

平成21年5月26日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：平成18年度～平成20年度

課題番号：18340113

研究課題名（和文） 量子統計力学的手法を用いたナノシステムの分析

研究課題名（英文） Analyses of nano-system with quantum statistical mechanical methods

研究代表者

内山 智香子 (UCHIYAMA CHIKAKO)

山梨大学・大学院医学工学総合研究部・准教授

研究者番号：30221807

研究成果の概要：

半導体構造中での電子スピンの緩和現象を記述するための新たな量子統計力学的手法を構築した。これとともに、環境世界の影響下にあるスピンの安定性を制御するためのパルス制御法についての研究を行いその有効性を調べた。さらに、ナノシステムを分析する上で重要な役割を果たしている複素アドミッタンスについて新たな表式を得た。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2007年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2008年度	1,800,000	540,000	2,340,000
年度			
年度			
総計	4,900,000	1,470,000	6,370,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・数理物理 物性基礎

キーワード：ナノデバイス, 量子統計力学, 量子コンピュータ

## 1. 研究開始当初の背景

スピントロニクスデバイスや量子コンピュータの実現を目指した実験的研究が近年急速に進んでいる。前者は電子スピンの依存する電気伝導現象を用いたナノデバイスであり、すでに大容量記憶媒体が作成され、現在はスピントランジスタなどの素子開発が行われている。また後者では量子ドットなどの半導体のナノ構造中に、情報をエンコード

した電子スピンを注入し、その量子状態を操作することによる情報処理の可能性に注目が集まっている。これらのスキームで正確な情報伝達・処理を実現するために、半導体構造中で電子スピンの情報をいかに保持するか、ということが中心的な課題となっている。本研究では、半導体構造中での電子スピンの緩和現象の解明を通して、ナノシステムの安定性を論じるとともに、新たな量子統計力学

的手法の開発を目指したものである。

## 2. 研究の目的

①核スピンの構成される熱浴による緩和現象に対する影響の解明

半導体物質の核スピンと電子スピンの超微細相互作用による緩和に焦点を絞り、従来のスピン・ボソン系では考慮できない、環境系の構成要素同士のエンタングルメントが緩和現象にどのような影響を及ぼすのかを明らかにする。

②半導体中の電子スピンの緩和現象を記述する量子統計力学的手法の開発

項目1で得た知見をもとに、従来のマスター方程式による緩和現象の記述法の限界を克服する手法を開発する。

## 3. 研究の方法

①の目的に対しては、まず、有限個の核スピンと電子スピンとが超微細相互作用するモデルを考える。この相互作用下で、電子スピンのみの縮約した密度演算子の持つ性質に注目して解析的に調べる。もし電子スピンの純粋状態であれば、密度演算子の状態はブロッホ球面上の点の集合であらわされる。しかし、環境系とのエンタングルにより、電子スピンの縮約した密度演算子は混合状態となる。この変化は、電子スピンの状態がブロッホ球内部の点の集合であらわされるようになることに反映される。

本研究では、注目する電子スピンのみの縮約した密度演算子の正值性を調べることで、超微細相互作用する核スピンと電子スピンのエンタングルしているのか、また核スピン同士のエンタングルメントは電子スピンにどのような影響を与えるのか、について positivity を満たす点の集合の領域がどのような時間変化するのか

②上記項目の研究を通して、半導体中の電

子スピンの状態制御の可能性を探る。その際には、超微細相互作用下にある電子スピンの対しても、パルス制御が有効であるかを調べる。

## 4. 研究成果

①の項目に対しては主に平成18年度に取り組んだ。具体的には、半導体構造中での電子スピンの緩和現象に取り組んだ。その際に、スピンの構成された熱浴と相互作用する電子スピンの時間発展を求めるための方法論を構築した。この方法論は、従来の射影演算子法を基礎にしているが、最終表式はマスター方程式のような微分方程式ではなく、任意の時間差の間の変化を行列形式で求めることができるものである。これにより、Dynamical map とマスター方程式の対応を明確にすることができた。得られた一般式を上述のモデルに適用したところ、熱浴を構成するスピンと注目しているスピンの非共鳴の場合に、Dynamical map の完全正值性 (Complete positivity) が破られる時間領域があることを示した。

この場合、一度熱浴に吸収された、注目しているスピンのエネルギーが再吸収されるという、非マルコフ効果を色濃く反映している。現在の量子情報処理のスキームは、完全正值性を下敷きにしているものがほとんどであるため、量子情報処理との関係を具体的に付ける必要があることがわかった。

②の項目については主に平成19年度に取り組んだ。具体的には、環境世界の影響下にあるスピンの安定性を制御するためのパルス制御法についての研究を行った。その結果、注目しているスピンの環境と相互作用することによって、初期時刻に励起状態にあったスピンのエネルギーが環境から再吸収されるという、非マルコフ効果のある場合には、

パルス制御法が有効であることを示すことができた。このほか、注目しているキュービットが初期時刻に他のキュービットと関連のある場合の量子エラー訂正の有効性についての研究を行った。その結果、初期相関の影響は深刻で、量子エラー訂正が有効に機能しない場合があることについて、日本物理学会にて発表を行った。また、ナノシステムを分析する上で重要な役割を果たしている複素アドミッタンスについて新たな表式を求め、「量子応答と量子ダイナミックスの新展開」研究会にて発表を行った。

平成 20 年度には、特に電子スピンの緩和現象を解明する上で重要な役割を果たす複素アドミッタンスに焦点を絞った研究を行った。複素アドミッタンスをもとめる際には、従来、注目している系が熱浴と分離 (decouple) した初期条件が多く多く用いられてきた。(ここで初期条件とは、たとえばパルスの外場を印加する直前の状況を指す。) しかし、このような条件は  $\mu$  SR 等の実験以外の状況にはそぐわない人工的なものであり、実際には注目している系は熱浴までを含んだ全系で熱平衡状態にあると考えるほうが自然である。本研究ではこのような初期条件にも対応できるように、線形応答理論の拡張を行った。この定式化は、同時に注目している系と強くの相互作用の非マルコフ効果と、熱浴との相互作用による周波数変調の効果も考慮できるものとなっている。得られた表式を互いに相互作用する複数スピンの緩和現象に適用を行った。研究成果については、日本物理学会秋の分科会、国際会議 Dynamics and manipulation of quantum systems、及び日本物理学会春の年会にて発表し、論文にまとめたものを現在投稿中である。

## 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 2 件)

1. “Generation and Suppression of Decoherence in Artificial Environment for Qubit System”, Y.Kondo, M.Nakahara, S.Tanimura, S.Kitajima, C.Uchiyama, F.Shibata, Journal of Physical Society of Japan, vol.76 (2007) 074002 1-11(査読有)
2. “Non-Markovian dynamical maps and spin relaxation”, Chikako Uchiyama, Physics Letters A, vol.356(2006)294-305. (査読有)

[学会発表] (計 10 件)

1. “熱浴と相互作用する複数スピン系の line shape—スピン間相互作用の効果—”(口頭), 内山智香子・佐伯瑞彦・相原正樹・宮下精二, 日本物理学会 (立教大学) (2009.3.27).
2. “A Master equation approach to line shape in dissipative systems”(口頭), 内山智香子・佐伯瑞彦・相原正樹・宮下精二, 国際会議 Dynamics and manipulation of quantum systems (2008.10.21).
3. “A Master equation approach to line shape in dissipative systems”(口頭), 内山智香子・佐伯瑞彦・相原正樹・宮下精二, 日本物理学会(岩手大学) (2008.9.22).
4. “マスター方程式と複素アドミッタンス”(口頭), 内山智香子・佐伯瑞彦・宮下精二, 「量子応答と量子ダイナミックスの新展開」研究会(2008..16).
5. “Quantum Error Correction for Initially Correlated Qubits”(口頭), 内山智香子, 日本物理学会 (北海道大学) (2007.9.23).
6. “Dynamical maps and spin relaxation” (招待), Chikako Uchiyama, NANOME06, Italy, Napoli(2006.11).
7. “Multi-pulse Control of Decoherence - Non-linear Spin Boson Model-” (招待), Chikako Uchiyama, NANOME06, Italy, Bari(2006.11.24).
8. “Dynamical maps の正值性とスピン緩和”(口頭), 内山智香子, 日本物理学会 (千葉大学) (2006.9.24).
9. “Hilbert-Schmidt 空間における射影演算子法と非マルコフ的な Dynamical Map”(口頭), 内山智香子, 日本物理学会 (千葉大学) (2006.9.16).
10. “Dynamical Maps and Spin Relaxation”(招待), Chikako Uchiyama, Particles and Field Conference Spain, Jaca (2006.9.16).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

内山 智香子 (UCHIYAMA CHIKAKO)  
山梨大学・大学院医学工学総合研究部・  
准教授  
研究者番号：30221807

### (2) 研究分担者

平岡 賢三 (HIRAOKA KENZOU)  
山梨大学・大学院医学工学総合研究部・  
教授  
研究者番号：80107218