



INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ  
POLSKIEJ AKADEMII NAUK dr hab. Wolfgang Schäfer

---

*IFJ PAN, Zakład  
Teorii Silnych Oddziaływań  
i Układów Wielu Ciał, NZ21  
ul. Radzikowskiego 152  
31-342 Kraków, Poland  
+48 662 8227  
Wolfgang.Schafer@ifj.edu.pl*

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pana Piotra Janusa  
zatytułowanej  
„Measurement of W boson production in Pb + Pb collisions at 5.02 TeV with the  
ATLAS detector”**

Przedstawioną mi do recenzji rozprawę doktorską przestudiowałem z dużym zainteresowaniem i przyjemnością.

Dysertacja mgr. inż. Piotra Janusa została przygotowana pod opieką prof. dr hab. inż. Mariusza Przybycienia na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH w Krakowie. Część badań Doktorant wykonał w ośrodku CERN, będąc członkiem międzynarodowej kolaboracji ATLAS.

Tematem pracy jest pomiar produkcji elektroślabych bozonów  $W^\pm$  w zderzeniach ołów na ołowiu przy energii (per pary nukleonów) 5.02 TeV w eksperymencie ATLAS. Analogiczny proces w zderzeniach proton-proton jest cennym źródłem informacji o rozkładach partonów, szczególnie kwarków w protonie. Badanie produkcji bozonów  $W^\pm$  w reakcjach jądrowych jest interesujące ze względu na możliwe modyfikacje rozkładów partonów w nukleonach związanych w jądrze.

Praca jest napisana w języku angielskim. Poziom lingwistyczny oceniam na bardzo dobry, jak również praca jest bardzo starannie i ładnie zredagowana. Wszystkie rysunki są czytelne i dobrze opisane. Znalazłem tylko bardzo niewiele pomyłek, które będę poniżej wymieniać. Nie mają one jednak wpływu na moje bardzo dobre wrażenie o przedstawionej rozprawie.

Recenzowana rozprawa składa się z krótkiego wstępu, czternastu rozdziałów, trzech załączników oraz bibliografii.

W krótkim “zerowym” rozdziale, Autor wspomina o jego wkładzie w eksperymencie ATLAS. Doktorant podczas jego pobytów pełnił typowe obowiązki dla członków kolaboracji. Zajmował się pracą nad triggerami i analizą ich wydajności. Opracował również oprogramowanie potrzebne do analizy danych. Prace nad analizą danych (“physics analyses”) do których Doktorant miał wiodący wkład są w szczególności omówione w rozdziałach 2 do 13 recenzowanej rozprawy.

Wyniki tej analizy zostały zaprezentowane przez Doktoranta na międzynarodowych konfer-

encjach i warsztatach, i zostały opublikowane w materiałach pokonferencyjnych. Doktorant też miał znaczący wkład do pomiaru analogicznego procesu produkcji bozonów  $W$  w zderzeniach proton-proton na tej samej energii 5.02 TeV, które zostały opublikowane w Eur. Phys. J C. Publikacja kolaboracji ATLAS pt. „Measurement of  $W^\pm$  boson production in Pb+Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV with the ATLAS detector”, arXiv:1907.10414, zamieszczona w bazie arXiv i wysłana do publikacji w Eur. Phys. J C, jest oparta na analizie Doktoranta. Świadczy to o tym że główne wyniki prezentowane w przedstawionej rozprawie przeszły wszystkie procedury wewnętrzne recenzowania kolaboracji ATLAS.

Rozdział pierwszy stanowi krótkie wprowadzenie do Modelu Standardowego fizyki wysokich energii i również wprowadza kilka ważnych pojęć potrzebnych do opisu zderzeń ciężkich jonów. Tu znalazłem kilka bardzo drobnych literówek i niedociągnięć. Mnianowicie, we wzorze (12) należy przy lewej stronie wymienić  $Qd^2/dQ^2 \rightarrow Q^2d/dQ^2$  i przy prawej stronie  $q^2 \rightarrow Q^2$ . W wyprowadzeniu wzoru (19) z wzoru (18) należy nie tylko całkować po  $b$  ale również wykonać sumowanie po liczbie nielastycznych zderzeń,  $n$ .

Następnie, w rozdziale drugim, autor szkicuje opis eksperymentów na akceleratorze LHC i przedstawia najważniejsze części detektora ATLAS.

Pomiar bozonów  $W^\pm$  wykorzystuje rozpady  $W \rightarrow \mu\nu, W \rightarrow e\nu$ , więc ostatecznie wymaga detekcji leptonów, mionu albo elektronu. Ze względu na brak pomiaru neutrin, przypadki te są charakteryzowane przez brakujący pęd poprzeczny.

Rozdziały 3 do 12 zawierają zasadniczą część opisu wszystkich szczegółów pomiaru i analizy danych wykonanych przez Doktoranta. Autor bardzo starannie pokazuje poszczególne kroki analizy wprowadzając do ostatecznych wyników przedstawionych w trzynastym rozdziale.

Najpierw, w rozdziale trzecim Autor krótko omawia na jakich danych analiza jest oparta i tłumaczy definicje binowania w tak zwanej centralności. Następny rozdział czwarty omawia metody rekonstrukcji śladów i identyfikację i rekonstrukcję mionów i elektronów. Rozdział piąty jest poświęcony tzw. “lepton isolation” (uważam, że zdanie “No precise simulation...” w akapicie 5.2 się powtarza). Rozdział szósty na ponad 20 stron bardzo szczegółowo omawia zdolności i efektywność rekonstrukcji leptonów. W siódmym rozdziale Autor opisuje zdolność rozdzielczą w rozkładzie brakującego pędu poprzecznego. Po krótkim opisie kryteriów wyboru przypadków (event selection) Autor przechodzi do opisu tła w kanale mionowym (rozdział dziewiąty) i elektronowym (rozdział dziesiąty). Autor słusznie identyfikuje produkcję dżetów przez oddziaływania silne jako dominujący wkład do tła. Tu ważny wkład wychodzi z półleptonowych rozpadów hadronów powabnych, zarówno jak i z rozpadów naładowanych pionów. Autor tłumaczy jak m. in. kryterium “lepton isolation” pomaga z redukcją tła. Krótki rozdział jedynasty przedstawia zdolność pomiaru w poszczególnych binach w pospieszności (rapidity) i wprowadza asymetrię ze względu na ładunek leptonów (lepton charge asymmetry). Rozdział 12 podsumowuje analizę błędów systematycznych.

W trzynastym rozdziale Autor przedstawia końcowe wyniki pomiarów. Najpierw Doktorant prezentuje rozkłady bozonów  $W^+$  i  $W^-$  w pospieszności (rapidity). Rozkłady te są wyznaczone z liczby zliczeń bozonów  $W$  na przypadek “minium bias”. Dodatkowo są one normalizowane przez średnią “nuclear thickness”  $\langle T_{AA} \rangle$  i mają wymiar przekroju czynnego (są więc podane w nanobarnach).

Druga obserwacja to asymetria ze względu na ładunek leptonu (“lepton charge asymmetry”). Wyniki są pokazane odrębnie w kanałach: mionowym i elektronowym i później w złączonym kanale, biorąc pod uwagę korelacje błędów z pewnym przybliżeniem. Autor też pokazuje porównanie z przewidywaniami teoretycznymi używając różnych rozkładów partonowych w jądrze. Tu okazuje się, że dane (ang. yields) są najlepiej opisane przez rozkłady CT14 kolaboracji CTEQ, które nie zawierają efektów jądrowych, takich jak na przykład “nuclear shadowing”.

Następnie, Autor pokazuje zależność produkcji bozonów  $W$  od centralności. Ciekawym wynikiem jest odstępstwo od skalowania z liczbą  $N_{\text{part}}$  dla  $N_{\text{part}} < 200$ . Motywowany przez tę obserwację, Autor bada zależność tego wyniku od traktowania geometrii w zderzeniach w Monte Carlo, używając nowszej wersji kodu typu “Glauber Monte Carlo”. (Wydaje mi się że cytowana liczba dla  $\sigma_{\text{tot}}^{\text{NN}} = 67.7 \pm 0.5 \text{ mb}$  jest pomyłką. Chyba chodzi tu o  $\sigma_{\text{inel}}^{\text{NN}}$ ). Autor twierdzi, że pozostałe niepewności eksperymentalne są większe niż różnica między obliczeniami używając różnych metod Glauber MC. Chciałem tu zauważyć, że geometryczny opis reakcji wykorzystany we wszystkich modelach typu Glauber MC jest pewną idealizacją i liczbę  $N_{\text{part}}$  wyznaczoną z pomocą tego typu kodu należy rozumieć sceptycznie (cum grano salis). Jest to jednak wezwanie dla teoretyków którzy powinni uwzględnić kanały dyfrakcyjne w przekrojach nieelastycznych nukleon-nukleon. Autor bada też potencjalny efekt tzw. skóry neutronowej. Uwzględnienie tego efektu zmienia przewidywania teoretyczne w obszarze małych  $N_{\text{part}}$ , jednak tylko na poziomie 1 do 2 procent.

Nie mam krytycznych uwag do prowadzenia analizy danych i wyznaczenia niepewności eksperymentalnych. Są one wykonane w mojej ocenie poprawnie.

Jednak w rozdziale trzynastym brakuje mi trochę dyskusji o znaczeniu wyników. Na przykład opis rysunku  $R_{\text{AA}}$  Fig.98 jest trochę lakoniczny i tu Doktorant mógł zwracać uwagę na to, że w badanej reakcji  $R_{\text{AA}}$  jest głównie efektem izospinowym. Chciałbym też, żeby w czasie obrony Doktorant odniósł się do pytania jak nowe wyniki otrzymane na 5.02 TeV się różnią od wcześniejszych pomiarów produkcji bozonów  $W^{\pm}$  przy energii 2.76 TeV, albo do wyników innych kolaboracji w zderzeniach Pb-Pb jak i p-Pb. Czy wnioski wyciągnięte z tych różnych pomiarów są ze sobą spójne?

Konkludując, stwierdzam że przedstawiona mi do recenzji praca doktorska mgr. inż. Piotra Janusa stanowi oryginalny i istotny wkład do badań zderzeń ciężkich jonów na wysokich energiach. Uważam, że spełnia ona wszystkie warunki stawiane pracom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie mgr. inż. Piotra Janusa do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Kraków, 25.VII.2019r.

dr hab. Wolfgang Schäfer