

**Recenzja rozprawy doktorskiej**  
zatytułowanej:  
***Search for  $\eta$ -mesic  $^3\text{He}$  in non-mesonic final states***  
autor: **Oleksandr Rundel**  
promotor: prof. dr hab. Paweł Moskal  
promotor pomocniczy: dr Magdalena Skurzok

Oleksandr Rundel przedstawił napisaną po angielsku pracę zawierającą siedem rozdziałów poprzedzonych streszczeniem (także w języku polskim) oraz uzupełnioną dwoma dodatkami. Razem ze spisem literatury rozprawa liczy 91 stron.

Rozprawa doktorska zawiera opis badań dotyczących poszukiwania stanu związanego mezonu  $\eta$  i jądra  $^3\text{He}$  poprzez badanie reakcji  $pd \rightarrow ^3\text{He} + 2\gamma$  (z hipotezą rozpadu  $\eta \rightarrow 2\gamma$ ) i  $pd \rightarrow ^3\text{He} + 6\gamma$  (z hipotezą  $\eta \rightarrow 3\pi^0 \rightarrow 6\gamma$ ). Badania zostały wykonane na wiązce protonów synchrotronu COSY (Jülich) z pelletową tarczą deuterową. Do rejestracji emitowanych cząstek użyto spektrometru WASA, pozwalającego na rejestrację zarówno cząstek naładowanych, jak i fotonów, a więc spektrometru pozwalającego na realizację założonego w pracy programu badawczego.

Tematyka badawcza przedstawiona w rozprawie jest bardzo aktualna. Efekty występujące w układach kilku nukleonów poniżej progu na produkcję mezonu (oddziaływania trój- i wielociałowe), jak i powyżej progu na produkcję mezonów budzą żywe zainteresowanie środowiska naukowego. Przekłada się to na stopniowy postęp zarówno w zakresie interpretacji teoretycznych, jak i na precyzję wyników doświadczalnych. W tym zakresie swój wkład wnosi O. Rundel w swojej rozprawie, przesuując w dół górną granicę wartości przekroju czynnego na utworzenie stanu związanego  $^3\text{He} + \eta$  do poziomu 2-15 nb (w zależności od założonych parametrów stanu związanego).

We wprowadzeniu (Rozdział 1) mgr Rundel przedstawił fizyczne podstawy badań opisanych w rozprawie. Poszukiwania stanu jądra wiążącego oddziaływaniami silnymi neutralny mezon prowadzone są od kilku dekad, to jest od postulowania istnienia tego stanu w połowie lat 80 XX wieku. Autor zwięźle opisał uzasadnienie merytoryczne oraz program eksperymentalny poszukiwania tego stanu związanego realizowany przez współpracę WASA-at-COSY. Eksperyment zrealizowano w 2014 roku i od tej pory trwają analizy zebranego materiału dotyczące różnych kanałów wyjściowych oddziaływania proton-deuteron. Akurat w tym rozdziale pojawiły się drobne pomyłki: „hardons” zamiast „hadrons”. Takich błędów w dalszych rozdziałach już nie zauważyłem. Autor, poza standardowymi obiektami jak bariony (układy 3 kwarków) czy mezony (układy kwark-antykwar) pisze o istnieniu takich obiektów

jak tetrakwarki, pentakwarki, dibariony. Krytyczne spojrzenie na istnienie (lub nieistnienie) tych obiektów prezentuje Particle Data Group, używając w swoich publikacjach sformułowań typu „Tetraquark candidates and molecular bound states”<sup>1</sup> czy też podkreślając ograniczoną ewidencję tworzenia pentakwarków („So far the  $P_c^+$  states have been observed by only one experiment in only one channel.”<sup>2</sup>). Aktualność przeglądów dokonywanych przez Particle Data Group wskazuje jednoznacznie, że jest to rozwijający się obszar badawczy.

Rozdział 2 zawiera podstawy teoretyczne i eksperymentalne, jak i motywację dla badania zagadnienia fizycznego wymienionego w tytule rozprawy. Jest to nadspodziewanie krótki rozdział, bowiem liczy tylko trzy strony. Można tu znaleźć podstawy teoretyczne oraz krótki przegląd dotychczas prowadzonych badań. Jednak nadmiernie często używane jest sformułowanie „are reviewed in [numer spisu literatury]”. Ten odnośnik literaturowy czasami oznacza niepublikowaną rozprawę doktorską, a więc nie jest powszechnie dostępny. Autor mógł skorzystać z przeglądów dotychczasowych badań w cytowanych rozprawach i dokonać niezbędnych (?) aktualizacji.

Przeprowadzony eksperyment został przez Autora rozprawy opisany w Rozdziale 3 bardzo ogólnikowo. Tarczą w zrealizowanym eksperymencie były kropelki zamrożonego deuteru. Jest to bardzo rzadko stosowana technika, toteż rozdział 3.2.1 mógł być bardziej rozbudowany, zwłaszcza o rysunek układu generującego kropelki. Nie jest też opisana metoda, jaką wyznaczano liczbę generowanych kropli. Kalorymetr elektromagnetyczny SEC jest opisany nadmiernie skrótowo, a jest to kluczowy element spektrometru niezbędny dla rejestracji wysokoenergetycznych fotonów. W szczególności brak jest informacji o grubości warstwy scyntylacyjnej, a to jest ważne dla interpretacji widma energetycznego mierzonego tym detektorem (Rys. 4.10). Informacja o energetycznej zdolności rozdzielczej SEC jest podana tylko dla fotonów o energii 100 MeV; z reguły opisuje się zdolność rozdzielczą jako „sumę” członu stałego i członu stochastycznego. Opis detektora przedniego „Forward Detector” (strona 22) jest niespójny z rysunkiem 3.2, bowiem podczas opisywanego eksperymentu „Trigger Hodoscope” FTH miał tylko jedną warstwę, ale na rysunku są zaznaczone trzy warstwy FTH. Opis układu zbierania danych jest bardzo powierzchowny a jego schemat (Rys. 3.3) zupełnie ogólnikowy i mógłby być pominięty. Warunki wyzwiania układu zbierania danych są opisane precyzyjnie, ale warto byłoby to uzupełnić poprzez wskazanie procesu fizycznego, który dany tryger miał wybierać. Brak też wskazania co do wartości poziomów wyzwiania określanych jako „low” i „high” w „Forward Window Counter” FWC. Autor dokonał wstępnej selekcji zarejestrowanych zdarzeń wybierając te, gdzie doszło do emisji  $^3\text{He}$  (Rozdział 3.4.3).

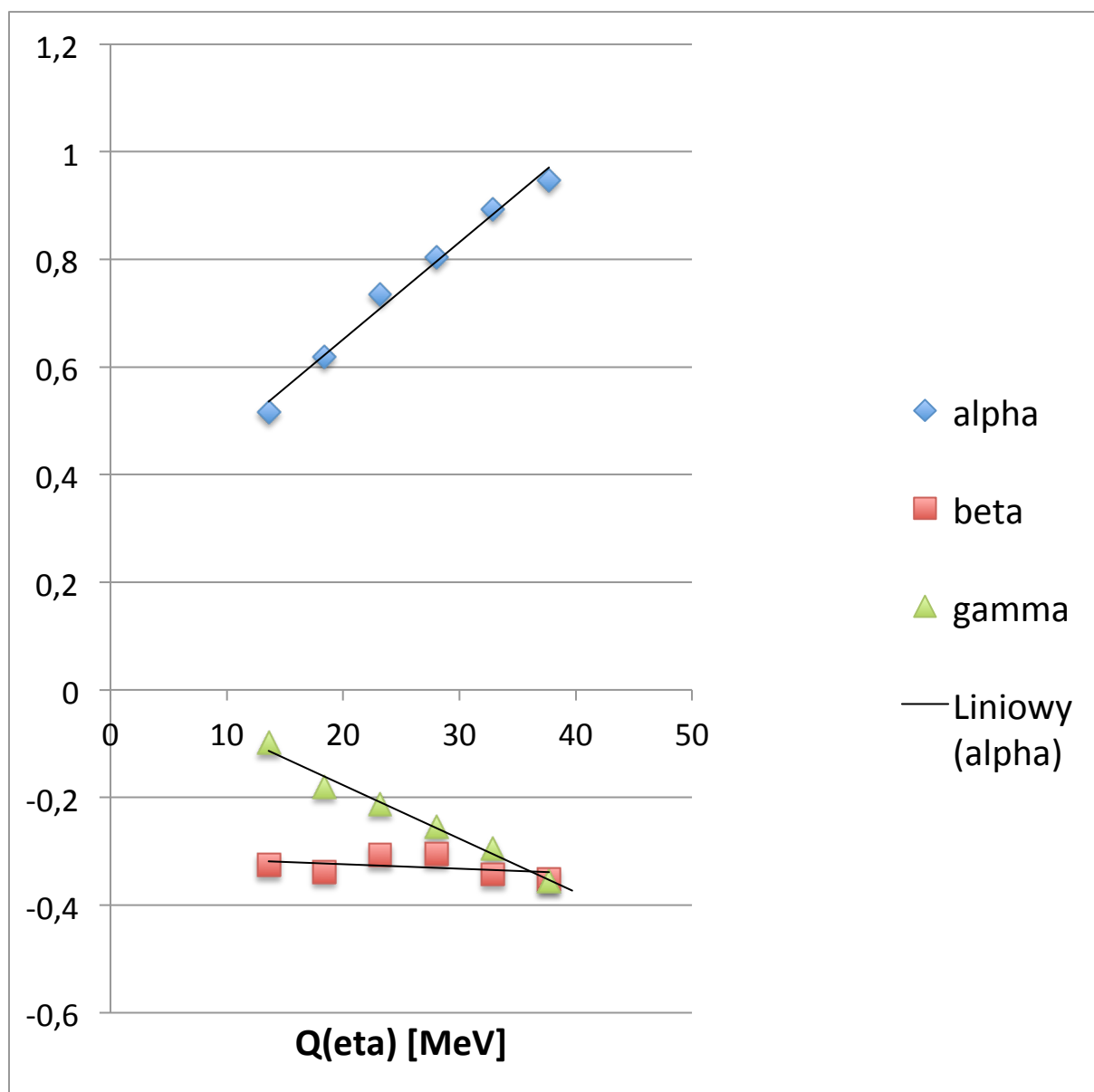
Kolejny rozdział (Rozdział 4) przedstawia pomiar świetlności eksperymentu. Jest on oparty o wyniki eksperymentalne oraz analizę symulacji Monte Carlo układu detekcyjnego. Należy podkreślić, że do analizy wyników z symulacji użyto identycznego algorytmu (Rozdział 4.1), jak dla analizy danych doświadczalnych. Jest to czynnik podnoszący zaufanie do prowadzonej analizy.

W symulacji rozkładu kąтового emisji mezonów  $\eta$  użyto parametryzacji (wzór 4.4) w postaci wielomianu trzeciego stopnia o parametrach  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$ . Autor musiał dokonać ekstrapolacji istniejących wyników w stronę niskich energii  $Q_\eta$ , czyli niskich pędów (Rysunek 4.1). O ile nie ma wątpliwości co do ekstrapolacji parametru  $\beta$ , to sposób ekstrapolacji pozostałych

<sup>1</sup> Particle Data Group, <http://pdg.lbl.gov/2017/reviews/rpp2017-rev-non-qqbar-mesons.pdf>

<sup>2</sup> Particle Data Group, <http://pdg.lbl.gov/2018/reviews/rpp2018-rev-pentaquarks.pdf>

dwóch parametrów na pewno wpływa na błędy systematyczne. Można było rozszerzyć zakres punktów na wykresie 4.1 o kilka wyników doświadczalnych przy wyższych energiach z pracy<sup>3</sup>, bowiem układają się one dalej w zależność liniową (rysunek poniżej).



Rekonstrukcja zdarzeń zawierających  ${}^3\text{He}$  (Rys. 4.2) jest bardzo wyraźna i nie budzi wątpliwości. Powstaje jednak pytanie, czy liczba zdarzeń na tym rysunku jest przedstawiana w skali liniowej, czy logarytmicznej? Na wykresie widać także podwójną strukturę w  $E_{FTH1}$ , którą autor rozprawy pozostawił bez komentarza. Należy także zauważyć, że wzór 4.5 ma błędny znak w parametryzacji zależności dla energii powyżej 100 MeV. Prawidłowa postać tego wzoru to:

$$E_{FTH1} > h + \max(0.05(100 - E_{FRH1}), -0.02(E_{FRH1} - 100))$$

W analizie prowadzonej przez pana Oleksandra Rundel stosowano prawidłowy wzór, gdyż inaczej obcięcie w danych byłoby widoczne na Rys. 4.2. Jest to więc tylko błąd w przepisywaniu wzoru do tekstu rozprawy.

<sup>3</sup> P. Adlarson et al., (WASA-at-COSY Collaboration), Physics Letters B782 (2018) 297

Produkcja mezonu  $\eta$  otrzymywana jest w procedurze symulacji poprzez wyznaczenie widma masy brakującej i analizę sygnału przy masie tego mezonu. Pozwala to na wyznaczenie wydajności. Otrzymana wydajność (Rysunek 4.6) ma silną zależność energetyczną. Brak jest jednak komentarza wyjaśniającego ten bardzo silny efekt aparaturowy.

Analiza świetlności opisana w tym rozdziale została przeprowadzona dla dwóch kanałów reakcji p+d. Otrzymane wyniki są zgodne w granicach błędów systematycznych. Szczegółowe informacje dotyczące zakresu zmienności parametrów wpływających na ten wynik podnoszą zaufanie do przeprowadzonej procedury.

Kluczowy dla rozprawy jest Rozdział 5 przedstawiający analizę dwóch reakcji:  $pd \rightarrow {}^3\text{He} + 2\gamma$  i  $pd \rightarrow {}^3\text{He} + 6\gamma$ . Jest on napisany bardzo starannie i precyzyjnie udokumentowany. Wszystkie warunki nakładane na dane są dokładnie określone i zestawione z przewidywaniami pochodzącymi z symulacji.

Wzór 5.16 prowadzi do wyboru takiej kombinacji 6 fotonów, dla których można zidentyfikować trzy mezony  $\pi^0$ . Nałożony warunek  $D < 0,05 \text{ (GeV/c)}^2$  odpowiada

$$\sum_{i=1}^3 (m_{\gamma(2i-1)\gamma 2i} - m_{\pi^0})^2 < 0,05 \left(\frac{\text{GeV}}{c^2}\right)^2$$

co oznacza, że średnie odchylenie wartości masy niezmienniczej pary fotonów od masy neutralnego mezonu  $\pi^0$  wynosi

$$|m_{\gamma\gamma} - m_{\pi^0}| < \sqrt{\frac{0,05 \text{ GeV}}{3} \frac{\text{GeV}}{c^2}} = 0,13 \frac{\text{GeV}}{c^2}$$

Jest to więc ograniczenie niezbyt silne, zgodne ze stosowaną w analizie zasadą niezbyt ostrego odrzucania zdarzeń eksperymentalnych.

Podsumowując ocenę tego rozdziału stwierdzam, że świadczy on nie tylko o bardzo starannej i konsekwentnej analizie wyników otrzymanych z eksperymentu, ale także o ogromnym wysiłku włożonym w zrozumienie nakładanych warunków i wspieranie tych decyzji szczegółowymi obliczeniami symulacyjnymi.

Ostateczne wyniki i ich interpretacja zawarte są w Rozdziale 6. Uznanie budzi skromność i ostrożność autora przy interpretacji wyników. Na samym wstępie stwierdza brak bezpośredniej obserwacji poszukiwanego sygnału (Rys. 6.1), a dopiero potem zagłębia się w szczegóły oszacowania górnych granic przekroju czynnego. Przedstawione dopasowania (rysunki 6.4 do 6.7) dokumentują te próby. Można było zrezygnować z powielania identycznego podpisu pod tymi rysunkami. Rozdział ten kończy żmudna i niewdzięczna, ale solidnie zrealizowana i opisana ocena niepewności systematycznych.

Autor posumował wyniki swoich badań w Rozdziale 7. Powtórzył tu podstawowe konkluzje z poprzedniego rozdziału, uzupełniając je stwierdzeniem o znaczącym przesunięciu górnej granicy przekroju czynnego na populację poszukiwanego stanu związanego.

W tym miejscu rozprawy doktorskiej często pojawia się wniosek autora dotyczący możliwości kontynuacji badań. Nic takiego nie znalazłem, ale też wiadomo o zamknięciu wielu tematów badawczych w ośrodku w Jülich i demontażu aparatury. Czyżby był to koniec

poszukiwania stanów związanych mezonów i lekkich jąder atomowych w przewidywalnej perspektywie czasowej?

Rozprawę kończą dwa dodatki (dotyczące własności mezonu  $\eta$  oraz elementów teorii rozpraszania), spis skrótów oraz obszerny, bo obejmujący 107 pozycji, spis literatury. Autor dość mocno stosuje „*et al.*” przy publikacjach mających więcej niż jednego autora. Niemniej jednak należałoby wymieniać wszystkich autorów, gdy jest ich kilku (co dotyczy znacznej części cytowanych prac teoretycznych).

Podsumowując moją recenzję, chcę podkreślić walory rozprawy doktorskiej mgr Oleksandra Rundel:

1. ważność problemu fizycznego, bowiem odkrycie poszukiwanego stanu związanego miałyby znaczące konsekwencje dla rozumienia oddziaływań silnych przy niskich energiach,
2. skrupulatność w analizie danych doświadczalnych, gdzie podejmowane decyzje o nakładanych warunkach były wspierane obliczeniami symulacyjnymi.

Otrzymany wynik fizyczny oraz kompetencje autora przy realizacji badań to podstawowe kryteria oceny. Zauważone w pracy różnorakie niedokładności i uchybienia nie mają podstawowego znaczenia dla oceny wartości naukowej całej rozprawy. Można raczej wnioskować, że autor rozprawy nie uczestniczył w samym procesie realizacji eksperymentu i wobec tego mógł nie dostrzec pewnych szczegółów z tym związanych.

Stwierdzam, że rozprawa przedstawiona przez pana Oleksandra Rundel 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 pana magistra Oleksandra Rundel do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

