

研究種目： 若手研究 (B)
研究期間： 2008 ~ 2009
課題番号： 20740219
研究課題名 (和文)
量子確率モデルによる環境制御とディコヒーレンス抑制の理論
研究課題名 (英文)
Study of decoherence suppression in quantum system under fluctuating environment
研究代表者
北島 佐知子 (KITAJIMA SACHIKO)
お茶の水女子大学・大学院人間文化創成科学研究科・准教授
研究者番号： 70334571

研究成果の概要 (和文)：

非平衡統計力学、および量子情報分野において重要な課題の一つである量子コヒーレンスの消失過程および消失抑制法の研究を行った。すなわち、注目するスピン系 (キュービット) を囲む環境系を確率的揺動磁場と考え、2 状態遷移マルコフ過程およびガウス過程を用いた量子確率モデルを設定した。注目するスピン系の密度行列および特性関数の時間発展を非平衡統計力学の手法により厳密に解き、ダイナミカルな振舞いを詳細に検討した。

研究成果の概要 (英文)：

We study decoherence and its suppression processes for a relevant spin (qubit) system surrounded by a stochastic environment, which is represented by a two-state jump Markov process and a Gauss-Markov process. Using the methods of non-equilibrium statistical physics, we obtain exactly the reduced density matrices and characteristic functions for a relevant system.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	600,000	180,000	780,000
2009 年度	200,000	60,000	260,000
総計	800,000	240,000	1,040,000

研究分野：数物系科学

分科：物理学

細目：数理物理・物性基礎 (理論)

1. 研究開始当初の背景：

量子系の基礎的問題の一つとして、コヒーレンス消失 (ディコヒーレンス) の問題を挙げることができる。ここでいうコヒーレンスとは、量子系における単純な重ね合わせ状態のような“よい状態”が干渉性をもつことを

意味する。しかし通常、量子系は環境にとり囲まれており、両者間の相互作用によって時間とともに量子系の状態は変化する。このとき、注目している量子系が初期に有していたエネルギーや“よい状態”の情報が失われて

いく。すなわち、時間発展に伴って系はコヒーレンスを失い、ディコヒーレンスとよばれる。ディコヒーレンス過程は、非平衡量子統計力学における重要課題の一つである。

一方で、量子系を用いた情報処理や情報通信に関する試みが近年、理論と実験の双方から進められている。この分野は、量子力学と情報理論の融合した新しい分野として量子情報とよばれている。量子情報では、量子系の状態と古典的な情報とを対応させることによって、情報通信や量子計算などの処理を行うのであるが、量子系のディコヒーレンスは、誤った情報伝送や間違った計算結果を生み出す原因となりうる。よって、ディコヒーレンス過程の研究の重要性が了解されよう。事実、近年、この問題に関する研究が活発化している。

さらに、問題はここにとどまらず、ディコヒーレンスによる影響をいかにして取り除くことができるか、または避けることができるかという課題に発展している。これらのうち、ディコヒーレンスを避けて“よい状態”を保つための方法に関する研究は、注目すべき課題の一つである。ディコヒーレンス制御に関する研究は、新規のアイデアの提案、理論的枠組みの構築、そして実験による詳細な検証という事柄が絡み合いながら進展している。

以上から分かるように、旧来、重要視されてきた問題が、新しい背景が加わることにより、さらなる発展を期待されている。この間、我々は量子情報分野で扱う量子系における諸問題を、非平衡統計力学の視点から取り上げて理論研究を進めている。特に、厳密な扱いを可能とする理論模型により、注目する量子系と環境との相互作用を記述し、時間発展による状態変化、ディコヒーレンスの性質を調べることができた。さらに引き続き、ディ

コヒーレンス制御のメカニズムとしてパルス印加の方法を取り入れ、その効果を理論的に厳密に論じた。我々の理論の基本的アイデアに対する実験検証が行われた結果、関連する諸問題を含め、さらに系統的に調べることが重要と考えるに至った。

2. 研究の目的：

上述のように、量子系のディコヒーレンスの問題からその制御に関する研究へと進展しているなかで、近年、クロロフォルムを用いた核磁気共鳴による実験が行われた。そこでは、

(1) 環境系としての揺動磁場を人工的に発生させる手法がとられている。すなわち、注目する量子スピン系の周囲で、揺動磁場として2つの実現値をランダムに発生させるように外部からのパルス印加によって環境系を構築する。

(2) この環境の下、注目する量子スピン系の状態変化、およびディコヒーレンス過程を実験的に実現させ、そのダイナミクスを追っている。

(3) さらに、ディコヒーレンスの抑制、すなわち、“よい状態”の保持を行う過程の検証を行っている。このとき、我々の理論的研究で取り上げたパルス印加によるディコヒーレンス制御法が取り入れられ、(1)、(2)を踏まえて、ディコヒーレンスの抑制が可能である様子が詳細に調べられている。

我々は、この実験にターゲットをおいた理論構築を行い、環境系に取り囲まれた量子スピン系のディコヒーレンス過程と、パルス印加の方法によるその抑制過程に関するメカニズムの詳細を論じる。具体的には、環境系を特徴づける確率模型として2状態マルコフ遷移模型を取り上げる。この模型は2つの状態間のみを遷移しうることが特徴であり、実験で用いられた2つの実現値をとる揺動磁場に対する理論枠組みを構築するのに適したものである。また、この過程と等価な量子模型を構築できることは、以前、我々が既に示している。

よって、本研究課題では、

(1) 上記の環境に対して、注目する大きさ $1/2$ の量子スピン系（量子情報分野におけるキュービット系）のディコヒーレンス過程を詳細に調べる。

(2) (1)を踏まえて、その抑制を行うために動的分離法（ダイナミカル・デカップリング）を取り上げて理論的な検証を行う。

この方法は、注目する量子スピン系に適切なタイミングでパルスを複数回印加することにより、ディコヒーレンスを抑制するとい

うものである。この方法によってディコヒーレンスの様子がいかに変化するかということに注目し、詳細な検討を行う。

3. 研究の方法：

上記の目的を達成するために、2 状態遷移マルコフ模型をもとにディコヒーレンス過程、およびその抑制過程を記述する理論模型を構築する。

理論の大枠としては、非平衡量子統計力学の方法を用い、注目する量子系の時間変化を記述する密度行列を定式化し、ディコヒーレンス過程の目安となる量を求めることによって動的過程の詳細を調べる。すなわち、方法の手順としては、

(1) 環境と注目する量子スピン系、および両者間の相互作用を表わすハミルトニアンを用い、密度行列の発展方程式を定め、時間発展を追うことにより、注目する量子スピンの状態変化を追う。環境系に起因するディコヒーレンス過程は、2 状態遷移マルコフ模型により引き起こされる。具体的には、密度行列の解からディコヒーレンスの目安となる特性関数を求めればよい。

(2) (1) においてディコヒーレンス過程の詳細を調べたのち、その抑制効果を与える方法として、動的分離法の実用形であるパルス印加の効果を加えた密度行列の発展方程式を得て、これを厳密に解く。得られた密度行列から (1) 同様に特性関数を求め、(1) のディコヒーレンス過程との比較、検討を行う。

(3) (1)、(2) の結果をもとに、数値計算を行い、定量的にディコヒーレンスの抑制過程を表わし、その性質を調べる。

(4) 上記の結果を踏まえて、印加するパルスの強さや、環境を特徴づける模型の量子論的扱いを進める。

4. 研究成果：

非平衡量子統計力学の方法論により、環境を特徴づける 2 状態遷移マルコフ模型を取り上げた。特に、本研究では 2 状態遷移マルコフ過程の特徴として、

(1) 取り得る 2 状態が対称的な場合はもとより、非対称的な場合も扱い得る模型を採用したこと、

また、

(2) 定常過程のみではなく、非定常過程をも対象としたこと、
が挙げられる。このことは本課題の研究として大きな特徴である。

まず、(1)、(2) の要素を含めて、全系のハミルトニアンによる密度行列の時間発展方程式を基に、注目する量子スピン系について密度行列の解析解を求めた。

そして、パルス印加の効果を加えたハミル

トニアンに対し、同様に密度行列の時間発展を解くことを試みた。パルス印加の効果を加えたことによって問題は極めて複雑になる。一般に、大きさ $1/2$ の量子スピン系、および二準位系と呼ばれる物理系のディコヒーレンス過程は、密度行列の非対角要素がその特徴を担っている。よって、まずは密度行列の非対角要素について、数値的な解を求めるという方法が考えられた。しかし、非平衡系の特徴を用いて、適切な方法を用いることによりこの問題は進展し、適切な強さを有するパルスの下で、密度行列の時間発展を定める解析解を厳密に求めることに成功した。

厳密な解を得たことの最大の利点は、系を特徴づけるパラメータに対して、近似理論とは異なり、弱い相互作用、といった制限がない、ということである。すなわち、環境を特徴づける揺動磁場の強さや、その変化の速さをはじめ、パルスを印加する間隔などを任意に設定することが可能である。このことにより、実験と理論との対応はより詳細に行うことが可能となり、実験の基礎的理論を構築できたことは、特筆すべき点である。

さらに、ディコヒーレンス過程とその抑制過程を具体的に検討するために、注目する量子スピン系の密度行列の解析解から特性関数を求め、時間発展に対する特性関数の振る舞いを調べるために数値計算を行った。

パルスの印加がない場合は、特性関数は時間の経過とともに減少し、典型的なディコヒーレンス過程を示している。これによって、2 状態遷移マルコフ模型の有する対称-非対称の性質と、定常-非定常の性質をとらえることができた。大きな特徴の一つは、非対称性、非定常性を有する場合には、パラメータに依存してディコヒーレンス過程が、通常の場合とは極めて異なる場合があることが分かった。すなわち、パルスを印加することなく、ある程度のディコヒーレンスを抑えることはパラメータの設定によって可能ということになる。

次いで、ディコヒーレンス抑制のためのパルスを一定間隔で印加する場合について、数値計算を行った。この場合は、パルス印加が行われた瞬間に、特性関数は増加方向に切り替わり、しかし相互作用の効果ですぐに再び減少するという過程を繰り返し、時間進展とともに山脈の連なりのような振る舞いを示す。この振る舞いはパルス印加がない場合に比べてコヒーレンスを保持する働きを示している。

これらの理論結果から、対称-非対称の性質、定常-非定常の性質を含め、系を特徴づけるパラメータを適切に設定することができれば、実験的にも、ディコヒーレンスを抑制するメカニズムの詳細を、より鮮明に検証することができるであろう。

また、2 状態遷移マルコフ模型とは対極的な模型の一つである、ガウスマルコフ模型を環境としたディコヒーレンスの検討も行った。この場合にも、フォッカープランク方程式を基に、定常-非定常の性質を含め、特性関数の解析解を厳密に求めることができる。

ガウスマルコフ過程においても、非定常性を表わすパラメータに依存して特性関数の時間的振る舞いに変化することが分かった。

また、パルス印加を行った場合には、非定常性のパラメータの設定によっては、ディコヒーレンスの抑制がきわめて困難な様子も見られた。すなわち、ガウスマルコフ模型に対応する物理系を考えた場合、このパラメータ設定は非常に重要である。

以上の具体的数値計算の結果より、2 つの模型について共通点としては、

(1) パルスの印加間隔が狭いと、ディコヒーレンス抑制の効果はより大きくなるということ、

(2) 非定常性がディコヒーレンスの様子に大きな影響を与えるということ、そして、ディコヒーレンスの抑制効果に対しても非定常性は影響力が大きいということ、が挙げられる。(1) の性質はこれまでの研究でもみられた性質であるが、とくに (2) の性質と、2 状態遷移マルコフ過程の場合に有する対称-非対称性の性質については、我々が初めて得た特有な結果であるといえる。ただしこれらは、得られている解析解に制限を加え、印加するパルスの間隔を一定として、数値計算を行って得られたものである。

本研究で得られている解析解は、印加するパルスの間隔を任意に設定可能である。そして、ディコヒーレンスの抑制メカニズムとして取り上げた動的分離 (ダイナミカル・デカップリング) の方法では、パルス間隔に対するさまざまな選び方が提案されている。よって本研究の結果は、多様なダイナミカル・デカップリング法に適用可能である。

そして、印加するパルスの間隔は、実験において調整可能なパラメータであるので、ダイナミカル・デカップリングの具体的な検証を行う際には、本研究の結果が実験との比較、検討を行う上で極めて有用であるということができる。

さらに、本課題で得られた上記の結果は、適切な強さのパルスを用いることによって厳密に与えられた。この条件は、実験的にももっとも効率がよいと考えられる。一方、パルスの強さが適切な範囲内では、ディコヒーレンスの抑制効果に有効的ということもわかっている。

2 状態遷移マルコフ過程については、これと等価な量子論的模型を与えることができ

る。よって、この模型を基にして、量子論的マスター方程式を出発点としたパルス効果によるディコヒーレンス抑制の問題を扱うことができる。すなわち、密度行列の時間発展を超演算子によって表現するという方法を用いて、注目する量子スピン系の状態変化、ディコヒーレンス過程を調べることができる。パルスを印加した場合については、密度行列の時間発展を、超演算子を適切に繰り返し演算をすることによって与えることができる。

以上、本研究を遂行した結果、新たな課題も得られた。したがって、パルス印加によるディコヒーレンス抑制効果の検証を進めることにより、本研究で扱った物理系に対する動的分離法を用いたディコヒーレンスの抑制について、今後、より一層の理論的な知見を得ることができると考えており、さらなる研究の進展を視野に入れている。

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 3 件)

① S. Kitajima, M. Ban and F. Shibata, Theory of decoherence control in a fluctuating environment, J. Phys. B, accepted for publication. (査読あり)

関連論文

② M. Ban, S. Kitajima and F. Shibata, Reduced dynamics and the master equation of open quantum systems,

Phys. Lett. A, 374 (2010) 2334. (査読あり)

③ M. Ban, S. Kitajima and F. Shibata, Dynamical suppression of dephasing for Markov processes,

Phys. Lett. A, 373 (2009) 3614. (査読あり)

[学会発表] (計 1 件)

① 宇野政子, 北島佐知子, 番雅司, 柴田文明: 古典雑音による量子情報のディコヒーレンスとその制御、日本物理学会第 63 回年次大会、近畿大学、(2008 年 3 月)

[図書] (計 1 件)

① 柴田文明、有光敏彦、番雅司、北島佐知子: 東京大学出版会、「量子と非平衡系の物理」2009 年 11 月 (共著)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北島 佐知子 (KITAJIMA SACHIKO)
お茶の水女子大学・大学院人間文化創成科学
研究科・准教授
研究者番号： 70334571

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

柴田 文明 (SHIBATA FUMIAKI)
お茶の水女子大学・名誉教授
研究者番号：20011702

番 雅司 (BAN MASASHI)
お茶の水女子大学・大学院人間文化創成科学
研究科・教授
研究者番号：50416955