

Warszawa, 10 marca 2015 r.

Prof. dr hab. Włodzimierz Jastrzębski
Instytut Fizyki PAN, Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgra Krystiana Sycza
p.t. „Dynamika stanów superpozycji zimnych atomów ^{85}Rb ”

Praca doktorska mgra Krystiana Sycza została wykonana w Zakładzie Fotoniki Instytutu Fizyki UJ pod kierunkiem prof. Wojciecha Gawlika i dra Adama Wojciechowskiego jako promotora pomocniczego. Tematyka, której praca dotyczy jest od lat rozwijana w zespole Promotora i jej początków można się nawet doszukać w pracach dotyczących rozpraszania prowadzonych w UJ w latach '70. Jednak obecne badania są prowadzone w zupełnie innych warunkach fizycznych, całkowicie niedostępnych dla fizyków w *epoce ciepłych atomów* – to wiąże się z nowymi wyzwaniami doświadczalnymi, ale daje też szereg nowych możliwości i perspektyw, jak zastosowania w ultraczułej magnetometrii czy równie ostatnio modne poszukiwanie zastosowań układów atomowych w informatyce kwantowej.

Tematem rozprawy są badania czasowej ewolucji koherentnych superpozycji stanów zeemanowskich w atomach rubidu. Ośrodek atomowy (Rb) przygotowywany był w pułapce magneto-optycznej (MOT) i składał się z $\sim 5 \cdot 10^8$ atomów w objętości $\sim 1 \text{ mm}^3$ schłodzonych do temperatury $\sim 100 \mu\text{K}$. Badań tak przygotowanej próbki dokonywano w warunkach uwolnienia jej z pułapki, co pozwoliło wyeliminować wpływ samego procesu chłodzenia i pułapkowania na obserwowane zjawiska bardzo czyszcząc sytuację fizyczną i jednocześnie zachowując zalety pracy z bardzo zimnym ośrodkiem atomowym. To oczywiście narzuciło pewne ograniczenia na prowadzone pomiary wynikające ze swobodnego spadku swobodnego i ekspansji chmury atomowej, ale to jest cena, którą trzeba zapłacić za uwolnienie się od bardzo złożonych warunków, jakie panują w MOT. Jak podkreśla Autor w rozprawie jego badania poprzedzają planowane, w których badana próbka atomowa będzie przechowywana w dipolowej pułapce optycznej, która część z tych ograniczeń wyeliminuje.

Układ rozprawy jest klasyczny; rozpoczynają ją rozdziały teoretyczne 1 i 2, w których Autor zdefiniował zjawiska, które będzie badał i podał teoretyczne podstawy ich opisu. Przedstawił podstawy fizyczne i mechanizmy liniowej rotacji Faradaya, paramagnetycznego i nieliniowego zjawiska Faradaya. W mojej ocenie dokonał trafnego wyboru poziomu opisu tych zjawisk upraszczając ten opis do układu z małą liczbą podpoziomów zeemanowskich ($J=0, 1$). Taki opis jednak pozwolił na przeanalizowanie jakościowe procesów wytwarzania anizotropii w ośrodku atomowym a jednocześnie uczynił ten wstęp bardzo przystępnym. Autor wskazał na te elementy, które zaniedbuje w opisie – w tym rzędzie przybliżeń – a które mogą wpływać na obserwowane efekty nie tyle jakościowo, co ilościowo. Są to np. efekty związane z dużymi

natężeniami światła i wielofotonowego oddziaływania ze światłem podczas swobodnej ewolucji spójności zeemanowskiej (tzw. resetowanie spójności). Przechodząc do opisu obserwowanych w doświadczeniu sygnałów rotacji Faradaya Autor posłużył się symulacjami numerycznymi. Pozwoliły one na analizę zmian parametrów wiązki próbkującej propagującej się w ośrodku atomowym, którego polaryzacja – w tym jej dynamika – jest wynikiem oddziaływania ze światłem wzbudzającym i daje się wyrazić przez elementy macierzy gęstości. Wyniki symulacji numerycznych pokazały m.in., że przy wzbudzeniu odpowiednio krótkim impulsem światła (ułamek okresu precesji Larmora) amplituda oscylacji jest tłumiona znacznie wolniej niż przy wzbudzeniu ciągłym oraz znalezienie optymalnych czasów trwania impulsów dla różnych natężeń światła w szczególności takich, dla których nie występuje „resetowanie” koherencji. Z kolei symulacje dla realnego układu z dużą liczbą podpoziomów zeemanowskich pokazały, że wprawdzie dynamika procesów ma taki sam charakter jak w najprostszym 3-poziomowym układzie, ale oczekiwane skrócenie płaszczyzny polaryzacji jest znacznie mniejsze (rys. 16). Te spostrzeżenia z symulacji numerycznych dały podstawy do jakościowej interpretacji przebiegów doświadczalnych opisanych w dalszej części pracy – chociaż zapewne chronologia była odwrotna – modele numeryczne rozwinięte zostały na potrzeby interpretacji wyników.

W Rozdziale 3 mgr Sycz przedstawił szczegóły eksperymentalne: doświadczenia zrealizowane były w chmurze atomów uwolnionych z pułapki MOT, opadających i ekspandujących w polu grawitacyjnym w obecności magnetycznego pola kierującego. Tak dynamiczne pomiary wymagały odpowiednich sekwencji czasowych wyłączania i włączania pól laserowych i magnetycznych dodatkowo dostosowanych do dwóch rodzajów pomiarów: gdy wiązka wytwarzająca koherencje jednocześnie ją próbuje (układ jednowiązkowy) oraz z oddzielną wiązką próbującą (układ dwuwiązkowy). Eksperyment jednowiązkowy pozwolił na odniesienie obecnych warunków doświadczalnych do poprzednich badań wykonanych w Zakładzie Fotoniki tą techniką i m.in. na ocenę skuteczności ekranowania i kompensacji pól magnetycznych. Nie jest dla mnie jasny powód utrzymywania podczas doświadczeń cały czas działającej wiązki repompującej. Z kolei zaobserwowanie nierównowagowego obsadzenia podpoziomów zeemanowskich w atomach uwalnianych z pułapki dało możliwość wykonania kalibracji pola magnetycznego metodą podwójnego rezonansu optyczno-radiowego. To jest sprytnie wykorzystanie niecelowo wytworzonej sytuacji, aczkolwiek nie podzielam zaskoczenia Autora, że takie nierównowagowe obsadzenie w ogóle się pojawia - chociażby ze względu na proces uwalniania atomów: niejednorodne pola, prądy wirowe, wyłączane pola świetlne.

W Rozdziale 4 Autor przedstawił cały szereg obserwacji wykonanych w różnych konfiguracjach pól magnetycznych, dla różnych czasów trwania impulsów laserowych oraz w konfiguracji jedno i dwuwiązkowej. Celem tych eksperymentów były m.in. poszukiwania warunków, w których czasy życia koherencji (optycznych i zeemanowskich) byłyby najdłuższe i ewentualna identyfikacja głównych źródeł niszczących te spójności. W recenzji ograniczę się do omówienia moim zdaniem najciekawszego wyniku, jakim jest rezultat wykonania dwóch

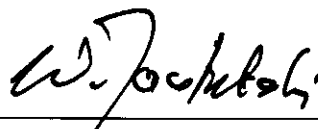
oddzielnych pomiarów dynamicznych: (i) skreślenia płaszczyzny polaryzacji będącej wynikiem polaryzacji ośrodka atomowego oraz (ii) będącej wynikiem wytworzonych spójności zeemanowskich ($|\Delta m_F|=2$). Pomiary różniły się konfiguracją pól magnetycznych ale również zastosowaniem odstrojonej (o 70MHz) od rezonansu wiązki próbkującej – w badaniach polaryzacji atomowej. Zaobserwowane stosunkowo powolne (1.2ms, rys.51) defazowanie polaryzacji atomowej w stosunku do obserwowanego dla koherencji zeemanowskich (130 μ s), przy obserwacji którego nie można było zastosować światła odstrojonego, sugerowałoby właśnie zależność od tego odstrojenia. Jak pokazały dociekliwe badania Autora, siła oddziaływania ze światłem jest faktycznie jednym z czynników powodujących defazowanie. Powtórzone, tym razem dla wiązki rezonansowej badania zaniku rotacji polaryzacji (punkt (i)) doprowadziło do skrócenie czasu zaniku (do ~ 1 ms) jednak nadal był on znacznie dłuższy niż w przypadku spójności zeemanowskich. Dopiero zastosowanie włączanej z opóźnieniem wiązki próbkującej (zmniejszające efektywne, destrukcyjne oddziaływanie ze światłem próbującym) pozwoliło na dwukrotne wydłużenie czasu zaniku koherencji zeemanowskich (Rys. 68), a dalsze – trzykrotne - wydłużenie tego czasu Autor osiągnął poprzez bardzo stabilną metodę wytwarzania pól magnetycznych. Bardzo mi się podoba sposób dedukcji – na podstawie rozstrajania się faz oscylacji - w jaki Autor doszedł do wniosku, że to niestabilności pól są tym czynnikiem ograniczającym czas zaniku w metodzie stroboskopowej. Natomiast nie wspomina Autor o ewentualnym wpływie zderzeń niszczących fazę – czy wyklucza, że mogą one być źródłem wciąż istniejącej różnicy w szybkości zaniku polaryzacji i spójności zeemanowskich?

Uważam, że wyniki przedstawione w pracy są rzetelnym i dobrze udokumentowanym raportem z wykonanych badań. Elementem, który bardzo by je wzbogacił, byłoby porównanie ilościowe otrzymanych czasów życia z literaturowymi – niekoniecznie otrzymanymi w zimnych atomach, próba określenia jak długich czasów życia takich superpozycji można oczekiwać ze względu na różne czynniki ograniczające je.

Podsumowując: Autor wykonał postawiony na wstępie cel badawczy jakim było opracowanie i przetestowanie metod badania dynamiki koherentnych superpozycji stanów zeemanowskich w zbiorze zimnych atomów Rb. W tym celu rozwinął różne techniki detekcji oraz interpretację obserwowanych przebiegów wspomaganą symulacjami numerycznymi, co doprowadziło m.in. do otrzymania stosunkowo długich czasów zaniku koherencji zeemanowskich. Te badania, zgodnie z zapowiedzią Autora, będą kontynuowane w optycznych pułapkach dipolowych, co moim zdaniem nie uwolni ich niestety od problemów związanych z niestabilnością pól magnetycznych, a najprawdopodobniej dojdą problemy związane z dynamicznym efektem Starka w takich pułapkach. Będzie to najprawdopodobniej tematem dalszych badań, obecnie na plus odnotowuję fakt opublikowania części wyników z rozprawy w Journal of Physics: Conference Series (2014).

Rozprawa licząca 117 stron została przygotowana starannie. Nie zauważyłem poważnych usterek, które wymagałyby odnotowania w recenzji. Zwróciłbym jedynie uwagę na nie całkiem dla mnie jasne zróżnicowanie pomiędzy czasami relaksacji poprzecznej T_2 i T_2^* (str. 23, 86, 98, 105) – czy za tym kryje się jakaś głębsza myśl Autora?

Uważam, że przedstawione w rozprawie oryginalne wyniki eksperymentalne i interpretacja zjawisk fizycznych będących podstawą obserwacji spełniają wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie mgra Krystiana Sycza do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Prof. dr hab. Włodzimierz Jastrzębski