

「新しい物理現象や動作原理に基づくナノデバイスの創製」
平成 14 年度採択研究代表者

高柳 英明

(東京理科大学応用物理学科 教授)

「超伝導磁束量子ビットによる量子もつれの実現」

1. 研究実施の概要

研究のねらい：ジョセフソン接合を含む超伝導リング(量子ビット)と相互作用するマイクロ波共振回路のエネルギー量子を媒介して複数量子ビット間のもつれ制御を実現すること。

研究の概要と今後の見通し：今年度、主に下記 3つの成果が得られた。

- [1] 量子ビットの最適動作点近傍における緩和過程の精密測定より、コヒーレンス時間を決定している緩和に関する理解が進展した。すなわち、最適動作点ではエネルギー緩和過程が、最適動作点から外れたその近傍では、 $1/f$ 磁束ゆらぎが量子ビットのコヒーレンス時間を決定していることが判明した。得られた知見を基に、今後コヒーレンス時間の改善を行う予定である。
- [2] コヒーレンス時間内に真空ラビ振動過程を複数回実行し、励起された量子ビットを用いて LC 共振回路へエネルギー量子を1個ずつ送り込む実験を行った。サブポアソン分布で特徴付けられる LC 共振回路の非古典的状態が形成されていることを初めて確認した。
今後、LC 共振回路の特性を改良し、光子数状態の生成および制御を目指す。
- [3] オランダのデルフト工科大との共同研究で得られた成果として、エネルギー緩和時間内に反作用の小さい測定を素早く複数回行うことによって、最適動作点から離れた動作点において、超伝導磁束量子ビットの状態の量子非破壊測定をほぼ忠実に実現した。今後、NTT でもこの読出し方法を取り入れて、量子ビット状態読出しの高速化とフィデリティ向上を目指す。

これらの成果を踏まえて、最終年度は、コヒーレンス時間を改善した LC 共振回路と相互作用する 2量子ビット 試料を作製し、共振回路のエネルギー量子を媒介とする複数量子ビット間のもつれ制御を実現する予定である。

2. 研究実施内容

本年度は、1ビットに関する緩和過程の理解(エネルギー緩和時間、位相緩和時間 のバイアス磁束依存性)、および、LC 回路共振量子(1光子から3光子状態)とのエンタングルメント制御に関して進展が見られた。特に後者は、多ビット化展開の際に重要となる拡張可能な多ビットゲート制

御スキームに関して、一部その可能性を実証したものである。

量子ビットのデコヒーレンスの原因を探ることは、量子ビット間のもつれ制御実現のための必須条件のひとつである。今年度は、量子ビットの最適動作点近傍における緩和過程の精密測定より、コヒーレンス時間を決定している緩和に関する理解が進展した。すなわち、最適動作点ではエネルギー緩和過程が、最適動作点から外れた最適動作点近傍では、 $1/f$ 磁束ゆらぎが量子ビットのコヒーレンス時間を決定していることが判明した。

図1に測定試料の SEM 写真および2種類の緩和時間測定で用いたパルスタイミングの模式図を示す。エネルギー緩和時間(T_1)は、(b)に示す測定を繰り返し行ない、励起状態に準備された量子ビットを π パルスから読出しパルスまでの時間の関数として測定することにより、量子ビットを励起状態に見出す確率の指数関数型の緩和を仮定して求まる特徴的時間スケールである。

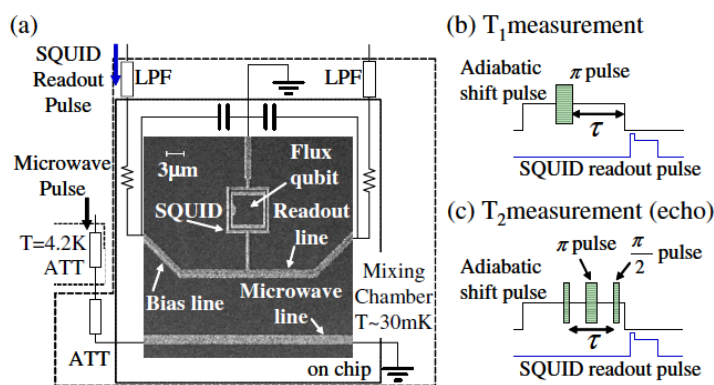


図1. (a) 測定試料の SEM 写真 (b) エネルギー緩和時間(T_1)測定のパルスタイミング模式図
(c) エコー法による位相緩和時間(T_2)測定のパルスタイミング模式図

また、位相緩和時間(T_2)は、(c)に示すエコー法のパルス列を使って求められるもので、量子ビットがブロッホ球の赤道を廻る間に位相緩和する特徴的時間スケールを与える。測定に用いた量子ビットのエネルギースペクトルを図2に示す。データは、最適動作点($\Delta \Phi_{qb}=0$)で 3.9 GHz 相当のエネルギー分裂をもつ双曲線によく説明できる。磁場で変化しない 6.2 GHz の共鳴はオンチップ超伝導 LC 共振回路に由来するものである。NTT グループでは、近年このような数 GHz のエネルギー分裂をもつ量子ビットが再現性良く作製できるようになってきた。

最適動作点近傍における緩和過程の測定結果を図3に示す。横軸のスケールは、 $-0.5 m\Phi_0 \sim 0.5 m\Phi_0$ ($\Phi_0=h/(2e)$: 磁束量子)であり、最適動作点のごく近傍であることがわかる。明らかに、エコー法で測定された位相緩和時間(T_2)は、バイアス磁束に対する強い依存性を示し、最適動作点ではエネルギー緩和時間(T_1)の約2倍 ($T_2^{\text{echo}} \approx 2T_1$)に達する。良く知られた関係式 $(T_2^{\text{echo}})^{-1} = (2T_1)^{-1} + \Gamma_\phi$ (Γ_ϕ : 純位相緩和率)から、最適動作点ではエネルギー緩和過程が量子ビットのコヒーレンス時間を決定していることが判る。すなわち、最適動作点において量子ビットのコヒーレンス時間を改良するためには、量子ビットのエネルギー分裂($h \cdot 3.9$ GHz)に相当する高周波ノイズを低減する必要がある。また、図3の挿入図に示すように、位相緩和時間(T_2)の逆数は、

最適動作点近傍でバイアス磁束に対して二次関数的ではなく線形に変化している。周波数依存性のないホワイトノイズが原因の場合には、二次関数で説明されることが知られている。この振る舞いは、 $1/f$ の周波数依存性をもつ磁束ノイズに起因するガウス型緩和によって説明される。われわれの量子ビットのコヒーレンス時間は今後大いに改善の余地があり、この $1/f$ 磁束ノイズをいかに取り除けるかが量子ビットの寿命を決定することがわかる。この実験で得られた知見を試料設計へ反映させ、コヒーレンス時間の改善を行う予定である。

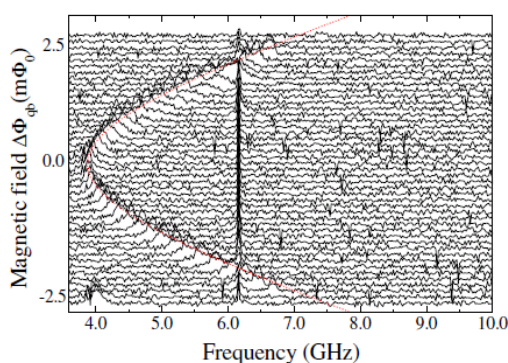


図2. 量子ビットのエネルギースペクトル

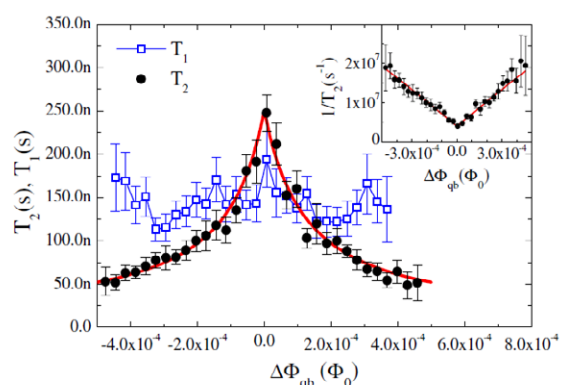


図3. エネルギー緩和時間(T_1) と エコー法位相緩和時間(T_2) のバイアス磁束依存性

DC-SQUID を利用した、結合度を制御することのできる磁束量子ビットの結合回路について、前年度に引き続き実験を行った。理論との詳細な比較を行うために、DC-SQUID との結合を強くした試料を設計し、結合回路の動作特性を測定した。超伝導シールドを使うことにより、以前は観測できなかった系の準安定状態を広い領域にわたって観測することができた。実験結果は、この回路がエネルギー障壁の高さを制御することができる RF-SQUID として動作していることを明確に示している。この結合回路で結合した磁束量子ビットの2ビット系の設計を行った。次年度に実際に試料をつくり、2ビット系の状態測定とエネルギー分光を実施する計画である。

一方、理論面では、まず、系と環境についてのモデルを考え、系の状態が環境との相互作用によってどのように変化するかを調べた。系のモデルは多数個のスピン $1/2$ 系が猫状態にあるとし、環境のモデルは多数個のスピン $1/2$ 系が熱平衡状態のような混合状態にあるとした。これらが相互作用した場合、たとえ相互作用の大きさが小さくとも、系と環境の自由度の多さのために、状態は大きく変化してしまうことが示される。特に元の猫状態との忠実度は激しく減少し、純粋度も同時に減少する。

次に、この状態変化を復元する方法として、以下のような逆測定を考えた。コヒーレント状態にあるスピン系のプローブを用意し、それを系と相互作用させて、プローブのスピン成分についての測

定を行う。この測定によって適切な測定結果が得られた場合、忠実度を大きく改善させ、さらに純粋度も上昇させることができることを示した。このような復元操作は測定の後選択を利用しているため、確率的にしか成功しない。しかし、その確率は決して低くはなく、期待値を考えた場合にも同様な結論を得ることができることがわかった。

3. 研究実施体制

(1) 「NTT」グループ

①研究者名

仙場 浩一 (NTT 物性科学基礎研究所・超伝導量子物理研究グループリーダー 主幹研究員)

②研究項目

超伝導磁束量子ビットを用いた量子もつれの実現

(2) 「横浜国立大学」グループ

①研究者名

島津 佳弘 (横浜国立大学 助教授)

②研究項目

磁束量子ビットの実験

(3) 「理論」グループ

①研究者名

上田 正仁 (東京工業大学 教授)

②研究項目

量子計算を固体素子と原子系で実現するための基礎理論の研究

(4) 「理科大」グループ

①研究者名

高柳 英明 (東京理科大学 教授)

②研究項目

量子ビット用接合の評価

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表(原著論文)

- F. Wilhelm and K. Semba. Superconducting Quantum Computing : Status and Prospects , in *Physical Realizations of Quantum Computing* pp.38-107. (World Scientific Pub Co Inc., New

Jersey, April 2006) ISBN 981-256-473-X.

- H. Nakano, S. Saito, H. Takayanagi, R. Fazio. ADIABATIC BERRY PHASE DETECTION ONLY BY CONTROLLING EXTERNAL MAGNETIC-FLUXES IN COUPLED FLUX-QUBIT SYSTEM. ISQM-Tokyo'05 Proceedings, edited by Ishioka and Fujikawa, (World Scientific Pub Co Inc., Singapore, July 2006).
- K. Kakuyanagi, T. Meno, S. Saito, H. Nakano, K. Semba, H. Takayanagi, F. Deppe, A. Shnirman. Dephasing of a superconducting flux qubit. Phys. Rev. Lett. **98**, 047004 (2007).
- Fei Xue, Y. D. Wang, C. P. Sun, H. Okamoto, K. Yamaguchi, K. Semba. Controllable Coupling between Flux Qubit and Nanomechanical Resonator by Magnetic Field. New Journal of Physics **9**, 35 (2007).
- A. Lupascu, S. Saito, T. Picot, P. C. de Groot, C. J. P. M. Harmans, and J. E. Mooij. Quantum non-demolition measurement of a superconducting two-level system. Nature Physics **3**, 119 (2007).
- Y. Shimazu, T. Niizeki, Y. Wada: Fabrication and characterization of a switchable flux transformer using a DC-SQUID, Physica C 445-448, 971-974 (2006).
- R. Kanamoto, H. Saito, and M. Ueda: Critical fluctuations in a soliton formation of attractive Bose-Einstein condensates; Phys. Rev. A **73**, 033611, 2006.
- M. Ueda and T. Nakajima: Nambu-Goldstone Modes in a Rotating Bose-Einstein Condensate; Phys. Rev. A **73**, 043603, 2006.
- T. Ohkuma and M. Ueda: Quantum-statistical mechanics of an atom-dimer mixture: Lee-Yang cluster expansion approach; Phys. Rev. A **73**, 063608, 2006.
- H. Terashima and M. Ueda: Reversible quantum measurement with arbitrary spins; Phys. Rev. A **74**, 012102, 2006.
- Y. Kawaguchi, H. Saito, and M. Ueda: Spontaneous Circulation in Ground-State Spinor Dipolar Bose-Einstein Condensates; Phys. Rev. Lett. **97**, 130404, 2006.
- H. Saito and M. Ueda: Stabilization of a matter-wave droplet in free space by feedback control of interatomic interactions; Phys. Rev. A **74**, 023602, 2006.
- Y. Kawaguchi, H. Saito, and M. Ueda: Can Spinor Dipolar Effects Be Observed in Bose-Einstein Condensates?; Phys. Rev. Lett. **98**, 110406, 2007.
- Y. Kurotani and M. Ueda: Circuit analysis of quantum measurement; Phys. Rev. A **75**, 012110, 2007.
- K. Murata, H. Saito, and M. Ueda: Broken-axisymmetry phase of a spin-1 ferromagnetic Bose-Einstein Condensate; Phys. Rev. A **75**, 013607, 2007.
- H. Saito, Y. Kawaguchi, and M. Ueda: Topological defect formation in quenched ferromagnetic Bose-Einstein condensates; Phys. Rev. A **75**, 013621, 2007.

(2) 特許出願

平成 18年度特許出願:1 件(CREST 研究期間累積件数:1 件)