



dr hab. Łukasz Cywiński, prof. IF PAN
Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk
Al. Lotników 32/46
02-668 Warszawa
lcyw@ifpan.edu.pl

Warszawa, 21 VIII 2025

Recenzja pracy doktorskiej mgr. Julii Amorós-Binefa
p.t.: "Real-time optimal quantum control for atomic magnetometers with decoherence"

Rozprawa doktorska magister Julii Amorós-Binefa została przygotowana w dyscyplinie nauki fizyczne na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pod opieką dr. Jana Kołodyńskiego oraz prof. dr. hab. Konrada Banaszka. Została ona napisana w języku angielskim i liczy 279 stron. Poświęcona jest one teoretycznemu opisowi śledzenia zależnych od czasu (stochastycznie lub deterministycznie) pól magnetycznych wyczuwanych przez optycznie kontrolowane i mierzone magnetometry atomowe. Motywacją do podjęcia opisanych badań teoretycznych są doświadczenia, w których chmura atomów (traktowanych jako układy dwupoziomowe, ze względu na to, iż jedynie dwa wybrane stany każdego z nich oddziałują w niezaniechanymalny sposób ze światłem laserowym wybranym do kontroli i pomiaru układu) zainicjalizowana jest w spinowym stanie ściśniętym, zaś rozszczepienie pomiędzy dwoma mającymi znaczenie poziomami zależy od zewnętrznego pola magnetycznego. Wiązka światła o częstości bliskiej rezonansowej oddziałuje z dwupoziomowymi atomami, a fotodetekcja rozproszonego przez nie światła dostarcza *ciągłego w czasie* sygnału niosącego w sobie informację o polu magnetycznym odczuwanym przez atomy w danej chwili. W rozprawie rozpatrzony jest najbardziej ogólny scenariusz estymacji pola magnetycznego, w którym wcześniej uzyskane wyniki ciągłych pomiarów światła mogą być wykorzystane do modyfikacji Hamiltonianu układu atomowego, n.p. poprzez dodanie zależnego od czasu kontrolowanego przez nas pola magnetycznego zależnego od estymowanej w danej chwili wartości pola, którego dynamikę usiłujemy odtworzyć.

Podobne układy były badane teoretycznie w przeszłości. Ważnym punktem odniesienia są np. prace [54-55] z lat 2003-2004, oraz praca [56] z 2017 roku. Kluczowym nowym elementem uwzględnionym w opisanych tu badaniach jest dekoherencja dwupoziomowych atomów, a dokładniej obecność defazowania superpozycji dwóch stanów rozszczepionych przez pole magnetyczne. Pierwszym ważnym oryginalnym wynikiem opisanym w rozprawie jest dowód tego, iż w obecności defazowania nie jest możliwym (w najogólniejszym przypadku, niezależnie od wyboru stanu początkowego układu, rodzaju ciągłych pomiarów, czy sposobu implementacji sprzężenia zwrotnego pomiędzy mierzonym sygnałem fotodetektora a kontrolą nad atomami) uzyskanie prawdziwie „kwantowego” zwiększenia precyzji estymacji pola magnetycznego, tzn. otrzymanie „heisenbergowskiego” skalowania tej precyzji z czasem pomiaru t oraz liczbą atomów N , czyli wariancji pomiędzy

estymowaną wielkością a jej prawdziwą wartością skalującą się jak $1/N^2t^3$. Drugim ważnym wynikiem, czy też zestawem wyników, jest dogłębna analiza możliwości osiągnięcia najmniejszej w takiej sytuacji możliwej wariancji, skalującej się jak $(Nt)^{-1}$ w przypadku lokalnego defazowania, dla realistycznie opisywanych układów N atomów.

Omówię teraz strukturę pracy i zawartość kolejnych jej rozdziałów. Pierwsze trzy rozdziały rozprawy, obejmujące około 130 stron, stanowią bardzo ambitnie zakrojony przeglądowy opis teoretycznych narzędzi, koncepcji i modeli wykorzystanych w rozdziałach następnych. W pierwszym rozdziale znajdujemy, między innymi, opis podstaw teorii procesów stochastycznych ze szczególnym skupieniem procesach Wienera i Poissona oraz na teorii stochastycznych całek Itô. Drugi rozdział to wstęp do ogólnej teorii estymacji bayesowskiej. Omówione są w nim kluczowe dla oryginalnych wyników rozprawy narzędzia takie jak filtry Kalmana. W rozdziale trzecim mgr Amoros-Binefa omawia rozwiniętą w latach 80-tych teorię opisu układów monitorowanych w sposób ciągły poprzez pomiar fotonów, które wcześniej oddziaływały z tymi układami. Rozdział ten zawiera szczegółowe wyprowadzenie stochastycznych równań podstawowych (stochastic Master equations) opisujących dynamikę stanu układu warunkowaną poprzez otrzymywane wyniki różnych typów pomiarów światła, które zostało rozproszone przez układ. Kolejne przybliżenia prowadzące do znanych sformułowań stochastycznych równań oraz fizyczne motywacje dla tych przybliżeń są opisane w wyczerpujący sposób. Materiał zawarty w tym rozdziale w dużej mierze zawarty jest w podręcznikach i artykułach przeglądowych, których wyczerpującą listę można znaleźć w tekście. Jest jednak jasnym, iż czytamy tu pedagogiczny opis wyprowadzenia i uzasadnienia nietrywialnego formalizmu oparty na przeliczeniu materiału z wielu źródeł przez Kandydatkę.

Rozdział czwarty zawiera opis ciekawego wyniku oryginalnego. Przedstawiono w tym rozdziale ścisłe dolne ograniczenie na dokładność estymacji fluktuującego w czasie parametru $\omega(t)$, który jest wyczuwany poprzez pomiary na układzie kwantowym, którego ewolucja zależy od wartości tego parametru. Kluczowy wynik to pokazanie, iż w obecności defazowania układu kwantowego (np. chmury N dwupoziomowych atomów), dla długich czasów estymacji jej dokładność nie wykazuje „heisenbergowskiego” wzmocnienia, wyprowadzonego np. w pracy [54] pod nieobecność takiego defazowania.

Rozdział piąty poświęcony jest zastosowaniu wszystkich wcześniej opisanych narzędzi teoretycznych do teoretycznego opisu magnetometrii przy użyciu N atomów dwupoziomowych oddziałujących ze światłem, które jest mierzone w sposób ciągły. Rozważone są przypadki pomiaru stałego pola magnetycznego oraz pola zależnego od czasu. Wyniki teoretyczne uzyskane są dla ciągłego polaru polaryzacji wiązki światła po przejściu przez chmurę atomową, z wziętym pod uwagę sprzężeniem zwrotnym pomiędzy otrzymywanym sygnałem a kontrolą nad układem atomów, bez stosowania (jak w niektórych wcześniejszych pracach) przybliżenia liniowo-Gaussowskiego. Bardziej stosowne dla realistycznie opisywanych magnetometrów atomowych przybliżenie „co-moving Gaussian” jest zaproponowane, zaś jego stosowalność jest potwierdzona przez numeryczne symulacje dla $N \sim 100$ atomów. Ilość otrzymanych wyników dotyczących estymacji zmiennego w czasie pola magnetycznego – stochastycznie ewoluującego pola opisanego jak proces Ornsteina-

Uhlenbecka oraz deterministycznie (choć nieco zaszumionych) zależnych od czasu sygnałów odpowiadających polom wytwarzanym przez ludzkie serce – robi wrażenie. Można się spodziewać, iż opisane wyniki będą dużą pomocą w przyszłych pracach doświadczalnych dotyczących zależnej od czasu magnetometrii przy użyciu chmur atomowych.

Bardzo obszerny wstęp rozprawy ma niezwykle ambitny cel: opis podstaw teorii procesów stochastycznych, stochastycznego rachunku całkowego, podstaw kwantowej metrologii, wnioskowania bayesowskiego, oraz opisu pewnej klasy układów kwantowych obserwowanych w sposób ciągły. Nie wszystkie z tych tematów udało się opisać w równie udany sposób. Przykładowo, o ile dyskusję podstaw wnioskowania bayesowskiego czytałem z dużą przyjemnością, to omówienie stochastycznego rachunku całkowego Itô bez wcześniejszego podania motywacji dla jego wprowadzenia do opisu pewnych układów fizycznych było dla mnie nieco dezorientujące. Niedosyt pozostawia również dyskusja teorii estymacji i wprowadzenie informacji Fishera w rozdziale 2.2: zaskakująco niewiele miejsca poświęcono dyskusji ograniczenia Cramera-Rao w jego standardowej oraz bayesowskiej wersji. Rozdziały o flirtowaniu bayesowskim i filtrach Kalmana zawierają bardzo szczegółowe wyprowadzenia, co nieco utrudnia lekturę przy pierwszym zetknięciu z tą tematyką, ale z drugiej strony czyni to z rozprawy pożyteczne źródło informacji dla osób chcących nauczyć się więcej o tych narzędziach. Rozdział trzeci zawiera dobrze napisany opis całej drogi, którą należy przejść, aby przekonać się, iż układ kwantowy monitorowany w sposób ciągły przez pomiary fotonów rozpraszanych na nim może być (pod pewnymi warunkami, które są szczegółowo omówione) opisany przez układ stochastycznych równań podstawowych. Chciałem podkreślić, iż lektura tego rozdziału bardzo dobitnie pokazuje osiągnięcie przez Kandydatkę obszernej ogólnej wiedzy teoretycznej w dyscyplinie nauki fizyczne.

Rozdział czwarty zawiera szczegółowy opis obliczeń prowadzących do ważnego wyniku – ograniczenia na dokładność estymacji pola magnetycznego w obecności szczególnego typu dekoherencji: defazowania superpozycji stanów, których rozszczepienie energetyczne zależy od pola. W rozdziale tym bardzo brakuje mi jasnego opisu (oraz wyprowadzenia, czy przynajmniej jego szkicu) wyniku uzyskanego we wcześniejszych pracach, w którym pod nieobecność defazowania przewidziano „heisenbergowskie” skalowanie się dokładności estymacji z liczbą atomów i czasem pomiarów. Wynik ten pojawia się w pewnym momencie jako granica zerowej dekoherencji wyniku ogólniejszego. To byłoby zrozumiałe, gdyby był on wcześniej dokładniej omówiony w rozdziałach wstępnych - ale tam również pojawia się on raczej mimochodem. Nie jest to jedyny przykład częściowego stracenia z oczu przez Autorkę rozprawy obserwacji i faktów kluczowych dla zrozumienia znaczenia nowych wyników, i zagubienia ich w gąszczu szczegółowych wyprowadzeń (których obecność jest skądinąd pożyteczna). Inny przykład dotyczy wyżej wspomnianego modelu dekoherencji sensorów: nie jest łatwo zauważyć, w którym momencie rozważania w rozdziale czwartym przestają być ogólne, a zaczynają dotyczyć szczególnego przypadku defazowania. Kluczowa relacja pomiędzy oddziaływaniem, poprzez które wartość pola ω wpływa na dynamikę układów dwupoziomowych, a operatorem generującym dekoherencję, pojawia się poniżej równania (4.25), i prowadzi natychmiast do równania

(4.26) i dalszej technicznej dyskusji. Warto było się tu zatrzymać i podkreślić znaczenie tego wyboru.

Wydaje mi się, iż prawie wszystkie krytyczne uwagi, które mam do rozprawy, wynikają z dokonanego wyboru jej struktury, oraz poziomu szczegółowości opisu. Pierwsza połowa pracy to omówienie potrzebnych narzędzi teoretycznych i szczegółowy opis modelu pomiaru ciągłego dla układu atomowego oddziałującego ze światłem, zaś oryginalne wyniki zawarte są w drugiej połowie, w której czytelnik często odsyłany jest do wcześniejszych rozdziałów. Tak rozbudowany opis podstaw teoretycznych, a następnie wszystkich szczegółów wyników, wymagał ogromnej pracy i przyniósł wiele dobrych efektów, ale kilka ważnych rzeczy zostało ostatecznie opisanych w nie do końca satysfakcjonujący sposób. Jeden przykład to wyżej wymieniona zaskakująco skrótowa (w porównaniu z zawartością sąsiednich rozdziałów) dyskusja ograniczenia Cramera-Rao, czy „stracenie z oczu” podstawowego wyniku teoretycznego dotyczącego precyzji estymacji parametru pod nieobecność dekoherencji (opisanego jako „equation one” w pracy Kandydatki i jej promotora w New Journal of Physics w 2021 roku), wykazanie nierealistyczności którego jest jednym z głównych opisanych w rozprawie osiągnięć. W tym przypadku i w paru innych, odniosłem wrażenie, iż Kandydatka opisując szczegółowo bardzo wiele wyprowadzeń i konstrukcji teoretycznych, w paru miejscach straciła perspektywę i „zamiast lasu zaczęła widzieć drzewa”.

Chciałbym też wspomnieć o kwestii umieszczenia nowych badań na tle wcześniejszych. Nie mam żadnych zarzutów do listy referencji i tego, w jaki sposób są one cytowane w tekście: wydaje mi się, iż każdy wynik uzyskany we wcześniejszych pracach jest odpowiednio oznaczony. Uważny czytelnik może odtworzyć stan wiedzy z okolic 2020 roku na podstawie lektury i zanotować listę kluczowych wcześniejszych prac teoretycznych. W rozdziale czwartym brakuje mi jednak syntetycznego opisu stanu wcześniejszej wiedzy teoretycznej i bardziej uwypuklonej dyskusji tego, co opisany w tym rozdziale wynik wnosi do niej. Chciałbym jednak podkreślić, iż rozdział piąty, zawierający wiele wyników dotyczących zaszumionych magnetometrów atomowych, jest prawie wolny od wyżej wymienionych drobnych mankamentów: zaczyna się on od wyczerpującego opisu obecnego stanu wiedzy dotyczącej magnetometrii przy użyciu gazów atomowych, a po przedstawieniu każdego z wielu ciekawych wyników możemy przeczytać dyskusję jego znaczenia dla praktycznej magnetometrii.

Ze względu na zaprezentowanie przez Kandydatkę wysokiego poziomu wiedzy teoretycznej dotyczącej wielu aspektów problematyki magnetometrii atomowej, pozwolę sobie zadać dwa pytania dotyczące możliwych rozszerzeń teorii opisanej w rozprawie:

- 1) W rozdziale trzecim pole fotonowe przed oddziaływaniem z układem jest w stanie próżni. Czy po przyjęciu jako stanu początkowego światła innego stanu koherentnego (lub ogólniej gaussowskiego) wyprowadzenie stochastycznych równań podstawowych zmienia się jakościowo? Czy możliwe jest wyprowadzenie analogicznych równań, gdy stan początkowy fotonów będzie niegaussowski, np. będzie to stan Focka?
- 2) Czy można coś powiedzieć na temat tego, jak zmodyfikować należy wyprowadzenia z rozdziału czwartego, jeżeli założymy inny charakter dekoherencji atomów

dwupoziomowych, np. założymy, iż relaksacja pomiędzy ich stanami jest bardziej efektywnym procesem niż defazownie superpozycji tych stanów?

Podsumowując swoją recenzję zgodnie z art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 z późn. zm.) z przekonaniem stwierdzam, że przedłożona rozprawa doktorska mgr Julii Amorós-Binefa spełnia wszystkie wymagania do uzyskania stopnia doktora w dyscyplinie nauki fizyczne. Stanowi ona oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydatki w dyscyplinie nauki fizyczne, oraz dowodzi umiejętności samodzielnego prowadzenia przez nią pracy naukowej w tym zakresie. Z tego powodu wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie pani Julii Amorós-Binefa do dalszych etapów jej obrony.



dr hab. Łukasz Cywiński, prof. IF PAN