

Sprawozdanie merytoryczne
z realizacji projektu badawczego zamawianego Nr PBZ-MIN-008/P03/03
pt. „Informatyka i inżynieria kwantowa”
w okresie od 28.11.2004 r. do 27.05.2007 roku

kierownik projektu: doc. dr hab. Lech Mankiewicz, Centrum Fizyki Teoretycznej PAN, Aleja Lotników 32/46, 02-668 Warszawa, email: lech@cft.edu.pl

Rozwój w ciągu ostatnich 20-tu lat technik informatycznych w zakresie miniaturyzacji i oprogramowania wywołał rewolucyjne zmiany obejmujące obecnie niemal wszystkie dziedziny życia społecznego i gospodarczego. W badaniach naukowych sukces informatyki pozwala na przełamywanie barier złożoności i decyduje o niebywałym postępie. Szybkie przetwarzanie ogromnych ilości informacji staje się obecnie priorytetowym zagadnieniem warunkującym dalszy rozwój niemal każdej dziedziny życia. Równocześnie z rozwojem technik informatycznych nastąpił w ostatnich latach gwałtowny rozwój technologii i badań podstawowych w obszarze mikroświata, gdzie prawa fizyki kwantowej wyznaczają zupełnie nowe i nie w pełni jeszcze rozpoznane perspektywy. Nanotechnologia i spintronika to przykładowe szeroko znane hasła, za którymi kryje się nadzieja na przełomowe techniczne rozwiązania w najrozmaitszych dziedzinach o ogromnym praktycznym znaczeniu. Już obecnie wiele nowych konstrukcji np. w motoryzacji, elektronice, medycynie wykorzystuje z sukcesem nanotechnologiczne rozwiązania o nieosiągalnych poprzednio możliwościach.

Na skutek znaczącego postępu badań w dziedzinie podstaw mechaniki kwantowej, pojawiła się też możliwość przetwarzania, zapisu i przesyłania informacji na poziomie czysto kwantowym, tj takim gdzie wszystkie aspekty zjawisk informatycznych podlegają prawom mechaniki kwantowej. Badaniom teoretycznym w tej dziedzinie towarzyszą coraz aktywniejsze prace doświadczalne, rezultaty których wskazują na zbliżający się kolejny rozdział w rozwoju technik informatycznych, a być może i nową rewolucję informatyczną. Od połowy lat dziewięćdziesiątych obserwuje się gwałtowne przyspieszenie badań w nowej interdyscyplinarnej dziedzinie nazywanej ogólnie informatyką kwantową. Obejmuje ona wielokierunkowe badania podstawowe w zakresie teorii informacji, oraz jej przesyłania i przetwarzania w nowy, nieosiągalny klasycznie sposób .

Celem projektu badawczego zamawianego było zbadanie możliwości stojących przed informatyką i inżynierią kwantową w zakresie kwantowych metod przetwarzania informacji oraz rozbudowa krajowego potencjału naukowego w tej dziedzinie, w której polscy naukowcy mają znaczący dorobek w skali światowej.

Całe spektrum ważnych nurtów badań w zakresie inżynierii i informatyki kwantowej rozwijanych przez poszczególne ośrodki usystematyzowano wokół I-VI punktów szczegółowych projektu zamawianego:

- I. Manipulacje kwantowe spułapkowanymi jonami i analiza ich zastosowania w informatyce kwantowej
- II. Kwantowe przetwarzanie informacji przy wykorzystaniu własności ultrazimnych skończonych układów atomowych (kondensaty Bosego-Einsteina, zimne mieszaniny fermionowo-bozonowe i możliwości ich koherentnego sterowania)

- III. Teoria splątania kwantowego – teoretyczne podstawy informatyki kwantowej (geometria stanów splątanych, splątanie fotonów, kwantowa teleportacja, kwantowa teoria informacji, relatywistyczne aspekty splątania)
- IV. Realizacja bramek logicznych komputera kwantowego w technologii kropek kwantowych (dekoherencja orbitalnych i spinowych stopni swobody w kropkach kwantowych, metody ich sterowania)
- V. Inżynieria funkcji falowych w nowych realizacjach nanotechnologicznych i w spintronice (rozwój teorii w kierunku urządzeń jedno-fotonowych/jedno-elektronowych, koherentnych manipulacji spinem i wykorzystania kwantowych efektów w układach mezoskopowych)
- VI. Topologiczne i stochastyczne metody dla nowych układów kwantowych w informatyce (układy hallowskie, sieci optyczne, topologia i chaos w mechanice kwantowej a dekoherencja)

Wniosek o projekt badawczy zamawiany „Informatyka i Inżynieria Kwantowa” stanowił pakiet trzech ofert A, B, C nazwanych przez nas gałęziami A, B, C.

Zgodnie z harmonogramem, projekt badawczy zamawiany obejmował 42 zadania badawcze oraz 3 zadania dotyczące zakupu aparatury. Ilość zadań nie została zmniejszona pomimo zmniejszenia przez Ministerstwo budżetu projektu do połowy kwoty wnioskowanej w ofercie złożonej w konkursie.

Poniżej przedstawiam najważniejsze wyniki uzyskane w poszczególnych grupach zagadnień I-VI.

I. Manipulacje kwantowe splątkowanymi jonami i analiza ich zastosowania w informatyce kwantowej

Postęp metod doświadczalnych w dziedzinie splątkowania i chłodzenia najpierw jonów, a następnie atomów obojętnych doprowadził do wyłonienia się nowej dziedziny fizyki, zwanej inżynierią kwantową. Potrafimy dziś wyizolować pożądaną, niewielką liczbę jonów i przeprowadzać z nimi subtelne doświadczenia. Stąd wiele grup badawczych wiąże z zimnymi splątkowanymi jonami nadzieje na budowę komputera kwantowego.

Największą przeszkodą na drodze do praktycznych zastosowań układów kwantowych do celów informatycznych jest zjawisko dekoherencji czyli utrata wzajemnej spójności fazowej funkcji falowych różnych stopni swobody. W ramach zadania I.1 zbadano zjawisko dekoherencji jonów w pułapce. Zbadano szczegółowo tłumienie układu znajdującego się w stanie separowalnym oraz w stanie splątanym. Udowodniono, że tłumienie spójności, czyli relacji fazowej w stanie splątanym jest szybsze (o czynnik 2) w porównaniu z tłumieniem populacji [1B].

Jednym z celów kwantowej teorii informacji jest uzyskanie szybkiego i pewnego składowania i przekazywania informacji zakodowanej w stanie kwantowym. W typowej sytuacji doświadczalnej nie jest realistyczne rozpatrywanie układu fizycznego kodującego informację jako układu izolowanego. Takie oddziaływanie powoduje, że stany czyste stają się stanami mieszanymi. Proces wywołany wpływem szumu na stany kwantowe, prowadzi do błędów w przekazywaniu informacji. W ramach zadania I.2 [2B] badano kanały Gaussa. Dla takich kanałów podano definicję wierności przekazu informacji dla stanów czystych i mieszanych. Zbadano przykłady wierności dla takich kanałów uwzględniając szeroką klasę stanów. Podano też uniwersalne prawo skalowania dla kanałów Gaussa. Wykazano, że takie

zjawiska jak klonowanie, czy kwantowa teleportacja stanowią przykłady kanałów Gaussa. W pracy tej wykryto prawa skalowania, które okazują się kluczowe przy badaniu efektywności inżynierii kwantowej, w której stosuje się teleportację czy klonowanie.

Kolejnym rezultatem mającym duże znaczenie z punktu widzenia inżynierii kwantowej jest znalezienie nowych rezonansów dla atomów lub jonów znajdujących się w wirującej pułapce harmoniczej gdy uwzględnia się działanie grawitacji [3B].

II. Kwantowe przetwarzanie informacji przy wykorzystaniu własności ultrazimnych skończonych układów atomowych (kondensaty Bosego-Einsteina, zimne mieszaniny fermionowo-bozonowe i możliwości ich koherentnego sterowania)

Największym osiągnięciem fizyki zimnych atomów obojętnych jest wytworzenie przewidywanego od lat 20tych zeszłego wieku kondensatu Bosego-Einsteina w rozrzedzonym gazie. Zawierający od kilku tysięcy do kilku milionów atomów kondensat jest najlepszym dziś przykładem czysto kwantowego, izolowanego od wpływu otoczenia, układu o kontrolowanych parametrach. W dodatku, co w fizyce kwantowej jest nowością, można wykonywać doświadczenia z pojedynczym układem. W badaniach gazów kwantowych niewątpliwie ogromną inspirującą rolę odgrywają doświadczenia. Od lat w Polsce uprawiano tylko badania teoretyczne. W marcu 2007 roku w Krajowym Laboratorium FAMO w Toruniu uzyskano wreszcie kondensat. Otwiera to perspektywę intensyfikacji badań w tej dziedzinie w Polsce. Najważniejsze wyniki uzyskane w tym zakresie to:

1. Udoskonalenie oraz kolejne zastosowania przybliżonej metody pól kwantowych do opisu słabo oddziałującego gazu bozonów w niezerowej temperaturze. To oparte na równaniach kwantowej teorii pola przybliżenie polega na wyróżnieniu stopni swobody układu o małych pędach \vec{p} , w związku z ich dużym obsadzeniem, zastąpieniu występujących tam operatorów zespolonymi amplitudami. Przybliżenie to służy zarówno do wyznaczania statystycznych własności gazu w warunkach równowagi termodynamicznej jak i do opisu zjawisk dynamicznych. Serię publikacji na ten temat podsumowuje artykuł przeglądowy [4B].
2. Doświadczenia z kondensatem zawierającym wielką liczbę atomów są wyjątkowe także i z tego powodu, że pozwalają uzyskać wiele informacji na podstawie pojedynczego pomiaru. Zdjęcie pojedynczego układu jest jednym pomiarem wysokiej funkcji korelacji. Wychodząc od tego spostrzeżenia pokazano w szczególności jak, w zasadzie, można wykazać spójność makroskopowej superpozycji dwóch chmur atomowych [5B].
3. Dogodnym przybliżeniem wychodzącym poza teorię pola średniego dla kondensatu w pobliżu temperatury zera bezwzględnego jest przybliżenie Bogoliubowa. Kilku autorów podało jego udoskonaloną postać, zachowującą liczbę cząstek. Znalezienie [6B] dogodnego, uniwersalnego wyrażenia opisującego kondensat wraz z jego kwantowymi fluktuacjami pozwoliło na zbadanie fluktuacji w kilku ważnych przypadkach: ciemnych solitonów oraz kondensatów dwuskładnikowych.
4. Zderzeniom kondensatów towarzyszy rozpraszanie pewnej liczby atomów do początkowo nieobsadzonych stanów, będące odpowiednikiem zjawiska emisji spontanicznej dla światła. W pracach [7B] obliczono związane z tym procesem straty, a w pracy [8B] pokazano jak można numerycznie generować rezultaty pojedynczych doświadczeń zderzeniowych.

5. Wielkim zainteresowaniem cieszy się badanie obiecującego dla informatyki kwantowej układu kondensatu w sieci optycznej. We współpracy z grupą doświadczalną z Hanoweru przeanalizowano efekty lokalizacji kondensatu Bosego-Einsteina spowodowane wprowadzeniem nieporządku do regularnego potencjału sieci optycznej. Wyniki analizy teoretycznej porównano z rezultatami eksperymentu. Okazało się że, w przypadku kiedy część potencjału, która odpowiedzialna jest za nieporządek zmienia się na skali długości dużo większej niż periodyczność sieci optycznej, zachowanie układu bardzo dobrze opisuje się przybliżeniem Thomasa-Fermiego [9B].
6. Jednym z możliwych układów, które mogą posłużyć do realizacji komputera kwantowego są zimne atomy w potencjale sieci optycznej. Badania takich układów leżą zatem w centrum badań „informatyki kwantowej”. Badanie w takich sieciach dotyczyło także mieszanin bozonowo fermionowych. Rozszerzając podejście oparte o hamiltonian efektywny zastosowane poprzednio do regularnych mieszanek na przypadek częściowo nieuporządkowanej sieci pokazano że wypadkowe hamiltoniany efektywne realizują szereg modelowych hamiltonianów używanych w teorii nieuporządkowanej materii skondensowanej [10B].
7. Wielkim zainteresowaniem zarówno teoretycznym, jak i doświadczalnym cieszą się struktury, które można wytworzyć w zdegenerowanych gazach atomowych, a zwłaszcza jasne solitony. Pokazano, że takie solitony mogą występować w mieszaninach bozonowo fermionowych, gdy te dwie frakcje przyciągają się [11B]. Powstające struktury są dwuskładnikowe.
8. Od czasu, gdy W. Ketterle zdołał przeładować kondensat z pułapki magnetycznej do dipolowej pułapki optycznej kondensat uzyskał dodatkowy stopień swobody: wszystkie składowe spinowe są pułapkowane, a w zderzeniach rzut spinu atomu może się zmienić. Termodynamika i dynamika kondensatów spinorowych jest bardzo złożona. Pierwsze uzyskane wyniki dotyczą ferromagnetycznego kondensatu rubidowego o spinie jeden, w nieobecności pola magnetycznego [12B].
9. Nieliniowe zjawiska z udziałem kondensatu mają swoje analogie w optyce nieliniowej. Posługując się taką analogią zbadano trójwymiarowe solitony w sieci optycznej [13B] oraz podano nową metodę wytwarzania tak zwanych “gap solitons” w kondensacie [14B].
10. Jednym z zagadnień ważnych w ostatnich latach było poszukiwanie sposobów wytworzenia kondensatu molekularnego. Okazuje się, że łatwiej osiągnąć to za pomocą atomów fermionowych niż bozonowych [15B].

Osiągnięto także kilka znaczących, choć nie zaplanowanych wyników. Wyróżnić należy tu wykazanie, że splątany stan podstawowy w modelu Dicke’ego, badany przez Buzka i współpracowników, nie występuje w fizycznych układach opisujących atomy sprzężone z kwantowym polem elektromagnetycznym. Praca ta zwraca uwagę na fakt braku niestabilnych rozwiązań modelu Dicke’ego, jeśli oddziaływanie jest niezmiennicze ze względu na cechowanie pola elektromagnetycznego [16B].

III. Teoria splątania kwantowego – teoretyczne podstawy informatyki kwantowej (geometria stanów splątanych, splątanie fotonów, i kwantowa teleportacja, kwantowa teoria informacji, relatywistyczne aspekty splątania)

Ze względu na bardzo szeroki zakres badań, opis najważniejszych rezultatów warto podzielić na trzy zagadnienia: a. struktura i własności stanów splątanych, b. zastosowanie stanów splątanych w procesach komunikacji i kanały kwantowe, c. nieodwracalna dynamika kwantowych procesów przetwarzania informacji.

a. Struktura i własności stanów splątanych

Metody z użyciem różnych wariantów entropii stanowią niezwykle ważne narzędzie badania stanów splątanych. W pracy [1A] podano operacyjną interpretację kwantowej entropii warunkowej, analogiczną do klasycznej nawet gdy entropia ta jest ujemna. Wynik ten wykorzystano do rozwiązania kilku ważnych problemów kwantowej teorii informacji. Nierówności entropowe dla stanów splątanych zostały bezpośrednio potwierdzone w eleganckim eksperymencie opisanym w pracy [2A]. Inną, entropową wielkość zwaną klasycznym deficytem informacji zdefiniowano jako różnicę pomiędzy informacją, która może być zlokalizowana w podukładach stanu złożonego przy pomocy Zamkniętych Lokalnych Operacji i Klasycznej Komunikacji a informacją zawartą w podukładach [3A]. Udowodniono, że klasyczny deficyt informacji rośnie pod wpływem lokalnych operacji.

Innym rozwijanym intensywnie tematem była konstrukcja i badanie własności różnych miar splątania. Ważnym krokiem w kierunku udowodnienia hipotezy o addytywności miary tworzenia splątania jest pokazanie w pracy [4A], że koszt splątania jest ściśle większy od zera dla wszystkich stanów splątanych. W pracy [5A] wyprowadzono nową nierówność, która reprezentuje komplementarność pomiędzy rozróżnianiem stanów przez lokalne operacje i klasyczną komunikację a ich splątaniem. Nierówność ta pozwoliła zrozumieć ograniczenia na protokoły destylacji splątania, które poprawiają wszystkie błędy. W pracy [6A] pokazano, że wiele miar splątania może się zmniejszać o dowolną wielkość po odjęciu jednego qubitu, natomiast splątanie względnej entropii zmienia się co najwyżej o 2.

W pracy [7A] podano nowe sformułowanie problemu separowalności. Pytanie, czy dany mieszany stan kwantowy jest splątany, czy separowalny sprowadzono do zagadnienia istnienia pewnego zbioru komutujących macierzy normalnych, a więc zagadnienia czysto algebraicznego.

Badania własności stanów splątanych złożonych ze stanów kwantowych w wyższych wymiarach były celem pracy [8A]. W szczególności podano efektywną metodę znajdowania dolnego ograniczenia miary splątania, jaką jest zbieżność (ang. *concurrence*) dla układów binarnych o dowolnym wymiarze. W pracy [9A] uogólniono te metody na układy składające się z wielu cząstek. W pracy [10A] pokazano, że splątanie kwantowe dwóch fermionów zależy od wyboru rozkładu iloczynu tensorowego przestrzeni Hilberta badanego układu. Wykazano również, że w tym przypadku zbieżność Woottersa nie jest właściwą miarą splątania i znaleziono jawną postać splątania formacji.

Innym narzędziem badania struktury stanów splątanych jest teoria odwzorowań dodatnich. Relacje pomiędzy odwzorowaniami dodatnimi na algebrze macierzy zespolonych „ $n \times n$ ”, a podzbiorem elementów samosprzężonych z iloczynu tensorowego tych algebr były analizowane w pracy [11A]. Pokazano, że istnieje izomorfizm między zbiorem wszystkich unormowanych odwzorowań dodatnich na algebrze a podzbiorem stanów separowalnych w iloczynie tensorowym algebr. W pracach [12A,13A] badano związek pomiędzy dyskretną dynamiką w układach jednocząstkowych a statycznymi własnościami stanów kwantowych układu dwu-cząstkowego. W szczególności zdefiniowano i zbadano klasę odwzorowań unistochastycznych, zadanych przez sprzężenie badanego układu z otoczeniem w stanie

maksymalnie zmieszany, ewolucje unitarną całkowitego układu oraz uśrednienie po zmiennych otoczenia. Szczegółowo zbadano własności zbioru macierzy unistochastycznych dla $N=3$ i 4.

Prowadzono intensywne badania nierówności Bella, które ciągle są podstawowym narzędziem dla analizy eksperymentów ze stanami splątanymi. Pierwsze tzw. ściśle nierówności Bella analizujące splątanie trzech qutritów opisano w pracy [14A]. Pokazano do jakiego stopnia są one łamane przez czyste stany splątane. W pracach [15A,16A] badano nowe rodziny nierówności Bella analizujące eksperymenty, w których obserwatorzy mogą ustawiać swe analizatory na więcej niż dwa sposoby. Udowodniono również warunki konieczny i dostateczny, jakie muszą spełniać macierze gęstości aby łamać te nierówności.

Dużą uwagę poświęcono relatywistycznym wariantom opisu korelacji. W pracy [17A] zdefiniowano zredukowaną spinową macierz gęstości dla cząstki masywnej i wykorzystano ją do analizy relatywistycznego wariantu eksperymentu EPR-Bohmy, a w pracy [18A] policzono, metodami kwantowej teorii pola, funkcję korelacji dla eksperymentu typu EPR z dwoma masywnymi relatywistycznymi cząstkami Diraca. Analizie związków pomiędzy strukturą próżni w kwantowej teorii pola a splątaniem poświęcono pracę [19A].

Konstruowano także nowe klasy, głównie wielocząstkowych, stanów splątanych. W dwóch publikacjach [20A] zbadano klasę stanów wielocząstkowych, symetrycznych względem działania nieredukowalnych reprezentacji grupy unitarnej i ortogonalnej, a w pracy [21A] wprowadzono nową szeroką klasę stanów splątanych PPT, która zawiera większość znanych stanów tego typu.

Wiele z uzyskanych w ramach tego projektu wyników znalazło się w monografii [22A] będącej podsumowaniem wiedzy na temat struktury stanów i ich odwzorowań dla układów kwantowych. Dotychczasowe rezultaty teorii kwantowego splątania sytuującej się w centrum kwantowej teorii informacji zostały zaprezentowane w obszernym artykule przeglądowym (108 stron)[23A].

b. Zastosowanie stanów splątanych w procesach komunikacji i kanały kwantowe

Znaczną liczbę prac poświęcono zastosowaniom stanów splątanych do przesyłania informacji, w tym do kwantowej kryptografii. Warunki bezpieczeństwa na kryptograficzny klucz klasyczny uzyskiwany z dwucząstkowego stanu kwantowego były badane w pracy [24A]. Dowiedziono, że ilość klucza jaką można uzyskać w protokołach kwantowych z danego stanu dwucząstkowego jest ograniczona od góry przez zregularyzowaną miarę splątania zdefiniowaną poprzez entropię względną. Uzyskano destylację klucza kryptograficznego ze stanów wykazujących splątanie związane (tj. niedestylowalnych). Wynik ten zaprzeczył dotychczasowym intuicjom powszechnie obecnym w literaturze przedmiotu.

Używając paradygmatu odległych laboratoriów oraz pojęcia destylacji splątania w pracy [25A] wykazano, że istnieją kanały kwantowe posiadające ekstremalną własność nieaddytywności - równoległe złożenie kanałów o zerowej pojemności daje kanał o pojemności niezerowej.

Wyniki pracy [26A] pokazują, iż klasyczna komunikacja może poprawić wierność lokalnego klonowania oraz, że stany ze splątaniem związanym nie mogą być użyte dla poprawy wierności klonowania. W pracy [27A] wykazano, że wspomaganie komunikacją klasyczną nie zmienia obszaru pojemności dla kanałów kwantowych z wieloma nadawcami.

Nowe podejście do definicji „kwantowości” zespołu statystycznego oparte na analizie różnicy między ilością informacji zawartą w tym zespole i w zespole statystycznych zawierającym dwie kopie każdego stanu zostało przedstawione w pracy [28A].

W pracy [29A] pokazano, że stan skorelowany N -qubitów może być lepszym źródłem informacji o zredukowanej macierzy gęstości dla pojedynczego qubitu niż stan produktowy

(nieskorelowany), co ma znaczenie przy przesyłaniu informacji kwantowej oraz pomiarach stanów kwantowych. W pracy [30A] udowodniono, że przekazywanie pojedynczego qubitów $N-1$ razy, zamiast $N-1$ klasycznych bitów, prowadzi do wzrostu prawdopodobieństwa sukcesu pewnych zadań ze zredukowaną komunikacją (communication complexity) określonych pomiędzy N partnerami. Przeprowadzono eksperyment, w którym zrealizowano takie protokoły dla $N=5$.

W pracy [31A] rozpatrywany jest transfer informacji przez bezszumowe kanały kwantowe, gdzie informacja zakodowana jest w masywne nierozróżnialne cząstki: bozony i fermiony. Pokazano w sposób analityczny, że fermiony dostarczają wyższych pojemności to znaczy są lepiej przystosowane do przenoszenia bitów, jak i qubitów.

Interesującym nowym kierunkiem badań była analiza różnych aspektów kwantowego przetwarzania informacji z punktu widzenia teorii gier, ze szczególnym akcentem na tzw. gry kwantowe. Przykładem może być praca [32A], w której pokazano, że komputer kwantowy byłby efektywnym narzędziem do rozgrywania gier rynkowych.

Wyniki opublikowane w pracach [33A] otwierają nowy interdyscyplinarny obszar badań, którego celem jest zrozumienie, czy są możliwe niekwantowe implementacje algorytmów kwantowych. Opierają się one na możliwości kodowania bezpośrednio za pomocą tzw. algebr geometrycznych i związanej z tym możliwości sformułowania algorytmów podobnych do kwantowych, lecz nie bazujących na strukturach tensorowych.

c. Nieodwracalna dynamika kwantowych procesów przetwarzania informacji

Głównym kierunkiem badań była analiza ograniczeń, jakie pierwsza i druga zasada termodynamiki nakładają na efektywność procesów przetwarzania informacji kwantowej. I tak w pracy [34A] zbadano relacje termodynamiczne w hamiltonowskim modelu kwantowego układu przetwarzającego informację. W szczególności przeanalizowano scenariusz uzyskiwania pracy z kwantowych korelacji w paradygmacie odległych laboratoriów.

W pracy [35A] zbadano szczegółowo, czy standardowe założenia kwantowej teorii korekcji błędów są spełnione dla mikroskopowego modelu kwantowego układu otwartego, który jest zgodny z termodynamiką. Okazało się, między innymi, że idea tzw. „szybkich bramek” jest sprzeczna z markowskim modelem szumu kwantowego. Pokazano również, jak dalece model markowski jest nie do pogodzenia z termicznym charakterem rezerwuaru. Szczegółowa i ściśle matematyczna analiza modeli pamięci kwantowych zaproponowanych przez Kitajewa, a opisanych w języku kwantowych półgrup dynamicznych jest tematem pracy [36A]. Użyteczną konstrukcję klasy kwantowych półgrup dynamicznych dla skończonych i nieskończonych układów bozonowych przedstawiono w pracy [37A].

Kilka publikacji poświęcono analizie dynamiki splątania w kwantowych układach otwartych. Przykładem może być tu praca [38A], w której zbadano model dwóch atomów trójpoziomowych typu V z efektem spontanicznej emisji z dwóch poziomów wzbudzonych do poziomu podstawowego. Powstałe efekty interferencyjne i ich wpływ na zjawisko rozplątania badany był zarówno analitycznie jak i numerycznie.

Kilka prac dotyczy pomiarów parametrów kwantowych układów otwartych i ich kontroli. W pracy [39A] zastosowano tzw. tomografię stroboskopową do badania dynamiki otwartego układu kwantowego zadanej półgrupą gaussowską. Wyznaczono minimalną liczbę obserwacji, których pomiar w różnych chwilach czasu (tzn. w czasie trwania ewolucji) pozwala na pełną rekonstrukcję stanu początkowego (macierzy gęstości) układu. Konstrukcja modelu układu o nieskończonej liczbie stanów energetycznych, który można było kontrolować przy pomocy skończonej wymiarowej algebry, była tematem pracy [40A].

Podsumowując wyniki tej części projektu dotyczącej teorii splątania kwantowego, należy stwierdzić, że najbardziej widoczny postęp osiągnięto w dziedzinie badań fundamentalnych własności stanów splątanych i ich matematycznej struktury. Wiele własności i parametrów zostało określonych w sposób operacyjny tak, aby umożliwić w przyszłości ich eksperymentalną implementację. Trwałą wartością poznawczą jest tu niewątpliwie nowy sposób patrzenia na mechanikę kwantową i procesy zachodzące w układach kwantowych oparty na idei przetwarzania kwantowej informacji.

Znaczny postęp w kierunku praktycznych zastosowań zanotowano w dziedzinie wykorzystania wielofotonowej interferencji. Zaproponowane tu metody eksperymentalne mogą być przekształcone na użytek protokołów kwantowej kryptografii obejmujących wielu uczestników (np. tak zwany problem dzielenia się sekretem).

Najbardziej ambitne zastosowanie kwantowej informacji jakim jest kwantowy komputer pozostaje w sferze spekulacji. Wyniki tu uzyskane, związane z badaniem ograniczeń wynikających z podstawowych praw kwantowej mechaniki statystycznej i termodynamiki wskazują raczej na trudności w realizacji tej idei.

IV. Realizacja bramek logicznych komputera kwantowego w technologii kropek kwantowych (dekoherencja orbitalnych i spinowych stopni swobody w kropkach kwantowych, metody ich sterowania)

Kropki kwantowe (quantum dots, QDs) są postrzegane jako główny obszar implementacji QIP i zbudowania dużego komputera kwantowego. Korzystne są w tym przypadku możliwości szybkiego sterowania ładunkami i spinami w kropkach, oraz możliwości technologiczne unifikacji ze standardowymi półprzewodnikowymi układami informatycznymi. Zarówno orbitalne, jak i spinowe stopnie swobody nośników uwięzionych w kropkach kwantowych są teoretycznie rozważane jako potencjalne możliwości realizacji bitów kwantowych (*qubitów*). Mimo tych obiecujących własności, a także ogromnych wysiłków eksperymentalnych korzystających z poważnego wsparcia finansowego, realizacja kwantowego przetwarzania informacji w technologii kropek wciąż pozostaje na etapie bramki dwuqubitowej, działającej z niezbyt wysoką wiernością w nieskalowalnej realizacji bieksytonowej. Ta poważna rozbieżność pomiędzy oczekiwaniami i propozycjami teoretycznymi, a faktycznym postępem eksperymentu i technologii wskazywała na brak zrozumienia pewnych istotnych czynników decydujących o możliwości koherentnego sterowania stanami kwantowymi ładunków w kropkach kwantowych.

W ramach przeprowadzonych w projekcie badań zidentyfikowano i opisano (zarówno jakościowo, jak i ilościowo) ten krytyczny czynnik [14C,15C,28C,29C,31C-36C,38C,39C]. Wykazano, że pomimo pewnego podobieństwa pomiędzy kropkami kwantowymi, a naturalnymi atomami analogia pomiędzy tymi układami okazuje się powierzchowna. Kropki wbudowane są w kryształ heterostruktury półprzewodnikowej i podlegają nieusuwalnym oddziaływaniom z siecią krystaliczną. Centralny wynik tych badań zawarty jest w pracy [28C] i polega na wykazaniu, że dynamiczna odpowiedź sieci (związana z ubieraniem ekscytonu w mody fononowe) powoduje znaczącą dekoherencję stanów ładunkowych w warunkach sterowania optycznego w czasie kilku pikosekund po szybkim optycznym przełączeniu stanu qubitu. Oznacza to, że sterowanie qubitem możliwe jest jedynie w reżimie adiabatycznym, a więc w skalach czasu dłuższych od pikosekundowych. Ta pikosekundowa skala czasu lokuje się bardzo niekorzystnie pomiędzy skalami czasu rzędu 1-100 femtosekund, typowymi dla optycznych metod sterowania ładunkami w kropkach (i będących podstawą optymistycznych przewidywań co do możliwości implementacji bramek kwantowych), a nanosekundowymi czasami życia ekscytonu. Taka relacja skal czasowych prowadzi do błędów przynajmniej rzędu 10^{-3} i wyklucza (zgodnie z tzw. kryteriami

DiVincenzo) możliwość zastosowania kwantowej korekty błędów, a więc także skalowalnej implementacji kwantowego przetwarzania informacji w technologii kropek kwantowych. Zasadnicze nowe wyniki przedstawione pracy [28C], to:

- 1) podanie prostej i uniwersalnej metody oceny czasu defazowania w nanostrukturach,
- 2) uzasadnienie tej metody na gruncie mikroskopowym,
- 3) wytłumaczenie silnego (do 400%) wzrostu sprzężenia ładunków z fononami optycznymi w nanostrukturach (wzrost efektywnej stałej Fröhlicha)
- 4) oszacowanie czasu defazowania ładunkowych stopni swobody w kropkach w wyniku tworzenia polaronów różnych typów, oraz defazowania spinu w wyniku tworzenia magnetopolaronów,
- 5) czasowe ograniczenie spinowej blokady Pauliego w nanostrukturach w wyniku inercji sieci.

Ten ostatni rezultat wykluczył możliwość realizacji pewnej klasy komputerów kwantowych, a mianowicie komputerów z konwersją qubitów *spin-charge* (szybkie przetwarzanie ładunkowe, a przechowywanie na odporniejszych spinach), wobec wykazanego niekorzystnego ograniczenia czasowego na proces konwersji informacji kwantowej.

Opisanemu tu głównemu wynikowi towarzyszy seria innych rezultatów, odnoszących się do głównych wyników zawartych w [28C] i związanych z wpływem anharmonizmu sieci na przebieg dekoherencji, z rolą efektów fononowych dla stabilności splątania oraz z możliwością optymalizacji impulsów sterujących w celu zmniejszenia błędu fononowego.

W pracy [29C] zbadano rolę anharmonizmu fononowego w kinetyce ekscytonowo-fononowej i opisano tłumienie dudnień związanych z fononami LO. Wykazano, że czas defazowania, skalujący się wraz z rozmiarem kropki dla fononów optycznych odmiennie niż dla akustycznych (i przez to dłuższy dla typowych kropek), zmniejsza się istotnie na skutek anharmonicznego sprzężenia z innym rezerwuarem. Praca [39C] zawiera opis jakościowej zmiany przebiegu dekoherencji w wyniku anharmonizmu rezerwuaru. Wykazano tu, że anharmonizm rezerwuaru prowadzi do wykładniczego zaniku koherencji nawet dla rezerwuarów super-omowych (takich jak typowe rezerwuary fononowe). W publikacji [35C] opisany został zanik splątania dwóch ekscytonów w kropkach kwantowych w wyniku dekoherencji fononowej. Pokazane zostało, że rozpad splątania może być całkowity pomimo jedynie częściowego charakteru dekoherencji fononowej. W pracy [31C] podjęta została próba zredukowania wpływu dekoherencji poprzez, odpowiednio, kolektywne kodowanie informacji kwantowej w macierzach kropek kwantowych, oraz optymalizację przebiegu pól sterujących. Okazuje się jednak, że takimi metodami da się uzyskać najwyżej 2 krotną redukcję dekoherencji, podczas gdy potrzebna byłaby redukcja o 3 rzędy wielkości. W pracy [34C] sformułowany został opis dekoherencji spinu w schemacie sterowania optycznego (poprzez stymulowane adiabaticzne przejście ramanowskie) i wykazano, że optymalizacja warunków sterowania może umożliwić wzrost kwantowej koherencji. Potwierdza to istniejące przekonanie, że spinowe stopnie swobody są bardziej obiecujące jako potencjalne bity kwantowe, ale jednocześnie wskazuje na ograniczenia dekoherencyjne występujące w schematach optycznego sterowania spinem (także w pracy [28C]). Publikacja [15C] zawiera opis fononowego tłumienia oscylacji Rabiego, jakościowo zgodny z wynikami eksperymentu i zawierający teoretyczne przewidywania dalszych efektów. Stanowi ona łącznik pomiędzy formalną analizą zawartą w pozostałych pracach a konkretnym eksperymentem i potwierdza adekwatność zastosowanych modeli i metod teoretycznych. Przeanalizowano też różne typy dekoherencji i ich konkurencję [14C]. W pracach [1C] i [9C] rozpatrywano interesującą koncepcję implementacji qubitu w kropkach sprzężonych z pierścieniem i w parze asymetrycznych kropek (zapropozowano realizację bramki CNOT).

Uzyskane wyniki (zwłaszcza praca [28C]) rozstrzygają kwestię przydatności orbitalnych (czyli ładunkowych) stopni swobody w kropkach kwantowych dla budowy skalowanego komputera kwantowego w technologii stało-ciałowej. Seria wyników zawartych w omawianych publikacjach wskazuje, że w technologii nanostruktur półprzewodnikowych nie można spełnić tzw. warunków DiVincenzo, koniecznych dla implementacji kwantowej korekty błędów, co z kolei jest niezbędne dla konstrukcji dużego (skalowanego do wielu qubitów) komputera kwantowego. Autorzy wykazali, że nieusuwalna dekoherencja fazowa (tj. niekontrolowana utrata informacji kwantowej) w przypadku stanów ładunkowych w kropkach kwantowych lokuje się niekorzystnie pośrodku wymaganego okna sześciu rzędów wielkości między charakterystycznym czasem sterowania, a czasem dekoherencji amplitudowej. Bardziej obiecujące są implementacje na spinowych stopniach swobody, ale i tu występują poważne ograniczenia dekoherencyjne, szczególnie w magnetycznie uporządkowanych ośrodkach – co także zostało wykazane. Podana została nowa koncepcja qubitów i bramki kwantowej przy wykorzystaniu stanów singlet-tryplet w kropkach typu He [56C], a w szczególności zaproponowano sposób sterowania splątaniem przez zmianę stosunku rzeczywistego oddziaływania wywołującego splątanie do odległości energetycznej w qubitach (przez odsuwanie/zbliżanie się do punktu degeneracji singlet-tryplet), oraz opisano oscylacje Rabiego w punkcie degeneracji. Obie koncepcje sterowania kwantowego są nowe, ale również ograniczone dekoherencją (podano odpowiednie analizy).

Wyniki te mają duże przełożenie na planowanie dalszych projektów i międzynarodowych przedsięwzięć zwłaszcza technologicznych w zakresie informatyki kwantowej, gdyż jasno definiują one realne ograniczenia fizyczne nałożone na praktyczne realizacje QIP w obszarze nanotechnologii. Wyniki wskazują na silne ograniczenie na drodze do zbudowania komputera kwantowego – w ilościowy sposób, w rozmaitych fizycznych sytuacjach nanotechnologicznych, pokazują, że to samo oddziaływanie, które pozwala sterować qubitami i bramkami, powoduje w istocie silną i nieusuwalną dekoherencję, która lokuje się niekorzystnie pośrodku wymaganego przez kryteria DiVincenzo okna 6-ciu rzędów wielkości (między czasem sterowania a czasem dekoherencji). Ten jakościowy (ale potwierdzony ilościowo w kilku modelach) rezultat wyklucza, jak się wydaje, możliwość realizacji komputera kwantowego sterowanego światłem w technologii ciała stałego (kropek kwantowych). Jest to silny argument za tym, że lokalne stopnie swobody w układach kwantowych zbyt szybko ulegają dekoherencji i należy poszukiwać innych koncepcji kwantowego przetwarzania informacji. To ważny wniosek z realizacji projektu i wskazuje na potrzebę intensyfikacji prac teoretycznych, ale w innym obszarze niż rozwijany do tej pory. Za bardziej perspektywiczny należy uznać kierunek wykorzystania topologicznych stopni swobody, bardziej odpornych na lokalną dekoherencję.

Wyniki dotyczące analiz możliwości i ograniczeń kwantowego koherentnego sterowania nanoukładami mają też ogólniejsze znaczenie w zakresie inżynierii kwantowej. Wszystkie urządzenia nanotechnologiczne i spintroniczne oparte o własności pojedynczych elektronów, ich spinów i pojedynczych fotonów będą funkcjonalne tylko w obszarze sterowalności ich kwantowych stanów. Ograniczenia związane z utratą koherencji, dotyczą więc także tego typu zastosowań. Należy jednak podkreślić, że niemożność implementacji skalowanego komputera kwantowego nie wyklucza działania prostszych koherentnie sterowanych kwantowych urządzeń nanotechnologicznych, które mogą mieć zastosowanie w optoelektronice i spintronice nowej generacji.

Wyniki te były szeroko prezentowane na konferencjach międzynarodowych i opublikowane w kilkunastu innych opracowaniach i publikacjach, były one także przedmiotem zaproszonych rozdziałów przeglądowych do książek:

1. L. Jacak, P. Machnikowski, J. Krasnyj, *Fast control of quantum states in quantum dots:*

Limits due to decoherence, w: Quantum Dots: Fundamentals, Applications and Frontiers, red. B. Joice, P. Kelires, A. Naumovets, D. Vvedensky, Springer VL 2005;

2. Grodecka, L. Jacak, P. Machnikowski, K. Roszak, *Phonon impact on the coherent control of quantum states in semiconductor quantum dots*, w: Quantum Dots: Research Developments, red. P. A. Ling, Nova Science Publishers, New York 2005;
3. V. M. Axt, A. Vagov, B. Krummheuer, T. Kuhn, P. Machnikowski, J. Krasnyj, L. Jacak, *Phonon-induced decoherence in semiconductor quantum dots*, w: Semiconductor Macroatoms: Basic Physics and Quantum-Device Applications, red. F. Rossi, Imperial College Press, London, 2005.

Główne wyniki zostały także przedstawione w obszernym rozdziale (ca 30 stron) zaproszonym do encyklopedii [53C]: L. Jacak, A. Wójs, P. Machnikowski, *Semiconductor Quantum Dots*, Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology, American Sc. Publ. 2004/2007(nowe wydanie), www.aspbs.com/enn

V. Inżynieria funkcji falowych w nowych realizacjach nanotechnologicznych i w spintronice (rozwój teorii w kierunku urządzeń jednofotonowych-jednoelektronowych, koherentnych manipulacji spinem i wykorzystania kwantowych efektów w układach mezoskopowych)

W tym temacie zrealizowano wyjątkowo dużo prac i uzyskano liczne i różnorodne wyniki odnośnie układów w skali nano. Odnoszą się tu wyniki zawarte w pracach [2C-15C, 18C, 19C, 22C-27C,40C-42C,44C,48C,50C,53C,54C], są to głównie wyniki dotyczące modelowania nanostruktur – kropek kwantowych, drutów i studni kwantowych i nanorurek węglowych. Wszystkie urządzenia nanotechnologiczne i spintroniczne oparte o własności pojedynczych elektronów, ich spinów i pojedynczych fotonów będą funkcjonalne tylko w obszarze sterowalności ich kwantowych stanów i do tej tematyki odnosi się bardzo obszerna grupa prac zrealizowanych w ramach projektu. Większość prac w zakresie inżynierii kwantowej nie ma bezpośredniego odniesienia do QIP i raczej koncentruje się na modelowaniu kropek kwantowych, zjawisk termicznych i transportowych w kropkach, a także fizyki nanorurek węglowych. Istotne są tu także wyniki odnośnie studni kwantowych a zwłaszcza własności spinu w półprzewodnikowych studniach. Pośród bardzo licznych rezultatów należy zwrócić uwagę na :

- 1) analiza efektu giromagnetycznego w nanostrukturach półprzewodnikowych – studniach kwantowych [18C,19C,22C,23C], w bardzo dobrym związku z eksperymentem [24C]
- 2) modelowanie własności kropek i nanostruktur (w tym nanorurek węglowych) metodami *ab initio* typu silnego wiązania [30C,40C-42C,50C] – rozwinięto metodę silnego wiązania dla kropek (i innych nano-układów), co pozwala efektywnie badać wieloelektronowe struktury w różnych potencjałach ograniczających i przy uwzględnieniu czynników zewnętrznych (bardzo szeroko badano wpływ ciśnienia na stany zlokalizowane w kropkach i nanokryształach InP, w dobrej zgodności z eksperymentem [48C,42C])
- 3) analiza kropek kwantowych II rodzaju metodami Hartree – uwzględniono wzajemny wpływ elektronu i dziury na siebie w sytuacji, kiedy tylko jeden z nośników jest związany przez potencjał kropki, a drugi tylko poprzez przyciąganie elektron-dziura; prowadzi to do dwudolinowych potencjałów wiążących obu nośników i zwielokrotnienia stanów, w szczególności trionów i ich odmiennego

- zachowania w polu magnetycznym w porównaniu z kropkami typu I (w dobrej zgodności z eksperymentem) [57C]
- 4) rozwinięcie i zastosowanie wariacyjnej metody mieszania konfiguracji do modelowania wieloelektronowych kropek kwantowych [2C-8C,10C,11C] – opracowano bardzo efektywną metodę numerycznego modelowania kropek kwantowych (metoda polega na istotnym uogólnieniu rachunku Hartree-Focka w kierunku odejścia od jednocząstkowego opisu); uzyskano tą metodą całą serię wyników, spośród których należy podkreślić bardzo wyczerpującą analizę wignerowskiej krystalizacji stanów elektronowych w płaskich kropkach w polu magnetycznym prostopadłym do płaszczyzny kropki ([2C-8C], także [40C]).
 - 5) przeprowadzono nowatorskie badania termicznych własności kropek kwantowych i zademonstrowano ich odmienność od poprzednio badanych układów termodynamicznych [27C,54C] (pojemność cieplna QD i transport termiczny w nanoukładach)
 - 6) zbadano tunelowy transport pomiędzy kropką a złączem [12C,26C]
 - 7) zaproponowano i opisano pompowanie optyczne polaryzacji elektronów w CuCl [37C]
 - 8) analizowano interpretację pomiaru kwantowego (zagadnienie typu *'which path'*) [38C], przy wykorzystaniu qubitu na kropce kwantowej i rezerwuaru fononowego
 - 9) przeprowadzono szerokie modelowania struktury nanorurek węglowych, z silnym podkreśleniem ich geometrii i wynikających stąd własności elektrycznych i transportowych, zarówno dla czystych jak i domieszkowanych struktur [13C,17C,45C], (w kontekście nanorurek 1-D zaproponowano oryginalny półrelatywistyczny opis układu elektronowego [20C])

VI. Topologiczne i stochastyczne metody dla nowych układów kwantowych w informatyce (układy hallowskie, sieci optyczne, topologia i chaos w mechanice kwantowej a dekoherencja)

Nieusuwalna dekoherencja w nanostrukturach ciała stałych, która lokuje się niekorzystnie pośrodku wymaganego przez kryteria DiVincenzo okna, wyklucza prawdopodobnie skalowanie komputera kwantowego w technologii ciała stałego (sterowanego światłem na kropkach kwantowych). Podobnie silna dekoherencja w realizacjach optycznych QIP oraz w pułapkach atomowych/jonowych, raportowanych wyżej w kontekście kondensatów, wyraźnie wskazują na potrzebę poszukiwania innych niż lokalne stopnie swobody jako nośników informacji kwantowej. Lokalne stopnie swobody w układach kwantowych zbyt szybko ulegają dekoherencji i należy poszukiwać innych koncepcji kwantowego przetwarzania informacji. Za bardziej perspektywiczny należy uznać kierunek wykorzystania topologicznych stopni swobody, bardziej odpornych na lokalną dekoherencję. Dlatego też coraz większego znaczenia nabierają w kontekście informatyki kwantowej układy hallowskie, w przypadku których silnie przejawiają się globalne – topologiczne stopnie swobody (w tym anyony, złożone fermiony – stany Laughlina).

Tematyka ta rozwija się coraz mocniej – w projekcie badane były stany laughlinowskie metodą dokładnej diagonalizacji na sferze Haldane'a (dla kilku elektronów) [52C,46C]. Do ważnych osiągnięć projektu należy tu rozwinięcie oryginalnej koncepcji hybrydyzacji lokalnych stanów dziurowych i złożonych fermionów w studiach półprzewodnikowych – powstały w ten sposób ekscyton nosiłby cechy globalne [52C], które proponuje się identyfikować eksperymentalnie w silnym polu magnetycznym (współpraca z Grenoble). Badano też przejawy topologicznych kwantowych stopni swobody w magnetycznych układach typu Isinga [46C].

Ważnym, obszarem rozwoju metod topologicznych w układach hallowskich jest analiza topologiczno-algebraiczna o silnym matematycznym charakterze – w tym względzie w projekcie podano oryginalne rozwiązanie odnośnie indeksu lokalnego w sformułowaniu $SU-q(2)$ [55C]. Globalne własności posiadają też solitony – w projekcie zamodelowano procesy QIP za pomocą tych obiektów [49C].

Ponadplanowo, rozpoczęto analizy zastosowania grup warkoczowych w informatyce, i to zarówno do QIP (pełne grupy warkoczowe), jak i informacji klasycznej (czyste grupy warkoczowe). Rozwijana jest idea geometryzacji informacji w związku z informacyjną zasadą holograficzną.

Pośrednim stanem między zlokalizowanym (szybko ulegającym dekoherencji), a globalnym (odpornym na dekoherencję), ulokować można stan koherentny – nadprzewodnikowy (o maksymalnie dużej korelacji). W stanach (qubitach) opartych na efektach nadprzewodnikowych (prądy Josephsona, lub qubity na parach Coopera) upatruje się obecnie szansę spełnienia kryteriów DiVincenzo. W projekcie uruchomiono tego typu badania (od drugiego roku realizacji, w wyniku aneksowania umowy i zastąpienia zadania dotyczącego chaosu w sieciach optycznych). Przeprowadzono analizę porównawczą stabilności nadprzewodnikowych stanów singletowych i trypletowych w obecności silnej anizotropii w modelu silnego wiązania [51C]. Kilka wyników uzyskano też w obszarze topologicznych realizacji w polu magnetycznym w nanorurkach węglowych i pierścieniach nadprzewodnikowych (wiry nadprzewodnikowe i uogólnienia efektu Aharonowa-Bohma w mezoskopowych układach) [17C,45C,30C]. W pracy [45C] zaproponowano zdefiniowanie qubitu poprzez wykorzystanie wirów w nadprzewodnikowym pierścieniu. Do wyników o nowatorskim charakterze należy też zaliczyć badania relatywistycznych analogii w układach elektronowych 1D i 2D [20C,21C].

Inne osiągnięcia projektu

Zrealizowane w ramach tematów IV-VI badania naukowe przyczyniły się w decydującym stopniu do sformułowania dwóch rozpraw habilitacyjnych: dra P. Machnikowskiego [PWr Wrocław] – w toku i dra hab. Bartłomieja Szafrana [AGH Kraków], wniosły wkład w dorobek do postępowania w sprawie tytułu profesora (prof. Stanisław Bednarek, prof. Ryszard Gonczarek, PWr Wrocław, prof. Marek Szopa UŚl. Katowice) oraz kilku prac doktorskich i licznych magisterskich (w wielu ośrodkach uczestniczących w realizacji projektu). Projekt skierowany był na wykorzystanie wzajemnych powiązań pomiędzy zespołami realizującymi, co znalazło odbicie w sformułowaniu zadań badawczych i licznych współautorskich pracach realizatorów (w tym także pomiędzy gałęziami) – co było ważnym założonym celem realizacji projektu. Bardzo istotną rolę w tym względzie odegrały planowane i regularnie organizowane w gałęzi C projektu sympozja. Odbyły się 3 międzynarodowe sympozja (finansowane po części ze środków w projekcie):

[http://www.if.pwr.wroc.pl/sympozjumlfppi/;](http://www.if.pwr.wroc.pl/sympozjumlfppi/)

<http://lfppi.if.pwr.wroc.pl/sympozjumlfppi2.html>, <http://lfppi.if.pwr.wroc.pl>

- Quantum Cryptography and Quantum Information (Wrocław 2004), specjalny zaproszony gość: prof. Artur Ekert [Cambridge U.], dr Andreas Poppe [Wien U., grupa prof. Zeilinger] , około 350 słuchaczy, wykłady prof. K. Rzażewski, prof. Z. Bubnicki, panel - prof. Ł. Turski
- Frontiers of Quantum Mechanics (Wrocław 2005), specjalny zaproszony gość: prof. Ch. Fuchs [IBM NY USA], około 250 słuchaczy, wykłady prof. M. Kuś, prof. M. Żukowski, panel - prof. L. Mankiewicz
- Information & QM (Wrocław 2006),

zaproszony gość: G. t'Hoofst [Utrecht U.] , około 600 słuchaczy, wykłady prof. I. Białynicki-Birula, prof. J. Lukierski, prof. R. Alicki, prof. J. Zakrzewski, dr P. Horodecki, prof. L. Jacak.

Sympozja te przeprowadzone zostały przy udziale przedstawicieli wszystkich gałęzi A, B, C projektu, co przyczyniło się do wzmocnienia współpracy między gałęziami projektu, a także wzrostu zainteresowania lokalnego środowiska akademickiego i szerokiego uczestnictwa doktorantów i studentów. Oprócz organizacji podanych wyżej trzech międzynarodowych sympozyj informatyki kwantowej i inżynierii kwantowej we Wrocławiu, wymienić można również współorganizację konferencji krajowych *Inżynieria Kwantowa* (Wrocław 2004, 2005, 2006), współorganizację Szkoły Zimowej Informatyki i Inżynierii Kwantowej, Karpacz 2004 (około 100 uczestników, w tym 60 studentów z różnych ośrodków) [lista wykładowców szkoły: A. Ekert (Cambridge), M. Bayer (Würzburg), A. Poppe (Wien), T. Calarco (Innsbruck), M. Fromhold (Nottingham), M. Axt (Münster), P. O. Holtz (Linköping), A. Trifonov (Boston), F. Kusmartsev (Loughborough), J. Samson (Loughborough), H. Klar (Freiburg) D. Chruściński (Toruń), M. Czachor (Gdańsk), P. Garbaczewski (Zielona Góra), M. Horodecki (Gdańsk), P. Horodecki (Gdańsk), W. Jaskólski (Toruń), J. Krasny (Opole, Odessa), J. Rembieliński (Łódź), J. Zakrzewski (Kraków), M. Żukowski (Gdańsk)]; kilkanaście seminariów LFPPI w PWr Wrocław.

Podsumowanie

Zadania badawcze realizowane w ramach projektu „Informatyka i Inżynieria Kwantowa” dotyczyły analizy realizacji kwantowego przetwarzania informacji w układach spulchakowanych atomów i jonów, kondensatów atomowych i ich inżynierii, teoretycznych podstaw informatyki kwantowej i teorii splątania, kluczowych problemów koherencji w układach nanoskopowych, a zwłaszcza w kropkach kwantowych, ich zastosowania w inżynierii kwantowej, nanotechnologii i spintronice, a także badania fundamentalnych aspektów opisu kwantowego o charakterze topologicznym i chaosu kwantowego. Realizacja tak zaplanowanych badań gwarantowała uczestnictwo polskich zespołów w rozwijającym się obecnie bardzo dynamicznie kierunku opanowania technologii niezbędnych do praktycznej realizacji układów działających w oparciu o kwantowe algorytmy obliczeń i wykorzystania ogromnych możliwości inżynierii kwantowej. W realizacji projektu uczestniczyło kilkuset naukowców i doktorantów skupionych w zespołach z ponad 20 instytucji z całego kraju.

Badania prowadzone w zakresie projektu badawczego zamawianego „Informatyka i Inżynieria Kwantowa” przyczyniły się do ugruntowania wysokiej pozycji naszego kraju w świecie w dziedzinie badań nad technologiami przyszłości, które będą decydować o pozycji Polski i Europy na gospodarczej mapie świata. W przyszłości konieczna jest większa koncentracja środków przeznaczonych na badania w dyspozycji liderów najsilniejszych zespołów badawczych przy jednoczesnym ograniczeniu zakresu wspieranych finansowo badań do najbardziej istotnych i najbardziej obiecujących tematów.

Na wymierny dorobek projektu składają się: 1 praca opublikowana w **Nature**, 23 prace opublikowanych w **Physical Review Letters** oraz 104 prace w **Physical Review**, spośród ogólnej liczby 387 prac opublikowanych. (pełna lista publikacji w załączeniu). Wykonawcy projektu uczestniczyli w wielu konferencjach międzynarodowych, gdzie prezentowali swoje wyniki w formie wykładów i plakatów. Osiągnięte wyniki odpowiadają w dużej mierze zadeklarowanym zamierzeniom, choć należy rozumieć, że w badaniach podstawowych często najciekawsze wyniki pojawiają się niespodziewane.

Poziom badań naukowych, prowadzonych w zespołach uczestniczących w realizacji projektu zamawianego był poddawany systematycznie publicznej ocenie na sympozjach naukowo – sprawozdawczych organizowanych corocznie w listopadzie i grudniu na Uniwersytecie Gdańskim, w Centrum Fizyki Teoretycznej PAN i na Politechnice Wrocławskiej. Przebieg sympozjów wykazał że realizacja projektu badawczego zamawianego „Informatyka i Inżynieria Kwantowa” była zdecydowanym sukcesem naukowym, organizacyjnym i finansowym. Konsolidacja środowiska wokół tematyki projektu doprowadziła do wyraźnego efektu synergii, który zaowocował nie tylko rekordową wydajnością naukową, ale także niesłychanie istotnym z punktu widzenia rozwoju nauki w Polsce procesem odnawiania kadry naukowej na wielką skalę poprzez aktywny udział naukowców młodego pokolenia.

.....
(podpis kierownika projektu)

Warszawa, 24 lipca 2007 r.

Wybrana literatura podzielona na gałęzie A, B, C

Literatura A

- [1A] M. Horodecki, J. Oppenheim, A. Winter, *Partial quantum information*, Nature 436, 673 (2005)
- [2A] F.A. Bovino, G. Castagnoli, A. Ekert, P. Horodecki, C.M. Alves, A.V. Sergienko, *Direct measurement of non-linear properties of bipartite quantum states*, Phys.Rev.Lett. 95 240407, (2005)
- [3A] B. Synak-Radtke, M. Horodecki, *Classical information deficit and monotonicity on local operations* J. Phys. A: Math. Gen. 37, 11465, (2004)
- [4A] D. Yang, M. Horodecki, R. Horodecki, B. Synak-Radtke, *Irreversibility for all bound entangled states*, Phys.Rev.Lett. 95 , 190501 (2005)
- [5A] M. Horodecki, J. Oppenheim, Aditi Sen De, Ujjwal Sen, *Distillation protocols: Output entanglement and local mutual information*, Phys. Rev. Lett. 93, 170503 (2004)
- [6A] Karol Horodecki, Michal Horodecki, Pawel Horodecki, Jonathan Oppenheim, *Locking entanglement measures with a single qubit*, Phys. Rev. Lett. 94, 200501 (2005)
- [7A] J. Samsonowicz, M. Kuś, M. Lewenstein, *Separability, entanglement and full families of commuting normal matrices*, arXiv: 0704.2597, Phys. Rev. A, w druku.
- [8A] F. Mintert, M. Kuś, A. Buchleitner, *Concurrence of mixed bipartite quantum states in arbitrary dimensions*, Phys. Rev. Lett. 92, 167902 (2004).
- [9A] F. Mintert, M. Kuś, A. Buchleitner, *Concurrence of mixed multi-partite quantum states*, Phys. Rev. Lett. 95, 260502 (2005).
- [10A] P. Caban, K. Podlaski, J. Rembieliński, K. A. Smoliński, Z. Walczak, *Entanglement and tensor product decomposition for two fermions*, J. Phys. A. 38, L79 (2005)
- [11A] G. Kimura, A. Kossakowski, *A Note on Positive Maps and Classification of States*, Open Sys. and Information Dyn. 11 , 1,(2004)
- [12A] K. Życzkowski, I. Bengtsson, *On duality between quantum maps and quantum states*, Open Syst. Inf. Dyn. 11, 3-42 (2004)
- [13A] S. Szarek, I. Bengtsson, K. Życzkowski, *On the structure of the body of states with positive partial transpose*, J. Phys. A: Math. Gen. 39, L119-L126 (2006).
- [14A] A. Acin, J.L. Chen, N. Gisin, D. Kaszlikowski, L.C. Kwek, M. Żukowski, C.K. Oh, *Coincidence Bell inequality for three three-dimensional system*, Phys. Rev. Lett. 92, 250404 (2004)
- [15A] W. Laskowski, T. Paterek, M. Żukowski, C. Bruckner, *Tight multipartite Bell's inequalities involving many measurement settings*, Phys. Rev. Lett. 93, 200401 (2004)
- [16A] M. Żukowski, *On Tight Multiparty Bell Inequalities for Many Settings*, Quantum Information Processing 5, 287 (2006)
- [17A] P. Caban, J. Rembieliński, *Lorentz covariant reduced spin density matrix and Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm correlations*, Phys. Rev. A 72, 012103 (2005)
- [18A] P. Caban, J. Rembieliński, *Einstein-Podolsky-Rosen correlations of Dirac particles: Quantum field theory approach*, Phys. Rev A. 74 (2006), 042103.

- [19A] M. Pawłowski, M. Czachor, *Degree of entanglement as a physically ill-posed problem: The case of entanglement with vacuum*, Phys. Rev. A 73, 042111 (2006)
- [20A] D. Chruściński and A. Kossakowski, *On multipartite invariant states I. Unitary symmetry*, Phys. Rev. A 73, 062313 (2006). *On multipartite invariant states II. Orthogonal symmetry*, Phys. Rev. A 73, 062314 (2006)
- [21A] D. Chruściński and A. Kossakowski, *Class of positive partial transposition states*, Phys. Rev. A 74, 022308 (2006).
- [22A] I. Bengtsson, K. Życzkowski, *Geometry of Quantum States: An Introduction to Quantum Entanglement*, Cambridge University Press, Cambridge 2006.
- [23A] R. Horodecki, P. Horodecki, M. Horodecki, K. Horodecki, *Quantum Entanglement* (publikacja na zamówienie, przesłana do Rev. Mod. Phys. 2006.) po pozytywnych recenzjach (108 str.), *quant-ph/0702225*.
- [24A] K. Horodecki, M. Horodecki, P. Horodecki, J. Oppenheim, *Secure key from bound entanglement*, Phys. Rev. Lett. 94, 160502 (2005)
- [25A] Wolfgang Dür, J. Ignacio Cirac, Paweł Horodecki, *Nonadditivity of Quantum Capacity for Multiparty Communication Channels*, Phys. Rev. Lett. 93, 020503 (2004).
- [26A] R. Demkowicz-Dobrzański, M. Lewenstein, A. Sen (De), U. Sen, D. Brus, *Usefulness of classical communication for local cloning of entangled states*, Phys. Rev. A 73, 032313 (2006).
- [27A] M. Demianowicz, P. Horodecki, *Quantum channel capacities - multiparty communication*, Phys. Rev. A 74, 042336 (2006),
- [28A] M. Horodecki, P. Horodecki, R. Horodecki, M. Piani, *Quantumness of ensemble from no-broadcasting principle*, Inter.J. Quantum Inform. 4, 105, (2006)
- [29A] R. Demkowicz-Dobrzański, *State estimation on correlated copies*, Phys. Rev. A 71, 062321 (2005).
- [30A] P. Trojek, C. Schmid, M. Bourennane, C. Brukner, M. Żukowski, and H. Weinfurter, *Experimental Quantum Communication Complexity*, Phys. Rev. A 72, 50305 (2005)
- [31A] A. Sen(De), U. Sen, B. Gromek, D. Bruß, M. Lewenstein, *Capacities of noiseless quantum channels for massive indistinguishable particles: Bosons versus fermions*, Phys. Rev. A 75, (2007), 022331.
- [32A] E. W. Piotrowski, J. Śładkowski, *Quantum computer: an appliance for playing market games*, Inter. J. Quantum Inform. 2, 495, (2004)
- [33A] D. Aerts, M. Czachor, *Quantum aspects of semantic analysis and symbolic artificial intelligence*, J. Phys. A: Math. Gen. 37, L123-L132 (2004) ; D. Aerts, M. Czachor, *Cartoon computation: Quantum-like algorithms without quantum mechanics*, J. Phys. A: Math. Theor. 40, F259-F266 (2007)
- [34A] R. Alicki, M. Horodecki, P. Horodecki i R. Horodecki, *Thermodynamics of quantum information systems- Hamiltonian description*, Open Syst. & Inf. Dyn. 11:(2004), 205
- [35A] R. Alicki, D. Lidar, P. Zanardi, *Consistency of Fault-Tolerant Quantum Error Correction in Light of Rigorous Derivations of the Quantum Markovian Limit*, Phys.Rev.A 73, (2006) 052311
- [36A] R. Alicki, M. Fannes, M. Horodecki, *A statistical mechanics view on Kitaev's proposal for quantum memory*, J.Phys.A.40, (2007) 6451

- [37A] Ph. Blanchard, M. Hellmich, P. Ługiewicz, R. Olkiewicz, *Quantum dynamical semigroups for finite and infinite Bose systems*, J. Math. Phys. 48, 012106 (2007)
- [38A] Ł. Derkacz, L. Jakóbczyk, *Quantum interference and evolution of entanglement in a system of three-level atoms*, Phys. Rev. A 74 (2006), 032313
- [39A] A. Jamiołkowski, On a Stroboscopic Approach to Quantum Tomography of Qudits Governed by Gaussain Semigroups, Open Sys. and Information Dyn. 11 (2004) 63-70
- [40A] W. Karwowski, R. Vilela Mendes: *Quantum Control in Infinite Dimensions*, Phys. Lett. A 322 (2004) 282-285

Literatura B

- [1B] M. Janowicz, S. Karakula, and J. Mostowski, Coherent representation approach to damping of two level system J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **39**, 5199, (2006)
- [2B] C. M. Caves and K. Wódkiewicz, *Fidelity of Gaussian Channels*, Open Systems and Information Dynamics **11**, 309 (2004)
- [3B] I. Białynicki-Birula, T. Sowinski, Gravity-induced resonances in a rotating trap, *Phys. Rev. A*, 71, 043610 (2005)
- [4B] M. Brewczyk, M. Gajda, and K. Rzążewski, Classical fields approximation for bosons at nonzero temperature, *Journ. of Physics B* **40**, R1-R37 (2007)
- [5B] R. Bach and K. Rzążewski, Correlations in atomic systems: Diagnosing coherent superpositions, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 200401 (2004)
- [6B] J. Dziarmaga and K. Sacha, "N-particle Bogoliubov vacuum state", *Laser Phys.* 16, 1134 (2006)
- [7B] P. Ziń, J. Chwedeńczuk, A. Veitia, K. Rzążewski, and M. Trippenbach, Quantum multimode model of elastic scattering losses from colliding Bose-Einstein Condensates, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 200401 (2005)
- [8B] J. Chwedeńczuk, P. Ziń, K. Rzążewski, and M. Trippenbach, Simulation of a single collision of two Bose-Einstein condensates, *Phys. Rev. Lett.* **97** 170404 (2006)
- [9B] J. T. Schulte, S. Drenkelforth, J. Kruse, W. Ertmer, J. Arlt, K. Sacha, J. Zakrzewski, and M. Lewenstein, "Routes Towards Anderson-Like Localization of Bose-Einstein Condensates in Disordered Optical Lattices", *Phys. Rev. Lett.* 95, 170411 (2005).
- [10B] A. Sanpera, A. Kantian, L. Sanchez-Palencia, J. Zakrzewski, and M. Lewenstein, Atomic Fermi-Bose mixtures in inhomogeneous and random lattices: From Fermi glass to quantum spin glass and quantum percolation; *Phys. Rev. Lett.* **93**, 040401 (2004).
- [11B] T. Karpiuk, M. Brewczyk, S. Ospelkaus-Schwarzer, K. Bongs, M. Gajda, K. Rzążewski. "Soliton trains in Bose-Fermi mixtures", *Phys. Rev. Lett.* **93**, 100401 (2004).
- [12B] K. Gawryluk, M. Brewczyk, M. Gajda, K. Rzążewski, "Coherence properties of spinor condensates at finite temperatures", *Phys. Rev. A*, praca przyjęta do druku
- [13B] M. Matuszewski, E. Infeld, B. A. Malomed and M. Trippenbach, "Fully Three Dimensional Breather Solitons Can Be Created Using Feshbach Resonances", *Phys. Rev. Lett.* 95, 050403 (2005).

- [14B] M. Matuszewski, W. Królikowski, M. Trippenbach, and Yu. S. Kivshar, Simple and efficient generation of gap solitons in Bose-Einstein condensates, *Phys. Rev. A* **73**, 063621 (2006)
- [15B] Jan Chwedenczuk, Krzysztof Góral, Thorsten Köhler, and Paul S. Julienne, "Molecular Production in Two Component Atomic Fermi Gases", *Phys. Rev. Lett.* **93**, 260403 (2004).
- [16B] K. Rzażewski and K. Wódkiewicz, Comment on Instability and Entanglement of the Ground State of the Dicke Model , *Phys. Rev. Lett.* **96**, 089301, (2006)

Literatura C

- [1C] B. Szafran, F.M. Peeters, S. Bednarek, *Electron spin and charge switching in a coupled quantum-dot-quantum ring system*, **Phys. Rev. B** **70** (2004) 125310
- [2C] B. Szafran, F.M. Peeters, S. Bednarek, *Exchange energy tuned by asymmetry in artificial molecules*, **Phys. Rev. B** **70** (2004) 205318
- [3C] B. Szafran, F.M. Peeters, S. Bednarek, J. Adamowski, *Anisotropic quantum dots: Correspondence between quantum and classical Wigner molecules, parity symmetry, and broken-symmetry states*, **Phys. Rev. B** **69** (2004) 125344
- [4C] B. Szafran, F.M. Peeters, S. Bednarek, T. Chwiej, J. Adamowski, *Spatial ordering of charge and spin in quasi-one-dimensional Wigner molecules*, **Phys. Rev. B** **70** (2004) 035401
- [5C] B. Szafran, F.M. Peeters, S. Bednarek, J. Adamowski, *In-plane magnetic-field-induced Wigner crystallization in a two-electron quantum dot*, **Phys. Rev. B** **70** (2004) 235335
- [6C] B. Szafran, F. M. Peeters, *Re-entrant pinning of Wigner molecules in a magnetic field due to a Coulomb impurity*, **Europhys. Lett.** **66** (2004) 701
- [7C] S. Bednarek, B. Szafran, T. Chwiej, J. Adamowski, *Effective interaction for charge carriers confined in quasi-one-dimensional nanostructures*, **Phys. Rev. B.** **68** (2003) 045328
- [8C] S. Bednarek, B. Szafran, K. Lis, J. Adamowski, *Modeling of electronic properties of electrostatic quantum dots*, **Phys. Rev. B** **68** (2003) 155333
- [9C] S. Moskal, S. Bednarek, J. Adamowski, *Time evolution simulation of a CNOT gate with two coupled asymmetric quantum dots*, **Phys. Rev. A** **71** (2005) 062327
- [10C] B. Szafran, T. Chwiej, F.M. Peeters, S. Bednarek, J. Adamowski, B. Partoens, *Exciton and negative trion dissociation by an external electric field In vertically coupled quantum dots*, **Phys. Rev. B** **71** (2005) 205316
- [11C] Szafran, T. Chwiej, F.M. Peeters, S. Bednarek, J. Adamowski, *Relative stability of negative and positive trions in a model symmetric quantum wires*, **Phys. Rev. B** **71** (2005) 235305
- [12C] R. Taranko, T. Kwapiński, R. Taranko, *Influence of microwave fields on elektron transport through a quantum dot in the presence of direct tunneling between leads*, **Phys. Rev. B** **69**, 165306 (2004)
- [13C] M. Szopa, M. Margańska, E. Zipper and M. Lisowski, *Coherence of persistent currents in multiwall carbon nanotubes*, **Phys. Rev. B** **70**, 075406 (2004);

- [14C] R. Alicki, M. Horodecki, P. Horodecki, R. Horodecki, L. Jacak, P. Machnikowski, *Optimal strategy for a single-qubit gate and the trade-off between opposite types of decoherence*, **Phys. Rev. A** **70** (2004) 010501,
- [15C] P. Machnikowski, L. Jacak, *Resonant nature of phonon-induced damping of Rabi oscillations in quantum dots*, **Phys. Rev. B** **69** (2004) 193302,
- [16C] A. Radosz, et al. *Thermodynamics of entropy-driven phase transformations*, **Phys. Rev. E** **73**, 026127 (2006)
- [17C] M. Margańska, M. Szopa and E. Zipper *Orbital magnetic moments in pure and doped carbon nanotubes* **Phys. Rev. B** **72**, (2005) 115406
- [18C] P. Pfeffer and W. Zawadzki, *Spin and cyclotron energies of electrons in GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs quantum wells*, **Phys. Rev. B** **74**, 115309 (2006)
- [19C] P. Pfeffer and W. Zawadzki, *Anisotropy of spin g-factor in GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs symmetric quantum wells*. **Phys. Rev. B** **74**, 233303 (2006).
- [20C] W. Zawadzki, *One-dimensional semirelativity for electrons in carbon nanotubes*, **Phys. Rev. B** **74**, 205439 (2006).
- [21C] W. Zawadzki, *Zitterbewegung and its effects on electrons in semiconductors*, **Phys. Rev. B** **72**, 085217 (2005)
- [22C] P. Pfeffer and W. Zawadzki, *Theory of spin splitting in Ga_{1-x}Al_xAs parabolic quantum wells controlled by electric field*, **Phys. Rev. B** **72**, 035325 (2005)
- [23C] C. Skierbiszewski, P. Pfeffer and J. Łusakowski, *Effective g* factor in the diluted nitrides Ga_{1-y}In_yN_xAs_{1-x}*, **Phys. Rev. B** **71**, 205203 (2005)
- [24C] W. Zawadzki, S. Bonifacie, S. Juillaguet, C. Chaubet, A. Raymond, Y. Meziani, M. Kubisa and K. Ryczko, *Nonlinear dependence of magnetophoto-luminescence energies of asymmetric GaAs/Ga_{0.67}Al_{0.33}As quantum wells on an magnetic field*, **Phys. Rev. B** **75**, 245319 1-7 (2007).
- [25C] V. Bondarenko, M. Załuźny, Y. Zhao, *Interlevel electromagnetic response of systems of spherical quantum dots*, **Phys. Rev B** **71**, 115304 (2005).
- [26C] T. Kwapiński, R. Taranko, E. Taranko, *Photon-assisted electron transport through a three-terminal quantum dot system with nonresonant tunneling channels*, **Phys. Rev. B** **72**, 125312 (2005)
- [27C] Krawiec M, Wysokinski KI, *Thermoelectric phenomena in a quantum dot asymmetrically coupled to external leads*, **Phys. Rev. B** **75**, 155330 (2007)
- [28C] L. Jacak, J. Krasnyj, W. Jacak, R. Gonczarek, P. Machnikowski, *Unavoidable decoherence in semiconductor quantum dots*, **Phys. Rev. B** **72**, 245309, (2005)
- [29C] P. Machnikowski, L. Jacak, *Exciton-LO phonon dynamics in InAs/GaAs quantum dots: effects of zone-edge phonon damping*, **Phys. Rev. B** **71**, 115309 (2005)
- [30C] W. Jaskolski and L. Chico, *Localized and conducting states in carbon nanotube superlattices*, **Phys. Rev. B** **71**, 155405, 2005
- [31C] A. Grodecka, P. Machnikowski, *Partly noiseless encoding of quantum information in quantum dot arrays against phonon-induced pure dephasing*, **Phys. Rev. B** **73** (2006) 125306

- [32C] S. Stufler, P. Machnikowski, P. Ester, M. Bichler, V.M. Axt, T. Kuhn, A. Zrenner, *Two-photon Rabi oscillations in a single InGaAs/GaAs quantum dot*, **Phys. Rev. B** **73** (2006)123304
- [33C] P. Machnikowski, M. Axt, T. Kuhn, *Quantum information encoding in dressed qubits* **Phys. Rev. A** **75** (2007) 052330
- [34C] K. Roszak, A. Grodecka, P. Machnikowski, T. Kuhn, *Phonon-induced decoherence for a quantum dot spin qubit operated by Raman passage*, **Phys. Rev. B** **71** (2005) 195333
- [35C] K. Roszak, P. Machnikowski, *Complete disentanglement by partial pure dephasing*, **Phys. Rev. A** **73** (2006) 022313.
- [36C] Machnikowski, *Manifestation of fundamental quantum complementarities in time-domain interference experiments with quantum dots: A theoretical analysis*, **Phys. Rev. B** **72** (2005) 205332.
- [37C] W. Ungier, R. Buczko, *Optical Pumping of the Electron Spin Polarization in Bulk CuCl*, **Phys. Rev. B** **72**, 165320, 2005
- [38C] P. Machnikowski, *Theory of “which path” dephasing in single electron interference due to trace in conductive environment*, **Phys. Rev. B** **73** (2006) 155109.
- [39C] P. Machnikowski, *Change of decoherence scenario and appearance of localization due to reservoir anharmonicity*, **Phys. Rev. Lett.** **96** (2006) 140405
- [40C] J. Planelles, J. Movilla, W. Jaskolski, *From independent particles to Wigner crystalization: The effect of dielectric confinement*, **Phys. Rev. B** **73**, 35305 (2006)
- [41C] Diaz, M. Zielinski, W. Jaskolski, G.W. Bryant, *Tight-binding theory of ZnS/CdS nanoheterostructures. The role of strain and d orbitals*, **Phys. Rev. B** **74**, 205309 (2006)
- [42C] W. Jaskolski, M. Zielinski, G.W. Bryant, J. Aizpurua, *Strain effects on the electronic structure of strongly coupled self-assembled InAs/GaAs quantum dots: Tight-binding approach*, **Phys. Rev. B** **74**, 195339 (2006)
- [43C] M. Mierzejewski, J. Dajka, J. Łuczka, P. Talkner, P. Hänggi, *Dynamical bimodality in equilibrium monostable systems*, **Phys. Rev. E** **74**, 041102 (2006)
- [44C] J. Adamowski, S. Bednarek, B. Szafran, *Modeling of electrostatically gated vertical quantum dots*, **Handbook of Semiconductor Nanostructures and Nanodevices**, ed. A.A. Balandin, K.L. Wang, American Scientific Publishers, Vol. 1, Chapter 9, p. 389
- [45C] E. Zipper, M. Kurpas, M. Szeląg, J. Dajka and M. Szopa, *Flux qubit on mesoscopic nonsuperconducting ring*, **Phys Rev B** **74**, (2006) 125426
- [46C] K. Vyborny, O. Certik, D. Pfannkuche, D. Wodzinski, A. Wójs, J. J. Quinn, *Integral and fractional quantum Hall Ising ferromagnets*, **Phys. Rev. B** **75**, 045434 (2007)
- [47C] A. Sitek, P. Machnikowski, *Collective fluorescence and decoherence of a few nearly identical quantum dots*, **Phys. Rev. B** **75**, 035328 (2007)
- [48C] J. Diaz, G. Bryant, W. Jaskólski, *Theory of InP nanocrystals under pressure*, **Phys. Rev. B** (2007) accepted
- [49C] A. Janutka, *Simulation of quantum logic via collisions of vector solitons*, **J. Phys. A: Math. Gen.** **39** (2006) 12505
- [50C] M. Bylicki, W. Jaskólski, A. Stachów, J. Diaz, *Resonance states of two elektron quantum dots*, **Phys. Rev. B** **72** (2005) 075434

- [51C] R. Gonczarek, L. Jacak, M. Krzyżosiak, A. Gonczarek, *Competition mechanism between singlet and triplet superconductivity in tight-binding model with anisotropic attractive potential*, **The European Physical Journal B** **49** (2006) 171
- [52C] A. Wójs, A. Gładysiewicz, J. J. Quinn, *Quasiexcitons in incompressible quantum liquids*, **Phys. Rev. B** **73**, 235338 (2006)
- [53C] L. Jacak, P. Machnikowski, *Quantum Dots*, **Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology**, American Sc. Publ. 2007 (zamówiony rozdział)
- [54C] M. Krawiec, K.I. Wysokiński *Thermoelectric effects in strongly interacting quantum dot coupled to ferromagnetic leads*, **Phys. Rev. B** **73**, 075307 (2006)
- [55C] Walter van Suijlekom, Ludwik Dabrowski, Giovanni Landi, Andrzej Sitarz, Joseph C. Varilly, *Local index formula for $SU_q(2)$* , **K-Theory** (2005) 35:375–394
- [56C] L. Jacak, J. Krasnyj, D. Jacak, R. Gonczarek, M. Krzyżosiak, P. Machnikowski, *Spin-based quantum information processing in magnetic quantum dots*, **Open Sys.& Information Dyn.** **12** (2005) 133 W. Jacak, J. Krasnyj, J. Jacak, M. Krzyżosiak, L. Jacak, *Quantum information processing on spin degrees of freedom in QDs placed in diluted magnetic semiconductor*, **Phys. Stat. Sol. C** **11**(2006) 3702
- [57C] L. Jacak, J. Krasnyj, W. Jacak, *Structure of the Exciton-Complex X in Electrically Defined Quantum Dot of Type II*, **Phys. Low-Dim. Struct.** **11** (2003) 71, W. Jacak, J. Krasnyj, D. Jacak, *Recognition of a quantum dot type only by an optical measurement*, **Phys. Rev. B.** – w recenzji