

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ФИЗИЧКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Пошто смо на X седници Наставно-научног већа Физичког факултета Универзитета у Београду одржаној 20. септембра 2023. године одређени за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације „Properties of Quark-Gluon Plasma Inferred from High- $p_{\perp}$  Data“ (на српском језику: „Одређивање особина кварк-глуонске плазме помоћу високоенергијских честица“) из научне области физика високих енергија и нуклеарна физика, коју је кандидат Стефан Стојку, мастер физичар, предао Физичком факултету Универзитета у Београду 14. септембра 2023. године, подносимо следећи

### ИЗВЕШТАЈ

#### 1. Основни подаци о кандидату

##### 1.1. Биографски подаци

Стефан Стојку је рођен 15. априла 1994. године у Панчеву, где је похађао гимназију „Урош Предих“, коју је завршио као носилац Вукове дипломе. Године 2012. уписао је основне академске студије на Физичком факултету Универзитета у Београду, смер: Теоријска и експериментална физика, и дипломирао 2018. године са просечном оценом 9,82/10,00. Током студија, од јуна до септембра 2016. године, учествовао је у ЦЕРН-овој Летњој школи, где је радио у оквиру групе за теоријску физику. У октобру 2018. године уписао је мастер академске студије на Физичком факултету Универзитета у Београду, и завршио их у јулу 2019. године (просечна оцена: 9,67/10,00), када је одбранио свој мастер рад: „Одређивање фактора пропорционалности температурске зависности губитака енергије у кварк-глуонској плазми из експерименталних података“. Истраживање за његов мастер рад спроведено је под менторством др Магдалене Ђорђевић и касније објављено као чланак у часопису Physical Review C.

У новембру 2019. године, уписао је докторске академске студије на Физичком факултету Универзитета у Београду из уже научне области: физика високих енергија и нуклеарна физика под менторством др Магдалене Ђорђевић. Био је ангажован на пројекту основних истраживања Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије ОИ 171004 („ATLAS експеримент и физика честица на LHC енергијама“) у Лабораторији за физику високих енергија Института за физику у Београду. Стефан Стојку је од 01. 10. 2018. до 31. 08. 2023. био ангажован на пројекту ERC-2016-CoG:725741 („A novel Quark-Gluon Plasma tomography tool: from jet quenching to exploring the extreme medium properties“), а 18. 12. 2019. запослен је на Институту за физику као истраживач приправник. На Колегијуму докторских студија Физичког факултета Универзитета у Београду одржаном 01. 12. 2021. године одбранио је тему докторске дисертације под насловом „Properties of Quark-Gluon Plasma Inferred from High- $p_{\perp}$  Data“ (на српском језику: „Одређивање особина кварк-глуонске плазме помоћу високоенергијских честица“), а за ментора је одређена др Магдалена Ђорђевић, научни саветник. Након одбране теме докторске дисертације изабран је у звање истраживач сарадник.

Током докторских студија, Стефан Стојку је објавио пет истраживачких радова у области физике високих енергија (категорије M21) и један чланак у области квантитативне биологије (категорије M21).

Говори српски, енглески, румунски и немачки језик.

## 1.2. Научна активност

Истраживање Стефана Стојку је у области теоријског проучавања кварк-глуонске плазме (КГП). Циљ истраживања је примена претходно развијеног DREENA модела за проучавање особина кварк-глуонске плазме помоћу губитака енергије високоенергијских честица, као и побољшање DREENA модела. Стефан Стојку је радио на одређивању зависности губитака енергије високоенергијских честица у КГП од температуре, што је била тема његовог мастер рада. Радио је и на развоју методе за одређивање просторне анизотропије кварк-глуонске плазме из високоенергијских података. Осим тога, радио је и на проучавању раних стадијума еволуције кварк-глуонске плазме, као и на побољшању DREENA модела кроз имплементацију процеса са вишеструким центрима расејања високоенергијских честица у медијуму.

Резултати везани за одређивање температурске зависности губитака енергије високоенергијских честица у КГП чине део његовог мастер рада, а објављени су у Phys. Rev. C **103**, 024908, раду на којем је Стефан Стојку први аутор. У овом раду је помоћу аналитичких аргумената утврђено коју опсерваблу је могуће употребити за одређивање ове температурске зависности. Затим су вредности ове опсервабле израчунате у оквиру DREENA-C модела, и одређено је да је зависност губитака енергије високоенергијских честица од температуре скоро линеарна, што је у супротности са другим (једноставнијим) моделима, и у складу са мноштвом експерименталних података.

Стефан Стојку се бавио и проучавањем раних стадијума еволуције кварк-глуонске плазме, односно, еволуције пре почетног тренутка примене релативистичке хидродинамике за опис медијума. У првој фази овог истраживања је испитано време термализације кварк-глуонске плазме. Ово је изведено тако што је генерисано више температурских профила са различитим временима термализације, а затим су у оквиру DREENA-A модела на овим профилима израчунате високоенергијске опсервабле, које су затим упоређене са експерименталним подацима. Даље истраживање иде у смеру имплементације нетривијалне еволуције КГП пре термализације, у складу са савременим описом еволуције медијума. Резултати су објављени у Phys. Rev. C **105**, L021901

Први резултати везани за проучавање анизотропије КГП су објављени у Phys. Rev. C **100**, 031901(R). У овом раду је испитано да ли и на који начин је могуће довести у везу високоенергијске податке са просторном анизотропијом кварк-глуонске плазме. Помоћу једноставних закона скалирања и аналитичких аргумената који су оправдани у оквиру поједностављеног модела DREENA-B, закључено је за коју високоенергијску опсерваблу се очекује да је у вези са просторном анизотропијом кварк-глуонске плазме. Даље истраживање настављено је коришћењем модела DREENA-A, где се медијум моделује као 3+1-димензиона хидродинамичка еволуција. Опсервабла за коју је у оквиру DREENA-B модела добијено да се може довести у везу са просторном анизотропијом израчуната је у оквиру модела DREENA-A, а затим је потврђено да се она заиста може довести у везу са анизотропијом медијума. Резултати овог истраживања објављени су у Physics Letters B **835**, 137501.

Стефан Стојку се такође бавио побољшањем модела DREENA, кроз имплементацију вишеструким центара расејања у медијуму. Наиме, већина модела укључује радијативне губитке енергије након расејања на једном или бесконачно центара расејања. Ниједна од ове две апроксимације није реалистична, те је Стефан Стојку у оквиру свог истраживања генерисао DREENA модел тако да укључује коначан број центара расејања. Резултати овог истраживања су тренутно под рецензијом у Phys. Rev. C.

Искуство из нумеричке анализе података је применио у квантитативној биологији, на једном од тренутно најакутелнијих проблема – разумевању динамике преношења COVID-19 у популацији. Резултати овог истраживања су објављени у Global Challenges 2021, 5, 2000101 раду.

Представио је своје резултате на бројним конференцијама и радионицама у облику говора и постера. 2022. године освојио је награду за најбољу постер-презентацију на 29. Међународној конференцији посвећеној ултрарелатистичким сударима тешких јона „Quark Matter 2022“, одржаној од 4. до 10. априла у Кракову, Пољска.

## **2. Опис предатог рада**

### **2.1. Основни подаци**

Дисертација је урађена под руководством др Магдалене Ђорђевић, научног саветника, која је запослена на Институту за физику у Београду. Менторка испуњава услове Физичког факултета и Универзитета у Београду за руковођење израдом докторске дисертације јер је у научном звању и аутор је великог броја радова из области физике високих енергија и нуклеарне физике, који су објављени у врхунским међународним часописима и представљени на међународним и домаћим конференцијама.

Дисертација је написана на енглеском језику на 119 страна, не рачунајући насловну страну, захвалнице, сажетак, садржај, биографију аутора и изјаве. У тексту се налази 70 слика, а у библиографији је наведено 236 референци. Теза је подељена у 6 поглавља и садржи 7 додатака.

### **2.2. Предмет и циљ рада**

Предложена докторска дисертација припада области физике високих енергија и нуклеарне физике, а бави се проучавањем кварк-глуонске плазме.

Кварк-глуонска плазма је ново стање материје које настаје у експериментима који укључују сударе тешких јона убрзаних до ултрарелативистичких брзина у Великом сударачу хадрона (LHC) и у Релативистичком сударачу тешких јона (RHIC). Она се састоји од слободних кваркова, антикваркова и глуона. На основу модерне космологије, кварк-глуонска плазма је постојала убрзо након Великог праска, те је проучавање кварк-глуонске плазме од фундаменталне важности. Тиме се стиче увид у ново стање материје чије особине одређује јака интеракција, унапређујући разумевање раног универзума.

Након судара два језгра, већина насталих честица (99.9%) које чине кварк-глуонску плазму има ниску енергију и формира термализован медијум. Мали број (0.1%) честица има високу енергију - оне настају рано у еволуцији система, пролазе кроз медијум интерагујући са њим посредством јаке интеракције, и на тај начин носе информацију о његовим особинама. Ово је главна идеја истраживања у предложеној дисертацији. Резултати ће показати како теорија, нумерички прорачуни и подаци који су у вези са високоенергијским честицама могу бити коришћени заједно са физиком нискоенергијских честица како би се одредиле важне особине кварк-глуонске плазме.

Резултати су подељени у три одељка: први је везан за почетне стадијуме еволуције кварк-глуонске плазме, други за просторну анизотропију кварк-глуонске плазме настале у сударима тешких јона, док се трећи бави проширењем динамичког формализма губитка енергије на случај вишеструких центара расејања у медијуму.

Уобичајено је да се колективно кретање нискоенергијских честица које чине медијум настао у сударима тешких јона описује применом релативистичке хидродинамике. Међутим, динамика пре почетног времена хидродинамичке еволуције кварк-глуонске плазме још увек није одређена. У предложеној дисертацији, коришћењем теорије и података везаних за високоенергијске честице, испитане су ране фазе еволуције кварк-глуонске плазме, пре почетка ширења медијума у трансверзалној равни, које је добро описано релативистичком хидродинамиком. Један од циљева овог дела дисертације је одређивање почетног времена хидродинамичке трансверзалне експанзије, које је важан параметар, а до сада недовољно прецизно одређиван коришћењем физике нискоенергијских честица. Ради остваривања овог циља, прво је разматран једноставан модел без еволуције медијума у трансверзалној равни пре остваривања равнотеже, и коришћене су нумеричке симулације високоенергијских честица и поређење са експерименталним подацима у циљу одређивања вредности овог параметра. Имајући у виду да се не сматра да је модел без еволуције медијума пре остваривања равнотеже реалистичан, у наредном кораку, проширен је укључивањем еволуције медијума пре почетног времена хидродинамичке трансверзалне експанзије.

Просторна анизотропија кварк-глуонске плазме настале у сударима тешких јона – мера одступања насталог медијума од сферног облика – једна је од његових фундаменталних особина. Међутим, упркос важности ове опсервабле, још увек није могуће одредити њене вредности директно из експерименталних података. У предложеној дисертацији показано је како се ово може извести коришћењем високоенергијских података. Наиме, прво је разматран поједностављен модел, где се медијум шири у лонгитудиналном правцу. Након тога, прелази се на реалистичан, хидродинамички опис медијума, који се шири и у трансверзалној равни, и испитано је да ли његова просторна анизотропија може бити повезана са високоенергијским опсерваблама.

Конечно, разматран је проблем вишеструких центара расејања високоенергијских честица у медијуму. Наиме, већина постојећих формализама који описују радијативне губитке енергије високоенергијских честица укључује расејање на једном или на бесконачном броју центара расејања. На основу прве од ових апроксимација, џет наилази на један центар расејања пре него што израчи глуоне – она је коришћена у динамичком формализму губитка енергије високоенергијских честица који чини основу модела DREENA. У другој апроксимацији, џетови наилазе на бесконачан број центара расејања пре него што израче глуоне. С обзиром на то да је величина медијума који настаје у сударима тешких јона величине неколико фемтометара, а да је средњи слободан пут партона у медијуму око 1fm, јасно је да ниједна од ових апроксимација није реалистична. У предложеној дисертацији изведени су изрази за радијативне губитке енергије у оквиру динамичког формализма губитка енергије до четвртог реда у развоју по броју центара расејања, и имплементирани у адекватно уопштен нумерички формализам како би се произвела предвиђања за лаке и тешке честице.

### 2.3. Публикације чији су резултати приказани у дисертацији

У овој докторској дисертацији су представљени резултати четири рада, и то три рада објављена у часописима категорије M21, једног под позитивног рецензијом у часопису категорије M21, и једног саопштења са конференције објављеног у посебном издању часописа категорије M23.

Радови објављени у врхунским међународним часописима (M21):

1. **Stefan Stojku**, Jussi Auvinen, Marko Djordjevic, Pasi Huovinen, and Magdalena Djordjevic, *Early evolution constrained by high- $p_{\perp}$  quark-gluon plasma tomography*, Physical Review C **105**, L021901 (2022) (ISSN: 2469-9985, IF = 2.9)

2. Magdalena Djordjevic, **Stefan Stojku**, Marko Djordjevic, and Pasi Huovinen, *Shape of the quark gluon plasma droplet reflected in the high- $p_{\perp}$  data*, Phys. Rev. C **100**, 031901(R) (2019) (ISSN: 2469-9985, IF = 2.9)
3. **Stefan Stojku**, Jussi Auvinen, Lidija Zivkovic, Pasi Huovinen, Magdalena Djordjevic, *Jet-perceived anisotropy revealed through high- $p_{\perp}$  data*, Physics Letters B **835**, 137501 (2022) (ISSN: 0370-2693, IF = 3.9)

Саопштење са конференције објављено у специјалном издању часописа категорије **M23**:

1. **Stefan Stojku**, Jussi Auvinen, Marko Djordjevic, Magdalena Djordjevic, Pasi Huovinen, *Initial Time  $\tau_0$  Constrained by High- $p_{\perp}$  Data*, Acta Phys. Pol. B Proc. Suppl. **16**, 1-A156 (2023) (ISSN: 0587-4254, IF = 0.4)

Рад под рецензијом у врхунском међународном часопису (**M21**):

1. **Stefan Stojku**, Bojana Ilic, Igor Salom, Magdalena Djordjevic, *Importance of higher orders in opacity in QGP tomography*, arXiv:2303.14527 [nucl-th] (под рецензијом у Physical Review C) (ISSN: 2469-9985, IF = 2.9)

## 2.4. Преглед научних резултата изложених у дисертацији

Ова докторска дисертација подељена је у шест поглавља.

У првом поглављу дат је увод у проблематику која је разматрана у дисертацији и укратко су описани концепти и физичке величине који су релевантни за проучавање кварк-глуонске плазме. Описани су модели почетног стања који су коришћени у изради дисертације, као и релативистичка хидродинамика, која успешно описује нискоенергијске конституенте кварк-глуонске плазме.

Друго поглавље представља кратак преглед коришћене методологије истраживања. Уведен је динамички формализам губитка енергије, који се у дисертацији примењује за рачунање губитка енергије ретких високоенергијских честица у медијуму. Овај формализам је интегрисан у DREENA модел, који служи за израчунавање неопходних опсервабли које су коришћене у даљој анализи у дисертацији.

У трећем поглављу су представљени резултати који се односе на изучавање раних стадијума формирања кварк-глуонске плазме. Основни циљ је одређивање вредности почетног времена хидродинамичке (трансверзалне) експанзије медијума. Ради остваривања овог циља, прво су разматрани температурски профили генерисани без трансверзалне експанзије медијума пре хидродинамичке еволуције, и упоређивањем теоријских предвиђања са експерименталним подацима, закључено је да се слагање са експерименталним подацима добија у случају коришћења каснијег почетног времена (око 1fm/c). Затим су разматрани температурски профили који укључују еволуцију медијума пре хидродинамичке еволуције, што је довело до истог закључка – експериментални подаци фаворизују каснији почетак трансверзалне хидродинамичке експанзије.

Четврто поглавље садржи резултате који се односе на изучавање просторне анизотропије кварк-глуонске плазме која настаје у ултрарелативистичким сударима тешких јона. Овде је показано како се ова анизотропија може одредити коришћењем високоенергијских честица. Прво је разматрана поједностављена слика: једнодимензиона еволуција медијума без трансверзалног ширења. Затим се прешло на пуни 3+1-димензиони хидродинамички опис медијума, и испитана

је веза између високоенергијских података и просторне анизотропије медијума коришћењем различитих колизионих система, енергије судара, почетних стања и модела хидродинамичке експанзије. На основу анализе и резултата у овом поглављу, анизотропија медијума се може директно повезати са модификованим односом високоенергијских опсервабли,  $v_2$  и  $R_{AA}$ . На основу овога, предложена је нова опсервабла – *jet-perceived anisotropy* („температура коју виде цетови“), која је пропорционална овом модификованом односу, али која се може и директно израчунати из хидродинамичке еволуције медијума. Закључено је да хидродинамички прорачуни треба да буду подешени да репродукују њене вредности добијене из експерименталних података.

Пето поглавље се бави значајем виших редова у развоју по броју центара расејања у динамичком формализму губитка енергије високоенергијских честица. Наиме, у предложеној дисертацији изведени су изрази за радијативне губитке енергије у оквиру динамичког формализма губитка енергије до четвртог реда у развоју по броју центара расејања, и имплементирани у адекватно уопштен нумерички формализам како би се произвела предвиђања за лаке и тешке честице. Резултати сугеришу да су ефекти укључивања коначног броја центара расејања мали и да је коришћење једног центра расејања прикладна апроксимација за динамички формализам губитка енергије, као и за формализме губитка енергије са статичним центрима расејања.

Шесто поглавље резимира главне резултате ове дисертације.

### 3. Списак публикација кандидата

Радови објављени у врхунским међународним часописима (M21):

1. **Stefan Stojku**, Bojana Ilic, Marko Djordjevic, and Magdalena Djordjevic, *Extracting the temperature dependence in high- $p_{\perp}$  particle energy loss*, Physical Review C **103**, 024908 (2021) (ISSN: 2469-9985, IF = 2.9)
2. **Stefan Stojku**, Jussi Auvinen, Marko Djordjevic, Pasi Huovinen, and Magdalena Djordjevic, *Early evolution constrained by high- $p_{\perp}$  quark-gluon plasma tomography*, Physical Review C **105**, L021901 (2022) (ISSN: 2469-9985, IF = 2.9)
3. Magdalena Djordjevic, **Stefan Stojku**, Marko Djordjevic, and Pasi Huovinen, *Shape of the quark gluon plasma droplet reflected in the high- $p_{\perp}$  data*, Phys. Rev. C **100**, 031901(R) (2019) (ISSN: 2469-9985, IF = 2.9)
4. **Stefan Stojku**, Jussi Auvinen, Lidija Zivkovic, Pasi Huovinen, Magdalena Djordjevic, *Jet-perceived anisotropy revealed through high- $p_{\perp}$  data*, Physics Letters B **835**, 137501 (2022) (ISSN: 0370-2693, IF = 3.9)
5. Magdalena Djordjevic, Marko Djordjevic, Bojana Ilic, **Stefan Stojku**, Igor Salom, *Understanding Infection Progression under Strong Control Measures through Universal COVID-19 Growth Signatures*. Global Challenges **5**, 2000101 (2021) (ISSN: 2056-6646; IF = 6.4)

Саопштење са конференције објављено у специјалном издању часописа категорије M23:

1. **Stefan Stojku**, Jussi Auvinen, Marko Djordjevic, Magdalena Djordjevic, Pasi Huovinen, *Initial Time  $\tau_0$  Constrained by High- $p_{\perp}$  Data*, Acta Phys. Pol. B Proc. Suppl. **16**, 1-A156 (2023) (ISSN: 0587-4254, IF = 0.4)

2. Magdalena Djordjevic, **Stefan Stojku**, Dusan Zigic, Bojana Ilic, Jussi Auvinen, Igor Salom, Marko Djordjevic and Pasi Huovinen, *From high- $p_{\perp}$  theory and data to inferring anisotropy of Quark-Gluon Plasma*, Nucl. Phys. A **1005**, 121900 (2021) (ISSN: 0375-9474, IF = 1.2)

Рад под рецензијом у врхунском међународном часопису (**M21**):

1. **Stefan Stojku**, Bojana Ilic, Igor Salom, Magdalena Djordjevic, *Importance of higher orders in opacity in QGP tomography*, arXiv:2303.14527 [nucl-th] (под рецензијом у Physical Review C) (ISSN: 2469-9985, IF = 2.9)

#### 4. Закључак

На основу изложеног, Комисија закључује да резултати кандидата Стефана Стојку приказани у оквиру ове докторске дисертације представљају изузетно оригиналан и значајан научни допринос у области физике високих енергија и нуклеарне физике. Из области дисертације кандидат има три објављена рада у међународним часописима категорије M21, и један који је под позитивном рецензијом у часопису категорије M21. Сходно томе, комисија предлаже Наставно-научном већу Физичког факултета Универзитета у Београду да одобри јавну одбрану докторске дисертације под називом:

**„Properties of Quark-Gluon Plasma Inferred from High- $p_{\perp}$  Data“**

**(„Одређивање особина кварк-глуонске плазме помоћу високоенергијских честица“)**

У Београду, 21. септембра 2023. године

---

др Бојана Илић

научни сарадник

Институт за физику у Београду

---

проф. др Маја Бурић

редовни професор Физичког факултета

---

проф. др Воја Радовановић

редовни професор Физичког факултета