

Prof. dr hab. Włodzimierz Jastrzębski

Instytut Fizyki PAN, Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgra Marcina Piotrowskiego

p.t. „Zastosowanie metrologiczne zimnych atomów pułapkowanych optycznie”

Praca doktorska mgra Marcina Piotrowskiego została wykonana w pod kierunkiem prof. Jerzego Zachorowskiego. Większość badań przedstawionych w rozprawie wykonanych zostało na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UJ. Pomiar z wykorzystaniem pułapki strontowej wykonane zostały w KL FAMO w Toruniu, aczkolwiek część aparatury związana z tymi pomiarami została przygotowana w Krakowie z udziałem Autora.

Rozprawę można podzielić na dwie części: pierwszą dotyczącą budowy i diagnostyki układu do chłodzenia i pułapkowania atomów rubidu oraz drugą dotyczącą strontu. W przypadku układu strontowego mgr Marcin Piotrowski przedstawił też oryginalne wyniki uzyskane w laboratorium zegarowym w KL FAMO z wykorzystaniem wybudowanej aparatury. Moją ocenę rozprawy odniosę kolejno do tych dwóch niezależnych części.

We wstępie (str. 16) Autor określił swój wkład w wykonane prace, który w mojej ocenie sprawia wrażenie bardzo technicznego, co oczywiście nie oznacza, że nie wymagał dobrej znajomości specyficznych dla Rb i Sr technik badawczych oraz zrozumienia procesów fizycznych na różnych etapach chłodzenia i pułapkowania obu rodzajów atomów niezbędnych do zaprojektowania i optymalizacji układu. W szczególności w przypadku aparatury rubidowej trochę bez pokrycia jest obietnica ze str. 14 „... w rozprawie zostaną przedstawione nowe pola badawcze otwierające się dzięki powstałej aparaturze ...”, których przedstawienia nie dostrzegłem w rozprawie. Natomiast prace Autora dotyczące konstrukcji i precyzyjnej kontroli parametrów aparatury strontowej wpisują się bardzo dobrze w tematykę metrologii czasu/częstotliwości prowadzonych na świecie i w Polsce – świadczą o tym też wyniki przedstawione w rozprawie.

Opis działań eksperymentalnych Autora poprzedza krótki Rozdział 1. z wybranymi zagadnieniami teoretycznymi. Znalazły się w nim metody oceny stabilności wzorców częstotliwości (wariancja i odchylenie Allana), które Autor stosował do porównania stabilności swojego układu z działającym w KL FAMO. Z kolei podstawy optycznego pułapkowania atomów przedstawione w tym rozdziale wprowadzają parametry charakteryzujące pułapki dipolowe m.in. częstości własne pułapek, charakterystykę sieci optycznej powstającej w fali stojącej i pojęcie magicznej długości fali. W tej części trochę zabrakło mi porównania pułapek typu FORT i QUEST, co w dalszej części pozwoliłoby Autorowi porównać zbudowaną przez niego pułapkę na długości fali 1070 nm z poprzednio uruchomioną w Zespole pułapką wykorzystującą laser CO₂, o której wspomina na str. 86 (przedmiot pracy doktorskiej Krzysztofa Brzozowskiego, 2010r.).

W Rozdziale 2. Autor bardzo szczegółowo przedstawił etapy budowania i testowania układu do chłodzenia i pułapkowania optycznego atomów Rb, włącznie z procedurami

wygrzewania, odgazowywania, pompowania i transportowania aparatury próżniowej do nowego laboratorium. Ten opis jest pewnie wartościowy dla następnych użytkowników tej aparatury ale z powodzeniem mógłby się znaleźć w dodatku, jako bardzo techniczny. W tej części zwróciła moją uwagę analiza czasów życia atomów w pułapce MOT, która dzięki zidentyfikowaniu przyczyn początkowo bardzo krótkiego czasu życia ($\sim 2s$) pozwoliła wydłużyć go do $\sim 40s$ i pokazała, że dość powszechnie stosowana ocena próżni na podstawie prądu pomp jonowych nie jest w pełni wiarygodna. W tym rozdziale Autor mógł moim zdaniem bardziej rozwinąć opis stabilizacji laserów z wykorzystaniem spektroskopii z transferem modulacji. Dużym wyzwaniem konstrukcyjnym była też komplikacja w rozmieszczeniu cewek MOTowskich i kompensacyjnych związana z instalacją ekranu magnetycznego.

W Rozdziale 3. dotyczącym ostatnich faz prowadzących do spulapkowania optycznego atomów Rb znajdują się szczegóły dotyczące budowy i działania dwuwymiarowej pułapki MOT (2D-MOT) z wykorzystaniem magnesów neodymowych – to jest ciekawe rozwiązanie. Wykonane przez Autora symulacje działania pułapki 2D-MOT umożliwiły dobranie odpowiednich parametrów pola magnetycznego poprzez „obserwację” trajektorii atomów dla różnych stanów początkowych (rys. 3.2). Bardzo dobrą zgodność wniosków z tych symulacji z obserwacjami doświadczalnymi obrazują m.in. wykresy intensywności strumienia atomowego - rys. 3.3 i 3.15. W rezultacie strumień poprzecznie schłodzonych atomów z 2D-MOT wyniósł ok. 10^8 at/s ładując (10^9 atomów) do drugiej, trzywymiarowej pułapki MOT (3D-MOT), z której atomy są przekładane do pułapki optycznej. Czas życia w pułapce optycznej wyniósł ok. 2s, co jak pisze Autor jest znacznym postępem w stosunku do czasów otrzymanych przez dra Brzozowskiego – nie jest to jednak bliżej przedyskutowane w recenzowanej rozprawie.

Wykorzystując wybudowaną, bardzo złożoną aparaturę mgr Piotrowski wykonał jedynie bardzo wstępne pomiary rotacji Faradaya. W recenzowanej niedawno m.in. przeze mnie pracy doktorskiej dra Sycza w podobnych pomiarach, ale prowadzonych z atomami uwalnianymi z pułapki MOT, ograniczeniem był bardzo krótki czas obserwacji (ms) i fluktuacje pól magnetycznych. Obecnie te ograniczenia zostały pokonane i szkoda, że Autor nie wykorzystał tej szansy – przeprowadził jedynie pomiar testowy, który jak pisze (str.88) stanowi bazę do dalszych eksperymentów. Szkoda, bo w tej sytuacji niemały wysiłek Autora mogę ocenić głównie jako osiągnięcie techniczne.

Druga część rozprawy (Rozdział 4.) poświęcona jest badaniom w układzie do wytwarzania i pułapkowania zimnych atomów ^{88}Sr , który jest częścią zegara atomowego w Toruniu. Zasługą mgra Piotrowskiego jest dopracowanie ostatnich faz przygotowania próbki atomowej, które umożliwiło porównanie dwóch wzorcowych częstotliwości krakowskiej (^{88}Sr) i toruńskiej (^{87}Sr). Techniki chłodzenia atomów Sr są bardzo odmienne od Rb m.in. ze względu na strukturę poziomów energetycznych i szerokość przejść optycznych. Podkreślić należy, że eksperyment strontowy wymagał bardzo wyrafinowanego dopasowania i opanowania wszystkich parametrów układu, gdyż ostateczne testy były bardzo rygorystyczne jak np. pomiar bezwzględnej częstotliwości przejścia $^1\text{S}_0\text{-}^3\text{P}_1$ z dokładnością kilohertzową (ok. 434829121310 kHz) czy rejestracja bardzo wąskiego (27Hz) przejścia zegarowego $^1\text{S}_0\text{-}^3\text{P}_0$ z dokładnością bezwzględną ok. 600 Hz. W tym celu Autor opanował metodę efektywnego (30-40%) przeładowywania atomów Sr wstępnie chłodzonych na przejściu $^1\text{S}_0\text{-}^1\text{P}_1$ (461nm – tzw. niebieski MOT) do temperatur mK do tzw. czerwonego (689nm) MOT pracującego na wąskim (8kHz) przejściu interkombinacyjnym $^1\text{S}_0\text{-}^3\text{P}_1$, w którym osiągane są temperatury μK pozwalające na wychwyt w sieci optycznej. W rozprawie przedstawił i uzasadnił szereg

subtelnych zabiegów (np. poszerzenie lasera 689 nm poprzez modulację częstotliwości, kompresję chmury atomowej przez zwiększenie gradientu pola magnetycznego), które optymalizował w kolejnych etapach eksperymentu. Dodatkowo wprowadził kontrolę rozkładu temperatury komory próżniowej, co pozwoliło na wyznaczenie i uwzględnienie poprawki przesuwającej poziomy energetyczne ze względu na promieniowanie termiczne. Ta poprawka w temperaturze pokojowej jest na poziomie 10^{-15} i jest jednym z głównych źródeł systematycznej niepewności w pomiarach przejścia zegarowego, dla którego oczekuje się docelowej precyzji 10^{-18} . Opisane w pracy mgra Piotrowskiego rozwiązanie jest interesującą alternatywą dla bardziej skomplikowanych technik kriogenicznych rozważanych w innych grupach badawczych. Z kolei wytworzenie stabilnej sieci optycznej na ściśle określonej magicznej długości fali (813 dla przejścia zegarowego) wymagało zarówno precyzyjnej stabilizacji lasera jak i wnęki rezonansowej wytwarzającej falę stojącą dla sieci optycznej. Bezwzględny pomiar częstotliwości przejścia zegarowego został wykonany z zastosowaniem grzebienia optycznego zalokowanego do wzorca rubidowego kontrolowanego sygnałem GPS. W takiej konfiguracji spodziewana dokładność jest na poziomie 10^{-12} , co potwierdza otrzymana wartość: 429 228 066 418 300 (580) Hz. Dalszej poprawy tej dokładności, jak sugeruje Autor można spodziewać się po zastąpieniu wzorca rubidowego do opartego na maserze wodorowym np. poprzez połączenie światłowodowe z Obserwatorium w Borowcu.

W tej strontowej części rozprawy Autor przedstawił też interesującą obserwację pasm bocznych towarzyszących linii zegarowej związanych z modami podłużnymi i poprzecznymi pułapki optycznej. Wydaje mi się, że mógłby to być interesujący wątek naukowy, którego rozwinięcie przez mgra Piotrowskiego mogłoby nadać jego badaniom bardziej autorskiego charakteru.

Podsumowując tę część rozprawy: wszystkie elementy układu jak i organizacja całego eksperymentu w Toruniu jest kompetentnie i jasno przedstawiona w rozprawie. Oczywiście cały układ jest dziełem kilkunastoosobowego zespołu - Autor był odpowiedzialny za działanie układu ^{88}Sr , który jest bardzo ważnym elementem tego układu. Wyniki tych badań i sposób ich przeprowadzenia są przedmiotem artykułu w *Measurement Science and Technology* (2015), którego mgr Piotrowski jest współautorem.

Podsumowując: prace mgra Piotrowskiego obejmowały konstrukcję i diagnostykę dwóch, złożonych układów do chłodzenia i pułapkowania atomów Rb i Sr. W przypadku układu rubidowego jest on też autorem koncepcji układu. To jest bardzo szeroki zakres prac, zwłaszcza że te układy są bardzo różne, co moim zdaniem świadczy o opanowaniu przez Autora szerokiej gamy technik doświadczalnych.

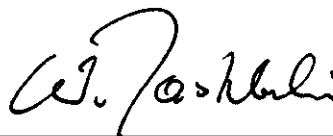
Mój niedosyt odnośnie części rubidowej związany jest z tym, że Autor nie przeprowadził bardziej zaawansowanych badań w tym układzie pomimo bardzo dużego zaangażowania i nakładu pracy (i środków) w jego budowę i przetestowanie. Nie porównał możliwości badawczych w nowym układzie do tych, które były w poprzednich wersjach np. pułapce optycznej dra Brzozowskiego.

W przypadku układu strontowego mgr Piotrowski miał znaczący wkład w przygotowanie układu do pomiarów, zintegrowanie go z aparaturą toruńską i przeprowadzenie pomiarów. Wysoko oceniam ten wkład ponieważ ostatni etap uruchomienia całego układu, w szczególności wykonanie oryginalnych pomiarów jest prawdziwym testem jakości wykonanych

prac i decyduje o ostatecznym sukcesie. A z pewnością takim sukcesem są superprecyzyjne pomiary przejścia zegarowego.

Rozprawa licząca 162 strony (włączając załączone rysunki techniczne) została przygotowana starannie. Podtrzymuję wcześniejszą uwagę, że część detali konstrukcyjnych powinna się znaleźć w dodatkach – podniosłoby to komfort czytania rozprawy. Nie zauważyłem poważnych usterek, które wymagałyby odnotowania w recenzji. Zwróciłem jedynie uwagę na jednostki na rys. 4.19 i 4.20 mogące sugerować bardzo różne liczby atomów dla obu realizacji pułapek.

Uważam, że przedstawione wyniki oraz osiągnięcia w konstrukcji układów doświadczalnych i dojrzałym ich opisie zawarte w rozprawie spełniają wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie mgra Marcina Piotrowskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Prof. dr hab. Włodzimierz Jastrzębski