

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgra Krzysztofa Kowalskiego p.t. „Elektromagnetycznie wymuszona przezroczystość w zimnych atomach rubidu w pułapce magneto-optycznej”

Praca doktorska mgra Krzysztofa Kowalskiego została wykonana w Instytucie Fizyki PAN pod kierunkiem doc. dr hab. Małgorzaty Głódź i jest poświęcona eksperymentalnym badaniom widm absorpcji (transmisji) laserowej wiązki próbującej w ośrodku zimnych atomów rubidu poddanych jednocześnie oddziaływaniu z inną, silną wiązką laserową. W wyniku tego oddziaływania obserwowane jest zmniejszenie rezonansowej absorpcji i zmiana dyspersji ośrodka atomowego. Zjawisko to, zwane w literaturze elektromagnetycznie wymuszoną przezroczystością (EIT) zaobserwowane po raz pierwszy na początku lat 90' cieszy się niesłabnącym zainteresowaniem w wielu laboratoriach na świecie m.in. ze względu na własność pozwalającą na obniżenie prędkości grupowej światła do wartości rzędu 10m/s, co w pewnym sensie daje możliwości „przechowania” i modyfikacji impulsu światła (informacji) przez ośrodek atomowy. To częściowo wpisuje badania nad EIT w dziedzinę określaną jako atomtronika.

Zadaniem mgra Kowalskiego było wybudowanie układu doświadczalnego do laserowego chłodzenia atomów Rb w pułapce magneto-optycznej (MOT), następnie wykonanie w zbudowanym układzie pomiarów absorpcyjnych w warunkach EIT w celu zbadania wpływu szeregu parametrów charakteryzujących układ atomy-światło na obserwowane widma, zinterpretowanie ich i określenie parametrów pozwalających na sterowanie własnościami optycznymi takiego układu. Zważywszy, że znaczną część aparatury, w tym dwa lasery diodowe z zewnętrznym rezonatorem i układem elektronicznym do ich zasilania i stabilizacji, interface i oprogramowanie do sterowania pomiarem mgr Kowalski musiał wybudować własnoręcznie, a następnie wykonać z ich użyciem niełatwe pomiary i zinterpretować wyniki, uważam, że program, który udało mu się wykonać z całą pewnością wykracza poza standardowe wymagania stawiane obecnie doktorantom.

Tak szeroki zakres wykonanych badań i prac konstrukcyjnych wpłynął też na rozmiary rozprawy-liczy ona aż 185 stron. Dla recenzenta pewną rekompensatą tej objętości jest doskonała strona edytorska pracy.

Pracę rozpoczyna **Wstęp**, który jest w moim odczuciu formą pośrednią pomiędzy streszczeniem a spisem treści. Szkoda, że Autor nie przedstawił już na wstępie motywacji dla podjętych badań w szerszym kontekście - ale to jest jedynie uwaga dotycząca układu pracy, bo te motywacje i cele zostały przedstawione dalej, w Rozdziale 4.

Rozdziały 1 i 2 dotyczą działania i budowy pułapki MOT. W pierwszym Autor podał fizyczne podstawy jej działania, w zakresie podręcznikowym. Doceniam jasną i zwięzłą formę tego rozdziału. Natomiast podrozdział dotyczący chłodzenia Syzyfa został moim zdaniem dodany niepotrzebnie - w pracy nie była mierzona temperatura atomów, nie możemy ocenić czy ten mechanizm chłodzenia był istotny w badanym układzie i nie nawiązuje do niego Autor w dalszej części rozprawy. W **Rozdziale 2** Autor szczegółowo omówił zbudowany układ pułapki: lasery, wzmacniacz światła laserowego, dwa

stosowane sposoby stabilizacji częstości laserów, sposób kalibracji częstości oraz układ próżniowy. Poza omówieniem układów optycznych przedstawił też odpowiednie schematy, które pozwalają prześledzić rozwiązania zastosowane w doświadczeniu. Uzupełnieniem tego rozdziału jest **Rozdział 6**, w którym bardzo szczegółowo, włącznie ze schematami elektronicznymi, przedstawiono zaprojektowane i wybudowane przez mgra Kowalskiego urządzenia. Te rozdziały, chwilami bardzo szczegółowe, oceniam jako wartościowy fragment rozprawy – świadczą o przemyśleniu przez Autora działania wszystkich elementów układu doświadczalnego, wysiłkowi włożonemu w ich zbudowanie, a także zaradności w rozwiązywaniu problemów technicznych np. kontroli i stabilizacji odstojenia częstości lasera pułapkującego w sytuacji gdy nie dysponował on modulatorem akustooptycznego. Ale ta część rozprawy ma też moim zdaniem dodatkową wartość, gdyż tak zebrane i uporządkowane informacje o parametrach układu i zastosowanych rozwiązaniach technicznych to niezbędne kompendium wiedzy dla użytkowników laboratorium - uważam, że rozprawa doktorska jest właściwym miejscem, w którym powinny się te szczegóły znaleźć.

Rdzeń rozprawy stanowią **Rozdziały 3, 4 i 5**, w których Autor przedstawił wyniki swoich badań absorpcji wiązki próbującej przez ośrodek zimnych atomów Rb poddanych dodatkowo oddziaływaniu z silną wiązką sprzęgającą - układ poziomów zaangażowanych w oba przejścia tworzy układ schodkowy lub Λ . W szczególności skoncentrował się na poszukiwaniu takich warunków doświadczalnych, w których obserwowany jest wzrost transmisji ośrodka w wyniku oddziaływania z wiązką sprzęgającą, co jest wynikiem wymuszonej przez tę wiązkę przezroczystości (EIT). W rozprawie przedstawił olbrzymią ilość obserwacji doświadczalnych. Rozwinął również, we współpracy z teoretykami, modele które pozwoliły mu na odtworzenie charakteru większości obserwowanych przebiegów doświadczalnych.

Już na wstępie chciałbym podkreślić, że badanie absorpcji w warunkach działającej pułapki MOT są bardzo skomplikowane, jeśli chcemy uzyskać ilościowo interpretowalne wyniki. Wprawdzie sam ośrodek atomowy wydawałoby się jest idealny: praktycznie brak poszerzenia dopplerowskiego, duża gęstość atomów, mało zderzeń. Ale aby otrzymać takie warunki atomy znajdują się w polu 6 wiązek laserowych oraz kwadrupolowym polu magnetycznym i wpływ tych czynników trzeba brać pod uwagę w interpretacji wyników. Co więcej, nie jest łatwo zbadać wpływ poszczególnych czynników na obserwowane przebiegi, gdyż zmiana jednego z nich prawie zawsze pociąga zmiany pozostałych jak np. zmiana natężenia lasera pułapkującego zmienia rozmiary chmury atomowej, a to z kolei zmienia rozszczepienia zeemanowskie poziomów ze względu na gradient pola magnetycznego.

Dlatego też mgr Kowalski, bardzo słusznie rozpoczął swoje badania od możliwie najprostszej (a i tak złożonej) sytuacji gdy obserwowana jest absorpcja w pułapce MOT nie poddanej działaniu silnej wiązki sprzęgającej. Takie badania są opisane w literaturze, włącznie z modelem atomu ubranego, który pozwala na ich interpretację. Autor wykorzystał i trochę rozwinął ten model, co pozwoliło mu, głównie jakościowo, zinterpretować otrzymane widma absorpcji m.in. zaobserwowane przesunięcia i rozszczepienia rezonansów będące wynikiem efektu Autlera-Townesa. Te obserwacje posłużyły Autorowi do określenia parametrów pracy pułapki, przy których ich wpływ na obserwowane widma absorpcji był najmniejszy, co z kolei odpowiada pożądanemu reżimowi w dalszych, jeszcze bardziej złożonych doświadczeniach, gdy działa wiązką sprzęgającą.

Część wykonanych obserwacji (np. absorpcji na przejściu $5P \rightarrow 5D$) i ich interpretacja jest oryginalna i nie była prezentowana w znanej mi literaturze.

Natomiast niewyjaśniona pozostała zaskakująco duża szerokość obserwowanych rezonansów (np. dla przejścia $5S_{1/2}(F=3) \rightarrow 5P_{3/2}(F=4)$ w zależności od mocy lasera wynosiła $13 \div 23$ MHz, podczas gdy szerokość naturalna wynosi 6 MHz, a model atomu ubranego daje poszerzenie $0.6 \div 1.8$ MHz. Autor podjął próbę wyjaśnienia rozbieżności oszacowując wpływ rozszczepienia zeemanowskiego (2.8 MHz) – pomysł uważam za trafny, aczkolwiek mam zastrzeżenia do analizy ze str. 66, w której Autor założył, że linowa polaryzacja wiązki próbkującej w jego układzie oznacza polaryzację π podczas gdy w rzeczywistości kierunek pola magnetycznego wyznaczający w tym układzie oś kwantyzacji nie jest równoległy do wektora polaryzacji. Należałoby uwzględnić domieszkę polaryzacji typu σ – co warto zauważyć, domieszka takiej polaryzacji byłaby „dobrym” czynnikiem, działającym w stronę poszerzenia rezonansów. Ale przyznaję, że też nie wyjaśniłaby obserwowanej szerokości rezonansów.

Rozdział 4 zawiera wprowadzenie do tematyki EIT, omówienie podstawowych konfiguracji w których jest obserwowana, krótki przegląd literaturowy i perspektywy zastosowań. Precyzuje też zagadnienie, które jest przedmiotem dalszych rozdziałów: wielokrotne okna EIT – t.j. wielo-pikowe struktury absorpcyjne (transmisyjne), które są interesujące ponieważ umożliwiają np. wykorzystanie do spowalniania światła anomalnej dyspersji ośrodka dla różnych częstości. Poszukiwania takich wielo-pikowych struktur w próbkach „ciepłych” jak i „zimnych” atomów znane są z literatury np. poprzez wykorzystanie bichromatycznych wiązek sprzęgających, lub wykorzystanie struktury nadsubtelnej przejścia sprzęgającego. Mgr Kowalski w swojej pracy realizuje wariant: zimne atomy ^{85}Rb i wykorzystanie struktury nadsubtelnej przejścia $5P \rightarrow 5D_{5/2}$ i $5D_{3/2}$.

Na potrzeby interpretacji wyników wprowadza dwa modele 3- i 5-poziomowy, w których zastosowano formalizm macierzy gęstości. Pierwszy jest mocnym przybliżeniem ale jego zaletą jest możliwość podania wyrażeń analitycznych (też po pewnych przybliżeniach) na obserwowane przebiegi absorpcji. Drugi, 5-poziomowy znacznie bardziej odpowiada sytuacji doświadczalnej jest jednak nierozwiązywalny analitycznie i pozwala jedynie na symulacje numeryczne absorpcji po zadaniu dobrze zdefiniowanych fizycznie parametrów. Ten model też nie jest wolny od uproszczeń – zaniedbano wpływ pola magnetycznego oraz światła laserów MOTa (pułapkującego i repompującego). Pewnym uzasadnieniem tego ostatniego założenia są obserwacje Autora z badań absorpcji $5P \rightarrow 5D$, ale jak już wspominałem wyżej, charakter tych krzywych absorpcyjnych nie w pełni jest wyjaśniony (poszerzenia).

Następnie Autor prezentuje bardzo obszerny materiał doświadczalny, na który składają się wyniki pomiarów absorpcji dla różnych konfiguracji wiązka próbkująca-wiązka sprzęgająca, gdy laser sprzęgający dostrojony jest do trzech wybranych grup poziomów nadsubtelnych w stanach $5D_{5/2}$ i $5D_{3/2}$. Autor zawsze porównuje widmo absorpcji „zwykłej” (gdy wyłączony jest laser sprzęgający) z widmami w warunkach EIT (rys. na str. 101-125) – to jest z bardzo rzetelną procedurą doświadczalną, pozwalającą m.in. natychmiast zidentyfikować obszary zwiększonej transmisji i wyznaczyć stopień redukcji absorpcji. Zaobserwował w ten sposób piki transmisji w wyniku EIT dla kilku częstości (związanych ze strukturą nadsubtelną stanu $5D$), zbadal je w funkcji natężenia i odstrojenia wiązki sprzęgającej. To pozwoliło na wyznaczenie współczynnika redukcji absorpcji dla różnych okien EIT i określenie jego zależności od natężenia wiązki sprzęgającej. Największą wartość tego współczynnika (87%) Autor uzyskał dla przejścia $5S_{1/2}(F=3) \rightarrow 5P_{3/2}(F=2)$ w oknie absorpcyjnym powstałym wskutek sprzężenia światłem stanów oraz $5P_{3/2}(F=2) \leftrightarrow 5D_{5/2}(F=3)$.

Bardzo ciekawe jest porównanie otrzymanych wyników z przewidywaniami wprowadzonych przez Autora modeli, 3- i 5-poziomowego. Model 3-poziomowy, pomimo uproszczeń dał dobrą zgodność

z wyznaczoną wartością współczynnika redukcji absorpcji dla małych natężeń światła sprzęgającego (rys. 5.24 i 5.25) i wyraźnie gorzej stosuje się w przypadku dużych. Niestety zakres dużych natężeń reprezentowany jest jedynie przez jeden pomiar (dla dwóch okien transmisji) i trudno na tej podstawie sformułować bardzo silne wnioski, ale zgadzam się z argumentami Autora, że założenie 3 poziomów może załamywać się ze wzrostem natężenia światła, w szczególności gdy częstość Rabi'ego dla przejścia sprzęgającego staje się porównywalna z odległością do pozostałych, nieuwzględnionych w modelu poziomów. Wyjaśnienia wymaga rozbieżność, z kolei dla małych natężeń, otrzymana przy założeniu modelu 5-poziomowego (rys. 5.24) przy niezłej zgodności tego modelu dla dużych natężeń.

W ramach modelu 5-poziomowego rozwiązywanego numerycznie wartości szeregu parametrów (których sens jest dobrze zdefiniowany fizycznie) musiało być zapostulowane – Autor starannie uzasadnia wartości wprowadzone do modelu (str.129) ale też, o czym pisze, koryguje niektóre z nich starając się w ten sposób dopasować je do warunków doświadczalnych. To jest bardzo trudne i może być niejednoznaczne w przypadku wieloparametrowego modelu. Wprawdzie rezultat jest obiecujący – zaprezentowana rodzina widm EIT parametryzowanych natężeniami wiązki sprzęgającej I_c wizualnie dobrze jest odtwarzana przez model 5-poziomowy (rys. 5.22) to niewątpliwie konieczne jest przeprowadzenie bardziej ilościowych porównań. Takimi najbardziej nasuwającymi się byłyby zbadanie położenia pików transmisji – wyliczonych i obserwowanych oraz zbadanie, czy gdyby położyć $I_c = 0$ w modelu (co odpowiada brakowi wiązki sprzęgającej) to zreprodukowałby on proste struktury absorpcyjne rejestrowane w doświadczeniu. Chciałbym też zwrócić uwagę Autora na bardzo ciekawy aspekt takiego modelu, który nie został podkreślony w rozprawie - jest nim możliwość wyliczenia w ramach tego modelu również dyspersji ośrodka. Moim zdaniem możliwość wyznaczenia wielkości, która doświadczalnie jest bardzo trudna do zmierzenia (dyspersja) a jest kluczowa w zastosowaniach do spowalniania światła, z modelu przetestowanego na wykonanych pomiarach absorpcyjnych jest bardzo dobrym uzasadnieniem do dalszych prac nad tym modelem.


Podsumowując, bardzo wysoko oceniam zarówno zakres wykonanych prac doświadczalnych, wysiłek włożony w zbudowanie od podstaw układu doświadczalnego, otrzymane wyniki jak i ambitne próby wymodelowania obserwowanych doświadczalnie przebiegów. Mgr Kowalski przedstawił bardzo obszerny i wnikliwie przeanalizowany materiał, w którym maksymalnie wykorzystał wszystkie informacje otrzymane z własnych pomiarów jak i z dostępnej literatury. Za najważniejsze wyniki przedstawione w pracy uważam:

- wykonanie wysokorozdzielczych badań widm absorpcyjnych w próbce chłodzonej laserowo atomów ^{85}Rb , w tym analizę wpływu parametrów pracy pułapki MOT na obserwowane przebiegi absorpcji dla przejścia $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{3/2}$ oraz dla przejścia schodkowego $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{3/2} \rightarrow 5D_{5/2, 3/2}$,
- rejestrację zjawiska elektromagnetycznie wymuszonej przezroczystości (EIT) w ^{85}Rb dla kilku badanych, wielopoziomowych konfiguracji kaskadowych ($5S_{1/2} \rightarrow 5P_{3/2} \leftrightarrow 5D_{5/2, 3/2}$), otrzymanie wielokrotnych okien transmisji EIT i określenie wpływu parametrów wiązki sprzęgającej na położenie okien EIT i współczynników transmisji. Stanowi to krok w kierunku kontroli dyspersyjnych własności ośrodka,
- rozwinięcie modeli opisujących badaną sytuację fizyczną, w tym najbardziej zaawansowanego, 5-poziomowego i otrzymanie dobrej jakościowo zgodności z zaobserwowanymi przebiegami,
- analizę wpływu struktury zeemanowskiej na EIT w konfiguracji Λ .

Tekst rozprawy jest napisany bardzo jasno i przejrzysto, jest doskonały edytorsko. Listę kilku zauważonych drobnych usterek i uwag z obowiązku recenzenckiego dołączam do recenzji.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra Krzysztofa Kowalskiego spełnia warunki stawiane pracom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie mgra Krzysztofa Kowalskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Ponadto uważam, że wkład mgra Kowalskiego w wykonane badania jest ponadprzeciętny w stosunku do standardowo oczekiwanych, podczas wykonywania prac doktorskich; zarówno na etapie budowania bardzo złożonego układu doświadczalnego, wykonanych badań eksperymentalnych jak ich interpretacji. Tematyka pracy była nowa w zespole, w którym wykonywał pracę i każdy z tych elementów wymagał twórczego podejścia, zaangażowania i wytrwałości. Dlatego uważam, że bardzo dobra rozprawa doktorska, która powstała w wyniku tak wszechstronnych działań doktoranta, zasługuje na wyróżnienie.



Lista usterek redakcyjnych i drobnych uwag

- str. 21 – male „s“ we wzorze 1.24
- str. 22 – współczynniki Clebsch-Gordana opisujące sprzężenie atomu ze światłem
- str. 25 - afektywne
- str. 30 – krzywa wzmocnienia rezonatora
- str. 37 – profil różnicowany
- str. 38 - urzyciu
- str. 51 - widmo wiązki próbkującej
- str. 57 – w podpisie pod rys. 3.4 – ω_T
- str. 68 - rys. 3.9 – nieskomentowane maksimum transmisji (w obszarze ok. 200 MHz)
- str. 81 - krótkiego komentarza wymagałoby uzasadnienie zalet „zimnego” ośrodka atomowego (np. str. 51) w konfrontacji z wymienionymi na str. 81 „rekordami” w spowolnieniu światła otrzymanymi w próbkach atomów „ciepłych.
- str. 97 – nie podano żadnego uzasadnienia dla wybranego układu polaryzacji.
- str. 117 – aby sprawdzić, że rozbieżności w obserwowanych położeniach niektórych okien EIT są spowodowane dryfem częstości laser można było wielokrotnie wykonać pomiary i porównać przebiegi.
- str. 132 – brak „-”, w drugim wykładniku we wzorze 5.12