

Prof. dr hab. Janusz Chwastowski

Oddział Fizyki i Astrofizyki Cząstek,
Instytut Fizyki Jądrowej
Polskiej Akademii Nauk,
Ul. Radzikowskiego 152,
31-342 Kraków,
Tel. 12 66 28 449

Kraków, 19/11/2025

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr Małgorzaty Niemiec

Pani mgr Małgorzata Niemiec przedstawiła do recenzji pracę zatytułowaną „*Studies of the Three-Dimensional Structure of the Nucleon at the COMPASS Experiment at CERN*”. Promotorem w przewodzie doktorskim jest prof. dr hab. Barbara Badełek z Uniwersytetu Warszawskiego. Dysertacja wykorzystuje dane doświadczalne dotyczące procesu Drell-Yan

$$\pi^- + p^\uparrow \rightarrow \gamma^* + X \rightarrow \mu^- + \mu^+ + X$$

zgromadzone przez Współpracę COMPASS w CERN w latach 2015 i 2018. Dane te zostały zebrane podczas badania oddziaływań ujemnie naładowanych mezonów π o energii 190 GeV ze spolaryzowaną poprzecznie tarczą amoniaku. Doktorantka skupiła się na dwu zagadnieniach:

- pomiarze azymutalnych asymetrii zależnych od poprzecznego spinu, ważonych poprzecznym pędem;
- wyznaczeniu momentów k_T^2 funkcji rozkładu partonów zależnych od pędu poprzecznego.

Napisana po angielsku praca zawiera streszczenie, dziesięć rozdziałów, sześć dodatków i obszerną bibliografię. Poprzedzona jest przedmową.

Pierwszy rozdział stanowi zgrabne wprowadzenie w tematykę struktury nukleonu i funkcji ją opisujących. W drugim rozdziale Autorka przechodzi do omówienia, wykorzystanego w pomiarach, procesu Drell-Yan produkcji par mionów na spolaryzowanej tarczy. Następnie wprowadza relację Lam-Tung i funkcje struktury zależne od pędu poprzecznego (TMD). Istotnym elementem jest omówienie metody ważenia pędem poprzecznym pozwalającej na uniknięcie problemów związanych ze splotami funkcji rozkładu partonów zależnych od pędu poprzecznego (TMD PDF) pojawiających się w przekroju czynnym na mechanizm Drell-Yan we wiodącym przybliżeniu (LO) w formalizmie TMD – nieanalityczność całek i konieczność wprowadzenia silnych zależności modelowych. Efektem dyskusji jest wyprowadzenie dokładnych zależności między funkcjami struktury a asymetriami azymutalnymi jako iloczynów TMD PDF.

Krótki doświadczalny przegląd kolinearnych i TMD PDF jest zawarty w rozdziale trzecim zawierającym również pewne wskazówki dotyczące przyszłych badań.

Czwarty rozdział przedstawia eksperyment COMPASS. Nacisk został położony na konfigurację aparatury użytej do zbierania danych w latach 2015 i 2018. Doktorantka omówiła linię wiązki, skomplikowany układ spolaryzowanej tarczy, spektrometr a także system trygera i akwizycji danych.

Rozdział 5 wprowadza w analizę procesu $\pi^- + p^\uparrow \rightarrow \gamma^* + X \rightarrow \mu^+ + \mu^- + X$ w dwóch przedziałach masy efektywnej pary mionów:

1. $M_{\mu\mu} \in (4.3, 8.5) \text{ GeV}/c^2$, gdzie przyczynek od tła i rezonansów, jest szacowany na mniej niż 4%,
2. rozszerzony zakres, $M_{\mu\mu} \in (4.0, 9.0) \text{ GeV}/c^2$.

Omówione zostały kryteria wyboru przypadków oraz porównano rozkłady niektórych zmiennych dla obu zakresów masy efektywnej pary mionów. Przedyskutowano także współczynniki osłabienia (dilution factors) związane ze spolaryzowaną tarczą i migracją wierzchołka oddziaływania.

Szczegółowy opis metody ekstrakcji asymetrii dla obu zakresów mas efektywnych pary mionów — standardowego i rozszerzonego — zawarty jest w rozdziale 6. Podkreślony został wpływ sposobu ważenia zdarzeń na obserwowalne eksperymentalne. W szczególności podejście fD-WTSA, opracowane specjalnie dla rozszerzonego regionu mas, skutkowało wzrostem średniego czynnika kinematycznego o około 11% oraz spadkiem średniego współczynnika osłabienia o około 10% w porównaniu z analizą standardową.

Rozdział 7 przedstawia wyniki pomiaru ważonych asymetrii poprzecznych (WTSA) w podstawowym zakresie masy pary mionów, $M_{\mu\mu} \in (4.3, 8.5) \text{ GeV}/c^2$. Dominującym zagadnieniem tego rozdziału jest szczegółowa analiza wpływu efektów systematycznych związanych z okresami gromadzenia danych w latach 2015 i 2018, fałszywymi asymetriasami (mieszanie przypadków/cel tarczy, zamiana cel tarczy/przypadków) szacowanymi, co istotne, w oparciu o zgromadzone dane. Podsumowując swoje pomiary Doktorantka stwierdza:

1. nieujemność funkcji asymetrii Siversa (Sivers WTSA) na poziomie jednego odchylenia standardowego i jej zgodność z wynikami Współpracy COMPASS (Phys. Rev. Lett 133, 071902 (2023)) i przewidywaniami teoretycznymi;
2. ujemność asymetrii transversity (transversity WTSA) o istotności około jednego odchylenia standardowego, zgodnie z przewidywaniami teoretycznymi;
3. ujemność prezelosity WTSA (na poziomie jednego odchylenia standardowego) co jest przypisywane wpływowi wyższych pędów poprzecznych wirtualnego fotonu wzmacnianemu poprzez metodę ważenia (q^3_T).

Analiza ważonych asymetrii dla $M_{\mu\mu} \in (4.0, 9.0) \text{ GeV}/c^2$ jest przedstawiona w Rozdziale 8. Wykorzystane zostało podejście, oznaczane jako FD-WTSA, uwzględniające ważenie każdego przypadku z osobnymi współczynnikami osłabienia i kinematycznymi. Przeanalizowano dwa niezależne zbiory danych, zdefiniowane przez różne kryteria selekcji, aby ocenić wpływ efektów systematycznych:

- $Dq_T^3 / (2M_\pi M_N^2) < 300$ – ograniczenie efektów związanych z rekonstrukcją i poprawa jakości wybranych przypadków,
- $q_T < 2.5 \text{ GeV}/c$ – kompatybilność z obszarem stosowalności formalizmu TMD.

W pierwszym podrozdziale Doktorantka przedstawia wyniki otrzymane dla każdego z okresu gromadzenia danych w latach 2015 i 2018 w porównaniu do wartości uśrednionej dla całego, odpowiedniego, roku. Następnie dyskutuje wyniki bardzo pracochłonnych, a wręcz żmudnych, analiz niepewności statystycznych, zależności od sposobu ograniczenia przestrzeni fazowej oraz niepewności systematycznych uwzględniających również zgodność wyników pomiędzy zakresami gromadzenia danych czy fałszywe symetrie. Na koniec, Autorka przedstawia końcowe wyniki podkreślając zgodność zmierzonych asymetrii dla dwóch zakresów masy efektywnej pary mionów i ich zgodność z wartościami otrzymanymi przez Współpracę COMPASS w analizie TSA.

Rozdział dziewiąty poświęcony jest wyodrębnieniu funkcji TMD PDF z wcześniej przeprowadzonych pomiarów. Pierwszym elementem jest pomiar pierwszego momentu k_T^2 funkcji Sieversa dla rozszerzonego zakresu masy pary mionów i różnych cięć wskazujący na umiarkowaną zależność od cięć— różnice sięgają 16–35% w trzech przedziałach x_N pomiędzy cięciami Dq_T i q_T . Pomiar ten jest porównany do wyników uzyskanych przez COMPASS przy badaniu semi-inkluzywnego głęboko nieelastycznego rozpraszania mionów na spolaryzowanym deuterze. Znalezione wartości momentu funkcji Sieversa są ujemne (w ramach dużych błędów można mówić o zgodności z zerem) dla większych wartości x_N w zgodzie z przewidywaniami wynikającymi z badań semi-inkluzywnego DIS (SIDIS) i przewidywaną zmianą znaku. Dla najmniejszej wartości x_N wartość momentu wydaje się być dodatnia, co jak podkreśla Autorka można przypisywać zaniedbaniu wpływu kwarków morza. Następnie Doktorantka przechodzi do pomiaru momentu funkcji Boer-Mulders dla pionu przy założeniu zerowych wartości Boer-Mulders i transversity TMD PDF dla kwarków morza. W procedurze wykorzystane są rozkłady partonów pionu i protonu dostępne poprzez pakiet LHAPDF. Po dopasowaniu transversity TMD PDF Autorka wyznacza pierwszy moment k_T^2 funkcji Boer-Mulders dla mezonu π stwierdzając słabą zgodność pomiaru z przewidywaniami dla $x_\pi < 0.5$ i wiążąc ten fakt z niegaussowskim rozkładem k_T oraz ograniczoną jakością partonowych rozkładów gęstości pionu.

Rozdział 10 pracy zawiera jej podsumowanie oraz krótkie komentarze dotyczące zakresu i jakości pomiarów planowanych na powstającym akceleratorze EIC i przez Współpracę LHCb w ramach Współpracy LHC Spin. Natomiast dodatki skupiają się na aspektach technicznych

i uzupełnieniach przeprowadzonej analizy oraz zawierają stabilizowane wyniki asymetrii dla rozszerzonego zakresu masy efektywnej pary mionów.

Doktorantka przeprowadziła zaawansowaną istotną analizę procesu Drell-Yan $\pi^- + p^\dagger \rightarrow \gamma^* + X \rightarrow \mu^+ + \mu^- + X$ wykorzystując dane zgromadzone przez Współpracę COMPASS w 2015 i 2018 roku. Wykorzystała metodę ważonych asymetrii pozwalającą na uniknięcie komplikacji i zależności modelowych związanych ze splotami funkcji struktury. Autorka wykazała, że metoda to jest cennym narzędziem w badaniach funkcji TMD PDF, oferując bezpośrednią i przejrzystą interpretację w ramach formalizmu TMD. Przeprowadziła pomiar asymetrii dla standardowego i rozszerzonego zakresu masy efektywnej pary mionów wykazując zgodność z wcześniejszymi wynikami analizy TSA przeprowadzonej przez Współpracę COMPASS. Niezwykle cennym, a bardzo pracochłonnym i żmudnym elementem pracy jest przeprowadzona analiza niepewności statystycznych i systematycznych. Efektem końcowym jest otrzymanie pierwszych momentów rozkładu względem k_T^2 dla funkcji Siversa i Boer-Muldersa. Chciałbym podkreślić, że uzyskane wyniki będą mogły być uzupełnione, rozszerzone na inne obszary kinematyczne dopiero przez eksperymenty następnej generacji takie jak ePIC przy EIC czy LHCSpin, na co przyjdzie poczekać jeszcze prawie dziesięć lat.

Jak w każdej pracy tej objętości można znaleźć pewne błędy edytorskie. Wśród istotniejszych wspomnielibym brak odniesienia się do publikacji Współpracy ATLAS dotyczącej relacji Lam-Tung (JHEP 08 (2016) 159), brak czynnika kolorowego w równaniach 2.30 i 2.34, niejednorodność zapisu we wzorach 2.52-2.53, czynnik 4 powinien być zastąpiony przez 8 we wzorach 6.36, 6.42, 6.46 i 6.52, we wzorach 6.48 i 6.54 brakuje również czynnika zawierającego sumy po spinach. Utrudnieniem są także małe rysunki z nie zawsze dobrym doбором kolorów i dobrym opisem, przez co stanowią pewną trudność w odbiorze pracy. Zwrócę również uwagę na to, że referencja do generatora PYTHIA 8 jest szczegółowo określona przez autorów (patrz <https://pythia.org/latest-manual/Welcome.html>) i inna niż ta zawarta w ref. 126 pracy.

Elementem, którego obecność w recenzowanej pracy chętnie bym widział jako doświadczalnik (również w trakcie publicznej obrony), jest rozszerzone przedstawienie danych pozwalające na dyskusję:

- sposobu binowania danych,
- ich migracji pomiędzy binami,
- zrozumienia akceptancji aparatury (np. porównanie danych i symulacji Monte Carlo).

Liczę również na obszerniejszą dyskusję i interpretację wyników uzyskanych przez Doktorantkę.

Wymienione powyżej mankamenty nie wpływają jednak znacząco na jakość recenzowanej pracy.

Podsumowując uważam, że przedstawiona do recenzji praca doktorska Pani mgr Małgorzaty Niemiec spełnia wymogi Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r., Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2020 r. poz. 85 z późn. zm.). Doktorantka wykonała istotny i aktualny pomiar. Rozwiązała postawione przed nią zadania wykorzystując oryginalną metodę. Wykazała zdolność do samodzielnej pracy popartą szeroką wiedzę teoretyczną i doświadczenia w zakresie diskutowanych problemów oraz umiejętnością biegłego wykorzystania narzędzi dostępnych w fizyce wysokich energii.

Wnioskuje o dopuszczenie Doktorantki do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

A handwritten signature in dark ink, appearing to be 'J. L. T.' or similar, written in a cursive style.