

「量子効果等の物理現象」
平成8年度採択研究代表者

大塚 洋一

(筑波大学物理学系 教授)

「金属微細トンネル接合システムの物理と素子応用の研究」

1. 研究実施の概要

本研究の目的は、微小トンネル接合に関連した新しい物理現象を、応用を視野に入れつつ、探索し検証することである。微小トンネル接合研究グループでは、微小トンネル接合作製技術の開発、基本素子である単一接合や単電子トランジスタにおけるトンネル素過程の物理を中心とした研究、電子素子や回路への応用の各側面から研究を進めてきた。平成12年度においては、微小超伝導島電極を用いた電荷量子ビットに関する研究、微小ジョセフソン接合の基底状態に関する研究などで着実な進展を見たほか、新たに磁束型量子ビットの研究や10nm級微小金属中の一電子状態の観測などへ研究を展開した。デバイス応用においては金クラスターを用いた少数電子メモリ、単一電子トランジスタと強誘電体を用いたメモリの試作などを行った。

一方、量子カオスとエネルギー準位に関する理論的研究をそれぞれ進めている量子カオス研究グループでは、特にランダム行列の特性関数のユニバーサルな相関関数ならびにそのモーメントを解析的に求めた。今回新たにオーソゴナルな場合の外場がある場合の相関関数の導出を行い、その群論的研究に成果をみた。

2. 研究実施内容

微小トンネル研究グループでは以下に示すテーマにおいてそれぞれ成果を上げると共に、9月に理化学研究所で開催されたナノ構造とメゾスコピック系の物理に関する日本・イスラエル2国シンポジウムをチームとして共催した。また量子カオスグループは第4回国際ワークショップを開催した。

(1) 微小トンネル接合に関する研究

【超伝導単一クーパー対箱における電荷量子ビット】

微小な超伝導島電極においては熱励起のない多数電子系基底状態を実現することができる。この島電極を微小ジョセフソン接合でリザーバと結合したとき電荷数の異なるマクロな状態間の量子コヒーレンスが生じること、さらにこの量子コヒーレント状態を素子に高速のゲート電圧パルスを印加することにより制御できることを前年度までの実験で明らかにし、この系が人工2準位系、すなわち電荷量子ビットとなることを示した。12年度は、複数のゲート電圧パル

スによる量子状態の操作、電荷エコーによる不均一広がりの抑制の実証などを行った。前者の2パルス実験による量子干渉で見られた約1nsという短い緩和時間の原因を考察した結果、状態観測が多数回の同操作を積算するという方法であるため、低周波の電荷揺らぎによって生じる試行毎の位相発展の違いによって見かけ上の位相緩和が引き起こされるためであるとの結論を得た。これを検証するため、NMRスピンエコー法に類似の「電荷エコー」実験をおこない、実際、量子振動が6nsまで観測されることを示した。一方、このことはこのデバイスの動作に対し背景電荷の揺らぎが大きな障害となることを意味しており、今後の展開においてはこの揺らぎの克服が重要である。

【微小ジョセフソン接合配列における散逸誘起超伝導・絶縁体転移】

超伝導微小トンネル接合は量子相転移研究の恰好の舞台である。絶対零度において微小ジョセフソン接合系は系に付随するいくつかのパラメータの大小に応じ、超伝導状態、あるいはクーロンブロック状態のいずれかになる。このうち特に散逸の大小に依って生じる両状態間の転移は巨視的変数の量子相転移に特有なものであり、とりわけ興味深い。我々はこれまで、この散逸による超伝導・絶縁体転移を微小抵抗を並列につなげた単一微小トンネル接合系、常伝導トンネル抵抗を付加した単一微小トンネル接合、並列抵抗を持つ二次元的配列について実験を行い、それぞれの場合に明確な超伝導絶縁体転移を観測した。本年度は2次元配列の実験結果を詳しく検討すると共に、新たに1次元系の実験を行い、結果を得た。

【微小超伝導体の磁場応答】

前年度に見出した、微小超伝導リングにおけるLittle-Parks振動の振幅減少の原因を探るために、リングの超伝導転移を、微小トンネル接合を使った超伝導エネルギーギャップ測定法を用いて詳細に調べた。その結果、リング内磁束が磁束量子の整数倍のときに比べて半整数倍の際に超伝導ゆらぎが大きくなる現象を見出した。このことが、Little-Parks振動の振幅減少の原因となっているとの結論を得た。

【金属超微粒子中の1電子状態】

前年度に数nmの島電極を持つ室温動作アルミニウムSETの開発を報告した。このような極微小SETの極低温における電流電圧特性には、単電子帯電効果に原因する構造の他に、島電極中の1電子準位の離散化による新たな構造がもたらされると考えられる。10nm級のAl-SETにおいて、この離散化準位による構造を確認した。電子密度の小さな半導体量子ドットにおいてはこのような離散化準位の観測は多く報告されているが、金属における報告例は少ない。今後、準位統計や電子間相互作用など多くの方面で展開が期待できる。

【金クラスターを利用した少数電子メモリセル】

金属クラスターの自己組織的配列の実現とその応用を追求してきたが、今年度は直径数nmの金クラスターを用いた電子トラップ型の少数電子メモリの試作を行った。読み出しにはAI-SETを用い、明確なメモリ特性が認められた。

【強誘電体メモリ】

高速動作が可能で、高度の集積が可能な不揮発メモリとして、電荷蓄積部として強誘電体（PZT）を用いた単電子トランジスタメモリを昨年度提案・設計した。今年度はその試作を行い、評価測定を開始した。書込み電圧を印加すると、強誘電体中での電荷移動を示唆する不規則な位相変化がSETのクーロン変調に観測された。

【単電子トランジスタにおける熱活性化型背景電荷ゆらぎの観測】

単電子トランジスタの正常動作に障害となる背景電荷についての研究を行い、とりわけ大きな影響を与えるトンネルバリア内の背景電荷に関し、荷電粒子の安定・準安定2状態間の単純な熱活性的運動で理解できる事例を見出した。

この他、微小ジョセフソン接合素子による磁束型量子ビットに関する研究（デルフト工科大との共同研究）、多層カーボンナノチューブを用いた微小接合系、窒化シリコン薄膜を利用した微小トンネル接合作成法の高精度化、単電子トランジスタの高速動作などの研究を新たに取り組み始めた。また強磁性SETにおけるトンネル磁気抵抗の増大の原因を探る研究、超伝導・強磁性接合におけるアンドレーエフ反射や長距離近接効果の研究、走査型SETプローブ顕微鏡の開発などを行いつつある。

(2) 量子カオスとエネルギー準位相関の理論的研究

量子カオスグループにおいては“ランダム行列理論と量子カオス”を主題とする第4回CRESTワークショップを9月に開催するなどして、ランダム行列とメソスコピックゆらぎについて議論した。特にランダム行列の特性関数のユニバーサルな相関関数、ならびにそのモーメントを解析的に求めた。今回新たにオーソゴナルな場合の外場がある場合の相関関数の導出を行い、その群論的研究に成果をみた。

3. 主な研究成果の発表（論文発表）

T. Yamaguchi, R. Yagi, A. Kanda, Y. Ootuka, and S. Kobayashi, "Superconductor-Insulator Transition in a Two-dimensional Array of resistively shunted small Josephson Junctions", Phys. Rev. Lett. 85(2000)1974-1977.

Y. Ootuka, R. Matsuda, K. Ono, and H. Shimada, "Spin polarization and magneto-Coulomb oscillations in ferromagnetic single-electron transistors", Physica B 280 (2000)394-398.

R. Yagi, S. Kobayashi, Y. Ootuka, "Superconductor-Insulator Transitions in Single Small Josephson Junctions with Shunt Resistor and with Normal Tunneling Junction", Physica B 280 no. 1-4, 416-417(2000)

A. Kanda, M. C. Geisler, K. Ishibashi, Y. Aoyagi and T. Sugano, "Suppression of the Little-Parks Oscillation in a Mesoscopic Superconducting Ring", Physica B 284-288(2000)1870-1871.

T. Yamaguchi, R. Yagi, A. Kanda, Y. Ootuka, and S. Kobayashi, "Phase Diagram for Two-Dimensional Arrays of Small Josephson Junctions with Shunt Resistors", Physica C, 352(2001)181-185.

Yu. A. Pashkin, Y. Nakamura and J. S. Tsai, "Room-temperature Al single-electron transistor made by electron-beam lithography", Applied Physics Letters, 76(2000)2256.

Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin, and J. S. Tsai, "Quantum-state control with a single-Cooper-pair box", Journal of Low Temperature Physics 118(2000)765.

Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin, and J. S. Tsai, "Quantum Coherence in a single-Cooper-pair box : experiments in the frequency and time domains", Physica B, 280(2000)405.

H. Shimada and Per Delsing, "Current mirror effect and correlated Cooper-pair transport in coupled arrays of small Josephson junctions", Physical Review Letters 85(2000)3253-3256.

Y. Shimazu, K. Sakai, T. Noda, I. Yamamoto and M. Yamaguchi, "Effect of domain walls on resistivity in ferromagnetic films and wires", Physica B 284-288 (2000)1239-1240.

Y. Shimazu, T. Noda and T. Uchikawa, "Domain wall effect at room temperature in ferromagnetic wires of micron-range diameter", Proceedings of Symposium on Spin-electronics, Halle, Germany(2000)p. 91.

E. Brezin, and S. Hikami, "Characteristic Polynomials of Random Matrices", Commun. Math. Phys. 214(2000)111-135.

E. Brezin, and S. Hikami, "Characteristic polynomials of random matrices at edge singularities", Phys. Rev. E 62(2000)3558-3567.

中村泰信、蔡 兆申、“超伝導電子対を操る - 量子状態の重ね合わせ ”、パリティ 15 No.4(2000) .

単電子トンネルと強磁性、大塚洋一、パリティ 15 No.06(2000)20-27(丸善) .

蔡兆申、中村泰信、ユーリ パシュキン“ 固体素子量子ビット 単一電子クーパー対箱におけるコヒーレンス ” FEDジャーナル10(2000)36 .

中村泰信、蔡兆申、“ジョセフソン接合を用いた量子ビット”、応用物理69巻11号
(2000)1299 .

大塚洋一、用語解説「量子コンピュータ」、高圧ガス37、No.2(2000)45 .