



Prof. dr hab. Piotr Salabura

Instytut Fizyki im. M. Smoluchowskiego

ul. Prof. Łojasiewicza 11

Uniwersytet Jagielloński

30-348 Kraków

6.12. 2021

Kraków

Recenzja pracy doktorskiej mgr. Piotra Podlaskiego ” Study of charged
hadron production with tof-dE/dx identification method in central Ar+Sc collisions in
NA61/SHINE experiment at CERN”

Praca doktorska pana mgr. Piotra Podlaskiego „Study of charged hadron production with tof-dE/dx identification method in central Ar+Sc collisions in NA61/SHINE experiment at CERN” została wykonana w ramach międzynarodowej współpracy NA61/SHINE, wykonującej pomiary na akceleratorze SPS w CERN.

Autor pracy przedstawił spójny i dobrze określony temat badawczy związany z pomiarem produkcji pionów, kaonów, protonów i ich antycząstek w zderzeniach Ar+Sc przy 6 różnych pędach wiązki (Ar): 13, 19, 30, 45, 75, 150 GeV/c na nukleon. W celu identyfikacji produkowanych hadronów opracował i zastosował metodę bazującą na pomiarze straty energii (dE/dx) w komorach projekcji czasowej (TPC) oraz czasu przelotu w detektorach TOF w spektrometrze NA61/SHINE na akceleratorze SPS w CERN. Wyznaczył różniczkowe rozkłady krotności produkcji hadronów w funkcji pędu transversalnego (p_t) i prędkości (y) oraz zintegrowane w obszarze środka prędkości (y) dla najbardziej (10%) centralnych zderzeń (rys 6.7-6.12). Z dopasowania widm p_t określił współczynnik nachylenia ($1/T$) dla (anty-) kaonów (rys.6.15). Szczególną uwagę zwrócił na wyznaczenie stosunku krotności kaonów i pionów, których zależność od całkowitej energii zderzenia w układzie nukleon-nukleon wzbudza od lat zainteresowanie w kontekście poszukiwań sygnatur uwolnienia kwarków i produkcji plazmy kwarkowo-gluonowej w zderzeniach ciężkich jonów. Rozkłady p_t oraz zintegrowane krotności zostały porównane do trzech

modeli transportu EPOS 1.99, PHSD 4.0 i SMASH 2.0. Uzyskane wyniki uważam za wartościowe, w szczególności należy podkreślić dobrą jakość widm p_t (anty-) kaonów pokrywających małe wartości (< 0.6 GeV/c) istotną do określenia zintegrowanej krotności produkcji (rys.6.13). Ich uzyskanie było możliwe w wyniku użytej przez autora metody identyfikacji TOF-dE/dx, która jest istotnym ulepszeniem dotychczasowych metod identyfikacji używanych w NA61 bazujących tylko na pomiarze strat energii. Uzyskane wyniki są istotne dla zbudowania pełnej systematyki zderzeń ciężko-jonowych w obszarze dużych gęstości barionowych, badanych obecnie w wielu ośrodkach na świecie. W pracy skupiono się głównie na własnościach widm (anty-) kaonów i stosunku K/π , co jest zrozumiałe w kontekście historii tego eksperymentu. W szczególności uzyskano interesującą zależność stosunku K^+/π^+ od energii wiązki, znacząco inną od obserwowanej w cięższych układach oraz przewidywań modelu wczesnej fazy kolizji SMES (rys.6.17 i rys 1.9). W dyskusji wyników zabrakło, w mojej ocenie, porównania do innych modeli statystycznej hadronizacji powszechnie używanych do opisu krotności produkowanych cząstek. Także materiał eksperymentalny mógł zostać rozszerzony o wyniki dopasowania otrzymanych widm p_t pionów i protonów, określenia ich parametrów nachyleń ($1/T$) oraz porównania ich z modelami teoretycznymi EPOS, PHSD, SMASH.

Praca została napisana w języku angielskim i składa się 6 rozdziałów i 3 dodatków, z których jeden zawiera użyteczne tabele z krotnościami produkcji analizowanych hadronów. Praca zawiera rysunki dobrze ilustrujące uzyskane wyniki, choć w wielu przypadkach bardzo małe opisy symboli utrudniają odczyt (np. seria wyników 6.7-6.12). Praca jest napisana czytelnie, choć w pewnych przypadkach, w mojej ocenie, zbyt skrótowo lub w sposób niejasny i wymaga uściśleń (co wskazuję poniżej). Listę drobnych poprawek sformułowań oraz językowych załączam w dołączonym spisie.

Opis pracy i szczegółowe pytania/uwagi do rozdziałów.

Rozdział pierwszy zawiera wprowadzenie do modelu standardowego, problematyki fizyki reakcji ciężko-jonowych oraz w szczególności sygnatur uwolnienia kwarków poszukiwanych w zderzeniach ciężkich jonów ("onset of deconfinement") zaproponowanych i badanych przez NA49/NA61. Moje generalne zastrzeżenie budzą jednoznaczne stwierdzenia o odkryciu takiego punktu, np "NA49 measurements confirmed existence of the onset of deconfinement.." odnoszące się wyników przedstawionych na rys.1.8 i interpretacji bazującej na jednym modelu statystycznym, modelu wczesnej fazy kolizji SMES. Autor nie wspomina o wynikach innych modeli statystycznej hadronizacji, które opierając się na modelu gęstego gazu hadronowego (bez włączania partonowych stopni swobody) także wyjaśniają obserwowany kształt funkcji wzbudzenia stosunku Kaon/pion („horn”) (np.. prace A.Adronica,

P.B. Munzingera, J. Stachel, K. Redlicha) bez konieczności wprowadzania mechanizmu uwolnienia. Nie wspomniane są także pomiary innych obserwabli badanych w programie Beam Energy Scan na RHIC w podobnym zakresie energii (np. skalowania pływu eliptycznego barionów i mezonów). Oczywiście pełna dyskusja przekraczałaby ramy pracy doktorskiej jednak jakaś minimalna dyskusja argumentów „za i przeciw” byłaby w mojej opinii wskazana i bardziej adekwatna w świetle obecnego stanu wiedzy.

Rozdział 2 opisuje system akceleracyjny, prowadzenie wiązki, układ detekcyjny NA61/SHINE oraz system wyzwalania. W szczególności opisane są zasady pracy komór projekcji czasowej (TPC) oraz system czasu przelotu które zostały wykorzystane w procesie identyfikacji cząstek. Sama metoda oparta na połączeniu pomiaru dE/dx z TOF, używana także w innych eksperymentach na świecie, jest dobrze wyjaśniona na przykładzie dwuwymiarowych rozkładów obserwabli w funkcji pędu. Opis systemu wyzwalania oraz warunków logicznych pozwala zrozumieć warunki zbierania danych. Istotną brakującą informacją jest częstość wyzwalania (domyślam się że jest powiązana z czasem martwym TPC), czasu martwego całego układu i powiązanie go z intensywnością wiązki. W innym rozdziale (4), wymienione są specyficzne warunki dla pomiaru Ar+Sc (wiązka, tarcza) podające intensywność wiązki jako 100k jonów na spill (10 s), stąd domyślam się że eksperyment zbierał 10k/s zderzeń na sekundę? W tym kontekście nie jest dla mnie jasny rysunek 4.3 przedstawiający intensywność wiązki na jednostkę czasu? (suma zakresie odpowiadającym 1 s powinna dać 10 000 zliczeń?).

Rozdział 3 Definiuje kolejne kroki analizy zdarzeń składające się z : rekonstrukcji wierzchołka oddziaływania, śladów w TPC, czasu przelotu w detektorach TOF oraz energii mierzonej w detektorze centralności PSD. Symulacje Monet Carlo przebiegają w sposób standardowy, choć sam wybór generator EPOS w oparciu o argumentacje wskazującą na lepszą zgodność EPOS dla zderzeń p+p, które nie były analizowane, jest mało przekonujący w świetle gorszej zgodności z danymi ciężko-jonowymi wykazanymi w rozdziale 6. Domyślam, choć może niesłusznie, się że kluczowym argumentem był możliwość symulacji lekkich fragmentów co miało wpływ na określenie centralności. Ale czy to oznacza że pozostałe generatory PHSD i SMASH nie miały takiej funkcjonalności? Czy mogło to mieć wpływ na określenie centralności w przypadkach tych generatorów i zgodności z danymi (patrz powiązanie pytanie o widma PSD poniżej)

Rozdział 5 przedstawia wyniki analizy danych Ar+Sc ilustrowane kryteriami: wyboru centralności zderzeń, rekonstrukcji wierzchołka oddziaływania, śladów i skorelowanych z nimi trafień w detektorze TOF i wreszcie identyfikacji cząstek. Wybór centralności to

kluczowy element analizy i wymaga uzasadnienia symulacją. Czy przedstawione widma depozycji energii w PSD (rys 5.5) były porównane do symulacji?

Jakość identyfikacji cząstek, przedstawiona w rozdziale 5.4, byłaby łatwiejsza do oceny gdyby scharakteryzowano ją w postaci dwóch wielkości: wydajności oraz czystości identyfikacji w funkcji pędu (rys. 5.13 nie jest specjalnie pomocny). Domyślam się że w obszarze pędu podlegającego działaniu algorytmu TOF separacja jest blisko 100% ale nie mam jasności co obszaru dE/dx . Czy takie badania były zrobione?

W rozdziale 5.3 przedstawiono wartości współczynników korekt dla otrzymanych widm surowych badanych hadronów (tak naprawdę współczynniki korekt są odwrotnościami przedstawionych wydajności które nazwane są wsp. korekcyjnymi). Co do zasady są one jasne, choć ich szczegółowe opisy wzbudziły u mnie szereg wątpliwości: Czy we wzorze (5.8) w liczniku są zawarte, lub w pewnym stopniu?, także przypadki w których kaony lub piony które uległy rozpadom ale zostały mimo to zrekonstruowane poprzez detekcję ich produktów rozpadu (głównie mionów)? (n.b autor wiele razy mówi o „weak decays” nie definiując o jakie rozpady chodzi i jakie mają charakterystyczne średnie drogi). Nie jest dla mnie jasne zdanie na str. 58 „Thus, the results at this stage are corrected for contamination by products of weak decays” w powiązaniu z wprowadzeniem następnego czynnika korekcyjnego (wzór 5.11), czy ta korekta nie uwzględnia tego efektu jeszcze raz? W równaniu 5.9 uwzględnia się efekt brakujących (mało wydajnych) elementów TOF które w liczniku wyrażenia są opisane jako „dead” ale w opisie czytamy „ratio of the multiplicity of simulated tracks extrapolated to properly working pixels”, więc jest tutaj jakiś problem z definicją.. (podobnie w równaniu 5.10 podającym wydajność „dobrych” elementów w mianowniku jest znowu używany indeks „dead”..

W rozdziale 5.6.2 szacowane są niepewności systematyczne. W szczególności te dotyczące wspomnianej wyżej identyfikacji opartej na metodzie dE/dx poprzez zmianę pozycji centralnych dla rozkładów gaussowskich użytych w dopasowaniu o $\pm 1\%$. Dlaczego o taką a nie inną wartość? (np. jakie były typowe błędy z dopasowania tych centralnych wartości?)

Rozdział 6 zawiera wyniki, których ocenę zamieściłem na początku recenzji. W tej części recenzji chciałbym odnieść się to bardziej szczegółowych aspektów. Jak wspomniałem we wstępie istotnym wynikiem pracy są funkcje wzbudzenia stosunku (anty-) kanonów do pionów (rys. 6.17), zintegrowanej krotności (rys. 6.22), współczynników (T) (rys. 6.15) oraz ich porównania do modeli transportu zawarte w rozdziale 6.6. Pytanie: czy z porównań modelowych, zwłaszcza dla stosunku krotności kaonów/pionów (rys. 6.25) można coś wnioskować o mechanizmie pojawiania się charakterystycznego wzmocnienia w okolicy 7.5 GeV widocznego dla PHSD (n.b dobrze opisującego większość rozkładów kaonów) a braku

tej struktury dla innych modeli?. Czy jest to może wynik braku poprawnego opisu produkcji pionów w PHSD?. W tym kontekście brak porównania tych rozkładów w pracy (a dostępnych z kombinowanej metody h- i pracy autora) utrudnia konkluzje. Także porównanie do innych statystycznych modeli hadronizacji byłoby bardzo pomocne w celu określenia efektu tłumienia produkcji dziwności które może występować dla małych systemów (rys 1.9 określa ten efekt dla SMES). Autor nie komentuje w pracy zupełnie innego przebiegu funkcji wzbudzenia dla stosunku K/π dla cząstek i antycząstek (rys. 6.17) .

Rys.6.15 i 6.14 przedstawiają dopasowania widm p_t dla kaonów oraz protonów i ich antycząstek. Niestety nie podano wartości wsp. nachylenia ($1/T$) które byłyby istotne dla sprawdzenia zależności (1.7) oraz określenia prędkości ekspansji źródła. Czy taka analiza była zrobiona?

Wszystkie powyższe pytania, do których proszę się o ustosunkowanie w czasie obrony, nie mają wpływu na moja pozytywną ocenę pracy. Stwierdzam że przedstawiona praca zawiera materiał który spełnia warunki stawiane pracom doktorskim.

Prof. dr hab.

Piotr Salabura

Lista zauważonych drobnych usterek językowych

Abstract : zamiast „A +Sc” Ar+Sc

Streszczenie: zamiast „pospiesznosci” pospieszności

Str 2 „It is responsible for the masses of the other elementary particles..” (Higgs) To prawda z wyjątkiem lekkich kwarków gdzie mechanizm łamania symetrii chiralnej w QCD jest odpowiedzialny za masę kwarków („constituent”) (mechanizm Higgsa odpowiada tylko za małą część związaną z masą „current”)

Str. 5 zamiast „constriction” chyba construction

Str. 19 rys. 2.3 600m long (zamiast “ling”)

Str. 25 ostatni wiersz cathode planes (zamiast plans)

Str. 28 “..energy transfer in a single collision” (with electron?)

Str. 32 2.5.3 ..”azimuthal angles ϑ ” “ ϑ ” jest chyba kątem polarnym..(tak zdef. w A)

Str 56 „particle type probabilities” probabilities of hadron species

Str. 59 fig.5.14 “MC correction factors’ to powinno być definiowane jako “geometrical acceptance” (która jest mniejsza od 1, wsp. korekcji ze względu na akceptancję geometryczną są odwrotnościami)

Str. 67 „ is is based” is based