

Recenzja rozprawy doktorskiej
dla Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej

Tytuł rozprawy: **Transverse momentum fluctuations in proton-proton
and beryllium-beryllium interactions at the SPS energies**

Autor rozprawy: **Mgr inż. Tobiasz Czopowicz**

Przedstawiona do recenzji praca doktorska opisuje istotną część poszukiwań punktu krytycznego przemiany fazowej materii oddziałującej silnie. Przedmiotem badań są fluktuacje hadronów emitowanych ze zderzeń p+p oraz Be+Be przy pędach 20 – 150 GeV/c na nukleon, zarejestrowanych przez spektrometr NA61 przy akceleratorze SPS w ośrodku CERN. Praca ma 84 strony, nie licząc kart przedwstępnych i napisana jest po angielsku. Rozpoczyna ją strona tytułowa, streszczenie w dwóch językach oraz spis treści. Składa się z 6 rozdziałów: pierwsze dwa wprowadzające, trzeci poświęcony układowi badawczemu, czwarty analizie danych. W rozdziale piątym znajduje się dyskusja wyników, zaś pracę zamyka rozdział podsumowania i bibliografia licząca 107 pozycji. Przedmiot pracy wraz z wynikami został opublikowany w pracy [1] w czasopiśmie recenzowanym.

W **Rozdziale 1.** Autor rozpoczyna od wprowadzenia w formie logicznego wywodu od cząstek elementarnych i oddziaływań fundamentalnych do plazmy kwarkowo-gluonowej (QGP), oraz opisu kolejnych generacji akceleratorów, dzięki czemu odkryto stan QGP i umożliwiono badanie przejścia fazowego między nim a gazem hadronów. Po krótkim opisie ewolucji relatywistycznego zderzenia jądrowego Autor omówił diagram fazowy materii oddziałującej silnie i zrzecznie opisał model SMES (Statistical Model of Early Stage) oraz przewidywane w jego ramach sygnatury przejścia fazowego do stanu QGP. Należało by jednak zaktualizować diagram fazowy ukazany na rys. 1.2 o szereg danych dla AGS i SIS (por. np. [2] i rys 7. w pracy [3]). Z kolei pojęcie punktu krytycznego drugiego rzędu można by wyjaśnić. Należy też zaznaczyć, że we wzorze $dn/dm_T \sim m_T \exp(m_T/T)$ w stopce na str. 7 zabrakło minusa w wykładniku (co zapewne jest literówką), natomiast nie zostało wyjaśnione, skąd ta zależność wynika – czy z modelu statystycznego przy uproszczeniu statystyki do modelu Boltzmanna z warunkiem $T \ll m$, czy z innych przesłanek. Natomiast pozytywnie należy ocenić objaśnienie na str. 9 oraz w innych miejscach pracy, które fragmenty eksperymentu i jego analizy zostały wykonane przez Autora lub przy jego wydatnym współudziale.

¹ A. Aduszkiewicz *et al.* (NA61 Collaboration), Eur. Phys. J. C 76, 635 (2016).

² A. Andronic *et al.*, Nucl. Phys. A 772, 167 (2006).

³ G. Agakishiev *et al.* (Hades Collaboration), Eur. Phys. J. A 47, 21 (2011).

Rozdział 2. Autor poświęcił metodyce poszukiwań punktu krytycznego (CP) na diagramie fazowym silnie oddziałującej materii. Wprowadzone zostały pojęcia wielkości intensywnych i ekstensywnych. Omówione zostały też skalowane momenty silniowe, uzależnione od szerokości przedziału histogramowania, przewidywane wartości indeksu intermitencji ϕ_2 oraz skalowana wariancja $\omega[X]$. Tak skonstruowane zmienne są wciąż czułe na naturalne fluktuacje objętości strefy zderzenia. Poszukiwania wielkości niezależnych od tego przyczynku do fluktuacji zaowocowały dwiema klasami zmiennych tzw. silnie intensywnych, tj. klasą Δ i Σ . W tym miejscu przydałoby się przedstawienie rozumowania wydzielającego przyczynki do fluktuacji, przedstawionego np. w pracy [4], które mogłoby być np. ujęte w krótkim dodatku na końcu pracy.

Następnie Autor rozpatruje efekty wpływające na rozmiar fluktuacji, takie jak prawa zachowania, gdzie dla małych systemów uwidaczniają się różnice pomiędzy układem kanonicznym a wielkim kanonicznym. Po opisie formalizmu Autor dokonał chronologicznego przeglądu poszukiwań fluktuacyjnej sygnatury punktu krytycznego w zderzeniach ultrarelatywistycznych, a następnie przeszedł do szerokiego przedstawienia wyników kolaboracji NA49 i NA61. W mojej opinii ta część pracy należy do jej zdecydowanie mocnych punktów. Autor wskazuje m. in. na dwa istotne przypadki pozytywne, tj. potęgowej zależności momentu Φ_2 od liczby przedziałów dla protonów oraz par $\pi^+\pi^-$ ze zderzeń układu pośredniego Si+Si przy energii wiązki 158A GeV. Opisuje też porównania doświadczalnych zależności wariancji ω od zmiennych termodynamicznych T i μ_B z przewidywaniami modelowymi przejścia przez CP – dla różnych energii wiązki i rozmiarów jąder, które wykazują brak sygnatury CP dla układu ciężkiego Pb+Pb oraz obserwację sygnatury dla układów lżejszych przy energii wiązki 158A GeV. Wprowadza też miary fluktuacji pędu poprzecznego Φ_{pT} , $\Delta[P_T, N]$ i $\Sigma[P_T, N]$, gdzie P_T jest sumą modułów pędów poprzecznych cząstek zaakceptowanych w zderzeniu. Przedstawia ich spodziewane zachowanie w zależności od założeń modelowych, a także porównanie między danymi a przewidywaniami, które wskazuje na możliwy sygnał od punktu krytycznego dla jąder o pośrednich masach na wykresie zależności Φ_{pT} od T , badanej dla sumy hadronów naładowanych.

Dalsze części pracy mają charakter doświadczalny. W **Rozdziale 3.** opisany został akcelerator SPS i układ badawczy NA61/SHINE. Prześladowana została w pierw drodze wiązki od źródła do spektrometru w zależności od nuklidu jonów i z uwzględnieniem opcji wiązki wtórnej ${}^7\text{Be}$. Następnie Autor opisał wszystkie istotne komponenty układu NA61 oraz tarcz, jak również przedstawił zasady działania trygierów wiązek (protonowej i berylowej) oraz interakcji z obiema tarczami. Pozytywnie należy ocenić przedstawienie wykresu identyfikacyjnego cząstek mierzonych w detektorach ToF (czasu przelotu). Zgłosiłbym tu jednak mankament – dla komór VTPC, omawianych na s. 33, wykres identyfikacyjny został umieszczony dopiero na str. 50 (rys. 4.12), w kontekście usuwania efektów ubocznych. Na s. 31 zauważyłem też niespójność w rzędach wielkości czasów charakterystycznych dla wiązki pomiędzy tekstem (skala ns) a rysunkiem (skala μs). Natomiast godne uznania jest wstawienie do wewnątrz VTPC jonowodu wypełnionego helem. To drugie rozwiązanie zmniejszyło o rząd wielkości tło od elektronów delta, co poszerzyło akceptancję w pobliżu pospieszności środka masy nukleon-nukleon. Na koniec

rozdziału Autor wymienił wstępne kroki analizy danych: rekonstrukcja torów w komorach VTPC, wyznaczenie wierzchołka zderzenia i kojarzenie torów z punktami w detektorze ToF. Wspomniano też o symulacji wydajnościowej, od generacji w ramach modelu EPOS, poprzez transport cząstek i dygitalizację odpowiedzi detektorów w środowisku GEANT, kończąc na rekonstrukcji jak w symulacji.

Rozdział 4. poświęcony jest analizie danych. Należy tu podkreślić znaczną objętość materiału, który przebadał mgr inż. T. Czopowicz. Na materiał ten składały się dane dla 5 energii wiązek (na nukleon). Przy każdej energii dane dotyczą 2 rodzajów wiązek (p i Be), przy czym zderzenia Be+Be zostały podzielone na 4 klasy centralności. Dodatkowo, w każdej z konfiguracji przeprowadzono pomiary z tarczą wstawioną w układ oraz bez tarczy. Ponadto dla każdego przypadku Autor przeprowadził obliczenia wydajnościowe na bazie generacji w modelu EPOS i transportu w środowisku GEANT. Objętość przeanalizowanego materiału jest więc nietypowa i imponująca. Co więcej, całość tych badań została opublikowana w pracy [1] w wysoko punktowanym recenzowanym czasopiśmie European Physics Journal C.

Autor, opisując kolejne etapy analizy, podzielił warunki selekcji na 2 kategorie: dotyczące prowadzenia wiązki przed tarczą (a w przypadku Be – do jej składu) oraz odnoszące się do interakcji z tarczą. Trzeba stwierdzić, że dbałość procedury na tym etapie jest wyraźnie widoczna i świadczy o wnikliwości doświadczalnej Autora. Ze względu na szereg niepożądanych domieszek w wiązce ^7Be , Autor dokonał filtracji off-line identyfikującej beryl na szeregu histogramów korelujących ładunki z detektora Z z ładunkami ze stacji S oraz BPD. Ponadto, po cięciu w oknie czasowym trygerowania, użyto dwóch technik eliminacji przypadków pile-up: poprzez hardware'owe rozdwojenie sygnału z detektora Z oraz odrzucenie poszerzonych przestrzennie sygnałów w detektorze BPD. Po rekonstrukcji torów nakłada się zwykle warunek na składową wierzchołka równoległą do osi wiązki. Przeprowadzenie pomiarów referencyjnych z wiązką przechodzącą swobodnie (bez tarczy; rys. 4.8) unaocznilo, że wspomniane cięcie wciąż pozostawiało reakcje uboczne – i umożliwiło ilościowe odjęcie pozostającego tła, opisane w rozdziale 4.4.1 i widoczne np. na rys. 4.23. Moim zdaniem jest to mocny punkt badań. Choć ostatecznie jego wpływ na wynik okazał się względnie niewielki (por. np. rys. 4.25), to fakt ten nie był wiadomy a priori, a jego zastosowanie usunęło potencjalne wątpliwości.

Następnie Autor omówił warunki selekcji prawidłowych torów narzucane na wartości zmiennych kontrolnych, uzasadniając wybór histogramami i referując tabelą ukazującą odsetek zaakceptowanych cząstek. Na tym etapie został też odjęty wkład do krotności od elektronów. Tu zgłosiłbym jedno zastrzeżenie: określenie odległości między zrekonstruowanym torem a wierzchołkiem zderzenia mianem „parametru zderzenia” wydaje mi się dość mylące, jako że pojęcie to w fizyce zderzeń ciężkich jonów jest zdefiniowane jako odległość między zderzającymi się jądrami w płaszczyźnie zderzenia.

Kolejnym punktem jest opis mapy akceptancja-wydajność, otrzymanej na podstawie symulacji. Zaletą jest tu podejście trójwymiarowe. Jednak słabością jest nieco zdawkowe omówienie tematu. Można by tu wybrać przykładowy wykres np. 2-wymiarowego rzutu mapy, aby dać ogólne pojęcie ilościowe o tej wydajności. Autor przedstawił za to porównanie pomiędzy eksperymentem a symulacją w rozkładach populacji na przestrzeni fazowej oraz rozkładach krotności cząstek naładowanych

(rys. 4.14-19). Pozwala to upewnić się, że odwzorowanie akceptancji geometrycznej jest dobre.

Na ostateczną korektę danych składa się odjęcie przyczynku od reakcji zachodzących poza tarczą oraz korekcja na wydajność na rejestrację zdarzeń o danej charakterystyce globalnej: ustalonej sumarycznej krotności, sumie pędów poprzecznych i kwadratów p_T . Należy tu zaznaczyć, że – jak podaje Autor – tak szczegółowa procedura korekcyjna została wykonana po raz pierwszy. Demonstracja jej skutku na rys. 4.25-26 jest kolejnym mocnym punktem w pracy, tym bardziej, że korekta wyraźnie wpływa na otrzymane rozkłady (por. różnica na rys. 4.25 między trójkątami a czerwonymi kółkami czy różnica na rys. 4.2 między pustymi a pełnymi kółkami).

Procedura określania niepewności statystycznych, w której wyznacza się dyspersję wyniku w efekcie podziału próbki na 30 podpróbek jest prawidłowa. Również koncepcja oceny niepewności systematycznej poprzez powtórzenie analizy z zawężonymi i poszerzonymi wartościami cięć jest zrozumiała. Mam jednak wątpliwość, czy w scenariuszu „poszerzonym” pełne otwarcie niemal wszystkich okien (por. środkowy rząd w tab. 4.4) nie jest zbyt szerokie? W końcu warunki te są uzasadnione i pełnią ważną rolę w procesie selekcji próbki. Pozostawiam jednak to pytanie otwartym, zwłaszcza że wyniki zostały już opublikowane w recenzowanym czasopiśmie.

W Rozdziale 5. Autor zestawia wyniki pracy, tj. miary fluktuacyjne Δ , Σ , Φ_{Pt} i ω dla wszystkich energii wiązek, oraz układów (p+p i Be+Be w czterech klasach centralności). Podanie wyników w formie zarówno wykresu, jak i tabel, jest dobrą praktyką, która ułatwia porównania modelowe. Najbardziej istotną obserwacją w pracy jest brak ich anomalnego zachowania w funkcji centralności i/lub energii wiązki jako spodziewanej sygnatury fluktuacji w pobliżu Punktu Krytycznego. Być może nawet przy najbardziej centralnym zderzeniu Be+Be układ był wciąż zbyt mały? Jednak sprawdzenie tego sygnału było właśnie przedmiotem badań, co Autor wykonał z dużą dbałością. Przebieg miar fluktuacyjnych na rys. 5.1 wskazuje, że są one średnio większe dla sumy cząstek naładowanych od miar wyznaczonych osobno dla cząstek ujemnych i dodatnich. Autor wskazuje, że możliwą przyczyną byłoby nierównomierne populowanie produktów rozpadów rezonansów. Za możliwą przyczynę otrzymanej prawidłowości $\Delta < 1$, $\Sigma > 1$ Autor podaje m.in. statystykę Bosego-Einsteina. Tu jednak brakuje informacji, czy dla badanych energii wiązek rzeczywiście bozony (π^\pm) dominują w emisji?

Za bardzo ważne uważam porównanie wyników z przewidywaniami modeli transportu EPOS i UrQMD, ukazane na rys. 5.2. Ponieważ przebieg punktów modelowych dla większości z wykresów okazał się niezgodny z danymi doświadczalnymi, to porównanie stanowi cenny sygnał dla koniecznego udoskonalenia opisu modelowego. Jest to istotna nowa wiedza wniesiona do zagadnienia. Również pouczającym elementem jest porównanie rezultatów z wcześniejszymi danymi dla NA49. Pierwotna rozbieżność między danymi obu eksperymentów została wyjaśniona koniecznością zawężenia akceptancji NA61 do NA49, po czym uzyskano zgodność przebiegów. Również porównanie dla najwyższej z energii wiązek danych nowych (p+p i Be+Be) z danymi dla układów większych (rys. 5.4) przekonuje, że wyniki p. mgr inż. Czopowicza stanowią spójne

dopełnienie profilu fluktuacyjnego, który traktowany jako całość mógłby świadczyć o przechodzeniu przy tej energii w pobliżu punktu krytycznego (choć pamiętać należy o obecnych niepewnościach doświadczalnych). Z kolei porównanie z danymi fluktuacyjnymi dla Ar+Sc otrzymanymi niedawno przez Kolaborację NA61 w zmiennych Δ i Σ nie wykazuje sygnału CP. Na koniec należy stwierdzić, że wybór odnośników w **Bibliografii** jest adekwatny do tematyki.

Reasumując, praca referuje analizę intermitencyjną dla zderzeń p+p i Be+Be (w czterech klasach centralności) dla szerokiego zakresu pędów wiązek (od 20 do 150 GeV/c na nukleon), wraz z porównaniami modelowymi i odniesieniem do dostępnych danych. Autor dołożył należytych starań przy oczyszczaniu próbki. Jego wyniki są spójne z innymi dostępnymi, a niezgodności z przewidywaniami modelowymi są nową, istotną informacją. Wymienione w recenzji mankamenty nie przesłaniają faktu, że przedstawiona rozprawa **spełnia wymagania** stawiane pracom doktorskim przez *Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki*. Dlatego wnioskuję o **dopuszczenie** mgr inż. Tobiasza Czopowicza do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Krzysztof Piasecki

