

Prof. dr hab. Krzysztof Doroba  
Wydział Fizyki  
Uniwersytetu Warszawskiego  
02-093 Warszawa  
ul. Pasteura 5

Styczeń 2017

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Bartosza Maksiaka pod tytułem "Two-particle Correlations in p+p and Pb+Pb Collisions at SPS Energies"**

Akcelerator Super Proton Synchrotron (SPS) od wielu lat działa w Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych (CERN) w Genewie i dostarcza wiązek zarówno protonów jak i jonów cięższych pierwiastków, do ołowiu włącznie. Wiązki te oraz wiązki wtórne wykorzystywane były i są w licznych eksperymentach fizyki cząstek elementarnych. Jednym z eksperymentów jest prowadzony właśnie w Holu Północnym eksperyment NA69 SHINE. Z jednej strony jest on nastawiony na dostarczenie danych służących do precyzyjnego określenia składu wiązek w eksperymentach neutrinowych (K2K, Fermilab) oraz dostarczenia informacji o przekrojach czynnych dla eksperymentów badających promieniowanie kosmiczne (Pierre Auger Observatory, KASCADE). Z drugiej strony jest on kontynuacją eksperymentu NA49 i używa praktycznie tej samej aparatury w celu dokładnego zbadania przejść fazowych w materii jądrowej i innych zagadnień plazmy kwarkowo-gluonowej. Takie badania prowadzone są w fizyce cząstek od wielu lat, ale ciągle wzbudzają duże zainteresowanie fizyków. Dowodem są programy ciężkojonowe prowadzone w eksperymentach przy Wielkim Zderzaczu Hadronów (LHC). Eksperyment NA49 SHINE częściowo zrealizował już swój plan szerokiego przeglądu oddziaływań przy różnych wiązkach, tarczach i energiach. Ostatecznie zbadane zostaną energie od 13 A GeV do 158 A GeV. Porównanie oddziaływań różnych jonów przy takiej samej energii pary zderzających się nukleonów powinno się opierać o dobrą znajomość oddziaływań tych ostatnich. W ten scenariusz bardzo dobrze wpisuje się praca mgr Bartosza Maksiaka, która poświęcona jest badaniom korelacji dwucząstkowych w oddziaływaniach proton-proton i ołów-ołów. Rozkłady dwucząstkowe są dużo bardziej czułe na założenia fizyczne niż jednocząstkowe powinny dobrze przysłużyć się zrozumieniu oddziaływań elementarnych. Badane były już w latach siedemdziesiątych (ISR) jak i współcześnie w LHC, z bardzo ciekawymi rezultatami.

W przypadku dużej kolaboracji (NA61 SHINE liczy nieco ponad dwustu uczestników) zasadne jest pytanie o wkład autora rozprawy doktorskiej w opracowanie przedstawianego materiału. W przypadku pracy mgr Bartosza Maksiaka sprawa wydaje się jasna. Bartosz Maksiak jest autorem korespondentem publikacji "Two-particle correlations in azimuthal angle and pseudorapidity in inelastic p+p interactions at the CERN Super Proton Synchrotron" właśnie przyjętej do druku przez European Physical Journal C. W dużych współpracach funkcje te powierza się osobie, która prowadziła zawartą w pracy analizę.

Praca doktorska mgr Bartosza Maksiaka składa się z sześciu Rozdziałów, Biografii i trzech Dodatków, razem liczy 123 strony. Napisana została w języku angielskim, tylko streszczenie pracy napisane jest w języku polskim i angielskim. Rozdział 1 stanowi wprowadzenie w tematykę pracy. Zawiera bardzo krótką charakterystykę Modelu Standardowego, informacje o Wielkim Wybuchu i związku pomiędzy badaniami plazmy kwarkowo-gluonowej a analizą ewolucji Wszechświata. Omówione są podstawowe terminy opisu oddziaływań z plazmą kwarkowo-gluonową oraz wyliczone są główne ośrodki, które dysponują (bądź będą wkrótce dysponowały) sprzętem odpowiednim do wytworzenia plazmy kwarkowo-gluonowej. W dalszej części rozdziału przedstawiony jest diagram fazowy (którego dokładne zbadanie jest jednym z głównych celów NA61) i sygnatury plazmy kwarkowo-gluonowej. Pośród sygnatur najbardziej szczegółowo omówiona jest kwestia pływów. W kolejnym podrozdziale autor analizuje kwestie prognozy energetycznej na uwolnienie z uwięzienia kwarków i leptonów (deconfinement). Autor przytacza z jednej strony argumenty modelowe (model SMES Gazdzickiego i Gorensteina) za osiągnięciem uwolnienia w zderzeniach ciężkich jonów (załamanie, róg i próg) potwierdzone przez NA49 a z drugiej strony zwraca uwagę, że eksperyment NA61 SHINE podobne nieregularności zaobserwował w zderzeniach proton-proton. Rozdział 1 zamyka słuszną uwagę, że istotnych informacji dotyczących przejść fazowych i punktu krytycznego dostarczyć mogą badania fluktuacji.

Rozdział 2 jest dalszym ciągiem wprowadzeniem w tematykę rozprawy. Autor podaje stosowaną w pracy definicję współczynnika korelacji  $C(\Delta\eta, \Delta\varphi)$ , funkcji powszechnie używanych zmiennych pseudospieszczości  $\eta$  i kąta azymutalnego  $\varphi$ . Pewne własności tej funkcji dają się przewidzieć w oparciu o prawa zachowania i przyjęte modelowanie zachodzących procesów. Aby zaprezentować otrzymane przez siebie wyniki w odpowiednim kontekście autor przedstawia aktualne wyniki dotyczące  $C(\Delta\eta, \Delta\varphi)$  pochodzące z doświadczeń STAR i PHOBOS (zderzenia Au+Au) a następnie CMS, ATLAS, ALICE i LHCb (zderzenia Pb+Pb p+Pb i proton-proton). Ogólnie znany obraz wyłaniający się z tego przeglądu to korelacje po stronie „away”, które mogą być związane zarówno z dżetowym charakterem oddziaływania jak produkcja rezonansów, korelacje związane z fragmentacją struny i najbardziej intrygująca korelacja „near side ridge”, najprawdopodobniej związana z pływami, choć jej obecność w oddziaływaniach p+p jest może nieco zastanawiająca. Autor prezentuje w tym rozdziale bardzo kompetentny i kompletny przegląd wyników eksperymentalnych na temat korelacji dwucząstkowych.

Rozdział 3 poświęcony jest opisowi eksperymentu NA61 SHINE, w ramach którego przewidziane są trzy zadania: neutrinowe, kosmiczne i hadronowe. Dla tego ostatniego, najbardziej związanego z recenzowaną pracą, podane są energie wiązek (od 13 A GeV do 158 A GeV) i zderzające się jony wiązki i tarcze (p+p, Be+Be, Ar+Sc, Xe+La, Pb+Pb). Rysunki przedstawiają schematy zarówno CERN-owskiego układu akceleratorów jak i eksperymentu NA61 SHINE. Nakreślona jest procedura rekonstrukcji oddziaływań jak również ich symulacji (EPOS + GEANT 3.21). Opis detektora jest wystarczająco precyzyjny dla potrzeb rozprawy. Pewnie lepiej byłoby gdyby autor zachował większą precyzję w określaniu wykorzystania liczników TOF, bo zdania ze strony 36, 39 i 40 mogą wydawać się sprzeczne.

Rozdział 4 stanowi trzon rozprawy. Poświęcony jest oddziaływaniom p+p przy energiach wiązki 20, 31, 40, 80, 158 GeV zebranych przez NA61 SHINE w roku 2009. Podane są liczby zebranych i pozostałych po cięciach przypadków. Omówione są cięcia



nakładane na przypadki i poszczególne tory cząstek wtórnych. Lista cięć jest szczegółowa, choć niektóre opisy wymagają wyjaśnienia, na przykład dlaczego wszystkie przypadki, które zaszły w czasie mniejszym niż  $1 \mu s$  od zaakceptowanego oddziaływania nazywa się „of time”. Podane są również cięcia stosowane wobec próbki Monte-Carlo. Dużą niezręcznością jest używanie tu i w dalszej części pracy sformułowania: *gamma decays* ( $\gamma \rightarrow e^-e^+$ ). Tylko w jednym miejscu rozprawy (strona 92) znajduje się sformułowanie  *$\gamma$  conversion*.

Prezentacja swoich rezultatów autor zaczyna od przedstawienia współczynników korelacji  $C(\Delta\eta, \Delta\varphi)$  na niepoprawionych danych. Autor zawsze przedstawia zestaw dwuwymiarowych histogramów przy wspomnianych pięciu energiach i różnych kombinacjach ładunkowych ( $++$ ,  $--$ ,  $+-$ ,  $+ -$ ). Format A5 w jakim recenzent otrzymał do zrecenzowania rozprawę nie ułatwia odczytywania subtelności tych histogramów ale z pewnością wszystkie osoby zainteresowane mogą (tak jak recenzent) mieć dostęp do wersji elektronicznej, w której problem ten nie jest istotny. Następnie autor stosuje do danych multiplikatywną poprawkę będącą w każdym przedziale  $\Delta\eta, \Delta\varphi$  ilorazem czystego Monte-Carlo EPOS i tegoż Monte-Carlo po przetworzeniu go przez symulacje detektora i rekonstrukcję. W prawie całej rozprawie autor ogranicza analizę do niezidentyfikowanych cząstek z pędem poprzecznym  $p_T < 1.5 \text{ GeV}/c$ . Otrzymane dane potwierdzają szereg znanych już efektów: maksimum dla  $\Delta\varphi \approx \pi$  i  $\Delta\eta \approx 0$ , które autor wiąże z rozpadami rezonansów. Modulacje proporcjonalne do  $-\cos(\Delta\varphi)$  związane zapewne z zachowaniem pędu, podłużne maksimum dla  $\Delta\eta \approx 0$  związane z kolei z fragmentacją struny. Najmniej widoczna zdaniem recenzenta jest korelacja dla cząstek tego samego znaku (B-E). Porównanie danych z przewidywaniami modelowymi (EPOS1 i UrQMD) wykazują zgodność na ogół lepsza dla EPOS1, choć zdaniem recenzenta trzeba pamiętać, że to ten model użyty był przy wyznaczaniu efektywności detektora.

Porównanie z innymi eksperymentami (PHOBOS, ALICE, ATLAS, CMS) nie wykazuje nieoczekiwanych niezgodności poza brakiem sygnału od ‘near side’ dżetu. Autor przeprowadza zresztą specjalną analizę korelacji, w której dopuszczał tylko cząstki o pędzie  $p_T > 0.5, 0.75, 1.5 \text{ GeV}/c$  ale nie udało mu się wspomnianego sygnału zaobserwować. Stosunkowa niska maksymalna wartość  $\sqrt{s} = 17.3 \text{ GeV}$  wydaje się to dobrze tłumaczyć; sygnały struktury dżetowej obserwowano przy energiach ISR  $\sqrt{s} = 63 \text{ GeV}$  czy PETRY  $\sqrt{s} = 31 \text{ GeV}$ .

Rozdział 5 poświęcony jest analizie funkcji korelacji  $C(\Delta\eta, \Delta\varphi)$  w oddziaływaniach Pb+Pb. Dane te pochodzą z eksperymentu NA49, gdyż NA61 SHINE dopiero w 2016 zebrało dane Pb+Pb. Schemat analizy jest podobny do tej dla p+p ale użyte są tylko dwie energie (158A i 20A GeV), liczba przypadków jest znacznie mniejsza i brak odpowiedniego Monte-Carlo uniemożliwia wprowadzenia poprawek akceptacyjnych. Przede wszystkim obserwowany sygnał korelacyjny jest znacznie mniejszy niż dla p+p ze względu na tło kombinatoryczne. Autor stara się w szczególności wytłumaczyć poprzez oddziaływania Coulombowskie obecność minimum dla  $\Delta\eta = 0, \Delta\varphi = 0$  dla torów dodatnich. Wpływ przekrywania się torów w rekonstrukcji stara się wykluczyć analizując rozkład krotności w funkcji wielkości  $d_{min}^{TT}$ . Rozkład taki ma charakter rozkładu całkowego i znacznie bardziej konkluzywny byłby zdaniem recenzenta rozkład kwadratu odległości pomiędzy torami.

Pracę zamyka Podsumowanie czyli Rozdział 6. Autor słusznie stwierdza, że poza kwestią dżetów otrzymane przez niego rezultaty są zgodne z wynikami eksperymentów otrzymanymi przy wyższych energiach. Korelacje są bardziej wyraźne w oddziaływaniach o mniejszej krotności. Poza tym z korelacjami zaobserwowanymi w analizie p+p bardziej

zgadza się model EPOS niż UrQMD. Wnioski dotyczące oddziaływań Pb+Pb są mniej ugruntowane ze względu na mniejszą statystykę

Pracę doktorską mgr Bartosza Maksiaka uzupełniają Dodatki. Dodatek A jest uzupełnieniem Rozdziału 2 i zawiera definicje funkcji korelacji używane w różnych eksperymentach. Dodatek B związany jest z akceptacją detektora NA61 SHINE a Dodatek C zawiera przykładowe rozkłady.

Mgr Bartosz Maksiak napisał dobrą rozprawę doktorską. Przedstawił kompleksową analizę dwucząstkowych korelacji cząstek wtórnych w oddziaływaniach p+p i Pb+Pb. Wskazał które obszary korelacji związane są konkretnymi mechanizmami oddziaływania. Wyniki potwierdzają obecny stan wiedzy na temat oddziaływań hadronów i z pewnością będą użyte do zwiększenia siły predykcyjnej modeli miękkich oddziaływań elementarnych. Ze zbadanych przez autora modeli oddziaływań EPOS dużo lepiej opisuje dane niż UrQMD. Można mieć nadzieję, że gdy pełna statystyka oddziaływań Pb+Pb będzie dostępna z punktu widzenia opracowanych przez autora rozprawy narzędzi to porównanie pomiędzy oddziaływaniami p+p i Pb+Pb dostarczy nowych, istotnych informacji. Strona redakcyjna, poza formatem i wspomnianym niefortunnym sformułowaniem jest bardzo dobra.

Uważam, że recenzowana praca w pełni spełnia warunki stawiane przez ustawę pracom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie mgr Bartosza Maksiaka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

