



dr hab. Radosław Ryblewski, prof. IFJ PAN

Kraków, 30 grudnia 2025 r.

Instytut Fizyki Jądrowej

im. H. Niewodniczańskiego

Polskiej Akademii Nauk

Radzikowskiego 152

31-342 Kraków, Poland

radoslaw.ryblewski@ifj.edu.pl

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Yehora Bondara pt.
*Polaryzacja poprzeczna hiperonów Lambda w zderzeniach proton-proton
w eksperymencie NA61/SHINE przy akceleratorze CERN SPS***

Rozprawa doktorska mgr. Yehora Bondara, zatytułowana *Polaryzacja poprzeczna hiperonów Λ w zderzeniach proton-proton w eksperymencie NA61/SHINE przy akceleratorze CERN SPS* (ang. *Lambda transverse polarization in proton-proton interactions in NA61/SHINE at the CERN SPS*), została przygotowana pod kierunkiem dr. hab. Grzegorza Sławomira Stefanka (promotor) oraz dr. Tobiasza Czopowicza (promotor pomocniczy) i złożona zgodnie z wymogami uzyskania stopnia doktora w dyscyplinie Nauki Fizyczne na Wydziale Nauk Ścisłych i Przyrodniczych Uniwersytetu Jana Kochanowskiego w Kielcach. Rozprawa oparta jest na rezultatach przeprowadzonej przez Autora analizy danych zarejestrowanych w latach 2009–2011 przez eksperyment NA61/SHINE na akceleratorze SPS w CERN. Prezentowane wyniki określone są przez kolaborację jako *wstępne*. Część analizy została opublikowana w niekolaboracyjnej pracy współautorskiej dotyczącej studiów wykonalności pomiaru: Y. Bondar, W. Florkowski, *Acta Physica Polonica B* 55 (2024) 9-A1.

Tematyka i znaczenie rozprawy

Rozprawa dotyczy pomiaru poprzecznej polaryzacji hiperonów Λ produkowanych w zderzeniach niespolaryzowanych protonów z tarczą ciekłowodową przy pędzie wiązki 158 GeV/c (odpowiadającym energii w układzie środka masy $\sqrt{s} = 17.3$ GeV). Wybór tematu rozprawy jest dobrze motywowany merytorycznie. Zjawisko niezerowej polaryzacji Λ w zderzeniach hadronowych przy niespolaryzowanych stanach początkowych jest obserwowane od dziesięcioleci, natomiast wciąż brak jest powszechnie zaakceptowanego, ilościowego teoretycznego opisu mechanizmu odpowiedzialnego za wytwarzanie tej polaryzacji w funkcji zmiennych kinematycznych. W konsekwencji każdy nowy, dobrze kontrolowany pomiar tej obserwacji ma charakter nie tylko uzupełniający, lecz również weryfikujący spójność obecnego obrazu fenomenologicznego oraz ograniczający przestrzeń dopuszczalnych modeli teoretycznych.



Polaryzacja poprzeczna hiperonu Λ w zderzeniach hadronów jest definiowana jako składowa wektora polaryzacji prostopadła do płaszczyzny produkcji, rozpiętej przez wektory pędu wiązki oraz produkowanego hiperonu. Taka definicja nie jest arbitralna i wynika bezpośrednio z własności symetrii oddziaływań silnych. Przy niespolaryzowanej wiązce jest ona jedyną średnią składową polaryzacji dozwoloną przez zachowanie parzystości w procesie produkcji, natomiast składowe leżące w płaszczyźnie produkcji są oczekiwane jako zerowe. W rezultacie poprzeczna polaryzacja Λ jest wrażliwą obserwabłą procesów hadronizacji oraz korelacji orbitalno-spinowych w QCD. Dostarcza ona informacji o dynamice fragmentacji oraz mechanizmach generowania spinu w zderzeniach hadronowych, dla których opis perturbacyjny nie jest bezpośrednio dostępny.

Oprócz motywacji fizycznej przedstawiona analiza ma istotne znaczenie również z kilku innych powodów. Po pierwsze, energia SPS leży w obszarze, gdzie dostępne dane doświadczalne są relatywnie skąpe i często pochodzą ze starszych pomiarów o ograniczonej dokumentacji systematyki (choć w ostatnich latach pojawiły się nowe precyzyjne pomiary w reżimach komplementarnych, np. LHCb). Co więcej, współczesne dane z eksperymentów przy wysokich energiach na RHIC i LHC dotyczą innego reżimu kinematycznego i odmiennych, dominujących tam mechanizmów produkcji. W tym sensie reżim energii SPS stanowi istotny punkt w systematycznym badaniu zależności zjawiska polaryzacji Λ od energii oraz w weryfikacji ewentualnego skalowania w zmiennych kinematycznych.

Po drugie, eksperyment NA61/SHINE oferuje unikatową z perspektywy tego problemu kombinację cech: bardzo duży zakres akceptancji w kierunku przednim oraz rozbudowany program pomiarów dla wielu układów i energii. Stwarza to możliwość przeprowadzenia badań systematycznych w spójnych warunkach detektorowych i przy użyciu jednorodnej metodologii oraz ułatwia przyszłe porównania między różnymi układami i energiami w ramach jednego eksperymentu.

Po trzecie, pomiar polaryzacji w eksperymencie NA61/SHINE stawia szczególnie wysokie wymagania metodologiczne. Akceptancja detektora i wydajność rekonstrukcji Λ silnie zależą od kinematyki i geometrii rozpadu, co może prowadzić do deformacji obserwowanych rozkładów $\cos \theta_x$ używanych do wyznaczenia polaryzacji. Jest to jedno z centralnych wyzwań bieżącej analizy, które zaadresowane jest poprzez korekcie akceptancji, efektywności rekonstrukcji i efektów selekcji, realizowane w ramach procedury *unfoldingu*. Wartość rozprawy polega więc nie tylko na wartości samego rezultatu, ale przede wszystkim na konstrukcji, przetestowaniu i udokumentowaniu kompletnego łańcucha analizy.

W tym kontekście prezentowana rozprawa ma zarówno istotne znaczenie fizyczne (wniesienie nowych informacji o polaryzacji do danych światowych), jak i metodologiczne (zbudowanie kompletnej analizy w ramach kolaboracji NA61/SHINE, stanowiącej punkt odniesienia dla przyszłych badań).

Struktura i główne wyniki rozprawy

Rozprawa doktorska mgr. Yehora Bondara została sporządzona w języku angielskim; ma przejrzystą, spójną i logiczną strukturę, typową dla analiz eksperymentalnych. Praca składa się z siedmiu rozdziałów poprzedzonych streszczeniami w języku polskim i



angielskim oraz spisem treści. Całość uzupełniają cztery dodatki, spis literatury oraz wykazy rysunków i tablic. Tekst jest przemyślany i rzetelnie zredagowany.

Rozdział **pierwszy** zawiera krótkie wprowadzenie do problematyki polaryzacji hiperonów oraz uzasadnia jej pomiar w kontekście programu badawczego kolaboracji NA61/SHINE. Rozdział ten zawiera również oświadczenie jednoznacznie potwierdzające wyraźny wkład Autora w przygotowanie i realizację analizy. W szczególności należy zaznaczyć, że wyniki były prezentowane na kilku ważnych konferencjach z dziedziny fizyki wysokich energii, w tym na Quark Matter 2022 i Quark Matter 2025 (postery). Autor pełnił również rolę kierownika grantu NCN PRELUDIUM (nr 2023/49/N/ST2/02299) poświęconego m.in. bieżącej analizie.

Rozdział **drugi** stanowi przegląd teoretyczno-fenomenologiczny będący jednocześnie wprowadzeniem pojęciowym dla dalszej części pracy i ma raczej użytkowy charakter. Autor omawia tło historyczne, kluczowe zagadnienia dotyczące hiperonów oraz praktykę identyfikacji neutralnych rozpadów typu V^0 . Syntetyczny przegląd elementarnych wiadomości dotyczących Modelu Standardowego oraz części zmiennych kinematycznych używanych w pracy jest przesunięty do dodatku – zabieg ten jest trafiony i pozwala skupić się na zagadnieniach kluczowych dla analizy. W dalszej kolejności Autor wprowadza definicję polaryzacji w oparciu o rozkład kątowy produktów rozpadu słabego, który jest później bezpośrednio użyty do wyznaczenia składowej $P_x(x_F, p_T)$. W oparciu o symetrie argumentuje on również, że dla wiązki niespolaryzowanej oczekiwane wartości pozostałych składowych powinny zniknąć – co później wykorzystuje się kontrolnie. Następnie Autor syntetyzuje wiedzę teoretyczną i eksperymentalną dotyczącą polaryzacji poprzecznej, wyróżniając model DeGrand–Miettinen oraz fenomenologiczną parametryzację danych światowych jako punkty odniesienia, z którymi zestawia swoje rezultaty w dalszej części pracy. Końcowe podrozdziały dostarczają szerszego kontekstu dla bieżącej analizy. Rozdział ten czyta się bardzo dobrze, niemniej część przeglądowa mogłaby zyskać na bardziej szczegółowym i uporządkowanym podsumowaniu, wskazującym jasno, które cechy zależności $P_x(x_F, p_T)$ są najbardziej rozróżniające dla omawianych klas modeli w kontekście bieżącego pomiaru. W ten sposób wybór modelu DeGrand–Miettinen byłby bardziej oczywisty.

Rozdział **trzeci** stanowi spójne wprowadzenie do warunków eksperymentalnych detektora NA61/SHINE istotnych dla pomiaru polaryzacji hiperonu Λ . Autor jasno przedstawia konfigurację detektora oraz kluczowe elementy aparatury wpływające na jakość rekonstrukcji torów i poprawną definicję geometrii zdarzenia. Na uznanie zasługuje zwłaszcza omówienie komór projekcyjnych TPC oraz pola magnetycznego, istotne z punktu widzenia precyzyjnego wyznaczania pędu i parametrów toru cząstek, co stanowi niezbędną podstawę dla późniejszej analizy rozkładów kątowych.

Rozdział **czwarty** opisuje kompletny łańcuch przetwarzania danych w eksperymencie, począwszy od przygotowania próbek symulacyjnych Monte Carlo (MC), poprzez rekonstrukcję zdarzeń prowadzoną dla danych i MC, aż po rekonstrukcję V^0 i zestaw niezbędnych kalibracji. Wyraźnym atutem tej części jest precyzyjne zdefiniowanie procedur i kryteriów jakościowych oraz wskazanie miejsc, gdzie rekonstrukcja nie daje pełnego mapowania między danymi MC a obiektami zrekonstruowanymi. Jednocześnie warto zaznaczyć, że choć Autor deklaruje wybór EPOS-1.99 jako konfiguracji preferowanej ze względu na lepszą zgodność z danymi, to w analizie używa również alternatywnego



modelu FTFP. W dalszej części pokazane są przykładowe porównania z danymi dla widm/krotności Λ (np. w okolicy midrapidity), które wspierają tę decyzję. Wybrane generatory MC mogłyby zostać nieco bardziej szczegółowo opisane, co zmniejszyłoby wrażenie ich użycia w roli czarnych skrzynek.

Rozdział piąty stanowi kluczową część rozprawy. Bazując na informacjach prezentowanych we wcześniejszych rozdziałach, przedstawia on szczegółowy opis procedury analitycznej: selekcję zdarzeń i śladów, rekonstrukcję kandydatów Λ , ekstrakcję sygnału z rozkładów masy niezmienniczej oraz budowę rozkładów $\cos \theta_i$ wykorzystywanych do wyznaczenia polaryzacji. Zrekonstruowanie Λ poprzez topologię V^0 i dopasowanie masy niezmienniczej pary $p\pi^-$ jest klasycznym podejściem. Pozytywnie oceniam szczegółowe omówienie funkcji sygnałowej użytej do opisu piku masowego i tła oraz zwrócenie uwagi na potencjalne problemy stabilności dopasowań w pobliżu granicznych wartości parametrów.

Najmocniejszą stroną rozprawy jest zastosowanie procedury korekcji akceptancji z użyciem symulacji MC oraz unfoldingu rozkładów $\cos \theta_x$ wykonywanego w zbinowanej przestrzeni $(x_F, p_T, \cos \theta_x)$ przy użyciu tzw. macierzy odpowiedzi. Autor przedstawia metodologię tego podejścia, wykonuje testy na próbkach MC z narzuconą (oraz zerową) polaryzacją i bada wpływ wyboru algorytmu unfoldingu na wynik. Takie podejście jest poprawne i odpowiada dobrej praktyce w analizach, w których akceptancja istotnie zależy od kąta rozpadu. Warto podkreślić, że Autor bada także potencjalny wpływ precesji spinu Λ w polu magnetycznym detektora, co stanowi przykład poprawnej kontroli potencjalnych efektów systematycznych. Znikomy wpływ precesji pozwala pominąć ten efekt w końcowym rachunku niepewności. Budżet niepewności systematycznych jest w pracy szeroko omawiany. Autor rozważa zarówno wpływ doboru cięć selekcyjnych, jak i zależności od modelu generatora MC. Zaletą jest jawne wskazanie, które elementy dominują w danych obszarach fazowych.

Główne wyniki pomiaru przedstawiono w rozdziale szóstym. Wyniki przedstawiono jako zależności składowej poprzecznej polaryzacji w funkcji x_F w kilku przedziałach p_T (w zakresie $x_F \in (-0.3, 0.2)$, $p_T \in (0.2, 1.2)$ GeV/c), z rozdzieleniem niepewności statystycznych i systematycznych oraz odniesieniem do danych światowych. Autor prawidłowo unika nadinterpretacji: wskazuje obszary, w których niepewności systematyczne dominują oraz pokazuje, że wybór modeli MC i procedur korekcji może istotnie wpływać na wynik w części przestrzeni fazowej. Porównanie z wybranymi modelami i parametryzacjami danych światowych jest wykonane rzetelnie, a wnioski są formułowane ostrożnie i w sposób zgodny z mocą danych. Autor wskazuje zgodność z zerem w granicach niepewności w obszarze bliskim midrapidity oraz podkreśla, że przy obecnej precyzji pomiar nie rozstrzyga jednoznacznie istniejących rozbieżności pomiędzy wcześniejszymi eksperymentami.

Rozprawę zamyka rozdział siódmy zawierający zwięzłe podsumowanie oraz zarys perspektyw dalszych badań i redukcji niepewności w kontekście instalacji detektora wierzchołka podczas LS2 (2020) oraz planowanej rejestracji wysokostatystycznych danych $p + p$ przy 300 GeV/c w 2025 r. (rzędu 600M zdarzeń).

Dodatki zawierają uzupełniające informacje formalne i techniczne, w tym dyskusję alternatywnej względem unfoldingu metody momentów oraz tabele z wynikami liczbowymi (co podnosi odtwarzalność i użyteczność pracy). Ich obecność zwiększa



kompletność rozprawy i ułatwia odtworzenie analizy, choć część materiału dodatków (Dodatek A.2) ma charakter podręcznikowy i mogłaby zostać skrócona na rzecz bezpośredniego wsparcia głównego wywodu.

Uwagi/pytania

1. W pracy wskazano, że mimo cięcia $|\cos \theta_z| \leq 0.95$ rozkład $\cos \theta_z$ pozostaje nie-regularny i dlatego analizę P_z porzucono. Czy Autor próbował wykonać korektę akceptancji/efektywności dla $\cos \theta_z$ metodą analogiczną do tej zastosowanej dla $\cos \theta_x$ (tj. zbudować macierz odpowiedzi i przeprowadzić unfolding)? Jeśli tak – proszę o krótką diagnozę co uniemożliwiło uzyskanie stabilnego wyniku. Jeśli nie – proszę uzasadnić, dlaczego taka procedura jest niewykonalna w NA61/SHINE dla tej składowej.
2. W pracy zaznaczono, że domieszka K_S^0 nie jest uwzględniana. Czy Autor może oszacować potencjalny bias wartości P_x oraz/lub wkład do niepewności systematycznej wynikający z tej domieszki?

Wniosek końcowy

Rozprawa mgr. Yehora Bondara przedstawia starannie przemyślaną i solidnie wykonaną analizę eksperymentalną, której mocną stroną jest szczegółowo udokumentowana metodologia oraz ostrożne ułożenie wyniku w kontekście danych światowych. Praca potwierdza ogólną wiedzę teoretyczną Autora w dyscyplinie, czego wyrazem jest wyczerpujące wprowadzenie teoretyczne formalizmu polaryzacji oraz jego adaptacja do analizy w środowisku eksperymentu NA61/SHINE. Jednocześnie rozprawa wyraźnie pokazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, obejmując pełny łańcuch analizy oraz rzetelne rozważenie wpływu pola magnetycznego na pomiar. Przedstawione badania stanowią oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, jakim jest pierwsze w ramach NA61/SHINE kompletne opracowanie procedury pomiaru poprzecznej polaryzacji hiperonów Λ w zderzeniach $p + p$. Wyznacza on punkt wyjścia do przyszłych analiz tego zjawiska w różnych konfiguracjach zderzeń i zakresach energii oraz o większej statystyce. Uzyskana wiedza i wypracowany warsztat otwierają nowe perspektywy badawcze: od pogłębienia zrozumienia mechanizmów fragmentacji w procesach hadronowych, poprzez systematyczne testy zależności energetycznej i układowej w NA61/SHINE, po bardziej wymagające studia w zderzeniach ciężkich jonów wówczas, gdy precyzja pomiaru pozwoli na jednoznaczniejsze wnioski.

W konsekwencji uważam, że rozprawa mgr. Yehora Bondara spełnia wszystkie formalne i zwyczajowe wymagania stawiane pracom doktorskim, a wkład Autora jest wyraźny i merytorycznie istotny. W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie mgr. Yehora Bondara do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

dr hab. Radosław Ryblewski, prof. IFJ PAN