

Hemijska analiza

Stanislav Milošević

Matematički fakultet

1 Uvod

Proučavanje osobina zvezda i drugih objekata neizostavno podrazumeva i određivanje hemijskog sastava. Putem spektralne analize moguće je izvršiti hemijsku analizu. Bitno je da znamo od kojih elemenata su sačinjeni objekti koje proučavamo. Hemijska analiza nam daje informacije o nuklearnim reakcijama u jezgrima zvezda (koje obezbeđuju proizvodnju energije), znajući zastupljenost određenih elemenata (npr. litijuma i gvožđa) moguće je doneti zaključke o evolutivnoj fazi. Evolucija galaksije se može pratiti kroz analizu hemijskog sastava zvezda i međuzvezdane sredine u različitim delovima galaksije (centralnom delu, disku,...).

Postoje razne tehnike kojima se određuje hemijski sastav. Postupak nije jednostavan, a teškoća se sastoji u konstrukciji modela fotosfere (teorijski deo) i u dobijanju kvalitetnog spektra iz posmatranja (posmatrački deo).

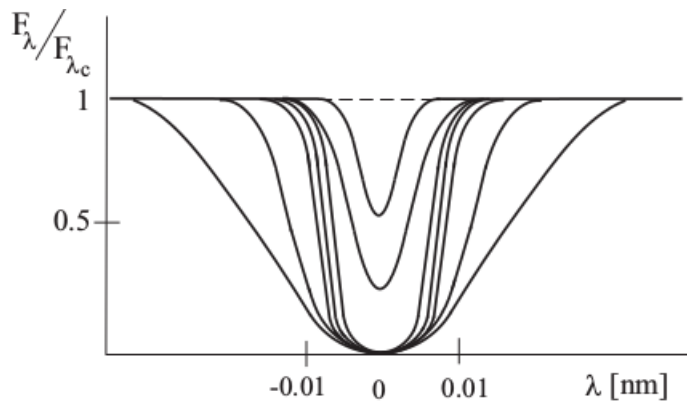
2 Kriva rasta

Svetlost prolazeći kroz fotosferu biva apsorbovana na nekim frekvencijama usled prisustva apsorbera, koji apsorbuju baš na tim frekvencijama. Na taj način se formira spektralna linija koja ima konačnu širinu. Širina spektralne linije je posledica prirodnog širenja, čiji je uzrok činjenica da u samom apsorberu postoji konačna širina energijskih nivoa, zatim širenje može da potiče od Doplerovog širenja, širenja usled pritiska, itd... Kao rezultat imamo zavisnost intenziteta zračenja od frekvencije unutar linije, odnosno profil linije. Profil linije zavisi od velikog broja parametara, pa samim tim nosi informaciju o mnogim karakteristikama sredine u kojoj nastaje. Međutim, u operativnom smislu profil linije nije od velike koristi, jer je jako teško dobiti neku informaciju. Iz tog razloga se koristi ekvivalentna širina linije, koja predstavlja površinu pravougaonika jedinične stranice, čija je druga stranica brojno jednaka površini ograničenoj linijom i kontinuumom (integraljen intenzitet po frekvencijama).

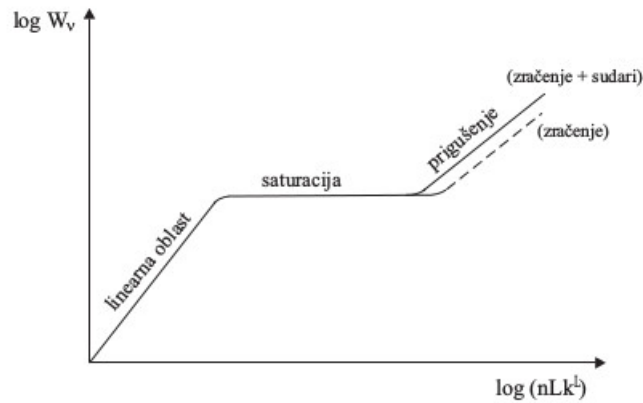
Ekvivalentna širina zavisi od zastupljenosti apsorbera, pa se koristi za njegovo određivanje. Što je više apsorbera, veća će biti apsorpcija na toj frekvenciji, odnosno veći će biti odnos koeficijenta apsorpcije u liniji i kontinuumu, pa će linija biti jača. Kriva rasta (slika 2.) je logaritamski grafik, na kom je prikazan rast jačine linije (ekvivalentne širine) od broja apsorbera, odnosno $\log W_\nu$ od $\log Nf$ (gde je Nf proizvod broja apsorbera i jačine oscilatora).

Pri određenim analizama, kriva rasta može da bude zadata eksplicitno, odnosno na grafik se unose direktno merene veličine. Ukoliko je zadata implicitno,

radi se o teorijskom spektru, pri čemu se zastupljenost elemenata "podešava", dok se ne uspostavi poklapanje sa posmatranim vrednostima. Kriva rasta se može konstruisati za jednu spektralnu liniju. U slučaju malog broja apsorbera, linija je plitka i proširena Doplerovim efektom (*videti [2]*). U slučaju malog broja apsorbera, ekvivalentna širina je linearno proporcionalna broju apsorbera. Sa daljim povećanjem broja apsorbera, ekvivalentna širina sporije raste, jer je više apsorbera od fotona. Na talasnoj dužini na kojoj dolazi do saturacije, dubina linije se više ne može povećavati, ali apsorpcija može da se odvija u krilima linije, na drugim talasnim dužinama.



Slika 1: Saturacija profila spektralne linije (*slika preuzeta iz [2]*)



Slika 2: Kriva rasta (*slika preuzeta iz [2]*)

3 Direktno računanje

U slučaju lokalne termodinamičke ravnoteže (LTR) imamo:

$$F_\nu = 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} B_\nu(T) E_2(T) \frac{l_\nu + k_\nu}{k_0} \tau_0 \frac{d \log \tau_0}{\log e} \quad (1)$$

l_ν je koeficijent apsorpcije u liniji, k_ν je koeficijent apsorpcije u kontinuumu, τ_0 je referentna optička dubina (na 500 nm)

Ako izvršimo integraciju po profilu linije, dobijamo ekvivalentnu širinu:

$$W = \int_0^\infty \frac{F_\nu - F_c}{F_c} d\nu \quad (2)$$

l_ν zavisi od $g_n A f$ (g_n statistička težina donjeg nivoa, A je zastupljenost, a f snaga oscilatora), pa promena bilo koje veličine ima isti efekat, jer na isti način utiču na l_ν .

Ako imamo slučaj slabih linija i ako su nam f i g_n poznati, tada računamo l_ν , k_ν , τ_ν , a model fotosfere nam daje $T(\tau_0)$, P_e , $k_0(\tau_0)$. Ako je linija jača i pokazuje saturaciju, potrebno je uračunati i mikroturbulentnu disperziju brzina ξ , a ako linija ima i krila, potrebno je uzeti u obzir i konstantu prigušenja (eng. damping constant). Prema klasičnoj slici, elektron se ponaša kao oscilator pri prolasku fotona, tj. pri interakciji sa električnim poljem fotona (*videti [4]*).

4 Relacije skaliranja

Znamo da ekvivalentna širina linije raste sa porastom broja apsorbera, međutim situacija nije jednostavna kada konstruišemo krivu rasta za jednu zvezdu, zato što zvezda ima jednu zastupljenost za određeni element. Postoje drugi faktori koji jednu liniju nekog elementa čine jačom od druge linije istog elementa. Korišćenjem ovih faktora u mogućnosti smo da konstruišemo krivu rasta koristeći mnoštvo linija. Prilikom ovog postupka, podrazumeva se da kriva rasta za jednu liniju ima univerzalni oblik, što je dobra aproksimacija (osim za deo krive, gde dominira konstanta prigušenja). U suštini, vrši se skaliranje, kako bi se sve linije "dovele" na istu krivu rasta.

Ponovo uzimamo u obzir slabe linije i odnos apsorpcije u liniji i kontinuumu. Ako je F_ν fluks koji dolazi sa karakteristične optičke dubine τ_1 , tada imamo:

$$\frac{F_c - F_\nu}{F_c} \approx \frac{l_\nu}{k_\nu} \quad (3)$$

Ako sa w definišemo integral po profilu linije:

$$w = \frac{\text{const}}{k_\nu} \int_0^\infty l_\nu d\nu \quad (4)$$

Koristeći da je $l_\nu \rho = N \alpha$, gde je ρ gustina, a N broj apsorbera po jedinici zapremine, zatim uzimajući u obzir jednačinu (11.9) iz [1] za atomski koeficijent apsorpcije α kao i vrednost za f , imamo:

$$w = \text{const} \frac{\pi e^2 \lambda^2}{m c^2} f \frac{N}{k_\nu} \quad (5)$$

Ako izrazimo N preko ekscitacione jednačine (1.20.) iz [1]:

$$N = A \frac{N_j}{N_E} N_H \frac{g_n}{u(T)} e^{\frac{\chi}{kT}} \quad (6)$$

g_n je statistička težina nivoa, $u(T)$ je particiona funkcija, χ je ekscitacioni potencijal.

Prethodnu jednačinu transformišemo u oblik:

$$\log(w/\lambda) = \log \left[\text{const} \frac{\pi e^2}{mc^2} \frac{N_j N_H}{N_E} \frac{1}{u(T)} \right] + \log A + \log g_n f \lambda - \theta_{ex} \chi - \log k_\nu \quad (7)$$

$$\log(w/\lambda) = \log C + \log A + \log g_n f \lambda - \theta_{ex} \chi - \log k_\nu \quad (8)$$

Deljenje w sa λ je uobičajeno jer normalizuje efekte mikroturbulencije i termalnog širenja ([1]). Izraz u uglastim zagradama je prepisan kao konstanta.

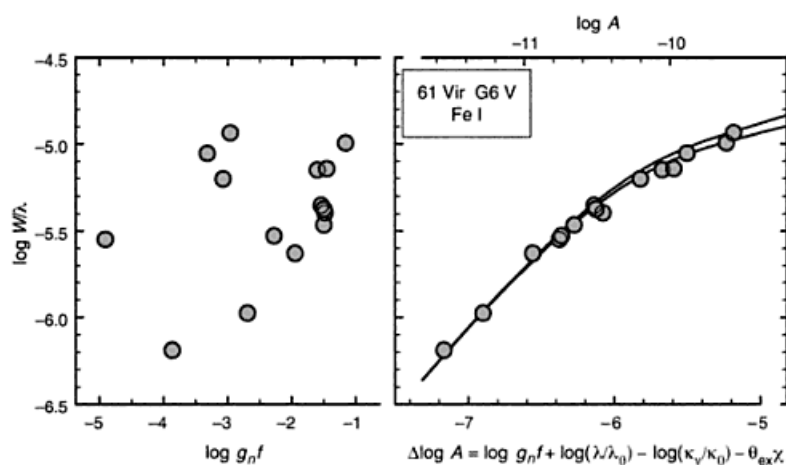
Sa stanovišta modela fotosfere, biramo liniju koja ima fiksirano $g_n f \lambda$ i χ , a modelom su fiksirani θ_{ex} i k_ν . Variramo A , tako da generišemo krivu rasta. Sa stanovišta posmatranja, A je fiksirano, a različite linije imaju različite jačine zbog ostalih članova u poslednjoj jednačini. Konstruišemo empirijsku krivu tako što izrazimo $\log(W/\lambda)$ kao funkciju $\log(w/\lambda) - \log A$, što računamo numerički preko $\log C + \log g_n f \lambda - \theta_{ex} \chi - \log k_\nu$. Translacija empirijske krive na standardnu daje $\log A$.

Mereno W se unosi na standardnu krivu. Zastupljenost koja se dobija, odnosi se na liniju sa parametrima za standardnu krivu i neka je to A_1 Tada je:

$$\Delta \log A = \log(g_n f / g_n^1 f_1) + \log(\lambda / \lambda_1) - \log(k_\nu / k_1) - \theta_{ex}(\chi - \chi_1) \quad (9)$$

$$\log A = \log A_1 - \Delta \log A \quad (10)$$

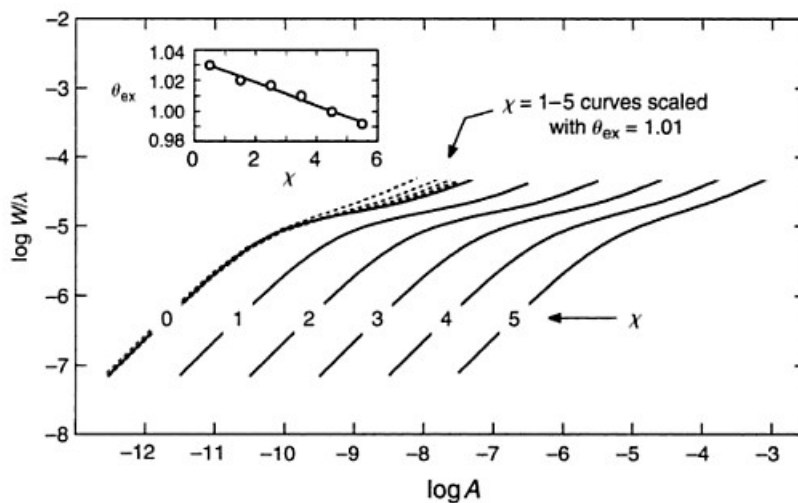
Parametri g_n , f , λ i χ su za liniju, čija W je korišćena za dobijanje A_1 , dok su parametri sa indeksom korišćeni za generisanje standardne krive. Ako konstruišemo grafik - posmatrano $\log(W/\lambda)$ u zavisnosti od $\Delta \log A$ svaka linija je redukovana na istu krivu rasta i ta kriva rasta se zove posmatrana ili empirijska kriva rasta. Translacija ove krive na standardnu, podrazumeva primenu poslednje jednačine za sve linije simultano. Primer skaliranja je dat na slici 3.



Slika 3: Sirovi podaci sa levog panela su skalirani na empirijsku krivu rasta na desnom panelu. Poređenjem ove krive sa teorijskom krivom, izračunatom iz fotosferskog modela, dobija se zastupljenost. (slika preuzeta iz [1])

Krive pokazuju male razlike u obliku, kako linija postaje saturisana. Najveća promena potiče od toga što su krive sa velikim χ pomerene ka većim zastupljenostima, što se vidi na slici 3. Na slici se takođe vidi grafik koji pokazuje opadanje θ_{ex} sa χ . Razlog za to je sledeći: što je veći ekscitacioni potencijal, dublje u fotosferi (pri većoj temperaturi) je linija formirana (videti [1]).

Skaliranje sa $\theta_{ex}\chi$ je dobro za slabe linije. Za deo krive sa jakim linijama pojedinačne konstante prigušenja dolaze do izražaja i skaliranje nije moguće.

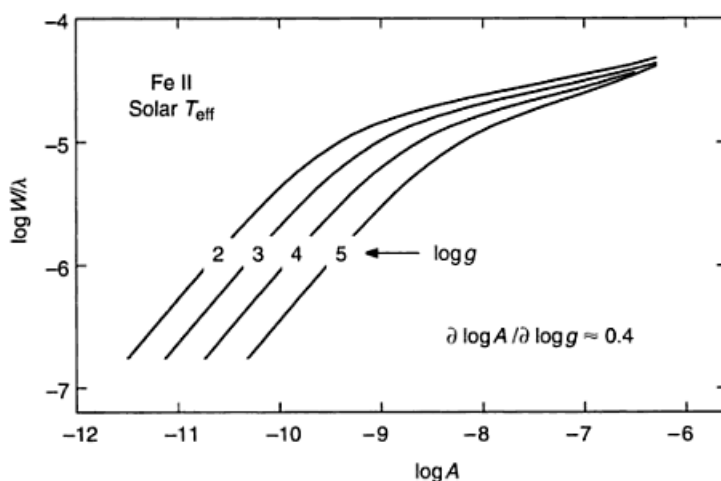


Slika 4: Promena oblika krive rasta u zasnosti od ekscitacionog potencijala (slika preuzeta iz [1])

5 Efekti temperature i površinske gravitacije

Temperatura je važan faktor, a kroz jednačinu jonizacione ravnoteže, k_ν , i θ_{ex} utiče na izgled krive rasta. Greške za temperaturu mogu da potiču od pogrešno pretpostavljene temperaturske raspodele. Ako pretpostavimo neku temperatursku raspodelu, moguće je da ne dođe do poklapanja modela sa realnom zvezdom usled disipacije energije, intenzivnosti konvekcije, mešanja linija... Tada je potrebno izvršiti korekciju modela.

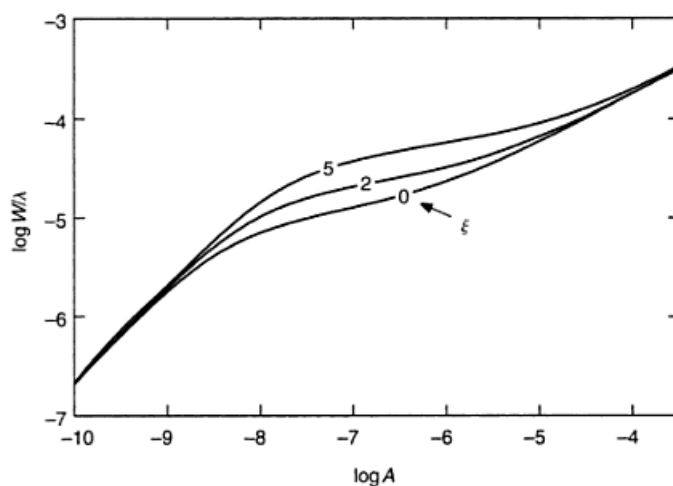
Zavisnost od pritiska može da se pojavi i kod k_ν i kod N_r/N_E . Sve dok je element pretežno jonizovan, za linije neutrala važi $\partial \log A / \partial \log g \approx 0$. Ekvivalentna širina linija jona zavisi od gravitacije kao $g^{-1/3}$, što znači da se zastupljenost menja kao $g^{1/3}$. Ako je površinska gravitacija poznata iz nezavisnog merenja, moguće je sprovesti posebnu hemijsku analizu za neutrane i jone. Očekujemo da ćemo iz obe procedure dobiti isto A . U slučaju da g nije poznato, onda ono postaje slobodan parametar, koji može biti određen tako što zahtevamo da rešenja za jone i neutrane daju istu zastupljenost. Korišćenje jakih linija se izbegava zbog dodatnih neodređenosti koje ulaze kroz mikroturbulenciju, saturaciju, konstantu prigušenja. U nekim slučajevima, kada imamo jaku gravitaciju i veliku konstantu prigušenja, moguće je da kontinualni prelaz iz oblasti slabih u oblast jakih linija krive rasta bude bez platoa (*videti [1]*).



Slika 5: Zavisnost krive rasta od površinske gravitacije (*slika preuzeta iz [1]*)

6 Saturacija - plato krive rasta

Nagib krive rasta je daleko manji na delu krive gde imamo saturaciju, nego na delu gde imamo slabe linije. Greška pri određivanju ekvivalentne širine na ovom delu krive rasta vodi većoj greški u određivanju zastupljenosti. Ekvivalente širine saturisanih linija su veće od onih koje predviđa model (kada u obzir uzimamo termalno širenje i širenje usled prigušenja). Ovo se objašnjava mikroturbulencijom. Zbog mikroturbulencije saturacija "kasni". Vrednost ξ je određena najpre merenjem ekvivalentnih širina slabih linija (gde nema promena usled mikroturbulencija), zatim usvajajući teorijsku krivu traži se najbolje poklapanje sa saturisanim delom. Prilikom određivanja vrednosti ξ , analiza može da podrazumeva i metod pokušaja i pogreške, uz uslov da zastupljenost za saturisane linije bude ista kao kod slabih linija. Drugi desaturacioni mehanizmi (hiperfina struktura i Zemanov efekat) imaju isti efekat kao mikroturbulencija.



Slika 6: Prisustvo mikroturbulencije odlaže saturaciju. Vrednosti za ξ su u km/s i raspodela brzina je Gausijan. (slika preuzeta iz [1])

Saturacioni deo krive rasta takođe zavisi od distribucije temperature. Saturacija se dešava ranije u toplijem modelu. To se dešava zbog većeg rezidualnog fluksa $\pi B_\nu(T_0)$ (videti [1]). Odstupanja od LTR takođe utiču na saturaciju: što je odstupanje veće, linija postaje dublja pre saturacije. Slabe linije, prema tome, imaju prednost pri određivanju hemijskog sastava u odnosu na saturisane, jer nisu pod uticajem desaturacionih mehanizama.

7 Diferencijalna analiza

Pod diferencijalnom analizom se podrazumeva poređenje zastupljenosti elemenata između zvezda. Poredimo hemijski sastav neke zvezde sa referentnom zvezdom. Bitno je da referentna zvezda bude što sličnija zvezdi čiji hemijski sastav određujemo, jer se onda minimizuju razlike u k_ν i θ . Diferencijalna analiza podrazumeva korišćenje jednačine (7) za obe zvezde.

$$\log \frac{A}{A_{ref}} = \log \frac{w}{w_{ref}} - \log \frac{k_\nu}{k_\nu^{ref}} - (\theta_{ex} - \theta_{ex}^{ref})\chi \quad (11)$$

Razlike u k_ν su male. Iako je $\theta_{ex} - \theta_{ex}^{ref}$ funkcija dubine, možemo aproksimirati da je konstantno. Što su članovi θ_{ex} i k_ν manji, odnos ekvivalentnih širina je bliži odnosu zastupljenosti. Ako koristimo jake linije potrebno je uzeti u obzir razlike u mikroturbulencijama, kao i razlike u konstantama prigušenja, koje postoje i zbog razlika u efektivnoj temperaturi i površinskoj gravitaciji između zvezda.

8 Metod sinteze

Računanje celog spektralnog intervala, gde su sve posmatrane linije uključene, zove se sinteza. Metod je koristan ako imamo veliko mešanje linija kao kod hladnih zvezda i zvezda kod kojih imamo širenje linija usled rotacije. Sinteza podrazumeva veliki utrošak vremena, ali je isplativa kada ne postoje drugi načini određivanja ekvivalentne širine spektralnih linija.

9 Hemijski sastav Sunca

Hemijski sastav Sunca se uzima kao standardni, na osnovu koga se određuju hemijski sastavi drugih zvezda. Težište hemijske analize Sunca leži na fotosferskom spektru, ali značajna su i proučavanja hromosfere, korone, pega i Sunčevog vetra. Ako posmatramo promenu zastupljenosti sa povećanjem atomskog broja, možemo zapaziti nedostatak litijuma i berilijuma. Veća zastupljenost je primetna kod elemenata koji se u periodnom sistemu nalaze oko gvožđa. Takođe, veća je zastupljenost elemenata sa parnim rednim brojem. Elementi sa parnim rednim brojem su sintetisani zahvatima α čestica i ne zavise od početnog sastava, dok proizvodnja elemenata sa neparnim rednim brojem zavisi od početnog sastava.

Sunčev hemijski sastav se uzima kao standardni. Zastupljenost vodonika po masi je $X = 0.735$, helijuma $Y = 0.248$, a težih elemenata $Z = 0.017$. Zastupljenost helijuma nije u potpunosti određena zbog toga što je fotosfera Sunca suviše hladna da bi se videle linije helijuma.

10 Hemijski sastav kroz Galaksiju

U galaktičkom disku prevladavaju zvezde čiji je hemijski sastav sličan hemijskom sastavu Sunca. To su zvezde koje imaju pored vodonika i helijuma dosta metala i pripadaju populaciji I. Zapaža se gradijent metaličnosti od centra diska ka obodu. Zvezde sa malom metaličnošću se nalaze u halou Galaksije i

pripadaju populaciji II. To su uglavnom starije zvezde. Najstarije zvezde imaju ekstremno malu metaličnost, to su gotovo vodonične zvezde i pripadaju populaciji III, ali još uvek nisu detektovane. Globularna jata (stari objekti) su sačinjena od zvezda populacije II.

Zvezde sa velikom metaličnošću su mlađe zvezde. Naime, najstarije zvezde formirane u ranom periodu života Galaksije su fuzionisale vodonik u teže elemente. Zvezdanim vetrovima i eksplozijama supernovih su teže elemente izbacivali u međuzvezdani prostor. Prilikom nastanka nove generacije zvezda, u početnom hemijskom sastavu su se mogli naći i teži elementi. Svaka naredna generacija zvezda bila je bogatija težim elementima, jer je međuzvezdana sredina bila bogatija njima.

U centralnom delu Galaksije (eng. bulge) nalaze se starije zvezde, pa je ovaj deo crveniji od diska. Uprkos tome što se u centralnom delu nalaze starije zvezde, metaličnost je veća. Razlog za to su burni događaji u ranom periodu života Galaksije, koji su doprineli da najmasivnije zvezde koje inače brže evoluiraju obogate prostor u centralnom delu metalima (*videti [3]*).

Literatura:

- [1] David F. Gray, *The observations and analysis of stellar photospheres*, 2005, Cambridge, United Kingdom
- [2] Olga Atanacković, *Formiranje spektralnih linija u zvezdanim atmosferama*, skripta, Beograd.
- [3] Bradley W. Carroll, Dale A. Ostlie, *An introduction to modern astrophysics*, 2007, San Francisco, USA
- [4] George W. Collins II, *Fundamentals of Stellar Astrophysics*, 2003, web edition