

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ФИЗИЧКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

На седници Наставно-научног већа Физичког факултета Универзитета у Београду, одржаној 19. новембра 2025. године, именовани смо за чланове комисије за оцену докторске дисертације под називом „Мерење троструке самоинтеракције Хигсовог бозона у каналу распада на четири лептона експериментом ЦМС“, коју је поднео кандидат Лазар Марковић. Дисертација је урађена под заједничким менторством проф. др Предрага Миленовића са Физичког факултета Универзитета у Београду и проф. др Роберта Коварелија са Департмана за физику Универзитета у Торину. Наставно-научном већу Физичког факултета подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ

1 Основне информације о кандидату

1.1 Биографски подаци

Лазар Марковић је рођен 6. августа 1996. године у Београду. Земунску гимназију је завршио 2015. године. Основне студије на Физичком факултету, на програму теоријска и експериментална физика, завршио је 2020. године са просечном оценом 9,59 (девет и 59/100).

Мастер студије из физике завршио је на матичном факултету, на програму теоријска и експериментална физика, 2021. године са просечном оценом 10 (десет). Током мастер студија Лазар је постао члан ЦМС колаборације у ЦЕРН-у. Мастер рад „Потрага за новим појавама у производњи и распаду Хигсовог бозона коришћењем методе ефективних теорија поља“, урађен под менторством проф. др Предрага Миленовића, одбрањен је на Физичком факултету са просечном оценом 10 (десет).

Лазар Марковић је уписао докторске студије из физике у ужој научној области Нуклеарна физика и физика високих енергија у академској 2021/2022. години на Физичком факултету Универзитета у Београду и на Департману за физику Универзитета у Торину. Од јануара 2022. до августа 2023. већину времена провео је у Торину ради истраживачког усавршавања, радећи у лабораторији за иновативне силицијумске детекторе. Од августа 2023. до августа 2024. већину времена провео је у ЦЕРН-у ради истраживања и стручног усавршавања. На оба универзитета положио је све предвиђене испите, а на Универзитету у Београду остварио је просечну оцену 10 (десет).

Од марта 2021. (четири семестра) Лазар држи рачунарске вежбе из предмета Физика елементарних честица, а од новембра 2021. (три семестра) такође и рачунарске вежбе из предмета Виши курс из физике елементарних честица 1. Један је од коаутора лабораторијског приручника писаног за ове предмете и тренутно учествује у припреми збирке задатака. Од октобра 2024. води рачунарске и лабораторијске вежбе на два предмета: 1. Физика језгра и честица, 2. Нуклеарна физика.

Од марта 2022. Лазар је запослен на Физичком факултету Универзитета у Београду на позицији истраживач–приправник, а од октобра 2024. запослен је на позицији асистента у ужој научној области нуклеарна физика.

1.2 Научна активност

Паралелно са мастер студијама, Лазар је као члан АТЛАС колаборације у ЦЕРН-у похађао престижну ЦЕРН-ову летњу школу, где је спровео истраживање и завршио завршни пројекат у области суперсиметрије на тему „Производња парова глуина на LHC -у“.

Током докторских студија, истраживање Лазара Марковића фокусирао се на проучавање самоинтеракције Хигсовог бозона. То је обрађено мерењем референтног пресека Хигсовог бозона у каналу са четири лептона и даље преласком на анализу „off-shell” региона масе четири лептона. У тој области ефекти у првом наредном реду квантних корекција (next-to-leading-order) у производњи и распаду Хигсовог бозона пружају осетљивост на могуће аномалије у самоинтеракцији. Током тих студија колега Марковић је радио и на прорачунима попречних пресека високог реда коришћењем софтвера MATRIX, као и на лабораторијском тестирању и квалификацији ултра-брзих силицијумских детектора (UFSD).

На основу свог рада и стеченог знања, Лазар је постао контакт особа ЦМС колаборације за генератор Монте Карло догађаја MATRIX и HZZ MC контакт особа унутар ЦМС колаборације, чиме је постао експерт на нивоу колаборације одговоран за симулацију свих процеса релевантних за мерења и за интерне ревизије у HZZ групи.

Лазар Марковић је похађао три веће ЦЕРН-ове школе посвећене физици високих енергија, статистичким методама анализе података и експерименталним технологијама. Такође је учествовао на неколико радионица и конференција где је презентовао резултате свог рада.

2 Опис предате дисертације

2.1 Основне информације

Теза је урађена под заједничким менторством проф. др Предрага Миленовића са Факултета за физику Универзитета у Београду и проф. др Роберта Коварелија са Департмана за физику Универзитета у Торину. Истраживачки интереси оба ментора су у области физике високих енергија, а већ више година су чланови ЦМС колаборације. Рад се састоји од 6 поглавља, укључујући увод и закључак, као и три прилога, и укупно има 110 страница. Укупно садржи 72 слике, 25 табела и 246 референци.

2.2 Предмет и циљ докторске дисертације

Научна област дисертације је нуклеарна физика и физика високих енергија. Дисертација Лазара Марковића фокусирана је на проучавање самоинтеракције Хигсовог бозона. Анализа има за циљ мерење константе спрезања која описује интеракцију Хигсовог бозона

са самим собом, што је предвиђено Стандардним моделом али је још увек релативно слабо експериментално истражено.

Главни циљ истраживања је мерење троструке интеракције Хигсовог бозона (означене као κ_λ), што је кључно за разумевање механизма нарушења електрослабе симетрије и порекла масе елементарних честица. Испитан је распад „off-shell” Хигсовог бозона у четири лептона (два пара електрона или миона) преко два Z бозона. Овај канал је веома интересантан због релативно чистог сигнала са малом позадином, али је изузетно редак.

Истраживање користи податке прикупљене ЦМС детектором, једним од главних експеримената на Великом хадронском сударању (ЛХЦ) у ЦЕРН-у, са фокусом на податке из протон–протон судара из Run 2 и Run 3 (година 2022). Коришћене су оригиналне Монте Карло симулације за моделовање како сигнала (трострука самоинтеракција Хигсове производње у Стандардном моделу и у оквиру Ефективног поља) тако и различитих позадинских процеса. За издвајање одступања од Стандардног модела коришћене су мултиваријантне методе анализе, као што су дискриминанте засновани на теорији матричних елемената.

Током докторских студија, кандидат се такође бавио израчунавањима попречних пресека високог реда користећи MATRIX и лабораторијским тестирањем ultra-fast silicon детектора (UFSD).

2.3 Релевантне публикације

- A1 F. Siviero, R. Arcidiacono, G. Borghi, M. Boscardin, N. Cartiglia, M. Costa, G.-F. Dalla Betta, M. Ferrero, F. Ficorella, M. Mandurrino, L. Markovic, L. Pancheri, G. Paternoster, V. Sola, M. Tornago

Design optimization of the UFSD inter-pad region

Nucl. Instrum. Meth. A, 10.1016/j.nima.2024.169153, 2024

- A2 CMS collaboration (with Lazar Markovic)

Measurements of the Higs boson production cross section in the four-lepton final state in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13.6$ TeV

JHEP, 10.1007/JHEP05(2025)079, 2025

Цитати:

- A1 1. Lastovicka-Medin, G., Kramberger, G., Kroll, J., and Rebarz, M.
Impact of the Guard Rings on Self-Induced Signal and Leakage Current in Trench-Isolated Low Gain Avalanche Diodes
SENSORS 10 (2025) 3006.
2. Sola, V. *et al.*
The first batch of compensated LGAD sensors
NIM A 1064 (2024) 169453
- A2 1. CMS Collaboration (Hayrapetyan, A. *et al.*)
Measurements of inclusive and differential Higs boson production cross sections at $\sqrt{s} = 13.6$ TeV in the $H \rightarrow \gamma\gamma$ decay channel, JHEP 09 (2025) 070.

2.4 Приказ научних резултата приказаних у дисертацији

Дисертација је структурирана у поглавља и могу се издвојити **три** дела у којима је јасно приказан оригиналан допринос кандидата.

1. Мерења везана за UFSD

Релевантне референце: [A1, Ц1, Ц2]

У припреми за надоградњу детектора ЦМС за High-Luminosity LHC развијају се UFSD детектори за прецизна мерења времена у региону затварача (endcap). Студија међуподних (интер-пад) распореда усредредила се на оптимизацију геометрије и профила допирања, а резултати иницијалне серије производње указују да је могуће постићи међуподне ширине од око $25 \mu m$ у оптимизованим условима.

Еластомерна поставка омогућава мерење укупне струје цурења контактирањем свих појединачних падова сензора. Облик напонско-струјних кривих уопштено прати очекивања произвођача, мада уз смањену прецизност за сензоре са дубљим имплантима. У неким случајевима измерене струје су веће од оних које наводи произвођач, што сугерише да је поставка у стању да ухвати општи тренд, али да су потребна додатна побољшања и истраживања како би се идентификовали узроци разлика.

2. Мерење ефикасних пресека Хигсовог бозона

Релевантне референце: [A2]

Мерење фидуцијалног ефикасног пресека канала $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ при $\sqrt{s} = 13.6 TeV$ показало је одличну сагласност са очекивањима Стандардног модела. Кључни допринос била је процена NNLO QCD и NLO EW ефикасних пресека за нерезонантни 33 процес.

MATRIX оквир се показао робусним алатом за прецизне предикције Стандардног модела, посебно за дибозонске процесе. Коришћењем MATRIX-а на NNLO QCD тачности (уз NLO EW корекције где су доступне) омогућене су прецизне процене попречних пресека на енергији релевантној за Run 3 услове ЛХЦ-а, при чему комбинација NNLO QCD и NLO EW корекција даје тачност на нивоу процената за ZZ производњу.

3. Мерење самоинтеракције Хигсовог бозона у off-shell режиму

Иновативна стратегија за испитивање самоинтеракције у off-shell производном режиму показала је да се канал $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ може користити за ограничавање параметра самоинтеракције. Матрични елементи укључујући SMEFT c_6 корекције пребачени су са МЦФМ 8.0 на JHUGen-MCFM Monte Carlo алате, омогућавајући анализе засноване на елементима матрице. Ефикасни пресеци су израчунати са појединачним или комбинованим корекцијама (производња, пропагација, распад) и поређени између два генератора, показујући задовољавајућу сагласност у пресеку и кинематичким дистрибуцијама. Reweighting тест који омогућава добављање многих c_6 хипотеза из једног генерисаног узорка такође је показао добру конзистентност са директно генерисаним узорцима.

Матрични елементи за електро-слабу продукцију Хигсових канала су такође израчунати, проширујући оригиналну параметризацију изван главног мода.

Коришћена је статистичка анализа заснована на темплејтима, где су сви ефекти изван СМ параметризовани како би се проценила осетљивост на модификације $k_\lambda = c_6 + 1$. Очекивани скен даје најбољу процену k_λ у сагласности са Стандардним моделом, мада са великим несигурностима.

Off-shell методологија је комплементарна традиционалном приступу ди-Хигс процесу: Off-shell је осетљив на ефекте вишег реда индуковане у петљи, док ди-Хигс директно мери производњу пара Хигсових бозона. Иако је Off-shell осетљивост слабија, резултати у дисертацији показују потенцијал Off-shell мерења као независне ограничавајуће мере.

3 Списак публикација кандидата

А. Радови у међународним часописима

Радови у водећим међународним часописима (импакт фактор » 1)

Лазар Марковић је коаутор 56 радова у оквиру ЦМС колаборације и аутор једног рада у мањем ауторству. Наводе се најзначајнији који су директно везани за докторски рад.

- A1 F. Siviero, R. Arcidiacono, G. Borghi, M. Boscardin, N. Cartiglia, M. Costa, G.-F. Dalla Betta, M. Ferrero, F. Ficorella, M. Mandurrino, L. Markovic, L. Pancheri, G. Paternoster, V. Sola, M. Tornago

Design optimization of the UFSD inter-pad region

Nucl. Instrum. Meth. A, 10.1016/j.nima.2024.169153, 2024

- A2 CMS collaboration (with Lazar Markovic)

Measurements of the Higs boson production cross section in the four-lepton final state in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13.6$ TeV

JHEP, 10.1007/JHEP05(2025)079, 2025

Б. Монографије, уџбеници, помоћни уџбеници

- B1 N. Konjik, L. Markovic, P. Milenovic

Laboratory Manual in Elementary Particle Physics: Computer Exercises, Faculty of physics, University of Belgrade, 2023

ISBN: 978-86-84539-38-2

Ц. Радови у зборницима међународних конференција

Усмена излагања

- Ц1 L. Markovic

The Endcap Timing Layer detector for the CMS Phase-2 upgrade, FAST 2023, Elba, Italy

<https://indico.cern.ch/event/1214183/contributions/5399414/>

Постер презентације

- Ц2 L. Markovic

Progress on characterization of LGAD sensors for the CMS ETL

4 Цитати

56 радова ЦМС колаборације (у којима је Лазар Марковић коаутор) имају укупно 125 цитата (118 без ауто-цитата). Цитати који се односе на радове A1 и A2 наведени су у одељку 2.3.

5 Појединачне оцене рецензената

Име рецензента: Николо Картиља

Институција рецензента: INFN Torino

	Недовољан	Довољан	Добар	Одличан
Укупна научна вредност (оригиналност, релевантност, потпуност)			x	
Увод и библиографија (довољно информација дато у уводу, адекватно цитиране референце)			x	
Методологија (анализа података, одговарајуће и јасно описане методе, адекватна и исцрпна анализа података)			x	
Резултати (уверљиви и јасно објашњени резултати - одговарајући број и квалитет табела и слика)			x	

Укупна оцена (молимо означити једну опцију)

☒ Кандидат може бити примљен на завршни испит

☐ Кандидат може бити примљен на завршни испит, али дисертација захтева мање измене; даља процена од стране рецензента није потребна

☐ Да би кандидат био примљен на завршни испит, дисертација захтева обимне измене; измењена верзија мора бити достављена у року од 6 месеци и поново оцењена од стране рецензента

Посебни коментари и предлози

У овој дисертацији, Лазар Марковић је веома успешно радио унутар Силицијумске лабораторије у Торину. Савладао је употребу лабораторијске опреме и дао значајан допринос у неколико важних мерења. Био је добро интегрисан у истраживачку групу и допринео је одржавању активног рада лабораторије. У целини, веома сам задовољан његовим боравком и ангажовањем у Торину.

Име рецензента: Никола Амапане

Институција рецензента: Универзитет у Торину

	Недовољан	Довољан	Добар	Одличан
Укупна научна вредност (оригиналност, релевантност, потпуност)				x
Увод и библиографија (довољно информација дато у уводу, адекватно цитиране референце)				x
Методологија (анализа података, одговарајуће и јасно описане методе, адекватна и исцрпна анализа података)			x	
Резултати (уверљиви и јасно објашњени резултати - одговарајући број и квалитет табела и слика)				x

Укупна оцена (молимо означити једну опцију)

☒ Кандидат може бити примљен на завршни испит

☐ Кандидат може бити примљен на завршни испит, али дисертација захтева мање измене; даља процена од стране рецензента није потребна

☐ Да би кандидат био примљен на завршни испит, дисертација захтева обимне измене; измењена верзија мора бити достављена у року од 6 месеци и поново оцењена од стране рецензента

Посебни коментари и предлози

Ова дисертација пружа свеобухватан и кохерентан приказ истраживачких активности које је кандидат спровео током својих докторских студија. Она одражава солидно овладавање експерименталном физиком елементарних честица, обухватајући развој детектора (за унапређење CMS Phase-2 timing layers система), рачунарске технике и напредне анализе података из перспективе физике (ограничавање константе троструке самоинтеракције Хигсовог бозона путем коначног стања са четири лептона). Спроведени рад и стратегије анализе пажљиво су мотивисани и реализовани, а приказ резултата је темељит и добро структуриран. Научни резултати су релевантни и значајни за текуће и будуће анализе у оквиру ЦМС колаборације.

Име рецензента: Роберто Коварели

Институција рецензента: Универзитет у Торину

	Недовољан	Довољан	Добар	Одличан
Укупна научна вредност (оригиналност, релевантност, потпуност)			x	
Увод и библиографија (довољно информација дато у уводу, адекватно цитиране референце)				x
Методологија (анализа података, одговарајуће и јасно описане методе, адекватна и исцрпна анализа података)			x	
Резултати (уверљиви и јасно објашњени резултати - одговарајући број и квалитет табела и слика)			x	

Укупна оцена (молимо означити једну опцију)

☒ Кандидат може бити примљен на завршни испит

☐ Кандидат може бити примљен на завршни испит, али дисертација захтева мање измене; даља процена од стране рецензента није потребна

☐ Да би кандидат био примљен на завршни испит, дисертација захтева обимне измене; измењена верзија мора бити достављена у року од 6 месеци и поново оцењена од стране рецензента

Посебни коментари и предлози

У овој дисертацији, Лазар Марковић је показао добру научну зрелост и снажан приступ анализи података у физици, нарочито са рачунарског аспекта. Остварени резултати су високог квалитета и веома цењени од стране остатка ЦМС колаборације. У целини, изражавам дубоко поштовање према раду који је Лазар Марковић спровео током трогодишњег периода својих докторских студија.

Име рецензента: Гаетано Бароне

Институција рецензента: Универзитет Браун

	Недовољан	Довољан	Добар	Одличан
Укупна научна вредност (оригиналност, релевантност, потпуност)				X
Увод и библиографија (довољно информација дато у уводу, адекватно цитиране референце)				X
Методологија (анализа података, одговарајуће и јасно описане методе, адекватна и исцрпна анализа података)			X	
Резултати (уверљиви и јасно објашњени резултати - одговарајући број и квалитет табела и слика)				X

Укупна оцена (молимо означити једну опцију)

X Кандидат може бити примљен на завршни испит

☐ Кандидат може бити примљен на завршни испит, али дисертација захтева мање измене; даља процена од стране рецензента није потребна

☐ Да би кандидат био примљен на завршни испит, дисертација захтева обимне измене; измењена верзија мора бити достављена у року од 6 месеци и поново оцењена од стране рецензента

Посебни коментари и предлози

Ова дисертација описује како рад спроведен у оквиру додавања timing layer-а ЦМС детектора за Phase-2 унапређење, тако и нову анализу спектра великих маса коначног стања са четири лептона ($4l$) ради ограничавања троструке самоинтеракције Хигсовог бозона. Ниво детаља у опису моделовања осетљивости индуковане петљама на параметар κ_λ одражава висок степен техничког ангажовања у успостављању алата неопходних за спровођење овог мерења. Несумњиво је да су добијени резултати од великог интереса за ову област. Још важније, по мом мишљењу, знање стечено у разумевању начина моделовања ове осетљивости представљаће основу за побољшану прецизност у off-shell режиму у ZZ каналима, као и шире гледано, у другим коначним стањима, уз коришћење комплетне статистике доступне у Run-3 фази и на High-Luminosity ЛХЦ-у.

Име рецензента: Вукашин Милошевић

Институција рецензента: Универзитет у Београду

	Недовољан	Довољан	Добар	Одличан
Укупна научна вредност (оригиналност, релевантност, потпуност)				X
Увод и библиографија (довољно информација дато у уводу, адекватно цитиране референце)				X
Методологија (анализа података, одговарајуће и јасно описане методе, адекватна и исцрпна анализа података)				X
Резултати (уверљиви и јасно објашњени резултати - одговарајући број и квалитет табела и слика)				X

Укупна оцена (молимо означити једну опцију)

☒ Кандидат може бити примљен на завршни испит

☐ Кандидат може бити примљен на завршни испит, али дисертација захтева мање измене; даља процена од стране рецензента није потребна

☐ Да би кандидат био примљен на завршни испит, дисертација захтева обимне измене; измењена верзија мора бити достављена у року од 6 месеци и поново оцењена од стране рецензента

Посебни коментари и предлози

Ова дисертација представља прикладан и заокружен преглед рада Лазара Марковића током претходних година. Он је показао добро разумевање обе стране савремене експерименталне физике: рада на детекторима и различитим приступима анализи података. Добијени резултати су од великог значаја за HZZ радну групу и читаву ЦМС колаборацију. Дисертација је јасно и квалитетно написана, при чему је сваки корак мерног поступка детаљно и темељно размотрен.

Име рецензента: Никола Коњик

Институција рецензента: Универзитет у Београду

	Недовољан	Довољан	Добар	Одличан
Укупна научна вредност (оригиналност, релевантност, потпуност)				X
Увод и библиографија (довољно информација дато у уводу, адекватно цитиране референце)				X
Методологија (анализа података, одговарајуће и јасно описане методе, адекватна и исцрпна анализа података)				X
Резултати (уверљиви и јасно објашњени резултати - одговарајући број и квалитет табела и слика)				X

Укупна оцена (молимо означити једну опцију)

☒ Кандидат може бити примљен на завршни испит

☐ Кандидат може бити примљен на завршни испит, али дисертација захтева мање измене; даља процена од стране рецензента није потребна

☐ Да би кандидат био примљен на завршни испит, дисертација захтева обимне измене; измењена верзија мора бити достављена у року од 6 месеци и поново оцењена од стране рецензента

Посебни коментари и предлози

У овој дисертацији, Лазар Марковић је објединио феноменолошки и експериментални, а у одређеним аспектима и теоријски приступ у решавању постављеног проблема. Његов рад представља добру основу за будуће анализе на ЛХЦ-у.

ПРОЦЕНА ОРИГИНАЛНОСТИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

На основу „Правилника о поступку провере оригиналности докторских дисертација одбрањених на Универзитету у Београду“ (у даљем тексту: Правилник) и извештаја генерисаног програмом iThenticate, који је коришћен за проверу оригиналности докторске дисертације под називом „Мерење троструког самоспрезања Хигсовог бозона у каналу распада на четири лептона помоћу ЦМС експеримента“, аутора Лазара Марковића, потврђујемо да утврђена текстуална сличност износи 18%.

Овај ниво сличности последица је приказа општих информација о експерименталном апарату (ЛХЦ акцелератор и ЦМС експеримент) и Стандардном моделу елементарних честица, цитирања коришћене литературе (теоријског моделовања експериментално испитиваних ефеката и релевантних експерименталних метода), као и приказа претходно објављених резултата који укључују и сопствене радове кандидата, што је све у складу са чланом 9 Правилника.

На основу свега претходно наведеног и у складу са чланом 8, став 2 Правилника, изјављујемо да извештај потврђује оригиналност докторске дисертације, те да се може наставити са прописаном процедуром за припрему њене одбране.

Закључак

Комисија је детаљно проучила поднету дисертацију, оцењујући је према критеријумима оригиналности, релевантности, потпуности, методологије и утицаја добијених резултата. Комисија закључује да докторска дисертација „Мерење троструког самоспрезања Хигсовог бозона у каналу распада на четири лептона помоћу ЦМС експеримента“, коју је поднео Лазар Марковић, представља значајан допринос области нуклеарне физике и физике високих енергија и да су испуњени сви прописани услови за одобравање одбране дисертације. Због тога комисија предлаже да Наставно-научно веће Физичког факултета одобри њену одбрану.

Комисија за оцену докторске дисертације кандидата Лазара Марковића:

Др Николо Картиља
Директор истраживања
ИНФН, Торино, Италија

Др Гаетано Бароне
Доцент (истраживање)
Браун универзитет, САД

Др Никола Амапане
Ванредни професор, Департман за физику
Универзитет у Торину

Др Роберто Коварели
Ванредни професор, Департман за физику
Универзитет у Торину

Др Никола Коњик
Доцент, Физички факултет
Универзитет у Београду

Др Вукашин Милошевић
Доцент, Физички факултет
Универзитет у Београду

Датум: _____

TO THE TEACHING AND SCIENTIFIC COUNCIL OF THE FACULTY OF PHYSICS, UNIVERSITY OF BELGRADE

At the session of the Teaching-Scientific Council of the Faculty of Physics of the University of Belgrade held on November 19, 2025, we were appointed as members of the committee for evaluation of the doctoral dissertation entitled "Measurement of triple self-coupling of the Higgs boson in the four lepton decay channel with the CMS experiment", submitted by the candidate Lazar Markovic. The dissertation was carried out under the joint supervision of Prof. Dr. Predrag Milenovic from the Faculty of Physics of the University of Belgrade and Prof. Dr. Roberto Covarelli from the Department of Physics of the University of Torino. To the Teaching-Scientific Council of the Faculty of Physics we submit the following

R E P O R T

1 Basic information about the candidate

1.1 Biographical data

Lazar Markovic was born on August 6, 1996, in Belgrade. He completed the Zemun Gymnasium in 2015. He finished his undergraduate studies at the Faculty of Physics, study program in theoretical and experimental physics, in 2020 with an average grade of 9.59 (nine and 59/100).

He completed his master's studies in physics at his home faculty, in the theoretical and experimental physics program, in 2021 with an average grade of 10 (ten). During his master's studies, Lazar became a member of the CMS collaboration at CERN. His master's thesis, "Search for new phenomena in the production and decay of the Higgs boson using the effective field theory method", supervised by Prof. Dr. Predrag Milenovic, was defended at the Faculty of Physics with an average grade of 10 (ten).

Lazar Markovic enrolled in doctoral studies in physics within the narrower scientific field of Nuclear Physics and High Energy Physics in the 2021/2022 academic year at the Faculty of Physics of the University of Belgrade and the Department of Physics of the University of Torino. From January 2022 to August 2023, Lazar spent most of his time in Torino for research and professional development, working in the laboratory of innovative silicon detectors. From August 2023 to August 2024, he spent most of his time at CERN for research and professional training. At both universities Lazar passed all required examinations, achieving at the University of Belgrade in particular an average grade of 10 (ten).

Since March 2021 (four semesters), Lazar has been teaching computer-based exercises in the course Physics of Elementary Particles, and since November 2021 (three semesters) also in the course Advanced Course in Elementary Particle Physics 1. Lazar is one of the co-authors of the laboratory manual written for these courses and is currently participating in the preparation of a collection of problems. Since October 2024, Lazar has been teaching computational and laboratory exercises in two courses: 1. Nuclear and Particle Physics, 2. Nuclear Physics.

Since March 2022, Lazar has been employed at the Faculty of Physics of the University of Belgrade in the position of Research-intern, and since October 2024 Lazar has been employed in the position of Teaching Assistant for the narrower scientific field of nuclear physics.

1.2 Scientific activity

Parallel to his master's studies, Lazar, as a member of the ATLAS collaboration at CERN, attended the prestigious CERN Summer School, where he conducted research and completed his final project in the field of supersymmetry on the topic "Gluino pair production at the LHC."

During his PhD course, Lazar Markovic's research has focused on the study of the self-interaction of the Higgs boson: this is tackled by both measuring the benchmark Higgs cross-section in the four-lepton final state and subsequently moving to a more challenging analysis on the so-called "off-shell" region of the four-lepton mass spectrum. In this region next-to-leading-order effects on the Higgs production and decay provide sensitivity to possible anomalies in the self-interaction. During such studies, Markovic also worked on high-order perturbative cross section calculations using the MATRIX software, and on the laboratory testing and qualification of ultra-fast silicon detectors (UFSDs).

Based on his work and acquired expertise, Lazar became the CMS collaboration contact person for the Monte Carlo (MC) event generator MATRIX and the HZZ MC contact person within the CMS collaboration, thereby becoming a collaboration-level expert responsible for the simulation of all processes relevant for all measurements and for internal reviews within the HZZ group.

Lazar Markovic attended three major CERN schools dedicated to high-energy physics, statistical data analysis methods, and experimental technologies. He also participated in several workshops and conferences where he presented the results of his work.

2 Description of the submitted thesis

2.1 Basic information

The thesis was carried out under the co-supervision of Prof. Dr. Predrag Milenovic from the Faculty of Physics of the University of Belgrade and Prof. Dr. Roberto Covarelli from the Department of Physics of the University of Torino. Both their research interests are in High Energy Physics, and they have been members of the CMS Collaboration for several years. The thesis consists of 6 chapters, including introduction and conclusions, and three appendices, for a total of 110 pages. There are in total 72 figures, 25 tables and 246 references.

2.2 Subject and objective of the thesis

The scientific field covered in the thesis is that of Nuclear Physics and High Energy Physics. Lazar Markovic's thesis has focused on the study of the self-interaction of the Higgs boson. This analysis aims to measure the coupling constant that describes the interaction of the Higgs boson with itself, a phenomenon predicted by the Standard Model but still little explored

experimentally. The main goal of this research is to measure the triple interaction of the Higgs boson (indicated as κ_λ), which is one of the keys to understanding the mechanism of electroweak symmetry breaking and the origin of the mass of elementary particles. The decay studied is that of the "off-shell" Higgs boson into four leptons (two pairs of electrons or muons), through the intermediate process of two Z bosons. This channel is very interesting because it presents a relatively clean signal, with a low amount of background, but also extremely rare. The research uses data collected by the CMS detector, one of the main experiments at the Large Hadron Collider (LHC) at CERN, with a focus on data from proton-proton collisions from Run 2 and Run 3 (year 2022). The research uses original Monte Carlo simulations to model both the signal of interest (triple-self-interaction Higgs production in the Standard Model and Effective Field Theory) and the various background processes. Multivariate analysis methods, such as matrix element discriminants, are used to extract deviations from the Standard Model prediction. During his doctoral studies, Dr. Markovic also worked on high-order perturbative cross section calculations using the MATRIX software, and on the laboratory testing and qualification of ultra-fast silicon detectors (UFSDs).

2.3 Related publications

- A1 F. Siviero, R. Arcidiacono, G. Borghi, M. Boscardin, N. Cartiglia, M. Costa, G.-F. Dalla Betta, M. Ferrero, F. Ficorella, M. Mandurrino, L. Markovic, L. Pancheri, G. Paternoster, V. Sola, M. Tornago
Design optimization of the UFSD inter-pad region
 Nucl. Instrum. Meth. A, 10.1016/j.nima.2024.169153, 2024
- A2 CMS collaboration (with Lazar Markovic)
Measurements of the Higgs boson production cross section in the four-lepton final state in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13.6$ TeV
 JHEP, 10.1007/JHEP05(2025)079, 2025

Citations:

- A1 1. Lastovicka-Medin, G., Kramberger, G., Kroll, J., and Rebarz, M.
Impact of the Guard Rings on Self-Induced Signal and Leakage Current in Trench-Isolated Low Gain Avalanche Diodes
 SENSORS 10 (2025) 3006.
2. Sola, V. *et al.*
The first batch of compensated LGAD sensors
 NIM A 1064 (2024) 169453
- A2 1. CMS Collaboration (Hayrapetyan, A. *et al.*)
Measurements of inclusive and differential Higgs boson production cross sections at $\sqrt{s} = 13.6$ TeV in the $H \rightarrow \gamma\gamma$ decay channel
 JHEP 09 (2025) 070.

2.4 Overview of scientific results presented in the thesis

The thesis is structured in chapters and **three** parts can be identified where an original contribution from the candidate is clearly presented.

1. UFSD-related measurements

Related works: [A1, C1, C2]

In preparation for the CMS detector upgrade for the High-Luminosity LHC, Ultra-Fast Silicon Detectors (UFSDs) are being developed to provide precise timing measurements in the endcap region. The study of the inter-pad layout focused on optimizing both the geometry and doping profile of UFSDs and results from an early production campaign indicate that, under certain optimized conditions, inter-pad widths of approximately $25\ \mu\text{m}$ can be achieved.

Regarding the elastomer-based setup, it enables measurements of the total leakage current by making contact with all individual pads of a sensors. The shape of the voltage–current curves expected from the manufacturer is generally well reproduced, albeit with reduced accuracy for sensors with deeper implants. In some cases, measured currents exceed those reported by the manufacturer, suggesting that while the elastomer setup captures the overall current trend reliably, there is still room for refinement. Further investigation is needed to pinpoint the underlying cause of these discrepancies.

2. Higgs cross-section measurements

Related works: [A2]

The fiducial cross-section measurement of the $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$ decay channel at 13.6 TeV shows excellent consistency with Standard Model expectations. For this measurement an invaluable ingredient was the estimation of the NNLO QCD and NLO EW production cross-section of the non-resonant ZZ process.

The MATRIX framework has proven to be a highly robust tool for precision Standard Model predictions, particularly for diboson processes. Using MATRIX at NNLO QCD accuracy (supplemented by NLO EW corrections where available) enabled precise cross-section calculations at a proton–proton center-of-mass energy of 13.6 TeV, corresponding to LHC Run 3 conditions. The combination of NNLO QCD and NLO EW corrections demonstrated percent-level theoretical precision for ZZ production.

3. Higgs self-coupling measurement in off-shell

The innovative strategy for probing the Higgs boson self-coupling in the off-shell production regime demonstrates that the $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$ channel can indeed be used to constrain the self-interaction parameter. Matrix elements including SMEFT c_6 corrections were transferred from the MCFM8.0 to JHUGen-MCFM Monte Carlo generating tools, enabling matrix-element-based analyses. The production cross sections were computed with individual or combined corrections applied (production, propagation, decay) and compared across the two generators, showing satisfactory agreement in both cross sections and kinematic distributions. A reweighting test, allowing many c_6 hypotheses to be derived from a single generated sample, also showed good consistency between directly generated samples and their reweighted counterparts. Matrix elements for electroweak Higgs production channels were also computed, extending the original parameterization beyond the main mode.

A template-based statistical analysis, where all BSM effects are parametrized, is used to estimate sensitivity to modifications of $\kappa_\lambda = c_6 + 1$. The expected scan gives a best-fit value of

κ_λ consistent with the Standard Model, though with large uncertainties.

The off-shell methodology is complementary to the traditional di-Higgs approach: the former is sensitive to higher-order loop-induced effects, while the latter probes deviations in the Higgs self-coupling by directly measuring di-Higgs production. While the off-shell sensitivity is weaker, the results presented in the thesis highlight the potential of off-shell measurements as an independent constraint.

3 List of the candidate's publications

A. Papers in international journals

Papers in leading international journals (impact factor > 1)

Lazar Markovic is author of 56 papers as co-author with the CMS collaboration, and author of one paper with a small group of the authors. We list the most significant ones which are directly related to his doctoral work.

- A1 F. Siviero, R. Arcidiacono, G. Borghi, M. Boscardin, N. Cartiglia, M. Costa, G.-F. Dalla Betta, M. Ferrero, F. Ficorella, M. Mandurrino, L. Markovic, L. Pancheri, G. Paternoster, V. Sola, M. Tornago

Design optimization of the UFSD inter-pad region

Nucl. Instrum. Meth. A, 10.1016/j.nima.2024.169153, 2024

- A2 CMS collaboration (with Lazar Markovic)

Measurements of the Higgs boson production cross section in the four-lepton final state in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13.6$ TeV

JHEP, 10.1007/JHEP05(2025)079, 2025

B. Monographs, textbooks, auxiliary textbooks

- B1 N. Konjik, L. Markovic, P. Milenovic

Laboratory Manual in Elementary Particle Physics: Computer Exercises, Faculty of physics, University of Belgrade, 2023

ISBN: 978-86-84539-38-2

C. Papers in proceedings of international conferences

Oral presentations

- C1 L. Markovic

The Endcap Timing Layer detector for the CMS Phase-2 upgrade

FAST 2023, Elba, Italy

<https://indico.cern.ch/event/1214183/contributions/5399414/>

Poster presentations

- C2 L. Markovic

Progress on characterization of LGAD sensors for the CMS ETL

4 Citations

The 56 papers by CMS collaboration (with Lazar Markovic) have a total of 125 citations (118 without self-citations). The ones related to papers A1 and A2 are listed in Section 2.3.

5 Individual reviewer assessments

Name of the reviewer: Nicol  Cartiglia

Reviewer's institution: INFN Torino

	Insufficient	Sufficient	Good	Excellent
Overall scientific merit (originality, relevance, completeness)			x	
Introduction and bibliography (sufficient information provided in the introduction, appropriately cited references)			x	
Methodology (data analysis, appropriate and clearly described methods, adequate and exhaustive data analysis)			x	
Results (convincing and clearly explained results - adequate number and quality of tables and figures)			x	

Overall evaluation (please check one)

- ☒ The candidate can be admitted to the final examination
- ☐ The candidate can be admitted to the final examination but the thesis requires minor revision; further evaluation by the reviewer is not required
- ☐ To be admitted to the final examination the thesis requires extensive revision; the revised version must be provided within 6 months and must be re-evaluated by the reviewer

Specific comments and suggestions

In this thesis, Lazar Markovic has worked in the Torino Silicon laboratory with good profit. He has learned to use laboratory equipment and contributed to several important measurements. He was integrated in the group, and contributed to keep the laboratory active. Overall, I am very pleased with his presence in Torino.

Name of the reviewer: Nicola Amapane

Reviewer's institution: University of Turin

	Insufficient	Sufficient	Good	Excellent
Overall scientific merit (originality, relevance, completeness)				x
Introduction and bibliography (sufficient information provided in the introduction, appropriately cited references)				x
Methodology (data analysis, appropriate and clearly described methods, adequate and exhaustive data analysis)			x	
Results (convincing and clearly explained results - adequate number and quality of tables and figures)				x

Overall evaluation (please check one)

- ☒ The candidate can be admitted to the final examination
- ☐ The candidate can be admitted to the final examination but the thesis requires minor revision; further evaluation by the reviewer is not required
- ☐ To be admitted to the final examination the thesis requires extensive revision; the revised version must be provided within 6 months and must be re-evaluated by the reviewer

Specific comments and suggestions

This dissertation offers a comprehensive and coherent account of the research activities undertaken by the candidate during his doctoral studies. It reflects a solid mastery experimental particle physics, spanning detector development (for CMS Phase-2 timing layers), computational techniques, and advanced physics analysis (constraining the trilinear Higgs self-coupling via the four-lepton final state). The work done and the analysis strategies are carefully motivated and executed, and the presentation of the results is thorough and well structured. The scientific outcomes are relevant and significant for ongoing and future CMS analyses.

Name of the reviewer: Roberto Covarelli
Reviewer's institution: University of Turin

	Insufficient	Sufficient	Good	Excellent
Overall scientific merit (originality, relevance, completeness)			x	
Introduction and bibliography (sufficient information provided in the introduction, appropriately cited references)				x
Methodology (data analysis, appropriate and clearly described methods, adequate and exhaustive data analysis)			x	
Results (convincing and clearly explained results - adequate number and quality of tables and figures)			x	

Overall evaluation (please check one)

- ☒ The candidate can be admitted to the final examination
- ☐ The candidate can be admitted to the final examination but the thesis requires minor revision; further evaluation by the reviewer is not required
- ☐ To be admitted to the final examination the thesis requires extensive revision; the revised version must be provided within 6 months and must be re-evaluated by the reviewer

Specific comments and suggestions

In this thesis, Lazar Markovic has demonstrated good scientific maturity and a strong attitude for data analysis in physics, especially from a computational perspective. The results achieved are of high quality and highly appreciated by the rest of the CMS collaboration. Overall, I express my deep appreciation for the work carried out by Dr. Lazar Markovic during the three-year period of his PhD.

Name of the reviewer: Gaetano Barone
Reviewer's institution: Brown University

	Insufficient	Sufficient	Good	Excellent
Overall scientific merit (originality, relevance, completeness)				X
Introduction and bibliography (sufficient information provided in the introduction, appropriately cited references)				X
Methodology (data analysis, appropriate and clearly described methods, adequate and exhaustive data analysis)			X	
Results (convincing and clearly explained results - adequate number and quality of tables and figures)				X

Overall evaluation (please check one)

- ☒ The candidate can be admitted to the final examination
- ☐ The candidate can be admitted to the final examination but the thesis requires minor revision; further evaluation by the reviewer is not required
- ☐ To be admitted to the final examination the thesis requires extensive revision; the revised version must be provided within 6 months and must be re-evaluated by the reviewer

Specific comments and suggestions

This thesis describes both the work carried out in the context of adding timing layers to the CMS detectors for the Phase-2 upgrade and a novel analysis of the high-mass spectrum of the 4ℓ final state to constrain the trilinear self-coupling. The level of detail in describing the modelling of loop-induced sensitivity to κ_λ mirrors the technical involvement in setting up the tools necessary to accomplish this measurement. Undoubtedly, the results are of great interest to the field. More importantly, in my opinion, the knowledge gained in understanding how to model this sensitivity will form the basis for improved precision in the off-shell regime in ZZ and, more broadly, in other final states, with the complete statistics available in Run-3 and at the High-Luminosity LHC.

Name of the reviewer: Vukašin Milošević

Reviewer's institution: University of Belgrade

	Insufficient	Sufficient	Good	Excellent
Overall scientific merit (originality, relevance, completeness)				X
Introduction and bibliography (sufficient information provided in the introduction, appropriately cited references)				X
Methodology (data analysis, appropriate and clearly described methods, adequate and exhaustive data analysis)				X
Results (convincing and clearly explained results - adequate number and quality of tables and figures)				X

Overall evaluation (please check one)

- ☒ The candidate can be admitted to the final examination
- ☐ The candidate can be admitted to the final examination but the thesis requires minor revision; further evaluation by the reviewer is not required
- ☐ To be admitted to the final examination the thesis requires extensive revision; the revised version must be provided within 6 months and must be re-evaluated by the reviewer

Specific comments and suggestions

This thesis serves as a fitting summary of Lazar Markovic's work over the past years. He has demonstrated a good grasp of both sides of modern experimental physics: detector work and various data analysis approaches. The obtained results are of high importance for the HZZ physics analysis group and the entire CMS collaboration. The thesis is well written, with every step of the measurement process examined in thorough detail.

Name of the reviewer: Nikola Konjik

Reviewer's institution: University of Belgrade

	Insufficient	Sufficient	Good	Excellent
Overall scientific merit (originality, relevance, completeness)				x
Introduction and bibliography (sufficient information provided in the introduction, appropriately cited references)				x
Methodology (data analysis, appropriate and clearly described methods, adequate and exhaustive data analysis)				x
Results (convincing and clearly explained results - adequate number and quality of tables and figures)				x

Overall evaluation (please check one)

☒ The candidate can be admitted to the final examination

☐ The candidate can be admitted to the final examination but the thesis requires minor revision; further evaluation by the reviewer is not required

☐ To be admitted to the final examination the thesis requires extensive revision; the revised version must be provided within 6 months and must be re-evaluated by the reviewer

Specific comments and suggestions

In this thesis, Lazar Marković has merged both the phenomenological and experimental, but also in some aspects theoretical approaches in solving the given problem. His work should be good foundation for future analyses at LHC.

ASSESSMENT ON THE ORIGINALITY CHECK OF THE DOCTORAL DISSERTATION

Based on the "Regulation for the procedure for checking the originality of doctoral dissertations defended at the University of Belgrade" (hereinafter: the Regulation) and on the findings presented in the report generated by the iThenticate program, which was used to verify the originality of the doctoral dissertation "Measurement of triple self-coupling of the Higgs boson in the four lepton decay channel with the CMS experiment", authored by Lazar Marković, we confirm that the identified text similarity amounts to 18%.

This level of similarity is a consequence of the presentation of general information about the experimental apparatus (the LHC accelerator and the CMS experiment) and the Standard Model of elementary particles, the citation of the literature used (theoretical modeling of the effects being experimentally tested, relevant experimental methods), as well as the presentation of previously published results that include the doctoral candidate's own research, all of which is in accordance with Article 9 of the Regulation.

Based on all the facts presented above, and in accordance with Article 8, paragraph 2 of the Regulation, we state that the report confirms the originality of the doctoral dissertation, and therefore the prescribed procedure for the preparation for its defense may proceed.

C O N C L U S I O N

The Committee has thoroughly examined the submitted thesis, evaluating it based on criteria of originality, relevance, completeness, methodology and impact of the obtained results. The Committee concludes that the doctoral thesis "Measurement of triple self-coupling of the Higgs boson in the four lepton decay channel with the CMS experiment" submitted by Lazar Markovic makes a significant contribution to the field of Nuclear Physics and High Energy Physics, and that all prescribed requirements for approving the defense of the thesis have been satisfied. Therefore, we propose that the Teaching and Scientific Council of the Faculty of Physics approve its defense.

Committee for evaluation of the doctoral thesis submitted by the candidate Lazar Markovic:

Dr Nicolo Cartiglia
Director of Research
INFN, Turin, (IT)

Dr Gaetano Barone
Assistant Professor (Research)
Brown University, USA

Dr Nicola Amapane
Associate Professor, Physics Department
University of Turin

Dr Roberto Covarelli
Associate Professor, Physics Department
University of Turin

Dr Nikola Konjik
Assistant Professor, Faculty of Physics
University of Belgrade

Dr Vukasin Milosevic
Assistant Professor, Faculty of Physics
University of Belgrade

Date: _____