

Prof. dr hab. Krzysztof Doroba  
Wydział Fizyki  
Uniwersytetu Warszawskiego  
02-093 Warszawa  
ul. Pasteura 5

Sierpień 2019

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jakuba Kremera pod tytułem  
“Measurement of W boson production in pp collisions at 5.02 TeV and  
optimization of electron identification in Pb+Pb collisions with the ATLAS  
detector”**

Eksperyment ATLAS jest jednym z dwóch (drugim jest CMS), wielkich szeroko zadaniowych eksperymentów działających przy Wielkim Zderzaczu Hadronów (LHC) w Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych (CERN) w Genewie. Zasadniczym celem działania eksperymentu są precyzyjne testy Modelu Standardowego (MS) oraz próby rozszerzenia MS. Pierwszym odniesionym sukcesem było odkrycie (wraz z eksperymentem CMS) bozonu Higgsa w roku 2012, potwierdzone w 2013. Obecnie prowadzone badania skupiają się na precyzyjnym wyznaczaniu sprzężeń i przekrojów czynnych przewidywanych przez MS i poszukiwaniu niezgodności mogących wskazywać na istnienie tak zwanej Nowej Fizyki (NF) poza Modelem Standardowym. Trwają szczególnie intensywne poszukiwania przejawów Supersymetrii, która stanowiłaby drogę do oczekiwanego rozszerzenia MS. Bardzo dużo ciekawych i istotnych informacji wynika też z badania oddziaływań ciężkich jonów ( $Pb + Pb$ ) w LHC.

Pomiar przekroju czynnego na produkcje elektroslabego bozonu W jest jednym ważniejszych pomiarów wykonanych przy LHC i głównie temu właśnie pomiarowi poświęcona jest recenzowana praca doktorska. Wykonana jest na materiale zebranym przez eksperyment ATLAS dotyczącym oddziaływań proton proton przy energii  $\sqrt{s} = 5.02 \text{ TeV}$  oraz oddziaływań ciężkich jonów przy energii  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02 \text{ TeV}$  na parę nukleonów. Oczywiście pomiar ten jest własnością całej współpracy ATLAS, lecz z zamieszczonych wyjaśnień autora jak treści samej rozprawy widać, że wkład mgr. inż. Jakuba Kremera w przedstawianą analizę był istotny, o czym dalej.

Rozprawa doktorska mgr. inż. Jakuba Kremera liczy 150 stron i składa się z 5 Rozdziałów i dwóch dodatków. Napisana jest w języku angielskim jasno i przejrzysto. Pracę rozpoczyna obszerne Streszczenie, napisane zarówno w języku angielskim jak i polskim. Wstęp do rozprawy zawiera bardzo istotną informację określającą szczegółowo pola działania autora rozprawy w eksperymencie ATLAS. Autor podje 12 obszarów analizy, w które wniósł szczególnie wkład w sukces eksperymentu. Dla recenzenta

związanego z innym dużym eksperymentem przy LHC lista ta jest dość przekonująca. Recenzentowi wydaje się, że szczególnie warto zwrócić uwagę na punkt mówiący o kierowaniu analizą produkcji bozonu  $W$  rozpadającego się w kanale mionowym. W żadnym eksperymencie a tym bardziej w tych wielkich, gdzie tak wiele osób stara się wykazać, nie powierza się kierownictwa konkretnej analizy młodym osobom, które nie wniosły bardzo istotnego wkładu w tę analizę. Pozostałe podane punkty, dotyczące prowadzonych przez autora rozprawy studiów wydajności rejestracji mionów, opracowanie poprawek do zebranych danych związanych z mionami, określenia błędów systematycznych pomiaru mionów potwierdzają to rozumowanie. Autor wniósł również istotny wkład w analizę pomiaru elektronów w zderzeniach  $Pb + Pb$ , w szczególności opracował metodę znacznie polepszającą algorytm pomiaru energii elektronów rejestrowanych w zderzeniach  $Pb + Pb$ . Zatem zdaniem recenzenta, wkład mgr. inż. Jakuba Kremera w analizę w pełni odpowiada wymogom stawianym rozprawom doktorskim.

Rozdział pierwszy rozprawy zawiera opis obecnego stanu opisu teoretycznego oddziaływań elementarnych. Autor zwięźle opisuje podstawy Modelu Standardowego, produkcje bozonów  $W$  i  $Z$  w zderzeniach hadronów a następnie najważniejsze fakty dotyczące oddziaływań ciężkich jonów. W Rozdziale podane są najważniejsze pojęcia i wzory dotyczące oddziaływań jonów, oraz podkreślona jest rola bozonów  $W$  produkowanych w tych oddziaływaniach. Opis układu doświadczalnego, który służył do zebrania analizowanych danych zawarty jest w Rozdziale 2. Podany w nim jest krótki opis Wielkiego Zderzacza Hadronów LHC i dużo bardziej szczegółowy opis detektora ATLAS. Autor rozprawy przedstawił istotne dla prezentowanej dalej analizy elementy detektora (Inner detektor, Detektor płytkowy i półprzewodnikowy, detektor promieniowania przejścia, system kalorymetrów i spektrometr mionowy) oraz system wyzwiania detektora. Przedstawiona jest również kwestia rekonstrukcji zdarzeń, w szczególności identyfikacja i rekonstrukcja torów mionów i elektronów.

Rozdział 3 zawiera opis pomiaru produkcji bozonów  $W$  w oddziaływaniach  $pp$  przy energii  $\sqrt{s} = 5.02 \text{ TeV}$ . Zawarte są w nim opisy poszczególnych kroków prowadzących do wyznaczenia przekroju czynnego na produkcje bozonu  $W^\pm \rightarrow l^\pm \nu$ . Krótko opisany jest dokonany wybór danych (dane z 2015 roku), Monte-Carlo używane do symulacji przypadków a następnie już bardziej szczegółowo wybór przypadków, które zawierały izolowany lepton świadczący o rozpadzie  $W^\pm \rightarrow l^\pm \nu$ . Oddzielnie omawiany jest kanał mionowy rozpadu (którego analizą kierował autor rozprawy) a oddzielnie kanał elektronowy. W obu wypadkach dla osiągnięcia wymaganej dokładności konieczne było zastosowanie całego szeregu poprawek dotyczących wydajności zarówno rekonstrukcji jak i układu wyzwiania, wydajności odnajdywania odpowiednio izolowanych leptonów, kalibracji pędu (dla mionów) i energii (dla elektronów) i wielu innych. W szczególności w Rozdziale omówiona jest również bardzo istotna kwestia określenia tła pochodzącego od procesów QCD. Zastosowana metoda, dość powszechna przy LHC, opiera się nie o Monte-Carlo, ale zebrane dane doświadczalne. Ostatecznie produkcja bozonu  $W$  określona jest zarówno w kanale mionowym jak i elektronowym. Dzięki precyzyjnym poprawkom wyniki w obu kanałach są zgodne i autor rozprawy może łatwo podać sumaryczny wynik na produkcję bozonów  $W$ , które rozpadają się następnie w kanałach  $e^\pm \nu$  lub  $\mu^\pm \nu$ .

Rozdział 4 zawiera opis wprowadzonych przez autora rozprawy zmian w algorytmie identyfikacji elektronów wymuszone zarówno ogromnymi krotnościami stanów końcowych jak i problemami z detektorem przejścia TRT. Autor bardzo biegle

posługuje się metodą analizy wielowymiarowej (MVA) i dla oddziaływań  $Pb + Pb$  zaproponował modyfikacje stosowanej w oddziaływaniach  $pp$  dyskryminanty prawdopodobieństwa (likelihood), służącej do identyfikacji elektronów. W zmodyfikowanej wersji dyskryminanta ta jest zależna od centralności zderzenia. Doświadczalnie przyjętą tu miarą tej centralności jest suma energii poprzecznych zarejestrowanych w kalorymetrach „do przodu”. Podejście to wyraźnie poprawia procent identyfikowanych elektronów i zostało przyjęte jako rutynowe podejście we Współpracy ATLAS.

W Rozdziale 5 czyli Konkluzjach autor podkreśla, że głównym celem rozprawy był pomiar na danych zebranych przez ATLAS przekroju czynnego na produkcję bozonu  $W$  w zderzeniach  $pp$  przy energii  $\sqrt{s} = 5.02 \text{ TeV}$ . Cel ten został osiągnięty, podobnie jak drugie ważne zadanie rozprawy to jest optymalizacja kryteriów identyfikacji elektronów w zderzeniach  $Pb + Pb$ .

Z błędów redakcyjnych w pracy Jakuba Kremera znalazłem tylko na stronie 93 w wierszu 17 od dołu  $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$  a powinno być  $Z \rightarrow e^+ e^-$ . Recenzentowi natomiast niezbyt podobają się sformułowania ze strony 100 i 101, że przekrój przewidywany jest mniejszy od zmierzonego, ale w granicach błędu się zgadzają.

Pracę doktorską mgr. inż. Jakuba Kremera oceniam bardzo wysoko. Przedstawia ona w sposób ładny i przejrzysty bardzo cenną analizę. Zgodnie z autorem rozprawy oceniam, że jej głównym wynikiem jest przeprowadzenie analizy produkcji i rozpadu  $W$  w kanale mionowym i opracowanie bardziej efektywnej identyfikacji elektronów w oddziaływaniach Pb-Pb. Imponująca jest liczba przeróżnych poprawek, które autor przeanalizował i umiejętnie zastosował. Autor zresztą porusza się równie sprawnie w pozostałych aspektach poruszanych w rozprawie. Praca napisana jest w sposób bardzo elegancki, zwarty i dobrze czytelny, choć trzeba przyznać, że ułatwia to fakt, iż część przedstawianych wyników była już publikowana (przy współautorstwie autora rozprawy)

Uważam, że recenzowana praca w pełni spełnia warunki stawiane przez ustawę pracom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie Jakuba Kremera do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Poza tym wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Jakuba Kremera za opracowanie metody bardziej skutecznej identyfikacji elektronów w oddziaływaniach Pb-Pb, prowadzenie analizy produkcji  $W$  w rozpadowym kanale  $W^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu$  i bardzo eleganckie przedstawienie treści rozprawy.