

Prof. Antoni Szczurek
Instytut Fizyki Jądrowej
im. Henryka Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
ul. Radzikowskiego 152
31-345 Kraków

Recenzja rozprawy doktorskiej dr Anny Kozuch

W swojej pracy zatytułowanej „Badania produkcji mezonów π w reakcji $p + p \rightarrow p + p + \pi^0$ przy energii wiązki 1.25 GeV za pomocą spektrometru HADES” autorka przedstawiła szczegółowe analizy reakcji $pp \rightarrow pp\pi^0$ oraz wybrane analizy dotyczące reakcji $pp \rightarrow pn\pi^+$. Przedstawione analizy są, jak pokazano i przedyskutowano w pracy, użyteczne w interpretacji wcześniejszych wyników dla reakcji $pp \rightarrow ppe^+e^-$. Przedstawiona analiza, dotycząca zarówno pomiaru, analizy danych i interpretacji wyników koncentruje się na energii wiązki $E_p = 1.25$ GeV. Przy tej energii otwarte są tylko kanały jednopionowe, co wydaje się być raczej ułatwieniem, gdyż upraszcza interpretację wyników.

Praca napisana jest w języku polskim. Składa się z dziewięciu rozdziałów.

Rozdział pierwszy jest wprowadzeniem do pracy i przedstawia również plan rozprawy. Autorka nawiązuje do głównego tematu badań grupy badawczej HADES jakim było badanie produkcji dileptonów i ewentualna modyfikacja kształtu linii widmowych rezonansów wektorowych w zderzeniach jądro-jądro, a więc w obszarze dużych gęstości materii jądrowej. Proste przewidywania sugerowały duży efekt zmiany pozycji rezonansu ρ^0 lub ewentualnie jego poszerzenia. Wcześniejsze wyniki eksperymentalne wydawały się to potwierdzać. Z biegiem czasu uświadomiono sobie, że naiwna interpretacja modyfikacji linii widmowych jest przedwczesna i należy przejść do badania procesów elementarnych. Wkrótce okazało się że nawet tam nie do końca rozumiemy rozkłady masy niezmienniczej. Dane eksperymentalne zasugerowały między innymi duży przyczynek pochodzący od tak zwanych rozpadów Dalitza izobaru Δ : $\Delta \rightarrow Ne^+e^-$. Zrodziła się więc konieczność zrozumienia jak duży jest przekrój czynny na produkcję rezonansu Δ . Badanie reakcji z jednym pionem jest tutaj bardzo użyteczne.

Rozdział drugi jest wstępem teoretycznym do przedstawionej rozprawy. Autorka przedstawia aktualne zrozumienie badanych reakcji. W tym sensie jest to przedłużenie wstępu. Ten wstęp koncentruje się na produkcji dileptonów. Autorka omawia główne mechanizmy produkcji par dileptonów, biorąc pod uwagę rozpady Dalitza mezonów π^0 , η i ω jak również rozpady Dalitza barionów Δ czy $N(1535)$, dwuciałowe rozpady rezonansów wektorowych, czy procesy bremsstrahlungu. We wstępie przedstawiono również wyniki dla zderzeń $C + C$ przy

energii 1-2 AGeV. W tym kontekście autorka omawia różne podejścia teoretyczne takie jak HSD, UrQMD, IQMD czy RQMD, które używane były do interpretacji danych z HADESa czy DLS. Szczególną uwagę poświęcono produkcji rezonansu $\Delta(1232)$. Autorka rozważa również wcześniejsze badania eksperymentalne poświęcone kanałom jednopionowym z BNL, LAMPF, KEK, PNPI czy COSY. Osobny podrozdział poświęcono procesowi/mechanizmowi wymiany jednego pionu, który wydaje się być dominujący, przynajmniej w rozważanym zakresie energii. Przedyskutowano relacje izospinowe wynikające z tego podejścia. Omawiana jest zależność od energii jak i rozkłady kątowe. Nieco więcej uwagi poświęcono opisowi fal parcjalnych w zastosowaniu do kanałów końcowych $pp\pi^0$ i $pn\pi^+$. Przedstawiono wyniki takich analiz dla wcześniejszych eksperymentów. Trochę uwagi poświęcono też kanałom dwupionowym, które zaczynają być istotne dla nieco wyższych energii.

Rozdział trzeci poświęcony jest eksperymentowi HADES. Autorka przedstawia program badawczy, jak i budowę spektrometru HADES. Program badawczy był już w dużej mierze poruszony we wstępie jak i w części teoretycznej. W części dotyczącej spektrometru HADES autorka najpierw opisuje budowę ogólną, a następnie przechodzi do szczegółów związanych z detektorem promieniowania Czerenkowa RICH, systemem rejestracji cząstek, systemem META oraz systemem wyzwiania danych. Jeśli chodzi o detektor RICH omówiono zarówno zasadę działania detektorów Czerenkowa, jak i konkretne rozwiązanie używane przez grupę badawczą HADES. Na system rejestracji torów cząstek składają się magnesy toroidalne i cztery moduły wielodrutowych komór dryfowych (MDC). Omawiany jest cały system komór wielodrutowych, jak i budowa poszczególnych modułów. Autorka przedstawia szczegóły akceptancji kątowej jak i konkretne realizacje jeśli chodzi o używane gazy robocze. Skład roboczy używanych gazów zmieniał się w czasie. W skład systemu META wchodzi detektory czasu przelotu TOF i TOFINO oraz detektor kaskady elektromagnetycznej. Detektory TOF oraz TOFINO pozwalają mierzyć czas przelotu cząstek w zakresie kątów polarnych 44° - 88° i 18° - 45° . Detektor TOFINO ma znacznie mniejszą granulację w stosunku do detektora TOF. Omówiono zasadę działania detektora preshower. System wyzwiania oparty jest na dwóch poziomach wyzwiania systemu akwizycji danych, zwanych LVL1 i LVL2. Na poziomie pierwszym żąda się odpowiedniej krotności cząstek naładowanych. Poziom drugi używany jest do znalezienia kandydatów na pozyton i elektron, przy pomocy sygnatur elektro-nowych w detektorach RICH. Szczegółowo omówiono zasadę ich działania. W ostatnim podrozdziale omówiono pewne własności charakterystyczne i istotne dla eksperymentu przy energii kinetycznej 1.25 GeV. Przedstawiono niektóre charakterystyki, takie jak intensywność wiązki, parametry tarczy. Przedstawiono ponadto warunki logiczne niezbędne do pomiaru konkretnych kanałów końcowych.

Rozdział czwarty poświęcony jest symulacją komputerowym używanym do

interpretacji wyników eksperymentalnych. Symulacje te oparte są o generator PLUTO. Nie do końca rozumiem, czy autorka rozprawy doktorskiej w tym uczestniczyła. Proszę o ewentualne wyjaśnienie podczas obrony. W przypadku używanym przez autorkę uwzględniono rezonans Δ i rezonans Ropera $N(1440)$. Program/generator PLUTO dodaje te dwa przyczynki niekoherentnie. W zasadzie te dwa procesy mogłoby interferować w sensie kwantowo-mechanicznym. Wyżej wzbudzone rezonanse i inne procesy są zaniebane. W badaniach mechanizmu reakcji $pp \rightarrow pp\pi^0$, w kontekście pomiarów na COSY, uwzględniano również inne mechanizmy nierezonansowe, takie jak wymiana „ciężkich mezonów” Trochę brak mi dyskusji dlaczego w tym konkretnym przypadku są one zaniebane. Rozważany model jest bardzo prosty. Krótko opisano pewne parametry używane w symulacjach. Szczegółowo opisano model wymiany jednopionowej do produkcji rezonansu Δ . Uwzględniono wzbudzenie zarówno pocisku, jak i tarczy. Bardziej szczegółowo omówiono w jaki sposób zaimplementowany został rozkład kątowy rozpadu izobaru Δ . W rozważaniach tych tak zwany współczynnik anizotropii jest traktowany jako parametr. Zaniebano również interferencję dwóch diagramów (t i u), co jest trochę niepoprawne. Być może część niezgodności danych eksperymentalnych z przewidywaniami PLUTO, dyskutowana później, jest związany z ewentualną interferencją obu wkładów. Bez uwzględnienia tej interferencji trudno to powiedzieć. Za współczynnik anizotropii przyjęto $A = 0.66$, bez żadnego komentarza. Poproszę o komentarz podczas obrony. Rezonans Ropera jest traktowany w sposób bardzo uproszczony, zakładając rozpad izotropowy. Przedyskutowano szczegółowo relacje izospinowe dla poszczególnych członów rezonansowych, wynikające z werteksów na produkcję i rozpad izobaru Delta. W rozdziale 4.4 omówiono kinematykę procesów rezonansowych. Denerwujące jest stwierdzenie żargonowe typu „wykres Dalitza w 4π ” czy rażąco brzydkie: „z symulacji w 4π kanałów reakcji” czy na przykład: „po właściwym przysposobieniu danych”. Autorka pokazała wiele różnych dwuwymiarowych diagramów Dalitza separując oba mechanizmy rezonansowe (z rezonansem Δ czy rezonansem Ropera) dla reakcji $pp \rightarrow pp\pi^0$. Przedstawiono też zależności dwuwymiarowe typu pęd-kąt polarny, oddzielnie dla obu reakcji rezonansowych. Podrozdział 4.5 poświęcony jest akceptancji i wydajności. Trochę brakuje mi w tekście definicji tych obu pojęć. Poproszę o przedstawienie podczas obrony takich definicji. Autorka przedstawiła dwuwymiarowe rysunki właśnie akceptancji w przestrzeni kątów polarnego i azymutalnego dla różnych rodzajów cząstek. Przedstawiona akceptancja jest bardzo wysoka w szerokim zakresie kątowym co świadczy o dobrej jakości spektrometru HADES. Na rysunku 4.13 świetnie widać strukturę heksagonalną spektrometru HADES. Nie bardzo podoba mi się określenie: „poprawienie danych eksperymentalnych na niewydajność detektorów”, ale to może rzecz względna. Krótki rozdział poświęcono rozdzielczosci pędowej, niestety nie zilustrowano tego żadnym rysunkiem. W rozdziale 4.7 uwzględniono akceptancję i wydajność pokazując różne rozkła-

dy dwuwymiarowe. Brak jednak, co byłoby początkujące, porównania do wyników bez uwzględnienia akceptancji i wydajności. Na większości rysunków w tym rozdziale słabo lub w ogóle nie wyjaśniono jaka wielkość (wielkości) są pokazane w trzecim wymiarze przy pomocy kolorów. W opisie tego co oznaczają kolory nie ma jednostek. Czy to jest zrobione poprawnie?

Rozdział piąty poświęcony jest procedurze analizy danych. W podrozdziale 5.1 szczegółowo opisano procedurę identyfikacji cząstek. Błędne wydaje mi się zdanie: „.....rekonstrukcja trajektorii lotów poszczególnych cząstek w polu magnetycznym (znana jako polaryzacja)”. Procedura jest kilkustopniowa. Do analizy używa się między innymi detektorów MDC i RICH, TOF i TOFINO. Podano kryterium jakości dopasowania do punktów trafień w detektorach. Autorka zauważa że podczas eksperymentu detektor START był nieobecny. Na rysunku 5.1 pokazano dwuwymiarowy rysunek intensywności zdarzeń w funkcji prędkości i pędu cząstek. Widzimy wyraźnie rozdzielenie protonów i naładowanych pionów. Podrozdział 5.2 poświęcony jest selekcji zdarzeń elastycznego rozpraszania: $pp \rightarrow pp\pi^0$ oraz $pp \rightarrow pn\pi^+$. Zdarzenia elastyczne identyfikuje się szczególnie dobrze na rysunku dwuwymiarowym $|\phi_1 - \phi_2|$ i $\tan\theta_1 \tan\theta_2$, co świetnie pokazuje rysunek 5.2. Na rysunku 5.3 pokazano odpowiednie rzuty na każdą z osi. Rysunek w masie brakującej dwóch pionów pokazuje wyraźny pik przy masie niezmienniczej równej zero, co odpowiada elastycznemu rozpraszaniu. Na rysunkach brakującej masy dwóch protonów widać również podniesienie odpowiadające dodatkowej produkcji mezonu π^0 . Tego typu rozkłady mogą więc być użyte do selekcji kanału $pp\pi^0$. Pokazano również szereg rozkładów dwuwymiarowych i opisano sposób selekcji. Na rysunku 5.12 pokazano rozkład masy brakującej układu $p\pi^+$. Bardzo wyraźnie widać na nim pik odpowiadający produkcji neutronu. Nakładając bramkę logiczną na brakującą masę $p\pi^+$ można więc wyodrębnić kanał końcowy $pn\pi^+$. Osobno omówiono pewne elementy związane z akceptancją i wydajnością oraz poprawki na wydajność (czasami autorka pisze poprawki na niewydajność) i akceptancję. W podrozdziale 5.4 wyjaśniono w jaki sposób dokonuje się absolutnej normalizacji przekroju czynnego w stosunku do elastycznego rozpraszania. Wartości przekroju czynnego dla rozpraszania elastycznego została wzięta z precyzyjnych pomiarów grupy EDDA@COSY. Ostatni podrozdział dotyczy oszacowania niepewności pomiarowych. Wyniki przedstawiono w % w tabeli 5.1 dla reakcji $pp \rightarrow pp\pi^0$ i tabeli 5.2 dla reakcji $pp \rightarrow pn\pi^+$. Rozumiem, że przedstawione niepewności dotyczą całkowitych przekrojów czynnych wycalkowanych po przestrzeni fazowej. Niestety nie zostało to jasno powiedziane. Rozumiem, że niepewności pomiarowe w niektórych częściach przestrzeni fazowej mogą być dużo większe.

W rozdziale szóstym przedstawiono ostateczne wyniki uzyskane podczas analizy danych. Główne wyniki dotyczące reakcji $pp \rightarrow pp\pi^0$ przedstawiono w podrozdziale 6.1. Wyniki rozpoczyna wykres Dalitza w funkcji kwadratów mas niezmienniczych w dwóch podukładach $p\pi^0$. Obecność rezonansu Δ nie ulega

wątpliwości. Na wielu rysunkach pokazano rozkłady masy niezmienniczej $p\pi^0$. Dodatkowo pokazano wyniki uzyskane przy pomocy generatora PLUTO, które stosunkowo dobrze opisują dane eksperymentalne. W symulacjach uwzględniono produkcję i rozpad rezonansu $\Delta(1220)$ i rezonansu Ropera. Uwzględniono również oddziaływanie końcowe (FSI) dwóch protonów, niestety nie demonstrując efektu w sposób przekonujący. Nietrafiony jest tytuł rozdziału "Produkcja mezonu bezpośrednio z przestrzeni fazowej". Rozumiem, że chodzi tu bardziej o produkcję kanałów z jednym mezonem, zakładając stały element macierzowy. Fit do danych zezwala na taki, moim zdaniem nieco sztuczny, przyczynek. W rzeczywistości nie ma procesów dynamicznych dla których element macierzowy byłby stały. Moim zdaniem jest to próba odpowiedzi na pytanie czy brakuje jakichś innych (nierezonansowych) przyczynków. Autorka czasami pokazuje wyniki ze "standardowymi" parametrami a czasami wyniki przenormalizowane do danych. Ciekawe są rozkłady kątowe w układzie środka masy. Teoretycznie rozkłady te powinny być symetryczne względem $\cos(\theta)=0$. Fakt, że nie są, sugeruje efekty akceptancji lub tym podobne. Autorka zauważa jednak, na przykład na rysunku 6.5, że uwzględniono macierze akceptancji. Wydaje się więc, że nie wszystkie efekty są pod kontrolą, lub nie wszystkie efekty są uwzględnione. Trochę brakuje dyskusji tego problemu. Nie podoba mi się używanie pojęcia "krotność zdarzeń", które zwykle oznacza coś innego niż po prostu przekrój czynny. Aby uzyskać lepszy opis danych autorka modyfikuje standardowy parametr formfaktora używany w generatorze PLUTO. To zmienia i poprawia nieco opis danych. Nie bardzo podoba mi się uwzględnienie modyfikacji kształtu rozkładów, a pozostawienie absolutnej normalizacji jako wolnego parametru. Parametr obcięcia formfaktora wpływa zarówno na kształt jak i na normalizację i z punktu widzenia fizyki rozdzielanie tych kwestii jest nieuzasadnione. Modyfikacje parametru formfaktora nie rozwiązują kwestii asymetrii. Nie rozumiem, co jest pokazane na rysunku 6.10 i proszę o wyjaśnienie tego podczas obrony. Czy tu teoretycznie powinna być symetria względem $\cos = 0$? Zarówno dane jak i krzywe wykazują asymetrię. Na rysunkach 6.11 do 6.18 pokazano rozkłady masy niezmienniczej $p\pi^0$ dla różnych przedziałów cosinusa kąta protonu w układzie środka masy. Dla niektórych przedziałów zgodność obliczeń z danymi jest lepsza, a dla innych gorsza. Poproszę o omówienie tego faktu podczas publicznej obrony. Ciekawe są również rozkłady kątowe pionów w środku masy systemu $p\pi^0$. Nie jest dla mnie jasne, czy dane lub obliczenia są poprawione o akceptancję. Na jednym z rysunków rozkład został zsymetryzowany. Nie uczyniono tego dla wcześniej diskutowanych rozkładów kątowych. Ale zrobiono to dla rozkładu pionów neutralnych w układzie środka masy całego systemu (patrz rysunek 6.21). Niestety, nie rozumiem, jaki rozkład kątowy pokazany jest na rysunku 6.23. Również nie jest dla mnie jasne, dla których rysunków uwzględniono akceptancje, a dla których nie. Podjęto próbę policzenia rozkładów dla pełnej przestrzeni fazowej posiłkując się symulacjami przy pomocy

generatora. Poprawka z tego wynikająca, jak pokazano na rysunku 6.24, jest ogromna. Notacja użyta do podpisu osi horyzontalnej na rysunku 6.25 nie jest czytelna. Podpis pod rysunkiem tego nie ułatwia. Na rysunku 6.28 pokazano rozkład masy niezmienniczej $p\pi^0$ ekstrapolowany do pełnej przestrzeni fazowej, wraz z wynikiem symulacji. Ale czy zgodność nie wynika przypadkiem z faktu, że ekstrapolacja odbywała się przy pomocy symulacji a czynnik korekcyjny jest ogromny (patrz rysunek 6.29). W Tabeli 6.1 zestawiono całkowite przekroje czynne dla reakcji $pp \rightarrow pp\pi^0$ oraz oszacowano niepewności pomiarowe. W podrozdziale 6.2 porównano wyniki dla dwóch różnych reakcji: (a) $pp \rightarrow pp\pi^0$ i (b) $pp \rightarrow pn\pi^+$. Porównano wykresy Dalitza oraz rozkłady mas niezmienniczych pion-nukleon. W Tabeli 6.32 porównano całkowite przekroje i związane z tym niepewności dla obu procesów. Wyniki uzyskane przez grupę badawczą HADES dla obu reakcji porównano z danymi światowymi na rysunku 6.32. Dane HADESA dobrze wpisują się w ogólne tendencje, co uwiarygadnia te dane. Podrozdział 6.3 poświęcony jest anizotropii produkcji π^0 . W zderzeniach ciężkich jonów badana jest anizotropia w układzie środka masy. Autorka dyskutuje rozkład kątowy π^+ dla zderzeń $C + C$. Autorka rozważa anizotropię dla kilku przedziałów pędu π^0 w układzie środka masy. Już z rysunków widać wyraźnie różne kształty. Wartości anizotropii podsumowane są w Tabeli 6.3. Nie do końca rozumiem, na ile standardowe wyniki z generatora zgadzają się z tymi uzyskanymi eksperymentalnie. Poproszę o wyjaśnienie podczas publicznej obrony. Być może rysunek 6.39 jest odpowiedzią na moje pytanie, ale nie rozumiem czy w tym przypadku są to wyniki ze standardowymi parametrami czy jakaś próba dopasowania do danych.

Rozdział siódmy poświęcony jest rozpadowi elektromagnetycznego rezonansu Δ . Chodzi tu o przejście $\Delta \rightarrow N\gamma^*$. Autorka przedstawia strukturę werteksu wynikającą z ogólnych zasad (głównie symetrii) i krótko przedstawia kilka konkretnych modeli umożliwiających rachunki. W podrozdziale 7.1 przedstawia podstawy symulacji dotyczących produkcji i elektromagnetycznego rozpadu izobaru Δ . W kolejnym podrozdziale przedstawia metody rekonstrukcji procesu $pp \rightarrow ppe^+e^-$. Przedstawia rozkłady brakującej masy do pee oraz masy niezmienniczej dileptonów. Na rysunku 7.3 przedstawiono zrekonstruowany rozkład masy izobaru Δ . Nie bardzo rozumiem dlaczego rozkład ten nie przypomina zwykłego zachowania rezonansowego dla rezonansu Δ . Zarówno pozycja, jak i szerokość są niezgodne z PDG. Czy chodzi tu o nieuwzględnienie poprawek na „niewydajność” (ja wolę wydajność). Tuż obok jest poprawiony o wydajność zrekonstruowany rozkład kątowy Δ . Czy naprawdę warunek $M_{ee} > 0.14$ GeV to wyjaśnia, czy jest to tylko przypuszczenie? Uzyskany rozkład kątowy można porównać do rozkładu uzyskanego wcześniej w analizie reakcji $pp \rightarrow pp\pi^0$. Szkoda, że nie narysowano tego na jednym rysunku, co pokazałoby związek obu rozważanych reakcji. Osobny podrozdział poświęcono rozkładowi kątowemu „rozpadu” $\gamma^* \rightarrow e^+e^-$. Takie rozkłady różnią się dla różnych rozpadów

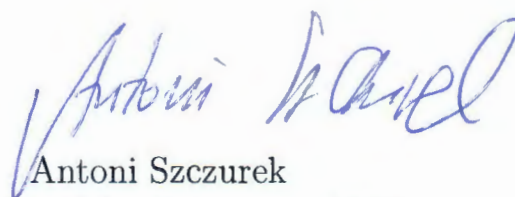
Dalitz i związane są w dużej mierze ze spinem rozpadającej się cząstki. Krótko (w niewielu słowach) przedyskutowano to jak otrzymano taki rozkład (szereg transformacji kinematycznych). Rozkład zmierzony ostatecznie przez grupę badawczą HADES pokazany jest na rysunku 7.5. Rozkład może być dopasowany prostą zależnością $A(1 + B \cos^2 \alpha)$. Uzyskany parametr B , z dokładnością do błędu, jest konsystentny z $B = 1$ który wynika z obliczeń kwantowej elektrodynamiki. To potwierdza dominujący wkład rozpadu Dalitza rezonansu Δ .

Rozdział ósmy jest podsumowaniem całej rozprawy doktorskiej. Składa się w zasadzie z dwóch części: dyskusji tytułowej ekskluzywnej produkcji $pp \rightarrow pp\pi^0$ oraz wniosków. Ten podrozdział na dwie części jest moim zdaniem trochę sztuczny. Ponadto podrozdział „wnioski” jest de facto podsumowaniem.

Rozdział dziewiąty jest zbiorem czterech technicznych dodatków. Pierwszy dotyczy definicji brakującej masy, drugi masy niezmienniczej, trzeci dyskutuje diagramy Dalitza i lokalizację efektów fizycznych, czwarty przedstawia współczynniki izospinowe produkcji i rozpadu rezonansów Δ , piąty dotyczy kinematyki elastycznego rozpraszania.

Całość rozprawy zamyka spis tabel i rysunków (nie rozumiem po co?), oraz spis literatury.

Przechodzę teraz do podsumowania całej rozprawy doktorskiej. Praca przedstawia wyniki cennych badań dotyczących produkcji pionów neutralnych i naładowanych oraz par e^+e^- w zderzeniach proton-proton. Wyniki są nowe i zawierają wiele wartościowych informacji i rzucają nowe światło na mechanizm produkcji rezonansów barionowych w obszarze pośrednich energii. Praca napisana jest czytelnie. Bardzo rażąca jest odmiana nazwisk, która zupełnie nie zgadza się z przyjętą gramatyką języka polskiego. Autorka za każdym razem robi to inaczej i nagminnie błędnie używa apostrofu. Znalazłem również sporo błędnych lub źle brzmiących sformułowań. Część z nich opisałem powyżej. Te wszystkie niedociągnięcia nie zmieniają jednak mojej pozytywnej oceny rozprawy jako całości. Wobec powyższego, wnoszę o dopuszczenie pani Anny Kożuch do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Antoni Szczurek

Kraków, 8 stycznia 2017