

Prof. dr hab. Tomasz Matulewicz
Zakład Fizyki Jądrowej
Instytut Fizyki Doświadczalnej
Wydział Fizyki
Uniwersytet Warszawski

Warszawa/Łomianki, 31 grudnia 2016

**Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr Anny Kożuch**

zatytułowanej:

*Badanie produkcji mezonów π
w reakcji $p+p \rightarrow p+p+\pi^0$ przy energii wiązki 1,25 GeV
za pomocą spektrometru HADES*

Można by oczekiwać, że prawie siedemdziesiąt lat po odkryciu mezonów π wiedza o ich produkcji, zwłaszcza w „klasycznym” oddziaływaniu proton-proton w zakresie energii dostępnym od wielu dziesięcioleci, jest już perfekcyjnie znana. To błędny pogląd. Przedstawiona do recenzji rozprawa mgr Anny Kożuch pokazuje, jak wiele jest jeszcze nieznanych szczegółów w tym obszarze badań. Aczkolwiek ogólny opis procesu można uznać za wyjaśniony, to szereg szczegółów przewidywanych teoretycznie odbiega od wyników doświadczalnych. Świadczy o tym ciekawa praca doktorska pani Kożuch. Wspomniany problem ma swoje poważne konsekwencje dla fizyki hadronowej. Jak słusznie pisze pani Kożuch, „*Wstępem do zrozumienia procesów w reakcjach ciężkojonowych są badania reakcji nukleon-nukleon.*” (str. 13 recenzowanej pracy doktorskiej). W istocie, wyciąganie znaczących wniosków o procesach właściwych dla gorącej i gęstej materii jądrowej powstającej w oddziaływaniach jądro-jądro wymaga odpowiednio dokładnego zrozumienia procesu podstawowego: oddziaływania nukleon-nukleon w próżni. Przykładem może tu być jądrowy czynnik modyfikujący (nuclear modification factor) często stosowany do oceny wpływu materii na widma hadronów, fotonów i leptonów emitowanych w oddziaływaniach wysokoenergetycznych¹. Należy z uznaniem przyjąć fakt, że współpraca HADES umieściła wysoko na liście

¹ ATLAS Collaboration, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 072302 (2015)
CMS Collaboration, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **38** 124015 (2011)
ALICE Collaboration, *Journal of Physics* **458**, 012013 (2013)

swoich priorytetów naukowych badanie nieelastycznego oddziaływania proton-proton, czego efektem jest także recenzowana rozprawa doktorska.

Napisana po polsku rozprawa doktorska pani Anny Kożuch, po przejrzystym wprowadzeniu i przedstawieniu celu pracy, zawiera bardzo ciekawy wstęp teoretyczny. Przypomina w nim szereg dotychczasowych wyników doświadczalnych oraz wiele aspektów modeli teoretycznych, od rozważań izospinowych poprzez model rezonansowy do rozważań wykorzystujących model fal parcjalnych. To ostatnie podejście jest ostatnio intensywnie stosowane w badaniach oddziaływania nukleon-nukleon w zakresie energii kinetycznych poniżej kilku GeV zarówno dla oddziaływań elastycznych², jak i nieelastycznych³.

Przedstawiony w rozprawie opis spektrometru HADES jest przejrzysty i dobrze podkreśla te cechy detektora, które są istotne dla opisywanych badań. Dla czytelnika niezwiązanego z tym eksperymentem wartościowa jest tabela 3.1 dokumentująca kilkanaście lat aktywności badawczej współpracy HADES.

Używany do opisu wyników program PLUTO został przez autorkę rozprawy przedstawiony (rozdział czwarty) w szczegółach świadczących o dogłębnym zrozumieniu funkcjonowania fizyki zjawisk oraz ich implementacji wewnątrz tego generatora przypadków. Fizykę zjawisk ilustrują bardzo dobrze liczne wykresy Dalitza oraz inne diagramy, które przedstawiają kształty rozkładów kątowych i pędowych cząstek emitowanych w wyniku rozpadu rezonansów barionowych. Jak zwykle w przypadku tak złożonego eksperymentu, wydajność rejestracji otrzymywana jest w wyniku odpowiednich obliczeń symulacyjnych. Autorka przedstawiła szczegółowo wyznaczone mapy akceptancji spektrometru HADES.

Rozdział piąty rozprawy zawiera precyzyjny opis procedur identyfikacji kanałów reakcji oraz wyznaczania widm obserwowalnych fizycznych. Jest to opis bardzo staranny, ilustrowany dużą liczbą diagramów (czasami mało różniących się, np. rys. 5.4 i 5.6). W odróżnieniu od wielu innych pomiarów realizowanych w fizyce hadronowej, bardzo cieszy fakt, że autorka pracy nie miała problemu z liczebnością zmierzonych przypadków i niepewności statystyczne są pomijalne. W tej sytuacji, zdaniem recenzenta, można było stosować bardziej wąskie kryteria selekcji przypadków.

Obszerny rozdział szósty rozprawy zawiera dokładny opis wyników analizy danych. Autorka zauważa istotne rozbieżności między wynikami

² Ron L. Workman, William J. Briscoe, and Igor I. Strakovsky, <https://arxiv.org/pdf/1609.01741v1.pdf>

³ L. Fabbietti i inni, artykuł w przygotowaniu (informacja prywatna, 2016)

doświadczalnymi a rezultatami obliczeń, takie jak przedstawione na rysunkach 6.2 i 6.5. Są to rozbieżności dotyczące widma masy niezmienniczej układu $p\pi^0$, gdzie obliczenia modelowe oddają kształt widma, ale są ogólnie poniżej danych doświadczalnych, jak również rozbieżności kształtu rozkładu kąтового protonu w układzie środka masy. Dobra znajomość generatora zdarzeń PLUTO pozwoliła autorce na próbę poprawienia jakości odtwarzania wyników, z całkiem zadowalającym skutkiem zwłaszcza dla opisu widma masy niezmienniczej. Natomiast głębokie minimum w rozkładzie kątowym protonów wokół kąta 90° widoczne w obliczeniach modelowych nie znajduje potwierdzenia w wynikach doświadczalnych, aczkolwiek autorce udało się nieco zredukować ten problem. Z uznaniem należy przyjąć sukces modelu teoretycznego dla opisu rozkładu kąтового mezonu π^0 (rys. 6.20). Silnym testem zmodyfikowanego modelu (nazywanego przez autorkę rozprawy Modelem B) są różniczkowe rozkłady masy niezmienniczej układu $p\pi^0$, przedstawione na rysunku 6.11 (oraz następnych dla innych wersji modeli rachunkowych). To ważny element rozprawy, wskazujący na potrzebę intensywnego wysiłku teoretycznego dla kompletnego opisu zjawiska.

Rozdział siódmy rozprawy dotyczy elektromagnetycznego rozpadu rezonansu $\Delta(1232)$, kanału istotnego dla spektrometru HADES będącego głównie spektrometrem dileptonów. Ciekawy jest zwłaszcza rysunek 7.2.b, gdzie widmo masy niezmienniczej dileptonów z badanej reakcji $p+p$ jest perfekcyjnie opisane jako suma wkładów od mezonu π^0 i od rezonansu $\Delta(1232)$. Świadczy to o znaczącej roli tego rezonansu w wysokoenergetycznej części widma masy niezmienniczej dileptonów.

Pani Anna Kożuch w ostatnim rozdziale podsumowuje uzyskane wyniki. Wnioski uzyskane w badaniach reakcji $p+p \rightarrow p+p+\pi^0$ przy energii 1,25 GeV są istotne: wykazują dominujący wpływ rezonansu $\Delta(1232)$ oraz potrzebę prawidłowej implementacji opisu rozpadu tego rezonansu w obliczeniach modelowych używanych jako generator przypadków. Wyznaczone wartości przekrojów czynnych są zgodne z dotychczasowymi wynikami.

Praca jest uzupełniona dodatkami dotyczącymi stosowanych metod analizy. Obfity i aktualny spis literatury jest bardzo przydatny, gdyż autorka zadała sobie trud podania nie tylko odnośników, ale także podała tytuły artykułów. Rozprawa opatrzona jest także streszczeniem w języku angielskim i polskim. Praca jest napisana bardzo starannie, tak że z trudem znalazłem chociaż jedno formalne uchybienie: w podpisie pod rysunkiem 2.13 powinno być „Zależność całkowitego przekroju czynnego od pędu”, a nie od „energii”. Dobrze wykonane rysunki świetnie ilustrują zagadnienia fizyczne. Nie mam też istotnych uwag do sposobu pisania rozprawy, czasami tylko skład komputerowy mógłby eliminować pojedyncze linie tekstu rozpoczynające lub kończące akapit rozłożony na dwóch stronach.

2. The second part of the document focuses on the financial aspects of the organization. It provides a detailed breakdown of the budget, including income and expenses, and discusses the strategies used to manage the funds effectively. This section also includes a comparison of the organization's financial performance against its goals and objectives.

3. The third part of the document addresses the operational aspects of the organization. It describes the various programs and services provided, and discusses the challenges faced in the process of implementation. This section also includes a discussion of the resources required to support these activities, such as personnel, equipment, and materials.

4. The fourth part of the document discusses the future plans of the organization. It outlines the goals and objectives for the next year, and describes the strategies used to achieve them. This section also includes a discussion of the potential risks and challenges that may be encountered, and the measures taken to mitigate them.

5. The fifth part of the document provides a summary of the findings and conclusions of the study. It highlights the key points discussed in the previous sections, and provides a final assessment of the organization's overall performance. This section also includes a list of recommendations for future action, based on the findings of the study.

Stwierdzam, że rozprawa przedstawiona przez magister Annę Kożuch bardzo dobrze spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Stawiam wniosek o dopuszczenie magister Anny Kożuch do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

A handwritten signature in blue ink, reading "Tomasz Kucharski". The signature is written in a cursive, flowing style.

The first part of the paper discusses the
 importance of the study and the
 objectives of the research. The second part
 describes the methodology used in the study.
 The third part presents the results of the study.
 The fourth part discusses the implications of the study.
 The fifth part concludes the paper.

The study was conducted in a laboratory setting.
 The participants were students from a university.
 The study was designed to investigate the effects of
 the independent variable on the dependent variable.
 The results of the study showed that there was a significant
 difference between the two groups. The first group
 performed better than the second group. The results
 were consistent across all measures. The study
 has several limitations. The sample size was small.
 The study was conducted in a laboratory setting.
 The results may not be generalizable to other
 populations. The study was funded by a grant.
 The authors would like to thank the grant
 committee for their support. The authors would
 also like to thank the participants for their
 contribution to the study.