

Merytoryczny raport roczny
z realizacji projektu badawczego zamawianego Nr PBZ-MIN-008/P03/03
pt. „Informatyka i inżynieria kwantowa”
za okres od 01.01.2006 r. do 31.12.2006 roku

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

1. Wstęp

Badania prowadzone w zakresie projektu badawczego zamawianego „Informatyka i Inżynieria Kwantowa” przyczyniają 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 trzecim roku realizacji projektu zespoły badawcze uczestniczące w realizacji projektu zamawianego „**Informatyka i Inżynieria Kwantowa**” uzyskały w 2006 roku znaczące rezultaty w zakresie tematyki objętej projektem zamawianym. Na wymierny dorobek projektu w tym okresie składa się **3** prace opublikowanych w najlepszym czasopiśmie fizycznym **Physical Review Letters** oraz **39** w **Physical Review**, spośród ogólnej liczby **115** prac w czasopiśmie recenzowanych z Listy Filadelfijskiej. Wykonawcy projektu uczestniczyli w okresie sprawozdawczym w **63** 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 został poddany publicznej ocenie na sympozjach naukowo – sprawozdawczych zorganizowanych w listopadzie i grudniu 2006 roku na Uniwersytecie Gdańskim i w Centrum Fizyki Teoretycznej PAN. Sympozjum sprawozdawcze na Politechnice Wrocławskiej zostanie zorganizowane w w 2007 roku, przed zakończeniem grantu. Przebieg sympozjów wykazał że dotychczasowa realizacja projektu badawczego zamawianego „Informatyka i Inżynieria Kwantowa” jest 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

2. Najważniejsze wyniki

W dziedzinie kwantowej teorii informacji trwałym wkładem do teorii splątania jest operacyjna interpretacja korelacji kwantowych, głównie w oparciu o wielkości entropowe, czego przykładem jest kwantowa entropia warunkowa mogąca, w odróżnieniu od przypadku klasycznego, przyjmować wartości ujemne. Dokonano także znacznego postępu w rozumieniu i ilościowej charakteryzacji ograniczeń dla efektywności procesów przetwarzania

informacji kwantowej w układach otwartych a także ich termodynamicznych aspektów. Wyniki te stanowią solidną podstawę teoretyczną dla badania konkretnych fizycznych implementacji np. kryptografii kwantowej czy precyzyjnych pomiarów wykorzystujących korelacje kwantowe.

Najważniejsze rezultaty można pogrupować w trzy grupy tematyczne:

Struktura i własności stanów splątanych

Monografia I. Bengtsson, **K. Życzkowski**, *Geometry of Quantum States: An Introduction to Quantum Entanglement*, Cambridge University Press, Cambridge 2006 zawiera podsumowanie wiedzy na temat struktury stanów i ich odwzorowań dla układów kwantowych opartej także na wielu oryginalnych wynikach autorów monografii.

W pracach **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) zbadano nową klasę stanów wielocząstkowych, symetrycznych względem działania nieredukowalnych reprezentacji grupy unitarnej i ortogonalnej.

W pracy **M. Żukowski**, *On Tight Multiparty Bell Inequalities for Many Settings*, Quantum Information Processing **5**, 287 (2006) zaproponowano geometryczną metodę wyprowadzania nierówności Bella dla eksperymentów, w których każdy z N obserwatorów wybiera pomiędzy trzema alternatywnymi, dychotomicznymi obserwablami, uzyskując w ten sposób pełny zestaw nierówności Bella dla danej sytuacji eksperymentalnej.

W pracy **P. Caban**, **J. Rembieliński**, *Einstein-Podolsky-Rosen correlations of Dirac particles: Quantum field theory approach*, Phys. Rev. A. **74** (2006), 042103. policzono, metodami kwantowej teorii pola, funkcję korelacji dla eksperymentu typu EPR z dwoma masywnymi relatywistycznymi cząstkami Diraca.

Praca **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) zawiera analizę związków pomiędzy strukturą próżni w kwantowej teorii pola a splątaniem.

Zastosowanie stanów splątanych w procesach przetwarzania informacji

Wyniki pracy **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) 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 **M. Demianowicz**, **P. Horodecki**, *Quantum channel capacities - multiparty communication*, Phys. Rev. A **74**, 042336 (2006) 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 zespole statystycznych

zawierającym dwie kopie każdego stanu zostało przedstawione w pracy **M. Horodecki, P. Horodecki, M. Piani**, *Quantumness of ensemble from no-broadcasting principle*, Inter.J. Quantum Inform. **4**, (2006), 105.

Nieodwracalna dynamika kwantowych procesów przetwarzania informacji

Praca **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 stanowi obszerną analizę przybliżenia markowskiego w kwantowej teorii układów otwartych ze szczególnym uwzględnieniem jego zastosowań w kwantowej teorii korekcji błędów.

W pracy Ph. Blanchard, M. Hellmich, **P. Ługiewicz, R. Olkiewicz**, *Quantum dynamical semigroups for finite and infinite Bose systems*, J. Math. Phys. **48**, 012106 (2007) podano konstrukcję klasy kwantowych półgrup dynamicznych dla skończonych i nieskończonych układów bozonowych.

W 2006 roku nadal świetnie przebiegała realizacja projektu w części B. We wszystkich zadaniach osiągnięto znaczące rezultaty. Wiele z nich ukazało się już drukiem. W dużej mierze osiągnięte wyniki odpowiadają deklarowanym zamierzeniom, choć należy rozumieć, że w badaniach poznawczych często najciekawsze wyniki są do pewnego stopnia niespodziewane.

Głównym tematem badań w tej części grantu jest inżynieria kwantowo zdegenerowanych gazów atomowych i molekularnych. To niezwykle układy kwantowe. Składają się z około miliona atomów. Umożliwia to dokonywanie nieniszczących doświadczeń z pojedynczymi kopiami układu kwantowego. To nowa, dotąd niedostępna sytuacja. Taki wielki układ jest wyjątkowo odporny na dewastujące zjawisko dekoherencji, prześladowujące fizyków zajmujących się informatyką kwantową. Stąd wielkie nadzieje z nim związane. W ramach nakreślonych zadań osiągnięto wiele znaczących wyników.

W ostatnich kilku latach, co pokrywa się niemal dokładnie z trwaniem grantu, grupa K. Rzązewskiego rozwinęła przybliżenie pól klasycznych do opisu statystycznych własności równowagowych oraz dynamiki słabo oddziałującego gazu bozonowego w skończonych temperaturach. Na zamówienie *Journal of Physics B* autorzy napisali obszerny artykuł przeglądowy, **M. Brewczyk, M. Gajda, and K. Rzązewski**, *Classical fields approximation for bosons at nonzero temperature*, Journ. of Physics B **40**, R1-R37 (2007).

Zawiera on opis metody. Wychodząc od teoriopolewego sformułowania równań polega ona na zastąpieniu zespolonymi amplitudami operatorów pola tych modów, które są wysoko obsadzone. W pracy podano szczegółową dyskusję najtrudniejszego elementu metody, jakim jest wybór optymalnego parametru wyznaczającego krótkofalową granicę modów klasycznych. Jest to zależny od czasu opis mikrokanoniczny. Oznacza to w szczególności, że energia, a nie temperatura jest tu parametrem kontroli. W pracy przedyskutowano różne sposoby zdefiniowania temperatury w metodzie. Praca zawiera ponadto opis najważniejszych zastosowań metody. Należą tu:

1. Fragmentacja kondensatów jednowymiarowych
2. Wyznaczenie zależnych od temperatury energii i czasów życia wzbudzeń kolektywnych gazu.
3. Ilościowy opis niszczenia wirów przez skończoną temperaturę.
4. Rozpad wirów o ładunku topologicznym dwa
5. Wyznaczenie prędkości krytycznej fazy nadciekłej

6. Badanie zjawisk spójności w kondensatach spinorowych

W pracy **J. Chwedeńczuk, P. Ziń, K. Rzążewski, M. Trippenbach**, *Single quantum realization of a collision of two Bose Einstein condensates*, Phys. Rev. Lett. 97, 170404 wykorzystano model zderzeń kondensatów Bosego – Einsteina do konstrukcji rozkładu gęstości atomów pojedynczej realizacji. Wielkość taka opisuje układ kwantowy w pojedynczym eksperymencie, a nie średnią po wielu realizacjach. Dzięki spostrzeżeniu, że rozproszone atomy opisywane są stanami ścisłymi w niezależnych modach, dla silnie obsadzonych modów udało się wyznaczyć obraz pojedynczej realizacji. Korzystając z tej funkcji, narysowano gęstość rozproszonych atomów w pojedynczym eksperymencie i pokazano, że dla odpowiednio dobranych parametrów zderzenia można zaobserwować znaczącą różnicę między średnią, a pojedynczą realizacją. Wydaje się, że w niedalekiej przyszłości wykonane zostaną doświadczenia, które być może potwierdzą słuszność tych przewidywań.

W pracy **I. Białynicki-Birula** and T. Radożycki, *Pinning and transport of cyclotron (Landau) orbits by electromagnetic vortices*. Phys. Rev. A 73, 052114 (2006) pokazano, że wiązka fal elektromagnetycznych obdarzona momentem pędu może służyć do kontroli i transportu cząstek naładowanych, na przykład elektronów. Przeprowadzono szczegółową analizę dla elektronów znajdujących się w stałym polu magnetycznym zarówno w teorii klasycznej (orbity cyklotronowe), jak i w teorii kwantowej (stany Landaua). Uzyskanie definitywnych odpowiedzi na stawiane pytanie w pełnym zakresie parametrów stało się możliwe dzięki znalezieniu ścisłych, analitycznych rozwiązań klasycznych równań ruchu Lorentza oraz kwantowych równań falowych Schrodingera i Diraca. Istotne w tej analizie okazały się dwa bezwymiarowe parametry: stosunek częstości cyklotronowej dla stałego pola do częstości fali i stosunek częstości cyklotronowej charakteryzującej amplitudę fali do częstości fali. Znaleziono obszary stabilności ruchu cząstki naładowanej w funkcji tych parametrów.

Pośród rezultatów uzyskanych w dziedzinie inżynierii kwantowej ciała stałego (część C) znajduje się wiele wyników z zakresu kwantowych własności nanostruktur, przy dużym nacisku położonym na analizy użyteczności tych struktur dla celów informatyki kwantowej. Należy podkreślić, że dla dalszego rozwoju QIPEC (przetwarzania informacji kwantowej i komunikacji) najistotniejsze jest określenie możliwości praktycznych realizacji qubitów i logicznych bramek kwantowych, w tym przede wszystkim w obszarze nanotechnologii przy wykorzystaniu kropek kwantowych i innych nanostruktur. Wyniki uzyskane w tym zakresie są znaczące także w skali międzynarodowej. Za najistotniejszy wynik uznać tu można rozstrzygnięcie odnośnie przydatności orbitalnych (czyli ładunkowych) i spinowych stopni swobody w kropkach kwantowych dla budowy skalowanego komputera kwantowego w technologii stało-ciałowej. Obszerna seria wyników w tym zakresie uzyskanych w ramach realizacji zadań w gałęzi C projektu zamawianego, 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 (wielo-qubitowego) komputera kwantowego. Wykazane zostało, że nieusuwalna dekoherencja fazowa (tj. niekontrolowana utrata informacji kwantowej) w przypadku półprzewodnikowych nanostruktur (w szczególności kropek kwantowych) lokuje się niekorzystnie pośrodku wymaganego okna 6-ciu rzędów wielkości między

charakterystycznym czasem sterowania, a czasem dekoherencji amplitudowej, zarówno dla ładunkowych jak i spinowych stopni swobody w półprzewodnikowych kropkach kwantowych. Rezultaty te uznać można za zasadniczy wynik badań w gałęzi C projektu, o dużym przełożeniu na planowanie projektów i międzynarodowych przedsięwzięć zwłaszcza technologicznych w zakresie informatyki kwantowej, gdyż jasno definiują one realne ograniczenia fizyczne nałożone na praktyczne realizacje QIPEC w obszarze nanotechnologii. Można dodać, że odnośnie defazowania spinu w kropkach kwantowych istotne rezultaty zostały uzyskane właśnie w 2006 roku.

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 i do tej tematyki odnosi się bardzo obszerna grupa prac zrealizowanych w ramach projektu (w 2006 roku). Wymienić tu można liczne rezultaty z zakresu:

- analizy efektu giromagnetycznego w nanostrukturach półprzewodnikowych,
- modelowania własności kropek i nanostruktur (w tym nanorurek węglowych) metodami *ab initio* typu silnego wiązania
- topologicznych charakterystyk nanorurek węglowych
- analizy kropek kwantowych II rodzaju metodami Hartree-Focka
- rozwinięcia i zastosowania wariacyjnej metody mieszanie konfiguracji do modelowania wieloelektronowych kropek kwantowych
- układów hallowskich – kontynuowana jest seria prac z zakresu hybrydyzacji typowo pasmowych cząstek: elektronów, dziur lub ekscytonów w półprzewodnikach z topologicznymi stopniami swobody w układach 2D w silnym polu magnetycznym; są to pionierskie prace w zakresie poszukiwania realnych przejawów złożonych fermionów w widmach optycznych i innych charakterystykach płaskich struktur półprzewodnikowych
- stanów nadprzewodzących i układów nieliniowej optyki.

Pozostałe rezultaty uzyskane w 2006 roku i warte podkreślenia, to prace w zakresie interpretacji pomiaru kwantowego (zagadnienie typu *'which path'*), symulacje QIP przy pomocy solionów, zastosowanie formalizmu grup warkoczowych do interpretacji *informacyjnej zasady holograficznej*, a także termodynamicznych własności nanocząstek (kropek i nanokryształów).

W pracy **P. Machnikowski**, *Theory of "which path" dephasing in single electron interference due to trace in conductive environment*, Phys. Rev. B 73 (2006) 155109.

rozpatrzono kwantowe zagadnienie wyboru trajektorii przy braku i przy obecności obserwacji (*which path*) przy uwzględnieniu defazowania przez otoczenie. Uwzględniono także anharmoniczny wpływ oddziaływania z fononami na zmianę charakteru dekoherencji fazowej ładunku w kropce kwantowej wywoływanej przez fonony, **P. Machnikowski**, *Change of decoherence scenario and appearance of localization due to reservoir anharmonicity*, Phys. Rev. Lett. 96 (2006) 140405.

W pracach J. Planelles, J. Movilla, **W. Jaskolski**, *From independent particles to Wigner crystalization: The effect of dielectric confinement*, Phys. Rev. B 73, 35305, 2006 i J. 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 przedstawiono wyniki modelowania wielo-elektronowych kropek kwantowych z

uwzględnieniem krystalizacji Wignera pojawiającej się w wyniku oddziaływania i przy uwzględnieniu naprężeń w hetero-strukturze.

Podobne metody silnego wiązania pozwoliły też na analizę układu silnie związanych kropek kwantowych (sztucznych molekuł) **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).

Duży zakres rozmaitych wyników z dorobku grupy z AGH w obszarze modelowania elektrostatycznie wytwarzanych kropek kwantowych zostało przedstawionych w obszernym rozdziale w książce **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

Rozwinięto teorie czynnika giromagnetycznego w nanostrukturach półprzewodnikowych, **P. Pfeffer i W. Zawadzki**, *Anisotropy of spin g-factor in GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs symmetric quantum wells*. Phys. Rev. B 74, 233303 (2006), w związku z wkładem energetycznym od spinowych stopni swobody w studniach kwantowych **P. Pfeffer i W. Zawadzki**, *Spin and cyclotron energies of electrons in GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs quantum wells*, Phys. Rev. B 74, 115309 (2006). Został zaproponowany nowatorski kwazi-relatywistyczny opis dynamiki elektronu w jednowymiarowym modelu nanorurki węglowej **W. Zawadzki**, *One-dimensional semirelativity for electrons in carbon nanotubes*, Phys. Rev. B 74, 205439 (2006).

Zagadnienie kwantowania strumienia magnetycznego zostało przeanalizowane w przypadku mezoskopowych obwodów przy obecności nadprzewodnictwa i rozpatrzone zostało zastosowanie takiego układu do realizacji qubitu dla potrzeb QIP, **E. Zipper**, M. Kurpas, M. Szelaż, J. Dajka i **M. Szopa**, *Flux qubit on mesoscopic nonsuperconducting ring*, Phys Rev B 74, (2006) 12542.

W kontynuacji szerokiej serii prac z zakresu FQHE przedstawiono możliwość kwantowania hallowskiego w odniesieniu do magnetycznych własności układu 2D (w modelu Isinga) **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).

W pracy **A. Sitek, P. Machnikowski**, *Collective fluorescence and decoherence of a few nearly identical quantum dots*, Phys. Rev. B 75, 035328 (2007) przeanalizowano modyfikacje dekoherencji (a także emisji optycznej) w przypadku układu skorelowanych odpowiednio kropek kwantowych.

Zbadano wpływ entropii układu na kinetykę przejścia fazowego w układach złożonych, **A. Radosz**, et al. *Thermodynamics of entropy-driven phase transformations*, Phys. Rev. E 73, 026127(2006) 1-15

Zaproponowano kwazi-dokładną symulację QIP (kwantowego przetwarzania informacji) przy wykorzystaniu nieliniowych obiektów klasycznych – solitonów, **A. Janutka**, *Simulation of quantum logic via collisions of vector solitons*, J. Phys. A: Math. Gen. 39 (2006) 12505-12513

Rozwiązano problem współzawodnictwa sparowania singlet i tryplet w przypadku anizotropowego nadprzewodnika w modelu silnego wiązania, **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) 171-186

W pracy **A. Wójs, A. Gładysiewicz, J. J. Quinn**, *Quasiexcitons in incompressible quantum liquids*, Phys. Rev. B 73, 235338 (2006). Rozwinięto model hybrydyzacji typowego wzbudzenia lokalnego w półprzewodniku – ekscytonu, z topologicznymi stopniami swobody charakterystycznymi dla układów płaskich w silnym polu magnetycznym.

Opracowano rozdział (około 20 stron, z zakresu kropek kwantowych i dekoherencji ich stanów kwantowych) do II edycji amerykańskiej encyklopedii nanotechnologii, **L. Jacak, P. Machnikowski**, *Quantum Dots*, Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology, American Sc. Publ. 2007 (zamówiony rozdział).

Rozwinięto teorię termoelektrycznych zjawisk (o dużym praktycznym znaczeniu) dla kropek kwantowych i ich układów **M. Krawiec, K.I. Wysokiński** *Thermoelectric effects in strongly interacting quantum dot coupled to ferromagnetic leads*, Phys. Rev. B 73, 075307 (2006).

3. Wyniki badań naukowych w 2006 roku według harmonogramu zadań

Realizacja programu badań przebiegała zgodnie z planem, a w wielu przypadkach udało się uzyskać ważne rezultaty wykraczające poza przewidziany początkowo zakres badań. Poniżej przedstawione są najważniejsze wyniki naukowe uzyskane w 2006 roku przez zespoły uczestniczące w projekcie w odniesieniu do realizowanych tematów badawczych.

3.a. Grupa tematyczna I. Manipulacje kwantowe spuląpkowanymi jonami i analiza ich zastosowania w informatyce kwantowej

W zadaniu I.1 „Fizyka jonów a dekoherencja” kierowanym przez prof. J. Mostowskiego (IF PAN) badano pojedyncze jony w pułapce, które anowią jeden z nielicznych układów, w których możliwe są operacje prowadzące do kwantowych obliczeń. Jednym z ważnych problemów jest jednak ocena szybkości i innych charakterystyk tłumienia i dekoherencji układu, która warunkuje dostępny czas wykonania obliczeń. Badanie tłumienia jest więc jednym z ważnych elementów fizyki jonów w pułapce.

Zastosowano dwa podejścia do tłumienia układów kwantowych o dwóch stanach. Pierwsza z nich oparta jest o funkcje charakterystyczne specyficzne dla układów dwupoziomowych. Funkcje te wzorowane są na ich odpowiednikach dla układów liniowych (oscylatorów harmonicznyc), różnią się jednak strukturą. Na początek funkcje te zostały zbadane szczegółowo dla pojedynczego układu. W ten sposób można było opisać tłumienie stanu pojedynczego jonu w pułapce. Istotny był opis tłumienia układ dwustanowego przygotowanego w stanie nieklasycznym. Pokazano, że tłumienie takiego stanu jest szybsze niż w przypadku stanu mającego odpowiednik klasyczny. W dalszym ciągu zbadano układ składający się z dwóch nieoddziałujących podukładów o dwóch stanach. Tłumienie takiego układu jest opisane przez sprzężenie każdego z podukładów z niezależnym rezerwuarem. Używając omówionego formalizmu zbadano szczegółowo tłumienie układu znajdującego się w stanie separowalnym oraz w stanie splątanym. Udowodniono, że tłumienie spójności,

czyli relacji fazowej w stanie splątany jest szybsze (o czynnik 2) w porównaniu z tłumieniem populacji.

W dalszym ciągu podano alternatywny opis tłumienia stanów układów o dwóch poziomach w oparciu o reprezentację Schwingera. To podejście jest szczególnie użyteczne dla opisu tłumienia stanów pojedynczego układu dwustanowego. W tym kontekście zbadano tłumienie stanu typu kota Schrodingera, jak również innych stanów. Podejście to zostało też rozszerzone na przypadek dwóch układów o dwóch poziomach.

W zadaniu I.2 „Fizyczne kanały przesyłania informacji” kierowanym przez prof. K. Wódkiewicza (IFT UW) zbadano efektywną generację stanów kwantowych zwanych kotami i kociątkami Schrodingera. Generacja oparta jest na zastosowaniu nieliniowych stanów Kerra. W nieliniowych ośrodkach czy kanałach optycznych z nieliniowym ośrodkiem można generować stany Kerra. Stany Kerra nie są stanami Gaussa, co powoduje, że badanie tych stanów w przestrzeni fazowej jest dość złożone. I tak funkcja Wagnera takiego stanu nie była dotychczas badana. W pracy tej udało się obliczyć i wykreślić funkcję Wignera dla stanu Kerra i zbadać dynamikę dla różnych parametrów. Kolejne wykresy funkcji Wignera reprezentują powstawanie stanów zawierających dwie lub więcej superpozycji kotów Schrodingera. Następnie wykazano, że stany te można realistycznie generować w pułapkach jonowych. Za pomocą specjalnie złożonej sekwencji impulsów laserowych, można w sposób efektywny nadrukować stany Kerra w pułapce jonowej.

W zadaniu I.3 „Przybliżenia dyskretne kwantowych teorii pól z cechowaniem i ich zastosowania do fizyki atomów” kierowanym przez prof. J. Kijowskiego (CFT PAN) kontynuowano badania dyskretnych przybliżeń kwantowej teorii pola. W szczególności udało się uzyskać znaczny postęp na drodze do konstrukcji granicy termodynamicznej teorii pola skalarnego na nieskończonej siatce kubicznej, w której parametry teorii (masa, oddziaływanie między sąsiednimi punktami sieci) nie są stałe lecz zależą nietrywialnie od położenia na sieci. Model taki stanowi np. dobre przybliżenie teorii pola na nietrywialnym tle grawitacyjnym. W przypadku jednorodnym podstawą konstrukcji jest grupa symetrii translacyjnych teorii, pozwalająca diagonalizować Hamiltonian. Dzięki temu potrafimy dobrać odpowiednią reprezentację kanonicznych reguł komutacji Heisenberga (w przypadku nieskończonej ilości stopni swobody jest ich nieskończenie wiele – i to nierównoważnych!) do znanej *explicite* postaci Hamiltonianu. Dla teorii niejednorodnej (a więc np. w obecności tła grawitacyjnego) taka konstrukcja jest zupełnie nieprzydatna. Zaproponowane przez nas podejście polega na przybliżaniu układu polowego (z nieskończoną ilością stopni swobody) przez układ kwantowo-mechaniczny (ze skończoną ilością stopni swobody).

W zadaniu I.4 „Rola mechanizmów kwantowo-elektrodynamicznych w procesach dekoherencji i fundamentalne ograniczenia na zachowanie spójności nakładane przez fizyczną strukturę próżni elektrodynamicznej” kierowanym przez prof. Iwo Białynickiego-Birulę (CFT PAN) pokazano, że wiązka fal elektromagnetycznych obdarzona momentem pędu może służyć do kontroli i transportu cząstek naładowanych, na przykład elektronów. Przeprowadzono szczegółową analizę dla elektronów znajdujących się w stałym polu magnetycznym zarówno w teorii klasycznej (orbity cyklotronowe), jak i w teorii kwantowej (stany Landaua). Uzyskanie definitywnych odpowiedzi na stawiane pytanie w pełnym zakresie parametrów stało się możliwe dzięki znalezieniu ścisłych, analitycznych rozwiązań klasycznych równań ruchu Lorentza oraz kwantowych równań falowych Schroedingera i Diraca. Istotne w tej analizie okazały się dwa bezwymiarowe parametry: stosunek częstości cyklotronowej dla stałego pola do częstości fali i stosunek częstości cyklotronowej

charakteryzującej amplitudę fali do częstości fali. Znalaziono obszary stabilności ruchu cząstki naładowanej w funkcji tych parametrów.

Opisano szczegółowo własności wiązek fal elektromagnetycznych wykorzystywanych a pracy 1 do kontroli ruchu cząstek naładowanych. Podano analityczne wzory opisujące takie fale wykorzystując wektor Riemanna-Silbersteina i reprezentację Whittakera do przedstawienia rozwiązań równań Maxwella. Znalaziono nowe rozwiązania tych równań charakteryzujące się wykładniczym spadkiem natężenia fali w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku rozchodzenia się fali.

Wykorzystując stosowane często w informatyce pojęcie entropii Renyiego znalaziono postać kwantowych zasad nieoznaczoności.

3.b. Grupa tematyczna II. Badanie możliwości kwantowego przetwarzania informacji przy wykorzystaniu własności ultra-zimnych skończonych układów atomowych (kondensaty Bosego Einsteina, zimne mieszaniny fermionowo-bozonowe i możliwości ich koherentnego sterowania).

W zadaniu II.1 „Półklasyczny opis kondensatu w skończonej temperaturze” kierowanym przez doc. M. Gajdę (IF PAN) przeprowadzono badania dotyczące istoty założeń leżących u podstaw metody pół klasycznych do opisu kwantowego gazu bozonowego w większych od zera temperaturach. Metoda pół klasycznych polega na zastąpieniu operatorów kreacji i anihilacji cząstek w makroskopowo obsadzonych modach układu przez zespolone amplitudy. Pozostałe, nisko obsadzone mody są ignorowane. Szczególny nacisk położono na zrozumienie sensu fizycznego owego obciążenia wysoko obsadzonych modów. W tym celu sformułowano klasyczny model nieliniowej, jednowymiarowej struny a następnie analizowano, jakie dodatkowe założenia są konieczne aby rozwiązania można interpretować w języku mechaniki kwantowej wielu ciał. Pokazano, że kluczowym elementem jest obciążenie modów o wysokich częstościach. Obciążenie tych modów jest równoznaczne z wprowadzeniem do teorii stałej o wymiarze działania. Aby wartość tej stałej zgadzała się zwartością stałej Plancka obciążenie należy wybrać tak, żeby w najmniej obsadzonym modzie klasycznym znajdował się średnio jeden atom. Wyniki tych badań zostały wysłane do publikacji do J. Phys. B, i praca ta została pozytywnie oceniona przez recenzentów i będzie wkrótce opublikowana.

W ramach tego zadania zbadano również efekt Einsteina-deHaasa w kondensacie rubidowym. Efekt ten jest tradycyjnie obserwowany w ferromagnetykach. Zmiana kierunku zewnętrznego pola magnetycznego powoduje obrót próbki. Ciekawe jest sprawdzenie, czy podobny efekt może być wykryty w spinowo spolaryzowanych kondensatach atomowych. Badania prowadzone w ramach tego zadania pokazały, że jest to możliwe. W celu uzyskania tego efektu kondensat spolaryzowanych spinowo atomów rubidu początkowo w stanie o $F=1$ zaczyna przechodzić do stanów o $F=0$ i $F=-1$ gdy odwróci się kierunek pola magnetycznego. W stanach tych pojawiają się skwantowane wiry, co świadczy o rotacji chmury atomowej. Obrót ten jest wynikiem zachowania całkowitego momentu pędu, a nie oddzielnie orbitalnego i spinowego momentu pędu, za co odpowiedzialne są oddziaływanie dipolowe. Zadziwiające jest, że udało wykazać w obliczeniach numerycznych, że efekt Einsteina-deHassa można zaobserwować w kondensacie rubinowym, dla którego oddziaływania magnetycznych momentów są bardzo słabe i z reguły pomijane. Okazuje się, że ten słaby efekt zostaje wzmocniony dzięki rezonansowi. Rezonans pojawia się, gdy energia zeemanowska atomów w stanie $F=1$ jest równa energii kinetycznej związanej z obrotem atomu w stanie $F=0$.

W zadaniu II.2 „Metody kwantowej teorii pola w zastosowaniu do zimnych gazów” kierowanym przez prof. K. Rzążewskiego (CFT PAN) rozwijano przybliżenie pól klasycznych do opisu statystycznych własności równowagowych oraz dynamiki słabo oddziałującego gazu bozonowego w skończonych temperaturach. Na zamówienie *Journal of Physics B* napisano obszerny artykuł przeglądowy. Zawiera on opis rozwiniętej przybliżonej metody. Wychodząc od teoriopolowego sformułowania równań teorii polega ona na zastąpieniu zespolonymi amplitudami operatorów pola tych modów, które są wysoko obsadzone. W pracy podano szczegółową dyskusję najtrudniejszego elementu metody, jakim jest wybór optymalnego parametru wyznaczającego krótkofalową granicę modów klasycznych. Opis ten jest zależnym od czasu opisem mikrokanonicznym. Oznacza to w szczególności, że energia, a nie temperatura jest tu parametrem kontroli. W pracy przedyskutowano różne sposoby zdefiniowania temperatury w naszej przybliżonej metodzie. Praca zawiera ponadto opis najważniejszych zastosowań metody. Należą tu:

1. Fragmentacja kondensatów jednowymiarowych
2. Wznaczenie zależnych od temperatury energii i czasów życia wzbudzeń kolektywnych gazu.
3. Ilościowy opis nieszczenia wirów przez skończoną temperaturę.
4. Rozpad wirów o ładunku topologicznym dwa
5. Wyznaczenie prędkości krytycznej fazy nadciekłej
6. Badanie zjawisk spójności w kondensatach spinorowych.

W zadaniu II.3 „Fizyka kondensatu a optyka nieliniowa. Zastosowanie teorii procesów stochastycznych” kierowanym przez dr. hab. M. Trippenbacha (IFD UW) zbadano nowy typ stabilnych trójwymiarowych solitonów w ośrodkach optycznych typu Kerra z periodyczną modulacją dyspersji (dispersion management) oraz poprzeczną zmianą współczynnika załamania. Stanowi to krok w kierunku uzyskania eksperymentalnej realizacji pocisków optycznych (light bullets). Wyniki opisane w tym artykule zostały uzyskane na podstawie analizy wariacyjnej, która przewidywała istnienie stabilnych solitonów w szerokim zakresie parametrów.

Przebadano właściwości hybrydowej metody wariacyjnej, która pozwala w przybliżony sposób opisać ewolucję nieliniowych układów, kiedy kształt funkcji falowej jest dobrze znany tylko w jednym wymiarze. Uzyskano częściową zgodność wyników pełnej ewolucji z przybliżeniem hybrydowym. Praca ta jest pierwszą, która opisuje dynamiczną ewolucję za pomocą metody hybrydowej.

Dokonano podsumowania dotychczasowych osiągnięć w dziedzinie nieliniowej optyki atomów. To podsumowanie było prezentowane na konferencji PHOTON 2005, jako zaproszony wykład.

Rozwinięto kwantowy model rozpraszania atomów na skutek zderzeń konsensów Bosego – Einsteina (wprowadzony w pracy P. Ziń, *et al.*, Phys. Rev. Lett . **94**, 200401 (2005)). Przeanalizowaliśmy dokładnie wszystkie uproszczenia prowadzące do końcowego równania ruchu. Wyzaczyliśmy w pierwszym rzędzie rachunku zaburzeń takie wielkości, jak macierz gęstości, czy gęstość anomalna. Analityczne wyrażenia pozwoliły nam na oszacowanie, kiedy w układzie zachodzi zjawisko bozonowego wzmocnienia. Ponadto, wyznaczyliśmy pierwszą i drugą funkcję korelacji układu. Pokazaliśmy, jak wyraża się całkowita liczba rozproszonych cząstek w trzech kolejnych rzędach rachunku zaburzeń. Pozwoliło nam to na znalezienie ogólnego wyrażenia na liczbę rozproszonych atomów.

Wyrażenia analityczne poparte zostały pełnymi rozwiązaniami numerycznymi

Wykorzystano model zderzeń kondensatów Bosego – Einsteina do konstrukcji funkcji falowej pojedynczej realizacji. Wielkość taka opisuje układ kwantowy w pojedynczym eksperymencie, a nie średnią po wielu realizacjach. Dzięki spostrzeżeniu, że rozproszone atomy opisywane są stanami ścisłymi w niezależnych modach, dla silnie obsadzonych modów udało się wyznaczyć funkcję falową pojedynczej realizacji. Korzystając z tej funkcji, narysowaliśmy gęstość rozproszonych atomów w pojedynczym eksperymencie i pokazaliśmy, że dla odpowiednio dobranych parametrów zderzenia można zaobserwować znaczącą różnicę między średnią, a pojedynczą realizacją. Wydaje się, że w niedalekiej przyszłości wykonane zostaną eksperymenty, które być może potwierdzą słuszność naszych przewidywań.

Opisano wyniki badań teoretycznych i doświadczalnych, prowadzone wspólnie z grupą optyki nieliniowej w Australijskim Uniwersytecie Narodowym. Rezultatem tych badań było odkrycie zjawiska ostrego przejścia od samorozpraszania do samopułapkowania światła w nieliniowych macierzach światłowodów, które zachodzi podczas zwiększania kontrastu współczynnika załamania w światłowodach. Ponadto pokazano, w jaki sposób zjawisko to można wykorzystać do generacji solitonów w takich układach. Opracowana przez nas metoda jest już używana w innych laboratoriach

Zaproponowano, na podstawie wyników powyższych badań, analogiczną metodę generacji solitonów w przypadku kondensatu Bosego-Einsteina z dodatnią długością rozpraszania. W porównaniu do dotychczas stosowanej metody, pozwala ona na znaczne zmniejszenie strat atomów oraz wielokrotne wydłużenie czasu życia tych obiektów. Kierując się uwagami recenzentów tejże pracy, opracowaliśmy teoretyczny model wyjaśniający spontaniczną migrację fal do określonych rejonów strefy Brillouina pod wpływem działania nieliniowości. Jest to zjawisko, które zostało zaobserwowane eksperymentalnie. Model został przychylnie oceniony przez recenzentów i ukazał się w końcowej wersji pracy.

Zbadano ściśle rozwiązania jednowymiarowego nieliniowego równania Schrodingera w geometrii podwójnej prostokątnej i symetrycznej studni potencjału. Podwójna studnia modeluje złącze Josephsona, którego własności badaliśmy w przypadku nieliniowości trzeciego rzędu. Nieliniowe równanie Schrodingera tego typu odpowiada opisowi w teorii pola średniego gazu oddziałujących atomów. W pracy tej badaliśmy oddziaływanie przyciągające. Prostokątny kształt studni potencjału wybraliśmy ze względu na możliwość ściślego rozwiązania nieliniowego równania Schrodingera w tym przypadku. Przeanalizowaliśmy stan podstawowy badanego układu. Okazuje się, że w tym układzie stan podstawowy układu powyżej pewnej wartości współczynnika nieliniowości (siły oddziaływania międzyatomowego) staje się niesymetryczny (pomimo symetrii potencjału) i podwójnie zdegenerowany. Zjawisko to przebadaliśmy również przy pomocy teorii złącza Josephsona, która poprawnie odtworzyła wyniki ściśle rozwiązań.

Rozszerzono analizę układu na oddziaływanie odpychające. Porównaliśmy wyniki ściśle rozwiązań nieliniowego równania Schrodingera z przybliżoną teorią złącza Josephsona. Zgodność pokazała, że podejście perturbacyjne, jakim jest teoria Josephsona poprawnie odtwarza statyczne własności stanów własnych układu. W związku z tym zwróciliśmy naszą uwagę na własności dynamiczne stanów własnych. W tym przypadku teoria Josephsona poprawnie odtworzyła dynamikę niskoenergetycznych wzbudzeń układu.

W zadaniu II.4 „Opis wielocząstkowy w podejściu perturbacyjnym Bogoliubowa” kierowanym przez dr. J. Dziarmagę (IF UJ) zbadano dynamikę przejść fazowych w kwantowym modelu Isinga i w modelu kompasów. Przypadkowy kwantowy model Isinga charakteryzuje się tzw. „infinite disorder fixed point”. Nawet niewielki nieporządek

całkowicie zmienia klasę uniwersalności tego modelu. W kontekście adiabaticznych komputerów kwantowych interesujące staje się pytanie czy jest możliwe adiabaticzne przejście przez punkt krytyczny takiego modelu. Okazuje się, że takie przejście nigdy nie jest naprawdę adiabaticzne, a w szczególności liczba defektów stanu podstawowego, które powstają w czasie przejścia zależy zaledwie logarytmicznie od czasu przejścia.

Model kompasów jest silnie wyidealizowanym opisem izolatorów Motta w kontekście nadprzewodników wysokotemperaturowych. Pomimo pozornej prostoty model kompasów nie został dotąd rozwiązany. Przybliżone rozwiązania perturbacyjne lub w przybliżeniu pola średniego sugerują ogromne degeneracje stanu podstawowego oraz kwantowe przejście fazowe I rodzaju. W pracy nr 2 sformułowaliśmy jednowymiarową wersję modelu kompasów, którą udało nam się rozwiązać ściśle dzięki odwzorowaniu różnych podprzestrzeni modelu na kwantowe modele Isinga o różnych warunkach brzegowych. W naszym modelu obserwujemy zarówno gigantyczną degenerację stanu podstawowego jak i przejście fazowe I rodzaju, a wszystko to w ramach eleganckiego matematycznie rozwiązania.

W zadaniu II.5, „Wpływ szumu i nieporządku na zimne atomy w sieciach optycznych” kierowanym przez prof. J. Zakrzewskiego (IF UJ) prowadzono dwa rodzaje prac. Jedną to kontynuacją badań nad wpływem oddziaływań w kondensacie Bosego-Einsteina na możliwość obserwacji nietrywialnej lokalizacji typu Andersona wskutek obecności nieporządku w układzie zimnych atomów. Otrzymane rezultaty potwierdziły niestety ww wcześniejszych etapach raportowane przewidywania, że oddziaływania prowadzą do efektywnej ekranizacji potencjału przypadkowego i niszczą lokalizację. Te przewidywania zostały przedstawione m.in. na 19 Marian Smoluchowski Symposium on Statistical; Physics (Kraków, maj 2006) jako zaproszony referat plenarny i będą opublikowane w formie publikacji w Acta Physica Polonica B.

Dużo czasu poświęciliśmy drugiemu typowi badań, z jednej strony luźno związanemu z tematem zadania, z drugiej zaś będącego ciekawym testem bardzo zaawansowanych kodów numerycznych, które ewentualnie mogą znaleźć zastosowanie w badaniu dynamiki zimnych atomów. Była to kwantowa analiza procesu jednoczesnej wielokrotnej jonizacji w uproszczonym dwu-wymiarowym modelu. Model ten, stymulowany mechaniką klasyczną i badaniami raportowanymi w projekcie wcześniej pozwala po raz pierwszy tak szczegółowo opisać dynamikę procesu jonizacji i podzielenie go na poszczególne etapy. Pozwala też jawnie zaobserwować istotne procesy fizyczne stymulujące wielokrotną jonizację takie jak tzw. rescattering, pokazać w szczególności jak się buduje proces wielokrotnej jonizacji, pozwala też przewidzieć np., że proces jednoczesnej podwójnej jonizacji staje się bardziej prawdopodobny dla krótkich (ale nie za krótkich, by umożliwić rescattering) impulsów światła. Otrzymane rezultaty zostały opublikowane w formie preprintu i praca jest w recenzji w Physical Review Letters. Zostały przedstawione m.in. na międzynarodowej konferencji w Dreźnie oraz wchodziły jako część rozprawy doktorskiej p. Bechcickiego obronionej we wrześniu br.

W zadaniu II.6, „Inżynieria sieci optycznych” kierowanym przez dr. K. Sachę (IF UJ) prowadzono badania dotyczące czterech zagadnień:

Samolokalizacja atomów obcego pierwiastka w kondensacie Bosego-Einsteina.

W przybliżeniu jednowymiarowym znaleziono rozwiązania układu równań Grossa-Pitajewskiego, które opisywały samolokalizację atomów w kondensacie. Znalezione rozwiązania odpowiadają parametrycznym solitonom znanym w optyce nieliniowej,

solitonom w modelach Schrodingera-Newtona i solitonom w mieszaninach kondensatów molekularno-atomowym. Wyliczono również widmo wzbudzeń w układzie, gdzie okazało się, że istnieją dwie gałęzie wzbudzeń. Pierwsza odpowiada sytuacji, kiedy efektywnie ulegają wzbudzeniom atomy kondensatu, druga sytuacji, gdy atomy obcego pierwiastka są wzbudzane i ulegają delokalizacji. Wyniki opublikowano.

Solitony w mieszaninach kondensatów molekularno-atomowych.

Analizowano charakter rozwiązań równań Grossa-Pitaiewskiego mieszaniny molekuł i atomów w jednowymiarowej pułapce harmoniczej w okolicy rezonansu Feshbacha. Okazało się, że w obecności pułapki i oddziaływań między cząstkami stany stacjonarne równania Grossa-Pitaiewskiego wciąż mają charakter solitonowy. Przeanalizowano również możliwość wzbudzeń takich stanów eksperymentalnie. Czasy konieczne do wzbudzenia solitonów są na tyle krótkie, że można się pokusić o przeprowadzenie eksperymentów w tej dziedzinie.

N-cząstkowe stany w przybliżeniu Bogoljubowa dla mieszaniny kondensatów. Rozważono tzw. stan próżni Bogoljubowa dla dwukomponentowego kondensatu Bosego-Einsteina. Pokazano, że pod pewnymi warunkami stan ten można w prosty sposób zapisać w reprezentacji liczby cząstek. Próżnia Bogoljubowa w reprezentacji liczby cząstek pozwoliła opisać fluktuacje gęstości w kondensacie, gdy parametry układu zbliżają się do wartości odpowiadających warunkowi na separację faz w układzie.

Model jednowymiarowy opisujący podwójną jonizację atomów.

Analiza symetrycznej podprzestrzeni w ruchu elektronów w podwójnej jonizacji atomów w silnym polu laserowym pozwala zidentyfikować kanał jednoczesnej ucieczki elektronów. Znając mechanizm takiej ucieczki byliśmy w stanie zaproponować jednowymiarowy model o poprawnej topologii przestrzeni fazowej z punktu widzenia jednoczesnej ucieczki elektronów. Należy podkreślić, że znany wcześniej w literaturze model jednowymiarowy nie jest w stanie poprawnie opisać interesującego nas procesu. W opublikowanej pracy (patrz poniżej) użyliśmy zaproponowanego modelu do analizy problemu Wanniera w przypadku obecności statycznego pola elektrycznego.

W zadaniu II.7 „Wieloskładnikowy zimny gaz Fermiego” kierowanym przez dr. hab. M. Brewczyka (IF UB) zbadano możliwość generowania jasnych solitonów w kondensacie Bosego-Einsteina z dodatnią długością rozpraszania (efektywnie odpychającymi się atomami). Długość rozpraszania zmieniamy na ujemną przez dodanie składnika fermionowego do układu. Jeśli przyciąganie między bozonami i fermionami jest odpowiednio silne to może ono zmienić oddziaływanie między samymi bozonami z odpychającego na przyciągające i umożliwić wytworzenie jasnych solitonów. Efekt ten przewidzieliśmy wcześniej w oparciu o jednowymiarowe rachunki. W trzech wymiarach musimy jednak pamiętać o kolapsie i zasadne jest pytanie czy istnieją tzw. okna stabilności czyli zakresy wartości stałej sprzężenia opisującej oddziaływanie między bozonami i fermionami, w których mieszanina bozonowo-fermionowa nie rozplywa się ale też nie kolapsuje. W [1] pokazujemy, że okna stabilności istnieją.

Zbadano także temperaturowe własności kondensatów spinorowych skupiając się głównie na spójności tych układów. Kondensaty spinorowe to wieloskładnikowe kondensaty, w których liczba atomów w poszczególnych składnikach może ulegać zmianie. Ten dodatkowy stopień swobody odróżnia kondensaty spinorowe od mieszanin zimnych gazów i jest przyczyną bogactwa własności tych układów. W [2] badamy wzajemny wpływ dynamiki spinów i procesów termalizacji i pokazujemy, że układ osiąga stan równowagi termodynamicznej choć następuje to w dość nietypowy sposób. Wiele interesujących zjawisk zachodzi w kondensacie spinorowym w stanie równowagi. Łamana jest symetria chiralna, atomy w składnikach $+1$ i $-$

1 (w $F=1$ multiplecie) zaczynają wirować w przeciwnych kierunkach a wektor magnetyzacji układa się w bardzo regularne struktury (tekstury spinowe). Z kolei spójność kondensatu spinorowego zaczyna zależeć od wartości stałej sprzężenia charakteryzującej zderzenia kontaktowe zależne od spinu (tzn. prowadzące do zmiany spinów atomów). I tak, jeśli ta stała sprzężenia jest ujemna (kondensat w stanie ferromagnetycznym) ale większa od pewnej wartości krytycznej to obserwujemy spójność pomiędzy składnikami $+1$ i -1 w części skondensowanej, składniki termiczne stają się całkowicie rozfazowane. Co więcej, spójność ta jest okresowo tracona i odzyskiwana co wiąże się właśnie z wirowaniem składników $+1$ i -1 . Natomiast po przekroczeniu wartości krytycznej stałej sprzężenia pojawia się dodatkowo spójność pomiędzy składnikami 0 i $+1$. Zależność spójności od stałej sprzężenia tłumaczymy w oparciu a analizę stabilności kondensatu spinorowego.

3.c. Grupa tematyczna III. Splątanie kwantowe – teoretyczne podstawy informatyki kwantowej (geometria stanów splątanych, splątanie fotonów i kwantowa teleportacja, kwantowa teoria informacji, relatywistyczne aspekty splątania).

W zadaniu III.1 „Podstawy przetwarzania informacji kwantowej” kierowanym przez prof. R. Horodeckiego (IFTIA UG) wprowadzono i przebadano tzw. entropowy parametr splątania. Posiada on interesujące cechy. Dla wszystkich separowalnych stanów parametr jest niedodatni. W ten sposób uzyskujemy informację o sile splątania. Podobną własność posiada koherentna informacja. W pracy dowiedziono, że parametr jest asymptotycznie ciągły i znaleziono jego górne i dolne ograniczenie. Jest interesujące, że parametr „czuje” strukturę stanu i jest związany z komplementarnością pomiędzy bazą własną stanu splątanego i produktowego.

Zbadano zmodyfikowane kryterium Shchukina –Vogela. Idea pracy jest oparta na podstawowej obserwacji, że jeżeli stan jest separowalny, wówczas odpowiednia macierz momentów jest także separowalna. Pozwoliło to zastosować wszystkie znane kryteria separowalności. włączając kryterium przetasowania, a także kryteria oparte na liniowych dodatnich odwzorowaniach. Nowe kryterium pozwala także na detekcję splątania dwuukładowych, wielodomowych systemów. Intrygującym jest fakt, że kryterium to, jak dotąd, nie jest czułe na tzw. związane splątanie.

W zadaniu III.2 „Ilościowa i jakościowa charakteryzacja splątania kwantowego” kierowanym przez dr M. Horodeckiego (IFTIA UG) przedstawiono nową ideę dotyczącą ilościowego opisu splątania. Zaproponowano operację na miarach splątania, zwaną warunkowaniem. Przeprowadza ona miary splątania w nowe miary splątania, posiadające interesujące własności takie jak superaddytywność, oraz szacowanie od dołu regularyzacji starej miary. Jeżeli miara jest superaddytywna, to operacja ta nie zmienia jej. Ponadto nowa miara jest nie większa od starej. Ponadto podano nową miarę, utworzoną przez warunkowanie wzajemnej informacji. Miara ta szacuje od góry tzw. „Squashed entanglement” - miarę wprowadzoną przez Wintera i Christandla. Pokazano, że dla pewnej klasy stanów, miary te są równe. Pokazano, że wielocząstkowe stany splątane można klasyfikować ze względu na przydatność do gęstego kodowania z wieloma nadawcami. Mianowicie, wszystkie splątane stany czyste są przydatne do gęstego kodowania, nawet gdy nadawcy nie mogą się porozumiewać między sobą. Pokazano, że niektóre stany stają się użyteczne dopiero wówczas, gdy nadawcy mogą się komunikować klasycznie. Pokazano też, że inne stany potrzebują kwantowej komunikacji między nadawcami. Zaproponowano też alternatywną definicję „kwantowego zysku” w gęstym kodowaniu, która dla stanów czystych dwucząstkowych jest równa entropii splątania.

W zadaniu III.3 „Termodynamiczne prawa i analogie w przetwarzaniu informacji kwantowej” kierowanym przez prof. dr hab. R. Alickiego (IFTIA UG) Badano ograniczenia na efektywność kwantowej korekcji błędów wynikające z hamiltonowskiego charakteru ewolucji układu. Modele hamiltonowskie w odróżnieniu od czysto fenomenologicznych są zgodne z zasadami termodynamiki. W szczególności pokazano, że wierność stanu zanika eksponencjalnie z „objętością” algorytmu kwantowego.

Przeanalizowano bezpośrednie ograniczenia na stabilność pamięci kwantowej wynikające z drugiej zasady termodynamiki. Opierając się na teorii stanów KMS pokazano, że istnienie stabilnej makroskopowo pamięci kwantowej implikuje istnienie perpetuum mobile II rodzaju. Wyniki zilustrowano za pomocą modelu Kitajewa.

Przedstawiono argumenty wspierające hipotezę o klasycznym charakterze złącz Josephsona co stawia pod znakiem zapytania możliwość wykorzystania takich układów w procesach przetwarzania informacji kwantowej.

Przedstawiono konstrukcję kompletnie dodatnich równań Blocha- Boltzmanna opisujących ewolucje optycznie aktywnych atomów w kąpeli cieplnej gazu zaburzaczy. Przedstawiony w niej model znajduje zastosowania również w teorii przetwarzania informacji kwantowej opartej na spektroskopii atomów oddziałujących z polem lasera.

W zadaniu III.4 „Generacja i analiza nowych stanów splątanych” kierowanym przez prof. dr. hab. M. Żukowskiego (IFTIA UG) zaproponowano geometryczną metodę wyprowadzania nierówności Bella dla eksperymentów, w których każdy z N obserwatorów wybiera pomiędzy trzema alternatywnymi, dychotomicznymi obserwablami. Metoda prowadzi do uzyskania pełnego zestawu nierówności Bella dla danej sytuacji eksperymentalnej. Dzięki niej uzyskujemy warunek konieczny i wystarczający na istnienie lokalnego i realistycznego opisu dla kwantowych funkcji korelacji. Metoda może być uogólniona do przypadku większej ilości alternatywnych obserwabli.

Ponadto prowadzono badania dotyczące komunikacji kwantowej (kwantowa kryptografia, złożoność komunikacyjna obliczeń), twierdzenia Bella oraz generacji stanów splątanych [we współpracy z grupami eksperymentalnymi Zeilingera (Wiedeń) i Weinfurtera (Monachium)]. Wyniki są zawarte w trzech pracach doktorskich będących na ukończeniu.

W zadaniu III.5 „Gry kwantowe” kierowanym przez dr. hab. J. Ślaskowskiego (IF UŚ) kontynuowano badania nad zastosowaniami kwantowej teorii gier. Przedyskutowano problem nieprzechodniości preferencji, co często stanowi problem. Pokazano, że w „kwantowym przypadku” nieprzechodniość jest znacznie bardziej istotna niż w klasycznych odpowiednikach. Kontynuowano badania nad wykorzystaniem formalizmu kwantowej teorii gier w finansach. Analizowano między innymi subtelności wyceny opcji oraz optymalizację zakładów w oparciu o znane z teorii informacji kryterium Kelly’ego. Pokazano jak pewne klasy algorytmów mogą być wykorzystane jako podprocedury. Ponadto, wprowadzone są pojęcia kwantowych wirusów i koni trojańskich. Dyskutowane są również memetyczne aspekty kwantowej sztucznej inteligencji. Zbadano możliwości implementacji gier rynkowych poprzez konstrukcję uniwersalnych składników. Zaproponowano implementację gry kwantowej przy pomocy qubitów realizowanych jako układy mezoskopowe.

W zadaniu III.6 „Odwzorowania dodatnie i ich rola w badaniu stanów splątanych” kierowanym przez prof. A. Kossakowskiego (UMK) zaproponowano nową klasę kwantowych stanów wieloskładnikowych. Stany te są symetryczne względem działania unitarnej nieredukowalnej reprezentacji grupy symetrii. Są naturalnym uogólnieniem

dwuskładnikowych stanów Wernera i stanów izotropowych. Podano warunki separowalności i dokonano analizy klas stanów typu PPT.

Dokonano konstrukcji nowej klasy stanów PPT. Klasa ta zawiera większość stanów tego typu znanych w literaturze (do nielicznych wyjątków należy splątany stan PPT zaproponowany przez P. Horodeckiego oraz klasa stanów oparta na konstrukcji *unextendible product bases*).

Podano konstrukcję nowej klasy nierozkładalnych odwzorowań dodatnich. Jak wiadomo odwzorowania tego typu odgrywają kluczową rolę w detekcji kwantowego splątania (w szczególności odwzorowania nierozkładalne mogą być użyte do wykrywania splątania związanego, tzn. splątanych stanów PPT). Klasa ta w istotny sposób powiększa listę znanych w literaturze odwzorowań tego typu.

W zadaniu III.7 „Relatywistyczne aspekty przetwarzania informacji kwantowej” kierowanym przez prof. dr. hab. J. Rembienińskiego (IF UŁ) policzono funkcję korelacji dla eksperymentu typu Einsteina-Podolsky'ego-Rosena z dwoma masywnymi relatywistycznymi cząstkami Diraca. Obliczenia zostały przeprowadzone z zastosowaniem formalizmu teorii pola. Funkcja korelacji została wyznaczona w stanach, które są interesujące z fizycznego punktu widzenia oraz transformują się w sposób kowariantny pod działaniem transformacji Lorentza, to jest dla stanu pseudoskalarnego i wektorowego.

Znaleziono ewolucję czasową układu dwóch nie oddziałujących cząstek niestabilnych (rozdzielalnych i nierozdzielalnych) w dowolnym układzie odniesienia znając jedynie operatory Krausa definiujące ewolucję cząstek w układzie spoczynkowym. Znaleziono również kwantową funkcję korelacji EPR dla układu K^0 -anti K^0 w stanie singletowym uwzględniając łamanie CP i dekoherencję. Pokazano, że w tym przypadku statystyka cząstek nie ma wpływu na otrzymany wynik.

Zbadano efekt Casimira dla pól naładowanych w obecności zewnętrznego pola magnetycznego. Rozważano pole skalarne (związane z cząstkami bezspinowymi) oraz pole Diraca (związane z cząstkami o spinie 1/2). Otrzymano energie próżni poprzez bezpośrednie rozwiązanie równań pola i użycie metody sumowania modów. W celu obliczenia zrenormalizowanej energii próżni stosowano formuły Abela-Plana.

Rozważono ewolucję splątania zespołu układów dwuskładnikowych. W szczególności zbadano ewolucję splątania dla układów K^0 -anti K^0 w stanie singletowym z uwzględnieniem dekoherencji i łamania CP.

Rozpatrzono transfer informacji przez bezszumowe kanały kwantowe, gdzie informacja zakodowana jest w masywne nierozdzielalne cząstki: bozony i fermiony. Analizowany jest przypadek cząstek nie oddziałujących. Pomimo iż kanały są bezszumowe dopuszczamy aby stany w które kodujemy były „zaszumione”. Przy fizycznie motywowanych ograniczeniach na energię i liczbę cząstek dla stanów wejściowych, elastyczna i kwantowa pojemność bezszumowego kanału ogranicza się do maksymalizacji entropii przy tych warunkach. Optymalny transfer otrzymany jest dla kodowania w stany czyste. W przypadku nie oddziałujących bozonów można obserwować pojawienie się kondensacji Bosego-Einsteina w zachowaniu się pojemności. Główną motywacją tych rozważań jest porównanie pojemności kanałów niosących bozony z tymi niosącymi fermiony. Pokazano w sposób analityczny, że fermiony dostarczają wyższych pojemności to znaczy są lepiej przystosowane do przenoszenia bitów jak i qubitów. Zachodzi to dla zakresu wysokich jak i umiarkowanych temperatur jak i szerokiej gamy potencjałów potęgowych. Symulacje numeryczne zdają się potwierdzać słuszność powyższego dla całego zakresu temperatur. Rozpatrywane jest też zachowanie niskotemperaturowe dla trójwymiarowego pudła i pułapki harmoniczej; znaleziono jest również potwierdzenie faktu wyższej pojemności fermionowej od bozonowej dla wystarczająco niskich temperatur.

W zadaniu III.8 „Teorio-polowe i nieliniowe aspekty kwantowej teorii informacji” kierowanym przez dr. hab. M. Czachora (PG) badania koncentrowały się na trzech zasadniczych obszarach. Dwa z nich (techniki solitonowe i uogólnione kwantowanie pola) są kontynuacją badań prowadzonych w latach poprzednich. Trzeci kierunek jest

nieoczekiwanym produktem ubocznym badań nad algebraiczną strukturą teorii pola (algorytmy kwantowopodobne konstruowane przy pomocy algebr geometrycznych).

Jeśli chodzi o techniki solitonowe, zasadnicze wyniki dotyczą solitonów optycznych we włóknach wielomodowych. Analizowane były realistyczne światłowody wielomodowe (dwa mody + dwie polaryzacje na mod) oraz światłowody o przekroju cylindrycznym (z pustą przestrzenią w środku). Nawiązana została współpraca z grupą prof. K. Blow w School of Engineering and Applied Science, Aston University. Techniki analityczne i numeryczne rozwinięte w naszej grupie zastosowane zostały do opisu eksperymentów przeprowadzonych a Aston. Rozwinięta została metoda obliczania kwantowych poprawek do klasycznych solitonów przy pomocy uogólnionych funkcji dzeta, a także technika rozwiązywania optycznych równań Heisenberga z hamiltonianami zależnymi od czasu. Zanalizowano zastosowania technik solitonowych do dynamik mogących mieć zastosowanie do przetwarzania informacji przez układy typu DNA.

Aspekty kwantowo-polowe, zwłaszcza analiza związków pomiędzy strukturą próżni a splątaniem, analizowane były w trzech opublikowanych pracach. Dwie dalsze prace (dotyczące widma światła emitowanego w procesie fluorescencji rezonansowej) są w przygotowaniu, a wyniki w nich zawarte znajdują się w rozprawie doktorskiej M. Wilczewskiego, której złożenie nastąpi w pierwszej połowie 2007 r.

Algorytmy oparte o algebry geometryczne badane były w kontekście algorytmów kwantowych (problem Deutscha-Jozsy) i tzw. binarnych kodów rozproszonych. Kierunek ten wymaga dalszych studiów, w szczególności w kontekście możliwych praktycznych implementacji „procesora geometrycznego”.

W zadaniu III.9 „Paradygmat odległych laboratoriów w kwantowej teorii informacji a klasyczna teoria bezpieczeństwa transmisji informacji” kierowanym przez dr P. Horodeckiego (PG) wprowadzono podstawowe definicje pojemności kwantowych w wersji minimalnej transmisji podprzestrzeni Hilberta oraz transmisji splątania.

Wykazano równoważność obu definicji. Poddano analizie pojemność bez wspomagania komunikacją klasyczną wprzód dowodząc m. in. optymalność kodowania izometrycznego.

Wykazano następnie, że wspomaganie takim rodzajem komunikacji klasycznej nie zmienia obszaru pojemności. Oznacza to m. in. że region pojemności podany dla kanału z dwoma nadawcami nie może być zwiększony przy pomocy wspomagania klasycznym kanałem tego typu.

Sformułowano kilka alternatywnych definicji pojemności kwantowych przy użyciu odmiennych pojęć wierności transmisji. Wykazano, że wszystkie definicje pojemności są równoważne. Korzystając z wyników wyprowadzono obszary pojemności dla szczególnej klasy kanałów kwantowych będących naturalnym uogólnieniem powielających kanałów kwantowych (kanałów typu „broadcast”).

Dokonano porównania i unifikacji dwóch schematów (i) klasycznego schematu destylacji klucza kryptograficznego z probabilistycznych rozkładów trójczęstkowych oraz (ii) destylacji splątania ze stanów kwantowych. Wyprowadzono szereg górnych ograniczenia na klucz kryptograficzny. Ponadto wykazano, że w pewnych sytuacjach destylacja klasycznego klucza kryptograficznego jest równoważna destylacji jego kwantowego odpowiednika.

.Wykazano, że jest możliwa tzw. bezwarunkowo bezpieczna destylacja

klucza w przypadku pewnych kanałów, które posiadają zerową pojemność kwantową.

Oznacza to, że dotychczasowe powszechne intuicje dotyczące bezwarunkowego kwantowego bezpieczeństwa są uproszczeniem: w rzeczywistości wierna transmisja

nieortogonalnych stanów kwantowych (jak to ma miejsce w słynnym schemacie BB84)

nie jest potrzebna aby uzyskać bezwarunkowo bezpieczny schemat kryptograficzny.

W zadaniu III.10 „Geometria i topologia stanów splątanych” kierowanym przez prof. dr. hab. M. Kusia (CFT PAN) badania dotyczyły Lokalnego optymalnego klonowania czystych stanów dwóch kubitów z ustalonym stopniem splątania. Wykorzystano metody programowania wypukłego, co pozwoliło na analityczne wyznaczenie wierności. Przystudowano problem poprawy wierności lokalnego klonowania za pomocą klasycznej komunikacji między podukładami. Pokazano, iż klasyczna komunikacja może poprawić wierność lokalnego klonowania oraz, że stany ze splątaniem związanym nie mogą być użyte dla poprawy wierności klonowania.

Rozwinięto podany poprzednio geometryczno-różniczkowy opis stanów kwantowych w powiązaniu z miarami splątania dla układów wielocząstkowych. W szczególności przebadano warunki monotoniczności szerokiej klasy miara splątania skonstruowanych za pomocą obserwabli.

Zbadano proces dekorelacji stanów kwantowych. Problem kwantowej dekorelacji można potraktować jako zagadnienie separacji dwóch (lub większej liczby) sygnałów kwantowych odpowiadające klasycznemu problemowi rozdzielania (nieznanych) sygnałów (tzw. "cocktail party problem") pochodzących z różnych źródeł celem odczytania informacji zawartej w każdym z sygnałów (a zakłócanej przez sygnały pozostałe). Przedstawiono operacje dekorelujące stany dwóch qubitów i stany gaussowskie dwóch oscylatorów harmoniczych. Przedstawiono metodę sekretnej dzielenia informacji o kierunku w przestrzeni pod nieobecność wspólnego układu odniesienia. Procedura zapewnia, że uczestnicy są w stanie odczytać zakodowany kierunek z bardzo wysoką wiernością jedynie, jeśli dokonują odpowiedniego pomiaru kolektywnego na stanach. Używając pomiarów lokalnych, z kolei, nawet wspomaganych klasyczną komunikacją jakość estymacji kierunku będzie zawsze bardzo niska.

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

W zadaniu IV.1 „Koherentne i niekoherentne efekty fonowe w kropkach kwantowych - dekoherencja orbitalnych stopni swobody. Kinetyka ubierania stanów ładunkowych w kropkach kwantowych w deformacyjne mody sieci” kierowanym przez prof. L. Jacaka (IF PWR) prowadzono dalsze badania nanostruktur pod kątem oceny dekoherencji (głównie defazowania, czyli kinetyki tworzenia zhybrydowanych stanów zlokalizowanych i kolektywnych – fononów/magnonów w kropkach kwantowych w otoczeniu kryształu). Rozpatrywano markowski i niemarkowski (z pamięcią) reżimy dekoherencji w kropkach kwantowych defazowanych przez fonony. Rozpatrywano możliwość osłabienia dekoherencji przez modulację sygnału sterującego (prowadzi to do wzmocnienia koherencji w granicach co najwyżej kilkudziesięciu %). Zbadano dekoherencję w półprzewodnikach półmagnatycznych. Rozpoczęto nowy temat (niezaplanowany) – powiązanie informatycznej zasady holograficznej z możliwością realizacji topologicznych czastek holograficznych. Zbadano wpływ poprzecznego pola na potencjał wiążący (Hartree) w kropkach kwantowych II. Zbadano w przybliżeniu faz chaotycznych wzbudzenia plazmonowe w nanocząstkach metalowych i określono przenikalność dielektryczną takich układów.

W zadaniu IV.2 „Analiza dekoherencji spinowych stopni swobody w kropkach kwantowych. Warunki i ograniczenia koherentnego sterowania spinem w nowej generacji kropkach magnetycznych” kierowanym przez prof. J. Krasnyja (IM Uniw. w Opolu) prowadzono

dalsze badania nanostruktur magnetycznych i niemagnetycznych i bramek logicznych dla kwantowego przetwarzania informacji przy wykorzystaniu spinu w kropkach kwantowych. Zbadano luminescencję od silnie wzbudzonych stanów (trionów) w kropkach kwantowych drugiego rodzaju ogniskowanych elektrostatycznie. Opisano koncepcję nano-lasera kaskadowego w matrycy kropek kwaziparabolicznych II rodzaju przełączanych elektrycznie. Opracowano wstępnie metodę tylko optycznego rozróżniania nanostruktur (odróżniania kropek I i II oraz zjonizowanych domieszek).

W zadaniu IV.3 „Metody sterowania qubitami w kropkach kwantowych i ich oddziaływaniem (sterowanie splątaniem) – w kierunku realizacji bramki logicznej komputera kwantowego w technologii kropek kwantowych” kierowanym przez dr. P. Machnikowskiego (IF PWR) kontynuowano badania nad sterowaniem qubitami ładunkowymi w kropkach kwantowych w obecności dekoherencji fononowej. Zaproponowano nową definicję qubitu w układach, w których dekoherencja zdominowana jest przez efekt defazowania fononowego i zbadano warunki sterowania, pomiaru i przygotowania stanu dla takiego qubitu. Kontynuowany był temat sterowania układem oddziałujących qubitów na kropkach kwantowych. Przeprowadzono symulację numeryczną bramki dwuqubitowej typu CNOT (generującej splątanie) dla qubitów zaimplementowanych jako ekscytyny w kropkach kwantowych sprzężone stacjonarnym oddziaływaniem dipolowym. Oceniony został błąd takiej bramki dwuqubitowej indukowany przez dekoherencję fononową. Rozwijany był temat wpływu anharmonizmu rezerwuaru na scenariusze dekoherencji i „lokalizacji” stanów kwantowych. Okazuje się, że model nad-omowego rezerwuaru bozonowego, generującego częściową dekoherencję, jest „patologiczny” w tym sensie, że dowolnie słaby anharmonizm rezerwuaru prowadzi do pojawienia się wykładniczego, Markowskiego zaniku koherencji. Prowadzone w tym roku badania zmierzały w kierunku oceny tego efektu w konkretnym przypadku ekscytynu w kropce kwantowej. Ponadto zbadano teoretycznie dekoherencję typu *welcher Weg* w eksperymencie interferencyjnym na pojedynczym elektronie, w którym elektron pozostawia ślad w płycie przewodnika umieszczonej pod jego trajektorią.

W zadaniu IV.4 „Precyzyjne ‘atomistyczne’ modelowanie kropek kwantowych pod kątem ich wykorzystania w konstrukcji bramek logicznych komputera kwantowego” kierowanym przez prof. W. Jaskólskiego (IF UMK) kontynuowano badania dotyczące wpływu efektów naprężeń na stany elektronowe oraz własności optyczne pojedynczych i podwójnych samorosnących kropek kwantowych, podjęto nowy nurt badań, t.j. próbę określenia wpływu zewnętrznych ciśnień i odkształceń na strukturę stanów elektronowych stosunkowo dużych nano-objektów.

Badano m.in. wpływ odkształceń nano-mechanicznych rezonatorów, na strukturę energetyczną i własności optyczne osadzonych w nich kropek kwantowych. Istnieją duże nadzieje na wykorzystanie sprzężeń pomiędzy modami oscylacyjnymi takich nano-rezonatorów z modami optycznymi zawartych lub osadzonych na nich kropkach kwantowych do, np. efektywnego optycznego chłodzenia drgających nanourządzeń. Wyniki naszych badań przeprowadzonych metodą ciasnego wiązania, na obiektach zawierających ponad 10^6 atomów pokazały, że w czasie drgań nano-mechanicznych rezonatorów (o postaci wiszących mostków), prawie liniowo zmienia się efektywna przerwa energetyczna kropki kwantowej, co może być wykorzystane do szybkiego i efektywnego optycznego schładzania takich układów. Kontynuowano badania wpływu zewnętrznego ciśnienia na własności nanokryształów InP. Po raz pierwszy w literaturze problemu wprowadzono model, w którym uwzględniono pewną rekonstrukcję sieci nanokryształu InP. Uzyskane rezultaty, lepiej niż dotychczasowe modele, opisują obserwowane eksperymentalnie zmiany przerwy energetycznej nanokryształu oraz

zmiany przesunięcia i natężeń widm optycznych InP poddanych wysokim ciśnieniom zewnętrznym.

Rozpoczęto także badania efektów oddziaływania kulombowskiego i efektów korelacji elektronowej w układach węglowych nanorurek, w szczególności w supercieciach zbudowanych z fragmentów nanorurek węglowych. Pokazano, że choć efekty te zmieniają w pewnym stopniu strukturę minipasm takich układów, to nie wpływają one istotnie na tzw. „pasma bezdyspersyjne”, pojawiające się m.in. w supersieciach zbudowanych w oparciu o złącza (12,0)/(6,6). Jednym z ciekawszych wyników jest obserwacja spontanicznego „ładowania” kropki kwantowej zbudowanej z metalicznych nanorurek (12,0) i (6,6).

W zadaniu IV.5 „Manipulacje kwantowe pojedynczymi elektronami w układach kropek kwantowych i analiza ich zastosowania w informatyce kwantowej” kierowanym przez prof. J. Mostowskiego (IF PAN) zaproponowano model teleportacji spinu elektronowego w układzie trzech kropek kwantowych. Schemat oparty jest o klasyczny mechanizm Benneta z 1993 roku. Zakłada się, że czas koherencji spinu pojedynczego elektronu jest dostatecznie długi, tak że relaksacja spinu może być pominięta w czasie transportu i tunelowania. Te ostatnie procesy stanowią część rozważanego modelu. Jednak oddziaływanie spinów z rezerwuarem (fononami) jest na tyle silne, że spójność spinowa zanika w krótszej skali czasu. Uważa się, że ten mechanizm tłumienia uniemożliwia wykorzystanie kropek kwantowych do wykonywania operacji logicznych. Wykazano, że ten typ dekoherencji nie uniemożliwia teleportacji. Ponadto, zaproponowano nową metodę pomiaru splątania spinów. Metoda oparta jest o pomiar ładunku w podwójnej kropce kwantowej za pomocą „point contact”.

3.e. Grupa tematyczna V. Inżynieria funkcji falowych w nowych realizacjach nanotechnologicznych i w spintronice (rozwój teorii w kierunku urządzeń jedno-fot./jedno elektronowych, koherentnych manipulacji spinem i wykorzystania kwantowych efektów mezoskopowych)

W zadaniu V.1 „Zaburzenia Hamiltonianu przez obiekty skoncentrowane na małych zbiorach” kierowanym przez prof. dr. hab. W. Karwowskiego (UZG) skonstruowano jednowymiarowy model polegający na zaburzeniu swobodnego hamiltonianu nielokalnym potencjałem skoncentrowanym na zbiorze Cantora. Jako techniki matematycznej użyto teorii form Dirichleta. W interpretacji probabilistycznej model opisuje proces dyfuzji na prostej ze skokami na punktach zbioru Cantora. Skoki są zadane przez proces stochastyczny na jednostkowej kuli 2-adycznej, przez co prawdopodobieństwa skoków są określone przez strukturę fraktalną zbioru Cantora, a nie geometryczną odległość między punktami. Zdefiniowano wzajemnie jednoznaczne odwzorowanie kuli 2-adycznej na zbiór Cantora. Pokazano, że miara skokowa procesu stochastycznego na kuli 2-adycznej określa miarę Radona na płaszczyźnie skoncentrowaną na iloczynie prostym zbioru Cantora przez siebie. Udowodniono domykalność formy zaburzonej (dyfuzja + skoki). Znalezione warunki (warunek dotyczy miary skokowej) zapewniający regularność formy zaburzonej. Znalezione dziedzinę na której forma zaburzona opisuje nietrywialny model (dyfuzja + skoki) nawet wówczas, gdy forma nie jest regularna.

W zadaniu V.2 „Stany koherentne dla mechaniki kwantowej na nietrywialnych rozmaitościach konfiguracyjnych” kierowanym przez dr. hab. K. Kowalskiego (UŁ) przedstawiono stany koherentne dla cząstki kwantowej na torusie. Mianowicie wykorzystując topologiczną równoważność torusa i iloczynu kartezjańskiego dwóch okręgów zastosowaliśmy technikę analogiczną do przypadku okręgu i zdefiniowaliśmy stany koherentne jako rozwiązanie pewnego zagadnienia na wartości własne. Prawdliwość konstrukcji została potwierdzona przez zachowanie średnich obserwabli w stanie koherentnym. Wydaje się, że przedstawione stany koherentne mogłyby być użyteczne w

chaosie kwantowym. Rzeczywiście, przestrzeń konfiguracyjna takich układów, jak wahadło podwójne i wahadło toroidalne jest torusem. Z drugiej strony dobrze wiadomo, że układy te wykazują chaotyczne działanie. Wypada również podkreślić w kontekście chaosu kwantowego rolę rozkładów Husimiego, które są niczym innym, jak rozkładami prawdopodobieństwa w stanie koherentnym. Ponadto skonstruowane stany koherentne mogłyby znaleźć zastosowanie w nanotechnologii. Wystarczy przypomnieć nanoskopowe pierścienie kwantowe. Wydaje się, że przedstawione stany koherentne dla cząstki na torusie są bardziej adekwatne do opisu kwantowych pierścieni niż stany koherentne dla cząstki na okręgu.

W zadaniu V.3 „Analiza (weryfikacja i optymalizacja) warunków pracy nowych konstrukcji nanotechnologicznych, spintronicznych w oparciu o kropki kwantowe” kierowanym przez dr. hab. A. Wójcisa (IF PWR) kontynuowano prace nad oddziaływaniem stanów kwantowych ekscytonu (pary elektron-dziura) zlokalizowanego w kropce kwantowej z jej otoczeniem termodynamicznym (z fononami akustycznymi w półprzestrzeni oraz z fononami powierzchniowymi). W szczególności wykazano silnie niszczący wpływ oddziaływania z fononami na splątanie pary ekscytonów związanych w sąsiadujących kropkach. Zbadano także oddziaływanie pary ekscytonów zlokalizowanych w pobliskich kropkach kwantowych z falą elektromagnetyczną i opisano powstawanie fluorescencji kolektywnej w takim układzie jeśli kropki nie są identyczne.

Kontynuowano także obliczenia absorpcji w dwu- i trójwymiarowych kropkach kwantowych o różnej symetrii i objętości (ekscytonowej).

Przebadano wzbudzenia ładunkowo-spinowe w dwuwymiarowych układach hallowskich w ramach zagadnienia dynamiki cieczy złożonych fermionów ze spinem. Praca ta motywowana była niedawnymi eksperymentami Kukushkina i in. wykazującymi istnienie w dwuwymiarowym gazie elektronowym o odpowiednim wypełnieniu poziomu Landaua (m.in. $\nu=2/5$) skorelowanej fazy elektronowej o ułamkowej polaryzacji spinowej, czulej na natężenie pola magnetycznego.

Kontynuowano także badania implementacji logiki kwantowej w układzie solitonów.

W zadaniu V.4 „Modelowanie realistycznych kropek i molekuł kwantowych i ich matryc zadawanych ogniskowaniem elektrycznym” kierowanym przez prof. J. Adamowskiego (IF AGH) obliczono energię wiązania trionów ekscytonowych, tzn. dodatnich i ujemnych trójcząstkowych układów elektron-dziura, w drucie kwantowym z uwzględnieniem zewnętrznego pola magnetycznego. Pokazano, że uporządkowanie linii fotoluminescencji pochodzących od trionów ujemnych i dodatnich jest wyznaczone przez potencjały uwięzienia elektronu i dziury. Uzyskane wyniki tłumaczą obserwowaną doświadczalnie w drutach kwantowych większą stabilność trionów ujemnych. Pole magnetyczne zorientowane równoległe do osi drutu prowadzi do zrównania energii wiązania trionów ujemnych i dodatnich. Dla odpowiednio silnego pola magnetycznego otrzymujemy przecinanie się linii fotoluminescencji pochodzących od trionów dodatnich i ujemnych, a w konsekwencji silniejsze wiązanie trionu dodatniego.

Przedyskutowano problem lokalizacji elektronów w jednowymiarowym nanoukładzie z nieporządkiem topologicznym. Wprowadzono model nieporządku w postaci przypadkowego rozkładu potencjału atomowego. Dla porównania zbadano aperiodyczne układy Thue-Morse'a i Fibonacciego. Zbadano lokalizację w przestrzeni wektora falowego i przestrzeni rzeczywistej w funkcji parametrów potencjału przypadkowego. W tym celu obliczono długość lokalizacji. Wyznaczono wpływ nieporządku generowanego przez przypadkowe i aperiodyczne sekwencje potencjałów na widmo energetyczne elektronów w drucie kwantowym.

Na zamówienie wydawnictwa American Scientific Publisher opracowano rozdział w książce „Handbook of Semiconductor Nanostructures and Nanodevices”. W rozdziale tym podano przegląd najnowszych osiągnięć eksperymentalnych i teoretycznych z zakresu elektrostatycznych kropek kwantowych. Większość omawianych osiągnięć teoretycznych powstała z udziałem autorów rozdziału. Kolejno przedstawiono podstawy jednoelektronowej spektroskopii tunelowej, samouzdognioną metodę rozwiązywania problemu Poissona-Schroedingera, wyniki obliczeń otrzymane przez autorów dla kwantowej blokady kulombowskiej, wpływ pola magnetycznego na transport jednoelektrodowy przez kropki kwantowe, problemy korelacji elektron-elektron, własności molekuł Wignera i sprzężonych kropek kwantowych. Wyniki obliczeń autorów bardzo dobrze odtwarzają dane eksperymentalne otrzymane w renomowanych laboratoriach prof. S. Taruchy (NTT, Japonia), prof. L. Kouwenhovena (TU Delft, Holandia) oraz prof. R.C. Ashoori’ego (MIT, USA). Przedstawione metody teoretyczne znalazły zastosowanie do opisu różnych nanoukładów o różnych konfiguracjach elektrod sterujących własnościami kropek, a w szczególności nanoukładów dwuelektrodowych (MIT) i trójelektrodowych (NTT).

W zadaniu V.5 „Opto-elektroniczne zastosowania kropek kwantowych – w kierunku nieliniowej optyki kropek kwantowych” kierowanym przez prof. A. Radosza (IF PWR) rozpatrywano zagadnienia dotyczące nieliniowych efektów optycznych oraz zagadnień z zakresu informatyki kwantowej. W anizotropowych układach wykazujących silnie nieliniowe właściwości, wskazano na możliwość formowania niskowymiarowych obiektów w skali nanoskopowej. Takie obiekty mogą powstawać spontanicznie w określonych warunkach: w układach fotoindukowanych gdzie istotną rolę spełnia silne oddziaływanie elektron-fonon oraz silne sprzężenie w układzie elektronowym dodatkowo wzmocnione w przypadku struktur niskowymiarowych. Formowanie obiektów tego typu może być stymulowane przy pomocy światła, co otwiera perspektywę sterowania i operacji femtosekundowych. Badano zastosowanie układów niskowymiarowych w zagadnieniach z zakresu informatyki kwantowej. Polaryzacja wielokomponentowego solitonu wektorowego jest tam traktowana jak wektor stanu układu kubitów (rejestr informacji kwantowej). Pokazano, że transformacja tego stanu z zadaną dokładnością jest możliwa za pomocą zderzeń solitonu - rejestru z innymi solitonami. Wyznaczono parametry solitonów przełączających odpowiadających uniwersalnemu zbiorowi kwantowych bramek logicznych.

Rozwazono realizacje optyczne odpowiednich układów logicznych wykorzystujące efekty samo-skupiania ośrodków nieliniowych i samo-indukowanej przezroczystości.

Rozpatrywano problem koherencji przestrzennej w stanie singletowym dwóch splątanych qubitów. Przedyskutowano zagadnienie przestrzennego rozpadu korelacji kwantowych oraz wpływ dekoherencji na rozkład korelacji kwantowych.

W zadaniu V.6 „Koherencja spinowa a inżynieria funkcji falowej w nanostrukturach półprzewodnikowych” kierowanym przez prof. W. Zawadzkiego (IF PAN) wyliczono g-czynnik spinu elektronów w studniach kwantowych GaAs/GaAlAs o różnych szerokościach w obecności zewnętrznego pola magnetycznego równoległego do kierunku wzrostu struktury. Wyliczono anizotropię g-czynnika spinu elektronów w studniach kwantowych GaAs/GaAlAs dla pola równoległego równoległego prostopadłego do kierunku wzrostu struktury. Uzyskane wyniki teoretyczne świetnie opisują wiele rezultatów eksperymentalnych publikowanych w literaturze.

Przedstawiono analogię między strukturą pasmową jednowymiarowych nanorurek węglowych i opisem swobodnych relatywistycznych elektronów. Opisano ruch drżący

(Zitterbewegung) elektronów w nieobecności pól zewnętrznych, w analogii do Zitterbewegung opisanym przez Schroedingera, lecz o znacznie niższej częstotliwości i większej amplitudzie.

W zadaniu V.7 „Własności transportowe nanorurek i fullerenów i ich zastosowania w nanotechnologii” kierowanym przez dr. hab. M. Szopa (IF UŚI) zbadano relację dyspersyjną warstwy grafenowej. Standardowe podejście za pomocą metody ciasnego wiązania daje w wyniku dokładną symetrię elektron-dziura. Symetria taka nie jest obserwowana doświadczalnie. Uwzględnienie przekrycia orbitali typu π powoduje złamanie tej symetrii. W naszych badaniach obliczyliśmy zależność dyspersyjną dla grafenu z uwzględnieniem takiego przekrycia. Pokazano, że tylko dla niewielkich odległości od poziomu Fermiego zależność dyspersyjna może być uznawana za symetryczną. Policzaliśmy wynikające z tej teorii prądy trwałe, które mogą być porównane z obserwacjami eksperymentalnymi. Przekrycie orbitali typu π powoduje również zmianę momentu magnetycznego indukowanego w nanorurkach węglowych poprzez poprzeczne pole magnetyczne typu Bohma-Aharonowa.

Zbadano możliwość realizacji kwantowego qubitu opartego na mezoskopowym nienadprzewodzącym pierścieniu jednowymiarowym. Taki pierścień, w obecności pola magnetycznego równoległego do jego osi symetrii może być sprowadzony do układu dwustanowego kontrolowanego przez dwa zewnętrzne stopnie swobody. Dwa wymienione stany odpowiadają prądom trwałym płynącym w przeciwnych kierunkach. Za ich sprzężenie jest odpowiedzialna bariera tunelowa dzięki której jest możliwa superpozycja stanów. Stany qubitowe mogą być kontrolowane przez rezonansowe sygnały mikrofalowe. Możliwe jest również sprzężenie wielu takich qubitów dzięki strumieniowi pola magnetycznego przez nie generowanemu. Oszacowano również możliwe źródła dekoherencji i ich wpływ na jakość qubitów. Zbadano również wpływ splecionych fotonów na prądy trwałe w dwu oddalonych pierścieniach oraz różne aspekty wpływu szumów na prądy trwałe.

3.f. Grupa tematyczna VI. Topologiczne i stochastyczne metody dla nowych układów kwantowych w informatyce (układy hallowskie, sieci optyczne, topologia i chaos w mechanice kwantowej)

W zadaniu VI.1 „Ścisłe i nieściśle stany wzbudzeń złożonych fermionów i ich topologiczne” kierowanym przez dr. P. Sitkę (IF PWR) stworzono program numeryczny diagonalizacji oddziaływania w układzie kilku cząstek na tzw. sferze Haldane’a (układ sferyczny, pole magnetyczne centralnie symetryczne). Uzyskano widma kilku cząstek dla oddziaływań: kulombowskiego, $1/r^2$, $1/r^3$ (dipolowego), oraz tzw. ultra krótkozasięgowego.

Znaleziono elementy macierzowe oddziaływania Cherna-Simonsa (dwu- i trójcząstkowe) dla całkowicie wypełnionej powłoki. Stan $1/3$ elektronów odpowiada wypełnieniu 1 w polu efektywnym (złożonych fermionów). Pokazano, że energia oddziaływania kulombowskiego liczona dla wypełnienia 1 różni się bardzo od energii oddziaływania stanu $1/3$.

W zadaniu VI.2 „Analiza widma foto-luminescencji dwuwymiarowego gazu elektronowego w silnych polach magnetycznych” kierowanym przez dr. hab. A. Wójcisa (IF PWR) kontynuowano badania teoretyczne fotoluminescencji kwazidwuwymiarowych układów elektronowych w kwantującym polu magnetycznym. Zaproponowano wyjaśnienie nieciągłości obserwowanych w fotoluminescencji przy natężeniach pola magnetycznego i koncentracjach nośników odpowiadających powstawaniu nieściślej cieczy kwantowej Laughlina i występowaniu ułamkowego kwantowego efektu Halla w eksperymentach transportowych. Oryginalnym pomysłem jest koncepcja kwaziekscytonu – kolektywnego

stanu promienistego powstałego z trionu (stanu związanego pary elektronów i dziury walencyjnej) odpowiednio skorelowanego z otaczającymi elektronami, którego ładunek elektryczny i w konsekwencji także energia rekombinacji w czuły sposób zależą od obecności kwazicząstek w cieczy Laughlina. W następnej kolejności planujemy rozszerzenie teorii na inne ciecze kwantowe.

Zbadano wpływ składowej obecności naładowanych domieszek (zjonizowanych donorów) wewnątrz studni kwantowej na widmo fotoluminescencji. Przewidziano pojawianie się w widmie dodatkowych przejść optycznych związanych z tzw. procesem *shake-up* (jednoczesna rekombinacja związanego trionu i wzbudzenie pozostałego po nim elektronu do wyższego poziomu Landaua). Występowanie przejścia *shake-up* jest bardzo czułym wskaźnikiem śladowych ilości domieszek w gazie elektronowym.

Zbadano także wpływ rozrzedzonego gazu otaczających nośników na gęstość stanów i widmo absorpcji i emisji trionu. W szczególności wykazano powstawanie kwazistabilnych stanów trionowych w procesie absorpcji fotonu przez elektron we wzbudzonym poziomie Landaua.

W zadaniu VI.3 „Analiza procesów dekoherencji kwantowej w układach z obecnością stanu nadprzewodzącego/nadciekłego” kierowane przez Dr hab. R. Gonczarka, IF PW prowadzono badania sformułowaniem w pełni niezależnego podejścia do układów nadprzewodzących opartego na elementach symetrii grupy C_{4v} i jej reprezentacjach, dla którego obszary stabilności parametrów porządku o ustalonej symetrii i obszary współistnienia tych parametrów są zdeterminowane przez symetrię potencjału parującego. Zastosowanie opracowanego formalizmu w odniesieniu nadprzewodników tlenkowo-miedziowych pokazuje, że możliwe jest dokonanie projekcji dowolnego zagadnienia do izotropowej przestrzeni z liniową relacją dyspersji, przy zachowaniu symetrii układu, tj. symetrii grupy C_{4v} , w jądrze gęstości stanów nakrywającym przestrzeń izotropową. Formalizm ten pozwala wykazać równoważność podejść, które mogą być wzajemnie do siebie sprowadzone poprzez transformacje unitarne.

W rozważaniach do określenia relacji dyspersji oraz potencjału oddziaływania parującego wykorzystywano funkcje bazowe nieprzywiedlnych reprezentacji grupy C_{4v} zdefiniowane w dwuwymiarowej przestrzeni pędów, które tworzą niezmiennicze podzbiory jedno- lub dwuelementowe. Wykonanie dla rozważanego układu kilku nieliniowych transformacji współrzędnych pozwoliło przenieść rozważania do biegunowego układu współrzędnych $[\xi, \varphi]$ (zawsze z liniową relacją dyspersji). W układzie tym harmoniki Fouriera ($\cos n\varphi$ i $\sin n\varphi$) stanowią zupełną ortogonalną bazę funkcji i tworzą jedno- lub dwuelementowe niezmiennicze podzbiory funkcji nieprzywiedlnej reprezentacji grupy C_{4v} . Wyrażenie potencjału oddziaływania parującego w reprezentacji harmonik Fouriera pozwoliło w prosty sposób identyfikować typy sparowania (S, D, P ...) oraz ustalić warunki ich zachodzenia w zależności od parametrów charakteryzujących oddziaływanie parujące i pola gęstości stanów.

Otrzymane wyniki pozwalają wskazać, że w nadprzewodnikach anizotropowych oprócz singletowego stanu D może być także realizowany stan trypletowy P (z zerowym rzutem całkowitego spinu). Uzyskana zunifikowana postać równania na szczelinę energetyczną ujawnia zróżnicowany wpływ rozpatrywanych form oddziaływania parującego na symetrię stanu nadprzewodzącego, a wyznaczone wartości temperatur krytycznych wskazują, że stan P staje się dominujący dla odpowiednio dużych wartości t_1/t_0 . Dokonanie rozwinięcia potencjału parującego w podwójny szereg Fouriera pokazało dominujący udział kilku pierwszych harmonik fourierowskich i zaniedbywalny wkład pozostałych, natomiast analiza numeryczna tego zagadnienia pozwoliła szczegółowo określić temperatury krytyczne, skok

ciepła właściwego w T_c oraz wartości wykładnika izotopowego dla realizowanych stanów D i P w zależności od wartości parametru t_1/t_0 . Otrzymane wyniki pozwalają na stosowanie opracowanego formalizmu w odniesieniu do bardziej złożonych modeli, a w szczególności np., gdy energia jednocząstkowa jest renormalizowana przez korelacje elektronowe, a jej postać ujawnia nesting dwuwymiarowej powierzchni Fermiego, efektywny potencjał parujący posiada człony singletowy i trypletowy, oraz gdy uwzględnia się zmiany koncentracji nośników ładunku, szerokości obszaru sparowania, spowodowane w ogólności domieszkowaniem, a także ich wpływu na potencjał chemiczny. Ponadto umożliwia jest klasyfikacja stanów – stany singletowe, stany trypletowe unitarne i nieunitarne, stany mieszane, badanie stabilności faz, ich współistnienie oraz istnienie punktów potrójnych oraz określenie temperatur przejścia, pól krytycznych i rodzaju przemian fazowych, co stało się przedmiotem dalszych badań.

W zadaniu VI.4 „Opis nielokalnych efektów kwantowych w ramach modelu ewolucji rzutowej i ich konsekwencje w informatyce kwantowej” kierowanym przez prof. K. Wysokińskiego (IF UMCS) opisano analityczne i numeryczne obliczenia transportowych właściwości układu zawierającego kropkę kwantową połączoną z dwiema elektrodami ferromagnetycznymi w stanie nierównowagowym. Obliczono przewodność elektryczną, cieplną i siłę termoelektryczną dla równoległej (FM) i antyrównoległej polaryzacji elektrod. Uwzględniono występowanie zjawiska Kondo w niskich temperaturach. Zjawisko Kondo silnie modyfikuje zależność gęstości stanów na kropce, przewodność elektryczną i termosilę, która zmienia znak w T_K . Znajomość termosily jest istotnym parametrem, gdyż określa ona wielkość termicznie indukowanych napięć, które mogą uniemożliwić niektóre zastosowania takich układów w nowoczesnej elektronice. Zanalizowano wpływ asymetrii sprzężeniem kropki z zewnętrznymi elektrodami na nieliniowe i nierównowagowe zjawiska termoelektryczne. Obliczenia wykonano w przybliżeniu NCA. Okazało się, że asymetria, która nie wpływa na siłę termoelektryczną w przybliżeniu liniowym ma silny wpływ na nieliniową siłę termoelektryczną.

Kontynuowana badania teoretyczne dotyczące reakcji optycznej planarnych układów sferycznych półprzewodnikowych kropek kwantowych. Rozważano zakres częstości odpowiadający przejściom pomiędzy poziomami kwantowania rozmiarowego naładowanej kropki kwantowej. Pokazano, iż obecność metalowej okładki bardzo mocno modyfikuje (wzmocnia) natężenie efektów wywołanych dynamicznym oddziaływaniem kulombowskim pomiędzy kropkami. Przeanalizowano warunki konieczne do zaobserwowania optycznej bistabilności układu uwarunkowanej wyżej wspomnianymi oddziaływaniami. Wykonane symulacje numeryczne wskazują na potencjalne możliwości praktycznych zastosowań badanych efektów w układach optoelektronicznych.

Badania dotyczyły także dynamiki stanów ładunkowych podwójnych kropek kwantowych (qubitów) znajdujących się względem siebie w różnych konfiguracjach i poddanych oddziaływaniu zewnętrznego pola elektromagnetycznego. Rozpatrywano dwie konfiguracje qubitów, konfigurację liniową, w której oddziaływanie pomiędzy qubitami zachodzi, gdy elektrony są zlokalizowane na sąsiadujących ze sobą kropkach i konfigurację prostopadłych do siebie qubitów. W tej sytuacji oddziaływanie pomiędzy qubitami jest obecne niezależnie od miejsca lokalizacji elektronu w jednym z qubitów. Rozważano również dynamikę oscylacji ładunkowych w dwóch qubitach sprzężonych elektrostatycznie z kropką kwantową umieszczoną pomiędzy dwoma rezerwuarami elektronów i grającą rolę układu pomiarowego. We wszystkich wspomnianych sytuacjach zbadano wpływ różnych parametrów charakteryzujących badane układy na przebieg oscylacji ładunkowych w qubitach.

W zadaniu VI.5 „Geometria kwantowego efektu Halla a charakter Cherna-Connesa w niekomutatywnej geometrii” kierowanym przez dr. hab. A. Sitarza (IFT UJ) kontynuowano wcześniej rozpoczęte prace nad charakterem Cherna-Connesa w niekomutatywnej geometrii, jednak z uwagi na dłuższy wyjazd członka zespołu miały one ograniczony charakter. Konkretnie badania dotyczyły charakteru Cherna-Connesa dla ilorazów przestrzeni kwantowych przez skończone grupy symetrii (tzw. przestrzenie soczewkowe), temat ten jest kontynuowany w kierunku analizy parowania dla orbifoldów kwantowych i tzw. różności Bieberbacha w kierunku uzyskania ułamkowych wyrażań indeksu.

W zadaniu VI.6 „Chaos kwantowy, dekoherencja i dynamika splątania” kierowanym przez prof. dr. hab. K. Życzkowskiego (IF UJ), celem lepszego zrozumienia różnych aspektów dyskretnej dynamiki kwantowej skoncentrowano się na analizie własności zbioru stanów kwantowych. Zbadano strukturę zbioru stanów kwantowych udowadniając, że jest to zbiór wypukły o stałej wysokości. Otrzymany wynik zastosowano do oszacowania prawdopodobieństwa że losowy stan kwantowy należący do wnętrza (powierzchni) zbioru stanów układu dwóch kubitów jest separowalny.

Opracowano nowe schematy kwantowej korekcji błędów oparte o formalizm uogólnionego zakresu numerycznego operatora. Przedstawiono przykładowe kody korekcji błędów dla układu przesyłanego przez kwantowy kanał bi-unitarny złożonego z dwóch lub więcej kubitów.

Analizowano zbiór zespolonych macierzy Hadamarda i sporządzono internetowy katalog wszystkich znanych nierównoważnych macierzy o wymiarach $N=2,3,\dots,16$. Otrzymane wyniki wykorzystano w pracy do znajdowania nowych trójek maksymalnie nieobciążonych baz dla wymiaru $N=6$.

Wyniki wieloletnich badań prowadzonych w ramach realizowanego programu badawczego przedstawiono w monografii wydanej w roku 2006 przez Cambridge University Press.

W zadaniu VI.7 „Dynamika kwantowych układów otwartych, dysypacja, dekoherencja, mechanizmy kontroli w układach mikroskopowych i mezoskopowych” kierowanym przez prof. dr. hab. P. Garbaczewskiego (UZG) podjęto systematyczną analizę roli funkcjonałów entropowych Shannona, Kullbacka-Leiblera i Fishera w termodynamicznym opisie procesów dyfuzyjnych oraz w (niedyssypatywnej) dynamice kwantowej stanów czystych. Teoria stosuje się do modeli stowarzyszonych z ciągłymi rozkładami prawdopodobieństwa, z naturalnymi warunkami brzegowymi. W szczególności do układów o zadanej a priori dynamice. Opisano wzajemne związki, w tym zróżnicowane nierówności, pomiędzy funkcjonałami entropowymi. Przeanalizowano równania bilansu (transfer energii na jednostkę czasu) zadane przez ich indukowaną (przez rozkłady prawdopodobieństwa) dynamikę. Dla szerokiej klasy układów zamkniętych (lecz nieizolowanych) opisano mechanizm produkcji entropii. Wyodrębniono termodynamiczne cechy dynamiki stanów czystych w obrazie Schrödingera.

W zadaniu VI.8 „Matematyczne modele dekoherencji” kierowanym przez dr. hab. R. Olkiewicza (UWr) kontynuowano badanie kwantowych półgrup dynamicznych opisujących nieodwracalną ewolucję kwantowych układów otwartych. Zaprezentowano przegląd efektów dekoherencyjnych w nieskończonych układach spinowych na sieci. Podano w niej również konstrukcje szerokiej klasy tzw. kwazi-swobodnych półgrup dynamicznych dla nieskończonych układów bozonowych. Idea konstrukcji polega na połączeniu deterministycznej dynamiki jednocząstkowej i nieskończenie podzielnych procesów stochastycznych. Zaprezentowano ogólne twierdzenie o generowaniu dynamiki kwazi-swobodnej na algebrach kanonicznych relacji komutacji za pomocą promiar, będących

uogólnieniem pojęcia miary na nieskończone wymiarowych przestrzeniach, typu Diraca, Poissona i Gaussa. Uzyskano również rezultat dotyczący rozszerzania półtrupy dynamicznej na algebry von Neumanna generowane przez temperaturowe reprezentacje algebry CCR. Podano konstrukcję klasy półgrup dynamicznych tzw. kwantowych półgrup Markowa dla skończonych i nieskończonych układów bozonowych będącą uogólnieniem wyników otrzymanych poprzednio. Zaprezentowano również przykład nieodwracalnej dynamiki indukującej w układzie cząstki kwantowej na prostej reguły nadwyboru parametryzowane warunkami brzegowymi cząstki kwantowej na skończonym odcinku.

W zadaniu VI.9 „Tarcie i dysypacja w układach kwantowych” kierowanym przez dr. hab. D. Chruścińskiego (UMK) Dokonano analizy spektralnej kwantowego oscylatora z tłumieniem. Pokazano, że kwantowy operator Hamiltona zdefiniowany w rozszerzonej przestrzeni Hilberta posiada widmo ciągłe oraz nieskończony dyskretny zbiór zespolonych wartości własnych odpowiadających stanom rezonansowym. Stany te są odpowiedzialne za występowanie tarcia (albo kwantową nieodwracalność). Pokazano, że kwantowa dynamika określona jest tylko na półprostej czasowej $[0, \infty)$. Dokonano porównania wyników z wynikami uzyskanymi ostatnio w literaturze przez innych autorów. Pokazano, że wcześniejsze wyniki były niekompletne.

Badano nowe podejście do analizy kwantowej fazy geometrycznej w oparciu o sformułowanie mechaniki kwantowej w przestrzeni fazowej (tzw. kwantowanie deformacyjne). Pokazano, jak zdefiniować fazę geometryczną używając do opisu stanów kwantowych funkcji Wignera zamiast funkcji falowej.

Analizowano klasyczną dynamikę z tarciem w formalizmie Koopmana. Formalizm ten pozwala sformułować dynamikę klasyczną w pełnej analogii do sformułowania kwantowego w przestrzeni Hilberta. Dokonano analizy spektralnej odpowiedniego operatora Koopmana i pokazano, że podobnie jak w analogicznych problemach kwantowych, dysypacja jest wynikiem występowania stanów rezonansowych odpowiadających zespolonym wartościom własnym operatora Koopmana.

Analizowano kwantowe stany splątane i ich geometryczne własności w rzutowej przestrzeni Hilberta (tzn. po utożsamieniu wektorów różniących się jedynie czynnikiem fazowym). Dyskutowano związek miar splątania (dla stanów czystych) i pewnej geometrycznej konstrukcji zwanej rozwłóknieniem Hopfa.

Analizowano nowy typ kanałów kwantowych, które nazwano kanałami częściowo niszczącymi splątanie (jest to klasa, która jest naturalnym uogólnieniem kanałów całkowicie niszczących splątanie). Zbadano podstawowe własności tych obiektów i zaprezentowano szereg przykładów o potencjalnych fizycznych zastosowaniach..

.....
(podpis kierownika projektu)

Warszawa, 30 marca 2007 r.