



Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr Patrycji Potępy

(imię i nazwisko doktorantki)

pod tytułem

Observation of top-quark pair production in heavy-ion collisions in the ATLAS experiment at the LHC

przygotowanej pod kierunkiem

Prof. dr hab. inż. Iwony Grabowskiej-Bold (AGH Kraków)

(imię i nazwisko promotora)

Prof. Dr. Matthiasa Schotta (Johannes Gutenberg-Universität Mainz)

(imię i nazwisko promotora)

1. Podstawa opracowania

Recenzja została wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Nauki fizyczne Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie.

Podstawa prawna: art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. "Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce" (z późn. zm.).

Opinia dotycząca przedmiotowej rozprawy zawiera trzy elementy:

1. Ocenę wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktorantki w dyscyplinie nauki fizyczne;
2. Ocenę wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktorantkę ubiegającą się o nadanie stopnia doktora;
3. Ocenę wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

2. Charakterystyka i opis rozprawy

Rozprawa doktorska mgr Patrycji Potępy dotyczy pomiaru par kwarków szczytowych $t\bar{t}$ w zderzeniach proton-ołów (p+Pb) i ołów-ołów (Pb+Pb) przy energiach $\sqrt{s_{NN}} = 8,16$ TeV i $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ TeV, zebranych w latach 2015-2018 przez kolaborację ATLAS przy LHC.

Pomiary produkcji $t\bar{t}$ w tych zderzeniach stanowią ważny wkład w badaniu nuklearych funkcji rozkładu partonów (nPDFs) oraz własności plazmy kwarkowo-gluonowej (QGP) - stanu materii, w którym kwarki i gluony nie są uwięzione w hadronach. Są to badania o fundamentalnym znaczeniu dla zrozumienia własności oddziaływań silnych oraz mechanizmów produkcji cząstek przy wysokich energiach. W szczególności mogą się przyczynić do odkrycia jednego z najbardziej intrygujących zjawisk w dziedzinie chromodynamiki kwantowej (QCD) - uwięzienia koloru.



Autorka przeprowadziła pomiar par $t\bar{t}$ w kanałach rozpadu $l+\bar{l}$ i dileptonowym w zderzeniach $p+Pb$, wyznaczając inkluzywny przekrój czynny ($\sigma_{t\bar{t}}$) na produkcję $t\bar{t}$ z całkowitą względną niepewnością około 9%, co stanowi obecnie najbardziej precyzyjny pomiar $\sigma_{t\bar{t}}$ w zderzeniach $p+Pb$. Należy zaznaczyć, że pomiar $t\bar{t}$ w kanale dileptonowym został przeprowadzony po raz pierwszy w zderzeniach $p+Pb$. Ponadto autorka wyznaczyła po raz pierwszy współczynnik modyfikacji jądrowej (R_{pPb}), otrzymując wynik zgodny z przewidywaniami teoretycznymi przy użyciu najnowszych nPDFs. Wyniki tych badań zostały opublikowane przez autorkę w JHEP 11 (2024) 101.

Autorka dokonała odkrycia, przeprowadzając pomiar produkcji par $t\bar{t}$ w zderzeniach ciężkich jonów $Pb+Pb$ w dileptonowym kanale rozpadu, otrzymując istotność sygnału na poziomie 5,0 odchyłeń standardowych. Całkowity $\sigma_{t\bar{t}}$ został wyznaczony z całkowitą względną niepewnością pomiarową około 31%, co stanowi obecnie najbardziej precyzyjny pomiar $\sigma_{t\bar{t}}$ w zderzeniach jądrowych. Wyniki opublikowała w Phys. Rev. Lett. 134 (2025) 142301 (wyróżnione przez Edytora) oraz w Nature, vol. 640, p. 573, Apr. 2025.

Należy podkreślić, że kluczowe w pomiarach $t\bar{t}$ w zderzeniach $p+Pb$ i $Pb+Pb$ było wykorzystanie przez autorkę dileptonowego kanału rozpadu kwarków szczytowych. Kanały te charakteryzują się większą czystością sygnału w porównaniu do ich rozpadów poprzez $l+\bar{l}$. Otrzymane wyniki są zgodne z wcześniejszymi pomiarami $t\bar{t}$ w kanałach rozpadu przeprowadzonymi przez kolaborację CMS w zderzeniach $p+Pb$ i $Pb+Pb$, które cechują się jednak gorszą precyzją.

Bez wątpienia jest to praca wybitna, a przedstawione pomiary par najcięższych kwarków $t\bar{t}$ otwierają nowe możliwości w badaniu struktury jąder atomowych oraz własności plazmy kwarkowo-gluonowej.

Praca składa się ze streszczenia, podziękowań, kontrybucji autorki, spisu treści, sześciu rozdziałów, spisu literatury i trzech dodatków. Praca liczy łącznie 153 strony i jest napisana poprawnym angielskim w bardzo dobrym stylu. Znalazłem jedynie kilka drobnych błędów, które nie rzutują na ogólną jakość rozprawy. Moje komentarze i uwagi są poniżej w tekście (pogrubioną czcionką) do dyskusji podczas obrony.

Na szczególną uwagę zasługuje znaczny wkład autorki w program badawczy kolaboracji ATLAS. W przypadku dużych kolaboracji nie zawsze jest to oczywiste. Autorka rozwinęła metody rekonstrukcji i identyfikacji elektronów w zderzeniach $p+Pb$ i $Pb+Pb$, które zostały włączone do oficjalnego pakietu analizy danych eksperymentu ATLAS. Ponadto przeprowadziła badania $d\bar{t}$ w zderzeniach $p+Pb$ i wyznaczyła nuklearne czynniki modyfikacji jądrowej R_{pPb} . Przeprowadziła wszystkie etapy analizy par $t\bar{t}$ w zderzeniach $Pb+Pb$, rozwijając framework do analizy ciężkich jonów dla eksperymentu ATLAS. Jako główna autorka tych analiz została wytypowana przez kolaborację ATLAS do udokumentowania i opublikowania tych wyników w dwóch renomowanych czasopismach. Ponadto jest autorką 5 publikacji konferencyjnych. Na uwagę zasługuje również 15 wystąpień konferencyjnych i udział w grantach badawczych, również jako główny wykonawca.

W pierwszym rozdziale autorka sprawnie przedstawiła teorię fizyki cząstek wysokich energii, w tym Model Standardowy, funkcje rozkładów partonów w hadronach (PDFs) i jądrach atomowych (nPDFs), własności oddziaływań silnych, hipotetyczny diagram fazowy materii



jądrowej zawierający plazmę kwarkowo-gluonową oraz mechanizmy produkcji kwarków szczytowych. Autorka pokazała obecny stan badań teoretycznych dotyczący wyznaczania PDFs i nPDFs w oparciu o dostępne dane eksperymentalne. Przedstawiła wyniki pomiarów tłumienia dżetów w zderzeniach Pb+Pb przez kolaborację ATLAS oraz wyniki pomiaru par $t\bar{t}$ przez kolaboracje ATLAS i CMS w zderzeniach p+p, p+Pb i Pb+Pb.

Uwagi:

- Tabela 1.1 przedstawione zostały oddziaływania słabe i elektromagnetyczne
- Wyrażenie "...nucleons confined within nuclei..." można źle zinterpretować
- Można było wspomnieć o modernizacji detektora ALICE (FoCal) przy dyskusji nPDFs
- Brakuje cytowania dla obliczeń QCD na siatce przejścia fazowego przy $T_C = 155 \text{ MeV}$

W rozdziale drugim autorka opisała LHC i eksperyment ATLAS, przedstawiając detektory wykorzystywane w pomiarach kwarków szczytowych. Ponadto omówiła warunki eksperymentalne, tj. świetłość, nakładanie się przypadków (ang. pile-up) podczas zbierania danych oraz ilość zebranych przypadków. Opisała również, w jaki sposób wyznaczana jest centralność zderzeń Pb+Pb w oparciu o model Glaubera i całkowitą energię transwersalną E_T zmierzoną w kalorymetrze do przodu FCal.

Rozdział trzeci jest kluczowy dla zrozumienia rekonstrukcji i identyfikacji elektronów w detektorze ATLAS. Autorka w sposób wyczerpujący opisała wszystkie etapy analizy w celu wyznaczenia całkowitej wydajności detekcji elektronów (ϵ_{total}) w zderzeniach p+Pb i Pb+Pb, na którą składa się wydajność rekonstrukcji, identyfikacji, izolacji i wyzwalacza. W tym celu wykorzystwała metodę tag-and-probe dla par elektronów pochodzących z rozpadów $Z \rightarrow e^+e^-$.

Analiza dla zdarzeń p+Pb przeprowadzona została na danych rzeczywistych oraz symulacyjnych otrzymanych przy użyciu pakietu GEANT4 z generatorem zdarzeń POWHEG+PYTHIA8. Wyszumowane zdarzenia proton-proton i proton-neutron zostały następnie dodane do rzeczywistych zdarzeń p+Pb w celu dokładnego zamodelowania tła.

Wkład od procesów tła (konwersja kwantów gamma, rozpadów leptonowych ciężkich kwarków czy hadronów) został oszacowany w oparciu o metodę bazującą na danych rzeczywistych poprzez dopasowanie szablonów na widmie masy niezmienniczej e^+e^- . Aby zwiększyć czystość próbki elektronów, autorka przeprowadziła identyfikację elektronów w oparciu o metodę bazującą na rozkładach gęstości prawdopodobieństwa dla parametrów odpowiedzi detektora i zrekonstruowanych trajektorii. Ponadto zastosowała cięcia w celu izolacji elektronów sygnałowych od tła, bazując na informacji z detektorów śladowych i kalorymetrów. Ostatecznie wyznaczyła wydajność wyzwalacza online dla zdarzeń sygnałowych.

Autorka porównała wydajności wyznaczone na każdym etapie analizy dla danych rzeczywistych i symulacyjnych w funkcji energii transwersalnej (E_T) i pseudopospiesznosci (η). Na podstawie różnic wyznaczyła poprawki do wydajności otrzymanych z symulacji, użytych później do korekcji danych.

W przypadku analizy danych Pb+Pb autorka wykorzystwała symulacje MC odpowiedzi detektora z generatorem zderzeń POWHEG+PYTHIA8, dodane do zdarzeń tła (Pb+Pb) wygenerowanych generatorem HIJING. W przypadku zderzeń ciężkich jonów autorka uwzględniła zależność wydajności od centralności, rozkład wierzchołka zderzeń w



symulacjach MC oraz przeprowadziła optymalizację cięć. Jako wynik otrzymała wyższą wydajność identyfikacji elektronów (około 12-20% w zależności od punktu pracy) w porównaniu do wcześniejszej analizy. Autorka przeprowadziła również weryfikację tych cięć na dużej statystyce danych Pb+Pb z Run 3, otrzymując zadawalające wyniki.

W rozdziale czwartym autorka przedstawiła w sposób wyczerpujący wyniki analizy produkcji $t\bar{t}$ w zderzeniach p+Pb (Pb+p) przy energii $\sqrt{s_{NN}} = 8,16$ TeV w centralnym obszarze pseudopospieszności $|\eta| < 2,5$ w kanałach rozpadu l+dżety i dileptonowym, zebranych przez kolaborację ATLAS w 2016 roku. Całkowita statystyka zderzeń użyta w analizie wynosiła 165 nb^{-1} , na którą składa się 57 nb^{-1} (108 nb^{-1}) dla dwóch konfiguracji zderzeń p+Pb (Pb+p). Dane zostały zebrane przy niskim prawdopodobieństwie nakładania się przypadków $\langle\mu\rangle = 0,18$.

Symulacje MC odpowiedzi detektora ATLAS przy pomocy pakietu GEANT4 wykonane zostały przy użyciu różnych generatorów zdarzeń i zbiorów nPDFs (tabela 4.1) w celu prawidłowego oszacowania sygnału i tła. Oprócz produkcji $t\bar{t}$ uwzględnione zostały procesy tła z pojedynczym kwarkiem szczytowym, dibozonami (VV) czy (Z/W + c, b, lekkie kwarki) w kanale wyjściowym.

Autorka przeprowadziła selekcję zdarzeń w zależności od kanału rozpadu. Dla kanału l+dżety zażądała pojedynczego leptonu i przynajmniej 4 dżetów (w tym przynajmniej jeden b-dżet), a dla kanału dileptonowego - dwóch leptonów przeciwnego znaku i przynajmniej dwóch dżetów (w tym przynajmniej jeden b-dżet). Następnie przeprowadziła selekcję elektronów (mionów) spełniających kryteria identyfikacji i izolacji, szeroko dyskutowane w rozdziale trzecim, bazując na informacji z detektora śladowego i kalorymetru elektromagnetycznego (spektrometru mionowego). Dla wyselekcjonowanych leptonów wyznaczyła całkowitą wydajność detekcji w symulacji MC oraz współczynniki korekcji tej wydajności na podstawie różnicy w porównaniu do tej otrzymanej w analizie danych Pb+Pb. **Tutaj nasuwa się pytanie, dlaczego wykorzystano dane Pb+Pb, a nie p+Pb?** Wyselekcjonowane leptony porównała z przewidywaniami teoretycznymi na widmach pędu poprzecznego (rysunek 4.2) dla sześciu różnych obszarów sygnałowych po dopasowaniu widm do przewidywań Modelu Standardowego, otrzymując dobrą zgodność.

Rekonstrukcja dżetów opiera się na algorytmie anti-kt z promieniem $R = 0,4$ z pakietu FastJet, wykorzystując informacje z kanałów kalorymetru (algorytm HI). Energia dżetu zmierzona w kalorymetrze jest następnie skorygowana ze względu na tło i nakładające się przypadki. Do rekonstrukcji b-dżetów autorka zastosowała inny algorytm (PF), stosowany głównie dla zderzeń proton-proton (anti-kt z promieniem $R = 0,4$), który wykorzystuje topologiczny rozkład klastrów w kalorymetrze z trajektoriami naładowanych cząstek w detektorze wewnętrznym. Tylko dżety zrekonstruowane przez obydwa algorytmy, spełniające geometryczne kryteria bliskości, zostały zaklasyfikowane jako b-dżety. **Tutaj zabrakło mi rysunku, który ilustruje działanie tych dwóch algorytmów. Dlaczego konieczne było wykorzystanie obydwu algorytmów?**

Następnie autorka przeprowadziła weryfikację działania obydwu algorytmów dla zdarzeń p+Pb z produkcją $Z \rightarrow ll$ ($l = e/\mu$) w kanale wyjściowym na danych symulacyjnych i rzeczywistych, porównując parametry ($\langle p_T \rangle$, $p_{T,resol}$) zrekonstruowanych i wygenerowanych



dżetów oraz wykorzystując metodę Z-jet balance dla przypadków stowarzyszonej produkcji Z i dżetów w przeciwnych kierunkach ($|\Delta\phi(Z, \text{dżet})| > 2,8$). W tym ostatnim przypadku zrekonstruowany pęd dżetu ($p_{T,\text{reco}}$) jest porównywany z pędem referencyjnym $p_{T,\text{ref}}$ (rzut pędu Z na kierunek dżetu). Różnice pomiędzy danymi i symulacjami są zgodne z oczekiwaniami.

Dżety zrekonstruowane przez algorytm PF jako b-dżety są następnie oznaczane wykorzystując wielowymiarową analizę w oparciu o głębokie uczenie maszynowe (algorytm DLR). Do uczenia autorka wykorzystwała wysymulowane zdarzenia $t\bar{t}$, traktując b-dżety jako sygnał, a pozostałe c-dżety, lekkie kwarki-dżety i gluon-dżety jako tło. Ostatecznie wybrała punkt pracy algorytmu przy wydajności 85% (tak jak w przypadku zderzeń proton-proton przy energii 13 TeV) i współczynniku odrzucania b-dżetów na poziomie 3, a pozostałych dżetów na poziomie 40. **Dlaczego wybrany został taki punkt pracy dla zderzeń p+Pb przy 8,16 TeV? Tutaj zabrakło mi porównania krzywych pracy tego algorytmu dla zderzeń p+p i p+Pb.**

Autorka wyznaczyła też brakującą energię $E_{T,\text{miss}}$ związaną z produkcją neutrin, którą wykorzystwała tylko do celów oznaczania tła leptonowego ze względu na ograniczenia algorytmu rekonstrukcji dżetów HI w zderzeniach ciężkich jonów. **Jakie ograniczenia występowały w przypadku zderzeń p+Pb?** Ponadto narzuciła warunki na zrekonstruowane leptony i dżety, aby wyeliminować podwójne zliczenia elektronów jako dżety i kontrybucję leptonów z rozpadów ciężkich kwarków w dżetach. **Jaka jest wydajność tych cięć?**

W tym rozdziale autorka oszacowała również tło pochodzące z rozpadów leptonowych hadronów zawierających kwarki ciężkie, konwersji fotonów i lekkich hadronów zidentyfikowanych jako leptony w oparciu o Matrix Method, która pozwala na oszacowanie tła dla zadanego cięcia pod warunkiem, że znana jest wydajność rekonstrukcji leptonów sygnałowych i tła dla tego cięcia. Autorka wyznaczyła te wydajności dla elektronów i mionów w funkcji (p_T, η) wykorzystując symulacje MC.

Autorka przedstawiła w sposób zwięzły dyskusję niepewności systematycznych związanych z pomiarem $t\bar{t}$ w zderzeniach p+Pb. Tabela 4.2 zawiera całą listę kontrybucji do tych niepewności, na które składają się te związane ze świetlnością, modelowaniem sygnału $t\bar{t}$ i tła, rekonstrukcją leptonów i dżetów oraz wyznaczeniem tła leptonowego.

Przekrój czynny na produkcję $t\bar{t}$ został wyznaczony dopasowując funkcję wiarygodności, gdzie siła sygnału $\mu_{t\bar{t}}$ jest wyznaczona jako stosunek zmierzonego przekroju czynnego $t\bar{t}$ zmierzonego w kanałach l+dżet i dileptonowym do tego z przewidywań Modelu Standardowego (bez wykorzystania nPDFs).

Dopasowanie przeprowadzono jednocześnie dla sześciu obszarów sygnałowych. Po dopasowaniu otrzymana siła sygnału $\mu_{t\bar{t}}$ jest bliska jedności (równanie 4.22). W tabelach 4.3 i 4.4 autorka przedstawiła również zliczenia par sygnałowych i składników tła przed i po dopasowaniu funkcji wiarygodności dla różnych obszarów sygnałowych. Rysunek 4.14 przedstawia $\mu_{t\bar{t}}$ osobno dla każdego obszaru sygnałowego i dla wszystkich jednocześnie wraz z błędami statystycznymi i systematycznymi. Wyniki są zgodne z przewidywaniami Modelu Standardowego. Hipoteza, że obserwowany sygnał pochodzi jedynie od tła, została odrzucona na poziomie istotności powyżej 5,0 odchyłeń standardowych osobno dla każdego z kanałów



rozpadu kwarków szczytowych, co prowadzi do pierwszego pomiaru $t\bar{t}$ w dileptonowym kanale rozpadu w zderzeniach p+Pb.

W trakcie dopasowania funkcji systematyczne niepewności traktowane były jako skorelowane pomiędzy kanałami sygnałowymi. Względne kontrybucje do niepewności systematycznych dla $\mu_{t\bar{t}}$ przedstawione są w tabeli 4.5, z największą kontrybucją związaną ze skalą energetyczną dżetu. Całkowita niepewność systematyczna dla pomiaru $\mu_{t\bar{t}}$ wynosi $+8,3\%$ / $-7,6\%$.

Autorka wyznaczyła również błędy systematyczne związane ze zmianą parametrów dopasowania i korelacje między nimi. Dla tak złożonej analizy autorka wykonała znakomitą pracę przy szacowaniu tych niepewności.

Ostatecznie autorka przeprowadziła analizę kontrolną rozpadów bozonów W i kwarków szczytowych w kanałach hadronowych (l+dżety), gdzie ich masy niezmiennicze zrekonstruowane są z dwóch dżetów przy najwyższym p_T , które nie zostały oznaczone jako b-dżety. Otrzymała wyniki zgodne z oczekiwaniami.

Główne wyniki analizy przedstawione zostały w rozdziale 4.10. Inkluzywny zintegrowany przekrój czynny na produkcję $t\bar{t}$ w zderzeniach p+Pb przy energii $\sqrt{s_{NN}} = 8,16$ TeV wyznaczony został przy użyciu równania:

$$\sigma_{t\bar{t}}^{p+Pb} = \mu_{t\bar{t}} \cdot A_{Pb} \cdot \sigma_{t\bar{t}}^{th}$$

gdzie $A_{Pb} = 208$ jest liczbą masową Pb, a $\sigma_{t\bar{t}}^{th} = 268$ pb jest teoretycznym przekrojem czynnym w zderzeniach nukleon-nukleon z obliczeń NNLO QCD. Jako wynik otrzymała:

$$\sigma_{t\bar{t}}^{p+Pb} = 58.1 \pm 2.0 (stat.)_{-4.4}^{+4.8} (syst.) nb = 58.1_{-4.9}^{+5.2} (tot.) nb$$

Całkowita niepewność wynosi około 9% i jest zdominowana przez niepewność systematyczną. Jest to obecnie najbardziej precyzyjny pomiar w zderzeniach p+Pb. Otrzymany przekrój czynny porównała (rysunek 4.19) z obliczeniami NLO QCD dla czterech różnych nPDFs (TUJU21, nNNPDF3.0, nCTEQ15HQ, EPPS21) przeskalowanych do p+Pb przez A_{Pb} i dopasowanymi do NNLO QCD przy użyciu czynnika skalującego 1,139 otrzymanego przy pomocy programu TOP++, oraz z wcześniejszymi wynikami eksperymentalnymi otrzymanymi przez kolaboracje CMS i ATLAS. Zmierzony przekrój czynny jest zgodny z przewidywaniami teoretycznymi i wcześniejszymi pomiarami w granicach niepewności.

Autorka wyznaczyła również nuklearny czynnik modyfikacji, $R_{pPb} = \frac{\sigma_{t\bar{t}}^{p+Pb}}{A_{Pb} \cdot \sigma_{t\bar{t}}^{pp}}$, porównując produkcję $t\bar{t}$ w zderzeniach p+Pb do tej w zderzeniach protonów przeskalowanej przez A_{Pb} . $\sigma_{t\bar{t}}^{pp}$ otrzymała ekstrapolując przekrój czynny przy energii 8,0 TeV zmierzony przez ATLAS i CMS do energii referencyjnej. Otrzymała wynik:

$$R_{pPb} = 1.090 \pm 0.039 (stat.)_{-0.087}^{+0.094} (syst.) = 1.090 \pm 0.100 (tot.)$$

R_{pPb} jest większy od jedności o jedno odchylenie standardowe, co może sugerować zwiększoną produkcję $t\bar{t}$ w zderzeniach p+Pb w porównaniu do przeskalowanej produkcji w pp. Niepewności statystyczne i systematyczne zostały wyznaczone przy założeniu, że są w pełni niezależne dla systemów p+Pb i pp.

Dla porównania autorka wyznaczyła również R_{pPb} w oparciu o $\sigma_{t\bar{t}}^{pp}$ zmierzony przez ATLAS podczas Run 1 przy energii 8,0 TeV, ekstrapolowany do energii referencyjnej i otrzymała



porównywalny wynik o nieznacznie mniejszych niepewnościach statystycznej i systematycznej:

$$R_{pPb} = 1.092 \pm 0.039 \text{ (stat.)}^{+0.089}_{-0.082} \text{ (syst.)} = 1.092^{+0.097}_{-0.091} \text{ (tot.)}$$

Autorka wybrała pierwszy wynik do porównania z przewidywaniami teoretycznymi ze względu na mniejsze niepewności w pomiarze $\sigma_{t\bar{t}}$ i potencjalne różnice pomiędzy niepewnościami dla pomiarów eksperymentu ATLAS w Run 1 i Run 2. **Nie jest to dla mnie do końca jasne, dlaczego nie został wybrany wynik o mniejszych niepewnościach?**

Obliczenia teoretyczne przekrojów czynnych $t\bar{t}$ dla zderzeń p+Pb i pp bazują na NNLO QCD wykorzystując nPDFs (TUJU21, nNNPDF3.0, nCTEQ15HQ, EPPS21) i odpowiadające im PDFs. Do wyliczenia R_{pPb} założyła, że niepewności systematyczne związane z rozkładami partonów są w pełni skorelowane w tych systemach. Zmierzone R_{pPb} jest w zgodzie z przewidywaniami teoretycznymi (rysunek 4.20).

W rozdziale piątym autorka przedstawiła wyniki analizy, która doprowadziła do odkrycia produkcji najcięższych kwarków $t\bar{t}$ (istotność sygnału 5,0 odchyżeń standardowych) w centralnym obszarze pseudospieszości $|\eta| < 2,5$ w zderzeniach Pb+Pb przy energii $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ TeV zebranych przez kolaborację ATLAS w Run 2. Autorka zmierzyła inkluzyjny przekrój czynny na produkcję $t\bar{t}$ w kanale rozpadu $e\mu$. Wyniki analizy porównała do przewidywań teoretycznych bazujących na różnych rozkładach aktualnych nPDFs.

Analiza bazuje na całkowitej statystyce $1,9 \text{ nb}^{-1}$, na którą składa się $0,5 \text{ nb}^{-1}$ i $1,4 \text{ nb}^{-1}$ zebranych odpowiednio w 2015 i 2018 roku. Dane zebrane zostały przy niskim prawdopodobieństwie nakładania się przypadków $\langle\mu\rangle = 1.76 \cdot 10^{-3}$ ($2.58 \cdot 10^{-3}$) in 2015 (2018) roku.

Symulacje MC odpowiedzi detektora ATLAS w celu oszacowania sygnału i tła przeprowadzone zostały przy użyciu pakietu GEANT4 dla zderzeń nukleon-nukleon (wszystkie kombinacje izospinu) dodane do zdarzeń tła Pb+Pb wyprodukowanych przez generator HIJING. Pary sygnałowe $t\bar{t}$ i procesy tła (tW , VV , Z +dżety) zostały wygenerowane za pomocą różnych generatorów oraz zbiorów nPDFs (tabela 5.1). Program EVTGEN został wykorzystany do symulacji rozpadów hadronów zawierających ciężkie kwarki b i c. Wszystkie wygenerowane zbiory danych zostały znormalizowane do odpowiednich przekrojów czynnych otrzymanych z obliczeń NNLO QCD. Ponadto rozkłady całkowitej energii E_T zmierzone w kalorymetrze FCal zostały dopasowane do tych zmierzonych (rysunek 5.2). **Tutaj można było podać trochę więcej szczegółów dotyczących tego dopasowania?** Symulacje te nie uwzględniają efektu tłumienia dżetów w QGP.

Zdarzenia spełniające warunki wyzwalacza (pojedynczy elektron lub mion przy wysokim p_T) z dokładnie jednym zrekonstruowanym pierwotnym wierzchołkiem, centralnością (0-80%) i dokładnie dwoma leptonami przeciwnego znaku $e\bar{e}$, $\mu\bar{\mu}$ i $e\mu$, co stanowi odpowiednio 5718, 6636, 94 przypadki, zostały wyselekcjonowane do dalszej analizy. Autorka przeprowadziła pomiar $t\bar{t}$ w kanale $e\mu$ ze względu na najwyższą czystość sygnału, a pozostałe kanały wykorzystwała w celu walidacji analizy.

Selekcja elektronów (mionów) bazowała na informacji detektora wewnętrznego i kalorymetru (spektrometru mionowego) przy zmienionych cięciach w porównaniu do tych dla zderzeń



p+Pb w celu maksymalizacji istotności sygnału. Całkowita wydajność detekcji elektronów (mionów) wyznaczona została na podstawie symulacji MC ze współczynnikami korekcji wyznaczonymi dla danych pp (wydajność rekonstrukcji) oraz danych Pb+Pb (wydajność identyfikacji, izolacji i wyzwalacza). **Dlaczego do korekcji wydajności na rekonstrukcję leptonów wykorzystano dane pp, a nie Pb+Pb?** Rozkłady zmiennych wykorzystywanych do izolacji leptonów dla danych i symulacji przedstawione są na rys. 5.3 (**Dlaczego skala $E_{T,isol}/p_T$ sięga jedynie 0,7?**). Autorka porównała rozkłady p_T dla wszystkich par leptonów (rysunek 5.4) do tych w symulacji, otrzymując dobrą zgodność.

Do rekonstrukcji dżetów w zderzeniach Pb+Pb autorka wykorzystała algorytm HI (dyskutowany powyżej). Autorka użyła dedykowanej kalibracji skali energetycznej dżetu przy niskim prawdopodobieństwie nakładania przypadków w oparciu o symulacje odpowiedzi kalorymetru i pomiary in-situ, **jednak opis jest zbyt pobieżny, żeby zrozumieć tę metodę**. Algorytm HI nie pozwala na oznaczanie b-dżetów.

Brakujące efekty związane z tłumieniem dżetów w symulacjach MC zostały sparametryzowane (równania 5.1 i 5.2) w celu dopasowania rozkładów $p_{T,jet}$ do zmierzonych rozkładów. Parametry funkcji zostały wyznaczone na podstawie zmierzonych dżetów i stowarzyszonej produkcji Z-dżet w centralnych (0-30%) i peryferycznych (30-80%) zderzeniach Pb+Pb. Otrzymane korekcje są zgodnie z oczekiwaniami około dwa razy większe w centralnych niż w peryferycznych zderzeniach. Autorka wyznaczyła również takie korekcje (równanie 5.3) dla zrekonstruowanych fałszywych dżetów, które nie mają odpowiedników na poziomie generatora (brak geometrycznego dopasowania). Tak jak w poprzednim przypadku efekt jest większy w centralnych w porównaniu do peryferycznych zderzeń. Autorka porównała rozkłady krotności dżetów w symulacjach MC (po korekcjach) do tych zmierzonych dla wszystkich kombinacji dileptonów dla 0-80% centralnych zderzeń (rysunek 5.7), otrzymując zgodne wyniki. **Jak rozumiem, mała statystyka przypadków w kanale $e\mu$ nie pozwoliła na porównanie tych rozkładów dla obydwu rozpatrywanych centralności. Rysunek 5.7 ma nadmiarowy podpis (brak czerwonych strzałek)**. Ponadto narzuciła warunki na zrekonstruowane leptony i dżety, aby wyeliminować podwójne zliczenia elektronów jako dżety i kontrybucję leptonów z rozpadów ciężkich kwarków w dżetach. **Jaka jest wydajność tych cięć?**

Tło pochodzące z rozpadów leptonowych hadronów zawierających kwarki ciężkie, konwersji fotonów i lekkich hadronów zidentyfikowanych jako leptony oszacowane zostało przy pomocy metody ABCD i danych eksperymentalnych. Metoda ABCD bazuje na faktoryzacji tła w płaszczyźnie dwóch niezależnych zmiennych określających izolację leptonów (odizolowane/nieodizolowane) i ładunek par leptonów (przeciwnego/tego samego znaku) (tabela 5.2). Wykorzystując tę metodę, autorka oszacowała tło w obszarze sygnałowym A (odizolowane/przeciwnego znaku), zdominowanym przez rozpady sygnałowe $t\bar{t}$, w oparciu o liczbę zliczeń w pozostałych obszarach (równanie 5.4), a za kształt tego tła przyjęła rozkład par z obszaru C (nieodizolowane/przeciwnego znaku). Oszacowane tło stanowi 22%, 0,4% i 0,6% zdarzeń w obszarze par sygnałowych $e\mu$, ee , $\mu\mu$ (rysunek 5.9).

Autorka przeprowadziła pełną analizę niepewności systematycznych, na które składają się te związane z pomiarem świetlności, modelowaniem sygnału $t\bar{t}$ i tła, rekonstrukcją elektronów, mionów i dżetów oraz tłem leptonowym (tabela 5.3). W sumie jest to kilkadziesiąt różnych składników.



Procedura wyznaczania siły sygnału $\mu_{t\bar{t}}$ w zderzeniach Pb+Pb składa się z dwóch kroków. W pierwszym kroku autorka wykorzystała drzewa decyzyjne (BDT) w celu znalezienia zmiennych, które dają najlepszą separację par sygnałowych od tła. Klasyfikator został wytrenowany na dedykowanej symulacji zderzeń pp przy energii $\sqrt{s} = 5,02$ TeV z procesem sygnałowym $t\bar{t}$ i tłem Z+jet. BDT zostało wytrenowane ekskluzywnie tylko na zmiennych leptonowych (tabela 5.4), aby ominąć niepewności związane z modelowaniem kinematyki dżetów w zderzeniach Pb+Pb. Pęd transversalny $p_T^{e\mu}$ i masa niezmiennicza $m_{e\mu}$ (rysunek 5.10) dają najlepszą separację sygnału od tła.

W drugim kroku przeprowadziła dopasowanie funkcji wiarygodności do rozkładów $m_{e\mu}$ dla dwóch przedziałów pędu poprzecznego $p_T^{e\mu} > 40$ GeV (SR1) i $p_T^{e\mu} < 40$ GeV (SR2) i jednocześnie w obydwu przedziałach. W wyniku otrzymała siłę sygnału $\mu_{t\bar{t}}$ bliską jedności dla wszystkich przypadków (rysunek 5.15). Istotność sygnału dla kombinacji obydwu przedziałów jest na poziomie 5 odchyleń standardowych, co prowadzi do pierwszej obserwacji produkcji $t\bar{t}$ w zderzeniach Pb+Pb. Podsumowanie niepewności systematycznych na siłę sygnału przedstawione jest w tabeli 5.7 i na rysunkach 5.16 i 5.17. Całkowita względna niepewność wynosi +21% / -14%.

W rozdziale 5.9 przedstawiony jest inkluzywny zintegrowany przekrój czynny na produkcję $t\bar{t}$ w zderzeniach Pb+Pb, który otrzymany został przy użyciu:

$$\sigma_{t\bar{t}}^{Pb+Pb} = \mu_{t\bar{t}} \cdot \sigma_{t\bar{t}}^{th}$$

gdzie $\sigma_{t\bar{t}}^{th} = 2,71$ μb jest teoretycznym przekrojem czynnym w zderzeniach Pb+Pb (0-100%) z obliczeń NNLO QCD. Otrzymany przekrój czynny wynosi:

$$\sigma_{t\bar{t}}^{Pb+Pb} = 3.6^{+1.0}_{-0.9} (stat.)^{+0.8}_{-0.5} (syst.) \mu b = 3.6^{+1.2}_{-1.0} (tot.) \mu b$$

Autorka porównała (rysunek 5.18) otrzymany przekrój czynny z przewidywaniami NLO QCD dla czterech zestawów nPDFs (TUJU21, nNNPDF3.0, nCTEQ15HQ, EPPS21) przeskalowanych do Pb+Pb przez A_{Pb}^2 i dopasowanymi do NNLO QCD przy użyciu czynnika skalującego 1,149 otrzymanego przy pomocy programu TOP++ oraz do wcześniejszych pomiarów przez CMS i ATLAS ($\sigma_{t\bar{t}}^{pp}$ przeskalowany do Pb+Pb), otrzymując pełną zgodność. Biorąc pod uwagę małą statystykę zdarzeń, nie zaobserwowano modyfikacji jądrowej produkcji $t\bar{t}$ w zderzeniach Pb+Pb.

Rozdział szósty zawiera konkluzje i podsumowanie rozprawy. Oczekuje się, że nowe dane Pb+Pb zebrane przez kolaborację ATLAS przy znacznie większej statystyce podczas Run 3 (obecnie 2x większej niż w Run 2) przyczynią się do bardziej precyzyjnych pomiarów struktury czasowej QGP.

Ponadto rozprawa zawiera spis literatury (179 pozycji) i bardzo wartościowe trzy dodatki, w których autorka umieściła dodatkowe rysunki z różnych etapów analizy danych.

3. Wniosek końcowy

Praca magisterska mgr Patrycji Potępy przedstawia znaczące i oryginalne osiągnięcie naukowe. Autorka wykazuje się wszechstronną wiedzą teoretyczną z zakresu fizyki wysokich energii oraz wyjątkowymi umiejętnościami w zakresie samodzielnej pracy badawczej, w tym złożonej analizy danych i zarządzania niepewnościami systematycznymi. Wyniki,



prowadzące do pierwszej obserwacji produkcji pary $t\bar{t}$ w zderzeniach Pb+Pb oraz najdokładniejszego pomiaru w zderzeniach p+Pb, stanowią oryginalne rozwiązanie ważnych problemów naukowych i zostały opublikowane w czołowych czasopismach. Dysertacja w pełni spełnia wymagania do nadania stopnia doktora nauk fizycznych. Przyznaję tej pracy ocenę celującą (0.7) w skali stosowanej przez Uniwersytet w Moguncji.

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia / ~~nie spełnia~~ wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn.zm.) w wnioskuje o jej dopuszczenie / ~~nie dopuszczenie~~ do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne.

Biorąc pod uwagę wkład wniesiony przez doktoranta w badania opisane w rozprawie do rozwoju fizyki, a w szczególności okrycie produkcji $t\bar{t}$ w zderzeniach Pb+Pb przy energii $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ TeV zaliczam rozprawę do kategorii wybitnie dobrej i zasługującej na wyróżnienie. Tym samym wnioskuje o uznanie rozprawy ~~pana~~/pani Patrycji Potępy za wyróżniającą się.

Jacek Otwinowski

Kraków, 1.09.2025

Prof. dr hab. Jacek Otwinowski