

Извештај саопштен  
07.04.2021.

Универзитет у Крагујевцу  
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ  
ФАКУЛТЕТ



University of Kragujevac  
FACULTY OF  
SCIENCE

Радоја Домановића 12, 34000 Крагујевац, Србија

Radoja Domanovića 12, 34000 Kragujevac, Serbia

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ  
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ

ПРИМЉЕНО:	08.04.2021
Срг.	02
Бр.	210/4
Ј. бр.	-
Ј. бр.	-

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ  
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКОГ ФАКУЛТЕТА И ВЕЋУ ЗА  
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКЕ НАУКЕ

УНИВЕРЗИТЕТА У КРАГУЈЕВЦУ

На седници Већа за природно-математичке науке Универзитета у Крагујевцу, одржаној 10.03.2021., одлуком бр. IV-01-173/8, именовани смо за чланове Комисије за подношење извештаја за оцену научне заснованости теме и испуњености услова (Комисија) кандидата **Горана Качаревића**, за израду докторске дисертације под насловом: "МЕТОД МЕРЕЊА ОДНОСА ГРАНАЊА ХИГСОВОГ БОЗОНА BR ( $H \rightarrow \gamma\gamma$ ) НА 3 TEV CLIC".

На основу података којима располажемо, подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Научни допринос крајњег исхода рада на теми

Јуна 2020., донета је Европска стратегија за област физике честица [<https://cds.cern.ch/record/2721370/files/CERN-ESU-015-2020>], која, као један од највећих приоритета у области, издваја будуће електрон-позитронске судараче као фабрике Хигсових бозона. Наши истраживачи, укључени су у ове приоритетне међународне пројекте будућих сударача (ILC, CEPC и CLIC) кроз сарадњу Природно-математичког факултета Универзитета у Крагујевцу и Института за нуклеарне науке "Винча" – Института од националног значаја за Републику Србију, провобитно кроз реализацију националног пројекта ОИ171012, а данас кроз међуинституционалну сарадњу ове две установе. Кандидат за израду докторске тезе о чијој теми подносимо овај извештај је учесник у реализацији те сарадње.

Компактни линеарни сударач (CLIC) представља у овом тренутку један од најнапреднијих (пре свега у погледу обухватности програма физичких анализа) будућих пројеката електрон-позитронских сударача високих енергија, предложен за реализацију у Европској организацији за нуклеарна истраживања (CERN). На CLIC, као и на осталим пројектима будућих сударача, истраживања у Хигсовом сектору су у фокусу интересовања научне јавности. Основна мотивација лежи у чињеници да је Хигсов бозон једини елементарни скалар и једина самоинтерагујућа елементарна честица са којом стоје у вези бројна отворена питања савремене физике (од проблема хијерархије, релативистичког вакуума и састава Универзума, па до бариогенезе и нарушења CP симетрије). У том смислу, иако је Хигсов механизам инкорпориран у Стандардни модел у физици честица (SM), Хигсов сектор нуди јединствено поље истраживања које може пружити увид у физику изван SM. Из овога произилази чињеница да су мерења велике тачности у Хигсовом сектору окосница програма истраживања свих будућих пројекта у области физике са акцелераторима високих енергија, као што је констатовано у Европској стратегији за област физике елементарних честица из јуна 2020.

Посебно, када је реч о спрезању Хигсовог бозона са фотонима, научни значај теме наглашавају чињенице да фотони као безмасене честице немају спрезање са Хигсовим бозоном на Борновом нивоу, што дозвољава да на нивоу петље буду измењене тешке честице изван SM, а са друге стране, фотони су векторски бозони, па спрезање Хигсовог бозона са фотонима као и са осталим векторским бозонима

Централа: 034 336 223 Деканат: 034 335 039 • Секретар: 034 300 245 • Студентска служба: 034 300 260 • Факс: 034 335 040

Phone: +381 34 336 223 • Dean's office +381 34 335 039 • Secretary Office +381 34 300 245

Administrative student office +381 34 300 260 • Fax +381 34 335 040

www.pmf.kg.ac.yu • e-mail: pmfkrag@kg.ac.yu

може бити модификовано евентуалним нарушењем  $CP$  симетрије у Хигсовом сектору. Другим речима, двофотонски распади Хигсовог бозона су полигон за манифестацију евентуалне "нове физике".

Даље, сва мерења Хигсових спрезања предмет су глобалног фита који, код линеарних судараца који оперишу на различитим енергијама у систему центра масе, узима у обзир сва мерења свих Хигсових спрезања на свим енергијама рада судараца како би се екстраховао резултат највеће тачности. Различите су врсте глобалних фита за које мерења Хигсових спрезања, укључујући и ово које се предлаже да кандидат симулира, представљају инпут: модел-независни и модел зависни фит у коме тотална ширина за распад Хигсовог бозона укључује само  $SM$  процесе, као и  $EFT$  фит који независно од модела реализације физике изван  $SM$  утврђује вредност коефицијента Лагранжијана уз операторе димензије 6 који бивају модификовани услед присуства физике изван  $SM$  на скали енергија значајно већих од масе Хигсовог бозона. Дакле, добијени резултат биће укључен у шири контекст слике Хигсовог сектора која ће бити добијена уз помоћ будућих електрон-позитронских судараца.

У погледу значаја за дизајн и реализацију детектора у самом експерименту, распад Хигсовог бозона на пар фотона био је кључни (*benchmark*) процес за избор дизајна и технологије за електромагнетни калориметар за  $CMS$  детектор на сударачу  $LHC$ . Тако и у овом случају, остевљивост мерења на ефикасност идентификације фотона, као и на резолуцију енергије фотона представља значајан инпут у погледу препоруке/ограничења вредности стохастичког члана електромагнетног калориметра за детектор за  $CLIC$ .

Такође, желимо да истакнемо везу са досадашњим истраживањима које је урадила Група за експерименталну физику високих енергија Института "Винча" чији је кандидат члан, а који су, у случају Компактног линеарног судараца  $CLIC$  документовани у [Eur.Phys.J. C77 (2017) no.7, 475] и [Eur.Phys.J. C75 (2015) no.11, 515]. Наиме, истраживачи из ове групе, укључујући и Горана Качаревића су адресирали у пуној симулацији експерименталних услова неколико канала распада Хигсовог бозона на  $CLIC$ , и то: распад на  $EW$  бозоне  $WW$  и  $ZZ$  на енергијама од 350 GeV до 3 TeV у систему центра масе, у семи-лептонским и хадронским финалним стањима, као и редак распад Хигсовог бозона на пар миона на енергији од 1.4 TeV. Предложено мерење у двофотонском каналу допуњује поменути сет мерења, како са аспекта највеће статистичке тачности мерења одређене глобалним фитом, тако и са аспекта комплементарности  $CLIC$  као електрон-позитронског судараца са очекиваним резултатима мерења Великог хадронског судараца унапређене луминозности  $HL-LHC$ .

## 2. Циљ, план и методе у изради тезе

Оквирни сарджај тезе одређен је потпуном симулацијом експерименталног мерења односа гранања за распад Хигсовог бозона на пар фотона ( $BR(H \rightarrow \gamma\gamma)$ ), на енергији 3 TeV у систему центра масе, на будућем линеарном сударачу  $CLIC$ . Потпуна симулација експерименталног мерења подразумева симулацију интеракција честица са детектором и одговарајућу реконструкцију програмом за реконструкцију трагова и вертекса какав би био коришћен и у самом експерименту, затим симулацију и реконструкцију свих физичких процеса од интереса као шумова за двофотонски сигнал, као и симулацију машинских ефеката који потичу од међусобне интеракције снопова. Такође, укључени су на нивоу реконструкције и сви пратећи процеси попут зрачења иницијалног и финалног стања. Симулација свих физичких процеса врши се са промелљивом енергијом у систему центра масе, у складу са релистичним спектром луминозности.

### Циљ тезе:

Као што је већ речено, распад Хигсовог бозона на пар фотона је од посебног научног интереса јер се одвија на нивоу петљи и самим тим има осетљивост на евентуалну измену нових, тешких честица, што би се директно рефлектовало на однос гранања који је предмет мерења. Из мерене опсервабле  $\sigma \times BR (H \rightarrow \gamma\gamma)$ , где је  $\sigma$  ефикасни пресек за продукцију Хигсовог бозона на датој енергији (3 TeV) у систему цента масе, применом Фајнменових правила могуће је екстраховати спрезање Хигсовог бозона са фотонима, која, по више основа, заједно и са другим Хигсовим спрезањима, могу послужити као тест Стандарног модела и физике изван њега. Овај резултат може бити предмет комбиновања са резултатима мерења осталих Хигсових спрезања, на једној или више енергија расположивих у систему центра масе (глобални фит) или комбиновања и поређења са другим комплементарним пројектима (HL-LHC). Планирани резултат део је глобалног напора заједнице истраживача у области физике са акцелераторима високих енергија да процене границе сазнања, када је реч о Хигсовом бозону и његовој вези са отвореним питањима савремене физике (честица) досежне на будућим пројектима акцелератора високих енергија од којих је један (CLIC) планиран за изградњу у CERN.

### Основни кораци у изради тезе:

- Реконструкција догађаја са два изолована фотона;
- Преселекција у циљу супримирања шума;
- Мултиваријантна анализа (MVA) осетљивих опсервабли у циљу даље редукције шума;
- Математички опис издвојеног сигнала и шума функцијама густине вероватноће (*Probability Density Functions*);
- Дефинисање фит функције псеудо-података којом се, као слободни параметар, екстрахује број догађаја сигнала (и самим тим и однос гранања, за познати ефикасни пресек за продукцију Хигсовог бозона);
- Извођење великог броја (>1000) псеудо-експеримената да би се одредило статистичко расипање резултата мерења;
- Одређивање систематске грешке мерења односа гранања  $BR (H \rightarrow \gamma\gamma)$ .

**Детаљни план реализације истраживања** укључује следеће кораке, при чему се, након сваког корака, добија одређени резултат који се анализира у смислу разумевања физичких ефеката који тај резултат одређују, а затим се може вршити оптимизација примењене методе у циљу побољшавања (прелазног) резултата, пре него што се, под тако дефинисаним условима, пређе на следећи корак плана. У том смислу су све фазе плана реализације истраживања међусобно условљене. Истраживање се реализује у следећим корацима:

1. Карактеристике сигнала на генераторском нивоу,
2. Реконструисани сигнал,
3. Особине двофотонског система сигнала у односу на шум,
4. Преселекција изведена из 3.,
5. Дефинисање осетљивих опсервабли и стабилизација MVA,
6. Фазе тренинга и апликације MVA за сигнал и шум,
7. Одређивање PDF функција за сигнал и шум и укупне PDF функције,
8. Фитовање псеудо-података укупном PDF функцијом – псеудо експеримент,
9. Поновљени псеудо-експерименти и одређивање статистичког растура резултата,
10. Разматрање извора систематских неодређености мерења и њиховог утицаја на крајњи резултат мерења.

### Методе које ће се примењивати у истраживању:

- Пуна симулација хибридног детекторског система CLIC\_ILD, заснованог на Geant4 симулацији интеракције честица са супстанцијалном средином;
- Потпуна симулација физичких (WHIZARD [arXiv:0708.4233]) и машинских процеса (GuineaPig [496 CERN-PS-99-014-LP]) релевантних за ово мерење;
- Употреба Marlin процесора ([arXiv:0702171]) за реконструкцију трагова и вертекса, у оквиру програма ILCSoft (<https://ilcsoft.desy.de/portal/>);
- Употреба програма за мултиваријантну анализу TMVA ([arXiv:0703039]), засновану на методама машинског учења, у оквиру пакета за обраду података Root (<https://root.cern.ch/>).

### 3. Оригиналноост теме

Имајући у виду да нема публикованих резултата на тему "МЕТОД МЕРЕЊА ОДНОСА ГРАНАЊА ХИГСОВОГ БОЗОНА BR ( $H \rightarrow \gamma\gamma$ ) НА 3 TEV CLIC, Комисија закључује да је реч о предлогу оригиналне теме за израду докторске дисертације.

### 4. Поштовање научних приципа

Комисија констатује да научна тема предложене докторске дисертације не тангира питања заштите података о личности, рада са хуманим материјалом или било која друга етичка питања регулисана одговарајућим документима Универзитета у Крагујевцу.

Такође, Комисија констатује намеру да резултати добијени радом на теми ове докторске тезе буду публиковани у складу са правилима отворене науке у међународном часопису водећег значаја (M21) са отвореним приступом.

Подаци који ће се користити у изради тезе потпадају под правила о коришћењу података регулисаних у оквиру међународне колаборације CLIC у CERN.

### 5. Научна област и ментор

За ментора ове докторске тезе, уз сагласност Научног већа Института за нуклеарне науке "Винча" предложена је др **Иванка Божовић Јелисавчић**, научни саветник Института "Винча".

Др Божовић Јелисавчић је учествовала у реализацији ATLAS експеримента у CERN у време открића Хигсовог бозона у овом експерименту и једна је од неколико истраживача из Србије која потписује овај високо-цитирани рад (преко 10.000 цитата). На будућим пројектима линеарних судараца ILC и CLIC бави се физиком са Хигсовим бозоном, укључујући и менторство над докторском тезом CERN-THESIS-2017-349 одбрањеном на Универзитету у Београду 2017. године. Била је руководиоца националног пројекта ОИ171012 "Физика и развој детектора са акцелераторима високих енергија" у претходном пројектном циклусу, а данас руководи темом "Физика са будућим електрон-позитронским сударачима". Координатор је у Програмском савету Института "Винча" за област нуклеарне и физике честица. На пројекту ILC тренутно је члан рецензентског одбора у колаборацији ILD (*ILD Publication and Speakers Bureau*) и европски је представник рецензентском одбору Међународног развојног тима за ILC (*IDT Speakers Bureau*).

**Научна област којој припада тема: физика елементарних честица**

**Научна област Комисије: нуклеарна и физика елементарних честица**

## 6. Биографија докторанда

Горан Качаревић (1986) је дипломирао примењену физику на Природно-математичком факултету Универзитета у Крагујевцу, 12.12.2013. године, са средњом оценом у току студија 8.27, на тему: „Контролисана термонуклеарна фузија“.

Горан Качаревић се придружио групи за експерименталну физику високих енергија Института “Винча” почетком 2014. године и одмах се укључио у бројне научно-истраживачке активности које ова група реализује.

Докторске студије Физике, на Природно-математичком факултету Универзитета у Крагујевцу уписао је у јануару 2014. године, где је положио све планом предвиђене испите са средњом оценом 9.5.

Научно-истраживачка активност кандидата је превасходно оријентисана је на анализу пројектованих перформанси будућих електрон-позитронских судараца честица, у погледу њиховог потенцијала да квалитативно унапреде постојећи фонд знања у области физике са Хигсовим бозоном. Ту првенствено спадају мерења односа гранања, односно одговарајућих спрезања Хигсовог бозона са векторским бозонима и фермионима. У том смислу био је коаутор на два објављена рада у водећем часопису међународног значаја (M21), од којих је један високо-цитиран (наведен под бројем 2 у библиографији), са преко 100 цитата према <https://inspirehep.net/>. Дао је допринос и монографији међународног значаја (M14) у референци наведеној под 3. Учествоје у реализацији два рада која ће бити такође послата у водеће међународне часописе (M21). Два пута је био предавач на тему физике са Хигсовим бозоном на међународним конференцијама.

## 7. Библиографија докторанда

1. G. Milutinović-Dumbelović, I. Božović-Jelisavčić, C. Grefe, **G. Kačarević**, S. Lukić, M. Pandurović, P. Roloff, I. Smiljanić, Physics potential for the measurement of  $\sigma(H\nu)\times BR(H\rightarrow\mu+\mu^-)$  at the 1.4 TeV CLIC collider, Published in Eur.Phys.J. C75 (2015) no.11, 515, 10 pp., e-Print: arXiv:1507.04531 [hep-ex], *cited 5+*, IF: 5.084
2. H.Abramowicz, I. Božović-Jelisavčić, **G. Kačarević**, S. Lukić, G. Milutinović-Dumbelović, M. Pandurović, et al. (CLICdp collaboration), Higgs Physics at the CLIC Electron-Positron Linear Collider, Eur.Phys.J. C77 (2017) no.7, 475, 40 pp., e-Print: arXiv:1608.07538 [hep-ex], *cited 100+*, IF: 5.084
3. Updated baseline for a staged Compact Linear Collider, CLIC and CLICdp Collaborations (M J Boland (U. Melbourne) et al., (Vinca Belgrade: I. Bozovic-Jelisavcic, **G. Kacarevic**, S. Lukic, G. Milutinovic-Dumbelovic, M. Pandurovic), Aug 12, 2016, 57 pp., CERN-2016-004, DOI: 10.5170/CERN-2016-004, e-Print: arXiv:1608.07537 [physics.acc-ph], *cited 100+*

Такође, био је предавач на међународним конференцијама:

1. The 4<sup>th</sup> Alpine LCH Physics Summit (ALPS2019), 22-27 April 2019, Austria.
2. International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS2021), March 2021, CERN.

## ЗАКЉУЧАК

**Горан Качаревић**, запослен у Институту за нуклеарне науке "Винча" – Институту од националног значаја за Републику Србију, пријавио је докторску тезу под насловом: : "МЕТОД МЕРЕЊА ОДНОСА ГРАНАЊА ХИГСОВОГ БОЗОНА  $BR (H \rightarrow \gamma\gamma)$  НА 3 TEV CLIC", на Природно-математичком факултету Универзитета у Крагујевцу. Поступајући по предлогу Наставно-научног већа Природно-математичког факултета Универзитета у Крагујевцу (одлука бр. 120/X-1 од 25.02.2021.), Веће за природно-математичке науке Универзитета у Крагујевцу је нас доле потписано, на седници одржаној 10.03.2021., именovalo (одлуком бр. IV-01-173/8) за чланове Комисије за подношење извештаја за оцену научне заснованости теме и испуњености услова кандидата да започне израду докторске тезе.

У том својству

## ЗАКЉУЧУЈЕМО

да је предложена тема докторске дисертације научно значајна, оправдана и оригинална, те да кандидат испуњава све услове за њену израду. За ментора докторске дисертације предлаже се др Иванка Божовић Јелисавчић, научни саветник Института "Винча".

Крагујевац, Београд, 30.03.2001.



председник Комисије

**Проф. др Светислав Савовић**, редовни професор  
Природно-математичког факултета Универзитета у Крагујевцу  
ужа научна област: нуклеарна физика



члан Комисије, предложени ментор

**др Иванка Божовић Јелисавчић**, научни саветник  
Институт за нуклеарне науке "Винча" – Институт од националног значаја за Републику Србију,  
ужа научна област: физика елементарних честица



члан Комисије

**др Иван Смиљанић**, научни сарадник  
Институт за нуклеарне науке "Винча" – Институт од националног значаја за Републику Србију,  
ужа научна област: физика елементарних честица