

Dr hab. Jacek Rządkiewicz, prof. NCBJ
Narodowe Centrum Badań Jądrowych
ul. Andrzeja Sołtana 7, 05-400 Otwock-Świerk

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Jakuba Zielińskiego „Badanie atomów antyprotonowych i granic oddziaływań jądrowych i elektromagnetycznych”.

Rozprawa doktorska mgr. Jakuba Zielińskiego „Badanie atomów antyprotonowych i granic oddziaływań jądrowych i elektromagnetycznych” (tytuł angielski: *‘Study of antiprotonic atoms and the limits of the nuclear and electromagnetic forces’*) została przygotowana na Politechnice Warszawskiej pod kierunkiem promotorów prof. Georgy’ego Kornacov’a oraz prof. Adama Kisiela. Rozprawa poświęcona jest opracowaniu nowej metody badania atomów antyprotonowych w laboratorium CERN bezpośrednio wewnątrz pułapki Penninga-Malmberga w warunkach ultrawysokiej próżni poprzez wychwytywanie fragmentów powstających na skutek procesów anihilacji antyprotonu z nukleonem jądra atomowego. Rozprawa ma formę opracowania liczącego 238 stron, podzielonego na 10 rozdziałów i wyczerpujący spis literatury zawierający odniesienia do 153 pozycji bibliograficznych. Praca zawiera również streszczenie w języku polskim i angielskim, dodatki (załączniki) przedstawiające szczegóły rozwijanych narzędzi kontrolnych i analitycznych oraz listę rysunków, tabel i używanych skrótów.

Rozprawa doktorska rozpoczyna się od krótkiego wstępu, w którym jako cel naukowy przedłożonej rozprawy wskazano opracowanie nowej metody badania atomów antyprotonowych bezpośrednio z wykorzystaniem pułapki Penninga-Malmberga. Wydaje się, że cel ten można było wskazać nieco precyzyjniej jako opracowanie elementów nowej metody badania atomów antyprotonowych a nie całej metody. We wstępie doktorant jako motywację do prowadzenia niniejszych badań przywołuje możliwość bezpośredniego badania fundamentalnych symetrii oraz oddziaływań poprzez badania stanów związanych antymaterii w tym atomów antyprotonowych. Dodatkowo w streszczeniu pracy przywołana jest motywacja prezentowanych badań związana z możliwością uzyskania informacji na temat oddziaływań elektromagnetycznych i jądrowych, a także na temat rozkładu neutronów i protonów w pierwotnym jądrze. Przedstawiona motywacja uzasadniająca potrzebę niniejszych badań przedstawiona jest w sposób rzetelny i wyczerpujący.

W rozdziale drugim doktorant omówił strukturę materii w ramach modelu standardowego. W sposób uproszczony omówione zostały struktura atomu, jądra atomowego oraz rozkład nukleonów wewnątrz jądra atomowego. W rozdziale omówiono również proces kształtowania się atomów antyprotonowych, w szczególności proces wychwytu antyprotonu na wysoko wzbudzone poziomy rydbergowskie oraz de-ekscytację atomu poprzez emisję promieniowania rentgenowskiego lub elektronów Augera. Doktorant jako estymację głównej liczby kwantowej poziomu rydbergowskiego, do którego następuje wychwyt antyprotonu przyjął $n \approx 38$. Proszę o wskazanie źródła niniejszej estymacji oraz o uszczegółowienie niniejszej estymacji w kontekście wychwytu antyprotonu do atomów o różnej liczbie atomowej. Inaczej mówiąc

proszę o odpowiedź na pytanie: czy estymacja $n \approx 38$ dotyczy zarówno atomów o niskim jak i wysokim Z.

Rozdziały trzeci i czwarty omawiają metody pułapkowania cząstek naładowanych za pomocą pułapek Penninga i Paula oraz nowatorską metodę wytwarzania atomów antyprotonowych w pułapce Penninga–Malmberga. Schemat wytwarzania atomów antyprotonowych wewnątrz pułapki przedstawiony jest w sposób jasny i zrozumiały. Niemniej jednak pożądane w tym miejscu byłoby przedstawienie bardziej szczegółowego schematu dwu-etapowego wzbudzenia atomów do stanów rydbergowskich wraz z informacją o użytych laserach. W szczególności proszę o podanie informacji o długości fal emitowanych przez oba lasery i informacji o wzbudzanych przez nie poziomach atomowych.

W rozdziale piątym opisane zostały laboratoria eksperymentalne CERN wraz z kompleksem akceleratorowym, fabryką antymaterii zapewniającą produkcję zimnych antyprotonów, pierścieniem antyprotonowym bardzo niskich energii (ELENA) oraz aparaturą eksperymentu AEgIS, z wykorzystaniem której prowadzony jest program badań atomów antyprotonowych. W rozdziale znajdują się informacje o aktywnej roli doktoranta w pracach przy aparaturze eksperymentu AEgIS, w szczególności dotyczące prac związanych z rozwojem aparatury poprzez opracowanie nowego systemu sterowania. W tym miejscu prosiłbym o uzupełnienie informacji, jakie modyfikacje aparatury i systemu sterowania są jeszcze konieczne, aby możliwe stało się efektywne badanie atomów antyprotonowych.

W rozdziale szóstym omówiono użyte w pracy pakiety symulacyjne dedykowane fizyce wysokich energii, w tym pakiety GEANT4 i FLUKA oraz przedstawiono szczegółowy opis głównych symulacji opracowanych na potrzeby niniejszej pracy. W dalszej części rozdziału przedstawiono symulacje, których celem była optymalizacja procesu wychwytu antyprotonów. Na podstawie przeprowadzonych symulacji określono optymalną konfigurację do wychwytu antyprotonów przy potencjale pułapkującym równym 14 kV, co wymaga zastosowania kombinacji folii mylarowej o grubości 1400 nm oraz folii parylenowej o grubości 100 nm. Taki układ pozwala osiągnąć skuteczność wychwytu przekraczającą 90%. Niniejszy wniosek należy uznać za ważne osiągnięcie badawcze przedstawionej do recenzji rozprawy. W ostatniej części rozdziału przedstawiono symulacje dotyczące procesu anihilacji antyprotonu w jądrze atomowym. Zaprezentowano niezwykle ciekawe wyniki rozkładów fragmentów powstałych w wyniku anihilacji antyprotonów w jądrach ^{232}Th w funkcji liczby protonów oraz neutronów w jądrach końcowych. W pracy zaprezentowano symulacje wykonane przy użyciu pakietów GEANT4 v11.1, GEANT4 v11.2 oraz FLUKA. Otrzymanie niniejszych wyników należy uznać za ważne osiągnięcie naukowe doktoranta. Przedstawiona interpretacja otrzymanych wyników wydaje się jednak nieco pobieżna. Dlatego też prosiłbym o rozszerzenie interpretacji uzyskanych przez doktoranta wyników poprzez próbę bardziej szczegółowego opisu tzw. list fizycznych użytych w pakiecie GEANT, szczególnie w kontekście zastosowanych modeli struktury jądra atomowego, które determinują rozkłady fragmentów i wynikające z tego różnice pomiędzy symulacjami GEANT i FLUKA. Dodatkowo prosiłbym o komentarz dotyczący statystyki symulowanych zdarzeń (10^4), która w kontekście wielu kanałów fragmentyzacji wydaje się skromna oraz o komentarz dotyczący potencjalnych przyczyn niższych wydajności

produkcji fragmentów powstałych w wyniku anihilacji antyprotonów w jądrach ^{232}Th uzyskiwanych w symulacjach FLUKA niż w tych uzyskiwanych za pomocą pakietu GEANT. W rozdziale przedstawiono również rozkłady średniej energii fragmentów na ładunek elektryczny dla produktów oddziaływań antyproton–jądro dla różnych izotopów (^{232}Th , ^{197}Au , ^{127}I , ^{40}Ar). Wyniki jednoznacznie wskazują, że lżejsze fragmenty powstające w wyniku procesu anihilacji antyprotonu w jądrze atomowym charakteryzują się znacznie większymi wartościami energii niż fragmenty cięższe. W rozdziale omówiono również wyniki symulacji wydajności produkcji fragmentów możliwych do wychwycenia przy założeniu prostego kryterium energetycznego z potencjałem $V=10$ kV oraz dla pułapki typu Penninga–Malmberga. Symulacje pokazały, że pułapki Penninga–Malmberga są zdolne do wychwytywania szerszego zakresu fragmentów, umożliwiając tym samym rejestrację większości cięższych produktów powstających w wyniku fragmentacji indukowanej oddziaływaniem antyproton–jądro atomowe. Dodatkowo pokazano, że efektywność pułapkowania wzrasta wraz ze spadkiem energii powstających fragmentów. Należy podkreślić, że uzyskane wyniki mają ważny aspekt praktyczny związany z możliwością pułapkowania powstających fragmentów i tym samym możliwością ich efektywnego badania. W kolejnej części rozdziału doktorant w sposób wyczerpujący zaprezentował symulacje współczynnika halo neutronowego dla różnych izotopów oraz rekomendacje dotyczące metod eksperymentalnych umożliwiających rozróżnianie sygnałów o danej liczbie masowej i atomowej. Wyniki symulacji halo peryferyjnego dla jąder ^{12}C i ^{14}N , które sugerują istnienie peryferyjnego halo protonowego (w szczególności dla ^{14}N) wydają się dość zaskakujące. Mimo, że doktorant słusznie zwraca uwagę na konieczność dalszych badań eksperymentalnych, które pozwoliłyby zweryfikować niniejsze wyniki, prosiłbym o rozwinięcie dyskusji dotyczącej samej symulacji współczynnika halo. W szczególności proszę o komentarz dotyczący błędów statystycznych i systematycznych otrzymanych przewidywań teoretycznych wartości halo i halo peryferyjnego.

W rozdziale siódmym i ósmym przedstawiono systemy sterowania i sekwencjonowania eksperymentu AEgIS oraz analizę danych eksperymentalnych. W szczególności przedyskutowano przetwarzanie danych uzyskanych z symulacji, w tym tych dotyczących fragmentacji, których celem było określenie zakresu jąder atomowych, które mogą być otrzymywane w procesie rozszczepienia indukowanego przez antyprotony. Warto podkreślić, że przeprowadzone symulacje obejmowały ponad 3000 różnych izotopów. W rozdziale ósmym przedstawiono również opis dwóch głównych detektorów eksperymentu AEgIS oraz sposób przetwarzania i analizy danych eksperymentalnych pochodzących z tych układów. Opis ten uzupełniony został dyskusją dotyczącą niepewności wydajności produkcji izotopów oraz współczynników peryferyjnego halo neutronowego. Przedstawiona dyskusja jest wyczerpująca i nie budzi wątpliwości.

Rozdział dziewiąty przedstawia wybrane wyniki eksperymentalne uzyskane z wykorzystaniem nowego systemu sterowania CIRCUS, którego doktorant jest jednym z twórców. System ten, jak deklaruje doktorant, przyczynił się do znacznego wzrostu wydajności produkcji antywodoru w eksperymencie AEgIS w porównaniu z rezultatami uzyskanymi podczas pierwszej demonstracji tej metody w 2018 roku. Pozwoliło to na uzyskanie wydajności produkcji wynoszącej około 2 atomy antywodoru na jeden przebieg eksperymentalny. W kolejnej części

rozdziału przedstawiono systematyczne badania wpływu całkowitej grubości folii (degradatorów) Mylar i Parylene na skuteczność spowalniania i pułapkowania antyprotonów oraz porównanie wyników pomiarowych z przewidywaniami symulacji GEANT4. Badania pokazały, że produkcja antywodoru w eksperymencie AEgIS odbywa się dla folii Mylar o grubości 1460 nm, co jest zgodne (w granicach niepewności) z nominalną grubością 1400(140) nm otrzymaną w symulacjach jako tę zapewniającą najwyższą wydajność produkcji. W rozdziale przedstawiono również główne wyniki kampanii pomiarowych ze zjonizowanymi jonami He i Ar oraz z wiązką antyprotonów przeprowadzonych w eksperymencie AEgIS w latach 2023 i 2024. Były to pionierskie badania dotyczące wychwytywania dodatnio naładowanych produktów wtórnych powstających w wyniku oddziaływań antyprotonów z gazem szczątkowym znajdującym się wewnątrz pułapki Penninga–Malmberga. Przeprowadzona seria pomiarów miała na celu lepsze zrozumienie procedury zagnieżdżonej pułapki oraz mechanizmu powstawania sygnału w spektrometrze czasu przelotu. W szczególności zmierzono widma czasu przelotu (TOF) jonów He ($q=1+,2+$) i Ar (q od $1+$ do $5+$) zarejestrowane podczas eksperymentu AEgIS. Analiza wyników pokazała możliwość jednoczesnego pomiaru wydajności produkcji jonów z wykorzystaniem sygnału ze scyntylatorów jako znacznika anihilacji, co pokazuje, że detektory scyntylacyjne stanowią ważne narzędzie do identyfikacji produkcji jonów związanej z procesami anihilacji. Niniejsze wyniki zaprezentowane w rozprawie oraz w publikacji F. P. Gustafsson, M. Volponi, J. Zieliński, et al., [148] (której doktorant jest jednym z głównych autorów – trzecia pozycja na liście autorów w kolejności niealfabetycznej) stanowi kolejne ważne osiągnięcie naukowe doktoranta. Należy jednak zwrócić uwagę na pewne ograniczenia zaprezentowanej metody związanej z czułością pomiarów dla najsilniej zjonizowanych ciężkich jonów posiadających zaledwie kilka elektronów lub całkowicie zjonizowanych, które z punktu widzenia anihilacji odgrywają kluczową rolę. Ograniczenia te wynikają zarówno z czułości zaprezentowanej metody jak i z przekrywania sygnałów TOF z jonami He. Dlatego też prosiłbym o krótki komentarz dotyczący ewentualnych sposobów na przezwycięzenie niniejszych ograniczeń w przyszłych badaniach atomów antyprotonowych. Prosiłbym również o komentarz dotyczący niepewności wartości m/q przedstawionych w tabeli 9.2. Uwzględniając wielkości przedstawionych niepewności eksperymentalnych m/q (exp) widać systematyczne rozbieżności z wartościami m/q (lit), co może sugerować niedoszacowanie tychże niepewności. W końcowej części rozdziału porównano eksperymentalne sygnały czasów przelotu (TOF) z symulacjami uwzględniającymi wyłącznie jony He^{2+} oraz te obejmujące łączny sygnał od jonów He^{2+} i fragmentów powstających w wyniku anihilacji antyprotonów na jądrach ^{40}Ar . Model uwzględniający powstawanie fragmentów w wyniku anihilacji antyprotonów daje lepsze dopasowanie do danych eksperymentalnych wskazując na ich obecność w eksperymencie. Przedstawiona w pracy interpretacja danych wskazuje jednak, że ze względu na znaczne fluktuacje statystyczne sygnału eksperymentalnego oraz niepewności wynikające z zastosowanego modelu symulacyjnego, uzyskane wyniki należy traktować jedynie jako przesłankę wskazującą na potencjalną możliwość obecności występowania fragmentów powstających w wyniku anihilacji antyprotonów na jądrach ^{40}Ar . Przedstawiona dyskusja świadczy o skrupulatności i rzetelności jeśli chodzi o wyciąganie wniosków naukowych, które jasno wskazują na niedoskonałości obecnego podejścia eksperymentalnego i symulacyjnego przez co motywują do dalszego rozwoju obu podejść. Doktorant w konkluzji wskazuje na

konieczność potwierdzenia uzyskanych wyników w przyszłych badaniach o większej statystyce i z wykorzystaniem bardziej precyzyjnego modelu symulacyjnego. W szczególności w pracy zasugerowano odtworzenie szczegółowych symulacji wykonanych w pakiecie GEANT4 z wykorzystaniem innych narzędzi, takich jak FLUKA, co pozwoliłoby lepiej oszacować niepewności oszacowań teoretycznych. Proszę o komentarz dotyczący tej sugestii i wskazanie, które z używanych danych teoretycznych szczególnie wymagają bardziej precyzyjnych oszacowań lub weryfikacji eksperymentalnych.

Jeżeli chodzi o część edytorską, należy stwierdzić, że praca przygotowana jest bardzo starannie, włącznie z pozycjami bibliograficznymi, wzorami oraz listą rysunków i tabel. Wskazując pewne niedoskonałości edytorskie należy stwierdzić, że niektóre rysunki powinny być opisane bardziej szczegółowo, np. w opisie rysunków 6.8 i 6.9 powinna znaleźć się informacja o użytych modelach teoretycznych w Geant4v11.1 i Geant4v11.2 lub przynajmniej odnośnik do takiej informacji. Dodatkowo wprowadzając rozróżnienie między wersjami pakietu Geant4 należało konsekwentnie taką informację dodawać na kolejnych rysunkach prezentujących odpowiednie symulacje (rysunki 6.10, 6.11, 6.12, 6.15). Konsekwencji zabrakło również w określeniu radiacyjnej deekscytacji atomów antyprotonowych, które raz określane są w pracy jako promieniowanie X (ang. *X-rays*, str. 11) a raz jako promieniowanie gamma (ang. *gamma emission* str. 19).

Powyższe uwagi nie mają zasadniczego wpływu na pozytywną ocenę pracy doktorskiej. Recenzowana rozprawa stanowi autorski wkład mgr. Jakuba Zielińskiego w badania procesów anihilacji atomów antyprotonowych. Przeprowadzone symulacje egzotycznych procesów atomowych były czasochłonne i wymagały zastosowania zaawansowanych metod numerycznych. Pewien niedosyt pozostawia prezentacja wyników eksperymentalnych, które nie zawsze są jednoznaczne, choć ta niedoskonałość wynika ze skali trudności w obserwowaniu procesów anihilacji w atomach antyprotonowych. Wiedza zdobyta podczas przygotowywania niniejszej pracy z całą pewnością pozwoli na dalsze ważne badania w dziedzinie fizyki atomowej, jądrowej oraz fizyki wysokich energii z wykorzystaniem unikatowej infrastruktury w laboratoriach CERN, co samo w sobie stanowi istotną wartość przedłożonej do recenzji rozprawy. Wyniki prac, które stanowią część niniejszej rozprawy doktorskiej zostały opublikowane w recenzowanych czasopismach naukowych, w których doktorant jest jednym z głównych autorów. Praca zawiera elementy nowości i spełnia wymagania zarówno zwyczajowe, jak i formalne stawiane rozprawom doktorskim. Wnioskuje o dopuszczenie mgr. Jakuba Zielińskiego do dalszych etapów postępowania doktorskiego.

Jacek Rzadkiewicz

