

## ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ

## ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ 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)

<b>I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ</b>
<p>1. Датум и орган који је именовао комисију 16. јул 2015., Наставно-научно веће Природно-математичког факултета Универзитета у Новом Саду</p> <p>2. Састав комисије са знаком 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> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Проф. др Миодраг Крмар, редовни професор, нуклеарна физика, датум избора у звање 1.10.2012., Универзитет у Новом Саду, Природно-математички факултет, Депарتمان за физику, председник</li> <li>• Проф. др Наташа Тодоровић, ванредни професор, нуклеарна физика, датум избора у звање 1.7.2010., Универзитет у Новом Саду, Природно-математички факултет, Депарتمان за физику, ментор</li> <li>• Проф. др Уранија Козмидис-Лубурић, редовни професор, физика, датум избора у звање 1.4.2000., Универзитет у Новом Саду, Факултет Техничких наука, члан</li> <li>• Др Инес Крајцар Бронић, научни саветник, физика, датум избора у звање 15.7.2004., Институт Руђер Бошковић, Загреб, Хрватска, члан</li> </ul>
<b>II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ</b>
<p>1. Име, име једног родитеља, презиме: Ивана (Јован) Стојковић</p> <p>2. Датум рођења, општина, држава: 28. јануар, 1988., Кикинда, Србија</p> <p>3. Назив факултета, назив студијског програма дипломских академских студија – мастер и стечени стручни назив Природно-математички факултет, Мастер академске студије – физика (модул – истраживачки, усмерење – нуклеарна физика), Мастер физичар</p> <p>4. Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија: 2012., Докторске академске студије, Доктор наука – физичке науке</p> <p>5. Назив факултета, назив магистарске тезе, научна област и датум одбране: -</p> <p>6. Научна област из које је стечено академско звање магистра наука: -</p>
<b>III НАСЛОВ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:</b>
<b>Оптимизација течног сцинтилационог спектрометра за испитивање алфа и бета емитера у водама</b>

#### **IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:**

Навести кратак садржај са знаком броја страна, поглавља, слика, шема, графикона и сл.

Докторска дисертација има 205 страна, састоји се из шест поглавља, укупно има 57 табела и 105 слика.

Текст дисертације је организован по следећим поглављима:

Увод

1. Мониторинг радионуклида у хидросфери и у пијаћим водама
2. Технике течне сцинтилационе спектрометрије
3. Одређивање укупне алфа/бета активности у водама – резултати и дискусија
4. Одређивање садржаја трицијума у води
5. Мерење концентрације активности  $^{222}\text{Rn}$  у води
6. Одређивање садржаја  $^{90}\text{Sr}$  у води

Закључна разматрања и правци даљих истраживања

Литература

Поред Уводног дела, у дисертацији су приказани основни принципи техника течне сцинтилационе спектроскопије, објашњен је принцип детекције на течним сцинтилационим детекторима, приказани су поступци и резултати који су добијени приликом оптимизације метода и детекторског система Quantulus 1220<sup>TM</sup> при испитивању алфа и бета емитера у водама, објашњени су процеси који ометају LSC детекцију. Извршена је оптимизација детекторског система и метода за испитивање укупне алфа/бета активности,  $^3\text{H}$ ,  $^{222}\text{Rn}$  и  $^{90}\text{Sr}$ . Описани су поступци калибрације система, утицај релевантних параметара и подешавање њихових оптималних вредности.

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

- Докторска дисертација приказује оптимизацију детекторског система Quantulus 1220<sup>TM</sup> за испитивање алфа и бета емитера у водама. Значај дисертације се огледа у чињеници да су први пут на Катедри за нуклеарну физику развијене методе за испитивање алфа и бета емитера у водама и прилагођен је детекторски систем за оваква мерења. Развијене су брзе методе припреме узорак и мерења које су нарочито значајна при акциденталним ситуацијама. Потврда оригиналности и ваљаности дисертације и њеног значаја за академску и научну заједницу су објављени научни радови који су урађени у оквиру рада на докторској дисертацији: једно поглавље у монографији међународног значаја (M13), пет научних радова (четири категорије M21 и један категорије M22) у врхунским међународним часописима, као и учешће на међународним конференцијама.
- У првом поглављу дат је преглед природних и вештачких радиоизотопа у животној средини и ризици по популацију, разматрана је миграција радионуклида у екосистемима, као и потреба за мониторингом радиоактивности вода у окружењу.
  - У другом поглављу описане су технике течне сцинтилационе спектроскопије, физика сцинтилационих процеса у органским сцинтилаторима (интеракција јонизујућег зрачења са материјом, енергетски трансфер у течним сцинтилаторима, флуоресценција, сцинтилациони процеси у коктелима), описане су карактеристике детекторских система који као детекторе јонизујућег зрачења користе течне сцинтилаторе, разматрани су процеси који смањују ефикасност детекције у течним сцинтилационим детекторима, као и методе којима се они могу смањити, кориговати или потпуно елиминисати. Нарочита пажња је посвећена феноменима хемијског и обојеног пригушења као и методима њихове квантификације и корекције. Објашњени су уопштени поступци оптимизације детекторских система, са посебним освртом на течни сцинтилациони спектрометар Quantulus 1220<sup>TM</sup> који се користио као детекторски систем у докторској дисертацији и чија је оптимизација извршена.
- Треће поглавље се бави проблематиком оптимизације система и мерења укупне алфа и бета активности у водама, испитивана је зависност оптималног подешавања дискриминатора облика импулса у зависности од особина радиоизотопа који су коришћени за калибрацију детекторског система (енергија и активност), избора сцинтилационих

коктели и мерних бочица, као и типа и нивоа пригушења у мереном узорку. Урађена је корекција на обојено пригушење као додаток стандардној методи по којој се узорак припрема и анализира, што је један од оригиналних доприноса ове дисертације.

- Оптимизација методе и детекторског система за одређивање трицијума  $^3\text{H}$  у водама приказана је у четвртом поглављу, и она обухвата избор мерне конфигурације система, мерних бочица и сцинтилационог коктеља, оптималног запреминског односа узорак/коктељ, времена мерења и постигнуте границе детекције, као и методе корекције пригушења. Оригиналан допринос докторске дисертације је развој брзе методе за одређивање  $^3\text{H}$ , као и корекције на хемијско и обојено пригушење.
- Оптимизација методе и детекторског система за одређивање радиоактивног изотопа радона  $^{222}\text{Rn}$  дискутована је у петом поглављу. Поред испитивања утицаја коктеља, мерних бочица, оптималног запреминског односа узорак/коктељ и нивоа пригушења на валидност резултата мерења, посебно је истражен утицај поставке PSA параметра на калибрацију система и вредности одређивања  $^{222}\text{Rn}$  у водама. Валидација и евалуација методе извршена је упоредним мерењима узорака вода на течном сцинтилационом спектрометру и алфа спектрометру RAD7. Оригиналан допринос је закључак је да приликом калибрације система за одређивање  $^{222}\text{Rn}$  на течном сцинтилационом спектрометру није потребно пратити промену вредности PSA у функцији од ефикасности детекције, већ је потребно само фиксирати PSA у току калибрације и мерења узорака. Такође је показано да су добијене две калибрационе CF(PSA) криве, које су много адекватније од једне универзалне CF(PSA) криве, што стоји у стандардној методи.
- У шестом поглављу описана је оптимизација методе и детектора за одређивање  $^{90}\text{Sr}$  у водама детекцијом Черенковљевог зрачења. Приказани су резултати експеримената којима је калибрисан систем и одређена ефикасност детекције, утицај мерних бочица и времена мерења на границу детекције. Разматран је проблем обојеног пригушења и представљен метод корекције, као и домет његове примене у јако пригушеним узорцима. Валидација методе извршена је учешћем на међународној интеркомпарацији коју је организовала Међународна Агенција за атомску енергију (IAEA) на којој су добијени прихватљиви резултати за одређивање  $^{90}\text{Sr}$  у водама. Оригиналан допринос дисертације је развој брзе методе погодне за одређивање  $^{90}\text{Sr}$  при радијационим акцидентима, када је потребно добити валидан резултат за кратко време.
- У седмом поглављу изведени су закључци докторске дисертације са напоменом о доприносу дисертације и могућностима практичне примене добијених резултата, уз назначене правце даљег истраживања.
- На крају је дат списак коришћене литературе са 160 наслова.

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

Таксативно навести називе радова, где и када су објављени. Прво навести најмање један рад објављен или прихваћен за објављивање у часопису са ISI листе односно са листе министарства надлежног за науку када су у питању друштвено-хуманистичке науке или радове који могу заменити овај услов до 01. јануара 2012. године. У случају радова прихваћених за објављивање, таксативно навести називе радова, где и када ће бити објављени и приложити потврду о томе.

### Листа публикација које су објављене на основу резултата истраживања у оквиру рада на докторској дисертацији:

1. **Stojković I.**, Tenjović B., Nikolov J., Todorović N. (2015) Radionuclide, scintillation cocktail and chemical/color quench influence on discriminator setting in gross alpha/beta measurements by LSC, Journal of Environmental Radioactivity 144: 41-46, **M21**
2. **Stojković I.**, Tenjović B., Nikolov J., Vesković M., Mrđa D., Todorović N. (2015) Improvement of measuring methods and instrumentation concerning  $^{222}\text{Rn}$  determination in drinking waters – RAD7 and LSC technique comparison, Applied Radiation and Isotopes 98:117-124, **M21**
3. Todorović N., **Jakonić I.**, Nikolov J., Hansman J., Vesković M. (2014) Establishment of a method for

222Rn determination in water by low-level liquid scintillation counter, Radiation Protection and Dosimetry, 162(1-2): 110-114, **M22**

**4. Jakonić I.**, Nikolov J., Todorović N., Tenjović B., Vesković M. (2014) Study on quench effects in liquid scintillation counting during tritium measurements, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 302: 253-259, **M21**

**5. Jakonić I.**, Todorović N., Nikolov J., Krajcar Bronić I., Tenjović B., Vesković M. (2014) Optimization of low-level LS counter Quantulus 1220 for tritium determination in water samples, Radiation Physics and Chemistry 98:69-76, **M21**

**6.** Todorović N., Nikolov J., Petrović Pantić T., Kovačević J., **Stojković I.**, Krmar M. (2015) Radon in Water - Hydrogeology and Health Implication (Eds: Audrey M. Stacks), ISBN: 978-1-63463-742-8, **M13**

**7. Stojković I.**, Todorović N., Nikolov J., Krajcar Bronić I., Borković D., Barešić J., Sironić A. (2015) Optimization of 90Sr screening method in waters via Cherenkov radiation, HDZZ Zbornik radova desetog simpozija hrvatskog društva za zaštitu od zračenja (eds. Petrincec B., Bituh T., Milić M., Kopjar N.), p. 372-377, ISSN 1849-5060, Zagreb 2015, **M33**

**8.** Todorović N., **Stojković I.**, Nikolov J., Tenjović B. (2015) 222Rn determination in drinking waters - RAD7 and LSC technique comparison, HDZZ Zbornik radova desetog simpozija hrvatskog društva za zaštitu od zračenja (eds. Petrincec B., Bituh T., Milić M., Kopjar N.), p. 378-383, ISSN 1849-5060, Zagreb 2015, **M33**

**9. Jakonić I.**, Nikolov J., Todorović N., Tenjović B., Bikit I. (2014) Quench effects in tritium measurements by liquid scintillation counting, The 2nd International Conference on Radiation and Dosimetry in Various Fields of Research (RAD 2014), RAD2014 Book of Abstracts, p. 251, Niš, Serbia, May 27-30, 2014, **M34**

**10. Jakonić I.**, Todorović N., Nikolov J., Krajcar Bronić I., Tenjović B., Vesković M. (2014) Rapid method for tritium measurements with liquid scintillation counting on Quantulus 1220, The 2nd International Conference on Radiation and Dosimetry in Various Fields of Research (RAD 2014), RAD2014 Book of Abstracts, p. 212, Niš, Serbia, May 27-30, 2014, **M34**

**11.** Nikolov J., Todorović N., **Jakonić I.**, Bikit I., Vesković M. (2014) Determination of 222Rn in water by low-level liquid scintillation counter, The 2nd East European Radon Symposium (SEERAS), RN SEERAS Book of Abstracts, p. 97, Niš, Serbia, May 27-30, 2014, **M34**

## **VII ЗАКЉУЧЦИ ОДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА**

У дисертацији је извршена оптимизација детекторског система и метода за одређивање појединачних радионуклида  $^3\text{H}$ ,  $^{222}\text{Rn}$  и  $^{90}\text{Sr}$  и укупне алфа/бета активности у водама. Описани су поступци калибрације система, утицај релевантних параметара на резултате одређивања активности алфа и бета емитера, и подешавања оптималних вредности ових параметара. Посебна пажња је посвећена испитивању ефеката пригушења у узорцима и методама њихове корекције. Извршена је оптимизација при подешавању дискриминатора на детекторском систему Quantulus 1220<sup>TM</sup>, односно подешавању анализатора облика импулса на оптималну вредност, у сврху оптималног раздвајања алфа од бета догађаја. На основу добијених резултата истраживања изведени су следећи закључци:

- Оптимизација методе за одређивање укупне алфа/бета активности обухватила је калибрацију система, испитивање оптималне вредности PSA параметра који раздваја алфа од бета догађаја, као и утицај релевантних параметара на његову вредност. Најтачнији резултати су добијени уколико се калибрација и поставка оптималне PSA вредности врши на енергијама оних радионуклида и при нивоу пригушења који су присутни и у реалним узорцима, што је веома тешко спровести у пракси. Посебна пажња је посвећена зависности фактора мискласификације од нивоа пригушења и енергија испитиваних радиоизотопа. Извршена је серија експеримената у сврху истраживања утицаја пригушења на резултате мерења и као закључак предложене су две методе корекције: 1. корекција оптималног PSA параметра и 2. корекција одброја у зависности од SQP(E) индикатора нивоа пригушења. Метод примене функције корекције одброја од SQP(E) параметра показао се ефикаснијим, сем у случају јако пригушених узорака када се не може у потпуности кориговати привидан пораст у бета одброју у случају значајне алфа активности у узорку. Предложена оптимизована метода је валидована учешћем на међународној интеркомпарацији која је организована од стране Међународне Агенције за атомску

- енергију (IAEA) на којој су добијени резултати одређивања укупне алфа/бета активности у два узорка воде оцењени са А (Acceptable) – прихваћени као тачни и прецизни.
- У дисертацији су оптимизоване две методе за одређивање нискоенергијског бета емитера трицијума ( $^3\text{H}$ ) у водама. Обе методе су брзе, ефикасне и једноставне, што је нарочито важно у случају радијационог акцидента, када је потребно брзо одредити садржај трицијума у узорцима воде. Закључено је да избор сцинтилационог коктела, као и мерних бочица може имати значајан утицај на резултат мерења, на одброј позадинског зрачења, ефикасност детекције и FOM (Figure of Merit) фактор. Оригинални допринос се огледа у развоју и оптимизацији брзе директне методе одређивања  $^3\text{H}$  у водама. Предложене оптимизоване методе су валидоване међулабораторијским поређењем са Лабораторијом за мерење ниских радиоактивности са Института Руђер Бошковић у Загребу, која је међународно призната лабораторија за испитивање садржаја  $^3\text{H}$  у узорцима воде.
  - Оптимизована метода за одређивање алфа емитера радона  $^{222}\text{Rn}$  у водама састоји се од мешања узорка са сцинтилационим коктелом у стакленим мерним бочицама. Закључено је да могућност дискриминације алфа од бета догађаја у течном сцинтилационом бројачу Quantulus 1220<sup>TM</sup> осигурава поуздану и тачну мерења. Предложена модификација методе састоји се у примени две калибрационе криве зависности калибрационог фактора од вредности PSA параметра. Такође је закључено да је добијена вредност за мерну несигурност адекватнија уколико се у рачун узму у обзир мерне несигурности варијабли који фигуришу у изразу за концентрацију активности, у односу на предложен израз у стандардој EPA методе.
  - Развијена је брза метода одређивања радиоактивног бета емитера  $^{90}\text{Sr}$  детекцијом Черенковљевог зрачења. Основна предност методе јесте брзина добијања резултата испитивања, која нарочито погодује акциденталним ситуацијама. Поузданост методе је потврђена учествовањем на међународној интеркомпарацији која је организована од стране Међународне Агенције за атомску енергију (IAEA) и на којој су добијени прихватљиви резултати. Решење проблема корекције обојеног пригушења је предложено применом SCR методе, чија је ефикасност проверена у експериментима на пригушеним спајкованим узорцима. Закључено је да проблем корекције обојеног пригушења SCR методом ефикасно коригује обојено пригушење, осим код јако пригушених узорака где се добијају одступања до 20% од реалних вредности.
  - На основу добијених резултата експеримената који су извршени ради оптимизације детекторског система и метода испитивања алфа и бета емитера у водама, може се закључити да предложене методе испитивања имају велику ефикасност детекције, веома су прецизне и тачне, и погодне за мерење ниских активности где се захтева ниска граница детекције. Течни сцинтилациони спектрометар Quantulus 1220<sup>TM</sup> има високу ефикасност за детекцију алфа и бета емитера у водама, веома низак фон и погодан је за нискофонска мерења и постизање ниских граница детекције.

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

Експлицитно навести позитивну или негативну оцену начина приказа и тумачења резултата истраживања.

У дисертацији „Оптимизација течног сцинтилационог спектрометра за испитивање алфа и бета емитера у водама“ кандидаткиње Иване Стојковић су јасно дефинисани циљеви истраживања. Добијени резултати истраживања су прегледно приказани, систематично изложени, праћени адекватним трагичким и табеларним приказима, закључци су изведени на основу приказаних аргумената и упоређени су са резултатима других истраживања која се баве истом или сличном тематиком. Тумачење резултата је на високом научном нивоу, свеобухватно и у складу са савременим научним сазнањима. Коришћена литература указује да су размотрени актуелни ставови у области течне сцинтилационе спектроскопије, али и шире. На основу ових показатеља комисија даје позитивну оцену начина приказа и тумачења резултата истраживања.

## IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Експлицитно навести да ли дисертација јесте или није написана у складу са наведеним образложењем, као и да ли она садржи или не садржи све битне елементе. Дати јасне, прецизне и концизне одговоре на 3. и 4. питање:

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

Докторска дисертација „Оптимизација течног сцинтилационог спектрометра за испитивање алфа и бета емитера у водама“ кандидаткиње Иване Стојковић написана је у складу са образложењем наведеним у пријави теме дисертације. Једина разлика у односу на пријаву теме је та што због квара на опреми није било могуће развити методу и оптимизовати систем за одређивање радиоактивног бета изотопа  $^{14}\text{C}$ , али су уместо те развијене методе и оптимизован систем за испитивање два нова радиоизотопа  $^{222}\text{Rn}$  и  $^{90}\text{Sr}$ .

### 2. Да ли дисертација садржи све битне елементе

Својим насловом, садржајем, резултатима истраживања и начином тумачења тих резултата дисертација садржи све битне елементе који су потребни да би се објаснили поступци и разумели добијени резултати који су извршени у циљу оптимизације метода и детекторског система за одређивање алфа и бета емитера у водама. Сви добијени резултати су валидовани учествовањем у међународним интекомпарацијама, међулабораторијским поређењима и коришћењем стандардних референтних материјала.

### 3. По чему је дисертација оригиналан допринос науци

Потврда оригиналности и ваљаности дисертације и њеног значаја за академску и научну заједницу се огледа свакако у великом броју објављених научних радова који су урађени у оквиру рада на докторској дисертацији : једно поглавље у монографији међународног значаја (M13), пет научних радова (четири категорије M21 и један категорије M22) у врхунским међународним часописима, као и учешће на међународним конференцијама.

При оптимизацији методе за испитивање укупне алфа/бета активности урађена је корекција на обојено пригушење као додаток стандардној методи по којој се узорак припрема и анализира, што је један од оригиналних доприноса ове дисертације. Оригинални допринос се огледа и у развоју и оптимизацији брзе директне методе одређивања  $^3\text{H}$  у водама. Предложена је модификација стандардне методе за испитивање  $^{222}\text{Rn}$  у водама која се састоји се у примени две калибрационе криве зависности калибрационог фактора од вредности PSA параметра, што је оригиналан допринос дисертације. Развијена је брза метода одређивања радиоактивног бета емитера  $^{90}\text{Sr}$  детекцијом Черенковљевог зрачења. Основна предност методе је брзина добијања резултата испитивања, која нарочито погодује акциденталним ситуацијама. Решење проблема корекције обојеног пригушења је предложено применом SCR методе, чија је ефикасност проверена у експериментима на пригушеним спајкованим узорцима, што је такође оригинални допринос ове докторске дисертације науци.

Комисија закључује да докторска дисертација кандидаткиње Иване Стојковић представља оригинални научни допринос у области нуклеарне физике и да су испуњени сви постављени циљеви истраживања.

### 4. Недостаци дисертације и њихов утицај на резултат истраживања

Комисија је закључила једногласно да не постоје недостаци дисертације и њихов утицај на резултат истраживања.

<b>X ПРЕДЛОГ:</b>
На основу укупне оцене дисертације, комисија предлаже:
- да се докторска дисертација прихвати, а кандидату одобри одбрана

ПОТПИСИ ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ

---

Проф. др Миодраг Крмар,  
редовни професор Природно-математичког  
факултета Универзитета у Новом Саду,  
председник

---

Др Инес Крајцар Бронић,  
научни саветник, Институт Руђер Бошковић,  
Загреб, члан

---

Проф. др Уранија Козмидис-Лубурић,  
редовни професор Факултета Техничких наука  
Универзитета у Новом Саду, члан

---

Проф. др Наташа Тодоровић,  
ванредни професор Природно-математичког  
факултета Универзитета у Новом Саду, ментор