



Kraków 23.08.2019

Dr hab. Jacek Otwinowski, prof. IFJ PAN

jacek.otwinowski@ifj.edu.pl

tel: +48 12 662 8071

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jakuba Kremera pt. „Measurement of W boson production in pp collisions at 5.02 TeV and optimisation of electron identification in Pb+Pb collisions with the ATLAS detector”.

Mgr inż. Jakub Kramer podjął się trudnego zadania pomiaru produkcji bozonów W w mionowych i elektronowych kanałach rozpadu ($W \rightarrow \mu\nu$, $W \rightarrow e\nu$), w zderzeniach proton-proton przy energii $\sqrt{s} = 5,02$ TeV na LHC, wykorzystując dane zebrane przez eksperyment ATLAS w 2015 roku. **Jest to pierwszy pomiar przekrojów czynnych na produkcję bozonów W przy tej energii, a otrzymane wyniki zostały opublikowane w Eur. Phys. J. C 79 (2019) 128. Należy zaznaczyć, że rozprawa przedstawia w szczególności analizę bozonów W kanale mionowym, przeprowadzoną samodzielnie przez autora.** W rozprawie przedstawiona jest również optymalizacja algorytmu do identyfikacji elektronów w eksperymencie ATLAS w zderzeniach Pb+Pb. Wyniki działania tego algorytmu przedstawiane są po raz pierwszy dla danych Pb+Pb przy energii $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ TeV.

Rozprawa ma standardowy układ, składa się ze streszczenia w języku polskim i angielskim, podziękowań, wprowadzenia, 5 rozdziałów i dwóch dodatków, oraz spisu literatury. Napisana jest po angielsku w bardzo dobrym stylu. Od strony edytorskiej i graficznej praca jest bardzo staranna (lista kilku błędów umieszczona na końcu recenzji). **W tytule rozprawy brakuje jednak informacji, że pomiary przeprowadzone zostały przy energii 5,02 TeV w układzie środka masy ($\sqrt{s} = 5,02$ TeV). Ponadto, podrozdziały od 3.8 do 3.10, zawierające wyniki pomiarów i porównanie do przewidywań modelowych można było umieścić w osobnym rozdziale.**

We wprowadzeniu autor przedstawia w skrócie historię odkrycia bozonów W i Z przez eksperymenty UA1 i UA2 na akceleratorze CERN SPS, oraz ich znaczenie w badaniu oddziaływań elektrosłabych i silnych. Precyzyjne pomiary tych bozonów mogą w szczególności pomóc w opisie funkcji rozkładu partonów w hadronach. **We wprowadzeniu umieszczona jest również szczegółowa informacja o wkładzie autora do analizy bozonów elektrosłabych w eksperymencie ATLAS, co okazało się bardzo pomocne w ocenie tej rozprawy.**

W rozdziale 1. autor w zwięzły i przejrzysty sposób opisał wyniki badań teoretycznych i eksperymentalnych, które leżą u podstaw Modelu Standardowego. Szczególną uwagę poświęca na dyskusję produkcji bozonów elektrosłabych W i Z w zderzeniach hadronów i ciężkich jonów. Pokazane są funkcje rozkładów partonów otrzymane przy pomocy obliczeń perturbacyjnej QCD, z wykorzystaniem całego zbioru zmierzonych bozonów elektrosłabych. Na rysunku 1.3 autor przedstawia przekroje czynne na produkcję tych bozonów w zderzeniach proton-proton w funkcji \sqrt{s} , zmierzone w szerokim przedziale energii od 500



GeV do 13 TeV, włącznie ze swoimi wynikami. **W podpisie tego rysunku jednak jest błędna informacja dotycząca źródła jego pochodzenia („Figure taken from Ref. [30]”). Jedynie punkty pomiarowe zostały wzięte z tej publikacji.**

W dyskusji produkcji bozonów W i Z w zderzeniach ciężkich jonów autor skupia się na badaniu plazmy kwarkowo-gluonowej (QGP). Bozony te ze względu na słabe oddziaływanie z materią QCD (plazmą QGP) są przydatne w badaniu wpływu warunków początkowych na produkcję cząstek w zderzeniach jądrowych, związane z modyfikacją rozkładu partonów w materii jądrowej. **W tym miejscu brakuje jednak szerszej dyskusji dotyczącej aktualnego stanu badań tych modyfikacji.** Ponadto, autor omawia wyznaczanie centralności zderzeń jąder atomowych w oparciu o model Glaubera oraz definiuje czynniki modyfikacji jądrowej R_{AA} . W rozdziale tym przedstawione są również wyniki produkcji bozonów W zmierzonych przez eksperyment ATLAS w zderzeniach Pb+Pb przy energii $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV.

Aparatura badawcza oraz metody rekonstrukcji wierzchołków zderzeń i śladów cząstek przedstawione są w rozdziale 2. Autor w przejrzysty sposób opisuje system przyspieszaczy w laboratorium CERN, służący do rozpędzania hadronów i jonów do ultrarelatywistycznych energii. Wyczerpujący opis systemu detekcyjnego ATLAS zawiera wszystkie szczegóły potrzebne do zrozumienia detekcji cząstek. **Brakuje jedynie informacji na temat przedziałów pseudospieszczości dla detektorów Pixel i SCT. Poza tym, rozdzielczość rysunków jest trochę za mała.** Schemat blokowy i opis systemu wyzwalania danych pozwala na zrozumienie zasady jego działania. Autor w sposób wyczerpujący opisał rekonstrukcję wierzchołków zdarzeń i śladów cząstek, w szczególności mionów i elektronów. **Jedno sformułowanie „An important input to the track and vertex reconstruction is the global coordinate system” jest trochę mylące. Bardziej precyzyjnym byłoby sformułowanie, „... is the choice of coordinate system”.** W tym rozdziale jest również opisana metoda identyfikacji cząstek bazująca na funkcji wiarygodności w wielowymiarowej przestrzeni zmiennych, oraz metoda rekonstrukcji pędu poprzecznego bozonu W na podstawie informacji o energii poprzecznej wszystkich hadronów w zdarzeniu. **Weryfikacja tej metody w pomiarach bozonów Z (dostępna pełna kinematyka zdarzeń) pokazuje, że daje ona pędową zdolność rozdzielczą lepszą dla pomiarów w porównaniu do symulacji MC, około 15% dla $p_T^Z < 15$ GeV/c. Autor nie podaje jednak przyczyny tej różnicy.**

W rozdziale 3. autor przedstawia szczegółowo pomiar bozonów W w zderzeniach proton-proton przy energii $\sqrt{s} = 5,02$ TeV. Dane użyte w analizie ($L = 25.0 \pm 0.5$ pb⁻¹) zostały zebrane przy relatywnie małym prawdopodobieństwie nakładania się zdarzeń ($\langle \mu \rangle < 1.5$). Zdarzenia zawierające kandydatów na bozony W zostały zebrane przy ustawieniach systemu wyzwalania danych na pojedyncze miony i elektrony o odpowiednich parametrach śladów.

Symulacje MC potrzebne do oszacowania wielkości tła oraz wydajności rekonstrukcji sygnału przeprowadzono przy użyciu różnych generatorów cząstek: POWHEG+PYTHIA8 (produkcja pojedynczych bozonów W i Z), POWHEG+PYTHIA6 (produkcja Wt , $t\bar{b}$), SHERPA (produkcja par bozonów WW , WZ i ZZ) oraz PHOTOS++ (emisja fotonów w stanie końcowym). W symulacjach tych wykorzystywano różne rozkłady partonów (CT10, CT14, CT10f4, CTEQ6L1 oraz MSTW2008LO) do oszacowania różnych przyczynków do tła i sygnału. Oddziaływanie cząstek z materiałem detektora symulowano przy użyciu GEANT4. Należy dodać, że symulacje te również uwzględniają nakładanie się zdarzeń.



W rozdziale tym autor szczegółowo opisuje wszystkie kryteria, które wykorzystał do selekcji zdarzeń zawierających bozony W . Zastosowane kryteria dają stałą ilość interesujących przypadków niezależnie od okresu zbierania danych. Autor wyznaczył szereg współczynników korekcji związanych z rekonstrukcją i identyfikacją leptonów, izolacją leptonów, wydajnością systemu wyzwalań, oraz kalibracją energii i pędów leptonów. Współczynniki korekcji wyznaczone zostały w funkcji pędu poprzecznego i pseudopospieszności leptonów, bazując na symulacjach MC odpowiedzi detektora, które zostały dopasowane do danych używając zdarzeń $Z \rightarrow l^+ l^-$ i metody *tag-and-probe* (TP). Autor przeprowadził również pełną analizę błędów systematycznych związanych z wyznaczaniem tych współczynników. Zdarzenia $Z \rightarrow l^+ l^-$ wykorzystane również zostały do wyznaczenia korekcji dla pozostałych hadronów w zdarzeniu. **W podpisach rysunków 3.22 i 3.27 jest błędna informacja dotycząca źródła ich pochodzenia („Figure taken from Ref. [1]”). Tylko punkty pomiarowe zostały wzięte z tej publikacji.** Autor oszacował również procesy tła dla pomiaru bozonów W pochodzące od produkcji produkcja wielu dżetów, bozonów elektrosłabych ($W \rightarrow \tau \nu$, $Z \rightarrow l^+ l^-$, $Z \rightarrow \tau^+ \tau^-$, WW , ZZ , WZ) i kwarków *top*. W przypadku bozonów i kwarków *top* wykorzystał symulacje MC odpowiedzi detektora, a dla dżetów metodę dopasowania szablonów otrzymanych z symulacji MC do rozkładów eksperymentalnych.

Oszacowano wszystkie niepewności systematyczne związane z wyznaczeniem współczynników korekcji, tłem oraz świetlnością (rozdział 3.7). W tabeli 3.6 można znaleźć ich podsumowanie dla współczynników korekcji, które są mniejsze niż 1.5% dla mionów i 0.88% dla elektronów co świadczy o bardzo precyzyjnym wyznaczeniu tych korekcji. **Można było jednak umieścić takie podsumowanie dla wszystkich przyczynków. Nie znalazłem również dyskusji korelacji pomiędzy poszczególnymi przyczynkami do tych niepewności.**

W podrozdziałach 3.8 i 3.9 autor przedstawił w przejrzysty sposób otrzymane wyniki produkcji bozonów W . Całkowite przekroje czynne zmierzone w przestrzeni fazowej ograniczonej akceptancją detektora (pęd poprzeczny leptonu $p_T^l > 25$ GeV/c, pseudorapidity leptonu $|\eta| < 2.5$, pęd poprzeczny neutrina $p_T^\nu > 25$ GeV/c, oraz masy poprzecznej $m_T > 40$ GeV) przedstawione są w tabelach 3.7 i 3.8 dla kanałów mionowych i elektronowych. Natomiast różniczkowe przekroje czynne przedstawione są odpowiednio w tabelach 3.9 i 3.10. **Otrzymane przekroje czynne na produkcję bozonów W w kanałach mionowym i elektronowym są zgodne w granicach błędów, zgodnie z oczekiwaniami (uniwersalność leptonowa).** Autor wykorzystał ten fakt i wyznaczył również przekroje czynne na produkcję bozonów W kombinując wyniki z obydwu kanałów. Kombinacja ta przeprowadzona została uwzględniając korelacje pomiędzy błędami systematycznymi tych pomiarów.

Całkowite przekroje czynne zmierzone w ograniczonej przestrzeni fazowej wynoszą:

- $\sigma(W^+ \rightarrow l^+ \nu) = 2266 \pm 9$ (stat) ± 29 (syst) ± 43 (lumi) pb
- $\sigma(W \rightarrow l \nu) = 1401 \pm 7$ (stat) ± 18 (syst) ± 27 (lumi) pb

Precyzja ich pomiaru jest na poziomie 1,3% - 1,4%, nie uwzględniając niepewności pomiaru świetlności (lumi). Różniczkowe przekroje czynne dla procesów $W \rightarrow l \nu$ zmierzone w funkcji $|\eta|$ (rysunek 3.45), zmierzone są z niepewnościami pomiędzy 2,2% a 3,6% (tabela 3.11).



Stosunki przekrojów czynnych i asymetria ładunkowa przedstawione zostały odpowiednio w tabeli 3.12 i na rysunku 3.46. W przypadku tych wielkości niepewności pomiarowe są zdominowane przez niepewności statystyczne, ponieważ niepewności systematyczne zostały znacznie zredukowane. **Tutaj można było jednak podać więcej szczegółów, które przyczynki zostały zredukowane. Autor wspomina tylko od przyczynku od świetlności.**

W podrozdziale 3.10 autor porównał otrzymane wyniki (przekroje czynne i asymetria ładunkowa) do aktualnych przewidywań teoretycznych (NNLO QCD i LO EW) z różnymi funkcjami rozkładu partonów (tabela 3.14, rysunki 3.47 i 3.48). Najlepszą zgodność z danymi uzyskał dla przewidywań z rozkładem NNPDF3.1.

W rozdziale 4. autor w sposób wyczerpujący przedstawił optymalizację algorytmu do identyfikacji elektronów w zderzeniach Pb+Pb. Optymalizacja polegała ona na użyciu zmiennych dotyczących depozytu energii w kalorymetrze i trajektorii cząstki (dla elektronu) oraz użyciu zmiennych określających ich wzajemne dopasowanie. Zmienne te wyznaczone są w funkcji centralności zderzeń Pb+Pb, w różnych przedziałach pędu poprzecznego i pseudorapidity elektronu. W wyniku optymalizacji otrzymano wysoką wydajność na identyfikację elektronów (80-90%, Pb+Pb przy energii $\sqrt{s_{NN}} = 5,02$ TeV), która praktycznie nie zależy od centralności zderzeń.

Podsumowanie

Biorąc pod uwagę mniejszą statystykę zdarzeń użytą w pomiarach bozonów W ($L = 25.0 \pm 0.5$ pb⁻¹) w porównaniu z pomiarami przy wyższych energiach na LHC otrzymane wyniki można uznać za satysfakcjonujące (autor otrzymał około 3 razy większe niepewności pomiarowe w porównaniu do tych w zderzeniach proton-proton przy energii $\sqrt{s} = 7,0$ TeV, $L = 4,60 \pm 0,08$ fb⁻¹).

Bez wątplenia można stwierdzić, że otrzymane wyniki stanowią ważny wkład w badaniu własności materii jądrowej w zderzeniach hadronów i ciężkich jonów. Ze względu na silną korelację pomiędzy pospiesznością bozonu W a ułamkiem pędu protonu niesionego przez partony w stanie początkowym, tego typu pomiary mogą być wykorzystywane do badania rozkładu partonów w hadronach. Otrzymane wyniki stanowią również referencję dla pomiarów produkcji bozonów W w zderzeniach ciężkich jonów, w których rozkłady partonów są zmodyfikowane w porównaniu do tych w hadronach.

Podsumowując, Mgr inż. Jakub Kramer jest naukowcem o dużej wiedzy w zakresie fizyki cząstek wysokich energii. Biorąc pod uwagę jego wkład do badań produkcji bozonów W w zderzeniach proton-proton i ciężkich jonów, uważam tą rozprawę za wyróżniającą i wnioskuję o przyznanie mu stopnia doktora nauk fizycznych.

Lista błędów edytorskich

Abstract

- p.7: The thesis presents also... →The thesis also presents...



3.3.2 Muon trigger efficiency

- p.60: ...charged pairs are use... → ...charged pairs are used...

3.3.3 Muon isolation efficiency

- p.65: brakuje referencji do anti-kt

3.6.2 Correction factors

- p. 88: brakuje referencji do Crystal Ball

Figure 3.39: Prawy rysunek nie ma skali (górną i prawą oś)

Jacek Otwinowski
Dr. hab. Jacek Otwinowski