

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

---

Holendry/Warszawa, 20 sierpnia 2015

**Recenzja rozprawy doktorskiej  
magister Magdaleny Skurzok  
zatytułowanej:**

*Search for  $\eta$ -mesic helium via  $dd \rightarrow {}^3\text{He}n\pi^0$  reaction  
by means of the WASA-at-COSY facility*

Przedstawiona do recenzji rozprawa mgr Magdaleny Skurzok zawiera kompletny, bardzo dobrze uzasadniony opis ciekawego pomiaru fizycznego prowadzącego do określenia górnej granicy na wytworzenie stanu związanego mezonu  $\eta$  z jądrem helu  ${}^4\text{He}$ . Uprzedzając końcowy wniosek, już w tym miejscu chcę zaznaczyć, że moja opinia o tej rozprawie jest pozytywna: problem fizyczny jest ciekawy, pomiary są zaawansowane a wyniki precyzyjnie przeanalizowane.

Tematyka badawcza przedstawiona w rozprawie jest bardzo aktualna i budzi żywe zainteresowanie środowiska naukowego zajmującego się fizyką oddziaływań i strukturą hadronów. Mgr Skurzok udało się przesunąć granicę wartości przekroju czynnego na produkcje egzotycznego stanu związanego mezonu  $\eta$  w jądrze helu.

Mgr Skurzok przedstawiła napisaną po angielsku pracę zawierającą dziesięć rozdziałów poprzedzonych streszczeniem oraz uzupełnioną trzema dodatkami. Razem ze spisem literatury rozprawa liczy 97 stron. Z przykrością stwierdziłem brak choćby jednostronicowego przedstawienia wyników pracy w języku polskim. Co prawda Artykuł 13 pkt. 6 *Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* nie narzuca obowiązku umieszczania takiego streszczenia, używając sformułowania „*powinna być opatrzona*”. Obawiam się tylko przyszłości ze sformułowaniami w stylu „*jest sale na playery w markecie*”.

Pierwszy rozdział pracy w bardzo przejrzysty sposób przedstawia problem fizyczny, dotychczasowy stan badań oraz metodę doświadczalną zastosowaną przez doktorantkę. Autorka rozprawy w drugim akapicie wymienia jako już odkryte obiekty hiperjądra, tetrakwarki, pentakwarki i dibariony. Tu apelowałbym o zachowanie pewnej ostrożności. Particle Data

Group<sup>1</sup> formalnie milczy na temat tetrakwarków, tak jak i autorzy cytowanej pracy [2]<sup>2</sup>. Rok temu współpraca LHCb opublikowała<sup>3</sup> wyniki dotyczące stanu  $Z(4430)^-$ , które wskazują na czterokwarkowy charakter tego stanu (*„the four quark state as the only plausible interpretation“*). Uważam że właśnie ten najnowszy wynik powinien być cytowany.

Sprawa istnienia pentakwarków ponad dekadę temu wywoływała poważne kontrowersje<sup>4</sup>. Na stronie internetowej PDG można znaleźć sformułowanie:  $\Theta(1540)^+$  *denotes a possible narrow pentaquark state*. Dopiero ostatnio sprawa pentakwarków zaistniała ponownie, ze względu na wyniki współpracy LHCb wykazujące istnienie dwóch stanów  $P_c^+(4450)$  i  $P_c^+(4380)$ . W publikacji<sup>5</sup> współpracy LHCb wykazano istnienie tych stanów na poziomie około 10 odchyień standardowych oraz określono ich skład jako  $c\bar{c}uud$ . Wspomniane wyniki LHCb zostały opublikowane po złożeniu rozprawy doktorskiej, toteż Autorka rozprawy nie miała szansy na ich uwzględnienie w rozprawie.

Także istnienie rezonansu dibarionowego, wykazywanego w analizach danych z eksperymentu WASA-at-COSY, nie jest nadal pozytywnie zweryfikowane. Autorzy dedykowanych analiz danych z pomiarów wykonanych przez współpracę HADES podają, że *„the present situation, both from experimental and theoretical aspects, is not clear enough to draw conclusions on the existence of the dibaryon resonance“*<sup>6</sup>.

W świetle tych rozważań określenie że stany 4, 5 i 6 kwarkowe są „already discovered” tak jak odkryte 6 dekad temu hiperjądra, uważam za przedwczesne.

Po przedstawieniu fenomenologicznych podstaw modeli przewidujących istnienie stanów związanych mezonu  $\eta$  z jądrami atomowymi, w rozdziale trzecim pracy można znaleźć ciekawy opis obecnego stanu poszukiwań eksperymentalnych. Poszukiwania stanów związanych mezonu  $\eta$  z jądrami atomowymi były i są prowadzone w wielu laboratoriach europejskich, amerykańskich oraz w Japonii. W tym rozdziale na stronie 13 zapewne „PILOT experiment is planned” powinno być zapisane jako „pilot experiment is planned”.

Obszerny czwarty rozdział omawia szczegółowo układ detekcyjny WASA. Opis jest w ogólności bardzo precyzyjny. Jedynie opis procedury kalibracji

<sup>1</sup> <http://pdg.lbl.gov/>

<sup>2</sup> S.-K.Choi et al., Phys. Rev. Lett. **100**:142001, 2008

<sup>3</sup> R. Aaij et al., Phys. Rev. Lett. **112**:222002, 2014

<sup>4</sup> M. Chalmers, Nature **523**:267, 2015;

<http://www.nature.com/news/forsaken-pentaquark-particle-spotted-at-cern-1.17968>

<sup>5</sup> R. Aaij et al., Phys. Rev. Lett. **115**:072001, 2015

<sup>6</sup> G. Agakishiev et al., <http://arxiv.org/pdf/1503.04013.pdf>

energetycznej Forward Range Hodoscope jest niejasny. Niewiele pomaga powołanie się na trudno dostępny wewnętrzny raport (referencja 102). Także procedura poprawki przy kalibracji energetycznej FRH3 i FRH4 jest nieprecyzyjna: nie wiadomo, czy widma były przeskalowane liniowo czy też przesunięte. Również analiza widma masy niezmienniczej par fotonów zawiera pewne niejasności. W szczególności, nie wiem jak należy rozumieć stwierdzenie „invariant mass is assigned to the crystals with the largest energy deposit in the cluster”. Na rysunku 4.9 zabrakło mi porównania zmierzonego kształtu odpowiadającego rozpadowi mezonu  $\pi^0$  z wynikami symulacji. Nie wiem też, dlaczego do opisu kształtu tła użyto wielomianu stopnia 7. Czy były podjęte próby opisu tła poprzez procedurę mieszania zdarzeń? Uważam też, że opis kształtu funkcji odpowiedzi spektrometru elektromagnetycznego WASA dla mezonów  $\pi^0$  poprzez funkcję nazywaną „Nowosybirsk” powinien być opatrzony szerszym komentarzem. Według mojej wiedzy nie jest to powszechnie stosowany kształt – nie udało mi się odnaleźć innego kalorymetru elektromagnetycznego, do którego opisu stosowana jest taka parametryzacja.

Bardzo ważny jest rozdział piąty, gdzie przedstawiona jest procedura symulacyjna, istotna nie tylko dla opisu wydajności ale także dla wprowadzania warunków analizy danych. Bardzo przydatny jest schematyczny rysunek 5.1, świetnie ilustrujący metodę produkcji i rejestracji. Paragraf 5.3 dotyczący rozkładu pędowego nukleonów w jądrze  ${}^4\text{He}$  mógłby być skrócony, jako że w konkluzji mgr Skurzok ogranicza się tylko do wyników opartych potencjały AV18 i CDB2000. Uproszczony model rozkładu pędu, dany wzorem (5.6)<sup>7</sup>, wyraźnie odbiegał swoimi przewidywaniami od zaawansowanych modeli potencjałowych. We wspomnianym paragrafie warto też zauważyć pewną niezręczność przy energii separacji - w nawiasie podane jest 28 MeV (co jest całkowitą energią wiązania  ${}^4\text{He}$ ) oraz prawidłową wartość około 20 MeV nieco niżej w tekście. Większość odnośników literaturowych tego paragrafu odnosi się do prac doktorskich czy też informacji prywatnych. Można było poszukać publikowanych analiz, aczkolwiek znaczna część z dostępnej literatury w tym zakresie<sup>8</sup> opublikowana została kilka dekad temu.

Za pewną niezręczność uważam używanie w tym paragrafie (ale nie tylko) sformułowania „Fermi momentum distribution” przy określaniu rozkładu pędu nukleonów w jądrze  ${}^4\text{He}$ . Układ 2 protonów i dwóch neutronów trudno traktować jako gaz opisywany w ramach podejścia statystycznego ze statystką Fermiego. Nukleony w  ${}^4\text{He}$  należy raczej uważać za silnie skorelowane<sup>9</sup>.

<sup>7</sup> istnieją inne, zbliżone parametryzacje,  

$$n(p) = \{1 + [(A-4)/6](p/p_0)^2\} \exp(-(p/p_0)^2)$$
 (wzór 7-2c z H. Überall, *Electron Scattering from Complex Nuclei*, 79-137592, Academic Press 1971)

<sup>8</sup> J. Carlson „Alpha particle structure”, *Phys. Rev.* **C38**:1879, 1988

<sup>9</sup> H. Feldmeier et al., *Phys. Rev* **C84**:054003, 2011

Rozdział 6 zawiera szczegółowy opis analizy zarejestrowanych zdarzeń. Opis ten jest bardzo dokładny i zrozumiały, rysunki świetnie ilustrują nakładane warunki. Przy identyfikacji mezonów  $\pi^0$ , w przypadku rejestracji trzech lub więcej klastrów fotonowych, zastosowany został warunek wyboru tej pary fotonów, której masa niezmiennicza jest najbliższa masie mezonu  $\pi^0$ . Można by przedstawić informację, jak często taki warunek musiał być stosowany (np. przedstawienie rozkładu krotności klastrów fotonowych w rejestrowanych zdarzeniach).

W dwóch następnych rozdziałach przedstawiona jest analiza wydajności oraz pomiar świetlności. Wyniki obliczeń wydajności wykazują się znakomitą stabilnością, natomiast rezultaty analizy świetlności, przeprowadzone szczegółowo dla dwóch kanałów reakcji  $dd$  są zgodne w granicy błędów systematycznych (paragraf 8.3 raczej powinien nazywać się „Systematical Errors”, pewnie tak samo 9.3; sama nazwa „systematics” raczej odnosi się do obserwacji pewnych trendów w zbiorze wyników doświadczalnych).

Dwa ostatnie rozdziały (9 i 10) przedstawiają i podsumowują wyniki analizy. Autorka nie zaobserwowała efektu mogącego pochodzić z poszukiwanego stanu związanego  $\eta\alpha$ , ale wyznaczyła górną granicę wartości przekroju czynnego na wytworzenie takiego stanu (szczegółowe wyniki w tabeli 9.1 mogły być ograniczone do dwóch cyfr znaczących). Otrzymane ograniczenie jest nadal o znaczący czynnik kilka większe niż ostatnie przewidywania modelowe. Mgr Skurzok podaje w pracy informacje o dalszych, już zaakceptowanych, planach badawczych dotyczących poszukiwań stanu związanego mezonu  $\eta$ .

Rozprawę kończą trzy dodatki, w tym dwa dotyczące istotnych procedur symulacyjnych, spis skrótów oraz obszerny, bo obejmujący 130 pozycji, spis literatury. W ostatniej pozycji listy skrótów QCD jest błędnie opisane.

Praca napisana jest bardzo dobrze. Autorka w sposób logiczny wyjaśnia kolejne kroki prowadzonych analiz oraz dobrze dokumentuje wyciągane wnioski. Rysunki są perfekcyjnie wykonane i właściwie ilustrują omawiane zagadnienia. Autorka konsekwentnie stosuje w rysunkach GeV jako podstawową jednostkę energii, co przy energiach rzędu 10 MeV staje się nieco mniej przejrzyste graficznie. Błędów edytorskich wartych wspomnienia nie ma.

Podsumowując moją recenzję, chcę podkreślić walory rozprawy doktorskiej mgr Magdaleny Skurzok: ważność problemu fizycznego, skrupulatność analizy oraz znaczenie tej pracy jako kroku w stronę eksperymentów rozstrzygających o istnieniu (lub nie) jądrowego stanu związanego mezonu  $\eta$ . Podniesione w recenzji kwestie nie umniejszają

wartości pracy; wręcz przeciwnie – wynikają one z zainteresowania problemem fizycznym oraz przedstawionymi wynikami.

Stwierdzam, że rozprawa przedstawiona przez magister Skurzok 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 pani magister Magdaleny Skurzok do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

*Tomasz Natulski*