

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Wojciecha Brylińskiego pt.
„Study of K_S^0 Meson Production in Central Ar+Sc Collisions at SPS Energies”**

Rozprawa mgra inż. Wojciecha Brylińskiego dotyczy ważnego zagadnienia fizyki wysokich energii jakim jest badanie produkcji cząstek dziwnych w zderzeniach jądrowych przy relatywistycznych energiach. Najnowsze wyniki fizyczne z eksperymentów z ciężkimi jonami wraz z przewidywaniami teoretycznymi, wskazują, że w oddziaływaniach jądrowych powstaje nowy stan materii, tzw. silnie sprzężona plazma kwarkowo-gluonowa (PKG), posiadająca własności podobne do własności idealnej cieczy. W poznaniu PKG istotną rolę odgrywają badania produkcji cząstek dziwnych. W rozprawie doktorskiej mgr inż. Wojciech Bryliński skupia się na pomiarach dziwnych mezonów K_S^0 , w zderzeniach jonów ^{40}Ar z jądrami stacjonarnej tarczy ^{45}Sc w eksperymencie NA61/SHINE przy akceleratorze SPS w CERN. W rozprawie przedstawiono pierwsze precyzyjne pomiary rozkładów poprzecznych pędów oraz pośpieszności mezonów K_S^0 w 10% najbardziej centralnych oddziaływań Ar+Sc przy dwóch pędach jonów Ar wynoszących 40 GeV/nukl. i 75 GeV/nukl. Nowe wyniki dotyczące cząstek dziwnych mogą w istotny sposób przyczynić się do lepszego zrozumienia przejścia fazowego PKG-gaz hadronowy, a w szczególności mogą pozwolić na dokładniejsze modelowanie czasoprzestrzennej ewolucji PKG.

Rozprawa doktorska liczy 97 stron i jest napisana w języku angielskim. Składa się ze streszczenia, 8-miu rozdziałów oraz bibliografii zawierającej 119 poz.

W rozdziale 1 w ramach wstępu skrótowo opisano Model Standardowy, plazmę kwarkowo-gluonową wraz z jej podstawowymi sygnaturami, diagram fazowy QCD i czasoprzestrzenną ewolucją zderzeń ciężkich jonów. W następnych podrozdziałach krótko przedstawiono wybrane własności mezonów K^+ , K^- i K_S^0 oraz diagram Armenterosa-Podolanskigo wykorzystywany w rozprawie doktorskiej. W kolejnych podrozdziałach przedstawiono ciekawe uzasadnienie, oparte na modelu SMES, dlaczego warto badać produkcję dziwnych mezonów w oddziaływaniach jądrowych. Wybrane pomiary mezonów K_S^0 z innych eksperymentach są skrótowo opisane w podrozdziale 1.9. Rozdział 1 kończy się krótkim, bardzo przydatnym, opisem dokonań Autora. Uważam, że dobór materiału przedstawionego w tym rozdziale dobrze wpisuje się w tematykę rozprawy doktorskiej. Jednak, można było się pokusić o bardziej szczegółowy opis diagramu fazowego w rozdziale 1.2.3. W rozdziale 1.6.2. pojawia się uwaga, że parametr nachylenia widm m_T , T , dla mezonów K^+ posiada wkład od wpływu radialnego. W jakim stopniu radialny wpływ może zmodyfikować zależność T od energii zderzenia? W rozdziale 1.7 stwierdzono, że przy wzroście liczby zranionych nukleonów, W , w oddziaływaniach jądrowych występuje „gwałtowny wzrost dziwności”. Jednak biorąc pod uwagę rozmiar niepewności przedstawionych na rys. 1.8, możliwy wydaje się być również stopniowy wzrost dziwności, w szerokim zakresie parametru W , od $W \approx 2$ do $W \approx 100$?

Rozdział 2 zawiera informacje o detektorze NA61/SHINE, w którym przedstawiono program fizyczny eksperymentu oraz poddetektory istotne dla rezultatów zaprezentowanych w rozprawie. W szczególności omówiono system wyzwiania, komory projekcji czasowej (TPC), liczniki czasu przelotu (ToF), kalorymetr kąta zerowego (PSD) oraz detektor wierzchołka.

W rozdziale 3 omówiono proces rekonstrukcji danych doświadczalnych oraz symulacje Monte Carlo detektora NA61/SHINE. Przedstawiono również sposób rekonstrukcji wtórnych

wierzchołków w topologii V_0 , który jest kluczowy dla analizy zamieszczonej w rozprawie. W opisie rekonstrukcji metody wierzchołka rozpadu spodziewałbym się szerszej dyskusji dotyczącej możliwości pomiarowych detektora, np. omówienie zdolności rozdzielczej pomiaru tego wierzchołka w oddziaływaniach centralnych Ar+Sc. Z kolei **rozdział 4** przedstawiono system wyzwalania stosowany w zderzeniach Ar+Sc, a także charakterystykę czasoprzestrzenną wiązki Ar oraz tarczy, która stanowi Sc o wysokiej czystości.

Opis techniki pomiaru produkcji mezonów K_S^0 w oddziaływaniach Ar+Sc znajduje się w **rozdziale 5**. Na początku rozdziału zdefiniowano zakres oraz biny w przestrzeni fazowej używanej w analizie, omówiono selekcję i statystykę przypadków Ar+Sc dla obu energii zderzeń. Następnie został przedstawiony sposób selekcji śladów cząstek naładowanych oraz par cząstek, kandydatów na rozpadające się mezony K_S^0 na dwa piony. Rozkład masy niezmienniczej tych par, opisany nierelatywistyczną funkcją Breita-Wignera, wykorzystano do optymalizacji cięć użytych w analizie w każdym z binów. W podrozdziale 5.6 omówiono procedurę wyznaczania poprawek na niewydajność rekonstrukcji i akceptancję mezonów K_S^0 . Rozdział 5 kończy opis metody oszacowania niepewności statystycznych i systematycznych rozkładu p_T i y . Systematyczne niepewności zostały oszacowane niestety tylko dla zderzeń Ar+Sc przy wyższej energii. Uważam, że Autor opisał poszczególne etapy analizy w klarowny i poprawny sposób, chociaż zabrakło mi głębszego uzasadnienia, dlaczego pomiar K_S^0 zawężono tylko do 10% najbardziej centralnych oddziaływań Ar+Sc. Do pomiaru widm najbardziej optymalną próbką danych byłby próbka „minimum-bias”. Czy niepewność w wyborze centralności zderzenia (10%) jest zanedbywalna? Z kolei przy prezentacji poprawek MC MC_{MC} zabrakło mi dyskusji, na ile wartości tych współczynników zależą od efektów typu wydajności pomiaru pojedynczych śladów, akceptancji detektora, rekonstrukcji wierzchołka, modelu itp.? Poza tym mam parę drobnych uwag. Na rysunku 5.2 przedstawiającym zależność depozytu energii w detektorze PSD w funkcji krotności, występują znaczne niepewności – co one oznaczają? Z kolei na rysunku 5.9 (z prawej) opisy parametrów wymagają tekstowych poprawek. Bez komentarza pozostawiono opis zakresu osi y na Rys. 5.12, będący w granicach zmienności od +1.5 do 0 i następnie od 0 do 2.

W **rozdziale 6** przedstawiono główne osiągnięcie Autora rozprawy doktorskiej, tj. pomiar produkcji mezonów K_S^0 w centralnych zderzeniach Ar+Sc przy dwóch pędach jonów Ar 40 GeV/nukl. i 75 GeV/nukl. Jako sprawdzenie poprawności metody pomiaru przedstawiono najpierw pomiar średniego czasu życia mezonu K_S^0 w różnych binach pośpieszności. Zmierzone wartości czasu życia dobrze zgadzają się z wartością podaną przez PDG. W podrozdziale 6.2 przedstawiono rozkłady poprzecznego pędu i pośpieszności dla mezonów K_S^0 dla zderzeń Ar+Sc w formie dwuwymiarowych histogramów. Przyznam, że zagadką dla mnie pozostają liczby umieszczone na tle kolorowych histogramów na rysunkach 6.5-6.7. Jednowymiarowe rozkłady pędu poprzecznego mezonów K_S^0 w poszczególnych przedziałach pośpieszności zostały opisane funkcją eksponentialną w masie poprzecznej, co pozwoliło wyznaczyć parametr nachylenia widm T . Funkcje opisujące rozkłady p_T i y zostały wykorzystane przy wyliczeniu całkowitej krotności mezonów K_S^0 dla oddziaływań Ar+Sc w zakresie $0 < p_T < 10$ GeV/c oraz $-10 < y < 10$. Czy przy wyznaczaniu krotności jest potrzebny tak szeroki zakres ekstrapolacji, wykraczający poza obszar pomiaru? Przewidywania modeli EOPS i SMAS zamieszczone w rozprawie doktorskiej wskazują na znaczne odstępstwa rozkładu krotności mezonów K_S^0 w stosunku do danych eksperymentalnych. Tylko w przypadku modelu EPOS dla wyższej energii zderzeń przewidywania modelowe są zgodne. W rozdziale 6 przedstawiono również porównanie rozkładu pośpieszności i poprzecznych pędów mezonów K_S^0 ze wcześniejszymi rezultatami dla naładowanych kaonów w oddziaływaniach przy pędzie wiązki Ar 75 GeV/nukl. Porównanie wskazuje na znacznie mniejszą o ok. 20-30% produkcję mezonów K_S^0 niż kaonów

naładowanych w całym mierzonym zakresie pośpieszności i poprzecznego pędu dla $p_T \lesssim 1.5 \text{ GeV}/c$. Jak pokazano w rozprawie doktorskiej model hadronowego gazu rezonansowego, HRG, uwzględniający znane efekty łamania symetrii izospinowej nie odtwarza tych różnic. Uważam, że analiza przeprowadzona przez mgr inż. Wojciecha Brylińskiego jest ciekawa i wartościowa, a zarazem świadczy o bardzo dobrej znajomości tematyki. W ramach uzyskanych rezultatów, można by jednak wykonać więcej porównań. Np. można by zbadać efekt łamania symetrii izospinowej przedstawionej na rys. 6.15 w różnych przedziałach pośpieszności wykorzystując dane dla K^\pm zamieszczone w ref. 72. Można by też porównać przewidywania modelu EPOS i/lub HRG z rezultatami przedstawionymi na rysunkach 6.14 i 6.15. Interesujące mogłoby być także sprawdzenie czy produkcja mezonów K_S^0 w centralnych zderzeniach Ar+Sc przy obu energiach podlega skalowaniu względem produkcji tych kaonów w zderzeniach referencyjnych pp przy podobnej energii?

Rozdział 7 podsumowuje wkład mgr inż. Wojciecha Brylińskiego w prace mające na celu rozwój i przystosowanie detektora NA61/SHINE do przyszłych pomiarów. W szczególności pomiar cząstek powabnych w oddziaływaniach ciężkich jonów może przyczynić się do poznania mechanizmu produkcji kwarków powabnych w szerokim zakresie potencjału barionowego. W rozdziale 7 opisany jest istotny wkład Autora rozprawy w system naboru przyszłych danych doświadczalnych. Warto podkreślić, że mgr inż. Wojciech Bryliński podczas swoich studiów doktoranckich przebywał w CERN przez okres ok. 4-letni mając znaczący wkład nie tylko w prace nad oprogramowaniem detektora, ale także w prace przy samym detektorze NA61/SHINE, a w szczególności w prace przy elektronice detektora TPC.

Rozdział 8 zawiera podsumowanie rozprawy doktorskiej, która kończy się obszernym spisem literatury.

Rozprawę doktorską mgr inż. Wojciecha Brylińskiego przeczytałem z przyjemnością, jest zrozumiała i napisana w przejrzysty sposób. Jednak, w niektórych przypadkach oczekiwałem bym bardziej szczegółowych opisów, np. w rozdziale 5 prezentującym elementy analizy. Należy również podkreślić, że wyniki uzyskane przez Autora rozprawy dla zderzeń Ar+Sc przy wyższej energii uzyskały aprobatę współpracy NA61/SHINE i były prezentowane na prestiżowych konferencjach międzynarodowych, w tym przez Autora rozprawy, ostatnio na prestiżowej konferencji Quark Matter 2023 w Houston.

Podsumowując, oceniam przedstawioną mi do recenzji rozprawę jako spełniającą wymogi stawiane pracom doktorskim. Wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Wojciecha Brylińskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Adam Gryzupel