

Instytut Fizyki Jądrowej PAN
31-342 Kraków
ul. Radzikowskiego 152
oraz
Instytut Fizyki Uniwersytetu Jana Kochanowskiego
25-406 Kielce
ul. Świętokrzyska 15

**Recenzja pracy doktorskiej mgr. Łukasza Kamila Graczykowskiego pt.
"Femtoscopic Analysis of Hadron-Hadron Correlations in Ultrarelativistic
Collisions of Protons and Heavy-Ions Registered by ALICE at the LHC"**

1. Ogólna charakterystyka pracy

Praca doktorska Pana mgr. Graczykowskiego jest obszerną, liczącą ponad dwieście stron monografią, w której dyskutowane są korelacje pomiędzy hadronami wyprodukowanymi w zderzeniach p+Pb oraz Pb+Pb. Nacisk położony jest na badanie dwucząstkowych korelacji w przestrzeni pędu. Technika przeprowadzania tego typu pomiarów określana jest obecnie jako femtoskopia, gdyż umożliwia ona badanie czasowo-przestrzennych rozmiarów układów o typowej skali wynoszącej kilka femtometrów.

Praca składa się z dziesięciu rozdziałów i trzech dodatków. Pierwsze trzy rozdziały stanowią: ogólny wstęp, wprowadzenie do fizyki relatywistycznych zderzeń ciężkich jonów oraz omówienie eksperymentu ALICE. Rozdziały czwarty i piąty omawiają kolejno dwucząstkowe korelacje badane w przypadku małych różnic pędów hadronów oraz korelacje o charakterze niefemtoskopowym. Analiza danych przedstawiona jest w rozdziale szóstym. Rezultaty opisujące korelacje pionów wyprodukowanych w zderzeniach p+Pb przedstawione są w rozdziale siódmym. Rozdział ósmy omawia systematyczne niepewności. Wstępne wyniki dotyczące korelacji protonów i hiperonów lambda przedstawione są w rozdziale dziewiątym. Rozdział dziesiąty stanowi podsumowanie.

Z fizycznego punktu widzenia najistotniejsze są wyniki przedstawione w rozdziałach siódmym i dziewiątym. Pomiary femtoskopowe dają informacje o czasowo-przestrzennych rozmiarach wyprodukowanych układów i mogą pomóc rozstrzygnąć problemy dotyczące kolektywnego zachowania się materii wyprodukowanej w reakcjach p+Pb. Przed zbadaniem tych procesów panowało przekonanie, iż będą one stanowiły eksperyment kontrolny bez produkcji plazmy kwarkowo-gluonowej. Jednak wiele z wyników doświadczalnych wskazuje na obecność zjawisk kolektywnych typu hydrodynamicznego w zderzeniach p+Pb przy wysokich krotnościach. Wnioski z pomiarów femtoskopowych w tym zakresie są przedstawione w rozdziale siódmym. Rozdział dziewiąty omawia zastosowanie formalizmu femtoskopowego do badania oddziaływania silnego nieidentycznych barionów. W naturalny sposób uzupełnia to typowe zastosowania femtoskopii, w których bada się pary identycznych pionów lub kaonów.

Praca jako całość, pomimo swojego znacznego rozmiaru, ma spójną i przejrzystą konstrukcję. Napisana jest dobrym angielskim, a kolorowe, starannie dobrane rysunki ułatwiają percepcję tekstu.

2. Omówienie kolejnych rozdziałów

Rozdział pierwszy stanowi ogólne wprowadzenie do tematyki fizycznej będącej przedmiotem rozprawy doktorskiej.

W rozdziale drugim przedstawiony jest ogólny zarys fizyki relatywistycznych zderzeń ciężkich jonów. Autor zaczyna od przedstawienia schematu modelu standardowego, przechodząc kolejno do charakterystyki chromodynamiki kwantowej i koncepcji plazmy kwarkowo-gluonowej jako nowego stanu materii otrzymanego w tychże zderzeniach. Większość koncepcji omawianych w tym rozdziale jest przedstawionych poprawnie, chociaż zwróciłbym uwagę na kilka nieprecyzyjnych sformułowań. Na przykład: równanie (2.6) to związek pomiędzy ciśnieniem i gęstością energii, a nie pomiędzy gęstością barionową i gęstością energii jak jest napisane poniżej równania (2.6); granica Stefana-Boltzmana odpowiada zależności gęstości energii od czwartej potęgi temperatury i nie jest związana z wyborem liczby zapachów równej trzy jak sugeruje tekst; ponadto, warto zwrócić uwagę, że model Bjorkena jest popularny jedynie w uproszczonych rachunkach modelowych i nie może on zastąpić szeroko rozbudowanych obecnie kodów relatywistycznej hydrodynamiki w pełnej trójwymiarowej wersji z uwzględnieniem lepkości.

W podrozdziale 2.3.4.2 autor podkreśla różnicę pomiędzy kondensatem szkła kolorowego (ang. color glass condensate, w skrócie CGC) oraz plazmą kwarkowo-gluonową (w skrócie QGP) mówiąc, że CGC jest słabo oddziałującym układem, a QGP jest układem oddziałującym silnie. To nie do końca jest prawdą, CGC cechuje mała stała sprzężenia ale układ jest silnie oddziałujący bo zawiera wiele ładunków kolorowych. W opisie rysunku 2.18, a także w tekście omawiającym ten rysunek, autor odnosi się do „lattice QCD calculations”. Te ostatnie dotyczą badania własności termodynamicznych materii oddziałującej silnie a nie początkowego rozkładu nukleonów (gęstości energii), co prezentuje rysunek 2.18. Autor miał tutaj zapewne na myśli rachunki glauberowskie lub rachunki dokonane w ramach CGC?

W rozdziale trzecim przedstawiony jest eksperyment ALICE. Autor po kolei charakteryzuje elementy układu detekcji cząstek oraz pokrótce omawia zastosowanie programu ROOT.

Rozdział czwarty rozprawy wprowadza definicję funkcji korelacji jako rozkładu dwucząstkowego znormalizowanego przez iloczyn rozkładów jednocząstkowych. Dyskutowane są różne postacie modelowe funkcji korelacji, które posługują się pojęciem funkcji emisji. Typowa modelowa postać funkcji korelacji wyraża się jako całka po czasowo-przestrzennym obszarze emisji cząstek z iloczynu funkcji emisji i kwadratu funkcji falowej. Ta ostatnia w swojej najprostszej formie używanej dla identycznych pionów zawiera wyłącznie efekt symetryzacji, który prowadzi do wzrostu funkcji korelacji dla małych pędów względnych. Przy okazji pragnę zwrócić uwagę na prawdopodobnie brakujące fragmenty we wzorach (4.12) i (4.13), gdzie nie do końca jasne są zmienne po których się całkuje.

Uogólnione postacie funkcji falowej mogą uwzględniać także oddziaływanie elektromagnetyczne oraz silne dla niekoniecznie identycznych cząstek. W ten sposób badanie funkcji korelacyjnych może prowadzić bezpośrednio do badania oddziaływania hadronów w stanie końcowym. Strategia takiego działania jest zarysowana w rozdziale 4.7.2.

Rozdział czwarty zawiera także przedstawienie typowych parametryzacji funkcji korelacyjnych w tzw. układzie LCMS. Wprowadza się: parametryzację gaussowską przy pomocy trzech tzw. promieni HBT, parametryzację gaussowsko-wykładniczą oraz parametryzację opartą o rozkład w bazie harmonik sferycznych.

Rozdział piąty rozprawy zawiera analizę dodatkowych efektów korelacyjnych mających istotny wpływ na postać funkcji korelacyjnych badanych zwłaszcza dla małych układów, takich jakie powstają w zderzeniach p+p lub p+A. Przez te dodatkowe efekty rozumie się procesy korelacyjne inne od tych uwzględnionych przez kwantową statystykę i oddziaływanie w stanie końcowym. Dla małych układów przykładem takich efektów mogą być np. więzy wynikające z zasad zachowania energii i pędu lub produkcja tzw. mini dżetów.

Analiza przedstawiona w rozdziale piątym oparta jest na użyciu programu EPOS i służy do analizy danych przedstawionych później w rozdziale siódmym. Warto podkreślić, że rozdział piąty stanowi istotny oryginalny wkład autora do rozprawy. Jego wyniki zostały wcześniej opublikowane w artykule w Acta Phys. Pol. B napisanym wspólnie z promotorem i dwoma współpracownikami.

Rozdział szósty omawia eksperymentalne uwarunkowania dotyczące selekcji przypadków oraz przedstawia modele Monte Carlo użyte w analizie danych (EPOS 3.076, PYTHIA 6.4 tune Perugia-0).

Rozdział siódmy jest pierwszym z dwóch rozdziałów zawierających przedstawienie wyników doświadczalnych. Przedstawione są w nim wyniki pomiarów femtoskopowych dla pionów w reakcjach p+Pb przy energii 5.02 TeV na parę nukleonów. Z fizycznego punktu widzenia, ważne są tutaj porównania z modelami hydrodynamicznymi oraz podejściem CGC.

Te dwa podejścia przewidują różne wartości promieni: możliwość istnienia fazy hydrodynamicznej przewiduje zwiększenie promieni o czynnik 1.5–2 w porównaniu z promieniami zmierzonymi w zderzeniach p+p o analogicznej krotności, natomiast przewidywania oparte na teorii CGC przewidują podobne promienie. Wyniki przedstawione w rozprawie wskazują, że dla niskich krotności promienie w reakcji p+Pb są zbliżone do tych otrzymanych w zderzeniach p+p. Natomiast dla wysokich krotności i niskich pędów poprzecznych są one większe o 10–20%. Wynik ten sam w sobie jest nieco bliższy przewidywaniom teorii CGC, ale nie przesądza kategorycznie o braku zjawisk kolektywnych, zwłaszcza, że zmierzone promienie maleją ze wzrostem pędu poprzecznego, co jest charakterystyczne przy obecności przepływu radialnego.

W rozdziale ósmym Autor omawia systematyczne niepewności w procedurze eksperymentalnej.

Rozdział dziewiąty pracy omawia wstępne wyniki dotyczące femtoskopii w układach proton-lambda. Otrzymane wyniki wskazują na istnienie efektu anihilacji w kanałach barion–antybarion (czyli proton-antylambda i antyproton-lambda), co wydaje się zgodne z wynikami niektórych modeli termalnych wykazujących odstępstwa od lokalnej równowagi termodynamicznej i chemicznej.

Rozdział dziesiąty pracy stanowi jej podsumowanie.

3. Podsumowanie

Praca doktorska Pana mgr Łukasza Kamila Graczykowskiego ma przemyślaną, jasną konstrukcję. Zamieszczone wyżej drobne krytyczne uwagi nie wpływają na moją bardzo pozytywną opinię o niej. Praca zawiera nowe wyniki doświadczalne uzyskane w międzynarodowej grupie doświadczalnej, co wyznacza jej bardzo wysoki poziom naukowy. Oczywiście uważam, że praca spełnia jak najbardziej wymogi stawiane pracom doktorskim i powinna być dopuszczona do publicznej obrony.

Wojciech Florkowski