

dr hab. Michał Zieliński, prof. UMK
Instytut Fizyki
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
ul. Grudziądzka 5/7
87-100 Toruń

Toruń, 10 września 2017

Recenzja pracy doktorskiej mgr. Michała Gawelczyka

pt.

Dynamika i dekoherencja spinu w nanostrukturach półprzewodnikowych

Mgr Michał Gawelczyk przygotował rozprawę doktorską pod opieką promotora, prof. dr. hab. inż. Pawła Machnikowskiego. Praca dotyczy ewolucji polaryzacji spinowej, relaksacji spinu oraz procesów dekoherencji w półprzewodnikowych kropkach kwantowych, ze szczególnym naciskiem na układy podwójnych kropek kwantowych (tzw. sztuczne molekuly, kwazi-molekuly) oraz na obecność rezerwuaru fononowego. Praca została starannie napisana w języku polskim, dobrą polszczyzną i w klarowny sposób. Jest to praca obszerna, liczy bowiem około 140 stron. Autor podzielił rozprawę na 7 głównych rozdziałów, do których dochodzą wstęp i podsumowanie oraz spisy i informacje uzupełniające (m.in. lista prezentacji konferencyjnych). Autor zadbał o typografię, kolejność odnośników, zwraca uwagę na obecność spisu rysunków i tabel, a także „Wykaz symboli wraz z objaśnieniami”. Bardzo obszerna bibliografia liczy 255 pozycji. Zarówno objętość tej listy, jak i wybór pozycji literaturowych świadczy o bardzo dobrym rozeznaniu autora w literaturze przedmiotu.

Wyniki prezentowane w pracy charakteryzują się wysoką jakością naukową i zostały już w zdecydowanej większości opublikowane przez mgr. Michała Gawelczyka w szanowanych czasopismach fizycznych. Cztery prace ukazały się w *Physical Review B* (czynnik wpływu 3.763), jedna praca w *Semiconductor Science and Technology* (czynnik wpływu 2.654) oraz jedna praca w *Acta Physica Polonia A* (czynnik wpływu rzędu 1). Poza jedną z tych prac mgr Michał Gawelczyk jest pierwszym autorem, co z pewnością zasługuje na podkreślenie i wyróżnienie. Kolejne dwa, bezpośrednio powiązane z pracą doktorską, artykuły są na etapie przygotowań, przy czym jeden manuskrypt jest ogólnie dostępny na stronach arXiv. Zwraca również uwagę bogata, jak na ten etap kariery naukowej, lista siedmiu pozostałych prac powstałych, m.in. we współpracy z dobrymi grupami doświadczalnymi. Mgr Michał Gawelczyk najwyraźniej nie prowadzi profilu w Google Scholar, ma jednak konta w systemach Publons i Orcid, a zawarte tam informacje na temat publikacji są spójne z tymi z rozprawy doktorskiej. Trudno na tym etapie pracy naukowej przywiązywać zbyt wielką uwagę do wskaźników bibliometrycznych, takich jak h-index. Prace mgr. Michała Gawelczyka jednak już zyskały rozpoznawalność i są cytowane przez innych autorów. Myślę, że liczba cytowań tych artykułów będzie systematycznie rosła w nadchodzących latach.

Moją uwagę zwraca również bogata aktywność konferencyjna mgr. Michała Gawelczyka. Wygłosił on 13 referatów na konferencjach naukowych (tak w kraju, jak i za granicą) oraz 2 referaty w innych ośrodkach naukowych (na Uniwersytecie Warszawskim oraz na UMK w Toruniu). Tę bogatą listę wystąpień uzupełnia lista 20 plakatów, co jest wynikiem zdecydowanie wyróżniającym.

Analizowaną rozprawę doktorską można podzielić na dwie zasadnicze części. Pierwsza obejmuje rozdziały 1 oraz 2, i pełni rolę wstępu teoretycznego. Pierwszy kilkustronicowy zawiera ogólne wprowadzenie do tematyki pracy. Rozdział ten jest merytorycznie interesujący, choć znajdują się w nim

sformułowania nieco żargonowe. W szczególności sekcja 1.2.3 mogłaby być moim zdaniem napisana nieco klarowniej i obszerniej.

Rozdział 2 liczy 37 stron i jest najbardziej rozbudowanym i najdłuższym w pracy. W rozdziale tym autor wprowadza formalizm matematyczny oraz opisuje elementy modelu teoretycznego. Z pozoru można by uznać fragmenty tego rozdziału za niepotrzebne. Uważam jednak, że rozdział ten jest cenną kompilacją wiedzy z przedmiotu i może być cenną pomocą dydaktyczną dla czytelników rozpoczynających badania naukowe w tej dziedzinie. Dodatkowo obecność treści zawartej w Rozdziale 2 czyni pracę w zasadzie kompletną, bez konieczności żmudnego przeszukiwania artykułów źródłowych. Jedynym moim zastrzeżeniem jest zachwiane proporcji wielkości tego rozdziału w stosunku do pozostałych.

W rozdziałach 3-7 przedstawiona jest zasadnicza część badawcza pracy doktorskiej. Ta część pracy oparta jest na treści kolejnych artykułach naukowych, których mgr Michał Gawelczyk był współautorem, w kilku miejscach uzupełniona o wyniki nieopublikowane. Co ważne, w informacji rozpoczynającej każdy rozdział autor klarownie określa swój wkład oraz szczegółowo omawia rolę współautorów. Rozdziały 3 i 4 opisują kolejno efekty dekoherencji spinu w procesach jego optycznej inicjalizacji oraz dynamikę spinów w nanostrukturach zbudowanych z podwójnych kropek kwantowych. Rozdział 5 także dotyczy podwójnych kropek kwantowych, ale omawia szybkość tunelowania z efektem odwrócenia spinu. Z kolei rozdział 6 opisuje dekoherencję spinu elektronu w trakcie jego relaksacji orbitalnej w nanostrukturze. Rozdział 7 analizuje selektywne ze względu na spin tunelowanie elektronów w otoczeniu fononowym oraz możliwość zbudowania „diody” spinowej („filtra spinowego”) opartej o podwójne kropki kwantowe.

W ramach przyjętej przez autora metody badawczej poszczególne efekty są systematycznie analizowane pod kątem różnych wkładów (np. efekt piezoelektryczny, wkłady od potencjałów deformacyjnych itp.). Systematycznie badana jest również rola różnych zjawisk fizycznych (np. wpływ temperatury, zależność od zewnętrznych pól). Od strony warsztatowej Kandydat do stopnia doktora jako bazowe traktuje równanie fundamentalne (ang. *master equation*), w różnych wariantach (m.in. równanie Lindblada). Zwraca uwagę bardzo dobre przygotowanie matematyczne i informatyczne Kandydata. W omawianej pracy doktorskiej formułowane i rozwiązywane są trudne zagadnienia teoretyczne. Co bardzo ważne rozwiązania tych problemów obejmują zarówno nietrywialne podejście analityczne (wyprowadzenia i przekształcenia złożonych równań, m.in. hamiltonianu piezoelektrycznego oddziaływania nośników z fononami), zdolność do budowania uproszczonych, acz dających wgląd w fizykę zagadnienia modeli (np. oszacowania perturbacyjne), jak i złożone podejście numeryczne (rozwiązywanie równań różniczkowych, obliczenia metodą k.p). Wszystko to czyni to pracę bogatą i różnorodną, a mgr. Michała Gawelczyka świetnym moim zdaniem kandydatem do stopnia doktora.

Jak wspomniałem wyżej, rozprawa jest obszerna i zawiera kilka istotnych wyników. Do najważniejszych moim zdaniem należą, m.in.: teoretyczne przewidywania wystąpienia tzw. czystej dekoherencji spinu w procesach relaksacji nośników w polu magnetycznym, obliczenia szybkości przejść tunelowych (ang. *transition rates*) z odwróceniem spinu w kwantowych kwazi-molekułach, zrozumienie źródeł dekoherencji spinu w eksperymencie z inicjalizacją spinu oraz stworzenie modelu czasowej ewolucji spinu dla kwazi-molekuł w polu magnetycznym. Dla omawianych procesów utraty koherencji w optycznej inicjalizacji spinu, czy podczas tunelowania elektronu pomiędzy dwiema kropkami kwantowymi Kandydat czyni ciekawą analogię do eksperymentu z dwiema szczelinami z tym, że rolę obserwatora pełni tutaj sieć krystaliczna.

Autor w rozdziałach 3-7 omawia ciekawe zagadnienia fizyczne. Każdy z tych rozdziałów jest oparty w zasadzie (z wyjątkiem 7) o już opublikowane, recenzowane artykuły wydrukowane w dobrych czasopismach naukowych. Dodam jednak, że wybór takiej prezentacji wyników sprawia, że każdy rozdział jest niejako odrębną mikro-pracą ze swoim wstępem teoretycznym, analizą rezultatów itp. Sprawia to jednak, że omawiane wyniki są dość rozproszone, brak jest ich pewnej syntezy (nawet w podsumowaniu wyniki te przedstawione są jako osobne zagadnienia), brak jest też kompleksowego porównania z doświadczeniem.

Od strony warsztatowej po lekturze pracy nie jest dla mnie jasne, w których przypadkach wystarcza np. rozwiązywanie równania Lindblada, a kiedy trzeba wyjść poza przybliżenie Markowa. Niejasne są też dla mnie powody, dla których w rozdziale 6 analizowana jest inna geometria (ang. *trumpet shape*) kropek kwantowych niż w rozdziale 5. Stosowane przez Kandydata wykresy logarytmiczne (np. w rozdziale 5) pozwalają na porównanie wielkości różniących się o wiele rzędów wielkości, ale z drugiej strony jeśli wkłady do rozwiązań różnią się kilkoma rzędami wielkości, to być może warto pominąć to co jest „zaniedbywalne”. W kilku miejscach Kandydat używa moim zdaniem zbyt dowolnie określenia „pasma”, mając na myśli „poziom” w kropce kwantowej. Powyższe uwagi w żadnym stopniu nie wpływają jednak na moją bardzo wysoką ocenę recenzowanej rozprawy.

Podsumowując, pozwolę sobie zadać następujące pytania:

- Czy Kandydat mógłby syntetycznie omówić porównanie uzyskanych wyników z doświadczeniem?
- Jak wyglądają obecnie perspektywy eksperymentalnej kontroli dekoherencji w kropkach kwantowych (i w podwójnych kropkach kwantowych) za pomocą zewnętrznych pól?
- Jaki jest wpływ rozkładu składu chemicznego tzw. *trumpet shape* na dekoherencję spinu w trakcie tunelowania w podwójnych kropkach kwantowych?
- Czy znane ograniczenia metody k.p mogą mieć wpływ na jakość uzyskanych wyników? Na ile wiarygodne są g-czynnik uzyskane tą metodą w zestawieniu np. z doświadczeniem? Wydaje się to być kluczowe z punktu widzenia wyników w rozdziałach 5-7.
- W jakich z analizowanych przez Kandydata scenariuszach obliczeń należy wyjść poza przybliżenie Markowa i dlaczego? A z drugiej strony: kiedy można istotnie uprościć obliczenia, stosując jak najprostsze modele, bez konieczności rozwiązywania złożonych równań?
- Czy efekty wielociałowe (oddziaływanie elektronów i dziur: obecność ekscytonów) będą miały (i jeśli już to jaki) wpływ na wyniki omawiane w rozdziałach 5 i 6?

Podsumowanie:

Przedstawiona przez mgr. Michała Gawelczyka rozprawa doktorska dotyczy ważnej tematyki badań, związanej zarówno z fizyką nanostruktur, jak i potencjalnymi zastosowaniami nanostruktur w szeroko rozumianej informatyce kwantowej. Na treść pracy złożyło się kilka już opublikowanych prac w dobrych czasopismach fizycznych, takich jak *Physical Review B*. Prace te już zostały zauważone przez środowisko naukowe. Rozprawa doktorska stawia wiele nowych pytań i może stanowić inspirację do dalszych badań w tej tematyce. Lektura tej pracy była bardzo ciekawa i pozwoliła mi bliżej zapoznać się z aspektami fizyki kropek kwantowych, dotąd mi nieznanymi.

Z pełnym przekonaniem wnoszę o dopuszczenie Pana mgr. Michała Gawelczyka do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Rozprawa zwraca uwagę swoją jakością naukową, stopniem trudności i wagą poruszanych zagadnień, należy też docenić warsztat matematyczno-informatyczny kandydata. Z powyższych powodów wnoszę o wyróżnienie tej pracy doktorskiej.

dr hab. Michał Zieliński, prof. UMK