



# Politechnika Warszawska

## Wydział Fizyki

prof. dr hab. inż. Adam Kisiel

Warszawa, 13.4.2026 r.

### Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr Syed Uzair Ahmed Shah p.t.  
**„Study of charged hadrons produced in central Pb+Pb collisions at the CERN SPS”**

Recenzowana rozprawa dotyczy pomiarów inkluzywnej produkcji pionów i kaonów naładowanych, oraz protonów i antyprotonów mierzonych w eksperymencie ze stałą tarczą NA61/SHINE, przeprowadzanym w laboratorium CERN przy akceleratorze SPS. Analizowana próbka danych zwiera zderzenia przyspieszanych jąder  $^{208}\text{Pb}$  z tarczą zawierającą jądra  $^{208}\text{Pb}$  dla dwóch energii wiązki: 13 A i 30 A GeV/c. Uzyskano podwójnie różniczkowe rozkłady krotności cząstek w funkcji pospieszności (ang. „rapidity”) oraz pędu poprzecznego dla tych energii zderzenia, co pozwoliło również na oszacowanie całkowitej krotności mezonów wyprodukowanych w tych zderzeniach. Dane te stanowią kluczowe elementy głównego programu fizycznego eksperymentu NA61/SHINE i szerzej pojętego programu badania diagramu fazowego materii oddziałującej silnie w obszarze dużych gęstości barionowych, gdzie istotne jest wykonanie analiz w funkcji energii zderzenia i rozmiaru zderzanych jąder. Wyniki zaprezentowane w rozprawie stanowią ważny element większej całości badań zależności stosunków krotności pionów i kaonów naładowanych w funkcji energii zderzenia i rozmiaru zderzanego systemu. W tym sensie zaprezentowane wyniki są oryginalne i istotne.

Rozprawa napisana jest w języku angielskim i podzielona jest na 10 rozdziałów. Pierwsze trzy to część opisowa pracy, w kolejnych sześciu zawarto opis procedury wyboru próbki danych, wykonanych analiz modelowych i korekcji oraz same wyniki pomiarów. W ostatnim rozdziale stanowiącym podsumowanie zawarto również plany na przyszłość.

W rozdziale 1 przedstawiono, w jaki sposób analizy wykonane w rozprawie wpisują się w szerszy program badawczy akceleratora SPS oraz eksperymentu NA61/SHINE. Na pochwałę zasługuje umieszczenie w treści rozdziału klarownej deklaracji Doktoranta opisującej jego osobisty wkład w prace kolaboracji NA61/SHINE. Przedstawiona przez Doktoranta lista działań, obejmująca zarówno zadania związane z udziałem w szychtach eksperymentalnych monitorujących działanie detektora podczas zbierania danych, jak i kluczowych zadań związanych z kalibracją detektora TPC (określenie tzw. wartości rezydualnych wyznaczenia pozycji klastrów w tym detektorze) wykazuje, że jego wkład był istotny, odpowiadający jego zaangażowaniu w projekt na stanowisku doktoranta. Osobistym wkładem doktoranta jest również pełen ciąg kolejnych etapów prowadzących do uzyskania ostatecznych wyników fizycznych opisanych w pracy.

W rozdziale 2 omówiono podstawy Modelu Standardowego oraz Chromodynamiki Kwantowej (QCD), w tym zagadnień uwięzienia (ang. „confinement”) oraz asymptotycznej swobody kwarków. Zwrócono uwagę na aspekty QCD istotne z punktu widzenia zderzeń ciężkich jonów, takie jak fazy materii silnie oddziałującej oraz charakter przemian fazowych pomiędzy nimi, przedstawiane w postaci diagramu fazowego. W szczególności zwrócono uwagę na charakter przejścia fazowego pomiędzy gazem hadronowym oraz fazą w której kwarki i gluony nie są uwięzione w hadronach (ang. „deconfinement”). Spodziewane jest, że zmienia ono swój charakter z

przejścia pierwszego rodzaju na przejście typu „cross-over”. Punkt diagramu fazowego, w którym to następuje nazywany jest punktem krytycznym, a jego poszukiwanie jest jednym z głównych celów programu fizycznego SPS. Sygnatury tego przejścia fazowego zostały omówione z punktu widzenia modelu SMES („Statistical Model of Early Stage”). W tej interpretacji dane przedstawione w rozprawie (rozkłady inkluzywne oraz krotności naładowanych pionów i kaonów) są kluczowe w potwierdzeniu hipotezy o wyprodukowaniu materii w stanie, w którym kwarki są uwolnione. Rozdział pokazuje, że Doktorant zna teoretyczną motywację wykonywanych pomiarów i rozumie ich szerszy kontekst. Rozdział zadowalająco uzasadnia podjęcie tematu badań wybranego w rozprawie.

Rozdział 3 jest opisem narzędzia badawczego użytego w pracy, to znaczy detektora NA61/SHINE oraz zestawu akceleratorów dostarczających do niego wiązkę. Opisano układ formujący i transportujący wiązkę oraz rodzaje dostarczanych wiązek – protonów lub ciężkich jonów. Szczegółowo omówiono elementy układu detekcyjnego istotne dla analiz przeprowadzonych w pracy, w tym kompleks urządzeń zawierających detektory monitorujące wiązkę oraz tarczę. Wspólnie stanowią one podstawę systemu wyzwalania, a więc także początkowej selekcji przypadków. Specjalną uwagę zwrócono na detektory pozwalające na śledzenie i identyfikację cząstek, czyli komory projekcji czasowej (Time Projection Chambers – TPCs) oraz detektory czasu przelotu (Time-of-Flight – TOF). Wyjaśniono ich zasadę działania, w tym pomiar jonizacji dla TPC oraz całkowitego czasu przelotu cząstek od punktu zderzenia do detektorów TOF, które są kluczowe dla procesu odróżniania od siebie pionów, kaonów i protonów. Za pomiar centralności zderzenia odpowiada Projectile Spectator Detector, poprzez pomiar energii spektatorów. Zawartość rozdziału daje przekonanie, że Doktorant posiada wiedzę o szczegółach działania narzędzia badawczego, którym się posługuje, co prawdopodobnie wynika również z faktu, że był on bezpośrednio zaangażowany w procedurę kalibracji detektorów TPC. Wiedza ta została przez niego użyta w samej analizie danych oraz oszacowaniu niepewności systematycznej pomiarów. Treści zawarte w tym rozdziale są wystarczające do zrozumienia dalszej części rozprawy, a Doktorant w sposób właściwy odnosi się do nich w kolejnych rozdziałach przy dyskusji szczegółów analizy.

W rozdziale 4 skupiono się na procedurach obróbki danych eksperymentu NA61/SHINE. Omówiono kolejne etapy tzw. rekonstrukcji, to znaczy uzyskiwania użytecznych danych fizycznych z sygnałów odczytywanych z kolejnych elementów detekcyjnych. Istotnymi etapami tego procesu są między innymi: identyfikacja klastrów pochodzących z jonizacji wywołanej przez cząstki przemierzające TPC, identyfikacja śladów najpierw oddzielnie w poszczególnych detektorach, a następnie łączenie śladów pozostawionych przez tę samą cząstkę w kolejnych detektorach, rekonstrukcja pierwotnych i wtórnych wierzchołków. Wspomniane są poszczególne elementy kalibracji detektorów gazowych, takie jak kalibracja prędkości dryfu, kalibracja wzmocnienia sygnału, korekcja na gęstość i ciśnienie gazu, korekcja na straty ładunku oraz wyznaczenie zależności sygnału od długości dryfu. Krótko opisano też symulacje Monte-Carlo służące do oszacowania wydajności detektora. Informacje zawarte w tej części rozdziału pozwalają na zrozumienie koncepcji rekonstrukcji w NA61/SHINE, w tym roli jaką w tym procesie odgrywiają symulacje.

Rozdział 5 poświęcono kryteriom wyboru danych. Po pierwsze opisano sposób wyboru poprawnie zarejestrowanych zdarzeń, oraz procedurę wyznaczenia centralności zderzenia. W pracy przebadane zostały tylko najbardziej centralne zderzenia, stanowiące 10% całkowitego przekroju czynnego. Podobnie podane zostały kryteria wyboru torów, których jakość rekonstrukcji była wystarczająca. Kolejnym elementem analizy była identyfikacja cząstek, opisana w rozdziale 6. Opiera się ona przede wszystkim na szczegółowej analizie rozkładu średnich strat energii na jonizację w funkcji pędu cząstki, w tym jej opisu poprzez krzywą Bethgo-Blocha, oraz analizy obszarów, w których sygnały od cząstek różnego rodzaju przekrywają się. Ten aspekt jest kluczowy dla całej analizy. W rozprawie zdecydowano się użyć metody tożsamości cząstek (tzw. „identity method”), która pozwala na poprawne wyznaczenie krotności cząstek różnego rodzaju, przy jednoczesnym maksymalnym wykorzystaniu dostępnej statystyki. Ten wybór zasługuje na pochwałę, gdyż jest to metoda najbardziej odpowiednia w tym typie analizy. Opis rozwiązań

metodologicznych zamyka rozdział 7, w którym omówiono poprawki określone na podstawie symulacji Monte-Carlo. Wzięto pod uwagę akceptancję geometryczną detektora oraz poprawki na wkład do krotkości mierzonych cząstek pochodzący od cząstek rozpadających się poprzez procesy słabe. Podsumowaniem rozdziału jest końcowy wzór na całkowitą poprawkę oraz skorygowane różniczkowe rozkłady krotkości. Podsumowując rozdziały te pokazują szczegółowo szeroki zakres prac, które musiał wykonać Doktorant, aby uzyskać nietrywialne wyniki fizyczne. Wymagały one staranności i poświęcenia uwagi szczególnie analizie i wzajemnym zależnościom wielu czynników. Wykazały też, że Doktorant włożył duży wysiłek w dogłębne zrozumienie, a następnie wykorzystanie tych aspektów działania układu detekcyjnego, które są kluczowe dla przeprowadzanej przez niego analizy.

Rozdział 8 podaje procedurę wyznaczania niepewności statystycznych i systematycznych. Użyto tu standardowej metody badania wpływu zmiany wartości kryteriów wyboru przypadków oraz poszczególnych torów na ostateczny wynik. Rozdział zamyka prezentacją wyznaczonych niepewności.

Właściwe wyniki analizy będące celem rozprawy znajdują się w rozdziale 9. Dla pionów przedstawiono rozkłady krotkości w funkcji pędu poprzecznego i pospieszności dla zderzeń przy obu pędach wiązki – 13A i 30A GeV/c, przy pomocy których oszacowano średnią krotkość pionów dodatnich i ujemnych w funkcji pędu wiązki. Następnie przedstawiono różniczkowe rozkłady krotkości kaonów naładowanych, które użyto do wyznaczenia rozkładów oddzielnie w pędzie poprzecznym i pospieszności. Te pierwsze pozwoliły także na wyznaczenie odwrotności parametru nachylenia rozkładu pędu poprzecznego, który jest związany z temperaturą systemu. Analogiczne rozkłady podwójnie różniczkowe oraz w funkcji pędu poprzecznego i pospieszności przedstawiono dla protonów i antyprotonów. Rozkłady te porównano z przewidywaniami modelowymi. Połączenie wszystkich powyższych danych pozwoliło na wykonanie analizy, która była ostatecznym celem rozprawy, to znaczy zbadania zależności stosunków krotkości pionów i kaonów naładowanych od energii oraz od rozmiaru systemu. Wyniki z rozprawy zostały dodane do zależności wyznaczonych we wcześniejszych analizach eksperymentów NA49, NA61/SHINE i innych. Są one zgodne z zaobserwowaną wcześniej strukturą tzw. „horn” w stosunku krotkości dla pionów i kaonów dodatnich oraz brakiem takiej struktury dla cząstek naładowanych ujemnie. Dane dla wielu rozmiarów systemu pokazują, że ta charakterystyczna zależność występuje tylko dla dużych systemów. Podsumowując wyniki uzyskane w rozprawie dostarczają ważnych argumentów za interpretacją, że w zakresie energii akceleratora SPS dla dużych zderzanych systemów obserwowane jest pojawienie się materii w której kwarki i gluony nie są powiązane w hadronach.

W ostatnim rozdziale umieszczono wnioski z analiz oraz plany na przyszłość.

W rozprawie zamieszczono 2 dodatki. W pierwszym zdefiniowano użyte w pracy pojęcia kinematyczne, a w drugim zebrano w postaci tabel wartości liczbowe wszystkich zmierzonych krotkości, wraz z podaniem niepewności statystycznych i systematycznych.

W rozprawie przedstawione są unikatowe wyniki analizy, które w bezpośredni sposób wpisują się w główny nurt programu fizycznego eksperymentu NA61/SHINE, to znaczy są naukowo istotne. Skomplikowana analiza została przeprowadzona uważnie i starannie. Została ona przeprowadzona w całości, to znaczy uzyskano w pełni skorygowane ostateczne wyniki, które następnie zostały bezpośrednio porównane z przewidywaniami modelowymi, a także umieszczone w kontekście pozostałych analogicznych pomiarów wykonanych przy akceleratorze SPS i innych. Brakuje jedynie informacji, w jakim stadium znajduje się przygotowanie tych wyników do publikacji w czasopiśmie naukowym (zgodnie z informacją zawartą w rozdziale 1, wyniki mają status „preliminary”). Doktorant jest współautorem wielu publikacji eksperymentu NA61/SHINE, prezentujących analizy eksperymentalne, w tym oparte o kalibrację detektora TPC opisane w pracy. Nie ulega wątpliwości, że Doktorant spełnia wymogi stawiane doktorantom dotyczące liczby publikacji w znaczących czasopismach naukowych. Mimo iż analiza została przeprowadzona w ramach dużej międzynarodowej współpracy badawczej, nie ulega wątpliwości, że indywidualny wkład Doktoranta był ważny i wyraźnie zdefiniowany.

Niektóre elementy rozprawy wymagają dodatkowego wyjaśnienia:

Rysunek 3.4 oraz Tabela 3.1 wydają się niespójne (brak detektora „S5” na rysunku, pozycja detektora „S3” według tabeli jest przed tarczą, a według rysunku za nią).

Dyskusja dryfu jonizacji w TPC na stronie 21 nie definiuje co znaczy „time slice” w tym przypadku. Choć we wcześniejszej dyskusji pojawia się pojęcie prędkości dryfu, to nie jest wyjaśnione w jaki sposób związane jest ono z czasem dryfu i w konsekwencji wyznaczeniem położenia klastra w kierunku prędkości dryfu.

Na stronie 26 dyskutowane są rozpady cząstek neutralnych (takich jak  $\Lambda$  i  $K^0_S$ ). Z opisu wynika, że ich wierzchołki rozpadu identyfikowane są tylko w objętości detektorów TPC. Jednak cząstki te mogą się rozpaść w dowolnym miejscu, także poza tymi detektorami. Czy rekonstrukcja wtórnych wierzchołków rzeczywiście jest ograniczona tylko do wnętrza tych detektorów? Jeśli tak, to w jaki sposób wpływa to na wydajność ich znajdowania?

Na stronie 28 w sekcji „detector simulation” podano, że pakiet GEANT4 opisuje rozpady i wtórne oddziaływania cząstek. Jest to opis zbyt skrótowy, który pomija główne funkcje tego pakietu, to znaczy symulację oddziaływania promieniowania z materią, w tym depozycji energii przez cząstki w substancji aktywnej detektora, co jest właśnie istotą procedury symulacji detektora.

Na stronie 40 użyto sformułowania „measured with the Bethe-Bloch function”, choć przy pomocy tej formuły nic nie jest mierzone. Zapewne należałoby tu użyć sformułowania „calculated with”, lub podobnego.

W sekcji 7.1 opisano korekcję na akceptancję geometryczną. Na rys. 7.1 wyraźnie widać, że współczynnik poprawki ma wyjątkowo wysokie wartości na brzegach obszaru. Czy sprawdzony został wpływ tych efektów brzegowych, na stabilność poprawki? Czy przeprowadzony został tzw. „Monte-Carlo closure test”, to znaczy czy sprawdzono, czy po korekcji danych Monte-Carlo przy pomocy współczynników wyznaczonych na podstawie niezależnej symulowanej próbki danych odzyskano oryginalne wartości symulowane?

Jakie jest znaczenie współczynnika  $n_i^{\text{decay}}$  wyznaczanego równaniem (7.4)? Z opisu wynika, że ma on charakter mnożnika (odwrotności ułamka), natomiast ze wzoru wynika, że ma on charakter absolutnej wielkości.

Rysunek 8.1 jest mało czytelny, ze względu na użycie ciągłych linii o zbliżonych kolorach na reprezentację wszystkich możliwych kontrybucji do niepewności systematycznej.

Na rysunku 9.12 w przypadku obu modeli oraz obu pędów wiązki dla protonów widoczne są dodatkowe maksima w pobliżu pospieszności wiązki. Jednak ten efekt nie jest obserwowany w danych. Czy znane jest wyjaśnienie tego faktu?

W rozprawie sporadycznie występują błędy stylistyczne i powtórzenia w tekście.

Wymienione uchybienia nie wpływają jednak negatywnie na odbiór pracy. Jest ona przygotowana starannie od strony edytorskiej. Rysunki są w większości duże i czytelne oraz jasno opisane. Podział na rozdziały i wybór materiałów zawartych w dodatkach jest logiczny. Dzięki temu rozprawa w sposób wystarczający i klarowny prezentuje wyniki analizy i w sposób poprawny je interpretuje.

Podsumowując uważam, że recenzowana rozprawa mgr Syed Uzair Ahmed Shah spełnia wymagania stawiane przed rozprawami doktorskimi i wnoszę o dopuszczenie Autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Adam Kisiel