

Prof. dr hab. Krzysztof Doroba
Wydział Fizyki
Uniwersytetu Warszawskiego
02-093 Warszawa
ul. Pasteura 5

Grudzień 2017

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Damiana Pszczela pod tytułem “Search for a new light boson in meson decays”

Eksperyment WASA-at-COSY prowadzony jest przez stosunkowo niedużą, jak na fizykę cząstek elementarnych, współpracę międzynarodową (32 instytucje badawcze z 8 krajów, około 100 autorów publikacji). COoler SYnchrotron COSY to akcelerator działający w Forschungszentrum Julich w Niemczech, zaś Wide Angle Shower Apparatus WASA został zbudowany i pierwotnie uruchomiony w roku 1992 przy akceleratorze CELSIUS w Uppsali a w roku 2005 przeniesiony do Julich. Dane zbierał do połowy roku 2014. Akcelerator COSY dostarcza protony o pędzie do 3.7 GeV/c a pokrywający niemal pełny kąt bryłowy detektor WASA wyposażony był w kropelkową tarczę. Program eksperymentu przewidywał między innymi badanie procesów łamania symetrii oraz poszukiwanie fizyki poza Modelem Standardowym. Szczególną rolę w tych badaniach pełniły mezony pseudoskalarne mezony η oraz η' . Przedstawiona rozprawa doktorska jest kolejną poświęconą tej tematyce w eksperymencie WASA-at-COSY.

Praca doktorska mgr Damiana Pszczela składa się z ośmiu Rozdziałów oraz Biografii i liczy razem 115 stron. Napisana została w języku angielskim, tylko streszczenie pracy napisane jest w języku polskim i angielskim. Rozdział 1 stanowi wprowadzenie w tematykę pracy. Zawiera bardzo krótką charakterystykę Modelu Standardowego, wymienia mezony η i η' wraz z innymi mezonami pseudoskalarnymi. Mowa jest tu również o ciemnej materii i ewentualnym nowym lekkim bozonie (ciemnym fotonie) oraz o dotychczasowej wiedzy o kanałach rozpadu mezonów pseudoskalarnych, które będą analizowane w rozprawie. Rozdział kończy kilkudzaniowe omówienie treści kolejnych rozdziałów. Recenzentowi wydają się, że byłoby tu znakomite miejsce na wyraźne określenie, które części prezentowanej analizy są wyłącznym dziełem autora, a które wykonane zostały już przez jego poprzedników (co w przypadku eksperymentu takiej wielkości jak WASA-at-COSY jest zjawiskiem praktycznie nie do uniknięcia).

Rozdział 2 przedstawia układ doświadczalny z którego korzystał autor rozprawy. Jedną z oryginalnych cech detektora WASA jest kropelkowa (choć bardziej pasuje nazwa śrutowa) tarcza z zamrożonego wodoru. Pokrycie niemal pełnego kąta bryłowego zapewniają detektory zarówno gazowe jak i scyntylacyjne (z których część wykonano w Warszawie). Zawarty w tym rozdziale opis detektorów jest precyzyjny i w pełni wystarczający dla potrzeb rozprawy.

Rozdział 3 poświęcony jest powstałego na przestrzeni lat systemu rekonstrukcji zdarzeń w detektorze WASA. Autor skupia się na omówieniu kalibracji energetycznej i omawia poprawki związane z nieliniowością i niejednorodnością scyntylacyjnych części detektora. Opis ilustrowany jest rozkładami będącymi rezultatem doświadczenia jak i symulacji. Podrozdział poświęcony jest rekonstrukcji torów w komorach dryfowych MDC znajdujących się w polu o indukcji 1T.

Symulacje są obecnie nieodłączną częścią współczesnych eksperymentów. Przedstawiona przez autora analiza wykorzystywała CERNowski pakiet GEANT3, przy pomocy którego określano oczekiwaną odpowiedź detektora WASA na cząstki generowane przez program PLUTO opisujący zderzenia pp. W Rozdziale 4 opisana jest symulacja produkcji mezonu η (oraz η') poprzez różne stany pośrednie (na przykład N^*), rozpady $\eta \rightarrow \gamma\gamma$ oraz $\eta \rightarrow e^+e^-\gamma$ jak również mogące stanowić do nich tło rozpady z udziałem pionów. Uzyskane wyniki pozwoliły autorowi rozprawy określić kształt nieredukowalnego tła dopasowywanego w późniejszej analizie.

W Rozdziale 5 autor przedstawia uzyskany w roku 2012 zbiór danych pochodzących z oddziaływania protonów o energii kinetycznej 1.4 GeV z wodorową tarczą kropelkową. Przedstawione są cięcia (opracowane przez autora rozprawy), które dla celów analizy rozpadów mezonu η pozwoliły znacznie zredukować zebrane ponad 100 TB danych. Spośród $4 \cdot 10^6$ zarejestrowanych przypadków autor wyodrębnił $2.76 \cdot 10^5$ zdarzeń z dwoma protonami w stanie końcowym. Dalsze cięcia pozwoliły wyodrębnić próbki naładowanych i neutralnych rozpadów mezonu η (odpowiednio $1.4 \cdot 10^5$ i $6.9 \cdot 10^4$ zdarzeń). Całkowitą liczbę wyprodukowanych mezonów η ($\sim 150 \cdot 10^6$) autor ustalił poprzez dopasowanie do otrzymanych danych przewidywania obliczeń Monte Carlo dla kanału $\eta \rightarrow \gamma\gamma$ oraz wielomianowego tła. Szkoda tylko, że nie jest jednak sprecyzowane do jakiej liczby oddziaływań $pp \rightarrow pp\eta$ odnosi się ta liczba. Na podstawie Tabeli 5.2 można odnieść wrażenie, że całkowita liczba oddziaływań pp wynosiła $4 \cdot 10^6$. Innym mankamentem tej części rozprawy jest fakt, że szerokości przedziałów histogramów na rys 5.7, 5.8, 5.9 są niezgodne z opisami i tekstem rozprawy. Na zakończenie Rozdziału 5 autor analizuje wydajność układu wyzwalającego eksperymenty WASA-at-COSY a dokładniej część związaną z rejestracją rozpadów mezonu $\eta \rightarrow \gamma\gamma$ i $\eta \rightarrow e^+e^-\gamma$. Autor nie podaje jaki jest związek tych wydajności z podaną wcześniej liczbą wyprodukowanych mezonów η .

Rozdział 6 dotyczy tytułowemu zagadnieniu rozprawy, czyli poszukiwaniu rozpadającego się na parę e^+e^- bozonu o niezerowej masie, zwanego też ciemnym fotonem. Swoje poszukiwania sygnału w rozkładzie masy efektywnej pary e^+e^- autor prowadzi analizując rozpad $\eta \rightarrow e^+e^-\gamma$. Czystość próbki jest w tym przypadku bardzo istotna, gdyż źle zidentyfikowane cząstki mogą prowadzić do powstania fałszywego sygnału. Dlatego też chyba autor zamieszcza rysunki 6.1-6.7 choć bezpośrednio tej przyczyny nie podaje. Mieszanie torów z różnych przypadków prowadziłoby do zwiększania niepotrzebnego tła, więc autor wprowadza odpowiednie (i skuteczne) cięcia na odległości czasowe pomiędzy rejestrowanymi impulsami. Należy wiele uwagi poświęca autor identyfikacji elektronów i pozytonów. Omawia dwa tryby postępowania w przypadku wykorzystania do rozróżnienia π i e płaszczyzny $\Delta E, p$. Dokładniejsza z tych metod została opracowana przez autora rozprawy, choć z uzasadnionych powodów nie została użyta w dalszym ciągu rozprawy. Kolejne tło to pary e^+e^- powstające na skutek konwersji w rurze wiązki, mezony π pochodzące z rozpadów $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$. Autor proponuje szereg cięć dotyczących masy i energii brakującej jak również rozkładów kątowych. Oryginalne i

istotne z punktu widzenia rozprawy cięcia przedstawione są na Rys.6.19-6.20, szkoda tylko, że rysunki są zbyt małe i przez to słabo czytelne. Następnie przy pomocy Monte Carlo autor sprawdza, które z kanałów reakcji $pp \rightarrow ppX$ będą przez ten zespół cięć zaakceptowane. Porównanie z danymi doświadczalnymi pozwala autorowi ocenić jako istotny wkład od procesów $pp \rightarrow pp\pi^0(\rightarrow \gamma\gamma)\pi^0(\rightarrow e^+e^-\gamma)$ oraz $pp \rightarrow \eta(\rightarrow \gamma\gamma)$. Z przeprowadzonych wcześniej poszukiwań wynika, że hipotetyczny sygnał pochodzący od ciemnego fotonu byłby bardzo słaby, wobec czego autor stara się bardzo precyzyjnie eliminować źródła tła. Niska krotność badanej próbki pozwoliła autorowi zastosować metodę eliminacji tła kombinatorycznego. Ale fakt, że w różnych miejscach rozprawy autor wymiennie używa określenia „pileup” i „combinatorial background” bez jasnego stwierdzenia, że dla autora oznaczają one to samo, nie ułatwia śledzenie toku rozprawy.

Rozdział 7 poświęcony jest procesowi $\eta \rightarrow e^+e^-$. Proces ten stanowił podstawę rozprawy doktorskiej Marcina Berłowskiego) wykonanej we współpracy WASA-at-COSY i zakończonej w roku 2013, lecz autor analizuje dane zebrane w późniejszym okresie działania detektora oraz modyfikuje nieco stosowane uprzednio kryteria wyboru przypadków. Schemat postępowania jest podobny jak w pracy poprzednika, autor określa które z kanałów reakcji pp stanowiąc będą tła do poszukiwanego procesu. Jest to oczywiście rozpad $\eta \rightarrow e^+e^-\gamma$ oraz proces $pp \rightarrow pp\pi^+\pi^-$. Rozdział 7 zamyka Tabela 7.1, która przedstawia wkład procesów tła i badanego procesu $\eta \rightarrow e^+e^-$. Szkoda tylko, że tabela zawiera liczby, których pochodzenie nie jest dobrze wytłumaczone w tekście. W szczególności liczba podana jako pochodząca z pracy doktorskiej Berłowskiego jest inna niż podana w Tabeli 12 w cytowanej pracy.

O ile Rozdziały 1-7 poświęcone są wyselekcjonowaniu i opracowaniu odpowiednich materiałów doświadczalnych to ich końcowa analiza, rezultaty i dyskusja wyników zawarte są w Rozdziale 8. Dla rozpadów $\eta \rightarrow e^+e^-\gamma$ odjęcie od rozkładów masy układu e^+e^- określonego w poprzednich rozdziałach tła i podzielenie go przez rozkład przewidywany przez QED pozwala dopasować elektromagnetyczny czynnik przejścia mezonu η w postaci $F(q^2) = 1/(1 - q^2/\Lambda^2)$, gdzie $\Lambda = 1.97 \pm 0.29_{stat} + 0.13_{sys} - 0.23_{sys} \text{ GeV}$. Błąd systematyczny autor określa zmieniając odpowiednio cięcia stosowane przy wyborze próbki. Precyzyjne porównanie rozkładu masy pary e^+e^- z oczekiwanymi rozkładami tła nie wskazuje na znaczące niezgodności, które mogłyby wskazywać na istnienie ciemnego fotonu, wobec czego autor wyznacza górną granicę na sprzężenie pomiędzy nowym bozonem a fotonem w zbadanym obszarze masy e^+e^- ($\epsilon^2 < 10^{-3}$). Zdaniem recenzenta warto by było w tym miejscu odwołać do zamieszczonego na stronie 9 wyniku ($\epsilon^2 < 10^{-5}$) z cytowanej pracy Adlarson et al., której Damian Pszczel jest współautorem. Kolejny wyznaczony przez autora rozprawy limit dotyczy kanału rozpadu mezonu $\eta \rightarrow e^+e^-$. Autor, inaczej niż we wspomnianej pracy Berłowskiego, poszukuje sygnału w różnych przedziałach masy brakującej układu pp . W tym celu dopasowuje zdefiniowane w Rozdziale 7 składniki do rozkładów masy efektywnej e^+e^- dla różnych szerokości przedziałów tej masy oraz różnych wartości masy brakującej układu pp . Otrzymane ograniczenie to $BR_{limit}(\eta \rightarrow e^+e^-) = 6.2 * 10^{-5}$. Szkoda tylko, że autor nie porównuje tego wyniku z otrzymanym w pracy Berłowskiego $BR_{limit}(\eta \rightarrow e^+e^-) = 3.9 * 10^{-6}$.

Rozprawę zamyka podsumowanie, w którym autor przytacza otrzymane (i wymienione wyżej) wyniki. Zwraca też uwagę, że w przyszłości połączenie danych z wielu lat pozwoliłoby zredukować błędy a badania inkluzywnych rozkładów masy e^+e^- znacznie zwiększyłoby statystykę.

Drobne (głównie redakcyjne) błędy pogarszają obraz pracy. Poza wspomnianymi wyżej to na przykład opis Rysunków 8.24-8.32 jest źle zredagowany. Wzór 8.7 określający stosunki rozgałęzień zawiera pierwiastek z liczby ujemnej ($m_e \leftrightarrow m_\mu$). Na tej samej stronie w drugim wierszu o góry w wyrażeniu dotyczącym β brak jest symbolu BR choć i po jego dodaniu nie zgadza się one ze znaczeniem β ze strony 99. W trzecim wierszu od dołu strony 102 wymiar się nie zgadza. Na stronie 98 wyrażenie v_j^b nie jest zdefiniowane. Pochodzenie wzorów 8.6 i 8.7 nie jest podane i zdaniem recenzenta wzory te powinny być szerzej omówione. Niestety momentami pracy brak staranności.

Praca doktorska mgr Damiana Pszczela przedstawia ciekawą analizę. Oceniam, że jej głównym wynikiem jest wyznaczenie ograniczenia na sprzężenie „ciemnego fotonu” do fotonu. Ważne są również wyniki dotyczące czynnika przejścia oraz stosunku rozgałęzień kanału rozpadu $\eta \rightarrow e^+e^-$ bo są potwierdzeniem otrzymanych już przez współpracę WASA-at-COSY rezultatów, ale potwierdzeniem uzyskanym w prowadzonej odmiennymi (częściowo) kanałami analizie na zupełnie nowych danych doświadczalnych.

Uważam, że recenzowana praca w pełni spełnia warunki stawiane przez ustawę pracom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie mgr Damiana Pszczela do dalszych etapów przewodu doktorskiego.