

Merytoryczny raport roczny  
z realizacji projektu badawczego zamawianego Nr PBZ-MIN-008/P03/03  
pt. „Informatyka i inżynieria kwantowa”  
za okres od 01.01.2005 r. do 31.12.2005 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*

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.

Zespoły badawcze uczestniczące w realizacji projektu zamawianego „**Informatyka i Inżynieria Kwantowa**” uzyskały w 2005 roku znaczące rezultaty w zakresie tematyki objętej projektem zamawianym. Na wymierny dorobek projektu składa się jedna praca opublikowana w **Nature**, **9** prac opublikowanych w najlepszym czasopiśmie fizycznym **Physical Review Letters** spośród ogólnej liczby **103** prac w czasopismach recenzowanych z Listy Filadelfijskiej oraz **8** wykładów zaproszonych i **36** innych wystąpień na konferencjach międzynarodowych. 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 2005 roku na Uniwersytecie Gdańskim, Politechnice Wrocławskiej i w Centrum Fizyki Teoretycznej PAN. 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 uzyskano istotne rezultaty dotyczące opisu i detekcji splątania w układach kwantowych, a także podano interpretacje ujemnej entropii warunkowej stanów splątanych. Zaproponowano nowe zastosowania stanów splątanych w procesach przetwarzania informacji które zostały następnie zrealizowane we

współpracy z eksperymentatorami. Określono także nową metodę parametryzacji i pomiaru szumu urządzeń kwantowych.

W pracy **M. Horodecki**, J. Oppenheim, A. Winter, *Partial quantum information*, Nature **436**, 673 (2005) podano operacyjną interpretację kwantowej entropii warunkowej, analogiczna do klasycznej nawet gdy entropia ta jest ujemna. Wynik ten wykorzystano do rozwiązania kilku ważnych problemów kwantowej teorii informacji.

Ważnym krokiem w kierunku udowodnienia hipotezy o addytywności miary tworzenia splątania jest pokazanie w pracy D. Yang, **M. Horodecki**, **R. Horodecki**, **B. Synak-Radtke**, *Irreversibility for all bound entangled states*, Phys.Rev.Lett. **95**, 190501 (2005), że koszt splątania jest ściśle większy od zera dla wszystkich stanów splątanych.

W pracy **K. Horodecki**, **M. Horodecki**, **P. Horodecki** i J. Oppenheim, *Locking Entanglement with a single qubit*, Phys. Rev. Lett. **94**, 200501 (2005) zbadano interesujące zjawisko polegające na nieciągłej zmianie różnych miar splątania pod wpływem pomiaru przeprowadzonego na jednym z wielu qubitów w układzie.

Praca M. Czachor, *Comment on „Quantum Entropy and Special Relativity”*, Phys. Rev. Lett. **94**, 078901 (2005) stanowi ważny głos w dyskusji dotyczącej relatywistycznego opisu stanu qubitów a w szczególności definicji kwantowej entropii.

Nierówności entropowe dla stanów splątanych zostały bezpośrednio potwierdzone w eleganckim eksperymencie opisanym w pracy F.A. Bovino, G. Castagnoli, A. Ekert, **P. Horodecki**, C.M. Alves, A.V. Sergienko, *Direct measurement of non-linear properties of bipartite quantum states*, Phys.Rev.Lett. **95** 240407(2005).

W pracy F. Mintert, **M. Kuś**, A. Buchleitner, *Concurrence of mixed multi-partite quantum states*, Phys. Rev. Lett. **95**, 260502 (2005) zaproponowano ogólną konstrukcję miar splątania w układach wieloskładnikowych będących uogólnieniem tzw. współbieżności (concurrence) dla układów dwuskładnikowych.

W pracy **K. Horodecki**, D. Leung, H.-K. Lo, J. Oppenheim, *Quantum key distribution based on arbitrarily-weak distillable entangled states*, quant-ph/0510067, Phys. Rev. Lett.(w druku), należącej do dziedziny kryptografii kwantowej, wykazano, że jeżeli Alicja i Bob posiadają niewielką ilość splątania destylowanego, to możliwa jest taka modyfikacja tzw. protokołu Lo, Chau, która daje dużą ilość bezwarunkowo bezpiecznego klucza.

Znaczące rezultaty osiągnięto w dziedzinie inżynierii kwantowo zdegenerowanych gazów atomowych i molekularnych. Są 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.

W pracy **J. Dziarmaga** i M. Lewenstein, *Laser Cooling of Fermions to the Superfluid Transition Temperature*, Phys.Rev.Lett. **94**, 090403 (2005) przeprowadzono symulacje laserowego chłodzenia fermionów poniżej temperatury przejścia w stan nadciekły. Cały proces chłodzenia odbywa się po stronie przyciągającej rezonansu Feshbacha. Dla realistycznych parametrów układu uzyskaliśmy temperatury rzędu 0.08 temperatury

Fermiego w czasie rzędu kilku sekund. Wyniki pokazują, że chłodzenie laserowe jest interesującą alternatywą dla standardowych metod.

W pracy J. T. Schulte, S. Drenkelforth, J. Kruse, W. Ertmer, J. Arlt, **K. Sacha**, **J. Zakrzewski** i M. Lewenstein, *Routes Towards Anderson-Like Localization of Bose-Einstein Condensates in Disordered Optical Lattices*, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 170411 (2005) analizowano efekty lokalizacji kondensatu Bosego-Einsteina spowodowane wprowadzeniem nieporządku do regularnego potencjału sieci optycznej. Wyniki analizy teoretycznej porównano z rezultatami doświadczenia przeprowadzonego w Hanowerze. Okazało się że, w przypadku kiedy część potencjału, która odpowiedzialna jest za nieporządek zmienia się na skali długości dużo większej niż okresowość sieci optycznej, zachowanie układu bardzo dobrze opisuje się przybliżeniem Thomasa-Fermiego z tym, że najpierw należy w opisie wyeliminować sieć optyczną wprowadzając formalizm masy efektywnej.

W pracy **M. Matuszewski**, E. Infeld, B. A. Malomed i **M. Trippenbach**, *Fully Three Breather Solitons Can Be Created Using Feshbach Resonances*, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 050403 (2005), zaproponowano doświadczenie w którym przy zastosowaniu rezonansu Feshbacha można wytworzyć trójwymiarowe solitony w kondensatach Bosego Einsteina. Wykazano, że w przypadku, gdy w jednym kierunku kondensat jest silnie ściśnięty (na przykład przy pomocy jednowymiarowej pułapki harmoniczej), funkcja falowa zachowuje się efektywnie jak obiekt dwuwymiarowy. Okazało się, że kondensat pozostawiony w jednowymiarowej pułapce harmoniczej, w obecności zewnętrznego oscylującego pola magnetycznego będzie się zachowywał stabilnie, to znaczy nie rozplynie się w wyniku ekspansji balistycznej. Alternatywnym rozwiązaniem jest umieszczenie kondensatu w jednowymiarowej siatce optycznej. Powstały wówczas soliton ma w pełni trójwymiarowy charakter. Sprawdzono, że dane liczbowe używane w naszych symulacjach odpowiadają realnym parametrom użytym w eksperymentach.

W pracy **P. Ziń**, **J. Chwedeńczuk**, A. Veitia, **K. Rzązewski** i **M. Trippenbach**, *Quantum Multimode Model of Elastic Scattering from Bose-Einstein Condensates*, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 200401 (2005) dokonano szczegółowej analizy kwantowego wielomodowego modelu rozpraszania atomów ze zderzających się kondensatów. Własności pola rozproszonych atomów (takie jak spójność, skale czasowe narastania populacji pola, czy pierwsze dwie funkcje korelacji) zostały wyznaczone analitycznie. Ponadto, znaleziono prosty warunek (w języku parametrów układu takich jak liczba cząstek w kondensatach, ich względna prędkość i rozmiar kondensatu) na występowanie zjawiska bozonowego wzmocnienia. Jest to pierwsza praca, która przedstawia szczegółowy opis kwantowych własności pola rozproszonych atomów nie posługując się rachunkiem zaburzeń.

W dziedzinie inżynierii kwantowej ciała stałego osiągnięto znaczący postęp na drodze rozpoznania realnych uwarunkowań praktycznych realizacji kwantowego przetwarzania informacji w tej technologii. Zbadano dekoherencję fazową w nanostrukturach wywołaną kolektywnymi stopniami swobody otoczenia. Mikroskopowa analiza tego procesu pozwoliła na określenia skalowania czasu dekoherencji wraz z rozmiarami nano-układu. Nieusuwalna dekoherencja (niekontrolowany wpływ informacji kwantowej) zarówno ładunkowych jak i spinowych stopni swobody w kropkach kwantowych lokuje się niekorzystnie, uniemożliwiając spełnienie warunków DiVincenzo. Dla ładunków jest to skala pikosekund, a dla spinów – nanosekund; w obydwu przypadkach dekoherencja jest tylko 3 rzędy wielkości wolniejsza od najszybszych czasów sterowania odpowiednimi qubitami i bramkami, co

zdecydowanie utrudnia konstrukcję skalowanego komputera kwantowego. Umożliwia jednak działanie prostszych nanotechnologicznych/spintronicznych kwantowych urządzeń sterowanych koherentnie dla opto-elektronicznych zastosowań nowej generacji.

W pracy **L. Jacak, J. Krasnyj, W. Jacak, R. Gonczarek, P. Machnikowski**, *Unavoidable decoherence in semiconductor quantum dots*, Phys. Rev. **B 72**, 245309, (2005) opisano dekoherencję ładunków w realnych kropkach kwantowych i przedyskutowano zjawisko czasowego ograniczenia efektywności spinowej blokady Pauliego w kropkach kwantowych.

W pracy **T. Kwapiński, R. Taranko, E. Taranko**, *Photon-assisted electron transport through a three-terminal quantum dot system with nonresonant tunneling channels*, Phys. Rev. **B 72**, 125312 (2005) opisano zjawisko termoelektryczne w sprzężonych kropkach kwantowych i zjawiska tunelowe.

W pracach **B. Szafran, T. Chwiej, F.M. Peeters, S. Bednarek, J. Adamowski, B. Partoens**, *Exciton and negative trion dissociation by an external electric field in vertically coupled quantum dots*, Phys. Rev. **B 71** (2005) 205316, *Relative stability of negative and positive trions in a model symmetric quantum wires*, Phys. Rev. **B 71** (2005) 235305 i **W. Jaskolski i L.Chico**, *Localized and conducting states in carbon nanotube superlattices*, Phys. Rev. **B 71**, 155405, 2005 przeprowadzono analizę trionów oraz stanów Wignera w kropkach kwantowych.

W pracy **M. Margańska, M. Szopa i E. Zipper** *Orbital magnetic moments in pure and doped carbon nanotubes* Phys. Rev. **B 72**, (2005), przedstawiono analizę topologiczną stanów kwantowych w nanorurkach węglowych.

W pracach **W.Zawadzki**, Phys. Rev. **B 72**, 085217 (2005), **P.Pfeffer i W.Zawadzki**, Phys. Rev. **B 72**, 035325 (2005) i **C.Skierbiszewski, P.Pfeffer i J.Łusakowski**, Phys. Rev. **B 71**, 205203 (2005) przedyskutowano zjawiska w strukturach półprzewodnikowych mające analogie relatywistyczne.

W pracy **W. Ungier, R. Buczko**, *Optical Pumping of the Electron Spin Polarization in Bulk CuCl*, Phys. Review **B 72**, 165320, (2005) opisano optyczne pompowanie spinowych stopni swobody.

W pracy **P. Caban, J. Rembieliński**, *Lorentz covariant reduced spin density matrix and Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm correlations*, Phys. Rev. **A 72**, 012103 (2005) zdefiniowano zredukowaną spinową macierz gęstości dla cząstki masywnej i wykorzystano ją do analizy relatywistycznego wariantu eksperymentu EPR-Bohma

W pracy **P. Trojek, C. Schmid, M. Bourennane, C. Brukner, M. Żukowski, and H. Weinfurter**, *Experimental Quantum Communication Complexity*, Phys. Rev. **A 72**, 50305 (2005) udowodniono, że przekazywanie pojedynczego qubitu  $N-1$  razy, zamiast  $N-1$  klasycznych bitów, prowadzi do wzrostu prawdopodobieństwa sukcesu pewnych zadań ze zredukowaną komunikacją (communication complexity) określonych pomiędzy  $N$  partnerami. Przeprowadzono eksperyment, w którym zrealizowano takie protokoły dla  $N=5$ .

W pracy **R. Demkowicz-Dobrzański**, *State estimation on correlated copies*, Phys. Rev. **A 71**, 062321 (2005) pokazano, że stan skorelowany  $N$ -qubitów może być lepszym źródłem informacji o zredukowanej macierzy gęstości dla pojedynczego qubitu, niż stan produktowy

(nieskorelowany), co może mieć znaczenie przy przesyłaniu informacji kwantowej oraz pomiarach stanów kwantowych.

Kontynuowano analizę kwantowych gier rynkowych pokazując, między innymi, że formalizm kwantowy może być użyty to opisanie ewolucji czasowej instrumentów pochodnych **E. W. Piotrowski, J. Ślaskowski**, *Quantum diffusion of prices and profits*, *Physica A* **345**, 185 (2005).

Zaproponowano metodę pomiaru wierności, charakteryzującej jakość implementacji danego schematu przetwarzania informacji kwantowej, używając śladu superoperatora opisującego dynamikę nieunitarną jako miary szumu J. Emerson, **R. Alicki, K. Życzkowski**, *Scalable Noise Estimation with Random Unitary Operators*, *J. Opt. B: Quantum Semiclass. Opt.* **7** (2005) S347.

W pracach **D. Chruściński, J. Jurkowski**, *Quantum damped oscillator I: dissipation and resonances*, quant-ph/0506007, *Annals of Physics* (w druku) I **D. Chruściński**, *Quantum damped oscillator II: Bateman's Hamiltonian vs. 2D Parabolic Potential Barrier*, quant-ph/0506091, *Annals of Physics* (w druku) podano pełną analizę spektralną operatora Hamiltona dla kwantowego problemu tłumionego oscylatora otrzymując kompletny opis stanów rezonansowych w języku tzw. trójek Gelfanda.

### **3. Wyniki badań naukowych w 2005 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 2005 roku przez zespoły uczestniczące w projekcie w odniesieniu do realizowanych tematów badawczych.

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

W zadaniu I.1 „Fizyka jonów a dekoherencja” kierowanym przez prof. J. Mostowskiego (IF PAN) zbadano proces tłumienia jednego i dwóch jonów. Wykorzystano standardową teorię tłumienia, polegającą na wyznaczeniu przybliżonej ewolucji układu słabo oddziałującego rezerwuarem o dużej liczbie stopni swobody. Zasadniczym wynikiem jest podanie charakterystycznego czasu tłumienia stanów splątanych i porównane go z czasem tłumienia stanu wzbudzonego pojedynczego jonu. Pokazano, że czas tłumienia splątania jest dwukrotnie szybszy od czasu tłumienia pojedynczego stanu wzbudzonego.

W zadaniu I.2 „Fizyczne kanały przesyłania informacji” kierowanym przez prof. K. Wódkiewicza (IFT UW) zbadano własności interferencji w przestrzeni fazowej czas-częstość stosując impulsy świetlne z tzw. „chirp”. Okazuje się, że taka interferencja prowadzi do bardzo bliskich analogii do własności kwantowych stanów kontrakcyjnych (contractive states). Dla takich impulsów świetlnych i ich liniowych superpozycji można wykazać własności analogiczne do kwantowych redukcji szumów, splątania oraz struktur sub-planckowskich. Zaproponowano metodę badania takich struktur za pomocą operacyjnego widma zależnego od czasu..

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 własności specjalnej renormalizacji całkowitego Hamiltonianu opisującego układ wielu (np.  $N=1000$ ) cząstek układem kilku (np.  $n = 5,6,7$ ) „bloków”, z których każdy reprezentuje wiele (kilkaset) cząstek. Przeprowadzono symulacje komputerowe dla entropii układu. Wyniki te wskazują na zbieżność rezultatów numerycznych dla rosnącej ilości bloków.

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) badano możliwości kontrolowania naładowanych obiektów mikroskopowych (elektronów, jąder atomowych, jonów) przy użyciu rotujących pól elektromagnetycznych. Wykazano że przy uwzględnieniu pola grawitacyjnego w pułapce harmoniczej pojawiają się rezonanse nowego rodzaju (typu rezonansu parametrycznego) zależne nie tylko od szybkości obrotu, ale także od orientacji osi obrotu. Zbadano wiązki światła obdarzone orbitalnym momentem pędu, które mogą służyć do lokalizacji i do precyzyjnej kontroli ruchu cząstek naładowanych.

### ***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) zbadano fluktuacje fazy w kondensacie Bosego-Einsteina, który jest uwięziony w wydłużonej pułapce harmoniczej. Wykorzystując metodę pól klasycznych pokazano, że w temperaturach mniejszych od pewnej charakterystycznej temperatury, długość spójności jest rzeczywiście znacznie mniejsza od rozmiaru układu. Pokazano, że istnieje charakterystyczny stosunek rozmiaru podłużnego do poprzecznego, przy którym zachowanie układu zmienia się od typowego dla trójwymiarowej geometrii do takiego, które jest typowe dla układów jednowymiarowych.

W zadaniu II.2 „Metody kwantowej teorii pola w zastosowaniu do zimnych gazów” kierowanym przez prof. K. Rzążewskiego (CFT PAN) zgodnie z planem zbadano własności przepływu nadciekłego w kondensacie Bosego-Einsteina słabo oddziałującego gazu kwantowego. Uwzględniono wzbudzenia termiczne posługując się metodą pól klasycznych. Wykryto, że prędkość krytyczna jest istotnie mniejsza niż prędkość dźwięku. Pokazano także, że w realistycznych warunkach rozrzedzonego gazu wciąż można rozróżnić pomiędzy frakcją nadciekłą, a skondensowaną.

W zadaniu II.3 „Fizyka kondensatu a optyka nieliniowa. Zastosowanie teorii procesów stochastycznych” kierowanym przez dr. hab. M. Trippenbacha (IFD UW) zaproponowano eksperyment, w którym przy zastosowaniu rezonansu Feshbacha można wytworzyć trójwymiarowe solitony w kondensatach Bosego Einsteina. Wykazano, że w przypadku, gdy w jednym kierunku kondensat jest silnie ściśnięty (na przykład przy pomocy jednowymiarowej pułapki harmoniczej), funkcja falowa zachowuje się efektywnie jak obiekt dwuwymiarowy. Dokonano szczegółowej analizy kwantowego wielomodowego modelu rozpraszania atomów ze zderzających się kondensatów.

W zadaniu II.4 „Opis wielocząstkowy w podejściu perturbacyjnym Bogoliubowa” kierowanym przez dr. J. Dziarmagę (IF UJ) pokazano, że dynamiczną próżnię Bogoliubowa o dobrze określonej liczbie cząstek można sprowadzić do postaci diagonalnej, która

umożliwia przewidywanie możliwych wyników pomiarów gęstości na wzbudzonym kondensacie. Wykonano numeryczną symulację wyników pomiarów kondensatu z ciemnym solitonem wzbudzonym metodą nadruku fazy.

W zadaniu II.5, „Wpływ szumu i nieporządku na zimne atomy w sieciach optycznych” kierowanym przez prof. J. Zakrzewskiego (IF UJ) analizowano wpływ zaburzenia sieci optycznej, albo przez dodatkowy potencjał przypadkowy generowany przez spekle optyczne, albo przez potencjał pochodzący od dodatkowych sieci optycznych o częstościach niewspółmiernych z siecią główną na własności kondensatu Bosego-Einsteina oraz mieszaniny fermionowo-bozonowej. Znalezione numerycznie, w przybliżeniu średniego pola, stany podstawowe w dwuwymiarowych układach z nieporządkiem, analizując m.in. przejście od gazu Fermiego (dla uporządkowanej sieci) do szkła Fermiego w obecności nieporządku. Podobnie stosując dynamiczną wersję średniopolewego przybliżenia Gutzwillera można było zaobserwować przejście od typowego fermionowego izolatora do fazy izolatorowej z nieporządkiem.

W zadaniu II.6, „Inżynieria sieci optycznych” kierowanym przez dr. K. Sachę (IF UJ) zgodnie z planem analizowano efekty lokalizacji kondensatu Bosego-Einsteina spowodowane wprowadzeniem nieporządku do regularnego potencjału sieci optycznej. Okazało się że, w przypadku kiedy część potencjału, która odpowiedzialna jest za nieporządek zmienia się na skali długości dużo większej niż periodyczność sieci optycznej, zachowanie układu bardzo dobrze opisuje się przybliżeniem Thomasa-Fermiego z tym, że najpierw należy w opisie wyeliminować sieć optyczną wprowadzając formalizm masy efektywnej.

W zadaniu II.7 „Wieloskładnikowy zimny gaz Fermiego” kierowanym przez dr. hab. M. Brewczyka (IF UB) znaleziono analityczny wzór na maksymalną częstość pułapki przy zadanych liczbach atomów i stałych sprzężenia określających oddziaływania między atomami, przy której mieszanina fermionowo-bozonowa pozostaje jeszcze stabilna. Wzór analityczny porównano z wynikami rachunków numerycznych bazujących na hydrodynamicznym modelu mieszaniny fermionowo-bozonowej uzyskując dobrą zgodność.

### ***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) dowiedziono, że koszt splątania (zregularyzowana miara tworzenia splątania) jest ostro większy od zera dla wszystkich stanów splątanych. Ten rezultat stanowi jeszcze jedną przesłankę, że miara tworzenia splątania jest addytywna. W pomysłowym eksperymencie dla entropii Renyi’ego ( $\alpha=2$ ) pokazano że w przypadku kwantowych układów entropia całego układu może być mniejsza niż entropia podukładów.

W zadaniu III.2 „Ilościowa i jakościowa charakteryzacja splątania kwantowego” kierowanym przez dr. M. Horodeckiego (IFTIA UG) dostarczono operacyjnej interpretacji kwantowej entropii warunkowej, która jest analogiczna do klasycznej, nawet jeśli wielkość ta jest ujemna i bazując na tym rozwiązano kilka podstawowych problemów z teorii informacji. W szczególności podano formułę na tzw. "splątanie przy asyście", definiowane jako największą

ilość czystego splątania, które można wytworzyć między wybranymi podukładami układu on podukładach, przy pomocy lokalnych operacji i klasycznej komunikacji.

W zadaniu III.3 „Termodynamiczne prawa i analogie w przetwarzaniu informacji kwantowej” kierowanym przez prof. dr hab. R. Alickiego (IFTIA UG) pokazano, że nieodwracalność pojawiająca się w procesie formacji stanów splątanych zachodzi dla wszystkich niedestylowalnych stanów. W dowodzie wykorzystano nową nierówność dla splątania stanu czterech podukładów..

W zadaniu III.4 „Generacja i analiza nowych stanów splątanych” kierowanym przez prof. dr. hab. M. Żukowskiego (IFTIA UG) udowodniono, że przekazywanie pojedynczego kubitu  $N-1$  razy, zamiast  $N-1$  klasycznych bitów, prowadzi do znaczącego wzrostu prawdopodobieństwa sukcesu pewnych zadań ze zredukowaną komunikacją (communication complexity) określonych pomiędzy  $N$  partnerami. Jakość protokołów kwantowych, mierzona stosunkiem wierności odpowiedzi kwantowej do klasycznej, rośnie eksponentalnie z  $N$ . Przeprowadzono eksperyment, w którym zrealizowano takie protokoły dla  $N=5$ . Bez żadnych poprawek biorących pod uwagę niedoskonałości eksperymentalne kwantowy protokół okazał się bardziej wydajny niż najlepszy możliwy klasyczny protokół..

W zadaniu III.5 „Gry kwantowe” kierowanym przez dr. hab. J. Śładkowskiego (IF UŚ) pokazano analizowano kwantową sztuczną inteligencję i kontynuowano analizę kwantowych gier rynkowych. Pokazano jak algorytmy typu Metropolis oraz nieniszczące pomiary mogą być użyte w zagadnieniach dotyczących sztucznej inteligencji.

W zadaniu III.6 „Odwzorowania dodatnie i ich rola w badaniu stanów splątanych” kierowanym przez prof. A. Kossakowskiego (UMK) zbadano relacje między odwzorowaniami dodatnimi na algebrze macierzy  $n \times n$  ( $M_n$ ) a podzbiorem w iloczynie tensorowym tych algebr. Pokazano, że istnieje izomorfizm między zbiorem wszystkich unormowanych odwzorowań dodatnich na  $M_n$  a pewnym podzbiorem stanów separowalnych na iloczynie tensorowym  $M_n \times M_n$ . Zbadano strukturę geometryczną zbioru wektorów Blocha reprezentujących zbiór macierzy gęstości układu  $N$ -poziomowego. Podano charakterystykę zbioru wektorów Blocha przy pomocy widm generatorów grupy  $SU(N)$ .

W zadaniu III.7 „Relatywistyczne aspekty przetwarzania informacji kwantowej” kierowanym przez prof. dr. hab. J. Rembielińskiego (IF UŁ) pokazano, że splątanie kwantowe dwóch fermionów zależy od wyboru rozkładu iloczynu tensorowego przestrzeni Hilberta badanego układu. Wykazano 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.

W zadaniu III.8 „Teorio-polowe i nieliniowe aspekty kwantowej teorii informacji” kierowanym przez dr. hab. M. Czachora (PG) analizowano całkowalność pewnych klas równań (Boussinesq, Nahma i ich uogólnień) przy pomocy transformacji Draboux i podano jawną postać odpowiednich transformacji ubierających i nieabelowych funkcji specjalnych. Zastosowano technikę transformacji Laplace’a i Moutarda do opisu oddziaływania fal wirowych i akustycznych. Zaproponowano nowy mechanizm kontroli nieliniowego rezonansu fali Tollmiena-Schlichtinga przy pomocy akustycznego oddziaływania cztero-falowego.

W zadaniu III.9 „Paradygmat odległych laboratoriów w kwantowej teorii informacji a klasyczna teoria bezpieczeństwa transmisji informacji” kierowanym przez dr P. Horodeckiego

(PG) wykazano, że jeżeli w paradygmacie odległych laboratoriów Alicja i Bob posiadają niewielką ilość splątania destylowanego, to możliwa jest taka modyfikacja tzw. protokołu Lo, Chau, która daje dużą ilość bezwarunkowo bezpiecznego klucza. W dowodzie zastosowano jako kluczowe pojęcie p-bitu, oraz protokół teleportacji kwantowej..

W zadaniu III.10 „Geometria i topologia stanów splątanych” kierowanym przez prof. dr. hab. M. Kusia (CFT PAN) analizowano problemy geometrii stanów kwantowych w skończonej wymiarowej przestrzeni Hilberta istotnych w informatyce kwantowej. Za pomocą metod geometrii różniczkowej i symplektycznej wykazano, iż zbiór macierzy gęstości jest, w naturalny sposób, stratyfikowana mnogością. Udowodniono że zarówno zbiór wszystkich stanów kwantowych jak i też zbiór stanów z dodatnią częściową transpozycją są zbiorami o stałej wysokości. zaproponowano ogólna konstrukcję miar splątania w układach wieloskładnikowych będących uogólnieniem tzw. współbieżności (concurrence) dla układów dwuskładnikowych. Skonstruowane miary pozwalają na klasyfikację różnych rodzajów splątania w kwantowych układach wieloskładnikowych.

### ***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/ekscytonu w fonony. Opisano czasowe ograniczenia spinowej blokady Pauliego na skutek polaronowych efektów. Oszacowano dekoherencję ładunkowych stopni swobody w realnych nanostrukturach.

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) badano fale spinowe w półmagnetycznym półprzewodniku i wywołaną przez nie dekoherencję spinu w kropkach kwantowych na skutek ubierania spinu (elektronu/ekscytonu) w fale spinowe.

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) skoncentrowano się na zagadnieniach sterowania qubitami ładunkowymi w kropkach kwantowych (oscylacje Rabiego). Rozpatrzono termo-elektryczne efekty w sprzężonych kropkach kwantowych o możliwych praktycznych zastosowaniach.

Zadanie 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 przy zastosowaniu wielkoskalowych obliczeń numerycznych używanych do obliczeń struktury kwantowej w kropkach.

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) kontynuowano zakres badań w kierunku analizy możliwości realizacji teleportacji spinu w układzie kropek kwantowych oraz zbadano pompowanie optyczne polaryzacji spinowej .

**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) kontynuowano badania dynamiki układów składających się z cienkiego (kwantowego) przewodnika oddziaływującego z otoczeniem. Głównym wynikiem jest podanie dowodu istnienia operatora falowego oraz konstrukcja macierzy rozpraszania dla ujemnej części spektrum hamiltonianu.

W zadaniu V.2 „Stany koherentne dla mechaniki kwantowej na nietrywialnych rozmaitościach konfiguracyjnych” kierowanym przez dr. hab. K. Kowalskiego (UŁ) przedstawiono stany koherentne dla naładowanej cząstki w jednorodnym polu magnetycznym i znaleziono definiujące je równanie własne. Pokazano że przedstawione stany koherentne są bliższe punktom klasycznej przestrzeni fazowej niż stany Malkina i Man’ki i w tym sensie są od nich lepsze.

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) kontynuowana badania wpływu bliskości powierzchni heterostruktury na dekoherencję w kropkach kwantowych oraz stosowano metody analizy nadprzewodzących stanów w przypadku silnej anizotropii w celu rozwijania 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 analizę wieloelektronowych stanów w kropkach i układach kropek zadawanych polem elektrycznym.

W zadaniu V.5 „Opto-elektroniczne zastosowania kropek kwantowych – w kierunku nieliniowej optyki kropek kwantowych” kierowanym przez prof. A. Radosza (IF PWR) analizowano nieliniowe efekty optyczne w kropkach kwantowych w foto-indukowanych procesach przełączania.

W zadaniu V.6 „Koherencja spinowa a inżynieria funkcji falowej w nanostrukturach półprzewodnikowych” kierowanym przez prof. W. Zawadzkiego (IF PAN) kontynuowano analizę zagadnień spinowych w studniach kwantowych, takich jak sterowanie współczynnikiem giromagnetycznym, a także zbadano analog relatywistycznych efektów spinowych w półprzewodnikach.

Zadanie 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 – przedstawiono analizę stanów kwantowych w strukturach nanorurek węglowych i przeanalizowano topologiczne ich aspekty.

### ***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) rozwijano badania nieściśle stanów złożonych fermionów w układach 2D typu hallowskiego. Przedstawiono interesujący wynik analogii rotacyjnej do układu magnetycznego w reżimie Halla.

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 własności i struktury luminescencji z układów 2D w silnych polach magnetycznych, przy udziale topologicznych cząstek jakimi są złożone fermiony zmieszane ze zwykłymi nośnikami w półprzewodnikach.

Zadanie VI.3 „Analiza procesów dekoherencji kwantowej w układach z obecnością stanu nadprzewodzącego/nadciekłego” kierowane przez Dr hab. R. Gonczarka, IF PWR rozważano możliwość analizy układów nadprzewodzących w ograniczonej geometrii w kierunku zastosowań nanotechnologicznych. Przeprowadzone badania pozwoliły wykazać, że w nadprzewodnikach anizotropowych oprócz singletowego stanu D może być także realizowany stan trypletowy P (z zerowym rzutem całkowitego spinu). Uzyskana zuniifikowana postać równania na szczelinę energetyczną ujawnia różnicowany 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  $t_1/t_0$

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) rozwijano koncepcję nadania czasowi roli obserwabli w mechanice kwantowej. Pierwotnym celem tych badań było stworzenie w miarę konsekwentnej teorii dekoherencji kwantowej. Problem okazał się jednak znacznie szerszy. Spowodowało to konieczność analizy poszczególnych rodzajów procesów kwantowych i podanie ich schematycznych opisów. Zadanie to jest w trakcie realizacji i wymaga jeszcze znacznej ilości czasu.

W zadaniu VI.5 „Geometria kwantowego efektu Halla a charakter Cherny-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.

W zadaniu VI.6 „Chaos kwantowy, dekoherencja i dynamika splątania” kierowanym przez prof. dr. hab. K. Życzkowskiego (IF UJ) zaproponowano metodę pomiaru wierności charakteryzującej jakość implementacji danego schematu przetwarzania informacji kwantowej [1]. Wykazano, iż spadek wierności zależy od poziomu szumu kwantowego, który można mierzyć poprzez ślad superoperatora opisującego dynamikę nieunitarną. Zbadano problem estymacji skorelowanych stanów kwantowych.

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) wykazano, że entropia różniczkowa Shannona jest naturalną miarą (de)lokalizacji rozkładu prawdopodobieństwa, pozostającą w ścisłym związku z innym funkcjonałem entropowym zwanym informacją Fishera.. Rozszerzono w niej analizę funkcjonałów entropowych typu Gibbsa na gęstości prawdopodobieństwa stowarzyszone z dynamiką kwantową w obrazie Schrödingera. Wykazano, że dynamika entropii Gibbsa i funkcjonału Fishera kontrolują nietrywialne procesy wymiany energii w średniej.

W zadaniu VI.8 „Matematyczne modele dekoherencji” kierowanym przez dr. hab. R. Olkiewicza (UWr) podano konstrukcję klasy półgrup dynamicznych tzw. kwantowych półgrup Markowa dla skończonych i nieskończonych układów bozonowych. Idea konstrukcji polega na połączeniu deterministycznej dynamiki jednocząstkowej i nieskończenie podzielnych procesów stochastycznych. Kontynuowano badania łamania nierówności Bella przez stany mieszane. Uwzględniając jako parametry charakteryzujące stan splątanie i entropię liniową, zbadano numerycznie, dopuszczalne wartości stopnia splątania i entropii liniowej dla stanów, które łamią te nierówności.

W zadaniu VI.9 „Tarcie i dysypacja w układach kwantowych” kierowanym przez dr. hab. D. Chruścińskiego (UMK) badano fazę geometryczną w mechanice kwantowej w języku klasycznych zmiennych kanonicznych: położenia i pędu. Pokazano, że w przypadku ewolucji adiabatycznej geometryczna faza Berry'ego wyraża się formułą, która używa zmiennych niezależnych od cechowania fazy funkcji falowej. Taką wielkością jest np. funkcja Wignera. Pokazano, że w granicy klasycznej powyższa formuła prowadzi do klasycznego wzoru na kątą Hannay'a.

#### **4. Inne osiągnięcia**

Ważną i planowaną rolę w realizacji projektu zamawianego odgrywają zorganizowane kontakty między różnymi zespołami projektu. II Międzynarodowe Sympozjum Informatyki i Inżynierii Kwantowej (Wrocław 2005) oraz II Krajowa Konferencja Inżynierii Kwantowej (Wrocław 2005) odegrały ważną rolę unifikującą środowisko i zwiększającą udział studentów i doktorantów w realizacji badań.

.....  
(podpis kierownika projektu)

Warszawa, 31 marca 2005 r.