

СУДАРИ ЕМИТЕРА И АПСОРБЕРА СА НАЕЛЕКТРИСАНИМ ЧЕСТИЦАМА И ЗВЕЗДАНА ПЛАЗМА

МИЛАН С. ДИМИТРИЈЕВИЋ

Апстракт. Судари емитера и апсорбера са наелектрисаним честицама, утичу на профиле спектралних линија звездане плазме, пошто услед цепања и померања енергетских нивоа атома у електричном пољу (Штарков ефекат) долази до ширења и померања линија у спектрима. У раду је анализирана важност Штарковог ширења оваквих линија за анализу, интерпретацију и синтезу звезданих спектара, анализу, дијагностику и моделирање звездане плазме и значај оваквих резултата за истраживања лабораторијске, фузионе и технолошких плазми као и за физику ласера. Размотрено је код каквих типова звезда и при којим истраживањима је Штарково ширење значајно и дискутовани су методи за теоријско одређивање параметара ширења спектралних линија. Такође су дати и примери оваквих истраживања на Астрономској опсерваторији у Београду.

Кључне речи: Штарково ширење, спектралне линије, звездане атмосфере, базе података

УВОД

Спектрална линија није никада монохроматска. Увек је проширена због неколико разлога. Хајзенбергова релација неодређености показује да не можемо апсолутно тачно познавати координату и импулс честице. Може се показати (види нпр. [1]) да се ова релација може тако трансформисати да повезује ширину енергетског нивоа у атому и време живота електрона у таквом енергетском стању, односно што је време живота електрона краће то је енергетски ниво шири. Пошто је само у основном стању време живота електрона толико дуго да можемо да кажемо да његова ширина тежи нули, све спектралне линије имају неку ширину због ширине енергетских нивоа прелаза којим су настале. Таква ширина се назива природна и не зависи од температуре и густине честица (притиска) већ само од унутрашњих особина атома или јона који зрачи.

Осим овог узрока, линије могу бити проширене и услед Доплеровог ефекта. Пошто се емитери крећу хаотично, сваки емитовани фотон ће имати неки црвени или плави помак у зависности од компоненте брзине у правцу посматрача. Када се ови помаци саберу добиће се проширена спектрална линија. Профил Доплеровски проширене линије је Гаусов, пошто је то расподела која описује случајне процесе или догађаје и овај механизам ширења зависи од температуре емитера.

Судар такође доводе до ширења спектралних линија и овакви механизми ширења зависе од концентрације честица које пертурбују емитирујући/апсорбујући атом или јон, односно притиска, па се једним именом зову ширење притиском. То су Штарково ширење услед судара са наелектрисаним честицама, Ван дер Валсово ширење или ширење сударима са неутралним атомима и резонантно ширење (види нпр. [1]).

Занимљиво је колико података о звездама можемо сазнати анализом њиховог спектра. Анализом спектралних ли-

нија можемо одредити температуру звездане плазме, односно појединих слојева звездане атмосфере, њен хемијски састав и површинску гравитацију. Можемо боље разумети нуклеарне процесе у њеној унутрашњости, и одредити њен спектрални тип и ефективну температуру упоређивањем спектра звезде са стандардним спектрима за поједине типове.

Истраживање Штарковог ширења је развијена научна област у Србији и бившој Југославији, која има критичку масу научника, и захваљујући и свом мултидисциплинарном значају пружа добру основу за успешну сарадњу. Аутор је публиковао преглед истраживања облика спектралних линија у Србији и Југославији са библиографијом и индексом цитата за период од првог рада објављеног 1962. до краја 2000. године [2-6]. У том периоду је регистровано 1427 (1222 од српских аутора) библиографских јединица које је објавило 179 југословенских аутора (152 из Србије, 26 из Хрватске и један Македонац (Паскал Сотировски) који је живео у Француској). Већина ових радова односи се на Штарково ширење.

У овом раду размотриће се значај Штарковог ширења за истраживања астрофизичке плазме и рад у овој научној области на Астрономској опсерваторији у Београду у Групи за Астрофизичку спектроскопију.

УСЛОВИ У АСТРОФИЗИЧКОЈ ПЛАЗМИ И ШТАРКОВО ШИРЕЊЕ

Хенри Расел је 1926. објавио у Астрофизичком журналу чланак [7] са анализом спектра Fe II у коме је пронашао 61 енергетски ниво на основу 214 спектралних линија јонизованог гвожђа. У њему је написао да су сада «све линије од астрофизичког значаја класификоване». Ипак, 1988. је у чланку Јохансона [8], изјављено да сада познајемо 675 енергетских нивоа Fe II, али да је 50% појединачних спектралних облика у астрофизичким спектрима високе резолуције, још неклассификовано.

То је последица чињенице, да су услови у астрофизичким плазмама невероватно разноврсни у поређењу са изворима лабораторијске плазме. Сходно томе, ширење спектралних линија услед интеракције између емитера/апсорбера и наелектрисаних честица (Штарково ширење) у астрофизици је од интереса у плазмама у тако екстремним условима као што су они у међузвезданим облацима молекуларног водоника или у атмосферама неутронских звезда, какви се не могу добити у лабораторијама.

Типичне електронске температуре у међузвезданим молекуларним облацима су око 30 К или мање, а типичне електронске густине су $2\text{-}15\text{ cm}^{-3}$. У таквим условима, јон може да захвати слободне електроне (рекомбинација) у веома удаљену орбиту са главним квантним бројем (n) чија је вредност неколико стотина, па и већа од хиљаду и да се каскадно деесцитује на енергетске нивое $n-1$, $n-2$,... зрачећи у радио домену. Такви удаљени електрони су слабо повезани са језгром и на њих могу утицати веома слаба електрична микропоља. Сходно томе, Штарково ширење може бити значајно (види нпр. [9]).

У међузвезданим облацима јонизованог водоника, електронске температуре су око 10 000 К а електронске густине реда 10^4 cm^{-3} [10]. На одговарајуће серије блиских радио рекомбинационих линија које потичу са енергетских нивоа са великим вредностима n (неколико стотина па и веће од хиљаду) утиче Штарково ширење [10].

За $T_{\text{eff}} > 10^4\text{ K}$, водоник, главни конституент звезданих атмосфера је углавном јонизован, и међу сударним механизмима ширења спектралних линија, доминантан је Штарков ефекат. То је случај за беле патуљке и вреле звезде О, В и А типа. Чак и у атмосферама хладнијих звезда, као што је Сунце, Штарково ширење може бити значајно. На пример утицај Штарковог ширења у спектралним серијама расте са порастом главног квантног броја горњег нивоа [11-13] и за линије

са већом вредношћу овог квантног броја допринос Штарковог ширења је значајан и у Сунчевом спектру [14-16].

На пример спектралне линије - високи чланови Балмерове серије, могу се употребити као моћно дијагностичко средство за проучавање звезданих атмосфера. У раду Фелдмана и Дошека [17], употребљени су профили чланова Балмерове серије са главним квантним бројем n између 16 и 32 (на које значајно утиче Штарков ефекат), да би се одредила електронска густина и температура изнад активне области на Сунцу. Опсег густина (у cm^{-3}) и температура (у К) од значаја за радијативне омотаче А и F звезда је $10^{14} \text{ cm}^{-3} \leq N_e \leq 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; $10^4 \text{ K} \leq T \leq 4 \cdot 10^5 \text{ K}$ [18].

Бели патуљци DA и DB типа имају ефективне температуре између око 10 000 К и 30 000 К тако да је Штарково ширење од значаја за интерпретацију и синтезу њихових спектра и за истраживање, моделирање и анализу њихових атмосфера. Спектри патуљака DA типа карактеришу се широким водониковим линијама (нпр. [19]), а код DB типа у спектру доминирају линије неутралног хелијума. Занимљиво је да је у спектрима белих патуљака откривено Земаново ширење, кога нема у лабораторијским спектрима [20]. Бели патуљци DO типа имају ефективне температуре од приближно 45000 К до око 120 000 К [21] и за истраживање плазме њихових атмосфера Штарково ширење може да буде веома значајно [22].

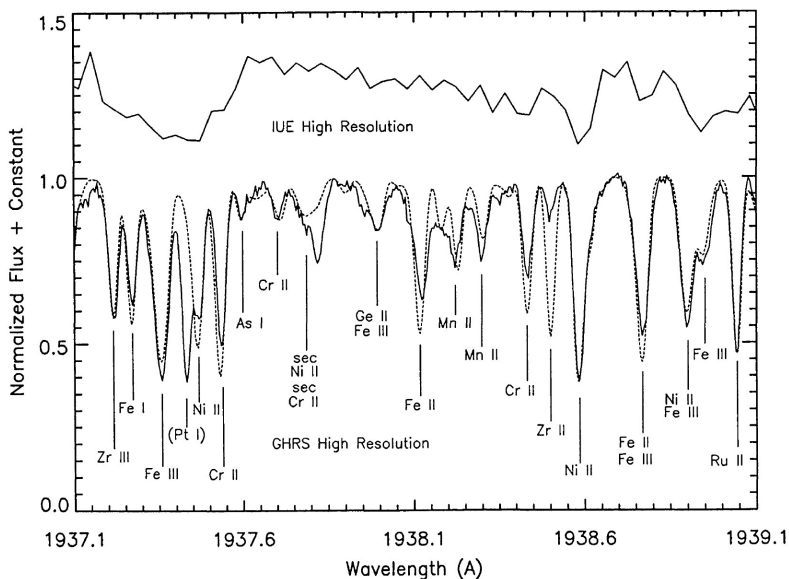
Међу најтоплије звезде спадају оне типа PG1159, Врели пре-бели патуљци са мањком водоника, чија ефективна температура се налази у опсегу од $T_{eff} = 100\ 000 \text{ K}$ (нпр. за PG1424+535 и PG1707+427) до $T_{eff} = 140\ 000 \text{ K}$ (за PG1159-035 и PG1520+525), где је свакако Штарково ширење изузетно важно [23]. Ове звезде имају велику површинску гравитацију ($\log g = 7$), и у њиховим фотосферама доминира хелијум и угљеник са знатним додатком кисеоника ($\text{C/He} = 0.5$ и $\text{O/He} = 0.13$) [23]. У њиховим спектрима, на које јако утиче Штарково ширење, доминирају линије He II, C IV, O VI и N V.

У атмосферама неутронских звезда, густина материје, електронска концентрација и температура су за редове величине већи него у атмосферама белих патуљака, и типичне су за унутрашњост звезда. Температуре на којима се одвија емисија из фотосфере су реда $10^6 - 10^7$ К, а електронске густине реда 10^{24} cm^{-3} [24,25]. У реф. [25], финални профил за хелијуму сличну резонантну линију гвожђа је описан помоћу Фогтовог профила, са укупним параметром пригушења једнаким суми природног и Штарковог (судари са електронима) ширења.

Јасно је да звездана спектроскопија зависи од веома великог броја прелаза за различите атоме и јоне са подацима о њиховим атомским параметрима и Штарковом ширењу што је посебно стимулисано развојем космичке астрономије, пошто је помоћу инструмената као што је Годаров спектрограф велике резолуције (Goddard High Resolution Spectrograph - GHRS) на Хабловом космичком телескопу (Hubble Space Telescope), прикупљен велики скуп спектроскопских података високог квалитета, који стално расте, стимулишући истраживања спектралних линија. То се може лепо илустровати упоређивањем ултра љубичастих спектра χ Lupi добијених помоћу уређаја на сателиту IUE (International Ultraviolet Explorer) и GHRS (сл. 1). Треба узети у обзир да је на сл. 1 приказан део спектра широк само 2 Ангстрема и упоредити квалитет посматраних профила спектралних линија.

Развој компјутера такође стимулише потребу за великом количином атомских и спектроскопских података. Нарочито велики број података је потребан на пример за прорачун непрозрачности звезданих атмосфера. Илустративан пример може бити чланак о прорачуну непрозрачности за класичан модел цефеида [28], где је у обзир било узето 11 996 532 спектралних линија. Други добар пример колико је велики скуп атомских и спектроскопских података неопходан, је моделирање звезданих атмосфера. На пример компјутерски програм

PHOENIX (види [29] и референце у чланку) за моделирање звезданих атмосфера, укључује базу података која садржи податке о 4.2×10^7 атомских, јонских и молекуларних прелаза.



СЛИКА 1. УВ спектар звезде χ Lupi добијен помоћу GHRS и помоћу IUE сателита [26]. Резолуција GHRS спектра је 0.0023 нм а максимални однос сигнал/шум је 95 [27]. На GHRS спектру пуном линијом је означен посматран а тачкастом синтетизовани.

Занимљива истраживања, која показују могућности које се отварају са развојем компјутерских технологија, и указују потребу за што је могуће већим скупом спектроскопских и атомских података, су прорачуни промена еквивалентних ширина са временом у звезданим јатима и галаксијама, „породилиштима“ (starburst) звезда [30]. У овим истраживањима, рачуната је промена еквивалентних ширина појединих водоникових и хелијумових линија у току 500 милиона година, и поређена са посматрањима звезданих јата и галаксија

«породилишта» звезда. Прорачуни су изведени у два корака. Прво су израчунате популације звезда различитих спектралних типова у функцији времена, а онда су профили спектралних линија синтетизовани додајући различите доприносе појединих спектралних типова звезда. Приликом синтезе профила спектралних линија, узети су у обзир природно, термално Доплерово, Штарково, и ширење линија услед судара са неутралним атомима.

За прорачун преноса зрачења кроз звездану плазму, нарочито у субфотосферским слојевима, као и за одређивање хемијске обилности елемената помоћу апсорпционих линија, потребан је што је могуће потпунији скуп података за што је могуће већи број спектралних линија различитих емитера односно апсорбера, пошто ми не знамо унапред хемијски састав проучаване звезде.

ИСТРАЖИВАЊА ЗВЕЗДАНЕ ПЛАЗМЕ

Профили спектралних линија улазе у моделирање слојева звездане атмосфере у оквиру процене величина као што су коефицијент апсорпције κ_ν , Роселандова оптичка дубина τ_{Ross} и укупни пресек за непрозрачност по атому σ_ν . Узмимо да је правац деловања гравитације у звезданој атмосфери z -оса. Ако је атмосфера у макроскопској механичкој равнотежи, а ρ означимо густину гаса, оптичка дубина је

$$\tau_\nu = \int_z^\infty \kappa_\nu \rho \, dz,$$

$$\kappa_\nu = N(A, i) \phi_\nu \frac{\pi e^2}{mc} f_{ij},$$

κ_ν је коефицијент апсорпције на фреквенцији ν , $N(A, i)$ је запреминска густина емитера у стању i , f_{ij} је јачина осцилатора у апсорпцији, m је маса електрона и ϕ_ν профил спектралне линије.

Пресек укупне непрозрачности по атому је

$$\sigma_v(\text{op}) = M\kappa_v,$$

где је M средња маса атома, а непрозрачност по јединици дужине је

$$\rho\kappa_v = N\sigma_v(\text{op}),$$

Уведимо као независну променљиву средњу оптичку дубину

$$\tau_{\text{Ross}} = \int_z^\infty \kappa_{\text{Ross}} \rho \, dz.$$

За Роселандову средњу оптичку дубину τ_{Ross} , κ_{Ross} је дефинисано као

$$\frac{1}{\kappa_{\text{Ross}}} \int_0^\infty \frac{dB_v}{dT} \, dv = \int_0^\infty \frac{1}{\kappa_v} \frac{dB_v}{dT} \, dv,$$

$$B_v(T) = \frac{2hv^3}{c^2} (e^{hv/kT} - 1)^{-1}.$$

Сада је Роселандов средњи пресек непрозрачности

$$\sigma_{\text{Ross}} = M\kappa_{\text{Ross}}.$$

Параметри Штарковог ширења су такође потребни за одређивање хемијског састава звезданих атмосфера, односно за одређивање звездане обилности хемијских елемената. Метод који користи синтетичке и посматране спектре и подешавање параметара модела атмосфере да би се добило најбоље

слагање, добро је развијен и примењиван на много звезда. Нађено је да постоје хемијски нерегуларне звезде, посебно у интервалу спектралних класа F0-B2 [31], код којих се обилности појединих елемената разликују за неколико редова величине од Сунчевих. Такође је пронађено да је површина CP звезда хемијски нехомогена, тако да је уведен локални хемијски састав, који зависи од координата на звезданој површини [31,32]. Такве неправилности се углавном објашњавају дифузионим механизмом, који делује у звезданим омотачима и (или) атмосферама, као и разликама у радијативном убрзању појединих елемената [33]. Радијативно убрзање g_r на ν , у интервалу фреквенција $d\nu$, које делује на елемент A (чија је густина $N(A)$ а маса m_A) је [34]

$$m_A g_r = \frac{\kappa_\nu(A)}{N(A)} \Phi_\nu \frac{d\nu}{c},$$

где је $\kappa_\nu(A)$ допринос A монохроматском коефицијенту апсорпције, а Φ_ν флуks зрачења. У непрозрачном омотачу радијуса r , флуks зрачења је приближно једнак [34]

$$\Phi_\nu = \frac{4\pi}{3} \frac{1}{\rho \kappa_\nu} \frac{\partial B_\nu}{\partial T} \left(\frac{-\partial T}{\partial r} \right),$$

$$\kappa_\nu = \kappa_\nu(A) + \kappa_{\text{rest}},$$

где су са κ_{rest} означени остали доприноси укупном коефицијенту апсорпције, поред $\kappa_\nu(A)$. Већина CP звезда су A и B спектралног типа, код којих је Штарково ширење главно од механизма ширења притиском.

НЕУТРОНСКЕ ЗВЕЗДЕ

Са побољшаном осетљивошћу Рендгенских уређаја у космосу, расте интерес за спектралне линије код атмосфера неутронских звезда. Пошто је карактеристична густина у атмос-

фери директно сразмерна гравитационом убрзању на звезданој површини, мерењем ширења притиском апсорпционих линија директно се мери M/R^2 , где су M и R маса и радијус звезде. Када се то повеже са мерењем гравитационог црвеног помака (пропорционалног са M/R), за исту или било коју другу линију или скуп линија, могу се одредити маса и радијус. Оваква мерења масе и радијуса не укључују удаљеност неутронске звезде, која је често недовољно прецизно позната, као ни величину емитујуће области [34].

Да бисмо добили грубу процену ширине спектралне линије за атмосферу неутронске звезде, можемо да проценимо ширину услед деловања најближег суседа (на растојању r_{nn}). Енергетска ширина линије $L\alpha$ коју изазива пертурбер са наелектрисањем z је [34]

$$W_{\text{Stark}} = \frac{6a_0ze^2}{Zr_{nn}^2} = 6\left(\frac{4\pi}{3}\right)^{2/3} \frac{a_0ze^2}{Z} N_{\text{pert}}^{2/3} \text{ eV}.$$

Овде је N_{pert} густина пертурбера а Z наелектрисање језгра јона.

Ако изаберемо јединицу дубине Томсоновог расејања као одговарајућу референтну тачку, и интегришемо једначину хидростатичке равнотеже за изотермалну атмосферу температуре T , добија се да је карактеристична електронска густина за атмосферу неутронске звезде [34]

$$N_e = \frac{\mu m_p g}{\sigma_T k T} = 3.4 \times 10^{24} \mu M_{1.4} T_6^{-1} R_6^{-2} \text{ cm}^{-3}.$$

Овде је μ средња маса по честици у јединицама масе протона m_p , g је гравитационо убрзање, σ_T Томсонов пресек, k Болцманова константа, $M_{1.4}$ маса звезде у јединицама 1.4 масе Сунца, R_6 радијус у јединицама 10^6 см, и T_6 температура атмосфере у јединицама 10^6 К.

У квазистатичкој апроксимацији [34], претпостављајући да су електронско и јонско ширење упоредиви, Штаркова

ширина спектралне линије за плазму у којој доминира водоник ($Z=1$, $N_{\text{pert}} = N_e$, $\mu = 1/2$) је [34]

$$W_{\text{Stark}} [\text{eV}] = 163 Z^{-1} (M_{1,4})^{2/3} (R_6)^{-4/3} (T^6)^{-2/3} \text{ eV}.$$

Перелс [34] је за $\text{Ly}\alpha$ линију водонику сличног кисеоника нашао типичну Штаркову ширину од 20 eV, а од 60 eV за $\text{Ly}\beta$.

ПРИМЕНА СЕМИКЛАСИЧНОГ МЕТОДА ЗА ИСТРАЖИВАЊЕ ШТАРКОВОГ ШИРЕЊА СПЕКТРАЛНИХ ЛИНИЈА У СРБИЈИ И АСТРОФИЗИЧКИ ЗНАЧАЈ ДОБИЈЕНИХ РЕЗУЛТАТА

Упркос чињеници да је најбољи теоријски метод за одређивање Штарковски проширених профила спектралних линија квантно – механички метод јаке спреге, услед његове комплексности и нумеричких тешкоћа, постоји само мањи број оваквих прорачуна (види на пример референце у [36] као и [37-42]). Као пример доприноса чланова Групе за Астрономску спектроскопију на Астрономској опсерваторији у Београду, можемо навести прво одређивање параметара Штарковог ширења у оквиру квантно-механичке теорије јаке спреге за један неводонични неутрални емитер (спектрална линија $\text{Li I } 2s \ ^2S - 2p \ ^2P^o$ [43]). Уз помоћ квантно-механичке теорије [41,42] израчунали смо и параметре Штарковог ширења за две линије C IV , 2 N V , 2 O VI , 2 F VII , 2 Ne VIII [44], 6 Ar VII [45] 6 Ar XV [46]

У многим случајевима, као што су на пример комплексни спектри тешких атома или прелази између високопобуђених нивоа, квантно-механички метод је веома тешко, а често и практично немогуће употребити, те у таквим случајевима семикласични метод остаје најефикаснији метод за одређивање параметара Штарковог ширења.

Постојећи семикласични прорачуни већег обима изведени су коришћењем три различита компјутерска програма које су у основи разрадили (i) Џонс, Бенет и Грим (Jones, Benett и Griem [47-49]), (ii) Саал-Брешо (Sahal-Bréchet [50,51]) и (iii) Басало, Катани и Валдер (Bassalo, Cattani и Walder [52]).

Да би обезбедили што већи број података о Штарковом ширењу, потребних за истраживања астрофизичке и лабораторијске плазме, прорачун звезданих непрозрачности и моделирање атмосфера ових објеката, чинимо непрекидан напор да одредимо параметре Штарковог ширења за велики број линија у спектрима атома и јона. У низу радова, користећи семикласични пертурбациони формализам [50, 51] који је био иновирани, осавремењен и оптимизован више пута (види нпр. [36,53-56], о примени метода види [57]), одредили смо параметре Штарковог ширења за прелазе за које постоји довољно комплетан скуп поузданих атомских података, тако да се очекује добра тачност резултата (види на пример референце у [36] као и [58]).

До сада су публиковани резултати за 79 He I, 61 Li I, 19 Be I, 66 B I, 9 O I, 29 Ne I, 62 Na I, 270 Mg I, 25 Al I, 51 K I, 189 Ca I, 9 Cr I, 5 Cu I, 32 Zn I, 18 Ga I, 31 Se I, 31 Se I, 11 Kr I, 24 Rb I, 33 Sr I, 3 Pd I, 48 Ag I, 70 Cd I, 4 Te I, 14 Ba I, 6 Au I, 29 Li II, 30 Be II, 1 B II, 148 C II, 5 F II, 22 Ne II, 66 Mg II, 19 Si II, 7 S II, 300 Ar II, 28 Ca II, 16 Cr II, 3 Fe II, 2 Ni II, 34 Zn II, 1 Kr II, 1 Cd II, 64 Ba II, 12 B III, 27 Be III, 5 F III, 5 Ne III, 23 Al III, 32 Ar III, 10 Sc III, 32 Y III, 20 In III, 4 Sn III, 2 Tl III, 157 B IV, 90 C IV, 5 O IV, 2 Ne IV, 39 Si IV, 114 P IV, 10 Ti IV, 114 Pb IV, 25 C V, 30 N V, 19 O V, 26 Ne V, 16 Si V, 51 P V, 34 S V, 26 V V, 238 Fe V, 30 O VI, 2 F VI, 15 Si VI, 21 S VI, 4 Xe VI, 14 O VII, 10 F VII, 10 Cl VII, 8 Ar VII, 20 Ne VIII, 4 K VIII, 9 Ar VIII, 6 Kr VIII, 60 Xe VIII, 8 Na IX, 30 K IX, 4 Ca IX, 57 Na X, 48 Ca X, 4 Sc X, 18 Mg XI, 7 Al XI, 4 Si XI, 10 Sc XI, 4 Ti XI, 9 Si XII, 27 Ti XII, 61 Si XIII, 33 V XIII, 6 Ar XV и 18 Fe XXV појединачних спектралних линија и мултиплета.

Добијени семикласични резултати су упоређени са критички изабраним експерименталним подацима за 13 мултиплета He I [59]. Разлике између семикласичних резултата и експерименталних вредности су унутар граница од $\pm 20\%$, што су и предвиђене границе тачности семикласичног метода [50]).

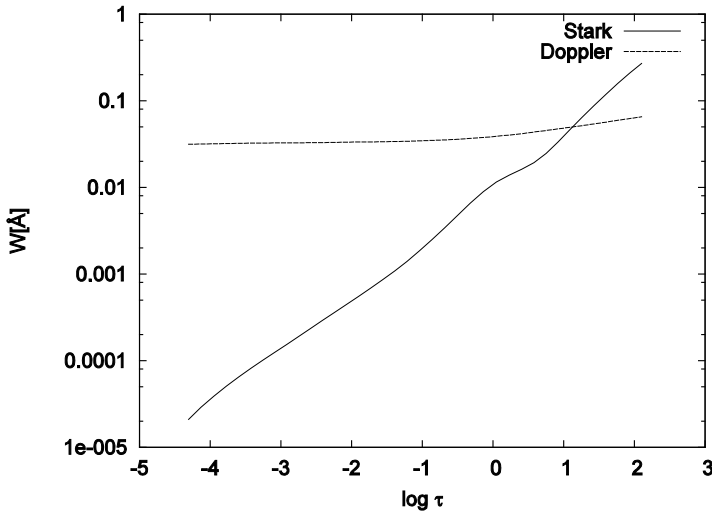
ПРИМЕНА ПАРАМЕТАРА ШТАРКОВОГ ШИРЕЊА ОДРЕЂЕНИХ СЕМИКЛАСИЧНИМ ПЕРТУРБАЦИОНИМ МЕТОДОМ ЗА ИСТРАЖИВАЊЕ УТИЦАЈА ОВОГ МЕХАНИЗМА ШИРЕЊА У ЗВЕЗДАНИМ АТМОСФЕРАМА

У низу радова истраживан је утицај Штарковог ширења на Au II [60], Co III [61], Ge I [62], Ga I [63], Cd I [64], Te I [65], Cr II [66,67], Lu II [68], Lu III [69], Co II [70], Zn II [71], Zn III [72] и Sn III [73] спектралне линије у спектрима атмосфера хемијски нерегуларних звезда А типа и за сваки испитивани спектар нађени су атмосферски слојеви, где се допринос овог механизма не може занемарити. У реф. [71] ово је истражено и код звезда касног В и раног F типа Као модел хемијски нерегуларне звездане атмосфере А типа, у поменутих радовима је коришћен модел са условима у плазми блиским HgMn звезди А типа χ Lupi. Таква истраживања су изведена и за атмосфере белих патуљака DA, DB и DO типа [22, 60, 61, 66, 68, 70, 72, 74-81], и установљено је да је за такве звездане атмосфере Штарково ширење доминантно у односу на Доплерово, у практично свим релевантним атмосферским слојевима. Слично испитивање изведено је и за sdV субпатуљке [82-84].

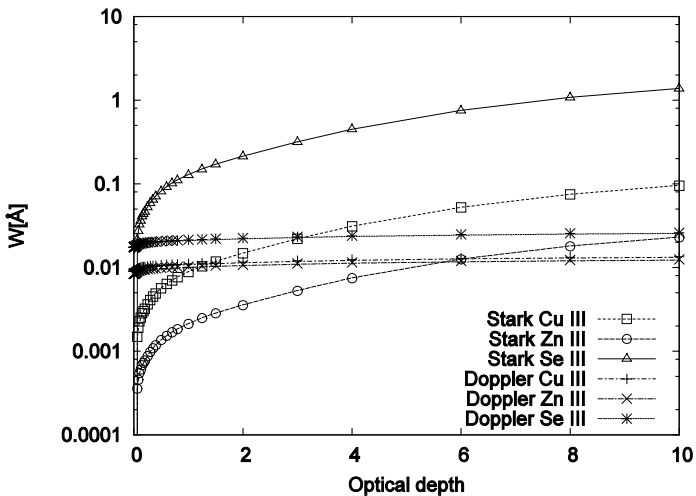
Као пример утицаја Штарковог ширења у атмосферама врелих звезда, на Сл. 2 је Штаркова ширина Te I $6s\ ^5S^{\circ} - 6p\ ^5P$ (9903.9 Å) мултиплета, упоређена са Доплеровом за модел ($T_{\text{eff}} = 10000$ K, $\log g = 4.5$ [85]) [65] атмосфере звезде

спектралног типа А. Наиме у атмосферама врелих звезда, Доплерово ширење је важан конкурентни механизам ширења спектралних линија, и упоређивањем Штаркове и Доплерове ширине може се закључити о значају ових механизма ширења. Треба имати у виду да се профил Доплеровски проширене линије описује Гаусовом расподелом а Штарковски проширене Лоренцовом. Због особина ове две расподеле, чак и када је Штаркова ширина линије мања од Доплерове, овај механизам може да утиче на крила линије. Резултати Симића и др. [65], представљени су на Сл. 2 у функцији Роселандове оптичке дубине – $\log \tau$. Може се видети да је механизам Штарковог ширења апсолутно доминантан у поређењу са термалним Доплеровим, у дубљим слојевима звездане атмосфере.

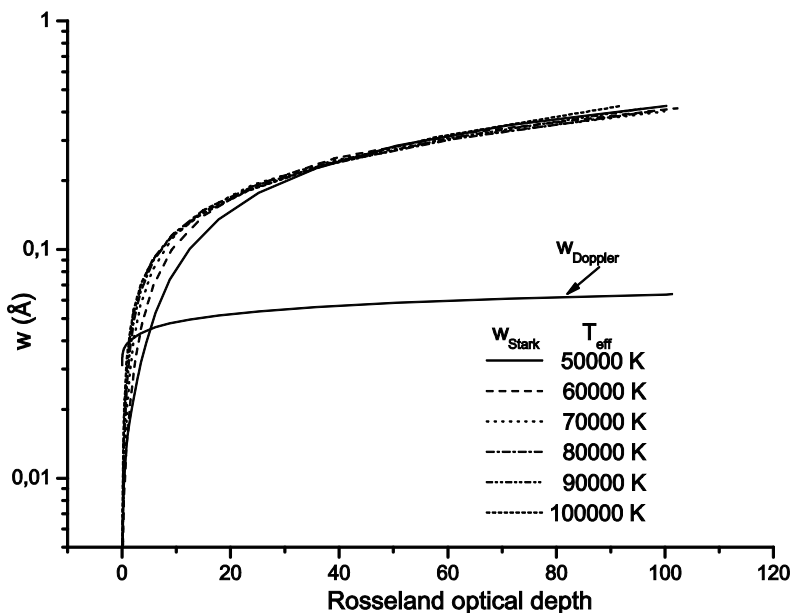
Утицај Штарковог ширења на линије Cu III, Zn III и Se III у спектрима атмосферама DB белих патуљака, истраживали су Симић и др. [64] за Cu III $4s^2F - 4p^2G^o$ ($\lambda=1774.4 \text{ \AA}$), Zn III $4s^3D - 4p^3P^o$ ($\lambda=1667.9 \text{ \AA}$) и Se III $4p5s^3P^o - 5p^3D$ ($\lambda=3815.5 \text{ \AA}$), користећи модел атмосфере са $T_{\text{eff}} = 15000 \text{ K}$ и $\log g = 7$ [86]. За разматрани модел атмосфере DB белих патуљака мрежа тачка за оптичку дубину дата је у реф. [86] за стандардну таласну дужину $\lambda_s = 5150 \text{ \AA}$ (τ_{5150}) па је оптичка дубина тако претстављена и код Симића и др. [64]. Као што се може видети на Сл. 3, за услове у плазми атмосфере DB белих патуљака термално Доплерово ширење има много мањи значај у поређењу са Штарковим ширењем. На пример Штаркова ширина за разматрану Se III 3815.5 \AA линију је већа од Доплерове и до два реда величине у оквиру посматраног опсега оптичких дубина. Много веће Штаркове ширене у атмосферама DB белих патуљака, у поређењу са звездама спектралног типа А, су последица већих електронских густина услед много веће површинске гравитације и ефективне температуре, тако да је механизам ширења спектралних линија услед судара са електронима (Штарков) много ефективнији.



СЛИКА 2. Термална Доплерова и Штаркова ширина за $\text{Te I } 6s^5S^{\circ} - 6p^5P$ (9903.9 \AA) мултиплет у функцији оптичке дубине за звезду спектралног типа A ($T_{\text{eff}} = 10000 \text{ K}$, $\log g = 4.5$).



СЛИКА 3. Термална Доплерова и Штаркова ширина за спектралне линије $\text{Cu III } 4s^2F - 4p^2G^{\circ}$ ($\lambda=1774.4 \text{ \AA}$), $\text{Zn III } 4s^3D - 4p^3P^{\circ}$ ($\lambda=1667.9 \text{ \AA}$) и $\text{Se III } 4p5s^3P^{\circ} - 5p^3D$ ($\lambda=3815.5 \text{ \AA}$), за модел атмосфере DB белог папуљка са $T_{\text{eff}} = 15\,000 \text{ K}$ и $\log g = 7$, у функцији оптичке дубине τ_{5150} .

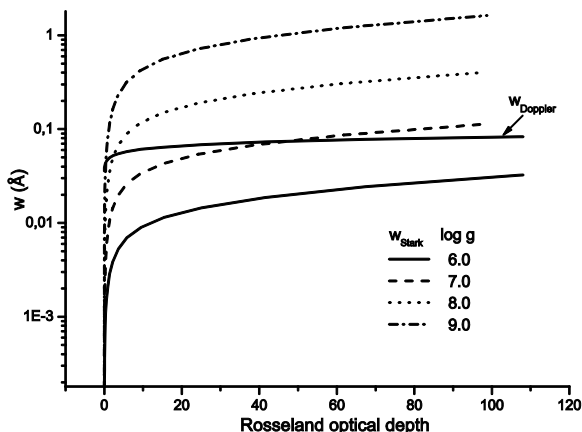


СЛИКА 4. Штаркова и Доплерова ширина за спектралну линију Si VI $2p^4(^3P)3s^2P-2p^4(^3P)3p^2D^0$ ($\lambda = 1226, 7\text{\AA}$) у функцији Роселандове оптичке дубине. Штаркове ширине су дате за шест модела DO белих патуљака са ефективним температурама $T_{\text{eff}} = 50\,000\text{--}100\,000\text{ K}$ и $\log g = 8$.

Хамди и др. [22] истраживали су утицај Штарковог ширења на Si VI линије у спектру DO белих патуљака за $50000\text{ K} \leq T_{\text{eff}} \leq 100000\text{ K}$ и $6 \leq \log g \leq 9$. Установљено је да утицај расте са порастом $\log g$ и доминантан је у великим областима разматраних атмосфера, чији су модели узети из рада Весемела (Wesemael) [87].

На Сл. 4 и 5 представљене су Штаркова (FWHM) и Доплерова ширина за спектралну линију Si VI $2p^4(^3P)3s^2P-2p^4(^3P)3p^2D^0$ ($\lambda = 1226, 7\text{\AA}$) у функцији Роселандове оптичке дубине. Штаркове ширине су дате за шест модела DO белих патуљака са ефективним температурама $T_{\text{eff}} = 50\,000\text{--}100\,000\text{ K}$ и $\log g = 8$ и четири модела са $\log g = 6\text{--}9$ и $T_{\text{eff}} = 80\,000\text{ K}$. За моделе звезданих атмосфера са већим вредностима површинске гра-

витације ($\log g = 8-9$), Штарково ширење је знатно веће од Доплеровог. За звездане атмосфере са површинском гравитацијом $\log g = 7$, Штаркове ширине су упоредиве са Доплеровим само за дубље, врелије слојеве. За моделе атмосфера са $\log g = 6$, Доплерово ширење је доминантно за све анализирани слојеве атмосфере.

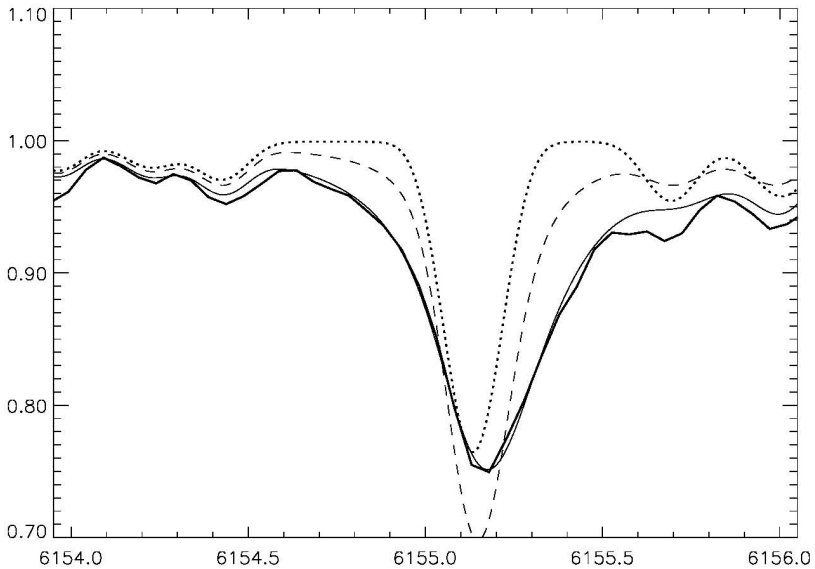


СЛИКА 5. Штаркова и Доплерова ширина за спектралну линију $Si VI 2p^4(^3P)3s^2P-2p^4(^3P)3p^2D^{\circ}$ ($\lambda = 1226, 7 \text{ \AA}$) у функцији Роселандове оптичке дубине. Штаркове ширине су дате за четири модела DO белих патуљача са $\log g = 6-9$ и $T_{eff} = 80\,000 \text{ K}$.

УТИЦАЈ ШТАРКОВОГ ШИРЕЊА И СТРАТИФИКАЦИЈЕ НА ЛИНИЈЕ $Si I$ КОД $roAp$ ЗВЕЗДЕ $10 Aq1$

Као пример примене података о Штарковом ширењу у астрофизици може да послужи реф. [88] где је проучен утицај хемијске раслојености односно стратификације и Штарковог ширења на спектралне линије $Si I$, код брзо осцилујуће $roAp$ звезде $10 Aq1$, где су линије $Si I 6142.48 \text{ \AA}$ и 6155.13 \AA асиметричне и померене. Аутори су прво израчунали параметре Штарковог ширења, користећи семикласични пертурбациони метод, за три спектралне линије неутралног силицијума:

5950.2 Å, 6142.48 Å и 6155.13 Å. Изменили су програм за рачунање синтетичког спектра тако да се узимају у обзир и Штаркове ширине и помаци за анализиране линије. На основу упоређивања теоријских прорачуна са посматрањима, нашли су да ефекти Штарковог ширења + хемијског раслојавања (стратификације) могу да објасне асиметрију Si I 6142.48 Å и 6155.13 Å линија.



СЛИКА 6. Упоређивање профила спектралне линије 6155 Å неутралног силицијума, посматране у спектру Ар звезде 10 Aql (дебела линија) и синтетичког спектра израчунатог са Штарковом ширином и помаком из табеле 1 у реф. [60] и раслојавањем (стратификацијом) обилности силицијума (танка линија), са истим Штарковим параметрима али за хомогену расподелу силицијума (цртице), као и са Штарковом ширином узетом помоћу апроксимативне формуле за исто раслојавање силицијума (тачкаста линија).

За анализу, искористили су посматрања нормалне звезде HD32115, и две Ар звезде HD122970 и 10 Aql, као и Solar Flux Atlas [89]. CCD спектри високе резолуције 10 Aql и HD122970

су описани у раду Рјабчикова и др. [90]. CCD спектри високе резолуције (R приближно 45000) звезде HD32115 у опсегу таласних дужина 4000-9500 Å добијени су помоћу coude-shell спектрометра монтираног на двометарски Цајсов телескоп на опсерваторији на врху Терскол у Русији (види Бикмаев и др. [91] за више детаља).

Велики број Ар звезда показује нерегуларне профиле линија Si I, али већина има јака магнетна поља која деформишу профиле линија преко Земановог цепања. Прилично слаба магнетна поља код Ар звезда HD122970 и 10 Aql, омогућују да се утицај магнетног поља на облик линије занемари. Прорачун модела атмосфере, као и израчунавање коефицијента апсорпције, изведени су у апроксимацији локалне термодинамичке равнотеже (LTE). Рачунање модела атмосфере извршено је уз помоћ компјутерског програма ATLAS9 који је написао Р. Л. Куруз [92].

Следећи корак био је рачунање флукса ка посматрачу, у функцији (за одговарајућу мрежу тачака) таласне дужине, користећи дати модел. За то је узет компјутерски програм STARSF, који је написао В. В. Цимбал [93], и то измењена верзија, која израчунава синтетички спектар за атмосферу са вертикалним раслојавањем (стратификацијом) хемијских елемената.

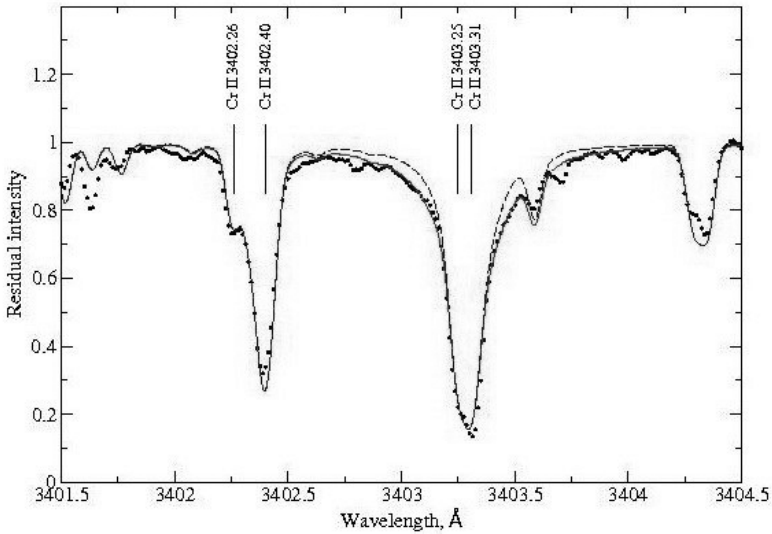
Прво су израчунали спектралне линије неутралног силицијума у спектру Сунца, да би проверили параметре Штарковог ширења и са поправљеним Штарковим параметрима синтетисали су профиле линија у спектрима звезда HD32115, HD122970 и 10 Aql.

Звезда 10 Aql= HD176232 је највредија у њиховом узорку. Има углавном асиметрични профил линије Si I 6155.13 Å, што се не може репродуковати ниједном комбинацијом параметара Штарковог ширења у хомогеној атмосфери. Чак и слабија, Si I 6142.48 Å линија, има значајан помак. Рјабчикова и др. [90] поменули су могућност раслојавања (стратификације) гвожђа и ретких земља у атмосфери 10 Aql. Они су покушали

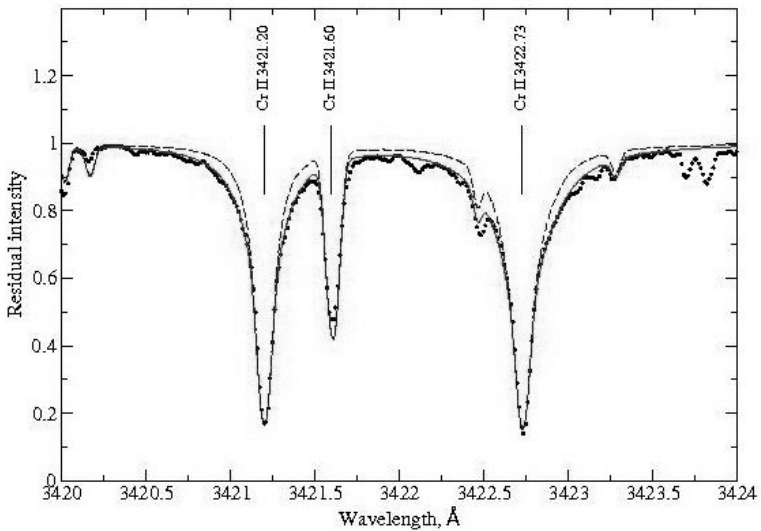
да нађу емпиријски, једноставну расподелу силицијума у 10 Aq1, која би фитовала како Si I 6142.48 Å тако и 6155.13 Å линију. Добијена расподела даје разумно слагање посматраног и синтетисаног профила за обе силицијумове линије (Сл. 6). Штавише, чини се да иста расподела силицијума много боље фитије профиле јаких Si II 6347, 6371 Å спектралних линија, у поређењу са прорачунима са хомогеном Si обилношћу (-4.19), које су извели Рјабчикова и др. [90]. У својој анализи, аутори подвлаче, да са употребљеним параметрима Штарковог ширења, осетљивост асиметрије 6155.13 Å линије на промене обилности Si у звезданој атмосфери, може бити успешно употребљена за емпиријска истраживања раслојавања обилности у атмосферама хладних Ar звезда.

ШТАРКОВО ШИРЕЊЕ ЛИНИЈА ЈОНИЗОВАНОГ ХРОМА У СПЕКТРУ Ar ЗВЕЗДЕ HD 133792

Димитријевић и др. [94] су истраживали Cr II линије у спектру Ar звезде HD 133792, за које постоји пажљиво изведена анализа обилности и стратификације [95]. Звезда HD133792 има ефективну температуру $T_{\text{eff}} = 9400$ K, површинску гравитацију $\log g = 3.7$, и средњу обилност хрома +2.6 dex у односу на обилност овог елемента код Сунца [95]. Сви прорачуни су изведени са побољшаном верзијом SYNTH3 компјутерског програма SYNTH за прорачун синтетичког спектра. Штаркови параметри пригушења су унети у компјутерски програм. Употребљена је раслојена (стратификована) расподела хрома у атмосфери HD133972, изведена у реф. [95]. На Сл. 7 је посматрани профил линије Cr II 3403.30 Å, упоређен са синтетичким са параметрима Штарковог ширења из рада Димитријевић и др. [94] и Куруцовим [96]. Добро слагање посматрања и прорачуна за неколико слабих Cr II линија, потврђује употребљену расподелу раслојавања хрома, док слагање за све четири јаке Cr II линије, демонстрира добру тачност добијених теоријских параметара Штарковог ширења у реф. [94].



СЛИКА 7. Поређење посматраног (тачке) профила линије Cr II 3403.30 Å, и синтетисаног са параметрима Штарковог ширења из рада Димитријевић и др. [94] (пуна линија) и Куруцовим [96] (испрекидана линија).



СЛИКА 8. Исто као на Сл. 7, само за линије Cr II 3421.20, 3422.73 Å.

То отвара нову могућност, да се теоријски и експериментални резултати о Штарковом ширењу додатно провере помоћу звезданих спектара, чему нарочито могу да допринесу развој спектроскопије помоћу уређаја у космосу, изградња циновских телескопа нове генерације и пораст тачности и поузданости компјутерских програма за моделирање звезданих атмосфера. Линије Cr II анализирани у реф. [94] су нарочито погодне за такву сврху, пошто имају добра и чиста крила, где је утицај Штарковог ширења најважнији.

МОДИФИКОВАНИ СЕМИЕМПИРИЈСКИ МЕТОД ЗА ШТАРКОВО ШИРЕЊЕ И АСТРОФИЗИЧКЕ ПРИМЕНЕ

Модификована семиемпиријска теорија (МСЕ) [97,98] за прорачун параметараа Штарковог ширења изолованих спектралних линија неводоничних јона, успешно је примењена много пута за различите проблеме у астрофизици и физици. Према МСЕ прилазу [97-104], пуна ширина изоловане јонске линије на половини максималног интензитета (FWHM) услед судара са електронима је

$$w_{\text{MSE}} = N \frac{4\pi \hbar^2}{3c m^2} \left(\frac{2m}{\pi kT} \right)^{1/2} \frac{\lambda^2}{3^{1/2}} \cdot \left[\sum_{\ell_t \pm 1} \sum_{L_t J_t} \mathcal{R}_{\ell_t, \ell_t \pm 1}^2 \tilde{g}(x_{\ell_t, \ell_t \pm 1}) \right. \\ \left. + \sum_{\ell_t \pm 1} \sum_{L_t J_t} \mathcal{R}_{\ell_t, \ell_t \pm 1}^2 \tilde{g}(x_{\ell_t, \ell_t \pm 1}) \right. \\ \left. + \left(\sum_{i'} \mathcal{R}_{i i'}^2 \right)_{\Delta n \neq 0} g(x_{n_i, n_i + 1}) + \left(\sum_{f'} \mathcal{R}_{f f'}^2 \right)_{\Delta n \neq 0} g(x_{n_f, n_f + 1}) \right],$$

а одговарајући Штарков помак

$$\begin{aligned}
d = N \frac{2\pi \hbar^2}{3c m^2} \left(\frac{2m}{\pi kT} \right)^{1/2} \frac{\lambda^2}{3^{1/2}} & \left[\sum_{L_f J_f} \sigma_{J_i J_f} \mathfrak{R}_{\ell_i, \ell_i+1}^2 \tilde{g}_{sh}(\mathbf{x}_{\ell_i, \ell_i+1}) \right. \\
& - \sum_{L_f J_f} \sigma_{J_i J_f} \mathfrak{R}_{\ell_i, \ell_i-1}^2 \tilde{g}_{sh}(\mathbf{x}_{\ell_i, \ell_i-1}) \sum_{L_f J_f} \sigma_{J_i J_f} \mathfrak{R}_{\ell_i, \ell_i+1}^2 \tilde{g}_{sh}(\mathbf{x}_{\ell_i, \ell_i+1}) \\
& + \sum_{L_f J_f} \sigma_{J_i J_f} \mathfrak{R}_{\ell_i, \ell_i-1}^2 \tilde{g}_{sh}(\mathbf{x}_{\ell_i, \ell_i-1}) + \left(\sum_{f'} \mathfrak{R}_{if'}^2 \right)_{\Delta n \neq 0} g_{sh}(\mathbf{x}_{n_i, n_i+1}) \\
& - 2 \sum_{f'(\Delta E_{if'} < 0)} \sum_{L_f J_f} \mathfrak{R}_{\ell_i, \ell_i'}^2 g_{sh}(\mathbf{x}_{\ell_i, \ell_i'}) - \left(\sum_{f'} \mathfrak{R}_{if'}^2 \right)_{\Delta n \neq 0} g_{sh}(\mathbf{x}_{n_i, n_i+1}) \\
& \left. + 2 \sum_{f'(\Delta E_{if'} < 0)} \sum_{L_f J_f} \mathfrak{R}_{\ell_i, \ell_i'}^2 g_{sh}(\mathbf{x}_{\ell_i, \ell_i'}) + \sum_k \delta_k \right],
\end{aligned}$$

где је почетни енергетски ниво означен са i , крајњи са f , а сума квадрата матричних елемената \mathfrak{R} за разлику главних квантних бројева $\Delta n \neq 0$, је

$$\left(\sum_{k'} \mathfrak{R}_{kk'}^2 \right)_{\Delta n \neq 0} = \left(\frac{3n_k^*}{2Z} \right)^2 \frac{1}{9} (n_k^{*2} + 3\ell_k^2 + 3\ell_k + 11)$$

у Кулоновој апроксимацији. При томе је

$$\mathbf{x}_{\ell_k, \ell_k'} = \frac{E}{\Delta E_{\ell_k, \ell_k'}}, \quad k = i, f,$$

где је $E=3/2kT$, кинетичка енергија електрона а

$$\Delta E_{\ell_k, \ell_k'} = |E_{\ell_k} - E_{\ell_k'}|$$

$$\mathbf{x}_{n_k, n_k+1} \approx \frac{E}{\Delta E_{n_k, n_k+1}},$$

а за $\Delta n \neq 0$ енергетска разлика између нивоа са n_k и n_{k+1} је процењена као

$$\Delta E_{n_k, n_{k+1}} \approx 2Z^2 E_H / n_k^{*3},$$

при чему је

$$n_k^* = [E_H Z^2 / (E_{\text{ion}} - E_k)]^{1/2}$$

ефективни главни квантни број, Z резидуално наелектрисање јона, односно наелектрисање остатка које „види“ оптички електрон, то јест електрон који врши прелаз ($Z=1$ за неутралне атоме, 2 за једноструко наелектрисане јоне ...) и E_{ion} одговарајућа граница спектралне серије. N и T су електронска густина и температура, док су са $g(x)$ [105], $\tilde{g}(x)$ [97] и $g_{\text{sh}}(x)$ [105], $\tilde{g}_{\text{sh}}(x)$ [98] означени одговарајући Гаунт фактори за ширину и помак. Фактор

$$\sigma_{kk'} = (E_{k'} - E_k) / |E_{k'} - E_k|,$$

где су E_k и $E_{k'}$ енергије разматраног нивоа и нивоа који га пертурбује. Сума по δ_l

$$\delta_i = \pm \mathcal{R}_{if}^2 \left[g_{\text{sh}} \left(\frac{E}{\Delta E_{i,f'}} \right) \mp g_{\text{sh}}(x_{n_i, n_{i+1}}) \right],$$

$$\delta_f = \mp \mathcal{R}_{ff'}^2 \left[g_{\text{sh}} \left(\frac{E}{\Delta E_{f,f'}} \right) \mp g_{\text{sh}}(x_{n_f, n_{f+1}}) \right],$$

је различита од нуле само за оне пертурбујуће нивое, ако постоје, за које су јако нарушене претпостављене апроксимације.

У поређењу са потпуним семикласичним [49-51], и Гривовим семиемпиријским прилазом [105], за који треба практично исти сет атомских података као и за најсофистициранији семикласични, за модификовани семиемпиријски метод

[97-104] потребно је знатно мање таквих података. У ствари, ако нема нивоа за које су претпостављене апроксимације јако нарушене, за прорачун Штаркове ширине, потребни су само енергетски нивои са $\Delta n = 0$, пошто је допринос свих нивоа са $\Delta n \neq 0$, који су потребни за потпуни семикласични прорачун и Гримову семиемпиријску формулу, приближно збирно процењен.

Услед потребе за знатно мањим бројем атомских података у поређењу са потпуним семикласичним пертурбационим [49-51], и Гримовим семиемпиријским прилазом [105], МСЕ метод је посебно користан за звездану спектроскопију, за коју су потребни атомски подаци и подаци о параметрима ширења за веома обимну листу елемената и спектралних линија, при чему није могуће у свим случајевима од интереса применити софистициране теоријске методе.

МСЕ метод је такође веома користан када су потребни подаци за веома велики број спектралних линија, а није неопходна велика тачност за сваку појединачну линију, као што су то на пример прорачуни преноса зрачења или моделирање плазме. Осим тога, у случају комплекснијих атома или вишеструко наелектрисаних јона, услед недостатка тачних атомских података потребних за прецизније прорачуне, поузданост семикласичних резултата опада. У таквим случајевима, МСЕ метод може такође бити интересантан.

УПРОШЋЕНА МСЕ ФОРМУЛА

За астрофизичке потребе, од посебног интереса може бити упрошћена МСЕ формула [100] за Штарково ширење изолованих линија, једноструко и вишеструко наелектрисаних неводоничних јона, примењљива у случају када је ниво најближи горњем и доњем нивоу прелаза, на који је могућ диполно дозвољени прелаз са почетног (i) или крајњег (f) енергетског нивоа разматране линије, тако далеко да је услов

$$x_{j\bar{j}} = E/|E_{j\bar{j}} - E_j| \leq 2$$

задовољен. У таквом случају, пуна ширина на половини максималног интензитета дата је изразом [100]:

$$W(\text{\AA}) = 2.2151 \times 10^{-8} \frac{\lambda^2(\text{cm})N(\text{cm}^{-3})}{T^{1/2}(\text{K})} \left(0.9 - \frac{1.1}{Z}\right) \sum_{j=i,\bar{i}} \left(\frac{3n_j^*}{2Z}\right)^2$$

$$(n_j^{*2} - \ell_j^2 - \ell - 1).$$

Овде, $E = 3kT/2$ је енергија пертурбујућег електрона, $Z-1$ је наелектрисање јона а n^* ефективни главни квантни број. Ова формула је од интереса за одређивања обилности, као и за истраживања звезданих атмосфера. Пошто су услови важења често задовољени у условима звездане плазме.

Слично у случају помака

$$d(\text{\AA}) = 1.1076 \times 10^{-8} \frac{\lambda^2(\text{cm})N(\text{cm}^{-3})}{T^{1/2}(\text{K})} \left(0.9 - \frac{1.1}{Z}\right) \frac{9}{4Z^2}$$

$$\times \sum_{j=i,\bar{i}} \frac{n_j^{*2} \varepsilon_j}{2\ell_j + 1} \left\{ (\ell_j + 1)[n_j^{*2} - (\ell_j + 1)^2] - \ell_n(n_j^{*2} - \ell_j^2) \right\}.$$

Ако сви нивои који улазе у горњу суму постоје, може се извести додатно сумирање и добија се

$$d(\text{\AA}) = 1.1076 \times 10^{-8} \frac{\lambda^2(\text{cm})N(\text{cm}^{-3})}{T^{1/2}(\text{K})} \left(0.9 - \frac{1.1}{Z}\right) \frac{9}{4Z^2}$$

$$\times \sum_{j=i,\bar{i}} \frac{n_j^{*2} \varepsilon_j}{2\ell_j + 1} (n_j^{*2} - 3\ell_j^2 - 3\ell_j - 1),$$

где је $\varepsilon = +1$ за $j = i$ и -1 за $j = f$.

Модификовани семиемпиријски метод тестиран је више пута на бројним примерима [36]. Да би се проверио овај метод, експериментални подаци за 36 мултиплета (7 различитих врста јона) троструко наелектрисаних јона упоређени су са теоријским ширинама линије и добијени следећи усредњени односи мерених и теоријских вредности [97]: за двоструко наелектрисане јоне 1.06 ± 0.32 а за троструко наелектрисане 0.91 ± 0.42 . Претпостављена тачност МСЕ формуле је око $\pm 50\%$, али је показано [102,106,107] да чак и у случају емитера са веома комплексним спектрима (нпр. Хе II и Kr II), МСЕ метод даје веома добро слагање са експериментом (у интервалу $\pm 30\%$). На пример за Хе II, 6s-6p прелазе, средњи однос између експерименталних и теоријских ширина линије је 1.15 ± 0.5 [106].

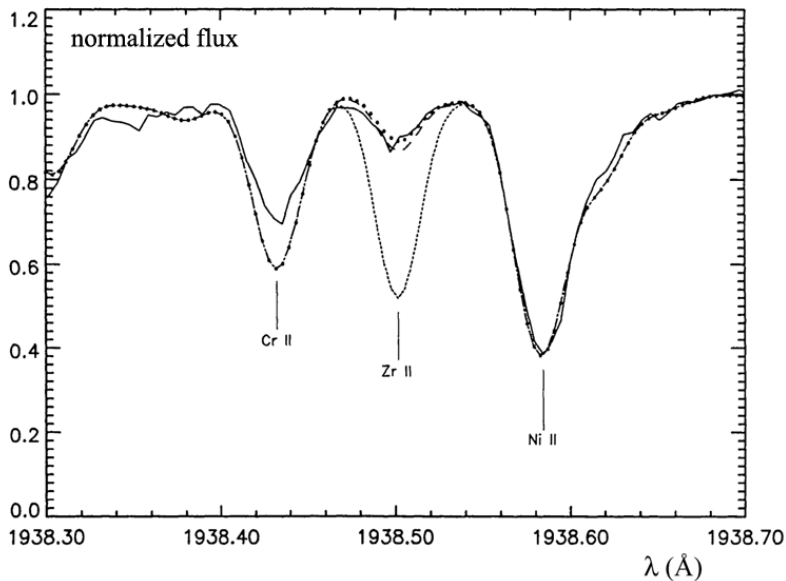
Израчунате су Штаркове ширине, а у неким случајевима и помаци, за спектралне линије следећих елемената: Si II, Ar II, Fe II, Pt II, Bi II, Cr II, Co II, Zn II, Cd II, As II, Br II, Sb II, Sr II, I II, Хе II, Mn II, La II, Au II, Eu II, V II, Ti II, Kr II, Na II, Y II, Zr II, Sc II, Lu II, Nd II, Be III, B III, C III, N III, O III, F III, Ne III, Na III, Al III, Si III, P III, S III, Cl III, Ar III, Cr III, Mn III, Ga III, Ge III, As III, Se III, Zn III, Mg III, La III, V III, Ti III, Bi III, Sr III, Cu III, Co III, Cd III, Yb III, Nb III, Lu III, B IV, Cu IV, Ge IV, C IV, N IV, O IV, Ne IV, Na IV, Mg IV, Si IV, P IV, S IV, Cl IV, Ar IV, V IV, Zr IV, Ge IV, Se IV, Sn IV, Sb IV, Te IV, Lu IV, C V, O V, F V, Ne V, Al V, Si V, N VI, F VI, Ne VI, Si VI, P VI, и Cl VI.

ПРИМЕНА НА ИСТРАЖИВАЊЕ „ЦИРКОНИЈУМСКОГ КОНФЛИКТА“ У АТМОСФЕРИ ЗВЕЗДЕ χ LUP1

Пример примене МСЕ формуле је разматрање „цирконинијумског конфликта“ у атмосфери звезде χ Lup1 [108]. Да

би анализирали овај проблем, напоменимо да истраживања обилности за звезде раних типова показују да око 10% - 20% звезда А и В спектралног типа имају аномалије обилности, укључујући аномалије у изотопном саставу [108].

Аномалије обилности у овим звездама, које се зову СР звезде, проузроковане су различитим хидродинамичким процесима у спољашњим звезданим слојевима (који су потпомогнути и олакшани магнетним пољима, slabим звезданим ветровима, турбуленцијом, мешањем услед ротације итд.). Да би се истражили ови процеси, потребни су атомски подаци за многу линија бројних емитера/апсорбера.

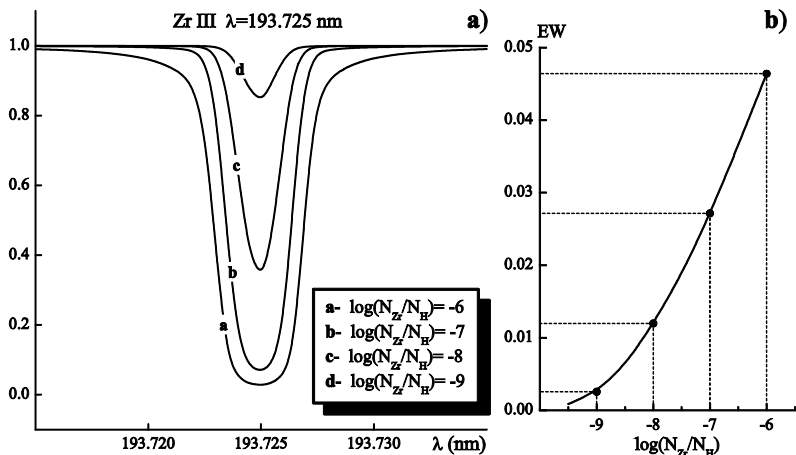


СЛИКА 9. UV спектар звезде χ Лирі у 1938.3 Å – 1938.7 Å опсегу таласних дужина. Пуном линијом је означен спектар добијен помоћу GHRS.

Тачкастом линијом је показана синтетисана $Zr II 4d5s5p^2D^{\circ}_{3/2} - 4d^25s a^2D_{3/2}$ $\lambda=1938.5$ Å линија, добијена за обилност цирконијума $\log [N_{Zr}/N_H] = -8.12$.

Ова вредност обилности је добијена помоћу $Zr III$ спектралних линија.

Испрекиданом линијом је означен синтетизовани спектар за обилност цирконијума $\log [N_{Zr}/N_H] = -9.1$, а са већим тачкама за $\log [N_{Zr}/N_H] = -9.0$ [26].



СЛИКА 10. Промена профила линије $Zr\ III\ 4d^2\ ^3P_1 - 4d5p\ ^3P_0\ \lambda=1937.25\ \text{\AA}$ услед промене обилности цирконијума $\log [N_{Zr}/N_H]$ за моделе звезданих атмосфера са $T_{\text{eff}}=10500\ \text{K}$, $\log g=4.0$ и турбулентном брзином $V_t=0.0\ \text{km s}^{-1}$ (a). На Сл. (b) је представљена еквивалентна ширина у функцији обилности цирконијума.

Линије цирконијума на пример, присутне су у спектри-ма HgMn звезда [26,109-111]. Занимљиво је да су обилности цирконијума одређене из слабих оптичких Zr II и јаких Zr III линија (које су откривене у UV) потпуно различите (види [26,111]) код HgMn звезде $\chi\ \text{Lupi}$. Ово је илустровано на Сл. 9, на којој је приказан UV спектар ове звезде у опсегу таласних дужина 1938.3 - 1938.7 \AA . Пуном линијом је означен спектар добијен помоћу GHRS. Тачкастом линијом је показана синтетисана Zr II $4d5s5p\ ^2D_{3/2}^o - 4d^25s\ a^2D_{3/2}\ \lambda=1938.5\ \text{\AA}$ линија, добијена за обилност цирконијума $\log [N_{Zr}/N_H]=-8.12$. Ова вредност обилности је добијена помоћу Zr III спектралних линија. Испрекиданом линијом је означен синтетизовани спектар за обилност цирконијума $\log [N_{Zr}/N_H]=-9.1$, а са већим тачкама за $\log [N_{Zr}/N_H]=-9.0$ [26]. То је такозвани “цирконијумски конфликт” и Сикстрем и др. (Sikström) [111] су претпоставили да је ова разлика вероватно последица неадекватног коришћења модела звезданих атмосфера, на пример ако није узет у обзир утицај не-ЛТЕ ефеката или дифузије.

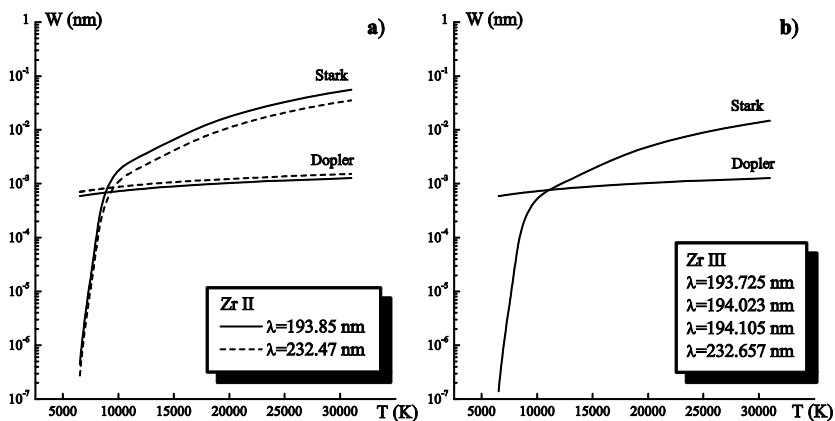
Цирконијум, који у HgMn звездама често има много већу обилност него код Сунца (види [110]), је члан Sr-Y-Zr тријаде, која је веома битна за проучавање s-процеса нуклеосинтезе и указано је да представља не-нуклеарни образац обилности у HgMn звездама. Најочигледније објашњење ове аномалије је помоћу теорије дифузије, или укључивањем не-ЛТЕ ефекта. Ипак, од значаја је такође истраживање доприноса цирконијумском конфликту разлике параметара Штарковог ширења Zr II и Zr III спектралних линија.

Поповић и др. [108] су, користећи модификовану семиемпиријску формулу, одредили параметре Штарковог ширења услед судара са електронима за две астрофизички значајне Zr II и 34 Zr III спектралне линије, да би тестирали утицај овог механизма ширења линија на одређивање еквивалентних ширина и да би дискутовали његов могући утицај на одређивање обилности цирконијума.

Атомски енергетски нивои потребни за рачунање узети су из реф. [112, 113]. Добијени резултати су употребљени да би се видело да ли ширење услед судара са електронима може да допринесе настанку такозваног „цирконијумског конфликта“ код HgMn звезде χ Lupi.

Да би се тестирао значај ефекта ширења спектралних линија услед судара са електронима за одређивање обилности цирконијума, Поповић и др. [108] су синтетисали профиле линија Zr II, $\lambda=1938. \text{ \AA}$ и Zr III, $\lambda=1940. \text{ \AA}$, користећи компјутерски програм SYNTH [114] и Куруцов програм ATLAS9 за модел звездане атмосфере [96] са $T_{\text{eff}}=10500 \text{ K}$, $\log g=4.0$ и турбулентном брзином $V_t=0.0 \text{ km s}^{-1}$, то јест за модел звездане атмосфере са карактеристикама сличним случају χ Lupi ($T_{\text{eff}}=10650 \text{ K}$ и $\log g=3.8$, види Лекроне и др. (Leckrone) [115]).

Ове линије су изабране, зато што су биле уобичајено коришћене за одређивања обилности, пошто имају мали помак таласне дужине и добро ду раздвојене [115]. Промена профила линије Zr III $4d^2 \ ^3P_1 - 4d5p \ ^3P_0$ $\lambda=1937.25 \text{ \AA}$ услед промене обилности цирконијума, представљена је на Сл. 10а, док је на Сл. 10б приказана еквивалентна ширина у функцији обилности цирконијума.



СЛИКА II. Понашање Штаркових и Доплерових ширина (FWHM) са температуром, за моделе звезданих атмосфера са $T_{\text{eff}}=10500$ K, $\log g=4.0$ и $V_1=0.08$ км c^{-1} за а) Zr II $4d5s5p^2D^{\circ}_{3/2} - 4d^25s a^2D^{\circ}_{3/2}$, $\lambda=193.85$ нм (пуна линија) и Zr II $4d5s5p y^2F^{\circ}_{5/2} - 4d^25s b^2G^{\circ}_{7/2}$, $\lambda=232.47$ нм (испрекидана линија), и б) Zr III $4d^2^3P_1 - 4d5p^3P_0$, $\lambda=193.725$ нм, Zr III $4d^2^1G_4 - 4d5p^1F_3$, $\lambda=194.023$ нм, Zr III $4d^2^3P_2 - 4d5p^3P_0$, $\lambda=194.105$ нм и Zr III $4d^2^3P_1 - 4d5p^3P_0$, $\lambda=194.657$ нм. На Сл. IIб није показана зависност од температуре за све наведене линије пошто је приближно једнака.

Поповић и др. [108] су израчунали еквивалентне ширине са и без утицаја ширења сударима са електронима за различите обилности цирконијума. Добијени резултати за Zr III [194.0 нм] и Zr II [193.8 нм] линије показују да је ефекат ширења електронима значајнији за веће обилности цирконијума. Еквивалентна ширина расте са обилношћу за обе линије, али еквивалентна ширина за Zr III [194.0 нм] линију је осетљивија него за Zr II [193.8 нм]. То може довести до грешке у одређивању обилности у случају када ефекат ширења сударима са електронима није узет у обзир. У сваком случају, синтетисање ове две линије да би се одредила обилност цирконијума, без узимања у обзир ширине услед судара са електронима, довешће да је обилност цирконијума одређена помоћу Zr III [194.0 нм] линије већа него ако се одреди користећи Zr II [193.8 нм] линију. Ипак, овај ефекат не може да изазове разлику у обилности од једног реда величине.

Премда се „цирконијумски конфликт“ код HgMn звезде χ Лири не може објаснити само овим ефектом, треба узети у обзир да занемаривање Штарковог ширења може да доведе до грешака у одређивању обилности. Штавише на Сл. 11 је показано да је Штарково ширење упоредиво са Доплеровим или доминантно за температуре око 10 000 К и веће.

РЕТКЕ ЗЕМЉЕ У СПЕКТРИМА CP ЗВЕЗДА

Други пример применљивости МСЕ метода у астрофизици је истраживање спектралних линија елемената ретких земља (rare earth element - REE) у спектрима CP звезда. Спектроскопски подаци за елементе ретке земље (REE) су од интереса за астрофизику пошто су линије јонизованих REE присутне у звезданим спектрима. Штавише, обилност REE у CP звездама је у широком опсегу температура много већа него на Сунцу (види нпр. Рјабчикова и др. [116]), и атомски подаци за REE су потребни да би се решавали астрофизички проблеми као што су релативне обилности елемената који настају у r- и s-процесима у хало звездама сиромашним металима и еволуција CP звезда [117, 118]. Обично се анализа обилности REE заснива на линијама првог јонизационог стања, за које постоје експериментално одређене јечине осцилатора. У неким CP звездама, на пример код HD 101065 [116], присутан је велики вишак REE.

У Поповић и др. [116], израчунати су помоћу модификоване семиемпиријске формуле Штаркове ширине и помаци за шест линија Eu II и ширине за три La II и шест La III мултиплета. Помоћу добијених резултата истражен је утицај механизма ширења спектралних линија сударима са електронима у атмосферама топлих звезда. Показано је да је овај механизам ширења значајан у топлим звездама, и да треба да се узима у обзир код анализе звезданих спектралних линија за $T_{\text{eff}} > 7000$ К, посебно ако је обилност еуропијума велика.

У Поповић и др. [119], користећи МСЕ формулу, одређене су Штаркове ширине за 284 Nd II линије. Линије јонизова-

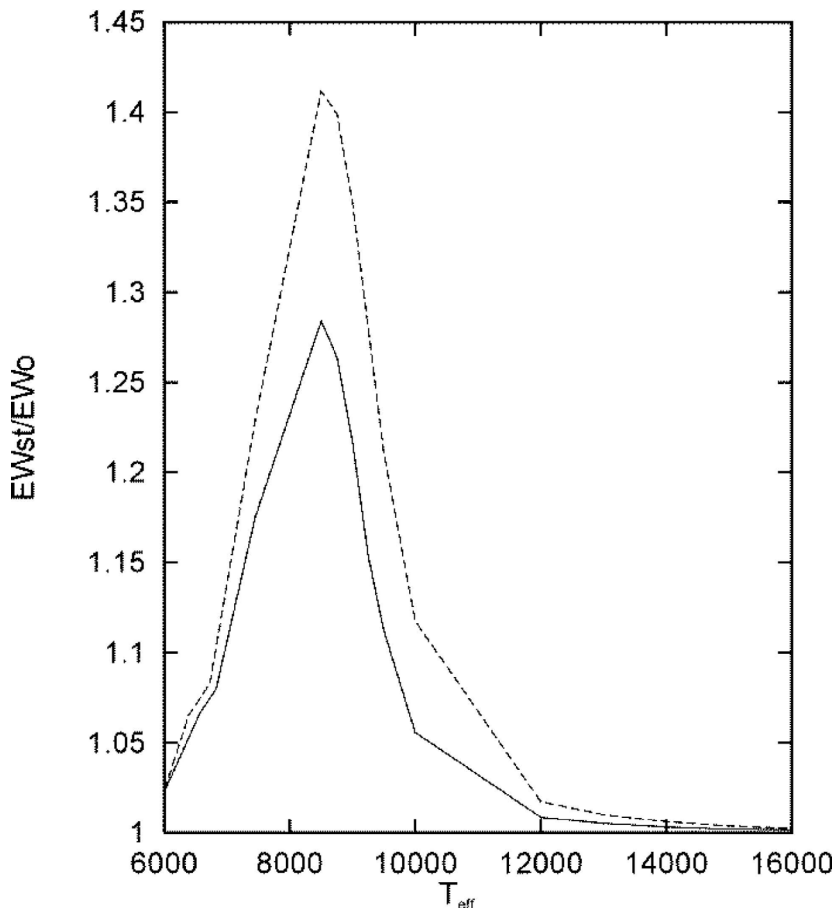
ног неодимијума посматране су у спектрима CP, као и других звезда (види нпр. [120-122]). Услед услова у звезданим атмосферама, Nd II линије су доминантне у поређењу са Nd I и Nd III линијама. На пример у спектру γ Ar звезде HD101065, Каули и др. (Cowley) [120] су нашли 71 линију Nd II а само 6 линија Nd I и 7 Nd III. Због тога се за одређивање обилности неодимијума код CP и других звезда, обично користе линије Nd II. Са друге стране, услед сложености Nd II спектра, веома је тешко добити атомске податке (јачине осцилатора, Штаркове ширине, итд.) потребне за астрофизичке сврхе.

Поповић и др. [119], су за прорачун Штаркове ширине користили упрошћени МСЕ прилаз Димитријевића и Коњевића [100]. Ова формула даје боље резултате него старија апроксимативна формула Каулија (Cowley) [123], често коришћена за процену Штаркове ширине када се не могу применити поузданији методи.

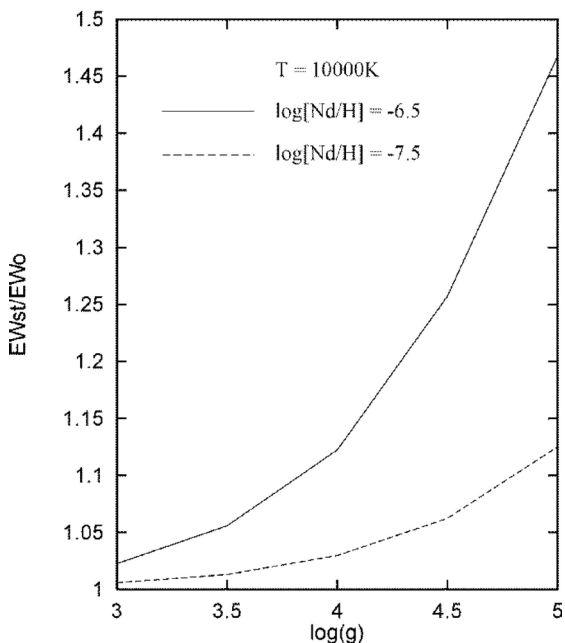
Да би тестирали значај ефекта ширења линија сударима са електронима у звезданим атмосферама, Поповић и др. [119] су синтетисали профиле 38 Nd II линија помоћу компјутерских програма за моделирање звезданих атмосфера SYNTH [114] и atlas9 [92], у температурском опсегу $6000 \leq T_{\text{eff}} \leq 16000$ K, и $3.0 \leq \log g \leq 5.0$.

Профиле линија су синтетисали са и без узимања у обзир Штарковог ширења сударима са електронима, за различите типове звезданих атмосфера. Прво су синтетисали све разматране профиле за обилност неодимијума $A = \log [Nd/H] = -7.0$, и две вредности $\log g = 4.0$ и 4.5 за различите ефективне температуре ($T_{\text{eff}} = 6000 - 16000$ K). Све разматране линије имају сличну зависност од ефективне температуре. Као пример, на Сл. 12 је показан однос еквивалентне ширине EW_{St}/EW_0 – као функција звездане температуре за линију Nd II 4013.3 Å. Као што се на слици може видети, највећи утицај ширења сударима са електронима на еквивалентну ширину је у опсегу ефективних температура $T_{\text{eff}} = 8000$ K - 10000 K. Напоменимо да је

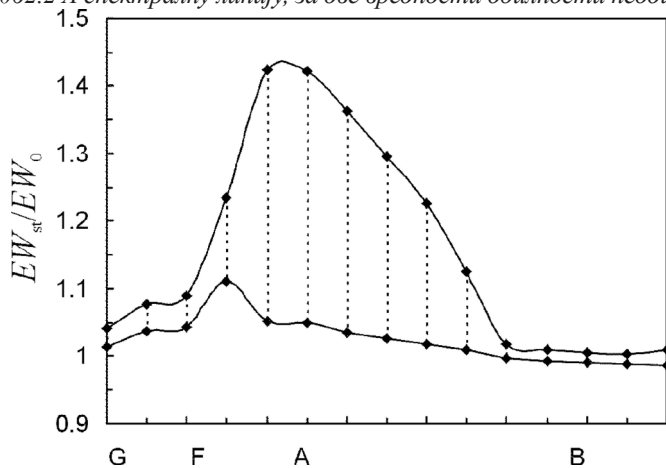
вредност обилности неодимијума за Сунце -10.55, што је три реда величине мање од вредности коришћене на Сл. 12, тако да су Сунчеве Nd II линије слабе и релативно неосетљиве на ширину пригушења.



СЛИКА 12. Однос еквивалентних ширина Nd II 4013.3 Å линије, израчунат са укључивањем Штарковог ширења (EW_{st}) и без њега (EW_0) у функцији ефективне температуре. Резултати за $\log g=4.0$ и $\log g=4.5$ приказани су пуном, односно испрекиданом линијом.



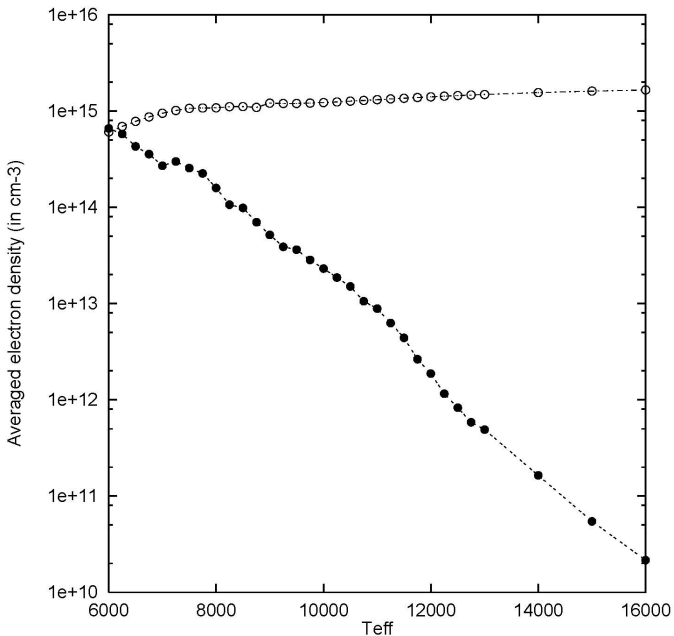
СЛИКА 13. Однос еквивалентних ширина EW_{st}/EW_0 у функцији $\log g$ за $Nd II$ 4062.2 Å спектралну линију, за две вредности обилности неодимијума.



СЛИКА 14. Максимални (горња линија) и минимални (доња линија) однос еквивалентних ширина EW_{st}/EW_0 за различите спектралне типове звезда, за 38 $Nd II$ спектралних линија.

На Сл. 13, илустрована је зависност од површинске гравитације, утицаја ширења линија сударима са електронима на еквивалентне ширине, за линију Nd II $\lambda = 4062.2 \text{ \AA}$ и $\log [\text{Nd}/\text{H}] = -6.5$ и -7.5 . Утицај је већи за веће обилности неоди-мијума, и расте са порастом површинске гравитације.

Да би указали на спектралне типове звезда где је ефекат ширења линија сударима са електронима најзначајнији, Поповић и др. [119] су дали преглед укупног утицаја у различитим типовима звезданих атмосфера, разматрајући најмањи и највећи утицај на све проучаване линије. Овај резултат је показан на Сл. 14, где је приказан однос еквивалентних ширина у функцији спектралног типа звезде. Као што се може видети на Сл. 14, највећи утицај механизма Штарковог ширења је код звезданих атмосфера А типа.



СЛИКА 15. Средње електронске густине у атмосфери (празни кругови) и у слојевима где је густина неодиимијумових јона највећа ($T=7000 \text{ K} - 9000 \text{ K}$, испуњени кругови), у функцији ефективне температуре која одговара спектралним типовима звезда од G до B.

Узимајући у обзир да Штарково ширење зависи од електронске густине (N), ефекат је највећи у атмосферама врелих звезда код којих је електронска густина већа, пошто водоник постаје јонизован. Може се очекивати да ће утицај Штарковог ширења бити већи за топлије звезде, али с обзиром да јон Nd II настаје у делу звездане атмосфере са одговарајућим параметрима плазме, то није случај. Полазећи од чињенице да је потенцијал јонизације Nd II 10.73 eV, и да слојеви где је густина јона Nd II највећа имају електронску температуру између 7000 K и 9000 K, Поповић и др. [119] су израчунали средњу електронску густину у овим слојевима звездане атмосфере за различите спектралне типове звезда и $\log g = 4.0$. Како се може видети на Сл. 15, средња електронска густина опада са ефективном температуром. То је разлог зашто је највећи утицај ефекта Штарковог ширења у случају Nd II, код звезданих атмосфера А типа.

СРПСКА ВИРТУАЛНА ОПСЕРВАТОРИЈА, БАЗА ПОДАТАКА STARK-V И ЕВРОПСКИ ВИРТУЕЛНИ ЦЕНТАР ЗА АТОМСКЕ И МОЛЕКУЛАРНЕ ПОДАТКЕ

Српска виртуална опсерваторија је започела као пројекат чије је финансирање одобрило Министарство за науку и технолошки развој Србије са циљем:

- Установити SerVO и придружити се EuroVO (Европска виртуална опсерваторија) и IVOA (International Virtual Observatory Alliance – Међународни савез виртуалних опсерваторија);
- установити SerVO центар података за дигитализацију и архивирање астрономских података добијених на Астрономској опсерваторији у Београду;
- развој алата за визуализацију података.

Наша основна замисао била је да се публикују у VO компатибилном формату, подаци које су добили српски астроно-

ми, као и да се астрономима у Србији обезбеде VO алати за научни рад. Први задаци били су:

- Дигитализација и публикување у виртуалној опсерваторији фотографских плоча из архива Астрономске опсерваторије;
- публикување, заједно са Париском опсерваторијом, базе података о Штарковом ширењу STARK-B, која ће, као први корак, садржати параметре Штарковог ширења, које су Димитријевић и Сахал-Брешо добили у оквиру семикласичног пертурбационог прилаза током вишедеценијске сарадње, у VO компатибилном формату.

У базу података STARK-B, улазе управо подаци о Штарковом ширењу о којима смо говорили у овом раду. Напоменимо да је претходник SerVO била BELDATA а њен главни садржај била је база података о Штарковом ширењу спектралних линија. Историја BELDATA може се следити у [124-128]. После интензивирања сарадње са француским колегама око базе података MOLAT на Париској опсерваторији, BELDATA је постала STARK-B.

Ова база података намењена је моделизацији и спектроскопској дијагностици звезданих атмосфера и омотача. Такође је од користи и за истраживања лабораторијске плазме, ласерски произведене плазме, инерцијалне фузије, као и за развој ласера и плазмене технологије. Сходно томе опсег температура и густина који покривају табеле је широк и зависи од степена јонизације разматраног јона. Температура варира од неколико хиљада за неутралне атоме до неколико милиона Келвина за високо наелектрисане јоне. Електронска или јонска густина мења се од 10^{12} (случај звезданих атмосфера) до неколико пута 10^{23} cm^{-3} (субфотосферски слојеви и истраживања инерцијалне фузије).

Обезбеђена је проста графичка међувеза (интерфејс) са подацима (види <http://stark-b.obspm.fr/elements.php>). Корисник

прво бира елемент из периодичног система који га интересује. После тога јонизационо стање, пертурбер(е), густину пертурбера, прелаз и температуру плазме, после чега се генерише табела са описом података, пуном ширином линије на половини максималног интензитета и помаком линије [129, 130].

Ова база података улази и у европски Виртуални центар за атомске и молекуларне податке (Virtual Atomic and Molecular Data Centre - VAMDC) који је започео као европски ФП7 пројекат, а наше учешће на њему било је прво такво у српској астрономији. Овај центар је изградио доступну и интероперабилну е-инфраструктуру за атомске и молекуларне податке, проширујући и интегришући замашан број база података, за потребе различитих корисника у науци и индустрији и постао нека врста гугла за овакве податке којим се одједном може прегледати неколико десетина, међусобно компатибилних база података [131-133].

ЗАКЉУЧАК

Као што се из изложеног може закључити, мултидисциплинарна област истраживања Штарковог ширења спектралних линија плазме у Србији има критичну масу и омогућава младима да се баве науком на светском нивоу и своје радове пласирају у врхунске међународне часописе. Оваква истраживања у астрономији имају и своју конференцију у Србији. I-III Југословенска конференција о облицима спектралних линија одржане су 1995, 1997 и 1999, у Криваји код Бачке Тополе, Белој Цркви и Бранковцу на Фрушкој Гори, IV Српска конференција о облицима спектралних линија у Аранђеловцу 2003, а V-XIV Српска конференција о облицима спектралних линија у астрофизици 2005. у Вршцу, 2007. у Сремским Карловцима, 2009. у Зрењанину, 2011. на Дивчибарима, 2013. у Бањи Ковиљачи, 2015. на Сребрном језеру, 2017. у Шабцу, 2019. у Врднику, 2021. у Београду и 2023. у Бајиној Башти.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. С. Димитријевић, *Астрономска спектроскопија*, Публ. Астрон. Обс. Београд, **69** (1998).
2. М. S. Dimitrijević, *Line Shapes Investigations in Yugoslavia 1962-1985 (Bibliography and citation index)*, Publ. Obs. Astron. Belgrade, **39** (1990).
3. М. S. Dimitrijević, *Line Shapes Investigations in Yugoslavia II. 1985-1989 (Bibliography and citation index)*, Publ. Obs. Astron. Belgrade, **41** (1991).
4. М. S. Dimitrijević, *Line Shapes Investigations in Yugoslavia and Serbia III. 1989-1993 (Bibliography and citation index)*, Publ. Obs. Astron. Belgrade, **47** (1994).
5. М. S. Dimitrijević, 1997а, *Line Shapes Investigations in Yugoslavia and Serbia IV. 1993-1997 (Bibliography and citation index)*, Publ. Obs. Astron. Belgrade, **58** (1997).
6. М. S. Dimitrijević, *Line Shapes Investigations in Yugoslavia and Serbia V. 1997-2000 (Bibliography and citation index)*, Publ. Obs. Astron. Belgrade, **70** (2001).
7. H. N. Russel, *Astrophys. J.*, **64**, 194 (1926)..
8. S. Johansson, in *Physics of Formation of Fe II, Lines Outside LTE*, eds. R. Viotti, A. Vitone, M. Friedjung, D. Reidel P C, 1988, p. 13.
9. A. Omont and P. Encrenaz, *Astron. Astrophys.*, **56**, 447 (1977).
10. G. T. Smirnov, R. L. Sorochenko and V. Pankonin, *Astron. Astrophys.*, **135**, 116 (1984).
11. М. S. Dimitrijević and S. Sahal-Bréchet, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **31**, 301 (1984).
12. М. S. Dimitrijević and S. Sahal-Bréchet, *Astron. Astrophys.*, **136**, 289 (1984).
13. М. S. Dimitrijević and S. Sahal-Bréchet, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **34**, 34 (1985).
14. I. Vince and M. S. Dimitrijević, Publ. Obs. Astron. Belgrade, **33**, 15 (1985).

15. I. Vince, M. S. Dimitrijević and V. Kršljanin, in: *Spectral Line Shapes III*, ed. F. Rostas, W. de Gruyter, Berlin, New York, 1985, p. 649.
16. I. Vince, M. S. Dimitrijević and V. Kršljanin, in: *Progress in Stellar Spectral Line Formation Theory*, eds. J. Beckman and L. Crivelari, D. Reidel, Dordrecht, Boston, Lancaster, 1985, p. 373.
17. U. Feldman and G. A. Doschek, *Astrophys. J.*, **212**, 913 (1977).
18. C. Stehlé, *Astron. Astrophys. Suppl. Series*, **104**, 509 (1994).
19. A. Beauchamp, F. Wesemael and P. Bergeron, *Astrophys. J. Suppl. Series*, **108**, 559 (1997).
20. G. D. Schmidt, S. C. West, J. Liebert, R. F. Green and H. S. Stockman, *Astrophys. J.*, **309**, 218 (1986).
21. S. Dreizler and K. Werner, *Astron. Astrophys.*, **314**, 217 (1996).
22. R. Hamdi, N. Ben Nessib, N. Milovanović, L. Č. Popović, M. S. Dimitrijević and S. Sahal-Brécho, *MNRAS*, **387**, 871 (2008).
23. K. Werner, U. Heber and R. Hunger, *Astron. Astrophys.*, **244**, 437 (1991).
24. F. Paerels, *Astrophys. J.*, **476**, L47 (1997).
25. J. Madej, *Astron. Astrophys.*, **209**, 226 (1989).
26. D. S. Leckrone, G. M. Wahlgren, S. G. Johansson and S. J. Adelman, in *Peculiar Versus Normal Phenomena in A-Type and Related Stars*, ASP Conference Series, Vol. **44**, eds. M. M. Dworetzky, F. Castelli and R. Faraggiana, 1993, p.42
27. J. C. Brandt, S. R. Heap, E. A. Beaver, A. Boggess, K. G. Carpenter, D. C. Ebberts, J. B. Hutchings, M. Jura, D. S. Leckrone, J. L. Linsky, S. P. Haran, B. D. Savage, A. M. Smith, L. M. Trafton, F. M. Walter, R. J. Weymann, C. R. Proffitt, G. M. Wahlgren, S. G. Johansson, H. Nilsson, T. Brage, M. Snow and T. B. Ake, *Astron. J.*, **117**, 1505 (1999).
28. C. A. Iglesias, F. J. Rogers and B. G. Wilson, *Astrophys. J.*, **360**, 221 (1990).

29. P. H. Hauschildt and E. Baron, *J. Comput. Appl. Math.*, **109**, 41 (1999).
30. R. M. Gonzales - Delgado, C. Leitherer and T. M. Heckman, *Astrophys. J. Suppl. Series*, **125**, 489 (1999).
31. V. L. Khokhlova, *Pis'ma v Astron. Zh.*, **20**, 110 (1994).
32. S. S. Vogt, G. D. Penrod and A. P. Hatzes, *Astrophys. J.*, **321**, 469 (1987).
33. F. LeBlanc and G. Michaud, *Astron. Astrophys.*, **303**, 166 (1995).
34. C. Stehlé, , in *Spectral Line Shapes*, Vol. **8**, eds. A. David May, J. R. Drummond, E. Oks, AIP Conf. Proc. **328**, AIP Press, New York, 1985, p. 36.
35. H. R. Griem, M. Blaha and P. C. Kepple, *Phys. Rev. A*, **19**, 2421 (1979).
36. M. S. Dimitrijević, *Zh. Prikl. Spektrosk.*, **63**, 810 (1996).
37. H. R. Griem, Yu. V. Ralchenko and I. Bray, *Phys. Rev. E*, **56**, 7186 (1997).
38. Yu. V. Ralchenko, H. R. Griem, I. Bray and D. V. Fursa, *Phys. Rev. A*, **59**, 1890 (1999).
39. Yu. V. Ralchenko, H. R. Griem, I. Bray and D. V. Fursa, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **71**, 595 (2001).
40. Yu. V. Ralchenko, H. R. Griem and I. Bray, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **81**, 371. (2003).
41. H. Elabidi, N. Ben Nessib, S. Sahal-Bréchet, *J. Phys. B*, **37**, 63 (2004).
42. H. Elabidi, N. Ben Nessib, M. Cornille, J. Dubau and S. Sahal-Bréchet, *J. Phys. B*, **41**, 025702 (2008).
43. M. S. Dimitrijević, N. Feautrier and S. Sahal-Bréchet S., *J. Phys. B*, **14**, 2559 (1981).
44. H. Elabidi, S. Sahal-Bréchet, M. S. Dimitrijević, N. Ben Nessib, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **417**, 2624 (2011).
45. Rihab Aloui, Haykel Elabidi, Sylvie Sahal-Bréchet, Milan S. Dimitrijević, *Atoms*, **6**, 20 (2018).

46. Haykel Elabidi, Sylvie Sahal-Bréchet, Milan S. Dimitrijević, *Advances in Space Research*, **54**, 1184 (2014).
47. S. M. Benett and H. R. Griem, *Calculated Stark Broadening Parameters for Isolated Spectral Lines from the Atom Helium through Calcium and Cesium*, Univ. Maryland, Techn.Rep. No 71-097, College Park, Maryland, 1971.
48. W. W. Jones, S. M. Benett and H. R. Griem, *Calculated Electron Impact Broadening Parameters for Isolated Spectral Lines from Singly Charged Ions Lithium through Calcium*, Univ. Maryland , Techn.Rep. No 71-128, College Park, Maryland, 1971.
49. H. R. Griem, *Spectral Line Broadening by Plasmas*, Academic Press, New York and London, 1974.
50. S. Sahal-Bréchet, *Astron. Astrophys.*, **1**, 91 (1969).
51. S. Sahal-Bréchet, *Astron. Astrophys.*, **2**, 322 (1969).
52. M. Bassalo, M. Cattani and V. S. Walder, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **28**, 75 (1982),
53. C. Fleurier, S. Sahal-Bréchet and J. Chapelle, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **17**, 595 (1977).
54. M. S. Dimitrijević and S. Sahal-Bréchet, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **31**, 301 (1984).
55. M. S. Dimitrijević and S. Sahal-Bréchet, *Physica Scripta*, **54**, 50 (1996).
56. Sylvie Sahal-Bréchet, Milan S. Dimitrijević, Nabil Ben Nessib, *Atoms*, **2**, 225 (2014).
57. Milan S. Dimitrijević, Sylvie Sahal-Bréchet, *Atoms*, **2**, 357 (2014).
58. D. Jevremović, M. S. Dimitrijević, L. Č. Popović, M. Dačić, V. Protić-Benišek, E. Bon, N. Gavrilović, J. Kovačević, V. Benišek, A. Kovačević, D. Ilić, S. Sahal-Bréchet, K. Tsvetkova and M. Malović, *New Astron. Rev.* **53**, 222 (2009).
59. M. S. Dimitrijević and S. Sahal-Bréchet, *Phys. Rev. A*, **31**, 316 (1985).
60. L. Č. Popović, M. S. Dimitrijević and D. Tankosić, *Astron.*

- Astrophys.*, **139**, 617 (1999).
61. D. Tankosić, L. Č. Popović and M. S. Dimitrijević, *Astron. Astrophys.*, **399**, 795 (2003).
 62. M. S. Dimitrijević, P. Jovanović and Z. Simić, *Astron. Astrophys.*, **410**, 735 (2003).
 63. M. S. Dimitrijević, M. Dačić, Z. Cvetković and Z. Simić, *Astron. Astrophys.*, **425**, 1147 (2004).
 64. Z. Simić, M. S. Dimitrijević, L. Č. Popović and M. Dačić, *New Astronomy*, **12**, 187 (2006).
 65. Z. Simić, M. S. Dimitrijević, A. Kovačević, *New Astronomy Review*, **53**, 246 (2009).
 66. Z. Simić, M. S. Dimitrijević, S. Sahal-Bréchet, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **432**, 2247 (2013).
 67. Abeer Almodlej, Nabil Ben Nessib Milan S. Dimitrijević, *European Phys. J. D*, **75**, 234 (2021).
 68. Milan S. Dimitrijević, Magdalena D. Christova, *European Phys. J. D*, **75**, 172 (2021).
 69. Z. Majlinger, Z. Simić, M. S. Dimitrijević, *J. Astrophys. Astron.*, **36**, 671, (2015).
 70. Zlatko Majlinger, Milan S. Dimitrijević, Vladimir A. Srećković, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **496**, 5584 (2020).
 71. Milan S. Dimitrijević, Magdalena D. Christova, Sylvie Sahal-Bréchet, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **507**, 2087 (2021).
 72. Milan S. Dimitrijević, Magdalena D. Christova, *Universe*, **8**, 430 (2022).
 73. Z. Simić, M.S. Dimitrijević, S. Sahal-Bréchet, N. Sakan, *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso*, **52/3**, 35 (2022).
 74. Milan S. Dimitrijević, Zoran Simić, Andjelka Kovačević, Aleksandar Valjarević, Sylvie Sahal-Bréchet, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **454**, 1736 (2015).
 75. M. S. Dimitrijević, Z. Simić, A. Kovačević, A. Valjarević, S. Sahal-Bréchet, *J. Astrophys. Astron.*, **36**, 681 (2015).

76. Milan S. Dimitrijević, Magdalena Christova, Zoran Simić, Andjelka Kovačević, Sylvie Sahal-Bréchet, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **460**, 1658 (2016).
77. Zlatko Majlinger, Zoran Simić, Milan S. Dimitrijević, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **470**, 1911 (2017).
78. Milan S. Dimitrijević, Abhishek Chougule, *Atoms*, **6**, 15 (2018).
79. Milan S. Dimitrijević, Zoran Simić, Andjelka Kovačević, Sylvie Sahal-Bréchet, *Astron. Astrophys. Transactions*, **30**, 331 (2018).
80. Zlatko Majlinger, Milan S. Dimitrijević, Zoran Simić, *Astron. Astrophys. Transactions*, **30**, 323 (2018).
81. Rafik Hamdi, Nabil Ben Nessib, Sylvie Sahal-Bréchet, Milan S. Dimitrijević, *Astron. Nachrichten*, **343**, e210047 (2022).
82. Rafik Hamdi, Nabil Ben Nessib, Sylvie Sahal-Bréchet, Milan S. Dimitrijević, *Advances in Space Research*, **54**, 1223 (2014).
83. Rafik Hamdi, Nabil Ben Nessib, Sylvie Sahal-Bréchet, Milan S. Dimitrijević, *Atoms*, **5**, 26 (2017).
84. A. Chougule, N. Przybilla, M.S. Dimitrijević, V. Schaffenroth, *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, **50**, 139 (2020).
85. R. L. Kurucz, *Astrophys. J. Suppl. Series*, **40**, 1 (1979).
86. D. T. Wickramasinghe, *Mem. R. Astron. Soc.*, **76**, 129 (1972).
87. F. Wesemael F., *Astrophys. J. Suppl. Series*, **45**, 177 (1981).
88. M. S. Dimitrijević, T. Ryabchikova, L. Č. Popović, D. Shulyak and V. Tsybmal, *Astron. Astrophys.*, **404**, 1099 (2003).
89. R. L. Kurucz, I. Furenlid, J. Brault and L. Testerman, *NSO Atlas No. 1: Solar Flux Atlas from 296 to 1300 nm*, Sunspot, NSO, 1984.
90. T. A. Ryabchikova, I. S. Savanov, A. P. Hatzes, W. W. Weiss and G. Handler, *Astron. Astrophys.*, **357**, 981 (2000).
91. I. F. Bikmaev, T. A. Ryabchikova, H. Bruntt, F. A. Musaev, L. I. Mashonkina, E. V. Belyakova, V. V. Shimansky, P.

- S. Barklem and G. Galazutdinov, *Astron. Astrophys.*, **389**, 537 (2002).
92. R. L. Kurucz, *Model atmosphere program ATLAS9* published on CDROM13, 1993.
93. V. V. Tsymbal, in: *Model Atmospheres and Spectral Synthesis*, eds. S.J. Adelman, F. Kupka and W.W. Weiss, *ASP Conf. Ser.* **108**, 198 (1996).
94. M. S. Dimitrijević, T. Ryabchikova, Z. Simić, L. Č. Popović and M. Dačić, *Astron. Astrophys.*, **469**, 681 (2007).
95. O. Kochukhov, V. Tsymbal, T. Ryabchikova, V. Makaganyk and S. Bagnulo, *Astron. Astrophys.*, **460**, 831 (2006).
96. R. L. Kurucz, CDROMs 13, 22, 23, SAO, Cambridge, 1993.
97. M. S. Dimitrijević and N. Konjević, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **24**, 451 (1980).
98. M. S. Dimitrijević and V. Kršljanin, *Astron. Astrophys.*, **165**, 269 (1986).
99. M. S. Dimitrijević and N. Konjević, in *Spectral Line Shapes*, ed. B. Wende, W. de Gruyter, Berlin, New York, 1981, 211.
100. M. S. Dimitrijević and N. Konjević, *Astron. Astrophys.*, **172**, 345 (1987).
101. M. S. Dimitrijević and L. Č. Popović, *Astron. Astrophys. Suppl. Series*, **101**, 583 (1993).
102. M. S. Dimitrijević and L. Č. Popović, *Zh. Prikl. Spektrosk.*, **68**, 685 (2001).
103. L. Č. Popović, M. S. Dimitrijević, 1996, *Phys. Scripta*, **53**, 325.
104. Milan S. Dimitrijević, *Data*, **5**, 73 (2020).
105. H. R. Griem, *Phys. Rev.*, **165**, 258 (1968).
106. L. Č. Popović and M. S. Dimitrijević, *Astron. Astrophys. Suppl. Series*, **116**, 359 (1996).
107. L. Č. Popović and M. S. Dimitrijević, *Astron. Astrophys. Suppl., Series*, **127**, 259 (1998).
108. L. Č. Popović, H. Milovanović and M. S. Dimitrijević, *Astron. Astrophys.*, **365**, 656 (2001).

109. C. R. Cowley and G. C. L. Aikman *Astrophys. J.*, **196**, 521 (1975).
110. W. D. Heacox, *Astrophys. J. Suppl.*, **41**, 675 (1979).
111. C. M. Sikström, H. Lundberg, G. M. Wahlgren, Z. S. Li, C. Lyngå, S. Johansson and D. S. Leckrone, *Astron. Astrophys.*, **343**, 297 (1999).
112. J. Reader and N. Acquista, *Phys. Scr.*, **55**, 310 (1997).
113. E. Charo, J. L. López-Ayuso and I. Martin, *J. Phys B*, **32**, 4555 (1999).
114. N. E. Piskunov, in *Stellar magnetism*, eds. Yu. V. Glagolevskij, I. I. Romanyuk, Nauka, St. Petersburg, 1992, p. 92.
115. D. S. Leckrone, C. R. Proffitt, G. M. Wahlgren, S. G. Johansson and T. Brage, *Astron. J.*, **117**, 1454L (1999).
116. T. A. Ryabchikova, N. Piskunov, I. Savanov, F. Kupka and V. Malanushenko, *Astron. Astrophys.*, **343**, 229 (1999).
117. C. R. Cowley, *Phys. Scripta*, **T8**, 28 (1984).
118. C. Sneden, A. McWilliam, G. W. Preston, J. J. Cowan, D. L. Burris and B. J. Armosky, *Astrophys. J.*, 467, 819 (1996).
119. L. Č. Popović, S. Simić, N. Milovanović and M. S. Dimitrijević, *Astrophys. J. Suppl. Series*, **135**, 109 (2001).
120. C. R. Cowley, T. Ryabchikova, F. Kupka, D. J. Bord, G. Mathys and W. P. Bidelman, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **317**, 299 (2000).
121. B. N. G. Guthrie, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **216**, 15 (1985).
122. S. J. Adelman, in: *Elemental Abundance Analyses*, Proc. of the IAU working group on Ap stars Workshop, eds. S. J. Adelman and T. Lanz, Institut d'Astronomie de l'Université de Lausanne, 1987, p. 58.
123. C. R. Cowley, *The Observatory*, **91**, 139 (1971).
124. L. Č. Popović, M. S. Dimitrijević, N. Milovanović and N. Trajković, *Publ. Astron. Obs. Belgrade*, **65**, 225 (1999).
125. L. Č. Popović, M. S. Dimitrijević, N. Milovanović and N. Trajković, *J. Res. Phys.*, **28**, 307 (1999).
126. N. Milovanović, L. Č. Popović and M. S. Dimitrijević, *Publ. Astron. Obs. Belgrade*, **68**, 117 (2000).

127. M. S. Dimitrijević, L. Č. Popović, E. Bon, V. Bajčeta, P. Jovanović and N. Milovanović, *Publ. Astron. Obs. Belgrade*, **75**, 129 (2003).
128. M. S. Dimitrijević and L. Č. Popović, in *Virtual Observatory; Plate Content Digitization, Archive Mining, Image Sequence Processing*, eds. M. Tsvetkov, V. Golev, F. Murtagh, R. Molina, Heron Press Science Series, Sofia, 2006, p. 115.
129. Sylvie Sahal-Bréchet, Milan S. Dimitrijević, Nicolas Moreau, Nabil Ben Nessib, *Advances in Space Research*, **54**, 1148 (2014).
130. Sylvie Sahal-Bréchet, Milan S. Dimitrijević, Nicolas Moreau, Nabil Ben Nessib, *Physica Scripta*, **50**, 054008 (2015).
131. M. L. Dubernet, V. Boudon, J. L. Culhane, M. S. Dimitrijević et al., *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **111**, 2151 (2010).
132. M. L. Dubernet, B. K. Antony, Y. A. Ba, Yu. L. Babikov, K. Bartschat, V. Boudon, B. J. Braams, H.-K. Chung, F. Daniel, F. Delahaye, G. Del Zanna, J. de Urquijo, M. S. Dimitrijević, et al., *J. Phys. B*, **49**, 074003 (2016).
133. Damien Albert, Bobby K. Antony, Yaye Awa Ba, Yuri L. Babikov, Philippe Bollard, Vincent Boudon, Franck Delahaye, Giulio Del Zanna, Milan S. Dimitrijević, et al., *Atoms*, **8**, 76 (2020).