

## ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ

## ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

-обавезна садржина-свака рубрика мора бити попуњена

(сви подаци уписују се у одговарајућу рубрику, а назив и место рубрике не могу се мењати или изоставити)

I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ
<p>1. Датум и орган који је именовao комисију</p> <p>20.07.2020. године, Наставно-научно веће Универзитета у Новом Саду Природно-математичког факултета</p> <p>2. Састав комисије са назнаком имена и презимена сваког члана, звања, назива уже научне области за коју је изабран у звање, датума избора у звање и назив факултета, установе у којој је члан комисије запослен:</p> <p>1. <b>др Иштван Бикит</b>, професор емеритус, Нуклеарна физика, 13.02.2014, Универзитет у Новом Саду, <b>председник</b>;</p> <p>2. <b>др Душан Мрђа</b>, редовни професор, Нуклеарна физика, 22.12.2016, Природно-математички факултет, Универзитет у Новом Саду, <b>ментор, члан</b>;</p> <p>3. <b>др Јован Пузовић</b>, редовни професор, Физика језгра и честица, 25.10.2017, Физички факултет, Универзитет у Београду, <b>члан</b>;</p> <p>4. <b>др Кристина Бикит-Шредер</b>, доцент, Нуклеарна физика, 25.06.2020, Природно-математички факултет, Универзитет у Новом Саду, <b>члан</b>;</p> <p>5. <b>др Томас Немеш</b>, доцент, Теоријска и примењена физика, 13.11.2015, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду, <b>члан</b>.</p>
II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ
<p>1. Име, име једног родитеља, презиме:</p> <p><b>Јована, Жељко, Кнежевић</b></p> <p>2. Датум рођења, општина, држава:</p> <p>23.01.1993, Нови Сад, Република Србија</p> <p>3. Назив факултета, назив студијског програма дипломских академских студија – мастер и стечени стручни назив</p> <p>Природно-математички факултет, мастер академске студије Физика, <b>Мастер физичар</b></p> <p>4. Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија</p> <p>2017, <b>Доктор наука-физичке науке</b></p> <p>5. Назив факултета, назив магистарске тезе, научна област и датум одбране: /</p>

6. Научна област из које је стечено академско звање магистра наука: /

#### IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Докторска дисертација под називом “**Коинцидентне методе за анализу временских карактеристика нуклеарних процеса**” кандидата **Јоване Кнежевић** је написана на српском језику, ћириличним писмом. У саставном делу дисертације налази се кључна документацијска информација на српском и енглеском језику, као и план третмана података. Укупан број страница дисертације је 194, од којих садржај саме студије чини 170 страна. У дисертацији се налази 135 слика, 18 табела и 120 референци. Дисертација садржи 9 поглавља:

##### Увод (2 стране).

**I Космичко зрачење (25 страна).** Примарно космичко зрачење. Секундарно космичко зрачење. Космичко зрачење на нивоу мора. Интеракција космичког зрачења са материјом. Интеракција миона са материјом: *Миони у нискофонским гама спектрометријским мерењима.* Интеракција неутрона са материјом: *Неутронске реакције. Неутрони у нискофонским гама спектрометријским мерењима.* Временске варијације интензитета космичког зрачења.

**II Радиоактивни распад и константа распада (10 страна).** Радиоактивни распад са квантно-механичког становишта. Константа радиоактивног распада: *Мерење константе распада.* Флукуације константе распада-преглед литературе.

**III Коинцидентне технике (16 страна).** Појам правих и случајних коинциденција у гама спектрометрији. Основне коинцидентне технике: *Технике окидања у коинцидентним системима. ТАС модули. Прилагођавање кашњења. Коинцидентна крива. Подешавање кашњења осцилоскопом. Случајне коинциденције. Комбиновање селекције висине сигнала и одређивање коинциденција. Брзо-спора кола.* Електронска логичка кола: *Основна логичка кола. Булова алгебра и идентитети.* Окидачи: *Једночестично расејање. Двочестично расејање. Мерење живота миона.*

**IV Монте Карло симулације (10 страна).** Структура Geant4 програмског пакета. Geant4 физички модели и процеси. Изградња симулација: *Конструкција детектора. Дефинисање осетљивих области детектора. Избор физичких процеса. Генерисање честица космичког зрачења.*

**V Коинцидентна метода за анализу интензитета космичког зрачења посредством нискоенергијских фотона (15 страна).** Експериментална поставка. Монте Карло симулације мерног система. Варијације интензитета нискоенергијских фотона. Закључак.

**VI Коинцидентна метода за истраживање варијација константе распада радионуклеида  $^{22}\text{Na}$  (9 страна).** Експериментална поставка. Монте Карло симулације мерног система. Анализа потенцијалних флукуација константе распада. Закључак.

**VII Коинцидентна метода за временску анализу нуклеарних догађаја индукованих космичким зрачењем у гама спектрометријским мерењима (66 страна).** Коинцидентни систем HPGe детектора мале активне запремине и пластичног сцинтилационог детектора  $0,5\text{ m}\times 0,5\text{ m}\times 0,05\text{ m}$ : *Експериментална поставка. Временско раздвајање догађаја индукованих космичким мионима и неутронима. Монте Карло симулације интеракције миона са коинцидентним системом: Селекција догађаја индукованих интеракцијом космичких миона са коинцидентним системом. Резултати и дискусија. Монте Карло симулације интеракције космичких миона и неутрона са коинцидентним системом: Селекција догађаја индукованих интеракцијом космичких миона и неутрона са коинцидентним системом. Резултати и дискусија.* Коинцидентни систем HPGe детектора велике активне запремине и пластичног

сцинтилационог детектора пречника 0,2 m: *Експериментална поставка. Монте Карло симулације интеракције космичких миона и неутрона са коинцидентним системом: Селекција догађаја индукованих интеракцијом космичких миона и неутрона са коинцидентним системом. Мионска и неутронска компонента у коинцидентном спектру. Анализа електромагнетних и хадронских процеса у коинцидентном спектру. Резултати и дискусија.* Закључак.

#### **Закључци и правци даљих истраживања (4 стране).**

Након наведених поглавља налазе се Прилози (4 прилога) са укупним бројем од 5 страна, Референце 8 страна, Биографија кандидата од једне стране, Кључна документацијска информација 8 страна и План третмана података 6 страна. На почетку дисертације налази се захвалница, предговор и садржај.

### **III НАСЛОВ ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:**

Коинцидентне методе за анализу временских карактеристика нуклеарних процеса

### **V ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ:**

У оквиру девет поглавља која чине главни део дисертације уочава се да су прва четири поглавља теоријски увод који даје преглед појмова и физичких појава неопходних за разумевање спроведених истраживања. Потом следе три поглавља (V, VI и VII) која представљају експериментални део рада и рад на симулацијама и сваки део је засебна студија, а практично представљају оригинални научни рад. Поголавља V, VI и VII садрже опис експерименталних поставки, Монте Карло симулације мерних система, Резултате и дискусију, као и Закључак. На крају дисертације су дати свеобухватни закључци, који обједињују спроведене експерименте, као и правци будућих истраживања утемељених на добијеним резултатима.

#### **Наслов**

Наслов докторске дисертације је јасно дефинисан и обухвата све елементе спроведених истраживања у оквиру представљене студије.

#### **Увод**

У уводу је јасно представљена мотивација и разлог спроведених истраживања која су резултат сталног унапређивања и развоја нискофонских мерења која се спроводе у лабораторији Департамента за физику, Природно-математичког факултета, Универзитета у Новом Саду. У концизном опису је указано на садржај дисертације и свих поглавља, кроз опис спроведених експеримената и очекиваних циљева.

#### **Космичко зрачење**

У овом поглављу описано је откриће космичког зрачења, његово порекло и састав и компоненте космичког зрачења. Описана је интеракција миона и неутрона са материјом, као и присуство мионске и неутронске компоненте у спектрима детектора при извођењу нискофонских гама спектрометријских мерења. Затим су описани узроци временских варијација интензитета космичког зрачења, са прегледом доступних научних радова који су истраживали ову појаву.

#### **Радиоактивни распад и константа распада**

У поглављу је дат концизан опис појма радиоактивности, закона радиоактивног распада, као и опис радиоактивног распада са квантно-механичког становишта. Затим је описан појам

константе радиоактивног распада, и дат је преглед експерименталних метода мерења константе распада. На крају је дат преглед научних радова доступних у литератури који су истраживали феномен постојања потенцијалних флукуација константе распада, који је истраживан и у самој дисертацији. Изложени су резултати бројних истраживачких група, како оних који су детектовали флукуације константе распада, тако и оних чији је резултат била нулта хипотеза, односно одсуство флукуација константе распада.

### **Коинцидентне технике**

Поглавље Коинцидентне технике садржи опис појма правих и случајних коинциденција, као и основних коинцидентних техника. Описана су електронска логичка кола, као и Булова алгебра и идентитети. Дати су и примери неколико конкретних експеримената, којима је илустрован избор окидача (*trigger-a*) у експериментима који се заснивају на детекцији коинцидентних догађаја.

### **Монте Карло симулације**

Поглавље посвећено Монте Карло симулацијама садржи опис Монте Карло метода, као и структуре Geant4 софтверског пакета, коришћеног за извођење симулација у дисертацији. Описане су категорије, физички модели и процеси који се налазе у оквиру овог софтверског пакета. Дати су примери конструкције детектора, заштите око детектора, визуализације догађаја, као и генерисања честица космичког зрачења.

### **Коинцидентна метода за анализу интензитета космичког зрачења посредством нискоенергијских фотона**

На почетку поглавља који описује прву експерименталну студију дат је преглед тренутних система за анализу варијација интензитета космичког зрачења. Представљен је метод детекције варијација интензитета космичког зрачења праћењем интензитета нискоенергијских фотона. Наглашена је предност испитивања варијација интензитета нискоенергијских фотона, у односу на експерименте који се баве директном детекцијом флукса миона. Представљени су циљеви примене развијене коинцидентне методе: анализа варијација интензитета фонских догађаја који су резултат интеракције космичког зрачења (доминантно миона) у коинцидентном спектру HPGe детектора, као и детекција периодичног понашања интензитета космичког зрачења и, на крају, детекција аperiodичних догађаја који су последица активности Сунца (попут Форбуш ефекта). Потом је описана експериментална поставка, заснована на коинцидентном систему HPGe детектора и пластичног сцинтилационог детектора. Дат је опис карактеристика детектора, као и вредности параметара коришћених у експерименту. Описани су услови (локација, вредности атмосферског притиска, температуре, релативне влажности) у којима је спроведен експеримент. Приказани су добијени експериментални спектри. Упоредбене су вредности брзине одброја детектора у директном и коинцидентном режиму рада, као и удео случајних коинциденција ( $\approx 5\%$ ), на основу чега је валидована ефикасност развијеног коинцидентног система. Извршене су Монте Карло симулације мерног система коришћењем Geant4 симулационог пакета (верзија 10.2), користећи реалистичну енергијску и угаону расподелу космичких миона. Приказани су спектри пластичног сцинтилационог детектора, као и HPGe детектора добијени у симулацијама. Извршено је квантитативно поређење експерименталног и симулираног спектра, а добијено слагање је додатно потврдило ефикасност развијеног детекторског система. Добијени експериментални подаци су искоришћени да се испитају варијације интензитета нискоенергијских фотона. Из дводимензионалног спектра добијеног мултипараметарским системом, селектовани су региони који одговарају флуоресцентним линијама олова, анихилационој линији и региону нискоенергијских фотона (10–1220 keV). Подаци су усредњени у временске интервале од 6 h. На основу спроведене анализе, закључено је да нису нађени аperiodични догађаји (сем једног догађаја који наликују Форбуш ефекту). Увидом у одабране регионе, доказано је да образац понашања интензитета нискоенергијских фотона није исти у свим енергијским регионима, те да је оваква детаљна анализа потребна у случајевима када се трага за сигналом неког ретког

догађаја, јер у таквим случајевима пораст интензитета фотона који су индуковани космичким зрачењем у интервалу енергија у ком се налази и тражени сигнал, може да доведе до имитације или маскирања сигнала. Додатно је спроведена Фурије и Ломб-Скаргл анализа на сировим експерименталним подацима. Ломб-Скаргл периодограм није показао значајну периодичност на нивоу значајности од  $\alpha=0,05$  током 42 дана колико је трајало експериментално прикупљање података.

### **Коинцидентна метода за истраживање варијација константе распада радиоизотопа $^{22}\text{Na}$**

На самом почетку изнета је важност испитивања потенцијалних флукуација константе распада. Потом су описане карактеристике испитиваног радиоизотопа  $^{22}\text{Na}$ , као и начин продукције анихилационих фотона који се региструју коинцидентним системом. Дат је кратак преглед метода и детекционих система из научних радова који су истраживали исти радиоизотоп. Описана је експериментална поставка, као и карактеристике коришћених детектора. Праћене су вредности спољашњих параметара (атмосферског притиска, температуре и релативне влажности) током времена аквизиције података. Спроведена је и анализа доприноса космичког зрачења анихилационој линији детектованој у спектру. Приказан је добијени коинцидентни спектар HPGe детектора. Из прикупљених сирових података одређен је период полураспада радиоизотопа  $^{22}\text{Na}$  и добијено је добро слагање са вредностима доступним у литератури. Додатно су спроведене Монте Карло симулације мерног система коришћењем Geant4 симулационог пакета (верзија 10.2). Експериментални спектар је упоређен са спектром добијеним у симулацијама, при чему је добијено значајно добро слагање. Реалистични подаци о радиоизотопу  $^{22}\text{Na}$  су узети из база података ENDSF, која садржи податке о периоду полураспада радиоизотопа, врсти распада, гранама распада и њиховим вероватноћама, емисионим енергијама и типовима прелаза. Експериментални спектар је упоређен са симулираним и добијено је значајно добро слагање. Извршена је анализа потенцијалних флукуација константе распада, применом Фурије и Ломб-Скаргл анализе. Резултат је показао одсуство значајних периодичних фреквенција, на нивоу поверења од  $\alpha=0,005$  током 33 дана експерименталног мерења.

### **Коинцидентна метода за временску анализу нуклеарних догађаја индукованих космичким зрачењем у гама спектрометријским мерењима**

У уводном делу последњег поглавља који се тиче експерименталног дела дисертације описана је проблематика фонских догађаја који су резултат интеракције космичких миона и неутрона у спектрима HPGe детектора. Истакнуто је да догађаји који су резултат узмака језгра, које је претходно интераговало са неутроном, припадају истом региону енергија као и догађаји који би одговарали интеракцији хипотетичких честица тамне материје (*WIMP*-ова) са детектором. Описана је могућност раздвајања догађаја према времену одигравања. Истакнута је могућност коришћења Монте Карло симулација приликом конструкције пасивних и активних заштита детектора, нарочито у експериментима чији је циљ детекција ретких нуклеарних догађаја. Извршене су Монте Карло симулације коришћењем симулационог пакета Geant4 (верзије 4.9.5). По први пут је добијена временска крива у симулацијама коинцидентног система пластичног сцинтилационог детектора и GMX детектора (мале активне запремине), као и пластичног сцинтилационог детектора и HPGe детектора велике активне запремине. Селекцијом различитих временских региона добијене симулационе криве, извршена је детаљна анализа процеса индукованих космичким мионима и неутронима. Приказани су спектри добијени селекцијом различитих временских региона, као и интензитети одабраних енергијских региона. Извршена је анализа доприноса миона и неутрона укупном фонском коинцидентном спектру HPGe детектора. Анализирани су електромагнетни и хадронски процеси детектовани у коинцидентном спектру HPGe детектора. Закључено је да је допринос миона неутронским линијама, као и континууму до 100 keV, релативно мали, стога је добијено да су ови процеси доминантно резултат интеракције самих космичких неутрона са кристалом германијума. У снимљеном експерименталном 2D спектру, селектован је регион који одговара мионском пику у спектру пластичног сцинтилационог детектора, за који је у симулацијама

утврђено да је допринос неутрона веома мали, те је на основу добијених података процењен укупни ефективни ефикасни пресек за интеракцију миона са конкретним детекторским системом представљеним у експерименту, коришћењем интензитета неутронске линије ( $(n,n')$  линија) на 595,9 keV детектоване у коинцидентном спектру. Добијена вредност ефикасног пресека до неколико  $mbarn$ -а указује на мале вероватноће продукције неутрона од стране миона у пасивној заштити детекторског система.

### Закључци и правци даљих истраживања

У оквиру овог поглавља дати су закључци који произлазе из све три спроведене студије, који указују на главне доприносе докторске дисертације. Разматране су могућности за даља истраживања и примене добијених резултата.

### Прилози

У оквиру поглавља Прилози налазе се четири прилога у којима су дати примери задавања генерисања догађаја и конструкције објеката у Geant4 симулационом софтверском пакету.

### Референце

Наведена су 120 литературна навода, нумерисана бројевима по реду појављивања у тексту.

Комисија је детаљном анализом извештаја тестирања на плагијаризам, који је урађен применом софтвера *iThenticate* (квантитативно добијена вредност од 3%), и увидом у докторску дисертацију кандидата, закључила да је дисертација кандидата Јоване Кнежевић оригинално научно дело.

**На основу изложеног, Комисија је позитивно оценила све делове докторске дисертације.**

## VI СПИСАК НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КОЈИ СУ ОБЈАВЉЕНИ ИЛИ ПРИХВАЋЕНИ ЗА ОБЈАВЉИВАЊЕ НА ОСНОВУ РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА У ОКВИРУ РАДА НА ДОКТОРСКОЈ ДИСЕРТАЦИЈИ

Рад у истакнутом међународном часопису (M22 категорија):

**J. Knezevic**, D. Mrdja, K. Bikit-Schroeder, J. Hansman, I. Bikit, J. Slivka. *Search for variations of  $^{22}Na$  decay constant*, Applied Radiation and Isotopes **163** (2020), p. 109178. doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109178.

**J. Knezevic**, D. Mrdja, K. Bikit, I. Bikit, J. Hansman, J. Slivka, S. Forkapic. *Simple coincidence technique for cosmic-ray intensity exploration via low-energy photon detection*, Applied Radiation and Isotopes **151** (2019), p. 157–165. doi.org/10.1016/j.apradiso.2019.06.009.

Саопштење са међународног скупа штампано у целини (M33 категорија):

**J. Knežević**, P. Kuzmanović. *Coincidence technique for intensity time variation analysis of low-energy photons*, Proceedings 12th scientific conference Students encountering science–StES Natural Sciences Research in Natural Sciences, Banja Luka, Republic of Srpska (2019), p. 55–70. doi 10.7251/STESPN1219055K.

## VII ЗАКЉУЧЦИ ОДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

На основу спроведених истраживања и анализе добијених експерименталних резултата и

результата добијених применом Монте Карло симулација, добијени су следећи закључци:

Примењена коинцидентна метода која се заснивала на HPGe детектору и пластичном сцинтилационом детектору укључује детекцију нискоенергијских фотона космичког порекла, која поред анализе временских варијација интензитета космичког зрачења, омогућава и анализе могућих периодичних понашања и појединачних аperiodичних догађаја. Показано је да се селекцијом одређених региона у прикупљеним спектрима омогућава бољи увид у понашање енергијских региона, који је значајан пре свега за анализу фонских догађаја при детекцији догађаја са малом вероватноћом одвијања. Извршена је и анализа периодичности понашања интензитета космичког зрачења, као и детекције потенцијалних аperiodичних догађаја. У циљу валидације коришћеног експерименталног система, извршене су Монте Карло симулације. Добра слагања експерименталног и симулираног спектра потврдила су ефикасност развијеног коинцидентног система. У оквиру времена аквизиције података у трајању од 42 дана, нису нађени статистички значајни аperiodични догађаји (сем једног догађаја који наликује Форбуш ефекту), нити значајна периодичност анализираних података. Циљ студије је био представљање методе корисне за истраживања фонских варијација интензитета нискоенергијских фотона, чији утицај на енергијске регионе од интереса не може бити занемарен у случају експеримената који трагају за ретким догађајима, или потенцијалним малим девијацијама закона радиоактивног распада. Стога, аквизиција података о фонским догађајима и анализа која је приказана у овој студији би требало да буду предуслов који би морао да буде испуњен при извођењу свих будућих експеримената чији је циљ детекција догађаја са малом вероватноћом одигравања и њихових потенцијалних варијација.

Пратећи актуелну област нуклеарне физике и астрофизике, развијен је коинцидентни систем који се базирао на HPGe детектору и пластичном сцинтилационом детектору, при чему су временски праћени одброји анихилационе линије, која настаје као резултат анихилације позитрона добијеног  $\beta^+$ -распадом испитиваног радиоизотопа  $^{22}\text{Na}$ . За разлику од осталих експеримената, представљених у доступној литератури, који су истраживали флукуације константе распада, овај експеримент је био специјално дизајниран и посвећен праћењу временских флукуација константе распада. Посебна пажња је посвећена анализи фонских догађаја у коинцидентном спектру, како би се искључио евентуални допринос варијација интензитета космичког зрачења на анализирану анихилациону линију. Додатно су праћени спољашњи параметри (атмосферска температура, притисак и релативна влажност), као и стабилност извора високог напона, како би се елиминисао потенцијални утицај и ових фактора на експерименталне резултате. Извршено је поређење експерименталног коинцидентног спектра са спектром добијеним Монте Карло симулацијама, при чему су добијена веома добра слагања. Примењена Ломб-Скаргл анализа на експерименталним подацима није открила периодично понашање, тј. значајне фреквенције на нивоу поверења од  $\alpha=0,005$  константе распада  $^{22}\text{Na}$ . Одсуство детекције флукуација у великој мери доприноси резултатима осталих научно-истраживачких група у оквиру ове, још увек актуелне, тематике у научној заједници.

Трећи део студије садржи примену коинцидентне методе за временску анализу нуклеарних процеса, како у HPGe детектору мале активне запремине, тако и у HPGe детектору велике активне запремине. Експериментално добијена временска крива је по први пут упоређена са временском кривом добијеном у симулацијама. Детаљном селекцијом различитих региона показано је да се интензитети одређених региона од интереса значајно мењају са променом временских интервала, те се одговарајућим одабиром коинцидентних интервала може постићи значајније истицање енергијских региона или линија од интереса у коинцидентном режиму рада детектора, или пак одбацивање фонских догађаја индукованих космичким мионима и неутронима у антикоинцидентном режиму рада. Показано је да је анализу временске криве добијене како у експерименту, тако и у симулацијама корисно спровести приликом дефинисања коинцидентних интервала детектора, како би се на што бољи начин смањило допринос нежељених фонских догађаја у добијеним спектрима.

Селекцијом различитих региона временске криве добијене у симулацијама, извршена је детаљна анализа временског одигравања фонских догађаја индукованих космичким мионима и неутронима у непосредној околини детекторског система. На основу симулационих резултата, закључено је да се фонски догађаји у коинцидентном спектру HPGe детектора могу раздвојити у две велике групе догађаја—брзе (*delayed*) и споре (*prompt*), што је у сагласности са експерименталним резултатом добијеним у референцама наведеним у раду. У брзе догађаје

сврставају се догађаји који су резултат директне интеракције миона са коинцидентним системом, као и догађаји који доприносе нискоенергијском делу, а који могу настати услед интеракције миона са оловном заштитом (без првобитне интеракције са пластичним сцинтилационим детектором). Пик директне депозиције енергије миона се појављује у временским интервалима који одговарају почетку пика временске криве, односно брзим догађајима, а припадају високоенергијском делу спектра. Анихилациона линија се појављује у групи догађаја који се налазе на почетку и крају пика временске криве, док сам пик временске криве карактерише одсуство анихилационе линије.

У споре догађаје се сврставају догађаји индуковани секундарним честицама произведених интеракцијама космичких миона, као и неутрона са детекторским системом. Анализом временске криве добијене у симулацијама, закључено је да су неутронске линије и нискоенергијски континуум до 100 keV, у спектру HPGe детектора, закаснили догађаји у групи спорих догађаја. Детаљном анализом региона који одговарају селекцији закаснелих догађаја, добијене су значајније изражене неутронске линије, при чему се испоставља да су у одговарајућем региону, анихилациона линија, као и пик директно депоноване енергије миона, слабо изражени. Истовремено се уочава значајно повећање одброја континуума највећим делом услед појаве компоненте нискоенергијског дела спектра до 100 keV.

На основу Монте Карло симулација, процењен је удео неутронске компоненте у коинцидентном спектру HPGe детектора, као и у директном спектру пластичног сцинтилационог детектора.

Детаљном анализом различитих региона временске криве добијене у симулацијама, закључено је да се неутронима индуковани догађаји, који су последица узмака језгра и махом припадају енергијском региону до 100 keV у спектру HPGe детектора, у постављеној геометрији детекторског система, налазе у временском региону  $>10 \mu\text{s}$ . У укупном спектру HPGe детектора добијеном у симулацијама, удео неутронске компоненте у овом региону енергија је  $\approx 88\%$ . У експериментима који трагају за хипотетичким честицама тамне материје (*WIMP*-овима), очекивани сигнали су управо у овом региону енергија, те је у оваквим експериментима значајно извршити одбацивање догађаја индукованих неутронима, који би могли да маскирају или имитирају очекиване сигнале.

На основу резултата Монте Карло симулација, извршена је анализа електромагнетних и хадронских процеса детектованих HPGe детектором велике активне запремине. Разноврсност и бројност догађаја указују на комплексност процеса који доприносе фонском спектру HPGe детектора у коинцидентном режиму рада. Међу електромагнетним процесима, најбројнији су јонизација које врши миони, потом електрони, а затим и фотоелектрични ефекат, Комптонов ефекат и заочно зрачење електрона, који доприносе нискоенергијском континууму (доминантно у региону до анихилационе линије). Међу хадронским процесима, најдоминантнија су нееластична расејања неутрона, као и еластична расејања хадрона која се највише одвијају на изотопу германијума  $^{74}\text{Ge}$ .

**На основу изложених закључака, Комисија је позитивно оценила закључке, односно резултате истраживања представљене у дисертацији.**

## **VIII ОЦЕНА НАЧИНА ПРИКАЗА И ТУМАЧЕЊА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА**

Докторска дисертација ‘‘Коинцидентне методе за анализу временских карактеристика нуклеарних процеса’’ кандидата Јоване Кнежевић садржи све неопходне делове састава докторске дисертације у оквиру којих су представљени разлози и циљеви истраживања, спроведени експерименти, анализа и дискусија резултата, као и одговарајући закључци и правци будућих истраживања. Извршена је детаљна анализа доступне литературе, као и новијих публикација. Спроведена истраживања су резултат добро промишљених и припремљених експеримената, при чему је вођено рачуна о условима у којима су се експерименти спроводили. Добијени подаци су обрађени одговарајућим софтверским програмима. Резултати су приказани на концизан начин, у виду слика и табела, при чему је изложена и одговарајућа дискусија и образложење добијених резултата.



На основу изложеног, Комисија је у потпуности позитивно оценила начин приказа и тумачења резултата истраживања.

**IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:**

1. Да ли је дисертација написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме

**Комисија сматра да је докторска дисертација кандидата Јоване Кнежевић написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме.**

2. Да ли дисертација садржи све битне елементе

**Комисија сматра да дисертација садржи све битне елементе.**

3. По чему је дисертација оригиналан допринос науци

Докторска дисертација својим садржајем доприноси развоју и унапређењу коинцидентних метода које се користе у нискофонским гама спектрометријским мерењима. Применом развијених и представљених метода могуће је допринети значајном смањењу фонских догађаја у коинцидентном спектру HPGe детектору, што је од нарочитог значаја при извођењу експеримената чији је циљ детекција ретких нуклеарних процеса, односно догађаја са малом вероватноћом одвијања. Развијене су иновативне методе коинцидентне детекције, једна метода за детекцију варијација интензитета космичког зрачења посредством нискоенергијских фотона индукованих космичким зрачењем у околини детекторског система, и друга метода за детекцију потенцијалних флукуација константе радиоизотопа  $^{22}\text{Na}$ . Обе методе обухватају примене у модерним и актуелним пољима истраживања у нуклеарној и честичној физици, а резултати добијени у дисертацији значајно доприносе резултатима осталих научно-истраживачких група у актуелној области, у прилог чему иду објављени радови у истакнутим међународним часописима, проистекли из дисертације. Надаље, извршене су Монте Карло симулације коинцидентног система HPGe детектора мале и велике активне запремине и пластичног сцинтилационог детектора и по први пут је добијена симулациона временска крива догађаја индукованих космичким мионима и неутронима у кристалу германијумског детектора и у околини детекторског система. Детаљном анализом различитих региона симулационе временске криве, омогућено је временско раздвајање догађаја, које је значајно при одабиру коинцидентних интервала.

Добијени резултати отварају широке могућности примене развијених коинцидентних метода у експериментима чији је циљ истраживање ретких нуклеарних процеса. Даљи правци истраживања, утемељени на представљеним резултатима, могу укључивати детекцију аперидичних догађаја који су резултат активности Сунца (попут Форбуш ефекта), затим анализе флукуација константе распада других радиоизотопа или потрагу за честицама тамне материје (*WIMP*-овима). Развијањем Монте Карло симулација отворен је пут за даље студије фонских догађаја индукованих космичким зрачењем у спектрима HPGe детектора.

4. Недостаци дисертације и њихов утицај на резултат истраживања

Увидом у докторску дисертацију “Коицидентне методе за анализу временских карактеристика нуклеарних процеса” кандидата Јоване Кнежевић и детаљним прегледом свих резултата, **Комисија није уочила недостатке** који би утицали на резултате и закључке рада. Комисија оцењује да је докторска дисертација написана у складу са постављеним циљевима, да су одабране адекватне методе, да су резултати јасни и применљиви, а дискусија у складу са добијеним резултатима.

**X ПРЕДЛОГ:**

На основу укупне оцене дисертације, комисија предлаже:

На основу укупне оцене дисертације и увида у научно-истраживачки рад кандидата, Комисија сматра да се докторска дисертација под насловом “Коинцидентне методе за анализу временских карактеристика нуклеарних процеса” прихвати, а кандидату Јовани Кнежевић одобри одбрана исте.

НАВЕСТИ ИМЕ И ЗВАЊЕ ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ  
ПОТПИСИ ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ

---

др Иштван Бикит,  
професор емеритус  
Универзитета у Новом Саду

---

др Јован Пузовић,  
редовни професор Физичког факултета,  
Универзитета у Београду

---

др Томас Немеш,  
доцент Факултета техничких наука,  
Универзитета у Новом Саду

---

др Кристина Бикит-Шредер,  
доцент Природно-математичког факултета,  
Универзитета у Новом Саду

---

др Душан Мрђа,  
редовни професор Природно-математичког-  
факултета, Универзитета у Новом Саду

НАПОМЕНА: Члан комисије који не жели да потпише извештај јер се не слаже са мишљењем већине чланова комисије, дужан је да унесе у извештај образложење односно разлоге због којих не жели да потпише извештај.