

「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」

平成 17 年度採択研究代表者

宮下 精二

(東京大学大学院理学系研究科 教授)

「量子多体協力現象の解明と制御」

1. 研究実施の概要

我々のグループは量子状態を能動的に制御し、その特徴を活かした情報処理の方法を開発するための理論構築をめざしている。これまで、量子力学的状態の動的性質に関する理論的研究の動向を調査するとともに、量子状態操作の方法に関する研究を行った。研究の進捗状況・成果は以下の通りである。

量子状態のスイッチなどにおいて重要な役割をするエネルギー準位構造における擬交差構造に関して、静的、動的な外場によるエネルギーギャップ依存性を明らかにした。また、非断熱遷移の最も基礎となる Landau-Zener 遷移における量子的な環境の効果の研究し、さらにキュービット操作などで重要となる絶対ゼロ度での厳密な関係を導出した。ポテンシャルエネルギーを動的に制御することで粒子の移動をさせる場合での移動する速度と粒子移送の確率の関係や、粒子を位置のエネルギーが異なる場所へ移動する際の移送の確率の関係も調べ、非断熱遷移の効果やトンネル効果による移送の確率への影響を明らかにした。

また、量子シミュレーションの興味深い対象となる量子状態として、固体状態と超流動状態が共存した超固体状態について、系の不均一性やハードコアの効果の特徴を明らかにした。その他、広い意味での量子情報操作である量子アニーリングの性質や、スピン波のドメイン壁による散乱、熱伝導の量子化コンダクタンス、量子相関の個別事象での観測の問題などについても調べ出版した。さらに横磁場イジング模型の量子相転移、ある種のはしご格子での量子スピン系が新奇な励起状態やスピントロスオーバーの相転移現象についても研究を進め、将来の量子情報処理の舞台としての可能性を探索中である。

電子間相互作用のある系の電気伝導についての研究を進めた。特に、共鳴準位模型のベーター仮説による厳密解を得たのは著しい成果である。また、スピン軌道相互作用のある量子細線について2つの重要な成果を得た。まず、量子細線に x 方向の磁場をかけてエネルギーバンドにギャップを作ると、そのギャップの中でのみ y 方向の磁化が発生することを予言した。次に、量子細線で干渉路を作り、ある条件を整えると完全スピントフィルターが実現することを予言した。

東工大のグループでは、量子状態の能動制御による最適解の探索アルゴリズムである量子アニーリングの基礎理論を展開した。特に、量子アニーリングの収束条件に関する定理を証明し、古典

的な熱アニーリングより収束が高速化されるという数値計算の知見に対して、厳密な裏付けを与えた。

2. 研究実施内容

今年度は、量子力学的状態の動的性質に関する理論的研究の動向を調査するとともに、量子状態操作の方法に関する研究を行った。主な研究方法・成果は以下の通りである。

(1) エネルギー準位構造における擬交差構造における非断熱遷移は、ランダウ・ゼナー遷移機構など量子状態のスイッチに重要な役割をする。外場によってエネルギーギャップが操作できる系として知られている容易軸型スピン系に横磁場をかけた場合の、ギャップの振る舞いをスピンのパリティの関係を通して明らかにした。また、振動磁場下で動的な振る舞いにおいて同様な振動現象があることが知られているが、その現象についてフロケ演算子の固有値問題として系統的に調べ、その性質を明らかにした。これらの研究結果は、いくつかの研究会で発表し、現在論文を制作中である。

(2) ポテンシャルエネルギーを動的に制御することで、粒子の移動をさせる方法は、光ピンセットや光格子の上での粒子操作、あるいは半導体の上での電子操作などで重要になる。この問題に対して、ポテンシャルを移動する速度と粒子移送の確率の関係や、粒子を位置のエネルギーが異なる場所へ移動する際の移送の確率の関係を調べ、非断熱遷移の効果やトンネル効果による移送の確率への影響を明らかにした。この研究は現在投稿中である。

(3) 興味深い量子状態として、固体状態と超流動状態が共存したいわゆる超固体状態がある。この状態の出現条件はこれまで多く調べられてきたが、我々は系に不均一性がある場合に超固体状態が出現する可能性や、粒子間の反発相互作用とボース粒子として同一サイトに複数個はいる場合のエネルギー損失の相対的な関係が超固体状態の実現にどのように影響するかを調べ、詳しい相図を調べるとともに、それらの相互作用による実効ポテンシャルが平坦になるところで超流動成分が最も流れやすいことを発見した。これらの成果もいくつかの研究会で発表し、出版準備中である。

(4) 広い意味での量子情報操作である量子アニーリングの性質についても研究を進めている。強くフラストレートし通常の温度アニーリングが働かない系において、この方法が有効であることを示し、基底状態探索を量子状態の断熱変化の立場からその特徴を明らかにし、量子ゆらぎとしての横磁場を工夫することでより効率的なアニーリング法を開発中である。これらの成果もいくつかの研究会で発表し、出版準備中である。

(5) スピンの大きさが変化するスピנקロスオーバーの相転移現象についても研究を進め、将来の量子情報の舞台としての可能性を探索中である。特に、光照射によるスピン状態のスイッチ機構で重要な役割をする低温での準安定状態の存在を発見し、その普遍性について研究を進めた。また、スピン間の相互作用の起源として弾性相互作用を取り上げ、それに関する分子動力学法、モンテカルロ法を開発した。これらの成果もいくつかの研究会で発表し、出版準備中である。

(6) 量子スピン系のダイナミクスに関して、オランダ、グローニンゲン大学との共同研究で、スピン波がドメイン壁でどのように散乱されるかについて詳しく調べ発表した。また、系の固有状態でないドメイン壁が動的にどのように安定かについても、調べ出版した。

(7) 量子観測にとって重要な量子相関の実験的な測定に関する基礎的な問題として、量子力学的な相関がない場合にも、ある種の条件の下ではいわゆるベルの不等式が破れることがあることを、オランダ、グローニンゲン大学との共同研究で具体的な例で示し、量子相関の個別事象での観測の問題について考察し、いくつかの論文を発表した。

(8) インド、JNCASR との共同研究で、ある種のはしご格子での量子スピン系が新奇な励起状態を示すことを明らかにし、その成果を現在投稿中である。

(9) 非断熱遷移の最も基礎となる Landau-Zener 遷移における量子的な環境の効果を研究し、キュービット操作などで特に重要になる絶対ゼロ度での厳密な公式を導出した。これは、主にドイツのアウグスブルグ大学との共同研究であり論文発表を行った。

(10) インドのラマン研究所との共同研究として、実験的に観測されている熱伝導の量子化コンダクタンスに関連して、量子効果が顕著になる極低温での熱流揺らぎの性質を厳密に解析し、揺らぎの定理が性質していることや、揺らぎそのものの公式を導出し、現在論文投稿中である。

(11) フランス、サクレイ研究所ともスピン系の緩和現象などのテーマについて共同研究をするともに、スピントロニクスなどについての研究連絡を行いその方面の研究進展を図っている。

(12) 量子スピン系の表面効果や、横磁場イジング模型の量子相転移のスピンのおおきさ依存性などについて研究を進め、いくつかの論文発表を行い、さらに準備中である。

(13) 電子間相互作用のある系の電気伝導を理論的に研究した。特に、共鳴準位模型をベーター仮設法で扱い、電子の運動量を指定した場合の厳密解を得た。それによって生じる電流の量子力学的期待値には、相互作用によって初めて現れる共鳴ピークが存在する。今後は、フェルミエネルギーを指定した場合の解を構成し、統計力学的期待値を計算する方向へ発展させる。

(14) 羽田野・中村浩章(核融合研)・白崎良演(横国大工)は、スピン軌道相互作用のある量子細線の分散関係を調べた。ラシュバ型の相互作用の場合、 x 方向(細線方向)に磁場をかけると、エネルギーバンドのゼロ運動量付近にギャップが生まれる。このギャップにフェルミ面がある場合に限り y 方向に磁化が発生することを理論的に予言し、数値計算でも確認した。

(15) 羽田野・中村浩章(核融合研)・白崎良演(横国大工)は、スピン軌道相互作用が非可換ゲージ場理論によって簡単に扱えることを示した。その議論を利用して、スピン軌道相互作用のある干渉路の電気伝導を調べた。磁場とスピン軌道相互作用の強さを調節すると、上向きスピンのみが出てこない完全スピンフィルターを構成できることを理論的に示した。

(16) 量子ゆらぎをどのように時間とともに制御すると最適状態に確実に到達するかというアニーリング・スケジュールに関して、いくつかの定理を証明した。その結果によると、量子アニーリングの実施方法によらず(すなわち、古典系に焼き直して行う量子モンテカルロ法を用いるか、あるいはシュレディンガー方程式を直接解くかによらず)同一のアニーリング・スケジュールで任意の問題に関して収束が保証されることが明らかになった。

(17) 量子ゆらぎの導入の仕方が一意的でないことに注目し、量子的な横磁場だけでなく横方向の相互作用を入れると収束が加速されることをいくつかの例で示した。特に、横磁場だけを使った量子アニーリングにより収束性が古典的な熱アニーリングに劣るとされていた例においても、相互作用を導入することにより大幅な改善が見られた。

3. 研究実施体制

(1)「東京大学」グループ

①研究者名

宮下 精二(東京大学 教授)

②研究項目

- ・量子相互作用による動的現象の理論的研究
- ・多体系における導線の自己エネルギー

(2)「東京工業大学」グループ

①研究者名

西森 秀稔(東京工業大学 教授)

②研究項目

- ・量子効果を用いた情報処理・記憶機構の理論的研究

4. 研究成果の発表等

(1)論文発表(原著論文)

○P. Contucci, S. Morita and H. Nishimori

“Surface terms on the Nishimori line of the Gaussian Edwards–Anderson model”

J. Stat. Phys., 122, 303 (2006)

○S. Morita, Y. Ozeki and H. Nishimori

“Gauge Theory for Quantum Spin Glasses”

J. Phys. Soc. Jpn., 75, 014001 (2006)

○H. Nishimori and M. Ohzeki

“Location of the Multicritical Point of the Ising Spin Glass on the Triangular and Hexagonal Lattices”

J. Phys. Soc. Jpn., 75, 034004 (2006)

○J. Ieda, T. Miyakawa and M. Wadati

“Exact Soliton Solutions of Spinor Bose–Einstein Condensates”

Laser Physics, 16, 678 (2006)

○R. Inoue Yamazaki and T. Yamazaki

- “Cohomological study on variants of the Mumford system, and integrability of the Noumi–Yamada system”
Comm. Math. Phys., 265, 699 (2006)
- H. Tokoro, S. Miyashita, K. Hashimoto and S. Ohkoshi
“Huge thermal hysteresis loop and a hidden stable phase in a charge–transfer phase transition of $\text{Rb}_{0.64}\text{Mn}[\text{Fe}(\text{CN})_6]_{0.88} \cdot 1.7\text{H}_2\text{O}$ ”
Phys. Rev. B, 73, 172415 (2006)
- Y. Nakamura, N. Hatano
“A non-Hermitian analysis of strongly correlated quantum systems”
Physica B, 378, 292 (2006)
- M. Machida, N. Hatano and J. Goryo
“Temporal Oscillation of Conductances in Quantum Hall Effect of Bloch Electrons”
J. Phys. Soc. Jpn., 75, 063704 (2006)
- M. Uchiyama, J. Ieda and M. Wadati
“Dark Solitons in F=1 Spinor Bose– Einstein Condensate”
J. Phys. Soc. Jpn., 75, 064002 (2006)
- M. Al Hajj, F. Alet, S. Capponi, M.B. Lepetit, J.P. Malrieu, and S. Todo
“Parity law of the singlet–triplet gap in graphitic ribbons”
Eur. Phys. J. B, 51, 517 (2006)
- M.Nishino, K. Boukheddaden, S. Miyashita, and F. Varret
“Dynamical properties of Photoinduced Magnetism and Spin–Crossover phenomena in Prussian Blue Analogs – photoinduced thermal hysteresis of magnetization –”
Solid State Phenomena, 112, 73 (2006)
- K. Takahashi and T. Aono
“Mesoscopic conductance fluctuations in a coupled quantum dot system”
Phys. Rev. B, 74, 041311(R) (2006)
- A. Nishino and T. Deguchi
“The $L(\mathfrak{sl}_2)$ symmetry of the Bazhanov–Stroganov model associated with the superintegrable chiral Potts model”
Phys. Lett. A, 356, 366 (2006)
- S. Yuan, H. De Raedt and S. Miyashita
“Quantum Dynamics of Spin Wave Propagation through Domain Walls”
J. Phys. Soc. Jpn., 75, 084703 1 (2006)
- H. Tokoro, T. Matsuda, S. Miyashita, K. Hashimoto and S. Ohkoshi
“Crystal Structures of Photo–induced Phase and Rapidly–cooled Phase in

Rb_{0.73}Mn[Fe(CN)₆]_{0.91} · 1.4 H₂O Prussian Blue Analog”

J. Phys. Soc. Jpn., 75, 085004 1 (2006)

○S. Todo

“Universal Reduction of Effective Coordination Number in the Quasi-One-Dimensional Ising Model”

Phys. Rev. B, 74, 104415 (2006)

○S. Tanaka, H. Katsura and N. Nagaosa,

“Electron Localization or Delocalization in Incommensurate Helical Magnets”

Phys. Rev. Lett., 97, 116404 (2006)

○M. Machida, T. Iitaka, S. Miyashita

“ESR Intensity and Anisotropy of the Nanoscale Molecular Magnet V15”

AIP Conference Proceedings, (2006)

○K. De Raedt, K. Keimpema, H. De Raedt, K. Michielsen and S. Miyashita

“A local realist model for correlations of the singlet state”

Euro. Phys. J. B, 53, 139 (2006)

○S. Morita and H. Nishimori

“Convergence Theorems for Quantum Annealing”

J. Phys. A, 39, 13903 (2006)

○K. Saito, M. Wubs, S. Kohler, P. Hanggi and Y. Kayanuma

Quantum state preparation in circuit QED via Landau-Zener tunneling

Europhys. Lett., 76, 22 (2006)

○Y. Nakamura, N. Hatano

“A non-Hermitian critical point and the correlation length of strongly correlated quantum systems”

J. Phys. Soc. Jpn., 75, 104001 (2006)

○Y. Konishi, H. Tokoro, M. Nishino and S. Miyashita

“Magnetic properties and metastable states in spin-crossover transition of Co-Fe Prussian blue

Analogues”

J. Phys. Soc. Jpn., 75, 114603 (2006)

○M. Ohzeki and H. Nishimori

“Internal Energy of the Potts model on the Triangular with two- and three-body interactions”

J. Phys. Soc. Jpn., 75, 114003 (2006)

○M. Wubs, K. Saito, S. Kohler, P. Hanggi and Y. Kayanuma

Gauging a quantum heat bath with dissipative Landau-Zener transitions

Phys. Rev. Lett., 97, 200404 (2006)

- Y. Aiba, N. Hatano
 “A microscopic model of triangular arbitrage”
 Physica A, 371, 572–584 (2006)
- C. Yasuda, S. Todo, and H. Takayama
 “Bond–Dilution–Induced Quantum Phase Transitions in Heisenberg Antiferromagnets”
 J. Phys. Soc. Jpn., 75, 124704 (2006)
- M. Nishino, K.l Boukheddaden, S. Miyashita, and F. Varret
 “Clustering of high–spin molecules in spin–crossover systems and magnetic ordering in
 temperature cycling processes”
 Phys. Rev. B, 74, 214416 (2006)
- X. Y. Ge and M. Wadati
 “Supersymmetric Extension of the Reflection Equation Algebra and Integrable Boundary
 Conditions in Doped Spin–1 Model”
 J. Phys. Soc. Jpn., 75, 124004–1–8 (2006)
- M. Wadati and T. Iida
 “BCS–BEC Crossover in One–Dimensional Integrable Model”
 Phys. Lett. A, 360, 423–728 (2007)
- R. Inoue Yamazaki, Y. Konishi and T. Yamazaki
 “Jacobian variety and integrable system --- after Mumford, Beauville and Vanhaecke”
 J. Geom. Phys., 57, 815 (2007).
- R. Inoue Yamazaki and Y. Konishi
 “Multi–Hamiltonian structures on Beauville’s integrable system and its variant”
 SIGMA, 3, 007, 16 pages (2007)
- J. Ieda, M. Uchiyama and M. Wadati
 “Inverse Scattering Method for the Multicomponent Nonlinear Schroedinger Equation with
 Nonvanishing Boundary Conditions”
 J. Math. Phys., 48, 013507 (2007)
- T. Nagao, S. Muller, P. Braun, K. Saito, S. Heusler and F. Haake
 Semiclassical Theory for Parametric Correlation of Energy Level
 J. Phys. A: Math. Theor., 40, 47 (2007)
- N. Hatano, R. Shirasaki and H. Nakamura
 “Gap–mediated magnetizaion of a pseudo–one–dimensional system with a spin–orbit
 interaction”
 Solid State Commun., 141, 79 (2007)
- K. Takahashi and T. Aono
 “Chaotic scattering through coupled cavities”

Phys. Rev. E, 75, 026207 (2007)

○N. Hatano, R. Shirasaki and H. Nakamura

“Non-Abelian gauge field theory of the spin-orbit interaction and a perfect spin filter”

Phys. Rev. A, 75, 032107 (2007)

○A.F. Albuquerque, F. Alet, P. Corboz, P. Dayal, A. Feiguin, L. Gamper, E. Gull,

S. Guertler, A. Honecker, R. Igarashi, M. Koerner, A. Kozhevnikov, A. Laeuchli, S.R.

Manmana,

M. Matsumoto, I.P. McCulloch, F. Michel, R.M. Noack, G. Pawłowski, L. Pollet, T. Pruschke,

U. Schollwoeck, S. Todo, S. Trebst, M. Troyer, P. Werner, S. Wessel (ALPS collaboration)

“The ALPS project release 1.3: open source software for strongly correlated systems”

to appear in J. Mag. Mag. Mat.