

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 25 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2014

課題番号：22540292

研究課題名(和文)量子環境物理学

研究課題名(英文)Quantum environmental physics

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、外界(環境系)との相互作用下にある注目量子系の物理を、これまで不問に付されてきた感のある環境系のダイナミクスや量子系のコヒーレンスやエンタングルメントといった量子論的特徴の振る舞いを通して解析し、いわゆる開いた量子系の理解を格段に進めることを目指した。特に、環境系の特徴付けと開いた量子系の動力学の解明を進めるとともに、量子情報分野や場の量子論といった関連分野への応用を様々な観点から遂行した。なかでも量子論に特徴的な測定操作がダイナミクスに及ぼす影響に関しては、従来考えられていた以上に決定的役割を果たし得ることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：In this research program, the dynamics of the so-called open quantum system, which is interacting with its environmental system and thus is not an isolated system, has been investigated, paying special attention to that of the latter, in views, for example, of quantum coherence and entanglement, aiming at advancing greatly our understanding of the former. In addition to the characterization of the environmental systems and clarification of the dynamics of open quantum systems, a lot of results have also been obtained in the related fields like quantum information and quantum field theories. In particular, it has been shown that the action of measurement can have far more profound and crucial effects on the dynamics in quantum world, than so far conceived.

研究分野：量子力学基礎論

キーワード：量子基礎論 量子ダイナミクス 量子コヒーレンス 量子開放系

1. 研究開始当初の背景

微視的世界の力学として信じられている量子論は閉じた孤立系に対する理論的枠組を Schrodinger 方程式の形で提供している。一方、外界（環境系）とは切り離すことのできない現実世界の量子系は開いた力学系となっており、量子論の枠組みで扱う際には、通常、環境系までを含めた全体系を孤立系として Schrodinger 方程式を設定し、そこから環境系の自由度を消去することによって注目量子系の方程式を導出している。この結果、注目量子系の時間発展は非ユニタリーとなり、散逸や位相緩和を伴ういわゆるマスター方程式で記述されることになる。環境系は多くの場合、多（無限）自由度の量子系によってモデル化されてきたが、従来は専ら注目量子系に対するマスター方程式導出のための数学的手段として利用されるのみであり、環境系として機能すべき要件が果たして具体的モデルにおいて満たされているのかどうかについては十分に考慮されてきたとは言い難い。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、外界（環境系）との相互作用下にある注目量子系の物理を、これまで不問に付されてきた感のある環境系のダイナミクスや量子系のコヒーレンスやエンタングルメントといった量子論的特徴の振る舞いを通して解析し、いわゆる開いた量子系の理解を格段に進めることにある。部分系である量子系にのみ注目してその振る舞いを解析することは従来から行われてきたが、理論全体の整合性の確認や全体系の理解には程遠く、決して満足できる状況にはない。本研究課題では、このような状況を打破することを目指し、これまで以上に環境系の物理に注意を払い、その特徴付けとその結果得られる環境系並びに量子系の動力学を解明することを目指す。さらにこのことを通して、量子論の考え方を実装しようという量子情報分野や、実験技術の進展に伴って改めて概念の真剣な吟味が求められている場の量子論への展開を図る。

3. 研究の方法

理論物理学の研究においては、適切な文献情報にアクセスできることと、同様な問題意識を持った研究者との意見交換、議論を重ねることが決定的重要性を持つ。現状の研究環境において前者に関しては特に問題となる点はなく、必要な情報はその都度入手可能である。一方後者に関しては、この研究課題に関連の深い仕事をしている共同研究者が海外の研究者だったこともあり、適宜相互にお互いの研究機関を訪問することで議論を深めていった。本研究課題の研究成果の多くは彼らとの共同研究の結果生まれたものである。

4. 研究成果

(1) 環境系の特徴付けとマスター方程式の再吟味

外界環境系下におかれた注目量子系を量子論の枠組みで扱う場合には、マスター方程式を用いて注目量子系の縮約されたダイナミクスを議論することが多い。多くの場合、環境系は無数の調和振動子の集合系としてモデル化され、量子系との相互作用スペクトルにもっともらしい関数形を仮定してマスター方程式は導出されるが、そこで用いられた条件や仮定の有効性は注目量子系の振る舞いによってのみ確認あるいは正当化されてきた。本研究課題では、量子系全体としての理論的整合性や、環境系としてふさわしいと思われる振る舞いが実際に実現されているのかどうかという視点から環境系の特徴付けと全体系の動力学の解明を目指した。

具体的には、非自明で最も簡単な模型と思わせるスピン(離散量子系) - ボソン(環境系)相互作用系を取り上げその全体系のダイナミクスを詳細に検討した。特に相互作用が準位間遷移を含まないような位相緩和型相互作用の場合には全体系に対する厳密解を求めることが可能であり、この結果を用いて注目量子系(スピン系)のマスター方程式を厳密な形で求めただけでなく、環境系(ボソン系)のダイナミクスも厳密に導出した。その結果は従来から知られているマスター方程式、特に非マルコフ過程に対する厳密解と称されている“time-convolutionless”マスター方程式と比較され、両者が良く整合していることが明らかになった。

次に相互作用が準位間の遷移を伴うようなスピン交換相互作用型の場合について考察した。この場合は、いわゆる回転波近似を仮定したとしても、全体系のダイナミクスを厳密に求めることは極めて困難である。ここでは全体系の力学を支配しているハミルトニアンの特長を求めるという方向からダイナミクスの解明に取り組んでみた。回転波近似を採用した場合は励起数が保存するため、エネルギー最低状態(励起数0, 基底状態)は直ちに求まるが、一般の励起状態波動関数を具体的に求めるのは困難である。本研究課題ではまず第一励起状態に関してその具体形を明らかにし、その固有状態関数が励起数1の部分空間で完全系を張っていることを具体的に確認した。また完全性を証明する過程で系のハミルトニアンの持っている解析性が極めて重要な役割を果たしていることが明らかになった。同様な取り組みは第二励起状態以上の励起状態に対しても適用可能のほずであり、引き続き解析を進めている。

(2) 場の量子論と量子力学

場の量子論は粒子の生成消滅をともなう物理過程の記述に適した理論的枠組みであるが、逆にこの枠組みにおいて安定な粒子状態を確定することは自明なことではなく、特別な場合を除けば1粒子状態は相互作用がなく

なるとされる無限の過去と未来でのみ、漸近状態という形で導入される。したがって、物理量として実験と対比できるのは、通常は無限の過去と未来の間の遷移確率のみである。一方、粒子数が確定した力学系を扱うには(粒子数確定の)Schrodinger 方程式を立てて通常の量子力学を展開すれば十分であると考えられている。素朴には、場の量子論において粒子数一定の部分空間のみを考えれば、粒子の量子力学が再現されるであろうと期待される。本研究課題では、場の量子論と粒子の量子力学の関係を、特に散乱現象という観点から解明することを試みた。散乱現象に注目したのは、上で記したように、場の理論で意味のある物理量として考えられる唯一の量が遷移確率だからである。

まず最も簡単な散乱問題として非相対論的粒子による1次元ポテンシャル問題を取り上げ、これが場の量子論の枠組みでどう定式化され得るかを考察した。入射状態および散乱状態の粒子描像を導入するためには対応する生成演算子を導入する必要があるが、場の演算子を散乱状態の固有関数で展開したときの展開係数としてこれらの演算子を導入するのが自然である。このもとで散乱行列(S行列)要素を計算すると、確かに正しい反射、透過係数が場の理論の枠組を通しても得られることを確認した。この解析の過程では、散乱状態固有関数を具体的に求め、その完全性を確認する必要がある。また完全性を陽に示すには、散乱状態波動関数の解析性をきちんと把握する必要があることが明らかになった。この事情は上記(1)での取り扱いと共通するものである。

続いて、相対論的粒子の散乱問題を取り上げた。この場合にはエネルギーと運動量の分散関係が相対論的関係になるばかりでなく、特にフェルミ粒子に対しては反粒子の存在とその解釈が決定的に重要な役割を果たす。その典型例が、電子に対する相対論的運動方程式であるDirac方程式によるポテンシャル散乱問題の取り扱いである。既に場の演算子を展開すべき散乱状態波動関数は具体的に求まっており、その完全性も確認済みである。そこで今後は、この場合の問題としてよく知られたKleinパラドックスを、場の量子論の枠組を通して再吟味し、従来とは異なる新しい角度からの理解を試みる予定である。

(3) その他、関連分野の研究

本研究課題では、量子系のダイナミクスや量子状態の特徴付けといったキーワードのもと、様々な成果が関連研究分野でも得られている。その多くは既に論文として公表済みである。このような成果のいくつかを以下に紹介する。

最も簡単な量子系の一つである量子2準位系であっても、ハミルトニアンが時間に陽に依存する場合には、近似に依らず厳密解を求めることは困難であり、厳密解が知られているのは極めて限定された

場合のみであった。しかし従来とは異なる方向からこの問題に取り組むことで、これまで知られていなかった厳密解の新しい構成法を提唱し、これに基づいて新しい厳密解を発見した。

量子系に対する測定操作は、系のダイナミクスに決定的な影響をもたらす、例えば量子ゼノン効果として知られるように、系の時間発展の抑制という古典論では到底考えられない結論が導かれる。このことは単に理論的予言に留まらず、実験的にも検証されており、量子論における測定操作の占める重要性を明示しているものであるが、実は測定操作は量子系の制御という観点からすると、これまで考えられている以上に重要な役割を果たしていることが明らかになった。測定操作は量子系に対する射影操作として単純化して扱うことができるが、素朴な期待とは反対に、射影された部分空間のダイナミクスはあらゆるユニタリー操作が可能にほどに複雑化され得る、すなわち単純な量子系に測定操作を施すことで量子計算を可能とする程度まで系を複雑化できることが明らかになった。実はこの逆を示すことも可能であり、非可換演算子で特徴づけられる量子系は、より次元の大きな可換量子系からの射影部分空間として常に表現できることが判明した。

量子系を特徴づける物理量は、一般には系を記述する密度行列の固有値の非線形な関数として表わされるため、その重要性にもかかわらず、量子状態トモグラフィの手法に依らず直接実験から求める手法は自明でない。例えば量子コヒーレンスの有無の指標の一つである純粋度はまさにこのような物理量であり、固有値の2次関数として表わされている。純粋度の直接測定には、従来、制御スワップゲートを利用した回路が提唱されていたが、残念ながらその実験的取り込みは自明でない。今回、このような制御ゲートを使わず、単純なユニタリーゲートの繰り返しで純粋度を求める方法を発見した。また同じ考え方に基づいて、純粋度を補助量子系による散乱問題から求める枠組みを提唱し、その有効性を吟味した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計15件)

- P. Facchi, H. Nakazato, S. Pascazio, F.V. Pepe, G.A. Sekh and K. Yuasa, "Phase randomization and typicality in the interference of two condensates," *International Journal of Quantum Information*, **12** (2014) 1560019 (15 pages), 査読有, DOI:10.1142/S0219749915600199
- A. Messina and H. Nakazato,

“Analytically solvable Hamiltonians for quantum two-level systems and their dynamics,” *Journal of Physics A: Math. Theor.*, **47** (2014) 445302 (10 pages), 査読有, DOI: 10.1088/1751-8113/47/44/445302
D.K. Burgarth, P. Facchi, V. Giovannetti, H. Nakazato, S. Pascazio and K. Yuasa, “Exponential Rise of Dynamical Complexity in Quantum Computing through Projections,” *Nature Communications*, **5** (2014) 5173-1,6, 査読有, DOI: 10.1038/ncomms6173
P. Facchi, H. Nakazato, S. Pascazio, F.V. Pepe and K. Yuasa, “Interference in a two-mode Bose system as a typical phenomenon,” *Physical Review A*, **89** (2014) 063625 (9 pages), 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevA.89.063625
T. Tanaka and H. Nakazato, “Measurement of purity, the simplest nonlinear functional of the density matrix,” *Open Systems & Information Dynamics*, **21** (2014) 1440009 (27 pages), 査読有, DOI: 10.1142/S1230161214400095
T. Tanaka, Y. Ota, M. Kanazawa, G. Kimura, H. Nakazato and F. Nori, “Determining eigenvalues of a density matrix with minimal information in a single experimental setting,” *Physical Review A*, **89** (2014) 012117 (4 pages), 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevA.89.012117
D. Burgarth, P. Facchi, V. Giovannetti, H. Nakazato, S. Pascazio and K. Yuasa, “Non-Abelian phases from quantum Zeno dynamics,” *Physical Review A*, **88** (2013) 042107 (5 pages), 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevA.88.042107
M. Unoki, H. Nakazato, K. Yuasa and K. Yoh, “A controlled-NOT gate in a chain of qubits embedded in a spin field-effect transistor and its process tomography,” *The European Physical Journal B*, **86** (2013) 393 (7 pages), 査読有, DOI: 10.1140/epjb/e2013-40339-1
T. Tanaka, G. Kimura and H. Nakazato, “Possibility of a minimal purity-measurement scheme critically depends on the parity of dimension of the quantum system,” *Physical Review A*, **87** (2013) 012303 (8 pages), 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevA.87.012303
H. Nakazato, T. Tanaka, K. Yuasa, G. Florio and S. Pascazio, “Measurement scheme for purity based on two two-body gates,” *Physical Review A*, **85** (2012)

042316 (7 pages), 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevA.85.042316
B. Leggio, A. Napoli, H. Nakazato and A. Messina, “Heat capacity and entanglement measure in a simple two-qubit model,” *J. of Russian Laser Research*, **32** (2011) 362-371, 査読有, <http://www.springer.com/physics/optics+%26+lasers/journal/10946>
R. Migliore, M. Scala, A. Napoli, K. Yuasa, H. Nakazato and A. Messina, “Dissipative effects on a scheme of generation of a W state in an array of coupled Josephson junctions,” *J. Phys. B*, **44** (2011) 075503 (9 pages), 査読有, DOI: 10.1088/0953-4075/44/7/075503
B. Bellomo, G. Compagno, H. Nakazato and K. Yuasa, “Distillation by repeated measurements: Continuous spectrum case,” *Physical Review A*, **82** (2010) 060101(R) (4 pages), 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevA.82.060101
D. Honda, H. Nakazato and M. Yoshida, “Spectral resolution of the Liouvillian of the Lindblad master equation for a harmonic oscillator,” *Journal of Mathematical Physics*, **51** (2010) 072107 (17 pages), 査読有, DOI: 10.1063/1.3442363
Y. Omar, Y. Hida, H. Nakazato and K. Yuasa, “Entanglement generation by a three-dimensional qubit scattering: Concurrence vs. path (in)distinguishability,” *Quantum Communication and Quantum Networking*, **36** (2010) 17-25, 査読有, DOI: 10.1007/978-3-642-11731-2

〔その他〕

ホームページ等

<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