



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

dr. hab. Wojciech Wasilewski, prof. UW

Warszawa, dnia 19 marca 2018

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Julii Sudyki pt.
„Przesunięcia poziomów energetycznych w precyzyjnej
magnetometrii atomowej”**

Przedstawiona mi do recenzji rozprawa została przygotowana pod kierunkiem prof. dr. hab. Wojciecha Gawlika oraz dr. hab. Szymona Pustelnego na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego. Rozprawa składa się z 4 rozdziałów, podsumowania, 6 dodatków oraz bibliografii liczącej 84 pozycje datowane na lata 1846-2017.

Przedstawiona rozprawa poświęcona jest pomiarom i obliczeniom przede wszystkim efektu Blocha-Siegerta, a także dynamicznego efektu Starka.

Rozprawa ma klarowny układ formalny opisany znaną z atomów wodoropodobnych formułą $l=n-1$, przy czym w rozprawie l to liczba użytych wiązek laserowych, zaś n jest numerem rozdziału. Tę szczególną harmonię treści i formy podkreślają czytelne i estetyczne wykresy oraz rysunki, a także przeplatanie się wyników doświadczalnych i teoretycznych na kartach przedstawionej rozprawy.

W rozdziale pierwszym „Metody pomiaru przesunięć poziomów energetycznych” autorka wykazuje się wiedzą z dziedziny optyki atomowej i magnetometrii.

Omawia prace naukowe, możliwości i zalety pomiaru pola magnetycznego za pomocą atomów oraz przybliża nam typowy schemat takiego pomiaru na przykładzie modelowego atomu czteropoziomowego.

Wybrany do analizy i dalej badany w rozprawie sposób opiera się na pomiarze częstości Larmora precesji spinu w polu magnetycznym, innymi słowy na pomiarze rozszczepienia energetycznego poziomów pod wpływem badanego pola magnetycznego. Ponieważ spin jądrowy atomów, po odpowiednim przygotowaniu ścianek komórki, może ewoluować unitarnie przez czas rzędu sekund, to osiągalna precyzja pomiaru jest bardzo duża. Jednocześnie wszelkie inne efekty powodujące analogiczne jak pole magnetyczne przesunięcie poziomów powinny zostać odpowiednio precyzyjnie odjęte.

W rozdziale pierwszym natrafiam na drobne usterki, istotne w mojej ocenie z punktu widzenia studenta, który mógłby chcieć zapoznać się z dziedziną na podstawie lektury pracy. Wzór (1.1) jest niezrozumiały i ociera się o dokonywanie kryminalnie zabronionych czynów

na wektorze stanu. Końcówka podpisu rys. 1.3 nie zgadza się z początkiem wykresu na panelu (b). Sformułowanie „w przeciwfazie” nad wzorami (1.3) jest zapewne przeoczeniem.

Nad wzorem (1.4) autorka zdradza się z wiarą, że stan pojedynczego atomu jest czysty. Wzór (1.4) jest niefortunnie sformułowany – nie jest jasne, do czego odnosi się współrzędna r . Podrozdział 1.4.1 wypada wyjątkowo mało przekonująco. Autorka nie wyjaśnia, jak rozumie czułość, nie przedstawia także prostej geometrycznej interpretacji przywoływanych wzorów, co właściwie uniemożliwia ich zrozumienie. Wydaje się, że jedynym celem było podanie wzoru (1.11) i z tego punktu widzenia lepiej byłoby wzorów (1.9) oraz (1.10) w ogóle nie wypisywać.

W rozdziale drugim „Magnetyczny efekt Blocha–Siegera” autorka zajmuje się efektem Blocha–Siegera wywoływanym przez oscylujące pole magnetyczne, mierzonym za pośrednictwem skreślenia polaryzacji jednej wiązki laserowej.

Autorka używa prostego modelu atomu 4-poziomowego, aby z powodzeniem wyjaśnić mierzone eksperymentalnie przesunięcia.

Bardzo pozytywnie oceniam udaną interpretację zniekształceń widocznych na mierzonych krzywych, dokonaną poprzez uzupełnienie modelu. Tego typu iteracyjne podejście jest w moim odczuciu konieczne dla prawdziwego zrozumienia fizyki badanego układu. W opisywanym rozdziale pozwoliło to autorce wyjaśnić dip pochodzący od szumów o charakterze termicznym oraz efekty związane z niedoskonałościami generowanych pól magnetycznych. Rozdział ten jest najbardziej udaną częścią pracy o czym dodatkowo świadczy fakt, że został on właściwie wprost przepisany w formie manuskryptu (nie wykazany w bibliografii arXiv:1709.07194), którego autorka jest pierwszym autorem, a pozostałymi promotorzy.

Chociaż robi na mnie wrażenie fakt, że autorce udaje się wyznaczyć subhertzowe przesunięcia rezonansów, to jednak w reżimie słabych natężeń pola zmiennego, który ma znaczenie w rzeczywistych magnetometrach, wyniki eksperymentalne wypadają nieprzekonująco. Jak widać na rys. 2.14b i jak przyznaje autorka, mierzone zależności odbiegają od spodziewanych.

Proszę o następujące wyjaśnienia do treści rozdziału 2:

1. Czy losowanie szumu we wzorze (2.35) było dokonywane w trakcie pojedynczej symulacji dla ustalonego Ω jeden raz?
2. Jakich środków technicznych użyto do rozwiązywania równań? Czy był to pakiet ADM [61]?

W rozdziale trzecim „Optyczny efekt Blocha–Siegera” autorka używa drugiej wiązki laserowej, aby indukować efekt Blocha–Siegera optycznie.

Tu także autorka przedstawia nam dużo precyzyjnych danych doświadczalnych. Część teoretyczna tego rozdziału jest interesująca i pouczająca. Skonstruowany model teoretyczny co prawda doskonale oddaje kształt obserwowanych widm i różnice tego kształtu między przypadkiem oscylującego a przypadkiem wirującego pola optycznego, ale nie pozwala przewidzieć wielkości przesunięć będących centralnym tematem pracy. Autorka szczegółowo dokumentuje tę specyficzną porażkę, co uważam za cenne bo trudno nieobecne w publikacjach czy podręcznikach. Kulminację niezgodności widzimy na rys. 3.8, gdzie autorka przewiduje kwadratowe w mocy wiązki pompującej przesunięcie, a obserwuje liniowy lightshift.

Zastosowany model, podzielony na trzy podukłady, jest jednocześnie zbyt ubogi by przewidzieć przesunięcie Starka AC, ale także najpewniej niepotrzebnie zawiły - sektor stanów podstawowych jest zapewne taki sam we wszystkich trzech podukładach.

Autorka formułuje wzór (3.22) definiujący współczynniki dopasowania kwadratowego obserwowanego efektu oBSE w funkcji mocy wiązki pompującej. Brakuje mi porównania między dopasowanymi do danych eksperymentalnych współczynnikami kwadratowymi przesunięcia (jak na rys 3.11) oraz analogicznymi współczynnikami uzyskanymi z teorii. Szkoda też, że autorka nie przeprowadziła pomiarów dla przeciwnych kierunków pola magnetycznego.

Na samej górze strony 62 autorka pisze, że „różnicowe przesunięcie (...) jest zaniedbywalne względem Γ_e . Innymi słowy, w rozważaniach numerycznych dysponujemy niewystarczającą rozdzielczością w dziedzinie częstości do zaobserwowania dynamicznego efektu Starka” – jak to stwierdzenie ma się do obserwacji efektu oBSE w symulacji?

Nie przekonuje mnie sformułowane przez autorkę w podsumowaniu rozdziału 3 zdanie: „Bardzo istotnym wnioskiem z powyższych badań jest istnienie odstrojenia spełniającego warunek $\Delta\omega=0$ ”. Chociaż jest to zdanie uprawnione w granicy niepewności w tym przypadku rzędu 0.1 Hz, to jednak sądziłem, że ambicją autorki byłoby skompensować nawet mniejsze błędy systematyczne. Zgodziłbym się natomiast z hipotezą – do potwierdzenia przez konstrukcję modelu teoretycznego pasującego do zmierzonych wyników – że dla ustalonej mocy wiązki pompującej, czyli ustalonych warunków pracy magnetometru, najpewniej istnieje takie odstrojenie, dla którego oBSE kompensuje lightshift.

W rozdziale 4 „Dynamiczny efekt Starka w parach atomowych” autorka wykorzystała najbardziej skomplikowany układ doświadczalny aby zmierzyć lightshift wywołany wiązką zajmującą mały obszar parafinowanej komórki.

Autorka opisuje dwuwymiarowy model analityczny pozwalający wyznaczyć średni lightshift dla atomów oddziałujących z wiązką o płaskim rozkładzie natężenia. Następnie opisuje model Monte Carlo który zawiera właściwie takie same przybliżenia i także jest dwuwymiarowy.

Dalej następuje opis układu doświadczalnego, który zawiera 3 stabilizowane lasery. Z rysunku 4.4 trudno wywnioskować ustawienie osi cylindrycznej komórki ale jest on sprzeczny z ustawieniem wzdłuż z które założono w symulacji.

Rysunek 4.5 prezentuje wyniki symulacji oraz pomiarów. Autorka prezentuje także (rys 4.6) wyniki z pracy [30], której jest współautorką. Precyzja tych pomiarów na poziomie mHz zrobiła na mnie bardzo pozytywne wrażenie. Ze składu autorów wnioskuję, że praca [30] nie była wykonana na UJ; czy układ z rysunku 4.4 znajdował się na UJ?

Rozumiem, że zmierzone przesunięcia są zgodne ze wzorem (4.9). Brakuje mi w tym rozdziale jakiegoś, chociażby słownego, omówienia przewidywań dla sytuacji trójwymiarowej.

Opisana na stronie 76 próba dopasowania zależności liniowej do uzyskanych wyników kończy się odkryciem słabych efektów interferencyjnych w okienkach komórki. Wynik ten pozostawia znaczne poczucie niedosytu. Kamera (beam profiler) powinna umożliwić jednoznaczne stwierdzenie czy obserwowany efekt jest pochodzenia interferencyjnego, czy nie, zamiast czczych spekulacji.

Zakładając, że autorka rozpoczęła doktorat bezpośrednio po ukończeniu studiów obliczam że trwał on 5.5 roku. W tym okresie opublikowała jedną pracę [30], w której jest trzecim z 6 autorów oraz przygotowała jeden manuskrypt (nie wykazany w bibliografii arXiv:1709.07194), gdzie jest pierwszym z 3 autorów wraz z promotorami. Manuskrypt ten zawiera wyniki drugiego rozdziału pracy.

Na lata doktoratu autorki przypadła przeprowadzka laboratoriów do nowej lokalizacji, co zapewne było znacznym zaburzeniem i odsunięciem postępu prac w czasie. Ewidentnie doktorat pozwolił autorce zapoznać się z szerokim wachlarzem metod doświadczalnych i teoretycznych. Pozytywnie oceniam ich wykorzystanie w doktoracie. Autorka zebrała setki bardzo precyzyjnych widm, które stały się solidnym fundamentem przedstawionej rozprawy i choć czasem nie pasują do teoretycznej nadbudowy, to ich wartość oceniam wysoko. Pewne ślady po znoju ale i optymizmie towarzyszącym pomiarom dostrzegam na rys. E.4.

Rozprawa ma w mojej ocenie dużą wartość jako pomoc dydaktyczna. Przedstawione w niej wyniki eksperymentalne oraz niedoskonałe modele są doskonałym materiałem do konstrukcji skomplikowanych modeli wielopoziomowych, zarówno perturbacyjnych jak i nieperturbacyjnych, co jest przy obecnej dostępności narzędzi algebry symbolicznej dosyć proste. Przedstawiona praca dostarcza bardzo cennego materiału do weryfikacji poprawności takich modeli w ważnym i eleganckim przypadku. Problemy, o które ociera się rozprawa są

obecne w nowoczesnych zastosowaniach i technologiach kwantowych. Co prawda nie powiemy już o przesunięciu poziomów ani nie będziemy mierzyć widm, a w zamian za to obliczamy informacje Fishera i estymujemy fazę, ale wewnętrzne potrzeby pozostają takie same: dobre równania Liouville'a.

Rozprawa ma także dużą wartość dla inżynierów magnetometrologów, którzy dzięki zebrany precyzyjnym wynikom i szerokiej gamie informacji teoretycznych będą w stanie skonstruować precyzyjne przyrządy. W rozprawie autorka wskazuje, które schematy pomiaru (ogólnie z obracającymi się falami) wolne są od błędów systematycznych wywołanych przez badane przez nią efekty, a także jakich błędów systematycznych spodziewać się w tańszych konstrukcjach z oscylującymi polami skalarnymi.

Reasumując stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa stanowi dokumentację wiedzy teoretycznej oraz przedstawia samodzielne rozwiązanie problemu naukowego precyzyjnego pomiaru i modelowania przesunięć poziomów przez autorkę.

Stwierdzam, że rozprawa spełnia wszystkie kryteria ustawowe i wnioskuje o dopuszczenie mgr. Julii Sudyki do dalszych etapów przewodu doktorskiego, a w szczególności do publicznej obrony.

Wojciech Wądrocki

