



Kraków 27.05.2021

Dr hab. Jacek Otwinowski, prof. IFJ PAN

[jacek.otwinowski@ifj.edu.pl](mailto:jacek.otwinowski@ifj.edu.pl)

tel: +48 12 662 8071

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Michała Naskręta pt. „Energy dependence of negatively charged pion production in nucleus-nucleus collisions”.**

Mgr. Michał Naskręt wykonał pomiary produkcji mezonów  $\pi^-$  przy pomocy detektora NA61/SHINE na akceleratorze SPS, w zderzeniach  $^{40}\text{Ar}+^{45}\text{Sc}$  przy pędach wiązki  $^{40}\text{Ar}$ : 13A, 19A, 30A, 40A, 75A, 150A GeV/c. W pracy prezentowane są widma pędu poprzecznego ( $p_T$ ) i masy poprzecznej ( $m_T$ ) w funkcji pospieszności ( $\gamma$ ), widma  $p_T$  i  $m_T$ , oraz krotności mezonów  $\pi^-$  dla centralnych (0-5%) zderzeń Ar+Sc. **Otrzymane wyniki stanowią ważny wkład w badaniach własności materii jądrowej, których głównym celem jest znalezienie śladów przejścia fazowego ze stanu materii hadronowej do stanu plazmy kwarkowo-gluonowej (QGP).** Jest to część programu badawczego eksperymentu NA61/SHINE polegającego na badaniu zależności produkcji hadronów w funkcji rozmiaru i energii zderzanych systemów w celu odkrycia warunków spontanicznego uwolnienia kwarków oraz punktu krytycznego dla tej przemiany fazowej.

Praca składa się ze streszczenia w języku angielskim i polskim, podziękowań, spisu treści, listy rysunków, listy tabel oraz listy skrótów. Treść rozprawy stanowi osiem głównych rozdziałów, podsumowanie, trzy dodatki oraz lista publikacji. Należy podkreślić, że układ pracy jest bardzo dobrze przemyślany. Praca liczy w sumie 123 strony.

Rozprawa napisana jest po angielsku w bardzo dobrym stylu. Od strony graficznej i edytorskiej praca jest starannie wykonana. Zastrzeżenie można mieć jedynie do rozmieszczenia niektórych tabel i rysunków, oraz braku konwencji przy nazwiskach autorów w cytowanych artykułach. Nie rzutuje to jednak na jakość tej pracy. Lista nielicznych błędów umieszczona jest na końcu recenzji.

We wprowadzeniu autor przedstawił motywację do przeprowadzenia tych pomiarów, opisując w skrócie stan badań eksperymentalnych i teoretycznych plazmy kwarkowo-gluonowej. W szczególności przytoczył najważniejsze wyniki otrzymane przez eksperymenty na zderzaczach SPS, RHIC i LHC, oraz wyniki obliczeń teoretycznych z uwzględnieniem tych na siatce QCD (**w tym przypadku cytowane wyniki dla temperatury krytycznej  $T_c$  przejścia fazowego nie są aktualne**). W tym rozdziale, autor zdefiniował hipotetyczny punkt krytyczny na diagramie fazowym silnie oddziałującej materii jądrowej, którego odkrycie jest głównym celem badań eksperymentu NA61/SHINE. Ponadto, przedstawił model statystycznej produkcji cząstek (SMES), który przewiduje szereg sygnałów przejścia fazowego do stanu plazmy. Jednym z nich jest tzw. „kink” na wykresie  $\langle\pi^- \rangle/\langle W \rangle$  w funkcji  $F$ , gdzie  $W$  jest liczbą zranionych nukleonów, a  $F$  energią Fermiego). Jest to jedna z najważniejszych zależności dyskutowana w tej pracy. Na zakończenie autor przedstawił swój



wkład w otrzymane wyniki oraz układ rozprawy. **Należy podkreślić, że prezentowane wyniki stały się częścią publikacji kolaboracji NA61/SHINE.**

W rozdziałach drugim i trzecim autor w sposób fachowy przedstawił wszystkie istotne informacje związane z pomiarem cząstek naładowanych w zderzeniach Ar+Sc przy pomocy systemu detekcyjnego NA61/SHINE na SPS. Przedstawiane zostały m.in.: akcelerator SPS, detektor NA61/SHINE, system akwizycji danych, metody rekonstrukcji trajektorii cząstek i pomiaru strat energii  $dE/dx$  w komorach TPC, oraz metoda wyznaczania centralności zderzeń przy pomocy detektora PSD. Ponadto, opisał proces symulacji MC odpowiedzi detektora wyznaczenia w celu wyznaczenia współczynników korekcji dla zmierzonych widm  $\pi^-$ . Współczynniki te wyznaczone zostały w oparciu o generator zdarzeń EPOS1.99. **Tutaj nasuwa się pytanie, dlaczego nie wykorzystano najnowszej wersji tego generatora - EPOS3, który jest rozwijany od około 2015 roku.**

Szczegóły dotyczące selekcji danych do analizy przedstawione są w rozdziale czwartym. Selekcja centralnych zdarzeń (0-5%) Ar+Sc odbywa się w oparciu o całkowitą energię  $E_F$  cząstek wyprodukowanych w silnych i elektromagnetycznych procesach w obszarze detektora PSD, która wyznaczona została w oparciu o energię zmierzoną przez kalorymetr PSD i symulacje MC odpowiedzi detektora. Następnie, autor w sposób klarowny opisał cięcia, które zastosował do selekcji zdarzeń i trajektorii cząstek dla zmierzonych i wysymulowanych danych. Ilości wyselekcjonowanych zdarzeń i cząstek podane są w tabelach 4.1, 4.3 i 4.4. **Autor podkreśla, że ze względów technicznych nie było możliwe otrzymanie dużej statystyki wysymulowanych zdarzeń z detektorem PSD. Tutaj nasuwa się pytanie, jak to rzutuje na wyznaczenie wydajności tego detektora i centralności zderzeń.**

Analiza danych opisana jest w rozdziale piątym. Autor w sposób wyczerpujący przedstawił wszystkie kroki w celu otrzymania widm  $\pi^-$ . W szczególności przedstawił metodę (h-) selekcji  $\pi^-$  w oparciu o symulacje MC odpowiedzi detektora przy użyciu generatora zdarzeń EPOS1.99, poprawionego na produkcję cząstek dziwnych. Otrzymane współczynniki korekcji przedstawione są w funkcji  $p_T$  i  $y$  na rysunku 5.7. W tym rozdziale autor przedstawił również szczegółową analizę niepewności statystycznych i systematycznych, które nie przekraczają 10% (rys. 5.9). **Tutaj można było podać trochę więcej szczegółów dotyczących szacowania błędów dla kontrybucji III i IV.** W tym rozdziale, autor opisał również metody ekstrapolacji i integracji widm  $p_T$  i  $y$  w celu otrzymania krotności  $\pi^-$ .

W rozdziale szóstym przedstawiona została procedura wyznaczania średniej liczby zranionych nukleonów  $\langle W \rangle$  (centralności) dla zderzeń Ar+Sc. W tym celu autor wykorzystał generatory zderzeń EPOS1.99 (Epos á la WNM), oraz Glissando i HIJING, zawierające różne implementacje modelu zranionych nukleonów. Selekcja centralności wygenerowanych zdarzeń została przeprowadzona w oparciu o informację z detektora PSD, wykorzystując z uproszczonej symulacji odpowiedzi tego detektora. **Autor mógł podać więcej szczegółów dotyczącej tych symulacji, pokazując porównanie do pełnych symulacji.** Porównanie otrzymanych wartości  $\langle W \rangle$  dla tych generatorów przedstawione jest na rysunku 6.2. **Nie jest jasne z opisu, ale wnioskuję, że modele Glissando i HIJING wykorzystane zostały do porównania wyników z modelem EPOS (Epos á la WNM) i oszacowania błędów systematycznych dla  $\langle W \rangle$ .**



Wyniki pomiarów przedstawione są w rozdziale siódmym. Pokazane są podwójnie różniczkowe widma  $d^2n/dydp_T$  (rys. 7.1) i  $d^2n/dydm_T$  (rys. 7.2), widma  $dn/dp_T$  (rys. 7.3) i  $dn/dm_T$  (rys. 7.4) dla wszystkich pędów wiązki. Autor dopasował funkcję eksponentialną,  $f(m_T) = A \cdot m_T \cdot \exp(-m_T/T)$ , do widm masy transwersalnej w celu wyznaczenia parametru  $T$  (wielkości proporcjonalnej do temperatury źródła). Ponadto, wyznaczył  $\langle m_T \rangle$  wykorzystując widma  $m_T$  ekstrapolowane poza obszar kinematyczny pomiarów. Parametr  $T$  i  $\langle m_T \rangle$  wyznaczone w funkcji  $y$  pokazane są na rysunku 7.5 dla wszystkich pędów wiązki. Widma  $dn/dy$  prezentowane są na rysunku 7.6, a ich kształt najlepiej opisuje suma dwóch funkcji Gausa. Ostatecznie, autor wyznaczył średnią krotność mezonów  $\langle \pi^- \rangle$  integrując ekstrapolowane widma  $dn/dy$  (tab. 5.4), oraz wyznaczył  $\langle \pi \rangle = \langle \pi^- \rangle + \langle \pi^+ \rangle + \langle \pi^0 \rangle$  w oparciu o symulację EPOS ze względu na brak zmierzonych  $\pi^+$ .

W rozdziale ósmym autor porównuje otrzymane wyniki do innych pomiarów i przewidywań modelowych.  $\langle \pi \rangle$  porównuje do wyników otrzymanych przez innych członków kolaboracji NA61/SHINE przy pomocy komplementarnych metod analizy w oparciu o straty energii w komorach TPC ( $dE/dx$ ) oraz dodatkowo czasu przelotu (tof- $dE/dx$ ). **Metoda wykorzystana przez autora (h-) pozwala na pomiar  $\langle \pi \rangle$  w znacznie szerszym obszarze kinematycznym niż pozostałe metody (rys. 8.1).** Z drugiej strony różnice pomiędzy pomiarami wynoszą od 5% do 20%. **Tutaj zabrakło analizy pokazującej czy te różnice są w ramach błędów systematycznych pomiarów.** Ponadto, autor porównuje widma  $\langle m_T \rangle$  otrzymane dla  $\pi^-$  dla centralnych  $y$  do wyników otrzymanych w zderzeniach p+p, Be+Be (referencja) i Pb+Pb. Ponadto, porównał widma  $T$ ,  $\langle m_T \rangle$ ,  $y$ ,  $\sigma_{dn/dy}$  oraz  $\langle \pi \rangle$  dla tych systemów. **Tutaj brakuje trochę szerszej dyskusji tych interesujących wyników np. z czego wynikają widoczne podobieństwa pomiędzy tymi systemami.**

Autor porównał otrzymane widma z tymi wygenerowanymi przy pomocy generatorów EPOS, UrQMD i HIJING, wskazując na znaczne różnice w stosunku do zmierzonych rozkładów. **Wyniki otrzymane przez autora niewątpliwie przyczynią się do ulepszenia tych modeli. Dla kompletności, można było przedstawić trochę szerzej model UrQMD.**

Ostatecznie, autor porównuje szerokość rozkładów  $dn/dy$  ( $\sigma_{dn/dy}$ ) z wynikami modelu hydrodynamicznego Landaua, który przewiduje, że kształt rozkładu  $dn/dy$  opisuje funkcja Gausa. Posługując się tym modelem autor wyznaczył prędkość dźwięku w medium w zależności od energii. Otrzymane wyniki (rys. 8.19) nie pozwalają jednak na żadne konkluzje dotyczące śladów przejścia fazowego. Podobnie, rozkład  $\langle \pi \rangle / \langle W \rangle$  w funkcji  $F$  (rys. 8.20) nie wskazuje na ślad przejścia fazowego („kink”) przewidywany przez model SMES. Interesującą obserwacją jest, że system Ar+Sc na tym wykresie wygląda podobnie do N+N dla niskich energii na SPS, a przy dużych energiach wygląda podobnie do Pb+Pb. **Tutaj nasuwa się pytanie czy jest potencjalnie możliwość zredukowania błędów systematycznych tych pomiarów (więcej danych, szerszy zakres kinematyczny, ulepszone metody analizy, ...)?**

Podsumowując, mgr. Michał Naskręt wykonał pomiary produkcji mezonów  $\pi^-$  w zderzeniach Ar+Sc na SPS otrzymując interesujące wyniki, które niewątpliwie stanowią ważny wkład w badaniu materii jądrowej w warunkach bardzo wysokiej temperatury i gęstości. **Należy podkreślić, że wyniki jego pracy zostały opublikowane przez kolaborację NA61/SHINE, co świadczy o ich wysokiej jakości.** Pomimo tego, że otrzymane wyniki nie pozwalają na żadne konkluzje dotyczące śladów przejścia fazowego z pewnością przyczynia się do ulepszenia modeli teoretycznych produkcji cząstek. Przeprowadzona analiza i dyskusja



INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ  
im. Henryka Niewodniczańskiego  
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

---

otrzymanych wyników świadczą o bardzo dużej wiedzy autora i rozumieniu różnych aspektów eksperymentalnej fizyki jądrowej wysokich energii. **Praca ta w pełni spełnia wymagania stawiane na stopień doktora w dziedzinie fizyki eksperymentalnej, dlatego wnioskuję o dopuszczenie mgr. Michała Naskręta do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**

Lista błędów/uwag:

Abstract (par. 4): can't -> cannot

Streszczenie (first line): mezonów pi -> mezonów  $\pi^-$

Sec. 1.5 (par. 2): helpful in improving

Fig. 1.5: Shaded bands ...? only one band is visible

Sec. 2.4 (par. 3): Each module...

Sec. 3.1 average energy loss  $dE/dx$

Chap. 4 (par. 2): ...non-biasing and biasing cuts...? All cuts are biasing

Sec. 5.1 (par. 2): ...in Fig. 5.1

Sec 7.2 (par 2). ... A and T are presented .. ? There are data and fit presented

Fig 8.10, 8.11, missing systems in the legends (figures should be self-explained)

A.2.2 (eq. A.8, A.9, A.10) missing dots (.)

*Jacek Otwinowski*  
Jacek Otwinowski