

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgra inż. Adama Ryszarda Linka
p.t. „Towards High-Precision Spectroscopy of Alkaline, Alkaline-Earth-Like, and Antimatter Atomic Systems”

Praca doktorska mgra inż. Adama Ryszarda Linka została wykonana w pod kierunkiem prof. UMK dra hab. Michała Zawady oraz dra Marcina Witkowskiego jako promotora pomocniczego. Prace koncepcyjne, konstrukcyjne i testy wybudowanej aparatury przedstawione w rozprawie zostały wykonane w Krajowym Laboratorium FAMO (Fizyka Atomowa, Molekularna i Optyczna) na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu oraz w CERN w Genewie w ramach udziału doktoranta w konsorcjum AEGIS (Antihydrogen Experiment: Gravity, Interferometry, Spectroscopy).

Autor przedstawił w niej swój wkład w budowę infrastruktury badawczej w FAMO i CERN, której długofalowymi celami są odpowiednio: uruchomienie pierwszego zegara atomowego z atomami rtęci Hg w FAMO oraz przeprowadzenie ultraprecyzyjnych pomiarów spektroskopowych struktury poziomów pozytonium (Ps) w CERN. Są to przedsięwzięcia naukowe zaplanowane na lata, angażujące duże zespoły badawcze, w tym doktorantów. Nie można oczekiwać szybkich rezultatów naukowych polegających na osiągnięciu docelowego wyniku, w skali czasowej odpowiadającej studiom doktoranckim. Proces osiągnięcia wyników końcowych jest wieloletni, ale aby w ogóle było to możliwe konieczne jest m.in. rozwiązanie szeregu problemów naukowych i technicznych m.in. tych które udało się rozwiązać Autorowi.

Badania Doktoranta dotyczą głównie konstrukcji i wyrafinowanych testów wybudowanych ultra precyzyjnych przyrządów optycznych, w tym wnęk optycznych o unikatowych w skali światowej parametrach. To między innym te konstrukcje, które służą do wykonania z niesłychaną precyzją planowanych badań łączą te dwie tematyki. Bez tego etapu konstrukcyjnego nie byłby możliwy rozwój badań, które wymieniałem powyżej, ale na których doniosłe wyniki naukowe trzeba jeszcze poczekać. Tym niemniej z przyjemnością odnotowuję, że Autor m.in. z promotorem pomocniczym opublikował (Optics Express, 30, 2022) wyniki pierwszych i dokładnych pomiarów częstotliwości przejścia $^1S_0 - ^3P_1$ w ^{201}Hg z zastosowaniem nowatorskiej techniki poprawiającej dokładność w pomiarach poprzez eliminację tła. Natomiast, wymagające serwisu zewnętrznego, problemy z laserami uniemożliwiły Doktorantowi pomiary na przejściu zegarowym (^{199}Hg , $^1S_0 - ^3P_0$), które byłyby moim zdaniem uwieńczeniem jego wysiłków eksperymentalnych w FAMO, na obecnym etapie badań. Tu chciałbym odnotować, że mgr.

Linek, jako uczestnik projektu AEgIS (tzw. kolaboracji) jest też współautorem innych, wieloautorskich publikacji.

Przechodząc do redakcji rozprawy: praca napisana jest w języku angielskim, ma tradycyjną formę. Składa się na nią 7 Rozdziałów, 3 Dodatków oraz Bibliografii liczącej 237 pozycji. Rozprawa licząca 155 stron została przygotowana dużym nakładem pracy Doktoranta. Pewnym utrudnieniem dla czytelnika jest użycie przez Autora ok. 60 akronimów, które są wprowadzone zdefiniowane na początku rozprawy, ale te mniej popularne dla czytelnika wymagają często ciągłego sprawdzania ich znaczenia. Podobnie, olbrzymia ilość szczegółów konstrukcyjnych (zwłaszcza w Rozdziale 5), z całą pewnością wartych zapisania, powinna moim zdaniem znaleźć się w dodatkach, podnosząc komfort czytania rozprawy.

Zgodnie z zaleceniami Rady Doskonałości Naukowej recenzja rozprawy doktorskiej powinna zawierać następujące elementy:

1) ocenę wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora w określonej dyscyplinie;

2) ocenę wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez osobę ubiegającą się o nadanie stopnia doktora;

3) ocenę wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Ad. 1) czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora w określonej dyscyplinie?

W mojej ocenie warunek ten jest bez zastrzeżeń spełniony, co więcej Doktorant wykazał się bardzo wszechstronnym przygotowaniem i wiedzą, co też było koniecznością wynikającą z bardzo zróżnicowanych perspektyw badawczych. Przedstawione w Rozdziale 1 podstawowe informacje i motywacje badań w kierunku uruchomienia zegara atomowego z atomami Hg oraz badań wodoropodobnego pozytonium (Ps) są kompendium wiedzy o tych badaniach na świecie, również w interesującym kontekście historycznym.

W Rozdziale 2 Autor szczegółowo omówił strukturę poziomów energetycznych Hg zaangażowanych w procesie laserowego schładzania atomów Hg do temperatur μK , zróżnicowania tych procesów w przypadku bozonowych ($^{196, 198, 200, 202, 204}\text{Hg}$) i fermionowych ($^{199, 201}\text{Hg}$) odmian izotopowych oraz parametry przejścia zegarowego $^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_0$. Pokazał zalety jakie będzie miał zegar rtęciowy w stosunku do – działającego zresztą w FAMO w Toruniu – zegara strontowego oraz innych np. z atomami Yb. Omówił też jak zredukowany może być dla atomów Hg dynamiczny efekt Starka przez umieszczenie schłodzonych atomów w sieci optycznej wytworzonej na tzw. magicznej długości fali (362.5nm dla Hg). Z

tęgo opisu wynika też dlatego to nie atomy Hg a Sr są tym wzorcem w pierwszym optycznym zegarze atomowym. Wynika to m.in. z bardzo trudnych do generacji laserowej długości fali leżących w UV, które stały się w miarę dostępne z urządzeń komercyjnych niedawno. To też pokazuje stopień komplikacji zadań eksperymentalnych, które podjął Doktorant.

Z kolei Rozdział 3 poświęcony jest omówieniu struktury stanów związanych pozytonium (Ps) i dotyczy badań w CERN. Autor przedyskutował w nim stany wodoropodobnego układu elektronu i pozytonu odpowiadające przejściu Ly- α w wodorze. Wskazał na cechy, które powodują, że ten układ jest przedmiotem szczególnego zainteresowania fizyków i jest badany (m.in. w CERN) jako bardzo dogodny obiekt do badań efektów QED, które przy braku struktury jądrowej mogą być dokładnie obliczane teoretycznie. Obecna dokładność obliczeń dla przejścia dwufotonowego $1^3S_1-2^3S_1$ wynosi $0.8 \cdot 10^{-9}$, co jest w porównaniu z doświadczalną ponad trzykrotnie lepszą. Otrzymanie lepszej dokładności w doświadczeniu jest więc wyzwaniem dla eksperymentatorów. W ten nurt badań chce się włączyć Doktorant proponując badania subdopplerowskie tego przejścia.

Bardzo dobrze oceniam, być może najbardziej autorski Rozdział 4, w którym Doktorant omówił i porównał różne miary dokładności i stabilności (dryftu) ze względu na fluktuacje (szumy) fazy i częstotliwości, takie jak metoda oparta o dwu i N próbkową wariancję Allana, kowariancję Grosamberta. Analizy za pomocą tych metod są niezbędne w badaniach, które prowadzi, i w których kluczowe jest oszacowanie wpływu czynników zewnętrznych. Dotyczy to zarówno wyznaczania wzorcowej częstości zegarowej, jak badań struktury Ps, gdy np. chcemy rzetelnie ocenić wielkość ewentualnych poprawek na poziomie QED.

Podsumowując Autor wykazał się bardzo dobrym przygotowaniem teoretycznym do podjęcia tytułowych badań. Doceniam też wartość tych rozdziałów, uzupełnionych bogatymi odnośnikami literaturowymi, jako przewodnika dla przyszłych magistrantów, doktorantów, którzy będą działali w tej dziedzinie.

Ad. 2) czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez osobę ubiegającą się o nadanie stopnia doktora?

Doktorant wykazał zdolność do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej o czym wnioskuje na podstawie oryginalnych inicjatyw badawczych i innowacji przedstawionych w Rozdziale 5 (eksperyment w FAMO) i Rozdziale 6 (propozycja eksperymentu w CERN).

Układ eksperymentalny w FAMO, który wykorzystał Doktorant powstał na bazie wcześniej wybudowanego układu do jednoczesnego chłodzenia w pułapce magneto-optycznej atomów Hg i Rb, wymagał jednak nietrywialnego rozbudowania, przystosowania i przeprowadzenia testów. To wymagało od Doktoranta szeregu umiejętności zarówno eksperymentalnych jak i wiedzy do przeprowadzenia

wyrafinowanej analizy sygnałów pomiarowych. Szereg podjętych inicjatyw badawczych jest oryginalna. Należą do nich m.in.:

- przeprojektowanie głównej komory próżniowej tak aby przystosować do potrzeb zegara Hg, w tym wprowadzenia wiązek laserowych do uformowania sieci optycznej na magicznej długości fali,
- skonstruowanie wysokostabilnej wnęki rezonansowej na podstawowej długości fali 1062.55 nm, która jest kluczowa dla badania przejścia zegarowego ($^1S_0 - ^3P_0$) zachodzącego na czwartej harmonicznej (265.6 nm). Następnie zbadanie termicznej i mechanicznej stabilności tej wnęki poprzez zdudnienie z dostępnymi w FAMO laserami referencyjnymi i przy użyciu grzebienia częstości,
- zaproponowanie i zrealizowanie układu do badania niestabilności wnęki m.in. poprzez wymuszone w laboratorium drgania. W rezultacie w wyniku udoskonalonej izolacji wnęki osiągnięcie rekordowej, w skali światowej stabilności dla tego typu referencyjnej częstotliwości,
- wprowadzenie aktywnej eliminacji szumów powstających w światłowodach doprowadzających promieniowanie laserowe do komory pomiarowej,
- opracowanie, wybudowanie i uruchomienie cyfrowej stabilizacji długości fali laserów repompujących niezbędnych w „cyklu zegarowym”.

To właśnie te ostatnio wymienione prace mgra Linka są źródłem jego pomysłu aby wykorzystać podobny układ w CERN do badań przejścia $1^3S_1 - 2^3S_1$ w Ps za pomocą bezdopplerowskiego przejścia dwufotonowego. W związku z tym mgr. Linek zaproponował, alternatywnie, dwa układy generujące długość fali 486nm o odpowiedniej mocy i również alternatywnie, zależnie od dostępności w CERN, zastosowanie różnych wzorców częstotliwości. Szacowana przez Autora dokładność wyznaczenia częstotliwości przejścia byłaby na poziomie 100kHz.

Nie udało mi się wywnioskować z lektury rozprawy, czy i jak zaawansowana jest realizacja tego projektu – będę chciał o to zapytać podczas obrony.

Ad. 3) czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego?

Rozprawa rozwiązuje doświadczalnie co najmniej kilka problemów naukowych z dziedziny bardzo zaawansowanej metrologii optycznej. Osiągnięte parametry metrologiczne są na najwyższym poziomie światowym, a w niektórych aspektach wyznaczają ten najwyższy poziom. Podobnie wdrożone przez Doktoranta procedury pomiarowe wyznaczają, moim zdaniem, standardy w metrologii optycznej.

Problemami naukowymi, które udało się rozwiązać Autorowi to m.in.:

- osiągnięcie stabilizacji wnęki referencyjnej (na 1062.55 nm) na poziomie 7×10^{-16} przez 1 s, co przewyższa dotychczas osiągane w laboratorium wyniki i otwiera drogę do badania częstotliwości przejścia zegarowego $^1S_0 - ^3P_0$ na poziomie sub-hertzów,

- precyzyjne zbadanie stabilności zbudowanej wnęki referencyjnej przez porównanie z inną wnęką w FAMO „przywiązaną” do optycznego grzebienia częstotliwości oraz niezależnie z sygnałem pochodzącym oryginalnie z PTB w Brunshwiku i doprowadzonym do laboratorium za pomocą europejskiej sieci światłowodowej,
- zbadanie wpływu zewnętrznych zakłóceń poprzez analizę odchylenia Allana oraz kowariancji Groslambda,
- wyeliminowanie szumów fazowych i częstotliwościowych w światłowodach doprowadzających promieniowanie laserowe do układu, ocena ich wpływu na rejestrowane sygnały. Wykonanie oszacowań (tzw. bilansu) wpływu czynników będącym źródłem niedokładności,
- opracowanie konstrukcji laserów na 404.7nm (do badań z Hg) i 486nm (do Ps) stabilizowanych m.in. przez ich „przywiązanie” do stabilizowanego grzebienia częstości optycznych, skonstruowanie wysokostabilnego lasera na 404.7 nm,
- zaprojektowanie dla projektu AEgIS bardzo przemyślanego układu do zbadania przejścia w Ps. Jeśli ten projekt jest (lub będzie) realizowany w CERN będzie to dużym sukcesem Autora.

Pewien niedosyt w tej ocenie powoduje to, że nie udało się wykorzystać wybudowanych i przetestowanych przez mgra Linka układów do pomiaru częstotliwości przejścia zegarowego $^1S_0 - ^3P_0$ w Hg, co byłoby ważnym etapem badań w FAMO. Jak napisał Autor spowodowane jest to problemami technicznymi z komercyjnymi laserami, których usunięcie przez serwis było niemożliwe w krótkim czasie. Będę chciał zapytać Autora czy nastąpił postęp w tej sprawie i czy w najbliższym czasie można oczekiwać wyników.

Poza wymienionymi osiągnięciami uważam, że wartością jest też sama rozprawa mgra Linka, chwilami trochę nieprzyjazna dla czytelnika-recenzenta ze względu na bardzo dużą szczegółowość, która będzie mieć jednak dużą wartość dla następnych badaczy, kontynuatorów badań w dziedzinie zawansowanej metrologii optycznej.

W podsumowaniu stwierdzam, że zgodnie z wymaganiami przepisów ustawy z dnia 20 lipca 2018 r., Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce oraz zaleceniami Rady Doskonałości Naukowej, oceniam pozytywnie wszystkie aspekty pracy doktorskiej mgra inż. Adama Ryszarda Linka, które podlegają ocenie recenzenta. Wnioskuje o dopuszczenie mgra inż. Adama Ryszarda Linka do publicznej obrony pracy doktorskiej.

