

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ФИЗИЧКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Пошто смо на VIII седници Наставно-научног већа Физичког факултета Универзитета у Београду одржаној 26. јуна 2024. именовани за чланове Комисије за оцену испуњености услова и оправданости предложене теме *Radiative W boson decay studies and the upgrade of the ATLAS muon spectrometer readout system* (Изучавање радијативних распада W бозона и унапређење система за читавање мионског спектрометра детектора АТЛАС) за израду докторске дисертације Евелин Бакош и одређивање ментора дисертације, подносимо следећи

Извештај

1 Биографски подаци

Евелин Бакош је рођена 1. јуна 1994. у Сенти. Завршила је гимназију „Светозар Марковић” у Суботици као ђак генерације. На Природно-математичком факултету у Новом Саду 2013. године уписала је студије физике, истраживачки смер, и након успешно завршених основних студија (просек 9.47) на истом факултету је завршила и мастер студије на смеру Нуклеарна физика (јун 2018. просечна оцена 10.00). Одбранила је мастер рад под називом „Могућности АТЛАС експеримента за детекцију троструке продукције W бозона”. Од октобра 2018. уписана је на докторске студије на Физичком факултету Универзитета у Београду, област физика високих енергија, као и на Универзитету Радбоуд у Најмехену, Холандија, као заједнички докторанд. Од децембра 2018. године је запослена у звању истраживач приправник у Лабораторији за физику високих енергија Института за физику у Београду. Свој квалификациони задатак за аутора АТЛАС колаборације под називом *MROD-FELIX read out system integration* успешно је завршила 30.11.2019. Предвиђене испите докторских студија на Физичком факултету положила је са просечном оценом 10.00, а 29.9.2021. Колегијум докторских студија одобрио је тему њене докторске дисертације под називом *Radiative W boson decay studies and the upgrade of the ATLAS muon spectrometer readout system* (Изучавање радијативних распада W бозона и унапређење система за читавање мионског спектрометра детектора АТЛАС) под руководством др Ненада Врањеша, научног саветника из Института за физику и проф. Николо де Грота, редовног професора Универзитета Радбоуд. Током 2019. Евелин Бакош је изводила рачунске вежбе за студенте Радбоуд Универзитета из предмета *Standard Model and beyond*. У периоду од 2013. до 2018. године учествовала је на неколико семинара и конференција у оквиру IAPS-a (*International Association of Physics Students*). Учествовала је на летњој школи у ЦЕРН-у 2018, као и на *BND School* у Спа, Белгија 2019. године. До сада је имала је неколико дужих боравака на Универзитету Радбоуд (кроз програм Еразмус), као и у ЦЕРН-у.

2 Опис предате дисертације

2.1 Основне информације

Докторска дисертација је реализована кроз заједничко менторство (*Cotutelle*) између Универзитета у Београду и Универзитета Радбоуд у Најмехену, Холандија. Руководиоци тезе били су Николо де Гроот, професор физике на Универзитету Радбоуд, и Ненад Врањеш, научни саветник на Институту за физику Универзитета у Београду. Предмет, назив и руководиоци тезе одобрени су на Колегијуму докторских студија Физичког факултета у Београду 29. септембра 2021. године, и Већу области природно-математичких наука Универзитета 13. децембра 2021. Истовремено је предмет одобрен на Универзитету Радбоуд.

Рад има 130 страница (без сажетка, садржаја, библиографије и другог помоћног материјала) организованих у 6 поглавља, са 3 поглавља која садрже оригиналне резултате (укупно 85 страница). Има 86 слика и 25 табела. Библиографија садржи 149 референци. Теза је написана на енглеском језику. Након што је рукопис прошао кроз софтвер за аутентификацију, установљено је да 5% 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

Докторска дисертација обухвата три теме, све урађене у оквиру АТЛАС експеримента на Великом сударачу хадрона (ЛХЦ) у ЦЕРН-у. Прва тема покрива допринос систему за прикупљање података (DAQ) АТЛАС-а, посебно имплементацију функционалности читавања мионског спектрометра (МРОД) у систем за читавање Front-End Link eKschange (FELIKS) детектора АТЛАС. Друга тема представља потрагу за ретким радијационим распадима W бозона на мезон и фотон, конкретно $W \rightarrow \rho\gamma$, анализирањем података прикупљених АТЛАС детектором током периода узимања података Run 2. Трећа тема представља проспект за идентификацију D мезона произведеног у небојеним синглетним стањима у радијативним распадима W бозона на ЛХЦ-у.

У циљу оптимизације могућности АТЛАС детектора за реализацију планираног научног програма, сам детектор пролази кроз две фазе унапређења (upgrade), од којих се прва одвија током 2019–2022, а друга је планирана за период од 2025–2027. Очекивани пораст луминозности представља значајан изазов за систем прикупљања и обраде података детектора АТЛАС, како у погледу количине података, тако и у погледу сложености обраде. Као део upgrade-а, развија се нови систем за читавање података Front-End Link eKschange (FELIKS). FELIKS је заснован на FPGA технологији и требало би да замени постојећи хардверски систем који се користи до сада у периодима прикупљања података експеримента (Run-1 и Run-2). Предности новог система су флексибилност (FELIKS ће имати мање карактеристика специфичних за поддетектор од претходног система за читавање), повећан капацитет и брзину читавања, софтверску оријентацију и увођење комерцијалних технологија раније у ланцу прикупљања података. Обрада, форматирање и контрола података са системом FELIKS биће омогућени преко Software Readout

Drive-a (swROD).

Делимична имплементација новог система планирана је и спроведена пре почетка Run-3,(2022-2025(6)), а биће завршена након тог периода, тако да ће се и стари и нови систем читавања увести паралелно током Run-3. Конкретно, у докторској дисертацији циљ кандидата је био да имплементира целокупну функционалност актуелног система за читавање мионског спектрометра АТЛАС детектора (MDT ReadOut Driver, MROD) у FELIXS-у. Ово је витални задатак за функционисање АТЛАС детектора током Run-3, јер постојеће MROD картице у наведеном периоду достижу крај свог животног века, а њихова замена није могућа. Наведена функционалност је укључивала инкорпорацију пакета података специфичних за поддетектор, специфичне поставке детектора и извештавање о грешкама и процедуре исправљања у реалном времену, и као такве су имплементирани у swROD.

W бозон се претежно распада хадронски у пар кварк-антикварк који се манифестује као пар џетова. У ретким случајевима, пар кваркова ствара један или неколико хадрона. Примери укључују распаде са мезоном M и фотоном у коначном стању, $W \rightarrow M\gamma$, и потпуно хадронске распаде као што је $W \rightarrow 3\pi$. Ови распади нуде јединствену прилику да се проучавају и слабо и јако везани режими квантне хромодинамике (QCD) у једном процесу. Конкретно, радијациони распади су тест за оквир QCD факторизације који омогућава израчунавање пресека процеса на хадронским сударачима кроз раздвајање пертурбативних и непертурбативних елемената. Важност ових распада у овом контексту произилази из чињенице да корекције вишег реда представљају мале доприносе. Штавише, ови ексклузивни распади могу послужити као нови начин за мерење масе W бозона, чија је експериментална прецизност тренутно мања у односу на предвиђање из фита електрослабих параметара SM. Такође, постоје различита теоријска предвиђања за факторе гранања наведених распада која се разликују понекад и за ред величине, те би експериментална мерења помогла да се расветли ова загонетка.

До данас, наведени распади су углавном остали неистражени и није опсервиран ексклузивни хадронски распад W бозона. Претрага за $W \rightarrow \rho\gamma$ никада раније није обављена и не постоји горња граница за његов фактор гранања. Од свих ових модова распада, $W \rightarrow D_s\gamma$ има највећи фактор гранања који предвиђа SM, међутим потраге су обављене анализом специфичних коначних стања ($K^+K^-\pi^+$, $\phi(K^+K^-)\pi$, $K_0^*K^+$) која чине само мањи део свих распада D_s мезона. Најјача граница на фактор гранања постављена је на експерименту LHCb и она је 2×10^4 већа од вредности коју предвиђа SM. Потрага за хадронским распадима је такође изазовна због великог фона којом доминирају различити QCD процеси. Циљеви истраживања спроведеног у оквиру тезе били су (i) да се изврши потрага за $W \rightarrow \rho\gamma$ анализирајући податке из pp судара које је прикупио АТЛАС при енергији $\sqrt{s} = 13$ TeV и који одговарају интегралној луминозности од око 140 fb^{-1} (ii) извођење студије коришћењем симулације за идентификацију D мезона специфичних за радијативни распад W бозона коришћењем инклузивног тагирања, дакле осетљивих на све распаде овог мезона. За прву тему су коришћене традиционалне технике анализе података у физици високих енергија, док су за другу биле неопходне технике машинског учења.

2.3 Остварени резултати

Кандидаткиња је обавила важан сервисни задатак АТЛАС-а развијањем и тестирањем софтвера за унапређење система за читавање мионског спектрометра (као што је документовано у поглављу 3 докторске дисертације). Резултати тестирања показују да ће модификовани ланац читавања заснован на FELIKS систему моћи да задовољи све захтеве који долазе са повећаном брзином преноса података у Run-3. Развијени CSMswROD обавља обраду података у потпуности на софтверском нивоу, који ће имати не само препоручене перформансе, него ће такође обезбедити компатибилност система са комерцијалним хардвером. Такође ће отворити могућност имплементације даљих ажурирања и закрпа без пребацивања било ког хардверског дела система. Поред тога, систем већ имплементира нове процесе опоравка података што није било могуће са претходним MROD системом читавања. FELIKS-ов ланац читавања се већ користи као систем за читавање новоинсталираних Нових малих тачкова детектора АТЛАС. Пројекат FELIKS-MROD је тако једини стални пројекат, где је FELIKS систем комбинован са претходно инсталираним ланцем читавања. Ово пројекту даје водећу улогу у будућем подешавању читавања FELIKS-а за друге под-детекторе и такође пружа пример имплементације који треба да се прати. Ово није важно само за прикупљање података током Run-3, већ и за надоградњу детектора за фазу High Luminosity-LHC. Поред тога, пројекат доказује да се сваки претходни систем може прилагодити коришћењем FELIKS картица не само у оквиру експеримената физике високих енергија, већ се може имплементирати у било који систем за прикупљање података где је потребна брза обрада података.

Потрага за распадом $W \rightarrow \rho\gamma$, као што је описано у поглављу 5 дисертације, обављена је коришћењем pp података прикупљених АТЛАС-ом током периода Run-2. Ова потрага пружа, по први пут, мерење фактора гранања $W \rightarrow \rho\gamma$ са добијеном горњом границом $B < 5.17 \times 10^{-6}$ на нивоу поверења 95% што је 592 пута више од предвиђења на основу SM. За анализу података су биле потребне нове експерименталне технике: наменски тригер који циља коначна стања са једним хадроном, метода непараметарског моделирања фона и неконвенционална употреба фотонских тригера и алгоритама реконструкције τ -лептона за циљање идентификацију ρ мезона. У селекцији тау-фотона, мезонски кандидат се реконструира као хадронски τ лептон узимајући у обзир и наелектрисане и неутралне производе распада ρ мезона. У подацима није уочено статистички значајно одступање од предвиђеног нивоа фонских процеса. Горње границе на фактор гранања добијене коришћењем асимптоцке апроксимације статистике теста вероватноће и модификованог фреквентног нивоа поузданости CL_s . Узете су у обзир све системацке неодређености. Комбиновани фит селекције тау-фотон и алтернативне селекције траг-фотона (где је ρ и реконструисан преко трагова) побољшавају измерену (очекивану) горњу границу за 18% (7%) у поређењу са само тау-фотон селекцијом. Добијени резултати дају релевантне инпуте за дизајн будућих експеримената на сударачима, где би се по први пут потенцијално могли уочити ексклузивни хадронски распада W бозона. Нове експерименталне технике представљене у овој тези су почетни корак ка посматрању ових распада у будућим акцелераторима који се тренутно планирају.

За идентификацију D_s мезона из радијативних W распада развијен је алгоритам за-

снован на машинском учењу, као што је представљено у поглављу 6 дисертације. Студија је заснована на симулираном параматизованом одговору детектора у контексту ATLAS експеримента и техници машинског учења за одвајање сигналних цетова од фонских цетова који потичу од кваркова и глуона. Перформансе дубоке неуронске мреже и конволуционе неуронске мреже су упоредиве, док комбинована мрежа ради нето боље: алгоритам заснован на комбинацији дубоке и конволуционе неуронске мреже показује добру ефикасност од 47% за сигнал са фактором потискивања фона од 100 пута. Алгоритам је стабилан под варијацијама параметара симулације и такође ради у присуству високог pile-up-а. Алгоритам отвара могућност даљег побољшавања мерења и потраге које укључују D_s мезоне, посебно у случају ретких распада који имају ниску статистику. Са скупом података са ниским pile-up-ом који одговара интегралној луминозности од 1 fb^{-1} горња граница фактора гранања $W \rightarrow D_s \gamma$ распада се може одредити на нивоу $B(W \rightarrow D_s \gamma) < 2.9 \times 10^{-4}$ што представља фактор 4 побољшања у односу на објављену горњу границу са експеримента LHCb.

2.4 Публикације

Евелин Бакош је аутор свих публикација ATLAS-а од завршетка ауторског квалификационог задатка 2020. године. Резултати представљени у предатој дисертацији објављени су у:

- G. Aad,...,E. Bakos *et al.* [ATLAS Collaboration], "The ATLAS experiment at the CERN Large Hadron Collider: a description of the detector configuration for Run 3," JINST **19**, no.05, P05063 (2024) doi:10.1088/1748-0221/19/05/P05063 [arXiv:2305.16623 [physics.ins-det]].
- E. Bakos, N. de Groot and N. Vranjes,"Identifying D Mesons from Radiative W Decays at the Large Hadron Collider," Symmetry **15**, no.10, 1948 (2023) doi:10.3390/sym15101948 [arXiv:2207.13587 [hep-ph]].
- G. Aad,...,E. Bakos *et al.* [ATLAS Collaboration], "Search for the exclusive W boson hadronic decays $W^\pm \rightarrow \pi^\pm \gamma$, $W^\pm \rightarrow K^\pm \gamma$ and $W^\pm \rightarrow \rho^\pm \gamma$ with the ATLAS detector", accepted for publication by Physical Review Letters, [arXiv:2309.15887 [hep-ex]].

3 Закључак

На основу наведеног Комисија закључује да резултати дисертације *Radiative W boson decay studies and the upgrade of the ATLAS muon spectrometer readout system* коју је поднела Евелин Бакош представљају оригинално научно достигнуће кандидата и дају значајан допринос развоју област експерименталне физике високих енергија. Стога препоручујемо њену јавну одбрану.

Београд и Најмехен,
5. септембар 2024.

др Маја Бурић
редовни професор, Физички факултет

др Душко Латас,
доцент, Физички факултет

др Марија Врањеш Милосављевић
научни саветник, Физички факултет

др Вим Бенакер,
редовни професор, Универзитет Радбоуд

др Антонио Пелегрино,
редовни професор, Универзитет Гронинген

др Менгкин Ву,
доцент, Универзитет Радбоуд

др Герко Ондерватер
редовни професор, Универзитет Мاستрихт