



Kraków, 7 kwietnia 2026 r.

## Recenzja rozprawy doktorskiej

**Mgr Syed Uzair Ahmed Shah**

(imię i nazwisko doktoranta)

**pod tytułem**

**Study of charged hadrons produced in central Pb+Pb collisions at the CERN SPS**

przygotowanej pod kierunkiem

**prof. dr. hab. Macieja Rybczyńskiego**

(imię i nazwisko promotora)

**dra Macieja Piotra Lewickiego**

(imię i nazwisko promotora pomocniczego)

## Charakterystyka i opis rozprawy

Rozprawa doktorska mgr. **Syeda Uzaira Ahmeda Shaha** dotyczy pomiaru rozkładów pędu poprzecznego ( $p_T$ ), pospieszności ( $y$ ) i średnich krotności  $\langle n \rangle$  dla  $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $K^+$ ,  $K^-$ ,  $p$  i  $\bar{p}$  w centralnych (0–10%, 0–7,2%) zderzeniach ołów–ołów (Pb+Pb) przy pędach wiązki 13 AGeV/c i 30 AGeV/c, zebranych przez kolaborację NA61/SHINE przy akceleratorze CERN SPS w 2016 roku. Autor wyznaczył również stosunki średnich krotności  $\langle K^+ \rangle / \langle \pi^+ \rangle$  i  $\langle K^- \rangle / \langle \pi^- \rangle$  oraz zbadał ich zależność od energii i centralności zderzeń. Otrzymane wyniki porównał z wcześniejszymi pomiarami innych eksperymentów przy energiach AGS/Brookhaven i SPS/CERN oraz z modelami produkcji cząstek EPOS i UrQMD.

Praca ta stanowi część programu fizycznego kolaboracji NA61/SHINE, poszukującego punktu krytycznego dla przejścia fazowego z materii hadronowej do plazmy kwarkowo-gluonowej w warunkach wysokiej temperatury i niezerowej wartości potencjału bariochemicznego ( $\mu_B$ ). Jest to hipotetyczny punkt na diagramie fazowym materii jądrowej, w którym przejście fazowe zmienia swój charakter z ciągłego (przejście gładkie) na nieciągły (przejście pierwszego rodzaju).

W tym celu kolaboracja NA61/SHINE przeprowadziła szereg pomiarów dla różnych układów: p+p, p+Pb, Be+Be, Ar+Sc, Xe+La i Pb+Pb przy różnych energiach zderzeń w SPS. Główną motywacją do przeprowadzenia niniejszej analizy było porównanie  $\langle K^+ \rangle / \langle \pi^+ \rangle$  z wcześniejszymi pomiarami kolaboracji NA49, w których zaobserwowano charakterystyczne wąskie maksimum dla tego rozkładu (tzw. *horn*) dla centralnych zderzeń Pb+Pb przy pędzie wiązki 30 AGeV/c. Wyniki przy niższym pędzie 13 AGeV/c dostarczają dodatkowej informacji w unikatowym obszarze energetycznym.



Rozprawa składa się z podziękowań, streszczenia w języku angielskim i polskim, słownika skrótów, spisu treści, dziesięciu rozdziałów, spisu literatury, dwóch dodatków, listy tabel i listy rysunków. Praca liczy łącznie 102 strony i jest napisana poprawnym angielskim, w dobrym stylu. Znalazłem jedynie kilka drobnych błędów, które nie rzutują na ogólną jakość rozprawy. Uwagę zwraca jednak brak symboli punktów na legendach kluczowych rysunków przedstawiających wyniki pomiarów w porównaniu do innych eksperymentów. Moje komentarze i uwagi znajdują się poniżej w tekście (pogrubiłą czcionką) do dyskusji podczas obrony.

W pierwszym rozdziale (wprowadzeniu) autor przedstawił w skrócie program fizyczny eksperymentu NA61/SHINE i główną motywację do przeprowadzenia tych pomiarów. Ponadto przedstawił swój wkład do eksperymentu NA61/SHINE w latach 2022–2025, biorąc aktywny udział w pomiarach i wstępnej kalibracji danych z komory projekcji czasowej TPC. Jednocześnie przeprowadził pełną analizę danych Pb+Pb przy pędach 13 AGeV/c i 30 AGeV/c zebranych w 2016 roku, której wyniki zaprezentował w tej pracy. Analiza obejmowała selekcję danych i optymalizację cięć dla centralnych (0–10% i 0–7,2%) zderzeń Pb+Pb. Identyfikację  $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $K^+$ ,  $K^-$ , p i  $\bar{p}$  przeprowadził w oparciu o straty energii  $dE/dx$  w TPC. Autor wyznaczył wszystkie korekcje w oparciu o symulacje MC i ostatecznie otrzymał rozkłady  $d^2n/(dy dpT)$ ,  $dn/dy$  oraz średnie krotności wraz z błędami statystycznymi i systematycznymi. Wstępne wyniki przedstawił na trzech konferencjach (dwa wystąpienia i jeden poster). Wyniki opublikowane zostały jedynie w materiałach konferencyjnych. **Czy są plany publikacji tych wyników w recenzowanym czasopiśmie z udziałem autora?**

W rozdziale drugim autor sprawnie przedstawił teorię oddziaływań silnych – chromodynamikę kwantową (QCD) oraz hipotetyczny diagram fazowy (T,  $\mu B$ ) materii jądrowej z zaznaczonym punktem krytycznym. Jest to intensywny obszar badań przez eksperymenty przy SPS, RHIC i LHC. Ponadto autor wprowadził pojęcie początku uwolnienia kwarków (ang. *onset of deconfinement*) jako progu, powyżej którego własności układu zaczynają być zdominowane przez swobodne kwarki i gluony. Przejście takie może się objawiać gwałtowną zmianą obserwabli eksperymentalnych. W końcu przedstawił model SMES (ang. *Statistical Model of Early Stage*), który służy do interpretacji niemonotonicznego zachowania produkcji hadronów na podstawie takich cech jak *horn*, *kink* i *step*. Autor na rys. 2.2 przedstawił przewidywania modelowe wraz z wynikami pomiarów NA49 i STAR, które sugerują pojawienie się tych cech i obserwację początku uwolnienia kwarków. **Czy możliwe jest ilościowe porównanie modelu SMES z danymi eksperymentalnymi?**

W rozdziale trzecim autor opisał eksperyment NA61/SHINE oraz system akceleratorowy w CERN. Dla eksperymentu przedstawił jego program fizyczny, układ detektorów, system wyzwiania oraz tarczę. Szczegółowo opisał detektory służące do identyfikacji hadronów – TPC i TOF – oraz selekcji centralności zdarzeń – PSD. **Dlaczego zdolności rozdzielcze czasowe TOF-L i TOF-R są różne? Gdzie został umieszczony dodatkowy moduł nr 45 detektora PSD użyty w pomiarach?**

Rozdział czwarty zawiera szczegóły rekonstrukcji danych, w tym znajdowanie klastrów i trajektorii w TPC oraz wierzchołków kolizji. Ponadto autor przedstawił etapy kalibracji danych TPC i skrótkowo symulacje MC odpowiedzi detektora w oparciu o GEANT4. **Jak działa algorytm *track matching*?**

W rozdziale piątym autor szczegółowo opisuje selekcję zdarzeń (wraz z selekcją centralności) oraz trajektorii cząstek. W selekcji zdarzeń zastosował detektory BPD (ang. *beam position detectors*), detektory trygerujące i TPC. Selekcja centralności zdarzeń bazowała na energii zmierzonej w detektorze PSD. **Rys. 5.1 (lewy) nie zawiera jednostek ładunku.** Centralność została wyznaczona dla 0–7,2% i 0–10% najbardziej centralnych zderzeń w oparciu o symulacje przy użyciu programu GLISSANDO (ang. *Glauber Initial-State Simulation AND mOre*). Tabela 5.1 przedstawia wyniki tej analizy, a tabela 5.2 – frakcję zdarzeń pozostałą po zastosowaniu cięć. **Co oznacza „perfect fit” w**



**tabeli 5.2?** Selekcja trajektorii bazowała na precyzyjnym dopasowaniu trajektorii cząstek oraz liczbie klastrów w TPC (tabela 5.3).

Rozdział szósty zawiera opis identyfikacji hadronów przy pomocy TPC ( $dE/dx$ ) w przedziałach ( $p$ ,  $p_T$ ). Do rozkładów  $dE/dx$  w tych przedziałach dopasowano parametryzację (sumę asymetrycznych funkcji Gaussa, równanie 6.2) dla dodatnio i ujemnie naładowanych hadronów (rys. 6.4). W tej procedurze wykorzystano więzy fizyczne w celu redukcji liczby parametrów, co poprawiło precyzję i stabilność dopasowania. Jakość dopasowania sprawdzono, porównując otrzymane wyniki z przewidywaniami Bethe–Blocha (rys. 6.5) w funkcji  $K = p \times (1 + 0,1(p_T - 1))$ , otrzymując różnice do 5% dla pionów oraz odpowiednio 1% i 2% dla kaonów i protonów (w przedziale pędowym, gdzie było to możliwe). Pozostałe parametry dopasowania przedstawiono na rys. 6.6 i 6.7. Wyznaczone frakcje zrekonstruowanych pionów, kaonów i protonów pokazano na rys. 6.8, które wykazują znaczny rozrzut w funkcji  $K$  w obszarach nakładania się rozkładów. W związku z tym autor wykorzystał metodę *identity*, przypisując każdej trajektorii hadronu prawdopodobieństwo (równanie 6.4) bycia pionem, kaonem lub protonem na podstawie dopasowanych krzywych do rozkładów  $dE/dx$ . Na tej podstawie otrzymał widma  $d^2n/(dp_T dy)$  pionów, kaonów i protonów (rys. 6.10).

W rozdziale siódmym autor wyznaczył współczynniki korekcji na podstawie pełnych symulacji MC odpowiedzi detektora w oparciu o pakiet Geant4. Korekcje te uwzględniają akceptancję geometryczną detektora, wydajność rekonstrukcji oraz wkład od cząstek wtórnych (*feed-down*). Autor poprawił wygenerowane rozkłady dla cząstek dziwnych w oparciu o wyniki pomiarów w celu lepszego oszacowania tła od cząstek wtórnych z rozpadów dziwnych hadronów. Rozkłady hadronów  $dn/(dp_T dy)$  dla pędu 30 AGeV/c po nałożeniu korekcji przedstawia rys. 7.4. **Rozkłady te powinny być też pokazane dla 13 AGeV/c.**

W rozdziale ósmym przedstawiono wyznaczanie niepewności statystycznych i systematycznych. Na niepewności statystyczne składa się ograniczona statystyka danych i symulacji MC wykorzystywanych do korekcji (równanie 8.4). W związku z ograniczoną akceptancją detektora autor ekstrapolował zmierzone rozkłady  $dn/(dp_T dy)$  i  $dn/dy$  przy użyciu parametryzacji w celu wyznaczenia  $\langle n \rangle$ , propagując odpowiednio niepewności statystyczne punktów pomiarowych i parametryzacji. **Tutaj można było wcześniej opisać metodę ekstrapolacji, która jest dopiero dyskutowana w rozdziale 9.**

W rozdziale tym opisana jest też szczegółowo procedura wyznaczania niepewności systematycznych związanych z selekcją zdarzeń, trajektorii cząstek, identyfikacją hadronów i korekcjami MC (równanie 8.10). Autor oszacował też niepewności systematyczne związane z ekstrapolacją rozkładów  $p_T$  i  $y$ . Względne niepewności przedstawił dla centralnych (0–10%) zderzeń Pb+Pb przy pędzie 30 AGeV/c w funkcji  $y$  na rysunku 8.1. **Należało je też przedstawić dla niższego pędu 13 AGeV/c. Ponadto można było przeprowadzić krótką dyskusję tych niepewności ze względu na ich ilościowy wkład do  $dn/(dp_T dy)$ ,  $dn/dy$  i  $\langle n \rangle$ . Czy te niepewności są takie same dla zderzeń Pb+Pb przy centralności 0-7.2%?**

W rozdziale dziewiątym autor zaprezentował wyniki analizy danych. Dla  $\pi^+$  i  $\pi^-$  zaprezentowano rozkłady  $dn/(dp_T dy)$  zmierzone w centralnych (0–10%) zderzeniach Pb+Pb przy pędach wiązki 13 AGeV/c i 30 AGeV/c (rys. 9.1). Niestety, ze względu na ograniczoną akceptancję detektora nie była możliwa ekstrapolacja w  $p_T$  i  $y$  w celu wyznaczenia rozkładów  $dn/dy$  i  $\langle n \rangle$ . Autor wyznaczył  $\langle \pi \rangle$  w zderzeniach Pb+Pb (0–10%), wykorzystując wcześniejsze pomiary  $\langle \pi \rangle$  przy energiach SPS i AGS oraz obliczenia modelowe Glauber MC (równanie 9.1). Dodatkowo konieczna była interpolacja w celu wyznaczenia  $\langle \pi \rangle$  przy 13 AGeV/c. **Tutaj brakuje dyskusji niepewności statystycznych i systematycznych. Jaki jest status pomiaru  $\langle \pi \rangle$  w eksperymencie NA61/SHINE?**



Dla  $K^+$  i  $K^-$  zaprezentowano rozkłady  $dn/(dp_T dy)$  (rys. 9.3),  $dn/dy$  (rys. 9.6) i  $\langle n \rangle$  (tabela 9.3) zmierzone w centralnych (0–10%) zderzeniach Pb+Pb przy pędach wiązki 13 AGeV/c i 30 AGeV/c, po ekstrapolacji do pełnego zakresu w  $p_T$  i  $y$ . Do ekstrapolacji w  $p_T$  wykorzystano funkcję eksponencjalną (równanie 9.2). Parametry dopasowania  $T$  pokazane są w funkcji  $y$  dla obu pędów na rys. 9.5 (**niestety nie mogę tutaj znaleźć porównania z wynikami NA49**). Ekstrapolacja w  $y$  została wykonana przy pomocy sumy dwóch rozkładów Gaussa (równanie 9.4) z parametrami dopasowania ( $\sigma_0$ ,  $y_0$ ) wyznaczonymi przez NA49. Rozkłady  $dn/dy$  przedstawiono również dla Pb+Pb (0–7,2%) i porównano do rozkładów NA49 (rys. 9.7). **Jak bardzo ilościowo różnią się te rozkłady?** Dodatkowo autor porównał rozkłady  $dn/dy$  do przewidywań modelowych EPOS i UrQMD (rys. 9.8). **EPOS lepiej opisuje dane, ale autor nie podaje jednak więcej szczegółów związanych z produkcją cząstek w tych modelach. Skąd mogą wynikać te różnice?** Średnie krotności kaonów przedstawione są wraz z niepewnościami statystycznymi i systematycznymi w tabeli 9.3.

Dla  $p$  i  $\bar{p}$  przedstawiono rozkłady  $dn/(dp_T dy)$  (rys. 9.3) dla zderzeń Pb+Pb (0–10%) przy pędach wiązki 13 AGeV/c i 30 AGeV/c. Do ekstrapolacji do pełnego zakresu w  $p_T$  wykorzystano parametryzację *Blast-Wave* (równanie 9.8) w celu uwzględnienia efektów pływu. Dla protonów  $p$  wyznaczono  $dn/dy$  przy obu pędach wiązki, a dla  $\bar{p}$  jedynie przy 30 AGeV/c (rys. 9.11). **Tutaj można było pokazać punkty lustrzane dla protonów.** Rozkłady  $dn/dy$  są porównane do przewidywań modelowych (EPOS i UrQMD) na rys. 9.12, co wskazuje na dramatycznie duże różnice między modelami (**autor nie dyskutuje jednak szerzej, jakie mogą być tego przyczyny**) w opisie danych. Średnią krotność wyznaczono jedynie dla antyprotonów ( $\bar{p}$ ) przy 30 AGeV/c (ekstrapolując  $dn/dy$ ) ze względu na ograniczoną akceptancję.

Autor wyznaczył stosunek  $\langle K^+ \rangle / \langle \pi^+ \rangle$  i  $\langle K^- \rangle / \langle \pi^- \rangle$  dla centralnych (0–10%) zderzeń Pb+Pb przy obu pędach wiązki, przedstawiony na rys. 9.13 w porównaniu do innych pomiarów. Należy zaznaczyć, że autor wyznaczył jedynie średnie krotności kaonów w oparciu o dane NA61/SHINE. Wyniki są zgodne z obserwacjami NA49: silnego wzrostu  $\langle K^+ \rangle / \langle \pi^+ \rangle$  w obszarze *horn* i słabszego wzrostu  $\langle K^- \rangle / \langle \pi^- \rangle$  w funkcji energii zderzeń. **Autor nie podaje szczegółów, w jaki sposób wyznaczył niepewności tych pomiarów. Brakuje ilościowego porównania do pomiarów NA49.** Niestety te dwa punkty pomiarowe nie pozwalają na reprodukcję całej struktury *horn* i wnioskowanie o niemonotonicznym zachowaniu w tym obszarze energetycznym. **Jaki jest status analizy  $\langle K^+ \rangle / \langle \pi^+ \rangle$  przez kolaborację NA61/SHINE przy wyższych pędach wiązki?**

Autor porównał  $\langle K^+ \rangle / \langle \pi^+ \rangle$  i  $\langle K^- \rangle / \langle \pi^- \rangle$  w zderzeniach centralnych Pb+Pb z tymi w innych układach ( $p+p$ , Be+Be, Ar+Sc) w oparciu o model zranionych nukleonów (rys. 9.14). **Układ Xe+La nie jest pokazany.** Dane pokazują monotoniczny wzrost tych stosunków z wielkością układu przy obu pędach wiązki. **Na jakiej podstawie można stwierdzić, że wzrost ten może być związany z saturacją produkcji dziwności?**

Rozdział dziesiąty zawiera podsumowanie, konkluzje i plany na przyszłość związane z analizą widm  $h^-$  (pionów) oraz włączeniem TOF do identyfikacji hadronów w NA61/SHINE.

W dodatku A autor zdefiniował zmienne kinematyczne, a w dodatku umieścił tabele z danymi numerycznymi.

## Podsumowanie i konkluzje

Podsumowując, mgr **Syed Uzair Ahmed Shah** przedstawił oryginalne wyniki pomiarów widm  $d^2n/(dy dp_T)$ ,  $dn/dy$  i średnich krotności  $\langle n \rangle$  dla pionów, kaonów i protonów w centralnych (0–10%, 0–7,2%) zderzeniach Pb+Pb przy pędach wiązki 13 AGeV/c i 30 AGeV/c zebranych przez kolaborację NA61/SHINE w 2016 roku. Niestety, ze względu na ograniczoną akceptancję detektora



nie udało się zmierzyć średniej krotności pionów  $\langle\pi\rangle$  i protonów  $\langle p\rangle$  oraz rozkładów  $dn/dy$  dla  $\bar{p}$  przy pędzie 13 AGeV/c. Autor wyznaczył  $\langle\pi\rangle$  w oparciu o pomiary pionów przez eksperymenty NA49/SPS i E-0895/AGS.

Szczególnie zabrakło pomiaru  $\langle\pi\rangle$ , który jest kluczowy w dyskusji produkcji  $\langle K^+\rangle/\langle\pi^+\rangle$  i  $\langle K^-\rangle/\langle\pi^-\rangle$  w porównaniu z wynikami innych eksperymentów. Autor wspomina, że komplementarna analiza negatywnych  $h^-$  ( $\pi^-$ ) prowadzona obecnie w eksperymencie NA61/SHINE ma na celu precyzyjny pomiar  $\langle\pi^-\rangle$ . Ponadto włączenie TOF do identyfikacji hadronów pomoże w rozszerzeniu zakresu kinematycznego ( $p_T$ ,  $y$ ). **Tutaj nasuwa się zasadnicze pytanie: dlaczego autor nie wykorzystał tych technik w swojej analizie?**

Autor porównuje wyniki pomiarów do przewidywań modelowych EPOS i UrQMD, wskazując na duże różnice między modelami. Różnice te są szczególnie duże dla protonów. **Autor nie przedstawił tych modeli, dlatego trudno wnioskować, czy ich wybór był zasadny. Skąd te różnice?**

Dyskusja niepewności systematycznych jest powierzchowna. Brakuje mi ilościowej analizy tych niepewności oraz dyskusji, w jaki sposób są one propagowane na prezentowane obserwacje. Nie znalazłem w ogóle takiej dyskusji przy wyznaczaniu  $\langle\pi\rangle$ . Brakuje mi również ilościowego porównania otrzymanych wyników z wcześniejszymi pomiarami. **Mam nadzieję, że autor ustosunkuje się do tych zarzutów podczas obrony.**

#### Wniosek końcowy

Podsumowując, stwierdzam że pomimo tych braków recenzowana rozprawa spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn. zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne.

*Jacek Otwinowski*

Prof. dr hab. Jacek Otwinowski