



7.12.2025

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Malgorzaty Niemiec
p.t.**

„Studies of the Three-Dimensional Structure of the Nucleon at the COMPASS Experiment at CERN.”

Celem przedstawionej rozprawy jest pomiar i analiza azymutalnych asymetrii zależnych od spinu poprzecznego przy pomocy danych doświadczalnych zebranych w eksperymencie COMPASS. Analiza dotyczy procesu Drella-Yana, w którym ujemnie naładowany pion rozprasza się na poprzecznie spolaryzowanej tarczy NH_3 . Najważniejszym i nowatorskim elementem analizy jest opracowanie i zastosowanie nowej metody, która polega na ważeniu asymetrii potęgami pędu poprzecznego (względem pędu wiązki początkowej) pary mionów. W tej metodzie możliwe jest bezpośrednie wyznaczenie pierwszych momentów funkcji rozkładów partonów zależnych od pędu poprzecznego, w szczególności funkcji Siversa i Boer-Muldersa.

Badania struktury nukleonów mają długą historię, sięgającą lat 60-tych ubiegłego stulecia, kiedy to w eksperymencie SLAC-MIT odkryto partony w rozpraszaniu głębokonieelastycznym elektronów na protonie. Struktura protonu (ogólniej nukleonu) jest standardowo opisywana przez kolinearne (lub przecałowane) rozkłady partonów (Parton Distribution Functions, PDF). Rozkłady te dla protonu są dość dobrze znane, ze względu na dużą ilość precyzyjnych danych doświadczalnych, zarówno z procesów rozpraszania leptonów na protonie, jak i z procesów mierzonych w zderzeniach protonów, na przykład z reakcji Drella-Yana. Niemniej jednak informacja o strukturze nukleonu zawarta w takich rozkładach jest ograniczona, bowiem nie zawierają one informacji o pędach poprzecznych, oraz przestrzennych rozkładach partonów. Obecnie dużo badań zarówno teoretycznych jak i eksperymentalnych skupia się na partonowych rozkładach, które są zależne również od pędu poprzecznego, tak zwanych Transverse Momentum Dependent Parton Distribution Functions, w skrócie TMD PDF. Funkcje te zawierają cenne informacje również o korelacjach spinowych i orbitalnych dlatego do ich badań wykorzystywane są spolaryzowane wiązki oraz potrzebny jest pomiar procesów, w których stany końcowe nie są wyciałowane po pędach poprzecznych. Wyznaczenie rozkładów TMD jest dużo bardziej wymagające niż standardowych rozkładów kolinearnych. Przedstawiona rozprawa doskonale wpisuje się w tę istotną tematykę badań dotyczącą wyznaczania TMD PDF.

Praca składa się z 10 rozdziałów, 6 dodatków, listy skrótów oraz spisu literatury.

Rozdział pierwszy jest wprowadzeniem, zawiera historyczną perspektywę oraz definiuje podstawowe pojęcia takie jak rozkład partonów i rozpraszanie głębokonieelastyczne. Na stronie 2 wkładło się kilka drobnych błędów (suprose, thet, fistr). Pod wzorem 1.1 Autorka pisze, że analiza koncentruje się na ΔG , i $\Delta \Sigma$ ale nie bardzo wiadomo konkretnie czy to chodzi o analizę w przedstawionej pracy czy inną. Wprowadzenie oznaczenia f_1^q zależnego od zapachu kwarku q we wzorze 1.12 jest mylące, gdyż tam

powinna się znajdować funkcja tradycyjnie oznaczana jako F_1 (zgodnie ze standardem w cytowanej pracy A.Manohar [22]). Wprowadzona funkcja Δf_1^a w równaniu 1.15 jest wprowadzie opisana (helicity), ale brakuje jej definicji jako różnicy między rozkładami, w których kwarki są spolaryzowane zgodnie lub przeciwnie do podłużnego spinu nukleonu. W pierwszym paragrafie rozdziale 1.4 Autorka pisząc o faktoryzacji kolinearnej, zapewne ma na myśli w ogólności brak zależności od pędu poprzecznego a nie spinu. Na stronie 9-tej jest drobny błąd (bso-called). Rozdział jest dość zgrabnie napisany, choć mógłby być lepiej zredagowany.

Rozdział drugi poświęcony jest procesowi Drell-Yana (DY), definicji przekroju czynnego na ten proces i odpowiednich układów odniesienia. Wprowadzone są wagi związane z pędem poprzecznym. Autorka definiuje podstawowe zmienne kinematyczne, układ spoczynkowy tarczy oraz układ współrzędnych Collins-Soper, jako układ spoczynkowy wirtualnego fotonu. W tabeli 2.1 powinno być Collins-Soper (nie Collin-Soper). W sekcji definiującej ten układ warto by było odnieść się do oryginalnej referencji Collins-Soper oraz zdefiniować wektory zcs i xcs . W opisie wzoru 2.6 brakuje wyjaśnienia, że funkcje F to różne funkcje struktury w tym procesie. W dalszej części rozdziału Autorka prezentuje relację Lam-Tung. W sekcji 2.3, zaprezentowana została metoda ważenia przekroju czynnego potęgami pędu poprzecznego pary DY w celu wyodrębnienia poszczególnych momentów funkcji rozkładów TMD. Wyprowadzone relacje, zwłaszcza te wiążące asymetrie z momentami TMD 2.52-2.54, stanowią podstawę do dalszej analizy, w szczególności do wyodrębnienia funkcji Siversa i Boer-Muldersa. Rozdział jest dobrze napisany z dużą ilością szczegółów i definicji podstawowych wielkości używanych w analizie.

Trzeci rozdział stanowi przegląd eksperymentów i danych, które są używane do wyodrębnienia funkcji rozkładów kolinearnych oraz funkcji TMD. Pokazane są dane eksperymentalne na wiele asymetrii służących do wyznaczania funkcji Siversa, Boer-Mulders, transversity oraz funkcji pretzelosity. Drobna uwaga: podpis pod figurą 3.2 zawiera w części ten sam tekst, który odnosi się do figury 3.3. Widać, że Autorka świetnie orientuje się w różnych eksperymentach i danych doświadczalnych używanych do wyznaczenia TMD PDF.

W następnym rozdziale Autorka przechodzi do szczegółowego opisu eksperymentu COMPASS. Początek rozdziału jest poświęcony opisowi elementów znajdujących się na linii wiązki, w szczególności tarcz, które umożliwiają generację wtórnej wiązki hadronowej i selekcji pionów. Następnie jest opis spolaryzowanej tarczy metodą dynamicznej polaryzacji jądrowej. Sekcję tekstu o tarczy kończy krótki opis absorbenta hadronów. Autorka pisze, że ten element absorbuje hadrony ale jednocześnie powoduje rozmycie ich przestrzennej rozdzielczości. Nie bardzo wiadomo w tym momencie, jaki i czy ma to jakiś wpływ na badany proces, skoro głównym celem pomiaru jest proces Drell-Yan i pomiar mionów. Myślę, że można by rozwinąć tę kwestię w tym lub kolejnym rozdziale. W kolejnej części rozdziału następuje opis samego spektrometru, w tym różnych rodzajów trackerów, kalorymetrów i systemu detekcji mionów. Opis ten jest bardzo systematyczny i szczegółowy. Drobna uwaga: w tabeli 4.1 jest błąd (Scintillatinf). Również na stronie 39 powinno być 'strong electric' (a nie 'stron'). W kolejnej części następuje opis triggerów, opartych na systemach hodoskopów funkcjonujących w różnych zakresach kątów rozproszenia produkowanych mionów. Różne kombinacje triggerów dla par mionów umożliwiają skanowanie zakresu mas pary mionów oraz zmiennej Feynmana. Rozdział zamyka opis systemu akwizycji danych (DAQ), kontroli detektora oraz rekonstrukcji i

symulacji. Rozdział jest bardzo dobrze napisany, z dużą wnikliwością, świadczy o tym, że Autorka bardzo dobrze zna szczegóły konstrukcji i operacji eksperymentu COMPASS.

W rozdziale piątym podany jest opis selekcji danych dla pojedynczo spolaryzowanego procesu Drell-Yana, dla wiązki ujemnie naładowanych pionów rozpraszanych na protonie. Rozdział ten rozpoczyna lista kryteriów selekcji par mionów. W szczególności podany jest opis selekcji pierwotnego werteksu, konfiguracji triggera i jego walidacji. Po nim jest opis selekcji dla zakresu pędu poprzecznego pary mionów q_T , w którym jest dyskusja na temat ucięcia dla q_T i dyskusji ogona rozkładu w tej zmiennej. Być może to nieco naiwne pytanie, ale nie bardzo jest jasne, dlaczego rezygnacja z cięcia dla małych q_T (jak rozumiem zastosowanego w poprzedniej analizie COMPASS [94] dla uzyskania odpowiedniej rozdzielczości kątowej) powoduje długi ogon dla dużych q_T . Może warto byłoby wyjaśnić na czym polega ta korelacja. Następnie jest dyskusja selekcji dwóch zakresów masy niezmienniczej pary DY mionów. W kolejnej sekcji jest dyskusja wyboru binów w masie oraz ułamkach pędów podłużnych pionu i nukleonu. Drobną uwagę tutaj: nie ma odniesienia w tekście do paneli 5.3c do 5.3f oraz 5.4c do 5.4f (lub też Autorka miała na myśli odniesienie 5.3f lub 5.4f w tekście zamiast 5.3b i 5.4b). Również w legendach rysunków 5.3a,b oraz 5.4a,b chyba powinno być 2015+2018 a nie 2015+2015. Rozdział zamyka sekcja poświęcona obliczeniu stopnia polaryzacji tarczy ('dilution factor'), a konkretnie efektów związanych z faktem, że w tarczy NH_3 tylko protony mogą być spolaryzowane oraz migracji przypadków między różnymi komórkami tarczy wynikającymi z rekonstrukcji. Rozdział jest dość jasno napisany i założenia są szczegółowo zaprezentowane.

Kolejny rozdział, szósty, jest poświęcony metodologii wyodrębnienia ważonych poprzecznych asymetrii spinowych z pomiarów. To kluczowy rozdział w całej rozprawie. Rozdział rozpoczynają definicje liniowych kombinacji kątów Φ i Ξ , których celem jest wyodrębnienie odpowiednich modulacji kątowych a w konsekwencji wydobyć indywidualnych asymetrii. Następnie jest podana ogólna definicja liczby przypadków w funkcji kąta Φ . W tym momencie tekstu jest wzmianka o 'subperiod', który jest definiowany później, przed wzorem 6.21. Dobrze byłoby to pojęcie zdefiniować wcześniej. Dalsza część sekcji 6.1 to opis całkowania głównego wyrażenia 6.2 w zależności od doboru liniowej kombinacji kątów oraz tego czy przypadki są dodatkowo ważone. W tej części analizy są założenia dotyczące akceptacji detektora, dobrze byłoby bardziej uszczegółowić tę dyskusję i wyjaśnić, dlaczego akceptacja detektora ma takie a nie inne zachowanie od różnych zmiennych. Na przykład nie bardzo jest zrozumiałe, dlaczego w tekście przed wzorem 6.11 Autorka pisze, że akceptacja może zależeć od q_T a następnie pisze, że jednak przyjęte jest założenie że akceptacja jest stała w q_T . Warto by było rozwinąć i uzasadnić tę kwestię. Rozumiem, że przedstawiona w kolejnej sekcji (6.2) metoda zmodyfikowanego podwójnego stosunku ma na celu między innymi zniwelowanie efektów akceptacji detektora, ale nie jest to całkiem jasne czytając tekst w sekcji 6.1. Na stronie 63 w ostatnim paragrafie jest błąd w definicji czynnika kinematycznego D (w porównaniu do wzoru 6.15). W kolejnej sekcji 6.2 jest opisana metoda zmodyfikowanego podwójnego stosunku oraz wyprowadzenie relacji między tym stosunkiem a asymetriami dla obu okien masy niezmienniczej mionów. Kolejna drobna uwaga, odnośniki do sekcji 6.1 i 6.2, na początku sekcji 6.3 wyglądają na zamienione. W sekcji 6.3 są wyprowadzone ostateczne relacje między zmodyfikowanym stosunkiem a asymetriami w obu oknach masowych. Czy we wzorze 6.55 wyrażenie w liczniku, $1 - \cos^2\theta_{CS}$, nie powinno być dodatkowo podniesione do kwadratu (przed uśrednieniem)? Rozdział zamyka sekcja 6.4 gdzie przedstawiona jest dyskusja różnic dotyczących sposobu ważenia między dwoma oknami mas niezmienniczych. Na rysunkach 6.1 i 6.2 pokazane są

czynnik kinematyczny oraz czynnik ‘rozcieńczenia’ (dilution factor) dla różnych okien masowych oraz dla danych 2015 i 2018. Czynniki te wyglądają na konsystentne, ale warto byłoby o tym wspomnieć w tekście.

Rozdział siódmy prezentuje wyodrębnienie asymetrii ze zmodyfikowanego podwójnego stosunku dla funkcji Siversa, pretzelosity oraz funkcji transversity w przypadku standardowego okna masowego dla pary mionów. Spora część tego rozdziału jest poświęcona analizie efektów takich jak kompatybilność różnych okresów czasowych, w których zbierane były dane oraz tak zwanych fałszywych asymetrii. W sekcji 7.2.1 przy dyskusji rozkładu odchyłeń znormalizowanych (rozkład typu ‘pull’) jest opisana konstrukcja rozkładów. Na rysunku 7.3 są pokazane te rozkłady, ale nie jest jasne które krzywe odnoszą się do których binów. W dalszej części 7.2.1 jest opis w przypadku kombinowania przypadków z trzech kinematycznych przedziałów i rezultat tej analizy podany na rysunkach 7.4. Autorka przy tym argumentuje że asymetria powinna pozostać stała w każdym z binów. Przydałoby się wyjaśnienie, dlaczego tak ma być (jak to ewentualnie zależy od szerokości binu). W dalszej części rozdziału są omówione tak zwane fałszywe asymetrie i sposób ich oszacowania. Rozdział kończy prezentacja ostatecznych wyników ważonych asymetrii spinowych, skombinowanych dla danych 2015+2018, dla standardowego okna masowego, Fig.7.12.

Rozdział ósmy zawiera analogiczną analizę jak w poprzednim rozdziale, dotyczącą wyodrębnienia asymetrii, dla poszerzonego okna masowego. Rozdział rozpoczyna dyskusja odnośnie jakości dopasowań amplitudy modulacji kątowej oraz efektów zwiększonej niepewności w funkcji Siversa przy analizie fD-WTSA. Autorka również opisuje obserwacje zwiększonej niepewności przy różnym uśrednieniu po okresach czasowych, co jest szczególnie widoczne w TMD pretzelosity w funkcji masy niezmienniczej (figura 8.5). Drobną uwagę: w podpisach figur 8.2 i 8.3 powinno być Drell-Yan. W sekcji 8.3 dyskutowane jest studium Monte Carlo mające na celu wyjaśnienie zwiększonej niepewności w funkcji Siversa wyznaczonej metodą fD-WTSA. Ten problem jest dość szczegółowo przeanalizowany i wprowadzone są dodatkowe poprawki do zmodyfikowanego podwójnego stosunku w tabeli 8.1. W sekcji 8.4, dyskutowany jest problem tzw. ‘outlier weights’ i wprowadzone jest dodatkowe ciecie (D_{QT}), które nieco poprawia zgodność przy uśrednieniu po oknach czasowych. Patrząc na Fig.8.5 i 8.6 wydaje się, że największe rozbieżności są dla danych z 2015, podczas gdy wydaje się że dane z 2018 nie wykazują tak dalekich rozbieżności (dla pretzelosity). Czy tak rzeczywiście jest i czy jest jakaś systematyczna przyczyna takiej rozbieżności między danymi 2015 i 2018? Rachunki w rozdziale 8.5 i sekcji 8.5.2 pokazują jak liczyć poprawki związane z kompatybilnością okresów czasowych ale nie odpowiadają na pytanie czy rozbieżności można jakoś zrozumieć (inna konfiguracja detektora?). Porównując figurę 8.5 z 8.12a i 8.13a, oraz 8.6 z 8.12b i 8.13b wydaje się, że największe niepewności i zależności od cięcia są w pierwszych dwóch (a zwłaszcza w pierwszym binie) x_N dla pretzelosity dla danych z 2015 roku. Kolejna sekcja to prezentacja ostatecznych wyników dla asymetrii w rozszerzonym oknie masowym pary mionów, otrzymane z cięciami D_{QT} i q_T . Kombinacja wyników z 2015 i 2018 jest również zaprezentowana. Rozdział zamyka porównanie wyników otrzymanych z analizy typu fD-WTSA dla rozszerzonego i standardowego okna masowego oraz porównanie wyników otrzymanych w pracy z opublikowanymi wcześniej otrzymanymi wynikami TSA przez kolaborację COMPASS, Ref. [94]. Wyniki dla funkcji Siversa oraz transversity są w dużej zgodności, dla funkcji pretzelosity zgodność jest na akceptowalnym poziomie, w granicach błędów.

Przedostatni rozdział jest poświęcony wyodrębnieniu momentów funkcji Siversa i Boer-Mulders. Rozdział otwiera opis relacji mierzonej asymetrii oraz momentu funkcji Siversa w nukleonie. Podpis rysunku 9.1 jest niezgodny z opisem w tekście (wydaje się że został zamieniony opis DY i SIDIS). Następnie przeprowadzone jest porównanie momentu funkcji Siversa otrzymanej z pomiarów asymetrii w SIDIS i w DY. Otrzymane wyniki w dwóch binach ułamka pędu podłużnego nukleonu są zgodne w ramach błędów, również znak funkcji Siversa jest zgodny (biorąc pod uwagę zmianę między SIDIS a DY, przewidywaną z teorii QCD). Niezgodność znaku w pierwszym binie, dla najmniejszego x_N , rzeczywiście może wynikać z przybliżeń, to jest zaniedbania kwarków morza. W drugiej części rozdziału jest opisane wyodrębnienie funkcji Boer-Mulders dla pionu. Tu drobna uwaga, pod wzorem 9.5 chyba niepotrzebne jest 'TMD PDF' ponieważ jak rozumiem mowa tutaj o kolinearnym rozkładzie kwarków w pionie (GRV-PI Ref. [145]). Wydobyta funkcja Boer-Mulders z mierzonej ważonej asymetrii jest porównana z modelem fenomenologicznym. Zgodność między mierzoną funkcją a modelem jest tylko w jednym binie, w pozostałych dwóch (zwłaszcza pierwszym) jest znaczna rozbieżność w porównaniu z modelem. W tej sekcji myślę, że logiczniej byłoby zacząć od dyskusji pomiaru, a dopiero później przedstawić model fenomenologiczny. Tutaj mam naiwne pytanie: patrząc na wzory 9.5 oraz modelu 9.10, pojawia się tam ta sama funkcja rozkładu pionu. A zatem wynikałoby z tego, że porównanie między danymi i modelem na figurze 9.8 zawiera tę samą funkcję. Stąd rozbieżności nie mogą wynikać z doboru tej parametryzacji tak jak to sugeruje ostatni paragraf w tym rozdziale.

Pracę zamyka podsumowanie oraz prezentacja możliwości przyszłych eksperymentów Electron Ion Collider (EIC) na spolaryzowanych wiązkach elektronów i protonów, oraz LHCSpin, w którym planuje się zderzenia wiązki protonów z LHC z poprzecznie spolaryzowaną tarczą przed spektrometrem LHCb.

Podsumowując, praca doktorska mgr Małgorzaty Niemiec dotyczy pomiarów w eksperymencie COMPASS asymetrii spinowych w procesie DY ze spolaryzowaną tarczą i wyznaczenia funkcji TMD, w szczególności momentów funkcji Siversa oraz funkcji Boer-Mulders. To bardzo istotna analiza ze względu na wkład jaki wnosi ona do szczegółowego poznania struktury nukleonu, w tym rozkładów w pędzie poprzecznym oraz efektów związanych ze spinem. Analiza jest bardzo ambitna, rzetelna, ważenie potęgami pędu poprzecznego jest nowatorską metodą wyznaczania asymetrii. Praca jest bardzo dobrze napisana, również od strony stylistycznej. Skomplikowana analiza jest bardzo dokładnie i dosyć jasno wytłumaczona. Układ pracy jest logiczny a bibliografia obszerna i dość kompletna. Drobne krytyczne uwagi zawarte w recenzji nie zmieniają mojej wysokiej oceny rozprawy mgr Niemiec.

Stwierdzam, że przedłożona praca spełnia wymagania ustawowe stawiane przed rozprawami doktorskimi i wnoszę o dopuszczenie mgr Małgorzaty Niemiec do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Anna Stas'ko