

**МОДИФИКОВАНИ
СЕМИЕМПИРИЈСКИ МЕТОД
ЗА ИЗРАЧУНАВАЊЕ ПАРАМЕТАРА
ШТАРКОВОГ ШИРЕЊА СПЕКТРАЛНИХ
ЛИНИЈА И ЊЕГОВЕ ПРИМЕНЕ У
ПРОУЧАВАЊУ ЗВЕЗДАНИХ АТМОСФЕРА**

**MODIFIED SEMIEMPIRICAL
METHOD FOR CALCULATIONS
OF STARK BROADENING PARAMETERS
OF SPECTRAL LINES AND ITS
APPLICATIONS IN INVESTIGATIONS
OF STELLAR ATMOSPHERES**



Милан С. Димитријевић,
научни саветник

*Астрономска опсерваторија
Волгина 7, 11060 Београд
mdimitrijevic@aob.rs*

Milan S. Dimitrijević,
Research Professor

*Astronomical Observatory
Volgina 7, 11060 Belgrade
mdimitrijevic@aob.rs*

Сажетак

Кључне речи:

Штарково ширење,
профили линија,
звездане
атмосфере,
бели патуљци,
атомски подаци,
базе података

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 овом раду је приказан Модификовани семиемпиријски метод за израчунавање параметара Штарковог ширења спектралних линија плазме и размотрене су његове примене, са посебним акцентом на звездане спектре и истраживања атмосфера белих патуљака и хемијски нерегуларних звезда, као и звезда спектралних типова А и касног Б. Такође је дат и преглед оваквих истраживања у Астрономској опсерваторији у Београду и разматрано укључивање добијених резултата за ширине и помаке спектралних линија у on-line базу података STARK-B, Српску виртуелну опсерваторију serVO и Виртуални центар за атомске и молекуларне податке VAMDC.

*Раd примљен:
1.3.2016.
Paper received:
1/3/2016*

*Раd прихваћен:
30.3.2016.
Paper accepted:
3/30/2016*

ABSTRACT

Key words:

Stark broadening,
line profiles,
stellar atmospheres,
white dwarfs,
atomic data,
databases

Collisions of emitters and absorbers with charged particles, influence on spectral line profiles of stellar plasma, since due to splitting and shifting of atomic energy levels in an electric field (Stark effect), spectral lines are broadened and shifted. Here is reviewed the Modified semiempirical method for calculation of Stark broadening parameters of spectral lines of plasma and its applications are considered. The emphasis is on stellar spectra and investigations of atmospheres of white dwarfs and chemically peculiar stars, as well as of stars of A and late B spectral type. Also, a review of such investigations on Belgrade Astronomical observatory is given and the implementation of obtained results for widths and shifts of spectral lines in on-line database STARK-B, Serbian virtual observatory serVO and Virtual Atomic and Molecular Data Center VAMDC is considered.

Увод

Судару различитих честица са атомом или јоном који зрачи (емитером) односно апсорбује зрачење (апсорбером) утичу на профил спектралне линије пошто доводе до њеног ширења и померања. У зависности од врсте честица које се сударају са атомом/јоном, у питању су *Штарково ширење* ако су честице наелектрисане, *Ван дер Валсово* или *ширење сударима са неутралним атомима и резонантно*, до кога може доћи ако су честице исте врсте као емитер/апсорбер. Пошто овакви механизми ширења зависе од концентрације честица које се сударају, односно притиска, једним се именом зову *ширење притиском*.

На основу анализе профила спектралних линија у звезданим спектрима можемо одредити различите карактеристике разматране звезде, као на пример температуру појединих слојева њене атмосфере, хемијски састав, површинску гравитацију, спектрални тип и ефективну температуру упоређивањем спектра звезде са стандардним спектрима за поједине типове. Када су у питању топле звезде, где је водоник углавном јонизован, Штарково ширење обично треба узети у обзир, а на пример код белых патуљака то је доминантан механизам ширења притиском, тако да је јасно да су у одређеном броју случајева подаци о његовом утицају на профиле спектралних линија незаобилазни.

Истраживање облика спектралних линија је мултидисциплинарна област, која у Србији и бившој Југославији има критичну масу научника. На основу прегледа оваквих истраживања у Србији и Југославији, са библиографијом и индексом цитата, за период од првог рада објављеног 1962. до краја 2000. године [1–5], види се да је у том периоду регистровано 1427 (1222 су од српских аутора) библиографских јединица, које је објавило 179 југословенских аутора (152 из Србије, 26 из Хрватске и један Македонац који је живео у Француској), при чему се већина ових радова односи на Штарково ширење.

Из горе поменутих прегледа [1–5], као и анализе утицаја радова српских астронома у издању Задужбине Андрејевић [6], може се запазити да међу неколико публикација из ове области које су оствариле највећи утицај на међународном плану спада и она у којој је формулисана Модификовани семиемпиријски прилаз за израчунавање Штаркове ширине спектралне линије [7], први у серији чланака у којима је ова метода разрађена и развијена [8–12].

У овом раду приказаћемо Модификовани семиемпиријски метод за прорачун параметара Штарковог ширења спектралних линија и размотрити његове примене, пре свега у астрофизици. Укратко ћемо се осврнути и на оваква истраживања у Групи за астрофизичку спектроскопију на Астрономској опсерваторији у Београду и размотрити рад

на укључивању добијених резултата за ширине и помаке спектралних линија у on-line базу података STARK-B, Српску виртуелну опсерваторију serVO и Виртуални центар за атомске и молекуларне податке VAMDC.

МОДИФИКОВАНИ СЕМИЕМПИРИЈСКИ ПРИЛАЗ ЗА ПРОРАЧУН ПАРАМЕТАРА ШТАРКОВОГ ШИРЕЊА

Модификовани семиемпиријски метод (МСЕ) [7–12] за прорачун параметара Штарковог ширења изолованих спектралних линија неводоничних јона развијен је у Београду, и много пута успешно примењен приликом разматрања различитих проблема у астрофизици и физици. Осмишљен је у циљу теоријске подршке експерименталном одређивању Штаркових параметара спектралних линија вишеструко наелектрисаних јона у лабораторији Николе Коњевића, што је осамдесетих година прошлог века био пионирски рад, и највећи број публикованих резултата долазио је у то време из ње. Према МСЕ прилазу [7–12], пуна ширина изоловане јонске линије на половини максималног интензитета (FWHM) услед судара са електронима је:

$$W_{MSE} = N \frac{4\pi\hbar^2}{3cm^2} \left(\frac{2m}{\pi kT} \right)^{1/2} \frac{\lambda^2}{3^{1/2}} \left[\sum_{l_i \pm 1} \sum_{J_i} R_{l_i, l_i \pm 1}^2 \tilde{g}(x_{l_i, l_i \pm 1}) + \sum_{l_i \pm 1} \sum_{J_i} R_{l_i, l_i \pm 1}^2 \tilde{g}(x_{l_i, l_i \pm 1}) + \left(\sum_{i'} R_{ii'}^2 \right)_{\Delta n \neq 0} g(x_{n_i, n_i+1}) + \left(\sum_{f'} R_{ff'}^2 \right)_{\Delta n \neq 0} g(x_{n_f, n_f+1}) \right],$$

а одговарајући Штарков помак:

$$d_{MSE} = N \frac{2\pi\hbar^2}{3cm^2} \left(\frac{2m}{\pi kT} \right)^{1/2} \frac{\lambda^2}{3^{1/2}} \left[\sum_{J_i, J_f} \sigma_{J_i, J_f} R_{l_i, l_i+1}^2 \tilde{g}_{sh}(x_{l_i, l_i+1}) - \sum_{L_i, J_i} \sigma_{J_i, J_i} R_{l_i, l_i-1}^2 \tilde{g}_{sh}(x_{l_i, l_i-1}) - \sum_{L_i, J_i} \sigma_{J_i, J_i} R_{l_i, l_i+1}^2 \tilde{g}_{sh}(x_{l_i, l_i+1}) + \sum_{L_i, J_i} \sigma_{J_i, J_i} R_{l_i, l_i-1}^2 \tilde{g}_{sh}(x_{l_i, l_i-1}) + \left(\sum_{i'} R_{ii'}^2 \right)_{\Delta n \neq 0} g_{sh}(x_{n_i, n_i+1}) - 2 \sum_{i' (\Delta E_{ii'} < 0)} \sum_{L_i, J_i} R_{l_i, l_i}^2 g_{sh}(x_{l_i, l_i}) - \left(\sum_{f'} R_{ff'}^2 \right)_{\Delta n \neq 0} g_{sh}(x_{n_f, n_f+1}) + 2 \sum_{f' (\Delta E_{ff'} < 0)} \sum_{L_f, J_f} R_{l_f, l_f}^2 g_{sh}(x_{l_f, l_f}) + \sum_k \delta_k \right].$$

Овде је почетни енергетски ниво означен са i , крајњи са f , k је Болцманова константа, c брзина светлости, m маса електрона, \hbar редукована Планкова константа, n главни

квантни број, l орбитални, L укупни орбитални, а j и J квантни број угаоног и укупног угаоног момента. Сума квадрата матричних елемената $R_{kk'}$ за $\Delta n \neq 0$, у Кулоновој апроксимацији:

$$\left(\sum_{k'} R_{kk'}^2 \right)_{\Delta n \neq 0} \left(\frac{3n_k^*}{2Z} \right)^2 \frac{1}{9} (n_k^{*2} + 3l_k^2 + 3l_k + 1)$$

При том је:

$$x_{l_k, l_k} = \frac{E}{\Delta E_{l_k, l_k}}, k = i, f,$$

где је $E = (3/2)kT$, кинетичка енергија слободног електрона који учествује у судару, а:

$$\Delta E_{l_k, l_k} = |E_{l_k} - E_{l_k}|$$

$$x_{n_k, n_k+1} \approx \frac{E}{\Delta E_{n_k, n_k+1}}$$

док је за $\Delta n \neq 0$ енергетска разлика између нивоа са n_k и n_k+1 процењена као:

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

при чему је:

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

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...), E_H енергија јонизације водониковог атома и E_{ion} граница спектралне серије, односно одговарајућа енергија јонизације. N је густина електрона, а T температура, док су $g(x)$ [13] и $\tilde{g}(x)$ [7] Гаунт фактори за ширину, а $g_{sh}(x)$ [13] и $\tilde{g}_{sh}(x)$ [8] за помак, при чему су модификовани означени тилдом. $g(x) = 0.2$ за $x \in 2$ и $g(x) = 0.24, 0.33, 0.56, 0.98, 1.33$ за $x = 3, 5, 10, 30$ и 100 . $\tilde{g}(x) = 0.7 - 1.1/Z + g(x)$. За високе температуре, рецимо $3kT/\Delta E > 50$, $g(x)$ и $\tilde{g}(x)$ се могу апроксимирати изразом:

$$\tilde{g}_{jj'} = g_{jj'} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \left[\frac{1}{2} + \ln \left(\frac{2ZkT}{n_j^2 \Delta E_{jj'}} \right) \right]$$

3a	x≤1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	40	60	80	≥100	
g_{sh}	0.20	0.25	0.32	0.41	0.45	0.51	0.56	0.60	0.63	0.66	0.78	0.82	0.84	0.85	0.86	0.87	
\bar{g}_{sh}	Z=2	0.35	0.40	0.47	0.53	0.58	0.61	0.64	0.66	0.68	0.70	0.78	0.82	0.84	0.85	0.86	0.87
	Z=3	0.53	0.54	0.57	0.59	0.62	0.64	0.66	0.67	0.69	0.70	0.78	0.82	0.84	0.85	0.86	0.87
	Z=4	0.62	0.62	0.63	0.64	0.65	0.66	0.67	0.68	0.69	0.70	0.78	0.82	0.84	0.85	0.86	0.87
	Z>4	0.88—1.1/Z+0.01x/Z															

Фактор:

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

при чему су E_k и $E_{k'}$ енергије разматраног нивоа и оног који га пертурбује. Узимамо да је сума по $\delta_{k'}$ где је $k = i, f$, а:

$$\delta_i = \pm R_{ii'}^2 \left[g_{sh} \left(\frac{E}{\Delta E_{ii'}} \right) \mp g_{sh}(x_{n_i, n_i+1}) \right]$$

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

различита од нуле само за оне пертурбујуће нивое, ако постоје, за које су толико нарушене претпостављене апроксимације да их морамо издвојити из суме доприноса енергетских нивоа са $\Delta n \neq 0$ и урачунати посебно.

Предност модификованог семиемпиријског прилаза у односу на Гримов семиемпиријски прилаз [13], за који је потребан практично исти сет атомских података као и за најсофистициранији семикласични метод (види на пример [14] и референце у њему), састоји се у много мањем броју неопходних енергетских нивоа и матричних елемената, тако да је применљив и у случајевима када, због њиховог помањкања, горе поменуте методе није могуће адекватно употребити. Наиме, за прорачун Штаркове ширине довољни 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.

С обзиром на много мањи број неопходних почетних података за прорачун, МСЕ метод је посебно занимљив за примену у звезданој спектроскопији, за коју су потребни атомски подаци и подаци о параметрима ширења за што већи број спектралних линија великог броја атома и јона у разним стадијумима јонизације, при чему тачније методе често није могуће применити због недостатака потребних података. То је нарочито случај код комплекснијих атома и јона, где се понекад не може оформити

одговарајући сет поузданих атомских података па тачност семикласичних прорачуна опада.

МСЕ метод је такође од интереса у случајевима када су потребни параметри Штарковог ширења за веома велики број спектралних линија, при чему је важнија средња тачност него велика прецизност за сваку појединачну линију, као што су то на пример прорачуни преноса зрачења или моделирање звезданих атмосфера. Потребни за подацима о Штарковом ширењу огромног броја линија најразличитијих атома и јона нарочито су допринели развој компјутера и изношење телескопа и спектрографа у космички простор. Помоћу инструмената као што је Годаров спектрограф велике резолуције (Goddard High Resolution Spectrograph – GHRS) на Хабловом космичком телескопу (Hubble Space Telescope), прикупљен је велики скуп спектроскопских података високог квалитета који стално расте, тако да линије многих атома и јона за које се сматрало да нису од интереса за истраживање звезданих атмосфера данас имају астрофизички значај, који са развојем одговарајућих космичких технологија стално расте због повећања прецизности и све веће резолуције. Нарочито је велики број података о Штарковом ширењу и профилима спектралних линија уопште, потребан за прорачун непрозрачности звезданих атмосфера, њихово моделирање и спектроскопско проучавање. Колико је томе допринео развој рачунара, може се илустровати на примеру компјутерског програма PHOENIX (види [15] и референце у чланку) за моделирање звезданих атмосфера. Он укључује базу података која садржи податке о 4.2×10^7 атомских, јонских и молекуларних прелаза, чији број стално расте, потребних за овакве прорачуне.

УПРОШЋЕНА МСЕ ФОРМУЛА

У истраживањима звездане плазме примену је нашла и упрошћена МСЕ формула [9] за Штарково ширење изолованих

линија, једноструко и вишеструко наелектрисаних неводоничних јона, која се може применити у случајевима када је за ниво најближи горњем и доњем нивоу прелаза, на који је могућ диполно дозвољени прелаз са почетног (i) или крајњег (f) енергетског нивоа разматране линије, задовољен услов:

$$x_{jif} = E / |E_f - E_i| \leq 2$$

Тада је израз за пуну ширину на половини максималног интензитета једноставнији [9]:

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

У горњем изразу, $E = 3kT/2$ је енергија пертурбујућег слободног електрона, $Z-1$ је наелектрисање јона, а n^* ефективни главни квантни број. Напомињемо да су услови важења ове једначине често задовољени у звезданој плазми, тако да се може успешно користити за одређивања хемијских обилности и друга истраживања звезданих атмосфера.

На сличан начин се у случају помака добија израз [9]:

$$d[\text{\AA}] = 1.1076 \times 10^{-8} \frac{\lambda^2[\text{cm}]N[\text{cm}^{-3}]}{T^{1/2}[\text{K}]} \left(0.9 - \frac{1.1}{Z}\right) \frac{9}{4Z^2} \sum_{j=i,f} \frac{n_j^{*2} \epsilon_j}{2l_j + 1} [(l_j + 1)(n_j^{*2} - (l_j + 1)^2) - l_j(n_j^{*2} - l_j^2)]$$

Ако сви атомски енергетски нивои који улазе у суму у горњој једначини постоје, може се извести додатно сумирање, при чему се добија [9]:

$$d[\text{\AA}] = 1.1076 \times 10^{-8} \frac{\lambda^2[\text{cm}]N[\text{cm}^{-3}]}{T^{1/2}[\text{K}]} \left(0.9 - \frac{1.1}{Z}\right) \frac{9}{4Z^2} \sum_{j=i,f} \frac{n_j^{*2} \epsilon_j}{2l_j + 1} (n_j^{*2} - 3l_j^2 - 3l_j + 1)$$

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

Од првог рада 1980 [7] до данас, МСЕ је тестирана и проверавана на бројним примерима (види нпр. [11, 13] и референце у њима). Тако су у литератури [7], са прорачунатим Штарковим ширинама спектралних линија упоређени експериментални подаци за 36 мултиплета (7 различитих врста јона) двоструко наелектрисаних јона и добијено

да је усредњени однос мерених и теоријских вредности 1.06 ± 0.32 , док је за троструко наелектрисане упоређење извршено за 7 мултиплета (4 врсте јона) и добијено 0.91 ± 0.42 . Претпоставили смо да је тачност МСЕ формуле у границама од око $\pm 50\%$, али је у бројним случајевима установљено да чак и у случају емитера са комплексним спектрима (нпр. Xe II и Kr II) МСЕ метод даје веома добро слагање са експериментом (у интервалу $\pm 30\%$). На пример, у раду [17] показано је да је за Хе II, 6s-6р прелазе, средњи однос између експерименталних и теоријских ширина линије 1.15 ± 0.5 .

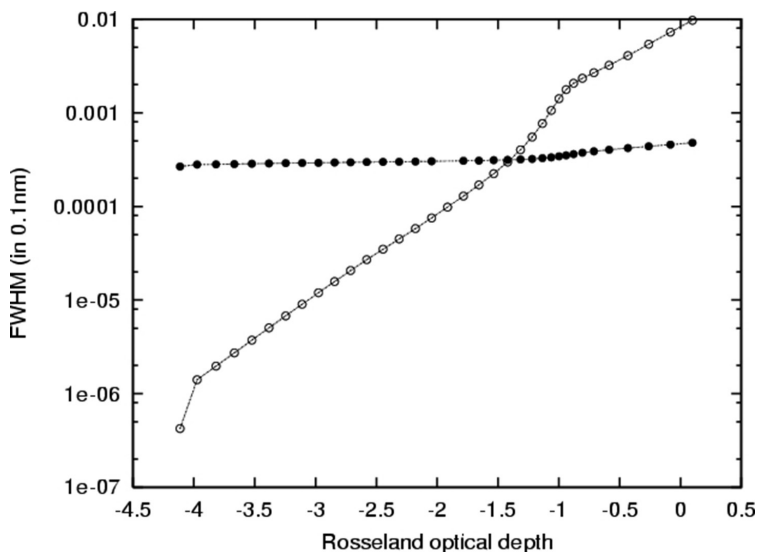
У бројним радовима чланова Групе за астрофизичку спектроскопију и њихових сарадника (види на пример референце у [16]) објављени су резултати за Штаркове ширине, а у неким случајевима и помаке спектралних линија следећих јона: Ar II, Fe II, Pt II, Bi II, Zn II, Cd II, As II, Br II, Sb II, I II, Xe II, Mn II, La II, Au II, Eu II, V II, Ti II, Kr II, Na II, Y II, Zr II, Sc II, Nd II, Be III, B III, S 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, 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, Nb III, Lu III, B IV, Cu IV, Ge IV, C IV, N IV, O IV, Ne IV, Mg IV, Si IV, P IV, S IV, Cl IV, Ar IV, V IV, Ge IV, Zr 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.

Овај посао се и даље одвија са циљем да се обезбеде подаци о Штарковом ширењу спектралних линија за истраживања не само звездане, већ и лабораторијске, фузионе, ласерски произведене плазме као и код технологија које је користе.

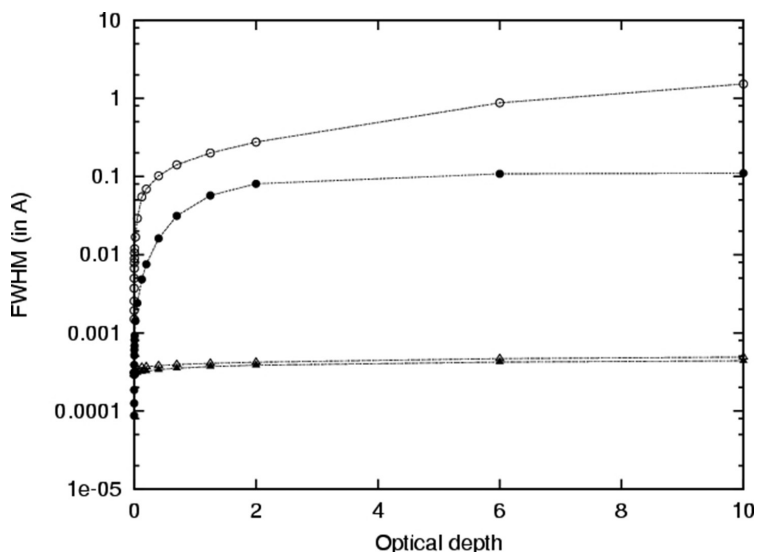
О ПРИМЕНИ МСЕ ПРИЛАЗА У ИСТРАЖИВАЊУ ШТАРКОВОГ ШИРЕЊА СПЕКТРАЛНИХ ЛИНИЈА ЗВЕЗДАНИХ АТМОСФЕРА

Чланови Групе за астрофизичку спектроскопију на Астрономској опсерваторији у Београду и њихови сарадници из Француске, Туниса и Хрватске, истраживали су у низу радова утицај Штарковог ширења на спектралне линије у спектрима звезданих атмосфера различитог типа, при чему су

користили или МСЕ или семикласичну пертурбациону методу, у зависности од расположивих атомских података. Тако су на пример истраживали линије Au II [18], Co III [19], Ge I [20], Ga I [21], Cd I [22], Te I [23] и Lu III [24] код хемијски нерегуларних



Слика 1. Термална Доплерова (пуни кружићи) и Штаркова ширина (FWHM – Full Width at Half Maximum) израчуната помоћу МСЕ методе (празни кружићи) за Co III $a^6D_{7/2} - z^6D_{9/2}$ ($\lambda = 1949.8 \text{ \AA}$) спектралну линију у функцији Роселандове оптичке дубине у атмосфери звезде спектралног типа A ($T_{\text{eff}} = 10\,000 \text{ K}$, $\log g = 4$). Слика је преузета из литературе [19], где је то Fig. 1.



Слика 2. Исто као на слици 1, али за беле патуљке типа DA ($T_{\text{eff}} = 10\,000 \text{ K}$, $\log g = 6$) и DB ($T_{\text{eff}} = 15\,000 \text{ K}$, $\log g = 7$). Пуним кружићима је означена Штаркова ширина за DA, а празним за DB беле патуљке. Пуни троуглови означавају Доплерову ширину за DA, а празни за DB беле патуљке. Штаркова и Доплерова ширина су дате у функцији оптичке дубине за стандардну таласну дужину од 5150 \AA . Слика је преузета из литературе [19], где је то Fig. 2.

звезда A типа, и за сваки испитивани спектар су нађени атмосферски слојеви где је допринос Штарковог ширења већи од Доплеровог или се не може занемарити. У овим истраживањима најчешће је коришћен модел са условима у плазми блиским атмосферским карактеристикама хемијски нерегуларне, HgMn звезде A типа χ Lyr1. Такође су публиковани овакви прорачуни и за атмосфере белих патуљака DA, DB и DO типа [18, 19, 24, 25], и показано је да је при условима који владају у њиховим атмосферама Штарково ширење доминантно у односу на Доплерово, у готово свим слојевима у којима се формирају спектралне линије.

Као примери примене МСЕ за истраживање утицаја Штарковог ширења у звезданим атмосферама на сликама 1 и 2 представљене су Штаркове ширине спектралне линије Co III $a^6D_{7/2} - z^6D_{9/2}$ ($\lambda = 1949.8 \text{ \AA}$) [19] у спектрима атмосфере звезде спектралног типа A ($T_{\text{eff}} = 10\,000 \text{ K}$, $\log g = 4$, где је T_{eff} ефективна температура а g површинска гравитација) и белих патуљака типа DA ($T_{\text{eff}} = 10\,000 \text{ K}$, $\log g = 6$) и DB ($T_{\text{eff}} = 15\,000 \text{ K}$, $\log g = 7$). Штаркова ширина је израчуната у функцији оптичке дубине у горе поменутих атмосферама користећи МСЕ метод и упоређена са термалном Доплеровом ширином.

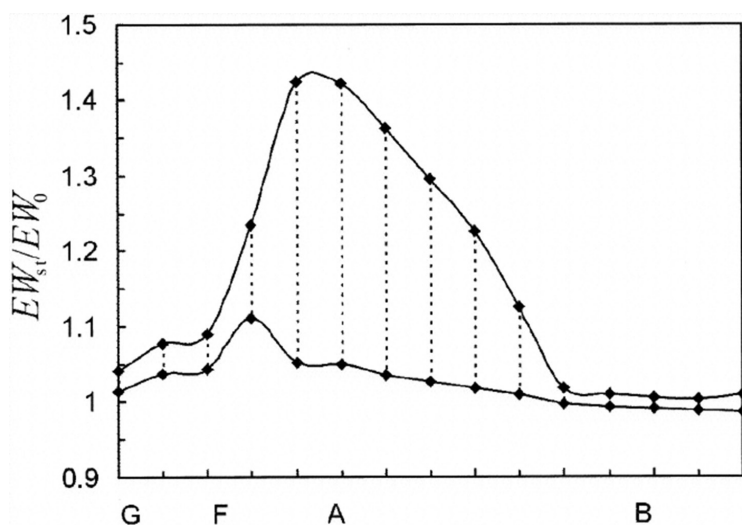
У звезданим атмосферама Доплерово ширење је важан механизам ширења спектралних линија, па се на основу упоређивања Штаркове и Доплерове ширине може видети да ли се неки од ових узрока ширења може занемарити или се мора узети у обзир. Притом, треба имати у виду да се код спектралне линије Доплеровска компонента описује Гаусовом расподелом, а Штарковска Лоренцовом, па чак и када је Штаркова ширина линије мања од Доплерове због особина поменутих расподела, Штарково ширење може утицати на крила линије.

На сликама 1 и 2 можемо видети да је механизам Штарковог ширења апсолутно доминантан за посматрану спектралну линију у поређењу са термалним Доплеровим у свим релевантним деловима атмосфера како код DA тако у још већем степену код DB белих патуљака, али да и код топлих звезда, у дубљим слојевима атмосфере, Штарково ширење доминира.

Још један пример применљивости МСЕ метода у астрофизици су истраживања спектра елемената ретких земаља (rare earth elements–REE) у спектрима CP звезда (Chemically Peculiar – хемијски нерегуларне звезде). Подаци о Штарковом ширењу спектралних линија ових елемената су од интереса за астрофизику, с обзиром на то да су линије јонизованих REE присутне и посматране у звезданим спектрима, а нарочито су изражене у случају CP звезда, код којих је обилност (abundance) ових елемената у широком опсегу температура много већа него на Сунцу. Подаци о Штарковом ширењу у спектрима REE су потребни да би се решавали астрофизички проблеми као што су одређивање обилности елемената, односно испитивање хемијског састава атмосфера, синтеза и анализа звезданих спектра, моделирање атмосфера, истраживање r и s нуклеарних процеса у којима REE настају у унутрашњости звезда, пренос зрачења итд.

У Поповић и др. [26], користећи упрошћени МСЕ метод, одређене су Штаркове ширине за 284 Nd II линије за услове који владају у звезданим атмосферама. Напомињемо да се за одређивање обилности неодимијума код CP и других звезда обично користе управо линије Nd II, али је због сложености Nd II спектра веома тешко добити атомске податке (јачине осцилатора, Штаркове ширине, итд.) који су неопходни за примену у астрофизици. Да би испитали утицај Штарковог ширења на спектралне линије Nd II у звезданим атмосферама, Поповић и др. [26] су извршили синтезу

профила 38 Nd II линија помоћу компјутерских програма за моделирање звезданих атмосфера SYNTH [27] и ATLAS9 [28]. Еквивалентне ширине у звезданим атмосферама за ове линије синтетисали су са (EW_{St}) и без (EW_0) узимања у обзир Штарковог ширења сударима са електронима, за спектралне типове звезданих атмосфера: G, коме припада наше Сунце и топлије F, A и B. То су урадили за обилност неодимијума $A = \log[Nd/H] = -7.0$ и две вредности логаритма површинске гравитације, $\log g = 4.0$ и 4.5 у функцији ефективне температуре ($T_{eff} = 6000 - 16000$ K). Да би показали код којих је спектралних типова звезда утицај Штарковог ширења најзначајнији, Поповић и др. [26] су за разматраних 38 линија одредили највећи и најмањи утицај овог механизма ширења на еквивалентне ширине линија и приказали најмањи и највећи однос еквивалентне ширине EW_{St}/EW_0 . Резултат је дат на слици 3, где је приказан максимални и минимални однос еквивалентних ширина са Штарковим ширењем у функцији спектралног типа звезде или без њега. Може се видети да је највећи утицај механизма Штарковог ширења код звезданих атмосфера спектралног типа A.



Слика 3. Максимални (горња линија) и минимални (доња линија) однос еквивалентних ширина EW_{St}/EW_0 за различите спектралне типове звезде, за 38 Nd II спектралних линија. Слика је преузета из литературе [26], где је то Fig. 5.

Штарково ширење зависи од електронске густине па његов утицај расте са порастом ефективне температуре звезде, пошто расте и степен јонизације у звезданој атмосфери односно и електронска густина, а код врелих звезда водоник, обично главни састојак атмосфере, постаје јонизован. Међутим, са порастом температуре атмосфера се шири па код звезда В и О типа, најврелијих на главном низу, електронска густина опада. Код звезда А типа утицај Штарковог ширења је највећи зато што су ту како температура тако и електронска густина најповољније за овај механизам.

БАЗА ПОДАТАКА О ПАРАМЕТРИМА ШТАРКОВОГ ШИРЕЊА STARK-B

Да би параметре Штарковог ширења, објављене у многим радовима, учинили боље доступним, почели смо да их имплементирамо у облику погодном за директни унос у компјутерске програме, као и у формату који користе виртуалне опсерваторије (ВО формат), у базу података STARK-B (<http://stark-b.obspm.fr/> [29–31]) која садржи теоријски одређене штарковске ширине и помаке спектралних линија неводоничних атома и јона, а првенствено је корисна за моделирање и истраживање звезданих атмосфера и субфотосферских слојева, дијагностику и проучавање лабораторијске и ласерски произведене плазме, као и за истраживања инерцијалне фузије и развој ласерских уређаја и плазмених технологија.

С обзиром на велики број могућих примена, опсег температура и густина који покривају подаци похрањени у бази је велики, а за поједини јон зависи од његовог наелектрисања, односно степена јонизације. Доња граница температуре је неколико хиљада Келвина код неутралних атома, а горња код вишеструко наелектрисаних јона је неколико милиона Келвина. Густине електрона и осталих укључених пертурбујућих јона мењају се од 10^{12} (случај звезданих атмосфера) до неколико пута 10^{23} cm^{-3} (субфотосферски слојеви и истраживања инерцијалне фузије).

У бази постоји проста графичка међувеза (интерфејс) са подацима (види <http://stark-b.obspm.fr/elements.php>). Најпре се бира елемент из периодичног система, затим јонизационо стање, пертурбер(и), густина пертурбера, спектрална линија (односно одговарајући прелаз оптичког електрона у атому/јону) и температура плазме, после чега корисник добија табелу са описом података, пуном ширином линије на половини максималног интензитета и њеним помаком. Излазни подаци се могу добити и у облику табеле усаглашене са ВО стандардима (у ВО формату).

Бази података STARK-B може се приступити и преко Српске виртуалне опсерваторије (Serbian Virtual Observatory–SerVO, <http://servo.aob.rs>, [32]), а укључена је и у Виртуални центар за атомске и молекуларне податке (Virtual Atomic and Molecular Data Center – VAMDC, <http://www.vamdc.org/> [33,34]). Напоменимо да је овај центар настао у резултату истоименог европског ФП7 пројекта, са конзорцијумом који је чинило 15 установа из 9 земаља, првог таквог у коме су учесници били српски астрономи и Астрономска опсерваторија. У оквиру њега саздана је доступна и интероперабилна е-инфраструктура за атомске и молекуларне податке, у оквиру које је интегрисан замашан број база података за потребе различитих корисника у науци и индустрији, а међу њима и STARK-B, која је настала и даље се развија у сарадњи Париске и Београдске астрономске опсерваторије.

ЗАКЉУЧАК

С обзиром на број лабораторија, научних институција и научника укључених у оваква истраживања у Србији, испунили су се услови да се у нашој земљи организује и серија одговарајућих скупова. Југословенске конференције о облицима спектралних линија I–III одржане су 1995. у Криваји код Бачке Тополе, 1997. у Белој Цркви и 1999. у Бранковцу на Фрушкој Гори, IV српска конференција о облицима спектралних линија у Аранђеловцу 2003, а V–X српска

конференција о облицима спектралних линија у астрофизици 2005, 2007, 2009, 2011, 2013. и 2015. у Вршцу, Сремским Карловцима, Зрењанину, на Дивчибарама, у Бањи Ковиљачи и на Сребрном језеру.

На основу свега изложеног може се закључити да мултидисциплинарна област истраживања Штарковог ширења спектралних линија звездане и лабораторијске плазме у Србији има критичну масу научника, што додатно омогућава младима да се баве науком на светском нивоу, своје резултате продискутују са старијим колегама и пласирају у врхунске међународне часописе.

ЗАХВАЛНОСТ

Овај рад део је пројекта 176002 „Утицај сударних процеса на спектре астрофизичке плазме“ и III44002 „Примена ИТ у астрономији и блиским областима“, које финансира Министарство за просвету, науку и технолошки развој Републике Србије.“

SUMMARY

Collisions of emitting and absorbing atoms and ions with charged particles, influence on spectral line profiles of stellar plasma, since due to splitting and shifting of atomic energy levels in an electric field (Stark effect), spectral lines are broadened and shifted. Stark broadening may be an important line broadening mechanism in various astrophysical plasmas like for example in white dwarf – and pre-white dwarf – atmospheres, where this broadening mechanism is usually dominant in comparison with Doppler broadening in large atmospheric layers, or for A and B type star atmospheres and subphotospheric layers. For modelling

of stellar atmospheres, stellar spectra analysis and synthesis, radiative transfer calculations and opacity determination Stark broadening parameters for a huge amount of spectral lines of various atoms and ions are needed.

Here is reviewed the Modified semiempirical method for calculation of Stark broadening parameters of isolated spectral lines of non-hydrogenic ions, especially convenient for large scale calculations and for the cases when there is no enough atomic data for sophisticated semiclassical calculations. Also, its applications and usefulness in astrophysics are considered and several examples are given: Comparison of Stark and Doppler widths of a Co II line in atmospheres of DA and DB white dwarfs and an A-type star and results of investigations of the importance of Stark broadening of Nd II lines in B, A, F and G type stars.

A short discussion on the research of Stark broadening in stellar atmospheres on Belgrade Astronomical observatory, and on spectral line shapes investigations in Serbia is also included.

The Stark broadening parameters – widths and shifts of spectral lines, obtained with the modified semiempirical and semiclassical perturbation methods, needed for the inclusion of Stark broadening mechanism in modelisation of stellar atmospheres and synthesis of their spectra, enter in the STARK-B database (<http://stark-b.obspm.fr/>). This is a common project of Paris and Belgrade observatories, which is also a part of Virtual Atomic and Molecular Data Center (VAMDC – <http://vamdc.org/>) and also has a link in Serbian Virtual Observatory (SerVO – <http://servo.aob.rs/>).

ЛИТЕРАТУРА

1. Dimitrijević, M. S. (1990). *Line Shapes Investigations in Yugoslavia 1962–1985 (Bibliography and citation index)*. Publ. Obs. Astron. Belgrade, 39, 1-214.
2. Dimitrijević, M. S. (1991). *Line Shapes Investigations in Yugoslavia II 1985–1989 (Bibliography and citation index)*. Publ. Obs. Astron. Belgrade, 41, 1-129.
3. Dimitrijević, M. S. (1994). *Line Shapes Investigations in Yugoslavia and Serbia III 1989–1993 (Bibliography and citation index)*. Publ. Obs. Astron. Belgrade, 47, 1-151.
4. Dimitrijević, M. S. (1997). *Line Shapes Investigations in Yugoslavia and Serbia IV 1993–1997 (Bibliography and citation index)*. Publ. Obs. Astron. Belgrade, 58, 1-251.
5. Dimitrijević, M. S. (2001). *Line Shapes Investigations in Yugoslavia and Serbia V 1997–2000 (Bibliography and citation index)*. Publ. Obs. Astron. Belgrade, 70, 1-326.
6. Dimitrijević, M. S. (2005). *Српски астрономи у индексу научних цитата у XX веку – Serbian Astronomers in Science Citation Index in the XX Century*. Belgrade: Zadužbina Andrejević, 1–398.
7. Dimitrijević, M. S., Konjević, N. (1980). Stark broadening of doubly and triply ionized atoms. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 24, 451-459.
8. Dimitrijević, M. S., Kršljanin, V. (1986). Electron-impact Shifts of Ion Lines: Modified Semiempirical Approach. *Astron. Astrophys.*, 165, 269-274.
9. Dimitrijević, M. S., Konjević, N. (1987). Simple Estimates for Stark Broadening of Ion Lines in Stellar Plasma. *Astron. Astrophys.*, 172, 345-349.
10. Dimitrijević, M. S., Popović, L. Č. (1993). Stark Broadening of Bi II Lines of Astrophysical Interest. *Astron. Astrophys. Suppl. Series*, 101, 583-586.
11. Dimitrijević, M. S., Popović, L. Č. (2001). Modified Semiempirical Method. *J. Appl. Spectrosc.*, 68 (6), 893-901.
12. Popović, L. Č., Dimitrijević, M. S. (1996). Stark Broadening of Heavy Ion Lines: As II, Br II, Sb II and I II. *Phys. Scripta*, 53, 325-331.
13. Griem, H. R. (1968). Semiempirical Formulas for the Electron-Impact Widths and Shifts of Isolated Ion Lines in Plasmas. *Phys. Rev.*, 165(1), 258-266.
14. Sahal-Bréchet, S., Dimitrijević, M. S., Ben Nessib, N. (2014). Widths and Shifts of Isolated Lines of Neutral and Ionized Atoms Perturbed by Collisions With Electrons and Ions: An Outline of the Semiclassical Perturbation (SCP) Method and of the Approximations used for the Calculations. *Atoms*, 2(2), 225-252.
15. Hauschildt, P. H., Baron, E. (1999). Numerical Solution of the Expanding Stellar Atmosphere Problem. *J. Comput. Appl. Math.*, 109(1), 41-63.
16. Dimitrijević, M. S. (1996). A Program to Provide Stark-Broadening Data for Stellar and Laboratory Plasma. *Zh. Prikl. Spektrosk.*, 63(5), 684-689.
17. Popović, L. Č., Dimitrijević, M. S. (1996). Stark Broadening of Xe II Lines. *Astron. Astrophys. Suppl. Series*, 116, 359-365.
18. Popović, L. Č., Dimitrijević, M. S., Tankosić, D. (1999). The Stark Broadening Effect in Hot Star Atmospheres: Au I and Au II Lines. *Astron. Astrophys.*, 139, 617-623.
19. Tankosić, D., Popović, L. Č., Dimitrijević, M. S. (2003). The Electron-Impact Broadening Parameters for Co III Spectral Lines. *Astron. Astrophys.*, 399, 795-797.
20. Dimitrijević, M. S., Jovanović, P., Simić, Z. (2003). Stark Broadening of Neutral Germanium Spectral Lines. *Astron. Astrophys.*, 410, 735-739.
21. Dimitrijević, M. S., Dačić, M., Cvetković, Z., Simić, Z. (2004). Stark Broadening of Ga I Spectral Lines. *Astron. Astrophys.*, 425, 1147-1152.
22. Simić, Z., Dimitrijević, M. S., Popović, L. Č., Dačić, M. (2006). Stark Broadening Parameters for Cu III, Zn III and Se III Lines in Laboratory and Stellar Plasma. *New Astronomy*, 12, 187-191.
23. Simić, Z., Dimitrijević, M. S., Kovačević, A. (2009). Stark Broadening of Spectral Lines in Chemically Peculiar Stars: Te I Lines and Recent Calculations for Trace Elements. *New Astronomy Review*, 53, 246-251.
24. Majlinger, Z., Simić, Z., Dimitrijević, M. S. (2015). On the Stark Broadening of Lu III Spectral Lines. *J. Astrophys. Astron.*, 36, 671-679.
25. Hamdi, R., Ben Nessib, N., Milovanović, N., Popović, L. Č., Dimitrijević, M. S., Sahal-Bréchet, S., (2008). Atomic data and electron-impact broadening effect in DO white dwarf atmospheres: Si VI. *MNRAS*, 387, 871-882.
26. Popović, L. Č., Simić, S., Milovanović, N., Dimitrijević, M. S. (2001). Stark Broadening Effect in Stellar Atmospheres: Nd II Lines. *Astro-phys. J. Suppl. Series*, 135, 109-114.
27. Piskunov, N. E. (1992). SYNTH – a Code for Rapid Spectral Synthesis. In Glagolevskij, Yu. V., Romanyuk, I. I. (editors). *Stellar Magnetism Proc. Int. Meeting Physics and Evolution of Stars (92)*. St. Petersburg: Nauka.
28. Kurucz, R. L. (1993). *Model atmosphere program ATLAS9*. Published on CDROM13.
29. Sahal-Bréchet, S., Dimitrijević, M. S., Moreau, N., Ben Nessib, N. (2014). The Stark-B database VAMDC node for spectral line broadening by collisions with charged particles. In Ballet, J., Martins, F., Bournaud, F., Monier, R., Reylé, C. (Editors). *SF2A Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics*, 515-521.
30. Sahal-Bréchet, S., Dimitrijević, M. S., Moreau, N. (2016). STARK-B database, [online]. On <http://stark-b.obspm.fr> [March 9, 2016]. Observatory of Paris, LERMA and Astronomical Observatory of Belgrade.
31. Sahal-Bréchet, S., Dimitrijević, M. S., Moreau, N., Ben Nessib, N. (2015). The STARK-B Database VAMDC Node: A Repository for Spectral Line Broadening and Shifts Due to Collisions with Charged Particles. *Phys. Scr.*, 90(5), 054008.
32. Jevremović, D., Dimitrijević, M. S., Popović, L. Č., Kovačević, A., Vujčić, V., Protić-Benišek, V., et al., (2012). Serbian Virtual Observatory. In Rachev, B., Smrikarov, A. (Editors). *Proc. 13th Int. Conf. CompSysTech'12 (Computer Systems and Technologies)*. New York: ACM ICPS, 630 (399-406).
33. Dubernet, M. L., Boudon, V. J., Culhane, L., Dimitrijević, M. S., Fazliev, A. Z., Joblin, C., Kupka, F., Leto, G., et al. (2010). The Virtual Atomic and Molecular Data Centre (VAMDC). *JQSRT*, 111, 2151-2159. On <http://www.vamdc.org/>
34. Rixon, G., Dubernet, M. L., Piskunov, N., Walton, N., Mason, N., Le Sidaner, P., Schlemmer, S., Tennyson, J., et al. (2011). VAMDC – The Virtual Atomic and Molecular Data Centre – A New Way to Disseminate Atomic and Molecular Data - VAMDC Level 1 Release. In: *AIP Conf. Proc. 7th International Conference on Atomic and Molecular Data and their Applications – ICAMDATA-2010*, 1344 (107-115). American Institute of Physics, 978-0-7354-0900-2