

Kraków, 27 grudnia 2025



UNIWERSYTET
JAGIELLOŃSKI
W KRAKOWIE

dr hab. Adam Wojciechowski, prof. UJ
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej
Uniwersytet Jagielloński

Wydział

Fizyki

Astronomii

i Informatyki

Stosowanej

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Adama Linka pt. "Towards High-Precision Spectroscopy of Alkaline, Alkaline-Earth-Like, and Antimatter Atomic Systems"

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy jednego z najbardziej dynamicznie rozwijających się obszarów współczesnej fizyki – precyzyjnej spektroskopii zimnych atomów - oraz jej zastosowań do testów fundamentalnych teorii i do metrologii czasu/częstotliwości. Autor podjął ambitne zadanie opracowania i wdrożenia zaawansowanych układów laserowych, stabilizowanych względem wzorca atomowego za pomocą optycznego grzebienia częstotliwości, w celu realizacji pomiarów przejść optycznych w dwóch zasadniczo różnych ale i komplementarnych układach: neutralnych atomach rtęci (Hg) oraz pozytonium (Ps). Podjęte tu badania mają wielowymiarowe znaczenie. Z jednej strony, atomy rtęci należą do grupy pierwiastków ciężkich, w których efekty relatywistyczne i korelacje elektronowe odgrywają istotną rolę, co czyni je doskonałym obiektem do testów teorii kwantowej elektrodynamiki (QED) i poszukiwania nowych efektów fizycznych. Z drugiej strony, pozytonium, jako układ złożony wyłącznie z leptonów – jest wolny od złożoności struktury jądrowej, dzięki czemu stanowi idealny model do weryfikacji obliczeń QED z bardzo wysoką precyzją.

Tematyka pracy wpisuje się w globalny trend rozwoju zegarów optycznych, które wyznaczają nowe standardy pomiaru czasu i częstotliwości. Już teraz bowiem ich stabilność przewyższa o około 3 rzędy wielkości tę z fontann cezowych i obecnie trwają dyskusje na temat zmiany definicji sekundy w układzie SI na opierającą się o optyczne zegary atomowe. Jednocześnie tak wysoka stabilność i precyzja współczesnych zegarów otwierają drogę do badań nad stałością fundamentalnych stałych fizycznych.

Realizacja badań związanych z rozprawą wymaga niewątpliwie opanowania i praktycznego wykorzystania wielu zaawansowanych metod i technologii, w tym chłodzenia i pułapkowania atomów oraz pozytonium, fizyki ultra-stabilnych wnęk optycznych, systemów kompensacji szumów w światłowodach, generacji promieniowania w zakresie UV, czy też wnęk optycznych wzmacniających moc dla celów spektroskopii. Podjęte badania mają zatem charakter silnie interdyscyplinarny, łącząc elementy współczesnej fizyki atomowej, elektrodynamiki kwantowej, technologii laserowych i metrologii. Niewątpliwie ich tematyka jest bardzo aktualna i o dużym znaczeniu dla współczesnej fizyki doświadczalnej.

Przedłożona mi do recenzji praca doktorska ma formę klasycznej rozprawy doktorskiej napisanej w języku angielskim o logicznym układzie treści. Liczy sobie 172 strony, przy czym główne rozdziały zajmują 131 stron, a na pozostałych umieszczono spisy (treści, figur, tabel i częściej używanych skrótów), trzy krótkie rozdziały stanowiące załączniki oraz listę odniesień literaturowych. Warto tu podkreślić, że lista referencji jest obszerna i liczy sobie 237 pozycji. Wiele z nich stanowią bardzo współczesne artykuły naukowe opublikowane w renomowanych czasopismach, co pokazuje dobre zaznajomienie autora z ważnymi (w tym najnowszymi) osiągnięciami

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

w dziedzinie. W dalszej części mojej recenzji omówione zostaną kolejne rozdziały rozprawy.

Rozprawę otwiera rozdział wprowadzający „Introduction”, który pełni rolę klasycznego wprowadzenia, prezentując kontekst badań w obszarze spektroskopii atomowej, zegarów optycznych i testów fundamentalnych teorii. Autor wskazuje znaczenie precyzyjnych pomiarów dla metrologii i fundamentalnej fizyki, a także uzasadnia wybór dwóch układów - rtęci (Hg) i pozytonium (Ps) – jako wybranych obiektów badań. Podkreślona jest też ich komplementarność: rtęć jako ciężki atom z silnymi efektami relatywistycznymi oraz Ps jako układ dwóch leptonów wolny od skomplikowanej struktury jądrowej. Motywacja do podjętych badań została przedstawiona dość jasno. Zaprezentowany został też aktualny stan badań w dziedzinie zegarów optycznych i spektroskopii, ze wskazaniem znaczenia precyzyjnych pomiarów częstotliwości dla testów Modelu Standardowego i poszukiwania nowych efektów fizycznych. Rozdział ten jest zaskakująco obszerny (ma nawet wyodrębnione dwa podrozdziały) i miejscami wydaje się zbyt opisowy oraz wchodzący w głębokie szczegóły. O ile zrozumiała jest dla mnie chęć ukazania kontekstu i historii badań spektroskopowych w Hg i Ps, o tyle kolejne rozdziały rozprawy, które są poświęcone z osobna tym układom, byłyby w moim odczuciu lepszym miejscem na te opisy. Szczególnie, że we wstępie ciężko jest odnaleźć jasno wskazaną hipotezę badawczą dysertacji, co byłoby pomocne dla czytelników. Brakuje tu niestety syntetycznego podsumowania problemów badawczych, którym Autor poświęca rozprawę. Zabrakło mi też wyraźnego wskazania, jakie ograniczenia istnieją w obecnych metodach (w szczególności dla zegarów Hg) i w jaki sposób praca ma je przezwyciężyć – jest to zasygnalizowane, choć nie rozwinięte. Rozproszone w tekście cele szczegółowe warto byłoby wyeksponować, np. w osobnej zwartej sekcji.

Rozdział drugi „About Mercury”, jest poświęcony podstawowym właściwościom atomu Hg oraz jego znaczeniu jako kandydata na wzorzec częstotliwości w zegarach optycznych. Autor omawia strukturę elektronową, różnice pomiędzy występującymi izotopami Hg, a także schemat poziomów energetycznych i kluczowe przejścia optyczne: $^1S_0 \rightarrow ^3P_1$ dla chłodzenia i pułapkowania w pułapce magneto-optycznej (MOT), $^1S_0 \rightarrow ^3P_0$ - przejście zegarowe, ultra-wąskie, kluczowe dla metrologii, a także omawia potrzebę przepompowania optycznego (repumping) z metastabilnych stanów (3P_0 , $^3P_2 \rightarrow ^3S_1$) do prowadzenia badań spektroskopowych w Hg. Omówiony został też wpływ struktury nadsubtelnej na prawdopodobieństwo obserwacji przejścia zegarowego w izotopach fermionowych. W rozdziale tym wskazano także znaczenie efektów Zeemana i koncepcję magicznej długości fali dla sieci optycznej. Opis ten wydaje się kompletny. Autor szczegółowo omawia wszystkie istotne przejścia i ich parametry (częstotliwości, szerokości naturalne, natężenia nasycenia). Podkreślone zostały zalety rtęci (niska wrażliwość na BBR, brak momentu magnetycznego w stanie zegarowym) oraz jej potencjał do osiągnięcia niepewności rzędu 10^{-18} . Natomiast brakuje wyjaśnienia czymże jest wspomniana wrażliwość na BBR. Czytelnik zyskałby wiele, gdyby podawane liczby zostały wprowadzone krótkim opisem tego zjawiska. Ponadto, autor przekonuje, że analiza przesunięć izotopowych pozwala tworzyć wykresy Kinga jako narzędziu do poszukiwania odstępstw od liniowości - sygnatur nowej fizyki. Zabrakło mi natomiast pokazania takiego wykresu Kinga, do którego autor kilkakrotnie się odwołuje w tekście, a który można było stworzyć na podstawie danych literaturowych, bądź zasymulować, pokazując choćby ideowo jak antycypowana nieliniowość mogłaby wyglądać. Mam też drobną uwagę co do stwierdzenia: ‘The choice of repumping wavelength must take into account not only the transition strength, but also the branching ratios of decay from 3S_1 .’, Wydaje mi się ono zbyt ogólnikowe. Po pierwsze istniejąca struktura poziomów stanów 3P_0 , 3P_2 oraz 3S_1 narzuca dwie konkretne długości fali, bez możliwości

wyboru. Nie jest więc dla mnie jasne, co autor chce tu przekazać, ani dlaczego decyduje się w dalszej części pracy na przygotowanie laserów pracujących na obu tych długościach fali. Czy współczynniki rozgałęzienia (branching ratios) nie są dobrze znane? Jeśli tak, to warto by tutaj przytoczyć wartości.

Rozdział trzeci rozprawy jest zatytułowany „About Positronium” i poświęcony krótkiemu omówieniu specyficznych właściwości pozytonium jako czystego układu leptonowego, jego znaczeniu w testach elektrodynamiki kwantowej (QED), badaniach zachowania symetrii CPT, a także przeglądowi dotychczasowych badań spektroskopowych. Autor przedstawia strukturę najniższych poziomów energetycznych poziomów ($n=1$ i $n=2$), kanały anihilacji pozytonium, czasy życia oraz kluczowe przejścia optyczne (linia Lyman- α i przejście dwufotonowe $1^3S_1-2^3S_1$). Opisuje historię pomiarów tych linii – od eksperymentów Stevena Chu i Allena P. Millsa w latach 80., przez wynik uzyskany w 1993 r. za pomocą dwufotonowej spektroskopii z wiązkami ciągłymi (continuous wave), aż po najnowsze badania z wykorzystaniem jonizacji stanów rydbergowskich (publikacja w Phys. Rev. A z 2025 r.!). W końcowej części rozdziału omówione zostało laserowe chłodzenie Ps, w tym przełomowe wyniki spowalniania Ps uzyskane przez Shu i innych (artykuł opublikowany w Nature w 2024 r) oraz równolegle przez kolaborację AEgIS w ośrodku CERN, do której należy także grupa autora z laboratorium FAMO. Podsumowując, ten krótki, pięciostronicowy rozdział zwięźle omawia wybrane aspekty spektroskopii Ps. Z obowiązku recenzenta muszę wskazać, że w tekście wkradły się błędy, np. pod Rys. 3.1. masa pozytonu jest zapisywana błędnie jako iloczyn masy i ładunku, co jednak wygląda na niedopatrzenie przy składzie tekstu. Podobnie w cytowanej tu bibliografii wkradły się pomyłki, jak np. przekręcanie nazwiska Millsa (Ref. 48-52, 121), błędna pisownia skrótownica AIP (Ref. 120), czy w reszcie pisownia nazwiska Bose mała literą w kontekście zjawiska kondensacji Bosego-Einsteina Ps (Ref. 121). Wydaje mi się, że autor nazbyt zaufał tutaj automatyzacji tworzenia odniesień przez systemy typu BibTeX (lub podobne) i nie zweryfikował wystarczająco dokładnie wygenerowanej bibliografii.

Rozdział czwarty rozprawy doktorskiej, zatytułowany „Theory and Methods”, został w rzeczywistości poświęcony omówieniu dwóch tematów: zagadnienia optycznych wnęk rezonansowych oraz metod analizy stabilności sygnałów oscylujących. Brakuje tu wprowadzenia, a rozdział otwiera opis modelu wnęki Fabry–Pérot (FP), zawierający wzory na takie parametry jak transmisja i odbicie w funkcji częstotliwości, współczynnik finezji i finezja, wpływ strat i parametrów absorpcji oraz rozpraszania realistycznych lusterek, a także warunki do krytycznego sprzężenia, które maksymalizuje moc światła cyrkulującego wewnątrz wnęki. Wskazano tutaj, jak parametry wnęki (finiezja, długość, straty) wpływają na projektowanie układów do spektroskopii. Są to niewątpliwie solidne teoretyczne podstawy zagadnienia stosowania wnęk rezonansowych o wysokiej dobroci do precyzyjnej spektroskopii, co ma znaczenie dla optycznych pułapek (sieci optycznych) dla Hg oraz wzmacniania mocy wiązki próbującej dla Ps, a prze to stanowi fundament dla prac doświadczalnych opisanych w dalszych rozdziałach.

Drugim zagadnieniem poruszonym w tym rozdziale jest analiza stabilności częstotliwości sygnałów oscylujących. Autor omawia tutaj pięć najczęściej obserwowanych modeli szumu (biały i różowy szum fazy, analogiczne szумы częstotliwości oraz błądzenie przypadkowe częstotliwości), oraz zależność (skalowanie) ich amplitudy od częstotliwości, która przekłada się z kolei na różne skalowanie się wariancji z czasem uśredniania wyników. Autor wprowadza wariancję Allana w różnych wariantach: podstawowym (oznaczana skrótem ADEV), z nakładaniem się próbek (OADEV, od overlapping), a także zmodyfikowanym o uśrednianie fazy (MDEV, od modified). Omówione są ich zalety i ograniczenia, w tym także sposób wyznaczania niepewności, polegający na wyznaczeniu efektywnej liczby

stopni swobody problemu (eDOF). Pokazuje to doskonałe zorientowanie autora pracy we współcześnie stosowanych technikach analizy stabilności zegarów atomowych. Po opisie wariancji, omawiana jest wyznaczania stabilności układu, gdy brakuje absolutnego wzorca (układu odniesienia), wobec którego ta stabilność mogłaby być wyznaczana. Jest to znowu aktualna tematyka, szczególnie dla optycznych zegarów atomowych, które stabilnością i precyzją przewyższają fontanny cezowe, będące z definicji wzorcem sekundy w obowiązującym układzie jednostek SI. Omówione zostały techniki porównywania trzech wzorców (TCH, three-cornered hat) oraz kowariancji Groslambda (GCOV), które pozwalają na charakteryzację stabilności oscylatora, gdy mamy dwa inne wzorce o zbliżonych parametrach. Rozdział kończy krótkie objaśnienie dwóch rodzajów liczników częstotliwości, typu Π i Λ , a także wpływu funkcji wagowych na dokładność ich pomiarów. Podsumowując ten rozdział, autor szczegółowo wyjaśnia w tym rozdziale zarówno fizykę wnek optycznych, jak i metody analizy stabilności, co jest kluczowe dla zrozumienia dalszych wyników. Uwzględnienie nowoczesnych metod, jak opis GCOV i MDEV, niewątpliwie pokazuje jego świadomość aktualnych standardów w analizie stabilności zegarów optycznych i precyzyjnej spektroskopii. Rozdział ten jest solidnym kompendium teoretycznym, ale zyskałby jeszcze na wartości, gdyby szerzej opisano powiązania z celami pracy. Z drobnych znalezionych niedociągnięć, na Rys. 4.8 wydaje się, że błędnie oznaczone są chwila/przedział τ (niespójnie z definicjami na poprzedzającej stronie), zaś w równaniu 4.2.21 źle dobrano górną granicę całkowania. Moją uwagę zwróciły też osobne odnośniki do dwóch wydań książki Saleha i Teiha pt. 'Fundamentals of Photonics' - wydaje się, że można było tu użyć jednej edycji tej pozycji literaturowej do opisu wneki FP.

Rozdział piąty rozprawy pt. „Experimental Setup at National Laboratory FAMO” jest najbardziej rozbudowaną jej częścią, obejmującą aż 73 strony. Stanowi on kompleksowy opis infrastruktury doświadczalnej stworzonej w zasadniczej mierze przez autora dysertacji w KL FAMO do realizacji spektroskopii przejścia zegarowego w zimnych atomach rtęci. Rozpoczyna się on opisem układu próżniowego wraz ze źródłem atomów Hg, który jednakże nie był przygotowany przez autora rozprawy. Jest to o tyle unikatowa aparatura względem innych układów do chłodzenia laserowego atomów, że prężność par rtęci w temperaturze pokojowej jest bardzo wysoka i dla utrzymania pożądanego ciśnienia par w komorze próżniowej zamiast ogrzewania wymagane jest chłodzenie rezerwuaru Hg do temperatur rzędu -30 C, czyli znacznie poniżej temperatury otoczenia. W opisie tym brakuje mi natomiast nakreślenia na początku, że aparatura służy również do chłodzenia atomów rubidu (Rb), co jest tylko wspomniane ale dość późno oraz bez szerszego kontekstu.

W kolejnym podrozdziale (5.2), autor opisuje układ laserowy wykorzystywany do chłodzenia i pułapkowania atomów Hg, który bazuje na generacji czwartej harmonicznej promieniowania o długości fali 1014,8 nm aby wytworzyć niezbędną ilość światła w zakresie UV o długości fali 253,7 nm, dostrojonej do przejścia optycznego $^1S_0-^3P_1$. Wykorzystano tutaj komercyjnie dostępny system laserowy. Technologicznie jest to dość skomplikowany proces konwersji światła, który jednakże jest konieczny ze względu na brak innych równie silnych, wąskich spektralnie i przestrajalnych źródeł światła w tym zakresie. W dalszej części tego podrozdziału autor wprowadza opis optycznego grzebienia częstości (OFC). W mojej opinii zasługuje on wyodrębnienie go jako osobnego podrozdziału, gdyż opis grzebienia i jego podstaw działania mieszają się tutaj z opisem lasera pułapkującego. Nie jest też wyjaśnione dlaczego potrzebny jest OFC, gdy dostępny jest układ spektroskopii bezdopplerowskiej. Czy wynika to z konieczności lepszej stabilizacji lasera pułapkującego, czy konieczności zawężenia szerokości spektralnej jego linii, czy też może obu tych efektów równocześnie? Rozumiem ideę stabilizacji i odnoszenia

częstotliwości wszelkich źródeł światła do OFC, by mieć możliwość wyznaczania absolutnej długości fali przejścia, lecz brakuje mi tu jawnego wprowadzenia czytelnika w motywację obranego podejścia.

Podrozdział 5.3 poświęcony jest wdrożeniu w FAMO ultrastabilnej wnęki rezonansowej dla światła o długości fali 1062,55 nm, czyli dostrojonego do przejścia zegarowego w Hg. Jest tutaj przedyskutowany projekt mechaniczny wnęki i komory próżniowej, zaprojektowana i wykonana izolacja od wibracji, układ do precyzyjnej stabilizacji temperatury o precyzji poniżej 1 mK, a także opis wyznaczenia temperatury zerowego współczynnika rozszerzalności wnęki wyniki pomiarów finezji. Niestety odniesienia bibliograficzne do programów i dokumentacji technicznej wykonanej przez autora mają postać tytułu i numeru wersji, lecz są pozbawione odnośnika do adresu internetowego, przez co nie jest możliwe zapoznanie się z nimi. Jest to niewątpliwie duże niedopatrzenie autora.

W podrozdziale 5.4 omówiony jest układ lasera do próbkowania przejścia zegarowego. Wykorzystany został tutaj laser NKT BASIK Y10, lecz pierwotnie planowano użycie lasera OEwaves EQ4126. Autor omawia powody tej zmiany i szeroko omawia opracowane układy optyczne. Laser zostaje sprzęgnięty do ultrastabilnej wnęki rezonansowej z wydajnością około 35%, co uznaje jako akceptowalne z możliwością dalszej optymalizacji. Brakuje tutaj podania wartości liczbowych uzyskiwanych w podobnych eksperymentach na świecie, które pozwoliłyby porównać osiągnięty wynik. Dalszy opis systemu dystrybucji światła powinien zostać poprzedzony objaśnieniem idei kompensacji szumu fazowego wprowadzanego przez światłowody, który jest zawarty kilka stron dalej. Przez to w opisie można znaleźć np. informacje, że wiązka laserowa padająca na fotodiodę stanowi referencję częstotliwości optycznej i na tym kończy się akapit (str. 84). Dopiero znacznie dalej w tekście pojawia się informacja, że w używanej tu technice interferuje się dwie wiązki. Jest to wiedza dość oczywista dla osób pracujących na co dzień z tego typu układami, lecz powinna zostać odpowiednio wprowadzona dla czytelnika rozprawy. Na wstępie należałoby przedstawić konieczność używania światłowodów do transportu światła oraz ich wpływ na szum fazowy transmitowanej wiązki laserowej i dopiero potem omówić w tym kontekście przedstawić zbudowany układ dystrybucji światła.

W dalszej części omówiony jest opis układu wzmacniacza światłowodowego i generacji promieniowania UV poprzez dwukrotny proces generacji drugiej harmonicznej, najpierw w falowodzie PPLN a później w rezonansowej wnęcie podwajającej. Opracowane układy optyczne pozwoliły na dowiązanie lasera zegarowego do wnęki rezonansowej i jego zdudnienie z optycznym grzebieniem częstości, który był odnoszony do stabilnych wzorców częstotliwości, co pozwoliło na określenie stabilności opracowanego układu na imponującym poziomie $7,2 \times 10^{-16}$ dla 1 s.

Kolejny podrozdział dedykowany został opracowaniu dwóch laserów diodowych z zewnętrznymi rezonatorami, które służą do pompowania optycznego ze stanów metastabilnych. Autorskie konstrukcje tych laserów pozwalają na generację promieniowania o właściwej długości fali. Jednakże autor szacuje niezbędną moc dla obu wiązek jako 8,7 mW i 5,2 mW odpowiednio dla długości fal 404,7 nm i 546,1 nm, podczas gdy pierwszy z laserów generuje 8,5 mW (a drugi 12 mW). Nie rozumiem zatem stwierdzenia, że oba systemy „komfortowo przewyższają” wymagany próg mocy. Może te wielkości zostały przypisane odwrotnie?

Ostatni podrozdział (5.6) dotyczy projektu wnęki do wytwarzania sieci optycznej, w której więzi się atomy Hg poddawane oddziaływaniu z laserem zegarowym. Sieć ta jest wytwarzana jako fala stojąca laser a o tzw. magicznej długości fali, która wynosi około 362,5 nm dla Hg. Bazując na teoretycznym modelu wnęki, autor zaprojektował układ wnęki rezonansowej do wytworzenia sieci optycznej przez efektywne zwielokrotnienie mocy lasera wewnątrz wnęki. Ponieważ obecny układ próżniowy nie

pozwała na jej integrację wewnątrz, zaprojektowana została również nowa komora próżniowa, w której planowane jest wytwarzanie sieci optycznej dla atomów Hg. Opisane tutaj prace mają zatem charakter projektowy, gdyż nie zostały jeszcze zweryfikowane. Moją uwagę zwróciło opisanie zastosowania okienek próżniowych umieszczonych pod kątem Brewstera jako polaryzatorów, gdyż chyba nie taki cel im przyświeca. Pojedyncza płytka szklana umieszczona pod kątem Brewstera zazwyczaj ma minimalizować straty odbiciowe, a jej działanie jako polaryzator można określić jako najwyżej umiarkowane – przepuszcza bowiem 100% światła o polaryzacji p, ale też ponad 80% o polaryzacji s.

Podsumowując rozdział piąty jest bardzo mocnym punktem pracy pod względem wkładu eksperymentalnego i dokumentacji technicznej. Brakuje mi tu jednak rozdzielenia „projektów” od „wyników”, co utrudnia ocenę powiązania z głównym celem i stopnia realizacji hipotez badawczych. W obecnej formie jest to natomiast świetny opis infrastruktury i nie ulega dla mnie wątpliwości, że autor wykonał tytaniczną pracę nad jej przygotowaniem i charakteryzacją. Z uwag edytorskich, czytając ten rozdział można znaleźć wiele krótkich, nawet jedno- i dwuzdaniowych akapitów następujących po sobie i kontynuujących zaczęłą myśl. Niestety sprawia to, że taki tekst jest mniej czytelny, bo kolejne akapity odnoszą się mocno do poprzedzających. Nasuwa mi się tutaj jeszcze pytanie o projekt nowego układu laserowego do wytwarzania sieci optycznej: w jakim celu planowane jest odnoszenie lasera pracującego na magicznej długości fali do optycznego grzebienia częstości? Czy jego długość fali musi być mierzona i zadawana z rozdzielczością większą niż oferuje lambdametr używany do stabilizacji laserów repompujących?

Szósty rozdział rozprawy poświęcony został przygotowaniu układu do spektroskopii pozytonium w ramach eksperymentu AEGIS w CERN. W pierwszej części opisany został system próżniowy i sposób wytwarzania Ps. Następnie przedstawiony jest projekt układu laserowego do próbkowania przejścia $1^3S_1-2^3S_1$ przy użyciu spektroskopii dwufotonowej na długości fali 486 nm z wiązkami ciągłymi (CW). Opisane są tu wymagania odnośnie mocy i stabilności wiązki próbkującej, co prowadzi do projektu wnęki wzmacniającej moc. Autor dyskutuje też kilka propozycji budowy źródeł światła – od komercyjnych systemów SHG, po własne typu ECDL z podwajaniem w falowodzie PPLN, przedstawiając także analizę kosztów i złożoności. Dyskutowana jest też integracja z systemami CERN do stabilizacji i pomiaru częstotliwości poprzez odniesienie do grzebienia OFC, czy też integracja z układami kontrolno-sterującymi ARTIQ/Sinara. Rozdział ten kończy analiza budżetu niepewności, przy czym cały rozdział ma charakter projektowy, więc rozważania te są teoretyczne i bazują na szacowaniach. Niewątpliwie doświadczenia autora z budowy układu o spektroskopii Hg mogą być w części przeniesione na układ do spektroskopii Ps i będą stanowić cenny wkład w jego rozwój. Jednak obecnie pozostaje on na poziomie koncepcji.

Rozprawę kończy rozdział siódmy stanowiący podsumowanie działań podjętych przez autora. Podkreślone zostały w nim główne cele – opracowanie układów do precyzyjnej spektroskopii przejścia zegarowego w Hg i przejść w Ps – jak również osiągnięcia – zbudowana infrastruktura i jej przeprowadzona charakteryzacja – i plany na dalszy rozwój – implementacja sieci optycznej i spektroskopia przejścia w Hg, spektroskopia Ps w CERN. Rozdział ten jest bogaty w szczegóły techniczne jednakże brakuje mi w nim jasnego, syntetycznego podsumowania co udało się dokonać naukowo.

Przechodząc do podsumowania całej rozprawy, chciałbym podkreślić dużą skalę i złożoność podjętych przez autora badań. Badania zimnych atomów, a w szczególności ultraprecyzyjna spektroskopia w nich to domena nielicznych grup na świecie. Takie doświadczenia są skomplikowane i ich planowanie oraz realizacja trwają wiele lat, często dłużej niż okres studiów doktoranckich, co stanowi dużą trudność

w pogodzeniu tych procesów. Rozprawę doktorską oceniam bardzo dobrze. Została napisana w sposób logiczny i zrozumiały, a także opatrzona dobrze wykonanymi ilustracjami. W tytule odnosi się do spektroskopii atomów alkalicznych, które jednak nie są jej przedmiotem. Odnoszę wrażenie, że pierwotne plany badawcze były szersze, natomiast nie udało się ich zrealizować z powodu ograniczeń czasowych i napotkanych problemów (m.in. awarii laserów), co też rozumiem prowadząc grupę badawczą zajmującą się zbliżoną tematyką. Największym mankamentem rozprawy jest brak realizacji głównego celu - pomiaru przejścia zegarowego w Hg, co ogranicza wartość naukową pracy. Z drugiej strony, przygotowana infrastruktura stanowi oryginalne, autorskie rozwiązania, a przedstawione koncepcje pomiarów dla Ps są solidne i mogą stanowić fundament dla przyszłych badań. Wypunktowane przeze mnie w poprzedzających akapitach uwagi nie umniejszają ogólnej wysokiej oceny dysertacji. Nie mam też wątpliwości, że autor demonstruje wysoki poziom samodzielności i istotny wkład w rozwój dyscypliny. W mojej opinii przedłożona rozprawa spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w art. 187 ustawy *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z dnia 20 lipca 2018 r. (z późn. zm.) i dlatego wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony i dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Adam Wojciechowski