

平成 22 年 5 月 10 日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2006～2009
 課題番号：18540292
 研究課題名（和文） 量子ダイナミクスと階層性
 研究課題名（英文） Quantum dynamics and hierarchy
 研究代表者
 中里 弘道（NAKAZATO Hiromichi）
 早稲田大学・理工学術院・教授
 研究者番号：00180266

研究成果の概要(和文):本研究課題の全体構想は、力学系の理論的記述にみられる階層性を個々の具体的物理過程でのダイナミクスをより実際の状況に即した形で議論することを通して考察し、その中から異なる階層間を結びつける鍵となる概念を抽出しようというものである。なかでもデコヒーレンスや散逸といった環境系からの擾乱の下での微視的力学系のダイナミクスに関しては、量子論的コヒーレンスの維持あるいは回復に関する新たなアイデアを提案するとともにいくつかの物理的状況に適用し、新たな知見を得ることができた。また場の量子論と量子力学の関係の理解に関して新しい視点への手がかりを得た。

研究成果の概要(英文): The ultimate purpose of this project is to understand in depth the hierarchical structures seen in the theoretical descriptions of physical systems, by faithfully studying the dynamics in the actual physical processes, to extract key notions that are essential in connecting different layers in the hierarchy. In particular, on the dynamics of microscopic systems under the influence of the environmental system, we have proposed new ideas to keep or recover quantum coherence against environmental disturbances like decoherence or dissipation, applied them to several physical situations and obtained new knowledge on such systems. A hint to understand the relationship between the quantum field theory and the quantum mechanics has also been found.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	900,000	0	900,000
2007年度	800,000	240,000	1,040,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
総計	3,300,000	720,000	4,020,000

研究分野：数物系科学，量子基礎論，素粒子理論

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：量子ダイナミクス，マスター方程式，デコヒーレンス，階層性

1. 研究開始当初の背景

力学系の記述には、その性格を反映した適切

な理論体系が存在しているように思われる。我々の対象が巨視的な力学系から微視的力

学系へと移行していった歴史的経緯を反映して基本的理論体系も精密化していったが、その移行は必ずしも滑らかなものではなくある種の不連続性を持って前者を後者が塗り替えていった感がある。一方で、それぞれの理論体系の有効性は、限られた物理系においては依然として保持されており、力学系の階層性はそこで有効な理論体系に反映されているとみることが出来る。この研究の全体構想はこのような階層性を、異なる階層間を結ぶ鍵となる概念の抽出を通して理解しようというものである。

2. 研究の目的

本研究の全体構想は力学系の理論的記述にみられる階層性を、個々の具体的物理過程でのダイナミクスをより実際の状況に即した形で考察し、その中から異なる階層間を結びつける鍵となる概念を抽出することを通して理解しようというものである。なかでも外部環境系の影響下におかれた微視的量子系のダイナミクスに関しては、微視的力学系としての量子系と巨視的力学系としての外部環境系という二つの階層をつなぐ鍵となる概念の抽出、また量子コヒーレンスの維持、回復という点に関する新しいアイデアと知見の獲得を目指す。また、粒子の生成消滅を記述するのに有効な場の量子論と粒子数が確定した状況で有効な量子力学との関係の理解に関しても新たな視点を模索する。

3. 研究の方法

理論物理の研究では、問題としている物理過程を適切に記述する理論的(数学)モデルの構築とその解析が主要な研究プロセスである。まずは問題点の把握とその問題点を具体化するモデルの構築が必要となる。この際には、先行研究や従来研究成果の把握が不可欠であり、関連文献の探索ならびに関連研究者との議論が重要な役割を担う。モデルは本質を失わない限りできるだけ単純化することで解析が容易となるが、この際にも関連研究者との共同作業は、独善的に陥りがちな思考を防いだり単純な誤りをなくすだけでなく、新たなアイデアの創出につながるなど、大変有効な研究手段となる。

4. 研究成果

取り扱った力学系、具体的テーマに応じて以下のような成果を得た。

- (1) 我々が既に提案していた状態純化に関する新しい手法、すなわち、参照量子系に測定を繰り返すことを通して、参照系と結合した対象量子系の純化を行おうという手法、において、これらの系を取り巻く環境系からの影響を Lindblad 型マスター方程式の形で取り入れて評価し、こ

のような状況下での状態純化の有効性を吟味した。特に純粋度という指標で見た場合には、散逸状況下においても純粋状態に近い状態が抽出できる可能性のあることが分かったほか、抽出される状態そのものについてもその漸近的振る舞いを評価した。

- (2) 繰り返し測定による量子状態制御の枠組みを単一モードの空洞内に置かれた非相対論的粒子に適用し、粒子が基底状態にあることの確認を繰り返すことで空洞モードが squeezed 状態に導かれることを明らかにした。
- (3) 散逸的ダイナミクスを記述する代表的なマスター方程式に関して、初期相関という観点からその有効性を再吟味するとともに、Lindblad 型マスター方程式の演算子形式の解法を新たに提案した。
- (4) 適切な初期状態が準備された場合の 1 次元あるいは 2 次元 flux qubit 配列系における量子絡み合い状態の生成手順、ならびにその転送機構を検討し、効率的な転送手順を考案した。
- (5) 参照(qubit)系の対象(2qubit)系による 3 次元空間での散乱と測定操作によって、(適切な初期状態から出発して)対象系に量子絡み合い状態が生成できること、ならびにその機構を明らかにした。この際、繰り込み操作を施すことで散乱の高次の効果が全てきちんと取り込めることも明らかにした。
- (6) 参照 qubit を標的 qubit に散乱させた場合の散乱データ(透過係数、反射係数)から標的 qubit の初期状態を再構築(トモグラフィー)する枠組みを提案した。参照 qubit のスピン自由度(入射波のスピン偏極方向および散乱波のスピン測定方向)と入射波数を適切に組み合わせることでトモグラフィーに必要なデータが確かに得られることを確認した。また最適なトモグラフィーをもたらすパラメータの選択も明らかにした。
- (7) 縦型の積層量子ドット系における量子状態再構築法(トモグラフィー)を、端点の量子ドットの測定と各量子ドット(内電子スピン)に対する回転操作を組み合わせることで実現する方法を構築した。
- (8) トンネル現象を量子多体問題として記述する方法として用いられることの多い transfer Hamiltonian の枠組みと、通常の量子力学的散乱問題としての定式化との関係を明らかにする上で、境界条件の設定が重要な役割を果たしていることを明らかにした。また、両者の関係を明らかにする糸口を得た。

いずれも個々の力学系や課題に対する新しい知見を示したもので、内外の研究者の関心

も高く引用回数も少なくない。ただし、必ずしもすべての問題が解決したわけではないので、引き続き残された問題の解決に努める。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 20 件)

“Efficient generation of a maximally entangled state by repeated on- and off-resonant scattering of ancilla qubits,” K. Yuasa, D. Burgarth, V. Giovannetti and H. Nakazato, *New Journal of Physics* 11 (2009) 123027 (19 pages) 査読有

“Extraction of a squeezed state in a field mode via repeated measurements on an auxiliary quantum particle,” B. Bellomo, G. Compagno, H. Nakazato and K. Yuasa, *Physical Review A* 80 (2009) 052113 (7 pages) 査読有

“State tomography of a qubit through scattering of a probe qubit,” A. De Pasquale, K. Yuasa and H. Nakazato, *Physical Review A* 80 (2009) 052111 (6 pages) 査読有

“Thwarted dynamics by partial projective measurements,” B. Bellomo, G. Compagno, H. Nakazato and K. Yuasa, *Journal of Russian Laser Research* 30 (2009) 451-457 査読有

“Entanglement generation by qubit scattering in three dimensions,” Y. Hida, H. Nakazato, K. Yuasa and Y. Omar, *Physical Review A* 80 (2009) 012310 (18 pages) 査読有

“Analysis of critical short-time Langevin dynamics in two-dimensional ϕ^4 theory on the basis of a higher-order algorithm,” T. Otobe, H. Nakazato, K. Okano, K. Yuasa and N. Hattori, *International Journal of Modern Physics C* 20 (2009) 735-745 査読有

“Entanglement of electrons field-emitted from a superconductor,” K. Yuasa, P. Facchi, R. Fazio, H. Nakazato, I. Ohba, S. Pascazio and S. Tasaki, *Physical Review B* 79 (2009) 180503 (4 pages) 査読有

“State tomography of a chain of qubits embedded in a spin field-effect transistor via repeated spin-blockade

measurements on the edge qubit,” K. Yuasa, K. Okano, H. Nakazato, S. Kashiwada and K. Yoh, *Physical Review B* 79 (2009) 075318 (6 pages) 査読有

“A Measurement-Based Purification Scheme and Decoherence,” H. Nakazato, in *PHYSICS OF SELF-ORGANIZATION SYSTEMS* (Proc. of the 5th COE Symp., 2007) (2008) 88-105 査読有

“Lateral effects in fermion antibunching,” K. Yuasa, P. Facchi, H. Nakazato, I. Ohba, S. Pascazio and S. Tasaki, *Physical Review A* 77 (2008) 043623 (18 pages) 査読有

“Estimation of the repeatedly projected reduced density matrix under decoherence,” H. Nakazato, K. Yuasa, B. Militello and A. Messina, *Physical Review A* 77 (2008) 042114 (12 pages) 査読有

“Oscillations of the purity in the repeated-measurement-based generation of quantum states,” B. Militello, K. Yuasa, H. Nakazato and A. Messina, *Physical Review A* 77 (2008) 042109 (5 pages) 査読有

“Influence of dissipation on the extraction of quantum states via repeated measurements,” B. Militello, K. Yuasa, H. Nakazato and A. Messina, *Physical Review A* 76 (2007) 042110 (10 pages) 査読有

“Diffusion and transfer of entanglement in an array of inductively coupled flux qubits,” R. Migliore, K. Yuasa, M. Guccione, H. Nakazato and A. Messina, *Physical Review B* 76 (2007) 052501 (4 pages) 査読有

“On the assumption of initial factorization in the master equation for weakly coupled systems II: Solvable models,” K. Yuasa, S. Tasaki, P. Facchi, G. Kimura, H. Nakazato, I. Ohba and S. Pascazio, *Annals of Physics* 322 (2007) 657-676 査読有

“On the assumption of initial factorization in the master equation for weakly coupled systems I: General framework,” S. Tasaki, K. Yuasa, P. Facchi, G. Kimura, H. Nakazato, I. Ohba and S. Pascazio, *Annals of Physics* 322 (2007) 631-656 査読有

“Resonant scattering can enhance the degree of entanglement,” K. Yuasa and

H. Nakazato, Journal of Physics A 40 (2007) 297-308 査読有

“Solution of the Lindblad equation in the Kraus representation,” H. Nakazato, Y. Hida, K. Yuasa, B. Militello, A. Napoli and A. Messina, Physical Review A 74 (2006) 062113 (8 pages) 査読有

“Generation of multipartite entangled states in Josephson architectures,” R. Migliore, K. Yuasa, H. Nakazato and A. Messina, Physical Review B 74 (2006) 104503 (9 pages) 査読有

“Control of Decoherence via Quantum Zeno Subspaces,” P. Facchi, H. Nakazato, S. Pascazio and S. Tasaki, International Journal of Modern Physics B20 (2006)1408-1420 査読有

Messina Antonino

パレルモ大学(イタリア)・物理学科・教授
Compagno Giuseppe

パレルモ大学(イタリア)・物理学科・教授
Militello Benedetto

パレルモ大学(イタリア)・物理学科・講師

〔学会発表〕(計4件)

吉本誠也,独立 2qubit 系の dephasing ダイナミクス,日本物理学会第 65 回年次大会,2010/03/23,岡山大学

肥田雄一郎,三次元散乱問題として捉えたエンタングルメント生成,日本物理学会第 62 回年次大会,2007/09/23,北海道大学

肥田雄一郎,マスター方程式を演算子形式で解く方法,日本物理学会 2007 年春季大会,2007/03/18,鹿児島大学

肥田雄一郎,媒介系を用いたエンタングルメント生成におけるデコヒーレンスの影響,日本物理学会 2006 年秋季大会,2006/09/25,千葉大学

〔その他〕

ホームページ等

WEB ページ

<http://www.hep.phys.waseda.ac.jp/index-j.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

中里 弘道 (NAKAZATO HIROMICHI)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号:00180266

(4)研究協力者

湯浅 一哉 (YUASA KAZUYA)

早稲田大学・高等研究所・准教授

研究者番号:90339721

Pascazio Saverio

パリ大学(イタリア)・物理学科・准教授

Facchi Paolo

パリ大学(イタリア)・数学科・准教授