

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ФИЗИЧКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Пошто смо на IV седници Наставно-научног Већа Физичког факултета Универзитета у Београду, одржаној 20. 01. 2016. године, одређени за чланове Комисије за припрему извештаја о докторском раду “КОЕФИЦИЈЕНТИ БРЗИНЕ ПОБУЂИВАЊА И ЈОНИЗАЦИЈЕ МОЛЕКУЛА СО И N₂ ЕЛЕКТРОНИМА У ПРИСУСТВУ ЕЛЕКТРИЧНИХ И МАГНЕТНИХ ПОЉА“ из научне области ФИЗИКА и уже научне области ФИЗИКА АТОМА И МОЛЕКУЛА, коју је кандидат МИРЈАНА ВОЈНОВИЋ предала Физичком факултету у Београду дана 18. 01. 2016. године, Наставно-научном Већу подносимо следећи:

Р Е Ф Е Р А Т

1. Основни подаци о кандидату

1.1 Биографски подаци

Мирјана Војновић, рођена је 19. 04. 1984. године у Београду. Основну школу и гимназију завршила је у Београду. Дипломски рад под насловом „Дискусија између Бора и Ајнштајна о квантној механици”, рађен под руководством проф. др Маје Бурић, одбранила је 10. 05. 2010. са оценом 10. Просечна оцена кандидата са основних студија је 8,37. Докторске студије на Физичком факултету на смеру Физика атома и молекула уписала је школске 2010/2011. године, под менторством проф. др Горана Попарића. Предвиђене испите положила је са просечном оценом 10. Од 2011. године запослена је на Физичком факултету у Београду. Од 2014. године је у звању истраживач-сарадник.

Била је ангажована у настави на следећим предметима: Програмирање 1 и Основи програмирања (2010/2011, 2011/2012, 2012/2013, 2013/2014, 2014/2015); Основи информатике (2012/2013, 2013/2014); Физика атома и молекула (2012/2013, 2013/2014,

2014/2015) и на предмету Мониторинг буке (2012/2013, 2013/2014), за студенте Географског факултета.

1.2 Научна активност

Област истраживања кандидата је Физика атома и молекула. Научна активност кандидата води се у два правца: рад на Монте Карло симулацији кретања електрона кроз молекуле гаса у присуству електричних и магнетних поља и рад на спектрометру за мерење ефективних пресека за јонизацију молекула са детекцијом фрагмената јона техником времена прелета (ТОФ). Истраживања је вршила у Лабораторији за физику атомских сударних процеса и у Лабораторији за физику атома и молекула у Београду, у оквиру пројекта Министарства Науке Републике Србије „Атомски сударни процеси и фотоакустичка спектроскопија молекула и чврстих тела“ (ев. бр. 171016), чији је руководилац проф. др Драгољуб Белић. До сада је објавила 4 научна рада у водећим међународним часописима (и.ф. > 1), од којих два припадају категорији М23, док друга два припадају категорији М22 према класификацији Министарства просвете, науке и технолошког развоја. Радови су укупно цитирани два пута, без аутоцитата и цитата коаутора. Учествовала је на једној националној и на две међународне конференције.

2. Опис предатог рада

2.1 Основни подаци

Дисертација је написана на српском језику, ћириличним писмом на 123 стране, не рачунајући насловну страну, захвалнице, сажетак, садржај, прилоге, биографију аутора, списак литературе, списак публикација и изјаве. Садржи 6 глава, два прилога (А и Б), 74 слика, 8 табела и 123 референци.

Руководилац докторске дисертације је проф. др Горан Попарић, ванредни професор Физичког факултета Универзитета у Београду. Проф. др Горан Попарић испуњава све

услове предвиђене статутом за ментора. Његови најзначајнији радови у часописима са SCI листе у протеклих пет година су:

1. Vojnović M, Popović M, Ristić M. M, Vičić M. D, Poparić G. B, *Rate coefficients for electron impact excitation of N₂*, Chemical Physics, **463** (2015) 38, IF 1.65, ISSN 0301-0104.
2. M. M. Popović, M. M. Vojnović, M. M. Aoneas, M. M. Ristić, M. V. Vičić, G. B. Poparić, *Ionization of N₂ in radio-frequent electric field*, Physics of Plasmas, **21** (2014) 6, IF 2.2, ISSN 1070-664X.
3. M. Vojnović, M. Popović, M. M. Ristić, M. D. Vičić, G. B. Poparić, *Rate coefficients for electron impact excitation of CO*, Chemical Physics, **423** (2013) 1, IF 2.0, ISSN 0301-0104.
4. M. M. Ristić, M. Vojnović, G. B. Poparić, D. S. Belić, *Rate coefficients for electron impact excitation of the a³Π state of CO*, Chemical Physics, **405** (2012) 16, IF 2.0, ISSN 0301-0104.
5. M. M. Ristić, G. B. Poparić, D. S. Belić, *Excitation of the a³Π state of CO by electron impact*, Phys. Rev. A, **83** (2011) 042714, IF 2.9, ISSN 1050-2947.

2.2 Предмет и циљ рада

Докторска дисертација кандидата је из уже научне области Физика атома и молекула, подобласт – Атомски сударни процеси. Предмет истраживања описаног у дисертацији је истраживање понашања коефицијената брзине побуђивања и јонизације молекула гаса на ниском притиску (CO и N₂) електронима у условима присуства спољашњег хомогеног електричног поља и у присуству магнетног поља.

Коефицијенти брзине реакције пружају увид у динамику сударних процеса. Њихово одређивање је од великог значаја уколико је важно утврдити који од конкурентних канала интеракције атомских честица има преовлађујућу улогу у датом макроскопском процесу. Поред тога, коефицијенти брзине реакције су неопходни улазни подаци за сложене моделе астрофизичких и лабораторијских плазми. У овим плазмама често владају неравнотежни услови услед присуства електричних и/или магнетних поља. Међутим, и у данашње време, највише резултата коефицијената брзине побуђивања и

јонизације молекула електронима објављено је за равнотежну функцију расподеле електрона по енергијама.

За потребе истраживања презентованог у дисертацији развијена је Монте Карло симулација кретања електрона кроз гас у присуству електричног и магнетног поља. Значај у развоју ове симулације огледа се у томе што на основу експериментално измерених ефективних пресека и тачних дефиниција физичких процеса омогућава егзактно симулирање кретања електрона кроз гас са резултатом макроскопских транспортних карактеристика електрона, које се могу добити у експериментима. Међу тим карактеристикама најважнија за ову студију је функција расподеле електрона по енергијама, неопходна за добијање коефицијената брзине реакције у неравнотежним условима.

Симулација користи комплетан скуп пресека за све типове судара електрона и молекула, садржаних у бази података. У питању су углавном експериментално измерени пресеци. Међу овим подацима су и пресеци за вибрационо и електронско побуђивање молекула CO и N₂, раније измерени у Лабораторији за физику атомских сударних процеса Физичког факултета у Београду. За потребе одређивања ефективних парцијалних и тоталних пресека за јонизацију молекула у зависности од упадне енергије електрона развијен је електронски спектрометар са масеним спектрометром за јоне са техником времена прелета за раздвајање фрагмената по маси.

Циљ истраживања је систематска анализа динамике процеса одређивањем коефицијената брзине процеса јонизације, дисоцијације, ротационог, вибрационог побуђивања, као и електронског побуђивања у синглетна и триплетна стања молекула CO и N₂ у присуству електричних и магнетних поља. Један од циљева истраживања је и упоредна анализа резултата добијених у неравнотежним и равнотежним условима у зависности од средње енергије електрона.

Значај резултата коефицијената брзине реакције је у њиховој применљивости у моделовању лабораторијских плазми, а такође и у уређајима који користе истовремено присуство електричног и магнетног поља (магнетрони, магнетно конфинирани гасни ласери, плазмени реактори), као и моделовања горњих слојева планетарних атмосфера које садрже дате молекуле. Експериментални уређај за мерење пресека за јонизацију

молекула ће омогућити комплетирање базе података са пресецима за јонизацију, а такође и за мерење пресека за јонизацију других молекула.

2.3 Публикације

Из садржаја ове дисертације су проистекла два рада, претежно урађених од стране кандидата, у водећим међународним часописима са импакт фактором преко 1.0:

1. Vojnović M, Popović M, Ristić M. M, Vičić M. D, Poparić G. B, *Rate coefficients for electron impact excitation of CO*, Chemical Physics, **423** (2013) 1-8 (M22; IF 2.03).
2. Vojnović M, Popović M, Ristić M. M, Vičić M. D, Poparić G. B, *Rate coefficients for electron impact excitation of N₂*, Chemical Physics, **463** (2015) 38-46 (M23; IF 1.65).

2.4 Преглед научних резултата изложених у тези

Прва глава садржи теоријске основе и дефиниције најважнијих појмова у области истраживања дисертације. Друга глава се бави карактеристикама кретања електрона у присуству електричног и магнетног поља.

Трећа глава садржи кратак увод у Монте Карло симулације, опште услове у симулацији и кораке симулације на основу којих су добијени резултати приказани у докторату. У оквиру описа рада симулације дискутовано је о проблемима који се јављају у стандардним нумеричким техникама при рачунању путања електрона у присуству магнетног поља. Упоређене су три различите технике садржане у симулацији (аналитичке и нумеричке) за рачунање положаја и брзине електрона.

Опис и део резултата тестова исправности алгоритма симулације, извршени за фиктивне моделне гасове, приказани су у четвртој глави. Други део резултата тестова, извршен за различите углове између електричног и магнетног поља, дат је у прилогу А. У четвртој глави приказани су резултати поређења транспортних параметара добијених симулацијом за случај реалних гасова, у условима присуства електричног поља, са експериментално измереним вредностима доступним у литератури. Резултати поређења показују конзистентност резултата транспортних параметара добијених са одабраним

скупом ефективних пресека у бази симулације са експерименталним подацима доступним у литератури.

Поређење симулацијом добијених јонизационих коефицијената за ове гасове у присуству електричних и магнетних поља са експерименталним подацима, приказаних у петој глави, показало је поузданост резултата коефицијената брзине реакције. Пета глава садржи резултате добијене Монте Карло симулацијом, груписане у два дела за дату врсту молекула. Притом су целине подељене на подсекције са резултатима парцијалних и тоталних коефицијената брзине одређеног типа побуђивања и јонизације молекула CO [A2], односно N₂ [A4], у зависности од редукованог електричног поља за различите вредности редукованог магнетног поља са вектором постављеним под правим углом у односу на вектор јачине електричног поља. Добијени су веома слични резултати за ова два молекула. Показано је да се ефекат успоравања електрона применом магнетног поља (“магнетно хлађење”) генерално испољава у опадању коефицијената брзине реакције са повећањем магнетног поља. Утврђено је да побуђивање преко стварања резонанце (краткоживећег негативног јона) утиче на карактеристике коефицијената брзине вибрационог и ротационог побуђивања у виду појаве максимума у области енергије, која одговара формирању резонанце.

Резултати су показали да су најдоминантнији процеси у области ниских средњих енергија за оба молекула вибрационо и ротационо побуђивање. Тотални коефицијенти брзине реакције упоређени су са равнотежним коефицијентима брзине реакције, добијеним за Максвелову расподелу електрона по енергијама. Ово поређење је показало да су у области формирања резонанце вредности равнотежних коефицијената веће од вредности неравнотежних за дати процес.

На крају главе је размотрено понашање коефицијената брзине процеса при промени угла између електричног и магнетног поља. Представљена је формула уз помоћ које су фитовани подаци добијени симулацијом, чијом употребом је могуће израчунати коефицијент брзине процеса за било који угао између електричног и магнетног поља на основу резултата коефицијената брзине процеса у дисертацији добијених у одсуству магнетног поља и у ортогоналној конфигурацији електричног и магнетног поља, за дате вредности редукованог електричног и магнетног поља [A4].

Посебан део доктората чини следеће поглавље, у ком је описан спектрометар за мерење тоталних и парцијалних пресека за јонизацију молекула, развијен у Лабораторији за физику атомских сударних процеса Физичког факултета Универзитета у Београду. Дати су опис и принцип рада уређаја уз прелиминарне резултате мерења тоталних пресека за јонизацију молекула азота и спектра времена прелета јона добијеног за упадну енергију електрона од 82 eV.

3. Списак публикација кандидата

А Радови у водећим међународним часописима (импакт фактор > 1)

[A1] M. M. Ristić, M. Vojnović, G. B. Poparić, D. S. Belić, *Rate coefficients for electron impact excitation of the $\alpha^3\Pi$ state of CO*, Chemical Physics, **405** (2012) 16 (M23; IF 1.96).

[A2] Vojnović M, Popović M, Ristić M. M, Vičić M. D, Poparić G. B, *Rate coefficients for electron impact excitation of CO*, Chemical Physics, **423** (2013) 1 (M22; IF 2.03).

[A3] M. P. Popović, M. M. Vojnović, M. M. Aoneas, M. M. Ristić, M. D. Vičić, G. B. Poparić, *Ionization of N₂ in radio-frequent electric field*, Physics of Plasmas, **21** (2014) 6 (M22; IF 2.14).

[A4] Vojnović M, Popović M, Ristić M. M, Vičić M. D, Poparić G. B, *Rate coefficients for electron impact excitation of N₂*, Chemical Physics, **463** (2015) 38 (M23; IF 1.65).

Б Радови у зборницима међународних конференција

[БП-1] M. Vojnović, M. Popović, M. M. Ristić, M. Vičić, G. B. Poparić, *Rate coefficients in crossed E and B fields in CO*, SPIG, Beograd, 2012.

[БП-2] M. Popović, M. Vojnović, M. M. Ristić, M. Vičić, G. B. Poparić, *Rate coefficients for electron impact ionization in RF electric field in Nitrogen*, SPIG, Beograd, 2012.

[БП-3] M. M. Vojnović and D. S. Belić, *Rate coefficients for electron-impact dissociation of O₃⁺*, SPIG, Beograd, 2014.

[БП-4] М. М. Aoneas, М. М. Vojnović, М. М. Ristić, М. D. Vičić, G. B. Poparić, *Electron impact ionization of CO in RF electric field*, SPIG, Beograd, 2014.

В Радови у зборницима националих конференција

[БП-1] М. М. Vojnović, М. Popović, М. М. Ristić, and G. B. Poparić, *Development of electron ionization time-of-flight mass spectrometer*, CEAMPP, Beograd, 2013.

[БП-2] М. М. Vojnović, М. М. Ristić, М. D. Vičić and G. B. Poparić, *Monte Carlo simulation of electron transport in N₂*, CEAMPP, Beograd, 2013.

4. Цитати

[A1] М. М. Ristić, М. Vojnović, G. B. Poparić, D. S. Belić, “Rate coefficients for electron impact excitation of the a³Π state of CO”, *Chemical Physics*, **405** (2012) 16-21(M23; IF 1.96)

1. R. Alvarez, J. Cotrino, A. Palmero, *On the kinetic and thermodynamic electron temperatures in non-thermal plasmas*, *EPL* **105** (2014) Issue 1.

2. J. Annaloro, A. Bultel, P. Omaly, *Collisional-Radiative Modeling Shock Waves in Nitrogen*, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer* **28** (2014) 608.

ЗАКЉУЧАК

На основу изложеног комисија закључује да је кандидат МИРЈАНА ВОЈНОВИЋ у докторској дисертацији под називом “КОЕФИЦИЈЕНТИ БРЗИНЕ ПОБУЂИВАЊА И ЈОНИЗАЦИЈЕ МОЛЕКУЛА СО И N₂ ЕЛЕКТРОНИМА У ПРИСУСТВУ ЕЛЕКТРИЧНИХ И МАГНЕТНИХ ПОЉА“ представила оригиналне научне резултате са значајним научним доприносом у области ФИЗИКЕ АТОМА И МОЛЕКУЛА. Делови тезе кандидата су публиковани у истакнутим међународним часописима. Стога сматрамо да овај рад може да буде прихваћен као докторска дисертација и

ПРЕДЛАЖЕМО

Наставно-научном већу Физичког факултета Универзитета у Београду да одобри њену јавну одбрану.

Београд, 02. 02. 2016.

др Горан Попарић
Ванр. проф. Физичког факултета
у Београду

др Драгољуб Белић
Ред. проф. Физичког факултета
у Београду

Академик др Зоран Петровић
Научни саветник Института
за физику у Београду