

**ДРУШТВО ЗА ЗАШТИТУ ОД ЗРАЧЕЊА  
СРБИЈЕ И ЦРНЕ ГОРЕ**



**ЗБОРНИК  
РАДОВА**

**XXIX СИМПОЗИЈУМ ДЗЗСЦГ  
Сребрно језеро  
27- 29. септембар 2017. године**

**Београд  
2017. године**

**SOCIETY FOR RADIATION PROTECTION OF  
SERBIA AND MONTENEGRO**



# PROCEEDINGS

**XXIX SYMPOSIUM DZZSCG  
Srebrno jezero  
27- 29. September 2017**

**Belgrade  
2017**

ЗБОРНИК РАДОВА

XXIX СИМПОЗИЈУМ ДЗЗСЦГ  
27-29.09.2017.

Издавачи:

Институт за нуклеарне науке „Винча“  
Друштво за заштиту од зрачења Србије и Црне Горе

За извршног издавача:

Др Борислав Грубор

Уредници:

Др Јелена Станковић Петровић  
Др Гордана Пантелић

ISBN 978-86-7306-144-3

©Institut za nuklearne nauke „Vinča“

Техничка обрада:

Јелена Станковић Петровић, Гордана Пантелић

Штампа:

Институт за нуклеарне науке ”Винча”, Мике Петровића Аласа 12-14, 11351  
Винча, Београд, Србија

Тираж:

150 примерака

Година издања:

Септембар 2017.

## НИСКОФОНСКА ЛАБОРАТОРИЈА ИНСТИТУТА ЗА ФИЗИКУ

### - ПРВИХ ДВАДЕСЕТ ГОДИНА -

**Владимир УДОВИЧИЋ, Александар ДРАГИЋ, Радомир БАЊАНАЦ, Дејан ЈОКОВИЋ, Димитрије МАЛЕТИЋ, Никола ВЕСЕЛИНОВИЋ, Михаило САВИЋ, Давид КНЕЖЕВИЋ,**

*Институт за физику, Београд, Србија, [banjanac@ipb.ac.rs](mailto:banjanac@ipb.ac.rs)*

#### **САДРЖАЈ**

*Представљена је делатност сарадника Нискофонске лабораторије од њене изградње до данас. Почетна мерења концентрације радона, интензитета космичког зрачења и фона гама зрачења временом су, методолошким приступом, прерасла у континуирани мониторинг. Статистички значајни резултати добијени након дуготрајних мерења, допуњени поузданим симулацијама и анализирани напредним мултиваријантним техникама јасно идентификују Нискофонску лабораторију у свим њеним областима истраживања.*

#### **1. УВОД**

Природа овог рада је ревијална и представља ретроспективу најважнијих резултата сарадника Лабораторије током последње две деценије.

Почетак научне каријере прва три потписана коаутора практично коинцидира са изградњом подземне лабораторије и конституисањем Нискофонске лабораторије за нуклеарну физику, Института за физику. Иницијална замисао др Радована Антанасијевића и професора др Ивана Аничина о постојању референтне лабораторије за мерење малих активности и проучавање ретких нуклеарних процеса, реализована је 1997. године у оквиру Института за физику. Непроцењиву подршку двојице учитеља додатно је обогатила сарадња колеге Александра Драгића са академиком Звонком Марићем, његовим ментором на теоријским радовима, који је такође веома био заинтересован за Плазма фокус експеримент. У мерењима на тој фузијоној машини, значајна је била техничка подршка Бошка Антанасијевића, Бате Панића и др Драгутина Шевића, као и теоријски прорачуни колеге Јовице Станојевића, па је 2000. године одбрањена прва дисертација на Плазма фокус експерименту, колеге Душана Јоксимовића. После дуже паузе изазване дотрајалошћу опреме, пре неколико година покушана је ревитализација овог експеримента, ентузијазмом колега др Драгана Лукића и Мирослава Максимовића, али је процењено да она захтева значајније инвестирање.

Знања стечена на Плазма фокус експерименту употребом чврстих детектора трагова примењивана су и у првим мерењима концентрације радона у подземној лабораторији. У области детектора трагова, поред великог ауторитета др Радована Антанасијевића, оснивача и првог руководиоца Лабораторије, који је знање преносио на млађе сараднике вредно је поменути и корисне инструкције колегинице др Бојане Грабеж као и искуство професора др Јована Вуковића. То је све заједно допринело да 2006. године у Лабораторији буде одбрањена нова докторска дисертација, колеге Владимира Удовичића поново на тему Плазма фокус експеримента. Убрзо, током 2007. године придружио му се колега

Александар Драгић, одбраном дисертације са теоријским радом о позитронијуму у сарадњи са академиком Звонком Марићем.

Сарадња са професором др Иштваном Бикитом, испред новосадске лабораторије за нуклеарну физику, ПМФ-а у Новом Саду, била је драгоцену већ на почетку током емпиријске селекције радијационо чистих грађевинских материјала за градњу Лабораторије. Први резултати мерења концентрације радона током градње подземне лабораторије публиковани су већ 1999. године [1]. И током наредног периода, проблематика радона била је присутна, периодичном провером у надземној и подземној лабораторији (НЛ/ПЛ), детекторима трагова и канистрима са активним угљем. Упоредо са постепеним опремањем Лабораторије потребном инструментацијом, предност су добијале две примарне области. Најпре је 2001. године иницијативом професора др Ивана Аничина, уз подршку његових асистената др Јована Пузовића и др Горана Шкоре, и виспиреним саветима професора др Ђуре Крмпотића у Институту за физику покренута проблематика физике космичког зрачења. Тих година Лабораторија је остала без неколицине сарадника, а непроцењив је био губитак великог Радета, др Радована Антанасијевића нашег драгог шефа, и Лабораторија од те 2003. године носи његово име. Лабораторију су у кратком периоду напустили Драгутин Шевић, Бошко Антанасијевић, Надежда Антанасијевић, Зорка Продановић и Јовица Станојевић, али је стигло и прво појачање. Колега Дејан Јоковић се од самог почетка укључио у покретање проблематике космичког зрачења на којој је магистрирао, а 2011. године и докторирао.

Основна намена надземних или плитко укопаних нискофонских лабораторија је мерење малих активности, било узорака из природе или вештачки обогаћених (НОРМ и ТЕНОРМ), пошто је низак фон обрнуто пропорционалан осетљивости мерења или минималној детектабилној активности мереног узорка. Фон је најчешће синоним за фон гама зрачења којим се, пошто је моноенергетско, јасно идентификује одређени радио изотоп. За мерење гама зрачења најчешће су у употреби германијумски детектори, са ултимативним захтевима за радијационо чистим криостатом, што веће активне запремине (ефикасности), и смештене у одговарајућој пасивној заштити (најчешће олову). Високо осетљива мерења фона, којима се фундаментално истражују ретки процеси (двоструки бета распада и тамна материја) спроводе се у дубоким подземним лабораторијама у којима је минимизован утицај космичког зрачења. Ипак, и плитко укопане лабораторије могу послужити у анализи оних компоненти фона које генерише космичко зрачење (због боље статистике), а које су релевантне у високо осетљивим мерењима у дубоким лабораторијама, као и у селекцији радијационо чистих материјала који се уграђују у инструментацију тих високо осетљивих истраживања. Главни циљ, анулирање нуклеонске компоненте космичког зрачења, присутне на површини и све до око 15 метара воденог еквивалента (м.в.е), постигнуто је укопавањем земунске лабораторије у десну обалу Дунава. Добијено је 12 метара заштитног слоја земље, леса (еквивалентног са 25 метара воде) па је и најпродорнија компонента космичког зрачења, наелектрисани миони, редукована интегрално скоро 4 пута.

Први резултат релативног смањења флукса миона, подземне у односу на надземни простор (око 4 пута), добијен је двома техникама, пластичним сцинтилатором NE102 и преносним германијумским детектором (рел. ефикасности 20%). На жалост, овај први Ge детектор, позајмљен из Винче, није био од користи за нискофонска мерења због његове радијационе запрљаности услед рада на мониторингу

реакторских неутрона. У прво време, Лабораторија је располагала и планарним Ge(Li) детектором, добијеним од колега из Новог Сада, којим се могао детектовати тек нискоенергетски део фона амбијенталног гама зрачења, до око 200keV. Поред доминантних Pb-X пикова, од оловног оклопа, јасно се издвајала линија од урана 238 (тачније његовог првог потомка Th-234) на 63.3keV, што је послужило за први чланак о анализи узорака са ураном [2]. Током годину дана и непосредно пре набавке првог и још увек јединог германијумског детектора у Лабораторији, у подземној лабораторији је био у употреби још један позајмљени Ge детектор, из Лабораторије за заштиту од зрачења из Винче, а у циљу компаративних мерења истих узорака.

### 2. ПРОБЛЕМАТИКА КОСМИЧКОГ ЗРАЧЕЊА

Прегледни рад, из 2011. године, [3], садржи и детаље конструкције саме подземне лабораторије и описа њеног радног режима, па ће се надаље прича фокусирати на три доминантне области истраживања у Лабораторији. Хронолошки, прва област којом смо се бавили од 2001. године је космичко зрачење, и још увек је област која је предмет интересовања највећег броја сарадника.

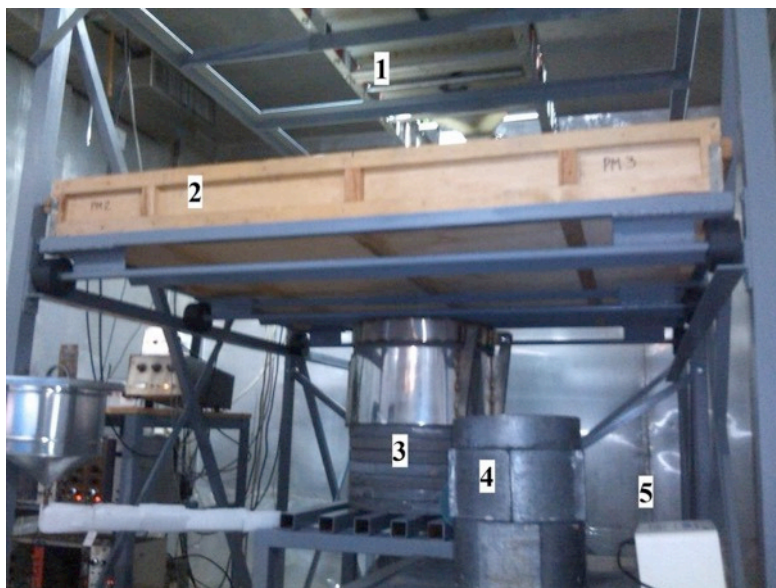
Континуирани мониторинг интензитета космичког зрачења у НЛ/ПЛ, траје непрекидно од 2002. године до данас, у почетку са два једнака пластична сцинтилатора мале површине. Мали пластици, како их називамо, стигли су у Србију из Дубне, 1994. године, ентузијазмом професора Аничина и Миодрага Крмара. Детектори су комплетирани у нашој Лабораторији, спајањем сцинтилатора са светловодом и по једним фотомултипликатором. И данас су у функцији са још увек беспрекорном дискриминацијом мионског  $\Delta E$  пика од нискоенергетског космичког и гама зрачења. Први резултати редом су представљани на светским, Јапан, 2003, Индија, 2005. и европским конференцијама о космичком зрачењу, Италија, 2004. и Португалија 2006. године [4]. На послетку, прецизно одређен флуks космичких миона, први пут на нашим географским ширинама и дужинама, публикован је у [5]. Крајем 2005. године, сналажљивошћу колеге Драгића, у склопу набавке германијумског детектора, успели смо значајно да подигнемо квалитет мерења космичког зрачења, набавком два идентична, 8 пута по површини већа сцинтилатора. Боља статистика мерења значила је и упуштање у временску спектоскопију космичког зрачења, посебно након набавке првог дигиталног анализатора (CAEN), 2008. године, иако су и до тада анализиране временске серије и периодограми космичких података, [6].

Од прошле године у новој просторној конфигурацији расположивих пластичних сцинтилатора (названог ASYMUT, што је асиметрични мион телескоп), отвара се могућност енергетски диференцираног праћења процеса соларне модулације космичког зрачења, слика 1.

Много значајније за потенцијал Лабораторије од скромног опремања хардвером, јесте трансфер поново из Винче, овог пута колеге Димитрија Малетића, препоруком нашег професора Ивана. Његово велико знање стечено на CMS експерименту у CERN-у, на коме је и докторирао 2009. године, посебно софтверских алата, оснажило је способности групе да се применом ново развијених софтвера, на адекватан начин анализира све богатија база космичких података.

У Лабораторији је реализовано десетак дипломских радова, али се од млађих тек колега Никола Веселиновић, радећи најпре дипломски на теми плазма фокуса са

колегом Удовичићем, касније „усудио“ да анализира поменућу базу космичких података те тако управо ове године приводи рад на својој дисертацији. Његовим стопама је, најпре радећи дипломски рад о САЕН дигиталном анализатору, кренуо и колега Михаило Савић, па се ускоро може очекивати још једна дисертација из области космичког зрачења, [7].



**Слика 1. АSYMUT конфигурација у подземној лабораторији, 1-мали пластици, 2-велики пластик, 3-Ge детектор у Pb заштити, и додатно 4-NaI детектор у Pb заштити, 5-радонометар**

### 3. НИСКОФОНСКА ГАМА СПЕКТРОМЕТРИЈА

После 8 година од отварања, у Лабораторију је стигао германијумски детектор, у стандардној вертикалној геометрији криостата који је изабран да буде од нискофонских материјала. Релативне ефикасности од 35% и номиналне енергетске резолуције 1,72 keV, детектор је представљао изврстан инструмент за детаљно упознавање са свим компонентама фона гама зрачења у амбијенту подземне лабораторије. У почетку је пасивна заштита била недовољна, бст олова непознате историје (у смислу његовог порекла и старости). Неколико година касније после процене да је оптимална дебљина заштите 12 cm олова, опет уз помоћ колега из Новог Сада, изливени су дискови укупне масе око 900 килограма од довољно старог олова за које је процењен садржај Pb-210 око  $25 \text{ Bqkg}^{-1}$ . Већ је поменута тријажа грађевинских материјала у смислу избора оних са минималном концентрацијом урана, торијума и калујума 40, а за њом је следило зналачко пројектовање вентилационог система који је од највећег значаја за подземне лабораторије. Без њега, спонтана акумулација радона достиже два реда већу концентрацију па би у фонском спектру доминирале бројне пострадонске линије уз њихово интензивно варирање у времену. Непрестаним изменама целокупног ваздуха у подземној лабораторији (запремине око  $130 \text{ m}^3$ ) скоро 4 пута на сат, и филтрацијом ваздуха на улазу у систем у два степена, прво филтером за прашину а потом и великим (око 50 kg) адсорберским филтером са активним угљем, концентрација радона је смање-



на на око  $10 \text{ Bqm}^{-3}$ . Временом је процењено да је и достигнутих  $20 \text{ Bqm}^{-3}$  довољно ниско, штедећи на честим заменама великог филтера. Поред филтрације, разликом у брзини упумпавања чистог и испумпавања радоном запрљаног ваздуха, пројектован је и надпритисак од преко  $2 \text{ mbar}$ -а, који спречава дифузију радона кроз евентуалне пукотине из алуминијумом пресвучених зидова и додатно доприноси релативној стабилности концентрације радона.

Још у пројектовању прве конфигурације са великим пластицима ( $1 \text{ m}^2$ ), реализована је вето-активна заштита Ge детектора, са растојањем оловног поклопаца до коаксијално постављеног великог пластика од око  $60 \text{ cm}$ . Управо је тежак оловни поклопац и начин приступа самом Ge детектору, захтевао релативно велико растојање што је због широке угаоне расподеле миона ( $\cos^2\theta$ ) значајно умаљило учинак вето детектора. Континуирани мониторинг космичког зрачења и упоредо временска спектроскопија пружали су могућност да се у антикоинцидентном режиму смањи фон одбацујући део догађаја детектован у вету, док се у коинцидентном режиму управо анализирао део фонског спектра генерисан од стране космичког зрачења. Први резултати су представљени у [3]. Посебно је занимљива процена флукса неутрона генерисаних од миона у олову, који се детектују преко закаснелих коинциденција њиховом интеракцијом на изотопима германијума, [8]. Поменута ASYMUT конфигурација, слика 1, значајно је побољшала геометрију два детектора па се очекује и значајно нижи интегрални фон и интензитет анихилационе линије у вето режиму. Пре тога, карактеристике фона после дужег мерења представљене су у [9].

Током година континуираног мерења, било је од значаја анализирати утицај варијације радона и космичког зрачења на варијације фона, пошто су варијације фона у спрези са систематском грешком мерења малих активности. Мерења су сукцесивно обављана у обе лабораторије НЛ и ПЛ, и показана је очигледна предност остварених нискофонских услова у подземној лабораторији, [10]. Ово је била и тема дисертације колеге Радомира Бањанца, одбрањене 2011. године.

Нискоенергетски део спектра фона германијумских детектора истраживан је и са аспекта утицаја „skyshine“ радијације у односу на конкурентски допринос космичког зрачења. Миони космичког порекла производе континуирани спектар губитака енергије који има максимум интензитета на високим енергијама, реда неколико десетина  $\text{MeV}$ , која је најчешће изван области интересовања, али дају допринос и у нискоенергетској области. Свеукупни инструментални фонски спектри одликују се изразитим максимумом, који је у зависности од величине детектора у близини  $100 \text{ keV}$ . Интензитет, природа и порекло фона у овој енергетској области испитивано је апсорпционим мерењима и закључено је да је зрачење континуираног спектра двојаког порекла. Једним делом оно представља расејано и деградирано зрачење електромагнетне компоненте космичког зрачења, док другим делом представља од целокупне околине расејано зрачење терестријалног порекла, често познатог под називом „skyshine radiation“, [11].

Важно је поменути, као што је случај и код проблематике космичког зрачења, да се у анализама фона неизоставно користе симулациони пакети, најчешће церновски GEANT4, [12], и у области космичког зрачења, CORSICA.



### 4. ДЕТЕКЦИЈА РАДОНА

Радон је свуда присутан јер је по природи гас па дифундује и кроз зидове лабораторија, при томе је и инертан па га је тешко филтрирати и хемијски изоловати. У нискофонској гама спектрометрији увек својим релативно кратким животом, генерише значајну активност потомака који потом својим распадањем продукују мноштво пострадонских гама линија, посебно Рb-214 и Bi-214. Један од начина детекције радона је управо анализом интензитета пострадонских линија након што је сам радон адсорбован у канистрима са активним угљем. Време акумулације је обично 2 дана, а још једна, тзв. пасивна метода је пребројавање трагова од радонових алфа честица у чврстим детекторима (CR-39 и LR-115) после времена експонирања од најмање 3 месеца. Већ је поменуто да радон као сметња у нискофонским мерењима осим што генерише непријатан фон у виду мноштва гама линија и припадајућег Комптоновског континуума, додатно утиче у варијацији, најчешће дневној, истих линија. Начин да се поузданије процени утицај овог варирања јесте активна метода детекције радона која у реалном времену сакупља податке, концентрације радона као и релевантних метеоролошких параметара, температуре и релативне влажности ваздуха. Од 2008. године Лабораторија располаже једним таквим бројачем, радонометром, који је далеко јефтинији од активних спектрометара (Rad7 и AlphaGuard), али подједнако прецизан. Дуготрајним мониторингом у амбијенту подземне лабораторије, радонометар је потврдио очекивано дневно варирање али показао и сезонску варијацију радона, [13].

Активни уређај пружио је и могућност примене напредних мултиваријантних техника анализе, које се успешно тренирају на актуелно измереној бази података радона и метео параметара, и потом успешно врше предикцију динамике радона у контролисаним условима подземне лабораторије, [14].

Већ неколико година активан је сајт, <http://cosmic.ipb.ac.rs/index.html>, наше Лабораторије са линковима на ажуриране податке мерења космичког зрачења, <http://147.91.87.156/cgi-bin/bcrs> и евалуационе концентрације радона у ПЛ, [http://147.91.87.156/nf-cosmic/rad3/Radon\\_alarm/](http://147.91.87.156/nf-cosmic/rad3/Radon_alarm/).

Знањем стеченим применом разноликих техника детекције радона, не само унутар ПЛ/НЛ простора већ систематски и у реалном амбијенту ван лабораторија, [15], уз подршку Агенције за јонизујућа зрачења и нуклеарну сигурност Републике Србије, и реализовану преко ИАЕА фондова, нови руководилац Лабораторије др Владимир Удовичић успешно је координирао великом кампањом мапирања радона и добијањем прве радонске мапе Србије 2016. године, [16].

### 5. УМЕСТО ЗАКЉУЧКА

Надајући се да ће се кроз 10 или 20 година поново пружити прилика писању рада сличног садржаја, очекујући напослетку боље опремање Лабораторије хардвером и уз задржавање високог нивоа ентузијазма сарадника, сматрамо досадашње ангажовање успешним, а постојање наше Лабораторије оправданим.

Ово је прилика да се присетимо непосредније сарадње током ових двадесет година и са колегама из Винче, Милојком Ковачевићем, Зором Жунић, Иваном Вуканац, Драганом Тодоровић, Јеленом Крнета Николић, Предрагом Ујићем, и колегама из Новог Сада Миодрагом Крмаром, Софијом Форкапић и Николом Јованчевићем. Управо је наш најмлађи сарадник, Давид Кнежевић, долазећи из јаке новосадске школе нуклеарне физике додатна нада у покретање нових тема.

Наравно, ту је и велики број наших колега из самог Института за физику, заинтересованих за наш рад од којих се од самог формирања Лабораторије у сваком афирмативном смислу истиче др Александар Белић.

Може се ипак закључити да су почетна мерења концентрације радона, интензитета космичког зрачења и фона гама зрачења временом, методолошким приступом, прерасла у континуирани мониторинг. Статистички значајни резултати добијени након дуготрајних мерења, допуњени поузданим симулацијама и анализирани напредним мултиваријантним техникама јасно идентификују Нискофонску лабораторију у свим њеним областима истраживања.

На крају, као и сваком приликом, радо се сећамо нашег драгог професора Ивана Аничина који је у најтеже време, када је опстанак Лабораторије био угрожен, али и након одласка у пензију, својом харизмом, неограниченим знањем и свеprisутном љубављу међу нама надањивао истраживачки дух и одржавао јединство свих сарадника Лабораторије.

### 6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] R. Antanasijević, I. Aničin, I. Bikit, R. Banjanac, A. Dragić, D. Joksimović, Đ. Krmpotić, V. Udovičić, J.B. Vuković Radon measurements during the building of a low-level laboratory Radiation Measurements 31, (1999) 371
- [2] I. Aničin, R. Banjanac, A. Dragić, D. Joković, V. Udovičić, Investigation of the Uranium Solubility and Absorption Physica Scripta T118 (2005) 39-40
- [3] Aleksandar Dragić, Vladimir Udovičić, Radomir Banjanac, Dejan Joković, Dimitrije Maletić, Nikola Veselinović, Mihailo Savić, Jovan Puzović, Ivan V. Aničin. The new set-up in the Belgrade low-level and Cosmic-ray laboratory. *Nuclear Technology and Radiation Protection Vol. XXVI, No. 3, 181-192 (2011)*
- [4] (a) J. Puzović, A. Dragić, V. Udovičić, D. Joković, R. Banjanac, I. Aničin, Analysis of continuous cosmic ray measurements in Belgrade *Proceedings of 28th International Cosmic Ray Conference 1199-1202, Japan, (2003)*  
(б) A. Dragić, R. Banjanac, V. Udovičić, D. Joković, J. Puzović, I. Aničin, Variations of CR-Muon Intensity in the Declining Phase of the 23rd Solar Cycle in Ground and Shallow Underground Data *Proceedings of 29th International Cosmic Ray Conference 101-104, Pune, India, (2005)*  
(в) A. Dragić, R. Banjanac, V. Udovičić, D. Joković, I. Aničin, J. Puzović, Comparative Study of Power Spectra of Ground and Shallow Underground Muon Data *Proceedings of 19th European Cosmic Ray Symposium (Published in International Journal of Modern Physics A 29 (2005) 6953-6955), Florence, Italy, (2004)*  
(г) A. Dragić, R. Banjanac, V. Udovičić, D. Joković, I. Aničin, J. Puzović, Diurnal and seasonal variations of CR-muon intensity in the declining phase of the 23rd solar cycle in ground and 25 m.w.e. underground data at 45oN *Proceedings of 20th European Cosmic Ray Symposium, Lisbon, Portugal, (2006), <http://www.lip.pt/events/2006/ecrs/proc/ecrs06-s2-76.pdf>*
- [5] A. Dragić, D. Joković, R. Banjanac, V. Udovičić, B. Panić, J. Puzović, I. Aničin. Measurement of cosmic ray muon flux in the Belgrade ground level and

- underground laboratories *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 591 (2008) 470-475
- [6] A. Dragić, R. Banjanac, V. Udovičić, D. Joković, J. Puzović, I. Aničin Periodic Variations of CR Muon Intensity in the Period 2002-2004. *Proceedings of the 21st European Cosmic Ray Symposium, Košice, Slovakia (2008)* 368-373.
- [7] (a) N. Veselinović A. Dragić, M. Savić, D. Maletić, D. Joković, R. Banjanac, V. Udovičić. Utilization of a shallow underground laboratory for studies of the energy dependent CR solar modulation. *XXV European Cosmic Ray Symposium, Torino, Sept. 4-9 (2016)*  
 (б) M. Savić, A. Dragić, N. Veselinović, V. Udovičić, R. Banjanac, D. Joković, D. Maletić. Effect of pressure and temperature corrections on muon flux variability at ground level and underground. *XXV European Cosmic Ray Symposium, Torino, Sept. 4-9 (2016)*
- [8] (a) A Dragić, I Aničin, R Banjanac, V Udovičić, D Joković, D Maletić, M Savić, N Veselinović and J Puzović. Neutrons produced by muons at 25 mwe. *Proceedings of the 23rd European Cosmic Ray Symposium (and 32nd Russian Cosmic Ray Conference), Moscow, Russia, July 3 - 7, (2012), J. Phys.: Conf. Ser. 409 012054* doi:10.1088/1742-6596/409/1/012054.  
 (б) N. Veselinović, D. Maletić, D. Joković, R. Banjanac, V. Udovičić, M. Savić, J. Puzović, I.V. Aničin, A. Dragić. Some peculiarities of digital gamma-ray spectroscopy with germanium detectors. performed in presence of neutrons. *GAMMA-2 Scientific Workshop on Nuclear Fission Dynamics and the Emission of Prompt Neutrons and Gamma Rays, 24 – 26 September 2013, Sremski Karlovci, Serbia. Physics Procedia, 59, pp. 63-70 (2014)*
- [9] Radomir Banjanac, Vladimir Udovičić, Dejan Joković, Dimitrije Maletić, Nikola Veselinović, Mihailo Savić, Aleksandar Dragić, Ivan Aničin. Background spectrum characteristics of tfe HPGe detector long-term measurements in the Belgrade low-background laborator.y *Proceedings of Third International Conference on Radiation and Dosimetry in various fields of Research, RAD2015, JUNE 8 – 12, 151-153 (2015)*
- [10] R. Banjanac, A. Dragić, V. Udovičić, D. Joković, D. Maletić, N. Veselinović, M. Savić. Variations of Gamma-Ray Background in the Belgrade Shallow Underground Low-Level Laboratory. *Applied Radiation and Isotopes, 87 (2014)* 70-72 <http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.11.091>
- [11] R. Banjanac, D. Maletić, D. Joković, N. Veselinović, A. Dragić, V. Udovičić, I. Aničin. On The Omnipresent Background Gamma Radiation Of The Continuous Spectrum. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 745 (2014) pp. 7-11* <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2014.01.065>
- [12] D. R. Joković, A. Dragić, V. Udovičić, R. Banjanac, J. Puzović, I. Aničin. Monte Carlo simulations of the response of a plastic scintillator and an HPGe spectrometer in coincidence. *Applied Radiation and Isotopes 67 (2009) 719-722*
- [13] (a) V. Udovičić, B. Grabež, A. Dragić, R. Banjanac, D. Joković, B. Panić, D. Joksimović, J. Puzović, I. Aničin. Radon problem in an underground low-level laboratory. *Radiation Measurements 44 (2009) 1009-1012*  
 (б) Udovičić V., Aničin I., Joković D., Dragić A., Banjanac R., Grabež B., Veselinović N. Radon Time-series Analysis in the Underground Low-level Laboratory in Belgrade, Serbia. *Radiation Protection Dosimetry 145 (2-3) (2011):155-158*

- (b) V. Udovičić, J. Filipović, A. Dragić, R. Banjanac, D. Joković, D. Maletić, B. Grabež and N. Veselinović. Daily and Seasonal radon variability in the underground low-background laboratory in Belgrade, Serbia. *Radiation Protection Dosimetry* 160 (1-3): pp. 62-64 (2014)
- [14] (a) Dimitrije M. MALETIĆ, Vladimir I. UDOVIČIĆ, Radomir M. BANJANAC, Dejan R. JOKOVIĆ, Aleksandar L. DRAGIĆ, Nikola B. VESELINOVIĆ, and Jelena Z. FILIPOVIĆ. Comparison of multivariate classification and regression methods for the indoor radon measurements. *Nuclear Technology and Radiation Protection Vol. XXIX, No. 1, 17-23 (2014)*
- (b) D. M. Maletić, V. I. Udovičić, R. M. Banjanac, D. R. Joković, A. L. Dragić, N. B. Veselinović, J. Filipović. Correlative and Multivariate analysis of increased radon concentration in underground laboratory. *Radiation Protection Dosimetry*, 162 (1-2): pp. 148-151 (2014) doi:10.1093/rpd/ncu248
- [15] Vladimir Udovicic, Dimitrije Maletic, Jelena Zivanovic, Aleksandar Dragic, Radomir Banjanac, Dejan Jokovic, Sofija Forkapic. Long-term indoor radon measurements in a family house – a case study in Serbia. In: *Book of Abstracts of 8th Conference of Protection against Radon at Home and at Work, 12 - 14 of September 2016, Prague, Czech Republic, Book of Abstracts, pp. 79*
- [16] Udovičić V, Maletić D, Eremić Savković M, Pantelić G, Ujić P, Čeliković I, Forkapić S, Nikezić D, Marković V, Arsić V, Ilić J, Nilsson P. Preliminary results of the first national indoor radon survey in Serbia. In: *Book of Abstracts of 8th Conference of Protection against Radon at Home and at Work, September 12-14, 2016; Prague, Czech Republic.*

### LOW-BACKGROUND LABORATORY FOR NUCLEAR PHYSICS IN THE INSTITUTE OF PHYSICS -THE FIRST TWENTY YEARS OF EXISTENCE-

Vladimir UDOVIČIĆ, Aleksandar DRAGIĆ, Radomir BANJANAC, Dejan JOKOVIĆ, Dimitrije MALETIĆ, Nikola VESELINOVIĆ, Mihailo SAVIĆ, David KNEŽEVIĆ

*Institute of Physics, Belgrade, Serbia, [banjanac@ipb.ac.rs](mailto:banjanac@ipb.ac.rs)*

#### **ABSTRACT**

*The most important scientific activities in the Low-background laboratory are described for the entire period of its existence. Over the period of twenty years, initial measurements of radon concentration, cosmic-rays intensity as well as gamma radiation background through metodological approach evolved into consistent continual monitoring. Statistically significant results obtained by long-term measurements, enriched by reliable simulation and analyzed using advanced analysis tools clearly identify our Lab.*