



dr hab. Michał Zawada

Toruń, 23 listopada 2015

KL FAMO, Instytut Fizyki Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgra Artura Stabrawy

p.t. „Nieliniowe zjawiska optyczne w ultra-zimnych atomach rubidu”

Praca doktorska mgra Artura Stabrawy została wykonana w Zakładzie Fotoniki Instytutu Fizyki UJ pod kierunkiem prof. Jerzego Zachorowskiego. Zostały w niej przedstawione wyniki prac doświadczalnych nad elektromagnetycznie indukowaną przezroczystością w parach atomów rubidu zarówno w temperaturze pokojowej, jak i w chmurze atomów zimnych, o temperaturze rzędu mikrokelwinów. Dodatkowo zostały w niej przedstawione pomiary podstawowych parametrów nowo zbudowanych pułapek dla zimnych atomów: magneto-optycznej i dipolowej optycznej. O ile to drugie zagadnienie jest badaniem diagnostycznym, pozwalającym osiągnąć kontrolę nad wyrafinowanym układem doświadczalnym, ale używającym dobrze znanych i opisanych literaturze technik, to pierwsze jest sporym wyzwaniem doświadczalnym. Niewątpliwie pomocnym w osiągnięciu założonych przez doktoranta celów było olbrzymie doświadczenie grupy doświadczalnej Zakładu Fotoniki w badaniu optyki nieliniowej w zimnych atomach, mające początki jeszcze w pracach prowadzonych w poprzednim stuleciu.

Praca doktorska liczy 143 stron, składa się sześciorozdziałów, z czego rozdział pierwszy jest wstępem, a szósty zakończeniem. Bibliografia zawiera 92 pozycje. We wstępie autor określa, jaki zakres zadań przedstawionych w dysertacji jest jego autorskim wkładem.

Rozdział drugi przedstawionej pracy doktorskiej opisuje techniki potrzebne do schłodzenia i utrzymania atomów siłami magneto-optycznymi oraz czysto optycznymi, oraz wprowadza dwie techniki detekcji zimnych atomów: obrazowanie fluorescencyjne i obrazowanie absorpcyjne.

KRAJOWE LABORATORIUM FIZYKI ATOMOWEJ, MOLEKULARNEJ I OPTYCZNEJ



KRAJOWE LABORATORIUM FIZYKI ATOMOWEJ, MOLEKULARNEJ I OPTYCZNEJ

W rozdziale trzecim autor zdefiniował i opisał zjawiska, które będzie badał i podał teoretyczne podstawy ich opisu. W szczególności przedstawił opis zjawiska elektromagnetycznie indukowanej przezroczystości, stosując równania ewolucji w polu elektromagnetycznym nieoddziałujących ze sobą atomów w formalizmie macierzy gęstości.

Rozdział czwarty poświęcony jest konstrukcji i optymalizacji układu doświadczalnego użytego przez autora do pomiarów elektromagnetycznie indukowanej przezroczystości, a w przyszłości także do uzyskania kondensatu Bosego-Einsteina w dipolowej pułapce optycznej. W rozdziale tym widać ogrom pracy, jaki musiał być poświęcony wytworzeniu aparatury niezbędnej do przeprowadzenia przez autora zaplanowanych badań. W rozdziale opisany jest kolejno układ próżniowy, układ wytwarzający pole magnetyczne, układ laserowy, układ obrazowania i sterowanie eksperymentem. Duży nacisk jest położony na kontrolę pola magnetycznego w eksperymencie, optymalizację takich parametrów pułapek, jak czas życia atomów i kształt potencjału, oraz na projekt układu obrazującego. W rozdziale 4.2 widać troskę o brak indukowanych niechcianych pól magnetycznych, z jaką autor projektował układ magnetyczny. Zastanawia mnie, czy autor oszacował wkład od samoindukcji w cewkach kompensujących nałożonych bezpośrednio na komórkę roboczą. Takie same cewki w układzie w KL FAMO okazały się poważną przeszkodą techniczną w osiągnięciu kondensatu Bosego-Einsteina i musiały być usunięte. W kilku miejscach rozdziału 4 autor pisze, że zmniejszenie rozmiarów wiązek, jak rozumiem przy tej samej całkowitej mocy, pogarsza czas życia pułapki magneto-optycznej. To bardzo ciekawa obserwacja i dla wymiaru dydaktycznego pracy byłoby wskazane, żeby autor spróbował sformułować hipotezę wyjaśniającą ten efekt.

Rozdział piąty przedstawia przede wszystkim wyniki pomiarów zjawiska elektromagnetycznie indukowanej przezroczystości. Rozdział rozpoczyna opis wyników pomiarów zjawiska w układach typu Λ i V w liniach D_1 i D_2 oraz w kaskadzie $5S_{1/2} - 5P_{3/2} - 5D$ w izotopie rubidu ^{85}Rb w temperaturze pokojowej. W przypadku układu typu Λ oraz kaskady zmierzono także zależność przesunięcia składowych widma elektromagnetycznie indukowanej przezroczystości od zewnętrznego pola magnetycznego. W drugiej części rozdziału autor przedstawia zbadane przez siebie w różnych konfiguracjach widma elektromagnetycznie indukowanej przezroczystości w zimnych atomach utrzymywanych w pułapce magneto-optycznej dla obu naturalnie występujących izotopów rubidu ^{85}Rb i ^{87}Rb . Oprócz systematycznego przeglądu zależności widm od mocy i częstotliwości wiązki sprzęgającej, najważniejszym chyba wynikiem tej części jest wytypowanie przejścia $5S_{1/2} - 5P_{3/2} - 5D_{5/2}$ w izotopie ^{87}Rb jako najbardziej odpowiedniego do dalszych badań w optycznej

KRAJOWE LABORATORIUM FIZYKI ATOMOWEJ, MOLEKULARNEJ I OPTYCZNEJ

INSTYTUT FIZYKI UMK
ADRES: ul. Grudziądzka 5/7
87-100 Toruń

TELEFON: (56) 611 3333 FAX: (56) 622 5397
E-MAIL: famo@fizyka.umk.pl
STRONA WWW: <http://famo.fizyka.umk.pl>



pułapce dipolowej. W dalszej części rozdziału przedstawione są wyniki podstawowej diagnostyki pułapek magnetoptycznej i dipolowej, takich jak liczba i temperatura atomów oraz częstotliwości pułapki. Autor znajduje najkorzystniejsze warunki do pomiaru widma elektromagnetycznie indukowanej przezroczystości w atomach utrzymywanych w optycznej pułapce dipolowej, a następnie ten pomiar przeprowadza. W rozdziale 5.2.1 autor przedstawia też pomiary, z których wynika, że zmierzone odstrojenie wiązek pułapkujących jest o 300 kHz różne od zamierzonego. Z jednej strony wydaje się to bardzo mało, ale z opisu aparatury eksperymentalnej wynika, że w układzie są używane cyfrowe syntetyzery DDS, których niepewność normalnie oscyluje w granicach 1 Hz. Być może jest to jakiś ciekawy efekt, któremu należałoby się bliżej przyglądać.

Przedstawiona do oceny praca jest bardzo dobrze napisana i zredagowana. Nie znalazłem w niej żadnych poważnych błędów. Niemniej jednak z obowiązku recenzenta muszę wymienić kilka niedociągnięć, które zauważyłem.

- Słowa „ultrazimne”, „ultraniskie” oraz „ultrawysoka” piszemy razem. W języku polskim wszystkie przedrostki piszemy łącznie z wyrazami pospolitymi. Tak jak np. w wyrazach ultrafioletowy czy ultrakrótki.
- W rozdziale drugim opisana jest technika chłodzenia Syzyfa. Muszę przyznać, że nie widziałem jeszcze układu eksperymentalnego, w którym byłaby ta technika użyta, a to dlatego, że wymaga ona użycia wiązek o polaryzacjach liniowych. Tymczasem zarówno w pułapce magneto-optycznej, jak i w melasie optycznej używa się wiązek spolaryzowanych kołowo. W przypadku dwóch przeciwbieżnych, spolaryzowanych kołowo wiązek z różnymi polaryzacjami kołowymi, wektor polaryzacji obraca się przy ruchu wzdłuż fali stojącej, ale eliptyczność jest stała. Chłodzenie gradientem polaryzacji, które występuje w układzie eksperymentalnym autora ma nieco odmienny mechanizm, niż opisane w pracy proste chłodzenie Syzyfa.
- Do wyznaczenia przesunięć energetycznych linii D_2 w atomach ^{87}Rb spowodowanych dynamicznym efektem Starka uwzględniono po 10 najsilniejszych przejść z dolnego i górnego poziomu. W pracy brakuje mi kryterium, dlaczego wybrano 10, a nie 9 lub 11.
- W rozdziale 3.1 pojawia się bardzo dużo oznaczeń albo niezdefiniowanych w tekście, albo zdefiniowanych niejawnie, takich jak: a_i , ω_i , ω_1 , ω_2 , ω_{31} , ω_{32} , ω_{21} . Cały ten



podrozdział, ważny dla dalszej części pracy, jest moim zdaniem napisany zbyt skrótowo i z dużą korzyścią dla pracy można by go rozszerzyć kosztem np. rozdziału o nieliniowym efekcie Faradaya, jako że efekt ten nie jest w prezentowanej pracy mierzony.

- W rozdziale 3.4 autor pisze, porównując do siebie rozmiary frakcji kondensatu i chmury termicznej w pułapce: „Należy zauważyć, że stosunek R_i/a_i , jest znacznie większy od 1”. Autor powinien przedstawić proste oszacowanie dla typowych warunków doświadczalnych na potwierdzenie tej tezy.
- W rozdziałach 2 i 3 sporo miejsca jest poświęcone technikom wytwarzania oraz teorii opisującej kondensat Bosego-Einsteina, mimo że żaden pomiar nie został w tych warunkach wykonany. Domyślam się, że przyczyną tego jest duży wkład autora w budowę układu doświadczalnego mającego zrealizować interesujący eksperyment opisany w rozdziale 3.6, a mianowicie pomiar przesunięcia rezonansu elektromagnetycznie indukowanej przezroczystości spowodowanego oddziaływaniami międzyatomowymi w kondensacie Bosego-Einsteina wzmocnionego poprzez sterowanie stałą rozpraszania przy użyciu rezonansu Feshbacha. W oczywisty sposób oddziaływania międzyatomowe istnieją także w materii niezdegenerowanej i bardzo ciekawym jest pytanie, czy można manipulować rezonansami elektromagnetycznie indukowanej przezroczystości przy użyciu rezonansu Feshbacha w chmurze zimnych atomów o gęstościach i temperaturze osiągalnych w eksperymencie autora.
- Pomiar elektromagnetycznie indukowanej przezroczystości przedstawione w rozdziale 5 miałyby dużo większą wartość, gdyby były porównane z przewidywaniami teoretycznymi wykonanymi na podstawie wyprowadzeń przedstawionych w rozdziale 3. Jedyne przewidywania teoretyczne umieszczone w pracy to przesunięcie poziomów pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego, niestety po szczegóły obliczeń autor odsyła nas do zewnętrznej referencji. Podobnie przy opisie wykonanych pomiarów elektromagnetycznie indukowanej przezroczystości w pułapce magnetoptycznej po dokładniejszy opis teoretyczny badanych zjawisk autor odsyła czytelnika do zewnętrznej referencji.
- Rozdział 5.3.1 jest zatytułowany „Pomiar liczby i temperatury atomów”, niestety w rozdziale znalazłem tylko wynik pomiaru liczby atomów.



KRAJOWE LABORATORIUM
FIZYKI ATOMOWEJ, MOLEKULARNEJ I OPTYCZNEJ

- W rozdziale 5.3.2 autor w opisie spektroskopii optycznej pułapki dipolowej w funkcji mocy wiązki dipolowej tłumaczy kształt i występowanie opóźnień w widmie zastosowaniem elektroniki filtrującej szybko zmienne sygnały. Czy nie można by albo wykonywać wolniejszych, a węższych skanów, albo wręcz wykonać tę spektroskopię punkt po punkcie, tak jak autor robi w przypadku pomiarów rezonansu parametrycznego?
- Na dużej liczbie wykresów punktowych zawartych w pracy brakuje mi słupków niepewności. Jeżeli były małe w porównaniu do skali rysunku, powinno być to opisane. Tak samo brakuje mi niepewności w wielu wynikach pomiarowych zawartych w tekście, co np. utrudnia ocenę, czy opisana w tekście zgodność pomiarów przewężenia wiązki pułapki dipolowej $\pm 10 \mu\text{m}$ mieści się w granicach niepewności pomiarowych, czy też nie.

Podsumowując, mimo pewnych uwag krytycznych, uważam, że wyniki przedstawione w pracy są rzetelnym i dobrze napisanym raportem z wykonanych badań. Te badania będą kontynuowane w przyszłości po otrzymaniu w Zakładzie Fotoniki kondensatu Bosego-Einsteina. Należy również docenić olbrzymi wkład pracy wykonany przez autora zarówno w projekt i budowę układu eksperymentalnego, jak i w pomiary na nim wykonane. Przedstawione w rozprawie oryginalne wyniki eksperymentalne spełniają wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie mgra Artura Stabrawy do publicznej obrony jego rozprawy.

KRAJOWE LABORATORIUM FIZYKI ATOMOWEJ, MOLEKULARNEJ I OPTYCZNEJ

INSTYTUT FIZYKI UMK
ADRES: ul. Grudziądzka 5/7
87-100 Toruń

TELEFON: (56) 611 3333 FAX: (56) 622 5397
E-MAIL: famo@fizyka.umk.pl
STRONA WWW: <http://famo.fizyka.umk.pl>