

# НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ФИЗИЧКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Пошто смо на VII седници Наставно-научног већа Физичког факултета Универзитета у Београду одржаној 26. априла 2017. године одређени за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације *MEASUREMENT OF THE W BOSON MASS AND THE CALIBRATION OF THE MUON MOMENTUM WITH THE ATLAS DETECTOR* (Мерење масе  $W$  бозона и калибрација импулса миона на детектору АТЛАС) из научне области физика честица, коју је кандидаткиња Александра Димитријевска, дипломирани мастер физичар, предала Физичком факултету 24. априла 2017, након прегледа дисертације подносимо следећи

## ИЗВЕШТАЈ

### 1 Основни подаци о кандидаткињи

#### 1.1 Биографски подаци

Александра Димитријевска је рођена 1984. године у Бору, Република Србија. Основне студије уписала је 2003. године на Природно-математичком факултету Универзитета у Новом Саду, на смеру дипломирани физичар, а дипломирала је 2010. са просечном оценом 9.96 и оценом 10 на дипломском раду. Мастер студије завршила је на истом факултету 2011. са просечном оценом 9.94. Децембра 2011. године уписала је докторске студије на Физичком факултету Универзитета у Београду, смер физика језгара и честица, где је положила све предвиђене испите. У току школовања била је стипендиста Републичке фондације за развој научног и уметничког подмлатка (2002-2009), добитник школарине *EFG Eurobank* за најбоље студенте државних факултета у Србији (2010), као и стипендиста Фонда за младе таленте Републике Србије (2010/11). Од 1. децембра 2011. године запослена је у Лабораторији за физику високих енергија Института за физику, а од јула 2014. је у звању истраживач сарадник. Учествовала је на следећим школама из физике честица: *Sarajevo School of High Energy Physics*, 2012, Сарајево, Босна и Херцеговина, *CERN Summer Student Programme* 2012, ЦЕРН, Швајцарска, *CERN-Fermilab Hadron Collider Physics Summer School*, 2013, ЦЕРН, Швајцарска, *Danube School on Instrumentation in Elementary particle & Nuclear physics*, 2014, Нови Сад, Србија. По позиву АТЛАС колаборације кандидаткиња је два пута представљала резултате на међународним конференцијама: *LHC Days in Split*, 2014, Хрватска и *European Physical Society Conference on High Energy Physics*, 2015, Беч, Аустрија. Активно је учествовала у организацији *MasterClass* програма за ученике и наставнике средњих школа у Србији под покровитељством *IPPOG (International Particle Physics Outreach Group)*.

#### 1.2 Научна активност

Научна активност Александре Димитријевске одвија се у области експерименталне физике честица. Од 2011. учествује у раду АТЛАС колаборације на Великом сударачу ха-

дрона (ЛХЦ) у ЦЕРН-у. Њена примарна активност била је везана за прецизна мерења параметара Стандардног модела, као и одређивање карактеристика реконструкције миона на детектору АТЛАС. Појам реконструкције објеката у експерименталној физици честица се користи као синоним за идентификацију и мерење четвороимпулса тих објеката. Конкретно, кандидаткиња је радила на мерењу масе  $W$  бозона са подацима добијеним у протон-протон сударима на ЛХЦ-у прикупљеним током 2011. на енергији судара  $\sqrt{s} = 7$  TeV. Треба напоменути да је у питању веома изазован пројекат: да би се резултати могли упоредити са теоријским предвиђањима потребно је достићи екстремну прецизност од 0.01%. Поређења ради, типична прецизна мерења на ЛХЦ-у имају за циљ прецизност реда величине 1%. Прецизно одређивање масе  $W$  бозона омогућава тестирање конзистентности Стандардног модела и посредно тестирање постојања физике која није укључена у Стандардни модел. Резултат приказан у докторској дисертацији представља први резултат мерења овог параметра на ЛХЦ-у. Поред тога, кандидаткиња је активно учествовала у калибрацији импулса миона са подацима прикупљеним током 2011. и 2012. године. Калибрација импулса миона је рађена коришћењем добро изучених распада  $J/\psi$  мезона на два миона. Прва важна примена калибрације лептона на АТЛАС-у је било мерење масе Хигсовог бозона у четворолептонском каналу (4 миона, 4 електрона и два миона и два електрона).

Александра Димитријевска је ангажована је на пројекту „АТЛАС експеримент и физика честица на ЛХЦ енергијама”, финансираном од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја, који се реализује у Институту за физику. Од септембра 2013. је квалификовани аутор свих радова АТЛАС колаборације. До сада је оригинални допринос имала у три рада у међународним часописима са импакт фактором већим од 1 (један рад је поступку рецензије), у три јавне ноте АТЛАС колаборације, пет интерних нота. Према бази *Web of Science* објављени радови су цитирани 48 пута не рачунајући аутоцитате. Два пута је презентовала по позиву на међународним конференцијама.

## 2 Опис предатог рада

### 2.1 Основи подаци о докторској дисертацији

Докторска дисертација је реализована у оквиру две групе колаборације АТЛАС: *Standard model* и *Muon Combined Performance* групе. Не рачунајући Увод, Закључак и два Апендикса, дисертација има 6 поглавља и написана је на енглеском језику. Дисертација има 270 страница, 126 оригиналних слика, 41 оригиналну табелу и 212 референци. У уводном поглављу дат је кратак опис Стандардног модела, мотивација за мерење масе  $W$  бозона, резултати из претходних експеримената, затим описана феноменологија градијентних бозона на протон-протон сударачима и приказана стратегија мерења масе  $W$  бозона на АТЛАС-у. У другом поглављу дат је опис АТЛАС детектора и инфраструктуре за симулацију догађаја. Оригинални допринос приказан је преостала четири поглавља и опис садржаја ових поглавља дат је у Прегледу научних резултат овог Извештаја. Дисертација урађена је под руководством др Ненада Врањеша, научног сарадника из Института за физику. Ментор испуњава услове Физичког факултета за руковођење докторском дисертацијом с обзиром да је у научном звању и да је аутор већег броја радова у водећим међународним часописима у последње две године. За руководиоца наведене дисертације именован је одлуком Наставно-научног већа Физичког факултета на седници одражаној 26. октобра 2016. Најважнији сарадници у изради дисертације су поред др Ненада Врањеша били др Мартен Бонекамп стални истраживач (*CEA-Saclay*), и др Лоран Шевалије стални

истраживач (*CEA-Saclay*).

## 2.2 Предмет и циљ рада

Докторска дисертација обухвата област физике честица и поља, уже експерименталну физику честица. Стандардни модел елементарних честица (СМ) представља предиктиван теоријски оквир у коме су фундаментални параметри, масе и ширине честица као и њихове јачине спрезања, међусобно повезани скупом релација. Након потврде постојања Хигсовог бозона и првог мерења његове масе на експериментима АТЛАС и ЦМС на ЛХЦ-у тај скуп релација је надограничен, и упоређивање експериментално измерених вредности параметара са теоријски предвиђеним вредностима омогућава даље тестирање конзистентности модела. Маса  $W$  бозона је један од кључних параметара СМ. Овај параметар је осетљив на корекције вишег реда које зависе, између осталог, од масе топ кварка и масе Хигсовог бозона. Корекције вишег реда могу потицати и од нових хипотетичких тешких честица, па експериментално мерење масе  $W$  представља и „прозор” ка физици која није укључена у СМ. Узимајући измерене вредности и неодређености масе топ кварка и масе Хигсовог бозона, масу  $W$  бозона је могуће предвидети са прецизношћу од 8 MeV (МегаЕлектрон-Волти). Неодређеност добијена комбиновањем резултата мерења са више експеримената на сударачима ЛЕП и Теватрон износи 15 MeV, при чему доминирају резултати са Теватрона, чија комбинована неодређеност износи 16 MeV. Коначна прецизност која може бити постигнута засебно на АТЛАС-у и ЦМС-у процењена је на  $\approx 7$  MeV, а комбинована на  $\approx 5$  MeV. Циљ рада је мерење масе  $W$  бозона са прецизношћу која би била конкуритивна са резултатима постигнутим на експериментима на Теватрону.

Кандидаткиња је укључена у рад групе за мерење масе  $W$  бозона на експерименту АТЛАС од 2013. Њен допринос досадашњем раду односи се на реконструкцију и калибрацију хадронског узмака, величине која је од кључног значаја за прецизно мерење недостајућег трансверзалног импулса и трансверзалне масе. Наведене опсервабле су осетљиве на масу  $W$  бозона и користе се за њено мерење на хадронским сударачима у лептонским каналима распада  $W \rightarrow \ell\nu$ ,  $\ell = e, \mu$ . Хадронски узмак представља векторску суму енергија кластера ћелија у калориметрима детектора АТЛАС. На карактеристике хадронског узмака утичу детекторски ефекти (неактиван материјал у калориметру, калибрација електромагнетних кластера, нагомилавање сигнала који потичу од протон-протон судара који нису од интереса) као и моделовање вишечестичних интеракција. За ефективну калибрацију хадронског узмака коришћени су догађаји из распада  $Z$  бозона на парове електрона и миона. Распожива статистика је веома велика (реда величине милион честица у изучаваним догађајима) са малом фонском контрибуцијом. Такође могуће је у потпуности реконструисати кинематику  $Z$  бозона за разлику од лептонских распада  $W$  бозона.

Други део докторске дисертације је посвећен калибрацији импулса миона, раду који је кандидаткиња урадила као свој квалификациони задатак за аутора АТЛАС колаборације. За ову студију коришћени су миони из распада  $J/\psi \rightarrow \mu\mu$ . Анализирани су подаци прикупљени у протон-протон сударима током 2011. и 2012. године. Миони из распада  $J/\psi$  резонанце имају релативно мали трансверзални импулс ( $\sim 10$  GeV), са малом вредношћу просторног угла између њих, што омогућава тестирање локалних ефеката у детектору. На њихову реконструкцију највише утичу губици енергије при проласку кроз калориметре. Кандидаткиња је дефинисала два метода за процену корекције енергетских губитака миона: поређењем реконструисане масе  $J/\psi$  са табличном вредношћу, поређењем импулса миона измерених у унутрашњем детектору и мионском спектрометру. Корекција губитака енергије изведене су у зависности од псевдорепидитета и азимуталног угла миона. Доби-

јени резултати су од значаја за велики број резултата на АТЛАС-у. Поред овог задатака, кандидаткиња је радила на валидацији комплекснијег скупа корекција импулса миона са  $J/\psi \rightarrow \mu\mu$  догађајима. Корекција енергетских губитака миона при проласку кроз калориметре је веома значајна за анализу карактеристика (маса и јачина спрезања) Хигсовог бозона у његовом распаду на четири лептона. Енергетски губици су посебно анализирани у  $Z \rightarrow \mu\mu$  и  $J/\psi \rightarrow \mu\mu$  догађајима. Захваљујући добијеним резултатима, неодређеност масе Хигсовог бозона усред импулсне скале и резолуције миона представља ефекат другог реда у односу на статистичку неодређеност. Маса Хигсовог бозона је измерена са неодређеношћу од 0.2%.

### 2.3 Публикације

Резултати приказани у овој докторској дисертацији објављени су у три рада [A1, A2, A3] у часописима са импакт фактором већим од 1, од којих је први рад [A1] објављен у часопису *European Physical Journal C*, а други у [A2] у *Physical Review D*, док је трећи рад у процесу објављивања у *European Physical Review C*, и postavljen на arXiv. Резултати из [A3] су већ објављени у једној јавној ноти [A4], и презентовани на најзначајнијим конференцијама из физике честица. Наведени радови су до сада цитирани 4 пута [A1], 36 пута [A2], односно 8 пута [A3]. Поред тога, разни помоћни и прелиминарни резултати су документовани у јавним нотама [A4, A5, A6], и приказани на једној међународној конференцији [ВП-1].

### 2.4 Преглед научних резултата изложених у дисертацији

Оригинални допринос кандидаткиње приказан је у поглављима 3, 4, 5. и 6.

#### 2.4.1 Глава 3

У овом поглављу дат је кратак преглед Монте Карло програма којима се моделује продукција и распад  $W$  и  $Z$  бозона на хадронским сударачима. Након тога су описани реални и симулирани подаци коришћени у овој дисертацији. Следи приказ факторизоване формуле диференцијалног пресека за продукцију  $W$  и  $Z$  бозона која укључује корекције вишег реда, рапидитета и трансверзалног импулса градијентних бозона. На крају је описана реконструкција објеката који се користе у дисертацији (миона, електрона, недостајуће трансверзалне енергије) као и селекција догађаја. Резултати су саставни део [A1, A3].

#### 2.4.2 Глава 4

У четвртом поглављу детаљно је описана реконструкција миона, проблем калибрације њиховог импулса и објашњено моделовање енергетских губитака миона приликом проласка кроз детектор. Затим су приказани резултати студија миона са  $J/\psi \rightarrow \mu\mu$  догађајима. Приказани су резултати фитова инваријантне масе  $J/\psi$  резонанце, и разлике импулса миона измерених у унутрашњем детектору и мионском спектрометру. На основу ових студија су изведене корекције на енергетске губитке миона приликом проласка кроз калориметре у функцији псевдорapidитета и азимуталног угла. Типична вредност корекције износи  $\sim 50$  MeV, и највећа је у предњем делу детектора. Након тога следи опис корекција импулсне скале и резолуције која се примењује на симулиране догађаје како би се постигло потпуно слагање са реалним подацима. Ове корекције укључују и корекције енергетских губитака, као и резолуције миона услед вишеструког расејања, флукуација енергетских губитака и поравњања детекторских елемената у унутрашњем детек-

тору и мионском спектрометру. Корекције су изведене симултаним фитом  $J/\psi \rightarrow \mu\mu$  и  $Z \rightarrow \mu\mu$  догађаја, а онда су валидиране само на  $J/\psi \rightarrow \mu\mu$  догађајима где је показано одговарајуће слагање. На крају је приказана примена ових корекција на мерење масе Хигсовог бозона у четворолептонском каналу распада. Добијени резултат је  $m_H = 124.51 \pm 0.52 \text{ (stat.)} \pm 0.06 \text{ (syst.) GeV} = 124.51 \pm 0.52 \text{ GeV}$ . Захваљујући прецизној калибрацији импулса лептона у коначном резултату доминира статистичка неодређеност. Резултати приказани у овом поглављу су саставни део [A1, A2, A6]. Кандидаткиња је била коедитор рада [A1].

### 2.4.3 Глава 5

У овом поглављу најпре је описан алгоритам реконструкције хадронског узмака и упоређене карактеристике наведеног и алтернативних алгоритама. Показано је да изабрани алгоритам заснован на векторском сабирању енергетских кластера ћелија у калориметру има најбољу резолуцију са изучаваним догађајима. Детаљне одлике наведеног алгоритма за реконструкцију хадронског узмака и програм његове калибрације која се спроводи како би се отклонила преостала неслагање између реалних и симулираних података, као и да би се процениле систематске неодређености у мерењу масе  $W$  бозона, дат је након тога. Калибрација се спроведене у два корака: кроз корекције укупне активности у догађајима, као и корекције скале и резолуције коришћењем  $Z \rightarrow \mu\mu$  догађаја. На крају су пропагиране систематске неодређености услед калибрације хадронског узмака на мерење масе  $W$  бозона. Показано је да неодређеност износи 3 MeV (за фит трансверзалног импулса) односно 13 MeV (за фит трансверзалне масе), што је упоредиво са вредностима на експериментима са Теватрона. Резултати приказани у овом поглављу су од виталног значаја за коначан резултат објављен [A3, A4].

### 2.4.4 Глава 6

На крају су приказани резултати мерења масе  $W$  бозона, са детаљним приказом свих неодређености. Мерење је спроведено у два канала (елетронском и мионском), засебно за позитивно и негативно наелектрисане лептоне, за две опсервабле и у неколико бинова псеудорapidитета. Наведена категоризација представља не само значајну проверу конзистентности резултата, већ води и смањењу укупне неодређености услед постојећих корелација између категорија. Посебно у овом поглављу су приказане студије са оптимизацијом опсега фита које је извела кандидаткиња. Резултат првог мерења масе  $W$  бозона на експерименту АТЛАС је:

$$\begin{aligned} m_W &= 80369.5 \pm 6.8 \text{ MeV (stat.)} \pm 10.6 \text{ MeV (exp. syst.)} \pm 13.6 \text{ MeV (mod. syst.)} \\ &= 80370 \pm 19 \text{ MeV,} \end{aligned}$$

при чему је прва неодређеност статистичка, друга експериментална а трећа произилази из теоријског моделовања продукције и распада  $W$  бозона на ЛХЦ-у. Добијени резултат по прецизности  $\pm 19 \text{ MeV}$  одговара најпрецизнијим резултатима мерења до данас оствареним на експериментима ЦДФ и Д0 на сударачу Теватрон, док је средња вредност компатибилна са тренутном светском средњом вредношћу (добијеном усредњавањем свих експерименталних мерења) као и најмодернијим теоријским предвиђањима. Резултати су саставни део [A3, A4].

### 3 Списак публикација кандидаткиње

### 4 А Радови у међународним часописима

Овде су наведени само репрезентативни радови у којима је кандидаткиња дала оригинални допринос.

#### Радови везани за докторску дисертацију

- [A1] G.Aad,..., A. Dimitrievska et. al., [ATLAS Collaboration], *Measurement of the muon reconstruction performance of the ATLAS detector using 2011 and 2012 LHC proton-proton collision data*, Eur.Phys.J. C74 (2014) no.11, 3130, arXiv:1407.3935 [hep-ex], IF=5.084.
- [A2] G.Aad,..., A. Dimitrievska et. al., [ATLAS Collaboration], *Measurement of the Higgs boson mass from the  $H \rightarrow \gamma\gamma$  and  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$  channels in pp collisions at center-of-mass energies of 7 and 8 TeV with the ATLAS detector*, Phys.Rev. D90 (2014) no.5, 052004, arXiv:1406.3827 [hep-ex], IF=4.643.
- [A3] G.Aaboud,..., A. Dimitrievska et. al., [ATLAS Collaboration], *Measurement of the W-boson mass in pp collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS detector*, submitted to Eur. Phys. J. C (2017), arXiv:1701.07240 [hep-ex], IF=4.912.

#### Остали радови кандидаткиње

- [A4] ATLAS Collaboration, *Measurement of the W-Boson Mass in Proton-Proton Collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with the ATLAS Detector*, ATLAS-CONF-2016-113, <https://cds.cern.ch/record/2238954>
- [A5] ATLAS Collaboration, *Studies of theoretical uncertainties on the measurement of the mass of the W boson at the LHC*, ATL-PHYS-PUB-2014-015, <http://cds.cern.ch/record/1956455>
- [A6] ATLAS Collaboration, *Preliminary results on the muon reconstruction efficiency, momentum resolution, and momentum scale in ATLAS 2012 pp collision data*, ATLAS-CONF-2013-088, <https://cds.cern.ch/record/1580207>

### В. Радови у зборницима међународних конференција

#### Усмена излагања

- [VO-1] A. Dimitrievska, on behalf of the ATLAS Collaboration, *Precision measurements of Standard Model parameters with the ATLAS detector*, European Physical Society on High Energy Physics, PoS EPS-HEP2015 (2015) pp.332, ATL-PHYS-PROC-2015-109.

#### Постер презентације

- [VP-1] A. Dimitrievska, on behalf of the ATLAS Collaboration, *Muon reconstruction performance of the ATLAS detector*, Poster at LHC days in Split, 29.09.- 04.10.2014. Split, Croatia, <https://cds.cern.ch/record/1957574>
- [VP-1] A. Dimitrievska, *Muon reconstruction efficiency, momentum scale and resolution in pp collisions at 8 TeV with ATLAS*, Poster at 117th LHCC Meeting, 5 - 6 March 2014. CERN, Switzerland, ATL-COM-PHYS-2014-163.

## Г. Радови у зборницима домаћих конференција

### Постер презентације

[ГП-1] А. Димитријевска, Н. Врањеш, *Карактеристике реконструкције миона ниског импулса на АТЛАС детектору*, XII Конгрес физичара Србије, Зборник радова, 28. април - 2. мај 2013. Врњачка бања, Србија, Постер у секцији: 2. Физика језгра, елементарних честица и основних интеракција, стр. 185 – 188.

## З А К Љ У Ч А К

Имајући у виду актуелност теме и значај добијених резултата, лични допринос и публикације кандидаткиње, као и врло активну улогу у раду АТЛАС колаборације, сматрамо да докторска дисертација *MEASUREMENT OF THE  $W$  BOSON MASS AND THE CALIBRATION OF THE MUON MOMENTUM WITH THE ATLAS DETECTOR* (Мерење масе  $W$  бозона и калибрација импулса миона на детектору АТЛАС) коју је предала Александра Димитријевска, представља значајан допринос експерименталној физици елементарних честица. *Стога предлагемо Наставно-научном већу Физичког факултета Универзитета у Београду да одобри њену јавну одбрану.*

Београд, 7. јул 2017.

др Ненад Врањеш,  
научни сарадник, Институт за физику

---

проф. др Петар Ацић,  
редовни професор Физичког факултета

---

проф. др Маја Бурић,  
редовни професор Физичког факултета

---

др Лидија Живковић,  
научни саветник, Институт за физику

---