

Prof. dr hab. Jarosław Zaremba
Instytut Fizyki
Uniwersytetu Mikołaja Kopernika
w Toruniu

Ocena rozprawy doktorskiej magister Julii Sudyki zatytułowanej
„Przesunięcia poziomów energetycznych w precyzyjnej magnetometrii atomowej”

Przedmiotem rozprawy doktorskiej Pani mgr Julii Sudyki jest analiza roli i znaczenia wybranych efektów przesunięcia atomowych poziomów energetycznych ważnych dla interpretacji sygnałów magnetometrii atomowej. Magnetometry atomowe mają dziś wielorakie zastosowania, od fundamentalnych badań fizycznych po geologię i medycynę. Obserwuje się intensywny rozwój aktywności badawczej w tej tematyce, a ośrodek krakowski w Zakładzie Fotoniki w Instytucie Fizyki UJ jest tu jednym z wiodących laboratoriów o bogatej tradycji i osiągnięciach. Osiągana w tej dziedzinie precyzja wymaga uwzględnienia subtelnych efektów związanych z mechanizmami leżącymi u jej podstaw fizycznych. Rozprawa doktorska mgr Julii Sudyki należy do tego nurtu badawczego.

Nierezonansowe oddziaływania promieniowania z układami atomowymi to istotny element dynamiki procesów zachodzących w takich układach i badanych we współczesnej fizyce atomowej i optyce. Wpływają one na strukturę widma energetycznego układu kwantowego i wprowadzają modyfikacje zjawisk związanych z oddziaływaniami nominalnie rezonansowymi. Klasycznymi reprezentantami tego typu zjawisk są efekt Blocha-Siegerta oraz dynamiczny efekt Starka. Polegają one na przesunięciu poziomów atomowych zaanagażowanych w trakcie kwazirezonansowego sprzężenia atomu z polem promieniowania, zmiennego magnetycznego o częstotliwości radiowej w pierwszym i optycznego w drugim przypadku, wskutek oddziaływania z nierezonansowymi składowymi tych pól. Uwzględnienie tych efektów okazuje się być konieczne w szczegółowej analizie bardzo wielu interesujących i subtelnych zjawisk związanych z oddziaływaniem układu kwantowego czy to ze zmiennym polem magnetycznym, czy z polem promieniowania laserowego, czy z oboma tymi polami jednocześnie. Będące przedmiotem rozprawy doktorskiej zjawiska magneto optyczne, które leżą u podstaw precyzyjnej magnetometrii atomowej, należą właśnie do tej kategorii.

Zjawiska te wynikają ze związku między właściwościami optycznymi ośrodka a zewnętrznym polem magnetycznym. Ważnym przykładem jest efekt Faradaya, którego prototypową wersją jest efekt liniowy, polegający na skręceniu płaszczyzny polaryzacji światła spolaryzowanego liniowo w trakcie jego biegu przez ośrodek umieszczony w podłużnym polu magnetycznym, przy czym efekt ten jest rezonansowo wzmacniany w pobliżu częstotliwości przejścia atomowego. Pole magnetyczne powoduje dwójłomność ośrodka dla dwóch składowych światła o kołowej polaryzacji, które po przejściu wiązki przez ośrodek składają się na skręconą polaryzację liniową światła. Z pomiaru kąta skręcenia można wnioskować o wartości indukcji pola magnetycznego. Jeżeli efekt zależy od natężenia światła mówimy o nieliniowej rotacji magneto optycznej. Oddziaływanie z kwazirezonansową wiązką promieniowania prowadzi do wykreowania w atomach koherencji Zeemanowskich między

podpoziomami stanu podstawowego i skutki istnienia tych koherencji mogą być próbkowane poprzez analizę właściwości światła biegnącego przez ośrodek atomowy, w szczególności właśnie poprzez pomiar kąta skręcenia kierunku polaryzacji wiązki. Silna zależność sygnału od zewnętrznego pola magnetycznego pozwala na wykorzystanie efektu w bardzo czułej magnetometrii. Czułość współczesnych magnetometrów atomowych sięga poziomu $\text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}$, tak więc nawet subtelne przesunięcia poziomów energetycznych atomów związane ze wspomnianymi nierezonansowymi efektami oddziaływania powinny być uwzględniane w trakcie analizy sygnałów magnetorotacji. Jak pokazuje tytuł rozprawy, omawiane w rozprawie badania sytuują się właśnie w tej perspektywie.

Celem programu badawczego podjętego przez Panią magister Julię Sudykę w przedstawionej rozprawie doktorskiej jest systematyczne przebadanie przesunięć poziomów energetycznych zaangażowanych w dynamikę wymienionych nieliniowych efektów magnetoptycznych. Autorka interesuje się dwoma efektami: przesunięciem Blocha-Siegerta oraz dynamicznym efektem Starka w eksperymentach, w których atomy oddziałują nieliniowo z promieniowaniem wiązki laserowej, a przedmiotem rozprawy są ich systematyczne i wieloaspektowe badania doświadczalne oraz modelowanie teoretyczne. Podjęcie tej tematyki jest więc dobrze uzasadnionym, naturalnym i ambitnym przedsięwzięciem sytuującym program rozprawy w perspektywie badań podstawowych o znaczeniu bezpośrednio poznawczym dla wglądu w dynamikę zachodzących procesów fizycznych, jak i realizującym ważny i aktualny cel aplikacyjny dla potencjalnego wykorzystania w precyzyjnej magnetometrii atomowej. Uważam w świetle powyższego, że temat rozprawy jest interesujący i wartościowy, a przedstawiona rozprawa zawiera ciekawą i systematyczną prezentację oraz krytyczną dyskusję uzyskanych rezultatów.

Rozprawa została napisana w języku polskim i ma 115 stron podzielonych na cztery rozdziały, podsumowanie i sześć dodatków. Bibliografia pracy zawiera 84 pozycje. Czytając rozprawę żałowałem, iż nie ma ona standardowego, nieco bardziej obszernego wstępu zarysowującego tematykę dziedziny i strukturę pracy; rolę tę mogą wprowadzić pełnić czytane łącznie otwierające rozprawę streszczenie oraz wstępny paragraf rozdziału pierwszego, ale taki układ nie sprzyja czytelności całości tekstu.

Rozdział pierwszy zatytułowany „Metody pomiaru przesunięć poziomów energetycznych” zawiera dwa związane ze sobą wątki tematyczne: krótkie omówienie modelowego schematu eksperymentu dla obserwacji nieliniowych efektów magnetoptycznych oraz wykorzystania ich w magnetometrii optycznej. Cennym fragmentem jest tu przeglądowe omówienie efektów determinujących dokładność pomiaru magnetometrycznego, w tym kontekście pojawiają się będące przedmiotem badań Autorki efekty przesunięcia poziomów energetycznych.

Kolejne trzy rozdziały zawierają zasadniczą część rozprawy i prezentują nowe, autorskie wyniki naukowe

Rozdziały drugi i trzeci rozprawy poświęcone są efektowi Blocha-Siegerta analizowanemu w dwóch różnych wariantach gdy biegnąca przez ośrodek wiązka promieniowania laserowego dostrojonego do linii D1 oddziałuje z atomami rubidu 85. Pierwszy z nich, zwany w rozprawie magnetycznym i omówiony w rozdziale drugim, realizowany jest w konfiguracji podwójnego rezonansu magnetyczno-optycznego gdzie oprócz magnetycznego pola wiodącego atomy próbki oddziałują z polem promieniowania mikrofalowego rezonansowego z częstotliwością Larmora. Drugi z nich, nazwany optycznym efektem Blocha-Siegerta i omówiony w rozdziale

trzecim, realizowany jest w sposób pośredni, w którym stany Zeemanowskie sprzęgane są ramanowsko poprzez oddziaływanie z modulowanym promieniowaniem laserowym. Oba te procesy są nominalnie rezonansowe, a przesunięcie zaangażowanych poziomów energetycznych powodowane jest oddziaływaniem z niedopasowaną do rezonansu składową zmiennego pola promieniowania. Istotą badań jest porównanie sygnałów magnetorotacji w dwóch przypadkach: gdy realizowany jest „czysty” przypadek rezonansowy, w którym indukowane są przejścia między podpoziomami oraz wychodzący poza przybliżenie rezonansowe przypadek, w którym obecność składowej nierezonansowej wywołuje przesunięcie tych podpoziomów oraz systematyczne przebadanie tych efektów w zależności od różnych parametrów dostępnych w eksperymencie. Od razu podkreślę, że oprócz wielu oryginalnych wyników szczegółowych dotyczących obu sytuacji, za interesujące, wartościowe i pouczające z szerszej perspektywy poznawczej uważam ich porównanie i wskazanie cech i mechanizmów wspólnych oraz istotnie je różniących.

Struktura obu rozdziałów jest redakcyjnie podobna. Oba, obok szczegółowego przedstawienia schematów eksperymentów oraz omówienia przeprowadzonych badań i wyników doświadczalnych, prezentują model teoretyczny analizowanych zjawisk. W obu prezentowane są wyniki pomiarów sygnałów magnetorotacji (w fazie i w kwadraturze), położenia rezonansów oraz przesunięć poziomów dla przypadków pól oscylujących i rotujących w zależności od istotnych parametrów wpływających na badane efekty, a także porównywane są one z wynikami modelowych symulacji numerycznych. Modelowy układ atomowy zawiera cztery aktywne stany (trzy Zeemanowskie w stanie podstawowym i jeden w stanie wzbudzonym) i jest uproszczony w stosunku do bardziej złożonej struktury poziomów atomu rubidu, tym niemniej, jak pokazują porównania z wynikami eksperymentalnymi, może on z pożytkiem służyć do opisu zasadniczych cech ewolucji układu i analizy sygnałów detekcji. Atomy oddziałują z promieniowaniem świetlnym analizowanym w przybliżeniu fali wirującej i polami magnetycznymi. Dynamikę procesów opisuje równanie Liouville’a z fenomenologicznie uwzględnionymi efektami relaksacji i pompowania właściwymi dla badanej konfiguracji. Wynikający stąd układ równań różniczkowych na elementy macierzy gęstości w bazie standardowej rozwiązywany jest numerycznie. Są to rozwiązania nieperturbacyjne, a więc uwzględniają efekty nieliniowe w oddziaływaniu.

Rozdział drugi rozpoczyna zreferowanie standardowej wersji efektu Blocha-Siegerta dla najprostszej sytuacji: układu dwustanowego złożonego z dwóch poziomów Zeemanowskich oddziałującego z monochromatycznym polem promieniowania mikrofalowego w modelu atomu ubranego. Pozwala to jasno wskazać genezę przesunięcia częstości rezonansu magnetycznego wynikającego z oddziaływania atomu z antyrezonansową (poza przybliżeniem fali wirującej) składową pola radiowego i wielkość tego przesunięcia wyrażoną wzorem (2.14). Ten klasyczny wynik stanowi tło dla dalszych analiz w bardziej złożonej, analizowanej w rozprawie sytuacji podwójnego rezonansu i uzyskane przez Autorkę, pokazane na rysunkach (2.13) i (2.14) wyniki dobrze ilustrują jego zasadnicze charakterystyki. Aczkolwiek sam efekt Blocha-Siegerta jest dobrze rozumiany, to szczegółowe badania doświadczalne nad rolą nierezonansowej składowej pola mikrofalowego w magnetometrii optycznej, gdzie wywoływane przez nią przesunięcie poziomów powoduje systematyczne błędy w precyzyjnych pomiarach, jest nowym i ważnym przedsięwzięciem. W prezentowanych tu eksperymentach badano i porównywano przesunięcie poziomów oraz sygnały skreślenia płaszczyzny polaryzacji liniowo spolaryzowanej wiązki laserowej w dwóch sytuacjach: gdy pole mikrofalowe ma polaryzację kołową i może realizować „ściśły”

rezonans z dostrojeniem do częstości własnej (Larmora) układu oraz gdy polaryzacja tego pola jest liniowa i uzewnętrzniają się efekty nierezonansowe związane z wyjściem poza przybliżenie fali wirującej. Metoda pomiarowa polegała na przemiennym, dla zminimalizowania skutków ewentualnego dryfu statycznego pola magnetycznego między pomiarami, stosowaniu pola oscylującego i wirującego w trakcie przemiatania częstości tych pól wokół częstości rezonansowego przejścia. Autorka uzyskała wiele szczegółowych i wieloaspektowych wyników, które pozwalają na ocenę znaczenia tego efektu dla subtelnych pomiarów magnetometrycznych, w szczególności na ocenę wagi składowej antyrezonansowej pola radiowego, podając oszacowania niepewności wartości indukcji pola magnetycznego wynikających z mierzonych przesunięć częstości. Na podkreślenie zasługuje staranność i drobiazgowość eksperymentów i ich analizy, w tym roli efektów nieuwzględnianych przez podstawowy model dynamiczny, w szczególności wpływu nieskompensowanych pól reszkowych. Uzyskane tu precyzyjne i szczegółowe wyniki oraz ich krytyczną interpretację należy więc uznać za naprawdę cenne. Co dodatkowo ważne, stanowią one naturalny punkt odniesienia dla badań nad optyczną wersją efektu pozwalając wskazać i przedyskutować ważne z punktu widzenia analizowanych zjawisk różnice i podobieństwa między nimi.

Rozdział trzeci zatytułowany został „Optyczny efekt Blocha-Siegerta. Termin „optyczny” znaczy tu, że koherencje Zeemanowskie w stanie podstawowym wytwarzane są poprzez sprzęganie podpoziomów w sposób pośredni modulowanym promieniowaniem laserowym z udziałem stanu wzbudzonego. Modulacja jest realizowana na dwa sposoby: poprzez modulację amplitudy bądź poprzez obrót pola wiązki spolaryzowanej liniowo. Porównanie sygnałów magnetorotacji realizowanej w obu wypadkach stanowi analog sytuacji rozważanej w przypadku magnetycznego efektu Blocha-Siegerta. Podkreślić należy, że ta szczegółowa analiza przesunięć poziomów energetycznych w kontekście magnetometrów ze światłem modulowanym to nowatorskie i oryginalne przedsięwzięcie. Rozdział ten rozpoczyna wskazanie różnic między magnetyczną i optyczną wersją efektu związanych z udziałem atomowego stanu wzbudzonego w tej drugiej sytuacji, w szczególności zwrócenie uwagi na znaczenie emisji spontanicznej oraz wywoływanych światłem przesunięć poziomów. Wyraźne podkreślenie tego na samym początku dyskusji uważam za bardzo pożyteczne. Podobnie jak w przypadku efektu magnetycznego wykonane zostały pomiary sygnałów magnetorotacji oraz przesunięcia Blocha-Siegerta dla różnych mocy wiązki pompującej i częstości Larmora. Wyniki te zostały wszechstronnie omówione i skonfrontowane z wynikami modelowania numerycznego wykazującego jakościową zgodność z eksperymentem. Przedstawiono też drobiazgową dyskusję szczegółów eksperymentalnych i efektów mogących wpływać na wyniki. Istotna jest tu krytyczna analiza roli dynamicznego efektu Starka, który w warunkach eksperymentu składać się może wraz z badanym efektem Blocha-Siegerta na całkowite przesunięcie poziomów. Na podstawie przeprowadzonych badań Autorka postuluje formułę (3.22) opisującą w sposób przybliżony takie przesunięcie. Zwraca też uwagę na możliwość eliminacji efektu Blocha-Siegerta poprzez odpowiednie dostrojenie wiązki laserowej. Uzyskane i przedstawione w rozprawie wyniki dotyczące optycznej wersji realizacji efektu Blocha-Siegerta rozwiązują oryginalny problem fizyczny rysujący się jako naturalna kontynuacja i rozszerzenie badań nad efektem znanym z fizyki rezonansu magnetycznego. Raz jeszcze podkreślę, że rozdziały drugi i trzeci czytane łącznie, oprócz dyskusji wielu ważnych wyników szczegółowych, stanowią ciekawą i kształcącą panoramę porównawczą prezentującą znaczenie nierezonansowej składowej pola elektromagnetycznego, mikrofalowego bądź modulowanego optycznego, dla przesunięć

poziomów energetycznych zaangażowanych w mechanizmy powstawania sygnałów magnetoptycznych.

Pozwolę sobie tu zwrócić uwagę na dwa elementy, których bardziej szczegółowe objaśnienie uczyniłoby, moim zdaniem, lekturę łatwiejszą. Jako zbyt skrótowe odebrałem przedstawienie „koncepcji trzech obszarów-model komórki z pokryciem parafinowym” (cytat z podpisu pod rysunkiem 3.5, który ma ją ilustrować graficznie), która w tekście jest wprowadzona jako „podział” (czego?) na „obszary”; nieco szersze omówienie uczyniłoby tu prezentację bardziej przejrzystą. Jak już wyżej wskazywałem, jako wartościowy oceniam aspekt porównawczy materiału przedstawionego w rozdziałach drugim i trzecim. Z tego punktu widzenia chętnie przeczytałbym komentarz Autorki na temat znaczenia wyboru różnych kierunków wiodącego pola magnetycznego względem wybranej osi kwantyzacji zgodnej z kierunkiem propagacji wiązki światła w obu wersjach realizacji efektu Blocha-Siegerta, na który sama Autorka zwraca uwagę jako na „bardzo istotną różnicę” (strona 47).

Rozdział czwarty zatytułowany „Dynamiczny efekt Starka w parach atomowych” podejmuje inny aspekt związany z przesunięciem poziomów ważny w magnetometrii atomowej. Inaczej niż w poprzednich rozdziałach dyskusja nie dotyczy analizy samych mechanizmów przesunięcia atomowych poziomów energetycznych, ale bada konsekwencje wynikające z faktu, że aktywna próbka gazu atomowego umieszczona jest w antyrelaksacyjnej komórce z pokryciem parafinowym. W komórkach takich realizowany jest długi czas życia spójności atomowych. W rozdziale tym zaproponowany został statystyczny model analizy trajektorii spolaryzowanego optycznie atomu doświadczającego wielokrotnych odbić od ścianek komórki. Model ten pokazał, a wynik ten został potwierdzony przez symulacje oparte na metodzie Monte Carlo, że efekt Starka, generowany w trakcie oddziaływania w obszarze wiązki pompującej uśrednia się wskutek zderzeń ze ściankami na obszar całej komórki. Obrazowo ilustruje to rysunek 4.3, na którym trajektoria spolaryzowanego w obszarze wiązki atomu wypełniła cały przekrój komórki, co pozwala na wyciągnięcie ważnego praktycznie wniosku, że przesunięcie światłem częstości rezonansowej zależne jest od mocy wiązki światła laserowego, a nie od jej powierzchni. Wyniki te były skonfrontowane z doświadczeniem dla komórek z cezem 133, a przedstawione w rozprawie wyniki doświadczalne były już publikowane w pracy, której Doktorantka jest współautorką, w znaczącym czasopiśmie Optics Express.

Rozprawę zamyka sześć dodatków, w których omówione są techniczne i warsztatowe problemy dotyczące eksperymentalnej strony rozprawy. Pozwalają one czytelnikowi zdać sobie sprawę ze złożoności problematyki stojącej przed eksperymentatorem tej dziedziny.

Rozprawa skonstruowana jest w sposób przejrzysty i zredagowana poprawnie. Układ materiału jest czytelny, podział na rozdziały i podrozdziały ułatwia orientację w tekście. Dobrym pomysłem było przesunięcie informacji o charakterze technicznym do dodatków, dzięki czemu zasadnicze wywody dotyczące analizowanych procesów fizycznych nie musiały być nimi przerywane. Chwaląc konstrukcję rozprawy należy jednak odnotować zauważone w niej niedociągnięcia. Jako czytelnikowi tekstu nie ułatwiała mi lektury zwięzłość objaśnień opisu sytuacji eksperymentalnej w realizowanych wariantach (choć zawsze zamieszczony był schemat układu eksperymentalnego). Byłoby pomocne jasne opisanie, nawet za cenę niewielkich powtórzeń, na początku prezentacji każdej wersji eksperymentu jak wyglądały konfiguracje stosowanych w niej pól magnetycznych i wiązek światła; o związanych z nimi

oddziaływaniach informację zawierała postać macierzy hamiltonianu. Bardzo skrótowo potraktowane zostało omówienie stałych relaksacji występujących w modelach przedstawionych w paragrafach 2.3 i 3.3 i wyboru danych, dla których prowadzono symulacje numeryczne. Pojawiają się w rozprawie wyrażenia nadmiernie żargonowe i usterki redakcyjne. Wymienię kilka przykładów. Używanie terminu „light shift” w polskich zdaniach jest wygodne, ale jednak w tekście rozprawy doktorskiej lepiej byłoby go unikać. Zdarzają się niezdefiniowane w tekście symbole, jak P_i we wzorze (2.26) i dalszych (choć można się domyślać ich znaczenia bądź sprawdzić w przywołanej referencji) czy niekonsekwencje dotyczące oznaczeń, jak na przykład użycie symboli ω (we wzorach) i Ω (w tekście po wzorze (2.34)) dla oznaczenia częstości fali o długości λ w paragrafie 2.3.1. Tego typu drobne i nieliczne usterki nie mają znaczenia dla pozytywnej oceny merytorycznej wartości rozprawy.

W podsumowaniu recenzji pragnę stwierdzić, że całość materiału stanowi spójną i ciekawą prezentację. Program badawczy podjęty w rozprawie dotyczy istotnego zagadnienia ważnego dla współczesnej magnetometrii atomowej, a jego temat i zakres programu został jasno określony. Program ten został konsekwentnie i pozytywnie zrealizowany prowadząc do uzyskania oryginalnych wyników naukowych. Badania prezentowane w rozprawie wymagały opanowania przez Doktorantkę różnych zaawansowanych układów i technik doświadczalnych oraz metodologii eksperymentalnej stawiających bardzo różnorodne wymagania w dziedzinie optyki i fizyki atomowej, kontroli pól magnetycznych czy metod detekcyjnych, a także opracowania danych; materiał zamieszczony w pracy dobrze to pokazuje. Doktorantka pokazała, że potrafi skutecznie stosować opanowany warsztat badawczy do rozwiązywania postawionych problemów oraz poprawnie zinterpretować i zaprezentować otrzymane rezultaty. Rozprawa świadczy o dobrym opanowaniu przedmiotu badań i przekonuje, iż Pani magister Julia Sudyka dysponuje już niemalym warsztatem i doświadczeniem badawczym w dziedzinie optyki i fizyki atomowej. Należy z uznaniem odnotować, że część wyników uzyskanych w trakcie pracy doktorskiej została już opublikowana.

Nie mam wątpliwości, że recenzowana rozprawa Pani magister Julii Sudyki zasługuje na pozytywną ocenę i spełnia warunki stawiane pracom doktorskim w dziedzinie fizyki. W konkluzji wnoszę o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej Autorki do kolejnych etapów przewodu doktorskiego.

Toruń, 3 kwietnia 2018

