

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ФИЗИЧКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Пошто смо на VII седници Наставно-научног већа Физичког факултета Универзитета у Београду одређени за чланове Комисије за припрему извештаја о докторском раду „Реализација детекторског система у подземној лабораторији за изучавање соларне модулације космичког зрачења у хелиосфери“ из научне области Физика високих енергија и нуклеарна физика, коју је кандидат Никола Веселиновић предао Физичком факултету у Београду подносимо следећи

РЕФЕРАТ

1. Основни подаци о кандидату

1.1 Биографски подаци

Никола Веселиновић је рођен 1976. године у Београду, Република Србија где је завршио основну школу и гимназију. Дипломирао је 2008. године на Физичком факултету Универзитета у Београду, на смеру Теоријска и експериментална физика. Дипломски рад на тему: “Скалирање приноса неутрона и максималне струје пражњења у деутеријумском плазма фокусу“ је одбранио на Физичком факултету са оценом 10 под менторством др Владимира Удовичића. Од јесени 2008. године, студент је докторских студија на Физичком факултету на смеру Физика честица и језгара под менторством др Александра Драгића. Запослен је, од априла 2011. године, у Нискофонској лабораторији за нуклеарну физику Института за физику у Земуну. Као део групе, ангажован је на пројекту ОИ 171002: „Нуклеарне методе истраживања ретких догађаја и космичког зрачења“. У звање истраживач сарадник изабран је марта 2016. године.

1.2 Научна активност

Главна научна активност Николе Веселиновића, као члана Нискофонске лабораторије за нуклеарну физику Института за физику у Земуну, је у области космичког зрачења и то мионске компоненте секундарног космичког зрачења које се детектује на површини и испод површине Земље. У оквиру тих активности, користећи Монте Карло симулационе пакете, истражује везу примарног и секундарног космичког зрачења детектованог у надземном и подземном делу Нискофонске лабораторије. Ови резултати су од значаја за изучавање процеса соларне модулације примарног космичког зрачења.

У оквиру овог истраживања, радио је на инсталацији асиметричног мионског телескопа у подземном делу Нискофонске лабораторије, чиме су значајно проширене могућности лабораторије за изучавање поменутог процеса. Резултати тих активности су објављени у часописима са импакт фактором преко 1: Nucl.Instrum.Meth. A875 (2017) 10-15, Nucl.Instrum.Meth. A745 (2014) 7-11 и Nuclear Technology & Radiation Protection (2011), Vol. 26, No. 3. Никола Веселиновић је представио резултате ових активности на неколико међународних конференција из области астро-честичне физике и физике космичких зрака као и на неколико домаћих конференција. Поред главног правца истраживања Никола Веселиновић је дао допринос и у другим областима истраживања која се одвијају у оквиру Нискофонске лабораторије за нуклеарну физику Института за физику у Земуну и то у нуклеарној спектроскопији, изради радонске мапе Србије и нуклеарне фузије помоћу уређаја Плазма фокуса.

2. Опис предатог рада

2.1 Основни подаци о докторској дисертацији

Дисертација је урађена под руководством др Александра Драгића, вишег научног сарадника Института за физику у Земуну. Ментор испуњава услове Физичког факултета за руковођење изработом докторске дисертације јер је у научном звању и аутор је великог броја радова управо из области космичког зрачења који су објављени у водећим међународним часописима као и учесник европских и светских конференција везаних за космичко зрачења. Теза је написана на 121 страни, не рачунајући насловну страну, захвалнице, сажетак, садржај, биографију аутора и изјаве. У тексту се налази 16 табела и 95 слика.

Ова докторска дисертација је подељена у 6 поглавља. Прво поглавље чини увод у проблематику изучавања флуksа космичких зрака у Нискофонској лабораторији Института за физику у Земуну.

У другом поглављу се даје увид у примарно космичко зрачење од настанка до интеракције истог са атмосфером Земље. У овој глави су дате физичке карактеристике примарног космичког зрачења, објашњене су интеракције космичког зрачења са магнетним пољем Сунца. Такође указано је на појаве која изазива интеракција космичких зрака са хелиосфером као и интеракција већ модулисаних космичких зрака са магнетним пољем Земље.

Треће поглавље даје увид у интеракцију космичког зрачења са атмосфером, креацију више врста пљускова секундарних честица и осталим процесима у атмосфери изазваних космичким зрачењем као и везом између примарног космичког зрачења са мерењем флуksа секундарног космичког зрачења на површини наше планете.

У четвртог поглављу се описује даље простирање секундарних космичких зрака кроз слој земље и процесима који се тада одвијају и утицајем тог проласка на физичке карактеристике флуksа секундарног космичког зрачења.

Пето поглавље представља оригиналан допринос и подељена је на два дела. У првом делу, урађена је симулација интеракције примарног космичког зрачења са атмосфером, и то симулација пропагације секундарног космичког зрачења кроз атмосферу и земљиште, као и симулација интеракције космичког зрачења са детекторским системом Нискофонске лабораторије. На основу резултата симулација су израчунате функције одзива детектора на примарно космичко зрачења. Као пример примене ових резултата израчунат је спектар ригидности детектованих Форбуш-снижења. Описан је нови асиметрични мионски телескоп, чијом инсталацијом је Нискофонска лабораторија у стању да прати варијације мионског флуksа на 4 различите средње енергије. У другом делу петог поглавља су резултати, добијени симулационим методама, упоређени са вишегодишњим мерењима флуksа у Нискофонској лабораторији. Поред тога урађена је и компарација мерења у Нискофонској лабораторији са мерењима система неутронских монитора у свету и показано да су мерења у Нискофонској лабораторији надоградња светске мреже ових детектора за више енергије примарног космичког зрачења.

Последња глава ове докторске тезе је кратак закључак тезе као и приказ перспектива даљих експеримената. На крају је дат списак коришћених референци.

2.2 Предмет и циљ рада

Докторска теза припада области Физика високих енергија и нуклеарна физика, а ужа подобласт је Космичко зрачење. Енергија и флуks космичких зрака који долазе изван Сунчевог система бивају модулисани соларним магнетним пољем. Посебно је осетљив нискоенергетски део спектра космичког зрачења (до 100 GeV). Примарно космичко зрачење производи, при интеракцији са атмосфером, секундарно космичко зрачење које може да се прати преко

различитих детекторских система које се налазе на Земљи. Стога, секундарно космичко зрачење носи информацију о соларној модулацији па може бити искоришћено за изучавање процеса на Сунцу и у хелиосфери, што не само да је од значаја за изучавање космичких зрака него има утицаја и на изучавање процеса у атмосфери и магнетосфери Земље. У овој тези испитана је употребљивост плитко укопане подземне лабораторије за истраживање енергетски зависне соларне модулације космичког зрачења.

Нискофонска лабораторија Института за физику у Земуну је опремљена мионским детекторима, смештеним у њеном надземном и подземном делу. Ради разумевања природе варијација примарног космичког зрачења на основу мерења на површини Земље, неопходно је познавати одзив детекторског система на примарне честице космичког зрачења тј. тзв. *Response* функције. На основу ових функција, мерења у Нискофонској лабораторији се могу искористити као допуна мерењима светске мреже неутронских монитора при анализи модулационих процеса. Додатни циљ тезе је био да се размотре нове конфигурације детектора космичког зрачења, које би омогућиле изучавање процеса соларне модулације на више различитих средњих енергија одзива. Међу разматраним конфигурацијама је систем за детекцију вишемионских догађаја у подземном делу лабораторије. Ова конфигурација би обезбедила највишу средњу енергију посматраних космичких зрака, али би захтевала значајна улагања, која нису извесна у наредном периоду. Алтернативна конфигурација, која је и експериментално реализована, је асиметрични мионски телескоп и она омогућава селекцију космичког зрачења по упадним угловима и истовремена мерења на три средње енергије са довољном статистиком.

Испитивања ових конфигурација су укључила коришћење симулационих пакета CORSIKA и GEANT4 помоћу којих је симулирано како секундарно космичко зрачење тако и детекторски системи. Ови софтверски пакети за Монте Карло симулације су искоришћени за утврђивање интеракција примарног космичког зрачења и атмосфере као и генерисање и пропацију мионског флука кроз атмосферу, земљиште и интеракција миона са детекторским системима.

Резултати симулације су упоређени са експериментално измереним мионским флуksom и у надземном и у подземном делу лабораторије са којим је симулација показала добро слагање. Резултати симулације да је систем са мултимионским коинциденцијама адекватан за посматрање примарних честица виших енергија (преко 300 GeV-a), где је утицај соларне модулације занемарљив. У зависности од броја детектованих коинцидентних миона енергија примарног космичког зрачења од којих ти миони потичу расте. Тиме се добија добра дискриминација различитих енергија примарних честица космичког зрачења и омогућава посматрање варијације флука и његове модулације на различитим енергијама у широком интервалу енергија. Међутим показано је да је, у садашњим условима Нискофонске лабораторије, ова конфигурација недовољне површине да би видели потребне варијације флука мање од 1%. Друга детекторска поставка омогућава да се, коришћењем детектора у телескопској конфигурацији, добије дискриминација флука примарних честица различитих енергија. Овим системом се омогућава посматрање флука космичког зрачења на четири различите медијане енергије од 59 GeV све до 157 GeV што је више од енергија космичког зрачења који неутронски монитори детектују. Испитивања су показала да експериментална поставка асиметричног мионског телескопа омогућава мерења који би могла да уоче мале варијације флука. Ове варијације су изазване соларном модулацијом на енергијама које су веће него енергије космичког зрачења на којима се уобичајено посматра овај утицај Сунца. Целокупна анализа указује да се у Нискофонској лабораторији, коришћењем постојеће опреме омогућава да се, у истим атмосферским и геомагнетним условима, посматра утицај соларне модулације за различите енергије космичког зрачења. Показано је да овакав детекторски систем представља корисну надоградњу већ постојећих система неутронских монитора ка већим енергијама што је од значаја за истраживање домета утицаја Сунца на галактичко космичко зрачење, као и истраживање самог галактичког космичког зрачења. Ова надоградња већ постојеће светске мреже неутронских монитора се показала веома примерена приликом неколико Форбушових смањења изазваних аперидичним активностима Сунца. Утврђено је и логаритамска зависност јачине амплитуде ових смањења и медијане енергије космичког зрачења. Овај

детекторски систем помера могућност посматрања утицаја Сунца на космичко зрачење виших енергија. Ова мерења доприносе разумевању периодичних варијација космичког зрачења на различитим енергијама. Такође, омогућава и карактеризацију екстремних догађаја на Сунцу попут пертурберанци али и прецизније одређивање градијента и анизотропије космичког зрачења.

Овакав систем ће у будућности моћи да прати како активност Сунца опада током трајања тренутног, по свему судећи нетипичног, 24. Соларног циклуса, али и даље дати допринос све већој активности на пољу истраживања утицаја Сунчеве активности на климатске процесе и остале параметре атмосфере наше планете.

2.3 Публикације

У овој докторској тези су представљени резултати 3 рада [A1, A2, A3] објављена у часописима са импакт факторима већим од 1. Од тога 2 рада [A1, A2] категорије M21 и 1 рад [A3] категорије M22. Резултати ове тезе представљени су и на неколико међународних конференција који су дати у списку публикација кандидата.

У раду [A1] Никола Веселиновић је главни аутор, док је у радовима [A2, A3] дао изузетно значајан допринос. Као најзначајнији, на сајт Физичког факултета се стављају радови [A1] и [A2].

2.4 Преглед научних резултата изложених у дисертацији

Најважнији делови докторске дисертације представљени су у Поглављу 5. Резултати се могу поделити на три целине: 1. симулација космичког зрачења и одзива детекторског система, 2. експериментална мерења мионског флукса и верификација симулације и 3. изучавање утицаја Сунчеве активности на космичко зрачење измерено у Нискофонској лабораторији.

2.4.1 Симулација мионског флукса у подземној лабораторији

Примарно космичко зрачења, после проласка и интеракције са хелиосфером и геомагнетним пољем, интерагује са молекулима у атмосфери, при чему се стварају каскадни пљускови секундарно креираних честица од којих неке доспевају до површине Земље. Једна од компоненти те каскаде секундарног космичког зрачења су и миони који настају пионизациом високо у атмосфери и носе информацију о енергији примарне честице. Мионска компонента се може мерити на површини Земље, али исто тако миони виших енергија продиру и у тло и могу се мерити на различитим дубинама. Овим се омогућаје да на једном месту, под истим геомагнетним и атмосферским условима добију мерења миона који потичу од примарних честица различитих енергија. Тиме добијемо диференцијацију примарних честица на којима се може, посебно, посматрати утицаји хелиосфере и атмосфере. Да би се знале енергије примарних честица које се посматрају мора се применити симулација коришћењем Монте Карло алгоритма. Овим симулацијама се налази веза миона, детектованих детекторима на површинском и у плитко укопаном делу Нискофонске лабораторије, и примарног космичког зрачења од кога потичу. Коришћењем симулационог пакета Corsika и Geant4 симулирана је пропација више од милијарду честица космичког зрачења кроз атмосферу, а затим и мионске компоненте кроз тло, лабораторију и детектор. Тиме је становљен одзив детектора, тј. *response* функција на примарно космичко зрачења.

Резултати ове симулације су примењени да би се провериле две различите експерименталне поставке. Прва поставка, где се детектовали коинцидентни миони у подземном делу Нискофонске лабораторије даје медијану енергије приимарног космичког зрачења од 300 GeV-а, при чему 95% свих миона потиче од примарних космичких зрака са енергијом већом од 75 GeV-а. Симулацијом је потврђено да друга експериментална поставка, са асиметричним телескопом даје потребну осетљивост на варијације временске серије космичког зрачења које се

очекују услед активности Сунца. На основу рачуна *response* функције за ову поставку, миони детектовани у симетричном моду имају медијану енергије од 121 GeV у антикоинцидентном моду од 157 GeV-а. Ово са медијанама енергије за појединачни детектор на површини и подземљу Нискофонске лабораторије од 59 GeV-а и 137 GeV-а чини основу за посматрање различитих утицаја на примарно космичко зрачење диференцијално за различите енергије. Овај резултат је приказан у [A1, ВП-1, ВО-1]. Поред тога симулација интеракције детекторског система са космичким зрачењем је био део испитивања фона гама зрачења у оба дела Нискофонске лабораторије што је и приказано у [A2].

2.4.2 Експериментални резултати мерења интензитета мионског флукса

Нискофонска лабораторија користи брзе аналогно-дигиталне конвекторе за дигитализацију сигнала добијених у детекторским системима. За потребе обраде ових дигиталних сигнала развијен је пакет програма за временску и спектралну анализу која омогућава производњу временских серија сигнала како у целом енергетском опсегу депоноване енергије у детекторима тако и за део таквог спектра. Уз то, могуће је коинцидирати сигнале са различитих детектора што је било од значаја при развијању детекторске поставке која даје најбоље резултате. Поређењем симулације са измереним временским серијама спектра депоноване енергије у детекторима, добијају се три временске серије у подземном делу лабораторије и једна временска серија у надземном делу лабораторије са различитим медијанама енергије. Ово омогућава праћење промене флукса на различитим енергијама. Измерени флуксеви миона одговарају оним добијеним симулацијом и износе, усредњено, у подземном делу лабораторије: $46.5 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ за појединачан детектор и $24.9 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ и $21.6 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ за коинцидентни и антикоинцидентни мод асиметричног телескопа. Коришћењем симулације процењени су и грешке у мерењу, које потичу већином услед погрешне детекције Мишелових електрона који депонују енергију која је упоредива са депонованом енергијом миона што ствара малу систематску грешку (која се мора узети у обзир [ВП-3]). Спектри добијени мерењем су упоређени са спектрима добијених симулацијом [A3]. Утврђен је допринос измереном спектру сваке појединачне компоненте секундарног космичког зрачења (електрони, гама фотони, хадрони, миони), што доприноси бољем разумевању детектованог флукса [A1]. Такође омогућено је посматрања варијације флукса за сваку компоненту секундарног космичког зрачења. Коинцидирањем сигнала различитих детектора утврђена је декохеренција која је верификовала симулацију поставке са детекцијом мултимионских догађаја у подземном делу Нискофонске лабораторије. Ови мултимионски догађаји потичу од примарног космичког зрачења енергија преко 75 GeV (чија је медијана енергије 710 GeV).

2.4.3 Утицај соларне модулације на мионски флукс

Активност Сунца значајно утиче на нискоенергетску компоненту космичког зрачења нижих енергија (до 20 GeV) и опада са порастом енергије космичког зрачења. Тај нискоенергијски крај спектра, који је уједно и најобилнији, се детектује коришћењем неутронских монитора. Ово су стандардни детектори космичког зрачења који се могу наћи свуда по свету. Све више се користе и сателити да би се директно мерио флукс примарног космичког зрачења. Мионски детектори детектују мионе нестале од примарних честица више енергије и тиме допуњују мерење флукса. Апериодична активност Сунца, која је праћена избацивањем материје са површине Сунца, изазива Форбушова смањења у флуксу космичког зрачења. Ови периоди веће активности Сунца, током Сунчевог 24. циклуса, су искориштени за утврђивање корелације мионских детектора у Нискофонској лабораторији и мрежи неутронских детектора. Рачунањем Pearson-овог линеарног

корелационог коефицијента као и периоде добијене брзом Фуријевом анализом, током повећане активности Сунца, се утврдило у којој мери постоји корелација и са којим неутронским детекторима. Тиме је потврђена могућност мерења утицаја Сунца на космичко зрачења виших енергија. Постојање више детекторских система на једној геомагнетној локацији, попут Нискофонске лабораторије у Земуну, користи чињеницу да током Форбушовог смањења, на честице различите ригидности различито утиче соларна модулација и мења се енергетски спектар детектованог космичког зрачења. На основу дифузионо конвективног модела амплитуда Форбушовог смањења је инверзно пропорционална компоненти дифузног тензора дуж магнетног поља који је са своје стране пропорционалан неком степену ригидности. Стога се очекује пад амплитуде Форбушовог смањења са повећањем средње ригидности што је и измерено и упоређено са другим детекторима у свету [A1]. Поред пада одброја посматрао се и осетљивост детектора на промене изазване екстремним догађајима на Сунцу преко одступања флукса од усредњене вредности у јединицама стандардне девијације.

3. Списак публикација кандидата

А Радови у међународним часописима

[A1] N. Veselinović, A. Dragić, M. Savić, D. Maletić, D. Joković, R. Banjanac, V. Udovičić, *An underground laboratory as a facility for studies of cosmic-ray solar modulation*, Nucl.Instrum.Meth. A875 (2017) 10-15 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2017.09.008>

[A2] R. Banjanac, D. Maletić, D. Joković, N. Veselinović, A. Dragić, V. Udovičić, I. Aničin, *On the omnipresent background gamma radiation of the continuous spectrum*, Nucl.Instrum.Meth. A745 (2014) DOI: 10.1016/j.nima.2014.01.065

[A3] A. Dragić, V. Udovičić, R. Banjanac, D. Joković, D. Maletić, N. Veselinović, M. Savić, J. Puzović, I. Aničin, *The New Setup in the Belgrade Low-Level and Cosmic-Ray Laboratory*, Nuclear Technology & Radiation Protection (2011), Vol. 26, No. 3, DOI: 10.2298/NTRP1101064N

В Радови у зборницима међународних конференција

ВП-1. 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*, 25th European Cosmic Ray Symposium, Torino 2016

ВП-2. M. Savić, D. Maletić, D. Joković, N. Veselinović, R. Banjanac, V. Udovičić, A. Dragić, *Pressure and temperature effect corrections of atmospheric muon data in the Belgrade cosmic-ray*, J.Phys.Conf.Ser. 632 (2015) DOI: 10.1088/1742-6596/632/1/012059, 24th european cosmic ray symposium, Kiel

ВО-1. N. Veselinović, A. Dragić, D. Maletić, D. Joković, M. Savić, R. Banjanac, V. Udovičić, I. Aničin, *Cosmic rays muon flux measurements at Belgrade shallow underground laboratory* Published in AIP Conf.Proc. 1645 (2015) 421-425, DOI: 10.1063/1.4909614
Exotic nuclei and nuclear/particle astrophysics (v). from nuclei to stars, Sinaia 2014.

ВП-3. D. Maletic, R. Banjanac, D. Jokovic, N. Veselinovic, V. Udovicic, M. Savic, J. Puzovic, I. Anicin, *Stopped cosmic-ray muons in plastic scintillators on the surface and at the depth of 25 m.w.e. (Proceedings Paper)*, 23RD EUROPEAN COSMIC RAY SYMPOSIUM (AND 32ND RUSSIAN COSMIC RAY CONFERENCE), (2013), vol. 409

ВП-4. A. Dragic, I. Anicin, R. Banjanac, V. Udovicic, D. Jokovic, D. Maletic, M. Savic, N. Veselinovic, J. Puzovic, *Neutrons produced by muons at 25 mwe (Proceedings Paper)*, 23RD EUROPEAN COSMIC RAY SYMPOSIUM (AND 32ND RUSSIAN COSMIC RAY CONFERENCE), (2013), vol. 409 br.

Г Радови у зборницима домаћих конференција

1. Р. Бањанац, А. Драгић, В. Удовичић, Д. Јоковић, Д. Малетић, **Н. Веселиновић**, М. Савић, Б. Грабеж, И. Аничин, Ј. Пузовић, *Варијације радона и космичког зрачења као извори временске варијације фона гама зрачења у нискофонској гама спектрометрији XII Конгрес физичара Србије*, 28 април – 02 мај, 2013, Врњачка Бања, Србија
2. А. Драгић, **Н. Веселиновић**, Д. Малетић, Д. Јоковић, Р. Бањанац, В. Удовичић, И. Аничин, *О вези између интензитета космичког зрачења и климе на Земљи*, Конгрес физичара Србије, 28 април – 02 мај, 2013, Врњачка Бања, Србија

Закључак

На основу изложеног Комисија закључује да докторски рад „РЕАЛИЗАЦИЈА ДЕТЕКТОРСКОГ СИСТЕМА У ПОДЗЕМНОЈ ЛАБОРАТОРИЈИ ЗА ИЗУЧАВАЊЕ СОЛАРНЕ МОДУЛАЦИЈЕ КОСМИЧКОГ ЗРАЧЕЊА У ХЕЛИОСФЕРИ“ кандидата Николе Веселиновића, даје значајан допринос физици космичког зрачења. Делови тезе кандидата су публиковани у водећим међународним часописима и представљени на међународним конференцијама из области. Пошто су задовољени сви Законом о универзитету и Статутом Физичког факултета прописани услови за одобравање одбране тезе

ПРЕДЛАЖЕМО

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

Београд, _____2018. год.

Комисија:

др Александар Драгић, виши научни сарадник
Институт за физику

проф др Јован Пузовић, редовни професор
Физички факултет, Универзитет у Београду

Проф др Марија Димитријевић-Ћирић, ванредни професор
Физички факултет, Универзитет у Београду