

dr hab. inż. Grzegorz Soboń, prof. uczelni
Politechnika Wrocławska
Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław
grzegorz.sobon@pwr.edu.pl

Wrocław, dn. 23.12.2025 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Adama Ryszarda Linka

zatytułowanej:

*„Towards High-Precision Spectroscopy of Alkaline, Alkaline-Earth-Like,
and Antimatter Atomic Systems”.*

Recenzję wykonano na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne
Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu z dnia 15.10.2025 r.

1. Wprowadzenie

Rozprawa doktorska poświęcona ultraprecyzyjnej spektroskopii atomów rtęci (Hg) wpisuje się w jeden z najbardziej dynamicznych nurtów współczesnej fizyki eksperymentalnej, tj. rozwój optycznych standardów częstotliwości i zegarów sieciowych (ang. *optical lattice clocks*). Kluczowe przejście zegarowe w rtęci leży w zakresie spektralnym ultrafioletu (około 265,6 nm) i już na etapie spektroskopii atomów schłodzonych laserowo wykazano jego przydatność do metrologii częstotliwości o bardzo wysokiej rozdzielczości. Jednocześnie rtęć jest szczególnie atrakcyjna dla zegarów optycznych, ponieważ oczekuje się u niej mniejszej podatności na zaburzenia środowiskowe, co bezpośrednio przekłada się na potencjalnie niższe niepewności systematyczne. Zegar Hg jest też czułym narzędziem do testów fundamentalnych, m.in. poszukiwań zmian stałych fizycznych, poprzez porównania między zegarami na innych atomach (Yb, Sr). W szerszym kontekście, optyczne zegary atomowe są dziś uznawane za jedne z najczulszych sond „nowej fizyki”. W tym sensie rozwijane w pracy metody spektroskopii Hg mają realny potencjał zarówno dla precyzyjnej metrologii, jak i dla eksperymentów, które mogą ograniczać (lub ujawniać) odchylenia od Modelu Standardowego w reżimie niskoenergetycznym. W tym kontekście, praca mgr inż. Adama Linka doskonale wpisuje się w główny nurt badań światowych, a zespół, w którym pracował doktorant, bezsprzecznie należy do światowej czołówki w tym obszarze. Praca została zrealizowana pod opieką naukową dra hab. inż. Michała Zawady, prof. UMK oraz dra Marcina Witkowskiego, w Krajowym Laboratorium Fizyki Atomowej, Molekularnej i Optycznej w Toruniu.

2. Zawartość pracy

Przedstawiona do oceny praca liczy łącznie 155 stron (uwzględniając bibliografię). Składa się z 7 głównych rozdziałów merytorycznych.

Pracę otwiera wprowadzenie, zawierające motywację do podjęcia badań w tematyce spektroskopii rtęci oraz pozytonium, wyjaśniające znaczenie dla metrologii i badań podstawowych.

Rozdział 2 stanowi wprowadzenie do spektroskopii rtęci. Czytelnik może zapoznać się m.in. ze strukturą poziomów energetycznych Hg ważnych w kontekście pracy.

W rozdziale 3 wprowadzono definicję pozytonium, strukturę poziomów energetycznych oraz krótkie wprowadzenie do chłodzenia laserowego.

Rozdział 4 wprowadza pojęcia kluczowe dla zrozumienia dalszej części pracy, czyli rezonator Fabry'ego-Pérot (podano m.in. równania opisujące transmisję rezonatora) oraz pojęcia związane z analizą stałości częstotliwości (np. odchylenie Allana). Tę część uznaję za szczególnie interesującą, gdyż wyjaśnia jednoznacznie różnice między różnymi wariantami odchylenia Allana (ADEV, MDEV, OADEV).

Najobszerniejszy objętościowo rozdział 5 zawiera zasadniczy opis dokonań doktoranta w zakresie budowy układów eksperymentalnych do precyzyjnej spektroskopii przejścia zegarowego w atomie rtęci.

Rozdział 6 opisuje część eksperymentu AEgIS w CERN związaną z badaniem pozytonium oraz własny wkład autora w te badania (m.in. opracowanie lasera CW o długości fali 486 nm).

Pracę kończy rozdział 7, zawierający syntetyczne podsumowanie osiągnięć oraz, co bardzo istotne, wyznaczający dalsze kierunki możliwych badań.

Dodatkowo, praca zawiera 3 załączniki zawierające głównie wyprowadzenia wzorów opisujących rezonator Fabry'ego-Pérot (transmitancję i refleksję, także dla rzeczywistych zwierciadeł dielektrycznych, oraz rozkład pola elektromagnetycznego wewnątrz wnęki).

Układ pracy jest więc logiczny i wyraźnie podzielony na sekcje poświęcone wprowadzeniu do poruszanych zagadnień oraz sekcje zawierające oryginalne wyniki autora. Struktura jest nieco zbyt rozdrobniona, gdyż rozdziały 2 i 3 (poświęcone rtęci oraz pozytonium) są bardzo krótkie i liczą odpowiednio 7 i 5 stron. Bibliografia jest imponujących rozmiarów i liczy 237 pozycji, co świadczy o świetnym rozeznaniu autora w aktualnym stanie wiedzy.

3. Wartość naukowa prezentowanych rezultatów

Oceniana praca doktorska ma charakter jednoznacznie doświadczalno-pomiarowy. Autor koncentrował się na konstrukcji zaawansowanych układów optycznych (składających się z laserów, ultrastabilnych wnęk, pułapek magneto-optycznych oraz elektroniki stabilizującej) do spektroskopii atomów rtęci oraz pozytonium z najwyższą precyzją. Po lekturze pracy wyłania się obraz autora jako zdecydowanego eksperymentatora i konstruktora, który nie tylko posiada szeroką wiedzę z zakresu optyki, ale nie bojącego się wyzwań z zakresu konstrukcji mechanicznych, elektroniki czy technik próżniowych. Jest to dość unikatowy i niezmiernie cenny zestaw kompetencji.

Osiągnięcia w pracy są wyraźnie rozdzielone na dwa nurty. Pierwszy, dotyczący konstrukcji eksperymentu do wysokorozdzielczej spektroskopii rtęci. Drugi wątek, prowadzony w ramach kolaboracji AEgIS (CERN) dotyczył laserowego chłodzenia pozytonium (Ps). Do oryginalnych osiągnięć autora w pierwszej części należy zaliczyć:

- konstrukcję ultrastabilnego rezonatora Fabry'ego-Pérot na długość fali 1062,55 nm, z zastosowaniem wyrafinowanych metod izolacji akustycznej oraz stabilizacji temperaturowej, o zmierzonej niestabilności na poziomie $7,2 \times 10^{-16}$ dla czasu uśredniania 1 sekundy,
- opracowanie i konstrukcję systemu optycznego na bazie stabilizowanego lasera iterbowego ($\lambda=1062,55$ nm) z generacją czwartej harmonicznej ($\lambda=265,6$ nm), do spektroskopii przejścia $^1S_0-^3P_0$ rtęci,
- opracowanie laserów z zewnętrznym rezonatorem (ECDL) na bazie laserów półprzewodnikowych o długościach fali $\lambda=404,7$ nm oraz 546,1 nm (druga harmoniczna z 1092,2 nm) – obu laserów w postaci modułów z siatką dyfrakcyjną, stabilizacją temperatury i obudową – jako kluczowych modułów zegara opartego na atomach rtęci,
- zaprojektowanie próżniowej komory eksperymentalnej, przeznaczonej do pracy na długości fali $\lambda=362,5$ nm, tj. magicznej długości fali dla atomu rtęci (kluczowe dla stworzenia sieci optycznej i w przyszłości zegara optycznego).

Wyżej wymienione osiągnięcia zdecydowanie przybliżają grupę badawczą UMK do stworzenia zegara optycznego na bazie atomów rtęci, jak również otwierają nowe ścieżki badawcze

w zakresie wysokorozdzielczej spektroskopii izotopów Hg. Oczywiście, pozostaje pewien niedosyt, że w pracy nie przedstawiono przełomowych wyników spektroskopowych. Wtedy jednak doktorat musiałby trwać prawdopodobnie 10 lat, a nie 4–5.

Drugi wątek badawczy prowadzony przez autora oparty był na współpracy z Europejską Organizacją Badań Jądrowych CERN w ramach współpracy AEgIS (*Antimatter Experiment: gravity, Interferometry, Spectroscopy*), tj. eksperymencie mającym na celu określenie czy grawitacja oddziałuje na antymaterię w taki sam sposób jak na normalną materię. Oryginalne osiągnięcia autora w tym obszarze to przede wszystkim opracowanie układu optycznego dla spektroskopii przejścia $1^3S_1-2^3S_1$ pozytonium. Autor opracował m.in. laser CW o długości fali $\lambda=486$ nm, na bazie konfiguracji ECDL z laserem półprzewodnikowym $\lambda=972$ nm i generacją drugiej harmonicznej, zaproponował projekt ultrastabilnej wnęki optycznej na długość fali $\lambda=486$ nm oraz oszacował budżet niepewności.

W mojej opinii, uzyskane przez doktoranta rezultaty należy uznać za bardzo wartościowe dla nauk ścisłych i przyrodniczych. Choć autor sam nie przeprowadził pomiarów spektroskopowych ze względu na ograniczenia czasu trwania doktoratu oraz problemy aparaturowe, w całości przygotował unikatowy na skalę światową układ dający ogromne możliwości eksperymentalne. Autor w pracy bardzo precyzyjnie wskazał ścieżki badawcze, które otworzył budując ten układ i wręcz wskazał kolejne kroki (niejako kreując tematykę rozpraw doktorskich kolejnych badaczy w tej grupie).

Na dorobek autora składa się 5 prac w czasopismach z Listy Filadelfijskiej, z czego 4 pochodzą z kolaboracji AEgIS. W jedynym artykule nie z kolaboracji, doktorant jest pierwszym autorem, a praca opublikowana została w czasopiśmie Optics Express:

A. Linek, P. Morzyński, M. Witkowski, "Absolute frequency measurement of the $6s^{21}S_0 \rightarrow 6s6p^3P_1F=3/2 \rightarrow F'=5/2$ ^{201}Hg transition with background-free saturation spectroscopy", Opt. Express 30, 44103-44117 (2022).

Dorobek należy więc uznać za wystarczający by ubiegać się o stopień doktora.

4. Uwagi do pracy

Rolą recenzenta jest krytyczne spojrzenie na pracę i zadawanie pytań. Po lekturze pracy nasunęło mi się kilka pytań i komentarzy:

1. Proszę o wyjaśnienie stwierdzenia „*I personally performed the mode-matching of the OFC beam and injected it into the PM fibre*”, które pojawia się na stronie nr 55.
2. W rozdziale 5.2.2 dotyczącym stabilizacji optycznego grzebienia częstotliwości pojawia się stwierdzenie o uzyskanym paśmie pętli stabilizacji wynoszącym około 350 kHz. Brak jest odniesienia, czy to jest wartość dobra, zła, satysfakcjonująca? Co jest ograniczeniem pasma pętli? Z kolei w pomiarze na rys. 5.28 pasmo wynosi ponad 790 kHz, a użyto tego samego kontrolera PID (Toptica FALC110).
3. Opisana w rozdziale 5.3.1 ultrastabilna wnęka optyczna skonstruowana została z użyciem zwierciadła płaskiego oraz wklęsłego z promieniem krzywizny 50 cm. Autor określa tę konfigurację jako „*standard configuration*”. Z czego wynika akurat taki dobór zwierciadeł? Dlaczego takich wnęk nie konstruuje się jako konfokalne?
4. Na stronie 90 pojawia się opis eksperymentu zdudnienia grzebienia z laserem CW: „*I detect the interference between the laser beam and the OFC mode using an avalanche photodiode*”, który sugeruje, że przeprowadzone jest zdudnienie z odfiltrowanym pojedynczym zębem grzebienia (co prawdopodobnie nie jest prawdą). Brak jest niestety opisu bądź ilustracji pokazującej czy filtrowano światło grzebienia przed zdudnieniem? Czy użyto do tego modułu BDU dostarczonego z grzebieniem, tak jak w eksperymencie na rys. 5.4? Jaka jest szerokość spektrum grzebienia filtrowana w module BDU?
5. Rysunek 5.33 na stronie 96 stanowi fotografię niebieskiej plamki lasera 404,7 nm. Podpis sugeruje, że jest to „czysta wiązka gaussowska”. Na zdjęciu widoczny jest wyraźnie eliptyczny kształt, w jaki sposób określono więc, że wiązka jest gaussowska? Jeśli profil ma

w tym przypadku znaczenie dla eksperymentu, powinien zostać scharakteryzowany przy użyciu aparatury (kamery czy profilometru).

Mimo usilnych starań, nie znalazłem istotnych uchybień typograficznych czy edytorskich. Praca napisana jest świetnym językiem, pozbawionym błędów. Przedstawione schematy i diagramy są czytelne i bardzo dobrej jakości. Pod względem edytorskim praca reprezentuje bardzo wysoki poziom. Jedyny mankament dotyczy niektórych zdjęć układów eksperymentalnych (np. rysunku 5.19 czy 5.21). Zdjęcia te nie zawierają żadnych opisów czy oznaczeń, są więc nieczytelne (nie wiadomo, czym są poszczególne elementy). W tym przypadku, umieszczanie zdjęć jest zbędne, gdyż nie wnoszą one żadnych informacji merytorycznych.

5. Podsumowanie

Podsumowując, praca mgr inż. Adama Ryszarda Linka przedstawia oryginalne wyniki naukowe, wnoszące nową wiedzę do dyscypliny Nauki Fizyczne. Autor rozwiązał postawione problemy naukowe i osiągnął stawiane cele. Istotny wkład autora zawiera się w obszarze konstrukcji układów eksperymentalnych dla potrzeb ultraprecyzyjnej spektroskopii rtęci i pozytonium. Zbudowane układy autor w pełni charakteryzował pod względem stałości częstotliwości, czym potwierdził ich wysoce stabilne i precyzyjne działanie, spełniające kryteria zaawansowanych eksperymentów metrologicznych. Praca pozbawiona jest błędów merytorycznych czy większych uchybień. Moja ocena przedstawionej do recenzji pracy jest jednoznacznie **pozytywna**. Praca spełnia warunki określone w art. 187 ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. (z późn. zm.) i może podstawą do ubiegania się o stopień doktora. W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie autora do kolejnych etapów przewodu doktorskiego.