

dr hab. Magdalena Skurzok
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej
Uniwersytet Jagielloński
ul. St. Łojasiewicza 11, 30-348 Kraków
magdalena.skurzok@uj.edu.pl

Kraków, 30 kwietnia 2026



UNIWERSYTET
JAGIELLOŃSKI
W KRAKOWIE

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Jakuba Zielińskiego
pt. „Study of antiprotonic atoms and the limits of the nuclear
and electromagnetic forces”**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr inż. Jakuba Zielińskiego pt. *Study of antiprotonic atoms and the limits of the nuclear and electromagnetic forces* została wykonana pod opieką promotorów dr hab. Georgy Kornakova oraz prof. dr hab. Adama Kisiela na Politechnice Warszawskiej.

Badania atomów antyprotonowych, czyli egzotycznych układów materii złożonych z antyprotonu i jądra atomowego, prowadzone od lat 70 XX wieku nadal budzą duże zainteresowanie środowiska naukowego. Wynika to z ich wyjątkowej roli w testowaniu fundamentalnych symetrii oddziaływań oraz w badaniu procesów anihilacji antymaterii z materią, które pozostają jednym z kluczowych zagadnień współczesnej fizyki jądrowej i cząstek elementarnych. Układy te dostarczają cennych informacji na temat oddziaływań antyproton-jądro oraz struktury jąder atomowych, w tym tzw. halo neutronowego. Wciąż jednak wiele aspektów tych zjawisk nie zostało w pełni zbadanych czy potwierdzonych eksperymentalnie, jak choćby procesy anihilacji i fragmentacji. Realizacja tego typu eksperymentów wymaga rozbudowanej aparatury oraz bardzo dokładnej kontroli wiązek i układów pułapkowych, co sprawia, że dziedzina ta stanowi istotne wyzwanie zarówno od strony technicznej, jak i metodologicznej. Jednym z kluczowych układów eksperymentalnych prowadzących badania atomów antyprotonowych jest AEgIS w CERN, który wykorzystuje antyprotony dostarczane przez spowalniacz cząstek ELENA.

Praca doktorska Pana mgr inż. Jakuba Zielińskiego dotyczy rozwoju nowatorskiej metody kontrolowanej produkcji atomów antyprotonowych oraz metod badania fragmentów powstających w procesie ich anihilacji w eksperymencie AEgIS. Autor podejmuje zagadnienie zarówno od strony koncepcyjnej, jak i eksperymentalnej, proponując podejście oparte na wykorzystaniu pułapek elektromagnetycznych do precyzyjnego wytwarzania i kontroli tych egzotycznych układów. Przedstawione rozwiązania stanowią alternatywę dla tradycyjnych metod wiązkowych, jednocześnie otwierając nowe możliwości w badaniach krótkożyciowych izotopów oraz procesów anihilacji w ściśle kontrolowanych warunkach eksperymentalnych.

Praca napisana w języku angielskim liczy 238 stron, składa się z dziesięciu rozdziałów, dziewięciu dodatków, bibliografii zawierającej 153 pozycje, streszczenia w języku polskim i angielskim, listy osiągnięć autora, list skrótów, rysunków oraz tabel. Praca jest napisana w sposób zrozumiały i wyróżnia się dużą starannością edytorską. Rozdziały 5–9 rozpoczynają się krótkim podsumowaniem wkładu Autora związanego z omawianymi zagadnieniami, co zwiększa przejrzystość pracy oraz ułatwia identyfikację jego udziału w jej poszczególnych częściach.

Wydział

Fizyki

Astronomii

i Informatyki

Stosowanej

ul. prof. Stanisława

Łojasiewicza 11

PL 30-348 Kraków

tel. +48(12) 664-48-90

fax +48(12) 664-49-05

e-mail:

wydzial.fais@uj.edu.pl

Rozdział 1 pracy stanowi rzetelne merytoryczne wprowadzenie do tematyki badawczej. Autor rozpoczyna od opisu fundamentalnego problemu asymetrii między materią a antymaterią we Wszechświecie, wskazując na rozbieżności między obserwacjami a przewidywaniami Modelu Standardowego i OTW. Następnie argumentuje, iż badanie układów związanych z antymaterią, takich jak atomy antyprotonowe, jest kluczowym narzędziem do testowania symetrii materia-antymateria. Rozdział zamyka przejrzysty zarys struktury całej pracy z precyzyjnym opisem zawartości kolejnych sekcji. Rozdział 2 zawiera opis struktury materii - od cząstek elementarnych Modelu Standardowego, poprzez klasyczne zagadnienia fizyki atomowej i jądrowej, aż po układy egzotyczne. Autor szczegółowo wyjaśnia proces powstawania oraz rozpadów atomów antyprotonowych będących przedmiotem jego badań. W rozdziale 3 przedstawiono charakterystykę pułapek cząstek naładowanych (Penninga i Paula) kluczową dla zrozumienia nowej metody wytwarzania atomów antyprotonowych, która jest przedmiotem rozdziału 4. W tej części Autor omawia technikę produkcji tych atomów egzotycznych opartą na kontrolowanej reakcji zimnych antyprotonów z jonami w pułapce Penninga-Malmberga oraz możliwość jednoczesnego efektywnego przechwytywania fragmentów powstających w procesie ich anihilacji. Autor wskazuje, iż rozwiązanie to stanowi skuteczną alternatywę dla tradycyjnych eksperymentów typu wiązka-tarcza z udziałem wysokoenergetycznych antyprotonów. Proponowane podejście otwiera nowe perspektywy w badaniach krótkożyłowych izotopów, oddziaływań antyproton-jądro, czy struktury peryferyjnej jąder atomowych. Obszerny rozdział 5 omawia szczegółowo aparaturę wykorzystywaną w eksperymencie AEgIS w CERN, dokumentując jednocześnie aktywny udział Autora w rozwoju tego układu badawczego. Autor opisuje strukturę kompleksu akceleratorowego CERN, podkreślając rolę deceleratorów (spowalniaczy cząstek) AD oraz ELENA w dostarczaniu antyprotonów o niskiej energii, które ostatecznie trafiają do układu detekcyjnego AEgIS. W sposób klarowny prezentuje również budowę samej aparatury AEgIS, obejmującą m.in. systemy kriogeniczne, układ degraderów, układ pułapek cząstek, a także dwa systemy detekcyjne: ESDA (oparty na scyntylatorach) oraz detektor MCP, wraz z nowoczesnym systemem wyzwalania. Istotną część rozdziału stanowi omówienie narzędzi programistycznych oraz architektury systemu sterowania eksperymentu. Rozdział 6 pracy poświęcony jest zaawansowanym symulacjom Monte Carlo stanowiącym kluczowy element optymalizacji eksperymentów prowadzonych w ramach kolaboracji AEgIS. Autor przeprowadził symulacje oddziaływań antyprotonów z materią z wykorzystaniem dwóch komplementarnych pakietów oprogramowania: GEANT4 oraz FLUKA. Analiza porównawcza rozkładów fragmentów jądrowych powstających w wyniku procesu anihilacji wykazała, iż GEANT4 lepiej odwzorowuje złożoność procesów, szczególnie w zakresie ciężkich fragmentów i produktów rozszczepienia. Na tej podstawie Autor zdecydował o wykorzystaniu go jako podstawowego narzędzia symulacyjnego. Jednym z głównych celów symulacji było określenie optymalnych warunków spowalniania i pułapkowania antyprotonów. Otrzymane wyniki wskazują, że zastosowanie kombinacji degraderów z Mylaru (1400 nm) i Parylenu N (100 nm) umożliwia osiągnięcie ponad 90% wydajności pułapkowania antyprotonów, przy jednoczesnym istotnym wpływie pola magnetycznego na efektywne skupianie wiązki. Autor przeprowadził także analizę procesów anihilacji atomów antyprotonowych dla ponad 3000 izotopów, identyfikując główne kanały reakcji: produkcję fragmentów A-1, emisję lekkich cząstek oraz rozszczepienie jądra. Symulacje wykazały, że lekkie fragmenty jądrowe charakteryzują się wysokim stosunkiem energii do ładunku, co stanowi wyzwanie techniczne w kontekście ich późniejszego magazynowania w pułapkach. Istotnym elementem pracy jest analiza efektu halo neutronowego, umożliwiająca mapowanie rozkładu neutronów i protonów na powierzchni jądra poprzez badanie stosunku ani-



UNIWERSYTET
JAGIELLOŃSKI
W KRAKOWIE

Wydział

Fizyki

Astronomii

i Informatyki

Stosowanej

ul. prof. Stanisława

Łojasiewicza 11

PL 30-348 Kraków

tel. +48(12) 664-48-90

fax +48(12) 664-49-05

e-mail:

wydzial.fais@uj.edu.pl

hilacji na poszczególnych nukleonach. Autor zaproponował również algorytm służący do optymalizacji ścieżek wytwarzania izotopów, które można następnie pułapkować oraz opracował model symulacji widm czasu przelotu (TOF) dla cząstek uwalnianych z pułapki Penninga-Malmberga. Model ten wykazuje dobrą zgodność z danymi eksperymentalnymi, przy jednoczesnym wskazaniu ograniczeń wynikających z przyjętych uproszczeń i konieczności jego dalszego rozwoju. Rozdział 7 opisuje kluczowe elementy systemu sterowania aparaturą AEgIS, w tym manipulacji plazmą, ze szczególnym uwzględnieniem działań bezpośrednio związanych z wynikami przedstawionymi w pracy. Autor dokumentuje swój istotny wkład w rozwój infrastruktury eksperymentalnej, obejmujący m.in. system komunikacji AEgIS-ELENA, technikę ściskania plazmy (plasma squeezing), opracowanie procedury pułapki zagnieżdżonej (nested trap) oraz implementację techniki czasu przelotu (TOF) dla eksperymentów z ciężkimi jonami. Rozdział 8 z kolei przedstawia metodologię analizy danych symulacyjnych i eksperymentalnych, w tym ich wstępne przetwarzanie, ujednolicenie formatów, estymację niepewności oraz procedury kalibracyjne. W rozdziale 9 Autor dokonuje kompleksowego podsumowania otrzymanych wyników eksperymentalnych, które są efektem jego wieloletniej pracy w ramach kolaboracji AEgIS. Przedstawione rezultaty obejmują zarówno rozwój aparatury i systemów eksperymentalnych, jak i analizę danych. Dzięki nowemu systemowi sterowania, który zapewnił niezawodną i stabilną pracę eksperymentu, a którego Autor jest jednym z głównych twórców, udało się m.in. po raz pierwszy w historii dokonać chłodzenia laserowego pozytronium (Ps) do temperatury około 210 K, jak i znacząco zwiększyć wydajność produkcji antywodoru, która wzrosła około czterdziestokrotnie w porównaniu z rezultatami uzyskanymi we wcześniejszych pomiarach. Jedną z analiz przeprowadzonych przez Autora jest porównanie danych eksperymentalnych frakcji pułapkowanych antyprotonów z wynikami symulacji dla różnych grubości folii degradera. Wykazano, że dane pomiarowe pozostają w lepszej zgodności z symulacjami dla folii z Mylaru o grubości rzędu 1460 nm niż z nominalną wartością 1400 nm stosowaną w eksperymencie, przy czym wartość ta pozostaje zgodna w granicach niepewności grubości folii. Wstępne oszacowanie efektywności pułapkowania w eksperymencie na poziomie 64–74% pozostaje zgodne z symulacjami. Szczególne miejsce w pracy zajmują dane uzyskane podczas pomiarów przeprowadzonych w latach 2023–2024, które wnoszą istotny wkład w zrozumienie procesów zachodzących w pułapce w obecności gazu resztkowego. Przeprowadzona analiza ujawnia obecność w widmach TOF pików w obszarze $m/Q \approx 2u/e$, którego intensywność wykazuje korelację z czasem uwięzienia antyprotonów w gazie, co sugeruje powstawanie jonów o takim stosunku masy do ładunku w wyniku procesów anihilacji. Równocześnie wykazano, że istotnym źródłem tła w pomiarach jest hel, generujący wyraźny sygnał w widmie czasu przelotu. Kolejnym istotnym wynikiem pracy jest wykazanie, że średnia energia antyprotonów maleje wykładniczo wraz z czasem ich magazynowania w pułapce z argonem, osiągając wartości około dwukrotnie niższe od przewidywań symulacyjnych, co jednoznacznie potwierdza efektywną rolę gazu jako moderatora. Wykorzystanie metody czasu przelotu pozwoliło Autorowi na precyzyjną identyfikację różnych stanów jonizacji argonu, a także wykazało obecność sygnału w okolicy $m/Q \approx 2u/e$. Analiza widma umożliwiła ilościowe wyznaczenie stosunków masy do ładunku, które pozostają w zgodności z wartościami literaturowymi. Autor przedstawił również porównanie danych eksperymentalnych z symulacjami uwzględniającymi anihilację antyprotonów w argonie oraz tło pochodzące od helu. Wykazano, że sygnał w rejonie $m/Q \approx 2u/e$ może pochodzić zarówno od jonów He^{2+} , jak i od superpozycji tego tła z fragmentami jądrowymi, przy czym model dwuskładnikowy lepiej opisuje dane (20% lepsza zgodność). Autor komentuje, iż z uwagi na fluktuacje danych i niepewności modelowe, nie można jednoznacznie po-



UNIWERSYTET
JAGIELLOŃSKI
W KRAKOWIE

Wydział

Fizyki

Astronomii

i Informatyki

Stosowanej

ul. prof. Stanisława

Łojasiewicza 11

PL 30-348 Kraków

tel. +48(12) 664-48-90

fax +48(12) 664-49-05

e-mail:

wydzial.fais@uj.edu.pl

twierdzić, iż sygnał zawiera przyczynek od uwieczonych fragmentów. Niemniej jednak uzyskane wyniki stanowią istotną przesłankę wskazującą na możliwość ich detekcji. Rozdział 10 stanowi spójne podsumowanie pracy, otrzymanych wyników. Zawiera on również realistyczny plan dalszego rozwoju eksperymentu AEgIS pod kątem badania atomów antyprotonowych, obejmujący m.in. poprawę pułapowania oraz rozszerzenie modeli symulacyjnych. Wnioski są ostrożne i właściwie wyważone, szczególnie w odniesieniu do niejednoznacznych wyników otrzymanych w pracy. Rozprawę kończy dziewięć dodatków A-I, które stanowią kluczowe uzupełnienie techniczne i dokumentacyjne, potwierdzające wkład własny Autora w rozwój infrastruktury eksperymentu AEgIS w CERN oraz rzetelność przeprowadzonych badań.

Oddając się lekturze rozprawy nasunęły mi się pewne uwagi i pytania, do których należą:

1. Rozdział 2: w tej części pracy brakuje szerszego odniesienia do aktualnego stanu badań nad atomami antyprotonowymi obejmującego mierzone wielkości fizyczne. Autor ogranicza się głównie do historycznych eksperymentów z okresu LEAR oraz ogólnego opisu działalności AD w CERN. Warto byłoby uzupełnić ten fragment o przykłady najnowszych rezultatów, jak również wspomnieć o aktualnie rozwijanych projektach w CERN, takich jak PAX i PUMA.
2. Rozdział 2.4, przypis 2 dotyczący stanu związanego K^-pp : co należy rozumieć przez stwierdzenie *...however, it's not clear if this state can be considered as a nucleus?*
3. Rozdział 5.3.1: szkoda, że na Rys. 5.12 nie zaznaczono położenia detektora MCP - jego uwzględnienie ułatwiłoby czytelnikowi szybszą orientację i zrozumienie przedstawionego układu.
4. Rozdział 6.3.4 oraz 9.4.3: Zarówno symulacje, jak i wyniki pomiarów wskazują, iż złe fragmenty powstające w procesie anihilacji nie są wychwytywane przez pułapkę, co wynika z jej ograniczeń i jest widoczne w rozkładzie m/Q . Czy opracowywane są obecnie lub planowane w przyszłości metody umożliwiające pułapowanie/pomiary takich lekkich fragmentów w AEgIS?
5. Rozdział 8.1.2.3 - autor przedstawia liczenie niepewności dla wydajności jako prostą sumę niepewności dla każdej wydajności w łańcuchu, z dodatkowym uwzględnieniem 20% błędu. W jaki sposób oszacowano tą dodatkową niepewność wydajności?

Chciałam również zwrócić uwagę na drobne błędy edytorskie:

1. Kilka wykresów w pracy nie zostało przywołanych w tekście, co miejscami utrudnia powiązanie zaprezentowanych danych z omawianą w pracy treścią: Rys. 6.5b, Rys. 6.19, Rys. 8.1.
2. Rozdział 6.3.2: Rys. 6.7 - słabo widoczne ślady ciężkich cząstek (kolor szary).
3. Rozdział 6.3.4., str. 78: jest Gd^{162} , a powinno być ^{162}Gd .
4. Fig. 9.1(A) - opis pod rysunkiem wydaje się niekompletny: *The number of annihilations counted after...*
5. Fig. 9.4 - na rysunku nie widać linii kropkowanych, która znajduje się w jego opisie: *The expected signal according to the GEANT4 simulation is shown as solid, dashed, and dotted lines for different thicknesses of the main degrader.*



UNIWERSYTET
JAGIELLOŃSKI
W KRAKOWIE

Wydział

Fizyki

Astronomii

i Informatyki

Stosowanej

ul. prof. Stanisława

Łojasiewicza 11

PL 30-348 Kraków

tel. +48(12) 664-48-90

fax +48(12) 664-49-05

e-mail:

wydzial.fais@uj.edu.pl

Powyższe uwagi nie umniejszają wartości pracy, a wręcz przeciwnie wynikają z zainteresowania przedstawionym problemem fizycznym i wynikami.

Podsumowując, rozprawa doktorska Pana mgr inż. Zielińskiego stanowi spójny zestaw wyników eksperymentalnych i symulacyjnych uzyskanych w ramach kolaboracji AEgIS, obejmujący rozwój aparatury oraz analizę danych w kontekście nowej metody badania atomów antyprotonowych. Przeprowadzone symulacje i analizy wykonano w sposób rzetelny, konsekwentny i dobrze zaplanowany. Uzyskane wyniki dowodzą wykonalności zaproponowanej metody oraz jej znaczenie dla badań oddziaływań antyprotonów z materią i eksperymentów nad krótkożyjącymi izotopami promieniotwórczymi. Należy podkreślić szerokie zaangażowanie Doktoranta w prace eksperymentalne, obejmujące rozwój narzędzi symulacyjnych, analizę danych oraz systemów sterowania eksperymentem AEgIS. W trakcie realizacji pracy zdobył on istotne kompetencje w obszarze fizyki eksperymentalnej i odegrał ważną rolę w działaniach kolaboracji. Wyniki jego pracy zostały opublikowane w kilku artykułach naukowych.

Biorąc pod uwagę ogrom pracy włożonej przez Pana mgr inż. Jakuba Zielińskiego w przygotowanie narzędzi symulacyjnych, zaplanowanie i realizację eksperymentów, opracowanie rozprawy oraz przeprowadzenie złożonych analiz danych wraz z ich interpretacją, stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim oraz wymienione w Ustawie *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. 2024 poz. 1571). **Wnioskuje o dopuszczenie mgr inż. Jakuba Zielińskiego do dalszych etapów postępowania doktorskiego oraz wnoszę o wyróżnienie jego rozprawy doktorskiej.**

Magdalena Skurzok



UNIWERSYTET
JAGIELLOŃSKI
W KRAKOWIE

Wydział

Fizyki

Astronomii

i Informatyki

Stosowanej

ul. prof. Stanisława

Łojasiewicza 11

PL 30-348 Kraków

tel. +48(12) 664-48-90

fax +48(12) 664-49-05

e-mail:

wydzial.fais@uj.edu.pl

