

Merytoryczny raport roczny  
z realizacji projektu badawczego zamawianego Nr PBZ-MIN-008/P03/03  
pt. „Informatyka i inżynieria kwantowa”  
za okres od 28.11.2003 r. do 31.12.2004 roku

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

## *1. Wstęp*

Zespoły badawcze uczestniczące w realizacji projektu zamawianego „**Informatyka i Inżynieria Kwantowa**” uzyskały w 2004 roku znaczące rezultaty w zakresie tematyki objętej projektem zamawianym. Na wymierny dorobek projektu składa się **8** prac opublikowanych w najlepszym czasopiśmie fizycznym **Physical Review Letters** spośród ogólnej liczbę **104** prac w czasopismach recenzowanych z Listy Filadelfijskiej oraz **36** wykładów i **6** innych wystąpień na konferencjach międzynarodowych.

Poziom badań naukowych, prowadzonych w zespołach uczestniczących w realizacji projektu zamawianego został wysoko oceniony na sympozjach naukowo – sprawozdawczych zorganizowanych w listopadzie i grudniu 2004 roku na Uniwersytecie Gdańskim, Politechnice Wrocławskiej i w Centrum Fizyki Teoretycznej PAN.

## *2. Najważniejsze wyniki*

Rozważano wielkość zwaną klasycznym deficytem informacji, która jest kandydatem na miarę klasycznych korelacji. Jest ona zdefiniowana jako różnica pomiędzy informacją, która może być zlokalizowana w podukładach stanu złożonego przy pomocy Zamkniętych Lokalnych Operacji i Klasycznej Komunikacji (ZLOKK) a informacją zawartą w podukładach. Klasyczny deficyt informacji wyraża się poprzez formułę podobną do wielkości będącej miarą klasycznych korelacji zaproponowaną przez Henderson i Vedrala. Dokonując porównania tych dwóch wielkości udowodniono, że klasyczny deficyt informacji rośnie pod wpływem lokalnych operacji. Wyniki opublikowano w pracy: B. Synak-Radtke, M. Horodecki, *Classical information deficit and monotonicity on local operations*” **J. Phys. A: Math. Gen.** **37** (2004) 11465–11474.

Wyprowadzono nową nierówność, która reprezentuje komplementarność pomiędzy rozróżnianiem stanów przez lokalne operacje i klasyczną komunikację a ich splątaniem. Nierówność ta pozwoliła zrozumieć ograniczenia na protokoły destylacji splątania, które poprawiają wszystkie błędy. Wyniki opublikowano w pracy: M. Horodecki, J. Oppenheim, Aditi Sen De, Ujjwal Sen, *Distillation protocols: Output entanglement and local mutual information*, **Phys. Rev. Lett.** **93**, 170503 (2004).

Zbadano własności stanów splątanych złożonych stanów kwantowych w wyższych wymiarach. W szczególności podano efektywną metodę znajdowania dolnego ograniczenia miary splątania, jaką jest zbieżność (ang. *concurrence*) dla układów binarnych o dowolnym wymiarze. Pozwala to na stosunkowo dokładną ocenę ilościową splątania stanów

mieszanych takich układów. Wyniki opublikowano w pracy: F. Mintert, M. Kuś, A. Buchleitner, *Concurrence of mixed bipartite quantum states in arbitrary dimensions*, **Phys. Rev. Lett.** **92**, 167902 (2004).

Zbadano warunki bezpieczeństwa na kryptograficzny klucz klasyczny uzyskiwany ze dwucząstkowego stanu kwantowego. Dowiedziono, że ilość klucza jaką można uzyskać w protokołach kwantowych z danego stanu dwucząstkowego jest ograniczona od góry przez zregulowaną miarę splątania zdefiniowaną poprzez entropię względną. Wyprowadzono protokół prowadzący do destylacji klucza kryptograficznego z pewnych stanów reprezentujących splątanie związane (tj. niedestylowalne). Wynik ten zaprzeczył dotychczasowym intuicjom powszechnie obecnym w literaturze przedmiotu. Wyniki przedstawiono w pracy: K. Horodecki, M. Horodecki, P. Horodecki, J. Oppenheim, *Secure key from bound entanglement*, quant-ph/0309110, **Phys. Rev. Lett.** (2005), w druku.

Pokazano, że splątanie kwantowe dwóch fermionów zależy od wyboru rozkładu iloczynu tensorowego przestrzeni Hilberta badanego układu. Wykazano również, że w tym przypadku zbieżność Woottersa nie jest właściwą miarą splątania i znaleziono jawną postać splątania formacji. Dzięki temu pokazano, że zbiór stanów separowalnych nie jest tak liczny jak w przypadku układu dwóch qubitów i istnieją stany, które są separowalne bez względu na wybór rozkładu iloczynu tensorowego. Wyniki przedstawiono w pracy: P. Caban, K. Podlaski, J. Rembieniński, K. A. Smoliński, Z. Walczak, *Entanglement and tensor product decomposition for two fermions*, **Journal of Physics A** (2005) w druku.

Opisano pierwsze (tzw. ściśle) nierówności Bella analizujące splątanie trzech kutritów. Pokazano do jakiego stopnia są one łamane przez czyste stany splątane. Wyniki opublikowano w pracy: A. Acin, J.L. Chen, N. Gisin, D. Kaszlikowski, L.C. Kwek, M. Żukowski, C.K. Oh, *Coincidence Bell inequality for three three-dimensional system*, **Phys. Rev. Lett.** **92**, 250404 (2004)

Zbadano nowe rodziny nierówności Bella analizujące eksperymenty, w których obserwatorzy mogą ustawiać swe analizatory na więcej niż dwa sposoby. Udowodniono również warunki konieczny i dostateczny, jakie muszą spełniać macierze gęstości, aby łamać te nierówności. Wyniki opublikowano w pracy: W. Laskowski, T. Paterek, M. Żukowski, C. Bruckner, *Tight multipartite Bell's inequalities involving many measurement settings*, **Phys. Rev. Lett.** **93**, 200401 (2004)

Analizowano związek pomiędzy dyskretną dynamiką w układach jednocząstkowych a statycznymi własnościami stanów kwantowych układu dwu-cząstkowego. W szczególności zdefiniowano i zbadano klasę odwzorowań unistochastycznych zadanych przez sprzężenie badanego układu z otoczeniem w stanie maksymalnie zmieszonym, ewolucję unitarną całkowitego układu oraz uśrednienie po zmiennych otoczenia. Wyniki opublikowano w pracy: K. Życzkowski, I. Bengtsson, *On duality between quantum maps and quantum states*, **Open Syst. Inf. Dyn.** **11**, 3-42 (2004)

Analizowano relacje pomiędzy odwzorowaniami dodatnimi na algebrze macierzy zespolonych „ $n \times n$ ”, a podzbiorem elementów samosprężonych z iloczynu tensorowego tych algebr. Pokazano, że istnieje izomorfizm między zbiorem wszystkich unormowanych odwzorowań dodatnich na algebrze a podzbiorem stanów separowalnych w iloczynie tensorowym algebr. Wyniki opublikowano w pracy: G. Kimura, A. Kossakowski, *A Note on Positive Maps and Classification of States*, **Open Syst. Inf. Dyn.** **11** (2004) 1-11.

Badano tzw. hipotezę addytywności dla kanałów kwantowych. Hipoteza ta znajduje się w centrum zainteresowania wielu ośrodków badawczych. Pokazano, że zachodzi addytywność minimalnej  $p$ - entropii Renyi'ego stanu wychodzącego dla dowolnej liczby kanałów typu Holewo-Wernera i dowolnego wykładnika  $p$  z przedziału  $[1,2]$ . Wyniki przedstawiono w pracy: R. Alicki, M. Fannes, *Note on multiple additivity of minimal Renyi entropy output of the Werner-Holevo channels*, **Open Syst. Inf. Dyn.** **11**: (2004), w druku.

Zbadano relacje termodynamiczne w hamiltonowskim modelu kwantowego układu przetwarzającego informację. W szczególności przeanalizowano scenariusz uzyskiwania pracy z kwantowych korelacji w paradygmacie odległych laboratoriów. Wyniki opublikowano w pracach: R. Alicki, M. Horodecki, P. Horodecki i R. Horodecki, *Thermodynamics of quantum information systems- Hamiltonian description*, **Open Syst. Inf. Dyn.** **11**:(2004), 205; B. Synak-Radtke, M. Horodecki, *Classical information deficit and monotonicity on local operations*”, **J. Phys. A: Math. Gen.** **37** (2004) 11465–11474.

Zastosowano tzw. tomografię stroboskopową do badania dynamiki otwartego układu kwantowego, którego dynamika zadana jest przez półgrupę Gaussa. Wyznaczono minimalną liczbę obserwacji, których pomiar w różnych chwilach czasu (tzn. w czasie trwania ewolucji) pozwala na pełną rekonstrukcję stanu początkowego (macierzy gęstości) układu. Wyniki opublikowano w pracy: A. Jamiolkowski, *On a Stroboscopic Approach to Quantum Tomography of Qudits Governed by Gaussian Semigroups*, **Open Syst. Inform. Dyn.** **11** (2004) 63-70.

Zbadano zagadnienie sterowania układem kwantowym. Udało się skonstruować model układu o nieskończonej liczbie stanów energetycznych, który można kontrolować za pomocą skończonego wymiarowej algebry. Wyniki opublikowano w pracy: W. Karwowski, R. Vilela Mendes: *Quantum Control in Infinite Dimensions*, **Phys. Lett. A** **322** (2004) 282-285.

Rozszerzono podstawowe modele uwzględniające nieporządek w zimnych bozonach umieszczonych na sieci optycznej na przypadek, gdy w sieci optycznej umieścimy ultra zimną mieszkankę fermionowo-bozonową. Takie mieszanki stanowią centrum obecnego zainteresowania doświadczalnego, w kilku światowych laboratoriach są przygotowywane, czy wręcz prowadzone, eksperymenty z mieszkankami. Rozszerzając podejście zastosowane poprzednio do regularnych mieszanek na przypadek częściowo nieuporządkowanej sieci, podejście oparte o hamiltonian efektywny dla quasi-zdegenerowanej podprzestrzeni zawierającej stan podstawowy, udało się pokazać, że wypadkowe hamiltoniany efektywne realizują de facto (czyli są tożsame z) szereg modelowych hamiltonianów używanych w teorii nieuporządkowanej materii skondensowanej. Wyniki opublikowano w pracy: A. Sanpera, A. Kantian, L. Sanchez-Palencia, J. Zakrzewski, and M. Lewenstein, *Atomic Fermi-Bose mixtures in inhomogeneous and random lattices: From Fermi glass to quantum spin glass and quantum percolation*; **Phys. Rev. Lett.** **93**, 040401 (2004).

Zbadano wyższe funkcje korelacji układu wielu atomów. Funkcje te tworzą hierarchię. Z wyższych można otrzymać niskie, bo cały układ jest zawsze w stanie Focka. Zdjęcie pojedynczego układu jest jednym pomiarem wysokiej funkcji korelacji. Wychodząc od tego spostrzeżenia pokazano jak, w zasadzie, można wykazać spójność makroskopowej superpozycji dwóch chmur atomowych. Diagnostyka takich stanów ma podstawowe znaczenie dla informatyki kwantowej. Wyniki opublikowano w pracy: R. Bach and K. Rzażewski, *Correlations in atomic systems: Diagnosing coherent superpositions*, **Phys. Rev. Lett.** **92**, 200401 (2004).

Pokazano, że jeśli fermiony i bozony przyciągają się odpowiednio mocno, to składniki bozonowy i fermionowy stają się gazami efektywnie przyciągających się atomów. A wtedy, w stanie podstawowym w środku pułapki formuje się soliton. Jeśli, z kolei, nieadiabaticznie zwiększymy przyciąganie między atomami to chmura bozonowa pęka i powstają ciągi solitonów. Każdy z solitonów jest strukturą dwuskładnikową, tzn. zawiera zarówno bozony (których jest więcej) jak i fermiony (które są ukryte w chmurze bozonów). Omówione wyniki uzyskane zostały w modelu jednowymiarowym. Praca ma związek z doświadczeniami grupy prof. Sengstocka w Hamburgu. Wyniki opublikowano w pracy: T. Karpiuk, M. Brewczyk, S. Ospelkaus-Schwarzer, K. Bongs, M. Gajda, K. Rzążewski, *Soliton trains in Bose-Fermi mixtures*, **Phys. Rev. Lett.** **93**, 100401 (2004).

W kilku poniżej opisanych publikacjach zawarto szczegółowe rezultaty w zakresie modelowania nanostruktur w realistycznych układach dla praktycznych celów inżynierii kwantowej i badania dekoherencji w realistycznych układach nanometrowych w technologii ciała stałego w celu rozpoznania możliwych kierunków implementacji informatyki kwantowej. Prace te to bardzo udany cykl rezultatów zespołu z AGH w Krakowie dotyczący modelowania kropek kwantowych zadawanych polem elektrycznym, jak i płaskich wieloelektronowych kropek w polu magnetycznym przy wykorzystaniu koncepcji krystalizacji Wignera.

Kropki kwantowe zadawane polem elektrycznym to tzw. kropki II rodzaju, to znaczy kropki dla elektronów i anty-kropki dla dziur (lub odwrotnie), i wszelkie wyniki w tym zakresie powiązane z realistycznym modelowaniem eksperymentu mają pierwszoplanowe znaczenie, gdyż oczekuje się, że ta technologia kropek może być bardziej korzystna niż najpopularniejsza dotychczas technologia kropek samorosnących. Z kolei koncepcja krystalizacji Wignera w kropkach wieloelektronowych i badanie w ten sposób rozkładu ładunku w kropce, jest dobrym uzupełnieniem do interpretacji i zrozumienia zachowania kropek zwłaszcza w silnych polach magnetycznych. Poznanie złożonej powłokowej struktury kropek wieloelektrodowych jest istotne z punktu widzenia wypracowania skutecznych i uproszczonych modeli takich układów potrzebnych dla zastosowań. W obu aspektach szczegółowe wyniki opublikowano w pracach: B. Szafran, F.M. Peeters, S. Bednarek, „*Electron spin and charge switching in a coupled quantum-dot-quantum ring system*”, **Phys. Rev. B** **70**, 125310 (2004); B. Szafran, F.M. Peeters, S. Bednarek, „*Exchange energy tuned by asymmetry in artificial molecules*”, **Phys. Rev. B** **70**, 205318 (2004); B. Szafran, F.M. Peeters, S. Bednarek, J. Adamowski, „*Anisotropic quantum dots: Correspondence between quantum and classical Wigner molecules, parity symmetry, and broken-symmetry states*”, **Phys. Rev. B** **69**, 125344 (2004); B. Szafran, F.M. Peeters, S. Bednarek, T. Chwiej, J. Adamowski, „*Spatial ordering of charge and spin in quasi-one-dimensional Wigner molecules*”, **Phys. Rev. B** **70**, 035401 (2004); B. Szafran, F.M. Peeters, S. Bednarek, J. Adamowski, „*In-plane magnetic-field-induced Wigner crystallization in a two-electron quantum dot*”, **Phys. Rev. B** **70**, 235335 (2004).

Zadano dekoherencję w realistycznych układach nanometrowych. Zbadano konkurencję markowskiej i nie-markowskiej dekoherencji w kropkach i określono optymalny kształt sygnału sterującego. Okazuje się, że tak oszacowana dekoherencja jest wyjątkowo niekorzystna dla implementacji optycznie sterowanych bramek kwantowych na strukturach kropek półprzewodnikowych. Zbadano też dekoherencyjny anharmoniczny efekt dla ekscytonów w kropkach (polaronów) na skutek rozpadu fononów na brzegu strefy Brillouina. Wyniki przedstawiono w pracach: P. Machnikowski, L. Jacak, „*Exciton-LO-phonon dynamics in InAs/GaAs quantum dots: effects of zone-edge phonon damping*”, przyjęte do druku w **Phys. Rev. B**, preprint cond-mat/0312256; R. Alicki, M. Horodecki, P. Horodecki,

R. Horodecki, L. Jacak, P. Machnikowski, "Optimal strategy for a single-qubit gate and the trade-off between opposite types of decoherence", **Phys. Rev. A** **70**, 010501 (2004); P. Machnikowski, L. Jacak, "Resonant nature of phonon-induced damping of Rabi oscillations in quantum dots", **Phys. Rev. B** **69**, 193302 (2004).

Rozwinięto analizę elektronowego transportu przez kropkę kwantową w reżimie tunelowania między elektrodami. Poznanie i opisanie szczegółów tego zjawiska ma ważną rolę dla projektowania realistycznych urządzeń nanotechnologicznych wykorzystujących kwantowy transport przez kropki kwantowe. Zwrócono uwagę na mezoskopowe efekty prądowe w obecności pola magnetycznego w innych nanostrukturach – nanorurkach węglowych, których topologia sprzyja występowaniu odmiennych geometrycznie konfiguracji prądowych, niedostępnych w układach makroskopowych. Wyniki opublikowano w pracach: R. Taranko, T. Kwapiński, E. Taranko, "Influence of microwave fields on electron transport through a quantum dot in the presence of direct tunneling between leads", **Phys. Rev. B** **69**, 165306 (2004); M. Szopa, M. Margańska, E. Zipper and M. Lisowski, "Coherence of persistent currents in multiwall carbon nanotubes", **Phys. Rev. B** **70**, 075406 (2004).

### **3. Wyniki badań naukowych w 2004 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 2004 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) zaawansowane są badania dekoherencji układu kilku jonów w pułpce elektromagnetycznej.

W zadaniu I.2 „Fizyczne kanały przesyłania informacji” kierowanym przez prof. K. Wódkiewicza (IFT UW) zbadano kanały informacji opisane podstawowymi dla optyki kwantowej równaniami Blocha oraz zbadano tak zwane kanały gaussowskie.

W zadaniu I.3 „Przybliżenia dyskretne kwantowych teorii pól z cechowaniem i ich zastosowania do fizyki atomów” kierowanym przez prof. J. Kijowskiego (CFT PAN) badania dotyczyły konstrukcji niezmienniczych względem cechowania, nieperturbacyjnych przybliżeń sieciowych kwantowej teorii pola z cechowaniem oraz próby skonstruowania za ich pomocą teorii ciągłej. Jednocześnie trwały badania dotyczące modeli nierelatywistycznej teorii pola (bez cechowania) i jej przybliżeń sieciowych.

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) uzyskano bardzo interesujące wyniki dotyczące własności atomów znajdujących się w wirujących pułapkach asymetrycznych w obecności grawitacji.

**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) zgodnie z planem rozwiązano wreszcie dotkliwą trudność przybliżenia pól klasycznych, polegającą z jednej strony na zależności wyników od wyboru siatki, na której przeprowadza się obliczenia, a z drugiej rozwiązano trudność określenia temperatury układu. Znalaziono też temperaturowe zależności wzbudzeń kolektywnych kondensatu oraz ich dyssypacje.

W zadaniu II.2 „Metody kwantowej teorii pola w zastosowaniu do zimnych gazów” kierowanym przez prof. K. Rzążewskiego (CFT PAN) zgodnie z planem zbadano spójność kondensatu jedno- i kwazi-jednowymiarowego za pomocą przybliżenia pól klasycznych. Dodatkowo (co opisano w wykazie wyróżniających się prac) zbadano wynikające z kwantowej teorii pola bozonowego związki pomiędzy funkcjami korelacji różnych rzędów oraz podano interpretację zdjęć kondensatu jako pomiarów wysokiej funkcji korelacji. Zbadano również wyższe funkcje korelacji kondensatu ewoluującego w sieci optycznej.

W zadaniu II.3 „Fizyka kondensatu a optyka nieliniowa. Zastosowanie teorii procesów stochastycznych” kierowanym przez dr. hab. M. Trippenbacha (IFD UW) zgodnie z planem stosowano metody optyki nieliniowej do opisu nieliniowych zjawisk w kondensacie I gazach bozonowych. Badano atomowe mieszanie czterech fal ze szczególnym uwzględnieniem strat na rozpraszanie elastyczne. Te ostatnie inicjowano, zgodnie z projektem, za pomocą dodatkowych pól stochastycznych. Badano też proces tworzenia cząsteczek w zimnym gazie fermionowym.

W zadaniu II.4 „Opis wielocząstkowy w podejściu perturbacyjnym Bogoliubowa” kierowanym przez dr. J. Dziarmagę (IF UJ) zbadano za pomocą przybliżenia Bogoliubova wzbudzenia kolektywne odpowiedzialne w najniższych temperaturach za dyssypację ciemnych solitonów oraz wirów w kondensacie. Przeanalizowano również wpływ strat jedno i wielociałowych na stan kwantowy atomów pozostających w pułapce. Atomy spułapkowane stanowią układ otwarty, który można opisać za pomocą markowskiego równania master. Równanie to zostało następnie rozwiązane w przybliżeniu wirującej fali. W tym zadaniu powstało szczególnie wiele prac. Poza wspomnianymi, bezpośrednio odpowiadającymi planowi, zbadano też fizyczną implementację kwantowego bitu w technologii złączy Josephsona. W tej technologii kubit to nadprzewodzący pierścień przerywany złączami Josephsona. Wydaje się, że szybkie oscylacje Rabiego pomiędzy stanami układu mogą dynamicznie odprzęgnąć kubit od otoczenia redukując poziom dekoherencji, co wydają się potwierdzać bieżące eksperymenty. Autorzy badają ograniczenia tego efektu.

W zadaniu II.5, „Wpływ szumu i nieporządku na zimne atomy w sieciach optycznych” kierowanym przez prof. J. Zakrzewskiego (IF UJ) zbadano własności mieszaniny bozonowo-fermionowej umieszczonej w nieuporządkowanej sieci optycznej. Zgodnie z planem zbadano teoretycznie znane doświadczenie I. Blocha, w którym w sieci optycznej wytworzonej obserwowano kwantową przemianę Motta. Rozszerzając plan badań w zakresie tego zadania, przeprowadzono analizę ewolucji splątania w układzie, w którym dwumodowy stan ściśnięty próżni ewoluował w czasie będąc sprzężony z pojedynczym rezerwuarem oraz wykonano pracę opisującą klasycznie efekt jednoczesnej podwójnej jonizacji w dwuatomowych molekułach poddanych działaniu silnego, krótkiego impulsu laserowego.

W zadaniu II.6, „Inżynieria sieci optycznych” kierowanym przez dr. K. Sachę (IF UJ) zgodnie z planem starannie zbadano proces „szarzenia” ciemnego solitonu w kondensacie Bosego-Einsteina. Przeanalizowano również jak badany efekt objawia się w pomiarze gęstości atomów w pojedynczym eksperymencie. W części dotyczącej układów fermionowych zbadano wzbudzenia w układzie w fazie nadciekłej. Analiza równań teorii BCS pokazała, że posiadają one rozwiązanie z antysymetryczną funkcją parującą. Chmura oddziałujących fermionów umieszczona w quasi-jednowymiarowej pułapce może zostać wzbudzona do stanu, w którym funkcja parująca jest antysymetryczna i wykazuje zachowanie solitonowe. Ponadto, choć nie deklarowane w projekcie, wykonano interesujące badania korelacji występujących w zjawisku dwuelektronowej jonizacji cząsteczek.

W zadaniu II.7 „Wieloskładnikowy zimny gaz Fermiego” kierowanym przez dr. hab. M. Brewczyka (IF UB) zbadano stan podstawowy dwuskładnikowego gazu fermionowego. Posługując się metodą orbitali wykazano istnienie, w określonym zakresie parametrów, stanu podstawowego złożonego z par Coopera. Wykazano istnienie w jednoskładnikowym gazie Fermiego zaburzeń wielosolitonowych. Zaburzenia te propagują się podobnie jak impulsy w liniowym, jednowymiarowym równaniu falowym. Wykryto istnienie jasnych solitonów dwuskładnikowych w mieszkankach bozonów i fermionów.

### ***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) zdefiniowano nowe wielkości charakteryzujące splątanie (kwantowy deficyt informacji i termodynamiczny koszt splątania) i zbadano ich własności. Podano nowe schematy opisu i klasyfikacji odwzorowań dodatnich.

W zadaniu III.2 „Ilościowa i jakościowa charakteryzacja splątania kwantowego” kierowanym przez dr. M. Horodeckiego (IFTIA UG) przetestowano hipotezę addytywności (minimum wyjściowej entropii, pojemności kanału i splątania tworzenia) dla kilku przykładów kanałów kwantowych. Zaproponowano nową koncepcję tworzenia miar splątania i badano zachowanie się miar splątania po usunięciu pojedynczego qubit.

W zadaniu III.3 „Termodynamiczne prawa i analogie w przetwarzaniu informacji kwantowej” kierowanym przez prof. dr. hab. R. Alickiego (IFTIA UG) zbadano relacje termodynamiczne w hamiltonowskim modelu przetwarzania informacji kwantowej. Pokazano, że bistochastyczne półgrupy dynamiczne i tylko one nie zwiększają czystości stanu w dowolnej chwili.

W zadaniu III.4 „Generacja i analiza nowych stanów splątanych” kierowanym przez prof. dr. hab. M. Żukowskiego (IFTIA UG) otrzymano szereg wyników dotyczących nowych rodzajów nierówności Bella i przeanalizowano odpowiednie eksperymenty dla szeregu stanów splątanych. Zbadano proces wymiany splątania dla stanów o różnym stopniu zmieszania.

W zadaniu III.5 „Gry kwantowe” kierowanym przez dr. hab. J. Ślaskowskiego (IF UŚ) pokazano w jaki sposób gry kwantowe służą do rozwiązywania znanych paradoksów teorii gier i kontynuowano analizę kwantowych gier rynkowych.

W zadaniu III.6 „Odwzorowania dodatnie i ich rola w badaniu stanów splątanych” kierowanym przez prof. A. Kossakowskiego (UMK) pokazano istnienie izomorfizmu pomiędzy unormowanymi odwzorowaniami dodatnimi na algebrze macierzy a podzbiorem stanów separowalnych na iloczynie tensorowym algebr oraz skonstruowano pewną klasę odwzorowań dodatnich na macierzach  $n \times n$ .

W zadaniu III.7 „Relatywistyczne aspekty przetwarzania informacji kwantowej” kierowanym przez prof. dr. hab. J. Rembélińskiego (IF UŁ) zdefiniowano kowariantną spinową macierz gęstości dla cząstki masywnej. Zbadano splątanie stanów dwu-fermionowych i określono zbiór stanów separowalnych. Zbadano proces destrukcji dwóch cząstek rozróżnialnych o spinie  $\frac{1}{2}$ .

W zadaniu III.8 „Teorio-polowe i nieliniowe aspekty kwantowej teorii informacji” kierowanym przez dr. hab. M. Czachore (PG) zbadano strukturę nie-wightmanowskiej teorii pola w tym jej kowariantność i niezmienniczość względem cechowania. Badano szereg przykładów solitonowych równań używanych do opisu fal akustycznych, nieliniowych włókien optycznych i kinetyki procesów zachodzących w DNA. Zastosowano solitonową metodę transformacji do badania rozpraszania elektronów na molekułach.

W zadaniu III.9 „Paradygmat odległych laboratoriów w kwantowej teorii informacji a klasyczna teoria bezpieczeństwa transmisji informacji” kierowanym przez dr P. Horodeckiego (PG) rozszerzono teorię kanałów kwantowych na przypadek wielu nadawców i odbiorców. Pokazano przykłady nieaddytywności pojemności takich kanałów. Wyprowadzono warunki bezpieczeństwa dla kryptograficznego klucza uzyskiwanego z dwucząstkowego stanu kwantowego. Zbadano protokoły kryptografii kwantowej w kontekście teorii Bohma. Analizowano efekty kwantowe dla 4-qubitowych stanów Smolina i ich uogólnień na układy o parzystej liczbie cząstek.

W zadaniu III.10 „Geometria i topologia stanów splątanych” kierowanym przez prof. dr. hab. M. Kusia (CFT PAN) podano efektywną metodę znajdowania dolnego ograniczenia miary splątania (*concurrence*) dla układów binarnych o dowolnym wymiarze. Zbadano zależności między stopniem chaotyczności dynamiki i wzrostem splątania w układzie. Przeanalizowano wpływ korelacji kwantowych na wierność estymacji nieznanego stanu kwantowego.

### ***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) zgodnie z planem analizowano kinetykę ubierania elektronu/ekscytronu w fonony. Zaproponowano odpowiedni formalizm związany z badaniem pozabiegunowej części kauzalnych funkcji Greena. Uzyskano w ten sposób metodę ilościowej oceny nieusuwalnej dekoherencji polaronu w kropce kwantowej na skutek oddziaływania z fononami różnych typów.

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) rozpatrywano fale spinowe w półmagnetycznym półprzewodniku i znaleziono ich dyspersję po wykonaniu uśrednienia względem losowych położzeń domieszek magnetycznych. Jest to znaczący rezultat w stosunku do znanych poprzednio tylko wyników średnio-polowych. Znajomość dyspersji fal spinowych pozwala na analizę dekoherencji spinu w kropkach kwantowych w półprzewodnikach półmagnetycznych na skutek ubierania spinu (elektronu/ekscytronu) w fale spinowe. Rozpoczęto też analizę możliwości realizacji bramki kwantowej przy użyciu spinowych stopni swobody w kropkach kwantowych.

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) rozpatrzono szereg zagadnień dotyczących sterowania qubitami ładunkowymi w kropkach kwantowych. Zbadano optymalizację błędu na bramce kwantowej w zależności od kształtu sygnału sterującego przy obecności dekoherencji fononowej (posługując się wynikami Zadania IV1). Rozpatrywano także możliwość koherentnego sterowania w kropkach kwantowych przy uwzględnieniu transportu ładunku przez kropkę (konfiguracja sterowanego transportu).

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) zrealizowano zgodnie z założeniami i rozwinięto metody teoretycznego modelowania struktury elektronowej kropek kwantowych przy zastosowaniu wielkoskalowych obliczeń numerycznych.

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) zrealizowano zaplanowany na ten rok zakres badań w kierunku analizy możliwości realizacji teleportacji spinu w układzie 3 kropek kwantowych.

### ***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) zbadano dwu- i trójwymiarowe modele cząstki w potencjale skoncentrowanym na zbiorze o niższym wymiarze, w szczególności spektralne własności odpowiednich hamiltonianów. Skonstruowano model układu kwantowego o nieskończonej liczbie stanów, który można kontrolować za pomocą skończonej-wymiarowej algebry Liego i operacji dyskretnej.

W zadaniu V.2 „Stany koherentne dla mechaniki kwantowej na nietrywialnych rozmaitościach konfiguracyjnych” kierowanym przez dr. hab. K. Kowalskiego (UŁ) przedstawiono q-deformację stanów koherentnych dla cząstki kwantowej 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) badano wpływ bliskości powierzchni heterostruktury

na dekoherencję w kropkach kwantowych w celu odniesienia się do realnych struktur nanotechnologicznych, Rozwijano też badania kropek kwantowych II rodzaju – ekscytronów i kompleksów ekscytonowych w kropkach zadawanych polem elektrycznym w ultrawąskich studniach kwantowych. Dodatkowo rozwijano oryginalne metody analizy nadprzewodzących stanów w przypadku silnej anizotropii w celu przyszłej analizy nadprzewodnikowych realizacji nanotechnologicznych.

W zadaniu V.4 „Modelowanie realistycznych kropek i molekuł kwantowych i ich matryc zadawanych ogniskowaniem elektrycznym” kierowanym przez prof. J. Adamowskiego (IF AGH) rozwijano planowaną analizę wieloelektrodowych stanów w kropkach kwantowych przy użyciu koncepcji molekuly Wignera, a także modelowanie kropek zadawanych polem elektrycznym. W zadaniu tym badano sterowanie tunelowaniem w kwantowych molekułach i przeprowadzono komputerową symulację bramki CNOT na kropkach kwantowych.

W zadaniu V.5 „Opto-elektroniczne zastosowania kropek kwantowych – w kierunku nieliniowej optyki kropek kwantowych” kierowanym przez prof. A. Radosza (IF PWR) rozpoczęto przygotowania analizy nieliniowych efektów w kropkach kwantowych w analogii do podobnych wcześniej rozpatrywanych zagadnień nieliniowej optyki w zwykłych atomach. Na tym etapie badań skoncentrowano jednak większą uwagę na ultraszybkich nieliniowych foto-indukowanych procesach przełączania w molekułach.

W zadaniu V.6 „Koherencja spinowa a inżynieria funkcji falowej w nanostrukturach półprzewodnikowych” kierowanym przez prof. W. Zawadzkiego (IF PAN) zgodnie z planem rozwinięto szeroką analizę zagadnień spinowych w studniach kwantowych, takich jak sterowanie współczynnikiem giromagnetycznym czy relatywistyczne efekty spinowe w półprzewodnikach (odpowiednie rozwinięcia równania Diraca).

W zadaniu V.7 „Własności transportowe nanorurek i fullerenów i ich zastosowania w nanotechnologii” kierowanym przez dr. hab. M. Szopa (IF UŚI) zostało wykonane zgodnie z planem – przeprowadzono szeroko zakrojone badania kwantowych stanów prądowych w strukturach nanorurek węglowych i analizowano efekty stabilności tych stanów i topologiczne ich spektry (stany typu Aharonova-Bohma).

### ***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 „Ściśliwe i nieściśliwe stany wzbudzeń złożonych fermionów i ich topologiczne” kierowanym przez dr. P. Sitkę (IF PWR) rozwijano planowane badania nieściśliwych stanów złożonych fermionów w układach 2D typu hallowskiego. Zaproponowano stan typu Pfaffian dla wyjaśnienia istnienia nowych stanów hierarchicznych w ułamkowym kwantowym efekcie Halla. Oryginalna koncepcja została przedstawiona w publikacji.

W zadaniu VI.2 „Analiza widma foto-luminescencji dwuwymiarowego gazu elektronowego w silnych polach magnetycznych” kierowanym przez dr. hab. A. Wójca (IF PWR) uzyskano wiele istotnych wyników szczegółowych dotyczących własności i struktury luminescencji z układów 2D w silnych polach magnetycznych – a więc przy udziale topologicznych cząstek jakimi są złożone fermiony.

Zadanie VI.3 „Sieci stochastyczne w chaotycznych układach kwantowych. Dynamika kondensatu Bosego-Einsteina w sieciach optycznych z uwzględnieniem zjawisk chaosu” kierowane przez dr S. Bujkiewicz, IF PWR, nie zostało wykonane w tym roku, ale i nie zostały też wydatkowane środki w ramach tego zadania (za wyjątkiem proporcjonalnego udziału we wspólnej organizacji międzynarodowego sympozjum i szkoły – uczestniczył w niej prof. Mark Fromhold z Nottingham University, związany z planowaną realizacją tego zadania przy współpracy międzynarodowej). Przesunięcie i planowana modyfikacja tego zadania na kolejne dwa lata związane są z nieprzewidzianymi komplikacjami osobistymi kierownika – dr Sylwii Bujkiewicz (długoterminowy wyjazd zagraniczny, w kolizji z planowaną tematyką). Zadanie to przewidziane było w przekryciu tematycznym z podobnie zakrojonymi i obecnie szeroko zrealizowanymi badaniami innych zespołów uczestniczących w projekcie i w związku z tym jego modyfikacja nie spowoduje uszczerbku w realizacji całego projektu.

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) zostało wykonane zgodnie z planem. Zaproponowano nowy sposób interpretacji ewolucji kwantowej przy wykorzystaniu koncepcji rzutowania, co modyfikuje interpretację pomiaru.

W zadaniu VI.5 „Geometria kwantowego efektu Halla a charakter Cherna-Connesa w niekomutatywnej geometrii” kierowanym przez dr. hab. A. Sitarza (IFT UJ) zrealizowano zaplanowany zakres badań w kierunku rozwoju matematycznej interpretacji układów hallowskich o topologicznym charakterze. Rozwinięto metodę Bellisarda wiążącą nieprzemienią geometrię z koncepcjami fizycznymi ułamkowego efektu Halla.

W zadaniu VI.6 „Chaos kwantowy, dekoherencja i dynamika splątania” kierowanym przez prof. dr. hab. K. Życzkowskiego (IF UJ) zbadano związki między dyskretną dynamiką stochastyczną w układach jednocząstkowych a statycznymi własnościami stanów kwantowych układu dwu-cząstkowego. Szczegółowo opisano własności macierzy unistochastycznych dla wymiarów  $N=3$  i  $4$ . Użyto statystycznego podejścia do badania stanów mieszanych definiując na ich zbiorze miary probabilistyczne oparte na założeniach fizycznych. Nieklasyczne własności stanów opisano za pomocą pewnych nowych parametrów otrzymanych z funkcji Wignera.

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) zastosowano technikę modelowania stochastycznego do opisu kwantowych układów otwartych i niedysypatywnych układów mezoskopowych, w tym układów ograniczonych barierami. Sformułowano teorię półklasycznych katastrof dla dynamiki periodycznie zaburzanego rotatora kwantowego.

W zadaniu VI.8 „Matematyczne modele dekoherencji” kierowanym przez dr. hab. R. Olkiewicza (UWr) dokonano przeglądu efektów dekoherencyjnych w nieskończonych układach spinowych na sieci. Podano konstrukcję szerokiej klasy kwazi-swobodnych półgrup dynamicznych dla nieskończonych układów bozonowych. Opisano model układu otwartego, w którym każdy początkowo splątany stan ulega rozplątaniu po skończonym czasie.

W zadaniu VI.9 „Tarcie i dysypacja w układach kwantowych” kierowanym przez dr. hab. D. Chruścińskiego (UMK) skonstruowano model układu kwantowego z tarcie i zbadano

własności spektralne (rezonanse) odpowiadającego mu hamiltonianu. Badano własności spektralne tzw. operatora ściskania.

#### ***4. Inne osiągnięcia***

Ważną i planowaną rolę w realizacji projektu zamawianego odgrywają zorganizowane kontakty między różnymi zespołami projektu. Międzynarodowe sympozjum i szkoła informatyki i inżynierii kwantowej (Wrocław/Karpacz 2004) oraz konferencja inżynierii kwantowej (Wrocław 2004) odegrały ważną rolę unifikującą środowisko i zwiększającą udział studentów i doktorantów w realizacji badań.

.....  
(podpis kierownika projektu)

Warszawa, 31 marca 2005 r.