

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgra Yehora Bondara pt. „Lambda transverse polarization in proton-proton interactions in NA61/SHINE at the CERN SPS”

Rozprawa doktorska mgra Yehora Bondara dotyczy pomiaru poprzecznej polaryzacji hiperonów Λ produkowanych w relatywistycznych zderzeniach pp , na stałej tarczy, w eksperymencie NA61/SHINE przy akceleratorze SPS w CERN. Badanie mechanizmów powstawania polaryzacji hiperonów Λ produkowanych w oddziaływaniach pp ale także w oddziaływaniach pA i AA jest jednym z kluczowych zagadnień fizyki wysokich energii. Oczekuje się, że może służyć jako sygnatura powstawania nowego stanu materii, tj. plazmy kwarkowo-gluonowej. Jednak, pomimo wielu przeprowadzonych pomiarów polaryzacji, mechanizm jej powstawania wciąż nie jest w pełni poznany.

Analiza fizyczna przedstawiona w rozprawie doktorskiej wykorzystuje dane eksperymentalne dotyczące zdarzeń niespolaryzowanych protonów przy energii wiązki 158 GeV, zarejestrowanych w latach 2009-2011. Pomiar poprzecznej polaryzacji przeprowadzony w niniejszej rozprawie został wykonany dla słabego rozpadu cząstek $\Lambda \rightarrow p\pi^-$, w zakresie przestrzeni fazowej: $-0.3 < x_F < 0.2$ i $0.2 < p_T < 1.2$ GeV/c. Zmierzona polaryzacja jest zgodna z wynikami z innych eksperymentów, w ramach znacznych statystycznych i systematycznych niepewności pomiaru. Należy podkreślić, że pomiar ten został zatwierdzony przez współpracę NA61/SHINE jako pomiar wstępny (ang. „preliminary”) nadający się do prezentowania na konferencjach naukowych i był prezentowany przez mgra Yehora Bondara kilkakrotnie, w tym na prestiżowej konferencji Quark Matter 2022 i 2025.

Rozprawa doktorska liczy 120 stron i jest napisana w języku angielskim. Składa się ze streszczenia, krótkiego wstępu, siedmiu rozdziałów, czterech dodatków, obszernej bibliografii zawierającej 163 poz. oraz spisu rysunków i tabel.

Rozdział 1 rozprawy zawiera krótką motywację dotyczącą pomiarów polaryzacji wyprodukowanych cząstek w oddziaływaniach pp oraz w oddziaływaniach jądrowych. Autor przedstawia ogólny plan rozprawy doktorskiej jak również swój dorobek naukowy.

Rozdział 2 to wstęp do problematyki badań polaryzacji. Autor przedstawia historyczny zarys problematyki fizycznej, podstawowe własności hiperonów Λ oraz definicję polaryzacji. Po przedstawieniu przełomowych pomiarów polaryzacji obszerna część rozdziału została poświęcona omówieniu dwóch teoretycznych modeli opisujących powstawanie polaryzacji, tj. modelowi strunowemu Lund oraz modelowi rekombinacji DeGrand-Miettinen. Pouczająca ilustracja powstawania poprzecznej polaryzacji w modelu strun została przedstawiona na rys. 2.4. Następnie Autor krótko omawia poprzeczną polaryzację w oddziaływaniach ciężkich jonów jako sygnaturę PKG oraz omawia pojęcia globalnej i lokalnej polaryzacji hiperonu Λ . Rozdział kończy się omówieniem perspektyw przyszłych pomiarów polaryzacji hiperonów, w szczególności a oddziaływaniach AA .

Uważam, że dobór i ogólny opis pojęć przedstawionych w tym rozdziale są poprawne. Warto podkreślić, że Autor nie tylko opisuje wybrane modele teoretyczne, ale również przedstawia skomplikowany formalizm matematyczny. Poniżej przedstawiam kilka drobnych uwag. Oczekiwałbym bardziej szczegółowego omówienia wzoru (2.1), w tym interpretacji parametru α . W opisie rysunku 2.4 (po prawej) można by podać informacje o użytym modelu, danych a także zakresie zmiennej x_F .

Rozdział 3 zawiera szczegółowe informacje o detektorze NA61/SHINE. Przedstawiono program fizyczny eksperymentu, elementy kompleksu akceleratorowego oraz pod-detektory istotne dla rezultatów prezentowanych w rozprawie. W szczególności dokładnie omówiono

konfigurację systemu wyzwalania, wykorzystaną w rozprawie oraz zasadę działania komór projekcji czasowej (TPC). Można by również zamieścić w tym rozdziale, krótki paragraf poświęcony konfiguracji pola magnetycznego w detektorze z względu na dalsze rozważania dotyczące trajektorii cząstek, symulacji czy też badania precesji spinu w polu magnetycznym.

W rozdziale 4-ym zaprezentowano proces przygotowania symulacji Monte Carlo i danych doświadczalnych używanych w analizie polaryzacji hiperonu Λ . Dane Monte Carlo opierają się o modele fizyczne EPOS oraz Fritjof (FTFP) służące do generacji cząstek w oddziaływaniach pp . Wygenerowane cząstki następnie zostały użyte w programie GEANT4 do symulacji odpowiedzi detektora. W podrozdziale 4.2 zaprezentowano procedurę rekonstrukcji trajektorii śladów, wierzchołka pierwotnego, wierzchołka wtórnego V^0 oraz procedurę kalibracji programu rekonstrukcji. Rozdział ten kończy się opisem sposobu kalibracji strat energii, dE/dx , przypisanych do zrekonstruowanych śladów, które służą do identyfikacji cząstek.

Uważam, że rozdziały 3 i 4 dobrze prezentują aparaturę oraz podstawowe oprogramowanie detektora. Interesujące byłoby zobaczyć, rysunki ilustrujące możliwości pomiarowe detektora w oparciu o dane wykorzystywane w rozprawie, np. akceptancję, zdolność rozdzielczą pierwotnego i wtórnego (V^0) wierzchołka. Przy opisie procedury rekonstrukcji wierzchołka V^0 zabrakło mi uzasadnienia, np. dlaczego użyto cięć $L_{DCA} < 2.5$ cm oraz $p_T^{AP} < 0.5$ GeV/c (rozd. 4.2.2). Co to są „off-time particles”?

Rozdział 5 jest poświęcony metodzie pomiaru poprzecznej polaryzacji. W podrozdziale 5.2 omówiono kryteria selekcji przypadków, torów cząstek i wierzchołków V^0 (kandydatów na rozpady hiperonów Λ). W kolejnym podrozdziale 5.3 przedstawiono sposób wyznaczenia krotności hiperonu Λ poprzez oszacowanie jego wkładu do rozkładu masy inwariantnej dla zrekonstruowanych wierzchołków V^0 . Krotności hiperonu Λ wyznaczono w funkcji $\cos(\theta_x)$ w różnych binach x_F i pędu poprzecznego. Tak, wyznaczone krotności są obarczone niedokładnościami pomiarowymi. W celu uwzględnienia tych efektów zastosowano metodę „odwikłania” sygnału (ang. „unfolding method”) opartą na symulacjach MC. W rozdziale 5.4 zbadano poprawność tej metody używając symulacji MC. Następnie w podrozdziałach 5.6 i 5.7 Autor przedstawia metody wyznaczania statystycznych i systematycznych niepewności pomiaru polaryzacji. Wpływ oddziaływań precesji spinu w polu magnetycznym detektora NA61/SHINE został przedstawiony w podrozdziale 5.8. Efekt ten okazuje się być zaniedbywalny w stosunku do innych niepewności pomiaru.

Należy pochwalić Autora za wdrożenie w analizie zaawansowanych metod „odwikływania” sygnału. Poniżej zamieszczam kilka drobnych uwag/pytań. Na prawym górnym panelu rys. 5.5 widoczny jest pik przy $N_{klaster} \approx 70$ dla danych eksperymentalnych i modelu EPOS. Dlaczego w przypadku modelu FTFP pik ten nie występuje? Natomiast, na rysunku 5.9 można zauważyć, że rozkładu pozycji punktu przecięcia trajektorii hiperonu Λ z płaszczyzną x-y jest istotnie różny w danych doświadczalnych i MC, dlaczego? Z kolei, jak można zauważyć na rys. 5.22 wielkość poprawki niezbędnej do odtworzenia wygenerowanego rozkładu krotności hiperonów Λ może osiągnąć wartość ok. 8. Oczekiwałbym bardziej szczegółowego omówienia wpływu różnych efektów detektorowych prowadzących do tak dużych poprawek. Czy w ramach testu zastosowano prostsze podejście oparte na użyciu wydajności pomiaru hiperonu Λ , tak jak to zrobiono w publikacji [145]? Test ten pozwoliłby również sprawdzić poprawność oszacowania niepewności statystycznych. Czy użycie 20 binów w zmiennej $\cos(\theta_x)$ może mieć wpływ na wartość P ? Może, ze względu na duże niepewności statystyczne, użycie mniejszej liczby „binów”, np. 10 zamiast 20, byłoby bardziej optymalne?

Rozdział 6 zawiera wyniki rozprawy doktorskiej dotyczące pomiaru polaryzacji hiperonu Λ w oddziaływaniach proton-proton przy energii zderzeń $\sqrt{s_{NN}} = 158$ GeV dla $-0.3 < x_F < 0.2$ i $0.2 < p_T < 1.2$ GeV/c. Wyniki te są przedstawione na rys. 6.4. Na rysunkach 6.5 i 6.6 przedstawiono niepewności systematyczne, które szczegółowo omówiono w tekście. Rozumiem, że na rysunku 6.6 przedstawiono wartości bezwzględne różnic. Stosunkowo duża wartość niepewności dla źródła „MC model” została przypisana niewystarczającej statystyce przypadków

MC. Czy różnice polaryzacji uzyskanych przy pomocy obu modeli, wykazują fluktuacje wokół zera dla różnych binów, związane ze statystyką przypadków MC? Z kolei, duża wartość niepewności „VTPC clusters cut” w tylnej hemisferze dla małych p_T została przypisana oszacowaniu niewydajności rekonstrukcji śladów. Czy to oznacza, że macierz odpowiedzi (ang. „response matrix”) oparta na symulacjach MC, nie opisuje w pełni liczby klastrow śladu?

Na rysunku 6.7 można zaobserwować zgodność zmierzonych wartości polaryzacji z przewidywaniami modelu DG-M i z parametryzacją rezultatów z innych eksperymentów - przy niewielkiej nadwyżce zmierzonej polaryzacji dla dużych wartości p_T w przedniej hemisferze. W dalszej części rozdziału, na rys. 6.8, przedstawiono porównanie zmierzonej polaryzacji dla $0.8 < p_T < 1.2$ GeV/c z wynikami innych eksperymentów w szerokim zakresie zmiennej x_F i energii zderzeń dla oddziaływań pp i pA . Dane światowe wskazują, że wartość polaryzacji maleje od dodatnich wartości dla $x_F < 0$ do wartości ujemnych rzędu -0.3 przy wzroście x_F do ok. 0.8. Uzyskane rezultaty w niniejszej rozprawie ładnie wpisują się w ten trend. Np. dla symetrycznych binów $-0.2 < x_F < -0.1$ i $0.1 < x_F < 0.2$ polaryzacja maleje od wartości 0.032 do -0.008. Jednak, zmierzone wartości polaryzacji w niniejszej rozprawie są obarczone znacznymi niepewnościami pomiarowymi przez co możliwość porównania z rezultatami z innych eksperymentów oraz testowania modeli teoretycznych jest ograniczona.

Rozdział 7 zawiera podsumowanie rozprawy doktorskiej, w którym Autor podkreśla, że instalacja detektora wierzchołka oraz planowany nowy nabór danych pp o znacznie większej statystyce stworzy w przyszłości lepszą możliwość pomiaru polaryzacji, poprzez istotne zmniejszenie niepewności pomiaru.

Tekst rozprawy doktorskiej jest napisany poprawną angielszczyzną i generalnie w przejrzysty sposób. Chociaż, w przypadku tak złożonej metody pomiaru oczekiwałbym większej ilości rysunków ilustrujących poszczególne etapy analizy, a istniejące opisy rysunków mogłyby być trochę precyzyjniej omówione. Te redakcyjne niedociągnięcia nie umniejszają wartości merytorycznej rozprawy. Należy pochwalić Autora za zastosowanie zaawansowanych technik pomiarowych oraz wyczerpujący spis literatury. Przeprowadzona analiza eksperymentalna w rozprawie doktorskiej jest interesująca, wartościowa i rokująca dalsze badania w oparciu o wypracowane w niej metody.

Uważam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska w pełni spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim. Wnoszę o dopuszczenie mgra Yehora Bondara do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Adam Trzypał