

Prof. Michał Praszałowicz
Zakład Teorii Cząstek
Instytut Fizyki im. M. Smoluchowskiego
Uniwersytet Jagielloński
ul. S. Łojasiewicza 11
30-348 Kraków

Dziekanat Wydziału Fizyki UW
Seksja ds. pracowniczych
Wpłynęło dn. 22.15.2015
podpis 

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Antoniego Aduszkiewicza p.t.

*Energy dependence of negatively charged pion production
in proton-proton interactions at the CERN SPS*

Praca doktorska pana Antoniego Aduszkiewicza powstała pod opieką profesora Wojciecha Dominika i jest fragmentem obszernego programu badawczego eksperymentu NA61/SHINE działającego w laboratorium CERN i korzystającego z wiązki dostarczanej przez synchrotron SPS. Choć głównym celem eksperymentu NA61/SHINE jest badanie zderzeń różnych jonów przy energiach osiąganych przez SPS i w konsekwencji ustalenie warunków, w których powstaje w takich zderzeniach plazma kwarkowo-gluonowa (tzw. „skanowanie” diagramu fazowego chromodynamiki kwantowej), to w pracy doktorskiej pan Aduszkiewicz zajmuje się zderzeniami proton-proton. Jest to podyktowane koniecznością posiadania bardzo precyzyjnych rozkładów „referencyjnych”, do których można porównać rozkłady otrzymane w zderzeniach jąder, ale także – jak się okazuje – analiza zderzeń pp okazała się interesująca sama w sobie głównie ze względu na bardzo dobrą dokładność pomiarów. Ostatecznym wynikiem pracy są różniczkowe rozkłady ujemnych mezonów π^- w zderzeniach pp przy energiach wiązki: 20, 31, 40, 80 i 158 GeV/c. Zostały one już opublikowane przez grupę NA61/SHINE w *European Physics Journal* C74 (2014) 2794, gdzie pan Aduszkiewicz figuruje jako „corresponding author”. Opracowanie tych danych zajęło stosunkowo długi okres czasu, zważywszy że pochodzą one z roku 2009.

Rozprawa pana mgra Aduszkiewicza jest bardzo obszerna: na 121 stronach autor zawarł szczegółową motywację fizyczną prowadzonych badań, opis detektora NA61, szczegółowy opis przeprowadzonych w pracy symulacji Monte Carlo (MC) oraz analizy danych i – co wg mnie zasługuje na podkreślenie – analizę fizyczną zebranych danych oraz porównanie z istniejącymi danymi dla zderzeń ołów-ołów. Część szczegółowych wyników oraz szczegóły techniczne analizy zostały zgromadzone w trzech dodatkach. Na uwagę zasługuje obszerna bibliografia oraz duża staranność w przygotowaniu edytorskim rozprawy (choć akurat w moim egzemplarzu pracy zostały przedstawione pierwsze strony spisu treści). Praca napisana jest w języku angielskim i wg mojej oceny (osoby, dla której nie jest to język ojczysty) jest to angielszczyzna bardzo poprawna, co wiąże się także z jasnym stylem prezentacji.

We wstępie do rozprawy pan Aduszkiewicz w zwięzły sposób opisuje współczesne zrozumienie zjawisk zachodzących w zderzeniach hadronów, w szczególności ciężkich jonów, gdzie dochodzi do produkcji plazmy kwarkowo-gluonowej. Przytacza trzy obserwowalne fizyczne, których zachowanie w funkcji energii zderzenia ma świadczyć o powstaniu fazy swobodnych kwarków i gluonów (ang. *deconfined phase*), z których najpopularniejszy jest tzw. „róg” (ang. *horn*), który pojawia się w rozkładzie stosunku liczby $\langle K^+ \rangle / \langle \pi^+ \rangle$ przy energii około 8 – 12 GeV na nukleon (rysunek 1.2). Myślę, że poglądowe zilustrowanie tego typu zachowania przy pomocy prostych wzorów wynikających ze statystycznego modelu produkcji cząstek pomogłoby mniej zorientowanemu czytelnikowi na zrozumienie, dlaczego właśnie ów słynny „róg” jest uważany za dowód, że w układzie powstała plazma kwarkowo-gluonowa i ewentualnie faza mieszana. W dalszej części wstępu autor opisuje program badawczy eksperymentu NA61/SHINE, uzasadnia, dlaczego bada rozkłady ujemnych mezonów π i wreszcie opisuje swoją rolę w przeprowadzonej analizie i zakres obowiązków w eksperymencie. Z bardzo pozytywnym zdziwieniem odnotowałem tu, że w tak młodym wieku powierzono mu funkcję zastępcy koordynatora technicznego (ang. *deputy technical coordinator*) całego eksperymentu NA61/SHINE.

Rozdziały 2. i 3. poświęcone są opisowi detektora NA61/SHINE, który jest następcą eksperymentu NA49. W rozdziale drugim w skondensowany sposób przedstawiony jest ogólny schemat i zasada działania detektora, natomiast w rozdziale trzecim znajdujemy obszerny opis działania komór projekcji czasowej (ang. *time projection chamber*, w skrócie TPC). Ten fragment rozprawy jest szczególnie istotny, gdyż pan Aduszkiewicz był osobiście zaangażowany w utrzymanie systemu gazowego komór TPC, a także ich kalibracji. Jako teoretyk mogę tylko w kilku słowach podsumować wrażenia z lektury obu tych rozdziałów. Nie ulega dla mnie wątpliwości, że autor jest tu ekspertem i że jego działalność związana z TPC była bardzo ważna dla procesu akwizycji i opracowywania danych, w tym dla procesu identyfikacji cząstek. Krótki wstęp na początku rozdziału 3. zawierający nie tylko i opis zasady działania komór TPC ale ich historię był dla mnie bardzo pouczający.

Surowe dane z systemu detektorów NA61/SHINE dają informację o jonizacji gazów komorach TPC, co pozwala na odtworzenie trajektorii cząstek poruszających się w detektorze. Przypisanie tych śladów do konkretnych cząstek jest dokonywane przy pomocy generatorów Monte Carlo, które symulują proces zderzenia wiązki z tarczą oraz propagację powstałych w wyniku zderzenia cząstek przez detektor. Temu zagadnieniu jest poświęcony rozdział 4. rozprawy pana Aduszkiewicza. Spośród wielu testowanych generatorów MC symulujących zderzenia pp do analizy wybrano generator EPOS autorstwa Klausa Wernera i współpracowników. Jest to generator, w którym uwzględnia się zjawisko wysycenia (tzw. *saturacji*) gluonów przy wysokich energiach. Prowadzi to do dobrego opisu nie tylko rozkładów jednocząstkowych ale także korelacji, jak np. zależności średniego pędu poprzecznego $\langle p_T \rangle$ od krotności, co w innych generatorach (np. PYTHIA) wymaga dodania nowych elementów (w przypadku PYTHII rekombinacji kolorowej). Fakt użycia generatora EPOS jest dla mnie ciekawą informacją. Podstawowym problemem przy używaniu generatorów MC (symulujących zderzenia i

detektor) jest określenie czynników przystosowania (ang. *adjustment factors*), co pozwala uzyskać zgodność między wynikiem uzyskanym z generatora a danymi. Dla mnie najbardziej interesujący był tu rysunek 4.5, który pokazuje wpływ tej procedury na końcowe rozkłady mezonów π^- . Widzimy, że wpływ ten jest stosunkowo nieduży w przeważającym obszarze przestrzeni fazowej (-2% do $+5\%$).

W rozdziale 5. autor omawia przede wszystkim właściwości wiązki protonów używanej w eksperymencie NA61/SHINE, własności tarczy z ciekłego wodoru oraz efektywność i rozdzielczość rekonstrukcji ujemnie naładowanych cząstek π^- . Jak zostało to wcześniej zasygnalizowane we wstępie, pan Aduszkiewicz był w szczególności zaangażowany w analizę efektów pochodzących od cząstek z wiązki które poprzedzają lub są opóźnione w stosunku do cząstki zderzającej się (tzw. *off-time beam particles vs. trigger particle*). W podsumowaniu tego fragmentu pracy autor przedstawia rozkłady masy niezmienniczej wtórnych par $\pi^-\pi^+$ z rozpadów mezonów K^0_s otrzymane dla dwóch energii wiązki: 20 GeV/c oraz 158 GeV/c, które są porównane z symulacjami MC. Różnica pomiędzy maksimum rozkładu a znaną z literatury masą cząstki K^0_s wynosi mniej niż 1 MeV/c². Jest to miara poprawności rekonstrukcji pędu cząstek oraz kalibracji pola magnetycznego detektora. Rozkłady otrzymane w wyniku symulacji mają maksimum zgodne z danymi, ale zaniżają szerokości rozkładów i to o około 25%. Autor jednak twierdzi, że ta niedokładność symulacji ma bardzo niewielki wpływ na końcowe wyniki jego pracy, jakimi są rozkłady cząstek π^- .

Najobszerniejszym rozdziałem pracy jest rozdział 6, gdzie na 37 stronach autor przedstawia analizę danych. Autor zapoznaje czytelnika z „kuchnią eksperymentalną” opisując kryteria selekcji przypadków (czyli „właściwych” zderzeń), sposobu odrzucania przypadków elastycznych i oddziaływań poza tarczą. Następnie analizie poddaje się ślady. Tu autor wylicza kryteria selekcji i pokazuje jak maleje liczba śladów wraz z zastosowaniem kolejnych ograniczeń. Spośród różnych trudności w wyborze właściwych śladów autor przytacza przykład elektronów, które nie są uwzględnione w używanych do analizy generatorach MC i których ślady są odrzucane poprzez analizę straty energii cząstek w detektorze. Następnie do otrzymanych w ten sposób rozkładów stosuje się poprawki uwzględniające oddziaływanie poza tarczą, mylne zidentyfikowanie cząstki jako pierwotnego mezonu π^- , utratę śladu lub mylne przyporządkowanie wartości p_T lub y i wreszcie poprawki polegające na odrzuceniu binów „złej jakości”. Podsumowaniem tej części analizy są rysunki 6.15 i 6.16, gdzie pokazane są procentowe wartości sumarycznej poprawki, które w zależności od energii wiązki i zmiennych kinematycznych sięgają 15 – 25 %. Rozdział ten także zawiera opis obliczenia błędów statystycznych i systematycznych, i wreszcie porównanie otrzymanych rozkładów z innymi eksperymentami oraz sprawdzenie, czy posiadają symetrię ze względu na zamianę y na $-y$.

W przedostatnim rozdziale pracy pan Aduszkiewicz prezentuje ostateczne rozkłady ujemnie naładowanych mezonów π^- oraz dyskutuje ich własności. Do rozkładów w pędzie poprzecznym (lub precyzyjniej: w masie poprzecznej) autor dopasowuje rozkład eksponencjalny z dwoma wolnymi parametrami: normalizacją A oraz odwrotnym parametrem nachylenia T (zwanym dalej temperaturą). Dla rozkładów o małej

pośpieszności temperatura ta rośnie z energią zderzenia, podobnie zresztą jak średnia masa transversalna. Porównując dane z Tabeli 7.1 można się łatwo przekonać, że stosunek średniej masy poprzecznej do T jest dla obszaru centralnych pośpieszności stały i wynosi około 1.58. Patrząc na wykresy na rysunku 7.3 można odnieść wrażenie, że ta proporcjonalność się utrzymuje dla pośpieszności większych od zera. Używając danych z Tabeli C.5 i C.6 można łatwo taki stosunek wyliczyć w funkcji y . Sprawdziłem, że dla $y = 1 - 1.2$ stosunek ten pozostaje dalej równy mniej więcej 1.57 – 1.58. Oczywiście o ile fakt, że dla danej wartości y średnia masa poprzeczna jest proporcjonalna do temperatury T niezależnie od energii jest prawie trywialny i wynika z analizy wymiarowej, o tyle to, że współczynnik proporcjonalności nie zależy od y wydaje mi się mniej oczywisty (biorąc pod uwagę, że rozkłady nie są eksponencjalne w całym zakresie p_T). Warto też wspomnieć, że podobne parametryzacje dla zidentyfikowanych cząstek przy energiach LHC wskazują na inną tendencję. Na przykład w pracy z eksperymentu CMS (Eur. Phys. J. C 72 (2012) 2164), gdzie co prawda dopasowywano rozkłady typu Tsallisa, temperatura T jest wyraźnie niższa (rzędu 125 MeV) i maleje ze wzrostem energii zderzenia.

W dalszej części autor wykreśla stosunek R rozkładów mezonów π^- dla centralnych zderzeń ołów-ołów podzielonych przez otrzymane w omawianej pracy spektra w zderzeniach pp przy tej samej energii zderzenia na nukleon. Rozkłady takie wskazują na powstanie plazmy kwarkowo-gluonowej, jeżeli $R < 1$. Typowo przy energiach RHIC i LHC R jest zawsze mniejszy od jedności, a dla małych pędów poprzecznych rośnie z p_T . W omawianej tu analizie NA61/SHINE zachowanie R w funkcji m_T jest zupełnie inne. Brakuje mi komentarza autora co jest tego powodem i jak brak tłumienia współczynnika R ma się do ewidencji wskazującej na istnienie plazmy kwarkowo-gluonowej na podstawie tzw. „rogu” w stosunku $\langle K^+ \rangle / \langle \pi^+ \rangle$.

Kolejnym krokiem analizy jest zsumowanie rozkładów w pędzie poprzecznym i wykreślenie zsumowanych rozkładów w zmiennej y . Jak już to było wspomniane powyżej, rozkłady takie są symetryczne, ale – co autor podkreśla – dobre dopasowanie otrzymuje się opisując te rozkłady przy pomocy dwóch rozseparowanych funkcji Gaussa. Zarówno stała separacji y_0 jak i szerokości tych rozkładów wzrastają z energią (podobnie zresztą rośnie z energią szerokość rozkładu, jeżeli używa się tylko jednej funkcji Gaussa). Normalizacja rośnie z energią potęgowo, w przybliżeniu jak $(s_{NN})^{1/4}$, co jest zgodne z danymi przy wyższych energiach.

Mając analityczne parametryzacje danych można pokusić się o prostą analizę własności rozkładów w pośpieszności. Przesuwając rozkłady o niższych energiach w prawo (rysunek 7.6), tak aby w obszarze do przodu, t.j. dla $y \approx 2.5$, pokrywały się one z rozkładem o najwyższej zmierzonej energii ($p = 158 \text{ GeV}/c$), można sprawdzić hipotezę granicznej fragmentacji. Z ciekawości sprawdziłem – posługując się parametryzacją przy pomocy jednego rozkładu Gaussa, że hipoteza ta jest znakomicie spełniona, a przesunięcia dla poszczególnych energii są proporcjonalne do y_{beam} .

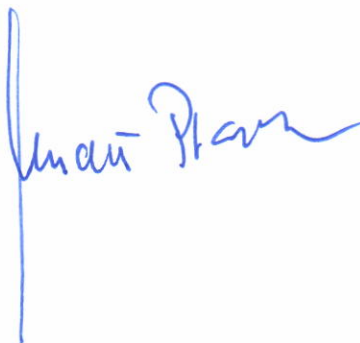
Kończąc rozdział 7 autor porównuje średnią liczbę pionów podzieloną przez liczbę nukleonów uczestniczących w zderzeniu (tzw. *partycypantów*) dla zderzeń pp i

centralnych zderzeń PbPb. O ile średnia ta dla zderzeń pp rośnie w przybliżeniu liniowo z $(s_{NN})^{1/4}$, to dla PbPb wzrost ten jest szybszy i raczej nie-liniowy, co sugeruje liniowy wzrost z wyższą potęgą s_{NN} . Szkoda, że autor nie pokazał, jak krotność mezonów π rośnie z energią dla peryferycznych zderzeń PbPb.

Krótkie podsumowanie oraz plany związane dalszą działalnością eksperymentu NA61/SHINE są przedstawione w rozdziale 8.

Przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska pana magistra Antoniego Aduszkiewicza jest bardzo kompletną i starannie napisaną analizą danych doświadczalnych, której ostatecznym rezultatem są dwuwymiarowe rozkłady ujemnie naładowanych mezonów π . Dane te są bardzo precyzyjne i służyć będą do porównania produkcji cząstek w zderzeniach pp różnych jonów przy energiach SPSu. Jestem pod wrażeniem zarówno przeprowadzonej przez autora analizy danych jak i precyzji jej opisu zawartej w rozdziale 6. Interesująca jest metoda identyfikacji cząstek, która opiera się na symulacjach MC opisanych w rozdziale 4. Bardzo pozytywnie oceniam teoretyczną analizę otrzymanych danych zawartą w rozdziale 7. Ciekawe jest porównanie z danymi dla centralnych zderzeń PbPb, choć można się tu było pokusić o podobne porównanie ze zderzeniami peryferycznymi.

Podsumowując: pan magister Antoni Aduszkiewicz przedstawił bardzo interesującą analizę danych z jednego z wiodących eksperymentów badających własności materii silnie oddziaływującej. Praca jest bardzo obszerna, napisana jest dobrą angielszczyzną i jest na bardzo wysokim poziomie edytorskim. Wnioskuje o dopuszczenie pana Aduszkiewicza do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

A handwritten signature in blue ink, which appears to read "Antoni Adam". The signature is written in a cursive, flowing style.