

Krzysztof Piasecki
Uniwersytet Warszawski
Wydział Fizyki
E-mail: krzysztof.piasecki@fuw.edu.pl

Warszawa, 20.04.2021

Rada Dyscypliny Nauki Fizyczne
Uniwersytet Jagielloński

Recenzja pracy doktorskiej "Open charm measurements at the NA61/SHINE experiment at CERN SPS with the new Vertex Detector" autorstwa mgr Anastasii Merzlaya

Głównym zagadnieniem opisanym w rozprawie jest walidacja i zbadanie wydajności detektora SAVD (Small Acceptance Vertex Detector), ustawionego za tarczą układu badawczego NA61/SHINE, w ośrodku CERN. SAVD jest detektorem wysokiej granulacji, którego celem jest detekcja wierzchołków rozpadu mezonów D^0 (\bar{D}^0), powstałych podczas relatywistycznych zderzeń ciężkich jonów i rozpadających się w kanałach π -kaon ze współczynnikiem rozgałęzienia kilku procent.

Motywacją fizyczną tych badań jest brak danych doświadczalnych dotyczących produkcji mezonów D w obszarze energii, w którym oczekiwane jest przejście fazowe pomiędzy gazem hadronowym a plazmą kwarkowo-gluonową (QGP). W efekcie, przewidywania modelowe są rozbieżne. Aby to zobrazować, warto przytoczyć dwa skrajne – spośród sześciu zaprezentowanych w Pracy – przewidywania krotności produkcji par $c\bar{c}$ [c-cbar] w centralnych zderzeniach Pb+Pb przy pędzie wiązki 158 GeV/c w układzie laboratoryjnym: gdy według obliczeń modelu HSD liczba tych par powinna wynosić 0.08 na zderzenie, to model SMES przewiduje krotność 8 na zderzenie. Na skutek faktu, że materia w tych dwóch stanach różni się nośnikami, w fazie QGP przewidywane jest wzmocnienie krotności produkcji par $c\bar{c}$, w porównaniu do scenariusza braku przejścia fazowego. Dodatkowo, ekranowanie koloru pary $c\bar{c}$ wewnątrz materii hadronowej powinno utrudniać rozpad tej pary w kanale J/Psi na korzyść produkcji mezonów D (\bar{D}). Ponadto, modele statystyczne i dynamiczne różnią się sposobem przewidywanego skalowania krotności produkcji z centralnością zderzenia: gdy według modeli statystycznych krotność ta powinna być proporcjonalna do liczby nukleonów uczestniczących w zderzeniu, to modele dynamiczne przewidują skalowanie krotności z liczbą zderzeń nukleon-nukleon. Tak więc pomiar produkcji mezonów D daje szanse wskazania, który z tych scenariuszy modelowych realizuje Przyroda.

Struktura ogólna Rozprawy jest właściwa. Po stronach początkowych z wymaganymi oświadczeniami, streszczeniem i spisem treści, następuje rozdział wprowadzenia z klarownie wyłożoną motywacją fizyczną. Jednak w świetle użycia detektora PSD oraz opisywanych w rozdziale 7. problemów dotyczących centralności, przydałoby się objaśnienie sposobu wyznaczenia centralności.

Po opisie ogólnym układu badawczego NA61/SHINE następuje prezentacja detektora SAVD. Objaśnienie tego urządzenia zawiera szczegółowe informacje dotyczące jego wymiarów, struktury, sensorów, konstrukcji nośnej i schematu odczytu impulsów.

Rozdział 4. poświęcony jest algorytmom rekonstrukcji klastrów i torów. Ponieważ informacje z detektorów TPC i SAVD są wzajemnie powiązane, Autorka opisała algorytmy dla obu tych detektorów.

Język tego opisu jest zrozumiały dla czytelnika posiadającego wiedzę z dziedziny zderzeń jądrowych. Jednak być może pewne objaśnienie sposobu ekstrakcji niektórych obserwacji fizycznych (np. zależności straty energii w funkcji pędu) lub skrótego objaśnienia zasady Filtru Kalmana poszerzyłoby zrozumienie Pracy dla audytorium ogólniejszego. Z drugiej strony, należy stwierdzić, że Autorka zawarła objaśnienie Transformaty Hough'a, stanowiącej kluczową procedurę rekonstrukcji torów w detektorze SAVD. Całość procedur rekonstrukcji danych w tym detektorze została opisana szczegółowo. Składają się na to metody rekonstrukcji klastrów i torów, a następnie wyznaczenia wierzchołka. Dobrze objaśniona jest też koncepcja łączenia torów SAVD-TPC.

Jednakże opis równania 4.1 nie wydaje się klarowny. Dobrze aby wyjaśnić, jakim symbolem wyraża się w tym wzorze wspólne przesunięcie czasu ('fixed time offset') i jaki jest powód znaku ujemnego. Czy we wzorze na paraboliczny kształt toru $x(z)$ na dole strony 39, w członie A_2x^2 nie powinno być 'z' zamiast 'x'? Z kolei przy rekonstrukcji wierzchołka w SAVD przydatny byłby komentarz, dlaczego we wzorze na minimalizację $D(z)$ na stronie 41, wspomniany człon kwadratowy jest pominięty. Natomiast przy opisie badania wydajności sensorów SAVD, warto wyjaśnić, dlaczego najbardziej wewnętrzny obszar detektora pozostał martwy (por. rys. 4.15).

Ekstrapolacja torów w detektorze SAVD na pierwszą stację VTPC pozwoliła na badanie odchyień torów w płaszczyźnie poprzecznej do osi wiązki, co umożliwiło wytyczenie filtrów eliptycznych o szerokości 4 standardowych odchyień. Ukazana na wykresie 4.13 selektywność tego filtru jest bardzo silna, za co należą się słowa uznania. Również zademonstrowanie korelacji pomiędzy odchyleniem toru SAVD wzdłuż osi kąta polarnego, a składową podłużną wierzchołka pierwotnego, stanowi bardzo dobre potwierdzenie całościowe: precyzji pomiarowej detektora, połączonej z właściwymi metodami rekonstrukcji. Jest to również widoczne w zwartym i ostrym profilu rozkładu pozycji wierzchołka, widocznym w prawym panelu wykresu 4.5. Pozytywnie należy też ocenić objaśnienie poszczególnych maksimów w rozkładzie położenia wierzchołków w ujęciu szerszym.

Rozdział 5 poświęcony został procedurze kalibracji. W pierwszym kroku ukazany jest algorytm wyznaczania prędkości dryfu elektronów w komorach TPC na podstawie składowej pionowej wektora różnicy pomiędzy ekstrapolacją toru TPC do stacji ToF a punktem aktywacji („hitem”) w detektorze ToF. W tym miejscu byłoby korzystne opisanie zasady wydobycia z sygnałów informacji o czasie i pozycji aktywacji detektora przez cząstkę, a co za tym idzie, co w świetle powyższej procedury oznacza pomiar czasu dryfu i/lub jego składowej stałej ('offset'). Ponadto, z postaci układu równań przedstawionej na stronie 54 nie wydaje się, aby wyznaczenie $\Delta Y / Y_{\text{Real}}$ prowadziło wprost do postaci $(v_{\text{Reco}} - v_{\text{Real}}) / v_{\text{Real}}$, z powodu dodatkowego członu y_0 w mianowniku. Jednak na podstawie wykresów 5.2 i 5.3 należy odnotować, że całość procedury kalibracji wyraźnie działa. Należy tu też pozytywnie ocenić procedurę kalibracji pozycyjnej ramion detektora SAVD względem osi wiązki, na podstawie tejże wiązki. Z kolei względne położenie detektorów SAVD i TPC jest dostrajane za pomocą śledzenia wykresów korelacji pomiędzy pozycjami położenia wierzchołka zderzenia, zrekonstruowanymi przez oba te detektory, w każdej ze współrzędnych oddzielnie.

W rozdziale 6. przedstawiony został pomiar testowy detektora SAVD dla zderzeń Pb+Pb i Xe+La przy pędzie wiązki 150 GeV/c na nukleon. Opis rozpoczyna klarowne objaśnienie układu wyzwania danych oraz przytoczenie statystyki otrzymanych danych. Dalsza część rozdziału poświęcona została procedurze wyboru zdarzenia. Za największe osiągnięcie należy tu uznać zademonstrowanie dobrej rozdzielczości składowej podłużnej wierzchołka zderzenia. Na koniec, opisane zostało określenie klasy centralności dla wybranych zderzeń.

Pozostaje jednak kilka kwestii. Należałoby przynajmniej w skrócie opisać zasadę działania analizatora przebiegu impulsu (WFA). Wzmianka na temat otwartej na 2 μ s bramki powinna się znajdować w tekście, a nie w podpisie obrazka. Pojawia się też niejasność pomiędzy wykresami 6.9 a 6.10: podczas gdy na pierwszym rysunku maksimum rozkładu (przed zastosowaniem filtra na 20% centralność) znajduje się w okolicy 14500 GeV, to na lewym panelu rysunku 6.10 maksimum jest umieszczone przy 11000 GeV. Również, jeśli jako zasadę filtra ("cut") przyjąć zastosowanie warunku $E_{PSD} < 11500$ GeV (wartość dla Xe+La), wówczas pojawienie się sygnałów w prawym panelu rysunku 6.10 powyżej tej wartości wydaje się niezrozumiałe. Przydałoby się wyjaśnienie tej kwestii.

Kwestią kluczową dla wydobycia sygnału $D^0 + \bar{D}^0$ jest metoda selekcji par stanowiących kandydatów na produkty rozpadu tych mezonów w kanale πK (pion-kaon). Jest to metoda oparta na topologii torów. W rozdziale 7. Rozprawy Autorka przeanalizowała rozkłady pięciu odpowiednich parametrów oraz kwestię stosowania dwóch dodatkowych filtrów. Zastosowanie filtrowania przy wartościach progowych parametrów uzyskanych na podstawie dedykowanych symulacji (temat opisany w rozdziale 8) poskutkowało silną redukcją tła, na poziomie ponad pięciu rzędów wielkości. Rozkłady masy niezmienniczej par (K, π) ukazane na wykresach 7.6 i 7.7 obrazują postęp tej redukcji dla kolejno stosowanych filtrów. W mojej ocenie wybór zmiennych jest tu całkowicie adekwatny. Nota na marginesie: być może zbadanie rozkładu kąta otwarcia (zamiast warunku, aby tory w parze pochodziły z odmiennych ramion detektora SAVD) mogłoby jeszcze polepszyć widoczność sygnału? Ostatecznie uzyskano w danych prawdopodobne maksimum odpowiadające sygnałowi $D^0 + \bar{D}^0$ na poziomie sygnał / niepewność równym 2.8 (dla Xe + La) oraz 2.0 (dla Pb + Pb). Należy odnotować to z uznaniem, gdyż stanowi to indykację faktycznego sygnału. Jednocześnie Autorka zasadnie powstrzymała się od twierdzeń o obserwacji faktycznego sygnału. W zamian za to, korzystając z podejścia Bayesowskiego, oszacowała ona górny prób krotności, dzięki któremu wskazała, że przewidywania modelu SMES w tym zakresie nie są prawdopodobne.

Wypada jednak poruszyć kilka spraw. Jeżeli za rezygnacją z określenia typu cząstki (co pozwoliłoby na odrzucenie protonów i cięższych fragmentów, które dla par K, π stanowią tło) stoją określone argumenty, to należałoby je przedstawić. W Tabeli 7.1, precyzującej wartości brzegowe zmiennych filtrujących, obszary akceptowane powinny zostać zaznaczone znakami \leq lub \geq . Należy też jednoznacznie wypisać i objaśnić wzory modelujące sygnał i tło na stronie 76 (w porównaniu do opisu w tekście, w obecnym wzorze opisującym sygnał występują 3 błędy typu literówka, a tło jest luźno scharakteryzowane jako 'exponent'). Ponadto, w miejscu, w którym szerokość maksimum (0.012 GeV – nie MeV) jest porównana do wyników symulacji, porównanie to powinno brać pod uwagę niepewności. Powinna zostać również rozważona, przynajmniej w skrócie, hipoteza zerowa („czy prawdopodobny jest brak sygnału?”).

Etapem badań nieodłącznie związanym z wydobyciem sygnału są symulacje odpowiedzi układu badawczego, oparte o szeroko rozpowszechniony i uznany pakiet Geant. Symulacje te zostały wyczerpująco opisane w Rozdziale 8. Procedura ta wymagała prawidłowego zakodowania struktury detektora SAVD oraz jego digitizera (algorytmu tłumaczącego aktywację detektora na zapisaną na dysku informację o sygnałach) – i osadzenia tych kodów w ogólnej strukturze pakietu do analizy danych z układu NA61/SHINE. Trzeba zwrócić uwagę, że stanowi to zazwyczaj trudny i żmudny etap pracy. W tym kontekście warto wskazać, że kolejne histogramy walidacyjne, ukazane w podrozdziale 8.3.1 Pracy demonstrują, że pracę tą Autorka wykonała w sposób prawidłowy. Pewne niewielkie niezgodności pomiędzy histogramami dla torów wysymulowanych i prawdziwych (np. wykresy 8.7 i 8.11) są znanym mankamentem ujawniającym się w symulacjach wirtualnych odwzorowań układów badawczych i nie podważają one wiarygodności ani jakości pracy Autorki. W tym rozdziale opisane

zostało też badanie przebiegów zmiennych filtrujących zdarzenia pod kątem par kaon-pion, opartych o topologię torów (por. wykresy 8.22). Śledząc w sposób systematyczny zachowanie się stosunku sygnału do szumu (S/B) pod wpływem różnych wartości brzegowych tych zmiennych, znaleziono wartości optymalne, maksymalizujące ten stosunek. Jednocześnie, Autorka oddzielnie przedstawiła mapy akceptancji geometrycznej (obszaru zmiennych kinematycznych obejmowanego przez detektor) oraz mapę wydajności rekonstrukcji torów. Na koniec rozdziału pani mgr Merzlaya porównała przewidywania kilku obliczeń w ramach modeli transportu, przefiltrowane przez wydajność układu badawczego – z otrzymanym doświadczalnie profilem danych.

Spośród niewielu kwestii pozostających do objaśnienia w tym rozdziale, należy wskazać, że na rysunku 8.22 nie jest jasne, czy stosunek sygnału do szumu jest wyznaczony z danych w ramach wąskiego okna dookoła wartości brzegowej, czy traktując dziedzinę jako półprostą zaczynającą się od tej wartości. Również, kształt S/B wydaje się nasycać nawet tam, gdy sygnał zanika (np. rozkłady zmiennych DCA lub D; również w świetle wykresu 7.4). A może został wykreślony stosunek sygnału do całości, zamiast sygnału do tła? Proszę o wyklarowanie tych niejasności. Jeśli chodzi o umieszczenie krotności przewidywanych przez modele transportu PHSD i SMES (podrozdział 8.4.4) wydaje się być bardziej naturalne umieszczenie ich w jednym z rozdziałów wprowadzających Pracy.

Rozprawę zamyka rozdział Dyskusji, w którym przewidywania modelowe podlegają prawidłowej konfrontacji z (prawdopodobnym) sygnałem doświadczalnym, dla którego rozkład kinematyczny został podjęty z dwóch modeli transportu: AMPT i PHSD. Następnie, Autorka rozpatruje nadchodzące plany współpracy NA61 odnośnie pomiarów mezonów $D^0 + \bar{D}^0$ za pomocą proponowanego nowego detektora pod nazwą Vertex Detector (VD). Warto odnotować, że owa intencja poszerzenia akceptancji została wsparta dedykowaną symulacją fantomu detektora VD w ramach środowiska Geant. Na koniec, w Pracy umieszczono Bibliografię. Zarówno przedstawiony wybór literatury, jak i składnię należy uznać za właściwe.

Poniżej znajduje się lista ogólnych kwestii typograficznych związanych z Pracą:

- Większość równań nie jest ponumerowana.
- Niektóre równania nie zostały wydzielone z tekstu (np. podstawa pomiaru masy na str. 32).
- W szeregu przypadków odnośnik do wykresu zamieniony został na numer aktualnego podrozdziału.
- W niektórych przypadkach rozmiary podpisów osi są zbyt małe (np. wykresy 4.6 i 4.8).
- Niekiedy kolejność słów w zdaniu cechuje zamieniony szyk (np. na stronie 37: "The z position is fitted using extrapolated to the target region TPC tracks")

Te kwestie nie znoszą ogólnej oceny, że analiza fizyczna zademonstrowana przez Autorkę jest rzetelna i prawidłowa. Reasumując, pani mgr Merzlaya przeprowadziła badania prototypowe detektora SAVD, nadzorowała jego testy na wiązkę, zaprogramowała kod znajdujący tory w tym detektorze, wykalibrowała dane z pomiaru testowego. Następnie Autorka zrekonstruowała rozkłady sygnału i szumu, zakodowała w wirtualnym środowisku Geant geometrię detektora i stosowny digitizer oraz wyznaczyła mapę wydajności SAVD.

Podsumowując, stwierdzam iż przedstawiona do recenzji praca mgr. Anastazji Merzlaya w pełni spełnia warunki ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym doktora dlatego też wnoszę do Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie o dopuszczenie mgr. Anastazji Merzlaya do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Krzysztof Piasecki

