

Wrocław, 25 września 2015 r.

dr. hab. Andrzej Szczepkiewicz
Instytut Fizyki Doświadczalnej
Uniwersytetu Wrocławskiego

Recenzja pracy doktorskiej magistra Marcina Piotrowskiego pt. „Zastosowania metrologiczne zimnych atomów pułapkowanych optycznie”

Techniki laserowego chłodzenia i pułapkowania atomów nie tylko odgrywają ważną rolę we współczesnej fizyce atomu, ale mają także zastosowania wykraczające daleko poza tę dziedzinę. Podam jeden przykład: w przyszłym roku Europejska Agencja Kosmiczna w ramach misji ACES planuje umieszczenie na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej mikrofalowego zegara atomowego pracującego na zimnych atomach cezu. Równolegle europejskie konsorcjum o nazwie „Space Optical Clocks” opracowuje o rząd dokładniejszy, przenośny i wytrzymały optyczny zegar atomowy pracujący na zimnych atomach strontu umieszczonych w sieci optycznej. Wysłanie na orbitę takiego zegara planowane jest pod koniec dekady¹. Celem obydwu misji jest między innymi sprawdzenie z niespotykaną dotychczas dokładnością przewidywań Ogólnej Teorii Względności.

W świetle powyższego uważam, że tematyka pracy doktorskiej Marcina Piotrowskiego leży bardzo blisko frontu badań współczesnej nauki. Jednocześnie chciałbym podkreślić, że jest to tematyka trudna. Układy doświadczalne są bardzo złożone, a ponadto muszą być projektowane i montowane samodzielnie – zakup gotowej aparatury nie jest tutaj możliwy. Każde przedsięwzięcie eksperymentalne w dziedzinie zimnych atomów trwa wiele lat i jest realizowane przy współudziale wielu osób.

Marcin Piotrowski w ramach swojej pracy doktorskiej uczestniczył w dwóch przedsięwzięciach eksperymentalnych. Celem pierwszego z nich jest uzyskanie w optycznej pułapce dipolowej ultrazimnych atomów rubidu do badań nieliniowych zjawisk magnetooptycznych, a w dalszej perspektywie do uzyskania kondensatu Bosego-Einsteina na drodze czysto optycznej. Eksperyment ten zlokalizowany jest w Krakowie. Celem drugiego przedsięwzięcia jest budowa, utrzymanie w ruchu i osiągnięcie najwyższej dokładności optycznego zegara atomowego pracującego na zimnych atomach strontu umieszczonych w sieci optycznej. Zegar ten pracuje w Toruniu.

¹K. Bongs *et al*, Development of a strontium optical lattice clock for the SOC mission on the ISS, C.R. Physique 16 (2015) 553–564.

We wstępie do rozprawy Marcin Piotrowski bardzo szczegółowo określa swój wkład w oba eksperymenty. Ogólnie można powiedzieć, że doktorant od początku czynnie uczestniczył w kolejnych etapach przedsięwzięcia rubidowego, począwszy od etapu kształtowania koncepcji, obliczeń i symulacji, poprzez etap projektowy, montażowy i testowy. Można żałować, że jego praca nie zdążyła już objąć etapu pomiarów nadających się do opublikowania w czasopiśmie naukowym, ale pamiętajmy, że w świetle art.13. ustawy o stopniach naukowych pracę doktorską może także stanowić praca projektowa i konstrukcyjna, o ile stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Moim zdaniem doktorant rozwiązał tutaj w sposób oryginalny wiele problemów naukowych z dziedziny doświadczalnej fizyki zimnych atomów, konstruuując unikalną w skali światowej aparaturę.

Praca doktoranta przy uruchomieniu zegara optycznego w Toruniu również wiązała się ze znacznym wysiłkiem projektowo-konstrukcyjnym, ale tutaj Marcin Piotrowski wziął ponadto udział w przygotowaniu i realizacji precyzyjnej spektroskopii optycznego przejścia zegarowego. Zmierzona szerokość połówkowa – zaledwie 27 Hz (FWHM) – jest znaczącym osiągnięciem tej krakowsko-toruńsko-warszawskiej współpracy. Osiągnięcie to ogłoszono w czasopiśmie *Measurement Science and Technology*, a Marcin Piotrowski jest jednym z autorów pracy.

Swoje osiągnięcia opisał doktorant w 162-stronicowej rozprawie. Maszynopis jest przygotowany starannie, z przejrzystą strukturą rozdziałów i podrozdziałów. Zwraca uwagę duża liczba ilustracji – aż 84 – co znacznie ułatwia lekturę, a jednocześnie dobrze dokumentuje osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne oraz pomiarowe autora. Ilustracje są przygotowane starannie, wśród nich szczególnie pięknie prezentują się diagramy wyjaśniające złożoną trójwymiarową strukturę aparatury oraz bieg wiązek laserowych. Ponadto dziewięć dodatków na końcu rozprawy zawiera znaczną liczbę rysunków technicznych i zdjęć aparatury. Oprócz opisu aparatury i doświadczeń, praca zawiera rozdział teoretyczny, w którym autor omawia zagadnienia związane z metrologią czasu, optyczną pułapką dipolową, atomami w sieci optycznej oraz spektroskopią przejścia zegarowego. Łącznie z wyjaśnieniami autora zawartymi w rozdziałach doświadczalnych świadczy to o opanowaniu przez autora ogólnej wiedzy teoretycznej niezbędnej fizykowi doświadczalnemu w jego pracy.

Nie znalazłem w rozprawie Marcina Piotrowskiego żadnych poważnych błędów. Szczegółowe uwagi do maszynopisu, w tym zauważone drobne błędy, opisałem w dodatku do niniejszej recenzji. Teraz chciałbym zwrócić uwagę na jedno potknięcie, które uważam za szczególnie niezręczne dlatego, że w tym roku obchodzimy stulecie sformułowania Ogólnej Teorii Względności. Na stronie 32 rozprawy autor pisze: „Zgodnie z ogólną teorią względności [24] dwa zegary umieszczone na różnych wysokościach nad powierzchnią Zie-

mi...". Spójrzmy teraz do bibliografii, praca cytowana [24] to „O elektrodynamice ciał w ruchu” z roku 1905, która ma nie 100, lecz 110 lat. Mam nadzieję, że podczas obrony pracy doktorant przekona nas, że zajrzał do słynnej pracy [24] i że odróżnia Szczególną Teorię Względności od Ogólnej Teorii Względności.

Podsumowując, uważam, że rozprawa doktorska Marcina Piotrowskiego świadczy jego wysokich umiejętnościach w dziedzinie fizyki doświadczalnej i wskazuje na gotowość autora do podjęcia samodzielnej pracy naukowej. Praca ta z powodzeniem spełnia ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

Dodatek. Uwagi szczegółowe do maszynopisu pracy

Strona 25. We wzorze (1.16) symbol Ω_R prawdopodobnie ma oznaczać częstość kołową, zgodnie z ogólnie przyjętą symboliką. Jeżeli tak, to po lewej stronie równości powinno się znaleźć nie Ω_R , lecz $\frac{\Omega_R}{2\pi}$ – alternatywnie można by zmienić definicję stałej ξ po prawej stronie, by nie była określona w hercach.

Strona 26. W drugim wierszu od góry we wzorze brakuje stałych, powinno być $I = \frac{1}{2} c \epsilon_0 |\mathbf{E}|^2$.

Strona 28. Rysunek 1.3. jest niejasny. Co oznaczają pionowe i poziome strzałki? Czy obrazują amplitudę ruchu, czy częstość? Czy ich długość ma znaczenie? Czy któreś spośród częstości ω_{jr} i ω_{jz} są równe? Proponuję, by podczas obrony doktorant przedstawił ulepszoną wersję tego diagramu. Może by warto zrobić konturowy (poziomicowy) wykres potencjału pułapki dla jednej oraz dwóch wiązek gaussowskich?

Strona 32. Zły odnośnik do literatury [24] – omówione w pierwszej części recenzji.

Strona 42. W piątym wierszu od dołu powinno być „w załączniku A.6”, a w trzecim wierszu od dołu „w załączniku A.5”. Błąd ten wynika z pomylenia numeracji rysunków z numeracją załączników, co z kolei jest konsekwencją przyjęcia niefortunnego sposobu numeracji rysunków w załącznikach. Prawidłowo rysunki w załączniku A.5. powinny być numerowane A.5.1, A.5.2, itd.

Strona 43. W opisie wygrzewania brakuje mi informacji, jak mierzono temperaturę wygrzewania i czy temperatura w obszarze wysokopróżniowym była wszędzie podobna.

Strona 48. W podrozdziale 2.1.10. autor rozprawy stwierdza, że praca sublimacyjnej pompy tytanowej „nie przynosiła znaczącego obniżenia ciśnienia, w wręcz zdawała się na jakiś czas pogarszać próżnię”. Nie ma nic dziw-

nego w tym, że pompa sublimacyjna po włączeniu pogarsza próżnię. Często jest tak, że aby uzyskać dobrą próżnię, tytan należy rozpylać przez kilka dni przed planowanym doświadczeniem, a w dniu pomiarów nie należy pompy sublimacyjnej w ogóle włączać! Dlatego być może wniosek o konieczności wymiany tej pompy był pochopny. Warto w przyszłości częściej konsultować się z kolegami z Zakładu Fizyki Nanostruktur w razie kłopotów z „hodowaniem próżni”.

Strona 74. Podrozdział „Symulacje pola od magnesów stałych” wygląda na dopisany w ostatniej chwili. Zawarte w nim informacje powinny moim zdaniem zostać wkomponowane we wcześniejsze partie tekstu.

Strona 96. Opis osi pionowej wykresu brzmi „dokładność zegara” i prowadzi do paradoksalnego wniosku, że z biegiem czasu fizycy konstruują zegary o coraz mniejszej dokładności. Powinno być np. „niepewność wskazań zegara” (clock uncertainty). Opisana niezręczność została bezkrytycznie przeniesiona z popularnonaukowego anglojęzycznego źródła [109].

Strona 102. „Limit Dopplera” nie brzmi dobrze. Lepsza by była „granica chłodzenia dopplera”, ew. „ograniczenie dopplera”.

Strona 120. „Wzorzec rubidowy dyscyplinowany GPSem” – ta kalka językowa z angielskiego „GPS-disciplined” nie brzmi dobrze po polsku. Zamiast „dyscyplinowany” proponuję „synchronizowany” (na wzór określenia niemieckojęzycznego), lub pełniejsze „synchronizowany z czasem UTC za pomocą GPS”.

Strona 123. Rysunek 4.22. wykazuje bliskie pokrewieństwo z rysunkiem 7. w pracy [135], więc może należałoby się powołać na tę pracę w podpisie rysunku, chyba że autorem obydwu rysunków jest Marcin Piotrowski (czy tak jest?).

Strona 151. W tej obszernej bibliografii bardzo mi się podoba pomysł, by podawać tytuły cytowanych prac – to duże ułatwienie dla czytelnika rozprawy.

Ponadto praca zawiera sporadyczne pomyłki literowe, słowne, językowe oraz dotyczące redakcji technicznej tekstu. Zazaczyłem je w maszynopisie recenzenta – wypisanie ich tutaj nikomu by się chyba nie przydało.

Andrzej Szczepkiewicz

