



Kraków, 28 maja 2026 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

Mgr Jakub Zieliński

(imię i nazwisko doktoranta)

pod tytułem

Study of Antiprotonic Atoms and the limits of the nuclear and electromagnetic forces

przygotowanej pod kierunkiem

dr. hab. Georgyego Kornakova

prof. dr. hab. Adama Kisiela

Charakterystyka i opis rozprawy

Rozprawa doktorska pana mgr. Jakuba Zielińskiego pt. „Study of Antiprotonic Atoms and the limits of the nuclear and electromagnetic forces” dotyczy badania egzotycznych układów - atomów antyprotonowych - w których jeden z elektronów został zastąpiony przez antyproton. Badania te autor przeprowadził w eksperymencie AE $\bar{g}$ IS (*Antimatter Experiment: Gravity, Interferometry, Spectroscopy*) w laboratorium Antiproton Decelerator (AD) w CERNie.

Autor przedstawił nowatorską metodę badania atomów antyprotonowych poprzez pułapkowanie ich fragmentów anihilacji w pułapce Penninga-Malberga w warunkach ultrawysokiej próżni.

Głównym osiągnięciem autora było zaimplementowanie symulacji oddziaływania antyprotonów z jądrami atomowymi przy wykorzystaniu najnowszych kodów Monte-Carlo (Geant4 i FLUKA) wraz z modelem pułapki jonowej. Ponadto, opracował model symulacji widma czasu przelotu (TOF) który w połączeniu z wydajnościami produkcji izotopów pozwala na planowanie i interpretację wyników eksperymentów.

Autor przeprowadził szereg usprawnień eksperymentu AE $\bar{g}$ IS w celu pomiarów atomów antyprotonowych. W szczególności rozwinął nowatorski system sterowania eksperymentu CIRCUS, który pozwala na w pełni automatyczną konfigurację systemu detekcyjnego i odczytu danych. Należy podkreślić, że autor odegrał kluczową rolę w implementacji i uruchomieniu tego systemu.

Autor przedstawił w rozprawie wyniki pomiarów przeprowadzanych w latach 2023 i 2024 i porównał je do wyników otrzymanych z symulacji. W szczególności, scharakteryzował wydajność pułapkowania antyprotonów przy różnych konfiguracjach folii degradujących (Mylar, Parylene). Przedstawił wyniki eksperymentów pułapkowania jonów dodatnich powstałych w wyniku



oddziaływania antyprotonów z resztkowym gazem ^{40}Ar w pułapce Penninga- Malberga. Pokazał, że zastosowanie zagnieżdżonej pułapki Penning- Malberga pozwala na uwięzienie jonów dodatnich zaraz po anihilacji antyprotonów. W oparciu o widma czasu przelotu TOF przeprowadził analizę fragmentów anihilacji pokazując, że pokrywają się one częściowo z przewidywaniami modelowymi. Wyniki nie są jednak jednoznaczne ze względu na duże tło pochodzące od resztkowego gazu oraz ograniczoną ilość danych.

Autor jest współautorem sześciu publikacji w tym jednej publikacji konferencyjnej w których przedstawione są szczegóły implementacji systemu kontroli i odczytu danych oraz wyniki pomiarów. Najnowsze wyniki pomiarów przedstawionych w rozprawie zostały udostępnione przez kolaborację AE $\bar{\gamma}$ IS na arXiv w grudniu 2025 (**kiedy można oczekiwać publikacji?**). Należy podkreślić, że w większości są to publikacje z kilkoma autorami.

Rozprawa jest napisana w języku angielskim w poprawnym stylu (tutaj zarzut mam jedynie do stosowania przez autora kontrakcji np. *are't* czy *doesn't*). Praca ma standardowy układ, zawiera streszczenie po angielsku i po polsku, przedmowę, podziękowania, dziesięć rozdziałów, listę osiągnięć, dziewięć dodatków, listę skrótów, listę rysunków i tabel oraz bogatą bibliografię. W sumie rozprawa liczy 238 stron. Pod względem edytorskim praca jest starannie napisana **brakuje jednak numerów dla niektórych równań w rozdziałach osiem i dziewięć. Kilka rysunków (zrzutów ekranów) w dodatkach jest zbyt małych**. W rozdziałach osiem i dziewięć zawarte jest dużo technicznych szczegółów pomiarów, ale autor zadbał o taki układ pracy (dużo dodatków), że nie wpływa to na przejrzystość przekazu informacji. Jest to bez wątpienia cenna publikacja dotycząca badania produkcji atomów antyprotonowych w eksperymencie AE $\bar{\gamma}$ IS.

W rozdziale wprowadzającym, autor porusza wciąż nierozwiązany problem asymetrii pomiędzy materią-antymaterią (barionami-antybarionami) widoczny we wszechświecie. Jest to główna motywacja do prowadzonych przez autora badań nad stanami związanymi takimi jak atomy antywodorowe, pozytonium, czy atomy antyprotonowe, które pozwalają na badanie fundamentalnych symetrii i oddziaływań.

W rozdziale drugim autor wprowadził Model Standardowy szerzej dyskutując antymaterię. W rozdziale tym autor przedstawił również strukturę budowy atomów (powłok elektronowych) i jąder atomowych (model powłokowy i kropłowy) wraz z rozkładem neutronów w jądrach atomowych (skórka neutronowa, halo neutronowe). Autor zauważa, że tak bogatą strukturę budowy jąder atomowych można badać przy wykorzystaniu egzotycznych atomów (w tym atomów antyprotonowych).

Krótki trzeci rozdział traktuje o technikach pułapkowania naładowanych cząstek przy pomocy pułapek Penninga i Paula. W rozdziale czwartym dyskutuje nowoczesne techniki produkcji atomów antyprotonowych przy wykorzystaniu wiązek antyprotonowych czy techniki zaproponowanej w tej rozprawie polegającej na uwięzieniu antyprotonów i jonów w pułapkach. Przewaga metody zaprezentowanej przez autora (w porównaniu do produkcji przy użyciu wiązek antyprotonowych) jest możliwość badania kolejnych etapów produkcji oraz anihilacji atomów antyprotonowych. W szczególności, możliwe jest badanie fragmentów anihilacji a tym samym oddziaływania antyprotonów z jądrami. Autor przedstawił w tym rozdziale schemat produkcji atomów antyprotonowych w pułapkach jonowych. Omawia również możliwość kontrolowanego procesu produkcji fragmentów jądrowych poprzez powtórzenie procesu wymiany ładunkowej uwięzionych fragmentów.

W rozdziale piątym autor w sposób wyczerpujący opisuje infrastrukturę CERN wykorzystywaną do produkcji (PS) i spowalniania (AD i ELENA) antyprotonów, aparaturę eksperymentu AE $\bar{\gamma}$ IS oraz system kontroli i wyzwalania danych CIRCUS. Ponadto, podaje imponującą listę zadań aparaturowych zrealizowanych w ramach doktoratu w których odegrał wiodącą rolę. Na szczególną



uwagę, zasługuje wkład autora w rozwój systemu CIRCUS, który pozwala na autonomiczne prowadzenie predefiniowanych eksperymentów bez nadzoru, co wymaga synchronizacji wszystkich procesów w systemie detekcyjnym i odczytu.

Autor sprawnie przeprowadza czytelnika przez eksperyment AE $\bar{g}$ IS (rys. 5.3) dyskutując m.in. system prowadzenia wiązki, źródła jonów, system nadprzewodzących magnesów i próżniowy. Ponadto, opisuje szczegółowo systemy spowalniania (folie degradujące, chłodzenie elektronowe) i pułapkowania antyprotonów (pułapka Penninga - Malberga).

System detekcyjny AE $\bar{g}$ IS zawiera detektory scyntylacyjne ESDA i mikrokanałowe MCP do pomiaru pionów i fotonów (produktów anihilacji antyprotonów oraz pozytonów). System ten zawiera również dwa oscyloskopy, które w połączeniu z MCP pozwalają na pomiar czasu przelotu produktów anihilacji antyprotonów. System wyzwalania zbudowany jest w oparciu o ARTIQ/Sinara, który wymaga wysokiej synchronizacji pomiędzy różnymi procesami od rozpoczęcia pomiaru, poprzez manipulację plazmą do wyzwalania odczytu detektorów. Analiza danych odbywa się w środowisku ALPACA (rys. 5.14) z wbudowanym optymalizatorem bayesowskim w celu optymalizacji złożonych zadań.

Rozdział szósty zawiera opis zaimplementowanych przez autora pełnych symulacji oddziaływania antyprotonów z jądrami atomowymi przy wykorzystaniu najnowszych kodów Monte-Carlo (Geant4 i FLUKA) wraz z modelem pułapki dla powstałych w wyniku tego oddziaływania fragmentów jądrowych. Pełna lista wykonanych przez autora zadań znajduje się na początku rozdziału.

Są to złożone symulacje, które zawierają pułapkowanie i anihilację antyprotonu przez jądro atomowe, produkcję cząstek w wyniku anihilacji, oraz wzbudzenie oraz deekscytację jąder atomowych wraz z fragmentacją. Autor przeprowadził również szereg analiz na danych symulacyjnych w celu oszacowania ilości interesujących przypadków.

Bazując na tych symulacjach autor oszacował wydajność pułapkowania antyprotonów w zależności od kombinacji i grubości folii degradujących i przyłożonego napięcia (tabela 6.1). Ponadto, porównał rozkłady fragmentów z anihilacji antyprotonów i ^{232}Th otrzymane w symulacjach Geant4 z różnymi listami procesów fizycznych (rys. 6.8) oraz Fluka (rys. 6.9). Różnice pomiędzy wynikami Geant4 są nieznaczne, natomiast symulacje Fluka znacznie się od nich różnią. Autor tłumaczy to uproszczonym modelem fizycznym użytym w symulacjach Fluka (**dlaczego w takim razie badano ten model?**). Jako domyślny model produkcji wybrał Geant4 z listą procesów fizycznych (FTFP_BERT_HP) do dalszych badań.

Autor pokazał rozkład izotopów wygenerowanych w tej reakcji (rys.10) oraz rozkłady średniej energii przez ładunek jonu $\langle E/Q \rangle$ dla kilku przykładowych tarcz (^{40}Ar , ^{127}I , ^{197}Au i ^{232}Th) w funkcji liczby masowej A wyprodukowanych fragmentów (rys. 6.11). $\langle E/Q \rangle$ zmniejsza się ze wzrostem A co oznacza, że małe fragmenty są trudniejsze do uwięzienia w pułapkach jonowych. Pokazał również w rozkład stosunku masy do ładunku (m/Q) wyprodukowanych fragmentów oraz podał warunki jakie muszą być spełnione, aby uwięzić je w pułapce Penninga-Malberga o promieniu $R = 15$ mm, polu magnetycznym $B = 5$ T i różnicy potencjałów $V = 10$ kV.

Autor przedyskutował możliwości badanie halo neutronowego z porównania procesów anihilacji $n\bar{p}$ do $p\bar{p}$ z produkcją fragmentów ($A-1, Z$) i ($A-1, Z-1$). Metoda ta wymaga dyskryminacji fragmentów (m/Q) z precyzją na poziomie 10^{-4} u/e (rys. 6.16, tabela 6.3). Pokazał również, że atomy antyprotonowe mogą być użyte jako źródło w produkcji egzotycznych izotopów. W tym celu proponuje wykorzystanie wielostopniowego procesu z wychwytem i anihilacją antyprotonu aż do momentu otrzymania docelowego izotopu (tabele 6.4 – 6.6).

Ostatecznie przedstawił modelowanie widma czasu przelotu TOF w celu identyfikacji fragmentów o różnym m/Q w pułapce Penninga-Malberga bazując na równaniu 6.10. W modelu tym autor zamodelował rzeczywiste warunki eksperymentalne bez potrzeby rozwiązywania złożonego problemu wyznaczenia potencjału nieznneutralizowanej plazmy zawierającej fragmenty anihilacji. W tym uproszczonym modelu założył, że a) radialny rozkład plazmy nie zaburza widma TOF, b) cząstki wzdłuż osi z są rozłożone zgodnie z uogólnionym rozkładem Gaussa, i c) cząstki są jednorodnie rozłożone w potencjale pułapkującym. Przykład widm TOF dla antyprotonów przy założeniu



ztermalizowanej i nie ztermalizowanej plazmy pokazane są na rysunku 6.20. Autor porównał ten model z pomiarami eksperymentalnymi dla antyprotonów (dodatek H) otrzymując relatywnie dobrą zgodność. Widoczne różnice w kształcie widm autor tłumaczy zastosowaniem uproszczonego modelu 1D w opisie rozkładu plazmy i potencjału elektrycznego. Do poprawy zgodności konieczne jest zastosowanie pełnego modelu 3D potencjału elektrycznego (**jak bardzo wyniki uproszczonego modelu mogą odbiegać od tych z modelu 3D?**). W końcu, autor przedstawił przykładowe widma TOF dla fragmentów anihilacji antyprotonów i ^{40}Ar dla przypadków ztermalizowanej i nie ztermalizowanej plazmy (rys. 6.21).

W rozdziale siódmym autor przedstawił procedury sterowania plazmą wykorzystywane w eksperymencie AE $\bar{g}$ IS w których implementacji odegrał znaczącą rolę. Należą do nich m.in. rozwój komunikacji pomiędzy akceleratorem ELENA i AE $\bar{g}$ IS, rozwój procedury kompresji plazmy i uruchamiania zagnieżdżonej pułapki, implementacja konfiguracji eksperymentów z zagnieżdżoną pułapką, implementacja techniki TOF dla wysoko naładowanych jonów, oraz implementacja procedury skanowania HV w celu pomiaru energii naładowanych jonów. Autor sprawnie i klarownie przedstawił wszystkie techniczne aspekty związane z prowadzeniem eksperymentów produkcji atomów antyprotonowych z uwzględnieniem wstrzykiwania wiązki, etapami chłodzenia i pułapkowania antyprotonów i jonów w zagnieżdżonych pułapkach. Rozdział zamyka opis procedury pomiaru TOF fragmentów anihilacji.

Rozdział ósmy zawiera opis wstępnej analizy danych z symulacji i eksperymentu w celu przygotowania odpowiedniego formatu danych i oszacowania niepewności statystycznych i systematycznych. Autor przygotował odpowiedni format danych z symulacji wydajności degradacji energii antyprotonów w foliach i oddziaływania antyprotonów z jądrami atomowymi do dalszych etapów analizy. Głównym celem tych symulacji było zamodelowanie najlepszych warunków do pułapkowania antyprotonów z akceleratora ELENA.

Autor oszacował procentowy udział źle zrekonstruowanych zdarzeń (niefizyczne wartości) w związku z przybliżonym modelem pola magnetycznego w pułapce jonowej (**można było podać więcej szczegółów**), który wynosi około 0.88(2)% i 15(6)% przy zastosowaniu pojedynczej i podwójnej folii (**nie ma jednak podanej żadnej informacji na temat użytych folii**).

Ponadto, autor przygotował symulacje fragmentacji dla około 3000 różnych izotopów ($Z < 100$) użytych jako tarcze w procesie anihilacji antyprotonów. W analizie fragmentów połówkowy czas życia i masę izotopów wziął z bazy danych IAEA - NDS. W przypadku braku takich danych, połówkowy czas życia bazuje na Geant4, a za masę przyjął $m = A \langle m_n \rangle$, gdzie $\langle m_n \rangle$ to średnia masa nukleonu. Autor podał również sposób szacowania niepewności wyznaczenia liczby wyprodukowanych izotopów (również w reakcjach łańcuchowych) oraz peryferycznego halo neutronowego. **Tutaj autor zwiększa arbitralnie te niepewności o 10% (20%) dla wyprodukowanych izotopów (skąd takie wartości?).**

Dla danych eksperymentalnych autor zapisuje dane z każdego scyntylatora ESDA włącznie ze znacznikami czasowymi (tzw. „sync checks”), które pozwalają na rozmieszczenie danych w odpowiednich przedziałach czasowych. Bazując na tych znacznikach autor wyznacza m.in stałe tło pochodzącego z procesów anihilacji antyprotonów w hali eksperymentalnej AD. Autor opisuje również w jaki sposób szacuje ilość uwięzionych antyprotonów bazując na współczynniku konwersji otrzymanym dla jednego ze scyntylatorów ($C_{56} = 36.5$ anihilacji na pojedyncze zliczenie) w symulacjach Geant4. Ilość antyprotonów dla pozostałych scyntylatorów szacuje wykorzystując równanie $N_{ap} \sim S_{SCX} * C_{56} * R_{SCX/SC56}$ gdzie S_{SCX} oznacza sygnał scyntylatora, a stosunek $R_{SCX/SC56} = S_{SCX} / S_{SC56}$ jest wyznaczony eksperymentalnie.

Ponadto, autor opisuje w tym rozdziale sposób odejmowania tła w detektorze MCP na podstawie dwuwymiarowej mapy pikseli z zapisaną odpowiedzią detektora. Tłumaczy sposób zapisywania danych czasowych z oscyloskopu oraz metodę analizy widm TOF w oparciu o dopasowanie funkcji Gaussa i eksponencjalnej. Przykłady dopasowania dla pojedynczego i wielu maksimów przedstawiony jest na rysunkach 8.2 i 8.3 (**te rysunki mają identyczny podpis**). Wartości szczytowe każdego rozkładu brane są za TOF do wyznaczenia wartości m/Q dla wyprodukowanych



fragmentów na podstawie równania 6.10. Ostatecznie, autor omawia zmodyfikowaną procedurę kalibracji TOF (opracowaną dla schłodzonych antyprotonów) dla przypadku wysoko naładowanych jonów. Metoda ta wykorzystuje dwa referencyjne pomiary TOF dla antyprotonów i He^+ , a stosunek m/Q dla uwięzionych jonów przedstawia równanie 8.4. **Dlaczego maksimum dla He^+ jest traktowane jako referencyjne dla pomiarów wysoko naładowanych jonów?** Autor przedstawia również w jaki sposób wylicza błędy statystyczne i systematyczne pomiaru TOF.

Rozdział dziewiąty przedstawia wyniki pomiarów zabranych przez eksperyment AE $\bar{g}$ IS przy użyciu nowego systemu kontroli CIRCUS zaimplementowanego przez autora. Ponadto, autor rozwinął procedury pułapkowania antywodoru oraz wysoko naładowanych jonów.

Nowy system CIRCUS pozwolił w 2023 na autonomiczne zbieranie danych przy 54% efektywnego wykorzystania wiązki. Autor przeprowadził analizę wydajności degradacji energii dla różnych zastawów folii degradujących porównując dane eksperymentalne z przewidywaniami z symulacji. Ponadto, przeprowadził analizę eksperymentów anihilacji antyprotonów z reszkowym gazem w pułapce Penninga-Malberga. W szczególności, oszacował wpływ Ar na chłodzenie antyprotonów oraz porównał widma TOF z symulacjami w celu identyfikacji uwięzionych jonów.

W pierwszej części przedstawia działanie systemu kontroli w tych eksperymentach oraz sposób optymalizacji ustawień tego system w celu maksymalizacji ilości uwięzionych antyprotonów. Autor pokazał, że procedura optymalizacji ustawień wiązki (2 offsety i 2 kąty) jest zbieżna i po około 63 przebiegach spełnia postawione kryteria (rys. 9.1 – **podpis lewego rysunku nie jest kompletny**). Widać jednak wyraźnie, że w następnych przebiegach wciąż następuje wzrost (~23%) ilości antyprotonów. Autor tłumaczy to innymi warunkami w czasie optymalizacji ustawień w porównaniu do tych panujących w późniejszych przebiegach. **Jak można poprawić taką procedurę kierowania wiązką, aby poprawić wyniki?** Autor użył również metodę optymalizacji w oparciu o zestaw 10 parametrów ustawień prowadzenia wiązki, jednak otrzymał porównywalne wyniki z poprzednią metodą (**nie są pokazane żadne wyniki tej 10 wymiarowej optymalizacji**).

Głównie wyniki eksperymentalne zawierają wyniki chłodzenia pozytonium przy pomocy lasera z 380(20) K do ~170 (20)K oraz produkcji anywodoru (rys. 9.2), otrzymane po raz pierwszy przez eksperyment AE $\bar{g}$ IS. **Jaki był dokładnie wkład autora w otrzymanie tych wyników?**

Autor pokazał wyniki przedstawiające frakcję antyprotonów które nie zostały uwięzione w funkcji potencjału pułapki w porównaniu z przewidywaniami z symulacji dla różnych grubości folii degradujących z Mylaru (rys. 93). W eksperymencie została użyta folia o grubości 1400(140) nm. Wynik z symulacji dają najlepszą zgodność dla folii o grubości 1460 nm, co mieści się w zakresie niepewności eksperymentalnych. **Należy jednak zwrócić uwagę, że symulacje dla grubości folii 1400 nm zdecydowanie różnią się od tych w eksperymencie.**

Autor pokazał również frakcję uwięzionych antyprotonów przy zastosowaniu dwóch folii degradujących – głównej (Mylar) i pomocniczej (Parylene). Wyniki w porównaniu do symulacji przedstawione są na rys. 9.4. Wyniki symulacji są zgodne z eksperymentalnymi przy grubości folii głównej 1400 nm i pomocniczej 100 nm. Przy zastosowaniu jedynie folii z Mylaru wyniki są zgodne dla grubości 1460 nm przy potencjale pułapkującym do 8 kV (pełny zakres 15 kV). **Należy jednak zauważyć, że kształty rozkładów znacznie się różnią pomiędzy eksperymentem i symulacją.**

Porównanie wyników eksperymentalnych z symulacjami nie daje jednoznacznej odpowiedzi dotyczących grubości folii degradujących. Autor wskazuje na możliwe przyczyny w uproszczonym modelowaniu i możliwych błędach w produkcji folii. **Czy folie degradujące nie przechodzą pomiarów jakości przed użyciem w eksperymencie? A jeżeli przechodzą to jakie?**

Ostatecznie, autor przedstawił analizę produkcji dodatnio naładowanych cząstek wtórnych wyprodukowanych w procesie oddziaływania antyprotonów z reszkowym gazem w pułapce Penninga-Malberga zebranych w latach 2023 i 2024. W 2023 roku w pułapce była mieszanina gazów N, He i Ar (rys. 9.5). Zmierzone widma TOF (rys. 9.6) wskazują, że wystąpiła anihilacja antyprotonów z He^+ ($m/Q = 4$ u/e) w obszarze pułapki w wyniku czego doszło do produkcji fragmentów o $m/Q = 2$ u/e.



W pomiarach w 2024 w pułapce pozostawiono jedynie Ar przy różnych ustawieniach eksperymentalnych (tabela 9.1). Podczas tych eksperymentów autor zbadał wpływ argonu na chłodzenie antyprotonów pokazując, że średnia energia antyprotonów zmniejsza się wykładniczo w funkcji czasu magazynowania antyprotonów (rys. 9.9). Początkowa średnia energia antyprotonów (zaraz po przejściu przez folię) jest około dwa razy większa w symulacji w porównaniu do tej w eksperymencie. Autor, interpretuje to jako wynik chłodzenia antyprotonów przez reszkowy gaz Ar. Autor wyznaczył również czas magazynowania antyprotonów podczas którego ich średnia energia maleje o czynnik dwa który wynosi $T_{1/2} \sim 1580(4)$ s. Ponadto, przeanalizował rozkłady TOF identyfikując fragmenty m/Q (rys. 9.10 i tabela 9.2). Pierwsze maksimum ($m/q \sim 2$ e/u) pochodzi z anihilacji antyprotonów i reszkowego gazu ^{40}Ar . Autor przeprowadził systematyczne badania tego maksimum dla różnych ustawień eksperymentalnych (rys. 9.11) i porównał wyniki z symulacjami dla dwóch różnych sygnałów: 1) He^{2+} (potencjalne tło) i 2) kombinacji He^{2+} i antyproton ^{40}Ar . Wyniki porównania przedstawił na rys. 9.12 i 9.13. Model z kombinacją sygnałów lepiej opisuje dane eksperymentalne (tabela 9.3). Ostatecznie autor, porównał sygnał w symulacjach do tego w eksperymencie z odjętą kontrybucją od He^{2+} (rys. 9.16 i 9.17). Otrzymane rozkłady nie pozwalają na jednoznaczne stwierdzenie, że są to uwięzione fragmenty.

W rozdziale dziesiątym autor przedstawił dyskusję wyników i perspektywy na przyszłość. Zwrócił uwagę na małą ilość danych eksperymentalnych i związane z tym trudności w modelowaniu reakcji anihilacji antyprotonów i jąder atomowych. Wykorzystanie metody pułapkowania fragmentów anihilacji w zagnieżdżonych pułapkach Peninnga- Maleberga zaproponowanej w rozprawie przyczyni się lepszemu modelowania tych procesów. Ponadto, metoda ta może służyć do badania radioaktywnych izotopów.

Nowatorski system kontroli eksperymentu AE $\bar{g}$ IS rozwinięty przez autora przyczynił się do zebrania dużej ilości danych eksperymentalnych i rozwoju techniki chłodzenia pozytonium. Dzięki modernizacji tego systemu udało się osiągnąć wydajność pułapkowania antyprotonów na rekordowym poziomie 70%.

Autor wykonał szereg eksperymentów przy wykorzystaniu zagnieżdżonej pułapki Peninnga- Maleberga co pozwoliło na pułpakowanie pozytywnie naładowanych jonów. Wyniki obserwacji pozwalają na stwierdzenie, że ilość uwięzionych jonów jest skorelowana z procesem anihilacji antyprotonów. Analiza fragmentów pochodzących z oddziaływania antyprotonów z reszkowym gazem Ar nie pozwoliła jednak na jednoznaczne stwierdzenie czy są one wynikiem anihilacji antyprotonów za względu na ograniczenia metody TOF i ograniczonej ilości danych.

Autor proponuje szereg ulepszeń dotyczących m.in. bardziej efektywnego pułapkowania jonów dodatnich czy zmniejszenia ilości gazu reszkowego w pułapce przy zastosowaniu nowych źródeł jonowych i dalszego rozwoju techniki pułapkowania jonów w eksperymencie AE $\bar{g}$ IS. Zwraca też uwagę na konieczność rozwoju modeli symulacji Geant4 i Fluka w celu lepszej kontroli błędów systematycznych.

Następnie autor podsumował swoje osiągnięcia, a szczegóły techniczne związane z systemem CIRCUS i walidacją metody TOF umieścił w dziesięciu dodatkach. Na końcu umieścił listę skrótów, rysunków, tabel i spis literatury.

Wniosek końcowy

Przedstawiona rozprawa doktorska bez wątpienia zasługuje na wyróżnienie. Autor przedstawił nowatorską metodę badania atomów antyprotonowych przy zastosowaniu zagnieżdżonej pułapki Peninnga- Maleberga w warunkach ultrawysokiej próżni. Wkład autora w przeprowadzenie pomiarów i interpretację wyników jest znaczący i świadczy o szerokiej wiedzy na temat bardzo wyrafinowanych technik pomiarowych jak i fizyki procesów produkcji atomów antyprotonowych. Pomimo tego, że nie udało się osiągnąć jednoznacznych wyników praca ta stanowi pierwszy krok w kierunku kontrolowanej produkcji atomów antyprotonowych przy użyciu tej metody. Jednocześnie



**INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
POLSKIEJ AKADEMII NAUK**

otrzymane wyniki przyczynią się do lepszego zrozumienia oddziaływania antyprotonów z jądrami atomowymi a metody przedstawione w pracy wykorzystane zostaną w badaniu krótkożyciowych radioaktywnych izotopów.

W związku z tym wnioskuję o dopuszczenie kandydata do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Mam nadzieję, że autor ustosunkuje się do moich uwag (zaznaczonych pogrubioną trzcinką) w trakcie obrony.

Jacek Otwinowski

Prof. dr hab. Jacek Otwinowski