

# НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ФИЗИЧКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

С обзиром да смо на седници Наставно-научног већа Физичког факултета Универзитета у Београду одржаној 12.09.2018. године одређени за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације под називом: **Theoretical Predictions of Highly Energetic Particles Energy Loss in Quark-Gluon Plasma** (наслов на српском језику: **Теоријска предвиђања губитака енергије високо енергијских честица у кварк-глуонској плазми**) из научне области Физика честица и поља, коју је кандидаткиња Бојана Благојевић, дипломирани физичар, предала Физичком факултету у Београду дана 7.9.2018. године, подносимо следећи

## ИЗВЕШТАЈ

### 1 Основни подаци о кандидаткињи

#### 1.1 Биографски подаци

Бојана Благојевић је рођена у Приједору, Босна и Херцеговина, 24. VIII 1984. године. У Добоју је завршила основну школу и гимназију Јован Дучић, као ђак генерације. Јуна 2003. године била је победник Физичке олимпијаде Босне и Херцеговине, а августа 2003. учествовала је на 34. Међународној физичкој олимпијади у Тајпеху, Тајван.

Основне академске студије на Физичком факултету Универзитета у Београду, смер Теоријска и експериментална физика, започиње 2003. године и завршава их 2013. године са просечном оценом 10,00, одбравивши дипломски рад на тему *Производња, масе и распади суперсиметричних честица у оквиру  $mS\bar{S}M$  модела на LHC-у*. Током основних академских студија Бојана Благојевић је награђена *Eurobank EFG школарином*, која се додељује најбољим студентима завршне године државних факултета за остварене изванредне резултате током студија. Током академске 2006/2007. године била је стипендиста фонда *Проф. др Ђорђе Живановић* као један од најбољих студената III године физике на Физичком факултету. Дипломски рад је израђен у Лабораторији за физику високих енергија Института за физику у Београду, а израдом рада руководила је др Марија Врањеш Милосављевић, виши научни сарадник са Института за физику у Београду.

Академске 2013/2014. године уписује докторске академске студије на Физичком факултету Универзитета у Београду, ужа научна област Физика честица и поља. Ментор њеног докторског рада је др Магдалена Ђорђевић, научни саветник Института за физику у Београду.

Кандидаткиња говори два страна језика, енглески (ниво C2 према Заједничком европском оквиру за језике) и немачки (ниво B2 према Заједничком европском оквиру за језике).

## 1.2 Научна активност

Бојана Благојевић је започела свој истраживачки рад у Лабораторији за физику високих енергија Института за физику у Београду, у новембру 2012. године, а запослена је од 30.06.2013. године. Кандидаткиња је ангажована на пројекту основних истраживања ОН171004 (ATLAS експеримент и физика честица на ЛНС енергијама) Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије, а од 01.09.2017. и на ERC-2016-CoG:725741, где се бави теоријском физиком кварк-глуонске плазме (QGP) под менторством др Магдалене Ђорђевић, научног саветника Института за физику у Београду. Ново стање материје, QGP које је креирано у експериментима ултра-релативистичких судара тешких јона на акцелераторским комплексима: RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider, Brookhaven National Laboratory, САД) и LHC (Large Hadron Collider, CERN), је стање материје у којем су кваркови и глуони асимптотски слободни. Конкретно, кандидаткиња ради на теоријским предвиђањима пригушења, тј. супресије (промене дистрибуција енергије) високо енергијских честица, на поређењу добијених предвиђања са експерименталним резултатима, као и аналитичком унапређењу модела енергијских губитака. Од јуна 2014. године ангажована је и на пројекту SNSF SCOPES IZ73Z0-152297, под менторством др Марка Ђорђевића (ванредног професора на Биолошком факултету Универзитета у Београду) и др Магдалене Ђорђевић, где се бави теоријским проучавањем имуног система бактерија и регулације експресије гена код рестрикционо-модификационих система, као и CRISPR/Cas-a.

До сада је објавила (као први аутор или коаутор) четири научна рада категорије **M21** и један рад категорије **M21a**, као и још један рад **M21** који је тренутно под (позитивном) рецензијом у часопису *Physical Review C*. Такође је учествовала у изради поглавља у Истакнутој монографији међународног значаја **M11**. Свој рад излагала је на доле наведеним међународним конференцијама.

Током септембра 2014. године Бојана Благојевић је била учесник конференције *Hot Quarks 2014, Workshop for young scientists on the physics of ultrarelativistic nucleus-nucleus collisions* у Лас Неграсу, Андалузија, Шпанија, где је одржала предавање под називом *Energy loss in jet suppression - what effects matter?*. Током јуна и јула 2015. године била је полазник летње школе *Helmholtz International Summer School, Dubna International Advanced School of Theoretical Physics, Dense Matter 2015*, која је одржана у Дубни, Русија. Такође у Дубни је, током јула 2015. учествовала на конференцији *Strangeness in Quark Matter*, где је одржала предавање под називом *Importance of different energy loss effects in jet suppression at RHIC and LHC*.

Током јуна 2016. године била је учесник конференције *Belgrade BioInformatics Conference 2016*, у Београду, Србија, где је одржала предавање под називом *Explaining regulatory features of bacterial R-M systems through theoretical modeling*. Током августа 2016. године кандидаткиња је била полазник школе *Young Scientists School, Systems Biology and Bioinformatics 2016* у Новосибирску, Русија, где је одржала предавање под називом *The role of different regulatory features in achieving safe and efficient R-M system establishment*. Такође у Новосибирску је, током августа и септембра 2016. године, учествовала на конференцији *The 10th International Multiconference Bioinformatics of Genome Regulation and Structure/Systems Biology 2016 (BGRS/SB 2016)*, где је презентовала постер под називом

*Design of bacterial restriction-modification systems: relating the system architecture with its dynamical response.* Крајем децембра 2016. године, заједно са Анђелом Родић, одржала је предавање на Биоинформатичком семинару Математичког факултета Универзитета у Београду под називом: *CRISPR/Cas and restriction-modification systems: modeling dynamics of bacterial immune system expression.*

У мају 2018. године учествовала је на конференцији *The 27<sup>th</sup> International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions, Quark Matter 2018*, у Венецији, Италија, где је презентovala постер под називом *Soft-gluon approximation in calculating radiative energy loss of high  $p_{\perp}$  particles - is it well-founded?*. Током јуна исте године била је учесник конференције *Belgrade BioInformatics Conference 2018*, у Београду, Србија, где је презентovala е-постер под називом *Defining dynamical property observables which ensure efficient restriction-modification systems establishment in bacterial host*. Септембра 2018. године учествовала је на конференцији *Hot Quarks 2018, Workshop for young scientists on the physics of ultrarelativistic nucleus-nucleus collisions* на острву Тексел у Холандији, где је одржала предавање под називом *Testing reliability of the soft-gluon approximation in calculating radiative energy loss of high  $p_{\perp}$  particles*, док је почетком октобра исте године била учесник конференције *Hard Probes 2018: International Conference on Hard and Electromagnetic Probes of High-Energy Nuclear Collisions*, где је одржала предавање под насловом *Hard probe radiative energy loss beyond soft-gluon approximation*.

## 2 Опис предатог рада

### 2.1 Основни подаци

Докторска дисертација је урађена под руководством др Магдалене Ђорђевић, научног саветника Института за физику у Београду. Ментор испуњава услове Физичког факултета за руковођењем израде докторске дисертације јер је у научном звању, аутор је великог броја радова из области Нуклеарне физике и физике високих енергија (тачније квантне теорије поља на коначним температурама у циљу теоријског испитивања својстава кварк-глуонске плазме) који су објављени у врхунским међународним часописима и представљени на међународним конференцијама. Такође, ментор је била стипендиста гранта Marie Curie International Reintegration Grant PIRG08-GA-2010-276913 и гранта L'OREAL-UNESCO National Fellowship in Serbia, док је тренутно носилац престижног гранта European Research Council ERC-2016-COG:725741.

Дисертација је написана на енглеском језику, има 178 страна, не рачунајући насловне стране, захвалнице, сажетак, садржај, листу слика, биографију и изјаве. Укупан број слика у дисертацији је 58, број референци је 257. Теза је подељена на седам поглавља, а садржи и два додатка.

### 2.2 Предмет и циљ рада

Последњих пар деценија, а посебно изградњом сударача снопова ултарелативистичких тешких јона, као што су Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) у Њујорку и Large Hadron Collider (LHC) у близини Женева, могућност креирања кварк-глуонске плазме, новог

стања материје у којој су кваркови и глюони слободни, а не заробљени унутар хадрона, у експериментима је постала стварност и отворила је пут обимним како експерименталним тако и теоријским стремљењима. Циљ је да се што боље разуме и опише то стање материје, које настаје на екстремним густинама енергије. Сматра се да 99.9 % креираних честица у судару тешких јона чине нискоенергијске честице, док само 0.1 % представљају високоенергијски партони, који су и предмет ове дисертације. Значај високоенергијских честица је у томе што после настанка у раној фази судара, пре термализације QGP, пролазе кроз целу средину током свих њених еволутивних фаза и интерагују са њом. Проучавање енергијских губитака ових честица пружа увид у начин интеракције млазева (цетова) са креираном средином тестирајући разумевање физике која стоји иза тога. Постоје разни теоријски модели, који подразумевају средину различите прозирности, укључују или не нека од својстава средине (као што је нпр. коначна димензија), и који са одређеним успехом репродукују експерименталне резултате. Међутим, не постоји јединствено разумевање и објашњење феномена пригушења.

Ова теза управо проучава енергијске губитке високоенергијских честица, као и пригушење спектра које из тога произилази у оквиру пертурбативне квантне хромодинамике, подразумевајући средину коначне температуре (Thermal field theory). Циљ ове дисертације је да разуме и разјасни физику интеракција цетова и средине. Тачније да покаже да Динамички модел губитака енергије, који има више саставних делова од других модела (као нпр. коначну хромоманетну масу, колизионе и радијативне губитке енергије рачунате под истим апроксимацијама), јако добро репродукује експерименталне резултате пригушења; да испита да ли је то слагање са експериментом последица једног доминантног ефекта или збирног ефекта свих побољшања који дати модел поседује. И коначно, да унесе једно значајно побољшање у модел, које би омогућило већу поузданост и шири опсег  $p_{\perp}$  важења предвиђања динамичког модела.

### 2.3 Публикације

У овој докторској дисертацији су представљени резултати из три рада објављена у часописима категорије **M21a** и **M21** и једног који је под (позитивном) ревизијом у часопису исте категорије (**M21**):

1. Magdalena Djordjevic, Marko Djordjevic and Bojana Blagojevic, *RHIC and LHC jet suppression in non-central collisions*, Phys. Lett. B **737**, 298-302 (2014).
2. Bojana Blagojevic and Magdalena Djordjevic, *Importance of different energy loss effects in jet suppression at RHIC and LHC*, J. Phys. G **42**, 075105 (2015).; такође истакнут и у LabTalk-у.
3. Magdalena Djordjevic, Bojana Blagojevic and Lidija Zivkovic, *Mass tomography at different momentum ranges in quark-gluon plasma*, Phys. Rev. C **94**, 044908 (2016).
4. Bojana Blagojevic, Magdalena Djordjevic and Marko Djordjevic, *Calculating hard probe radiative energy loss beyond soft-gluon approximation: how valid is the approximation?*, arXiv:nucl-th/1804.07593 (under review in Phys. Rev. C) (2018).

## 2.4 Преглед научних резултата изложених у дисертацији

Докторска дисертација садржи 7 поглавља.

Прво поглавље представља увод, кроз кратак осврт на развој познавања елементарних чиниоца материје и сила између њих, тј. на развој квантне хромодинамике, фаза хадронске материје, као и рађање идеје о могућности постојања стања материје у ком су кваркови и глуони слободни: кварк-глуонске плазме (QGP). Увод садржи и образложење зашто је проучавање QGP битно, опис ултра-релативистичких судара тешких јона, за сада јединог извора QGP у контролисаним експерименталним условима, као и историјски осврт на доказ формирања QGP у овим сударима. Наведена је, такође, и подела опсервабли за проучавања својстава кварк-глуонске плазме. Предмет ове тезе су опсервабле високих енергија, које служе за проучавање новог стања материје.

Друго поглавље је сажетак историјског развоја модела губитака енергије високоенергијских честица, како колизионих тако и радијативних, са акцентом на радијативне моделе (Gyulassy-Levai-Vitev (GLV) и Djordjevic-Gyulassy-Levai-Vitev (DGLV)) који су коришћени у тези у изворном облику или као база за напреднији модел, а чији саставни делови су проучавани у тези.

У трећем поглављу садржан је детаљан преглед развоја Динамичког модела губитака енергије, који подразумева средину сачињену од покретних конституената (лакх кваркова и глуона), средину коначних димензија, радијативне и колизионе губитке енергије, коначну хромоманетну масу екранирања, као и "running" константу јакх интеракција. Описана је и нумеричка процедура рачунања пригушења (супресије) спектра по импулсима, при проласку високоенергијске честице кроз QGP, која обухвата независне кораке: почетну расподелу партона по импулсима, вероватноћу губитака енергије (која садржи више-глуонске флукуације и флукуације дужине пређеног пута), фрагментационе функције партона у хадроне и функције распада тежих честица.

У четвртом поглављу генерисана су предвиђања пригушења спектра по импулсима, базирана на динамичком моделу губитака енергије. Добијена су веома добра слагања са експерименталним подацима за трансверзалне импулсе веће од 10 GeV. Сва предвиђања су генерисана у оквиру истог формализма, нумеричке процедуре и без слободних параметара. Та слагања важе за широк опсег детектованих честица (од лакх до тешких), различите енергије судара (од 200 MeV на Relativistic Heavy Ion Collider-у (RHIC) до 2.76 MeV на Large Hadron Collider-у (LHC)) и све до тада доступне централности судара. Ово поглавље садржи и предвиђања пригушења спектра на 5.02 TeV, која су генерисана пре него што су експериментални подаци били доступни. Предвиђено је квалитативно и квантитативно исто пригушење за LHC енергије 2.76 TeV и 5.02 TeV, што је касније добило и експерименталну потврду, а објашњено је супротним утицајима почетне дистрибуције и губитака енергије на пригушење. Такође, у овом поглављу је изнето предвиђање да је само област испод 50 GeV релевантна за масену томографију и истакнута је неопходност експерименталних стремљења ка мерењу пригушења спектра  $V$  мезона.

У поглављу 5 је поступно испитивано који од горе наведених саставних делова динамичких губитака енергије је одговоран, или највише доприноси тако добром слагању са експерименталним мерењем пригушења спектра и на RHIC-у и на LHC-у. На DGLV модел је увођено једно по једно побољшање: динамички центри расејања, колициони

губици енергије, коначна дужина средине, ненулта магнетна маса и running константа јаких интеракција, на примеру чисте сонде енергијских губитака: пригушења спектра  $D$  мезона. Закључак је да су сви ефекти (саставни делови) битни, да увођење покретних центара расејања (самим тим и колизионих губитака енергије) највише доприноси врло добром слагању са експериментима, док остали ефекти чине суптилније поправке и доприносе квалитативно бољем слагању (облика криве).

Поглавље 6 садржи једно битно побољшање модела губитака енергије: релаксацију soft-gluon апроксимације, у циљу спуштања доње границе  $p_{\perp}$  важења динамичког модела, и његове шире и тачније моћи предвиђања. Soft-gluon апроксимација подразумева да израчени глуон односи јако мали део енергије и лонгитудиналног импулса од почетног партона. Оправданост ове веома распрострањене апроксимације је доведена у питање с обзиром да су различити модели добили велике губитке енергије, а такође је неприменљива за  $5 < p_{\perp} < 10$  GeV у динамичком моделу, а највише за глуонске цетове који услед не-Абеловске природе QCD, губе значајно више енергије од кварк-цетова. Услед тога, апроксимација је релаксирана у прорачунима радијативних губитака енергије за глуонске цетове у првом реду развоја по прозирности QGP средине. Аналитички прорачуни су због своје сложености изведени у три корака: прво у оквиру GLV модела, који подразумева безмасене глуоне и статичке центре расејања; затим у оквиру DGLV модела, који за разлику од претходног модела узима у обзир ефективну масу глуона у QGP коначне температуре, и коначно разматра се како увођење покретних центара расејања утиче на закључке добијене у статичком случају.

Изненађујући резултат у овом раду је да, иако су аналитички изрази са и без soft-gluon апроксимације веома различити, и прилично компликованији у релаксираном случају, нумеричка предвиђања: фракционих радијативних губитака енергије, броја израчених глуона; фракционих диференцијалних радијативних губитака енергије, радијационог спектра глуона (осим за фракциону израчену енергију глуона  $x$  већу од 0.4); као и пригушења (супресије) се практично преклапају у ова два случаја. Нерелевантност  $x > 0.4$  области при прављењу разлике између soft-gluon и без soft-gluon резултата је објашњена утицајем експоненцијално опадајуће почетне расподеле глуона.

Значај резултата овог поглавља се огледа у томе што они представљају прво увођење ефективне масе глуона у изразе без soft-gluon апроксимације и испитивање нумеричког значаја релаксације у том случају. Даље, за разлику од других модела радијативних губитака енергије, код којих је ефекат релаксације значајан, у овом поглављу је показано да soft-gluon апроксимација остаје оправдана у DGLV формализму. Такође, на основу постојеће прескрипције између статичке и динамичке средине, очекује се да исти закључак важи и када се узму у обзир покретни центри расејања.

Седмо поглавље садржи све закључке дате тезе и осврт на будућа научна стремљења кандидаткиње.

### 3 Списак публикација

Објављен рад у међународном часопису изузетних вредности **M21a**:

1. Magdalena Djordjevic, Marko Djordjevic and Bojana Blagojevic, *RHIC and LHC jet suppression in non-central collisions*, Phys. Lett. B **737**, 298-302 (2014).

Објављени радови у врхунским међународним научним часописима **M21**:

1. Bojana Blagojevic and Magdalena Djordjevic, *Importance of different energy loss effects in jet suppression at RHIC and LHC*, J. Phys. G **42**, 075105 (2015).; такође истакнут и у LabTalk-у.
2. Magdalena Djordjevic, Bojana Blagojevic and Lidija Zivkovic, *Mass tomography at different momentum ranges in quark-gluon plasma*, Phys. Rev. C **94**, 044908 (2016).
3. Bojana Blagojevic, Magdalena Djordjevic and Marko Djordjevic, *Calculating hard probe radiative energy loss beyond soft-gluon approximation: how valid is the approximation?*, arXiv:nucl-th/1804.07593 (under review in Phys. Rev. C) (2018).
4. Andjela Rodic, Bojana Blagojevic, Evgeny Zdobnov, Magdalena Djordjevic and Marko Djordjevic, *Understanding key features of bacterial restriction-modification systems through quantitative modeling*, BMC Systems Biology, **11**:377, (2017).
5. Andjela Rodic, Bojana Blagojevic, Magdalena Djordjevic, Konstantin Severinov and Marko Djordjevic, *Features of CRISPR-Cas Regulation Key to Highly Efficient and Temporally-Specific crRNA Production*, Front. Microbiol., **8**, 2139 (2017).

Предавање по позиву штампано у целини на домаћој конференцији са међународним учешћем **M61**:

1. Jelena Guzina, Andjela Rodic, Bojana Blagojevic and Marko Djordjevic, *Modeling and bioinformatics of bacterial immune systems: understanding regulation of CRISPR/Cas and restriction-modification systems*, Biologia Serbica: **39** pp. 112-122 (2017).

Објављена саопштења са међународних скупова штампана у целини **M33**:

1. Bojana Blagojevic and Magdalena Djordjevic, *Energy loss in jet suppression - what effects matter?*, J. Phys. Conf. Ser. **612**, 012006 (2015).
2. Bojana Blagojevic and Magdalena Djordjevic, *Modeling jet-medium interactions at RHIC and LHC - which energy loss effect is crucial?*, J. Phys. Conf. Ser. **668**, 012044 (2016).

Поглавље у Истакнутој монографији међународног значаја **M11**:

1. Andjela Rodic, Bojana Blagojevic, Marko Djordjevic (2018) *Systems Biology of Bacterial Immune Systems: Regulation of Restriction-Modification and CRISPR-Cas Systems*. In: Rajewsky N., Jurga S., Barciszewski J. (eds) *Systems Biology. RNA Technologies*. Springer, Cham.

## 4 Закључак

На основу изложеног, Комисија закључује да резултати кандидаткиње Бојане Благојевић, изложени у докторској дисертацији, а садржани у три објављена (и једном под ревизијом) рада у врхунским међународним научним часописима, представљају оригиналан и веома значајан научни допринос у области Физике честица и поља. Према томе, Комисија предлаже Наставно-научном већу Физичког факултета Универзитета у Београду да одобри јавну одбрану докторске дисертације:

### **Theoretical Predictions of Highly Energetic Particles Energy Loss in Quark-Gluon Plasma**

**(Теоријска предвиђања губитака енергије високо енергијских честица у  
кварк-глуонској плазми)**

У Београду, 10.10.2018.

Комисија

проф. др Маја Бурић, редовни професор  
Физички факултет у Београду, Универзитет у Београду

---

др Магдалена Ђорђевић, научни саветник  
Институт за физику у Београду, Универзитет у Београду

---

проф. др Петар Ацић, редовни професор  
Физички факултет у Београду, Универзитет у Београду

---