

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Данка Бошњаковића

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета Универзитета у Београду бр. 5048/08-3 од 28.04.2016. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Данка Бошњаковића под насловом

**„Моделовање гасних детектора честица високих енергија
применом технике електронских ројева“.**

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала и разговора са кандидатом, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидат Данко Бошњаковић уписао је докторске академске студије 16.01.2009. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду. По истеку законског рока за завршетак докторских академских студија, на захтев студента, одобрено је продужење рока за завршетак ових студија за још два семестра, сагласно члану 92. став 4 Статута Универзитета у Београду, као и додатно продужење за годину дана на основу Одлуке бр. 24-06/18-2008/5022.

Тему за израду докторске дисертације под радним насловом „Моделовање гасних детектора честица високих енергија применом технике електронских ројева“ пријавио је 03.07.2014. године. Комисија за студије III степена на седници одржаној 09.07.2014. године разматрала је предлог теме за израду докторске дисертације и предлог Комисије за оцену подобности теме и кандидата упутила Наставно-научном већу на усвајање. Наставно-научно веће именovalo је Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр. 5048/08-1 од 08.09.2014. године) у саставу:

- др Предраг Маринковић, редовни професор
Електротехничког факултета Универзитета у Београду,
- др Саша Дујко, виши научни сарадник Института за физику Универзитета у Београду,
- др Синиша Јешић, ванредни професор
Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

За ментора је предложен академик Зоран Љ. Петровић, научни саветник Института за физику Универзитета у Београду. Јавна усмена одбрана предложене теме докторске дисертације

одржана је 14.10.2014. на Електротехничком факултету, пред комисијом, а у одсуству ментора. Кандидат је одговорио на сва питања комисије и добио оцену „задовољно“. Комисија за оцену подобности теме и кандидата, 29.10.2014. године поднела је извештај који је Комисија за студије III степена размотрила и упутила Наставно-научном већу на усвајање. Наставно-научно веће је на својој седници одржаној 18.11.2014. године усвојило извештај Комисије за оцену подобности теме и кандидата (Одлука бр. 5048/08-2). Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду, дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације кандидата Данка Бошњакловића под насловом „Моделовање гасних детектора честица високих енергија применом технике електронских ројева“ (Одлука бр. 61206-5771/2-14 од 22.12.2014. године).

Кандидат је 07.04.2016. године предао дисертацију на преглед и оцену. На седници одржаној 12.04.2016. године, Комисија за студије III степена потврдила је испуњеност свих потребних услова и Наставно-научном већу упутила предлог за именовање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације. Наставно-научно веће, на својој седници одржаној 21.04.2016. године, именovalo је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације (Одлука бр. 5048/08-3 од 28.04.2016. године), у саставу:

- др Зоран Петровић, научни саветник, Институт за физику у Београду,
- др Предраг Маринковић, редовни професор, Електротехнички факултет у Београду,
- др Антоније Ђорђевић, редовни професор, Електротехнички факултет у Београду,
- др Јован Цветић, редовни професор, Електротехнички факултет у Београду,
- др Саша Дујко, научни саветник, Институт за физику.

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација припада научној области електротехнике и ужој научној области нуклеарне технике за коју је матичан Електротехнички факултет Универзитета у Београду. Такође, дисертација припада и другим областима, попут експерименталне физике честица, физике транспорта наелектрисаних честица у гасовима и физике електричних гасних пражњења.

Дисертација је урађена под руководством академика Зорана Љ. Петровића, научног саветника Института за физику Универзитета у Београду. Академик Зоран Љ. Петровић је руководио Центром за неравнотежне процесе Института за физику у Београду, Центра изврности Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије. Зоран Љ. Петровић је један од водећих светских истраживача у оквиру физике електричних гасних пражњења и физике неравнотежног транспорта наелектрисаних честица у гасовима. У досадашњем раду, објавио је преко 200 публикација у часописима са SCI листе, одржао је преко 100 предавања по позиву на међународним конференцијама и аутор је једне од најзначајнијих монографија у својој области истраживања, *Plasma Electronics: Applications in Microelectronic Device Fabrication*. Био је ментор и руководио у великом броју докторских дисертација (преко 20) и магистарских теза (преко 15) које су одбрањене на Електротехничком факултету и Физичком факултету Универзитета у Београду. Ангажован је као предавач на докторским студијама Електротехничког и Физичког факултета Универзитета у Београду, а био је гостујући професор на Кеио Универзитету у Јокохами у Јапану. Добитник је великог броја домаћих и интернационалних награда и признања за научни рад и технолошка достигнућа. Редован је члан Српске академије наука и уметности и Академије инжењерских наука Србије.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Данко Бошњаковић рођен је 11.12.1984. у Београду, где је завршио основну школу и гимназију. Електротехнички факултет у Београду уписао је 2003. године, а дипломирао 2007. године са просечном оценом 9,57 на одсеку за физичку електронику, смеру за биомедицински и еколошки инжењеринг. Мастер студије на истом факултету и смеру завршио је 2008. године са просечном оценом 10. Докторске студије на Електротехничком факултету у Београду и модулу за нуклеарну, медицинску и еколошку технику уписује 2009. године.

Године 2010. постаје стипендиста Министарства за науку и технолошки развој, а 2012. године запослен је као истраживач-приправник у Институту за физику у Београду, при Лабораторији за гасну електронику. Ангажован је на пројекту основних истраживања под називом „Фундаментални процеси и примене транспорта честица у неравнотежним плазмама, траповима и наноструктурама“, финансираним од стране Министарства просвете науке и технолошког развоја, у оквиру кога ради на теми моделовања гасних детектора честица високих енергија. У звање истраживач-сарадник изабран је 2015. године.

Објавио је три рада у врхунским међународним часописима и одржао једно предавање по позиву на међународном скупу. Његови резултати презентовани су на више међународних конференција.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Дисертација је обликована према Упутству за обликовање докторске дисертације и Упутству за формирање репозиторијума докторских дисертација Универзитета у Београду од 14.12.2011. године. Састоји се од насловне стране на српском и енглеском језику, стране са подацима о ментору и члановима комисије, резимеа на српском и енглеском језику, садржаја, текста рада подељеног у поглавља, списка коришћене литературе и стране са биографијом аутора. Дисертација обухвата 182 стране са 109 слика, 6 табела и 147 библиографских референци. Текст дисертације обликован је кроз следећа поглавља:

1. Увод
2. Гасни детектори честица високих енергија
3. Транспортна теорија ројева електрона у неутралним гасовима
4. Моделовање транспорта електрона у ТРС детекторима
5. Моделовање транспорта електрона у RPC детекторима
6. RPC детектор
7. Монте Карло моделовање RPC детектора
8. Резултати Монте Карло моделовања RPC детектора
9. Флуидно моделовање RPC детектора
10. Резултати флуидног моделовања RPC детектора
11. Закључак

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводном поглављу дат је преглед стања у области моделовања гасних детектора честица. Идентификовани су и актуелни проблеми у овој области који представљају мотивацију за истраживање у оквиру докторске дисертације. Међу мотивационим факторима, посебно је наглашен проблем квалитета и некритичке имплементације транспортних коефицијената електрона у гасовима као улазних података у моделима гасних детектора. Такође је истакнута потреба за развојем нових модела одзива детектора типа RPC (енгл. *Resistive Plate Chamber*). На крају поглавља дат је кратак преглед садржаја дисертације.

На почетку другог поглавља размотрен је концепт савремених експеримената у физици честица високих енергија као и улога детекторских система у овим експериментима. Затим је дат преглед најважнијих физичких механизма интеракције честица високих енергија са материјалом детектора. Коначно, размотрени су принципи рада и карактеристике неких типова гасних детектора који се најчешће користе у експериментима физике високих енергија, попут дрифт коморе (енгл. *drift chamber*), вишежичане пропорционалне коморе (енгл. *Multi-Wire Proportional Chamber*, MWPC) и TPC коморе (енгл. *Time Projection Chamber*, TPC).

Треће поглавље приказује основне елементе хидродинамичке кинетичке теорије за опис неравнотежног и неконзервативног транспорта електрона у неутралним гасовима. Након дефиниције роја наелектрисаних честица, описана је претпоставка хидродинамичког режима чије увођење омогућава да се на ригорозан начин дефинишу две различите фамилије транспортних коефицијената, а то су *bulk* и *flux* транспортни коефицијенти. Затим је анализирана структура векторских и тензорских транспортних коефицијената, као и симетрија која постоји између индивидуалних елемената дифузионог тензора у специфичним конфигурацијама електричног и магнетског поља. На крају овог поглавља приказане су две технике које су коришћене у оквиру дисертације за прорачун транспортних коефицијената и проучавање транспорта електрона у гасовима који се користе у детекторима. То су *multi term* моментна метода за решавање неконзервативне Болцманове једначине и Монте Карло техника.

У четвртном поглављу је анализиран транспорт електрона у гасним смешама неона (Ne) и угљен диоксида (CO₂) које се користе као радни гасови у TPC коморама. Након кратког описа сетова пресека за расејање електрона у Ne и CO₂ који су коришћени као улазни подаци за решавање Болцманове једначине и као улазни подаци за Монте Карло симулације, разматран је утицај варијације температуре гаса и процентуалног садржаја CO₂ у смеси Ne-CO₂ на транспорт електрона. Проучаван је и утицај гасних нечистоћа, које се обично репрезентују азотом и/или воденом паром, на транспорт електрона. Такође је анализиран транспорт електрона у укрштеним електричним и магнетским пољима где је посебан акценат стављен на утицај угла између вектора поља на транспорт електрона. Мотивација за ове прорачуне произилази из чињенице да TPC коморе, које се користе на експериментима у физици високих енергија, представљају велике системе, са запремином гаса до 100 m³, где је тешко прецизно контролисати радне услове попут температуре и притиска гаса и присуство нечистоћа у гасној смеси. Такође, у овим системима електрично и магнетско поље скоро никада нису савршено просторно хомогени и међусобно паралелни. Ови параметри и њихове локалне варијације утичу на транспорт електрона од кога коначно зависе перформансе детектора, попут просторне резолуције и линеарности реконструкције трајекторије честица.

Пето поглавље је посвећено анализи и развоју сударних и транспортних података за електроне у индивидуалним гасовима и смешама гасова које се користе у RPC детекторима. Посебно су размотрени пресеци за расејање електрона у тетрафлуороетану (C₂H₂F₄), који има

улогу носећег гаса у RPC детекторима, изобутану ($i\text{-C}_4\text{H}_{10}$) и сумпор-хексафлуориду (SF_6). Након анализе сударних података за расејање електрона и њихове верификације поређењем експериментално одређених и теоријски израчунатих транспортних коефицијената, у овом поглављу је анализиран транспорт електрона у различитим $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4/i\text{-C}_4\text{H}_{10}/\text{SF}_6$ смешама које се користе у RPC детекторима на ALICE, ATLAS и CMS експериментима у CERN-у. Највећа пажња је посвећена проучавању експлицитних ефеката неконзервативних судара на транспортне особине електрона са посебним акцентом на тумачењу негативне диференцијалне проводности која се појављује искључиво у E/N-профилу *bulk* брзине дрифта (где је E јачина електричног поља а N концентрација молекула позадинског гаса). За потребе овог тумачења, израчунате су просторно разложене транспортне карактеристике роја електрона применом Монте Карло метода. На крају овог поглавља приказани су најновији сетови пресека за расејање електрона у фреону $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$ који су значајно унапређени у поређењу са претходно описаним сетовима. Новоформирани сетови су искоришћени за прорачун транспортних коефицијената у различитим $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4/i\text{-C}_4\text{H}_{10}/\text{SF}_6$ смешама које користе RPC детектори у CERN-у.

У шестом поглављу су описани конструкција и принцип рада RPC детектора који се користе у многим савременим експериментима физике високих енергија, али и у другим областима. Затим су размотрена два основна режима рада ових детектора, стримерски и лавински, који се разликују по примењеном електричном пољу, гасним смешама, а последично и амплитуди сигнала и брзини бројања. Посебно су истакнуте примене RPC детектора у *timing* и *triggering* системима на ATLAS и ALICE експериментима у CERN-у.

Микроскопски стохастички модел одзива RPC детектора који је развијен у оквиру ове дисертације, приказан је у седмом поглављу. Овај модел се заснива на Монте Карло техници симулације која се користи за праћење трајекторија појединачних електрона, као и њихових судара са молекулима гаса. На почетку поглавља је дата генерална структура алгорита симулације. Затим је описано генерисање тзв. примарне јонизације настале интеракцијом упадне наелектрисане честице високе енергије са гасом. У наставку су наведени начини за одређивање трајекторије електрона у гасу током времена између два судара, као и начини за одређивање тренутка судара и параметара расејања након судара. На крају поглавља приказана је примена Рамоове теореме на RPC детекторе која омогућава да се, познавајући брзине појединачних електрона, израчуна одзив детектора тј. струјни сигнал кроз електроде.

Резултати примене микроскопског модела RPC детектора су приказани у осмом поглављу. Прво је анализиран раст електронских лавина у неограниченом простору започетих једним електроном. Добијене расподеле величина лавина поређене су са Леглеровом теоријом раста лавина која је основа многих других модела одзива RPC детектора. Затим су проучаване лавине започете генерисаном примарном јонизацијом, а њихове временске расподеле поређене су са Риглеровим моделом времена одзива ових детектора. Применом пуног микроскопског модела, који укључује границе електрода и праг дискриминатора задат индукованим наелектрисањем, добијене су временска резолуција и ефикасност детекције за једну специфичну конфигурацију RPC детектора. Резултати су показали добро слагање са мерењима као и Риглеровим аналитичким моделом. Показано је и да су резултати веома осетљиви на сет пресека за расејање електрона у фреону $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$ који се користи као носећи гас у смеши.

Девето поглавље је посвећено флуидним моделима RPC детектора. Посебан нагласак је стављен на имплементацију транспортних података у флуидне моделе. Извођењем класичног флуидног модела (или флуидног модела првог реда) интеграцијом Болцманове једначине, показано је под којим условима се у флуидном моделовању могу користити *flux* транспортни подаци. Такође, полазећи од једначине континуитета, изведен је и модел заснован на хидродинамичкој претпоставци. У одређеним условима овај модел има исти математички облик као и класичан флуидни модел, са разликом што користи *bulk* транспортне

коэффициенте. У овом поглављу је дат критички осврт на сва три наведена приступа у флуидном моделовању а такође је указано на коректност примене Рамоове теореме под претпоставком хидродинамичког режима. Коначно, представљена је нумеричка имплементација 1,5-димензионалног флуидног модела RPC детектора који укључује и фотојонизацију у гасу.

У десетом поглављу су приказани резултати флуидног моделовања три различите конфигурације RPC детектора помоћу модела уведених у претходном поглављу. Прво је анализиран развој стримера у детектору под дејством просторног наелектрисања и фотојонизације. Затим је показано колико је израчунати сигнал детектора осетљив на врсту транспортних коефицијената који се користе као улазни подаци у флуидном моделу. Посебно је разматрана осетљивост резултата на транспортне коефицијенте електрона који су добијени на основу четири различита сета пресека за расејање електрона у $C_2H_2F_4$. На овај начин је заправо анализирана осетљивост сигнала детектора на пресеке за расејање електрона у $C_2H_2F_4$. На крају поглавља дато је поређење резултата добијених класичним флуидним моделом са онима који су добијени моделом заснованим на хидродинамичкој претпоставци.

Једанаесто поглавље у форми закључка сумира најважније резултате и доприносе дисертације, У овом поглављу идентификовани су правци за потенцијално нова истраживања и описане су стратегије за развој нумеричких алата који су неопходни у овим будућим истраживањима.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Тема докторске дисертације недвосмислено припада савременим областима истраживања, имајући у виду да су гасни детектори честица највише коришћени детектори у савременим експериментима физике високих енергија, пре свега захваљујући њиховој једноставној конструкцији, ниској цени по јединици запремине и добрим перформансама. На пример, гасни детектори чине већину од укупног броја детектора на ATLAS, CMS, ALICE i LHCb експериментима у CERN-у. Моделовање гасних детектора честица данас је посебно актуелна тема с обзиром на то да постоји више предлога и пројеката нове генерације експеримената физике високих енергија изузетно високе луминозности који од детектора захтевају перформансе на граници њихових теоријских могућности. Уз физику високих енергија, гасни детектори честица имају и бројне примене у многим другим областима као што су нуклеарна техника, дозиметрија и заштита од зрачења, медицина, физика космичког зрачења и геофизика.

Оно што ову дисертацију и истраживање издваја од већине досадашњих приступа у моделовању гасних детектора је, осим развоја нових модела, и критички осврт на постојеће моделе из угла транспортне теорије ројева електрона у гасовима. Посебан нагласак је стављен на квалитет транспортних и сударних података електрона у гасовима и начине за њихову имплементацију у моделе детектора. Критички су анализирани пресеци за расејање електрона у гасовима и смешама које се користе у детекторима као и њима одговарајући транспортни параметри који су добијени *multi term* теоријом за решавање Болцманове једначине и Монте Карло симулацијом. Да би се ово постигло, у оквиру ове дисертације уведени су нови елементи у рачунарске кодове за решавање Болцманове једначине и Монте Карло симулације. Кроз више примера и модела размотрен је и утицај ових података на

результате моделирања. Указано је и на могуће грешке и њихове последице које се често јављају приликом некоректне имплементације података у моделе. Такође, развијена су и два потпуно нова и оригинална модела: микроскопски стохастички модел RPC детектора и флуидни модел заснован на хидродинамичкој претпоставци.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Литература коришћена у дисертацији је наведена кроз више од 100 референци. Цитирани су актуелни радови из угледних међународних часописа, саопштења са конференција, прегледни радови и докторске дисертације. Наведени списак литературе указује да је кандидат прегледао и цитирао све референтне изворе из области физике гасних детектора честица, транспортне теорије ројева електрона у гасовима и експерименталне физике високих енергија, који су релевантни за тему дисертације. У дисертацији су такође цитирани и радови самог кандидата.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У оквиру ове дисертације су примењене две технике за анализу транспорта електрона и прорачун транспортних карактеристика електрона у гасовима и смешама који се користе у гасним детекторима честица. То су *multi term* моментна метода за решавање неконзервативне Болцманове једначине и Монте Карло метода симулације. Ово су егзактне методе у оквиру стандардне технике ројева електрона, која се користи не само за нормализацију сетова пресека за расејање електрона у гасовима од интереса, већ и као основни градивни елемент у изградњи модела електричних гасних пражњења. Ипак, ове две методе се суштински међусобно разликују и свака од њих има одређене области примене у којима једна има предности у односу на ону другу. На пример, моментна метода за решавање Болцманове једначине је генерално нумерички знатно ефикаснија од Монте Карло методе у хидродинамичким условима, али ипак постоје неке примене, попут анализе транспорта електрона у јако електронегативним гасовима, где ова метода не обезбеђује поуздане резултате услед отежане конвергенције транспортних коефицијената. Са друге стране, Монте Карло техника је далеко флексибилнија у погледу имплементације у моделе нарочито у ситуацијама у којима доминирају нехидродинамички услови. У хидродинамичким условима ова метода је у већини случајева нумерички мање ефикасна од нумеричког решавања Болцманове једначине, поготово у гасовима и на енергијама где доминирају еластични судари или у ситуацијама где спољашње магнетско поље, а не судари са позадинским гасом, контролише понашање роја електрона. У дисертацији је за већину прорачуна коришћена или једна, или друга метода, док су у неким случајевима обе методе коришћене упоредно ради поређења и верификације резултата. За анализу транспорта електрона у RPC детекторима коришћена су нумеричка решења Болцманове једначине јер у радним условима ових детектора доминирају еластични судари електрона и молекула позадинског гаса, па би Монте Карло техника у овом случају била прилично неефикасна. Са друге стране, Монте Карло метода је примењивана за анализу транспорта електрона у гасним смешама са јако електронегативним гасовима које се користе у RPC детекторима где на ниским електричним пољима моментна метода за решавање Болцманове једначине не даје поуздане резултате услед отежане конвергенције транспортних коефицијената. Такође, Монте Карло техника је коришћена и за добијање просторно разложених карактеристика роја које су биле неопходне за тумачење уочених транспортних феномена попут негативне диференцијалне проводности. Коначно, битно је истаћи да су обе методе у потпуности адекватне за прорачуне у оквиру ове дисертације, посебно имајући у виду да су обе методе детаљно тестиране у већем броју бенчмарк прорачуна, док већина других аутора у овој области још увек користи резултате за

транспортне коефицијенте електрона који су добијени апроксимативним методама за решавање Болцманове једначине различите поузданости или недовољно тестираним Монте Карло кодовима, који могу унети грешке од неколико десетина до неколико стотина процената у моделе детектора који се анализирају.

За потребе моделовања RPC детектора развијен је и примењен стохастички микроскопски модел заснован на Монте Карло техници праћења трајекторија појединачних електрона и њихових судара са молекулима гаса. Овај модел укључује и генерисање примарне јонизације настале интеракцијом упадне честице високе енергије са гасом, као и прорачун индукованог струјног сигнала у електродама детектора. Помоћу овог модела добијене су кључне карактеристике RPC детектора попут временске резолуције и ефикасности. У односу на остале до сада коришћене феноменолошке и макроскопске моделе, овај модел је далеко егзактнији и у потпуности адекватан намени.

Примењене су и две варијанте класичног флуидног модела, а развијен је и потпуно нови и оригинални флуидни модел заснован на хидродинамичкој претпоставци и апроксимацији локалног електричног поља. Модели су нумерички имплементирани у 1,5-димензији и коришћени за добијање средњих вредности сигнала RPC детектора. Имајући у виду детерминистички карактер модела и бројне апроксимације које подразумевају, укључујући и 1,5-димензионалну имплементацију, ови модели нису подесни за директно квантитативно поређење са измереним сигнаlima и резултатима стохастичких модела. Ипак, потпуно оправдано су коришћени за квалитативну анализу развоја стримера у RPC детекторима, али и за квантитативно разматрање утицаја транспортних коефицијената електрона на израчунате сигнале. Ови флуидни модели су такође оправдано коришћени за међусобно квантитативно поређење, чиме је указано на величину разлике коју уноси избор модела или врста улазних транспортних података.

На основу ове дискусије, може се закључити да је дисертација базирана на *multi term* теорији за решавање Болцманове једначине, Монте Карло симулацији и високо софистицираним флуидним моделима последње генерације. Овако широки спектар метода и техника је био неопходан, имајући у виду комплексност процеса на микроскопском нивоу, временске и просторне скале на којима се ови процеси одигравају, као и потребу за успостављањем њихове везе са макроскопским параметрима детектора.

3.4. Применљивост остварених резултата

Значај и применљивост бољих теоријских модела и нових приступа у моделовању виде се пре свега у пројектовању и оптимизацији детектора јер се са већом сигурношћу могу предвидети карактеристике рада детектора у зависности од његових бројних параметара. Истовремено, бољи модели доприносе и бољем познавању физичких основа и принципа рада детектора. Моделовање гасних детектора је данас посебно актуелно јер се за потребе нове генерације експеримената у физици високих енергија пројектују и испитују нове конструкције гасних детектора које по перформансама треба да надмаше постојеће. Уз физику високих енергија, гасни детектори честица налазе примене у многим другим областима, као што су нуклеарна техника, дозиметрија и заштита од зрачења, физика космичког зрачења и геофизика. Посебно се издваја и медицинска дијагностика где је у току пројектовање и испитивање *time of flight* PET томографа заснованих на RPC детекторима.

Без обзира на то да ли су аналитички или нумерички, стохастички или детерминистички, макроскопски или микроскопски, сви модели гасних детектора честица користе транспортне или сударне податке електрона као улазне параметре. У досадашњим моделима детектора

квалитет и порекло ових података су често били занемарени. С том мотивацијом, транспортни подаци, као и начини за њихов прорачун, имају кључно место у дисертацији. Теоријски је размотрено, и на конкретним примерима илустровано, како сударни и транспортни подаци електрона могу утицати на резултате моделовања детектора. Показано је и у коликој мери некоректна имплементација транспортних параметара, занемаривањем експлицитних ефеката неконзервативних судара, утиче на израчунате сигнале детектора. Без обзира што су ови ефекти илустровани на конкретним примерима у RPC детекторима, њихове импликације се односе на практично све моделе гасних детектора честица.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Од почетка истраживања до реализације докторске дисертације кандидат је прошао кроз неколико фаза. Изабрана је тема која спада у област актуелних мултидисциплинарних истраживања са широким спектром примена. Наведена литература указује да је кандидат пажљиво прегледао и проучио све релевантне и савремене изворе из области физике гасних детектора честица, транспортне теорије ројева електрона у гасовима и експерименталне физике високих енергија. Полазећи од транспортне теорије електрона у гасовима, идентификовани су кључни проблеми у постојећим моделима гасних детектора честица попут некритичке имплементације транспортних параметара у моделима, као и квалитет транспортних и сударних података електрона у гасовима од интереса за детекторе. Развијена су и два нова модела за прорачун одзива RPC детектора. Нумеричка реализација ових модела захтевала је посебно програмерско умеће, као и примену савремених мултипроцесорских рачунарских система високих перформанси. Добијени резултати су објављени у врхунским међународним часописима и презентовани на више међународних конференција. Коначно, сама докторска дисертација је припремљена и обликована у складу са добром праксом у светској научној заједници. На основу наведеног, комисија сматра да је кандидат показао високи степен способности за самосталан научни рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОСИ

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Из бројних резултата истраживања који су приказани у дисертацији могу се издвојити следећи оригинални научни доприноси:

- За потребе анализе транспорта електрона као и за директну имплементацију у микроскопском стохастичком моделу RPC детектора, развијени су нови и тестирани стари пресеци за расејање електрона у фреону $C_2H_2F_4$ који има улогу носећег гаса у гасној смеси.
- Транспорт електрона у гасним смешама које се користе у RPC детекторима на ATLAS, ALICE и CMS експериментима у CERN-у први пут је анализиран применом егзактне *multi term* моментне методе за решавање неконзервативне Болцманове једначине. Транспортни коефицијенти су искоришћени као улазни подаци за флуидне моделе RPC детектора.
- Негативна диференцијална проводност је уочена у *bulk* компоненти брзине дрифта у гасној смеси ALICE TOF RPC детектора. Ово је прва опсервација овог феномена за електроне у литератури. Његово порекло и физичко тумачење је дискутовано помоћу просторно разложених карактеристика роја електрона добијених Монте Карло техником.

- Развијен је микроскопски стохастички модел одзива RPC детектора заснован на Монте Карло симулацији.
- Овај модел коришћен је разматрање флукуација у расту електронских лавина, као и за добијање ефикасности детекције и временске резолуције *timing* RPC детектора. Ради поређења, резултати су добијени користећи различите сетове пресека за $C_2H_2F_4$ који представља носећи гас у гасној смеси.
- Развијен је флуидни модел RPC детектора заснован на хидродинамичкој претпоставци и апроксимацији локалног електричног поља. Модел је нумерички имплементиран у 1,5 димензији и укључује доприносе дифузије електрона и фотојонизације у гасу.
- Помоћу овог модела, као и класичног флуидног модела, анализиран је развој стримера и сигнала у RPC детектору под дејством просторног наелектрисања и фотојонизације у гасу. Разматране су три различите конфигурације RPC детектора.
- На основу флуидних модела, испитивана је осетљивост параметара детектора на сударне и транспортне податке за електроне. Израчунати су параметри детектора и направљена поређења на основу транспортних коефицијената који су добијени претпостављајући четири различита сета пресека за расејање електрона у носећем гасу $C_2H_2F_4$. Посебна пажња је посвећена испитивању утицаја природе транспортних података електрона на израчунате сигнале добијене класичним флуидним моделом.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

У досадашњим моделима гасних детектора честица недовољно пажње је посвећено квалитету транспортних и сударних података електрона у гасовима, као и имплементацији ових података у моделе детектора. Један од остварених циљева дисертације јесте разматрање ових проблема са чврстих становишта транспортне теорије ројева електрона у гасовима уз примену стандардних и проверених техника које се користе у тој области. Тако је први пут *multi term* моментна метода решавања неконзервативне Болцманове једначине примењена у анализи транспорта електрона у гасовима које користе RPC детектори на ATLAS, ALICE и CMS експериментима у CERN-у. Ова напредна техника теорије ројева се, уз Монте Карло технику, стандардно примењује за нормализацију сетова пресека за расејање електрона у гасовима и даје поузданије резултате у односу на јавно доступне *two term* алате за решавање Болцманове једначине које неки аутори користе. Такође, у анализи и прорачуну транспорта електрона у гасовима за RPC детекторе, први пут су коришћени нови сетови пресека за расејање електрона у фреону $C_2H_2F_4$ који је носећи гас у већини савремених детектора овог типа. У односу на раније сетове пресека за $C_2H_2F_4$, нови сетови пресека показали су знатно боље слагање израчунатих транспортних параметара електрона са одговарајућим измереним вредностима. У оквиру дисертације, сви наведени сетови пресека су упоредно коришћени за добијање улазних података у различитим моделима како би се испитао утицај квалитета транспортних и сударних података на израчунати одзив RPC детектора. Посебно се може истаћи да је анализом транспорта електрона у гасној смеси која се користи код RPC детектора на ALICE експерименту у CERN-у, уочена негативна диференцијална проводност испољена у *bulk* компоненти брзине дрифта. Физичко тумачење овог транспортног феномена дато је на основу просторно разложених карактеристика роја електрона. Иако је раније теоријски предвиђен, овај феномен је до сада једино био примећен код транспорта позитрона у гасовима.

Развој нових, као и надоградња постојећих модела гасних детектора, такође представљају истакнуте научне доприносе дисертације. Први пут је развијен и примењен микроскопски стохастички модел одзива RPC детектора. На основу овог модела израчуната је ефикасност детекције и временска резолуција RPC детектора. Досадашњи стохастички модели ових детектора се заснивају на полуемпиријском приступу или користе Леглерову теорију раста

електронских лавина која подразумева да вероватноћа за сударну јонизацију не зависи од енергије електрона. Новим стохастичким моделом, где се Монте Карло техником прате појединачни електрони и њихови судари са гасом, избегнуте су апроксимације које користе досадашњи стохастички модели. Осим стохастичког, развијен је и први пут примењен детерминистички модел заснован на претпоставци хидродинамичког развоја фазне функције расподеле уз апроксимацију локалног електричног поља. Овај модел подразумева мањи број апроксимација у односу на постојећи класични флуидни модел. Оба флуидна модела су, ради поређења, коришћена за разматрање развоја стримера и сигнала у RPC детектору, под дејством просторног наелектрисања и фотојонизације у гасу. Такође, за разлику од досадашњих флуидних модела RPC детектора, нумеричка имплементација наведених модела укључује допринос дифузије и користи напреднију нумеричку шему базирану на централним коначним разликама другог реда у простору и Рунге-Куте 4 техници за интеграцију у времену. Резултати ових флуидних модела међусобно су упоређени, на основу чега су изведени важни закључци о утицају начина имплементације транспортних података на израчунате сигнале RPC детектора.

4.3. Верификација научних доприноса

Научни доприноси остварени у оквиру докторске дисертације објављени су у следећим публикацијама сврстаним у категорије према Правилнику о поступку, начину вредновања и квантитативном исказивању научноистраживачких резултата истраживача Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије:

Категорија M21:

D. Bošnjaković, Z.Lj. Petrović, R.D. White and S. Dujko, “*Boltzmann equation and Monte Carlo studies of electron transport in Resistive Plate Chambers*”, J. Phys. D: Appl. Phys. **47** (2014) 435203. Online ISSN: 1361-6463. (IF2014= 2.721) doi: 10.1088/0022-3727/47/43/435203

S. Dujko, **D. Bošnjaković**, R.D. White and Z.Lj. Petrović, “*Heating mechanisms for electron swarms in radio-frequency electric and magnetic fields*”, Plasma Sources Sci. Technol. **24** (2015) 054006. Online ISSN: 1361-6595. (IF2014= 3.591) doi: 10.1088/0963-0252/24/5/054006

Категорија M22:

D. Bošnjaković, Z.Lj. Petrović and S. Dujko, “*A microscopic Monte Carlo approach to modeling of Resistive Plate Chambers*”, J. Instrum. **9** (2014) P09012. Online ISSN: 1748-0221. (IF2014= 1.399) doi:10.1088/1748-0221/9/09/P09012

Категорија M31:

D. Bošnjaković, Z.Lj. Petrović and S. Dujko, “*Resistive Plate Chambers: electron transport and modeling*”, J. Phys.: Conf. Ser. **565** (2014) 012008. doi: 10.1088/1742-6596/565/1/012008

Z.Lj. Petrović, S. Marjanović, S. Dujko, A. Banković, O. Šašić, **D. Bošnjaković**, V. Stojanović, G. Malović, S. J. Buckman, G. Garcia, R. D. White, J. P. Sullivan, M. J. Brunger, “*Kinetic phenomena in transport of electrons and positrons in gases caused by the properties of scattering cross sections*”, XXVIII International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC), July 24-30 2013, Lanzhou, China, Journal of Physics: Conference Series **488** (2014) 012047. doi:10.1088/1742-6596/488/1/012047

Категорија M32:

D. Bošnjaković, Z.Lj. Petrović and S. Dujko, “*Simulation and modeling of Resistive Plate Chambers*”, Proc. 27th Symposium on Physics of Ionized Gases - SPIG 2014, Belgrade, Serbia, (26 - 29 August 2014), Contributed Papers and Abstracts of Invited Lectures, Topical Invited Lectures and Progress Reports (Eds. D. Marić, A.R. Milosavljević and Z. Mijatović), p. 21. ISBN 978-86-7762-600-6

S. Dujko, Z.Lj. Petrović, R.D. White, G. Boyle, A. Banković, I. Simonović, **D. Bošnjaković**, J. Mirić, A.H. Markosyan and S. Marjanović, *Transport processes for electrons and positrons in gases and soft-condensed matter: Basic phenomenology and applications*, XXIX International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions, 22-28 July 2015, Toledo, Spain

Z.Lj. Petrović and S. Dujko, D. Marić, **D. Bošnjaković**, S. Marjanović, J. Mirić, O. Šašić, S. Dupljanin, I. Simonović and R.D. White, *Swarms as an exact representation of weakly ionized gases*, XIX International Symposium on Electron-Molecule Collisions and Swarms & XVIII International Workshop on Low-Energy Positron and Positronium Physics, POSMOL 2015, 17-20 July 2015, Lisboa, Portugal, Book of Abstracts, p. 4

Категорија M33:

D. Bošnjaković, Z.Lj. Petrović and S. Dujko, “*Studies of electron transport in gases for Resistive Plate Chambers*”, Proc. 27th Symposium on Physics of Ionized Gases - SPIG 2014, Belgrade, Serbia, (26 - 29 August 2014), Contributed Papers and Abstracts of Invited Lectures, Topical Invited Lectures and Progress Reports (Eds. D. Marić, A.R. Milosavljević and Z. Mijatović), pp. 114-117. ISBN 978-86-7762-600-6

D. Bošnjaković, Z.Lj. Petrović and S. Dujko, “*Simulation of Resistive Plate Chambers using Monte Carlo technique*”, in Proceedings of the 9th EU-Japan Joint Symposium on Plasma Processing (JSPP2014) and EU COST MP1101 Workshop on Atmospheric Plasma Processes and Sources, 19-23 January 2014, Bohinjska Bistrica, Slovenia

D. Bošnjaković, S. Dujko and Z.Lj. Petrović, “*Electron transport coefficients in gases for Resistive Plate Chambers*”, 26th Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases, August 27-31 2012, Zrenjanin, Serbia, pp. 265-268

Категорија M34:

D. Bošnjaković, Z.Lj. Petrović and S. Dujko, *Streamer studies in gases for resistive plate chambers*, XXIX International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions, 22-28 July 2015, Toledo, Spain

D. Bošnjaković, J. Mirić, Z.Lj. Petrović and S. Dujko, *Rescaling procedures for Monte carlo simulations of electron transport in strong electronegative gases*, XIX International Symposium on Electron-Molecule Collisions and Swarms & XVIII International Workshop on Low-Energy Positron and Positronium Physics, POSMOL 2015, 17-20 July 2015, Lisboa, Portugal, Book of Abstracts, p.25

D. Bošnjaković, Z.Lj. Petrović and S. Dujko, “*Simulation of RPCs using microscopic Monte Carlo technique*”, XII workshop on Resistive Plate Chamber and Related Detectors, February 23-28 2014, Beijing, China, Book of abstracts, p. 21

D. Bošnjaković, Z.Lj. Petrović and S. Dujko, “*Electron transport phenomena in gases for RPCs*”, XII workshop on Resistive Plate Chamber and Related Detectors, February 23-28 2014, Beijing, China, Book of abstracts, p. 21

S. Dujko, **D. Bošnjaković**, J. Mirić, I. Simonović, Z.M. Raspopović, R.D. White, A.H. Markosyan, U. Ebert and Z.Lj. Petrović, “*Recent results from studies of non-equilibrium electron transport in modeling of low-temperature plasmas and particle detectors*”, in Proceedings of the 9th EU-Japan Joint Symposium on Plasma Processing (JSPP2014) and EU COST MP1101 Workshop on Atmospheric Plasma Processes and Sources, 19-23 January 2014, Bohinjska Bistrica, Slovenia

S. Dujko, Z.Lj. Petrović, R.D. White, **D. Bošnjaković**, J. Mirić, A.H. Markosyan and U. Ebert, “*Non-conservative electron transport in gases and its application in modelling of non-equilibrium plasmas and particle detectors*”, Proceedings of the XVII International Workshop on Low-Energy Positron and Positronium Physics and the XVIII International Symposium on Electron-Molecule Collisions and Swarms (POSMOL), July 19-21 2013, Kanazawa, Japan, p. 24

D. Bošnjaković, Z.Lj. Petrović and S. Dujko, “*Monte Carlo modelling of Resistive Plate Chambers*”, Proceedings of the XVII International Workshop on Low-Energy Positron and Positronium Physics and the XVIII International Symposium on Electron-Molecule Collisions and Swarms (POSMOL), July 19-21 2013, Kanazawa, Japan, p. 44

Karieropuja M64:

D. Bošnjaković, Z.Lj. Petrović and S. Dujko, “*A microscopic model for time response of Resistive Plate Chambers*”, Proceedings of the 3rd National Conference on Electronic, Atomic, Molecular and Photonic Physics (CEAMPP), August 25 2013, Belgrade, Serbia, p. 16

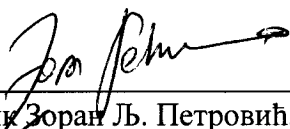
5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

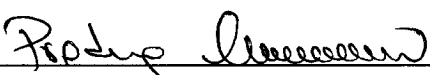
Током истраживања и рада на дисертацији кандидат је показао висок степен способности за самосталан научноистраживачки рад. Докторска дисертација садржи бројне оригиналне научне доприносе у виду нових резултата, закључака, унапређених постојећих модела, али и нових развијених модела који представљају суштинско унапређење научног знања у области моделовања гасних детектора честица високих енергија. Наведени резултати и модели објављени су у врхунским међународним часописима и приказани на угледним међународним конференцијама. Осим експерименталне физике високих енергија, резултати истраживања у оквиру дисертације имају примене у многим областима где се користе гасни детектори честица, попут нуклеарне технике, дозиметрије и заштите од зрачења, медицине, физике космичког зрачења и геофизике.

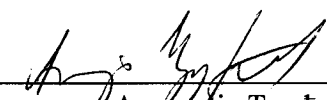
На основу изложеног, Комисија сматра да су испуњени сви суштински и сви формални услови предвиђени Законом о високом образовању и правилницима Електротехничког факултета и Универзитета у Београду. Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета да се докторска дисертација под називом „Моделовање гасних детектора честица високих енергија применом технике електронских ројева“ кандидата Данка Бошњаковића прихвати, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

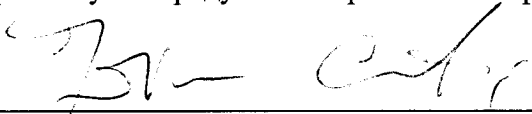
У Београду, 5. маја 2016. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ


академик Зоран Љ. Петровић, научни саветник
Универзитет у Београду – Институт за физику


др Предраг Маринковић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


академик Антоније Ђорђевић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


др Јован Цветић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


др Саша Дујко, научни саветник
Универзитет у Београду – Институт за физику