

dr hab. Radosław Ryblewski, prof. IFJ PAN
Instytut Fizyki Jądrowej
im. H. Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
ul. Radzikowskiego 152
31-342 Kraków

Kraków, 9 czerwca 2021 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Michała Naskręta
pt. *Zależność energetyczna produkcji ujemnie naładowanych mezonów π
w zderzeniach jądro-jądro***

Wstęp

Przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska mgr. Michała Naskręta pt. *Zależność energetyczna produkcji ujemnie naładowanych mezonów π w zderzeniach jądro-jądro* przygotowana została pod kierunkiem prof. dr. hab. Ludwika Turko i oparta jest na rezultatach przeprowadzonej przez Autora analizy danych zmierzonych przez eksperyment NA61/SHINE w 2015 roku na akceleratorze SPS w CERN-ie. Wyniki prezentowanych badań zostały opublikowane w dwóch recenzowanych artykułach naukowych z listy JCR (*Eur. Phys. J. C* i *Lith. J. Phys*) oraz trzech materiałach pokonferencyjnych.

Cel i tematyka rozprawy

Głównym celem przedstawionej w rozprawie analizy danych jest pomiar widm i średnich krotkości ujemnie naładowanych mezonów π wyprodukowanych w oddziaływaniach silnych i elektromagnetycznych w centralnych zderzeniach Ar+Sc dla pędów wiązki 13 A, 19 A, 30 A, 40 A, 75 A, oraz 150 A GeV/c. Zaprezentowana analiza jest częścią programu badań oddziaływań silnych eksperymentu NA61/SHINE zorientowanego na pomiar produkcji cząstek w szerokim zakresie pędu wiązki oraz rozmiaru zderzanych układów. Jego zadaniem jest poszukiwanie zmian określonych charakterystyk produkcji cząstek w funkcji temperatury i gęstości barionowej układów, mogących, według przewidywań modeli teoretycznych, stanowić sygnatury nowych struktur diagram fazowego materii oddziałującej silnie. Rezultaty pracy są oparte na wykorzystaniu tzw. metody h^- , której głównym zadaniem jest usunięcie z widm ujemnie naładowanych niezidentyfikowanych hadronów wkładu cząstek innych niż ujemne piony. Zastosowanie tej metody ma swoje umocowanie w fakcie, iż mezony π stanowią dominującą część (rzędu 90%) hadronów emitowanych w tychże procesach. Układ Ar+Sc badany przez Autora, w pewnym sensie, pełni szczególną rolę w programie NA61/SHINE, jako że jest jednym z najmniejszych, w których statystyczna produkcja cząstek ma swoją argumentację teoretyczną, zaś wkład cząstek z rozpadów rezonansów jest stosunkowo niewielki.

Należy podkreślić, że obecna wiedza teoretyczna na temat własności termodynamicznych materii jądrowej jest w znacznym stopniu ograniczona, głównie przez problemy wynikające ze znacznie zawężonej stosowalności rachunków QCD na siatkach w zakresie wysokich gęstości barionowych. Podczas gdy w obszarze wysokich energii

wiązki istnieje konsensus co do obecności “łagodnego” przejścia fazowego (nie w klasyfikacji Ehrenfesta) typu *cross-over*, w obszarze niskich energii własności diagramu fazowego są słabo znane, a potwierdzenie przewidywanych teoretycznie struktur, takich jak punkt krytyczny czy przejście fazowe, w ogromnym stopniu uzależnione od pomiarów eksperymentalnych. W tym kontekście systematyczne badania eksperymentalne w szerokim zakresie rozmiaru układów oraz ich energii prowadzone przy udziale mgr. Naskręta stanowią, w zasadzie, jedyną szansę na uzyskanie nowej wiedzy w tym zakresie oraz są elementem kluczowym dla dalszego rozwoju tej dziedziny. W mojej opinii, wiedza i doświadczenie uzyskane przez mgr. Naskręta w wyniku przeprowadzonych przez niego badań są niezwykle pożądane w kontekście innych obecnych, jak i zbliżających się, programów badawczych w obszarze niskich energii, w tym tych prowadzonych przez kolaborację STAR na akceleratorze RHIC, CBM na FAIR, czy też MPD na NICA.

Struktura i główne wyniki rozprawy

Rozprawa doktorska mgr. Naskręta została sporządzona w języku angielskim, jej struktura jest logiczna i przejrzysta, a redakcję tekstu przeprowadzono raczej starannie (z wyjątkami opisanymi poniżej). Tekst pracy, poprzedzony krótkim streszczeniem, spisem treści, zestawieniem tabel i rysunków oraz najczęściej używanych skrótowców, podzielony jest na 9 rozdziałów i uzupełniony trzema dodatkami, zawierającymi m.in. tabelaryczne zestawienia uzyskanych wyników, oraz spisem literatury.

Pierwszy rozdział zawiera zwięzły przegląd wiedzy teoretycznej stanowiącej motywację dla prezentowanych badań eksperymentalnych. W szczególności Autor dyskutuje najważniejsze założenia modelu statystycznego wczesnej fazy (SMES), oraz jego kluczowe przewidywania, w tym sygnatury przejścia fazowego badane w ramach eksperymentu NA61/SHINE. W ramach wstępu opisany jest również krótko wkład pracy kandydata.

Rozdział drugi zawiera zwięzły, aczkolwiek wystarczający do zrozumienia przedstawionej analizy eksperymentalnej, opis struktury detektora NA61/SHINE, a także budowy i zasady działania jego poszczególnych podzespołów, w szczególności detektora spektatorów pocisku (PSD), który pełni kluczową rolę w niniejszej analizie, pozwalając na wyznaczenie centralności zdarzeń. W tym kontekście, nie do końca jest dla mnie jasne jaki był cel wymieniania w tym rozdziale szczegółowych rozmiarów i orientacji padów w poszczególnych komorach projekcji czasowej.

W rozdziałach trzecim i czwartym omówiono, odpowiednio, etapy rekonstrukcji śladów cząstek w detektorze oraz proces selekcji danych, tj. śladów i zdarzeń, w oparciu o kryterium jakości oraz celów analizy. Szczególnie istotny z punktu widzenia metody pomiaru jest tutaj opis procedury selekcji centralności 5.% najbardziej centralnych przypadków na podstawie zdeponowanej energii w detektorze PSD, E_{PSD} . W oparciu o symulacje w ramach modelu EPOS pokazano, że selekcja przeprowadzona w ten sposób odpowiada selekcji w oparciu o tzw. energię do przodu, E_{F} . Jest to jeden głównych nowatorskich elementów prezentowanego pomiaru.

Rozdział piąty zawiera omówienie metody h^- w kontekście bieżącej analizy, rachunek niepewności pomiaru oraz opis metody ekstrapolacji do obszaru brakującej akceptacji detektora, pozwalającej na wyznaczenie krotności produkowanych pionów w pełnym kącie bryłowym. Bazując na symulacjach Monte-Carlo w ramach modelu EPOS wyznaczono poprawkę zmierzonych widm ujemnie naładowanych hadronów zależną od pospieszności i pędu poprzecznego pozwalającą usunąć wkład do widm ujemnych pionów cząstek innych niż mezony π .

W kolejnym rozdziale zaprezentowano rachunek średniej liczby zranionych nukleonów, których znajomość była konieczna by zestawić wyniki z rezultatami innych analiz oraz rachunków modelowych. W celu wyznaczenia tej liczby wykorzystano informację o energii do przodu w symulacjach Monte-Carlo.

Główne wyniki analizy danych, tj. podwójnie różniczkowe widma ujemnie naładowanych pionów w pędzie poprzecznym (lub masie poprzecznej) oraz pospieszności jak również odpowiednie widma jednowymiarowe, zostały przedstawione w rozdziale siódmym. Na podstawie eksponencjalnego dopasowania do widm w masie poprzecznej wyznaczono również efektywną temperaturę układu (parametr określający nachylenie widma) oraz średnią masę poprzeczną w funkcji pospieszności. Wyciąkując ekstrapolowane widma w pędzie poprzecznym wyznaczono również widma w pospieszności, które, z kolei po ponownej ekstrapolacji z użyciem funkcji podwójnie gaussowskiej posłużyły do wyznaczenia średnich krotności.

Rozdział ósmy zawiera dyskusję uzyskanych rezultatów w kontekście innych pomiarów jak również przewidywań modeli teoretycznych. Widma podwójnie różniczkowe zestawiono z rezultatami komplementarnych analiz dE/dx oraz $tof-dE/dx$ w większości zakresu zmienności uzyskując zgodność na poziomie 5%. Zaprezentowane stosunki tychże widm do widm uzyskanych w ramach różnych modeli teoretycznych, tj. EPOS, HIJING, oraz UrQMD, pokazują znaczne rozbieżności danych i modeli - jest to po części odzwierciedlone również w wynikach dotyczących widm w pędzie poprzecznym oraz widm w pospieszności. Niezgodność ta rodzi pytanie o stosowalność modelu EPOS w bieżącej analizie. W rozdziale tym zestawiono również stosunki widm w pędzie poprzecznym oraz, oddzielnie, w pospieszności, w zderzeniach Ar+Sc, p+p oraz Pb+Pb do tych uzyskanych w układzie Be+Be. Oprócz podobieństwa widm w Ar+Sc w pędzie poprzecznym do tych w zderzeniach Be+Be wyniki pokazane na rysunku 8.4 są niestety niekonkluzywne ze względu na konflikt w oznaczeniach (podobny problem występuje zresztą w przypadku rysunków 8.6, 8.10 i 8.11). Wartości temperatury efektywnej w centrum pospieszności oraz średnia masa poprzeczna zestawione z wynikami innych analiz wykazują podobną zależność od energii dla różnych systemów. Z kolei ich zależność od rozmiaru systemów wykazuje zmienność, odpowiednio, rzędu 10-15 MeV oraz 20-30 MeV, w przypadku temperatury jest to systematyczny wzrost z rozmiarem układu.

Jednym z głównych wyników pracy jest zależność stosunku średniej krotności pionów do średniej liczby zranionych nukleonów w funkcji tzw. energii Fermiego - wielkość interpretowana jako jeden z wskaźników przejścia fazowego. Zagadkowa wydaje się zgodność tejże wielkości dla zderzeń Ar+Sc w zakresie niskich energii z pomiarami N+N oraz w zakresie wysokich energii z pomiarami w zderzeniach Pb+Pb. *De facto* wynik ten pozostaje w sprzeczności z wynikami w zderzeniach Be+Be, m.in. z uwagi na fakt, iż zwiększenie nachylenia tejże wielkości interpretowane jest jako sygnatura przejścia fazowego.

Uwagi

Po zapoznaniu się z tekstem rozprawy nasuwają się następujące uwagi/pytania:

- Fig. 4.4: Na jakiej postawie ustala się zakres akceptacji dla oddziaływań z tarczą (przerwane pionowe linie)
- rozdział 4.3 v): co ustala wartości $|b_x| < 4\text{cm}$ oraz $|b_y| < 2\text{cm}$
- rozdział 6.5 I): czy wielkość $\sigma_{p,inel}$ nie powinna być równa $\sigma_{pp,inel}$

- powyżej równania 6.15: centrality → uncertainty ?
- rozdział A.1: perpendicular → parallel

Podsumowanie

Po zapoznaniu się z przedstawioną rozprawą doktorską, uważam, że zawiera ona oryginalne i niezwykle ważne wyniki, które stanowią wartościowy wkład w rozwój fizyki wysokich energii. Stwierdzam, że rozprawa ta spełnia wszystkie ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim. W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie Pana mgr. Michała Naskręta do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



dr hab. Radosław Ryblewski