

**Recenzja pracy doktorskiej
mgr inż. Patrycji Potępy**

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-Bołd oraz prof. dr. Matthiasa Schotta

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 doktorskiej zawiera trzy elementy:

- 1) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy w rozprawie doktorskiej zaprezentowano ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie nauki fizyczne;
- 2) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy w rozprawie doktorskiej wykazano umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta ubiegającego się o nadanie stopnia doktora;
- 3) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

2. Charakterystyka i opis rozprawy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Patrycji Potępy dotyczy niezwykle aktualnego i istotnego zagadnienia z zakresu fizyki wysokich energii – badania produkcji par kwarków top-antytop ($t\bar{t}$) w zderzeniach p+Pb i Pb+Pb w zakresie relatywistycznych energii. Kwarki top, ze względu na swoją olbrzymią masę i ekstremalnie krótki czas życia, stanowią unikalną sondę do badania zarówno struktury nukleonów w jądrach atomowych (opisywanej przez tzw. jądrowe funkcje dystrybucji partonów, nPDF), jak i właściwości plazmy kwarkowo-gluonowej (QGP). Praca została wykonana w ramach międzynarodowej współpracy naukowej ATLAS przy Wielkim Zderzaczu Hadronów (LHC) w CERN i powstała w oparciu o szeroki materiał eksperymentalny ATLAS z okresu Run 2 (2015-2018). Obejmuje zarówno szczegółowe analizy eksperymentalne, jak i istotny wkład metodyczny - optymalizację identyfikacji elektronów oraz korekcie wydajności (ang. scale factors) niezbędne do pomiarów par $t\bar{t}$ w środowisku dużego tła i wysokiego obciążenia detektora. Wyniki zaprezentowane w rozprawie mają fundamentalne znaczenie dla lepszego zrozumienia oddziaływań silnych przy ultrarelatywistycznych energiach.

Rozprawa składa się z sześciu rozdziałów, bibliografii oraz trzech dodatków. Została napisana w języku angielskim, zgodnie z najlepszymi standardami dla publikacji w dziedzinie fizyki wielkich energii. Zawiera również streszczenia w języku polskim i niemieckim.

Poniżej przedstawiam charakterystykę zawartości pracy, podkreślając miejsca, w których autorce udało się uzyskać nowe wyniki naukowe oraz oceniając jakość i oryginalność uzyskanych rezultatów.

Rozdział 1 przedstawia wyczerpujące wprowadzenie do Modelu Standardowego, funkcji rozkładu partonów (PDF i nPDF), plazmy kwarkowo-gluonowej oraz produkcji kwarków top w zderzeniach hadronowych i jądrowych. Szczególną uwagę poświęcono rolem twardych sond i produkcji par $t\bar{t}$ jako nowego narzędzia do badania modyfikacji rozkładów partonów i czasowej struktury QGP. Przegląd literatury jest kompletny i potwierdza rozległą wiedzę teoretyczną doktorantki w dyscyplinie nauk fizycznych. Treść jednoznacznie potwierdza bardzo dobre opanowanie przez autorkę nowoczesnych narzędzi oraz wiedzy teoretycznej z zakresu fizyki cząstek, QCD, zderzeń relatywistycznych jonów oraz szeroko rozumianej fenomenologii Modelu Standardowego.

W rozdziale 2 szczegółowo opisano Wielki Zderzacz Hadronów, infrastrukturę detektora ATLAS, systemy detekcyjne, metody rekonstrukcji obiektów fizycznych oraz zagadnienia pomiaru i geometrii zderzeń ciężkich jonów. Rozdział ten ma solidną wartość dydaktyczną, podkreślając ogrom aparatu detekcyjnego i trudności środowiskowe, z którymi mierzy się analiza par $t\bar{t}$ w Pb+Pb - element kluczowy dla pracy eksperymentalnej autorki.

W rozdziale 3 przedstawiono nowatorskie opracowanie parametrów detekcyjnych elektronów zarówno w zderzeniach p+Pb, jak i Pb+Pb. Autorka opracowała i wdrożyła dedykowane korekcje wydajności (scale factors) dla rekonstrukcji, identyfikacji, izolacji oraz wyzwalania elektronów, stosując własną implementację metody Tag-and-Probe do rezonansów $Z \rightarrow e^+e^-$. W rozdziale szczegółowo przeanalizowano efektywności w funkcji pędu poprzecznego i pseudopospieszności, a wyniki te zostały zaimplementowane do oficjalnego oprogramowania ATLAS. Zaprojektowane przez doktorantkę procedury identyfikacji i selekcji elektronów w Pb+Pb zostały zaadaptowane jako baza w kampanii Run 3 eksperymentu ATLAS. Do oryginalnych osiągnięć autorki, opisanych w tym rozdziale należy zaliczyć wprowadzenie i kalibrację dedykowanych parametrów identyfikacyjnych, optymalizację pracy selektorów elektronów w warunkach wysokiego obciążenia detektora w zderzeniach Pb+Pb oraz praktyczną implementację narzędzi do oficjalnego pakietu narzędzi analitycznych współpracy ATLAS.

W rozdziale 4 przedstawiono pełną analizę produkcji par $t\bar{t}$ w zderzeniach p+Pb przy energii w układzie środka masy równej 8.16 TeV na parę nukleonów, w dwóch kanałach: l +jets i dwuleptonowym. Autorka pracy odpowiadała za cały cykl analityczny: od selekcji zdarzeń, optymalizacji wyboru obiektów fizycznych (leptony, dżety, b-tagging), modelowania tła (w szczególności estymacji tła nieprawdziwych leptonów metodą macierzową), przez szacowanie niepewności systematycznych aż po przeprowadzenie ślepej analizy (profile-likelihood fit) i wyznaczenie przekroju czynnego oraz współczynnika modyfikacji jądrowej (ang. nuclear modification factor) - po raz pierwszy wyznaczonego dla procesu $t\bar{t}$ w zderzeniach p+Pb. Najważniejsze wyniki to:

- Najdokładniejszy dotychczas pomiar przekroju czynnego na produkcję par $t\bar{t}$ (niepewność 9%),
- Pierwsza obserwacja produkcji par $t\bar{t}$ w kanale dwuleptonowym w zderzeniach p+Pb (istotność sygnału $> 5\sigma$),
- Zgodność z przewidywaniami QCD z uwzględnieniem różnych zestawów nPDF.

Wyniki pracy opisane w tym rozdziale stanowią pionierski wkład autorki rozprawy i zostały uznane przez społeczność naukową (praca JHEP 11 (2024) 101). Analiza jest wykonana z najwyższym rygorem statystycznym oraz dużą troską o ewentualne efekty systematyczne.

Rozdział 5 zawiera opis analizy produkcji par $t\bar{t}$ w zderzeniach Pb+Pb przy energii w układzie środka masy 5.02 TeV na parę nukleonów. W tym przypadku doktorantka odegrała kluczową rolę jako odpowiedzialna za pomiar produkcji par $t\bar{t}$. Zastosowano zaawansowane narzędzia, rozbudowane o techniki ML (analiza z użyciem Boosted Decision Trees), intensywną optymalizację wyboru zdarzeń, dogłębną charakterystykę i estymację tła oraz oszacowanie niepewności. Oryginalne wyniki:

- Uzyskano najdokładniejszą jak do tej pory wartość przekroju czynnego produkcji par $t\bar{t}$ w Pb+Pb (niepewność 31%),
- Pierwsza w historii obserwacja procesu ze statystyczną istotnością 5σ ,
- Wynik jest zgodny z wcześniejszymi wynikami eksperymentu CMS przy LHC oraz przewidywaniami teoretycznymi dla nPDF w Pb+Pb.

Wyniki opublikowano w prestiżowym PRL 134 (2025) 142301.

Wyznaczone przekroje czynne otwierają pole do przyszłych analiz związanych z czasową strukturą QGP i badaniem modyfikacji rozkładów partonów (QCD w reżimie wysokiego Bjorken-x).

W rozdziale 6 podsumowano uzyskane wyniki i zaproponowano dalsze kierunki rozwoju badań - zarówno w zakresie przyszłych pomiarów w programie ciężkojonowym LHC, jak i potencjalnego wykorzystania par $t\bar{t}$ w precyzyjnych testach ewolucji nPDF oraz dynamiki i czasowej struktury QGP.

Pytania uzupełniające:

1. Czy prowadzone są już badania nad rozdziałem czasowym oddziaływania kwarków top z QGP przy wykorzystaniu danych Run 3?
2. Czy planowana jest koordynacja analizy z grupą eksperymentu CMS, dla zwiększenia restrykcji na nPDF w regionie wysokiego x?
3. Jakie są najważniejsze przeszkody techniczne w dalszej optymalizacji selekcji elektronów w Pb+Pb?

Rozprawa stanowi szeroki przegląd zagadnień związanych z fizyką wysokich energii, skupiając się szczególnie na zagadnieniach produkcji par kwarków top w zderzeniach ciężkojonowych w LHC. Doktorantka wykazuje świadomość zarówno aspektów fundamentalnych (symetrie, oddziaływania, geneza modeli), jak i narzędzi, w szczególności traktowania danych eksperymentalnych. Pani Potępa prezentuje aktualną wiedzę z zakresu współczesnej fizyki cząstek, QCD, modelowania rozkładów partonowych oraz fenomenologii środowisk ciężkojonowych. Rozprawa w pełni odpowiada oczekiwaniom stawianym doktoratowi z zakresu nauk fizycznych, świadcząc o doskonałym przygotowaniu merytorycznym i samodzielności w szeroko rozumianej dyscyplinie nauk fizycznych.

Autorka rozprawy wykazała zaawansowane umiejętności nie tylko w zakresie analizy danych eksperymentalnych, ale przede wszystkim w planowaniu, wdrażaniu, walidacji oraz publikacji własnych rozwiązań metodycznych i analitycznych na światowym poziomie. Jej rola w projekcie miała w pełni autonomiczny i aktywny charakter, obejmując zarówno aspekty koncepcyjne, jak i praktyczne. Jej prace zostały opublikowane w prestiżowych czasopismach (JHEP 11 (2024) 101, PRL 134 (2025) 142301), przy czym doktorantka była jednym z głównych autorów i koordynatorów procesu publikacyjnego, a wyniki uzyskane przez panią Potęgę stanowiły podstawę tych prac. Można wyróżnić liczne referaty i postery (między innymi Quark Matter, LHCP, Hard Probes, ATLAS Top Workshop, seminarium HEP „Białasówka”), gdzie doktorantka samodzielnie prezentowała i popularyzowała swoje wyniki, zyskując uznanie międzynarodowego środowiska.

Rozprawa doktorska pani Patrycji Potępy prezentuje rozwiązanie problemu naukowego o wybitnie oryginalnym, pionierskim charakterze. Tematyka pracy stanowi znaczący krok w międzynarodowych badaniach nad własnościami materii w ekstremalnych warunkach - szczególnie nad QGP i modyfikacjami rozkładów partonowych w jądrze atomowym.

3. Wniosek końcowy

Z przyjemnością zapoznałem się z rozprawą doktorską pani Patrycji Potępy. Praca spełnia kryteria oryginalności zarówno w rozumieniu rozwoju narzędzi metodycznych, jak i uzyskania nowej wiedzy z pomiarów niewykonanych dotąd w skali międzynarodowej. Wyniki autorki w realny sposób otwierają nowy rozdział w badaniach nad QGP i strukturą jąder atomowych, co wysoce predestynuje rozprawę do uzyskania wyróżnienia.

Odwaga i bardzo duża samodzielność w formułowaniu problemów badawczych oraz waga uzyskanych wyników nie budzą u mnie wątpliwości, że mamy do czynienia z dysertacją na bardzo wysokim poziomie. Wyniki przedstawione w rozprawie jednoznacznie wykazują na istotne osiągnięcia Patrycji Potępy w dziedzinie fizyki eksperymentalnej. Rezultaty naukowe opisane w rozprawie pokazują, że Patrycja Potępa jest specjalistką w tej dziedzinie, wykazującą oryginalne podejście i techniczne umiejętności. Doktorantka potrafi z sukcesem analizować i rozwiązywać skomplikowane problemy badawcze. Jestem pod wrażeniem jasności treści przedstawionych w jej rozprawie doktorskiej.

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki określonej w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn. zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne. Jednocześnie, ze względu na wysoki poziom naukowy dysertacji oraz rangę naukową opublikowanych wyników wnoszę o jej wyróżnienie.

Maciej Rybczyński
/– podpisany cyfrowo/