

# НАСТАВНО НАУЧНОМ ВЕЋУ ФИЗИЧКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Пошто смо на VI седници Нучно-наставног Већа Физичког факултета Универзитета у Београду одржаној 27. марта 2019. године одређени за чланове Комисије за припрему извештаја о докторском раду "Моделовање утицаја атмосфере на мионску компоненту секундарног космичког зрачења" из научне области Физика језгара и честица, коју је кандидат Михаило Савић предао Физичком факултету у Београду, подносимо следећи

## РЕФЕРАТ

### 1 Основни подаци о кандидату

#### 1.1 Биографски подаци

Михаило Савић рођен је 31.12.1975. године у Београду. Дипломирао је 2009. године а затим 2011. године завршио и мастер студије године на Физичком факултету у Београду. Исте године уписао је докторске студије на Физичком факултету Универзитета у Београду.

У периоду од 2009. до 2011. године био је запослен на Физичком факултету у Београду, где је у оквиру катедре за Физику језгра и честица држао рачунске и експерименталне вежбе из неколико предмета. Од 2011. године запослен је на Институту за физику у Београду као члан Нискофонске лабораторије за нуклеарну физику.

Од 2011. до 2014. године, као члан Београдског SHINE Team-а, био је део NA61/-SHINE колаборације. Од 2015. године, као члан Београдског MICE Team-а, део је MICE колаборације.

#### 1.2 Научна активност

Као члан Нискофонске лабораторије за нуклеарну физику, у оквиру пројекта ОИ 171002, "Нуклеарне методе истраживања ретких догађаја и космичког зрачења", ради на анализи утицаја атмосферских параметара на мионску компоненту секундарног космичког зрачења, као и на проблематици ефикасности мерења исте. Дао је значајан допринос и коаутор је два рада M21 категорије, једног рада M22 и једног рада M23 категорије. Резултати су презентовани на три међународне конференције.

У оквиру NA61/SHINE колаборације радио је на анализи продукције барионских резонанци, продукцији података, одржавању и надгледању Time-Of-Flight (TOF) поддетектора, калибрацији TOF података, одржавању и развоју софтвера за калибрацију, реконструкцију и геометрију. Дао је допринос и коаутор је на четири рада M21 категорије.

У оквиру MICE колаборације радио је на развоју апликације за визуелизацију догађаја (EventViewer) снимљених у оквиру MICE експеримента. Дао је допринос и коаутор је на једном раду M23 категорије.

## 2 Опис предатог рада

### 2.1 Основни подаци

Ова дисертација урађена је под руководством др Димитрија Малетића, вишег научног сарадника Института за физику у Београду. Др Димитрије Малетић испуњава услове за менторство обзиром да има велико искуство у најужој области истраживања и техникама коришћеним у изради дисертације. Осим ментора, значајан допринос у раду и публикацијама дали су и остали чланови Нискофонске лабораторије за нуклеарну физику Института за физику у Београду, а нарочито др Александар Драгић, виши научни сарадник Института за физику у Београду.

Дисертација има 148 страна, не рачунајући насловне и стране са општим информацијама, садржај, литературу, списак слика и табела и биографију. Текст садржи 66 слика, 10 табела и 109 референци.

Текст дисертације подељен је на седам поглавља, од којих прво представља увод.

У другом поглављу представљени су извори и механизми убрзања, неке основне карактеристике (хемијски састав, енергетски спектар и др.), главни механизми модулације и асоциране варијације интензитета примарног космичког зрачења. Такође, описани су неки основни процеси у оквиру честичне физике значајни за формирање и пропагацију каскада секундарног космичког зрачења, дат је преглед главних карактеристика пропагације ових каскада, као и неке особине мионске компоненте.

У трећој глави представљени су различити емпиријски и теоријски модели метеоролошких ефеката на мионску компоненту секундарног космичког зрачења, методи за корекцију развијени на основу датих модела, као и резултати примене ових метода на подацима мереним у Нискофонској лабораторији.

У четвртом поглављу описана је експериментална поставка, формат и основне технике процесирања мерених података, као и извори и обрада метеоролошких параметара неопходних за анализу.

У петом поглављу уводи се емпиријска анализа метеоролошких ефеката применом технике декомпозиције на основне компоненте и демонстрира ефикасност одговарајуће корекције.

У шестом поглављу се уводи емпиријска анализа метеоролошких ефеката применом метода за мултиваријантну регресију, имплементираних у TMVA пакету у оквиру ROOT окружења за анализу.

Седмо поглавље представља закључак који сумира и пореди уведене методе.

## 2.2 Предмет и циљ рада

Шира област истраживања која обухвата тему ове дисертације је Физика језгара и честица. Ужу област истраживања представља Физика космичког зрачења, односно најуже утицај атмосферских параметара на секундарно космичко зрачење.

Примарно космичко зрачење чине високо енергетске честице, углавном галактичког порекла, које након уласка у Земљину атмосферу интерагују са атомима елемената који чине ваздух. У јаким интеракцијама честица космичког зрачења долази до креације нових честица, секундарног космичког зрачења, које настављају да пропадају ка површини Земље у форми пљуска честица. Значајан број честица које стижу до нижих нивоа атмосфере чине неутрони и миони. Стога су, између осталих, широко раширени типови детектора космичког зрачења управо и неутронски и мионски монитори.

Примарни циљ истраживања представља потпуније разумевање и моделовање метеоролошких ефеката на мионску компоненту секундарног космичког зрачења, ради изучавања варијација мионског флукса неатмосферског порекла. За успешну анализу одговарајућих процеса предуслов је поуздана корекција на атмосферске параметре.

Пре увођења нових, неопходно је демонстрирати ефикасност постојећих метода на истом скупу података и тако утврдити референтне резултате. У овом раду су примењени следећи методи: метод ефективног нивоа продукције, интегрални метод и метод усредњене температуре.

У раду се уводе два потпуно нова емпиријска метода за корекцију барометарског и температурског ефекта, уз могуће проширење на шири скуп атмосферских параметара. Нов приступ подразумева примену савремених нумеричких техника, пре свега декомпозицију и анализу основних компоненти (Principal Component Analysis – PCA) и мултиваријантну анализу (Multivariate Analysis – MVA) базирану на техникама машинског учења. Мотивација за увођење ових техника је покушај да се отклоне недостаци постојећих метода, као што су непотпуност или међузависност вишеструких корекција код емпиријских метода (метод ефективног нивоа продукције), односно ослањање на различите апроксимације код теоријских метода (интегрални метод). Додатну предност представља чињеница да је уведене методе могуће брзо и једноставно применити у различитим експерименталним ситуацијама, као и да су применљиве на било који мионски монитор, независно од географске локације или дубине на којој се налази.

Метод декомпозиције на основне компоненте подразумева да се скуп корелисаних атмосферских варијабли замени скупом линеарно независних варијабли и добар је кандидат обзиром да је зависност флукса космичких миона од атмосферских температура и притиска изразито линеарна. Једна предност у односу на нелинеарне или

стохастичке методе је да новодобијени сет основних компоненти представља линеарну комбинацију полазног скупа варијабли те омогућава физичку интерпретацију евентуално уочених зависности. Такође, могуће је издвојити компоненте које најзначајније варирају и тиме свести полазни комплексни скуп података на новодобијени скуп потенцијално ниже димензије. Додатна предност је да је могуће укључити атмосферски притисак у почетни скуп варијабли и тиме искључити могућу резидуалну корелацију атмосферског притиска и атмосферских температура која иначе може неповољно утицати на одређивање барометарског коефицијента.

Мултиваријантни методи за класификацију и регресију, базирани на техникама машинског учења, представљају моћан скуп нумеричких алата чија имплементација је данас увелико олакшана постојањем довољно снажних рачунара. Управо је мултиваријантна регресија од интереса за корекцију метеоролошких ефеката мионске компоненте секундарног космичког зрачења, јер је могуће добити предвиђену вредност одброја миона (излазна варијабла) претпостављајући да зависи само од улазних варијабли (атмосферски параметри). Анализа се типично састоји од два корака: тренинга (training, testing) и апликације. У оквиру тренинга алгоритми се оптимизују на једном делу података, да би затим резултујућа мапирана функција одговора била примењена на новом, ширем сету података.

Корекција на метеоролошке ефекте је од суштинског значаја за детекторе космичких миона. Квалитет корекције директно утиче на ефикасност и осетљивост детекције. Примена предложених метода на експериментима базираним на мионским детекторима, повећава њихову осетљивост, како на варијације примарног космичког зрачења, тако и на варијације геомагнетног и соларног магнетног поља. Резултати су, између осталог, од непосредног значаја за мионску дијагностику атмосфере и магнетосфере. У питању је метода изучавања процеса у хелиосфери, магнетосфери и атмосфери на основу мерења детекторима базираним на површини земље. Практичну апликацију би могао да представља систем за рано упозорење кад су у питању геомагнетне олује које прате екстремне догађаје на Сунцу, а који би се ослањао на земаљске детекторе.

Уведеним методама би било могуће испитати могућност корекције на резидуални температурски ефекат код неутронских монитора, који утиче на неутроне настале у реакцијама пиона и миона са језгрима атома ваздуха као и са самим детектором, за шта тренутно не постоји широко распрострањен метод.

Такође, успешна демонстрација уведених метода је значајна јер омогућава једноставну генерализацију на шири скуп метеоролошких параметара. Теорија предвиђа диференцијалну зависност флукса тврде компоненте космичких миона од влажности атмосфере као и додатну поправку барометарског ефекта на динамичку компоненту притиска.

Поред веће осетљивости на варијације примарног космичког зрачења и ефекте

у хелио, односно магнетосфери, као што су Форбушеви догађаји, на основу коригованих података је могуће детектовати догађаје или ефекте који се претходно нису сигнификатно разликовали од позадинских флукуација.

## 2.3 Публикације

У овој докторској дисертацији представљени су резултати објављени у четири рада у међународним часописима [A1, A2, A3, A8]. Сви радови имају импакт фактор већи од 1. Радови [A1, A3] су објављени у часописима категорије M21, рад [A2] је објављен у часопису категорије M22, док је рад [A9] објављен у часопису категорије M23. Резултати су презентовани у оквиру два усмена излагања и два постера на три међународне конференције.

Најзначајнији допринос дат је у радовима [A1, A2], на којима је Михаило Савић и први аутор. Ови радови нису цитирани у изради других докторских дисертација, те се званично прилажу уз дисертацију.

## 2.4 Преглед научних резултата изложених у тези

Главни делови научног рада представљају демонстрирање постојећих метода за анализу и корекцију метеоролошких ефеката, процесирање експерименталних и моделованих података коришћених у анализи и увођење и демонстрацију ефикасности два нова емпиријска метода.

### 2.4.1 Постојећи методи

Пре свега, демонстрирано је овладавање постојећим емпиријским и теоријским моделима. На основу добијених резултата кориговане су временске серије детектованог одброја космичких миона и тиме дефинисане референтне вредности за ефикасност корекције. Када је у питању теоријски метод, функција густине температурског коефицијента је одређена нумерички, док је барометарски коефицијент одређен линеарном регресијом на основу података претходно коригованих на температурски ефекат. У случају емпиријских и семиемпиријских метода, одговарајући коефицијенти добијени су линеарном (метод усредњене температуре) или вишеструком линеарном регресијом (метод ефективног нивоа продукције).

### 2.4.2 Експериментални подаци

Подаци о одброју космичких миона коришћени у анализи су резултат мерења мионским мониторима у оквиру надземне (ниво тла) и подземне лабораторије (на дубини од  $25m.w.e.$ ) Нискофонске лабораторије за нуклеарну физику Института за физику у Београду.

За анализу је неопходно познавање метеоролошких параметара и то атмосферског притиска и температуре атмосфере. Подаци о притиску и температури на нивоу тла преузети су из мреже мерних станица локалних и државних метеоролошких служби. Подаци о температурама различитих слојева атмосфере добијени су на основу симулационих модела кретања ваздушних маса. Основни скуп података је интерполиран, одакле је затим било могуће узорковати податке са жељеном временском резолуцијом.

### **2.4.3 Декомпозиција на основне компоненте**

Први од новоуведених метода за анализу и корекцију метеоролошких ефеката базира се на техници декомпозиције на основне компоненте. Полазни скуп корелисаних метеоролошких варијабли је трансформисан у скуп некорелисаних компоненти. Из добијеног скупа издвојен је подскуп сигнификантних компоненти, које садрже највећи део варијације полазног скупа. Коначно, на основу корелације са детектованим одбројем миона издвојен је подскуп коришћен за анализу. Тиме је број улазних варијабли за анализу редукован са 26 на 5. Помоћу линеарне регресије одређени су одговарајући парцијални температурски коефицијенти, на основу којих је детектовани одброј коригован.

### **2.4.4 Мултиваријантна анализа применом техника машинског учења**

Други представљени метод базира се на примени различитих алгоритама за мултиваријантну регресију имплементираних у пакету TMVA, у оквиру окружења за анализу ROOT. Методи за су тренирани на изабраном подскупу података, где су улазне варијабле представљале атмосферски притисак, температуру на нивоу тла и моделоване температуре различитих слојева атмосфере, док је излазна варијабла била детектовани одброј. За изабране методе одређени су оптимални параметри. Алгоритми дају предикцију одброја космичког зрачења који садржи варијацију пореклом само од улазних метеоролошких варијабли, помоћу кога је израчунат коригован одброј.

## **3 Списак публикација кандидата**

### **A. Радови у међународним часописима**

Радови у водећим међународним часописима ( $ИФ > 1$ )

[A1] M. Savić, A. Dragić, D. Maletić, N. Veselinović, R. Banjanac, D. Joković, V. Udovičić, “A novel method for atmospheric correction of cosmic-ray data

based on principal component analysis”. y: *Astroparticle Physics* 109 (2019), c. 1–11. **[IF 3.2]**

[A2] M. Savić, N. Veselinović, A. Dragić, D. Maletić, D. Joković, R. Banjanac, V. Udovičić, “Rigidity dependence of Forbush decreases in the energy region exceeding the sensitivity of neutron monitors”. y: *ADVANCES IN SPACE RESEARCH* 63.4 (2019), c. 1483–1489. **[IF 1.5]**

[A3] 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”. y: *NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION A-ACCELERATORS SPECTROMETERS DETECTORS AND ASSOCIATED EQUIPMENT* 875 (2017), c. 10–15. **[IF 1.3]**

[A4] N. Abgrall et al. “Measurement of negatively charged pion spectra in inelastic p plus p interactions at p(lab)=20, 31, 40, 80 and 158 GeV/c”. y: *EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL C* 74.3 (2014), c. -. **[IF 5.0]**

[A5] N. Abgrall et al. “Measurements of production properties of K-S(0) mesons and Lambda hyperons in proton- carbon interactions at 31 GeV/c”. y: *PHYSICAL REVIEW C* 89.2 (2014), c. -. **[IF 3.2]**

[A6] N. Abgrall et al. “NA61/SHINE facility at the CERN SPS: beams and detector system”. y: *JOURNAL OF INSTRUMENTATION* 9 (2014), c. -. **[IF 1.4]**

[A7] M. Bogomilov et al. “Lattice design and expected performance of the Muon Ionization Cooling Experiment demonstration of ionization cooling”. y: *PHYSICAL REVIEW ACCELERATORS AND BEAMS* 20.6 (2017), c. -. **[IF 1.8]**

[A8] A. Dragić, V. Udovičić, R. Banjanac, D. Joković, D. Maletić, N. Veselinović, M. Savić, J. Puzović, I. Aničin, “The New Set-Up in the Belgrade Low-Level and Cosmic-Ray Laboratory”. y: *NUCLEAR TECHNOLOGY AND RADIATION PROTECTION* 26.3 (2011), c. 181–192. **[IF 1.1]**

Радови у осталим међународним часописима

[A9] N. Abgrall et al. “Pion emission from the T2K replica target: Method,

results and application". у: NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION A-ACCELERATORS SPECTROMETERS DETECTORS AND ASSOCIATED EQUIPMENT 701 (2013), с. 99–114. [IF 0.7]

### **В. Радови у зборницима међународних конференција**

[BO-1] 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 ECRS 2016 Proceedings - eConf C16-09-04.3

[BO-2] N. Veselinović, A. Dragić, D. Maletić, D. Joković, M. Savić, R. Banjanac, V. Udovičić, I. Aniĉin, Cosmic rays muon flux measurements at Belgrade shallow underground laboratory, AIP Conf.Proc. 1645 (2015) 421-425, Exotic nuclei and nuclear/particle astrophysics (v). from nuclei to stars, Sinaia 2014.

[BP-1] 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 station, 24th European Cosmic Ray Symposium (ECRS), (2015), vol. 632

[BP-2] 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 XXV ECRS 2016 Proceedings - eConf C16-09-04.3

### **Г. Радови у зборницима домаћих конференција**

[GP-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

[GP-1] Ј. Пузовић, Б. Грабеж, Д. Малетић, Д. Јоковић, М. Савић, Д. Манић, NA61/SHINE експеримент и детекторски систем, XII Конгрес



физичара Србије, 28 април – 02 мај, 2013, Врњачка Бања, Србија

## 4 Провера оригиналности

Провером оригиналности докторске дисертације Михаила Савића, спроведене 25.03.2019. године од стране Универзитетске библиотеке Светозар Марковић, Београд, на основу Правилника о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду ([http://valtez.rcub.bg.ac.rs/Files/Pravilnik\\_o\\_postupku\\_provere\\_originalnosti-dok\\_disert.pdf](http://valtez.rcub.bg.ac.rs/Files/Pravilnik_o_postupku_provere_originalnosti-dok_disert.pdf)) помоћу програма “iThenticate”, утврђено је да дисертација садржи 2% текста који се јавља у другим текстовима доступним библиотеци (базе свих часописа са SCI листе, базе докторских дисертација и мастер теза у свету и код нас). Поклапања су нађена са укљученим опцијама: “Quotes Excluded” (изоставља из провере цитирани текст) и “Bibliography Excluded” (изоставља из провере референце).

Највећи део поклапања се односи на делове математичких формула и случајне речи у тексту које се налазе у радовима публикованим од стране докторанда. Сва преклапања су са <1% укључујући и два рада која су коришћена у дисертацији, у којима су нађени назив лабораторије, опреме или ефеката који се изучавају, као и спорадичне речи при описивању метода и коришћених математичких формула.

Стога сматрамо да је утврђено да је докторска дисертација Михаила Савића у потпуности оригинална, као и да су у потпуности испоштована академска правила цитирања и навођења, те се прописани поступак припреме за њену одбрану може наставити.

## ЗАКЉУЧАК

На основу оригиналности и значаја представљених резултата, Комисија је закључила да докторски рад "Моделовање утицаја атмосфере на мионску компоненту секундарног космичког зрачења" који је предао Михаило Савић даје значајан допринос физици космичког зрачења и да су задовољени сви прописани услови за одобравање одбране тезе. Стога предложено Научно-наставном већу Физичког факултета да одобри њену одбрану.

Београд, \_\_\_\_\_

### **Чланови комисије:**

Редовни професор др Миодраг Крмар  
Департаман за физику, Природно-математички факултет,  
Универзитет у Новом Саду

\_\_\_\_\_

Ванредни професор др Марија Димитријевић-Тирић  
Физички факултет, Универзитет у Београду

\_\_\_\_\_

Доцент др Душко Латас  
Физички факултет, Универзитет у Београду

\_\_\_\_\_

Виши научни сарадник др Димитрије Малетић  
Институт за физику, Универзитет у Београду