



dr hab. Radosław Ryblewski, prof. IFJ PAN
Instytut Fizyki Jądrowej
im. H. Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
Radzikowskiego 152
31-342 Kraków, Poland
radoslaw.ryblewski@ifj.edu.pl

Kraków, 13 kwietnia 2026 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Syeda Uzaira Ahmeda Shaha pt.
*Study of charged hadrons produced in central Pb+Pb collisions at the CERN SPS***

Rozprawa doktorska mgr. Syeda Uzaira Ahmeda Shaha, zatytułowana *Study of charged hadrons produced in central Pb+Pb collisions at the CERN SPS*, została przygotowana w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Jana Kochanowskiego w Kielcach pod kierunkiem prof. dr. hab. Macieja Rybczyńskiego oraz promotora pomocniczego dr. Macieja Piotra Lewickiego. Praca dotyczy pomiaru produkcji naładowanych hadronów (π^+ , π^- , K^+ , K^- , p , \bar{p}) w centralnych zderzeniach Pb+Pb przy pędach wiązki 13A i 30A GeV/c ($\sqrt{s_{NN}} \approx 5.1$ i $\sqrt{s_{NN}} \approx 7.6$ GeV) w eksperymencie NA61/SHINE przy akceleratorze SPS w CERN. Celem analizy jest wyznaczenie widm tych cząstek oraz stosunków krotności $\langle K \rangle / \langle \pi \rangle$.

Tematyka i znaczenie rozprawy

Tematyka rozprawy bardzo dobrze wpisuje się w jeden z ważnych nurtów współczesnej fizyki jądrowej wysokich energii, jakim są badania własności materii oddziałującej silnie w warunkach ekstremalnej temperatury i gęstości barionowej. Zderzenia ciężkich jonów w zakresie energii SPS stanowią ważną część programu badań eksperymentu NA61/SHINE, ukierunkowanego m.in. na poszukiwanie sygnałów przejścia materii oddziałującej silnie z fazy hadronowej do fazy plazmy kwarkowo-gluonowej oraz na testowanie przewidywań dotyczących położenia tego przejścia na diagramie fazowym materii QCD. W badaniu tego zagadnienia szczególne znaczenie mają obserwabla związane z produkcją dziwności, a zwłaszcza stosunki średnich krotności kaonów do pionów, $\langle K \rangle / \langle \pi \rangle$, ponieważ stanowią one czułą miarę produkcji dziwności w stosunku do całkowitej produkcji hadronów. Nietrywialna zależność $\langle K \rangle / \langle \pi \rangle$ od energii zderzenia może dostarczać informacji o zmianie mechanizmu produkcji hadronów zawierających dziwność, a tym samym o zmianie własności ośrodka towarzyszącej przejściu fazowemu.

Szczególne znaczenie mają w tym kontekście pomiary wykonane dla dużych układów, takich jak centralne zderzenia Pb+Pb badane w recenzowanej pracy, ponieważ to właśnie w nich może powstać ośrodek o największej objętości, najwyższej gęstości energii i najdłuższym czasie życia. Stwarza to najkorzystniejsze warunki do osiągnięcia stanu bliskiego lokalnej równowadze termodynamicznej, a tym samym do badania własności



materii oddziałującej silnie i jej diagramu fazowego. W szczególności wcześniejsze wyniki eksperymentów AGS, NA49 oraz późniejszych pomiarów programu Beam Energy Scan wykazały, że zależność stosunku K^+/π^+ od energii zderzenia ma nietrywialny charakter i wykazuje wyraźne maksimum, tzw. róg (ang. *horn*), w okolicy pędu wiązki 30A GeV/c, co może stanowić przejaw progę przejścia fazowego (ang. *onset of deconfinement*). Na tle dotychczasowych pomiarów szczególnie cenne są nowe wyniki uzyskane dla centralnych zderzeń Pb+Pb przy 13A GeV/c, ponieważ wypełniają lukę w systematyce energetycznej pomiędzy wcześniejszymi pomiarami AGS i SPS.

Struktura i główne wyniki rozprawy

Rozprawa została napisana w języku angielskim i ma przejrzystą strukturę. Składa się z dziesięciu rozdziałów, poprzedzonych streszczeniami w języku angielskim i polskim oraz wykazem skrótów, a uzupełnionych dodatkami zawierającymi definicje zmiennych kinematycznych i dane liczbowe, a także wykazami tabel i rysunków. Jej układ jest logiczny i typowy dla rozprawy eksperymentalnej.

Rozdział pierwszy zawiera zwięzłe wprowadzenie do problematyki pracy, zarys jej struktury oraz oświadczenie dotyczące wkładu autora.

Rozdział drugi krótko prezentuje tło teoretyczne, w tym podstawy QCD, jakościowy opis diagramu fazowego oraz przewidywania modelu SMES w kontekście przejścia fazowego w QCD. Część ta stanowi zwięzłe, lecz wystarczające wprowadzenie do dalszej części rozprawy.

Rozdział trzeci poświęcony jest strukturze detektora eksperymentu NA61/SHINE, ze szczególnym uwzględnieniem komór TPC, układu ToF oraz kalorymetru PSD, których rola jest kluczowa dla prezentowanej analizy.

Rozdział czwarty przedstawia szczegóły dotyczące rekonstrukcji danych z komór TPC, procedury kalibracji dE/dx oraz symulacje Monte Carlo oparte na generatorze EPOS 1.99 i pakiecie GEANT4, wykorzystywane do wyznaczenia poprawek na akceptancję geometryczną, wydajność rekonstrukcji oraz wkład od rozpadów słabych.

Najważniejsze z punktu widzenia oryginalnego wkładu Autora są rozdziały od piątego do dziewiątego. W rozdziale piątym szczegółowo opisano selekcję zdarzeń i torów oraz procedurę wyznaczania centralności na podstawie energii mierzonych spektatorów w kalorymetrze PSD; analiza została przeprowadzona dla klas centralności 0–7.2% i 0–10%, co umożliwi zarówno bezpośrednie porównanie z wynikami NA49, jak i spójność z systematyką NA61/SHINE dla innych układów.

Rozdział szósty zawiera szczegółowy opis identyfikacji cząstek metodą strat energii dE/dx , prowadzonej w binach (p, p_T), z użyciem statystycznej metody identyfikacji (ang. *identity method*). W ramach tej metody każdemu torowi przypisuje się prawdopodobieństwo przynależności do danego gatunku cząstki. Rozwiązanie to jest konieczne z uwagi na nakładanie się rozkładów strat energii dla różnych gatunków hadronów, szczególnie w obszarze nakładania się sygnałów kaonów i protonów. W sensie metodologicznym wykorzystana metoda identyfikacji nie jest nowa; jest to uznane podejście eksperymentalne. Wartością pracy jest natomiast jej implementacja dla analizowanego układu i zakresu energii.

Rozdział siódmy poświęcono poprawkom Monte Carlo na akceptancję geometryczną detektora, wydajność rekonstrukcji oraz poprawki na wkład od rozpadów słabych. Rozdział ósmy zawiera omówienie niepewności statystycznych i systematycznych. Wreszcie



rozdział dziewiąty przedstawia końcowe wyniki dla widm podwójnie różniczkowych w rapidity i pędzie poprzecznym, rozkładów w rapidity oraz zależności stosunków K/π od energii i rozmiaru układu.

Do najważniejszych osiągnięć pracy zaliczam:

1. wyznaczenie widm naładowanych hadronów w centralnych zderzeniach Pb+Pb przy 13A i 30A GeV/c, z uwzględnieniem akceptancji detektora, wydajności rekonstrukcji oraz wkładu od rozpadów słabych; stanowi to zasadniczy rezultat rozprawy, a zarazem punkt wyjścia do dalszych analiz fizycznych;
2. otrzymanie rozkładów w rapidity oraz średnich krotkości dla naładowanych kaonów, a także wyników dla protonów i antyprotonów w zakresie umożliwiającym porównania z wcześniejszymi danymi i modelami; szczególnie cenne jest tu osadzenie nowych rezultatów w szerszym kontekście pomiarów innych eksperymentów badających obszar niskich energii SPS;
3. zbadanie zależności stosunków $\langle K^+ \rangle / \langle \pi^+ \rangle$ i $\langle K^- \rangle / \langle \pi^- \rangle$ od energii zderzenia, w tym wyznaczenie nowego punktu dla 13A GeV/c, który znajduje się w obszarze szczególnie istotnym dla dyskusji nad przejściem fazowym;
4. przeanalizowanie zależności stosunków krotkości od rozmiaru układu, pokazujące, że wyniki dla zderzeń Pb+Pb układają się w spójny obraz wraz z danymi dla mniejszych układów, takich jak $p + p$, Be+Be czy Ar+Sc;
5. udokumentowanie pełnej analizy, co sprawia, że przedstawiona praca może stanowić użyteczny punkt odniesienia dla kolejnych analiz.

Istotnym ograniczeniem pracy jest to, że końcowe wartości stosunków $\langle K \rangle / \langle \pi \rangle$ nie są rezultatem wyłącznie bezpośredniego pomiaru w ramach bieżącej analizy eksperymentalnej. Wynika to z ograniczonej akceptancji metody dE/dx , zwłaszcza w obszarze bliskim midrapidity i dla niższych pędów poprzecznych, co wymusza stosowanie ekstrapolacji do obszarów niepokrytych pomiarem. W szczególności średnie krotkości pionów użyte do wyznaczenia stosunków $\langle K \rangle / \langle \pi \rangle$ nie zostały w tej pracy wyznaczone bezpośrednio, lecz oszacowane na podstawie wcześniej opublikowanych danych AGS i NA49, przeskalowanych do klasy centralności 0–10% z użyciem modelu zranionych nukleonów. Dla energii 13A GeV/c konieczna była ponadto interpolacja między danymi AGS i NA49. Osłabia to pełną niezależność eksperymentalną wyznaczonych obserwabli $\langle K \rangle / \langle \pi \rangle$ i powinno być brane pod uwagę przy ich interpretacji fizycznej.

Z drugiej jednak strony należy podkreślić, że Autor, mimo istotnych ograniczeń użytej metody i dostępnej akceptancji, podjął ambitną próbę maksymalnego wykorzystania zgromadzonego materiału do uzyskania wyników o znaczeniu fizycznym. Świadczy to o samodzielności badawczej, dojrzałości analitycznej oraz twórczym podejściu do problemu, nawet jeśli część końcowych rezultatów pozostaje obciążona dodatkowymi założeniami. Za mocne strony rozprawy uważam również rzetelność i przejrzystość opisu kolejnych etapów analizy oraz porównanie uzyskanych wyników z wcześniejszymi pomiarami i przewidywaniami modeli.

Uwagi i pytania

Rozprawa jest napisana bardzo starannie i przejrzysto, a jej redakcja stoi na wysokim poziomie; poniżej zamieszczam jedynie kilka drobnych uwag i pytań.



1. W podpisie rys. 6.4 należałoby zamienić określenia “left” i “right”.
2. W rozdziale 9.2, w odniesieniu do rys. 9.5, w tekście pojawia się stwierdzenie, że wyniki dla temperatury porównano z rezultatami NA49, jednak na samym rysunku taki wynik nie jest widoczny.
3. Poniżej równania 9.3 wyrażenie “rapidity bin ($0 < y < 8$)” najprawdopodobniej powinno zostać poprawione na “rapidity bin ($0.6 < y < 0.8$)”.
4. Rys. 9.13 mógłby być bardziej czytelny po zastosowaniu mniejszej skali pionowej.
5. Skąd Autor wnosi, że różnica między wynikami NA61 i NA49 dla 30A na rys. 9.13 wynika z ograniczeń analizy opartej na dE/dx ? Czy Autor miał raczej na myśli dodatkową niepewność związaną z ograniczeniami tej metody?
6. W przypadku rozkładów protonów w rapidity (rys. 9.12), podczas gdy model UrQMD we wszystkich przypadkach zaniża dane eksperymentalne, model EPOS nie wydaje się tego czynić dla energii 30A. Ponadto maksima widoczne w modelach przy dużych rapidity zdają się nie występować w danych. Czy oznacza to, że modele nie opisują poprawnie efektu *baryon stopping* w tym zakresie energii? Jak Autor interpretuje tę rozbieżność?
7. Jakie są wartości temperatury wyznaczone z dopasowania funkcją (9.8)? Czy są one zbliżone do wartości uzyskanych dla kaonów? Jakie są wartości parametrów przepływu?

Powyższe uwagi nie zmieniają mojej jednoznacznie pozytywnej oceny pracy.

Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr. Syeda Uzaira Ahmeda Shaha przedstawia wartościową i rzetelnie przeprowadzoną analizę eksperymentalną, dobrze osadzoną w aktualnej problematyce fizyki zderzeń ciężkich jonów. Autor wykazał się dobrą znajomością tła fizycznego, umiejętnością samodzielnego przeprowadzenia kompletnego łańcucha analizy oraz sprawnością w posługiwaniu się narzędziami współczesnej analizy danych, w tym modelami Monte Carlo. Uzyskane rezultaty, w szczególności nowy punkt pomiarowy dla centralnych zderzeń Pb+Pb przy 13A GeV/c, stanowią istotny wkład do badań nad produkcją dziwności w obszarze energii SPS oraz cenny punkt odniesienia dla dalszych analiz prowadzonych w ramach programu NA61/SHINE.

W świetle powyższej oceny stwierdzam, że rozprawa mgr. Syeda Uzaira Ahmeda Shaha spełnia wszystkie ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim. W związku z tym wnoszę o dopuszczenie mgr. Syeda Uzaira Ahmeda Shaha do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

dr hab. Radosław Ryblewski, prof. IFJ PAN