrm, ulogu prijenosa energije preuzima konvekcija.

Konvektivna miješanja nastupaju ukoliko radijativna difuzija nije u mogućnosti dovoljno brzo prenijeti određen iznos energije. Mehanička mjiešanja na velikim se skalama realiziraju dosegnuvši kritični temperaturni gradijent pa tako onda dominiraju konvektivni procesi prijenosa. Konvektivna zona je gotovo adijabatska, što znači da ne postoji izmjena topline između konvektivnih ćelija i okolnog medija. Takvo konvektivno strujanje vrlo je učinkovito pri prenosu energije ali istodobno i vrlo komplicirano za modeliranje.

Treba napomenuti da je uključivanje fizike miješanja materije i procesa konvekcije ili semikonvekcije u današnje modele vrlo oskudno. Rezidualna turbulencija povezana s turbulencijom diferencijalne rotacije glavni je izvor miješanja unutar radijativne zone i prisutna je i u području jakog gradijenta kemijskog sastava blizu konvektivne zone.

Nekoliko grupa radi na području rotacijskog miješanja materije u ranim tipovima zvijezda i pokazuju da takvo mješanje materije bitno mijenja površinsku zastupljenost helija i CNO

elemenata (Langer 1991, 1992; Denissenkov 1994; Eryurt et al. 1994). U članku Maeder & Meynet (1996) uzeta je u obzir diferencijalna rotacija kako bi se izračunao doprinos difuzije uz pretpostavku da je rotacijski profil određen očuvanjem zakretnog momenta.

6.2 Konvektivni prijenos energije

Ukoliko je medij u unutrašnjosti zvijezde u stanju konvektivnog miješanja, temperaturni je gradijent medija pod velikim utjecajem temperaturnog gradijenta unutar konvektivne ćelije. Tijekom gibanja, pretpostavlja se da konvektivne ćelije ne izmjenjuju toplinu s okolinom već su adijabatske. Dakle, transport energije se realizira putem miješanja materije što predstavlja zapravo mehanički oblik procesa prijenosa. Konvektivni transport energije znači izmjenu energije između vrućih i hladnih plašteva unutar nestabilnih područja. Konvekcija uključuje podizanje toplih mjehurića plina i njihovu adijabatsku ekspanziju. Nakon što mjehurić prijeđe određenu udaljenost, on se napokon termalizira, predajući višak topline dok se 'utapa' u okolnome plinu. Adijabatski gradijent temperature opisuje stanje mijenjanja temperature plina unutar mjehurića tijekom njegove ekspanzije. U slučaju kada je duboko u unutrašnjosti zvijezde stvarni gradijent temperature malo veći od adijabatskog, ispunjen je uvjet da se sav luminozitet prenosi konvekcijom. Zahvaljujući velikim gustoćama u unutrašnjosti zvijezde, konvektivni transport energije je vrlo učinkovit. Znači, prijenosom energije u dubokoj unutrašnjosti dominira ili zračenje ili konvekcija, što ovisi o temperaturnom gradijentu. No, u blizini zvjezdane površine, mogu simultano i zračenje i konvekcija nositi značajne količine energije.

Učestalost pojavljivanja vanjskih konvektivnih ovojnica kod OB zvijezda i njihova anizotropna struktura vodi do niza astrofizičkih posljedica kao što su: konvektivno uvjetovani akustični modovi koji omogućavaju asteroseizmička opažanja kod OB zvijezda; konvektivna miješanja bi mogla imati utjecaj na gubitak mase putem zvjezdanih vjetrova; konvektivna ovojnica prenosi kemijske elemente i kutni impuls. Kod zvijezde mase M, luminoziteta L i kutne brzine Ω, ukupnoj akceleraciji doprinose osim gravitacijske akceleracije još i centrifugalna te akceleracija zračenja:

$$\vec{g}_{\rm tot} = \vec{g}_{\rm eff} + \vec{g}_{\rm rad} = \vec{g}_{\rm grav} + \vec{g}_{\rm rot} + \vec{g}_{\rm rad} \tag{6.1}$$

Vektor $\vec{g}_{\rm eff}$ posjeduje i radijalnu i tangencijalnu komponentu, pri čemu je radijalna komponenta za prostorni kut θ dana kao:

$$g_{\rm eff,r} = -\frac{GM_r}{r^2}\Big(1 - \frac{\Omega^2 r^3}{GM_r} sin^2\theta\Big) \tag{6.2}$$

Akceleracija zračenja je usmjerena prema van i oblika je

$$\vec{g}_{\mathrm{rad}} = \frac{1}{\rho}\vec{\nabla}P_{\mathrm{rad}} \tag{6.3}$$

Lokalni tok i hidrostatska jednadžba ravnoteže dani su kao

$$\vec{F} = -\chi\vec{\nabla}T \tag{6.4}$$

$$\vec{\nabla}P = \rho\vec{g_{\mathrm{eff}}} \tag{6.5}$$

s termičkom difuzijom oblika

$$\chi = \frac{4acT^3}{3\kappa\rho} \tag{6.6}$$

Tlak zračenja je uključen u ukupni tlak P. Lokalni gradijent zračenja kod zvijezde koja rotira ima oblik

$$\vec{\nabla}_{\mathrm{rad}} = \frac{dT}{d\vec{n}}\frac{d\vec{n}}{dP}\frac{P}{T} \tag{6.7}$$

pri čemu su derivacije određene duž smjera $\vec{n}$, okomito na izobare. Upotrebom Eddingtonova izraza za faktor Γ:

$$\Gamma = \frac{\kappa L}{4\pi cGM} \tag{6.8}$$

dobivamo

$$\vec{\nabla}_{\mathrm{rad}} = \frac{\Gamma}{4(1-\beta)(1-\frac{\Omega^2}{2\pi G\rho_m})} \tag{6.9}$$

gdje je κ opacitet (prozirnost), β=P_g/P je omjer tlaka plina prema ukupnom tlaku, ρ_m je srednja vrijednost unutrašnje gustoće te c brzina svjetlosti, pa vrijedi da je

$$\frac{P}{aT^4} = \frac{1}{3(1-\beta)} \tag{6.10}$$

pri čemu je a konstanta gustoće zračenja pa je adijabatski gradijent dan kao:

$$\vec{\nabla}_{\mathrm{ad}} = \frac{8-6\beta}{32-24\beta-3\beta^2} \tag{6.11}$$

Tako da uvjet konvektivne nestabilnosti $\vec{\nabla}_{\rm rad} > \vec{\nabla}_{\rm ad}$ poprima oblik

$$\frac{\Gamma}{(1-\frac{\Omega^2}{2\pi G\rho_m})} > 4[1-\beta]\vec{\nabla}_{\rm ad} \tag{6.12}$$

Jednadžba (6. 12) ima niz zanimljivih fizikalnih posljedica: kod zvijezde koja rotira ta je nejednakost brže zadovoljena pa tako i sam koncept rotacije zvijezde ide u prilog konvekciji u zvjezdanim ovojnicama; učestalost konvekcije ovisi o κ i β; ako je moguće centrifugalnu silu odrediti iz potencijala, onda su temperatura i gustoća konstantne na izobarama.

Parametar β je najmanji u središtu zvijezde, postigne maksimum u ovojnici i jednak je nuli na površini zvijezde. Tako da u ovojnicama rotirajučih zvijezda efekti rotacije značajno utjeću na termički gradijent što ide u prilog konvekciji te je povečanje konvektivne zone uglavnom učestalije na ekvatoru.

6.3 Konvektivno prebacivanje jezgre zvijezde

Zvijezde velikih masa imaju konvektivne jezgre i radijativne ovojnice. Postoje dokazi da je prijelaz između tih dvaju načina transporta energije više izvan same jezgre negoli u području gdje je dostignut sam kritični temperaturni gradijent. Ta se pojava naziva konvektivno prebacivanje jezgre zvijezde (engl. convective core-overshooting) i mogla bi značajno utjecati na svojstva, tijek i trajanje razvoja zvijezde velike mase. Fizikalno objašnjenje ovakve pojave pretpostavlja materiju koja podliježe konvektivnom miješanju u smjeru prema površini zvijezde. Dosegavši točku u kojoj je temperaturni gradijent ispod kritične vrijednosti, materija ulazi u područje u kojem nema nikakvih konvektivnih miješanja. Nadalje, kinetička energija materije uzrokuje još daljnje podizanje i prije nego se stigne dovoljno ohladiti za početak ponovnog spuštanja prema jezgri zvijezde. Koncept konvektivnog prebacivanja jezgre zvijezde je takav, da poveća područje jezgre zvijezde u kojem se odvijaju termonuklearne fuzije. To povećava vrijeme zadržavanja zvijezde na glavnom nizu pošto se povećava količina vodika. Luminozitet zvijezde se također povećava i ima za posljedicu promjene efektivne temperature zvijezde dok se nalazi na glavnom nizu.

Ako postoji područje unutrašnjosti zvijezde koje podliježe dinamičkoj stabilnosti, vrijedi Schwarzschildov kriterij:

$$\vec{\nabla}_{\rm rad} < \vec{\nabla}_{\rm ad} \tag{6.13}$$

Ukoliko je radijativni temperaturni gradijent veći od adijabatskog, imamo slučaj dinamičke

nestabilnosti. Ako su oba temperaturna gradijenta jednaki, govorimo o rubnoj stabilnosti. Problemi nastupaju u područjima gdje se radijalno mijenja kemijski sastav zvijezde. Takva područja postoje u unutrašnjosti zvijezda u razvoju gdje se teži elementi proizvode obično ispod lakših. Zbog toga molekulska težina raste prema unutrašnjosti (kao i tlak zvijezde). U prilog nestabilnosti idu perturbacije koje se povećavaju do konačnih amplituda sve dok cijelo područje nije u stanju konvektivnog miješanja. Takvu nestabilnost moguće je postići bilo činjenicom da $\vec{\nabla}_{\rm rad}$ postaje prevelik (veliki tok, ili vrlo prozirna materija), ili putem depresije $\vec{\nabla}_{\rm ad}$. Oba slučaja mogu nastupiti u unutrašnjosti zvijezde, gdje konvektivna miješanja nisu samo ovisna o lokalnim silama već ih povezujemo (putem izmjene momenta, inercije, jednadžbe kontinuiteta) sa susjednim omotačima. U ekstremnim slučajevima treba uzeti u obzir reakciju cijelokupne zvijezde naspram lokalnih perturbacija. Primjer toga je točno određivanje granice konvektivne zone, pri čemu elementi koji su ubrzani negdje drugdje 'prebacuju se' dokle god im gibanje nije narušeno. Konvektivno prebacivanje jezgre ima golem utjecaj na evoluciju zvijezde u fazi nakon što zvijezda napusti glavni niz (TAMS). To znači zapravo da se udio konvektivnog prebacivanja jezgre može odrediti usporedbom opažanja s predviđanjima teorijskih evolucijskih modela. Takvi modeli općenito uključuju prebacivanje jezgre putem parametrizacije, gdje je parametar prebacivanja $\alpha_{\rm OV}$ definiran kao duljina prodiranja konvektivnog miješanja u radijativni omotač izražen u jedinicama visinske skale tlaka:

$$\alpha_{\rm OV} = \frac{l_{\rm overshoot}}{H_p} \tag{6.14}$$

Drugi razlog uvođenja efekta konvektivnog prebacivanja jezgre zvijezde su promjene zastupljenosti elemenata zvijezda uznapredovalih u razvoju. Kako su konvektivne jezgre u prijašnjim fazama razvoja veće, veći je dio zvijezde zahvaćen promjenom zastupljenosti elemenata putem termonuklearnih fuzija. Andersen, Clausen & Nordström (1990b) također govore o prisutnosti efekta prebacivanja iz razmatranja svojstva pomrčinskih dvojnih zvijezda. Komponente u takvim sustavima dobro se uklapaju u predviđanja teorijskih modela, gdje se kod zvijezda s većim masama mora uključiti i efekt prebacivanja jezgre kako bi zadovoljili teorijski model.

7. V380 CYGNI

7.1 Uvod

U posljednjem desetljeću, načinjeni su novi evolucijski modeli zvijezda koji uključuju fizikalne procese važnih za razumjevanje strukture i evolucije zvijezda velikih masa; konvektivno prebacivanje jezgre, semikonvekcija, rotacijsko mješanje zvjezdanog materijala i proces gubitka mase. Prebacivanje jezgre i rotacija uvelike utječu na predviđanja starosti i luminozitet zvijezda velikih masa (Maeder & Meynet 2000; Heger & Langer 2000; Langer & Woosley 2000; Langer et al. 2008). Opažačka ograničenja tih dvaju procesa čine ih nezaobilaznim, unatoč velikim poboljšanjima opažačkih tehnika i njihovih mogućnosti (Hilditch 2004). Odvojeni pomrčinski dvojni sustavi (dEBs) su neophodni u dobivanju opažačkih ograničenja o strukturi i evoluciji zvijezda velikih masa, pošto one čine glavni izvor direktno mjerljivih zvjezdanih parametara (Andersen 1991). Nažalost, točna mjerenja fizikalnih parametara (2 % ili bolje) su dostupna samo za 8 pomrčinskih dvojnih zvijezda velikih masa, gdje većina od njih ne posjeduje opažačka ograničenja na kemijski sastav. Kemijska se zastupljenost teško određuje iz spektra zvijezda zbog više razloga. Prvo, spektar vrućih OB zvijezda u većini slučajeva prikazuje premalo spektralnih linija. Drugo, često prisutne velike rotacijske brzine takvih zvijezda velikih masa čine spektralne linije širokima i plitkima, pa su potrebni spektri velikih S/N kako bi dali upotrebljive rezultate. Treće, u spektrima pomrčinskih dvojnih zvijezda linije jedne komponente mijenjaju se s profilom linije druge komponente što otežava njihovu analizu (linijsko preklapanje).

Kako je već naglašeno, u izvornom radu Simon & Sturm (1994) je predstavljena tehnika spektralnog raspetljavanja (SPD), kojom je moguće izdvojiti spektre pojedinih komponenata spektroskopske dvojne zvijezde iz niza složenih spektara opaženih u raznim fazama orbitalnog perioda. SPD se može upotrijebiti za računanje spektroskopskih orbita iz spektara gdje je vrlo izrazito linijsko prekrivanje. Druge metode mogu zbog toga dati manje pouzdane rezultate poput kros-korelacije (Southworth & Clausen 2007). Raspetljani spektri pojedinih komponenti imaju veći omjer S/N negoli opaženi spektri, što dalje omogućuje pouzdaniju analizu spektara i određivanje zastupljenosti kemijskih elemenata. Veliki stupanj degeneracije među efektivnom temperaturom ($T_{\rm eff}$) i površinskog ubrzanja ($\log g$) nije poteškoća za pomrčinske dvojne zvijezde jer se površinsko ubrzanje može odrediti s velikom točnosti (0.01 dex ili bolje) za obje komponente sustava. Detaljan opis takvih mogućnosti opisani su u članku Pavlovski & Hensberge (2005).

Neka od predviđanja modernih evolucijskih računa se odnose na promjene u kemijskom sastavu zvjezdane atmosfere tijekom evolucije. Putem CNO ciklusa unutar same jezgre zvijezde velike mase dolazi ili do obogaćivanja nekih elemenata kao što su helij i dušik, ili do osiromašenja elemenata kao što su ugljik i u manjoj mjeri kisik. Pomoću dubokih miješanja materije putem rotacije, proizvodi nukleosinteze, jezgre se prenose do same površine zvijezde i tako uzrokuju promjene u kemijskoj zastupljenosti elemenata zvjezdane atmosfere. Rotacijsko mješanje je toliko učinkovito, da se promjene u zastupljenosti zvjezdane atmosfere mogu zamjetiti dok je zvijezda još uvijek na glavnom nizu. Nepravilna zastupljenost helija i elemenata CNO ciklusa je zamijećena već duže vrijeme (Leushin 1988; Lyubimkov 1998), i bila je potvrđena u nekoliko opsežnih istraživanja (Gies & Lambert 1992, te Lyubimkova et al. 2004 te Huang & Gies 2006). Vrlo opsežna opažačka istraživanja ukazuju na činjenicu da situacija nije nimalo jednostavna. U pregledu OB zvijezda unutar Mliječnog Puta i Magellanovim Oblacima, spektroskopski je opažano oko 750 zvijezda (Evans et al. 2005, 2006). Zastupljenost elemenata određena je za spore (Trundle et al. 2007, Hunter et al. 2007) i za brze (Hunter et al. 2008, 2009) rotatore unutar Velikog Magellanovog Oblaka. Budući da teorijski računi predviđaju najizraženiji učinak u porastu zastupljenosti dušika (oko 0.5 dex prema terminalnoj fazi glavnog niza; TAMS), Hunter et al. (2008) su vrlo podrobno odredili zastupljenost tog elementa u ovom velikom uzorku B zvijezda. Naišli su na vrlo složenu situaciju: porast dušika je povezan s projiciranom rotacijskom brzinom, ali postoji značajan broj sporo rotirajućih zvijezda koje posjeduju veliku zastupljenosti dušika. Ovi su rezultati i u skladu s nedavnim istraživanjem koje su proveli Morel et al. (2006). Oni su istraživali skup sporo rotirajućih galaktičkih β Cephei zvijezda. Našli su grupu objekata s povećanom zastupljenosti dušika. Morel et al. (2006) su uočili vezu s jačinom magnetskog polja. Posve je jasno da nekoliko fizikalnih pojava i procesa utječu na površinsku zastupljenost kemijskih elemenata kod zvijezda velikih masa, što je samo dodatni izazov opažačima da uspiju to razjasniti.

7.1.1 Pomrčinski dvojni sustav V380 Cygni

Spektroskopska pomrčinska dvojna zvijezda V380 Cyg je od izuzetne važnosti za testiranje teorijskih modela zvjezdane evolucije. Primarnu komponentu čini zvijezda velike mase koja se nalazi na rubu završetka boravka na glavnom nizu. Primarna komponenta (zvijezda A) je u naprednoj fazi evolucije ($\log g = 3.1$), gdje je sekundarna komponenta (zvijezda B) manje mase tek odmakla od ZAMS-a ($\log g = 4.1$). Iz radova Popper & Guinan (1998) i Guinan et al. (2000) se može zaključiti da je zvijezda A puno sjajnija i masivnija komponenta dvojnog sustava te da se nalazi na 'plavoj udici' glavnog niza, dok je zvijezda B oko ~ 3 mag manjeg sjaja od primarne komponente i nalazi se na samom početku glavnog niza.

Upravo iz razloga što je sekundarna komponenta slabijeg luminoziteta, u spektru nisu bile uočene naznake njezinog linijskog spektra te je bila u popisu SB1 dvojnih sustava (sustav sa spektrom jedne komponente, Batten 1962 i pripadne reference). Hill & Batten (1984) su primjenili tehniku kros-korelacije kako bi značajno poboljšali izračun elemenata orbite sustava te konačno kvalitetnije detektirali orbitalno gibanje sekundarne komponente. Veći je napredak bio jedino moguć analizom visoko-rezolucijskih spektara s velikim S/N (Lyubimkov et al. 1996; Popper & Guinan 1998). Pomrčine dvojnog zvjezdanog sustava V380 Cyg su podosta plitke (amplitude reda 0.12 i 0.09 mag) i pojavljuju se na orbitalnom periodu od 12.4 d. Polumjeri pojedinih komponenata nisu određeni s velikom točnosti unatoč uloženim naporima da se osiguraju precizna i potpuna mjerenja sjaja (Guinan et al. 2000). Takve opažačke poteškoće doprinjele su uvelike neslaganjima o tome koja od dvaju komponenata je uistinu toplija (Hill & Batten 1984; Lyubimkov et al. 1996; Guinan et al. 2000).

Najbolje određena efektivna temperatura $T_{\rm effA}$, dobivena je prilagodbom spektrofotometrije ultraljubičastom i vidljivom energijskom raspodjelom za modele zvjezdane atmosfere s $T_{\rm effA}=$ 21 350 K (Guinan et al. 2000). Također prisutna je i neusklađenost u polumjerima i masama pojedinih komponenata. Posljednja dva istraživanja daju vrijednosti $M_A = 11.1 \pm 0.5\,M_\odot$ i $M_B = 6.95 \pm 0.25\,M_\odot$ (Guinan et al. 2000), te $M_A = 12.1 \pm 0.3\,M_\odot$ i $M_B = 7.3 \pm 0.3\,M_\odot$ (Lyubimkov et al. 1996).

Komponente V380 Cyg gibaju se po ekscentričnoj orbiti i pokazuju apsidalno gibanje u iznosu $\dot{\omega} = 24.0 \pm 1.8^\circ/100$ godina (Guinan et al. 2000). Kako bi se uskladile opažačke vrijednosti zvjezdanih parametara s teorijskim evolucijskim trakama, ovi se autori pozivaju na velik iznos parametra konvektivnog prebacivanja jezgre zvijezde u iznosu $\alpha_{\rm OV} = 0.6 \pm 0.1$. Unutar HR dijagrama za zvijezdu A se predviđa položaj u plavom području 'udice' glavnog niza. Ovi su autori općenito donjeli zaključak da zvijezde velikih masa posjeduju široke konvektivne jezgre, te su jače centralno kondenzirane nego što to predviđa standardna teorija zvjezdane evolucije. Takav je zaključak i u skladu s analizama apsidalnog gibanja orbite. Ipak, Claret (2003, 2007) je revidirao koncept parametra konvektivnog prebacivanja jezgre kojeg su našli Guinan et al. (2000), te se u svojim izračunima koristio omjerom efektivnih temperatura pojedinih komponenata sustava. To je zapravo bolji pristup nego proračuni s apsolutnim vrijednostima. Dobio je manje vrijednosti parametra konvektivnog prebacivanja $\alpha_{\rm OV}$.

Kemijski sastav dvojnog sustava V380 Cyg, posebno zastupljenost helija pojedinih komponenata, su određivali Leushin & Topilskaya (1986) i Lyubimkov et al. (1996). Obje su grupe našle povećanje u zastupljenosti helija kod zvijezde A, te normalnu zastupljenost helija kod zvijezde B. Glavni cilj i zadaća ovog istraživanja je poboljšati i proširiti ova istraživanja i rezultate, što bi

omogućilo pouzdaniju usporedbu s postojećim teorijskim zvjezdanim modelima.

7.2 Spektroskopska mjerenja

Sekundarna komponenta dvojnog sustava V380 Cyg (zvijezda B) jedva da se zamjećuje u optičkom spektru dvojnog sustava. Guinan et al. (2000) su odredili omjer svjetlosnih doprinosa u vidljivom pojasu u iznosu L_A/L_B ∼14.5. Stoga, se vrlo uspješni opažački program mora temeljiti na spektrima visoke rezolucije i velikih omjera S/N. U našem istraživanju osigurali smo spektre takvih kvaliteta sa četiri različita opservatorija gdje se koriste bilo difrakcijske rešetke bilo échelle spektrografi. Popisi snimljenih spektara dani su u Dodatku.

Na Astronomskom institutu Akademije znanosti Češke republike u Ondřejovu snimljeno je 59 spektara V380 Cyg. Ta su opažanja izvršena od 2004. do 2007. godine pomoću 2 m teleskopa i coudé spektrografa. Spektralni interval centriran na Balmerovoj H_α liniji pokriva oko 500 Å s disperzijom od 17 Å/mm, dok spektri centrirani na H_β i H_γ liniji pokrivaju oko 250 Å s disperzijom od 8.5 Å/mm.

Također su snimljena 43 spektra u dva navrata opažanja (svibanj i kolovoz 2008) u German-Spanish Astronomical Center (CAHA) na Calar Alto, u Španjolskoj. Korišten je 2.2 m teleskop, FOCES échelle spektrograf (Pfeiffer et al. 1998), te Loral#11i CCD. Korišteno je binanje 2 x 2 kako bi se reduciralo vrijeme iščitavanja. S pukotinom od 150μm dobiven je spektralni interval od 3 700 - 9 200 Å i spektralno razlučivanje od R ∼40 000. Kalibracija valnih duljina je provedena pomoću torij-argonova luka, a za dobivanje 'flat-field'-ova korištena je volframova lampa. Općenito su uvjeti opaženja bili zadovoljavajući, dok je nekoliko spektara snimljeno uz naoblaku.

Nadalje, 15 spektara dvojnog sustava V380 Cyg snimljeni su u studenom 2006. godine na Nordic Optical Telescope (NOT) i FIES échelle spektrografu (Frandsen & Lindberg 1999) na La Palmi, Španjolska. Spektralna razlučivost je R ∼47 000 u spektralnom području od 3 640 - 7 360 Å. Kalibracija valnih duljina je učinjena pomoću torij-argonovog luka, dok se za dobivanje 'flat-field'-ova koristila halogena lampa. Svi su spektri snimljeni pod dobrim vremenskim prilikama (obzirom na zimsko godišnje doba na La Palmi), dok su nekoliko spektara snimljeni kroz tanke oblake i slabiji 'seeing'.

Zadnju grupu spektara čine spektri opaženi pomoću 1.2 m McKellar teleskopa i coudé spektrografa na Dominion Astronomical Opservatory (DAO) s disperzijom od 9 Å/mm. Ukupno je snimljeno 27 spektara u području H_α linije u rasponu od 6 150 - 6 760 Å. Spektri su snimljeni 2006. - 2007. godine gdje je naročito vidljiva priroda apsidalnog gibanja orbite dvojnog sustava. Échelle spektri su reducirani standardnim postupkom (oduzimanje bias signala, dijeljen sa sred-

njim flat-field snimkom) te ekstrahirani pomoću rutina échelle paketa unutar IRAF-a (standardni programski alat za redukciju podataka). Samo spajanje i normaliziranje je načinjeno s velikom pozornošću vlastitim programskim kodovima (opisano u 2. poglavlju), kako bi bili sigurni da ti koraci u ekstrahiranju spektrara ne stvaraju dodatnu sistematsku pogrešku i tako onda utjecali na konačni rezultat analize. Spektri snimljeni na Ondřejov opservatoriju su reducirani pomoću programa SPEFO (Horn et al. 1996, Škoda 1996).

7.3 Metoda

Analiza složenih spektara u ovome radu prati metode koje su uveli i razradili Pavlovski & Hensberge (2005) i Hensberge, Pavlovski & Verschueren (2000) u analizama pomrčinske spektroskopske dvojne zvijezde V578 Mon. Postupak je dalje unapređen i detaljno opisan u članku Pavlovski & Southworth (2009). Srž pristupa leži u rekonstrukciji individualnih spektara iz opaženih složenih spektara koristeći spektralno raspetljavanje (SPD) (engl. 'spectral disentangling'). Postupak omogućava vrlo detaljnu analizu zastupljenosti elemenata koristeći iste alate kao pri analizi pojedinačnih zvijezda (Pavlovski 2004, Hensberge & Pavlovski 2007, Pavlovski & Hensberge 2009). SPD metoda također daje orbitalne elemente dvojnog sustava iz kojih se mogu izračunati radijalne brzine RV. U kombinaciji s modeliranjem svjetlosnih krivulja dvojnog sustava V380 Cyg dolazi se do potpunog skupa astrofizičkih veličina koje opisuju sustav.

Tablica 7.1: Parametri spektroskopske orbite dvojnog sustava V380 Cyg izračunati u ovom radu. Tijekom računa raspetljavanja pomoću SPD postupka, period je fiksiran na vrijednost iz rada Guinan et al. 2000.

Period orbite (d)	12.425719 (fiksiran)
Vrijeme prolaska periastrona (HJD)	2454615.18 ± 0.14
Amplituda brzine K_A (kms^{-1})	95.1 ± 0.3
Amplituda brzine K_B (kms^{-1})	160.5 ± 1.2
Omjer masa q	0.592 ± 0.005
Orbitalni ekscentricitet e	0.206 ± 0.008
Longituda periastrona ω ($^\circ$)	134.2 ± 1.1

Metoda SPD raspetljava vremenski niz složenih spektara (snimljene za razne faze orbitalnog perioda) u spektre pojedinih komponenata dvojnog sustava. Ostaje problem renormalizacije raspetljanih spektara. Razlog tome je činjenica što omjer svjetlosnih doprinosa pojedinih komponenti prema kontinuumu nije direktno mjerljiv iz složenih spektara. U ovom sam radu uzeo omjer

svjetlosnih doprinosa pojedinih komponenti iz analize svjetlosne krivulje (poglavlje 7.5), popraćen detaljnim postupkom opisanim u radu Pavlovski & Hensberge (2005) te uzimajući u obzir linijsko blokiranje (Ilijić et al. 2004).

Određena je kemijska zastupljenost elemenata putem postupka prilagodbe renormaliziranih raspetljanih spektara komponenata dvojnog sustava V380 Cyg na teorijske spektre. Postupak sinteze teorijskih spektara uključuje efekte NLTE (odsutna lokalna termodinamička ravnoteža). Proračun je vršen pomoću programa $DETAIL$ i $SURFACE$ (Giddings 1981, Butler 1984) i modela atoma opisanih u Pavlovski & Southworth (2009). Modeli zvjezdanih atmosfera izračunati su pomoću programa $ATLAS9$ (Kurucz 1979). U LTE aproksimaciji opravdanje za takav hibridni pristup se može naći u radu Nieva & Przybilla (2007). SPD je vrlo osjetljiva na raspodjelu pojedinih faza u kojima su opaženi te na normalizaciju kontinuuma opaženih složenih spektara. Hynes & Maxted (1998) pokazuju da to ne predstavlja problem za analizu radijalnih brzina, no međutim Hensberge, Ilijić & Torres (2008) upućuju na suprotno, da je zapravo od izuzetne važnosti na koji su način složeni spektri normalizirani kako bi se što bolje reproducirali pojedinačni spektri komponenata. Naime, nedostatak vremenske promjenjivosti relativnih svjetlosnih doprinosa pojedinih komponenata dvojnog sustava, može uzrokovati nastanak lažnih doprinosa u raspetljanim pojedinačnim spektrima, što se u praksi manifestira kao niskofrekventne promjene kontinuuma (undulacije). Hensberge et al. (2008) objašnjavaju vrlo detaljno ovakvo ponašanje, te smatraju da ovakvo ponašanje rezultira degeneracijom SPD jednadžbi i/ili progresijom 'bias'-a od strane opaženih spektara. Vrlo pozorna i detaljno planirana opažanja, kao i pažljiva redukcija opaženog materijala mogu zaobići takve poteškoće. Posebno su važna opažanja dvojnog sustava u trenutku pomrčina ako je to tehnički moguće. U slučaju V380 Cyg imamo problem malog svjetlosnog doprinosa sekundarne komponente dvojnog sustava. Međutim imamo opažene spektre vrlo dobre raspodjele orbitalne faze. Kombiniranjem s vrlo pažljivo izvedenom redukcijom spektara (naročito je važna normalizacija kontinuuma i spajanje redova échelle spektara), ovakav nam je pristup omogućio visoko kvalitetne raspetljane spektre koji se dalje mogu koristiti za detaljnu analizu zastupljenosti elemenata u zvjezdanim atmosferama pojedinih komponenata dvojnog sustava.

7.4 Spektroskopska orbita iz spektralnog raspetljavanja

U metodi spektralnog raspetljavanja koja je izvorno formulirana u radu Simon & Sturm (1994), rješenja se traže za obje pojedine komponente dvojnog sustava kao i za optimalne pripadne parametre orbite. U ovom se radu koristi metoda spektralnog raspetljavanja složenih spektara u

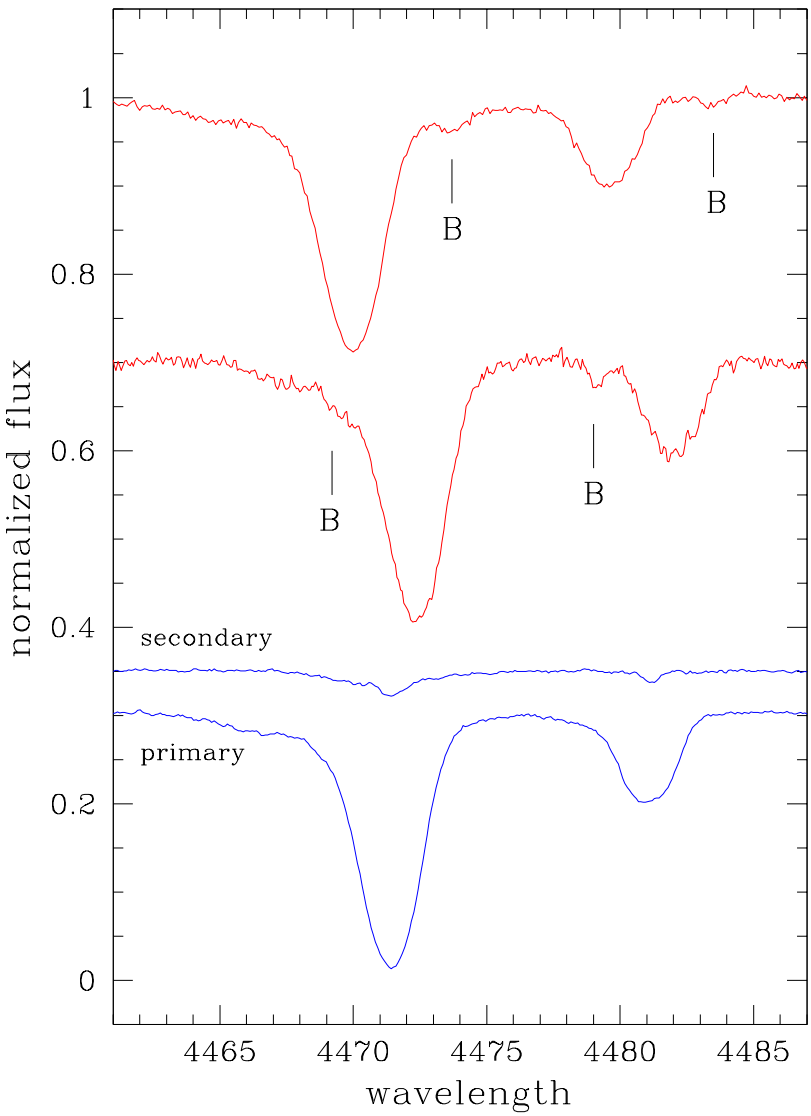
Fourierovom prostoru kao što je to formulirao Hadrava (1995). Prednost je ove metode u manjem zahtjevu na CPU vrijeme. Sustav jednadžbi se sastoji od $N_{obs} \times N_{pix}$ linearno vezanih jednadžbi, gdje N_{obs} predstavlja broj opaženih spektara, a N_{pix} broj točaka u svakom od opaženih spektara. Upotrebom diskretnog Fourierovog transformata, veliki se skup linearnih jednadžbi može svesti u $(N_{pix}/2)+1$ sustava od N_{obs} kompleksnih jednadžbi upotrebom samo dvaju nepoznanica za slučaj dvojnih zvjezdanih sustava. Obzirom da će trebati raspetljati spektralno područje raspona oko 3 000 Å skraćenje CPU vremena bit će od osobite važnosti. Korišten je kompjutorski program $FDBINARY$ opisan u radu Ilijić et al. (2004).

Doprinos sekundarne komponente (zvijezda B) ukupnom luminozitetu dvojnog sustava je vrlo malen ($L_A/L_B \sim 15.5$ u V pojasu), te je identifikacija pojedinih linija u spektru sekundarne komponente otežana. No sretna je okolnost što je efektivna temperatura zvijezde B slična zvijezdi A (poglavlje 6.7) pa će linije He I biti izražene. Spektralne su linije zvijezde B također vidljive i u drugim područima raspetljanog spektra, no one su većinom vrlo slabe i neupotrebljive za određivanje elemenata orbite. Tako smo se uglavnom u raspetljanom spektru sekundarne komponente fokusirali na linije neutralnog helija.

Dvojni zvjezdani sustav V380 Cyg pokazuje apsidalno gibanje orbite te se nastojalo vremenski gledano grupirati pojedine opažene spektre. Vremenski je raspon između prvog i zadnjeg opaženog spektra oko 5 godina, što za promjenu longitude periastrona znaći iznos od oko 6°, koristeći predviđanja iz Guinan et al. (2000).

Nakon pažljivog odabira, izdvojeno je šest spektralnih područja centriranih oko jakih linija helija na $\lambda\lambda$ 4026, 4388, 4471 (uključujući Mg II λ4481), 4712, 4912, i 6670 Å kako bi smo izračunali finalno rješenje parametara orbite. Također smo pridruživali statističke težine spektrima prema njihovim vrijednostima S/N. U tab. 7.1 su upisane konačne vrijednosti pojedinih parametara orbite, svaki od njih je srednja vrijednost parametara s pripadnom pogreškom dobivenih za sva spektralna područja.

Glavno je pitanje kako se novi izračuni i vrijednosti slažu u odnosu na ranije izračunate vrijednosti parametara? Batten (1962) je načinio vrlo temeljitu studiju mjerenja radijalnih brzina svih do tada prikupljenih fotografskih spektara. Njegova su vlastita mjerenja (načinjena na Dominion Astrophysical Observatory) prvi puta otkrila spektralne linije zvijezde B. Battenova je analiza dala kao rezultat iznos amplituda brzina $K_A = 93.4 \pm 2.0\,\mathrm{kms}^{-1}$ i $K_B = 160.9 \pm 2.9\,\mathrm{kms}^{-1}$ blizu onima iz tab. 7.1. Hill & Batten (1984) ponovno analiziraju do tada sve dostupne spektre te upotrebljavaju tehniku kros-korelacije i pronalaze neusklađenost između sistemskih brzina obaju komponenti dvojnog sustava. Njihova vrijednost K_B je za oko $7\,\mathrm{kms}^{-1}$ veća od vrijednosti koju ranije dobiva Batten, što ima za posljedicu porast u masi zvijezde A sa 12.5 na 13.7 $\mathrm{M}_\odot$. Lyubim-



Slika 7.1: Opaženi spektar oko He I λ4471 i Mg II λ4481 linija. Gornja su dva spektra snimljena oko kvadratura (faze 0.25 i 0.75), vidljive su i slabe linije sekundarne komponente označene sa B. Donja su dva spektra raspetljani spektri komponenata dvojnog sustava. Očita je slabija sjajnost zvijezde B u odnosu na zvijezdu A.

kov et al. (1996) prikuplja sva dostupna mjerenja radijalnih brzina za sustav V380 Cyg, uključujući i novu seriju mjerenja temeljena na CCD spektrima. Oni nalaze značajno nižu vrijednost K_B od 155.3 kms^{-1} i nešto veću vrijednost K_A od 93.95 kms^{-1} uz čije vrijednosti ne prilažu pripadne pogreške pa ih je teško usporediti s prijašnjim vrijednostima. Najcjelovitija istraživanja provode Popper & Guinan (1998), temeljena na visoko rezolucijskim spektrima s velikim S/N. Spektri su snimljeni Hamilton échelle spektrografom Lick opservatorija.

Glavni je izvor pogreške pri računanju radijalnih brzina tehnikom kros-korelacije u odabiru spektra predložka. Metoda spektralnog raspetljavanja u potpunosti zaobilazi taj problem tražeći istodobno najbolje opće rješenje kako za oba raspetljana spektra tako i za parametre orbitalnih elemenata. Metodi raspetljavanja nije potreban spektar predložak kao vodilja ili prolaz kroz neki međukorak za dobivanje mjerenih radijalnih brzina svakog od opaženih spektara. Nadalje, još jedna prednost metode raspetljavanja je i u tome, što joj ne smeta 'prekrivanje' spektralnih linija zvijezda u složenim opaženim spektrima. Još uvijek nedostaje analiza propagacije pogrešaka, tako da je za sada jedino moguće izdvojiti skupine spektara određenog spektralnog intervala u svrhu dobivanja niza nezavisno mjerenih parametara orbite u različitim spektralnim područjima. Southworth & Clausen (2007) su istraživali parametre orbite postupkom prilagodbe dvostrukog Gaussijana, kros-korelacije i metode spektralnog raspetljavanja složenih spektara. Parametri orbite dobiveni postupkom spektralnog raspetljavanja su dali najdosljednije vrijednosti, uključujući vrijednosti dobivenih pomoću prilagodbe dvostrukih Gaussijana.

Pokazalo se da prekrivanje linija utječe na rezultate kros-korelacije i da je prilagođavanje Gaussijanom često pouzdanije. Također autori zaključuju da je SPD metoda najpouzdanija uz napomenu da treba paziti na lokalne minimume.

7.5 Analiza svjetlosne krivulje

Analizu svjetlosne krivulje proveo je Dr. sc. John Southworth, a zbog cjelovitosti rasprave uvršteno je u ovaj rad.

Potaknuti činjenicom da bi sekundarna komponenta dvojnog zvjezdanog sustava V380 Cyg mogla biti toplija nego primarna komponenta, podrobno su provjerene svjetlosne krivulje dobivene u radu Guinan (2000). Ta su mjerenja dobivena upotrebom automatiziranog fotometrijskog teleskopa na Mt. Hopkins, Arizona, te su ukupno snimljena 870 mjerenja u UBV pojasevima.

U svrhu najboljeg modeliranja svjetlosnih krivulja, a koje otkrivaju značajne modulacije realizirane kroz asferičnost i refleksijskog efekta komponenti, odabran je Wilson-Devinney (WD) program (Wilson & Devinney 1971; Wilson 1979, 1993) verzija 2004/02/06 koja u sebi sadrži

Rocheovu geometriju popunjenosti ljusaka te detaljan opis efekta refleksije i drugih fizikalnih pojava. Računato je i drugim programima kako bi se prilagodbe svjetlosnih krivulja automatski iterirale, bilo upotrebom krnje verzije standardne procedure korekcija (DC) bilo robustnim simpleks minimalističkim algoritmom $AMOEBA$ (Press et al. 1992). Prilikom izračuna konačnog rješenja, koristili smo proceduru DC te je iterirali sve do uvjeta da korekcije parametara budu manje od polovine njihovih formalnih pogrešaka.

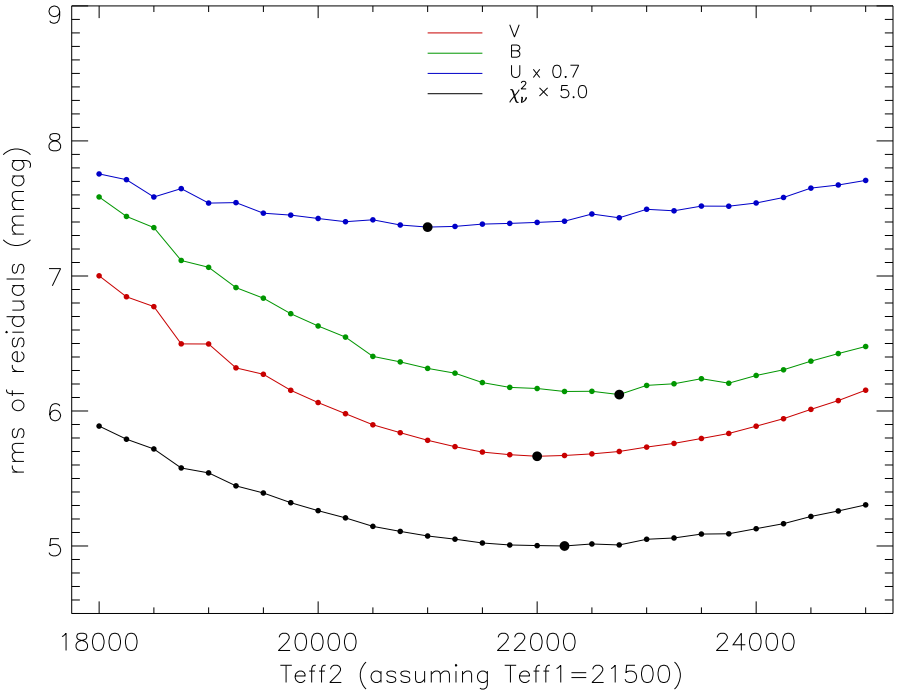
Tablica 7.2: Skupni prikaz fiksiranih i kontroliranih parametara za konačno rješenje WD svjetlosnih krivulja Guinan et al. (2000) dvojnog sustava V380 Cyg. Za detaljnija objašnjenja WD koristit priručnik (Wilson & Van Hamme 2004).

Parametar	WD naziv	Zvijezda A	Zvijezda B
Orbitalni period (d)	PERIOD	12.425719	
Referentno vrijeme (HJD)	HJD0	2441256.544	
Omjer masa	RM	0.5916	
Efektivne temperature (K)	TAVH, TAVC	21 500	22 000
Rotacijski iznosi	F1, F2	1.0	1.0
Zvjezdani albedo	ALB1, ALB2	1.0	1.0
Gravitacijsko zatamnjenje	GR1, GR2	1.0	1.0
Numerička točnost	N1, N2	60	30
Bolometrijski LD koeficijenti	XBOL1, XBOL2	0.6475	0.6854
U LD koeficijent	X1, Y1	0.3582	0.3128
B LD koeficijent	X1, Y1	0.3534	0.3026
V LD koeficijent	X1, Y1	0.3043	0.2622

Potpuni prikaz fiksiranih i kontroliranih parametara su prikazani u tab. 7.3: za naše modeliranje smo uzeli orbitalnu efemeridu iz rada Guinan et al. (2000), bolometrijska albeda i eksponenti gravitacijskog zatamnjenja uzeta su u skladu radijativnih atmosfera (Claret 1998, 2001) te su uzete pseudosinhrone rotacije za obje komponente dvojnog sustava.

Uzimanje u obzir rubnog zatamnjenja je od velike važnosti pošto postoje naznake da teorijski predviđeni koeficijenti rubnog zatamnjenja nisu potpuno pouzdani (Southworth 2008; Southworth et al. 2009). Tako smo u ove izračune uvrstili doprinos rubnog zatamnjenja na tri različita načina: upotrebom koeficijenata dobivenih bilinearnom interpolacijom u tabličnim vrijednostima Van Hamme (1993) ili Claret (2000), ili uključivanjem koeficijenata u postupak prilagodbe. Rješenja pokazuju zanemarivu ovisnost o efektu rubnog zatamnjenja, vjerojatno jer se radi o dosta plitkim pomrčinama dvojnog sustava u odnosu na disperziju opažanja. Za naše konačno rješenje uzeli smo linearnu ovisnost efekta rubnog zatamnjenja i fiksirali koeficijente na vrijednosti iz rada

Van Hamme (1993).

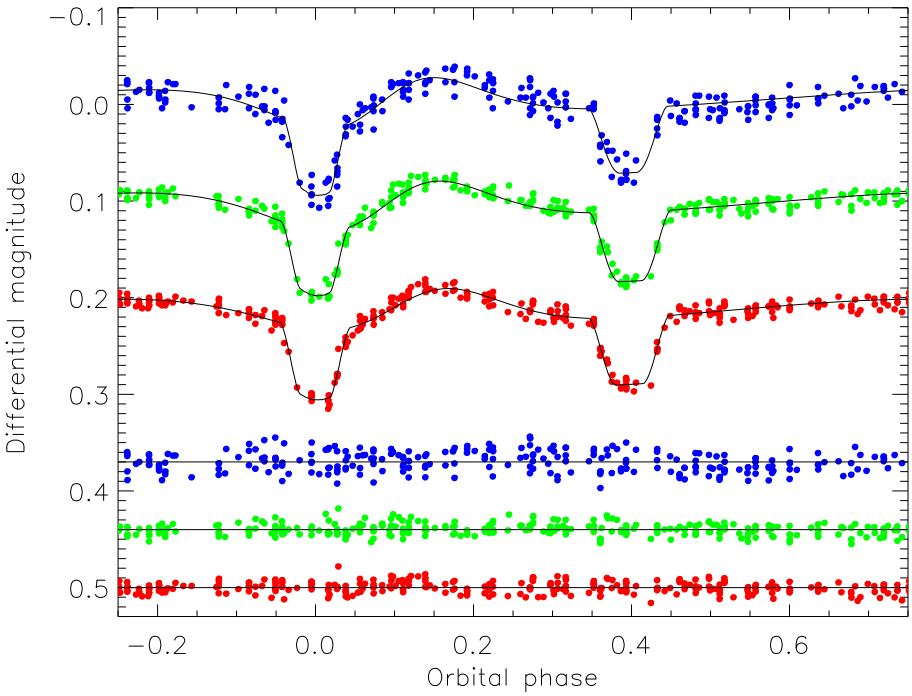


Slika 7.2: Kvaliteta rješenja za UBV svjetlosne krivulje zasebno, i u kombinaciji za $T_{\mathrm{eff\,A}} = 21\,500$ K i $T_{\mathrm{eff\,B}}$ fiksiran na interval vrijednosti. Za pojedine svjetlosne krivulje su kvaliteta rješenja dana nepouzdanostima reziduala, dok su za kombinirana rješenja dana vrijednostima reduciranih χ^2 uz pretpostavku da su pogreške opažanja jednake iznosima nepouzdanosti svake pojedine svjetlosne krivulje. Točke u kojima je računata prilagodba ili postignuta najbolja prilagodba dani su malim i velikim punim kružičima.

7.5.1 Konačna rješenja svjetlosne krivulje

Imajući na umu izračune iz predhodnog poglavlja, došli smo do konačnih rješenja za svjetlosne krivulje u pojasevima UBV i to pojedinačno i u kombinaciji upotrebom koda DC za optimizaciju prilagođenih rješenja. Taj nam kod omogućava upotrebu predviđanja iz modela atmosfera Kurucza (1993) kako bi se znao omjer tokova zračenja u različitim pojasevima opažanja što zapravo znači da nam rezultati ovise o teorijskim modelima.

Fiksirali smo $T_{\mathrm{eff\,A}} = 21\,500$ K i $T_{\mathrm{eff\,B}} = 22\,000$ K te onda primjenili postupak prilagodbe nad



Slika 7.3: Usporedba između najbolje prilagodbe nađene putem WD koda i svjetlosnih krivulja iz rada Guinan et al. (2000). Reziduali su prikazani u podnožju slike. Za svaki su pojedinačni slučaj gornji (plavi) opažanja za pojas U, srednji (zeleni) za pojas B i donji (crveni) za pojas V.

potencijalima obaju zvijezda (PHSV, PCSV), kutu inklinacije orbite, ekscentricitetu i longitudi periastrona (XINCL, E i PERR0) te nad pomakom u fazi u odnosu na orbitalnu efemeridu (PSHIFT) i svjetlosnim doprinosima pojedinih zvijezda dvojnog sustava u svakom od pojedinih pojaseva (HLUM, CLUM). Sve su tri svjetlosne krivulje prilagođavane istodobno u svrhu određivanja konačne vrijednosti parametara, ali i zasebno kako bi provjerili dosljednost i bili u mogućnosti pridružiti pogreške pripadnim parametrima. U tab. 7.3 upisani su prilagođeni parametri naših rješenja sa njima pripadnim pogreškama (računati kodom DC iz kovarijantne matrice), te su na sl. 7.3 grafički prikazane krivulje prilagodbe.

Za napomenuti je činjenica, da su pogreške možda previše optimistične u slučaju korelacija između raznih parametara, te ih treba prihvatiti sa oprezom (Southworth & Clausen 2007). Za konačno rješenje svjetlosne krivulje uzimamo vrijednost dobivenu iz postupka prilagodbe za slučaj kombinacije svih triju svjetlosnih pojaseva, te za pripadnu nepouzdanost vrijednost razlike između zasebno računatim vrijednostima.

7.6 Spektralna analiza komponenata

Model zvjezdane atmosfere je u prvom redu definiran preko parametara efektivne temperature ($T_{\rm eff}$) i površinskog ubrzanja ($\log g$) zvijezde, pa je moguće da u postupku računa prilagodbe ta dva parametra budu uvelike korelirani. Ova činjenica ograničava određivanje zastupljenosti elemenata pojedinačnih zvijezda. U slučaju pomrčinskih dvojnih zvijezda površinsko ubrzanje gravitacijske sile može se vrlo točno izračunati iz komplementarne analize svjetlosnih krivulja i dinamike sustava. Kod dvojnog zvjezdanog sustava V380 Cyg izračunali smo vrijednosti $\log g_A = 3.136 \pm 0.014$ i $\log g_B = 4.112 \pm 0.017$.

Parametar	WD naziv	U	B	V	Kombinirano	Usvojeno
Potencijal zvijezde A	PHSV	4.698 ± 0.073	4.541 ± 0.030	4.587 ± 0.039	4.609 ± 0.029	4.609 ± 0.046
Potencijal zvijezde B	PCSV	10.75 ± 0.25	10.51 ± 0.14	10.26 ± 0.14	10.51 ± 0.12	10.51 ± 0.17
Inklinacija orbite (°)	XINCL	80.76 ± 0.58	80.6 ± 0.17	81.25 ± 0.31	81.01 ± 0.21	81.01 ± 0.27
Ekscentricitet orbite	E	0.2207 ± 0.0042	0.2023 ± 0.0021	0.1831 ± 0.0017	0.1979 ± 0.0017	0.198 ± 0.012
Longituda periastrona (°)	PERR0	136.5 ± 2.7	140.3 ± 1.7	150.1 ± 2.1	143.2 ± 1.5	143.2 ± 5.3
Pomak faze	PSHIFT	-0.0459 ± 0.0009	-0.0460 ± 0.0004	-0.0480 ± 0.0004	-0.0470 ± 0.0004	
U-pojas zvijezde A	HLUM	12.008 ± 0.046			12.055 ± 0.027	12.055
U-pojas zvijezde B	CLUM	0.734 ± 0.045			0.697 ± 0.026	0.697
B-pojas zvijezde A	HLUM		9.443 ± 0.023		9.447 ± 0.025	9.447
B-pojas zvijezde B	CLUM		0.618 ± 0.022		0.611 ± 0.024	0.611
V-pojas zvijezde A	HLUM			9.823 ± 0.024	9.805 ± 0.025	9.805
V-pojas zvijezde B	CLUM			0.619 ± 0.023	0.635 ± 0.025	0.635
Frakcijski polumjer zvijezde A		0.2563	0.2660	0.2615	0.2609	0.2609 ± 0.0040
Frakcijski polumjer zvijezde B		0.06391	0.06538	0.06701	0.06534	0.0653 ± 0.0013
U-pojas rms reziduala (mmag)		10.386			10.524	
B-pojas rms reziduala (mmag)			5.964		6.130	
V-pojas rms reziduala (mmag)				5.782	5.635	

Tablica 7.3: Rezultati modeliranja WD svjetlosnih krivulja iz rada Guinan et al. (2000) dvojnog sustava V380 Cyg. U posljednjoj se koloni pogreške parametara pojavljuju zbog odstupanja u računu pri pojedinačno računatim rješenjima za pojedine pojaseve U, B i V. U ostalim su kolonama pogreške prisutne kao formalne pogreške računa WDDC koda.

7.6.1 Određivanje efektivnih temperatura zvijezda

Efektivne se temperature kod B zvijezda najbolje mogu odrediti iz ionizacijske ravnoteže silicija (Becker & Butler 1990). Linije iona Si II i Si III su prisutne u raspetljanom spektru primarne komponente dvojnog sustava V380 Cyg, pri čemu nedostatak linije iona Si IV upućuje na to da je $T_{\mathrm{eff\,A}} < 24\,000$ K. Izračunata je mreža sintetiziranih spektara za vrijednosti $T_{\mathrm{eff}} = 19\,000$ - 24 000 K i za fiksirani $\log g = 3.136$. Ekvivalentne smo širine mjerili unutar programskog paketa $IRAF$-a i to za linije Si II ($\lambda\lambda$ 4128, 4130, 5031) i Si III ($\lambda\lambda$ 4557, 4565, 5039) te načinili kalibracijske krivulje za omjere ekvivalentnih širina Si II/Si III. Prilikom računanja ekvivalentnih širina linija za primarnu komponentu V380 Cyg dobivena je srednja vrijednost efektivne temperature iz kalibracijskih krivulja od $T_{\mathrm{eff\,A}} = 21\,750 \pm 220$ K iz šest različitih omjera ekvivalentnih širina. Treba napomenuti činjenicu da apsolutne vrijednosti ekvivalentnih širina spektralnih linija nisu očuvane za slučajeve sa i bez provedbe postupka renormalizacije spektra, što nije slučaj za omjere ekvivalentnih širina, koji čuvaju vrijednost i bez provedbe postupka renormalizacije.

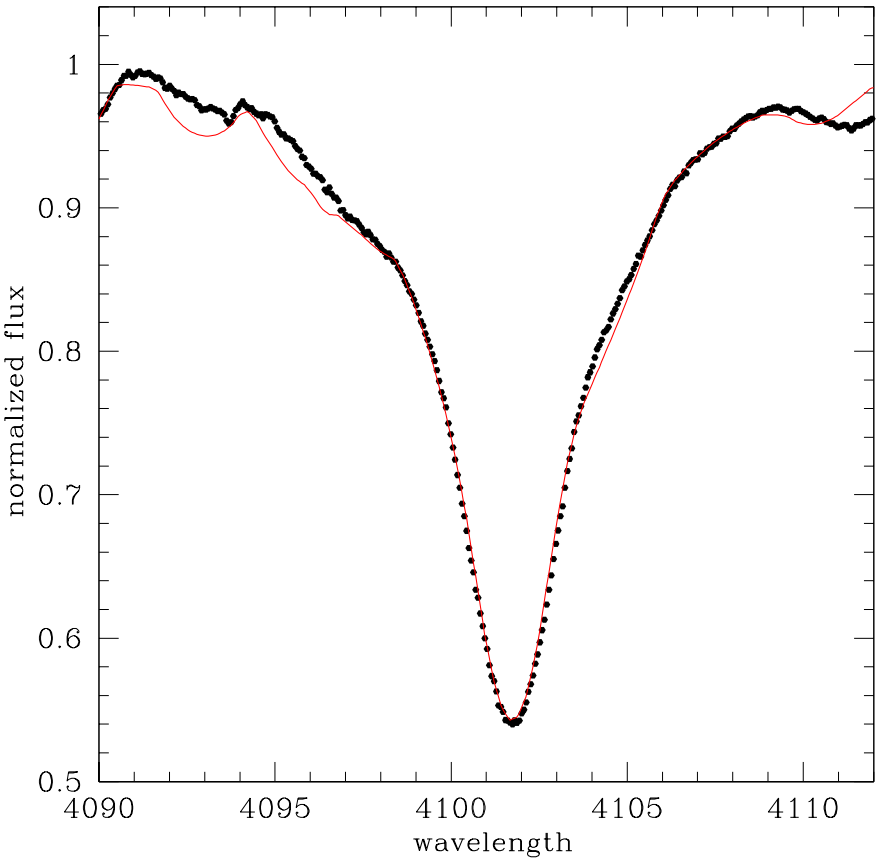
Drugi način da se odrede efektivne temperature B zvijezda je iz profila njihovih vodikovih Balmerovih linija. Općenito, taj je postupak pod velikim utjecajem degeneracije između parametara efektivne temperature T_{eff} i površinskog ubrzanja $\log g$. U slučaju pomrčinskih dvojnih zvjezdanih sustava taj je problem prebrođen direktnim i vrlo pouzdanim određivanjem $\log g$. Načinjeni su veliki napori kako bi se raspetljani spektri pouzdano renormalizirali, pri čemu smo koristili faktore svjetlosnih doprinosa pojedinih komponenata dvojnog sustava iz analize svjetlosne krivulje (poglavlje 7. 5): zvijezda A doprinosi oko 94 % od ukupnog luminoziteta sustava u pojasu B, te ista vrlo slabo varira u područima H_δ, H_γ i H_β. Izostavljena je analiza Balmerove linije H_α budući se ona formira u visokim slojevima zvjezdane atmosfere pa nije dobar pokazatelj efektivne temperature zvijezde. Postupak prilagodbe je proveden kodom GENFITT koji vrši više-parametarsko optimiziranje putem genetičkog algoritma u svrhu minimalizacije vrijednosti χ^2 (Tamajo et al. 2009). Projekcija rotacijske brzine primarne komponente sustava (zvijezda A) fiksirana je na vrijednost $v \sin i = 98\,\mathrm{kms}^{-1}$ (poglavlje 7. 6. 2). Provedeni su postupci prilagodbe u kojima se samo optimizirala T_{eff} (postupak 1) ili oboje T_{eff} i $\log g$ (postupak 2). Rezultati su dani u tab. 7.4 i grafički su prikazani na sl. 7.4, 7.5 i 7.6.

Također smo testirali i postupak prilagodbe za slučaj određivanja svjetlosnog faktora komponente sustava (tako da smo upotrebljavali raspetljani ali ne i renormalizirani spektar) i dobili obećavajuće rezultate (račun 3 i račun 4 u tab. 7.4). To nam potvrđuje činjenicu da je moguće pouzdano odrediti efektivne temperature i zvijezda u dvojnim sustavima koji nisu pomrčinski. Tako dobiveni svjetlosni faktori ne odstupaju od onih dobivenih iz analize svjetlosne krivulje (poglavlje 7. 5).

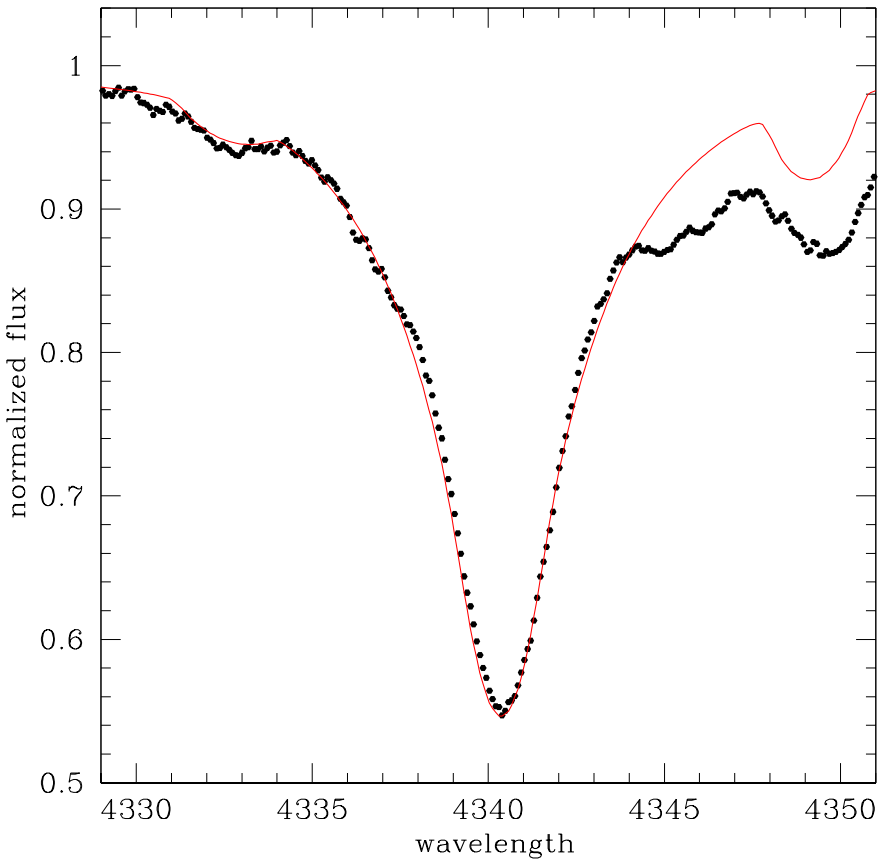
Obje metode se vrlo dobro slažu u vrijednostima efektivne temperature $T_{\mathrm{eff\,A}}$, pri čemu je razlika nešto veća od vrijednosti $1\,\sigma$ za račun 1. Mogući izvor sistematičnih pogrešaka jest postavljanje visine kontinuuma pri određivanju ekvivalentnih širina pojedinih linija u spektru (naročito slabe linije Si II λ4218 i λ4231), preklapanje linija kod Si II λ4231 i O II λ4233, te pojava undulacija kontinuuma kod vrlo širokih Balmerovih linija. Činjenica dobrog slaganja vrijednosti parametara u raznim spektralnim područjima i dobivenih različitim metodama ukazuje da se radi o malim iznosima sistematskih pogrešaka (manjim od 1 % za T_{eff}).

Tablica 7.4: Rješenja postupka prilagodbe genetičkim algoritmom za vodikove Balmerove linije zvijezde A. U drugom je stupcu označen parametar koji se optimizira; inače su parametri fiksirani na $\log g = 3.131$ ($\ell_{\mathrm{A}} = 1$ za renormalizirani spektar). Analiza svjetlosne krivulje je dala vrijednost $\ell_{\mathrm{A}} = 0.9394$. Usporedbe radi, analiza ionske ravnoteže silicija je dala vrijednost $T_{\mathrm{eff\,A}} = 21\,750 \pm 220$ K. U posljednjem je stupcu upisana razlika vrijednosti dobivene optimizacijom i vrijednosti usvojene u ovome radu. Dane su i pripadajuće vrijednosti χ^2.

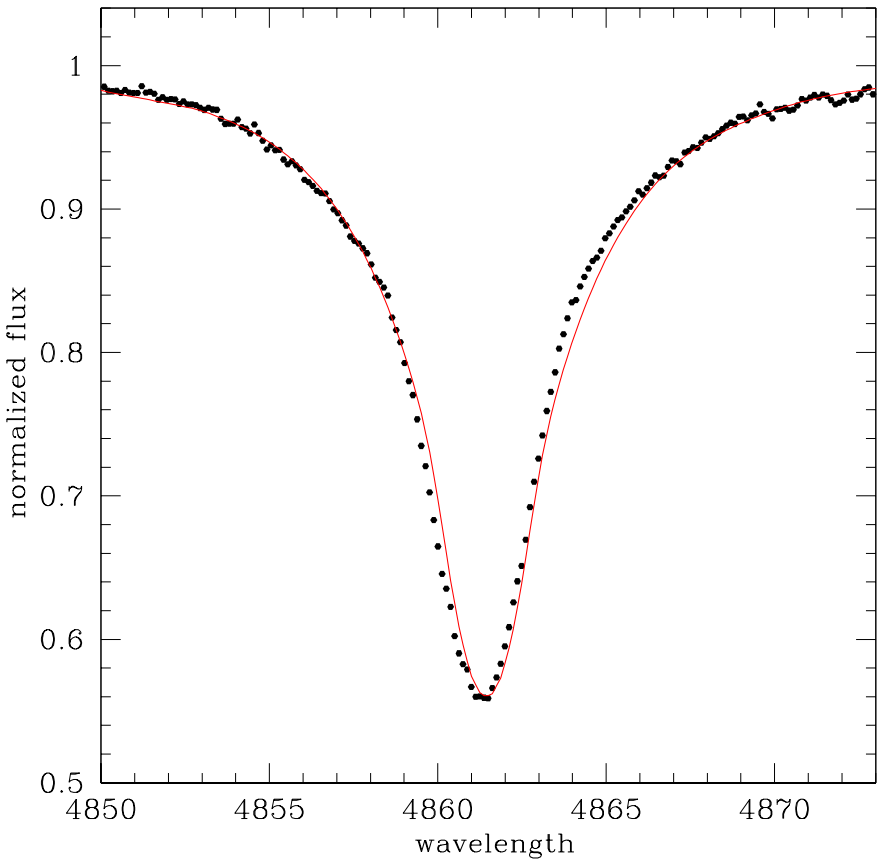
Račun	Parametar	H_β	H_γ	H_δ	Prosjek	Razlika
1	T_{eff}	21 960±85	22 270±70	21 860±55	22 030±210	280
	χ^2	0.0037144	0.0036232	0.0038175	-	-
2	T_{eff}	21 850±55	21 690±31	21 800±45	21 780±80	30
	$\log g$	3.121±0.034	3.125±0.031	3.123±0.030	3.123±0.030	-0.008
	χ^2	0.0025443	0.0023554	0.0027782	-	-
3	T_{eff}	21 830±70	21 620±80	21 970±75	21 764±43	14
	ℓ	0.9541±0.0021	0.9471±0.0034	0.9487±0.0029	0.9512±0.0015	0.0118
	χ^2	0.0019254	0.0018643	0.0020095	-	-
4	T_{eff}	21 920±95	21 890±90	21 845±95	21 885±54	135
	$\log g$	3.122±0.005	3.129±0.007	3.139±0.004	3.136±0.003	0.005
	ℓ	0.9677±0.0026	0.9501±0.0041	0.9675±0.0031	0.9643±0.0018	0.0249
	χ^2	0.0015442	0.0015135	0.0016024	-	-



Slika 7.4: Usporedba raspetljanog spektra (točke) i najbolje prilagodbe teorijskog spektra (linija) za H_δ spektralnu liniju.



Slika 7.5: Usporedba raspetljanog spektra (točke) i najbolje prilagodbe teorijskog spektra (linija) za H_γ spektralnu liniju.



Slika 7.6: Usporedba raspetljanog spektra (točke) i najbolje prilagodbe teorijskog spektra (linija) za H_β spektralnu liniju.

7.6.2 Mikroturbulencija i projekcija rotacijske brzine

Brzina mikroturbulencije v_{turb} se određuje na temelju zahtjeva da mjerena zastupljenost kemijskih elemenata ne ovisi o jakosti linija: nebi smjelo biti ovisnosti ekvivalentnih širina o zastupljenosti elemenata. Najbrojnije linije u spektru zvijezde A su linije O II kojih brojčano ima 32, te omogućavaju određivanje vrijednosti v_{turb}. Iz gornjeg je uvjeta dobiveno $v_{turb} = 14 \pm 1\,\mathrm{kms}^{-1}$. To je relativno velika vrijednost no nije uobičajena za evoluirane zvijezde s površinskim ubrzanjem $\log g \sim 3$ (Hunter et al. 2007, Morel et al. 2006). Ohrabrujuća je činjenica da su Guinan et al. (2000) za mikroturbulentnu brzinu dobili $v_{turb} = 12 \pm 1\,\mathrm{kms}^{-1}$ uz potpuno drugačiji pristup, prilagođavajući spektralne raspodjele energije UV i optičkog područja.

Projekcije rotacijske brzine ($v \sin i$) komponenata dvojnog sustava određene su iz širina nekolicine spektralnih linija: C II λ4267, Si III λ4553, Si III λ4568, O II λ4591, O II λ4596, and O II λ4662; izuzevši linije He I i Mg II (Hensberge et al. 2000). Usporedbom profila linija opaženog spektra sa cijelim nizom teorijski sintetiziranim spektrima računatim za razne vrijednosti $v \sin i$, dobivamo iznos $v_A \sin i = 98 \pm 2\,\mathrm{kms}^{-1}$.

7.6.3 Kemijska zastupljenost helija

Zvijezda V380 Cyg A je klasificirana kao spektralni tip B2 III, što je u skladu s procjenjenim vrijednostima T_{eff} i $\log g$ u ovome radu. Kod B2 tipova zvijezda linije neutralnog helija su izrazito jake, dok su linije ioniziranog helija u potpunosti odsutne. Teorijski profili linija He I izračunati su pomoću komjutorskih programa $DETAIL$ i $SURFACE$ (Giddings 1981, Butler 1984). Račun uključuje NLTE efekte obzirom da se radi o vrućim zvijezdama. Model helijevog atoma uzima (uključuje) sve prijelaze do energijskog nivoa $n = 4$ (Przybilla & Butler 2001). Sintetizirani spektar smo proširili iznosom rotacijske brzine $v \sin i = 98\,\mathrm{kms}^{-1}$ i $v_{turb} = 14\,\mathrm{kms}^{-1}$ te je ϵ(He) određivan minimalizacijom χ^2 prema opaženom (raspetljanom i renormaliziranom) spektru. Rezultati za deset linija He I dani su u tab. 7.5. Linije He I na λ4009.3 i λ4110.0 nisu korištene jer naš model atoma prvu liniju niti ne uključuje, a druga je preklopljena linijom O II λ4111.1.

Uzimajući u obzir rezultate upisane u tab. 7.5, srednja je vrijednost zastupljenosti helija u fotosferi zvijezde A jednaka $\epsilon(\mathrm{He}) = 0.094 \pm 0.031$. Ta je vrijednost nešto iznad vrijednosti zastupljenosti helija u Sunčevoj atmosferi [$\epsilon(\mathrm{He})_\odot = 0.089$; Grevesse et al. (2007)]. Zastupljenost helija dobiven iz raznih linija He I u rasponu je od 0.07 - 0.16 (od subsolarne do gotovo 80 % iznad Sunčeve zastupljenosti) što zahtjeva detaljno objašnjenje.

Prvo, proračuni linija λ4471 i λ4922 su precizniji ako uključuju prijelaze sve do razine $n = 4$ (Przybilla & Butler 2001). Lyubimkov, Rostopchin & Lambert (2004, na dalje LRL04) to disku-

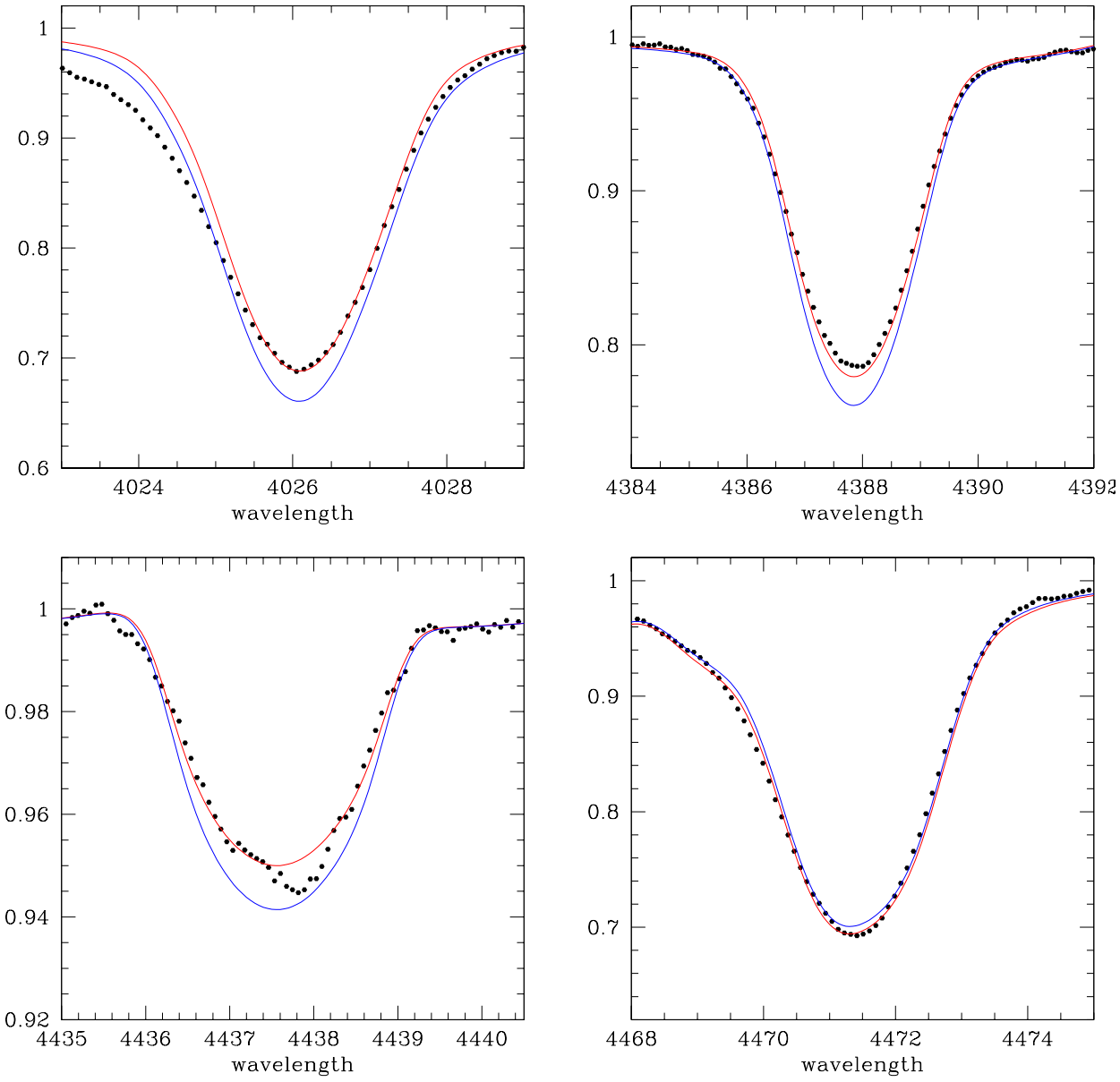
Tablica 7.5: Zastupljenosti helija za zvijezdu V380 Cyg A računatih iz skupa linija He I, uzimajući $v_{turb} = 14\,\mathrm{kms}^{-1}$ (izračunata iz O II linija). Treću kolonu čine vrijednosti zastupljenosti helija izračunate u radu Lyubimkov et al. (1996).

Linija (Å)	ϵ(He) Ovaj rad	ϵ(He) LRR96
4026.2	0.075 ± 0.003	-
4387.9	0.069 ± 0.005	0.123
4437.6	0.075 ± 0.005	-
4471.5	0.099 ± 0.007	0.153
4713.2	0.071 ± 0.008	0.212
4921.9	0.078 ± 0.007	0.145
5015.7	0.089 ± 0.012	(0.286)
5047.7	0.081 ± 0.008	-
5875.7	0.141 ± 0.013	(≥ 0.5)
6678.1	0.157 ± 0.018	(≥ 0.5)
srednja	0.094 ± 0.031	0.158 ± 0.038

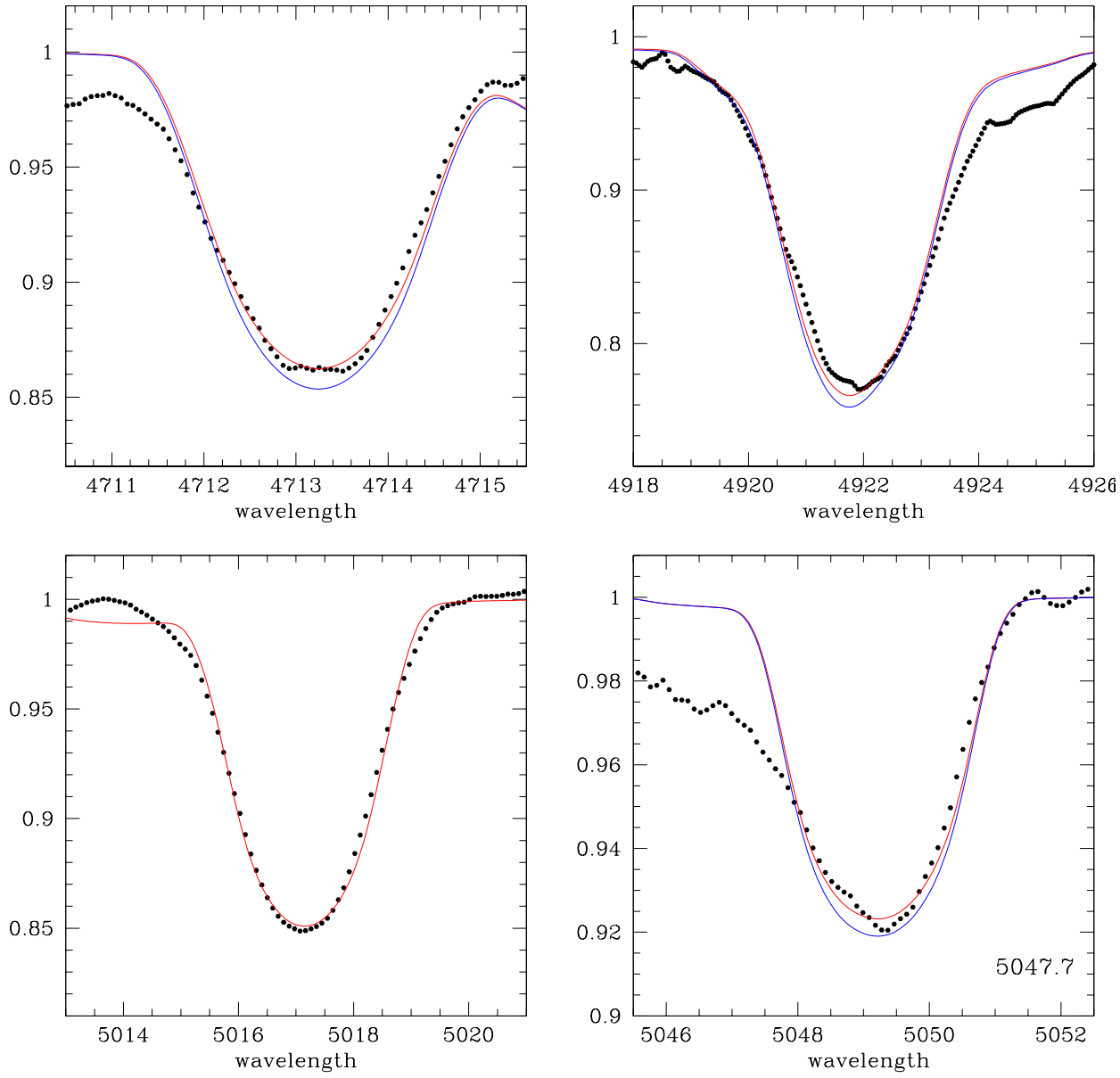
tiraju vrlo podrobno te pokazuju da ostale dvije linije He I (λ4026 i λ4388) daju sistematično nižu vrijednost zastupljenosti helija.

LRL04 su odabrali linije λ4471 i λ4922 kao glavne pokazatelje zastupljenosti helija za zvijezde spektralnog tipa B. Za zvijezdu V380 Cyg A srednja vrijednost zastupljenosti helija (iz niza atoma) bi trebala iznositi $N(\mathrm{He}) = 0.072 \pm 0.006$ iz λ4026 i λ4388, gdje naša vrijednost iznosi $N(\mathrm{He}) = 0.089 \pm 0.010$ (vrijednost zastupljenosti Sunca) iz λ4471 i λ4922. Taj je rezultat u skladu s procjenama LRL04.

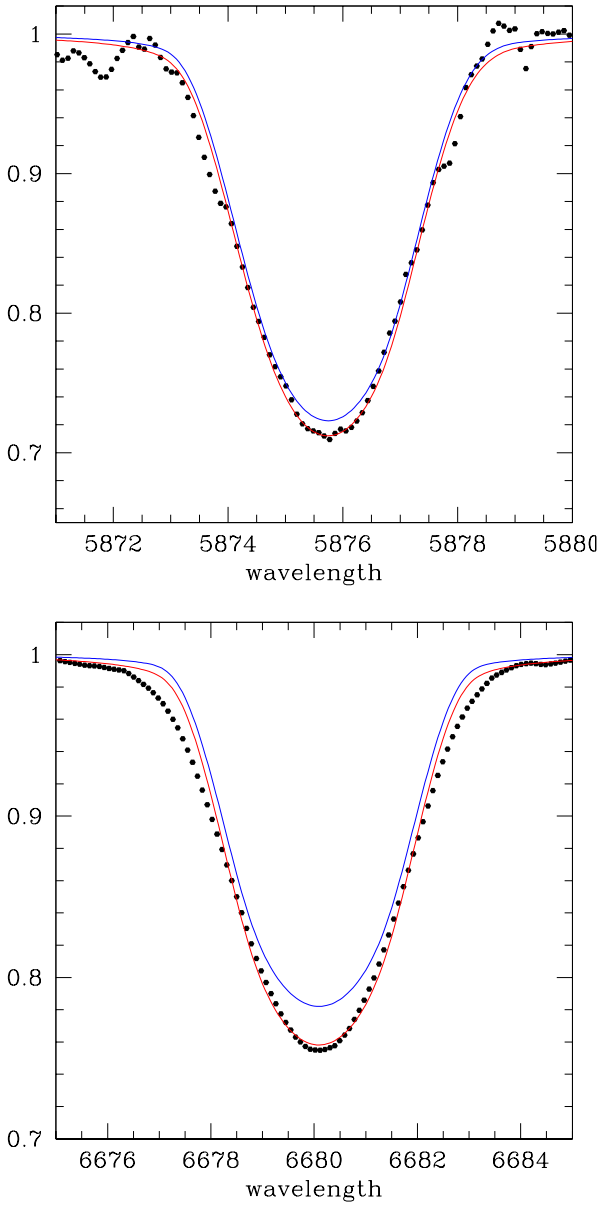
Drugo, osjetljivost nekih linija He I na v_{turb} bi mogla uzrokovati neusklađenost u vrijednostima zastupljenosti helija dobivenih iz različitih linija helija, pošto v_{turb} jako utječe na vrijednost zastupljenosti. U ovom je radu vrijednost v_{turb} određena iz linija O II kojih brojčano ima najviše u spektru zvijezde A. Nedavno objavljeni radovi sve više sadrže diskusije o tome zašto postoji razlika vrijednosti v_{turb} ako se odredi iz helijevih linija u odnosnu na linije metala tipa O II, N II i Si III (Hunter et al. 2007). LRL04 pronalaze da je vrijednost v_{turb} izračunata iz zastupljenosti helija sistematično veća od vrijednosti dobivenih iz linija metala.



Slika 7.7: Usporedba raspetljanog spektra (točke) i najbolje prilagodbe teorijskog spektra (plavo) za liniju helijevih iona He I λ4026, λ4388, λ4438 i λ4471. Usporedbe radi, ucrtani su i teorijski profili linija (crveno) sa vrijednostima zastupljenosti Sunca.



Slika 7.8: Usporedba raspetljanog spektra (točke) i najbolje prilagodbe teorijskog spektra (plavo) za liniju helijevih iona He I λ4713, λ4922, λ5016 i λ5048. Usporedbe radi, ucrtani su i teorijski profili linija (crveno) sa vrijednostima zastupljenosti Sunca.



Slika 7.9: Usporedba raspetljanog spektra (točke) i najbolje prilagodbe teorijskog spektra (plavo) za liniju helijevih iona He I λ5876 i λ6678. Usporedbe radi, ucrtani su i teorijski profili linija (crveno) sa vrijednostima zastupljenosti Sunca.

Suprotno tome, Pavlovski & Southworth (2009) su u analizi zastupljenosti helija u atmosferama komponenata dvojnog sustava V453 Cyg prilagođenjem teorijskih profila helija također optimizirali i mikroturbulentnu brzinu. Dobili su povećanu zastupljenost helija i manju mikroturbulentnu brzinu v_{turb} nego što je dala analiza O II linija.

Ostale linije koje su na popisu u tab. 7.5 ($\lambda\lambda$ 4713, 5016, 5048, 5876 i 6678) su poznate po svojstvu da značajno ovise o v_{turb}. Nadasve, posljednje dvije linije su neobično široke nego ostale linije (sl. 7.7 - 7.9) što zapravo ukazuje na prisutnost drugih (ne-Termičkih) mehanizama širenja spektralnih linija. Zvijezda V380 Cyg A dosegnula je fazu diva, pa je razumno očekivati da postoje razlike u brzinama unutar same atmosfere prema usporedbi sa zvijezdama glavnog niza istih masa. LRL04 su spomenuli mogućnost da je uzrok takvom povečanom širenju nekih linija helija u visokim slojevima atmosfere vrućih B divova asferičnost i/ili gubitak mase, što također raspravljaju (Herrero, Puls & Villamariz 2000). Dapače, oni su predvidjeli da će linije λ5875 i λ6678 dati največe vrijednosti zastupljenosti helija, a što je u skladu s ovim radom.

Treće, postoje naznake o mogućnosti da je atmosfera zvijezde A stratificirana zastupljenosti helija. Catanzaro (2008) je diskutirao mogućnost da se razlika u zastupljenosti helija za različite linije može objasniti kao stratifikacija atmosfere zvijezde. Usporedba tih rezultata (računatih za B2 V zvijezdu HD 32123) s našim iz tab. 7.5, otkriva gotovo isto ponašanje od linije do linije. Naravno, prije donošenja bilo kakvih zaključaka potrebna su dodatna i temeljita istraživanja. Smatramo, da planparalelni LTE model atmosfere koji se koristi u ovome radu nije najprikladniji za ovakvu vrstu istraživanja.

7.6.4 CNO zastupljenost elemenata

Površinska zastupljenost helija i CNO elemenata su od velikog značaja prilikom usporedbe opaženih vrijednosti i teorijskih predviđanja. Modeli koji uključuju rotaciju predviđaju povećanje zastupljenosti helija i dušika te smanjenje zastupljenosti ugljika i kisika tijekom evolucije zvijezda velikih masa. Optički dio spektra takvih objekata je bogat linijama kisika i dušika i u manjoj mjeri ugljika. U ovom se radu odredila vrijednost v_{turb} i zastupljenost kisika (poglavlje 7. 2) postupkom prilagodbe sintetiziranih spektara prema opaženim raspetljanim spektrima zvijezde A. Primjenjujući isti takav pristup za elemente C i N, dobivamo rješenja koja pokazuju relativno mala odstupanja među linijama. Model atoma ugljika kojeg smo koristili nije u mogućnosti reproducirati linije C II λ4267, no vrijednosti koje smo dobili u crvenom krilu H_α linije (C II λ6556 i λ6559) pokazuju usklađenost sa zastupljenostima određenima iz ostalih ugljikovih linija.

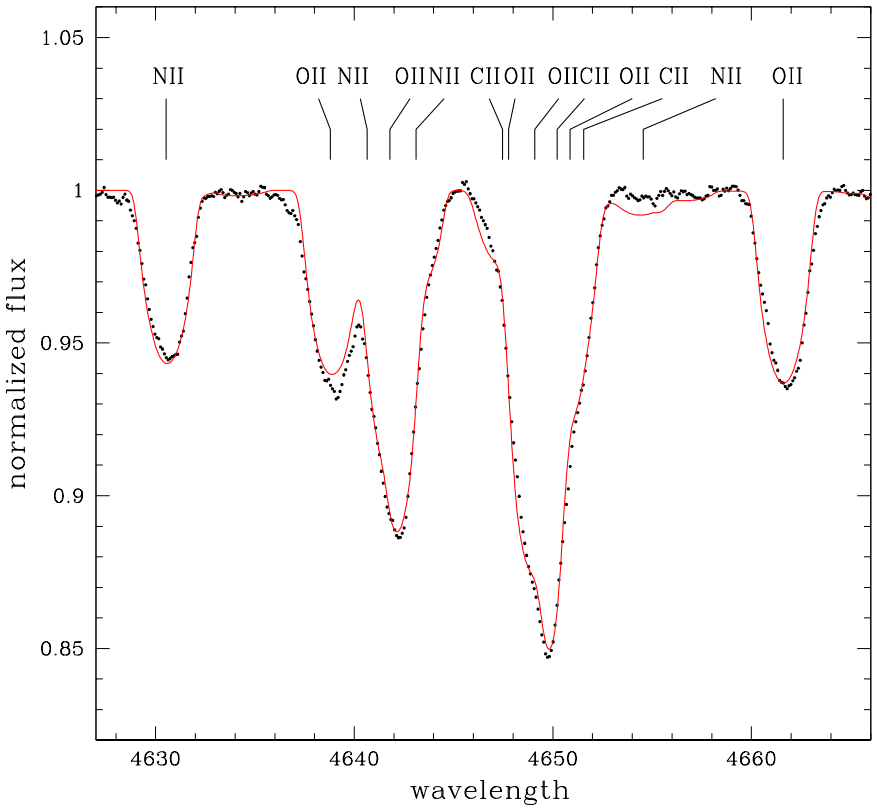
Tablica 7.6: Zastupljenosti određene za V380 Cyg A. Broj korištenih linija nalazi se u uglatim zagradama. Zastupljenosti Sunčeve fotosfere i galaktičkih OB zvijezda (Hunter et al. 2009) dani su u trećem stupcu, dok četvrti stupac pokazuje Sunčevu zastupljenost iz rada Grevesse et al. (2007). Zastupljenosti elemenata, osim onih za helij, dani su u skali u kojoj je $\log \epsilon(\mathrm{H}) = 12$.

Element	Zastupljenost	OB zvijezde	Sunčev
$N(\mathrm{He})/N(\mathrm{H})$	0.098±0.010 [10]	0.098±0.014[a]	0.093±0.002
$\log \epsilon(\mathrm{C})$	8.21±0.03 [8]	8.00±0.19	8.39±0.05
$\log \epsilon(\mathrm{N})$	7.52±0.10 [24]	7.62±0.12	7.78±0.06
$\log \epsilon(\mathrm{O})$	8.54±0.14 [35]	8.63±0.16	8.66±0.05
$\log \epsilon(\mathrm{Mg})$	7.52±0.05 [1]	7.25±0.17	7.53±0.09
$\log \epsilon(\mathrm{Si})$	7.26±0.18 [13]	7.42±0.07	7.51±0.04
$\log \epsilon(\mathrm{Al})$	6.04±0.03 [4]	5.94±0.14[b]	6.37±0.04

a Izračunato za ne uznapredovale B zvijezde iz rada Lyubimkov et al. (2004)
b Izračunato za B zvijezde sa $\mathrm{T_{eff}} \leq 30\,000\,\mathrm{K}$ iz rada Daflon et al. (2003)

Unutar spektralnog intervala 4635-4655 Å nalazi se niz relativno jakih linija O II, C II i N II. Priroda tih spektralnih linija može dati vrlo pouzdane vrijednosti zastupljenosti (Pavlovski & Hensberge 2005). Na sl. 7.10 prikazana je kvaliteta prilagodbe raspetljanog spektra zvijezde A prema teorijskom spektru izračunatom prema zastupljenosti dobivenoj iz 'čistih' linija ovih elemenata (tab. 9.7). Slaganje između opaženih i teorijskih vrijednosti je zadovoljavajuće.

Dušik je puno osjetljiviji na promjene zastupljenosti nego ugljik, za kojeg su inače predviđene samo male promjene. Međutim, nađeno je niz vrijednosti zastupljenosti dušika za B zvijezde glavnog niza, za koja su odgovorni možda i drugi mehanizmi osim rotacijskog miješanja materije (Morel et al. 2006, Hunter et al. 2009). Ta je činjenica vrlo dobro izražena omjerom [N/C], a koji je vrlo značajan pokazatelj CNO procesirane materije prenesene do površine zvijezde. Raspodjela tog omjera kod B zvijezda nije jednoznačna (Morel 2009), jedan niz vrijednosti čine inicijalne vrijednosti ($[\mathrm{N/C}]_\odot \sim$ -0.6 dex) drugi niz čine vrlo velike vrijednosti ([N/C] ∼ -0.1 dex) kao posljedica. Sa vrijednosti omjera $[\mathrm{N/C}]_A =$ -0.68 ± 0.10 dex, V380 Cyg A je blizu Sunčeve vrijednosti. To je istina i za omjer [N/O] za kojeg smo izračunali vrijednost $[\mathrm{N/O}]_A =$ -1.01 ± 0.17 dex pri čemu Sunčev iznosi $[\mathrm{N/O}]_\odot =$ -0.90 dex.



Slika 7.10: Usporedba opaženog spektra zvijezde A (točke) i najbolje prilagodbe sintetskog spektra (crvena linija) računata za vrijednosti zastupljenosti elemenata iz tablice 9.7. Spektralni raspon je 4625 - 4675 Å, koji sadrži jako 'prekrivene' linije C II, N II i O II.

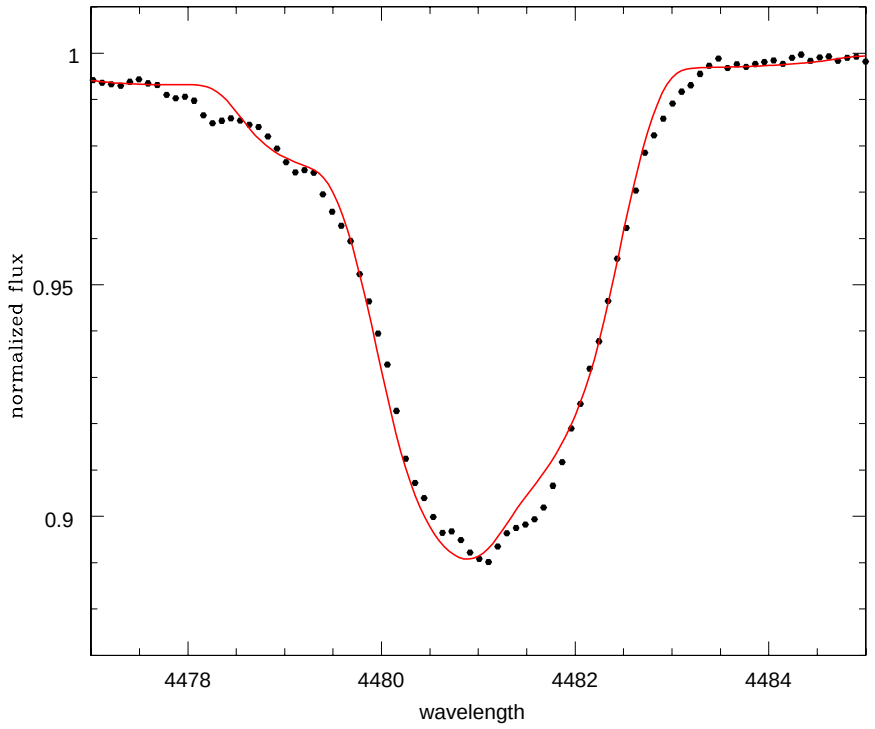
7.6.5 Magnezij, silicij i aluminij

Određivanje zastupljenosti elemenata poput Mg, Si i Al omogućava određivanje opsega metaliciteta kod B zvijezda. Takvi elementi ne sudjeluju u CNO ciklusu pa im stoga njihove vrijednosti zastupljenosti ne ovise o evoluciji zvijezde na glavnom nizu. Također se ne očekuje da su magnezij i aluminij iz slojeva bitno izmjenjeni zbog miješanja materije u sklopu Mg - Al ciklusa (Daflon et al. 2003). Posebno je zastupljenost magnezija vrlo dobar pokazatelj metaliciteta jer je s velikom pouzdanosti određena za Sunce i meteorite. Zastupljenost magnezija u Sunčevoj fotosferi iznosi $\log \epsilon(\mathrm{Mg}) = 7.54 \pm 0.06$ (Holweger 2001).

Nedostatak uzimanja magnezija kao pokazatelja metaliciteta kod B zvijezda je taj, što u cijelom optičkom spektru postoji za tu svrhu samo jedna prikladna spektralna linija: Mg II λ4481.2 Å, štoviše to je ujedno i najjača linija u spektru zvijezda ranih tipova. Za zvijezde s umjerenom i velikom rotacijskom brzinom ($v \sin i$) analiza te spektralne linije je dosta složen postupak zbog prisutnosti susjedne linije Al III λ 4479.9 Å. Unutar područja vrijednosti efektivnih temperatura koja su od važnosti za zvijezdu V380 Cyg A, linija Al III λ 4479.9 doseže do samog maksimuma jakosti, pa je i omjer ekvivalentnih širina linija Al III i Mg II ovdje najveći (Lyubimkov et al. 2005).

Prvo, odredili smo zastupljenost aluminija iz profila triju linija koje su bile dostupne u našem raspetljanom spektru ($\lambda\lambda$ 4512, 4671, 5766), i našli vrlo mala odstupanja među njima. Uzevši njihovo skupno rješenje računali smo zastupljenost magnezija iz 'prekrivenih' linija Al III i Mg II na λ 4481 Å. Ti su izračuni dali vrijednost $\log \epsilon(\mathrm{Mg}) = 7.52 \pm 0.05$, što prevedeno u indeks metaliciteta iznosi [Mg/H] = -0.02 $\pm$ 0.05. Sl. 7.11 pokazuje prilagodbu sintetskog spektra prema opaženoj liniji. U sklopu istraživanja elementarne zastupljenosti kod B zvijezda, Lyubimkov et al. (2005) su odredili konačnu srednju vrijednost zastupljenosti magnezija kod B zvijezda iznosom $\log \epsilon(\mathrm{Mg}) = 7.59 \pm 0.15$, a koji daje indeks metaliciteta [Mg/H] = 0.04 $\pm$ 0.15.

Metalicitet zvijezde A je također određen i u radu Guinan et al. (2000) putem prilagodbe spektralne raspodjele energije dvojnog sustava na teorijske modele. Dobili su vrijednost koja odgovara subsolarnoj vrijednosti ([Mg/H] = -0.44 $\pm$ 0.07). Manje neslaganje rezultata za metalicitet V380 Cyg A mogao bi se objasniti razlikom u proračunu teorijskih modela. U ovome radu proračun je temeljen na NLTE sintezi, dok su Guinan et al. (2000) koristili spektre izračunate u LTE aproksimaciji.

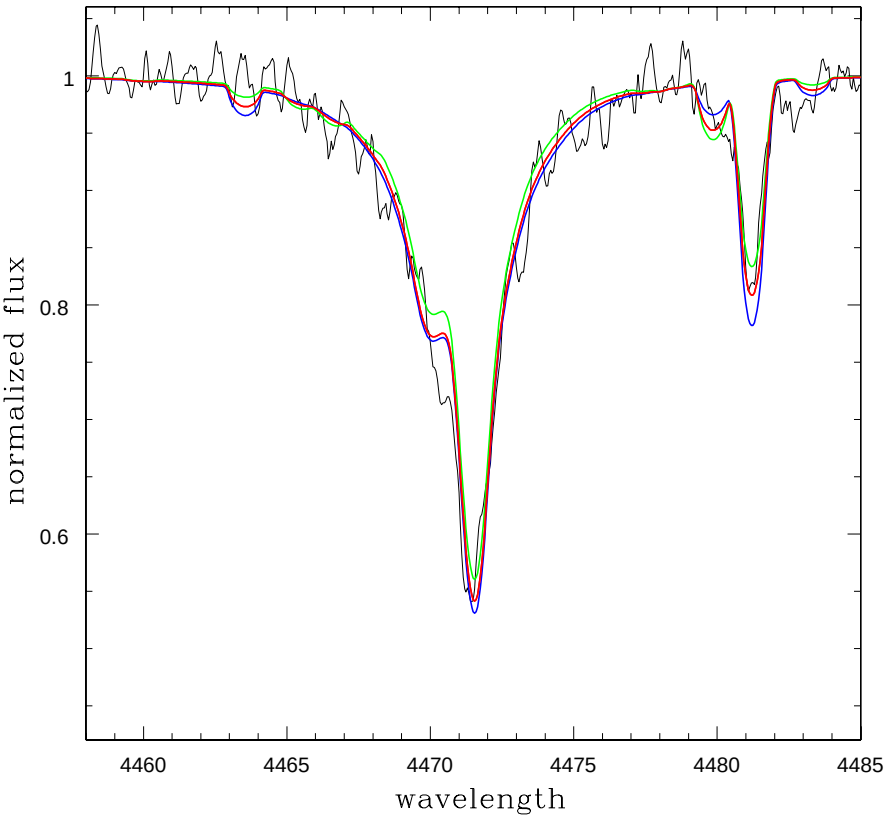


Slika 7.11: Najbolja prilagodba profila linije Mg II λ4481.2 Å (crveno), a koja je 'prekrivena' slabijom linijom Al III λ4479.9 Å, uspoređena sa opaženim profilom (točke) zvijezde A.

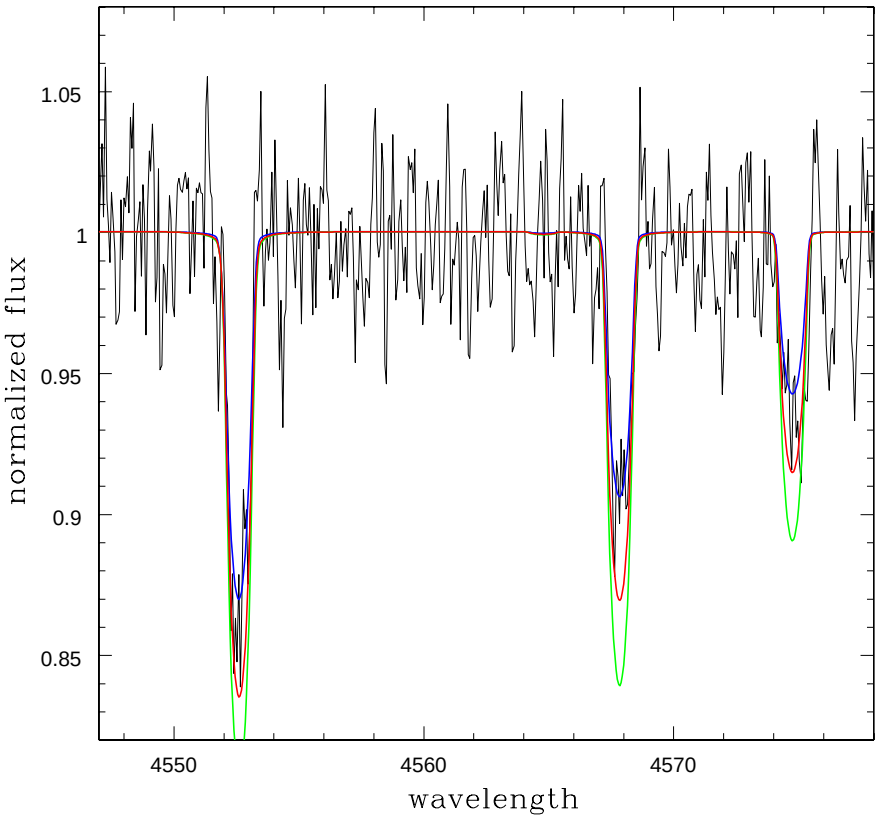
7.6.6 Sekundarna komponenta, zvijezda B

Sekundarna komponenta dvojnog sustava ima malen doprinos ukupnom svjetlosnom toku V380 Cyg. Unatoč tome, primjenom postupka spektralnog raspetljavanja dobiven je spektar sekundarne komponente zvijezde B (sl. 7.1). Njen doprinos ukupnom toku zračenja sustava određen je analizom svjetlosnih krivulja (poglavlje 7.5). U pojasu B iznosi 6.1 %, u V pojasu je nešto manji i iznosi 5.9 %. Kako bismo renormalizirali njen raspetljani spektar na razinu jediničnog kontinuuma, treba ga pomnožiti sa faktorom 16.4 odnosno 16.9. Za postupak raspetljavanja na raspolaganju smo imali 55 složenih spektara s prosječnom vrijednosti S/N $\sim$ 150, pa raspetljani spektar sekundarne komponente ima vrijednost S/N $\sim$ 45. Zbog toga u spektru je određena samo efektivna temperatura. Teorijski su spektri sintetizirani u temperaturnom rasponu $T_{\rm eff} = 19\,000$ - $25\,000$ K s površinskim ubrzanjem $\log g = 4.112$. Jedine linije, na koje smo se usredotočili su bile jake linije He I, Mg II λ4481 te Si III $\lambda\lambda$4550 - 4580 triplet koje su na kraju ušle u postupak minimalizacije χ^2. Srednja vrijednost, dobivena iz ukupno osam spektralnih linija iznosila je $T_{\rm eff\,B} = 21\,600 \pm 550$ K, što se dobro slaže unutar izračunatih pogrešaka za $T_{\rm eff\,B}$ ali i također sa omjerom temperatura iz analize svjetlosne krivulje.

Na sl. 7.12 i 7.13 uspoređujemo raspetljane spektre zvijezde B s teorijskim rješenjima za dva raspona intervala spektra, pokrivajući područje He I λ4471 i Mg II λ4481 te triplet Si III na $\lambda\lambda$4550 - 4580. Teorijski su spektri izračunati za zastupljenost elemenata jednakim primarnoj komponenti. Daljnji napredak u istraživanju bi zahtjevao veće vrijednosti S/N raspetljanog spektra, što bi značilo uvelike proširiti opseg opažanja.



Slika 7.12: Usporedba raspetljane i renormalizirane sekundarne zvijezde B sa teorijskim rješenjem za liniju He I λ4471 i Mg II λ4481. Sintetizirani je spektar računat za vrijednost $T_{\rm eff} = 20\,000$ K (plavo), 22 000 K (crveno) i 24 000 K. Zastupljenost elemenata je bila ista kao i kod zvijezde A (zeleno). Malena vrijednost S/N raspetljanog spektra ukazuje na činjenicu da se raspetljani spektar mora množiti približno faktorom 17 kako bi bio renormaliziran na jedinični kontinuum.



Slika 7.13: Usporedba raspetljane i renormalizirane sekundarne zvijezde B sa teorijskim rješenjem za triplet Si III na $\lambda\lambda$4550 - 4580. Sintetizirani je spektar računat za vrijednost $T_{\rm eff} = 20\,000$ K (plavo), 22 000 K (crveno) i 24 000 K. Zastupljenost elemenata je bila ista kao i kod zvijezde A (zeleno). Malena vrijednost S/N raspetljanog spektra ukazuje na činjenicu da se raspetljani spektar mora množiti približno faktorom 17 kako bi bio renormaliziran na jedinični kontinuum.

7.7 Fizikalna svojstva dvojne zvijezde V380 Cyg

Odredivši amplitude brzina pojedinih komponenata (poglavlje 7. 4) zajedno s rješenjima svjetlosne krivulje (poglavlje 7. 5), u mogućnosti smo odrediti fizikalna svojstva komponenata dvojnog sustava V380 Cyg (tab. 7.7). Za taj postupak korištena je programska rutina $JKTABSDIM$ (Southworth et al. 2005), kojom računamo propagaciju nepouzdanosti ulaznih parametara putem analize perturbacije. Ukupnim pogreškama najviše doprinose fotometrijski parametri, što potkrijepljuje činjenicu o potrebi novih mjerenja svjetlosne krivulje za ovako kompliciran objekt kao što je sustav V380 Cyg. Određene su nove mase i polumjeri komponenata sustava do na točnost od 2 % i bolje, pa je takva točnost određivanja parametara dobar argument za detaljnu provjeru zvjezdanih evolucijskih modela i teorija.

Odredivši efektivne temperature komponenata sustava, može se računati udaljenost. Potrebna je bolometrijska korekcija. Empirijski su te korekcije bile određene u radu Flower (1996), a teorijski su određene u radovima Bessell et al. (1998) i Girardi et al. (2002). U našim smo računima usvojili BV magnitudu iz Tychovog kataloga (Høg et al. 1997) i JHK magnitudu iz 2MASS (Skrutskie et al. 2006). Vrlo se dobro podudaraju bolometrijske korekcije (tab. 7.7). Upotrebom bolometrijskih korekcija iz rada Girardi et al. (2002) koji su određeni za vrlo široki interval fotometrijskog pojasa, nalazimo da je potrebno uzeti vrijednost međuzvjezdanog crvenjenja (engl. reddening) $E_{B-V} = 0.20 \pm 0.03$ kako bismo dobili konzistentne udaljenosti u optičkom i infracrvenom području. Kao konačno rješenje proizlazi udaljenost $d = 1004 \pm 22$ pc, i to iz K -pojasa. Takav je rezultat u dobrom slaganju pa čak i preciznije određen od udaljenosti koju su odredili Guinan et al. (2000).

7.8 Provjera zvjezdanih modela

Komponente dvojnog zvjezdanog sustava V380 Cyg imaju vrlo različite mase i polumjere, pa se stoga nalaze i u različitim stadijima zvjezdane evolucije. Zbog toga su obje komponente vrlo pogodne za provjeru zvjezdanih evolucijskih modela. Nepouzdanost mase i polumjera iznosi općenito 2 %, ograničena kvalitetom dostupnih svjetlosnih krivulja i slabom luminozitetu sekundarne komponente. Provjera zvjezdanih modela potkrijepljena je analizom zastupljenosti elemenata i poznavanjem perioda apsidalnog gibanja orbite dvojnog sustava. Guinan et al. (2000) pronalaze potrebu velikog iznosa parametra prebacivanja jezgre $\alpha_{\rm ov} = 0.6 \pm 0.1$ kako bi objasnili predviđanja modela za dvojni sustav V380 Cyg. Ribas et al. (2000) koriste taj podatak kao dokaz da se parametar konvektivnog prebacivanja jezgre $\alpha_{\rm ov}$ povećava s porastom mase zvijezde. Takav

Tablica 7.7: Apsolutne dimenzije i odgovarajuće veličine za dvojni sustav V380 Cyg. V_{eq} i V_{sync} predstavljaju opaženu ekvatorijalnu i računatu sinhronu rotacijsku brzinu. Uzeta je vrijednost $L_\odot = 3.826 \times 10^{26}$ W i $M_{bol,\odot} = 4.75$.

	Zvijezda A	Zvijezda B
Velika poluos ($R_\odot$)	62.17 ± 0.32	
Masa ($M_\odot$)	13.13 ± 0.24	7.779 ± 0.095
Polumjer ($R_\odot$)	16.22 ± 0.26	4.060 ± 0.084
$\log g$ (cms^{-2})	3.136 ± 0.014	4.112 ± 0.017
Efektivne temperature (K)	$21\,750 \pm 220$	$21\,600 \pm 550$
$\log(L/L_\odot)$	4.73 ± 0.023	3.51 ± 0.040
M_{bol} (mag)	-7.06 ± 0.06	-4.03 ± 0.10
V_{eq} (kms^{-1})	98 ± 2	43 ± 4
V_{sync} (kms^{-1})	66.1 ± 1.1	16.54 ± 0.34
Ekstinkcija E_{B-V} (mag)	0.20 ± 0.03	
Udaljenost iz Flower V - pojasa BK (pc)		1015 ± 55
Udaljenost iz Bessell V - pojasa BK (pc)		1034 ± 50
Udaljenost iz Bessell K - pojasa BK (pc)		1004 ± 22
Udaljenost iz Girardi V - pojasa BK (pc)		1035 ± 50
Udaljenost iz Girardi K - pojasa BK (pc)		1004 ± 22

se zaključak dovodi u pitanje u radovima Claret (2003, 2007).

Imajući revidirane fizikalne parametre dvojnog zvjezdanog sustava V380 Cyg, u dobrom smo položaju za detaljnu provjeru predviđanja zvjezdanih modela. Od posebne nam je važnosti utjecaj zvjezdane rotacije na evoluciju zvijezda velikih masa, a čija su predviđanja dostupna u radovima Heger, Langer & Woosley (2000), Heger & Langer (2000) te Meynet & Maeder (2000). Ovi autori posebno ukazuju na važnost procesa koji je odgovoran da je zvijezda dane mase sjajnija i traje duže na glavnome nizu. Modeli također predviđaju promjene u površinskom kemijskom sastavu, i to u smislu da dolazi do porasta zastupljenosti helija i dušika te opadanja zastupljenosti ugljika i kisika. Promjene su proporcijonalne porastu mase i/ili početnim rotacijskim brzinama.

Prema našem saznanju, jedino istraživanje u kojem se uspoređuju rotacijski evolucijski modeli s opažačkim mjerenjima za skup dvojnih zvijezda velikih masa proveo je Hilditch (2004). To je poznata neusuglašenost između evolucijskim masama određivanih prema položaju zvijezda u HR dijagramu relativno prema evolucijskim trakama modela i dinamički određivanih masa zvijezda (Herrero et al. 1992). Hilditch pronalazi, da se i dalje javljaju neusuglašenosti iako se koriste evolucijski modeli koji uključuju i rotaciju zvijezda. Našu provjeru parametara dvojnog sustava V380 Cyg s evolucijskim modelima započinjemo usporedbom s modelima Schaller et al. (1992) i Claret (1995) za solarni metalicitet ($Z = 0.02$), umjereno prebacivanje jezgre ($\alpha_{\rm OV} = 0.2$) te bez uzimanja u obzir rotaciju zvijezde. I dobro, i loše se slaganje vidi ovom usporedbom na sl. 7.14 i 7.16 za Schallerove modele: zvijezda A je presjajna za svoju masu, dok položaj za zvijezdu B u potpunosti odgovara njenoj masi i luminozitetu. Iz krivulja izohrona (zelene točkaste krivulje) moguće nam je odrediti starost zvijezda u iznosu od $\tau = 9.5 \pm 0.5$ Myr. Slična je situacija (sl. 7.15 i 7.17) i sa modelima Clareta (Claret 1995; Claret & Giménez 1995) pri metalicitetu $Z = 0.02$, dok je za model $Z = 0.01$ potpuno neslaganje za obje zvijezde. U dijagramima efektivnih temperatura i površinskih ubrzanja (sl. 7.16 i 7.17) situacija nije ništa bolja: modeli predviđaju položaj zvijezde B, no pogrešno predviđaju fizikalne parametare zvijezde A.

Slike 7.18 i 7.19 prikazuju modele koji uključuju i efekt rotacije zvijezde s opaženim vrijednostima dvojnog sustava V380 Cyg. Načinili smo interpolaciju modela koje su objavili Ekström et al. (2008). Ti su modeli parametrizirani omjerom rotacijske i kritične rotacijske brzine zvijezde, $\Omega/\Omega_{\rm crit}$. Na slici 7.18 prikazani su modeli za $\Omega/\Omega_{\rm crit} = 0.1$ (zeleno), i 0.5 (plavo), i oba modela ne uspjevaju predvidjeti luminozitet zvijezde A. Neslaganje iznosi oko $1.5\,{\rm M}_{\odot}$. Zvijezda B je također iznad predviđene evolucijske trake (točkaste linije na sl. 7.18), ali je slaganje u dijagramu do na pripadajuću pogrešku. Dijagram $\rm T_{eff}$ - $\log g$ (sl. 7.19) otkriva isto neslaganje. Zanimljivo je napomenuti da je položaj zvijezde A u rotacijskim evolucijskim modelima vrlo blizu kritične evolucijske faze. Kako rotacijsko mješanje produljuje boravak zvijezde velikih masa na glavnom

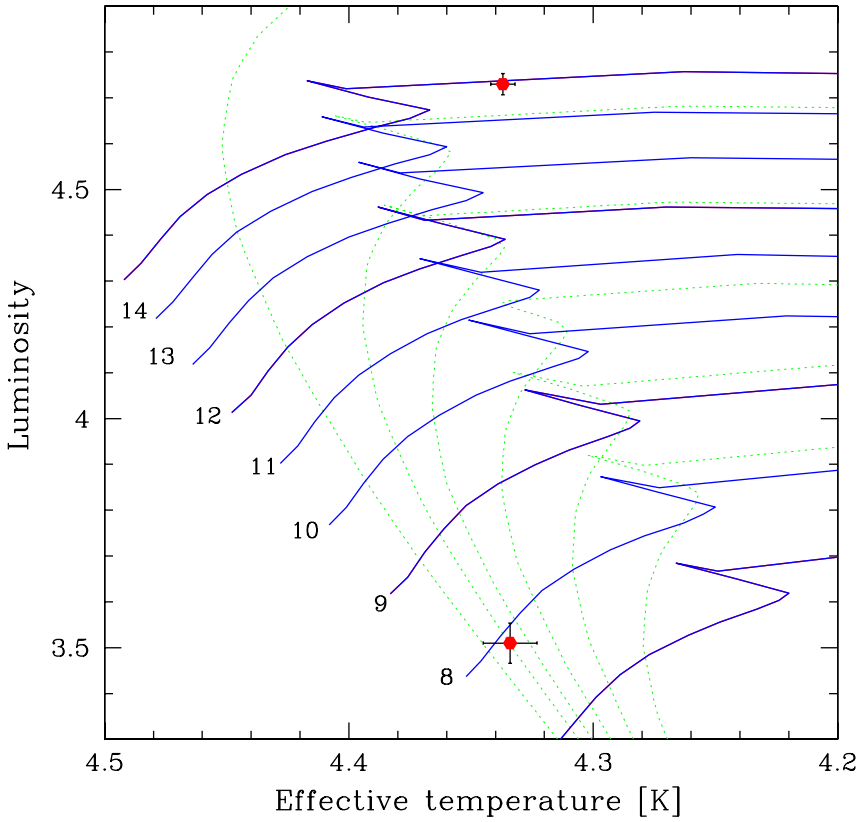
nizu (a ovisno o početnoj rotacijskoj brzini), zvijezda A se nalazi ili u fazi gorenja vodika u ljusci, ili na samoj tzv. 'plavoj udici' pri završetku faze glavnog niza (TAMS-u).

Daljnja istraživanja evolucije dvojnog sustava V380 Cyg mogla bi imati uporište u kemijskom sastavu fotosfere. Interpolirali smo modele prema Ekström et al. (2008) upravo za iznos mase primarne komponente sustava (zvijeda A). Za omjer brzina $\Omega/\Omega_{\rm crit} = 0.1$ ($V_{ini} \sim 40\,{\rm kms}^{-1}$) porast zastupljenosti helija u fotosferi na samom kraju faze gorenja vodika u jezgri zvijezde iznosi 0.5 %, dok su omjeri $N/C = 0.69$ i $N/O = 0.24$. Porast rotacijske brzine na iznos $\Omega/\Omega_{\rm crit} = 0.3$ znači porast zastupljenosti helija od 6 %, te povečanje zastupljenosti dušika na račun ugljika i kisika ($N/C = 1.12$ i $N/O = 0.40$). Naša analiza zastupljenosti helija fotosfere zvijezde A (poglavlje 6. 6. 3) pokazala je Sunčevu zastupljenost helija, pa zaključujemo da nikakav porast u zastupljenosti helija unutar fotosfere zvijezde A nije opažen. Nadalje, zastupljenosti elemenata CNO ciklusa (poglavlje 7. 6. 4) dali su $N/C = 0.25$ i $N/O = 0.11$. To odgovara vrijednostima na početku faze glavnog niza (ZAMS-a) prema tablicama teorijskih modela. Kemijski se sastav fotosfere čini nepromjenjen, čak iako je zvijezda A dosegla kraj faze gorenja vodika u jezgri. Oba bi modela za iznose omjera brzina $\Omega/\Omega_{\rm crit} = 0.1$, 0.3 i 0.5 na samom kraju faze glavnog niza (TAMS-a) imali rotacijske brzine iznosa 20, 80 odnosno 160 $\,{\rm kms}^{-1}$.

Kako rotacijska brzina zvijezde A u ovom stadiju evolucije iznosi $\sim 100\,{\rm kms}^{-1}$, interpolirali smo tablične vrijednosti teorijskih modela i našli da pri završetku faze glavnog niza (TAMS-a) za zvijezdu mase $13.3\,M_\odot$ model predviđa vrijednosti $N/C \sim 0.40$ i $N/O \sim 0.14$, dok početne vrijednosti za taj model iznose $(N/C)_{\rm ini} \sim 0.30$ i $(N/O)_{\rm ini} \sim 0.11$. Posljednja je vrijednost upravo ona koju smo dobili za zvijezdu A, dok promjenu vrijednosti N/C nismo opazili. Stoga zaključujemo da, protivno predviđanjima evolucijskih modela nikakve promjene u zastupljenosti elemenata CNO ciklusa nisu zamjećene.

Zašto je tomu tako? Evolucija zvijezda u bliskim dvojnim sustavima može biti modificirana nizom fizikalnih efekata. Prije svega to su plimne sile koje utječu na rotacijske brzine pa time i učinak rotacijskog miješanja. De Mink et al. (2008) razmatraju u svojim istraživanjima te efekte proračunima evolucije zvijezda u dvojnim sustavima. Njihovi su modeli ograničeni samo na komponente vrlo velikih masa. Autori su našli veliko povećanje zastupljenosti dušika kod dvojnih sustava s kratkim orbitalnim periodima, a čije su rotacijske brzine najveće, te za primarne zvijezde velikih masa koji su blizu ispopunjavanju Rocheovih kritičnih ekvipotencijalnih ploha. Međutim, za relativno dugački orbitalni period dvojnog sustava V380 Cyg od 12.4 d, možemo zaključiti prema istraživanju de Mink et al. (2009) kako bi promjene površinske zastupljenosti elemenata bile vrlo male, i vrlo vjerojatno ispod granice detekcije. Nadamo se, kako će budući modeli uključivati parametarski prostor sličan sustavu V380 Cyg što bi omogučilo usporedbu empirijskih podataka s

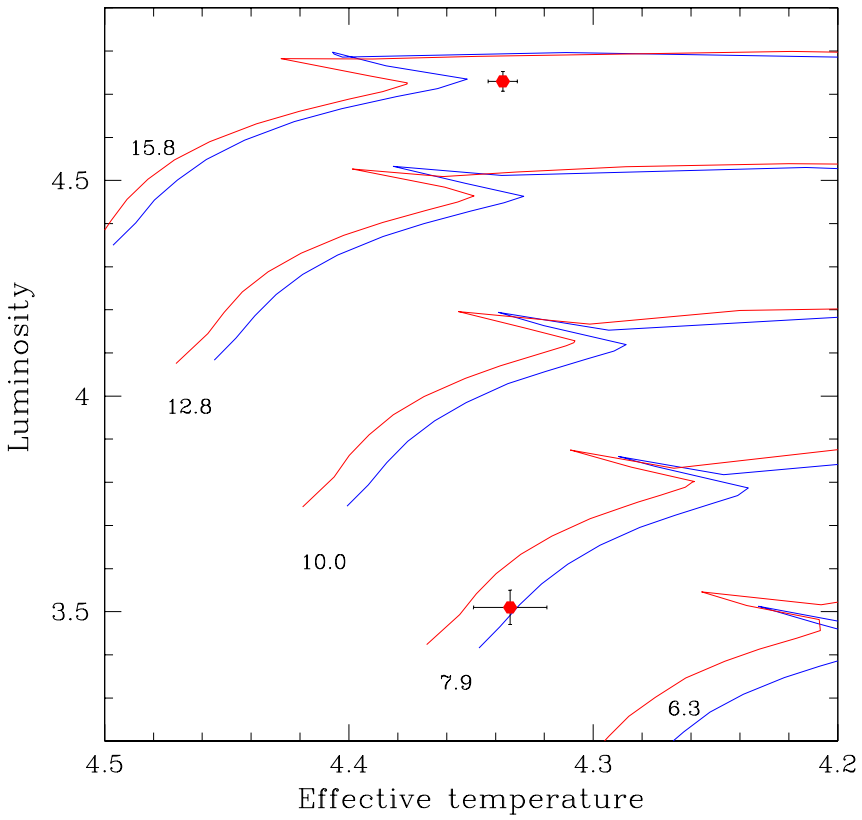
teorijskim predviđanjima.



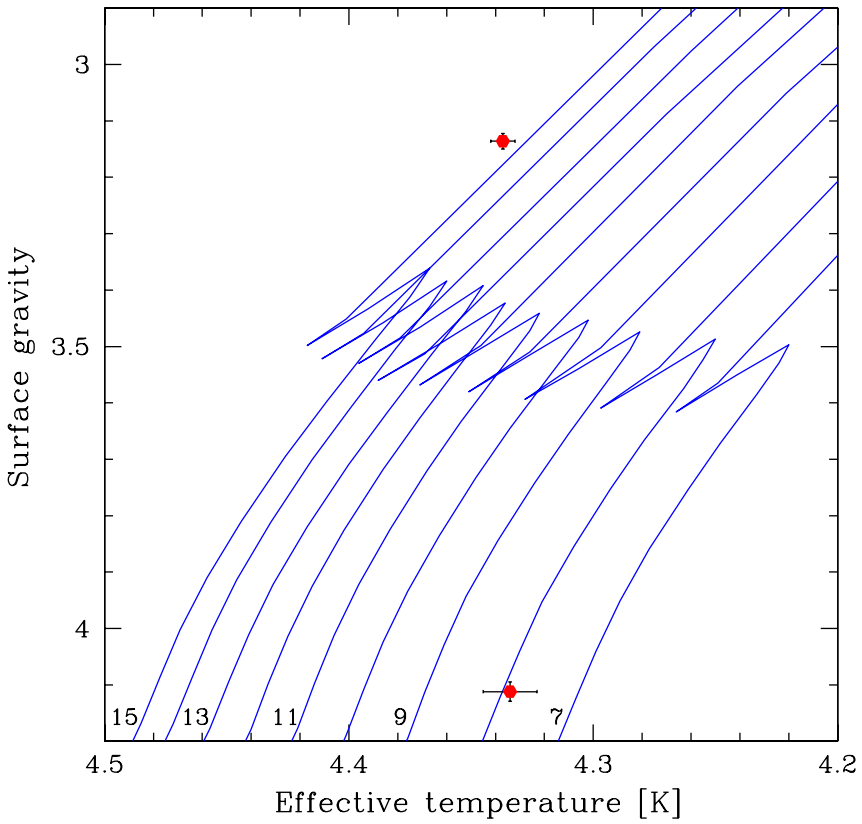
Slika 7.14: Usporedba teorijskog evolucijskog modela prema Schaller et al. (1992) i apsolutnih parametara dvojnog sustava V380 Cyg prikazan u log T_{eff} - log L skali. Modeli su izračunati efektom prebacivanja jezgre ali ne i efektom rotacijskog miješanja. Brojevi u dijagramu označuju mase ($M_{\odot}$) teorijskih traka modela.

7.9 Zaključak

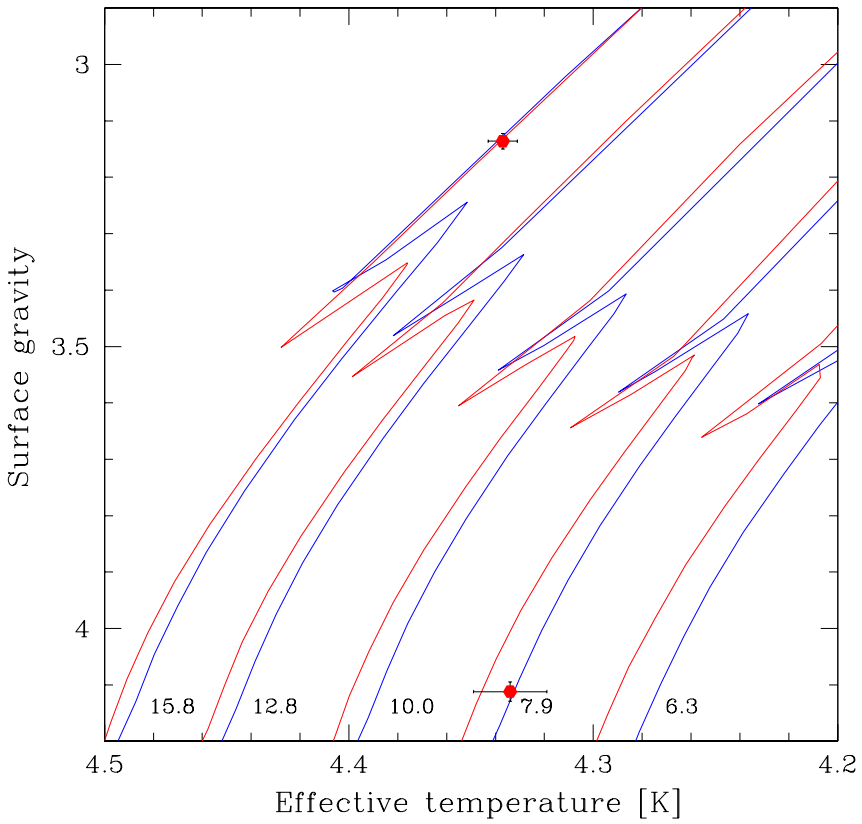
Predstavljeno je istraživanje ekscentrične pomrčinske i spektroskopske dvojne zvijezde V380 Cyg. Ovaj je sustav od posebne važnosti jer sadrži uznapredovalu komponentu koja se nalazi na za-



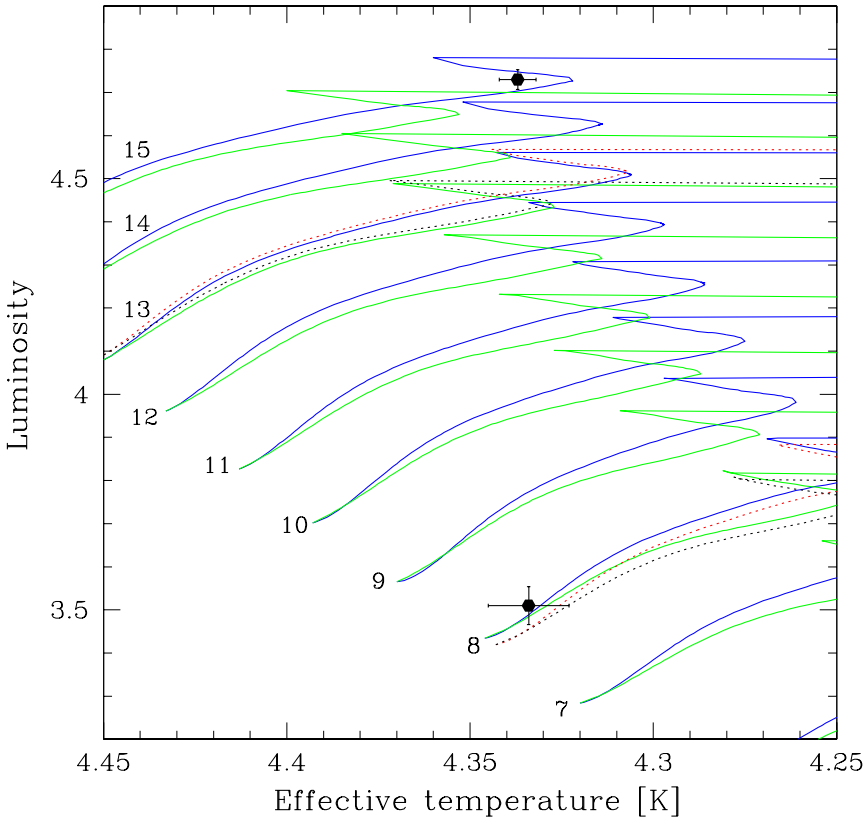
Slika 7.15: Teorijski evolucijski modeli prema Claret (1995) izračunati sa metalicitetom $Z = 0.02$ (plavo) i Claret & Giménez (1995) za $Z = 0.01$ u $\log T_{\rm eff}$ - $\log L$ skali (uključujući prebacivanje jezgre, ali ne i rotacijsko mješanje, crveno). Brojevi u dijagramu označuju mase ($M_\odot$) teorijskih traka modela.



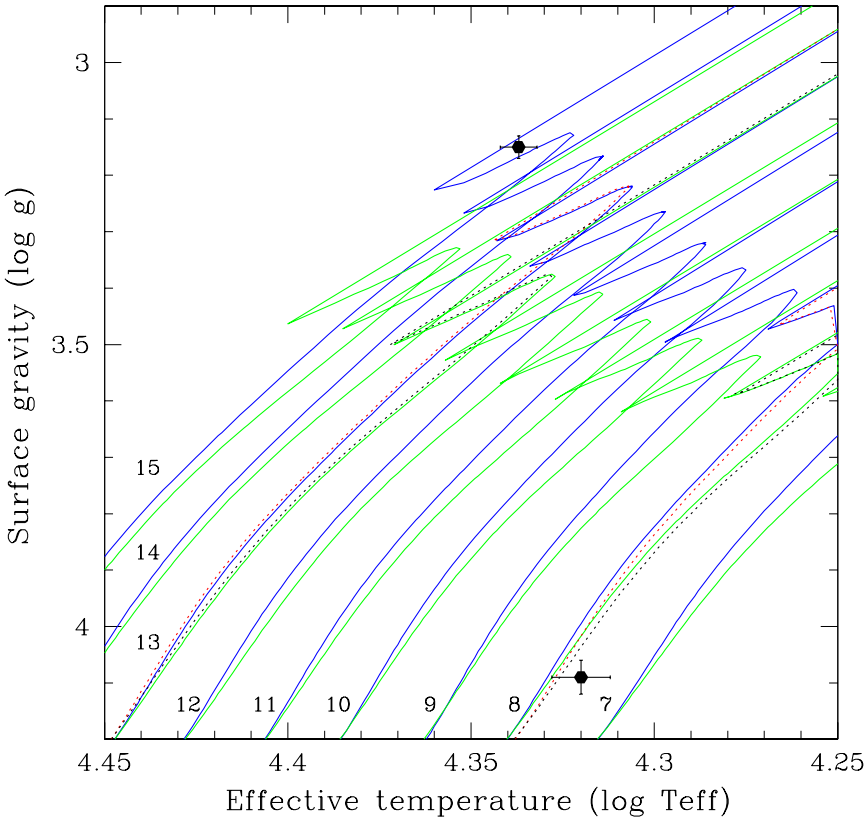
Slika 7.16: Usporedba teorijskog evolucijskog modela prema Schaller et al. (1992) i apsolutnih parametara dvojnog sustava V380 Cyg prikazan u $\log T_{\rm eff}$ - $\log g$ skali. Modeli su izračunati efektom prebacivanja jezgre ali ne i efektom rotacijskog miješanja (Schaller et al. 1992). Brojevi u dijagramu označuju mase ($M_\odot$) teorijskih traka modela.



Slika 7.17: Teorijski evolucijski modeli prema Claret (1995) izračunati sa metalicitetom Z=0.02 (plavo) i Claret & Giménez (1995) za $Z = 0.01$ u $\log T_{\rm eff}$ - $\log g$ skali (uključujući prebacivanje jezgre, ali ne i rotacijsko mješanje, crvene linije). Brojevi u dijagramu označuju mase ($M_\odot$) teorijskih traka modela.



Slika 7.18: Isto kao i na sl. 7.14 ali za modele koji uključuju rotacijsko mješanje (Ekström et al. 2008). Evolucijske su trake za $\Omega/\Omega_{\rm crit} = 0.10$ (zeleno) te 0.50 (plavo) prikazane za zvjezdane modele masa 7 do 15 $M_\odot$ u koracima po 1 $M_\odot$. Točkaste linije predstavljaju modele koji odgovaraju masama komponenata sustava V380 Cyg ($M_A = 13.1\,M_\odot$ i $M_B = 7.8\,M_\odot$), crnom linijom za $\Omega/\Omega_{\rm crit} = 0.10$, te crvenom linijom za $\Omega/\Omega_{\rm crit} = 0.50$. Zvijezda B opisuje predviđeni položaj unutar nepouzdanosti, no neusuglašenost je veća za uznapredovalu zvijezdu A. Dok zvijezda B u potpunosti opisuje položaj predviđen prema evolucijskom modelu.



Slika 7.19: Isto kao i na sl. 7.15 ali za modele koji uključuju rotacijsko mješanje (Ekström et al. 2008). Evolucijske su trake za $\Omega/\Omega_{\rm crit} = 0.10$ (zeleno) te 0.50 (plavo) prikazane za zvjezdane modele masa 7 do 15 $M_\odot$ u koracima po 1 $M_\odot$. Točkaste linije predstavljaju modele koji odgovaraju masama komponenata sustava V380 Cyg ($M_A = 13.1\,M_\odot$ i $M_B = 7.8\,M_\odot$), crnom linijom za $\Omega/\Omega_{\rm crit} = 0.10$, te crvenom linijom za $\Omega/\Omega_{\rm crit} = 0.50$. Zvijezda B opisuje predviđeni položaj unutar nepouzdanosti, no neusuglašenost je veća za uznapredovalu zvijezdu A. Dok zvijezda B u potpunosti opisuje položaj predviđen prema evolucijskom modelu.

vršetku faze glavnog niza (TAMS-a), pa je idealna zvijezda za provjeru teorijskih evolucijskih modela koji uključuju rotacijsko inducirano mješanje materije.

Snimljeno je nekoliko serija visoko-rezolucijskih spektara. Primjenjena je tehnika spektralnog raspetljavanja te su dobiveni pojedinačni spektri komponenata dvojnog sustava uz simultano računanje parametra spektroskopske orbite. Iako je doprinos sekundarne komponente ukupnom toku zračenja dvojnog sustava vrlo mali, postignuta točnost u određivanju parametara zvijezda i sustava nadmašuje prijašnja istraživanja.

Određene su mase i polumjeri obaju komponenata s točnosti od 1 - 2 %. Omjeri svjetlosnih doprinosa računatih iz svjetlosnih krivulja omogučili su nam da raspetljane spektre komponenata pouzdano renormaliziramo na jedinični kontinuum svake pojedine zvijezde. Te smo spektre dalje koristili kako bismo izračunali efektivne temperature obje komponente upotrebom dva nezavisna pristupa, potpomognuti pouzdanim izračunom površinskih ubrzanja iz polumjera i masa pojedinih zvijezda.

Spektrom dvojne zvijezde V380 Cyg dominira spektar primarne komponente (zvijezda A), te je raspetljanom spektru primarne komponente $S/N \sim 800$ po pikselu i pokrivenost valnih duljina u rasponu 3 900 - 7 000 Å, što nam omogućava vrlo detaljnu analizu zastupljenosti elemenata. To je izvedeno postupkom prilagodbe NLTE spektara prema opaženim profilima linija. Nismo našli nikakvu promjenu u zastupljenosti helija ili raznim metalima, dapače dobili smo vrijednosti svojstvene onima za B zvijezde u Sunčevoj blizini. Analiza zastupljenosti helija otkrila je široki raspon vrijednosti za različite linije, što pripisujemo nastanku nekih linija u puno višim slojevima fotosfere zvijezde, a gdje su izraženi efekti sferičnosti. Sam problem zaslužuje podrobnije istraživanje, jer postoji i mogućnost postojanja stratifikacije helija u fotosferi zvijezde.

Usporedili smo čitav niz fizikalnih parametara dvojnog sustava V380 Cyg s teorijskim modelima koji uključuju i onima koji ne uključuju rotacijske efekte. Niti jedan od tih modela u potpunosti ne predviđa empirijske podatke. Primarna komponenta u pravilu ima veći luminozitet za danu masu. Drugim riječima, suočeni smo poznatom neusuglašenosti između empirijskih (dinamičkih) i evolucijskih masa. Neusuglašenost iznosi oko $1.5\,M_{\odot}$ za modele koji uključuju rotacijsku evoluciju, te oko $2.5\,M_{\odot}$ za modele koji uključuju samo efekt konvektivnog prebacivanja jezgre, iako smo revidirali iznos mase zvijezde V380 Cyg A na bitno veću vrijednost.

Kemijski sastav površinske zastupljenosti elemenata kod zvijezda velikih masa bi trebala biti važan čimbenik u provjeri teorijskih modela. Noviji proračuni modela koji u sebi uključuju rotacijski inducirano mješanje materije, predviđaju promjene u zastupljenosti elemenata uključenih u CNO ciklus kod zvijezda velikih masa: predviđen je porast zastupljenosti helija i dušika, a pad zastupljenosti ugljika i kisika (snažno ovisno o masi i početnoj rotacijskoj brzini zvijezde). Za

zvijezdu mase $13\,M_{\odot}$ svi postojeći modeli predviđaju promjene pri kraju faze gorenja vodika u jezgri, no vrijednosti zastupljenosti elemenata koje smo u ovom radu izračunali ukazuju na vrijednosti koje bi zvijezda imala na samom početku faze glavnog niza (ZAMS-u). Jedina činjenica koju možemo zaključiti je da ovako detaljna diferencijalna analiza dvojnog sustava V380 Cyg kao što je provedena u ovome radu je u nesuglasju s teorijskim predviđanjima modela za evoluciju zvijezda velikih masa, pa smo u postupku proširenja skupa bliskih dvojnih zvjezdanih sustava za koje ta svojstva vrijede.

8. V615 PERSEI

8.1 Uvod

Zvjezdani skupovi h i χ Persei su vidljivi golim okom na sjevernom nebu. Plijene pažnju znanstvenika ne samo zbog njihove ljepote već i zbog njihovog astrofizičkog značaja. Znani su i pod imenima NGC 869 (h Persei) te NGC 884 (χ Persei) i predstavljaju samu jezgru prominentne asocijacije Per OB 1 (Humphreys 1978). Prvi je od tih dvaju zvjezdanih skupova izrazito velik i ukupne mase 3 700 $M_\odot$ u usporedbi s drugim koji je ukupne mase 2 800 $M_\odot$ (Slesnick et al. 2002). Temeljeno na vlastitim gibanjima i radijalnim brzinama, smatra se da oba zvjezdana skupa pripadaju obitelji otvorenih zvjezdanih skupova Cassiopea - Perseus (de la Fuente Marcos & de la fuente Marcos 2009). Ova obitelj zvjezdanih skupova vjerojatno uključuje 10 - 20 skupova članica ukupnog promjera od oko 600 pc, a nalazi se na udaljenosti od 2 kpc od Sunca unutar spiralnog kraka Perseusa.

Unatoč brojnim istraživanjima, nema konačnih potvrda o fundamentalnim parametrima ovih dvaju zvjezdanih skupova kao što su udaljenost ili starost (vidi tablicu 3 u članku Southworth et al. 2004a, i pripadne reference). Međutim, moderna širokopojasna i duboka CCD fotometrija koju su napravili Keller et al. (2001) te Slesnick et al. (2002) te nešto manje opširnom Strömgrenovom $uvby\beta$ fotometrijom načinjenoj od strane Marco & Bernabeu (2001) i Capilla & Fabregat (2002) vode do puno usuglašenijih rješenja koja potvrđuju da oba zvjezdana skupa dijele zajednički modul udaljenosti u iznosu od 11.8 mag. ($\sim$2.1 kpc) sa starosti od oko 13 milijuna godina.

Usporedbe fotometrijskih mjerenja i teorijskih predviđanja načinjene su pod pretpostavkom Sunčevog metaliciteta. Vrlo opsežnom analizom pomrčinskih dvojnih zvijezda V615 Per i V618 Per unutar h Persei, Southworth, Maxted & Smalley (2004a) zaključuju kako je metalicitet zvijezda $Z \sim 0.01$. To je prvi takav rezultat koji daje subsolarni metalicitet općeg metaliciteta zvjezdanog skupa h Persei, a određen je iz teorijskih evolucijskih modela. Gotovo sva moderna fotometrijska istraživanja zvjezdanih skupova h i χ Persei počivaju na pretpostavci o Sunčevom metalicitetu.

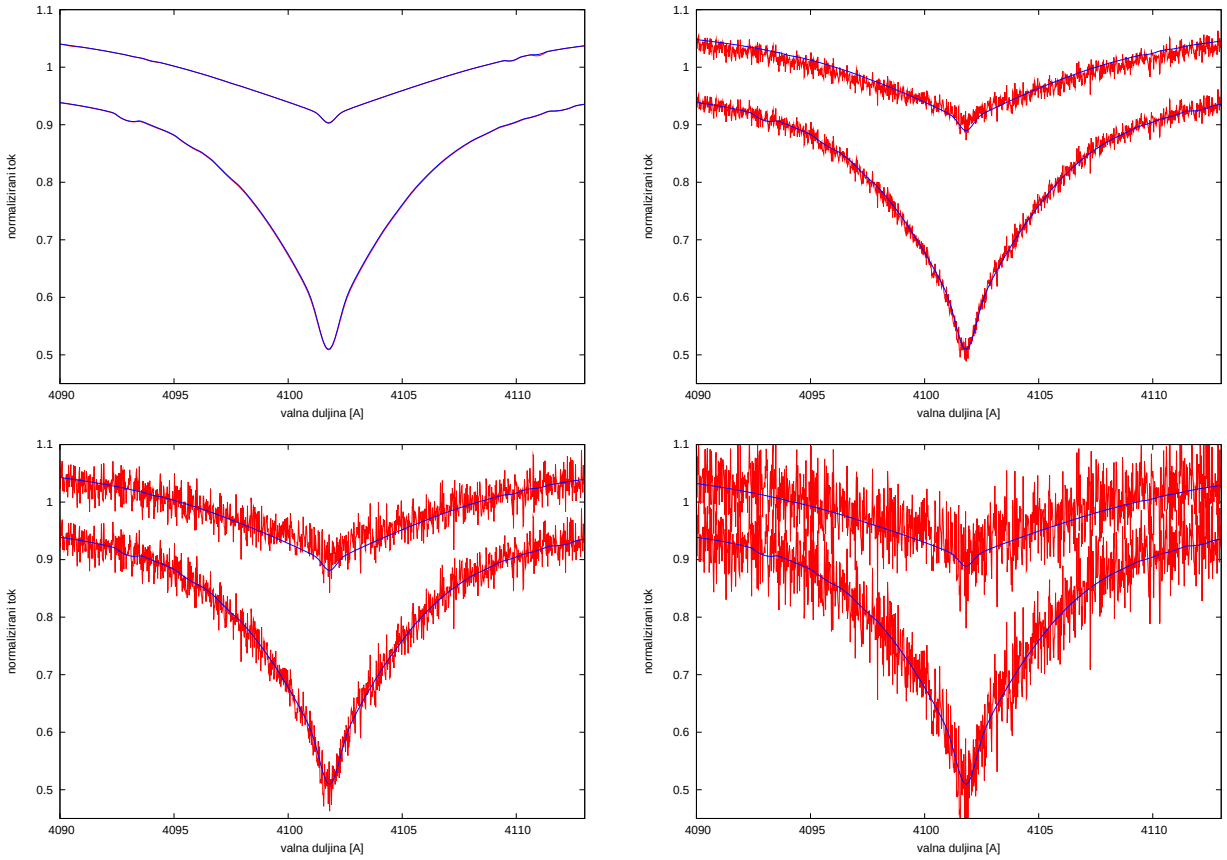
U literaturi su proturječni rezultati o kemijskom sastavu skupova h i χ Persei, što je naročito naglašeno u radu Southworth et al. (2004a). Detaljna analiza zastupljenosti elemenata iz analize visoko rezolucijskih spektara opaženim (Lennon, Brown & Dufton 1988 i Dufton et al. 1990) promjenila je ustaljenu tezu o niskoj zastupljenosti helija iz prijašnjih radova temeljenih na uskopojasnoj fotometriji (Nissen 1976) i spektroskopiji (Wolff & Heasley 1985).

Tablica 8.1: Rješenja postupka optimizacije genetičkom prilagodbom primarne komponente sa parametrima $T_{\rm eff} = 18\,000$ K, $\log g = 3.5$ dex, $v_{rot} = 38.0$ kms^{-1} i $L_F = 0.78$ i sekundarne komponente sa parametrima $T_{\rm eff} = 11\,000$ K, $\log g = 4.0$ dex, $v_{rot} = 22.0$ kms^{-1} i $L_F = 0.22$. Slobodni je parametar naveden u tablici sa pripadnom razlikom prema pravoj vrijednosti.

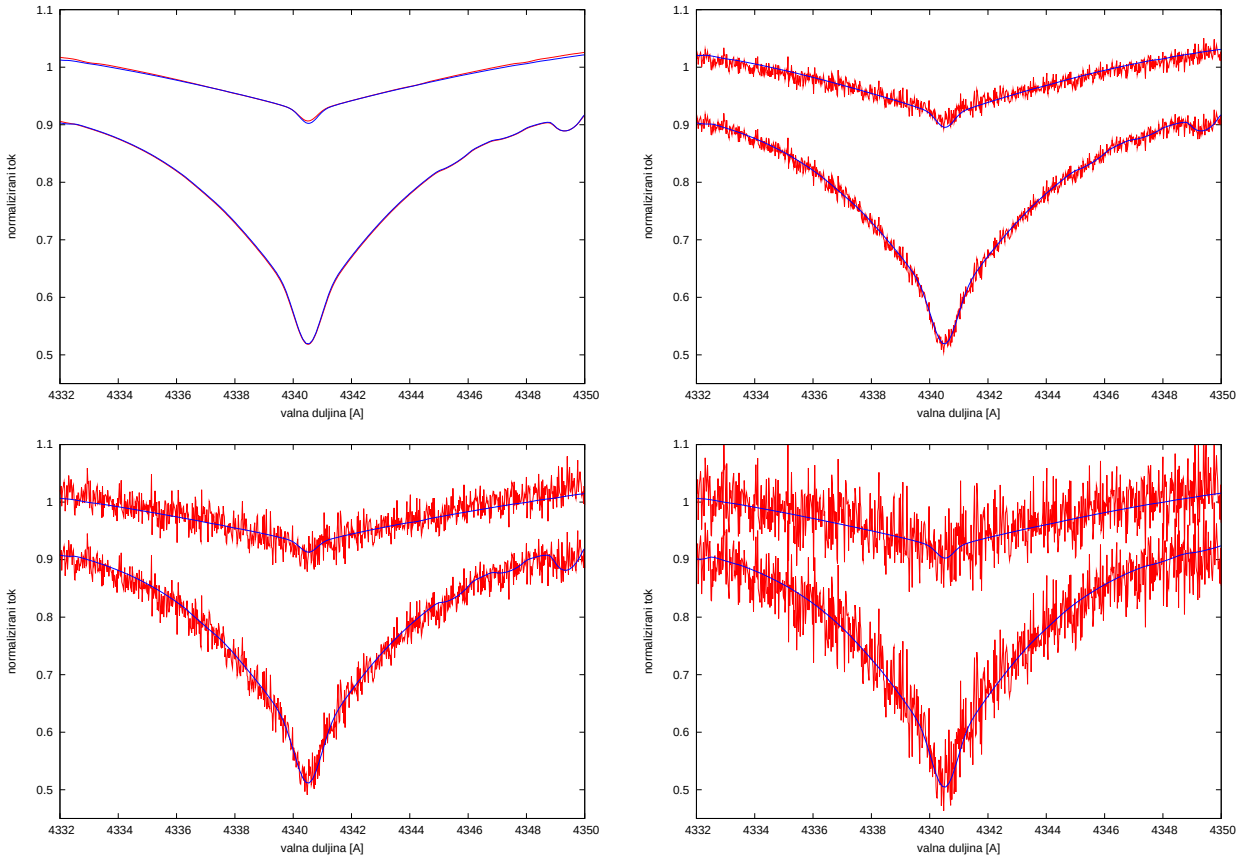
S/N	$T_{\rm eff\,1}$ [K]	$T_{\rm eff\,2}$ [K]	LF_1	LF_2	χ_1	χ_2
∞	18019.5±62.1	11010.1±69.5	0.7742±0.0060	0.2258±0.0061	0.00216	0.00261
	19.5	10.1	-0.0058	0.0058		
100	17983.4±212.3	10721.4±391.5	0.7744±0.0071	0.2256±0.0075	0.06132	0.06955
	-16.6	278.6	-0.0056	0.0056		
50	17425.3±450.4	10415.3±551.2	0.7731±0.0123	0.2269±0.0173	0.25632	0.39452
	-574.7	-584.7	-0.0069	0.0069		
25	17091.4±423.4	10203.5±611.4	0.7654±0.0192	0.2346±0.0215	1.21325	1.67321
	-708.6	-796.5	-0.0146	0.0146		

Istraživanje Dufton et al. (2005) dala su Sunčevu zastupljenost metala u skupovima h i χ Persei, što su potvrdili Smartt & Rolleston (1997). Kasnija istraživanja u suprotnosti su s tim rezultatima. Vrancken et al. (2000) su našli subsolarnu zastupljenost metala, koja iznosi oko 0.3 - 0.5 dex. Zastupljenost helija u atmosferama B zvijezda obaju zvjezdanih skupova predmet je istraživanja Klochkove & Panchuka (1987). Oni su analizirali spektre snimljene na 6 - m Bolshoj teleskopu, spektralnog raspona $\lambda\lambda$ 3900 -4900 Å. Usrednjena vrijednost koncentracije helija ϵ(He) $= 0.067 \pm 0.004$ određena je iz uzorka 15 zvijezda s efektivnim temperaturama $T_{\rm eff} > 12\,500$ K. Nedavno, u velikom pregledu OB zvijezda obaju skupova Huang & Gies (2006a, 2006b) su našli zastupljenosti helija za 18 zvijezda unutar h Persei i 22 zvijezda unutar χ Persei. Odredili su veliki raspon ϵ(He). Naravno, nikakav konačni zaključak o zastupljenosti helija ili metala unutar zvjezdanih skupova h i χ Persei nije moguće dati.

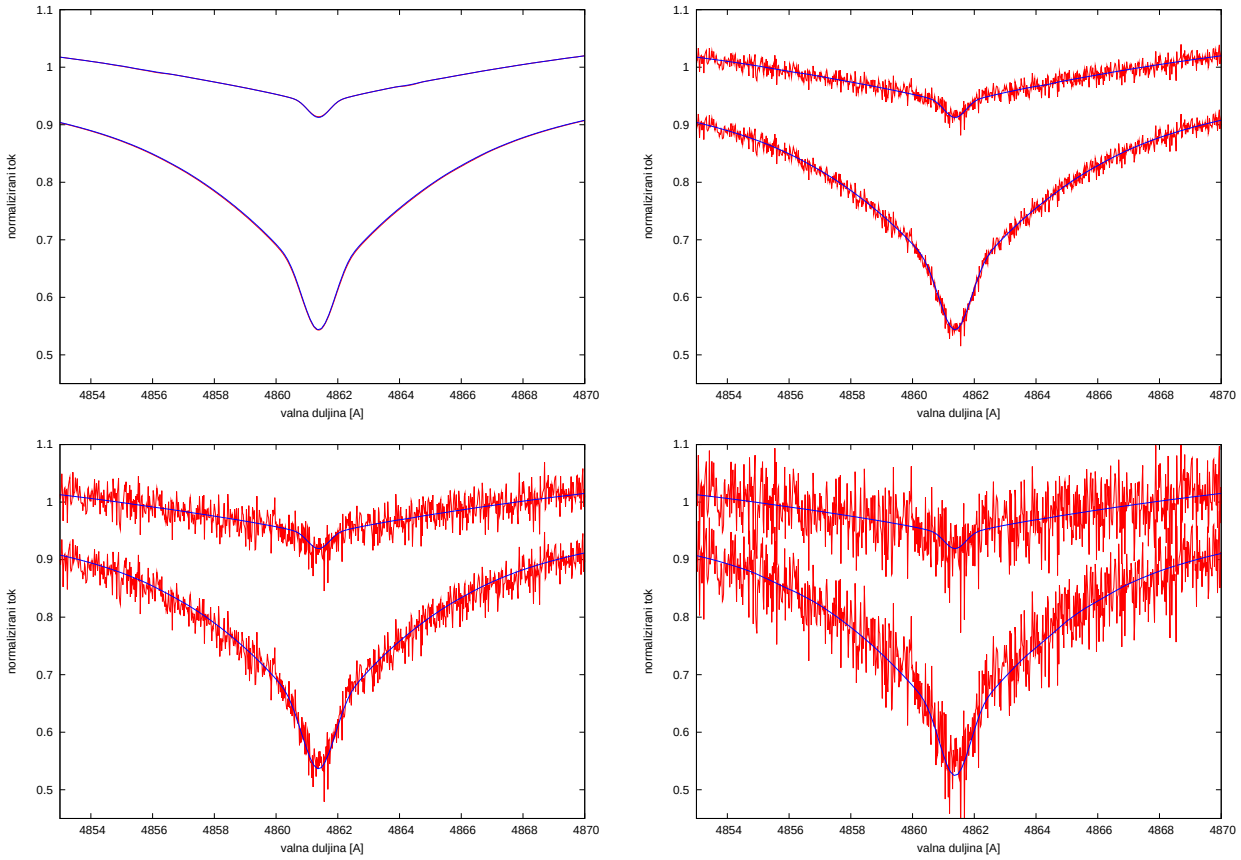
Nalaženje zastupljenosti helija u atmosferama kod zvijezda skupova h i χ Persei primarna je motivacija istraživanja u ovom radu. Troje dvojnih zvijezda istraživane od Southworth et al. (2004a, 2004b) nude veliku mogućnost za pouzdano određivanje zastupljenosti helija u atmosferama pojedinih komponenata tih dvojnih zvijezda pomoću postupaka koji su detaljno objašnjeni u radovima Pavlovski & Hensberge (2005) i Pavlovski & Southworth (2008).



Slika 8.1: Usporedba teorijskog spektra (crveno) i najbolje prilagodbe teorijskog spektra (plavo) za liniju H_δ, sa vrijednostima $S/N = \infty$, 100 (gornje slike) te 50 i 25 (donje slike) prilikom simultane prilagodbe obaju komponenata sa zahtjevom da suma svjetlosnih faktora komponenata bude jednaka 1.



Slika 8.2: Usporedba teorijskog spektra (crveno) i najbolje prilagodbe teorijskog spektra (plavo) za liniju H_γ, sa vrijednostima $S/N = \infty$, 100 (gornje slike) te 50 i 25 (donje slike) prilikom simultane prilagodbe obaju komponenata sa zahtjevom da suma svjetlosnih faktora komponenata bude jednaka 1.



Slika 8.3: Usporedba teorijskog spektra (crveno) i najbolje prilagodbe teorijskog spektra (plavo) za liniju H_β, sa vrijednostima $S/N = \infty$, 100 (gornje slike) te 50 i 25 (donje slike) prilikom simultane prilagodbe obaju komponenata sa zahtjevom da suma svjetlosnih faktora komponenata bude jednaka 1.

Tablica 8.2: Postupak prilagodbe renormaliziranog profila linije H_γ zvijezde V615 Per. Svjetlosni faktori su uzeti iz rješenja svjetlosne krivulje.

	(1)	(2)
Primarna		
$T_{\rm eff}$	$15\,070 \pm 214$	$15\,113 \pm 232$
$\log g$	4.328 (fiks)	4.265 ± 0.006
Sekundarna		
$T_{\rm eff}$	$10\,530 \pm 325$	$10\,840 \pm 355$
$\log g$	4.381 (fiks)	4.324 ± 0.005

Tablica 8.3: Prilagodbeni postupak rastavljenog profila linije H_γ zvijezde V615 Per. Površinska ubrzanja primarne i sekundarne komponente su fiksirane u oba računa vrijednostima 4.328 i 4.381.

	(1)	(2)
Primarna		
$T_{\rm eff}$	$14\,680 \pm 188$	$14\,920 \pm 191$
svj. fakt.	0.6733 ± 0.0042	0.6774 ± 0.0042
Sekundarna		
$T_{\rm eff}$	$11\,453 \pm 270$	$11\,425 \pm 252$
svj. fakt.	0.3548 ± 0.0042	0.3226 ± 0.0016

8.2 Pomrčinske dvojne unutar h i χ Persei

Pomrčinske su dvojne nađene kao nusprodukt fotometrijske potrage zvijezda za β Cephei zvijezdama: 2 (V621 Per i V623 Per) u skupu χ Persei (Krzesiński & Pigulski 1997), te dodatno 2 (V615 Per i V618 Per) u skupu h Persei (Krzesiński, Pigulski & Kolaczkowski 1999). Ovo je istraživanje kontinuirani slijed prijašnjih istraživanja pomrčinskih dvojnih u V615 Per i V618 Per unutar skupa h Persei koje su proveli Southworth, Maxted & Smalley (2004a) i V621 Per unutar χ Per od Southworth et al. (2004b). Ovi su autori dali vrlo detaljan pregled svih prijašnjih istraživanja pa stoga, navodim najvažnija.

Ranija kombinirana fotometrijska i spektroskopska istraživanja od Southworth et al. (2004a) određuju pouzdanu vrijednost parametra orbitalnog perioda od $P = 13.7$ d kao i ostale parametre obaju komponenata. Dvojna se zvijezda sastoji od komponenata B zvijezda masa $M_1 = 4.08 \pm 0.06$ $M_\odot$ i $M_2 = 3.18 \pm 0.08$ $M_\odot$ te polumjera $R_1 = 2.29 \pm 0.14$ $R_\odot$ i $R_2 = 1.90 \pm 0.09$ $R_\odot$. Efektivne su temperature obaju komponenata određene usporedbom opaženih spektara V615 Per i sintetiziranih spektara iz modela atmosfera, dobivši vrijednosti $T_{\rm eff\,1}$=15 000 $\pm$ 500 K i $T_{\rm eff\,2}$=11 000 $\pm$ 500 K. Usporedbom tih dobivenih vrijednosti temperatura sa evolucijskim modelima skloni smo vrijednosti metaliciteta od $Z \sim 0.01$. Točnost vrijednosti fundamentalnih parametara obaju komponenata, a posebno polumjera još su uvijek pod utjecajem nepotpunosti svjetlosnih krivulja. Ova je dvojna zvijezda član otvorenog zvjezdanog skupa h Persei sa vjerojatnosti pripadanja od $P = 96$ % (Uribe et al. 2002).

8.3 Spektralno raspetljavanje

Polazna točka prilikom određivanja zastupljenosti elemenata u zvjezdanoj atmosferi je svakako određivanje globalnih parametara, kao što je efektivna temperatura i površinsko ubrzanje. Odvojene pomrčinske dvojne zvijezde su kako je to već prije naglašeno glavni izvor fundamentalnih parametara zvijezde, masa i polumjera (Andersen 1991). Iz dinamičkih razmatranja $\log g$ se može odrediti sa točnosti od 0.01 dex, gotovo za jedan red veličine veći nego u slučaju pojedinačnih zvijezda.

U ovom se radu koristi serija spektara V615 Per koje su snimili i analizirali Southworth, Maxted & Smalley (2004a). Ukratko, 25 spektara je opažano upotrebom IDS na INT (La Palma, Španjolska). Spektri su centrirani na Balmerovoj H_γ liniji, rasponu od 270 Å rezoluciji oko 0.2 Å. Prosječna vrijednost S/N $\sim$ 50. Raspetljavanje je napravljeno u Fourierovom prostoru pomoću koda FDBINARY (Ilijić et al. 2004) prema izvodu kojeg je dao Hadrava (1995). U ovom se

Tablica 8.4: Zastupljenosti helija i magnezija određeni za primarnu komponentu V615 Per.

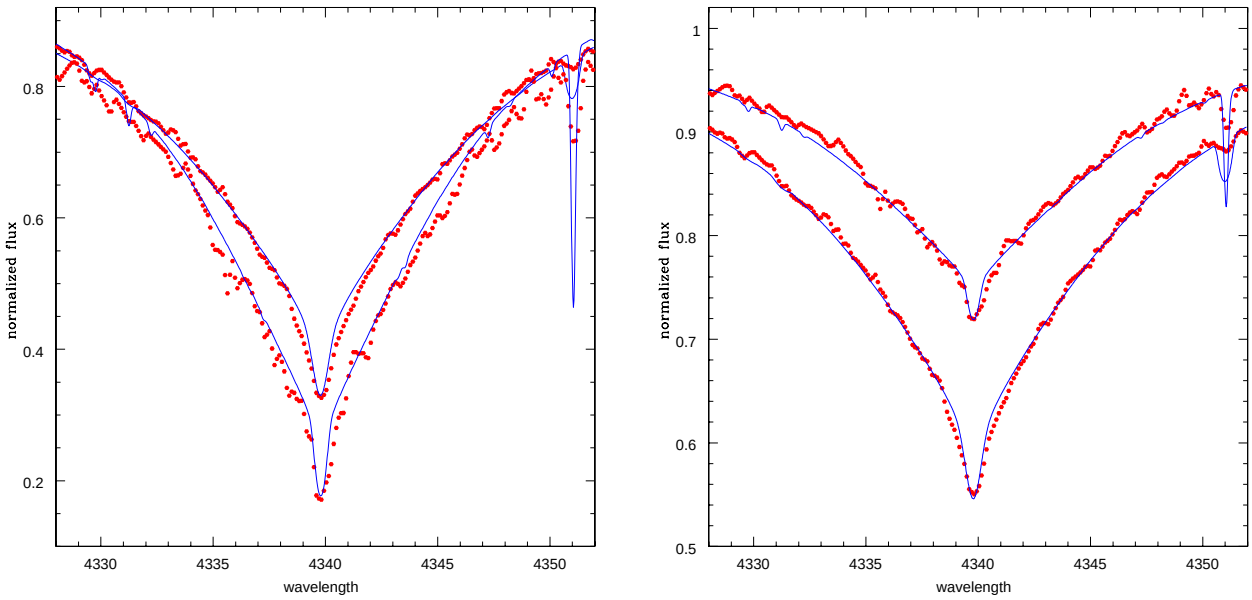
Zvijezda	Linija	V615 Per A	ϵ(He)
A	He I	4388	0.087 ± 0.004
A	He I	4471	0.088 ± 0.004
A	He	srednja	0.088 ± 0.006
A	Mg II	4481	7.28 ± 0.02
B	Mg II	4481	7.19 ± 0.05

radu potvrđuju semiamplitude radijalnih brzina određene prije od (Southworth et al. 2004a), bez ikakvih daljnjih namjera korekcije orbitalnih parametara. Naravno, bez dodatnih spektroskopskih opažanja takvo što ne bi imalo smisla.

8.4 Genetička potraga za atmosferskim parametrima

Raspetljani spektri komponenata dvojnog sustava omogućuju određivanje atmosferskih parametara. Obzirom na tu činjenicu, velika je prednost dvojnih zvjezdanih sustava u tome što u spektroskopskoj analizi vodikovih linija nemamo poteškoća s degeneracijom između efektivne temperature i površinskog ubrzanja jer se iz dinamike sustava površinsko ubrzanje može odrediti s velikom točnosti (0.01 dex i bolje). Analiza pomrčinskih dvojnih sustava također omogućava određivanje relativnog sjaja pojedinih komponenata u odnosu na ukupni sjaj dvojnog sustava. Poznavajući svjetlosne faktore komponenata, raspetljani ili separirani spektri komponenata mogu biti dosljedno renormalizirani u vlastitom kontinuumu (poglavlje 3.3).

Načinjeni kompjutorski program GENFITT (poglavlje 4.2) omogućuje određivanje atmosferskih parametara pomoću postupka prilagodbe profila spektralne linije. Slijedeći se parametri uzimaju u obzir za postupak optimizacijske prilagodbe: efektivna temperatura $T_{\rm eff}$, površinsko ubrzanje $\log g$, projekcija rotacijske brzine $v \sin i$, Dopplerov pomak RV, i svjetlosni faktori komponenata LF (o čemu će kasnije biti detaljno govora). Kako neodređenost izračunatih parametara raste s brojem slobodnih parametara, svakako je bolje fiksirati one parametre koji se mogu izračunati iz drugih izvora, ili one za koje se očekuje da njihovo prilagođavanje nema velikog smisla (npr. prilagođavanje projekcije rotacijske brzine $v \sin i$ na širokim Balmerovim linijama vodika). Kao optimizacijska rutina koristi se genetički algoritam. Još od kako je Holland (1975) uveo genetički odnosno evolucijski algoritam (GA) u potrazi za optimiziranim parametrima unutar više parametarskog prostora, ta je metoda uvelike dobila na popularnosti. U astrofiziku je ta metoda



Slika 8.4: Usporedba prilagodbenog spektra (plavo) i opaženog spektra (crveno) u okolini H_γ spektralne linije, za slučaj 'generičkih' komponenata (lijevo) i za slučaj renormaliziranih komponenata (desno) V615 Per.

ušla preko članka i subrutine PIKAIA od Charbonneau (1995), i našla veliku primjenu u raznim astrofizičkim proračunima. Implementacija genetičkog algoritma u ovom radu je slična onoj koju su opisali Mokiem et al. (2005) koji genetički algoritam koriste u spektroskopiji OB zvijezda prilikom modeliranja zvjezdanih vjetrova. Njihova metoda uključuje NLTE zvjezdani program atmosfera FASTWIND (Puls et al. 2005) koristeći genetički algoritam temeljen na Charbonneauovoj rutini PIKAIA.

GENFITT program računa optimizacijsku prilagodbu na skupu teorijskih spektara, pri čemu su napravljene dvije mreže sintetskih spektara. Prva za uvjet LTE efektivne temperature $T_{\rm eff} = 6$ - 15 kK i površinskih ubrzanja $\log g = 2.5$ - 5.0, te druga za uvjet NLTE u rasponu efektivnih temperatura $T_{\rm eff} = 14$ - 35 kK i površinskih ubrzanja $\log g = 2.5$ - 5.0. Koraci u mrežama u efektivnoj temperaturi iznose 250 K te u površinskom ubrzanju iznosi 0.1 dex. GENFITT vrši dvodimenzionalnu interpolaciju za proizvoljne $T_{\rm eff}$ i $\log g$. Teorijski spektri nisu prošireni za rotacijsku brzinu, obzirom da $v \sin i$ također može biti slobodan parametar u prilagođavanju. Konvolucije s rotacijskim profilom izračunate su pomoću subrutine ROTIN.F (Hubeny 1988). Postupak preraspodjele mreže valnih duljina (sempliranje) je vršen unutar linearne aproksimacije.

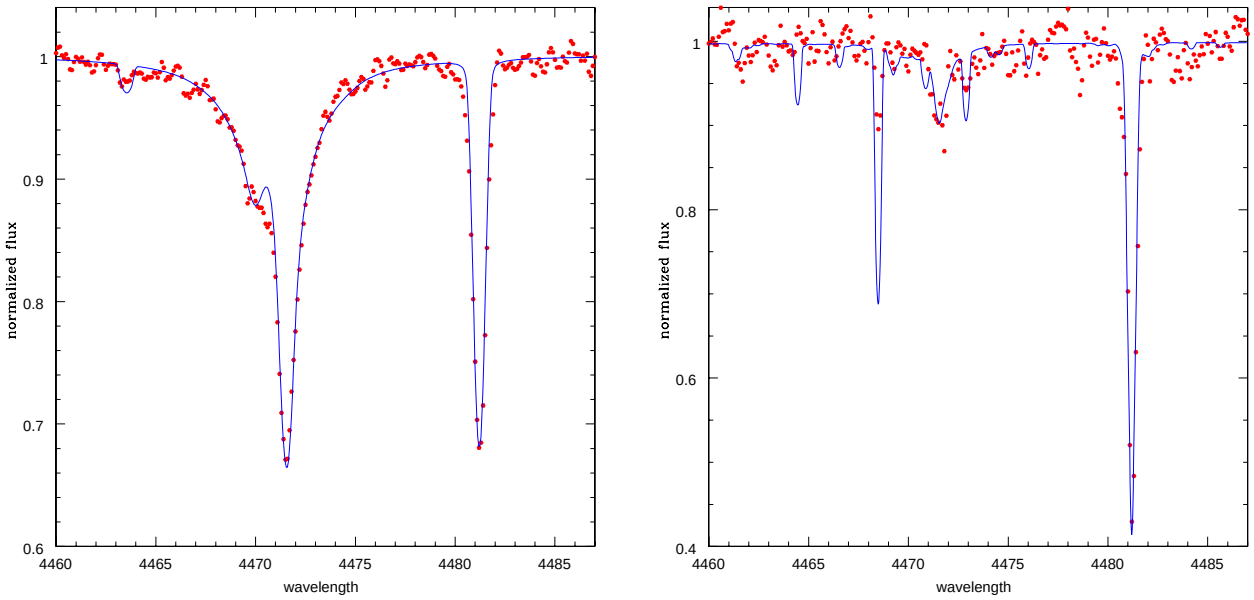
Program GENFITT je testiran na velikom broju simuliranih spektara, kako bi se pouzdano

analizirala kvaliteta prilagođenih parametara. Brojni testovi računa su vršeni u različitim uvjetima slobodnih i vezanih parametara. Priloženi su rezultati različitih testova računanja bilo u vrijednostima parametara ili vrijednostima sume kvadrata odstupanja. Računi testiranja su izvedeni za vrijednosti S/N = 25, 50, 100 i ∞ (slučaj bez šuma). Na sl. 8.1, 8.2 i 8.3 prikazani su dijagrami prilagodbe za slučaj simultanog prilagođavanja triju Balmerovih linija H_β, H_γ i H_δ za obje komponente istovremeno. Prilikom tih proračuna jedino su projekcije rotacijskih brzina komponenata fiksirane ($v \sin i = 38$ km/s i 22 km/s) za primarnu odnosno sekundarnu komponentu (iznosi brzina sličnim onima od V615 Per). U svim slučajima program GENFITT relativno reproducira zadane vrijednosti, sa rastučim pogreškama kao što se i očekuje pri malim vrijednostima S/N-a (tab. 8.1). Za S/N = ∞ i 100 rezultati su unutar jedne standardne devijacije od zadanih vrijednosti.

Budući nam je primarni cilj spektroskopska dijagnostika komponenata dvojnog sustava, posebna je pažnja posvećena pri određivanju svjetlosnih faktora iz generički raspetljanih ili separiranih individualnih spektara. Svjetlosni faktori (LF) su definirani kao relativni doprinos luminoziteta pojedine komponente prema ukupnom luminozitetu dvojnog sustava. Računati su prilagodbeni postupci sintetskih raspetljanih spektara za dva slučaja, (i) slobodan, i (ii) vezan. Slobodni slučaj znači da je LF pojedine komponente dvojnog sustava računat zasebno. U vezanom slučaju imamo istovremeni račun LF obaju komponenata uz ograničenje da je suma svjetlosnih faktora jednaka 1. Kvaliteta prilagodbenih postupaka za slučaj zadanih svjetlosnih doprinosa prikazana je na sl. 8.4 (desno) sa pripadnim rezultatima računa u tab. 8.2.

Za male vrijednosti S/N izračunate vrijednosti parametara i dalje ne odstupaju više od 2 % prema vrijednostima ulaznih parametara. Slaganje sa ulaznim parametrima je i bolje za slučaj vezanog računa, što je i razumljivo pošto slučaj vezanog uvjeta sume svjetlosnih doprinosa sužava parametarski prostor u potrazi za optimalnim vrijednostima. Međutim, ipak moramo biti oprezni u interpretaciji ovakvog rezultat jer je jedino nasumičan šum prisutan unutar simuliranih ulaznih spektara. U stvarnosti, bili bi suočeni i s izvorima sistematičnih pogrešaka, od kojih bi naravno najznačajni bio onaj uzrokovan pogrešnom normalizacijom ulaznih spektara. Posebno, takvo se što naročito očekuje kod širokih vodikovih linija kod ranih tipova zvijezda, a koje su upravo i predmet ovog istraživanja.

Na sl. 8.4 je prikazana optimalizacija genetičke prilagodbe za slučaj vezanog računa u dvije varijante, (1) efektivne temperature i svjetlosni faktori su nepoznati, i (2) efektivne temperature, površinska ubrzanja i svjetlosni faktori su nepoznati parametri. Slučaj (2) je zapravo najteži slučaj pošto postoji problem degeneracije pri računu prilagodbe širokih Balmerovih linija. Ta dva slučaja predstavljaju i dvije situacije koje su prisutne kod opaženog sustava. U prvom slučaju, kod pomrčinskih dvojnih sustava gdje je površinsko ubrzanje moguće odrediti s velikom točnosti



Slika 8.5: Usporedba prilagodbenog spektra (plavo) i opaženog raspetljanog spektra (crveno) magnezijeve linije te helijevih spektralnih linija, za primarnu komponentu (lijevo) i za sekundarnu komponentu (desno).

iz simultanog rješenja svjetlosnih krivulja i krivulja radijalnih brzina. U drugom slučaju, gdje imamo dvojni sustav koji nije pomrčinski i gdje nije moguće odrediti mase i polumjere pojedinih komponenata dvojnog sustava, pa je nemoguće odrediti površinsko ubrzanje. Rezultati računa prilagodbe sa simuliranim spektrima koji u sebi sadrže jedino nasumičan šum pokazuju odstupanje od pravih vrijednosti unutar 2 % za parametar efektivne temperature i oko 1 % za parametre svjetlosnih faktora za prvi slučaj, odnosno oko 2.5 % za parametar efektivne temperature, 1.5 % za parametar površinskog ubrzanja i 2 % za parametre svjetlosnih faktora za drugi slučaj (tab. 8.2 i 8.3), povečavajući se za manje vrijednosti S/N.

8.5 Atmosferski parametri i zastupljenosti

Kako se radi o malom intervalu optičkog spektra dvojnog sustava V615 Per koji je centriran oko linije H_γ (poglavlje 8.2), određivanje parametra efektivne temperature ograničeno je upravo na tu liniju. Linije helija su vrlo dobar temperaturni indikator iako ih nismo u tu svrhu koristili jer nam je primarni zadatak bio odrediti vrijednosti zastupljenosti helija u atmosferama pojedinih komponenata dvojnog sustava V615 Per. Zbog parcijalnih pomrčina, nije bilo moguće pouzdano

odrediti polumjere iz dostupnih svjetlosnih krivulja s velikom točnosti, što se je odrazilo i na točnost određivanja površinskog ubrzanja (postignuta točnost za primarnu komponentu iznosi 0.06 dex odnosno 0.05 dex za sekundarnu komponentu).

Iz fotometrijskih rješenja omjer luminoziteta u B pojasu iznosi $L_{\rm A}/L_{\rm B} = 0.512 \pm 0.071$. Takav fotometrijski omjer luminoziteta koristan je pri renormalizaciji raspetljanih spektara. Tada, se program GENFITT koristi pri određivanju efektivne temperature obaju komponenata, bilo pri fiksiranim vrijednostima površinskog ubrzanja bilo za slobodne vrijednosti površinskog ubrzanja. Vrijednosti projekcije rotacijskih brzina fiksirane su iznosima $v \sin i_{\rm A} = 32$ km s^{-1} i $v \sin i_{\rm B} = 18$ km s^{-1} (Southworth et al. 2004). Rezultati prilagodbe su prikazani u tab. 8.2-8.3, gdje je slaganje za parametar efektivne temperature u oba računa unutar vrijednosti $1\,\sigma$. Također su slaganja prilagođenih vrijednosti površinskog ubrzanja unutar nepouzdanosti navedenih u fotometrijskim rješenjima. Nadasve, potvrđene su efektivne temperature izračunate u radu Southworth et al. (2004). Rješenje postupka prilagodbe je prikazano na sl. 8.4 (lijevo). Korisno je napomenuti da je srednja vrijednost šuma ulaznih spektara S/N ~ 50, te da je šum raspetljanih komponentnih spektara unutar dosega S/N ~ 160 za primarnu (A) komponentu i S/N ~ 80 za sekundarnu (B) komponentu. Omjer svjetlosnih doprinosa u slobodnom slučaju ($\log g$ fiksiran) iznosi $L_{\rm A}/L_{\rm B} = 0.527 \pm 0.006$. U vezanom slučaju iznosi $L_{\rm A}/L_{\rm B} = 0.476 \pm 0.006$, oko 3.5 % različito prema analizi svjetlosnih krivulja.

U konačnici, uzeta je vrijednost efektivne temperature u iznosu $T_{\rm eff\,A} = 15\,050 \pm 250$ K i $T_{\rm eff\,B} = 10\,750 \pm 300$ K. Model atmosfera izračunat je programom $ATLAS9$ (Kurucz 1979) sa tim vrijednostima efektivnih temperatura i vrijednostima površinskog ubrzanja iz rada Southworth et al. (2004). Vrijednost mikroturbulentne brzine je fiksirana na iznos $v_{turb} = 2$ km s^{-1} za obje komponente prema vrijednostima za zvijezde sličnih atmosferskih parametara (Trundle et al. 2007). Zastupljenost helija u atmosferi primarne komponente (A) je određena iz χ^2 minimizacije između opaženog profila He I linije na 4388 i 4471 Å, te iz mreže helijevih linija računatim sa vrijednostima zastupljenosti u rasponu $\epsilon({\rm He}) = 0.06$ - 0.15. Teorijski profili linija za slučaj NLTE su računati programima DETAIL i SURFACE (Giddings 1981, Butler 1984).

Rezultati za obje linije prikazani su u tab. 8.4. Srednja vrijednost zastupljenosti helija iznosi $\epsilon({\rm He}) = 0.088 \pm 0.006$. Taj iznos gotovo odgovara Sunčevoj (normalnoj) zastupljenosti helija, te možemo reći da nikakvo odstupanje u zastupljenosti helija kod ove B2 zvijezde u sustava V615 Per nije zamječeno.

Magnezij kao element je vrlo prikladan kao indikator metaliciteta kod B zvijezda, pošto taj element ne sudjeluje u CNO procesu unutar same jezgre zvijezde (Lyubimkov et al. 2005). Nedavno, ovi su autori odredili zastupljenosti magnezija kod 50 ranih B zvijezda. Našli su zastup-

ljenost u iznosu $\log \epsilon(\mathrm{Mg}) = 7.67 \pm 0.21$. Uzevši u obzir jedino zvijezde s pouzdanom vrijednosti mikroturbulentne brzine ta vrijednost iznosi $\log \epsilon(\mathrm{Mg}) = 7.59 \pm 0.15$.

Kod obje komponente dvojnog sustava V615 Per, Mg II linija na λ 4481 Å je vrlo jaka linija u raspetljanim spektrima. Izačunali smo teorijske profile linija različitih zastupljenosti magnezija pri uvjetu NLTE za primarnu komponentu te pri uvjetu LTE za sekundarnu komponentu. Zastupljenost magnezija procjenjena je pomoću minimizacije χ^2 na renormaliziranim raspetljanim spektrima unutar mreže teorijskih spektara. Rezultati su prikazani u tab. 8.4, te je prilagodba prikazana na sl. 8.5 za primarnu komponentu (lijevi graf) i sekundarnu komponentu (desni graf). Srednja vrijednost zastupljenosti magnezija u obje komponente sustava V615 Per iznosi $\log \epsilon(\mathrm{Mg}) = 7.19 \pm 0.05$. Ta je vrijednost za -0.48 dex manja nego srednja vrijednost zastupljenosti magnezija određena u radu Lyubimkov et al. (2005) odnosno za -0.18 dex manja od srednje vrijednosti zastupljenosti magnezija koju su našli Daflon et al. (2003) kod OB zvijezda u Sunčevoj okolini. Očito je da postoji manjak zastupljenosti magnezija kod komponenti dvojnog sustava V615 Per i bolje pristaju B zvijezdama vanjskog haloa, negoli Sunčevom susjedstvu (Daflon et al. 2004). Zaključujemo da dvojni sustav V615 Per ukazuje na smanjeni metalicitet otvorenog zvjezdanog skupa h Per unutar kojeg se i sama nalazi. To je i potvrda predviđanjima Southworth et al. (2004) koja se temelje na analizi položaja zvijezde iz V615 Per u teorijskim evolucijskim dijagramima.

8.6 Zaključak

Pomrčinski dvojni zvjezdani sustav V615 Per je sastavnica otvorenog zvjezdanog skupa h Per. Spektralno raspetljavanje vremenskih nizova spektara visoke rezolucije dvojnog sustava V615 Per omogućava nam određivanje zastupljenosi helija i magnezija unutar atmosfera pojedinih komponenata.

Predstavljen je računski program GENFITT koji omogućuje optimalnu prilagodbu realnih spektara pomoću genetičkog algoritma. Proširena istraživanja na sintetiziranim spektrima pokazuju da se radi o pouzdanim prilagodbama i razumnim vrijednostima pogrešaka. Vrlo bitna sastavnica programa je mogućnost računanja prilagodbe za slučaj ograničenja svjetlosnih faktora pojedinih komponenti sustava, te mogućnost reproduciranja pripadnih omjera luminoziteta iz raspetljanih (generičkih) spektara. To čini program GENFITT bitnim alatom za slučaj dvojnih zvjezdanih sustava van pomrčinskih ciklusa.

Analiza zastupljenosti helija kod primarne komponente ukazuje na normalnu zastupljenost helija, dok zastupljenost magnezija kod obje komponente ukazuje na smanjenu vrijednost za oko -

0.3 dex prema usporedbi sa vrijednostima B zvijezda unutar Sunčevog susjedstva. Interpretirajući zastupljenost magnezija kao indikatorom metaliciteta, zaključujemo da je metalicitet dvojnog sustava V615 Per, pa tako i otvorenog skupa h Per nešto niži od Sunčevog metaliciteta.

9. V621 PERSEI

9.1 Uvod

Pomrčinska spektroskopska dvojna zvijezda V621 Per nalazi se u otvorenom galaktičkom skupu χ Per. Kao pomrčinski sustav otkriven je u fotometrijskom pregledu χ Per u potrazi za pulsirajućim zvijezdama (Krzesiński, Pigulski 1997).

V621 Per je jedna od najsjajnijih zvijezda u skupu χ Per pa je često bila predmet istraživanja. Zbog vrlo malog doprinosa ukupnom sjaju sustava sekundarna komponenta nije otkrivena u spektru, pa se u katalozima V621 Per označava kao SB1 sustav.

Lennon, Brown & Dufton (1988) su našli normalnu zastupljenost helija, no ističu da je dobivena zastupljenost različita za različite helijeve linije. Dufton et al. (1990) također nalaze normalnu zastupljenost helija i raznih metala, no i razliku od 0.4 dex u zastupljenosti dušika i aluminija prema Sunčevoj atmosferi. Ovi su autori jedni od prvih koji zapravo tvrde da je dvojna zvijezda V621 Per dvojni sustav. Vrancken et al. (2000) određuju efektivnu temperaturu i površinsko ubrzanje; $T_{\rm eff} = 22\,500 \pm 500$ K i $\log g = 3.40 \pm 0.05$ iz ionizacijske ravnoteže silicija i prilagodbi Balmerovih linija H_β i H_γ teorijskim spektrima. Također nalaze relativno veliku mikroturbulentnu brzinu od 9 kms^{-1} (13 kms^{-1} iz O II linije).

Vrancken et al. nalaze zastupljenosti elemenata C, N, O, Mg, Al i Si slične uobičajenoj zastupljenosti B zvijezda u otvorenom skupu χ Per, ali bitno nižim prema Sunčevoj atmosferi za 0.5 ± 0.2 dex.

Venn et al. (2002) određuju zastupljenost bora iz ultraljubičastih spektara snimljenih pomoću Hubbleovog svemirskog teleskopa sa STIS spektrografom. Mikroturbulentna brzina je $v_{turb} = 4\,\mathrm{kms}^{-1}$, što je i uobičajeno za ultraljubičasto područje, ali i za iznos makroturbulentne brzine od 20 kms^{-1}. Za metalicitet nalaze [M/H] = -0.16 $\pm$ 0.17 dex. Sve su ove analize učinjene uz potpuno zanemarivanje doprinosa sekundarne komponente. U ovom radu ponovit ćemo spektroskopsku analizu zastupljenosti elemenata u atmosferi primarne komponente, ali iz individualnog spektra primarne komponente.

9.2 Spektroskopska opažanja

Više nizova spektara V621 Per prikupljeno je pomoću 2.5 m Isaac Newton Teleskopa (INT) i 4.2 m William Herschel Teleskopa (WHT) na La Palmi u Španjolskoj. Opažanja na INT-u vršena su

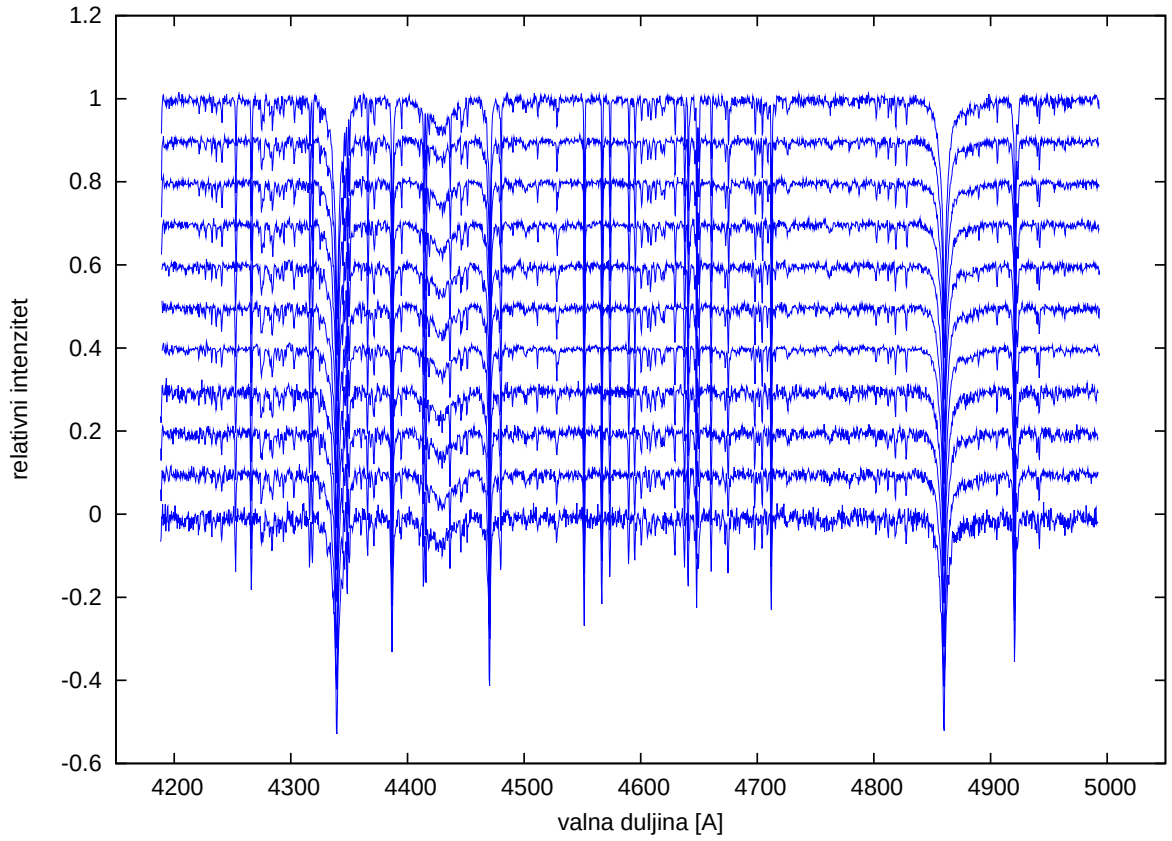
Tablica 9.1: Osnovni podaci spektroskopskih opažanja. N_{obs} je broj opažanja a t_{exp} je vrijeme ekspozicije.

Teleskop / spektrograf	rešetka	N_{obs}	t_{exp} /s	valne duljine Å	datum opažanja
INT/IDS 500 mm	H2400B	24	300	4225-4500	2002/10/14-25
INT/IDS 500 mm	H2400B	6	300	4450-4715	2002/10/11-12
INT/IDS 500 mm	H2400B	1	300	4710-4975	2002/10/23
WHT/ISIS plavi	H2400B	3	300	4320-4740	2004/12/18
WHT/ISIS crveni	R1200R	3	300	5340-6220	2004/12/18
WHT/ISIS plavi	R1200B	15	90-180	4170-5020	2006/06/2-6
WHT/ISIS crveni	R600R	15	90-180	7420-9150	2006/06/2-6
INT/IDS 235 mm	H2400B	7	600	4000-4580	2006/08/7-13
INT/IDS 235 mm	H2400B	1	900	4490-5140	2008/12/25
INT/IDS 235 mm	H2400B	6	900	4450-5100	2009/01/10-14
WHT+ISIS plavi	R1200B	11	30-120	4190-4990	2009/02/16-18
WHT+ISIS plavi	R136R	21	10-70	5760-8890	2009/02/16-18

pomoću disperzijskog spektografa (IDS) sa 500 mm i 235 mm kamerama. Opažanja na WHT-u su vršena pomoću ISIS spektrografa koji istovremeno registrira plavi i crveni spektar. Korišteno je niz rešetki za različita spektralna područja. Detalji spektroskopskih opažanja dani su u tab. 9.1. Spektri su reducirani upotrebom optimalne ekstrakcije (Horne 1986) koja je implementirana u alate PAMELA i MOLLY Marsh (1989). Kalibracija valnih duljina vršena je pomoću bakar - argon i bakar - neon lućnih lampi, te za uniformnost ('flat-field') korištena je volframova lampa. Opažanja i redukciju proveo je Dr. sc. J. Southworth.

Tablica 9.2: Orbitalni elementi s pripadnim pogreškama (prilagodbom parabole) za dvojni sustav V621 Per, pomoću postupka spektralnog raspetljavanja.

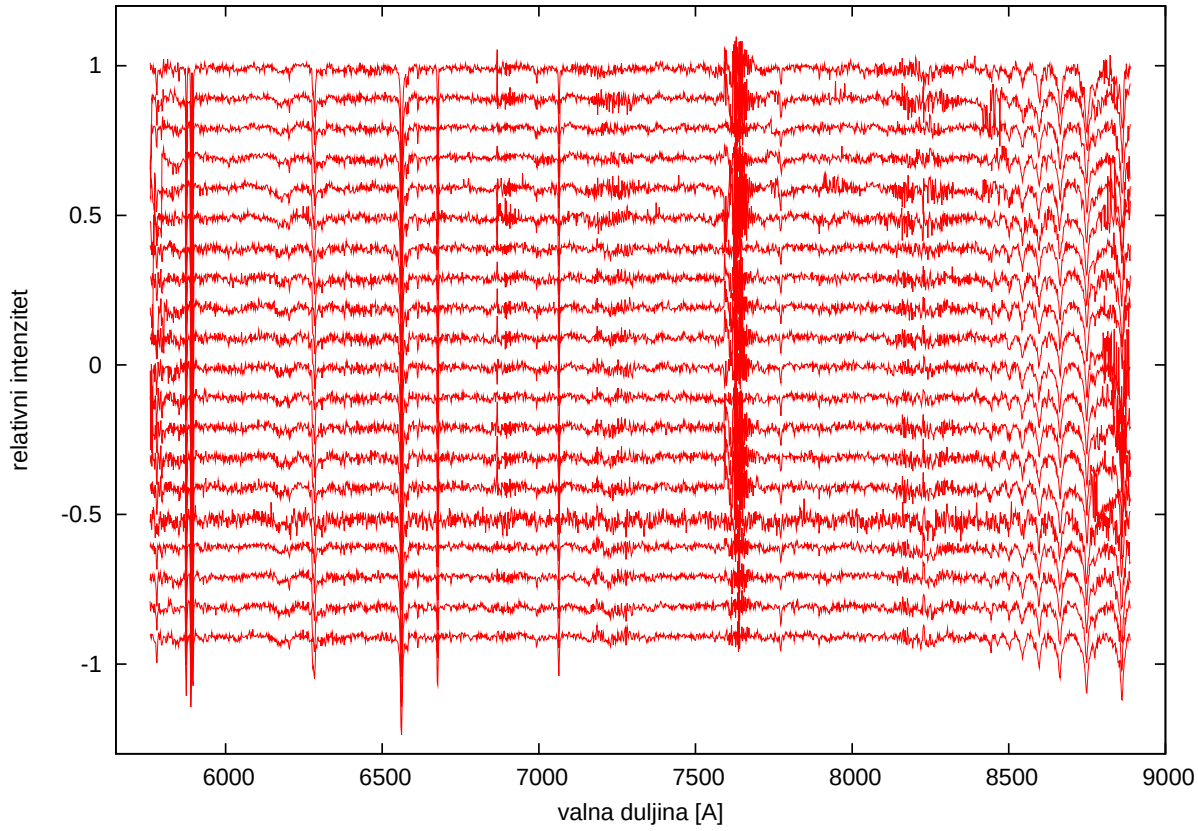
Parametar orbite	vrijednost/pogreška
epoha prolaska periastronom T_0 [HJD]	52565.1567 ± 0.0017
ekscentricitet e	0.2984 ± 0.022
duljina periastrona ω [deg]	233.85 ± 0.76
semiamplituda Rv_A [km/s]	64.73 ± 0.56
semiamplituda Rv_B [km/s]	119.57 ± 2.54



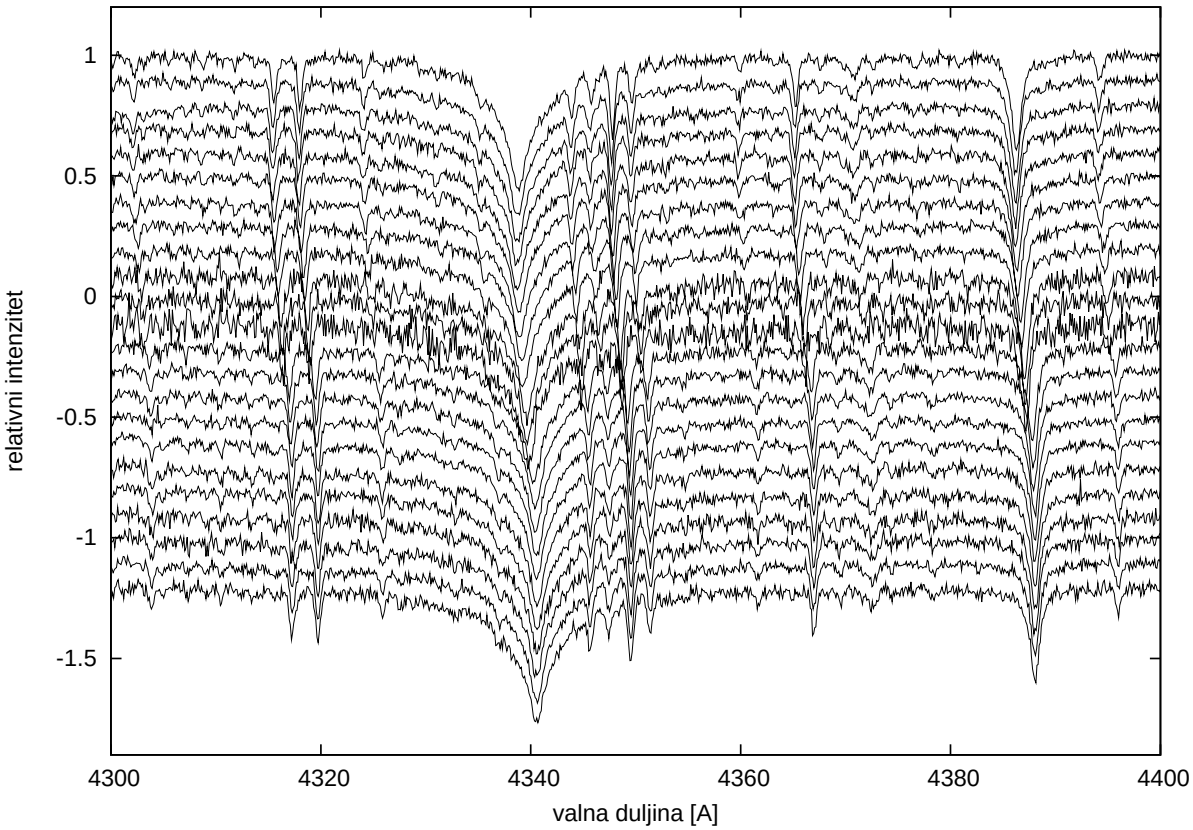
Slika 9.1: Prikaz niza snimljenih spektara V621 Per u plavom dijelu spektra snimljenih u različitim fazama orbite.

Tablica 9.3: Astrofizički parametri dvojnog sustava V621 Per s pripadnim pogreškama dobivenim iz rješenja svjetlosne krivulje i parametara iz postupka spektralnog raspetljavanja.

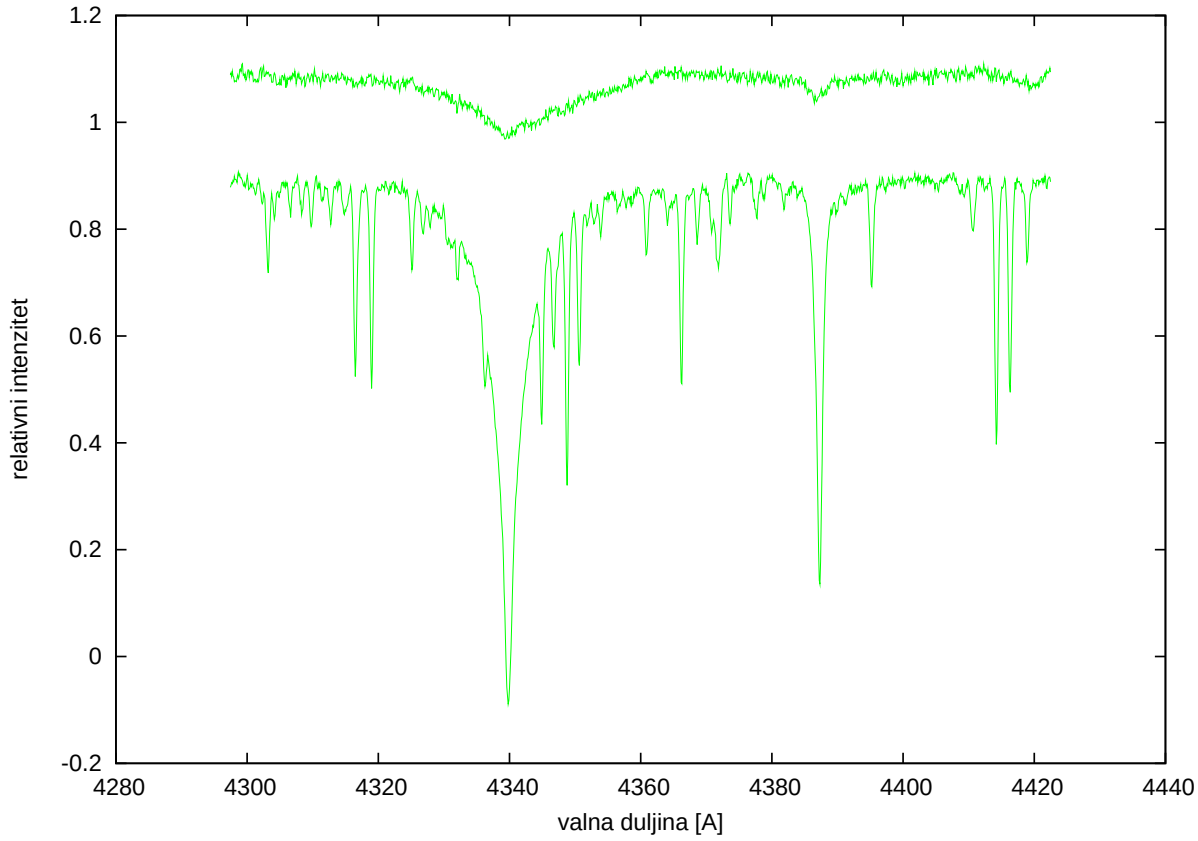
Parametar zvijezde	vrijednost/pogreška
Omjer masa $q = M_2/M_1$	0.541 ± 0.012
M_1 $[M_\odot]$	9.45 ± 0.46
M_2 $[M_\odot]$	5.11 ± 0.16
A [AJ]	89.06 ± 1.26
R_1 $[R_\odot]$	8.97 ± 0.13
R_2 $[R_\odot]$	2.76 ± 0.05
$\log g_1$ $[cm/s^2]$	3.508 ± 0.010
$\log g_2$ $[cm/s^2]$	4.265 ± 0.008



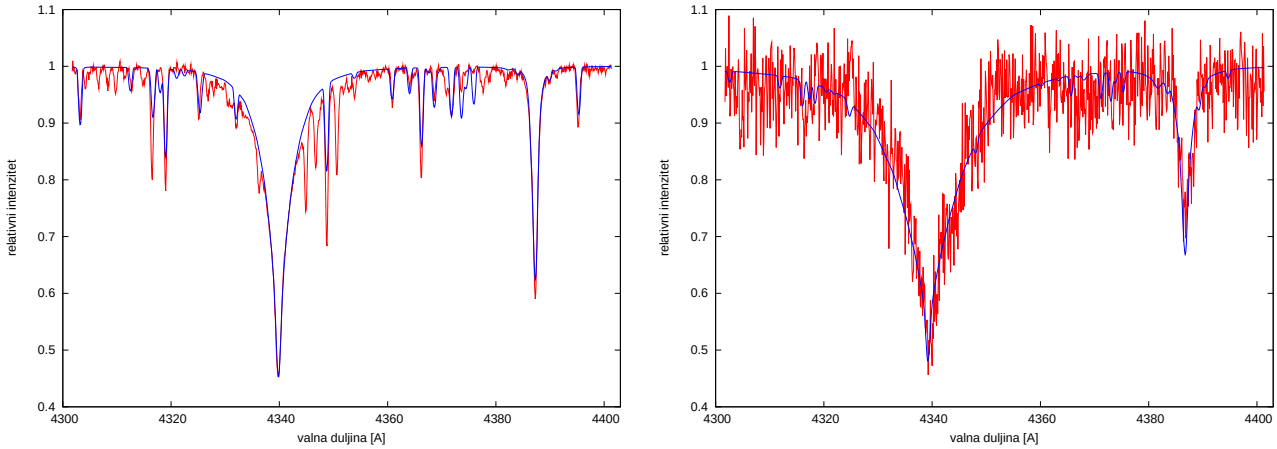
Slika 9.2: Prikaz niza snimljenih spektara V621 Per u crvenom dijelu spektra snimljenih u različitim fazama orbite.



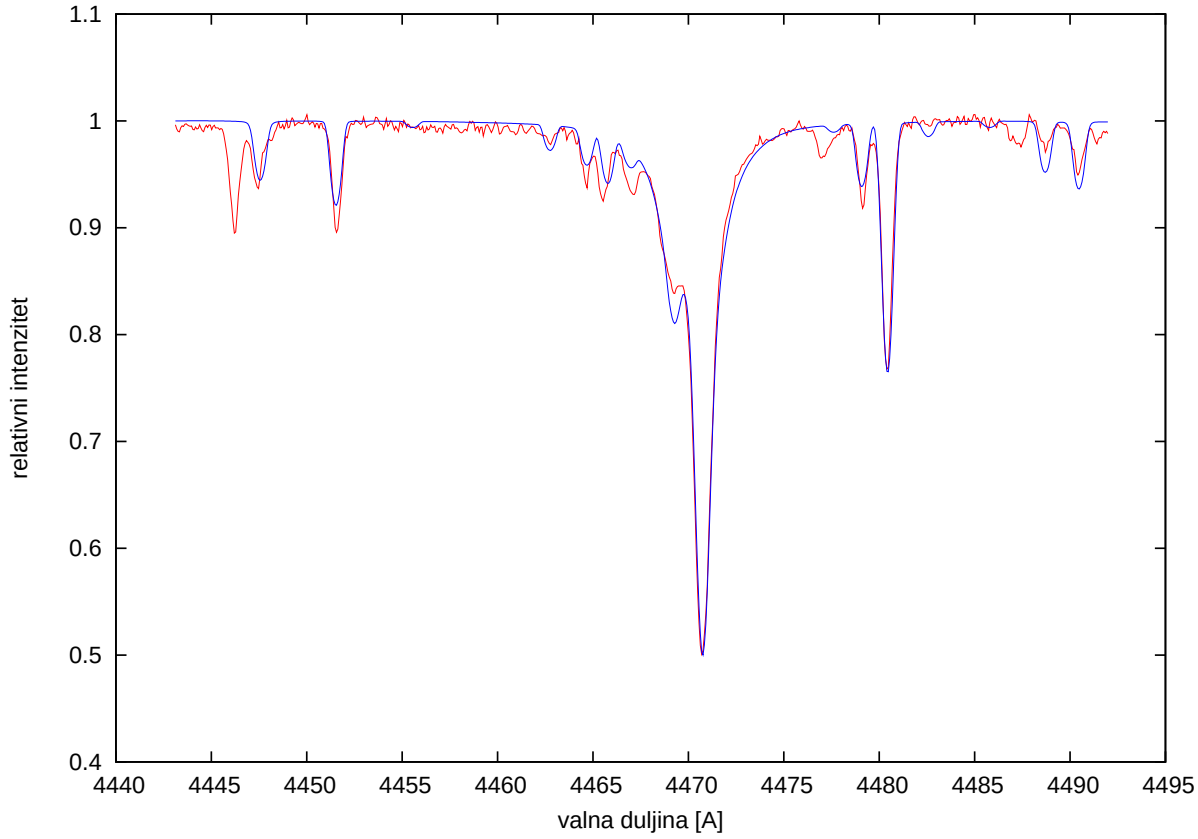
Slika 9.3: Prikaz niza snimljenih spektara V621 Per oko H_γ linije na $\lambda 4340$ Å. Vidljiv je Dopplerov pomak spektralnih linija u različitim fazama orbitalnog perioda.



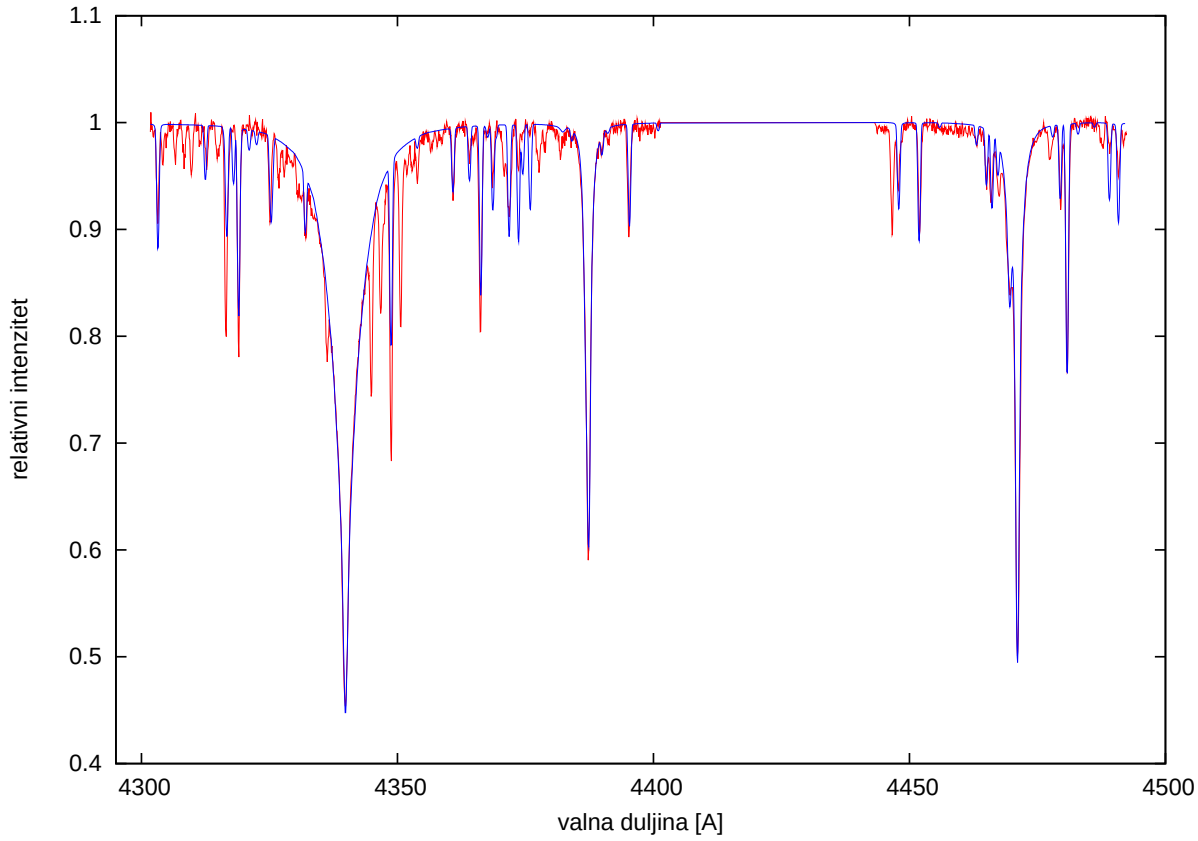
Slika 9.4: Prikaz raspetljanih komponenata dvojnog sustava V621 Per, gdje je vidljiv malen doprinos sekundarne komponente ukupnom sjaju sustava.



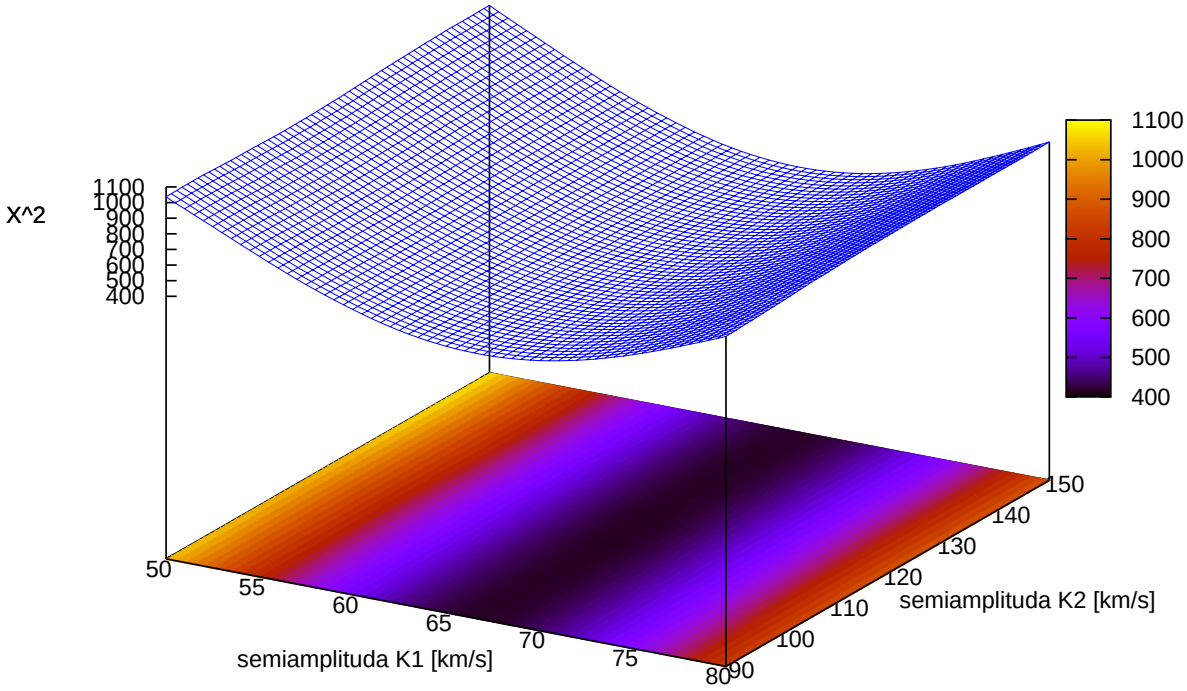
Slika 9.5: Usporedba prilagđenog spektra (plava) i opaženog raspetljanog spektra (crvena) Balmerove H_γ linije i helijeve linije na 4388 Å za primarnu komponentu (lijevo) i za sekundarnu komponentu (desno).



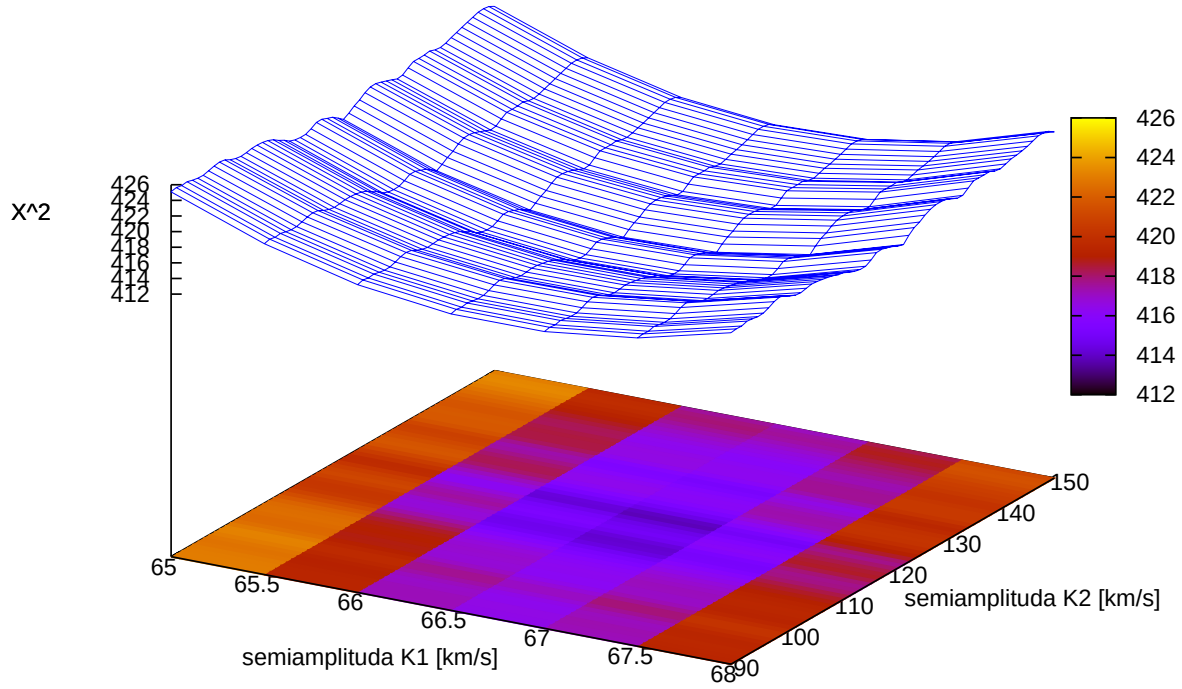
Slika 9.6: Usporedba prilagođenog spektra (plava) i opaženog raspetljanog renormaliziranog spektra (crvena) helijeve linije na 4471 Å za primarnu komponentu.



Slika 9.7: Usporedba prilagođenog spektra (plava) i opaženog raspetljanog spektra (crvena) za primarnu komponentu pri zajedničkoj prilagodbi na Balmerovoj liniji H_γ i helijevih linija na 4388 Å i 4471 Å.



Slika 9.8: Mreža odstupanja vrijednosti parova semiamplituda K_1 i K_2.



Slika 9.9: Mreža odstupanja vrijednosti parova semiamplituda K_1 i K_2 na manjoj skali gdje je vidljivo osciliranje vrijednosti odstupanja za semiamplitudu K_2.

Tablica 9.4: Prilagodbeni postupak rastavljenog profila linije Hγ i helijeve linije λ 4388 Å zvijezde V621 Per. Površinska ubrzanja primarne i sekundarne komponente su fiksirane vrijednostima 3.5 i 4.25 dex.

Parametar	Primarna	Sekundarna
$T_{\rm eff}$ [K]	$22\,639 \pm 260$	$20\,921 \pm 455$
$v \sin i$ [km/s]	32.29 ± 2.72	31.52 ± 3.45

9.3 Spektroskopska orbita pomoću SPD tehnike

Iz prethodne fotometrijske i spektroskopske analize Southworth et al. (2004) su procijenili da sekundarna komponenta doprinosi 5 % ukupnom sjaju sustava. Međutim, koristeći tehniku kros-korelacije nisu uspjeli u kros-korelacijskoj funkciji utvrditi naznake spektra sekundarne komponente. Zbog toga nisu mogli odrediti spektroskopski omjer masa, već mase komponenata procjenjuju koristeći funkciju mase. Definitivno potvrđuju svojstva primarne komponente kao B2 diva, dok je sekundarna komponenta još uvijek zvijezda s glavnog niza.

U našoj analizi koristili smo SPD tehniku. Za analizu smo pripremili najpotpuniji niz spaktara iz listopada 2002 koji sadrži 24 spektara u plavom području $\lambda\lambda$ 4225 - 4800 Å. To je niz koji su u analizi koristili Southworth et al. (2004). Pomoću SPD tehnike smo otkrili spektar sekundarne komponente, što je omogučilo direktno (spektroskopsko) određivanje omjera masa komponenata. Elementi spektroskopske orbite dani su u tab. 9.2. Naša analiza potvrđuje ekscentricitet orbite i semiamplitudu K_1 primarne komponente koji su odredili Southworth et al. (2004).

Otkriće spektra sekundarne komponente omogućilo nam je detaljni proračun astrofizičkih parametara komponenata V621 Per (tab. 9.3). Svojstva komponenata određena su komplementarnom analizom nekih fotometrijskih mjerenja prikupljenih u velikoj međunarodnoj kampanji (Saesen et al. 2008) i naše spektroskopske analize. Obzirom da sekundarna komponenta doprinosi ~ 5 % svjetla, može se očekivati veća nepouzdanost u određivanju njezine semiamplitude radijalnih brzina K_2. Zbog toga je provedeno vrlo detaljno pretraživanje parametarskog prostora brzina. SPD tehnikom provedeno je određivanje sume odstupanja za mrežu semiamplituda komponenata u velikoj mreži koja je sadržavala $K_1 = 50$ - 80 km/s s korakom od 1 km/s i $K_2 = 90$ - 150 km/s s korakom od 0.5 km/s.

Gridanje je prikazano na sl. 9.8. Očigledno je da je minimum K_1 vrlo dobro definiran, dok je određivanje K_2 puno nepouzdanije zbog više lokalnih minimuma koji se vide u detaljnom prikazu (sl. 9.9).

Tablica 9.5: Prilagodbeni postupak rastavljenog profila linije helija $\lambda\,4471$ Å zvijezde V621 Per. Površinsko ubrzanje primarne komponente je fiksirano na vrijednost 3.5 dex.

Parametar	Primarna
$T_{\rm eff}$ [K]	$22\,433 \pm 136$
$v \sin i$ [km/s]	29.87 ± 0.12

Tablica 9.6: Prilagodbeni postupak rastavljenog profila linije Balmerove H_γ linije i obje helijeve linije $\lambda\lambda\,4388$ i 4471 Å zvijezde V621 Per. Površinsko ubrzanje primarne komponente je fiksirano na vrijednost 3.5 dex.

Parametar	Primarna
$T_{\rm eff}$ [K]	$22\,864 \pm 142$
$v \sin i$ [km/s]	27.86 ± 0.13

Tablica 9.7: Zastupljenost elemenata u atmosferi primarne komponente V621 Per. Broj korištenih linija nalazi se u uglatim zagradama. Zastupljenosti Sunčeve fotosfere i galaktičkih OB zvijezda (Hunter et al. 2009) dani su u trećem stupcu, dok četvrti stupac pokazuje Sunčevu zastupljenost iz rada Grevesse et al. (2007). Zastupljenosti elemenata, osim onih za helij, dani su u skali u kojoj je $\log \epsilon(\mathrm{H}) = 12$.

Element	V621 Per A	OB zvijezde	Sunce
$N(\mathrm{He})/N(\mathrm{H})$	0.091±0.009	0.098±0.014	0.093±0.002
$\log \epsilon(\mathrm{C})$	8.31±0.06 [2]	8.00±0.19	8.39±0.05
$\log \epsilon(\mathrm{N})$	7.64±0.02 [16]	7.62±0.12	7.78±0.06
$\log \epsilon(\mathrm{O})$	8.75±0.02 [28]	8.63±0.16	8.66±0.05
$\log \epsilon(\mathrm{Mg})$	7.45±0.03 [1]	7.25±0.17	7.53±0.09
$\log \epsilon(\mathrm{Si})$	7.31±0.08 [8]	7.42±0.07	7.51±0.04
$\log \epsilon(\mathrm{Al})$	6.03±0.04 [2]	5.94±0.14	6.37±0.04

9.4 Spektroskopska analiza

Izdvajanje spektra pojedinih komponenata omogučilo je preciznije određivanje efektivnih temperatura (površinsko ubrzanje određeno je iz dinamike sustava). Prilagođenje teorijskih profila vodika linije H_γ rekonstruiranoj liniji H_γ iz raspetljanih komponenata spektra dalo je efektivne temperature obiju komponenata (tab. 9.4). Svjetlosni su faktori preuzeti iz analize svjetlosne krivulje (Southworth et al. 2009).

S poznatim $T_{\rm eff}$ i $\log g$ konstruirani su modeli atmosfera pomoću $ATLAS9$ (Kurucz 1979) za različite vrijednosti udjela helija. Zastupljenost helija određena je iz minimuma kvadrata odstupanja renormaliziranih spektara s teorijskim. Zastupljenost helija iz različitih linija dana je u tab. 9.7. Potrebna mikroturbulentna brzina određena je iz silicijevog tripleta na 4550 - 4580 Å. Dobivena je $v_{turb} = 12\,{\rm km/s}$. Postupkom koji je detaljno opisan u pogl. 7.6.2 za V380 Cyg, određene su zastupljenosti ugljika, dušika, kisika, aluminija, magnezija i silicija. Dobiveni rezultati dani su u tab. 9.7. Niti za jedan od navedenih elemenata nije nađena zastupljenost koja bi upućivala na razliku prema normalnoj zastupljenosti kod B zvijezda. Kao što je bilo nađeno u slučaju primarne komponente V380 Cyg, kemijska zastupljenost elemenata ne potvrđuje predviđanja rotacijskih evolucijskih modela. Razloge bismo mogli tražiti u činjenici da su proračuni modela provedeni za pojedinačne zvijezde, a ne zvijezde u dvojnom sustavu. Plimne sile i drugi elementi u sustavima dvojnih i višestrukih zvijezda mogli bi promjeniti tijek razvoja komponenata. S druge strane, zvijezde koje su bile predmet detaljnih istraživanja u ovoj disertaciji u donjem su dijelu skupine zvijezda velikih masa. Zbog toga ostaje mogućnost da su naši rezultati odredili donju granicu kada se manifestiraju efekti rotacijskog miješanja tvari u zvijezdama velikih masa, $M > 8\,M_\odot$.

9.5 Zaključak

V621 Per je spektroskopska dvojna zvijezda čija je primarna komponenta B2 div, a sekundarna je komponenta zvijezda glavnog niza. Apsolutni zvjezdani parametri ovog dvojnog sustava dani su u tab. 9.2 i 9.3. Unatoč malenom doprinosu sekundarne komponente ukupnom luminozitetu dvojnog sustava, primjenom postupka spektralnog raspetljavanja (SPD) otkrivamo i nešto hladniju sekundarnu komponentu koja do sada nije bila dokazana. Njen je svjetlosni doprinos određen iz fotometrijskih mjerenja (Southworth et al. 2004) i iznosi $\sim 5\,\%$. Na raspolaganju je bio velik broj spektara iz različitih spektralnih područja. Tako je kvaliteta raspetljanih komponenata bila dovoljna za određivanje fizikalnih parametara obiju komponenata.

Genetičkim postupkom prilagodbe (Tamajo et al. 2009) uspjeli smo odrediti efektivne tem-

perature pojedinih komponenata i tako dokazali da bez obzira na malen svjetlosni doprinos sekundarne komponente, SPD tehnika omogućava njenu detekciju.

10. ZAKLJUČAK

U posljednjih desetak godina učinjen je vrlo značajni napredak u teorijskim proračunima evolucijskih modela zvijezda. Rotacija zvijezde i magnetsko polje mogu značajno utjecati na strukturu i razvoj zvijezde. Cilj je ove doktorske disertacije bilo testiranje teorijskih predviđanja evolucijskih modela zvijezda u kojima je uključen efekt rotacije potpomognute mješanjem zvjezdane tvari.

Teorijski modeli rotirajućih zvijezda za razliku od ranijih statičkih modela ukazuju na već značajne promjene tijekom razvoja zvijezde na glavnom nizu. To se očituje kroz (i) veći luminozitet u ranijim fazama razvoja prije i poslje TAMS-a, i (ii) promjene u kemijskom sastavu zvjezdane atmosfere s predviđanjem porasta udjela helija i dušika, te smanjenju udjela ugljika i kisika.

Procijena teorijskih modela moguća je jedino ako su temeljne astrofizičke veličine (masa, polumjer i efektivna temperatura) zvijezde poznati u točnost od 1-2 %, što je vrlo velik zahtjev na opažačke (analitičke) postupke. U ovom radu odabrane su tri dvojne zvijezde koje imaju komponente ranog B spektralnog tipa i imaju mase koje ih kvalificiraju među zvijezde velikih masa ($M > 8\,M_{\odot}$). Dvojni sustav V380 Cyg i V621 Per imaju komponente koje su u idealnoj fazi razvoja. Njihove su komponente s većom masom evolucijski u fazi oko plave petlje gdje bi efekti razvoja zvijezda velikih masa trebali doći do izražaja kroz opća svojstva (luminozitet) i kemijska svojstva atmosfera kroz promjene u zastupljenosti elemenata.

Treći sustav u ovom istraživanju V615 Per ima komponente koje još nisu značajno odmakle u razvoju na glavnom nizu i poslužio je kao dobar referentni sustav za kalibraciju analitičkih postupaka.

Metoda spektralnog raspetljavanja (SPD) niza složenih spektara dvojnih sustava zvijezda omogućuje izdvajanje individualnih spektara pojedinih komponenata, a renormalizacija omogućuje detaljnu spektroskopsku analizu (Pavlovski & Hensberge 2009). Izuzetna vrijednost ove metode koja je u nekim dijelovima u ovom radu dalje unapređena, je ujedno istovremeno određivanje orbitalnih parametara dvojnog sustava. U ovom radu pokazano je također da točnost orbitalnih elemenata dobivenih SPD tehnikom nadmašuje mogućnosti ostalih metoda kao što je kroskorelacija.

Detaljno određivanje zastupljenosti elemenata u atmosferama evolucijski naprednijih komponenata dvojnih sustava V380 Cyg i V621 Per nije potvrdilo teorijska predviđanja. Zastupljenost helija i CNO elemenata u njihovim atmosferama odgovara zastupljenosti elemenata u atmosferama normalnih OB zvijezda. Objašnjenje ovog efekta treba tražiti u činjenici da zvijezde iz našeg istraživanja imaju mase koje su iz donjeg dijela raspona zvijezda velikih masa (V380 Cyg A ima masu $13.1\,M_{\odot}$, a V621 Per A ima masu $9.45\,M_{\odot}$).

S druge strane njihove su rotacijske brzine, također određene u ovom radu, manje nego bismo to očekivali slijedeći svojstva izoliranih OB zvijezda. Drugim riječima, vrlo vjerojatno je razvoj zvijezda u dvojnim sustavima značajno promjenjen plimnim silama. To bismo mogli smatrati i glavnim zaključkom istraživanja provedenih u ovome radu. Bez teorijskih modela evolucije rotirajućih zvijezda u dvojnim sustavima napredak u razumjevanju evolucije zvijezda teško će biti ostvariv.

REFERENCE:

Andersen J., 1991, A&AR, 3, 91

Andersen J., Clausen J. V., Nordström B., Ap&J, 1990, 363, L33

Barai P., Gies D. R., Choi E., et al., Ap&J, 2004, 608, 989

Batten A. H., 1962, Publ. Dom. Astrophys. Obs. Victoria, 12, 91

Becker S., Butler K., 1990, A&A, 235, 326

Bessell M., Castelli F., Plez B., 1998, A&A, 333, 231

Bevington P. R., 1969, Data reduction and error analysis for the physical sciences, McGraww-Hill

Bodenheimer P., 1995, A&A, 33, 199

Butler K., 1984, PhD thesis, University of London

Capilla G., Fabregat J., 2002, A&A, 394, 479

Catanzaro G., 2008, MNRAS, 385, L33

Chaboyer B., Zahn J. P., 1992, A&A, 253, 173

Charbonneau P., 1995, ApJS, 101, 309

Chiosi C., Maeder A., 1986, ARA&A, 24, 329

Claret A., 1995, A&AS, 109, 441

Claret A., 1998, A&AS, 131, 395

Claret A., 2000, A&A, 363, 1081

Claret A., 2001, MNRAS, 327, 989

Claret A., 2003, A&A, 399, 1115

Claret A., 2007, A&A, 475, 1019

Claret A., Giménez A., 1995, A&AS, 114, 549

Crawford J. A., 1955, PASP Conf. Ser., 67, 24

Daflon S., Cunha K., Smith V. V., Butler K., 2003, A&A, 399, 525

Daflon S., Cunha K. 2004, Ap&J, 617, 1115

Daflon S., Cunha K., Butler K. 2004, Ap&J, 606, 514

Daflon S., Cunha K., Smith V., Butler K. 2003, A&A, 399, 525

de Mink S. E., Cantiello M., Langer N., Yoon S.-Ch., Brott I., Glebbeek E., Verkoulen M., Pols O. R., 2008, in 'The Art of Modeling Stars in the 21st Century', eds. L. Deng and K. L. Chan, IAU Symp. 252, 365

de Mink S. E., Cantiello M., Langer N., Pols O. R., Brott I., Yoon S.-Ch., 2009, A&A, 497, 243

de la Fuente Marcos A., de la Fuente Marcos B., 2009, NewA, 25, 555

Denissenkov P., 1994, ems. conf., 405

Dufton P. L., Brown P. J. F., Fitzsimmons A., Lennon D. J., 1990, A&A, 232, 431

Eddington A. S., 1925, The Observatory, 48, 73

Ekström S., Meynet G., Maeder A., Barblan F., 2008, A&A, 478, 467

Eryurt D., Kirbiyik H., Kiziloglu N., Civelek R., Weiss A., 1994, in 'Pulsation; rotation; and mass loss in early-type stars', eds. Luis A. Balona, Huib F. Henrichs and Jean Michel Contel, IAU Symp. 162, 149

Eryurt D., Kirbiyik H., Kiziloglu N., Civelek R., Weiss A., 1994, A&A, 282, 485

Evans C. J., Smartt S. J., Lee J. K., et al., 2005, A&A, 437, 467

Evans C. J., Smartt S. J., Lee J. K., et al., 2006, A&A, 456, 623

Fabregat J., Torrejón J. M., Reig P., Bernabeu G., Busquets J., Marco A., Reglero V., 1996, A&AS, 119, 271

Flower P. J., 1996, Ap&J, 469, 355

Frandsen S., Lindberg B., 1999, in 'Astrophysics with the NOT', eds. H. Harttunen & V. Piirola, University of Turku, 71

Fricke K. J., Kippenhahn R., 1972, ARA&A, 10, 45

Giddings J., 1981, PhD thesis, University of London

Gies D. R, Lambert, D. L., 1992, Ap&J, 387, 673

Girardi L., Bertelli G., Bressan A., Chiosi C., Groenewegen M. A. T., Marigo P., Salasnich B., Weiss A., 2002, A&A, 391, 195

Goldberg D. E., 1989a, Complex Systems, 3, 153

Goldberg D. E., 1989b, Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley

Grevesse N., Asplund M., Sauval A. J., 2007, Space Sci. Rev. 130, 105

Guinan E. F., Dewarf L. E., Maloney F. P., Fitzpatrick E. L., Maurone P. A., Bradstreet D. H., Ribas, I., Gimenez A. 1997, A&AS, 29, 1209

Guinan E. F., Ribas I., Fitzpatrick E. L., et al., 2000, Ap&J, 544, 409

Guinan E. F., 2000, hst. prop., 8691G

Hadrava P., 1995, A&AS, 95, 101

Hadrava P., 1995, A&AS, 114, 393

Hartmann L. W., Noyes R.W., 1987, ARA&A, 25, 271

Heger A., Langer N., 2000, Ap&J, 544, 1016

Heger A., Langer N., Woosley S. E., 2000, Ap&J, 528, 368

Hensberge H., Pavlovski K., 2007, in 'Binary Stars as Critical Tools and Tests in Contemporary Astrophysics', eds. W. I. Hartkopf, E. F. Guinan & P. Harmanec, IAU Symp. 240, 136

Hensberge H., Ilijić S., Torres K. B. V., 2008, A&A, 482, 1031

Hensberge H., Pavlovski K., Verschueren W., 2000, A&A, 358, 553

Herrero A., 1987, A&A, 171, 189

Herrero A., 2003, in 'CNO in the universe', eds. C. Charbonnel, D. Schaerer and G. Meynet, ASP Conf. Ser. 304, 10

Herrero A., Kudritzki R. P., 1992, Lecture Notes in Physics, 401, 21

Herrero A., Kudritzki R. P., Vilchez J. M., Kunze D., Butler K., Haser S., 1992, A&A, 261, 209

Herrero A., Villamariz M. R., Martin E. L., 1998, in 'Boulder-Munich II: Properties of Hot, Luminous Stars', ed. Ian Howarth, ASP Conf. Ser. 131, 159

Herrero A., Villamariz M. R., 1999, in 'Wolf-Rayet Phenomena in Massive Stars and Starburst Galaxies', eds. Karel A. van der Hucht, G. Koenigsberger and Philippe R. J. Eenens, IAU Symp. 193, 244

Herrero A., Puls J., Villmariz M. R., 2000, A&A, 354, 193

Hilditch R. W., 2004, in 'Spectroscopically and Spatially Resolving the Components of the Close Binary Systems', eds. R. W. Hilditch, H. Hensberge & K. Pavlovski, ASP Conf. Ser. 318, 198

Hill G., Batten A. H., 1984, A&A, 141, 39

Høg E., Bässgen G., Bastian U., et al., 1997, A&A, 323, L57

Holland J. H., 1975, Ann Arbor: University of Michigan Press

Holweger H., 2001, in 'Solar and Galactic Composition', ed. R. F. Wimmer-Schweingruber, AIP Conf. Proc. 598, 23

Horn J., Kubat J., Harmanec P., Koubský P., Hadrava P., Šimon V., Štefl S., Škoda P., 1996, A&A, 309, 521

Horne K., 1986, PASP, 98, 609

Howarth I. D., Smith K. C., 2001, MNRAS, 327, 353

Huang W., Gies D. R., 2006a, Ap&J, 648, 580

Huang W., Gies D. R., 2006b, Ap&J, 648, 591

Hubeny I., 1988, Comput. Phys. Commun., 52, 103

Humphreys R. W., 1970, Ap&J, 160, 1149

Hunter I., Brott I., Langer N., et al., 2009, A&A, 496, 841

Hunter I., Brott I., Lennon D., et al., 2008, Ap&J, 676, L29

Hunter I., Dufton P.L., Smartt S. J., et al., 2007, A&A, 466, 27-7

Hynes R. I., Maxted P. F. L., 1998, A&A, 331, 167

Ilijić S., 2004, in 'Spectroscopically and Spatially Resolving the Components of the Close Binary Systems', eds. R. W. Hilditch, H. Hensberge & K. Pavlovski, ASP Conf. Ser. 318, 107

Ilijić S., Hensberge H., Pavlovski K., Freyhammer L. M., 2004, in 'Spectroscopically and Spatially Resolving the Components of the Close Binary Systems', eds. R. W. Hilditch, H. Hensberge & K. Pavlovski, ASP Conf. Ser. 318, 111

Jeans J. H., 1928, Nature, 121, 674

Keller S. C., Grebel E. K., Miller G. J., Yoss K. M., 2001, AJ, 122, 248

Kippenhahn R., 1977, A&A, 58, 267

Kippenhahn R., Weigert A., 1994, Stellar Structure and Evolution, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York

Klochkova V. G., Panchuk V. E., 1987, SvAL, 13, 23

Krzesiński J., Pigulski A., 1997, A&A, 325, 987

Krzesiński J., Pigulski A., Kolaczkowski Z., 1999, A&A, 345, 505

Kudritzki R. P., 1980, A&A, 85, 174

Kurucz R. L., 1979, Ap&JS, 40, 1

Kurucz R. L., 1993b, CD-ROM 13, SAO

Langer N., 1991, A&A, 252, 669

Langer N., 1992, A&A, 265, L17

Langer N., Heger A., Wellstein S., Herwig F., 1999, A&A, 346, L37

Langer N., Cantiello M., Yoon S. C., Hunter I., Brott I., Lennon D., de Mink S., Verheijdt M., 2008, in 'Massive stars as cosmic engines', eds. F. Bresolin, P. A. Crowther, J. Puls, IAU Symp. 250, 167

Lennon D. J., Brown P. J. F., Dufton P. L., 1988, A&A, 195, 208

Levenberg K., 1944, Quart. Appl. Math., 2, 164

Leushin V. V., 1984, Soviet Astron., 28, 427

Leushin V. V., 1988, Soviet Astron., 32, 517

Leushin V. V., 1988, Soviet Astron., 32, 430

Leushin V. V., 1988, Soviet Astron., 32, 291

Leushin V. V., Topilskaya G. P., 1986, Astrophysics, 25, 503

Lyubimkov L. S., 1984, Astrofizika, 20, 255

Lyubimkov L. S., 1989, Astrofizika, 30, 99

Lyubimkov L. S., 1989, Astrofizika, 30, 58

Lyubimkov L. S., 1991, in 'Evolution of Stars: the Photospheric Abundance Connection', eds. G. Michaud and A. V. Tutukov, IAU Symp. 145, 125

Lyubimkov L. S., 1995, Bull. of the Crim. Astrophys. Obs., 91, 17

Lyubimkov L. S., Rachkovskaya T. M., Rostophchin S. I., Tarasov A.E., 1996, Astron. Rep., 40, 46

Lyubimkov L. S., 1996, Ap&SS, 243, 329

Lyubimkov L. S., 1998, ARep, 42, 52

Lyubimkov L. S., Rostopchin, S. I., et al., 1997, MNRAS, 286, 549

Lyubimkov L. S., Rostopchin S. I., Lambert D. L., 2004, MNRAS, 351, 745 (LRL04)

Lyubimkov L. S., Rostopchin S. I., Rachkovskaya T. M., Poklad D. B., Lambert D. L., 2005, MNRAS, 358, 193

Maeder A., 1995, A&A, 299, 84

Maeder A., 1996, in 'From Stars to Galaxies: The Impact of Stellar Physics on Galaxy Evolution', eds. C. Leitherer, U. Fritze-von-Alvensleben and J. Huchra, ASP Conf. Ser. 98, 141

Maeder A., 1999, A&A, 347, 185

Maeder A., Zahn, J. P., 1998, A&A, 334, 1000

Maeder A., Meynet G., 2000, ARA&A, 38, 143

Maeder A., Meynet G., 1996, A&A, 313, 140

Maeder A., Meynet G., 2000, A&A, 361, 159

Maeder A., Meynet G., 2000, A&A, 361, 101

Marco A., Bernabeu G., 2001, A&A, 372, 477

Marquardt D., 1963, SIAM J. Appl. Math., 11, 431

Marsh T. R., 1989, PASP, 101, 1032

Matthews T. A., Sandage, A. R., 1963, Ap&J, 138, 30

Meynet G., Maeder A., Schaller G., Schaerer D., Charbonnel C., 1994, A&AS, 103, 97

Meynet G., 1996, in 'From Stars to Galaxies: The Impact of Stellar Physics on Galaxy Evolution', eds. C. Leitherer, U. Fritze-von-Alvensleben and J. Huchra, ASP Conf. Ser. 98, 160

Meynet G., Maeder A., 1997, A&A, 321, 465

Meynet G., Maeder A., 2000, A&A, 361, 101

Milne E. A., 1923, MNRAS, 83, 118

Mokiem M. R., de Koter A., Puls J., Herrero A., Najarro F., Villamariz M. R., 2005, A&A, 441, 711

Morel T., Butler K., Aerts C., Neiner C., Briquet M., 2006, A&A, 457, 651

Morel T., Hubrig S., Briquet M., 2008, A&A, 481, 453

Morel T., 2009, in 'Evolution and Pulsation of Massive Stars on the Main Sequence and Close to it', 38th Liege Coll., Comm. Asteroseismology, 158, 122

Nieva M. F., Przybilla N., 2007, A&A, 467, 295

Nissen P. E., 1976, A&A, 50, 343

Oosterhoff P. Th., 1937, Ann. Sternw. Leiden, 17, 1

Pavlovski K., 2004, in 'Spectroscopically and Spatially Resolving the Components of the Close

Binary Systems', eds. R. W. Hilditch, H. Hensberge & K. Pavlovski, ASP Conf. Ser., 318, 206

Pavlovski K., Hensberge H., 2005, A&A, 439, 309 (PH05)

Pavlovski K., Hensberge H., 2009, in 'Binaries - Key to Comprehension of the Universe', ASP Conf. Ser. (in press, arXiv:0909.3246v1)

Pavlovski K., Southworth J., 2009, MNRAS, 394, 1519

Pavlovski K., Tamajo E., Koubský P., Southworth J., Yang S., Kolbas V., 2009, MNRAS (in press, arXiv:0908.0351v1)

Pavlovski K., Tamajo E., 2007, in 'Binary Stars as Critical Tools and Tests in Contemporary Astrophysics', eds. W. I. Hartkopf, E. F. Guinan & P. Harmanec, IAU Symp. 240, 209

Pavlovski K., Holmgren D. E., Koubský P., Southworth J., Yang S., 2006, Ap&SS, 304, 329

Pfeiffer M. J., Frank C., Baumüller D., Fuhrmann K., Gehren T., 1998, A&AS, 130, 381

Pinsonneault M., 1997, ARA&A, 35, 557

Popper D. M., Guinan E. F., 1998, PASP, 110, 572

Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling, W. T., Flannery B. P., 1992, Numerical Recipes in Fortran 77: The Art of Scientific Computing, Cambridge University Press

Przybilla N., Butler K., 2001, A&A, 379, 955

Puls J., Urbaneja M. A., Venero R., Repolust T., Springmann U., Jokuthy A., Mokiem M. R., 2005, A&A, 435, 669

Ribas I., Jordi C., Giménez Á., 2000, MNRAS, 318, L55

Ribas I., Jordi C., Vilardell F., 2005, ApJ, 635, L37

Saesen S., Pigulski A., Carrier F. et al., 2008, in 'Helioseismology, Asteroseismology and MHD Connections', eds. L. Gizon and M. Roth, JPh Conf. Ser. 118, 1

Samland M., 1998, ApJ, 496, 155

Sandage A. R., Schwarzschild M., 1952, ApJ, 116, 463

Schaller G., Schaerer D., Meynet G., Maeder A., 1992, A&AS, 96, 269

Simon K. P., Sturm E., 1994, A&A, 281, 286

Simon K., Sturm E., Fiedler A., 1994, A&A, 292, 507

Slesnick C. L., Hillenbrand L. A., Massey P., 2002, Ap&J, 576, 880

Skrutskie M. F., Cutri R. M., Stiening R., et al., 2006, AJ, 131, 1163

Smartt S. J., Rolleston W. R. J., 1997, Ap&J, 481, L47

Southworth J., 2008, MNRAS, 386, 1644

Southworth J., Clausen J. V., 2007, A&A, 461, 1077

Southworth J., Bruntt H., Buzasi D. L., 2007, A&A, 467, 1215

Southworth J., Maxted P. F. L., Smalley B., 2004, MNRAS, 351, 1277

Southworth J., Zucker S., Maxted P. F. L., Smalley B., 2004c, MNRAS, 355, 986

Southworth J., Maxted P. F. L., Smalley B., 2005, A&A, 429, 645

Southworth J., Hinse T. C., Burgdorf M. J., et al., 2009, MNRAS, 399, 287

Spiegel E. A., Zahn J. P., 1992, A&A, 265, 106

Strittmatter P. A., 1969, ARA&A, 7, 665

Sturm E., Simon K. P., 1994, A&A, 282, 93

Škoda P., 1996, in 'Astronomical Data Analysis Software and Systems V', eds. G. H. Jacoby and J. Barnes, ASP Conf. Ser. 101, 187

Sweet P. A., 1950, MNRAS, 110, 548

Talon S., Zahn J. P., 1997, A&A, 317, 749

Talon S., Zahn J. P., et al., 1997, A&A, 322, 209

Tamajo E., Pavlovski K., Southworth J., 2009, A&A (submitted)

Tassoul J. L., 1978, Princeton Series in Astrophysics, Princeton: University Press

Tassoul J. L., 1990, Ap&J, 358, 196

Tomkin J., 1989, in 'Space Science Reviews', 107th Coll. on Algols, 50, 245

Trundle C., Dufton P. L., Hunter I., et al., 2007, A&A, 471, 625

Uribe A., García-Varela J.-A., Sabogal-Martínez B.-E., et al., 2002, PASP, 114, 233

Van Hamme W., 1993, AJ, 106, 2096

Venn K. A., 1995, Ap&J, 449, 839

Venn K. A., 1995, Ap&JS, 99, 659

Venn K. A., 1999, Ap&J, 518, 405

Venn K. A., Brooks A. M., Lambert D. L., Lemke M., Langer N., Lennon D. J., Keenan F., P.,

2002, Ap&J, 565, 571

Villamariz M. R., Herrero A., 2000, A&A, 357, 597

Vogt H., 1925, AN, 225, 315

von Zeipel H., 1924, MNRAS, 84, 684

Vrancken M., Lennon D. J., Dufton P. L., Lambert D. L., 2000, A&A, 358, 639

Weiss A., 1994, A&A, 284, 138

Wilson R. E., 1979, Ap&J, 234, 1054

Wilson R. E., 1993, in 'New frontiers in binary star research', eds. Kam-Ching Leung and Il-Seong Nha, ASP Conf. Ser. 38, 91

Wilson R. E., 1990, Ap&J, 356, 613

Wilson R. E., Devinney E. J., 1971, Ap&J, 166, 605

Wilson R. E., Van Hamme W., 2004, Computing Binary Star Observables

Wolff S. C., Heasley J. N., 1985, Ap&J, 292, 589

Zahn J. P., 1983, in 'Astrophysical Processes in Upper Main Sequence Stars', eds. B. Hauck and A. Maeder, Geneva Observatory, 253

Zahn J. P., 1992, A&A, 265, 115

Zahn J. P., 1994, ems. conf., 285

Zahn J. P., 1997, in 'Solar Convection and Oscillations and their Relationship', eds. F. P. Pijpers, J. Christensen-Dalsgaard, and C. S. Rosenthal, Ap&SS Library 225, 187

Zahn J. P., 1997, in 'Sounding solar and stellar interiors', eds. J. Provost and F. X. Schmider, IAU Symp. 181, 175

DODATAK

Tablica 1: Opažački dnevnik crvenih spektara mjerenih u Ondřejovu za V380 Cyg.

Set	ID	HJD	Phase	S/N
AUO	nh060033	53224.5345	963.1629	406
AUO	nj050015	53284.3204	967.9744	476
AUO	nj110016	53290.3615	968.4607	523
AUO	of190036	53541.4822	988.6701	256
AUO	pi240037	54003.3681	1025.8419	327
AUO	pj100025	54019.4183	1027.1337	302
AUO	pj160020	54025.3728	1027.6128	315
AUO	pj170017	54026.2822	1027.6860	329
AUO	pj200028	54029.3709	1027.9347	363
AUO	qd020024	54193.5319	1041.1460	433
AUO	qd040052	54195.5864	1041.3114	240
AUO	qd110012	54202.6237	1041.8779	282
AUO	qd130029	54204.4341	1042.0234	234
AUO	qd140035	54205.4133	1042.1023	329
AUO	qd150023	54206.4880	1042.1888	302
AUO	qd160023	54207.5143	1042.2715	320
AUO	qd190051	54210.5260	1042.5138	306
AUO	qd200076	54211.5794	1042.5984	154
AUO	qd220035	54213.4753	1042.7512	147
AUO	qd220036	54213.4893	1042.7522	424
AUO	qd230013	54214.4278	1042.8279	377
AUO	qd250015	54216.5346	1042.9973	645
AUO	qd300010	54221.3884	1043.3878	365
AUO	qe010020	54221.5111	1043.3978	153
AUO	qe030013	54224.3838	1043.6289	472
AUO	qe170014	54238.4871	1044.7640	185
AUO	qf230025	54275.5113	1047.7437	231
AUO	qg140028	54296.5112	1049.4337	268
AUO	qg140030	54296.5256	1049.4349	304
AUO	qg170012	54299.3604	1049.6628	371
AUO	qg260022	54308.5021	1050.3988	342
AUO	qh050031	54318.4729	1051.2010	313
AUO	qh130008	54326.3361	1051.8339	191
AUO	qh130010	54326.3563	1051.8354	396
AUO	qh170015	54330.4312	1052.1633	180

Tablica 2: Opažački dnevnik plavih spektara mjerenih u Ondřejovu za V380 Cyg.

Set	ID	HJD	Phase	λ_c (Å)	S/N
AUO	ni170011	53266.3564	966.5286	4500	231
AUO	ni180017	53267.3871	966.6116	4500	379
AUO	nj050010	53284.2734	967.9706	4500	269
AUO	nj100002	53289.2876	968.3742	4200	95
AUO	nj120017	53291.2617	968.5330	4500	67
AUO	nj240036	53303.4095	969.5107	4500	253
AUO	nj250003	53304.2597	969.5789	4500	304
AUO	nk250003	53335.2304	972.0715	4500	264
AUO	oe260012	53517.4736	986.7380	4350	224
AUO	pj160016	54025.3308	1027.6096	4900	139
AUO	qd160028	54207.5544	1042.2747	4900	213
AUO	qd190080	54210.5981	1042.5195	4900	83
AUO	qd220060	54213.5538	1042.7574	4900	210
AUO	qd270032	54218.5272	1043.1577	4900	254
AUO	qd280024	54219.4498	1043.2318	4900	187
AUO	qd290038	54220.5512	1043.3206	4900	176
AUO	qe030018	54224.4380	1043.6333	4900	191
AUO	qe180020	54239.4456	1044.8411	4350	129
AUO	qf090021	54261.5286	1046.6183	4440	150
AUO	qf110020	54263.4758	1046.7751	4400	122
AUO	qf160017	54268.3798	1047.1697	4400	76
AUO	qg140025	54296.4497	1049.4287	4400	198
AUO	qg160015	54298.5406	1049.5969	4400	148
AUO	qh050018	54318.3959	1051.1948	4400	148

Tablica 3: Opažački dnevnik crvenih spektara mjerenih u Victoriji za V380 Cyg.

Set	ID	HJD	Phase	S/N
DAO	3c05618	54232.9356	1044.3172	306
DAO	3c07248	54259.9013	1046.4873	287
DAO	3c07992	54274.8548	1047.6907	248
DAO	3c08291	54276.9189	1047.8569	48
DAO	3c12337	54340.7187	1052.9914	236

Tablica 4: Opažački dnevnici za spektre NOT-a i CAHA-e za V380 Cyg.

Set	ID	HJD	Phase	S/N
NOT		54039.37711	1028.7399	166
NOT		54039.38248	1028.7403	309
NOT		54039.39750	1028.7416	242
CAHA	A167	54607.46305	1074.4586	56
CAHA	A168	54607.46750	1074.4590	146
CAHA	A181	54607.61685	1074.4709	156
CAHA	A182	54607.62454	1074.4716	176
CAHA	A190	54607.67179	1074.4753	144
CAHA	A191	54607.67839	1074.4760	130
CAHA	B161	54608.63799	1074.5530	116
CAHA	B162	54608.64601	1074.5536	136
CAHA	B164	54608.66251	1074.5552	80
CAHA	B165	54608.67026	1074.5558	164
CAHA	C181	54609.55296	1074.6268	32
CAHA	C182	54609.56075	1074.6274	20
CAHA	D158	54610.52706	1074.7052	144
CAHA	D159	54610.53474	1074.7058	148
CAHA	H200	54691.47874	1081.2201	66
CAHA	H201	54691.48664	1081.2207	54
CAHA	H202	54691.49426	1081.2213	60
CAHA	H220	54691.67199	1081.2355	42
CAHA	H221	54691.67967	1081.2361	36
CAHA	H222	54691.68733	1081.2368	36
CAHA	I191	54692.33182	1081.2887	60
CAHA	I192	54692.33942	1081.2893	64
CAHA	I219	54692.60461	1081.3107	70
CAHA	I220	54692.61226	1081.3113	70
CAHA	I221	54692.61994	1081.3119	84
CAHA	J215	54693.61367	1081.3917	124
CAHA	J216	54693.62132	1081.3923	120
CAHA	J217	54693.62911	1081.3931	72
CAHA	K189	54694.31946	1081.4486	156
CAHA	K190	54694.32706	1081.4493	152
CAHA	K221	54694.59423	1081.4707	96
CAHA	K222	54694.59957	1081.4709	130
CAHA	K223	54694.60717	1081.4716	118
CAHA	M184	54696.32683	1081.6102	232
CAHA	M208	54696.53837	1081.6272	144
CAHA	M209	54696.54484	1081.6276	126
CAHA	M210	54696.55136	1081.6282	120
CAHA	M217	54696.58198	1081.6306	154
CAHA	M218	54696.58974	1081.6313	144
CAHA	M219	54696.59739	1081.6328	108

ZNANSTVENE PUBLIKACIJE

Znanstveni radovi u CC časopisima

- Tamajo, Ettore; Pavlovski, Krešimir; Southworth, John
  Spectroscopic analysis of the eclipsing binary V615 Per in the open cluster h Per
  Astronomy & Astrophysics, (2009), (submitted)

- Pavlovski, Krešimir; Tamajo, Ettore; Koubsky, Pavel; Southworth, John; Yang, Stevenson; Kolbas, Vladimir
  Chemical evolution of high-mass stars in close binaries - II. The evolved component of the eclipsing binary V380 Cygni
  Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, (2009), (in press, arXiv:0908.0351v1)

- J. Southworth, S. Saesen, K. Pavlovski, E. Tamajo, P.F.L. Maxted, I. McDonald
  Eclipsing binaries in open clusters- IV. Masses, radii and abundances of V621 Per in χ Per
  Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, (2009), (submitted)

- D. Dominis, P. Mimica, K. Pavlovski, E. Tamajo
  In between β-Lyrae and Algol: The case of V356 Sgr
  Astrophysics & Space Science, 296 (2005), 1-4; 189-192 (članak, znanstveni)

- M. Netopil, E. Paunzen, H.M. Maitzen, A. Claret, K. Pavlovski, and E. Tamajo
  CCD-Δa and BVR photometry of NGC 7296
  Astronomische Nachrichten, 326 (2005), 8; 734-737 (članak, znanstveni)

Znanstveni radovi u drugim časopisima

- K. Pavlovski, J. Southworth and E. Tamajo
  Spectral disentangling of the metallic-lined binary system WW Aurigae

Contributions of the Astronomical Observatory Skalnat Pleso, 38 (2008), 2; 437-438
(prethodno priopčenje, znanstveni)

Znanstveni radovi u zbornicima skupova s međunar. recenzijom

- E. Tamajo and K. Pavlovski
  An Observational Test on the Origin of magnetic Field in Chemically Peculiar Stars of the Upper main Sequence
  Astrophysics of Variable Stars, ASP Conference Series, Vol. 349 / Sterken, C.; Aerts, C. (ur.) San Francisco : ASP, 2006. 351-354
  (predavanje, međunarodna recenzija, objavljeni rad, znanstveni)

Kongresno priopčenje (sažeci) u ostalim časopisima

- K. Pavlovski and E. Tamajo
  Abundances from Disentangled Component Spectra: High-mass Stars in the Eclipsing Binaries CW Cep and V478 Cyg
  Proceedings of the International Astronomical Union Symposium No. 240 'Binary Stars as Critical Tools and Tests in Contemporary Astrophysics'
  Hartkopf, William I. ; Guinan, Edward F. ; Harmanec, Petr (ur.)
  Cambridge : Cambridge University Press, 2007. 209
  (poster, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)

Sažeci u zbornicima skupova

- Pavlovski, Krešimir; Tamajo, Ettore
  Renormalizacija individualnih spektara spektroskopske i interferometrijske dvojne zvijezde Atlas u Plejadama
  (poster, domaća recenzija, sažetak, znanstveni)

- Pavlovski, Krešimir; Southworth, John; Tamajo, Ettore. Spectral disentangling of the metallic-lined binary system WW Aurigae
  (poster, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)

- Pavlovski, Krešimir; Tamajo, Ettore. Abundances from Disentangled Component Spectra: High-mass Stars in the Eclipsing Binaries CW Cep and V478 Cyg
  (poster, sažetak, znanstveni)

- Pavlovski, Krešimir; Tamajo, Ettore; Koubsky, Pavel; Southworth, John; Yang, Stevenson; Kolbas, Vladimir
  Probing the models: V380 Cygni revisited
  (poster, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)

ŽIVOTOPIS

I. OSOBNI PODACI

Ime: ETTORE

Prezime: TAMAJO

Datum rođenja: 19.10.1974.

Mjesto rođenja: ZAGREB, RH

Adresa: STRMA UL. 14, 10430 SAMOBOR, RH

II. ŠKOLOVANJE

1981.-1985. Grundschule, Hannover, SR Njemačka

1985.-1987. Orientierungsstufe, Hannover,SR Njemačka

1987.-1989. Osnovna škola Veljko Vlahović, Zagreb

1989.-1993. MIOC-XV.Matematička gimnazija, Zagreb

1999.-1999. Služenje vojnog roka u OSRH

1994.-2001. PMF-Fizika, Zagreb, smjer Dipl.ing.fizike

2002.-2005. Stjecanje akademske titule magistra znanosti

2005.-2009. Izrada doktorske disertacije

III. ZAPOŠLJAVANJE

Od 01.01.02. radim u suradničkom zvanju znanstvenog novaka te u istraživačkom zvanju mlađeg asistenta na PMF-u, Fizičkom odsjeku, Sveučilišta u Zagrebu. Izabran sam 11/03. u istraživačko zvanje asistenta na PMF-u, Fizičkom odsjeku. Diplomski rad sam izradio iz polja astrofizike pod naslovom 'Analiza svjetlosnih promjena spektroskopske dvojne zvijezde HR8800'. Mentor rada, kao i šef projekta kod kojeg vršim posao asistenta je Prof. dr. sc. Krešimir Pavlovski, sa znanstvenim projektom MZT 119-0000000-3135 'Struktura i Evolucija zvijezda'.

Naslov rada za stjecanje stupnja magistra znanosti bio je 'OBSERVATIONAL TEST ON THE ORIGIN OF MAGNETIC FIELD IN CHEMICALLY PECULIAR STARS OF THE UPPER MAIN SEQUENCE'. Mentor magistarskog rada također je Prof. dr. sc. Krešimir Pavlovski. Rad je izrađen u sklopu bilateralne znanstvene suradnje sa Republikom Austrijom pod projektom

'Investigation of variable stars in star clusters: a clue to evolutionary processes in the Universe'. Od 2005. izrada doktorske disertacije pod naslovom 'Kemijska evolucija dvojnih zvijezda' pod mentorstvom Prof. dr. sc. Krešimira Pavlovskog na znanstvenom projektu MZT 119-0000000-3135 'Struktura i Evolucija zvijezda'.

IV. STUDIJSKI BORAVCI I KONFERENCIJE

- Boravak na INAF institutu za fiziku u Rimu (Italia) 10/02. u trajanju četiri tjedna gdje sam radio na redukciji CCD-frameova.

- Boravak na institutu za astrofiziku u Beču (Austrija) 04/05. u trajanju tri tjedna gdje sam radio sa grupom kolega na području fotometrije otvorenih zvjezdanih skupova.

- Organizacija međunarodnog simpozija astrofizike 10/03. u Dubrovniku pod naslovom 'Spectroscopically and spatially resolving the components of close binary stars', na kojem je prisustvovalo stotinjak stranih znanstvenika.

- Sudjelovanje na konferenciji 09/05. 'Conference on astrophysics of variable stars' , Pećuh, Mađarska, sa izlaganjem pod naslovom 'Observational test on the origin of magnetic field in chemically peculiar stars of the upper main sequence'.

- Poster na simpoziju IAU 240, 'Binary stars as critical tools and tests in contemporary astrophysics' Prag, 2006., pod naslovom 'Abundances from disentangled component spectra: High-mass stars in the eclipsing binaries CW Ceph and V478Cyg'.

- Poster na međunarodnoj konferenciji 'Binaries - Key to Comprehension of the Universe', Brno, Rep. Češka, 2009.
  Probing the models: V380 Cygni revisited

- Poster na međunarodnoj konferenciji 'CP#AP Workshop' Spectral disentangling of the metallic-lined binary system WW Aurigae, Beč, Austrija, 2007.

- Poster na 5. znanstvenom skupu HFD-a 'Renormalizacija individualnih spektara spektroskopske i interferometrijske dvojne zvijezde Atlas u Plejadama, Primošten, Hrvatska, 2007.

VI. NASTAVNA ZADUŽENJA NA PRIRODOSLOVNO MATEMATIČKOM FAKULTETU U ZAGREBU

Na Fizičom odsjeku PMF-a vodim seminare iz slijedečih kolegija:

1. Uvod u astronomiju i astrofiziku (istraživački smjer)
2. Astrofizka I - fizika zvijezda (istraživački smjer)
3. Astrofizika II- galaksije (istraživački smjer)
4. Astrofizički praktikum (istraživački smjer)
5. Astronomija i astrofizika (nastavni smjer)
6. Praktikum općih fizika I i II

VII. VJEŠTINE

Aktivno govorim i pišem njemačkim, engleskim i talijanskim jezikom. Posjedujem znanje rada u operativnim sustavima UNIX-a, SUSE-Linux-a i Windows-a, programiram u Latex-u i Fortranu90, te radim s programima za redukciju CCD-frameova unutar programskog paketa IRAF-a (Image Reduction and Analysis Facility).

CURRICULUM VITAE

I. PERSONAL IDENTIFICATION

- Name: ETTORE
- Lastname: TAMAJO
- Date of birth: 19.10.1974.
- Place of birth: ZAGREB, Croatia
- Affiliation : Faculty of Science, Department of Physics, Bijenicka 32, POBox 162, 10000 Zagreb, Croatia

II. EDUCATION DEGREES

- 1981.-1985. Grundschule, Hannover, Germany
- 1985.-1987. Orientierungsstufe, Hannover, Germany
- 1987.-1989. Elementary school Veljko Vlahovic, Zagreb
- 1989.-1993. MIOC- 15th Mathematical High school, Zagreb
- 1999.-1999. Military service
- 1994.-2001. B.- Sc. Physics (Department of Physics, Faculty of Science University of Zagreb)
- 2002.-2005. M.-Sc. Physics (Department of Physics, Faculty of Science University of Zagreb)
- 2005.-2009. Ph. D. (doctor of science thesis in physiscs)
  (Department of Physics, Faculty of Science University of Zagreb)

III. CAREER/EMPLOYMENT (employers, positions):

- 2002.- Department of Physics, Faculty of Science, University of Zagreb

- Present position: Scientific teaching and research assistant at the Department of Physics, Faculty of Science, University of Zagreb

- Present teaching commitments:

  1. Seminar on Introduction in Astronomy and Astrophysics
  2. Seminar in Astrophysics I- stellar physics
  3. Seminar in Astrophysics II- galaxies
  4. Astrophysical practical exercises
  5. Seminar in Astronomy and Astrophysics
  6. Laboratory exercises: Practical Laboratory Work I, II

IV. SCIENTIFIC ACTIVITIES

- Scientific visit : 10/02. Astronomical Observatory of Rome, Italy
- Scientific visit : 04/05. Institut für Astronomie der Univ. Wien, Austria
- Conference: 10/03. Organisation of the simposium on astrophysics 'Spectroscopically and spatially resolving the components of close binary stars', Dubrovnik, Croatia

- Conference: 09/05. Talk 'An Observational Test on the Origin of magnetic Field in Chemically Peculiar Stars of the Upper main Sequence' on the Ph.D. conference on Astrophysics of Variable Stars, held in Pech, Hungary

- Conference: 08/06. Posterpresentation 'Abundances From Disentangled Component Spectra: High-Mass Stars In The Eclipsing Binaries CW Cep And V478 Cyg' on the IAU Symposium 240 "Binary Stars as Critical Tools & Tests in Contemporary Astrophysics" held in Prague, 22-25 August 2006

- Conference: 09/07. Posterpresentation 'Spectral disentangling of the metallic-lined binary system WW Aurigae' on the CP#AP Workshop held in Wien, Austria, 10-14 September 2007

- Conference: 06/09. Posterpresentation 'Probing the models: V380 Cygni revisited', held in Brno, Czech Republic, 08 - 12 June 2009

V. PAPERS IN REFEREED JOURNALS :

- 1. D. Dominis, P. Mimica, K. Pavlovski, E. Tamajo
  In between β-Lyrae and Algol: The case of V356 Sgr
  Astrophysics & Space Science 2005, vol. 296, num. 1-4, pp. 189-192

- 2. M. Netopil, E. Paunzen, H.M. Maitzen, A. Claret, K. Pavlovski, and E. Tamajo
  CCD-Δa and BVR photometry of NGC 7296
  Astronomische Nachrichten 2005, vol. 326, Issue 8, pp. 734-737

- 3. E. Tamajo and K. Pavlovski
  An Observational Test on the Origin of magnetic Field in Chemically Peculiar Stars of the Upper main Sequence
  ASP Conference Series 2006, Vol. 349, pp. 351-354

- 4. K. Pavlovski and E. Tamajo
  Abundances from Disentangled Component Spectra: High-mass Stars in the Eclipsing Binaries CW Cep and V478 Cyg
  IAU Conference Series 2006, Vol. 240, pp. 104

- 5. K. Pavlovski, J. Southworth and E. Tamajo
  Spectral disentangling of the metallic-lined binary system WW Aurigae

CoSka Conference Series 2008, Vol. 38, pp. 437

- 6. Tamajo, Ettore; Pavlovski, Krešimir; Southworth, John
  The helium abundance in the eclipsing binary V615 Per and implications for the open cluster h Per
  Astronomy & Astrophysics, (2009), (submitted)

- 7. Pavlovski, Krešimir; Tamajo, Ettore; Koubsky, Pavel; Southworth, John; Yang, Stevenson; Kolbas, Vladimir
  Chemical evolution of high-mass stars in close binaries - II. The evolved component of the eclipsing binary V380 Cygni
  Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, (2009), (in press, 0908.0351v1)

- 8. J. Southworth, S. Saesen, K. Pavlovski, E. Tamajo, P.F.L. Maxted, I. McDonald
  Eclipsing binaries in open clusters- IV. Masses, radii and abundances of V621 Per in χ Per
  Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, (2009), (submitted)

VI. SKILLS

- Active knowledge of english, german and italian language
- Computer knowledge of operating systems of UNIX (Red Hat linux, Suse linux) and WINDOWS XP, programming in Fortran90 and Latex, fluid in using IRAF (Image Reduction and Analysis Facility)