

Dr hab. Małgorzata Głódź, prof. nzw. IF PAN
 Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk, ON 2.2
 Al. Lotników 32/46
 02-668 Warszawa

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Artura Stabrawy pt.
 „Nieliniowe zjawiska optyczne w ultra-zimnych atomach rubidu”**

Praca doktorska została wykonana na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki
 Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego, w Instytucie Fizyki.

Opiekun pracy: prof. dr hab. Jerzy Zachorowski.

Praca doktorska mgr. Artura Stabrawy obejmowała dwa zadania:

- (I) Pierwszym z nich było skonstruowanie (ściślej: współ-skonstruowanie) nowoczesnej złożonej aparatury pomiarowej z - omawianymi w dalszym tekście - atomowymi pułapkami różnych rodzajów. Aparatura musi osiągać wyrafinowane parametry pozwalające na przeprowadzanie planowanych w laboratorium badań w zakresie nieliniowych zjawisk optycznych i magnetoptycznych obserwowanych w próbkach ultra-zimnych atomów o różnym stopniu schłodzenia aż do temperatur o wartościach bliskich wymaganym przy przejściu fazowym do stanu kondensatu Bosego-Einsteina. Z zadaniem uruchomienia układu wiązało się też zaprojektowanie i wykonanie różnych pomiarów „diagnostycznych” określających jego parametry, także dla oceny możliwości wytworzenia w nim wspomnianego kondensatu. Pomiaru tego rodzaju, a także te zasadnicze – zakwalifikowane przeze mnie niżej jako Zadanie (II) doktoratu - wymagały automatycznego sterowania w oparciu o zaadaptowany istniejący software i odpowiedni hardware.
- (II) Drugie zadanie tego doktoratu miało charakter ściśle badawczy, ale nazwałabym go też przygotowawczym lub pilotażowym. Przy użyciu skonstruowanego układu należało przeprowadzić i zinterpretować dużą liczbę doświadczeń z gatunku szeroko rozumianej spektroskopii i optyki kwantowej. Głównie dotyczyły one modyfikacji widm transmisji słabej wiązki próbującej której przyczyną jest koherentne zjawisko elektromagnetycznie wymuszonej przezroczystości (EIT od ang. *Electromagnetically Induced Transparency*). Nie wchodząc w szczegóły, dla atomu trójpoziomowego zjawisko to można obserwować, gdy zostaje on poddany działaniu drugiej, znacznie silniejszej niż próbująca, rezonansowej (na ogół) wiązki sprzęgającej. Przejścia próbująca i sprzęgająca muszą mieć przy tym jeden wspólny stan. Materiałem badawczym były zimne atomy obu naturalnie występujących izotopów rubidu: ^{85}Rb i ^{87}Rb , a także, porównawczo, atomy „ciepłe”, to jest atomy w komórkach spektralnych w warunkach zderzeń termicznych w temperaturze pokojowej. Doświadczenia miały testować możliwości skonstruowanego układu doświadczalnego pod względem uzyskiwania widm EIT przez atomy w kolejnych etapach chłodzenia, a zwłaszcza wskazać które (quasi-) trójpoziomowe konfiguracje wiązki-poziomy oraz jakie warunki doświadczalne byłyby najkorzystniejsze z punktu widzenia dalszych zamierzeń badawczych

grupy. Zadanie to zakładało więc przeprowadzenie i zinterpretowanie znacznej liczby pomiarów widm EIT. Między innymi przedmiotem zainteresowania był również wpływ na widma EIT silnego pola magnetycznego w reżimie występowania efektu Backa-Goudsmita.

Pod koniec recenzji przedstawię moją ocenę realizacji zadań (I) i (II) odnosząc się też do szczegółów redakcyjnych rozprawy.

Ogólnie rozprawa ma konstrukcję prawidłową. Rozprawa liczy 143 strony i składa się z sześciu rozdziałów, z tym dwa - pierwszy („Wstęp”) i ostatni („Podsumowanie i dalsze plany”) - są krótkie, 2-3 stronnicowe. Rozprawę zamykają dwa Dodatki A i B i Bibliografia.

Poniżej będę analizować treść rozprawy, zasadniczo w kolejności jej rozdziałów, ale także niekiedy łamiąc taką kolejność.

Ad Rozdział 1 „Wstęp”

Po uwagach historycznych obejmujących takie kluczowe dla nauki odkrycia jak: uruchomienie pierwszego lasera, uzyskania zimnej materii i kondensatu Bosego-Einsteina, doktorant przedstawia krótki opis swoich osiągnięć, przy czym nawiązuje do wieloletniej tradycji i sukcesów badawczych Zakładu Fotoniki UJ i Krajowego Laboratorium FAMO w Toruniu.

Mgr Stabrawa przedstawia też strategię konstruowania układu badawczego, który był wykonywany przez dwóch doktorantów, i miał służyć dwóm różnym celom badawczym. Cel badawczy pracy doktorskiej Pana Stabrawy naszkicowałam powyżej w opisie jego zadania (II) dotyczącego zjawiska EIT. Cel badań Marcina Piotrowskiego, który był tym drugim ówczesnym doktorantem partycypującym w konstruowaniu układu (i który po uruchomieniu współdzielił z Panem Stabrawą jego wykorzystanie) był inny - dotyczył nieliniowego efektu Faradaya (NFE od ang. *Nonlinear Faraday Effect*). Aby sprostać tym różniącym się wyzwaniom, każdy z konstruktorów wyposażał układ w urządzenia i udoskonalenia służące eksperymentom swojej pracy doktorskiej.

Oceniam tę strategię jako niezwykle trafną. Uważam, że w dobie coraz większej złożoności unikalnych układów pomiarowych, których powstanie wymaga wiedzy i twórczego wkładu fizyka, jest nie tylko dopuszczalne, ale w najwyższym stopniu wskazane, aby układy pomiarowe były dziełem więcej niż jednego doktoranta, a istotny wkład każdego z nich był doceniany jako ważna część jego pracy doktorskiej.

Mgr Stabrawa w różnych miejscach rozprawy wyraźnie określa i opisuje zakres swojego udziału i swoich osiągnięć. Dotyczy to nie tylko współdziałania z Marcinem Piotrowskim, ale także z innymi współpracującymi z nim kolegami.

Ad Rozdział 2 „Chłodzenie i pułapkowanie atomów siłami optycznymi”

W rozdziale tym znajdujemy informacje o chłodzeniu atomów, zwłaszcza metodami zastosowanymi w skonstruowanym układzie, które to metody stosowane sekwencyjnie powinny doprowadzić do otrzymania (w tym przypadku spinorowego) kondensatu Bosego-Einsteina

Doktorant szkicuje najpierw zasadę działania pułapki magnetooptrycznej (MOT od ang. *Magneto-Optical Trap*) i chłodzenia Syzyfa. W pułapce MOT nie można zejść z temperaturą chłodzenia poniżej tzw. limitu Dopplerowskiego. Chłodzenie Syzyfa obniża temperaturę dalej do temperatury odrzutu (odrzut po absorpcji fotonu). Chłodzenie i pułapkowanie poniżej tego limitu musi odbywać się

metodami nieopartymi na absorpcji fotonów. Doktorant omawia zastosowaną w tym układzie pułapkę dipolową, w której wykorzystywany jest wyindukowany silnym światłem moment dipolowy atomu i zasady dalszego chłodzenia przez tzw. „odparowanie”. Podrozdział o sieciach optycznych wydaje mi się zbędny dla całości rozprawy, inaczej niż następujące po nim przydatne kolejne podrozdziały o zasadach obrazowania zimnych atomów.

Ad Rozdział 3 „Nieliniowe zjawiska optyczne i kondensat Bosego-Einsteina”

Moje komentarze poświęcę tu przede wszystkim zjawisku EIT, które było głównym przedmiotem badawczym zadania (II).

Autor przedstawia teoretyczne podstawy zjawiska elektromagnetycznie wymuszonej przezroczystości w układzie trójpoziomowym w oparciu o formalizm optycznych równań Blocha, rozwiązywanych dla stanu stacjonarnego przy założeniu fali rotującej.

Brakuje mi komentarza, w którym autor dodałby wyjaśnienia jak model ten przystaje do realiów jego doświadczeń, w których badane są atomy dwóch izotopów rubidu charakteryzujące się złożoną strukturą stanów, i za pomocą spolaryzowanego światła laserów. Wprawdzie zadaniem autora było uzyskanie dużej liczby widm EIT dla różnych przypadków i ich ogólne scharakteryzowanie, a nie dogłębne teoretyczne opracowanie każdego z nich, to jednak wydaje mi się, że przynajmniej dla niektórych przypadków przydałaby się analiza czy i jak problem wielopoziomowości, lub ściślej wielostanowości atomów może się odbić, lub nie, na kształcie otrzymywanych widm. Wielostanowość może się objawić co najmniej z dwóch powodów.

Po pierwsze, ze względu na gęste (naogół) multiplety nadsubtelne stanów F w rubidzie przy odpowiednio silnym sprzężeniu (tj odpowiednio dużej wartości częstości Rabięgo dla przejścia sprzęganego) sprzężenie obejmuje często nie tylko adresowany przez nas stan sprzęgany, ale i stany z jego sąsiedztwa, których udziału nie można wtedy zaniedbać. (Pewne tego objawy, jak asymetria „ramion” rezonansu EIT mogą być widoczne przy sprzężeniu, które nie wydaje się być szczególnie silne). W przypadku gdy daną wiązką sprzęgane jest więcej stanów niż jeden stan dolny z jednym stanem górnym tego sprzężenia, i już tylko z tego powodu, pozornie trójstanową konfigurację EIT należy rozpatrywać jako wielostanową. [np.: V. Bharti i A. Vasan, J. Phys. B **45** (2012) 185501 (dla zimnych atomów Fig 2)]. Oczywiście może wystąpić wtedy problem do ilu stanów i których wystarczy się ograniczyć. [A. Żaba i inni, Proc. SPIE, Bellingham, Volume **8770**, 87700Q (2013) (Fig. 2, zwł.dla $\Delta_c=0$ i 63 MHz)].

Po drugie, nawet, jeśli wybraliśmy stany nLJ o odpowiednio „luźnych” strukturach poziomów nadsubtelnych (np. dla konfiguracji Λ dla rubidu - stany generujące przejścia D1), żeby można było łatwo uzasadnić przybliżenie trójpoziomowości ze względu na trzy wybrane stany $nLJ(F)$, to i tak trzeba wziąć pod uwagę, że przejścia zachodzą między odpowiednimi stanami $nLJ(Fm_F)$, zdegenerowanych multipletów magnetycznych i profil widma EIT może się różnić od oczekiwanego dla konfiguracji trójpoziomowej. [np. S.J. Park i inni, Jpn. J. Appl. Phys. **43** (2004) 7273; Yun-Wen Chen i inni, J. Opt. Soc. Am. B **19** (2002) 1917]. Przy innych ustalonych parametrach doświadczenia, różnica ta zależy od polaryzacji wiązek laserowych próbkującej i sprzęgającej i od kąta między nimi. Trzeba nadmienić, że doktorant oczywiście pamięta o stanach magnetycznych (tym razem niezdegenerowanych), czego dowodzą opisy i interpretacje badań zależności widm EIT od silnego pola

magnetycznego w Rozdziale 5. Brak mi jednak komentarza w rozprawie odnośnie ew. wpływu przejść między niezdegenerowanymi stanami magnetycznymi $nLJ(Fm_F)$ w realiach doświadczeń nad zjawiskiem EIT w doktoracie. Rozumiem, przy tym, że poza fragmentem poświęconym badaniom z silnym polem magnetycznym, doktorant robi milczące założenie, że pomiary EIT odbywają się w zerowym polu magnetycznym.

„Zadanie” dla doktoranta. Nawiązując do drugiego przejawu wielopoziomowości chciałabym, aby doktorant w czasie obrony pracy doktorskiej narysował (w konwencji schematów w artykułach cytowanych w ostatnim akapicie Str. 3 recenzji) i omówił przykładowy prosty do wyjaśnienia schemat typu Λ z uwzględnieniem stanów m_F i przejść między tymi stanami, na którym naocznie widać, jakiej modyfikacji profilu EIT można jakościowo oczekiwać w porównaniu z profilem tego zjawiska w „podstawowym” (trójpoziomowym) schemacie Λ . **Założenia:** (i) Rozpatrujemy atomy ^{87}Rb ochłodzone w pułapce MOT i wypuszczone z niej przez wyłączenie wiązek chłodzących i repompujących oraz pułapującego pola magnetycznego (inne pola magnetyczne są skompensowane). (ii) Stany schematu Λ dla stanów nadsubtelnych: dwie składowe stanu podstawowego, tj. $5S_{1/2} (F=1 \text{ i } F=2)$, i składowa stanu wzbudzonego $5P_{1/2} (F=2)$. (iii) Wiązki laserowe schematu Λ : równoległe, spolaryzowane liniowo, o wektorach E prostopadłych. Wiązka sprzęgająca ze stanu $F=2$.

Z problemem wielopoziomowości, ale jeszcze w trochę w innym sensie, wiąże się problematyczna trójpoziomowość schematu (schematów) $5S-5P-5D$. *De facto* jest to układ otwarty gdyż w „bocznych” gałęziach rozpadu promienistego stanu $5D$ są także stany: $6P$, zaznaczony w Rozprawie na niektórych rysunkach-schematach, i, chyba nigdzie nie zaznaczony, stan $4D$. Może warto było gdzieś w rozprawie o tym przynajmniej nadmienić i ewentualnie przedyskutować dla potrzeb przyszłych badań EIT na tym układzie. Zgodziłabym się jednak z argumentacją, że jest to temat, który przy dużej ogólności zadania II wykracza poza jego ramy.

Natomiast innym problemem, o którym warto było wyraźnie zaznaczyć, gdy mówimy o zjawisku EIT, jest współistnienie tego zjawiska z efektem rozszczepienia Autlera-Townesa [np. Yong-qing Li i Min Xiao, PRA **51** (1995) 1958; T. Y. Abi-Salloum, PRA **81** (2010) 053836; L. Giner i inni, PRA **87** (2013) 013823]. Trzeba przyznać, że inne „konkurencyjne” względem EIT zjawisko, jakim jest dwufotonowa absorpcja - której obecność jest obserwowana w widmach EIT w schodkowej konfiguracji poziomów - autor komentuje w rozprawie.

Na koniec widzę jeszcze jeden problem, powiedzmy definicyjny. Autor pisze w rozprawie o trzech rodzajach schematów dla realizacji wymuszonej przezroczystości, które bada w pracy doktorskiej: schemat typu Λ , typu V i schodkowy (ze sprzężeniem w górnym przejściu). Tymczasem w literaturze przedmiotu można napotkać wątpliwość, czy w schemacie V zjawisko EIT jest faktycznie realizowane [np. T. Y. Abi-Salloum, art. wyżej cytowany]. Przyjmuję jednak, że jest to temat także wykraczający poza ramy tej pracy doktorskiej.

W Rozdziale 3 autor pisze też krótko o nieliniowym efekcie Faradaya. Myślę, że nie było to konieczne, skoro ten efekt nie był przedmiotem badań jego pracy doktorskiej. Chociaż, z drugiej strony, wiąże się on z tą pracą o tyle, że konstruowany układ pomiarowy miał być wielozadaniowy - jak wyżej wspominałam miał służyć (i służył) także badaniom NFE przez innego doktoranta. Rzutowało to na wybór pewnych rozwiązań konstrukcyjnych (np. wprowadzenie antymagnetycznego ekranu), które musiały mieć charakter kompromisu.

Zdecydowanie na miejscu jest dość obszerny opis zasad kondensacji Bosego-Einsteina, oddziaływań atomów w kondensacie i wreszcie wpływu tych oddziaływań międzyatomowych na zjawisko EIT. Ten ostatni ambitny wątek ma być podjęty w Zakładzie Fotoniki po uzyskaniu kondensatu. Konkretnie chodzi o przewidywane, a dotąd nie zaobserwowane, drobne przesunięcie rezonansu EIT po przekroczeniu granicy kondensacji. Wytworzony układ, jest tak „ukierunkowany” aby mógł dostarczyć gęstą chmurę kondensatu Bosego-Einsteina, jaka jest potrzebna do takich badań. Na potrzeby tych badań są również zaprojektowane przez autora cewki magnetyczne, które służyłyby generacji rezonansów Feshbacha dla 87 Rb. Zresztą cała zasadnicza część zadania (II) dotycząca badań widm EIT jest ściśle związana z wymienionymi wyżej zamierzeniami Zakładu.

Ad Rozdział 4 „Układ doświadczalny”

Rozdział ten jest dość szczegółowym opisem imponującego układu doświadczalnego, który powstał jako realizacja zadania (I).

Chłodzenie i pułapkowanie odbywa się w dwóch szklanych komórkach zamontowanych w pionie jedna nad drugą i połączonych odpowiednim łącznikiem. Do górnej komórki, w której panuje gorsza próżnia (10^{-9} mbar) są dostarczane pary rubidu i w niej odbywa się wstępny proces chłodzenia realizowany w tzw. dwuwymiarowej pułapce magnetooptrycznej (2D-MOT – od ang. *2-Dimensional MOT*). Specjalny system pomp i odpowiedni profil wewnętrzny łącznika umożliwiają uzyskanie w dolnej komórce bardzo wysokiej próżni (10^{-11} mbar) drogą pompowania różnicowego.

2-D MOT zapewnia wychłodzenie chmury atomów tylko w dwóch wymiarach (w tym przypadku w poziomie), w pionie powstaje zatem strumień w taki sposób wychłodzonych atomów skierowany w kierunku otworu dolnej komórki. Atomy były dodatkowo przepychane odpowiednią wiązką światła. Wewnątrz dolnej komórki są one przechwytywane przez trójwymiarową pułapkę 3D-MOT (nazywaną dalej za autorem po prostu MOT, lub 3-D MOT w przypadku gdy potrzebne jest rozróżnienie między tymi dwoma pułapkami typu MOT stosowanymi w układzie). Zimne atomy przechodząc przez fazę melasy optycznej były przeładowywane do dipolowej pułapki optycznej ODT, od ang. *Optical Dipole Trap*, na przekroju silnej wiązki laserowej (lub dwóch skrzyżowanych wiązek) z obszarem melasy. Zabieg ten ma służyć dalszemu ochłodzeniu atomów, w perspektywie aż do granicy kondensacji Bosego-Einsteina, przez zastosowanie dodatkowego chłodzenia przez odparowanie.

Chcę już tu podkreślić, że na podstawie swoich testów układu mgr. Stabrawa stwierdził (o czym pisze w dalszej części rozprawy), że stopień schłodzenia atomów, jaki ostatecznie uzyskał pozwala mu przewidywać, że wspomniane ochłodzenie do granicy kondensacji powinno zostać osiągnięte w korzystnych bezzakłóceńowych warunkach pracy tego układu w nowej siedzibie laboratorium, dokąd układ został (zostanie?) przeniesiony.

Autor opisuje konstrukcje i parametry różnych elementów tego układu, zwłaszcza swój samodzielny wkład w ich powstanie. Omawia w tym rozdziale, i także w Rozdziale 5, wykonane przez siebie pomiary diagnostyczne i działania prowadzące do zoptymalizowania właściwości układu. Przedstawia wprowadzone udoskonalenia, na przykład: zmiany dokonane w systemie pomp w celu wydłużenia czasu życia atomów w pułapce MOT, skonstruowanie ekranu magnetycznego skutecznie izolującego MOT od zewnętrznych pól magnetycznych, poprawę jakości systemu chłodzenia atomów w MOT przez zastąpienie tradycyjnego układu trzech zawracających wiązek sześcioma wprowadzanymi przez kolimatory światłowodowe oddzielnie w każde z sześciu ramion układu

chłodzenia. Specjalna uwaga skierowana była na dobór właściwych laserów i ich torów optycznych. Zwłaszcza odnośnie laserów dużej mocy stosowanych w pułapce optycznej szczegółowo opisane są wprowadzane kolejne zmiany, ich potrzeba oraz skuteczność. Z dużą starannością został też wykonany optyczny system obrazowania atomów w pułapce ODT, przystosowany do warunków geometrii całości układu.

Autor przedstawia też pokrótce system automatycznego sterowania układem oraz pokazuje wykresy sekwencji czasowych automatycznego włączania i wyłączenia elementów układu i dyskutuje osiągnięte czasy tych włączeń/wyłączeń ze względu na potrzeby eksperymentów. Ocenia je, jako satysfakcjonujące.

Ad Rozdział 5 „Wyniki badań”

Rozdział ten jest przede wszystkim relacją doktoranta z realizacji Zadania (II) – por. Str. 1 recenzji. Przypominam, że zadaniem tym było badanie widm elektromagnetycznie wymuszonej przezroczystości w zimnych atomach rubidu w różnych sytuacjach doświadczalnych w wytworzonym układzie. Przed tą zasadniczą relacją Pan Stabrawa przedstawia wynik badania widm EIT dla atomów w komórkach spektralnych w temperaturze pokojowej. Zarejestrowane widma można traktować jako porównawcze w stosunku do widm EIT dla przypadku zimnych atomów, na zasadzie kontrastu lub podobieństw. Pan Stabrawa w dalszych częściach pracy nawiązuje do tych wyników.

Badania widm w komórce były przeprowadzone dla wszystkich trzech podstawowych konfiguracji EIT w odniesieniu do trójpoziomowych modeli atomów, czyli do konfiguracji Λ , V i schodkowej, o ile w przypadku konfiguracji V w ogóle zachodzi zjawisko EIT (por. moja uwaga na ten temat na Str. 4.). Konfiguracja schodkowa dotyczyła wybranych przejść w schemacie stanów 5S-5P-5D, przy sprzężeniu w górnym przejściu. Konfiguracje Λ i V były realizowane dla wybranych przejść linii D1 i/lub D2. Rejestrowane były widma EIT dla obu izotopów Rb.

Dla atomów w komórce doktorant śledził także (dla konfiguracji Λ dla przejść linii D1 izotopu ^{85}Rb) przesunięcia rezonansów EIT od pola magnetycznego z konkluzją, że już w polach ok. 1 kGs osiągnany jest reżim Backa-Goudsmita. Podobne doświadczenia w polu magnetycznym przeprowadzał też autor dla schematów kaskadowych. Tego rodzaju doświadczenia dostarczały danych dla przyszłych prac z ew. wykorzystaniem rezonansów Feshbacha do kondensacji.

Badania EIT w zimnych atomach zostały przeprowadzone zarówno (i) w pułapce MOT (3D-MOT), jaki i (ii) w pułapce dipolowej. Jak wnioskuję pośrednio i/lub bezpośrednio z opisów w rozprawie, wiązki próbkująca i sprzęgająca były wprowadzane do pułapki MOT kolinearnie, zarazem tak aby były kolinearne względem biegu wiązki pułapki dipolowej, która była uruchamiana w przypadku eksperymentów (ii).

Przed rozpoczęciem badań EIT w pułapce MOT autor pokazuje wpływ stopniowego zwiększania/zmniejszania natężenia wiązek pułapkujących-chłodzących pułapki MOT, na widma absorpcyjne przejść D1 i D2 atomów rubidu i stabilność układu. Komentuje także wpływ obecności wiązek repompujących i przepychającej. Konkluduje, że trzeba było zoptymalizować parametry wszystkich pól uczestniczących w chłodzeniu-pułapkowaniu (w tym także gradientu pola B), aby zminimalizować ich wpływ na widma EIT przy zachowaniu stabilności pułapkowania, i podaje jaki zestaw parametrów wiązek laserów układu dobrał. Niestety jeśli chodzi o wiązki laserów

sprzęgającego i próbkującego, to tu, i dalej w pracy, podawana jest tylko całkowita moc lasera sprzęgającego, a nawet tylko zakres stosowanych wartości mocy wiązki próbkującej, i ogólnie stosowany zakres promieni przewężenia. Czytelnik nie może więc z tych danych oszacować (zależnych od natężenia) wartości częstości Rabiego dla przejść w konkretnych doświadczeniach.

Autor informuje, że priorytetem było osiągnięcie „optymalnego stosunku sygnału do szumu” dla rejestrowanych widm EIT, i w tym celu np. wiązka sprzęgająca bywała różnie ogniskowana. Wiazka próbkująca była ogniskowana „podobnie jak wiązką sprzęgającą” – co notabene nie jest zbyt precyzyjnym określeniem - a jej moc też zmieniano. Trudno mieć jednak do autora pretensję o niezbyt precyzyjne charakteryzacje, skoro, jak było to już podkreślane, doświadczenia miały głównie testować możliwości uzyskiwania widm EIT w tym układzie pomiarowym.

Do badań widm EIT otrzymywanych w zimnych atomach w pułapce MOT autor wybrał konfigurację schodkową. Tę samą konfigurację stosował też dla uzyskania widm EIT w warunkach ultra-zimnych atomów pułapki optycznej i uważa, że sprawdzi się ona również do badań EIT przy przejściu do stanu kondensacji.

W rozprawie pokazano dla obu izotopów ^{85}Rb i ^{87}Rb szereg widm w kaskadach: $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{3/2} \rightarrow 5D_{3/2}$ oraz $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{3/2} \rightarrow 5D_{5/2}$. Rejestrowane były widma transmisji wiązki próbkującej, z górnego, a następnie z dolnego stanu $5S_{1/2}(F)$, przestrajanej poprzez trzy dozwolone przejścia ($F \rightarrow F'$) linii D2. Wiazka sprzęgająca była dostrajana do rezonansów atomowych $5P_{3/2} \rightarrow 5D_{5/2}$, wiążąc kolejno każdy stan F' danej trójki z jednym z dwóch nadsubtelnych multipletów $5D_J$ (dozwolonych przejść z danego stanu F' do stanów $5D_J(F')$ jest na ogół trzy), a następnie z drugim. Badane były też widma z dostrojeniem wiązki sprzęgającej okołorezonansowo (do skraju multipletu $5D_J$ i nieco poza nim), a także daleko poza rezonansem. W sytuacjach pozarezonansowych widać wyodrębnione, wspomniane rezonanse absorpcyjne pochodzące od absorpcji dwufotonowej ze stanu podstawowego udziałem dwóch różnych fotonów: jednego z wiązki sprzęgającej i jednego z próbkującej.

Dla sytuacji gdy wiązka sprzęgająca jest dostrajana do rezonansów atomowych $(E_{F'} - E_F)/h$ doktorant rejestruje też widma zależne od mocy wiązki sprzęgającej. W przypadku izotopu ^{87}Rb i rezonansu ($F'=2$) – $5D_{5/2}$ w górnym przejściu i najniższej z zastosowanych mocy osiągnął dość wąski rezonans EIT o szerokości (połówkowej?) 3 MHz i autor wskazuje na możliwości dalszego zawężenia. Doktorant pokazuje też i wyjaśnia niszczący wpływ sprzężenia na pracę pułapki MOT, gdy dolnym stanem sprzężenia jest górny stan uczestniczący w chłodzeniu i pułapkowaniu

Na końcu omawianego podrozdziału Pan Stabrawa podsumowuje wymienione i niewymienione wyżej przeze mnie rezultaty i konkluzje. Oto odnośnie niektórych niewymienionych:

Doktorant stwierdza, że po odpowiednim dostrojeniu parametrów pułapki MOT w skonstruowanym układzie, można w działającej pułapce realizować warunki wywoływania zjawiska EIT i powinno to być możliwe w różnych stadiach chłodzenia obejmujących ładowanie pułapki MOT, kompresję chmury i fazę melasy optycznej.

Do dalszych badań doktorant wskazuje na izotop ^{87}Rb , m.in. dlatego że, jak stwierdza, „atomy tego izotopu można względnie łatwo skondensować w jednowiązkowej pułapce dipolowej bez konieczności stosowania rezonansów Feshbacha”. Biorąc pod uwagę korzystne prawdopodobieństwa przejść wskazuje na przejścia $5S_{1/2}(F=2) \rightarrow 5P_{3/2}(F'=2,3) \rightarrow 5D_{5/2}$.

Pan Stabrawa sugeruje też przeprowadzenie prób nad wykorzystaniem wiązki sprzęgającej w warunkach generacji EIT do poprawienia przeładowania atomów do pułapki dipolowej.

Ostatnie podrozdziały są poświęcone dalszemu chłodzeniu, którego autor dokonywał względem atomów w pułapce MOT (mam na myśli kompresję, a następnie warunki melasy optycznej) oraz przeładowaniu atomów do pułapki dipolowej optycznej. Autor opisuje przy tym różne procedury i przeprowadzone doświadczenia diagnostyczne.

Zwieńczeniem są przedstawione widma EIT dla ultra-zimnych atomów w pułapce ODT (ściślej, atomów wypuszczanych z tej pułapki), które to widma udało się doktorantowi zarejestrować z dobrą zdolnością rozdzielczą.

WNIOSKI DOTYCZĄCE PRACY DOKTORSKIEJ I ROZPRAWY

Stwierdzam na podstawie rozprawy doktorskiej Pana mgr. Artura Stabrawy, że pomyślnie zrealizował on oba zadania swojej pracy doktorskiej, które na początku recenzji wyodrębniłam jako Zadania (I) i (II). Stworzył on, samodzielnie w zakresie wymagań tej pracy, a także przy współpracy z innym doktorantem, wysokiej klasy złożony i wielozadaniowy układ badawczy, który powinien w perspektywie umożliwić uzyskanie spinorowego kondensatu rubidowego w Zakładzie Fotoniki. Następnie wykonał cały szereg badań spektroskopowych, w różnych warunkach, w głównej mierze na tym właśnie układzie. Dyskutowane w rozprawie różne wnioski i podsumowania kolejnych etapów tych badań powinny służyć grupie przy dalszym rozwoju tematyki. Autor sugeruje również niektóre kierunki tego rozwoju.

Doktorant nie uniknął w rozprawie pewnych błędów i potknięć, które nie wpływają jednak na moją ogólnie pozytywną ocenę jego pracy doktorskiej i jej opisu - czyli rozprawy doktorskiej. Z obowiązku recenzenta wymienię kilka przykładów niedociągnięć redakcyjnych:

- Str 25 Odwrotność czasu życia koherencji i stała gyromagnetyczna są oznaczone tym samym symbolem γ .
- Str 89 i 135 W schemacie poziomów dla rubidu 85 na górze strony nie jest zaznaczony jeden stan struktury nadsztywnej (składowa $F=0$ stanu $5D_{5/2}$).
- Nie znajduję odniesień w tekście do części artykułów z końca listy zawierającej bibliografię (podejrzewam błąd komputerowy).
- Część rysunków, zwłaszcza wykresów w Rozdziale 5. ma zdecydowanie za mały format, zwłaszcza na taką liczbę szczegółów, jakie zawierają.

Reasumując, stwierdzam, że praca doktorska Pana Artura Stabrawy spełnia wszystkie wymagania określone w art. 13. ust. 1. Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.) i wnioskuję o dopuszczenie doktoranta do dalszych etapów jego przewodu doktorskiego.

Małgorzata Głódź

Małgorzata Głódź