

Katowice, 3 stycznia 2017

dr hab. Elżbieta Stephan prof.US  
Zakład Fizyki Jądrowej i Jej Zastosowań  
Instytut Fizyki  
Uniwersytet Śląski  
ul. Uniwersytecka 4  
40-007 Katowice  
tel. (32) 359 1878  
elzbieta.stephan@us.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej Bartosza Maksiaka  
*Two-particle Correlations in p+p and Pb+Pb Collisions at SPS energies.*

Praca mgra B. Maksiaka dotyczy badania korelacji dwucząstkowych dla pseudopospieszności i kąta azymutalnego. Podstawą analizy są dane z eksperymentu NA61/SHINE dla zderzeń proton-proton przy pędach wiązki 20, 31, 40, 80 i 158 GeV/c oraz z eksperymentu NA49 dla zderzeń jąder ołowiu przy pędach wiązki 20 oraz 158 GeV/c na nukleon. Celem badań jest porównanie korelacji w zderzeniach p+p dla szeregu pośrednich energii z wynikami dla wysokich energii i interpretacja struktur obecnych w zależnościach korelacyjnych dla protonów i ciężkich jonów, m.in. pod kątem ewentualnych dowodów na istnienie plazmy kwarkowo-gluonowej.

Poszukiwanie plazmy kwarkowo-gluonowej (Quark-Gluon Plasma, QGP) ma duże znaczenie dla zrozumienia oddziaływań hadronowych, zwłaszcza w ekstremalnych warunkach gęstej i gorącej materii, wczesnych etapów ewolucji wszechświata, czy stanu materii jądrowej w gwiazdach neutronowych. Poszukiwanie jej sygnatur jest zadaniem trudnym z uwagi na bogactwo i komplikację procesów zachodzących w zderzeniach ciężkich jonów przy wysokiej energii: często można znaleźć inne wytłumaczenie dla obserwowanych zależności. Niemniej uważa się, że jednoczesne wystąpienie szeregu efektów jest silnym argumentem za istnieniem takiego stanu. Poszukuje się też dowodów na zajście przejścia fazowego oraz tzw. punktu krytycznego. Badania prowadzone w układach ciężkich jonów A+A są konfrontowane z wynikami uzyskiwanymi w układach p+p oraz asymetrycznych p+A. W eksperymentach NA49 i NA61/SHINE zderzenia protonów są porównywane z szeregiem reakcji w układach symetrycznych, ale o różnej wielkości: Be+Be, C+C, Si+Si, Pb+Pb, co pozwala na systematyczne poszukiwanie efektów powiązanych z QGP i przejściami fazowymi. Co ciekawe, pewne efekty w zależności parametru T w tzw. widmie masy poprzecznej obserwowane dla kaonów produkowanych w zderzeniach p+p przypominają te, które wiąże się z istnieniem przejść fazowych. Pokazuje to złożoność badanych problemów i tym bardziej wymaga kompleksowego podejścia: badań dla szeregu energii i reakcji, analizy różnych obserwabli i zależności. Można powiedzieć, że zderzenia proton-proton mają w tych badaniach głównie znaczenie referencyjne, ale i one mogą dostarczyć zupełnie nowych informacji dotyczących oddziaływań hadronowych. Jednym z narzędzi stosowanych w analizie zderzeń p+p przy wysokich energiach jest badanie korelacji dwucząstkowych, w szczególności konstrukcja takich korelacji w dwu wymiarach: dla różnicy pospieszności lub pseudopospieszności oraz różnicy kątów azymutalnych. Okazuje się, że takie korelacje między produkowanymi cząstkami mogą uwidocznić pewne procesy zachodzące podczas zderzenia, również na poziomie „partonowym”. Ponadto ich porównanie z wynikami dla ciężkich jonów pozwala na ewentualne wnioski dotyczące QGP.

Rozprawa jest napisana w języku angielskim. Rozdział pierwszy ma charakter wstępny i zawiera zarówno elementarne informacje dotyczące Modelu Standardowego, jak i wprowadzenie do zagadnień diagramu fazowego materii hadronowej, w tym plazmy kwarkowo-gluonowej i jej sygnatur. Pomimo może niezbyt fortunnie dobranej tytułu jednego z podrozdziałów, "Universe and its link to Quark-Gluon Plasma", należy podkreślić bardzo przejrzyste i systematyczne przedstawienie tych tematów, poglądowe wprowadzenie takich pojęć jak np. "pływy kolektywne" oraz przegląd obecnego stanu badań diagramu fazowego. Rozdział drugi odnosi się do korelacji badanych w ramach tej pracy doktorskiej. Oprócz niezbędnych definicji znalazło się w nim bardzo staranne przedstawienie historii rozwoju badań tego typu korelacji dwucząstkowych. Czytelnik jest krok po kroku wprowadzany w interpretację skomplikowanych struktur obecnych w korelacjach dwucząstkowych pseudopospieszności i kąta azymutalnego, zarówno w przypadku zderzeń p-p, p-ciężki jon, jak i dwu ciężkich jonów. Przedstawione zostały też najnowsze wyniki uzyskane w obszarze wysokich energii, w tym w eksperymentach na LHC. Definicje korelacji stosowanych w poszczególnych analizach zostały zebrane w dodatku A. Rozdział trzeci opisuje eksperyment NA61/SHINE: aparaturę i stosowane oprogramowanie do analizy zdarzeń i symulacji. Jest on bardzo krótki, zapewne z uwagi na wielokrotny opis tych zagadnień w innych pracach doktorskich i raportach. Rozdział czwarty stanowi najistotniejszą część pracy: zawiera opis analizy danych proton-proton i przeprowadzonych symulacji Monte Carlo, uzyskane wyniki, zastosowane korekty, analizę niepewności statystycznych i systematycznych, porównanie z wynikami uzyskanymi w ramach modeli EPOS i UrQMD. Na końcu uzyskane korelacje są porównywane z wynikami innych eksperymentów prowadzonych przy wyższych energiach wiązki. Rozdział piąty odnosi się do analizy w układzie Pb+Pb i płynących z niej wniosków. Krótkie podsumowanie wszystkich uzyskanych wyników znajduje się w rozdziale szóstym.

Wyniki uzyskane dla układu p+p wskazują na kilka zjawisk z zakresu tzw. miękkiej fizyki i brak sygnatur powstania jetów. Są istotne z uwagi na dotychczasowy brak takich analiz w szerszym zakresie energii oraz ważne dla przyszłych konfrontacji z wynikami dla zderzeń ciężkich jąder. Niestety w pracy nie pojawiły się szersze omówienia stosowanych modeli i trudno interpretować wyniki w konfrontacji z teorią, m.in. nie jest jasne, dlaczego UrQMD odtwarza wyniki gorzej od EPOS (choć niektóre struktury dla wysokich pędów poprzecznych w zakresie grzbietu „odległego” wydają się bardziej podobne do danych w przypadku UrQMD). Ciekawe są rozważania dotyczące fragmentacji partonów - modelu strun i wpływu tego mechanizmu na badane korelacje. Jeśli chodzi o samą analizę danych, należy podkreślić bardzo staranne podejście do badania efektów systematycznych. W przypadku analizy zderzeń Pb+Pb przebadany został ewentualny wpływ metody rekonstrukcji śladów na lokalne zmniejszenie liczby śladów cząstek ujemnie naładowanych. Wyniki dla zderzeń jąder ołowiu, choć również interesujące, można chyba traktować jako wstępne do dalszych systematycznych badań w tym zakresie.

Praca została przygotowana bardzo starannie od strony edytorskiej, bardzo dobra jakość rysunków umożliwia porównanie wyników różnych eksperymentów. Zwykle prezentacja wykresów 3-wymiarowych jest stosunkowo trudna, a autor dobrze sprostą temu zadaniu. Dodatkowym problemem w wypadku wykresów zależności od dwu zmiennych jest prezentacja niepewności statystycznych. Tu w zasadzie można je tylko oceniać na podstawie fluktuacji wyników pomiędzy sąsiednimi binami (słupkami) histogramów, ale w przypadku histogramów o niższej dokładności statystycznej w pracy znalazły się komentarze na ten temat. Przegląd wyników literaturowych dla korelacji, zawarty w rozdziale drugim, wykracza swoim zaawansowaniem poza to, czego zwykle oczekuje się od prac doktorskich. Wysoki poziom dydaktyczny opisu i prowadzonej dyskusji będzie na pewno doceniony przez doktorantów zajmujących się w przyszłości podobnymi zagadnieniami. Natomiast wyjątkowo skrótowo przedstawione są informacje w rozdziale trzecim, a w podrozdziałach 3.3 i 3.4 pojawia się nieco

więcej błędów językowych, ale trzeba przyznać, że tu również znalazły się informacje niezbędne do zrozumienia procedur analizy.

Poniżej przedstawiam kilka uwag i pytań, które nasunęły się podczas czytania pracy:

1. Na str.8 znajduje się wyjaśnienie zaniku struktury odpowiadającej za odległy jet. Taki efekt jest widoczny na rysunku 1.4 dla centralnych zderzeń Au+Au. Autor wyjaśnia, że parton, który przechodzi przez gęstą materię oddziałuje z QGP, w wyniku czego obniżeniu ulega jego pęd, a tym samym pęd powstałych cząstek. Natomiast z rysunku wynika, że te cząstki całkowicie znikają - jak rozumiem z cytowanej pracy, wykres jest utworzony z warunkiem na pęd poprzeczny cząstek?
2. Rozdział 3: niestety trochę trudno się zorientować, jak wyglądał eksperyment NA49, który też przecież dostarczył danych analizowanych w ramach niniejszej pracy doktorskiej. Można podejrzewać, że rysunek 3.3 odnosi się w dużym stopniu także do tamtego układu pomiarowego, oczywiście z wyjątkiem detektora PSD, który jak wynika z opisu, został wprowadzony na etapie eksperymentu NA61. Być może problem polega na tym, że w ramach podrozdziału "Upgrades of NA61" w jednym miejscu znalazły się zmiany przeprowadzone pomiędzy eksperymentami NA49 i NA61, jak i w trakcie NA61, a także planowane.
3. Definicje korelacji stosowanych w różnych eksperymentach są różne. W szczególności Autor zastosował moduły różnic, co z jednej strony ułatwia sytuację w analizie: nie ma problemu cząstki „pierwszej” i „drugiej”, z drugiej strony odbicie wyników na stronę ujemną wydają się zabiegiem sztucznym. Czy porównania z inaczej definiowanymi korelacjami są w pełni uzasadnione, gdzie ewentualnie mogą się pojawić różnice?
4. EPOS, UrQMD - wspomniany już brak choćby skrótowej charakterystyki tych modeli, na ile są adekwatne do opisu badanych procesów.
5. W pracy jest niewielka liczba błędów edytorskich, np. niezbyt jasne definicje  $\phi_R$ , dwojakie oznaczenie pływów we wzorze 1.1 i pod nim, ale to są raczej przypadki rzadkie.
6. Nie do końca rozumiem cięcie czasowe WFA (str.44), czy rzeczywiście te zdarzenia powinny być odrzucane, czy raczej akceptowane?
7. Autor nie ustrzegł się błędów językowych, czasami wprowadzających znaczenie inne od zamierzonego, np. "nucleons colliding with themselves" (str.4), "Leptons... can be divided by electric charge" (str.2). Zdarzają się też niezbyt zrozumiałe zbitki wyrazów jak "The interaction trigger simulation" (str.41) i inne.

Powyższe uwagi krytyczne i pytania nie wpływają na jednoznacznie pozytywną ocenę pracy doktorskiej, która podejmuje mało zbadane w tym zakresie energii zagadnienie korelacji dwucząstkowych w zderzeniach p+p i Pb+Pb. Jestem przekonana, że opracowane metody i uzyskane wyniki będą stanowić cenny punkt startowy i odniesienia dla przyszłych badań w tym zakresie.

Na podstawie przedłożonej do recenzji rozprawy doktorskiej Pana magistra Bartosza Maksiaka pt. *Two-particle Correlations in p+p and Pb+Pb Collisions at SPS energies* stwierdzam, że spełnia ona warunki stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Elżbieta Stephan