

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

Warszawa, 07 XII 2018

Recenzja pracy doktorskiej
mgr. inż. Piotra Busza
pt.: "Korelacje spinowe i detekcja kwantowego splątania par Coopera metodą
nierówności Bella i świadka splątania"

Rozprawa doktorska magistra Piotra Busza dotyczy problemu wykrywania splątania spinowego rozdzielonych przestrzennie elektronów, które pojawiły się w odpowiednio zaprojektowanej nanostrukturze na skutek procesu ekstrakcji pary Coopera z nadprzewodnika będącego w kontakcie z podwójną kropką kwantową. Doświadczalne i teoretyczne prace nad tym zagadnieniem są prowadzone w wielu miejscach na świecie (główne w Europie) od kilkunastu lat. Podstawowa fizyka tego zjawiska jest już dobrze rozumiana, ale w rozprawie Autor skupił się na modelu detekcji, który dotąd był przedmiotem tylko kilku prac. Kluczowym elementem tego modelu jest sprzężenie pomiędzy każdą z kropek kwantowych a ferromagnetyczną elektrodą, scharakteryzowaną przez kierunek magnetyzacji, oraz polaryzację spinową elektronów na powierzchni Fermiego. Takie elektrody są filtrami spinowymi dla elektronów wpływających do nich – w granicznym przypadku pełnej polaryzacji, tylko elektrony o polaryzacji spinowej zgodnej z polaryzacją elektrody mogą do niej wpłynąć.

Rozprawa ma charakter teoretyczny, choć nacisk w badaniach położony jest na nawiązanie bliskiego kontaktu z doświadczeniem, poprzez wzięcie pod uwagę wielu realistycznych cech rozważanych układów. Tematycznie znajduje się ona na pograniczu stosowanej informatyki kwantowej (jako że dotyczy detekcji splątania w możliwie najbardziej efektywny sposób, biorąc pod uwagę realistyczne cechy rozważanego układu), oraz teorii transportu w nanostrukturach nadprzewodnik/półprzewodnik/ferromagnetyk. Oparta jest ona na trzech opublikowanych artykułach (jeden w Phys. Rev. B, dwa w Acta Physica Polonica), zawiera ona też nieopublikowane jeszcze wyniki (według informacji z listy odnośników artykuł jest w przygotowaniu).

Głównym celem rozprawy było opracowanie najbardziej efektywnych i praktycznych metod wykrywania splątania spinowego w wyżej wymienionym układzie. Autor rozważył pomiary korelacji prądów płynących do dwóch elektrod dla różnych względnych ustawień ich magnetyzacji, oraz związek pomiędzy korelacjami spinowymi dwóch elektronów a całkowitym prądem wypływającym z nadprzewodnika do podwójnej kropki kwantowej a następnie do dwóch elektrod ferromagnetycznych. O ile dla pierwszego przypadku Autor bardzo pobieżnie opisał teorię transportu i skupił się jedynie na dość prostych rozważaniach dotyczących standardowych metod wykrywania splątania, to dla drugiego przypadku (będącego tematem pracy w Phys. Rev. B z 2017 r.) przedstawił znacząco więcej wyników teoretycznych dotyczących przepływu prądu w układzie, związku mierzalnych wielkości z

korelacjami spinowymi elektronów, oraz wykrywania splątania przy zastosowaniu wielu schematów pomiarowych (część z tych wyników jeszcze nie została opublikowana). Mogę stwierdzić, iż cel badań został osiągnięty, i w rozprawie opisane są wyniki będące zauważalnym wkładem w rozwój badań nad zagadnieniem rozdzielania par Coopera i wykrywania splątania uzyskanych w ten sposób przestrzennie rozdzielonych par elektronów.

Omówię teraz dokładniej zawartość pracy, skupiając się na głównych wynikach, oraz na najbardziej rzucających mi się w oczy niedociągnięciach i brakach rozprawy.

Pierwszy rozdział zawiera krótki wstęp do informatyki kwantowej: parę stron informacji o fizycznych realizacjach kubitów, strona o algorytmach kwantowych, oraz omówienie czystych i mieszanych stanów układu dwuczęściowego. Co do pierwszej części rozdziału, mam dwa komentarze. 1) „Wrażliwość fotonów na oddziaływanie z otoczeniem” nie jest największym problemem dla fotonicznych technologii kwantowych – przeciwnie, to słabe sprzężenie fotonów z resztą świata jest właśnie przeszkodą, gdyż utrudnia wykonanie dwukubitowych operacji logicznych. Innymi problemami są za to trudności związane z generacją fotonów (pojedynczych oraz też splątanych) „na żądanie” w danej chwili czasu, oraz efektywność fotodetektorów. 2) Podsumowanie kwestii koherencji spinu w kropkach kwantowych jednym cytowaniem pracy sprzed kilkunastu lat jest raczej powierzchowne. Lepiej nie napisać na temat o zupełnie pobocznym znaczeniu dla rozprawy, niż podać wyrwany z kontekstu czas koherencji przewidziany dla jednej konkretnej nanostruktury.

Bardziej poważną uwagę koncepcyjną mam do podrozdziału zawierającego opis stanów splątanych układu dwóch spinów. Pod równaniem 1.2 Autor pisze, że „indeksy 1 i 2 oznaczają pierwszy i drugi elektron w układzie”. Pod koniec rozdziału możemy za to przeczytać, iż „w dalszej części korzystano z powyższych definicji (...) zamieniając niekiedy indeksy 1 i 2 odpowiednio na L i R, oznaczające lewą i prawą cząstkę”. Wydaje mi się, iż Autor dość nieostrożnie miesza tzw. „splątanie cząstkowe” (wynikające z nierozróżnialności elektronów i antysymetryzacji wielocząstkowych stanów kwantowych ze względu na zamianę elektronu 1 i 2) ze splątaniem modowym, właściwym w przypadku rozważań kwantowo-informatycznych. W drugim przypadku mamy do czynienia z sytuacją, w której rozważamy przestrzennie rozdzielone podukłady, stan każdego podukładu może być rozważany oddzielnie, a przestrzeń Hilberta całego układu to iloczyn tensorowy przestrzeni Hilberta podukładów. Sytuacja, w której mamy dwie kropki (L i R) i wiemy, że w każdej z nich jest *dokładnie* jeden elektron, pozwala na opis układu przy użyciu stanów z przestrzeni będącej iloczynem tensorowym przestrzeni spinu elektronu w kropce L oraz spinu elektronu w kropce R. Jeżeli nie jest spełniony warunek rozdzielania przestrzennego i nie ma dobrze określonych „modów”, które mogą być lokalnie manipulowane i odczytywane, sytuacja jest bardziej skomplikowana. Przykładowo, singletowy stan dwóch elektronów znajdujących się na orbitalu o najniższej energii *w tej samej kropce*, czyli stan sugerowany przez równanie 1.2 (w którym brakuje innych niż spinowe indeksów charakteryzujących stany kwantowe), *nie jest* splątany modowo (J. Schliemann et al., *Quantum correlations of two-fermion systems*, Phys. Rev. A **64**, 022303). Zrozumienie tych subtelności ma podstawowe znaczenie dla całego zagadnienia generowania z par Coopera splątanych elektronów: splątanie o charakterze użytecznym dla informatyki kwantowej pojawia się dopiero po przestrzennym rozdzieleniu pary Coopera, a dobre zrozumienie różnicy pomiędzy indeksami 1 i 2 („jeden i drugi elektron”) a indeksami takim jak L i R jest tu kluczowe.

W drugim rozdziale znajdujemy omówienie podstaw fizyki i opisu teoretycznego nadprzewodników, które wprowadza czytelnika w tematykę wyciągania par Coopera z nadprzewodnika. Omówienie układów, w których może nastąpić przestrzenne rozdzielanie par Coopera, zasad ich działania, oraz obecnego stanu badań doświadczalnych nad tym tematem, jest bardzo dobrze napisane. Wiele nauczyłem się na temat tej dziedziny badań czytając ten rozdział.

Trzeci rozdział zawiera omówienie elementów teorii splątania kwantowego, a w szczególności jego wykrywania poprzez łamanie nierówności CHSH oraz wykorzystanie świadków splątania. Dyskusja pomiaru korelacji spinowych w układzie dwóch spinów w przypadku zastosowania nieidealnych detektorów polaryzacji spinowej wprowadza ważny dla rozprawy element brania pod uwagę realistycznych ograniczeń układów fizycznych, w których badane są takie korelacje dla elektronów płynących z nadprzewodnika do pary elektrod. Niestety, rozdział ten rozpoczęty jest w dość niefortunny sposób: na pierwszej stronie możemy przeczytać, iż „pomiar wykonany na jednej z takich (tzn. splątanych) cząstek może **natychmiast** wpłynąć na stan kwantowy drugiej bez względu na to, w jakiej odległości się znajduje”. Należy podkreślić, iż w przypadku odległych cząstek, „natychmiastowość” wpływu zdarzenia dotyczącego jednej cząstki na stan drugiej *nie ma sensu*, co jest podstawowym wnioskiem ze szczególnej teorii względności. Stany splątane oczywiście wykazują nielokalne korelacje, ale używanie sformułowań takich jak „natychmiastowy wpływ” jest poważnym koncepcyjnym błędem fizycznym. Dobrze wiadomo, iż przewidywania mechaniki kwantowej dla wyników pomiarów stanu splątanego są całkowicie zgodne z STW, i nie zachodzi żaden przekaz informacji pomiędzy podukładami wywołany pomiarami (przekaz taki oznaczałby komunikację z potencjalnie nadświatłną prędkością).

Dodatkowa uwaga dotyczy omówienia kryterium Peresa-Horodeckich. Możemy przeczytać, iż „stan jest separowalny wtedy i tylko wtedy, gdy wszystkie wartości własne częściowej transpozycji zastosowanej do podukładu R są nieujemne”. To jest prawda jedynie dla układu o całkowitym wymiarze przestrzeni Hilberta mniejszym od 7 (n.p. dla dwóch kubitów, dla których całkowity wymiar to 4). W ogólnym przypadku kryterium P-H, rozumiane jako *wjemność* przynajmniej jednej wartości własnej częściowo transponowanej macierzy gęstości, jest warunkiem *wystarczającym* dla splątania. Dodatność wszystkich wartości własnych w tymże ogólnym przypadku nie jest wystarczająca dla separowalności – istnieją stany „bound entangled” o dodatniej częściowej transpozycji.

Uwagi te pokazują, iż dyskusja dotycząca teorii splątania jest trochę powierzchowna, zaś Autor powinien był spędzić nieco więcej czasu uważnie analizując tą nietrywialną koncepcyjnie dziedzinę.

W czwartym rozdziale rozpoczyna się omówienie wyników badań Autora. Tematem rozdziału jest detekcja splątania spinowego elektronów pochodzących z rozdzielonych przestrzennie par Coopera poprzez pomiar korelacji prądów elektrycznych. Teoria wiążąca mierzone korelacje prądów wpływających do spinowo spolaryzowanych kontaktów ze splątaniem spinowym została wcześniej rozwinięta w pracach innych autorów (n.p. w cytowanych artykułach 130 i 136). Oryginalnym wkładem Autora jest przeanalizowanie wpływu nieidealnych detektorów spinowo spolaryzowanych prądów na wykrywanie splątania przy użyciu nierówności CHSH i dwóch typów świadków splątania, oraz optymalizacja świadków splątania dla detektorów o różnej polaryzacji. Badania te nie były skomplikowane,

ale ich wyniki mogą być pomocne dla eksperymentatorów planujących doświadczenia z użyciem magnetycznych elektrod. Muszę jednak przyznać, iż jestem trochę zaskoczony bardzo pobieżnym omówieniem fizyki transportu, która stanowi podstawę rozpatrywanego zjawiska. Czytelnik zainteresowany teorią opisującą korelacje prądów elektrycznych w rozważanym układzie odesłany jest do zbyt krótkiego dodatku A, który w kluczowym momencie odsyła go do prac 130 i 131. Kwestia nazbyt zdawkowego opisu teorii transportu elektronowego w rozważanych układach mezoskopowych zostanie poniżej wspomniana ponownie.

Rozdziały piąty i szósty zawierają teoretycznie najciekawszą część wyników Autora. Oparte one są na pracy opublikowanej w Phys. Rev. B w 2017 roku. W rozdziale piątym znajdujemy teoretyczną analizę przepływu prądu przez układ dwóch kropek kwantowych, do których wstrzykiwane są elektrony z rozrywanej pary Coopera. Tym razem jednak nie są analizowane korelacje prądów płynących z każdej z kropek do znajdującego się obok spinowo spolaryzowanego kontaktu, ale całkowity prąd płynący z nadprzewodnika, przez kropki, do obu kontaktów. Pomiar takiego całkowitego prądu jest o wiele łatwiejszy niż pomiary korelacji prądowych. Głównym wynikiem jest wyprowadzenie zależności tego prądu od „napięcia transportowego” (czyli przyłożonego napięcia wspólnego dla obu kontaktów) i od względnego ustawienia polaryzacji kontaktów, w przypadku wstrzykiwania z nadprzewodnika elektronów w spinowym stanie singletowym. Możemy też tu znaleźć ciekawą analizę wpływu ferromagnetycznego efektu bliskości (tzn. efektywnego pola wymiennego wytworzonego w kropce przez tunelowo sprzężony do niej kontakt ferromagnetyczny) na dynamikę spinu elektronu w kropce, oraz na możliwość powiązania płynącego przez układ prądu ze stanem spinowym wstrzykiwanych elektronów. Ponownie jednak odczuwam pewien (nieco mniejszy tym razem) niedosyt związany z opisem teorii transportu. Kluczowe równanie główne 5.15, oraz wyrażenie 5.26 na natężenie prądu w danej elektrodzie, pojawiają się bez opisu wyprowadzenia, są jedynie opatrzone odnośnikami do nieopublikowanej pracy 142. W rozdziale szóstym uzyskane wyniki są następnie wykorzystane do pokazania, iż w wielu przypadkach obecność splątania spinowego elektronów może być wykryta przez analizę zestawu pomiarów całkowitego prądu, przeprowadzonych dla kilku względnych ustawień polaryzacji detektorów. Rozdział siódmy zawiera dalsze wyniki tego typu dla różnych rodzajów świadków splątania.

Główną wadą rozprawy wydaje mi się brak pogłębionego opisu podstaw teorii procesów transportu elektronowego, której zastosowanie do układu nadprzewodnik – podwójna kropka – kontakty magnetyczne jest kluczowe dla całej pracy. Tematyka rozprawy jest interdyscyplinarna: łączy ona w sobie zagadnienia z informatyki kwantowej oraz z fizyki transportu w nanostrukturach. Bardzo dobra praca takiego typu powinna być pouczającą lekturą dla czytelników posiadających głębszą wiedzę z tylko jednej z tych dziedzin. Rozprawa zawiera rozdziały wstępne poświęcone splątaniu i jego wykrywaniu, i pomimo kilku opisanych powyżej problemów, mogą one być dość pouczające dla czytelnika, który nie zetknął się bliżej z teorią splątania. Szkoda, że w pracy nie ma rozdziału wprowadzającego czytelników w podstawy opisu przepływu prądu przez nanostruktury. Dobrze byłoby móc umieścić w szerszym kontekście takie terminy jak „reżim tunelowania sekwencyjnego” i wyjaśnić ich fizyczne znaczenie informatykowi kwantowemu, który z tejże rozprawy chciałby

nauczyć się trochę teorii transportu w nanostrukturach, w których można badać takie zjawiska jak splątanie.

Mimo powyżej opisanych niedoskonałości rozprawy, stanowi ona oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, i pokazuje ona, iż Autor posiada umiejętność samodzielnej pracy naukowej. Wnoszę o dopuszczenie mgr. inż. Piotra Busza do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



dr hab. Łukasz Cywiński, prof. IF PAN