



dr hab. inż. Iwona Grabowska-Bołd  
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica

Kraków, 3 kwietnia 2018 roku

## **Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr Tobiasza Czopowicza pt. “Transverse Momentum Fluctuations in Proton-Proton and Beryllium-Beryllium Interactions at the SPS Energies”**

Rozprawa doktorska pana mgr Tobiasza Czopowicza “Transverse Momentum Fluctuations in Proton-Proton and Beryllium-Beryllium Interactions at the SPS Energies” przedstawia wyniki pomiaru fluktuacji pędu poprzecznego cząstek naładowanych w zderzeniach proton-proton przy pędach wiązki 20, 31, 40, 80 oraz 158 GeV/c oraz beryl-beryl przy pędach wiązki (na nukleon) 19A, 30A, 40A, 75A oraz 150A GeV/c dla czterech różnych przedziałów centralności 0-5%, 5-10%, 10-15% oraz 15-20%. Dane używane do analizy zostały zebrane przez eksperyment ze stacjonarną tarczą NA61/SHINE w Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych CERN. Fluktuacje pędu poprzecznego mierzone są w obu układach przy różnych energiach z użyciem silnie intensywnych zmiennych ( $\Delta[P_T, N]$ ,  $\Sigma[P_T, N]$  oraz  $\Phi_{pT}$ ) oraz skalowanej wariancji rozkładu krotności,  $\omega[N]$ , która nie jest zmienną silnie intensywną. Mierzone wielkości po raz pierwszy zostały poprawione na efekty od zderzeń poza tarczą oraz inne nieefektywności detektora i rekonstrukcji włączając niewydajność od trygera. Wyniki pomiarów zostały porównane ze strunowo-rezonansowymi modelami EPOS i UrQMD, jak również wynikami pomiarów z eksperymentu NA49 oraz wstępnymi wynikami NA61/SHINE ze skanu energii z wiązką argonową.

Ekspertyzomawiany w rozprawie doktorskiej przeprowadzono przy użyciu spektrometru NA61/SHINE, następcy eksperymentu NA49, umiejscowionego na przyspieszacz SPS w laboratorium CERN w Genewie. Głównym celem eksperymentu jest poszukiwanie punktu krytycznego na diagramie fazowym materii jądrowej poprzez pomiar produkcji cząstek, w szczególności ich fluktuacji, w szerokim spektrum obserwabli oraz energii zderzanych systemów. Fluktuacje pędu poprzecznego są ważnym narzędziem służącym do badania układu powstającego w wysokoenergetycznych zderzeniach jądrowych. Ich dogłębne poznanie jest kluczowe dla zrozumienia mechanizmu oddziaływań silnych przy ekstremalnie wysokich temperaturach i gęstościach. W tym kontekście pomiary pana mgr Czopowicza wpisują się świetnie w tą tematykę. NA61/SHINE ma też ciekawy program badawczy związany z badaniem oscylacji neutrin w eksperymencie T2K w Japonii poprzez pomiar produkcji pionów z repliki tarczy stosowanej w w.w eksperymencie.

Praca doktorska została napisana w języku angielskim i składa się z sześciu rozdziałów oraz bibliografii liczącej 107 pozycji. Rozprawę otwiera zwięzły wstęp wprowadzający do fizyki zderzeń ciężkich jonów i plazmy kwarkowo-gluonowej (z ang. Quark-Gluon Plasma, QGP) produkowanej w takich zderzeniach. Autor omawia też diagram fazowy materii silnie oddziałującej z punktem krytycznym będącym jego integralną częścią. Ponadto definiuje obserwable, które służą do badania QGP. Rozdział 2 poświęcony jest punktowi krytycznemu, którego poszukiwanie jest celem niniejszej rozprawy, jak również omawia narzędzie służące do poszukiwań punktu krytycznego, jakim są fluktuacje.

W Rozdziale 3 opisany został eksperyment NA61/SHINE, jego program fizyczny i aparatura detekcyjna włączając układ służący do filtrowania danych podczas ich zbierania tzw. tryger eksperymentu. Rozdział kończy opis procedury rekonstrukcyjnej i kalibracyjnej dla danych rzeczywistych oraz symulowanych. Opis w tekście do dolnego panelu Rysunku 3.3 opisującego strukturę wiązki w eksperymencie wydaje się nie w pełni poprawny "It was coming in two 5 ns long bunches in 200 ns intervals followed by a 8  $\mu$ s no-beam.". W szczególności przedział o długości 200 ns nie został na wykresie uchwycony (skala sięga tylko do ok. 30  $\mu$ s). Natomiast Rysunek 3.6 jest przykładem wykresu, który ma bardzo ubogą dyskusję w tekście. W szczególności czytelnik chciałby się dowiedzieć skąd pochodzą piki obserwowane dla  $z \sim -600, -570, -510$  cm i inne struktury obecne na wykresie. Podobna uwaga dotyczy Rysunków 4.8 i 4.22 w kolejnych rozdziałach rozprawy. W tym ostatnim przypadku nasuwają się pytania dlaczego kształty krzywych oznaczonych "R" są różne w obu zderzanych systemach.

Rozdział 4 zawiera opis metodologii analizy danych i stanowi wraz z rozdziałem 5 tą część rozprawy doktorskiej, gdzie Doktorant opisuje swoje własne badania naukowe. Autor dyskutuje tu selekcję nieelastycznych przypadków, kryteria wyboru śladów cząstek naładowanych do późniejszej analizy oraz omawia zagadnienie kalibracji centralności dla zderzeń beryl-beryl. Rozdział 4 kończy dyskusja szacowanych poprawek oraz niepewności, którymi obarczone są mierzone wielkości. **Na podkreślenie zasługuje fakt, iż ważnym wkładem Autora do analizy jest wypracowanie poprawek na efekty od zderzeń poza tarczą oraz uwzględnienie nieefektywności detektora, trygera i rekonstrukcji śladów. Tego typu poprawki wyznaczone są w analizie fluktuacji po raz pierwszy, a jak demonstrują Rysunki 4.25-4.27 większość z nich jest nie do zaniedbania.** Niestety z uwag krytycznych, które mam, wrażenie, które odnosi się po przeczytaniu Rozdziału 4 jest takie, iż wiele zagadnień i wykresów w tej ważnej części pracy potraktowanych jest w sposób bardzo uproszczony bez głębszej dyskusji. Odnosi się wrażenie, iż Autor spieszy się, żeby jak najszybciej przejść do prezentacji wyników w Rozdziale 5. I tak największe moje wątpliwości budzi użycie poprawek na niewydajność trygera, detekcji i rekonstrukcji śladów oszacowanych wyłącznie z użyciem próbki Monte Carlo (MC). Czytelnikowi nie przedstawia się żadnych argumentów, że takie poprawki obowiązują również dla danych eksperymentalnych. Przykładem takiego argumentu za słusznością użycia poprawki wynikającej z niewydajności rekonstrukcji śladów oszacowanej w oparciu o próbkę MC do danych mogłaby być dobra zgodność w zmiennych kontrolnych opisujących ślady pomiędzy danymi i MC. Wiele takich zmiennych prezentowanych jest na Rysunkach 4.16-4.19 dla obu systemów i wszystkich energii wiązek. Jednakże brakuje z tych porównań konkluzji czy MC opisuje dane w sposób zadawalający, czy też nie. Dobrą praktyką tutaj jest nałożenie punktów dla danych i MC na ten sam wykres i dodatkowo pokazanie ich stosunku. Natomiast w części dotyczącej niepewności systematycznych brakuje komentarza na temat niepewności, którymi obarczone są poprawki pochodzące od niewydajności trygera oraz od tła ze zderzeń poza tarczą. Z drobnych uwag edytorskich wymienię dwie: (i) Tabela 4.1 podaje liczbę przypadków po selekcji, która to selekcja zdefiniowana jest

dopiero w części 4.2.1 oraz (ii) na str. 48 parametr zderzenia zdefiniowany jest jako odległość pomiędzy punktem przecięcia śladu z płaszczyzną oddziaływania a punktem zderzenia. Podczas, gdy na Rysunku 4.11 rozkład parametru zderzenia rozciąga się do ujemnych wartości, co sugeruje, że nie może być on wielkością reprezentującą odległość.

W Rozdziale 5 przedstawione są wyniki i ich obszerna dyskusja. Prezentowane dane zawierają poprawki od tła ze zderzeń poza tarczą, jak również na niewydajność układu trygera, detektora i rekonstrukcji śladów. Dane nie są natomiast poprawione na ograniczoną akceptancję detektora, ale fakt ten jest wyraźnie podkreślony w pracy i jest uwzględniony podczas porównań z modelami teoretycznymi. Mierzone obserwabale ( $\Delta[P_T, N]$ ,  $\Sigma[P_T, N]$ ,  $\Phi_{pT}$  oraz  $\omega(N)$ ) prezentowane są dla zderzeń proton-proton oraz beryl-beryl dla wszystkich pięciu energii wiązki. Ponadto prezentowane są one dla hadronów naładowanych dodatnio, ujemnie oraz inkluzywnie bez rozróżnienia ładunku elektrycznego. Dodatkowo wyniki ze zderzeń beryl-beryl dyskutowane są dla czterech przedziałów centralności: 0-5%, 5-10%, 10-15% oraz 15-20%. Wszystkie mierzone wielkości starannie zebrane są w Tabelach 5.1-5.5 wraz z niepewnościami oraz na Rysunku 5.1 prezentującym  $\Delta[P_T, N]$ ,  $\Sigma[P_T, N]$ ,  $\Phi_{pT}$  oraz  $\omega(N)$  w funkcji  $\sqrt{s_{NN}}$ , centralności, ładunku wraz z porównaniem pomiędzy układami proton-proton i beryl-beryl. W ogólności dane pomiarowe odbiegają od wartości referencyjnych dla niezależnej produkcji cząstek oraz nie obserwuje się silnej zależności mierzonych wielkości od centralności. Zależność fluktuacji dla obu systemów od energii zderzenia nie wykazuje niemonotonicznych struktur spodziewanych dla punktu krytycznego. W podrozdziałach 5.2 i 5.3 prezentowane są porównania z modelami EPOS i UrQMD (5.2) oraz z dostępnymi wynikami z eksperymentu NA49 oraz NA61/SHINE dla innych zderzeń (5.3). EPOS jest w stanie dość dobrze opisać pomiar w zmiennej  $\omega(N)$  w układzie proton-proton. W pozostałych zmiennych takie porównanie wypada dużo gorzej. Natomiast model UrQMD w większości przypadków nie opisuje danych eksperymentalnych. Przy porównaniach z istniejącymi wynikami z wcześniejszych publikacji nasuwa się pytanie, czy w obu przypadkach porównujemy dane poprawione na niewydajności uwzględnione w tej pracy? Różnice, które obserwujemy częściowo mogłyby być usprawiedliwione brakiem uwzględnienia takiej poprawki we wcześniejszych wynikach.

Rozdział 6 rozprawy zawiera podsumowanie uzyskanych wyników, wnioski i plany na przyszłość.

Rozprawa doktorska pana mgr Czopowicza napisana jest bardzo starannie. Prezentowane wykresy są czytelne, zaopatrzone w legendę i opis. Na uwagę zasługuje fakt, iż w rozprawie doktorskiej wszystkie wykresy, które nie są autorstwa Doktoranta posiadają referencję do oryginalnej publikacji, z której pochodzą. Drobnym niedociągnięciem strony edytorskiej rozprawy jest częsty brak przedimków przed rzeczownikami. Ponadto Autor nie używa konsystentnie akronimów zdefiniowanych w tekście pracy np. dla "critical point" zaraz na początku pracy zdefiniowany jest akronim "CP", który sporadycznie używany jest w kolejnych rozdziałach rozprawy.

**Na podkreślenie zasługuje fakt, iż wyniki analizy fluktuacji w pędzie poprzecznym i krotności dla nieelastycznych zderzeń proton-proton dla wszystkich energii wiązki zostały opublikowane przez współpracę NA61/SHINE w recenzowanym czasopiśmie EPJ C76 (2016) 635. Artykuł w chwili obecnej ma 32 cytowania wg bazy INSPIRE, co świadczy o ponadprzeciętnym zainteresowaniu jego wynikami naukowców zajmujących się tą tematyką.**

Podsumowując, uważam, że rozprawa doktorska pana mgr Tobiasza Czopowicza zatytułowana "Transverse Momentum Fluctuations in Proton-Proton and Beryllium-Beryllium Interactions at the

SPS Energies” zawiera nowe, ciekawe i ważne wyniki dotyczące fluktuacji w pędzie poprzecznym w zderzeniach proton-proton oraz beryl-beryl w szerokim zakresie energii wiązek. Krytyczne uwagi zawarte w niniejszej recenzji nie umniejszają jej ogromnej wartości naukowej.

Recenzowana rozprawa doktorska spełnia warunki ustawowe stawiane rozprawom doktorskim stąd wnioskuję o dopuszczenie pana mgr Tobiasza Czopowicza do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

*Iwona Grabowska-Bołd*  
.....  
Iwona Grabowska-Bołd