

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ФИЗИЧКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Пошто смо на I седници Наставно-научног већа Физичког факултета Универзитета у Београду одржаној 19. новембра 2025. именовани за чланове Комисије за преглед и оцену дисертације *W Boson Physics and Luminosity Calibration at the ATLAS Experiment* (Физика W бозона и калибрација луминозности на експерименту АТЛАС) коју је предао Вељко Максимовић, подносимо следећи

Извештај

1 Биографски подаци

Вељко Максимовић је рођен 9. октобра 1993. године у Новом Пазару. Гимназију у Новом Пазару завршио је 2012. године са одличним успехом (просек 5.0). Основне студије на Физичком факултету Универзитета у Београду завршио је 2018. (просек 9.21), а мастер студије на истом факултету завршио је 2019. године са просечном оценом 10.0. Мастер рад под називом „*Могућности за унапређење мерења масе W бозона на експерименту АТЛАС*” урађен је под менторством др Ненада Врањеша, научног саветника у Институту за физику. Од мастер студија, кандидат је укључен у експеримент АТЛАС на Великом сударачу хадрона у ЦЕРН-у. Од октобра 2019. године, Вељко Максимовић је студент докторских студија на Физичком факултету, ужа научна област Физика високих енергија и нуклеарна физика. Био је ангажован на пројекту основних истраживања Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије ОИ 171004 у Лабораторији за физику високих енергија Института за физику у Београду.

У септембру 2019. године Вељко Максимовић је учествовао организацији првог *Standard Model Workshop*-а у Београду на којем су учествовали научници окупљени око АТЛАС колаборације у ЦЕРН-у. Кандидат је држао предавање под називом *Absolute Luminosity calibration in pp collisions at $\sqrt{s}=900$ GeV in the ATLAS experiment* на 11. регионалној конференцији *Balkan Physical Union (BPU11 Congress)* одржаној од 28. августа до 1. септембра 2022. године у Београду. На сродну тему под насловом *Van der Meer analysis of 2018 pp data collected at 900 GeV* презентовао је постер на *ATLAS week*-у у ЦЕРН-у одржаном од 13. до 17. фебруара 2023. године. Кандидат је 2025. године одабран да испред АТЛАС колаборације одржи предавање на *Workshop*-у *On Quantum Entanglement at the Energy Frontier* који је од 25. до 28. априла у Школи физике, Универзитета у Пекингу, а тема предавања је била *Quantum Entanglement from the LHC ATLAS experiment*. Поред тога, кандидат је похађао *CERN Accelerator School* (2022. године), *MCnet Summer School* (2024), као и *CERN-Fermilab HCP Summer School* намењену студентима завршних година докторских студија (2023). Запослен је у Институту за физику, тренутно у звању истраживач сарадник. Ожењен, отац једног детета.

2 Опис предате дисертације

2.1 Основне информације

Предмет, назив и ментор докторске дисертације одобрени су на Колегијуму докторских студија Физичког факултета у Београду 15. јуна 2022. године, односно ННВ 14. септембра 2022. Ментор је Ненад Врањеш, научни саветник у Институту за физику. Рад има 118 страница (без сажетка, садржаја, библиографије и другог помоћног материјала) организованих у 4 поглавља, са 2 поглавља која садрже оригиналне резултате (укупно 80 страница). Рад има 60 слика и 24 табеле, библиографија садржи 272 референце. Теза је написана на енглеском језику. Након што је рукопис прошао кроз софтвер за аутентификацију, установљено је да 1% текста одговара тексту објављеном на другом месту (не узимајући у обзир публикације кандидата). Утврђено је да је подударане последица општих информација које се углавном односе на опис експерименталне поставке и теоријски оквир рада.

2.2 Предмет и циљ докторске дисертације

Вељко Максимовић се у свом научном раду бави експерименталном физиком високих енергија у оквиру експеримента АТЛАС на Великом сударачу хадрона (LHC) у ЦЕРН-у. Проблематика истраживања којима се кандидат бави је мерење луминозности на детектору АТЛАС и физика градијентних бозона. Предмет првог дела докторске дисертације је апсолутна калибрација луминозности за посебан режим рада LHC -а у протон-протон сударима на енергији у систему центра-месе $\sqrt{s} = 900 \text{ GeV}$. Предмет другог дела дисертације је мерење пресека за продукцију W бозона у протон-протон сударима на енергији у систему центра-месе $\sqrt{s} = 13.6 \text{ TeV}$ са подацима прикупљеним током текућег периода прикупљања података на LHC -у (RUN-3).

Луминозност описује потенцијал сударача да врши сударе у јединици времена, односно представља однос између брзине интеракције (броја произведених честица датог процеса у јединици времена) и пресека датог процеса. Интегрална луминозност је интеграл луминозности по времену, и представља меру количине прикупљених података. Прецизно знање интегралне луминозности је кључно, на пример, у мерењу пресека за продукцију W и Z бозона и топ кваркова на хадронском сударачу (где неодређеност на интегралну луминозност често одређује прецизност мерења), као и у потрази за честицама изван Стандардног модела где се користи у нормирању нивоа фонских процеса процењених на основу Монте Карло симулација. Луминозност се у експерименту мери помоћу посебних детекционих уређаја, луминометара. Не експерименту АТЛАС се користи више таквих уређаја (LUCID, BCM), и за сваки луминометар дефинише се више различитих алгоритама који из тзв. сировог одброја прерачунавају стопу интеракције. Луминозност се добија из количника стопе интеракције и нееластичног пресека (тачније видљивог нееластичног пресека, σ_{vis}). Величина σ_{vis} се одређује за сваки алгоритам посебно и представља калибрациону константу. На хадронским сударачима апсолутна калибрација луминозности се заснива на одређивању σ_{vis} анализирањем података које су прикупили луминометри током укрштања снопова дуж вертикалне или хоризонталне осе у трансверзалној равни. Ови судари се технички називају van der Meer (vdM) ске-

нови, а цео поступак је заснован на истоименом формализму, где се из зависности стопе интеракције од сепарације снопова и параметера снопа на основу фита експерименталних података добија вредност σ_{vis} . Циљ истраживања урађене докторске дисертације био је одређивање σ_{vis} за различите алгоритме анализом података из vdM скенова на енергији $\sqrt{s} = 900$ GeV прикупљених током октобра и новембра 2018. Ови скенови су обављени како би се одредила луминозност за податке у посебном режиму рада *LHC*-а на датој енергији и са вредностима β^* која омогућава велики ангуларни растур протона у снопу ($\beta^* = 11$ m, и $\beta^* = 100$ m, типичне вредности на *LHC*-у су $\beta^* < 1$ m). Примарни интерес за прикупљане наведених података је мерење еластичног пресека (у функцији Манделштамове варијабле t) за протон-протон сударе на наведеној енергији, као и тоталног pp пресека и параметра ρ (односа између реалног и имагинарног дела амплитуде еластичног расејања). Треба напоменути да тотални пресек за pp интеракције до сада није мерен на енергији $\sqrt{s} = 900$ GeV, ни на сударачима, ни у експериментима са космичим зрацима. Доминантна неодређеност приступу који се користи на експерименту АТЛАС (мерање тоталног пресека је до сада обављено за $\sqrt{s} = 7,8,13$ TeV) потиче од интегралне луминозности. Поред одређивања σ_{vis} било је потребно проценити (и по могућности минимизовати) релевантне систематске неодређености које произилазе из програма анализе vdM података.

Градијентни бозони $W^\pm$, Z^0 , γ су фундаменталне честице Стандардног модела (СМ) које су преносиоци електрослабе интеракције. Изучавање W бозона, пре свега мерење масе, ширине и фактора гранања представља важан тест СМ. Мерење пресека (тоталних, фидуцијалних и диференцијалних) на хадронским сударачима омогућава тестирање квантне хромодинамике са великом прецизношћу као и упоређивање теоријских предикција заснованих на различитим партонским дистрибутивним функцијама (parton distribution functions, PDFs) са резултатима мерења. Мерење укупног попречног пресека продукције W бозона (помножен фактором гранања за дати канал распада) обухвата одређивање корекционог фактора сигнала (везано за експерименталне ефекте као што су ефикасност тригерована, реконструкције, идентификације и изолације лептона, резолуције недостајуће трансверзалне енергије), аксептансе сигнала која дефинише фидуцијалну „запремину” у фазном простору у којој се мери пресек за продукцију дате честице, и одређивање нивоа фонских процеса у датом узорку. Производ тоталног ефикасног пресека и аксептансе назива се фидуцијални ефикасни пресек који факторизује инструменталне ефекте и теоријска предвиђања. Аксептанса је процењена коришћењем Монте Карло симулација а корекциони фактор добија се из *in situ* мерења и добијени резултати се упоређују са предвиђањима Монте Карло симулација. Циљ докторске дисертације је мерење тоталног и фидуцијалног пресека $pp \rightarrow W^\pm \rightarrow \ell\nu + X$, где је $\ell = e, \mu$, са подацима из протон-протон судара на енергији у систему центра-месе $\sqrt{s} = 13.6$ TeV који су прикупљени током прве године RUN-3.

Методе истраживања обухватале су методе анализе података у физици високих енергија, и методе физике акцелератора.

2.3 Остварени резултати

Апсолутна скала луминозности за наведене податке одређена је из калибрационих константи (σ_{vis}) за серију различитих алгоритама. Зависност стопе интеракције од сепарације снопова се не може описати аналитички већ се користе емпиријске „Гаусолике” функције, попут GPn које су производ Гаусијана и полинома n —тог степена. Кандидат је испитао различите функције, њихову стабилност и робусност, ради проналажења оптималног емпиријског модела који описује податке, а затим одредио неодређености у складу са оптималним избором. Даље, главни фонски процеси узети у обзир су инструментални шум (*noise*), „постсјај” (*afterglow*, фотони који потичу од распада расејаних хадрона) и расејање сноп-гас (*beamgas*). Други извор фона има утицај на мерење популисаности банчева протонима, где су коригована мерења за „духове” честице (*ghost charge particles*) и за сателитске банчеве. „Духови” честице су протони који се налазе у номинално непопуњеним банчевима, а урачунати су у интегралну популисаност. Сателитски банчеви су протони присутни у номинално попуњеним банчевима али не одговарају датом банчу. Анализирањем наведеног скупа података утврђена је енормна контаминација „духовима” и сателитским банчевима. Средњи ниво контаминације „духовима” честицама по снопу био је и до $\sim 13\%$ и утицао је на прецизност одређивања σ_{vis} и до $\sim 34\%$. Како је удео „духова” честица типично $\sim 1\%$ развијене су алтернативне методе за процену ове корекције за скуп података из октобра 2018. Даље, процењени су ефекти одступања (дрифтови) снопова од предвиђених орбита током скенирања (који се рефлектују кроз промену номиналне сепарације снопова), као и стохастичне промене позиције снопа. Наведени ефекти процењени су за сваки скуп података засебно и кориговани. Снопови протона интерагују међусобно електромагнетном интеракцијом узрокујући промену параметара фита, узрокујући два ефекта: (i) скретање (дефлексија) снопа (ii) дефокусирање снопова анологно је постојању квадрупла у тачки интеракције. Први ефекат описан је аналитичком функцијом (која се, опет користи у корекцији номиналне сепарације снопова) а други је моделиран применом Монте Карло симулацијама. На крају, како је цео формализам занован на претпоставци факторизације вертикалне и трансверзалне компоненете густине протона у снопу, а током сличних студија утврђено нарушење претпоставке факторизације, кандидат је дизајнирао посебни модел „спрегнутих” фитоа (дводимензиони фит са заједничким параметрима) како би се проценио ефекат наведеног нарушења. Поред поменутих ефеката кандидат је проверио конзистентност σ_{vis} међу банчевима, конзистентност одговора различитих алгоритама, репродуцибилност резултата између скенова. Процењена укупна неодређеност поступка калибрације је 1.85% , што представља значајан успех узимајући у обзир да се ради о посебном режиму рада *LHC*-а са нетипичним вредностима β^* . Калибрационе константе (и одговарајће интегралне луминозности) су изведене за неколико алгоритама са задовољавајућом статистиком за детектор LUCID. Конзистентност међу алгоритмима процењена је коришћењем података са траговаима Унутрашњег детектора заједно са инклузивним, коинцидентним и hit-counting алгоритмима за LUCID. Интегралне вредности луминозности за две конфигурације β^* износе $L_{int} = 925.4 \pm 0.5(stat) \pm 20.0(sys) \mu b^{-1} (\beta^* = 50/100 m)$ и $L_{int} = 501.0 \pm 0.4(stat) \pm 10.6(sys) \mu b^{-1} (\beta^* = 11 m)$. Добијена укупна систематска

неодређеност интегралне луминозности износи 2.1% и укључује доприносе поступка калибрације, стабилности одзива детектора и конзистентности разичитих алгоритама.

У другом делу дисертације приказано је мерење инклузивног попречног пресека производње W -бозона са подацима из протон-протон сударима на енергији у систему центра-месе $\sqrt{s} = 13.6$ TeV који одговарају интегралној луминозности 29 fb^{-1} . Фидуцијална запремина, одређена величином детектора и прагом за тригеровање догађаја, дефинисана је селекционим условима $p_T^\ell > 27 \text{ GeV}$, $|\eta^\ell| < 2.5$, $p_T^{\text{miss}} > 25 \text{ GeV}$, $m_T^W > 50 \text{ GeV}$. У дисертацији су измерени фидуцијални пресеци посебно за W^+ и W^- бозоне, као и њихов однос. Корекциони фактори и аксептансе сигнала за четири канал распада $W^+ \rightarrow e^+ \nu_e$, $W^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$, $W^- \rightarrow e^- \nu_e$, $W^- \rightarrow \mu^- \nu_\mu$, процењени су моделом Sherpa, верзија 2.2.12, и потпуне симулације одговора детектора засноване на Geant 4 програму. Ниво фона за електрослабе процесе и продукцију топ кваркова одређен је помоћу Монте Карло симулација, а ниво фона који потиче од продукције цетова процењен је директно из података. Експерименталне и теоријске неодређености су пропагиране у коначно мерење. Доминантна контрибуција неодређености произилази из нивоа фонских процеса и луминозности у електронском каналу, идоносно луминозности и неодређеностима у реконструкцији цетова у мионском каналу. Укупни и фидуцијални пресеци за четири једнолептонска канала прво су одређени коришћењем класичног метода event count, са прецизношћу 4.4–5.5%. Резултати су затим потврђени методом профилисане веродостојности (Profile likelihood fit, PLH). Утврђено је одлично слагање резултата два наведена метода у границама статистичке неодређености. PLH метод даје за око 0.5% мање укупне неодређености, па је тај метод узет као основни. PLH методом је добијен и коначни резултат, као и однос фидуцијалних пресека за W^+ и W^- : $\sigma_{fid}(W^+) = 4250 \pm 150 \text{ pb}$ $\sigma_{fid}(W^-) = 3310 \pm 120 \text{ pb}$, $R_{W^+/W^-} = 1.286 \pm 0.022$. Доминантна неодређеност за однос наелектрисања потиче од нивоа фона који је некорелисан између различитих наелектрисања, као и електронског и мионског канала. Измерени попречни пресеци W -бозона се добро слажу са предвиђањима СМ, заснованим на прорачуну вишег реда у теорији пертурбације. Предвиђања заснована на најнапреднијим ПДФ-овима упоређена су са фидуцијалним пресецима, као и односом R_{W^+/W^-} . Сва предвиђања су компатибилна са резултатима мерења у оквиру процењених неодређености. Кандидатов допринос у овој студији је био везан за експерименталне аспекте, конкретно селекцију догађаја, процену фонских процеса, процену систематских неодређености везаних за лептоне, као и мерење пресека у класичном приступу.

2.4 Публикације

Кандидат је аутор свих публикација АТЛАС-а од завршетка ауторског квалификационог задатка 2021. године. Резултати представљени у предатој дисертацији објављени су у:

- G. Aad,..., V. Maksimovic *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of vector boson production cross sections and their ratios using pp collisions at $\sqrt{s}=13.6$ TeV with the ATLAS detector," Phys. Lett. B **854** (2024), 138725 doi:10.1016/j.physletb.2024.138725 [arXiv:2403.12902 [hep-ex]].

- G. Aad,...,V. Maksimovic *et al.* [ATLAS Collaboration], "Measurement of the tt cross section and its ratio to the Z production cross section using pp collisions at s=13.6 TeV with the ATLAS detector," Phys. Lett. B **848** (2024), 138376 doi:10.1016/j.physletb.2023.138376 [arXiv:2308.09529 [hep-ex]].

Треба напоменути да је кандидат *contact editor* за рад у припреми:

- G. Aad,...,V. Maksimovic *et al.* [ATLAS Collaboration], "Absolute luminosity calibration and determination for 2018 pp dataset at $\sqrt{s}=900$ GeV using the ATLAS detector at the LHC",
https://atlas-glance.cern.ch/atlas/analysis/papers/details?ref_code=LUMI-2024-01

Резултати ове студије су прихваћени у оквиру АТЛАС колаборације и слање рада у часопис се очекује до краја ове године. Није уобичајена пракса да докторанди буду именовани за *contact editor* у оквиру колаборације, што говори о доприносу кандидата проблематици калибрације луминозности.

3 Закључак

На основу наведеног Комисија закључује да резултати дисертације коју је поднео Вељко Максимовић представљају оригиналан научни допринос кандидата и дају значајан допринос развоју области експерименталне физике високих енергија. Стога предлажемо њену јавну одбрану.

Београд,
21. новембар 2025.

др Маја Бурић
редовни професор, Физички факултет

др Душко Латас,
ванредни професор, Физички факултет

др Марија Врањеш Милосављевић
научни саветник, Институт за физику