

dr hab. inż. Paweł Sznajder, prof. NCBJ

Warszawa, 10 listopada 2025 r.

Zakład Fizyki Teoretycznej
Departament Badań Podstawowych
Narodowe Centrum Badań Jądrowych
ul. Pasteura 7, 02-093 Warszawa
pawel.sznajder@ncbj.gov.pl



RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ MGR MAŁGORZATY NIEMIEC PT. „STUDIES OF THE THREE-DIMENSIONAL STRUCTURE OF THE NUCLEON AT THE COMPASS EXPERIMENT AT CERN”

Podstawa recenzji

Niniejsza recenzja została sporządzona na podstawie dysertacji „Studies of the Three-Dimensional Structure of the Nucleon at the COMPASS Experiment at CERN” autorstwa mgr Małgorzaty Niemiec. Dysertacja składa się z dziesięciu rozdziałów (włączając wstęp i podsumowanie), sześciu załączników oraz bogatej bibliografii. Praca dotyczy wyznaczania asymetrii czułych na poprzeczną polaryzację tarczy z danych eksperymentu COMPASS dla procesu Drell’a-Yan’a oraz interpretacji tych asymetrii w języku rozkładów poprzecznego pędu partonów (ang. *transverse-momentum dependent parton distribution functions*, TMD PDFs).

Cztery pierwsze rozdziały dysertacji stanowią wprowadzenie do tematyki badań. Pierwszy rozdział zawiera krótki rys historyczny dotyczący badania struktury hadronów i pojawienia się modelu partonowego, opis głęboko nieelastycznego rozpraszania (ang. *deeply inelastic scattering*, DIS) i jego interpretacji oraz podstawowe informacje o rozkładach TMD. Drugi rozdział to opis reakcji Drell’a-Yan’a – jej kinematyki i interpretacji w języku rozkładów TMD. Rozdział ten prezentuje w szczególności dekompozycję przekroju czynnego na harmoniki względem zależności kątowej, które są czułe na różne typy rozkładów TMD. Dekompozycja ta i interpretacja harmonik są kluczowe dla prezentowanej pracy i stanowią podstawę proponowanej metody ważonej. Trzeci rozdział pracy w zwięzły sposób podsumowuje stan obecnej wiedzy na temat rozkładów partonów (zarówno zależnych, jak i niezależnych od poprzecznego pędu partonów). Czwarty rozdział to opis eksperymentu COMPASS.

Kolejne cztery rozdziały dysertacji stanowią szczegółowy opis analizy danych. Piąty rozdział podsumowuje wybór przypadków oraz ich grupowanie w przedziały kinematyczne. W rozdziale tym zdefiniowano ponadto tzw. współczynnik rozmycia (ang. *dilution factor*), czyli stosunek ilości spolaryzowanego do niespolaryzowanego materiału tarczy, przy wyznaczeniu którego uwzględnia się efekty jądrowe. Rozdział szósty to opis proponowanej metody ważonej wyznaczania asymetrii czułych na rozkłady TMD. Użycie tej metody dla danych eksperymentu

COMPASS opisano w rozdziałach siódmym i ósmym, kolejno dla „standardowego” i rozszerzonego przedziału masy niezmienniczej pary leptonów. W drugim przypadku uwzględnia się efekty związane z tłem pochodzącym z procesów innych niż proces Drell’a-Yan’a. W rozdziale dziewiątym dokonano próby interpretacji uzyskanych wyników w kontekście rozkładów TMD. Podsumowanie pracy przedstawiono w rozdziale dziesiątym.

Wartość naukowa rozprawy

Tematyka badań związana z recenzowaną pracą jest bez wątpienia ważna. Poruszony problem naukowy dotyczy rozkładów TMD. Eksperymentalne potwierdzenie tzw. zmodyfikowanej uniwersalności tych rozkładów (ang. *modified universality*), czyli uniwersalności z dokładnością do możliwych do przewidzenia modyfikacji (w tym przypadku zmiany znaku rozkładów Sivers’a i Boer-Mulders’a dających wkład do procesów SIDIS i Drell’a-Yan’a), ma kluczowe znaczenie dla weryfikacji faktoryzacji w której pojawiają się rozkłady TMD, a tym samym dla całej dziedziny. Pomiar obserwabli czułych na rozkłady TMD w procesie Drell’a-Yan’a jest również ważny dla samego wyznaczenia tych wielkości, przy czym użyteczność uzyskanych w recenzowanej pracy wyników w porównaniu z rezultatami pochodzącymi z procesu SIDIS jest w tym kontekście umiarkowana ze względu na duże niepewności, głównie związane z ograniczoną statystyką zarejestrowanych przypadków. Praca dobrze wpisuje się w główny trend eksperymentalnych badań nad rozkładami TMD. Badania te, poza CERN-em, prowadzone są także w innych laboratoriach, takich jak BNL czy Fermilab, i będą kontynuowane w eksperymentach nowej generacji, w szczególności w JPARC-u oraz przy EIC. Danymi eksperymentalnymi niosącymi informację o rozkładach TMD zainteresowanych jest wiele grup fenomenologicznych i teoretycznych. Należy się zatem spodziewać, że także dane uzyskane w recenzowanej pracy będą się cieszyć dużym zainteresowaniem.

Wartość merytoryczna rozprawy

Zaproponowana metoda ważona i przeprowadzona analiza danych doświadczalnych, poza drobnymi uwagami przedstawionymi w dalszej części recenzji, nie budzą wątpliwości merytorycznych. Ocena błędów systematycznych jest poprawna i wydaje się być wyczerpująca. Próbę interpretacji zmierzonych asymetrii w języku rozkładów TMD należy uznać za cenny i wartościowy dodatek, który dobrze uzupełnia część eksperymentalną. Metodologia i uzyskane wyniki są bez wątpienia oryginalne. Sama dysertacja ma logiczną strukturę, charakteryzuje się dbałością edytorską i czyta się ją dobrze. Zdania zbudowane są logicznie, wywód przeprowadzony jest starannie, z dbałością o wyjaśnienie poruszanych zagadnień i ułatwienie ich zrozumienia przez czytelnika.

Uwagi krytyczne

Metoda ważona jest dobrze zdefiniowana, jednak jej ograniczenia oraz motywacja zastosowania mogłyby zostać przedstawione nieco wyraźniej. Jest to istotne, ponieważ eksperyment opublikował już wyniki dla asymetrii nieważonych, uzyskane na podstawie tych samych danych

(Phys. Rev. Lett. 133, 071902 (2024)). Brakuje jasnego odniesienia się do tych rezultatów, zwłaszcza że Rys. 8.19 sugeruje większą precyzję asymetrii nieważonych. Komentarz wyjaśniający różnice między wartościami i niepewnościami obu zestawów asymetrii (poza jakościowym stwierdzeniem że są one zgodne) byłby pomocny, szczególnie dla osób które staną przed koniecznością wyboru konkretnego zestawu asymetrii do analiz fenomenologicznych.

Wstęp teoretyczny jest dość uproszczony. O ile ogólny poziom dyskusji jest wystarczający do przedstawienia zarysu modelu partonowego, to szersze omówienie problematyki rozkładów TMD, będących głównym obiektem zainteresowania w recenzowanej pracy, pozwoliłoby lepiej umotywować przeprowadzoną analizę. Brakuje informacji o faktoryzacji TMD, stanowiącej punkt wyjścia do dyskusji nad zmodyfikowaną uniwersalnością rozkładów i zakresem stosowności opisu. Warto byłoby również poruszyć zagadnienie nietrywialnej ewolucji rozkładów TMD, oraz ich jakościowy związek z orbitalnym momentem pędu partonów. Zwięzły opis tych kwestii pomógłby lepiej zademonstrować znajomość poruszanej tematyki.

Wpływ efektów aparaturowych mógłby zostać lepiej wyjaśniony. W rozdziale szóstym znajdziemy informacje o kilku założeniach dotyczących akceptacji (np. o jej stałości względem kąta Ξ i zmiennych x_π i x_N , oraz wzór (6.8)). W jaki sposób zweryfikowano te założenia oraz umotywowano zaniedbanie wpływu rozmycia zrekonstruowanych wartości kątów i energii (czyli tzw. *smearing-u*)? W metodzie ważonej zaniedbanie efektów aparaturowych wydaje się szczególnie niebezpieczne, zwłaszcza ze względu na możliwość pojawienia się twardych cięć wynikających z ograniczonej geometrii detektora. To, co zdecydowanie pomogłoby potwierdzić poprawność rekonstrukcji, to analiza Monte Carlo, oparta na pseudodanych wygenerowanych z pełną symulacją odpowiedzi detektora, w której wartości asymetrii są znane (czyli tzw. *closure test*). Zarys takiego ćwiczenia znajdziemy się w rozdziale 8.3, jednak skupiono się tam głównie na propagacji błędów statystycznych, jak można przypuszczać, bez symulacji efektów aparaturowych i fizycznych.

Praca zawiera pewną liczbę drobnych literówek, które jednak nie utrudniają czytania tekstu ani zrozumienia wyводу. Poważniejsze, potencjalne problemy, nie mające jednak wpływu na uzyskane wyniki, to:

- we wzorze (1.14) czynnik $1/2$ wydaje się niepotrzebny, natomiast we wzorze (5.1) w liczniku brakuje przekroju czynnego
- podpis rysunku 3.2 zawiera niepotrzebny tekst
- dane w tabeli 4.1 wydają się być pomieszane (silicons $\leftrightarrow$ fibers)
- wartości μ i σ wskazane na płocie 7.3 wydają się nie odpowiadać pokazanym krzywym
- rysunek 8.1 wydaje się być identyczny jak rysunek 7.1

Ocena końcowa

Nie mam wątpliwości, iż autorka recenzowanej rozprawy dysponuje wiedzą teoretyczną wymaganą od osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora w dyscyplinie nauki fizyczne. Potwierdza to w szczególności umiejętność właściwej interpretacji wyników eksperymentalnych

w kontekście obowiązujących modeli teoretycznych, poprawne posługiwanie się aparatem matematycznym oraz dobra znajomość współczesnych zagadnień związanych z fizyką cząstek.

Ponadto rozprawa jednoznacznie dowodzi umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez autorkę oraz stanowi oryginalne i wartościowe rozwiązanie postawionego problemu badawczego. Świadczy o tym sposób zaprojektowania i przeprowadzenia analizy danych, autorska interpretacja uzyskanych wyników, a także umiejętność ich krytycznej oceny w kontekście współczesnych badań eksperymentalnych. Jak wskazano powyżej, tematyka badań podejmowanych w pracy jest bez wątpienia aktualna i wpisuje się w główny nurt współczesnych badań nad strukturą hadronów.

Biorąc powyższe pod uwagę, stwierdzam, iż rozprawa spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim oraz warunki niezbędne do dopuszczenia jej autorki do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



dr hab. inż. Paweł Sznajder, prof. NCBJ