

戦略的創造研究推進事業
ナノテクノロジー分野別バーチャルラボ

研究領域「新しい物理現象や動作原理に基づいた
ナノデバイス・システムの創製」

研究課題「超伝導磁束量子ビットによる量子も
つれの実現」

研究終了報告書

研究期間 平成14年11月～平成20年3月

研究代表者：高柳 英明
(東京理科大学理学部第一部
応用物理学科、教授)

1 研究実施の概要

《研究の構想》

研究代表者である高柳が、量子コンピュータに関するまとまった講義を聴いたのは、1996 年の NATO の会議であった。そこで、基本的にはどのような量子2準位系も量子コンピュータの基本要素である量子ビットとして働くことを理解した。その後、オランダ・デルフト工科大の J.E. Mooij (モイ) 教授が高柳のグループに滞在した。教授は滞在中、超伝導素子を用いた量子コンピュータの構想を練っており、必然的に高柳やそのグループ員も教授との議論を通して、量子計算を実行するには、量子ビットのコヒーレンス時間が重要なファクターであることを学んだ。教授と入れ替わりに、高柳グループの田中社員が一年間、モイ教授のグループに滞在し、教授の SQUID を用いた量子ビット研究の立ち上げに協力した。帰国後、我々も3ジョセフソン接合を含む SQUID (超伝導磁束量子干渉計) を量子ビットとして働かせる研究に着手した。

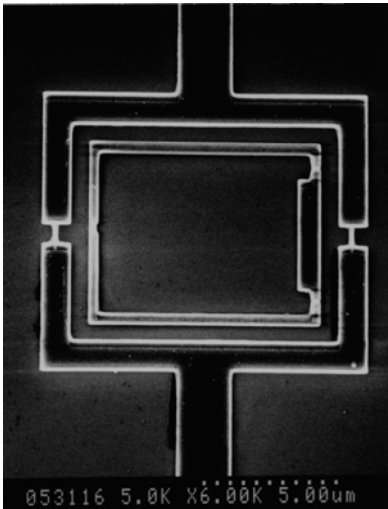


図1. 量子ビットと SQUID.

図1が作成した素子で、内側のループがアルミニウム製の量子ビットで三つのジョセフソン接合を含む。外側のループは量子ビットの状態を読み出すための、二つのジョセフソン接合を備えた DC-SQUID である。量子ビット用のループには右向きと左向きの超伝導電流が流れる状態があり(それぞれ $|\uparrow\rangle$ 、 $|\downarrow\rangle$ と表記)、この二つの状態から量子トンネル効果によって、新たに $|0\rangle = (|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle)/\sqrt{2}$ という基底状態と $|1\rangle = (|\uparrow\rangle - |\downarrow\rangle)/\sqrt{2}$ という第一励起状態が形成される。量子ビットは、この $|0\rangle$ と $|1\rangle$ を量子2状態とする量子力学的重ね合わせ状態を用いる。我々は、様々なフィルター挿入による雑音低減と、最適な測定点の発見により、外側の SQUID を用いて、1回の測定による基底状態と第一励起状態の読み出しに成功した(図2)。

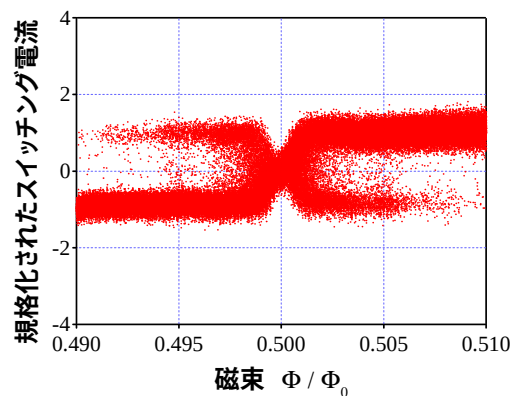
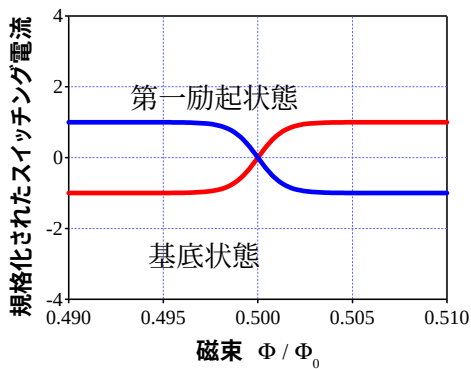


図2. 基底状態と第一励起状態の計算結果(左図)と実験結果(右図)。実験の小さな各点は一回の読み出し結果。

この時点では、まだ量子ビット動作(例えばラビ振動の観測)には成功していなかったが、この超伝導磁束量子ビットを研究対象とすることに、自信を深めた。全ての量子演算は基本的に2つの量子ゲート、即ち回転ゲートと C-NOT ゲートで実行できることが知られている。

回転ゲートはラビ振動の制御であり、C-NOT ゲートの本質は、2つの量子ビットの量子もつれ状態の実現である。そこで、この磁束量子ビットのラビ振動の制御と、2つの磁束量子ビットの量子もつれ状態の実現を目標として、実験家として、横浜国大の島津助教授、理論家として東工大の上田教授に参加してもらい、本 CREST プロジェクトを開始した。

量子ビットとして、SQUID から成る磁束量子ビットを選定した理由は、我々が元々超伝導素子の研究を通してその扱いや作成に慣れていたという理由以外に、以下の2つの理由が挙げられる。

- 巨視的なコヒーレンスが保たれる超伝導状態は、コヒーレンス時間という観点から有利である。
- 将来、1万量子ビットという規模の量子コンピューターを実現するには、集積製に優れた固体素子を用いた量子ビットが有利である。

《研究の実施とその成果》

(1) 多光子吸収遷移: 基底状態 $|0\rangle = (|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle)/\sqrt{2}$ と励起状態 $|1\rangle = (|\uparrow\rangle - |\downarrow\rangle)/\sqrt{2}$ の間には、巨視的量子トンネル効果によって、エネルギー分裂がおこる。このエネルギー分裂の分光実験に成功すれば、2つの状態の証明だけでなく、励起状態から基底状態へのエネルギー緩和時間を求めることもできる。そこで、我々はこのエネルギー分裂の分光実験にとりかかるため、希釈冷凍機温度における高速パルス測定系を立ち上げた。パルス測定では、量子ビット位置でのマイクロ波強度を増強する必要があったが、これはマイクロ波ラインのオンチップ化によって実現した。これによって、マイクロ波と量子ビットとのより強い結合が可能になり、量子ビットにおける1光子吸収だけでなく、多光子吸収遷移の観測に成功した。巨視的超伝導電流の重ね合わせ状態間での多光子遷移の観測は初の報告であり、理論グループとの連携により、実験結果をよく再現する結果が得られた。

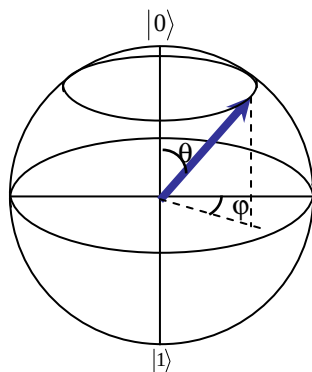


図3. 量子ビットのブロッホ球表現

(2) 位相偏移変調パルス法によるラムゼー縞観測: 基底状態と励起状態によって形成される量子力学的重ね合わせ状態は、図3のブロッホ球上の任意の点で表現できる。量子ビットの制御とは、この2つの角度 θ と ϕ の制御とも言える。 θ の制御は北極と南極の間の回転運動で、ラビ振動である。一方、 ϕ の制御は2つのマイクロ波パルスを用いた、ラムゼー縞と呼ばれる技法による。我々は、位相偏移変調された一対のパルスを用いれば、共鳴マイクロ波を用いたまま、離調を導入することなしにラムゼー縞の測定が可能であることを発見した。実際、この方法(位相偏移変調パルス法)を用いて、11 GHz 以上で高速に回転する量子ビットの自由歳差運動の観測することに

成功した。この方法は、限られたコヒーレンス時間という貴重な資源を有効利用する際に重要な技術である。

(3) 多光子ラビ振動の観測: 量子ビット直近の電磁環境の大きな改善によって、マイクロ波強度を増加させた強励起条件下でも量子ビットのラビ振動を観測できるようになった。これにより、1～4光子過程までの多光子ラビ振動の観測に成功し、マイクロ波強度の増強とともに、ラビ振動数が増加から減少へ転じる様子が観測された。これらは、理想的なベッセル関数に従うことが明らかとなり、上田氏による理論との一致は極めて良い。

(4) 磁束量子ビットと共振器との量子的結合: 原子物理や量子光学の分野得られた先駆

的な研究、例えばCavity QEDなどの成果を固体量子ビットの研究に取り込もうとする動きがある。それは既にこれらの領域で得られた豊富なノウハウを利用することによって、短いコヒーレンス時間の問題を解消しながら多量子ビット化を図っていかうという意図があるからである。我々も磁束量子ビットと外部LC共振器との量子的結合に成功した。具体的には青色サイドバンドと赤色サイドバンドでのマイクロ波光子の吸収観測に成功し、更に両サイドバンドでのラビ振動観測にも成功した。これは量子ビットと共振器という二つの量子二準位系の間の量子もつれ状態ができていることを端的に示す結果である。

(5) 真空ラビ振動

原子が上状態にあり共振器中に光子が0個(真空)の状態と、原子が下準位にあり共振器中に光子が1個の状態は、光子のエネルギーが原子二準位のエネルギー差に近い場合、これらの二状態間のコヒーレント振動が起こり、この現象は真空ラビ振動と呼ばれている(図4)。この場合、単一原子と単一光子は、いわゆるもつれた量子状態にあり、真空ラビ振動は、物質と光の量子もつれ実現のために必要不可欠な現象である。我々はこの真空ラビ振動を、上記のLC外部共振器と磁束量子ビットの間で実現した。時間領域での直接観測は、固体量子ビットでは初めてである。この成果は、共振器を介して、2つの量子ビットの量子もつれ状態の実現へ向けた大きな一歩となる。

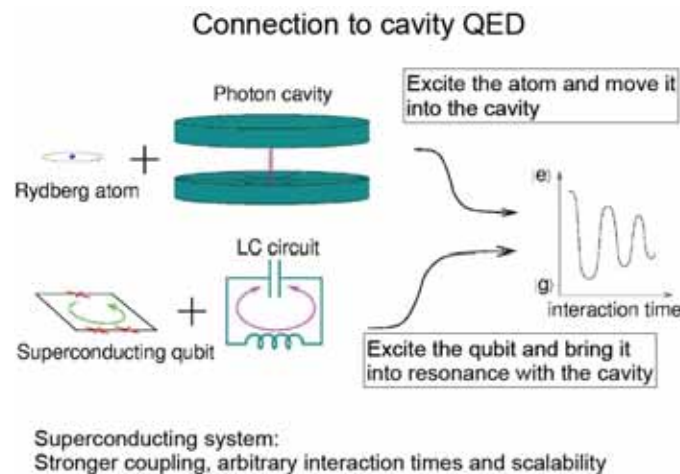


図4. 原子系と超伝導系での真空ラビ振動の対比

(6) 緩和時間の測定: 量子ビットのコヒーレンス時間を決定する物理的要因を探り当てることは、将来の量子コンピューター動作にとって、最重要課題の一つである。我々は、パルスエコー法によって、2つの緩和時間(エネルギー緩和時間 T_1 と位相緩和時間 T_2) を測定した。その結果、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を解明した。これから更に、我々の量子ビットのコヒーレンス時間をより長くする手がかりが得られ、量子もつれ動作に大きく貢献する。

以上、研究の構想、および研究の実施とその成果を、主に超伝導磁束量子ビットについて述べた。理論を担当した上田教授のグループは、以上の実験の理論面をサポートすると共に、「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」という担当研究名からわかるように、より広い領域での理論を展開した。この理論グループの研究構想は次章2の研究構想を、成果については、3の成果を参照されたい。

2 研究構想及び実施体制

(1) 研究構想

《研究開始時の目標》

超伝導磁束量子ビットの制御と、2量子ビットの量子もつれ状態の実現、を目標とした。超伝導磁束量子ビットの制御とは、ラビ振動によって、回転ゲート動作を実現することである。更に、ラムゼー縞制御などによって、ブロッホ球上の任意の動作点へ量子ビットを導くことである。2つの量子ビットを用いた量子もつれ状態の実現は、最も大事な CNOT-ゲート動作の基本となる。量子もつれ状態を実現するには、2つの量子ビット間のどのような相互作用を用いてもよいが、超伝導ループであるために、磁氣的な結合を用いることとした。

《5年間の研究計画と新しく生まれた目標》

初年度は、まず高速測定系の整備を行う。これは、ラビ振動を初めとする量子ビット制御には、さまざまなマイクロ波パルスを用いるため、量子ビットが外部雑音にも敏感なため、多くの雑音処理を行う必要がある。2年度目から、1磁束量子ビットの制御、具体的にはエネルギー分裂の分光、ラビおよび、ラムゼー縞による制御を行う。

3年度目から、量子もつれ回路の設計と作成に入る。なお当初、2量子ビットの結合には、量子ビットを構成する超伝導線を共有する方法や、ジョセフソン電界効果超伝導トランジスタを含む超伝導ループに2つの量子ビットを近接させる方法を考えた。後者では、トランジスタのオフによって、ループ全体が超伝導状態になり、磁氣的に2つの量子ビットがこのループを介して結合することになる。トランジスタをオンにすると、ループは切断され、2量子ビットの結合は切れる。この意味では理想的な結合と言えるが、超伝導トランジスタのオン・オフには大きなエネルギー散逸が伴い、これが量子ビットのデコヒーレンスの原因となることが判明したため、この方法をあきらめることになった。

かわって登場したのが、LC 外部共振器を介した量子もつれの実現で、これは量子光学の分野で、CAVITY-QED と呼ばれる手法を、固体超伝導素子に展開したものである。

この結合方法の開発、即ち、1量子ビットと外部共振器との量子もつれ状態実現の後、4年目以降、2つの量子ビットを、共振器を介してもつれさせる計画とした。

《研究グループ毎の役割分担》

NTT グループ

役割: 超伝導磁束量子ビットを用いた量子もつれの実現

概要: 3つのジョセフソン接合を持つ SQUID を量子ビットとして、高速低雑音測定系を立ち上げ、その量子振動(高速動作)の確認を行う。2つの SQUID の間の古典的相互作用について島津グループが得た成果を基に、2つの SQUID 間の量子もつれ回路を実現する。

横浜国立大学グループ

役割: 複数量子ビットの結合と操作に関する研究

概要: 2つの SQUID の間の古典的相互作用の研究を行う。磁氣的に結合した2個の量子ビットのつくる系の動作を実験的に調べ、量子もつれ状態の実証をめざす。量子論理ゲートの実現のためには、素子のパラメータを最適な値に調節することが必要と考えられるので、試料のジョセフソンエネルギーを制御できるような構造の単一量子ビットの動作の実証、及び、SQUID を用いて量子ビットの結合度を制御する方法についても研究を実施する。

理論グループ

役割: 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

概要: 実験結果を解釈するための実験系のモデル化と、それに基づいた新しい実験の提案。更に、測定系および駆動系の量子的振る舞いをも考慮に入れた固体キュービットの読み出しのモデル化を行う。

スライズドスピン状態の具体的な実現方法とその情報処理への応用についてはさまざまな観点から理論的な研究を行う。特に、単純な2順位キュービットとしてではなく、原子の集団的な量子状態も用いた情報処理の方法などについての探索を行う。

東京理科大グループ

役割:量子ビット用接合の評価

概要:SQUID による量子ビット状態の読み出し精度向上のため、NTT で作製されたジョセフソン接合特性をルーチン的に測定し、その結果を作製条件にフィードバックすることにより、高い最大超伝導電流を持ち、かつ特性の均質な接合を開発する。また、量子ビットと SQUID 間の結合度を測定し、高い相互インダクタンスを持つ系の開発を行う。

《理論グループの研究構想》

量子論における測定は通常、非可逆な過程であると考えられがちであるが、実際には可逆な測定というものも存在しうることがわかっている。そのような測定では、測定された系の情報がすべて保存されるため、逆測定という操作によって測定後の状態から測定前の状態を確率的に復元することができる。このような、系の情報や状態の復元といった観点から、可逆な測定は量子情報処理などへの応用が期待できると考えられるものの、まだそれほど当該分野で注目されているとはいいがたい。そこで、我々のグループは、この測定の可逆性に着目した、量子情報の理論的な研究を行った。具体的な研究目標は、次の3つである。

(A) 可逆な測定の実験可能なモデルの構築

我々の知る限り、可逆な測定は、実験技術の進歩にもかかわらず、まだ実験による実証はなされていない。その理由の一つとして、これまで知られていたモデルが実験的には困難なものであったということが挙げられる。そこで我々は、可逆な測定の実験的実現に向けた理論的なモデルを構築するということを行った。このモデルは、任意の大きさのスピン系と単純なイジング型の相互作用からなる非常に一般的なものであり、さまざまな物理系で可逆な測定の実験的実現を可能にするものと期待される。特に我々は、レーザー光を使った原子ガスのスピン測定の場合について議論した。

(B) 可逆性を応用した量子状態の修復

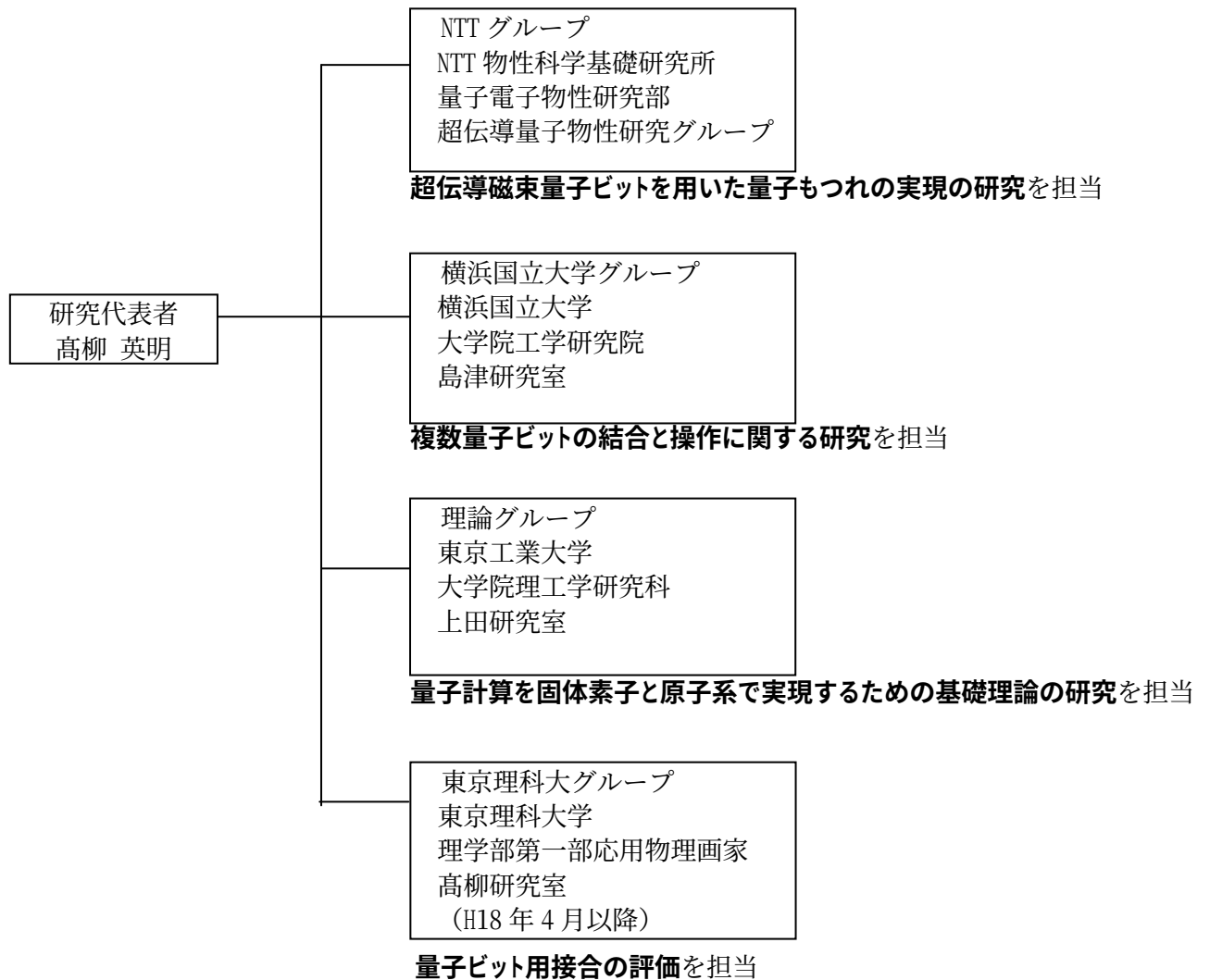
量子計算機実現への障害の一つとして、量子系の状態が、環境との相互作用による影響のために破壊されてしまうということが挙げられる。我々は、このような状態の変化を、可逆な測定の考え方に基づいた方法で修復することを考えた。すなわち、環境との相互作用は弱いものであれば、可逆な測定的一种と見なすことができるので、対応する逆測定を行うことで、元の状態を近似的に復元できることが考えられる。実際、猫状態のように壊れやすいとされている状態に対して解析した結果、忠実度（フィデリティ）と純粋度（ピュリティ）の両方を同時に上昇させ、状態の寿命を延ばすことができることを示した。このような結果は、量子計算機における誤り訂正としての応用が期待できる。

(C) 可逆な測定における情報量と状態変化の関係

従来の逆測定による復元方法では、測定前の状態を完全に復元できるものの、測定によって得られていた情報までも同時に消し去ってしまうことが知られている。これでは、折角行った測定の意味がなくなってしまう。そこで我々は、従来の逆測定の方法を改良し、復元が近似的になるものの、情報がさらに増加するような新たな復元方法を考案した。直観的には、状態を完全に復元すれば情報はなくなってしまうことから、近似的に復元するならば情報の大半が失われると考えられる。しかし、我々の復元方法では、情報は減少す

るどころか、むしろ増加させることができる。このような結果は、量子暗号における盗聴者の盗聴をより効率的なものにする可能性があると考えられる。

(2)実施体制



3 研究実施内容及び成果

3.1 超伝導磁束量子ビットを用いた量子もつれの実現(NTT グループ)

(1)研究実施内容及び成果

我々は、前記構想に述べたように、数ある量子ビットの候補の中から、微小な超伝導リングに、3個のジョセフソン接合を配置した SQUID（超伝導量子干渉素子）を採用した。これは、NTT が永年培ってきた 超伝導メゾスコーピックデバイスの作製技術、低温での低雑音測定技術の蓄積を活かせる研究対象であると判断したからである。この超伝導磁束量子ビットは、巨視的量子状態を用いて量子ビットを構成するため、原子、分子 等 極微領域の対象を直接制御する必要がない。また、ひとたび コヒー

レンズ時間の長い量子演算の基本素子作製に成功すれば、半導体微細加工技術を用いることが出来るため、量子コンピュータの真価が発揮される多量子ビットへの拡張を図る際に非常に有利であると考えられる。以下、実施内容、および成果を主に時系列的に述べることにする。

(A) エネルギー分裂の計測: 多光子吸収遷移の観測

図1の量子ビット用のループには3つの微小なジョセフソントンネル接合が含まれる。このループには右向きと左向きの超伝導電流が流れる状態があり(それぞれ $|\uparrow\rangle$ 、 $|\downarrow\rangle$ と表記)、この二つの状態から量子トンネル効果によって、新たに $|0\rangle = (|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle)/\sqrt{2}$ という基底状態と $|1\rangle = (|\uparrow\rangle - |\downarrow\rangle)/\sqrt{2}$ という第一励起状態が形成される。量子ビットは、この $|0\rangle$ と $|1\rangle$ を量子2状態とする量子力学的重ね合わせ状態で表現される。図3の球の任意の点 $|\psi\rangle = \cos(\theta/2)|0\rangle + \exp(i\phi)\sin(\theta/2)|1\rangle$ がこれに相当する。基底状態と励起状態の間には量子トンネル効果によって、エネルギー分裂が発生する。このエネルギー分裂は、マイクロ光子を用いた分光(光子の吸収と放出)によって、検出できる(図5)。この分光を実現するには、量子ビット位置でのマイクロ波強度を増強する必要があったが、これはマイクロ波ラインのオンチップ化によって実現した。

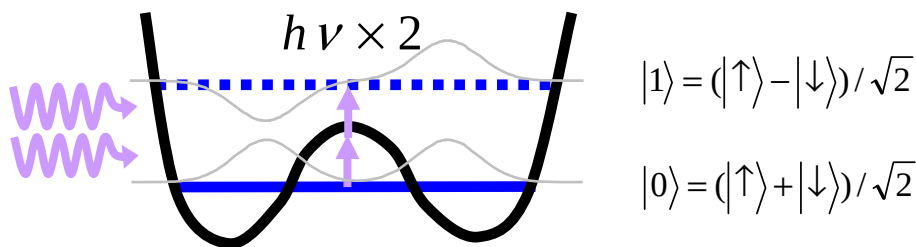


図5. 量子ビットの基底状態と第一励起状態間でおこるマイクロ波光子吸収による遷移。

エネルギー分裂の分光は通常単一光子の吸収によって行われるが、我々は多光子による遷移の観測にも成功した。図6に実験結果を示す。測定したのは SQUID のスイッチング電流の磁場依存性を多数回平均化したもので、マイクロ波を量子ビットループに照射すると、3個の光子遷移まで鮮明に観測できている。

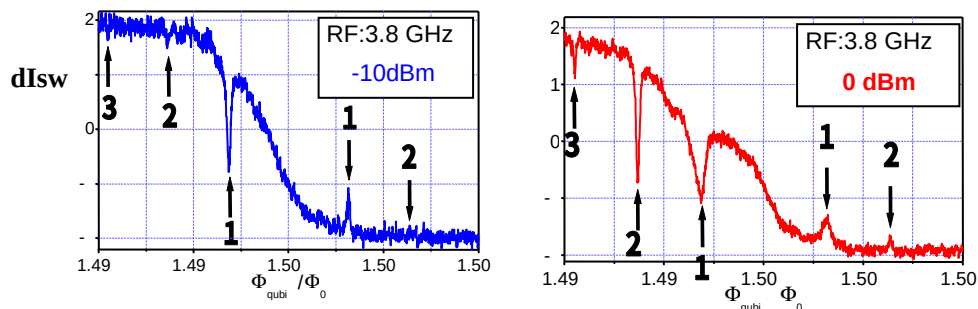


図6. スwitching電流の磁束依存性。量子ビットに照射した3.4GHzのマイクロ波の強度を増やすと(右図)、3光子吸収まで鮮明に観測された。

ところでこのような現象にかかわっている電子(クーパ対)の数は百万個のオーダーであり、それがコヒーレントに右向き(左向き)に流れている。そのいわば大きな流れをたった一個(あるいは複数個)のマイクロ波光子吸収で、逆転してしまうところに、巨視的コヒーレンスのおもしろさがある(図7)。吸収のところでは、量子ビットは巨視的な量子重ね合わせ状態

になっていることは言うまでもない。図6の吸収線幅を理論的にも解明することができ、光子に対して量子ビットがどのように応答するかを理解は大いに深まった。

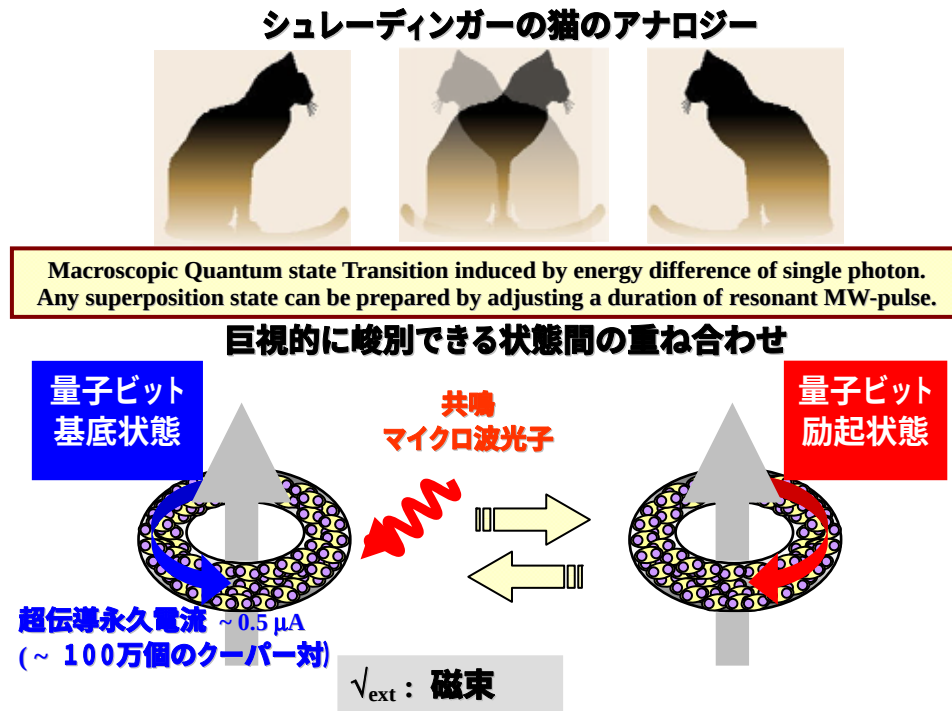


図7. 100万個のクーパー対のコヒーレントな運動の向きが、1光子吸収で変化する。

(B) 位相偏移変調パルス法による量子ビット自由歳差運動の高速測定

前述のように、量子ビットの制御とは、図3のブロッホ球上の2つの角度 θ と ϕ を制御すること

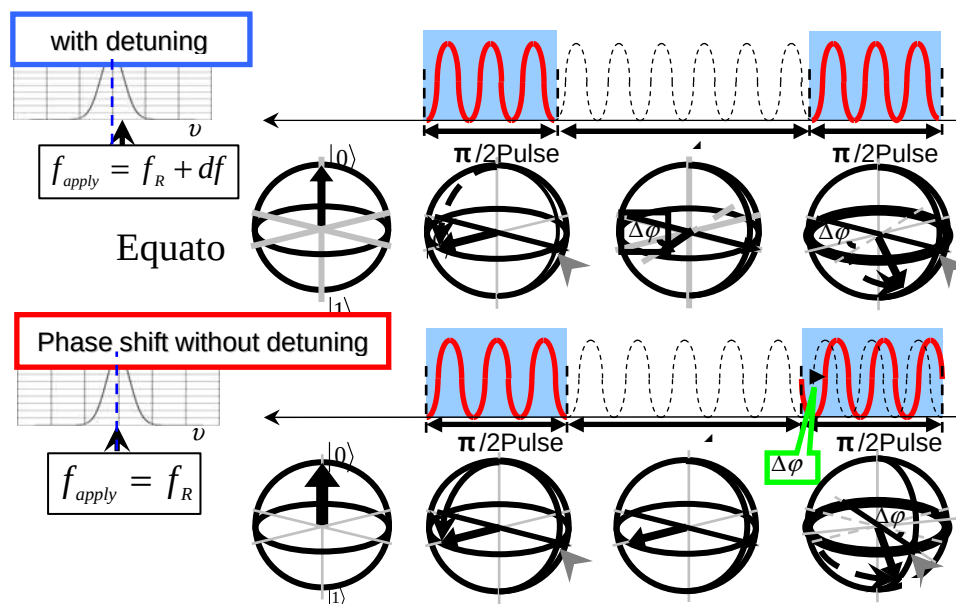


図8. ラムゼー縞を測定する2つの方法。従来法(上)と我々の新手法(下)。

である。 θ の制御は回転ゲートと呼ばれ、北極と南極の間の回転運動で、ラビ振動を用いる。一方、 φ の制御は2つのマイクロ波パルスを用いた、ラムゼー縞と呼ばれる手法による。我々は、外部磁場環境の改善を図ると同時に、懸案であった、量子ビット直近の電磁環境（インダクタンス、レジスタンス、およびキャパシタンス等のオンチップの微細電気回路要素）をようやく制御できるようになり、従来分光測定を阻んできた正体不明なマイクロ波吸収ラインを激減させることに成功した。そこで、ラムゼー縞の測定に取り掛かった。

従来のラムゼー縞の測定は、一番目の $\pi/2$ パルス照射の後、量子ビットが x - y 面内で回転するのを待った後、共鳴周波数からややずらした周波数の $\pi/2$ パルスを照射して、読み出しを行っていた(detuning method)。この離調法によるラムゼー縞の測定を行うには、少なくとも離調周波数の逆数程度より長いコヒーレンス時間が必要である。ところが、位相偏移変調された一対のパルスを用いれば、共鳴マイクロ波を用いたまま、パルスの相対位相偏移量に比例して、ブロッホ球表示された量子ビットの状態ベクトルの回転操作軸を x - y 面内で回転させることができる。即ち、二番目のパルスの周波数をずらすのではなく、意図的に位相シフトを与えた共鳴周波数の $\pi/2$ マイクロ波パルスを用いている。この方法を用いれば、離調を導入することなしにラムゼー縞の測定が可能である(図8)。実際、我々は、この方法を用いて、図9に示すように、11 GHz 以上で高速に回転する量子ビットの自由歳差運動をストロボスコピックに観測することに成功した。ちなみに従来法は、0.1GHz で測定されている。一例として、直行位相変調された一対の $\pi/2$ パルスを用いれば、1量子ビットの任意の回転操作が可能となる。これは、ブロッホ球の x -軸、 y -軸 を回転軸とする量子ビット状態ベクトルの任意角度の回転操作が可能となるためであり、その重要な応用としては、高速アダマールゲートの実現が挙げられる。この方法は、限られたコヒーレンス時間という貴重な資源を有効利用する際に重要な技術となるだけでなく、以下で述べる外部共振回路と量子ビットとの量子的結合を用いた多ビットゲート操作を実現する際にも必須な技術である。

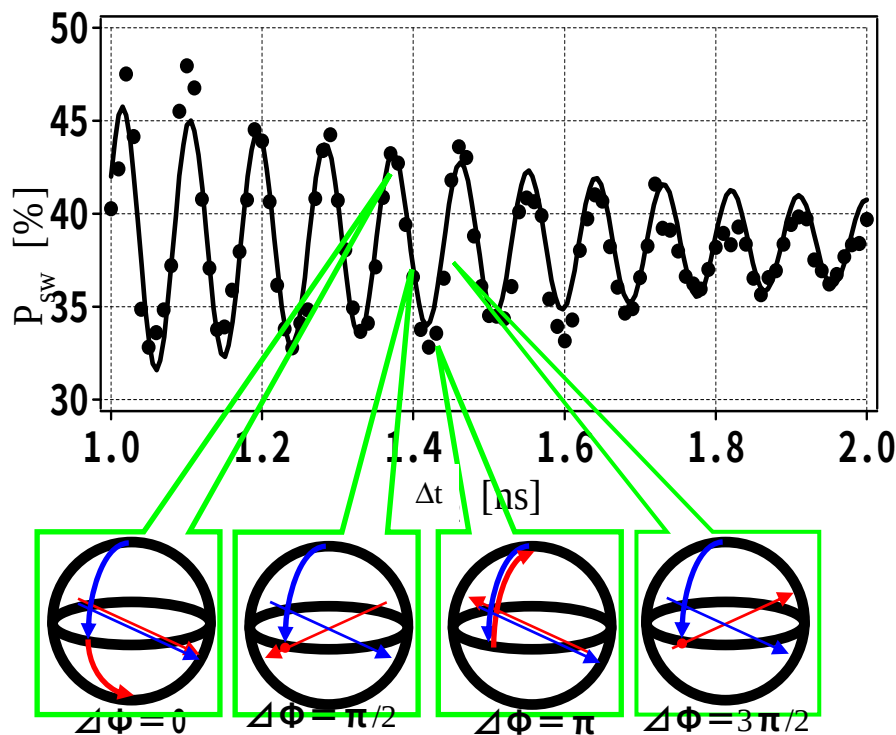


図9．位相シフト法によって観測されたラムゼー縞。

(C) 多光子ラビ振動、パラメトリック制御

マイクロ波ラインのオンチップ化、そしてオンチップフィルターを初めとする、様々な雑音処理技術の進歩により、マイクロ波強度を増加させた強励起条件下でも量子ビットのラビ振動を観測できるようになった。これにより、1光子を用いた従来のラビ振動に加えて、4光子過程までの多光子ラビ振動の観測に成功した(図10)。マイクロ波強度の増強とともに、ラビ振動数が増加から減少へ転じる様子が観測された。これらは、理想的なベッセル関数($J_1 \sim J_4$)に従うことが明らかとなり、理論グループ(上田教授)による理論との一致は、図11に示すように、極めて良い。結晶中で、同様な実験を行った場合を考えると、フォノンや他のモードが存在するため、狙った量子二準位系へのエネルギー移行がはるかに非効率的で、多光子過程を観測することは非常に難しいであろうと考えられる。改めて巨視的コヒーレンス状態の美しさを認識させられる

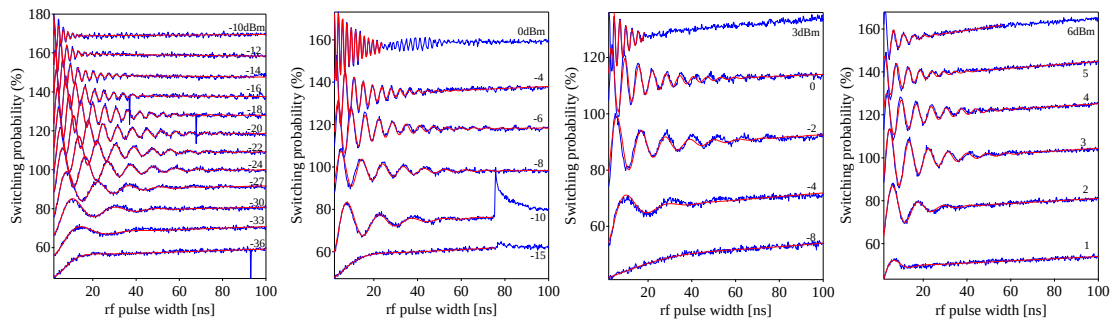


図10. 多光子ラビ振動の観測。左より右に、1, 2, 3, 4光子ラビ振動。

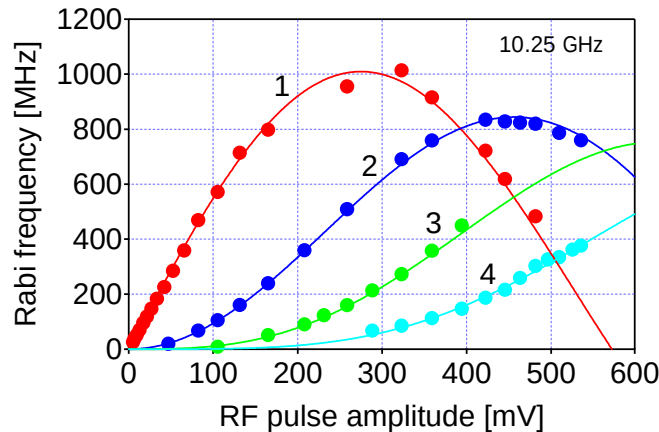


図11. 多光子ラビ振動における、振動数とマイクロ波強度の関係。実験は、理論値であるベッセル関数依存性を見事に示した。

以上の技術を駆使して、更に我々は遂に図12に示すように、異なる色(周波数)のマイクロ波光子2個を用いて、その和と差が2状態間のエネルギー差に等しくなるような状況で、鮮明なラビ振動の観測に成功した(パラメトリック制御)。このラビ振動数のマイクロ波強度依存性は、理論グループによって求められ、二つの一次のベッセル関数の積となることがわかった。実験はこの依存性をきちんと再現し、多光子ラビ振動だけでなく、パラメトリック制御に関する我々の理解は、飛躍的に高まった。

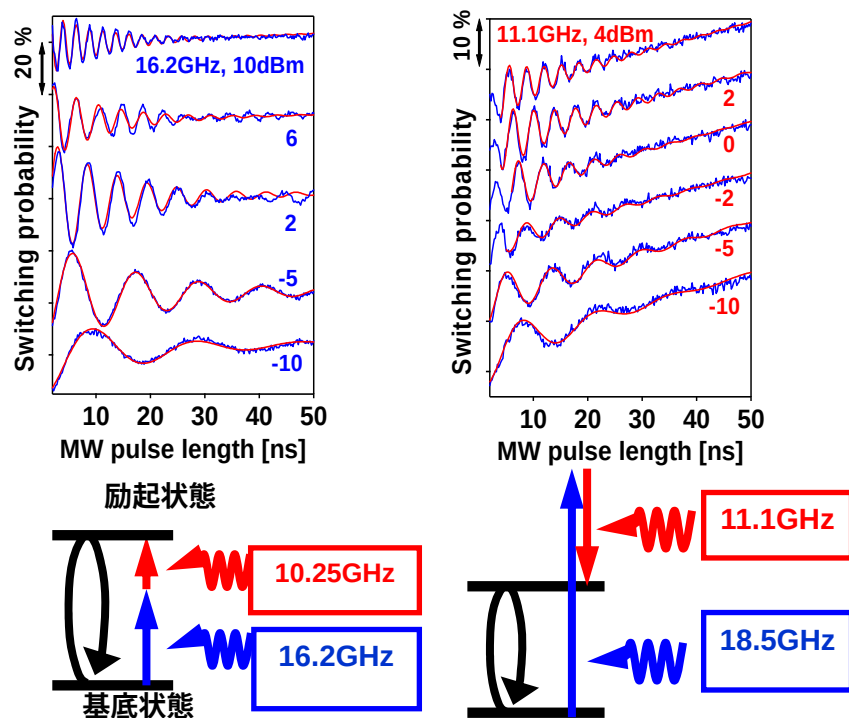


図12. 異なる2色（周波数）のマイクロ波の和周波、差周波を用いて観測された多光子ラビ振動。

(D) 外部 LC 共振器との量子もつれ生成

原子物理や量子光学の分野では、例えばボーズ・アインシュタイン凝縮を用いた量子操作や、共振器中に捕捉された原子やイオンを用いた量子ビットの実験など(Cavity QED)、先駆的な研究が進んでおり、固体量子ビットの研究もこれらの技術やアイデアを取り込んだ方向に自然と進みつつある。それは既にこれらの領域で得られた豊富なノウハウを利用することによって、短いコヒーレンス時間の問題を解消しながら多量子ビット化を図っているという意図があるからである。

2004年にYale大のグループは電荷量子ビットを作成したシリコン基板上に高いQ値を持つマイクロ波共振器(on-chip cavity)を作成し、電荷量子ビットを人工原子と見立てて、Cavity-QEDの実験に見事に成功した。人工原子としての量子ビットの持つ電気双極子モーメントが、通常の原子の約100倍も大きいため、原子と共振器の強い結合が可能となった。同時にDelft大のグループは、磁束量子ビットを用いて、やはり共振器との結合に成功した。

我々も、磁束量子ビットと共振器との量子的結合に成功した。図13に量子ビットと共振器の写真を示す。量子ビットと共振器の結合した系の状態を $| \text{量子ビット} \rangle | \text{共振器} \rangle$ と表すと、もつれ状態が形成されているために、通常の共振周波数より高い（よりエネルギーの高い）領域で $|0\rangle|0\rangle \rightarrow |1\rangle|1\rangle$ というマイクロ波の吸収が起こる。これを青色サイドバンド (blue sideband) と呼ぶ。また π パルスによって量子ビット単独の $|1\rangle|0\rangle$ という状態になるが、この後 $|1\rangle|0\rangle \rightarrow |0\rangle|0\rangle$ という通常の遷移とともに、 $|1\rangle|0\rangle \rightarrow |0\rangle|1\rangle$ というより低周波側で起こる遷移も観測される。これを赤色サイドバンド (red sideband) と呼ぶ。図14には通常の遷移 $|1\rangle|0\rangle \leftrightarrow |0\rangle|0\rangle$ による吸収ピーク以外に blue sideband と red sideband が鮮明に観測されている。更に両サイドバンドで、ラビ振動の観測にも成功した。これは紛れもなく $|0\rangle|0\rangle + |1\rangle|1\rangle$ や $|1\rangle|0\rangle + |0\rangle|1\rangle$ という状態が形成されていること、つまり量子ビットと共振器という二つの量子二準位系の間の量子もつれ状態ができていていることを示している。Yale大やDelft大の回

路では量子ビットと共振器とが超伝導線を共有しているのに対して、図からわかるように、我々の設計した回路では共振器と量子ビットの間に共有した配線はない。このように空間的に離れた位置にある二つの固体素子量子二準位系が示す量子もつれを観測したのは、我々が初めてであり、学問的意義は大きい。

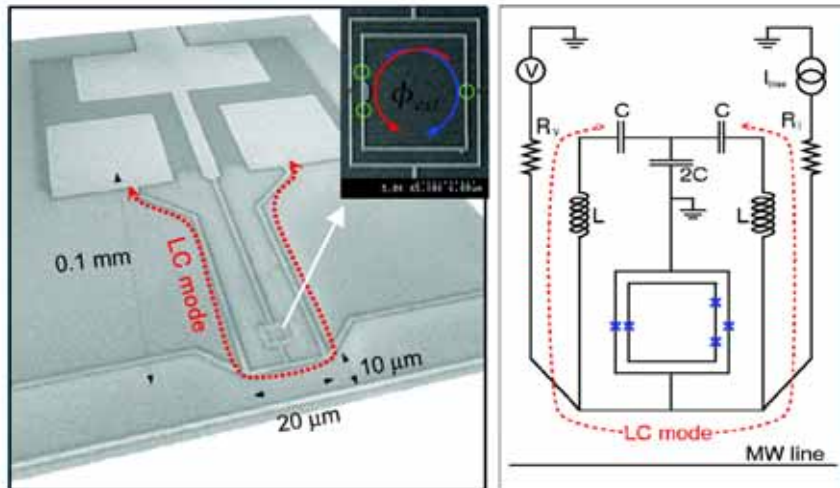


図13. 実験に用いたアルミニウム製の電気回路(左図)とその等価回路(右図)。拡大図は、量子ビット（内側の四角いループ）とその測定回路。

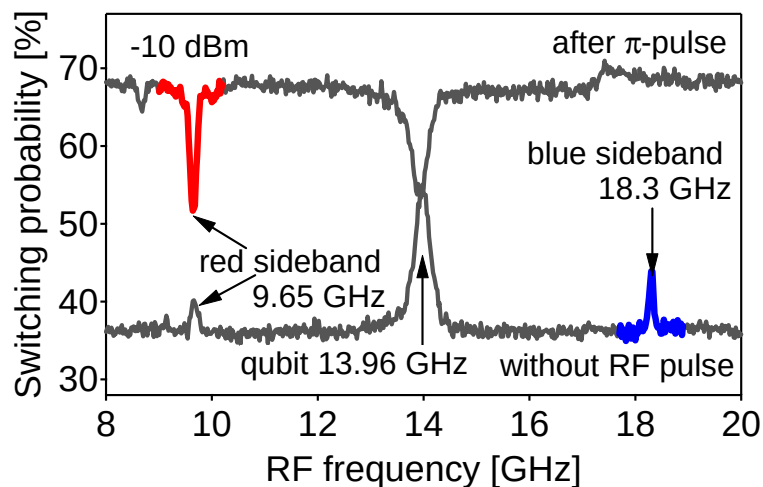


図14. 観測された青色、赤色サイドバンドにおける状態遷移。

(E) 真空ラビ振動の観測

光子(光の量子)は、量子の情報のやり取りに最も適していると見られており、光子を用いた量子もつれの実現と制御技術の確立への期待が高まっている。光子との量子もつれは、従来、原子と光子などマイクロな対象では実現可能なことが知られていた。図15に示すように、原子のエネルギーが上準位(エネルギーの高い状態)にあり空洞共振器中の光子が0個(真空)の状態($|e,0\rangle$ と表す)と、原子のエネルギーが下準位(エネルギーの低い状態)にあり空洞共振器中に光子が1個の状態($|g,1\rangle$ と表す)は、光子のエネルギーが原子の上下準位のエネルギー差に近い場合、光子と原子は量子もつれを生じ、これらの二つの状態 $|e,0\rangle$ と $|g,1\rangle$ 間をコヒーレントに振動することが知られている。

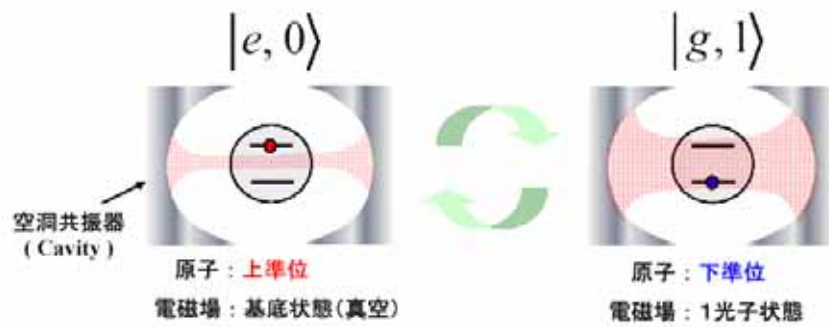


図15. 真空ラビ振動の説明。

この現象は、原子が上準位にあるときに電磁場が真空であることから、真空ラビ振動と呼ばれる。通常のラビ振動では、外部からマイクロ波を照射して、振動を励起する必要があるが、真空ラビ振動では、 $|e, 0\rangle$ の状態にすれば、このコヒーレント振動は自発的に始まる。

しかし、光は原子と通常は非常に弱くしか相互作用しないために、この現象を観測・制御するのは原子と光子というマイクロ系においてさえ容易ではなかった。前述のように、2004年頃から、超伝導磁束量子ビットの電流状態が、量子力学に特有の性質を示すことが次第に明らかになってきた。超伝導量子ビットは光と強く相互作用する性質を持つため、理論的には、原子の代わりに超伝導量子ビットを用いれば、比較的容易に真空ラビ振動が観測できると予想されていた。この現象を確認しようとする試みは、先の米国イェール大やオランダのデルフト工科大等で進められて来たが、これまで明瞭な真空ラビ振動を観測した例はなかった。

我々は、前述のように、インダクタンス (L) とキャパシタンス (C) とで構成される最も基本的な電気回路の一つであるLC回路と超伝導磁束量子ビットの量子もつれ状態の確認に成功しており、この系で真空ラビ振動の観測も可能であると判断した。実験では、LC回路が超伝導量子ビットと十分強く相互作用するよう、同一半導体チップ上に、微細加工技術を用いて作製した(図13)。さらに、極低温で測定することによって、LC回路中で励起される光子の数を極限にまで少なく抑えている。その結果、単一の光子と超伝導量子ビットが量子もつれ状態にあることを示す、真空ラビ振動を観測することに成功した。

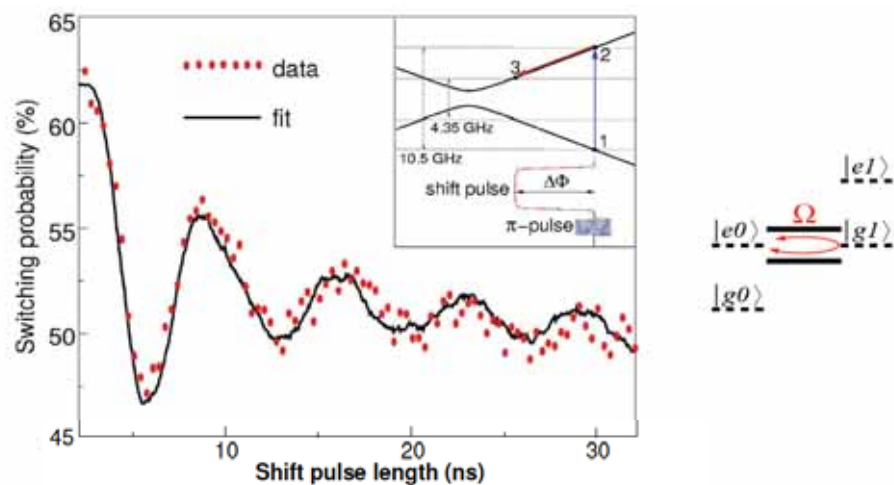


図16. 観測された真空ラビ振動(左図)と、複合系の準位模式図(右図)。

こうして数百万個の電子から構成されるマイクロアンペア程度の超伝導電流が、単一光

子と量子もつれ状態を形成可能であることが実証された。図16は、量子ビットとLC回路中の単一光子系で観測された真空ラビ振動のパターンである。量子ビットを透過させる磁束を素早く変化させ、量子ビットのエネルギー準位差と光子のエネルギーが共鳴条件にある時間（量子もつれ状態にある時間）をコントロールすることによって、測定に成功した。 $|e,0\rangle$ （量子ビット:励起状態, LC回路中光子数:0） $\leftrightarrow$ $|g,1\rangle$ （量子ビット:基底状態, LC回路中光子数:1）の2つの状態の間を規則正しく振動する（真空ラビ振動）様子が、観測されている。得られた真空ラビ振動の周波数は約 140 MHz であった。この値は、リドベリ原子を用いた場合の真空ラビ振動 50 kHz の約 2800 倍 にも達し、このことから、超伝導量子ビットは、原子に比べて約 3 桁以上も光と強く相互作用する系であることが実証された。

(F) エネルギー緩和時間、位相緩和時間の測定

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。我々は量子ビットの最適動作点近傍における緩和過程を精密に測定し、コヒーレンス時間を決定している緩和に関する理解を深めた。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を解明した。

図17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。試料は、前記、真空ラビ振動を観測したもの、基本的に同じである。エネルギー緩和時間(T_1)は、(b)に示す測定を繰り返して行ない、励起状態に準備された量子ビットを π パルスから読み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。

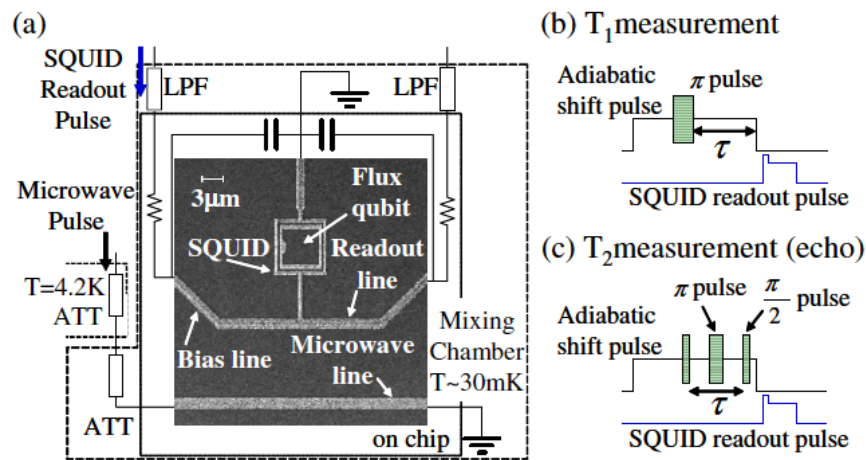


図17. (a) 測定試料の SEM 写真 (b) エネルギー緩和時間(T_1)測定のパルスタイミング模式図 (c) エコー法による位相緩和時間(T_2)測定のパルスタイミング模式図。

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回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18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、最近このような数 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19に示す。横軸のスケールは、-0.5

$m\Phi_0 \sim 0.5 \text{ } m\Phi_0$ ($\Phi_0 = h/(2e)$: 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($h \cdot 3.9 \text{ GHz}$)に相当する高周波ノイズを低減する必要がある。また、図17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。

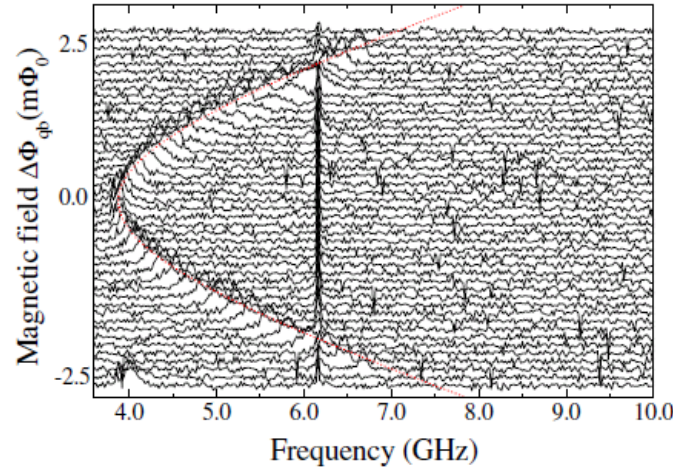


図18. 量子ビットのエネルギースペクトル位相緩和時間(T_2) のバイアス磁束依存性。

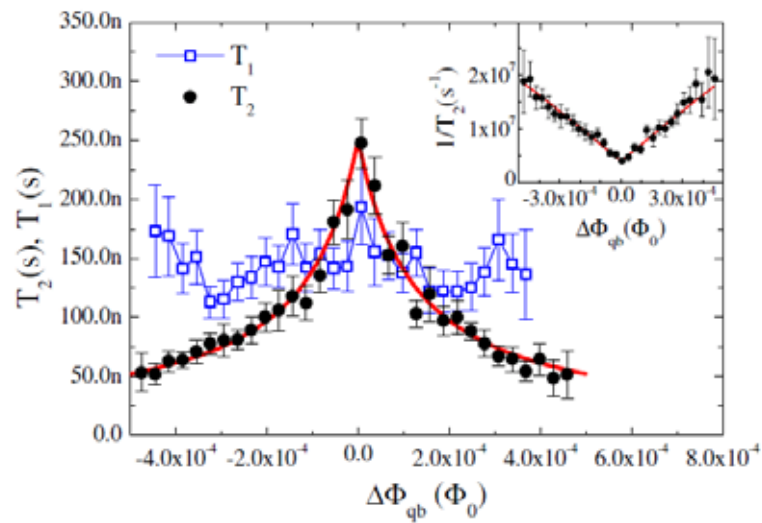


図19. エネルギー緩和時間(T_1) と エコー法。

(2)研究成果の今後期待される効果

物質と光の基本的な相互作用を光子1個のレベルで取り扱う共振器量子電磁力学 いわゆる cavity-QED は、従来 Q 値が大きいシングルモード空洞共振器中の光子と二準位原子を使って研究されてきた。この原子を超伝導量子ビットに、空洞共振器中の光子を超伝導回路中のマイクロ波光子に各々置き換えて同様な実験が可能だと理論的には予想されていた。本研究計画で得られた我々の実験結果[1]は、そのような具体例の最初の一つとなるもので、超伝導量子ビットとマイクロ波光子系の相互作用が、従来知られていた原子とマイクロ波光子の相互作用に比べて数千倍も強く cavity-QED 実験に不可欠ないわゆる強結合条件を比較的容易に実現できるため、基礎研究はもとより、応用の面から見ても大変魅力的な系である事を示している。量子もつれを自在に操ることを対象とする、このような、チップ上の超伝導回路を用いた共振器量子電磁力学実験 (circuit-QED) や、本研究計画で得られた超伝導量子ビットを含むジョセフソン量子回路の位相緩和やエネルギー緩和からの知見[2]、そして超伝導量子ビットのパラメトリック制御[3]等の技術は、今後、超伝導量子回路を用いたコヒーレンス時間が長い人工原子の作製や、その特性をさらに洗練されたものにし、量子計算等の量子情報処理へと進歩するために貢献できる成果であると考えられる。

関連論文

- (1) Vacuum Rabi oscillations in a macroscopic superconducting qubit LC oscillator system; J. Johansson, S. Saito, T. Meno, H. Nakano, M. Ueda, K. Semba, and H. Takayanagi, Phys. Rev. Lett. 96, 127006 (2006)
- (2) Dephasing of a superconducting flux qubit; K. Kakuyanagi, T. Meno, S. Saito, H. Nakano, K. Semba, H. Takayanagi, F. Deppe, and A. Shnirman, Phys. Rev. Lett. 98, 047004 (2007)
- (3) Parametric control of a superconducting flux qubit; S. Saito, T. Meno, M. Ueda, H. Tanaka, K. Semba, and H. Takayanagi, Phys. Rev. Lett. 96, 107001 (2006)

3. 2 結合量子ビットおよび量子ビット結合回路の研究（横浜国立大学 島津グループ）

(1)研究実施内容及び成果

われわれのグループでは、研究期間の中途に希釈冷凍機システムを導入し、量子ビット測定系を立ち上げた。測定系の製作、改良と平行して、古典的領域にある2ビット系の研究、量子的領域にある結合2ビットの研究、量子ビットの可変結合回路の研究などに取り組んだ。以下では主要な成果である、[1] 古典的領域にある結合2ビットの理論解析と実験、[2] 量子ビットの測定系の開発、[3] 結合度が固定された2個の非対称量子ビットの理論解析と実験、[4] 2ビットの可変結合器としての磁束輸送回路の実験、[5]可変磁束輸送回路で結合した2個の量子ビットの作製と測定について報告する。

[1] 古典的領域にある結合2ビットの理論解析と実験

結合した量子ビットの研究を行うための最初のステップとして、古典的領域にある結合2ビットの動作の理論解析と、実験を行った。本研究は、われわれのグループに希釈冷凍機システムを導入する前のものである。以下で示す測定結果は、 ^3He を使用して測定した結果と、NTT グループの希釈冷凍機を借用して測定した結果である。

(i) 理論解析

図20がここで対象とする結合2ビットの回路図であり、自己インダクタンス L をもつ2つの3接合ループが相互インダクタンス M によって結合しているものである。自己インダクタンスが無視できる場合は、量子ビットとして応用される3接合ループの量子力学的解析は比較的容易であるが、自己インダクタンスが無視できない場合は、解析は困難であり、1ビットについての量子力学的解析が昨年 T.L. Robertson らによって発表されている。(Phys. Rev. B 73, 174526(2006))

われわれは、後で示す実験に対応して、自己インダクタンスを厳密に考慮した場合の2ビット系の古典的動作を解析した。各ビットの自己インダクタンスが等しいものとする、各ビット内の磁束を磁束量子 Φ_0 で規格化したもの（magnetic frustration）は、

$$f_1 = f_{\text{ext}} + LI_1 / \Phi_0 + MI_2 / \Phi_0, \quad f_2 = f_{\text{ext}} + LI_2 / \Phi_0 + MI_1 / \Phi_0$$

と与えられる。ここで、 I_1, I_2 は各ビットの電流、 f_{ext} は外部磁場によって与えられる

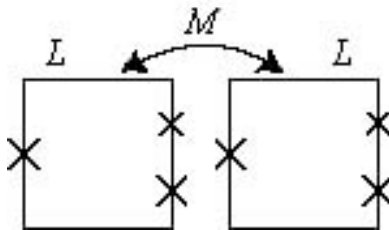


図 20 結合量子ビットのモデル。×印はジョセフソン接合を表す。

magnetic frustration である。系の全ポテンシャルエネルギーは、各ビットがもつジョセフソンエネルギー U_1, U_2 と磁気的エネルギーの和であるから $E_{\text{tot}} = U_1 + U_2 + L(I_1^2 + I_2^2)/2 + MI_1I_2$ となる。このポテンシャルエネルギーは、6個の接合の位相差 $(\gamma_1, \dots, \gamma_6)$ によって表すことができる。フラクソイドの量子化条件より、各ビットの3個の位相差については、 $\gamma_1 - \gamma_2 + \gamma_3 = 2\pi f_1$ 、 $\gamma_4 - \gamma_5 + \gamma_6 = 2\pi f_2$ の条件が成立するので、独立な自由度は4個である。 $(\gamma_1, \dots, \gamma_6)$ の関数としてポテンシャルを表す式を導き、極小エネルギーを与える位相差から、系の（古典的）磁束状態を求めた。(Y. Shimazu: J. Phys. Soc. Jpn. 73, 1914 (2004))

モデルのパラメータを、 $\alpha = 0.75$ （ジョセフソン結合エネルギーの比）、 $LI_c / \Phi_0 = 0.02$,

$MI_c/\Phi_0 = -0.09$ として計算した結果を図 2 1 に示す。図 2 1（上）は量子ビットの電流の和であるが、2 個のビットに等しく結合した DC-SQUID で磁束を測定した場合の磁束信号はこれに比例するものである。図 2 1（下）は系の全エネルギーを表す。横軸は、1 個あたりの量子ビットに与えられる外部磁束を磁束量子で規格化したものであり、外部磁場に比例するものである。

量子ビットの電流は外部磁束に対して、磁束量子の周期で反転するのであるが、相互作用のない単一ビットでは、外部磁束による frustration $f_{\text{ext}}=1/2$ において反転するのに対し、結合した 2 ビット系では、各ビットが異なる外部磁束で反転し、 $f_{\text{ext}}=1/2$ の付近では、磁気モーメントが反平行の状態が基底状態として実現することがわかる。まとめると、磁気モーメントの向きを上向きまたは下向きの矢印で表すことにすると、外部磁場により、量子ビットの状態を

$$|\downarrow\downarrow\rangle \Rightarrow |\uparrow\downarrow\rangle \text{ (or } |\downarrow\uparrow\rangle) \Rightarrow |\uparrow\uparrow\rangle$$

と変化させることができる。反平行状態で、いずれの状態が実現するかは、古典的には、ビットの非対称性、または磁場の不均一性により決定される。

(ii) 実験

試料の構成図を図 2 2 に示す。電子線リソグラフィと Al の斜め蒸着の手法で作製した。2 個のビット（3 接合を含むループ）の間の結合度を大きくするために、これらが 1 辺を共有し、超伝導細線のもつ Kinetic Inductance の作用で大きな相互インダクタンスをもつように設計した。2 個のビットのループ面積と巡回電流は等しい。両方のビットの作る磁束の和を、DC-SQUID を使って Flux-locked loop の方法で測定した。この測定方法は、広い磁場範囲での磁束信号を磁場によらず一定の感度で正確に測定できる点で、臨界電流測定よりも優れている。

ビットのループ面積、DC-SQUID と各ビットの相互インダクタンスなどの試料パラメー

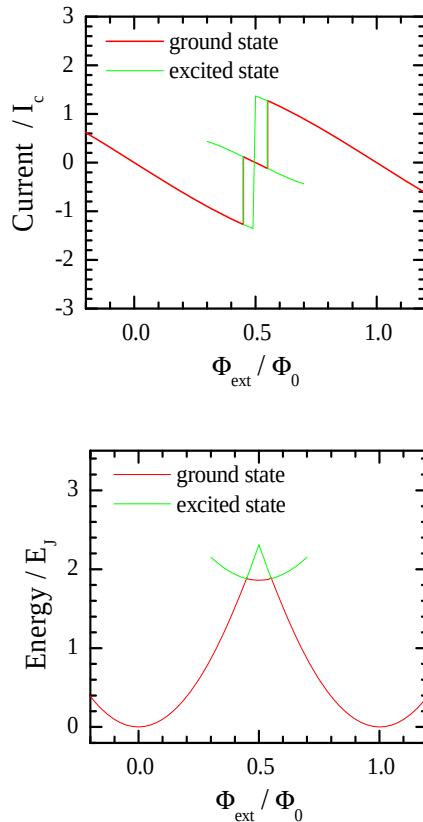


図 2 1 古典的な結合 2 ビットにおいて、各ビットを流れる電流の和と全エネルギー

タの異なるさまざまな試料を作製し、 ^3He を使用して 0.5 K で測定を実施した。どの試料についても、実験結果を理論的にほぼ再現することができた。図 2 3 は、ビットのループ面積、および、DC-SQUID と各ビットの相互インダクタンスが比較的大きく、大きな磁束信号が得られる試料についての、磁束信号の実験結果である。ビット間の結合の効果により各ビットが順番に反転している様子が、2 段のステップとして観測されている。ループ内の磁束が磁束量子 1 個分だけ変化する範囲での実験結果である。測定される磁束信号すなわち各ビットの巡回電流は磁束量子の周期をもつことに注意したい。

実験結果を定量的に説明するためには、試料のインダクタンスの評価が重要である。Geometrical inductance は試料の設計値から比較的精度よく見積もることができるものの、Kinetic Inductance はロンドン侵入長に依存するため、正確な評価には困難が伴う。われわれは、Kinetic Inductance を実測するための試料を作製し、実験結果からこれを精度良く評価することができた。見積もられたインダクタンスを使って理論計算を行った結果も図 2 3 の中に示している。各ループの巡回電流のみが未知のパラメータであるが、実験と理論の比較により、巡回電流を $1.7\mu\text{A}$ としたときに実験結果を定量的に再現することができる。図 2 4 は、希釈冷凍機温度 (12 mK) において DC-SQUID の臨界電流を外部磁場の関数として測定した結果である。臨界電流の上下の振動 (ジャンプ) は、1 個のビットが基底状態と第 1 励起状態の間で振動していること、すなわち、巡回電流の向きが反転し

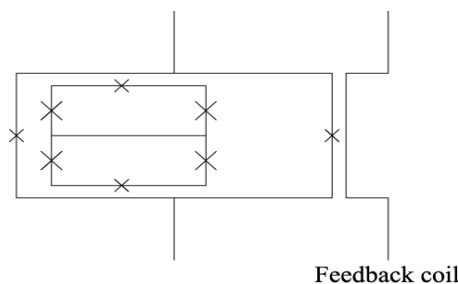


図 2 2 試料の構成図

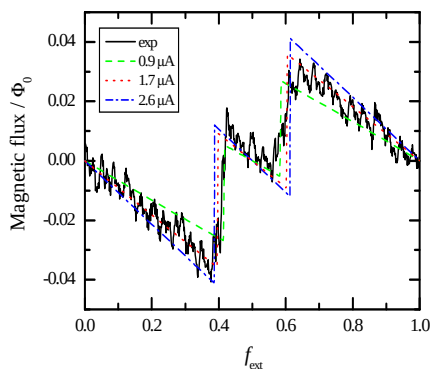


図 2 3 結合 2 ビットの磁束信号の実験結果および巡回電流の値を仮定したときの計算結果。

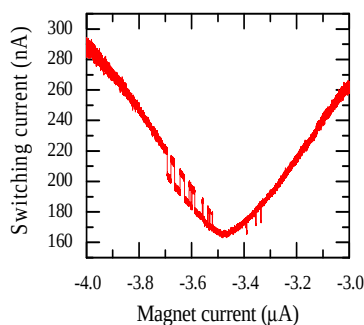


図 2 4 DC-SQUID の臨界電流の磁場依存性 (測定温度 12mK)。1 個のビットが、2 つの古典的状态の間を振動している。

ていることを表す。このような振動現象は、Flux-locked loop による測定では観測されず、臨界電流測定においてのみみられた。バイアス電流の振幅を変えて詳細に測定した結果、観測されているビットの状態のスイッチング（電流の反転）は、DC-SQUID と無関係に生じているものではなく、磁束を測定している DC-SQUID が電圧状態に転移する際に確率的に引き起こされているものであることがわかった。以上の結果から見積もられた巡回電流の値と接合面積から、この試料におけるジョセフソン接合のジョセフソン結合エネルギー E_J と帯電エネルギー E_C を評価した。これらの比は $E_J / E_C = 490$ となり、量子力学的動作が観測されている量子ビットの場合より 10 倍程度以上大きい。したがって、ここで測定した試料は十分に古典的領域に入っている系であると考えられる。本研究は古典的領域のものであるため、量子エンタングルメントの研究の前段階と位置づけられるが、従来の 2 量子ビットの測定例よりもはるかに結合度が大きい系を調べることで結合効果を過去になく明瞭に観測した点、超伝導細線のインダクタンスを正確に見積もることで磁束信号の実験結果を定量的に再現することができた点、Flux-locked loop の方法を使うことで、広い磁場範囲における磁束信号を初めて測定することができた点に大きな意義があるものとする。

[2] 量子ビットの測定系の開発

(i) 量子ビット測定のための希釈冷凍機測定系の開発・測定系の性能向上

磁束量子ビットの実験的研究のためには、希釈冷凍機でつくられる低温のもとでの測定が必要である。また、ナノ秒のスケールの短い電圧パルスやマイクロ波パルスを使っている輸送現象測定が必要であり、広い周波数帯域での測定が求められる。さらに、量子的性質はノイズに非常に敏感であるため、磁場ノイズや電圧ノイズを極度に抑えることが必要である。これらの条件をできるだけ満足する測定系をつくるのが、量子ビットの実験的研究の最初のステップである。われわれのグループでは CREST 研究期間の 3 年めである平成 16 年度に希釈冷凍機（Oxford MX-100）を導入し、それ以後測定系の製作を進めてきた。現在では、ひととおりの測定を行うことができるような測定系は完成しているものの、いまだに改善の余地は多く、今後も継続的に測定系の性能を向上させる予定である。現在の測定系は、多数の試料を測定するための比較的大きい試料室 1 個と、1 個の試料をパルス測定するための小型 Cavity 1 個を備えている。測定用のリード線としては、ツイストペアケーブル 48 本、同軸ケーブル 10 本を備えている。マイクロ波帯のノイズを除去するための自作の金属粉末型ノイズフィルターは、23 個が設置されている。磁場ノイズを低減するために、大型のパーマロイ磁気シールドをデュワーの外に設置している。

希釈冷凍機実験を反復する過程で、測定系の性能を向上するための知見をいくつも得ることができた。本報告では、そのうちで、磁場ノイズを減らすために大いに役立った二つの知見について述べる。

図 2 5 (a) と図 2 5 (b) は、NTT グループで作製された単一量子ビット試料をパルス測定した結果である。縦軸は DC-SQUID のスイッチング確率、横軸は DC-SQUID に加えるバイアス電流パルスの高さである。バイアス電流パルスが大きくなるにつれて、スイッチング確率は 0 % から 100 % まで増大する。両者の図では、磁場を印加するマグネットが異なる。(a) は、断熱真空容器の外につくした大型マグネットを使用した場合、(b) は、試料を内蔵した Cavity に直接とりつけた小型超伝導マグネットを使用した場合の結果である。比べると (b) の方が著しくノイズが小さいが、これは、(a) の場合は、軽量（約 300 g）の大型マグネットが長さ 2 m ほどの支持棒につくされているので、ゆっくりと振動しており、それが磁場ノイズをもたらしているためであると解釈できる。

次に、図 2 6 (a) と図 2 6 (b) の比較について述べる。これらの結果は、後述する磁束輸送回路の動作特性を DC-SQUID のスイッチング電流を通じて調べた結果である。(a) と (b) の違いは、(b) では鉛の超伝導磁気シールドを試料と超伝導マグネットを取り囲むように設置していることである。実験結果の詳細にはここではふれないが、(b) では著しくノイズが減少

し、2準位系としてふるまう磁束輸送回路が準安定状態にとどまっている様子が観測されている。この結果は超伝導磁気シールドの有効性を明瞭に示すものである。

図27は、超伝導磁気シールドを使った状態で、単一量子ビット試料をパルス測定した結果であり、量子ビットの信号 (Qubit step) が観測されている。この測定ではマイクロ波を外部から印加していないにもかかわらず、明瞭なピークやディップ構造がみられている。しかし、量子ビットのエネルギー準位に対応する共鳴ピークは、この試料についてのこれまでの測定では観測されていない。この原因は、この試料が古典的領域にあるためであろうと考えている。量子的領域にある試料で測定すれば、共鳴ピークの観測を通じてのエネルギー分光、および量子コヒーレンス振動の観測が可能であると予想している。NTTグループで量子コヒーレンス振動の観測された量子的領域の試料をわれわれの測定系で測定して測定系の性能を比較することを行いたかったが、時間の余裕がなく、いまのところそのような測定には到っていないことは残念な点である。

超伝導磁気シールドを使っている研究グループも多いので、われわれのグループで現在までにつくりあげた測定系が他のグループのものと比べて特に優れているということは難しいが、これまでに得られた測定系の性能向上のための知見は、他の研究者にとっても役に立つものと考えている。測定系の建設と性能向上に関しては、NTTグループの人々から

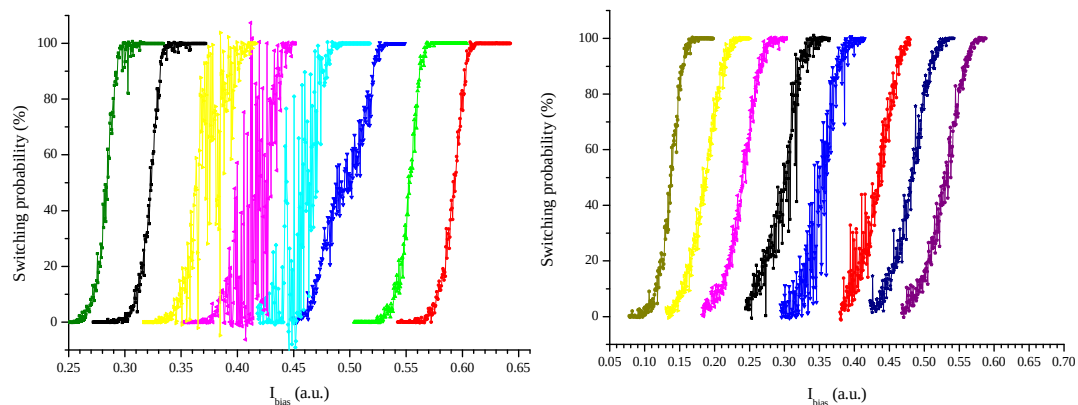


図25 単一量子ビット試料について、パルス測定による実験結果。縦軸はDC-SQUIDのスイッチング確率、横軸はDC-SQUIDに加えるバイアス電流パルスの高さである。

(a): 断熱真空容器の外につるした大型マグネットを使用、(b): 試料を内蔵したCavityに直接とりつけた小型超伝導マグネットを使用。

の多大な助言、援助に負うところが大きい。

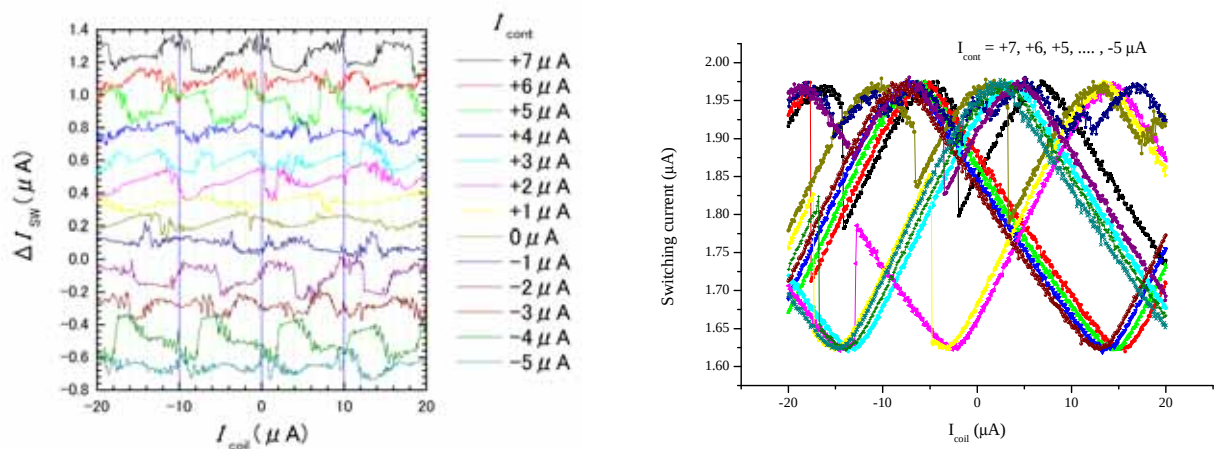


図 2.6 磁束輸送回路の動作特性。縦軸は DC-SQUID のスイッチング電流、横軸は入力コイル電流である。制御電流が異なる場合の結果を比較している。試料の構造は後述されている。
(a): 超伝導磁気シールドを不使用、(b): 超伝導磁気シールドを使用。

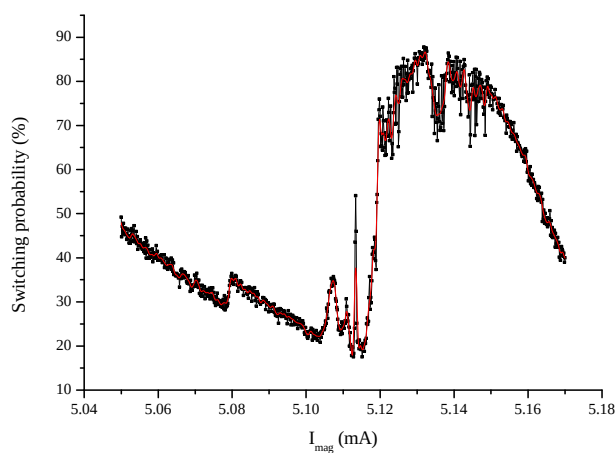


図 2.7 単一量子ビット試料の信号 (Qubit step)。
縦軸は DC-SQUID のスイッチング電流、横軸は磁場に対応する電磁石電流である。超伝導磁気シールドを使って測定した結果である。

(ii) スwitchング電流測定のための簡易なアナログ電子回路の開発

量子ビットのつくる磁束信号を観測するための標準的方法は、量子ビットと磁氣的に結合した DC-SQUID のスイッチング電流を測定するという方法である。一般にスイッチング電流は統計的にばらつくので、多数のスイッチング測定を行い、統計平均をとらなければならない。三角波で DC-SQUID のバイアス電流をスイープし、DC-SQUID が電圧状態にスイッチしたときのバイアス電流を ADC で読み込み、コンピュータで平均化処理が行うことで、通常は平均スイッチング電流が測定されている。われわれのグループでは、スイッチング電流の統計平均を測定するための、コンパレータ回路、単安定マルチバイブレータ、

サンプルホールド回路などで構成されるアナログ電子回路を開発し、実験に使用している。この方法は従来の方法と比べて、平均処理にコンピュータを必要としない、高分解能かつ高速の ADC を必要としない、非常に安価に回路を製作することができ使用方法も簡単であるなどの利点をもつものである。

(iii) 差動信号によるパルス測定系の開発

量子ビットの量子状態の測定には、ナノ秒～マイクロ秒のスケールの短いパルスを使うことが不可欠である。これまでの研究例では、同軸ケーブルを通して短パルスを伝達することで測定が行われてきたが、われわれは、平衡ケーブルであるツイストペアケーブルを試料まで配線し、差動パルス信号を使ってパルス測定ができるような測定系を製作し、試験を行った。この方法の利点はコモンモードノイズを著しく抑えることで低雑音の測定ができること、試料自体の受けるコモンモードノイズも減少するのでコヒーレンスを改善できる可能性があること、ツイストペアケーブルの配線は、同軸ケーブルの配線と比べて容易であり、かつ場所をとらないので、多数のケーブルの配線が比較的容易であることなどである。特に、多数のケーブルの配線が容易であることから多ビットの測定系に適しているものと考えられる。本研究では主に 2 ビット系を対象とするが、この場合でも制御線が複数必要である。それらの制御線に流す制御信号も差動信号としてツイストペアケーブルを通すことが一般に望ましい。

図 2 8 (a) は測定系の構成図である。シングルエンド出力のパルス発生器から出力されるパルス信号を、自作の差動ラインドライバで差動信号に変換する。高速の差動ラインドライバの集積回路 (MAX4447) を使うことで、立ち上がり時間が数 ns のパルスを作ることができた。差動信号をツイストペアケーブルで試料 (DC-SQUID) に印加し、電圧出力を別のツイストペアで伝達し、差動アンプ (NF SA-421F5) で増幅した。ツイストペアの長さは、入力側、出力側のそれぞれについて約 2 m である。100 Ω の抵抗を試料として室温でテストを行ったときの測定例も図 2 8 (a) 中に示す。このときのノイズレベルは 10 μ V 程度であり、DC-SQUID の電圧状態へのスイッチングを検出するために十分なレベルであることが示された。

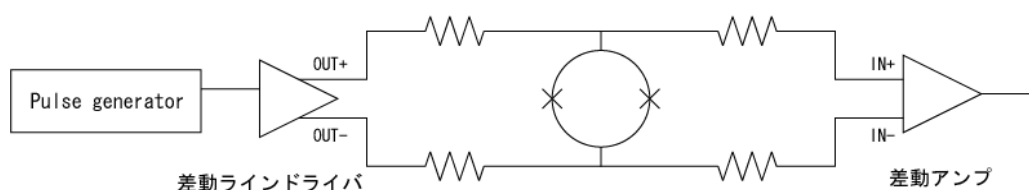


図 2 8 (a) 差動信号のパルスを使った測定系の構成図と電圧信号の測定例。観測されているノイズレベルは約 10 μ V である。

島津グループで作製した単一磁束量子ビット試料について、差動信号パルスを使った測定を行い、図 2 8 (b) のように、基底状態から第一励起状態への励起を示す共鳴ピークを観測することができた。用いたパルスは、60 ns のパルスに続いて、2.5 μ s の平坦部を有する形

状のものである。マイクロ波パルスは、DC-SQUID にパルスを印加する直前にループアンテナを使って試料に照射されている。ラビ振動の測定には到っていないものの、共鳴ピークを明瞭に観測できたことから、本測定系によっても量子ビットの量子状態の操作および測定が十分に行えるものと考えられる。図 2 8 (c) は、測定した単一磁束量子ビットのエネルギー分光の結果である。ただし、現在のところパルス測定データは十分に得られていないので、この図に示したデータは三角波による臨界電流測定で得たものである。図示された実験結果に対して理論曲線のフィッティングを行うことにより見積もられるエネルギー分裂量 Δ は、2.0 GHz である。前に述べたように、本測定系を用いることで試料の受けるコモンモードノイズが減少するので、従来の測定例より量子コヒーレンス時間が向上する可能性もあるものと期待している。

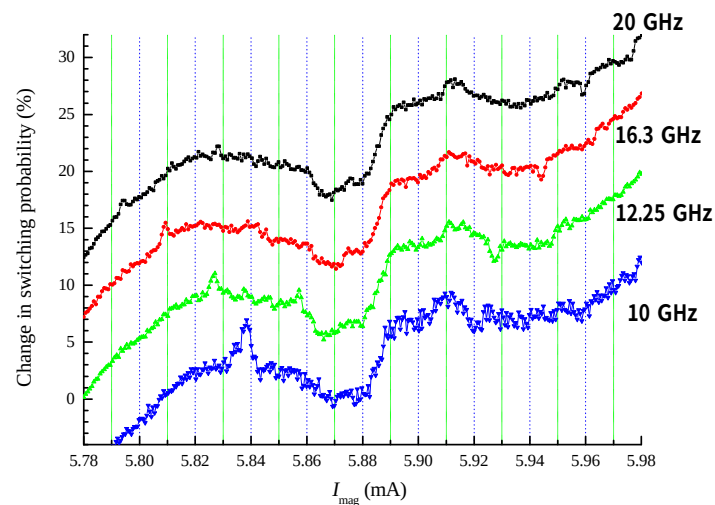


図 2 8 (b) 差動信号パルスを使って測定された、単一磁束量子ビットの共鳴ピーク。DC-SQUID のスイッチング確率から、線形のバックグラウンドを差し引いて表示している。横軸は電磁石電流であり、磁場に比例している。

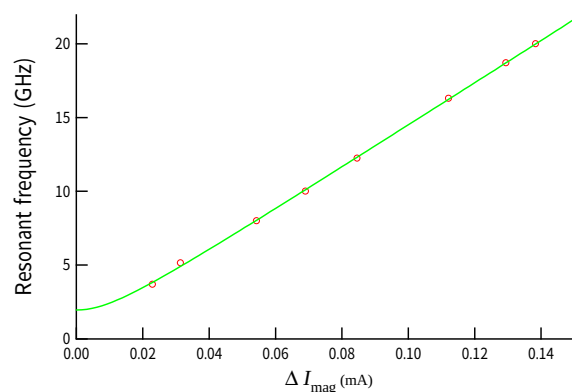


図 2 8 (c) 共鳴ピークおよびディップの位置から求めた、単一磁束量子ビットのエネルギー分散曲線。縦軸は共鳴周波数、横軸は共鳴ピークとディップの間隔を電磁石電流の差として表す。実線は理論曲線をフィッティングしたもので、縮退点でのエネルギー分裂量は 2.0 GHz である。

[3] 結合度が固定された2個の非対称量子ビットの理論解析と実験

量子的領域にある2ビット系の実験の第一歩として、結合度が固定された場合の試料を作製し、実験を行った。また理論的解析も行い、量子エンタングルメントの測定方法について考察した。図29が、NTTグループとの議論を通じて設計した試料の模式図である。2個の量子ビットが一辺を共有しており、固定された相互インダクタンスで結合している。これらの量子ビットの状態が1個のDC-SQUIDによって測定される。DC-SQUIDと量子ビットの間の相互インダクタンスを左右で異なるようにすると同時に、量子ビットを構成するジョセフソン接合の面積を左右で非対称にし、巡回電流も非対称になるようにした。この非対称性がこの試料の設計上の重要な点である。巡回電流が非対称であることによって、2個の量子ビットの識別度が増大し、 $|01\rangle$ と $|10\rangle$ の状態の区別が容易となると同時に、 $|01\rangle$ と $|10\rangle$ の状態の間の遷移確率が増大することが期待される。

このような2個の非対称な量子ビットの系に関し、対称にバイアス磁束を加えた場合と

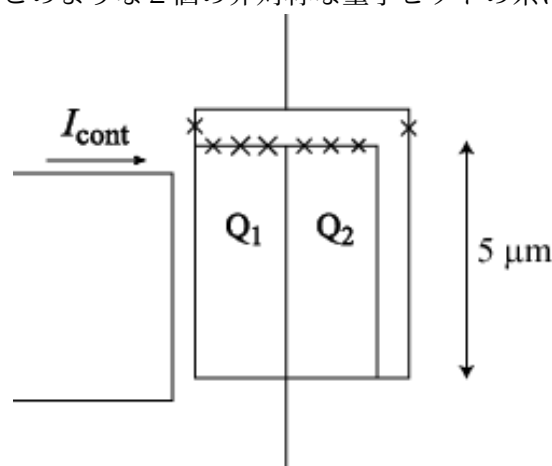


図29 固定された結合度をもつ、2ビットの試料の模式図。各量子ビットの巡回電流も非対称になるように設計し、試料を作った。磁束バイアスについても、制御電流によって非対称に与えることができる。

非対称にバイアス磁束を加えた場合の量子力学的動作を数値計算で調べた。図30は、対称および非対称にバイアス磁束を加えた場合のエネルギーレベル、図31は、非対称にバイアス磁束を加えた場合の磁束信号と遷移行列要素の計算結果である。これらの結果は、非対称にバイアスを加えることで、 $|01\rangle$ と $|10\rangle$ の状態の間のもつれあい状態（エンタングル状態）が比較的観測しやすくなることを示すものである。

図32は、作製した試料で観測された磁束信号の実験結果と理論計算の結果の比較である。この結果から、各ビットの巡回電流が、410nAと310nAであり、設計どおり非対称な巡回電流が流れていることが確認された。実験結果が磁束信号の熱平均の計算結果と一致しないことから、非熱的な励起が強いことが示唆される。この試料には片方の量子ビットと強く結合するような制御線を設けており、これに制御電流を流すことで、非対称な磁束バイアスを加えることができる。非対称に磁束バイアスをスイープしながらの測定も実施し、基底状態の磁束信号の測定を行うこともできた。

しかしながら、エネルギー分光の結果を得るところまでは、まだ実験を行っていない。エネルギー分光ができなかったのは、この試料を測定したときは、DC-SQUIDに電流パルスを加える高速測定系がまだ完成しておらず、低周波数の三角波によるスイッチング電流測定しかできなかったことが主な原因であると考えられる。本試料の測定後、高速測定系の立ち上げに時間を費やし、その後単一ビットの実験、後述の磁束輸送回路の実験を行なったので、この非対称量子ビットの実験は中断している。

われわれの理論計算の結果から、このような非対称量子ビットは量子エンタングルメントを調べる研究対象として優れていると考えられるので、今後、実験を行い、この系の量子力学的動作を追究したいと考えている。このような非対称量子ビットの研究はほとんど例がないので、新規な注目すべき結果が得られるものと期待している。

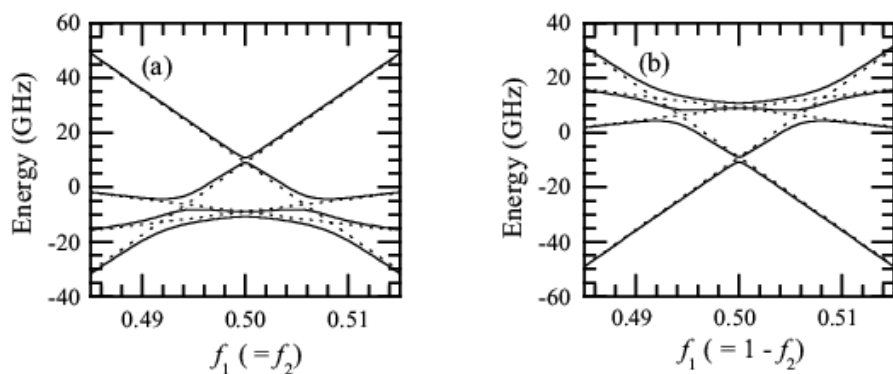


図30 非対称結合2ビットのエネルギーレベル。2ビット系であるので、4個の量子状態をもっている。各ビットに与えられる磁束を磁束量子で規格化したものを、 f_1 、 f_2 とする。
(a)：対称にバイアス磁束を加えた場合、(b)：非対称にバイアス磁束を加えた場合。

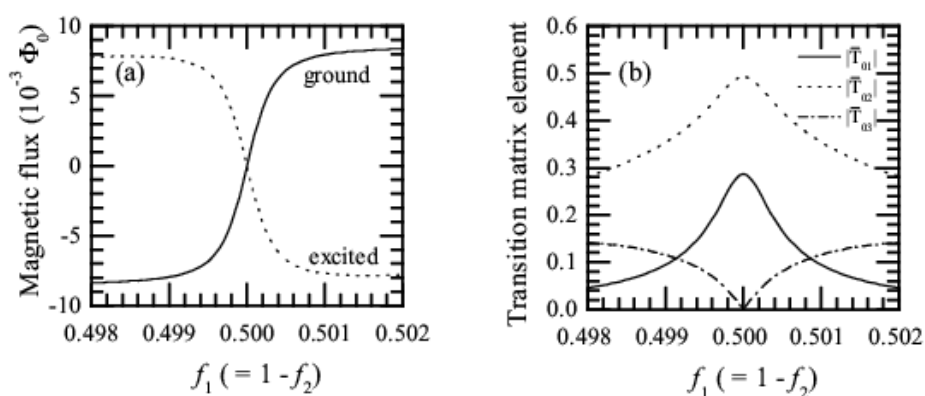


図31 非対称にバイアス磁束を加えた場合における計算結果。
(a)：基底状態と第一励起状態における磁束の期待値、(b)：基底状態から3個の励起状態への遷移行列要素。

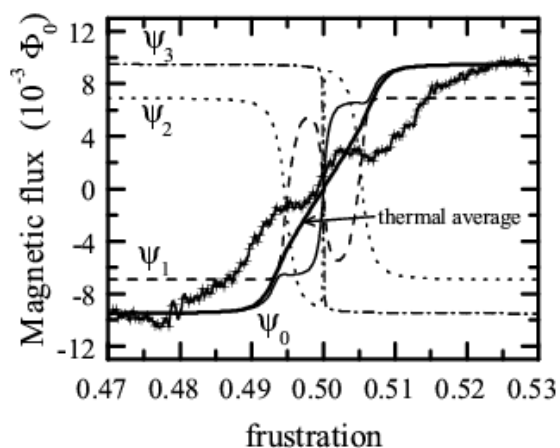


図32 非対称結合2ビットの磁束信号の実験結果と計算結果の比較。有効温度を100 mKと仮定したときのエネルギー固有状態のつくる磁束信号の熱平均が示されている。

[4] 2ビットの可変結合器としての磁束輸送回路の実験

操作性に富む2ビット論理ゲートの実現のためには、結合度を変化させることができるビット間の結合回路が必要であり、制御パラメータにより結合度を完全にオフにできることが非常に望ましい。磁束量子ビットに対するこのような結合回路として、DC-SQUIDを含む超伝導ループを用いることができることが、Mooij らにより早くから提案されている。図3-3がこの結合回路によって結合した3接合磁束量子ビットの模式図である。DC-SQUID内の磁束を制御ラインを流れる制御電流によって変えると、このDC-SQUIDの臨界電流が変化し、それによってビット間の結合度が変化する。各量子ビットの状態は、別の制御ラインを使い各ビット内の磁束を変化することによって制御される。われわれは、この結合回路自体の動作特性を実験的に調べ、理論計算とほぼ一致する結果を得た。この回路自体が、異なる磁束状態の間の量子コヒーレンスを示す系であり、磁束量子ビットとして応用できる可能性がある点でも興味深い対象である。

図3-3で示された結合回路の動作は、メインループとDC-SQUIDのそれぞれを貫く磁束 Φ と Φ_c によって記述することができる。それぞれの磁束に対する外部磁束の寄与を Φ_x と Φ_{cx} とし、これらを超伝導磁束量子 Φ_0 を使って無次元化したものを $\varphi=2\pi\Phi/\Phi_0$ 、 $\varphi_c=2\pi\Phi_c/\Phi_0$ 、 $\varphi_x=2\pi\Phi_x/\Phi_0$ 、 $\varphi_{cx}=2\pi\Phi_{cx}/\Phi_0$ とすると、系を記述する2次元ポテンシャルは
$$U(\varphi, \varphi_c) = \frac{\Phi_0^2}{4\pi^2 L} \left(\frac{1}{2}(\varphi - \varphi_x)^2 + \frac{1}{2}\gamma(\varphi_c - \varphi_{cx})^2 - \beta_0 \cos\left(\varphi + \frac{\varphi_c}{2}\right) \cos\left(\frac{\varphi_c}{2}\right) \right)$$
となる。ここで $\gamma=L/l$ 、 L と l はメインループとDC-SQUIDのインダクタンス、 $\beta_0=4\pi I_0 L/\Phi_0$ である。

$\gamma \gg 1$ のときは、系を実効的な1次元のポテンシャルで記述することができ、系の古典的基底状態はこのポテンシャルの最小値で与えられる。これによって外部磁束が与えられたときの巡回電流が決まり、磁束輸送特性を計算することができる。

図3-4は、メインループに与えられた外部磁束 $f_x=\Phi_x/\Phi_0$ を変化させたときの巡回電流 j のふるまいであり、制御磁束 $f_{cx}=\Phi_{cx}/\Phi_0$ を変えたときの様子を比較している。巡回電流は Φ_x と Φ_{cx} の両方に関して、周期 Φ_0 の周期関数となる。 f_x の関数としての振動の位相は f_{cx} によって変化し、 f_{cx} が半整数のときに $j=0$ となる。その前後では振動の振幅は非常に小さく、振動の位相が反転することがわかる。

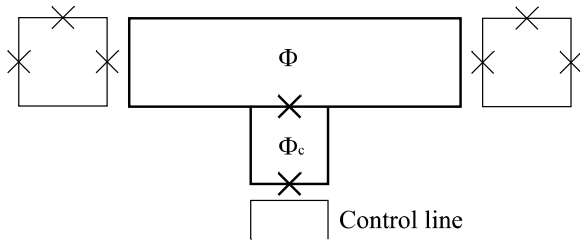


図3-3：可変結合回路で結合した磁束量子ビット（3個の接合を含む超伝導ループ）。DC-SQUID内の磁束を変えることで結合度を制御することができる。

可変結合回路の動作特性を調べるために、図3-5で示す構造の試料を作製し、実験を行

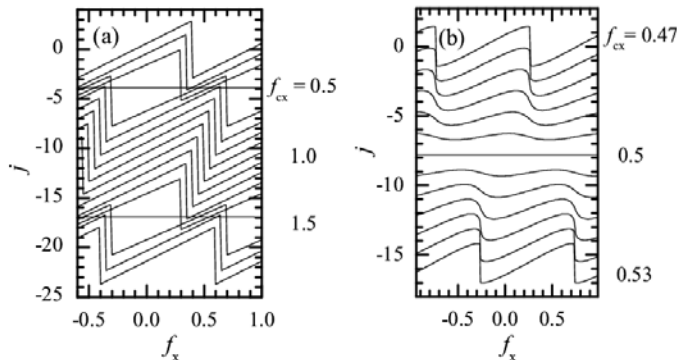


図3-4：可変結合回路の理論特性。制御磁束 $f_{cx}=\Phi_{cx}/\Phi_0$ の範囲は、(a) 0.2 から 1.8 および (b) 0.47 から 0.53 である。曲線を上下方向にずらして比較している。

った。入力コイルによってメインループに磁束を入力し、巡回電流が作る磁束を読み出し用 SQUID によって検出した。制御用 SQUID に与える磁束は制御ラインに流す電流によって作られる。制御ラインと SQUID の間の結合度を大きくすることにより必要な制御電流を小さくするために、これらは一部の辺を共有している。試料は電子線リソグラフィーで作製され、材質は Al である。微小ジョセフソン接合は斜め蒸着の方法で作製した。接合面積は約 $0.06 (\mu\text{m})^2$ で、臨界電流は約 500 nA であった。測定温度は約 20 mK である。

図 3 6 は、制御電流 I_{cont} に対する読み出し用 SQUID の臨界電流 I_{SW} の依存性である。臨界電流の変化は最大臨界電流と比べて小さいので、これが可変結合回路の巡回電流の変化に比例している。図示されている制御電流に対する周期性は、巡回電流が制御磁束 Φ_{cx} の関数として周期 Φ_0 で振動していることを示している。

図 3 7 は入力コイル電流 I_{coil} に対する I_{SW} の依存性であり、この回路の磁束輸送特性を表すものである。周期的な振動は、巡回電流が入力磁束 Φ_{x} の関数として周期 Φ_0 で振動していることを示し、この振動の位相が制御磁束によって変化していることがわかる。これらの特徴は前節で示した理論計算の結果と一致している。図 3 7 (b) は、制御磁束が磁束量子の半整数倍付近のときの実験結果である。このときは振動の振幅が小さく、ある制御磁束の前後で位相が反転しており、これらの特徴も理論計算の結果と定性的に一致している。理論計算で示された巡回電流の不連続な変化は実験ではみられないが、これは、主として磁場ゆらぎのためであると考えられる。後の実験で、磁場ゆらぎを大幅に低減した場合は、巡回電流の不連続な変化と系の準安定状態が観測できることがわかった。

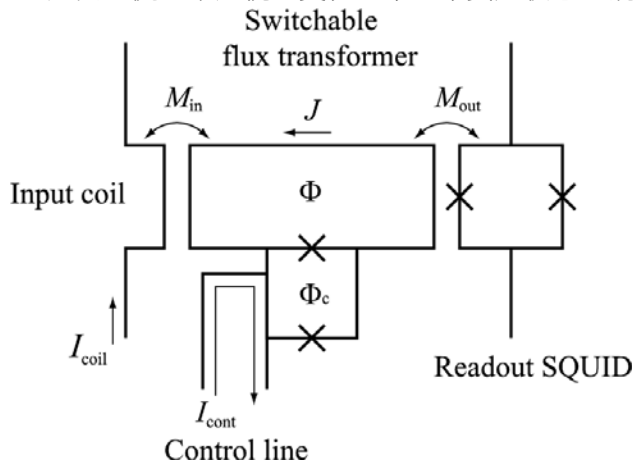


図 3 5：作製した試料の回路図。入力コイル電流 I_{coil} により磁束を入力し、制御電流 I_{cont} によって制御用 SQUID 内の磁束を制御する。巡回電流 J を読み出し用 SQUID によって検出する。

図 3 6 と図 3 7 で示された振動の周期から、制御ラインと制御 SQUID の間の相互インダクタンス、及び、入力コイルとメインループの間の相互インダクタンスを求めることができる。これらは、試料の構造から見積もられる相互インダクタンスと一致している。実験結果にみられる線形のバックグラウンドは、制御ラインと入力コイルが読み出し用 SQUID と弱く結合していることによるものである。

制御磁束が磁束量子の半整数倍付近の実験結果を詳細に調べると、振動が完全には消失していないことがわかった。これは制御 SQUID の非対称性の影響によって説明することができ、実験結果からこの試料における制御 SQUID の非対称性を評価することができた。実際の試料では非対称性をゼロにはできないので、振動の振幅を完全にゼロにすることはできないものの、図 3 7 からわかるように、微分特性は正および負の符号をとり得る。そして、ある動作点においては微分特性をゼロにすることができる。このことは、量子ビットの結合への応用上、非常に重要な特性であり、実質的にはこの回路をスイッチオフすることのできる結合回路として使用できることを示している。図 3 8 は、動作点として入力コイル電流を $-10 \mu\text{A}$ に固定したときの結合パラメータ（微分特性を有効相互インダクタンスで表したもの）の制御電流に対する依存性である。結合パラメータが、制御電流によって負から正に変化することが示されている。

以上の結果から、ここで調べた回路が制御可能な磁束輸送回路として動作することを実

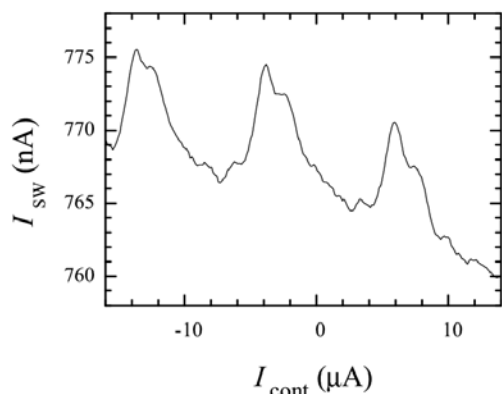


図3 6：制御電流に対する読み出し用 DC-SQUID の臨界電流の依存性。入力コイル電流はゼロである。

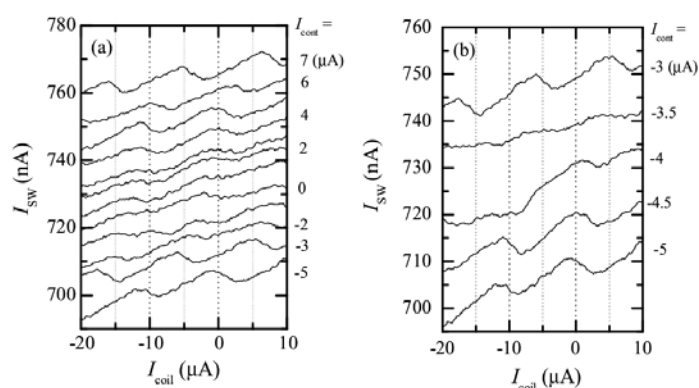


図3 7：入力コイル電流に対する読み出し用 DC-SQUID の臨界電流の依存性。いろいろな制御電流における結果を比較している。(b)は、制御磁束が磁束量子の半整数倍付近のときの結果である。

証することができた。この回路は、微分特性の符号を反転することができるため、実質的にスイッチオフすることのできる結合回路として使用できるという長所をもっており、磁束量子ビットの結合回路への応用に適しているものと考えられる。

Castellano らによって、DC-SQUID を利用した類似の変結合回路の動作特性が実験的に調べられている。彼らの調べた回路では、微分特性が常に正であり結合度をゼロにすることはできないことから、本研究で対象とした回路の方が優位性をもつものと考えられる。2 個の量子ビットの間の可変結合器として、第3の量子ビットを巧妙に用いることができることが最近 NEC のグループによって示されたが、これと比較すると、本研究で対象とした回路は単純であるだけに作製、操作が容易であり、かつ適用範囲が広いものと考えられる。

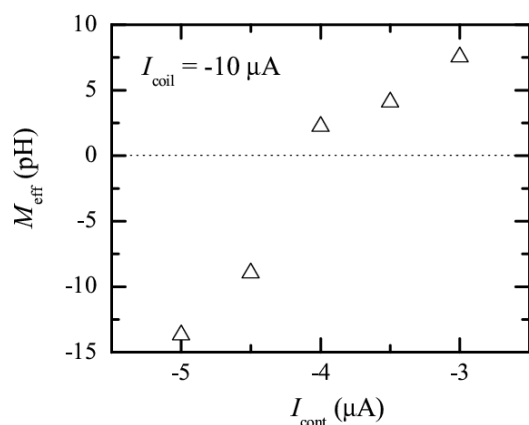


図3 8：入力コイルと読み出し用 DC-SQUID の間の有効相互インダクタンス。動作点を $I_{\text{coil}} = -10 \mu\text{A}$ としている。このパラメータは図3 7で示された磁束輸送特性の微分特性に対応している。

[5]可変磁束輸送回路で結合した2個の量子ビットの作製と測定

前項で調べた結合度を制御することのできる磁束輸送回路の有効性を実際に複数の量子ビットに適用して調べるために、この磁束輸送回路で結合した2個の量子ビットの試料を作製し、測定した。図39は、作製した試料の回路図である。2個の同一のパラメータをもつ量子ビットを1個のDC-SQUIDで測定している。2個の量子ビットの信号を区別するために、量子ビットとDC-SQUIDの相互インダクタンスを、比が1.6程度の違う値となるように設計した。左の量子ビットに磁氣的に強く結合する制御線を設け、この制御線に流す制御電流と外部から印加する一様磁場によって、各ビットに与えられる磁束を独立に制御することができる。2個の量子ビットは、磁束輸送回路で結合している。この磁束輸送回路の動作点は、磁束輸送回路を構成する2つのループ内の磁束で決定されるので、これらを与えるために、2個の制御線が設けられている。DC-SQUIDの特性を測定するための2本のリード線と合わせて合計8本のリード線を使用する構造である。

この試料をフォトリソグラフィーと電子線リソグラフィーの手法で作製し、測定を行った。量子ビットの面積の異なるいくつかの試料について測定したが、後で示す実験データは、比較的大きいサイズの量子ビットで得られたものである。この試料については、量子ビットのループ面積は $850\text{ (}\mu\text{m)}^2$ 、DC-SQUIDのループ面積は $2300\text{ (}\mu\text{m)}^2$ である。量子ビットのジョセフソン接合の接合面積は、 $0.075\text{ (}\mu\text{m)}^2$ と $0.075\text{ (}\mu\text{m)}^2$ であり、面積比は $\alpha=0.8$ である。後で示すように、接合の帯電エネルギーとジョセフソン結合エネルギーの値から、この試料は十分に量子力学的な動作が期待される領域にあるものと考えられる。

図40は、20 mKで測定された、DC-SQUIDのスイッチング電流の磁場依存性である。スイッチング電流は、前に説明した自作電子回路を使用して、500 Hzの三角波でバイアス電流をスイープして測定した。中央付近に、小さくステップが見えるが、このステップを明らかにするために、線形のバックグラウンドを引いて示したものが図41である。矢印で示す位置に高さの異なる2段のステップが見えるが、これらのステップが2個の量子ビットの巡回電流の反転を示すものである。制御電流によってこれらのステップの位置が一方方向に変化することも示されている。図42は、量子ビットの磁束信号を定量的に解析す

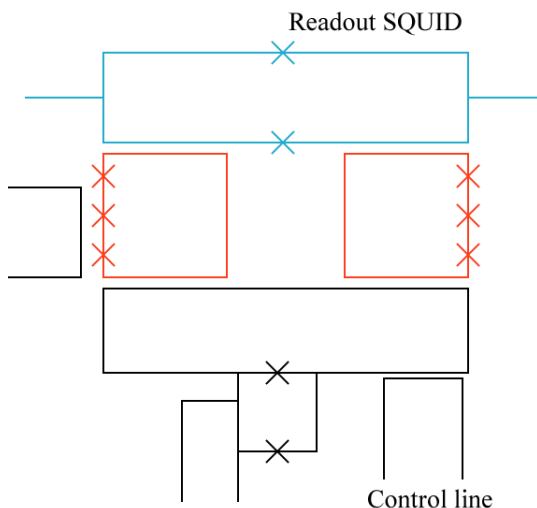


図39 磁束輸送回路で結合した2個の量子ビットの試料の回路図。1個のDC-SQUIDにより、2個の量子ビットの状態を測定する。

るために、DC-SQUIDの特性に由来する非線形なバックグラウンドを引いた結果である。この結果から各ビットのつくる磁束信号の大きさを定量的に見積もることができる。その値から、量子ビットの巡回電流が約 $0.30\text{ }\mu\text{A}$ であることがわかった。ステップの位置すなわち量子ビットの巡回電流が反転する位置を、図41の結果をスムージング後に微分した曲線のピーク位置をフィッティングすることにより求めた。その結果を図40に示す。各ビットが反転する位置は、制御電流に対して線形に変化し、その係数が制御線と各ビットの相互インダクタンスによって決まっている。この結果から、相互インダクタンスが 1.5 pH と

18 pH であることがわかる。これらの値は試料の寸法から見積もられる値とほぼ一致している。

求められた巡回電流の値と接合面積からジョセフソン結合エネルギー E_J と帯電エネルギー E_C を評価すると、 $E_J = 150$ GHz、 $E_C = 6$ GHz となり、これらの値から、この試料は十分

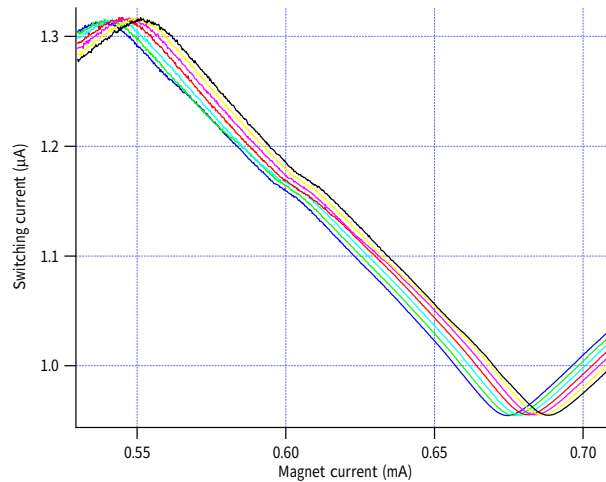


図4.0 DC-SQUID のスイッチング電流の磁場依存性。制御電流を $-10\text{ }\mu\text{A}$ から $+5\text{ }\mu\text{A}$ まで $2.5\text{ }\mu\text{A}$ おきに変えたときの結果を比較している。

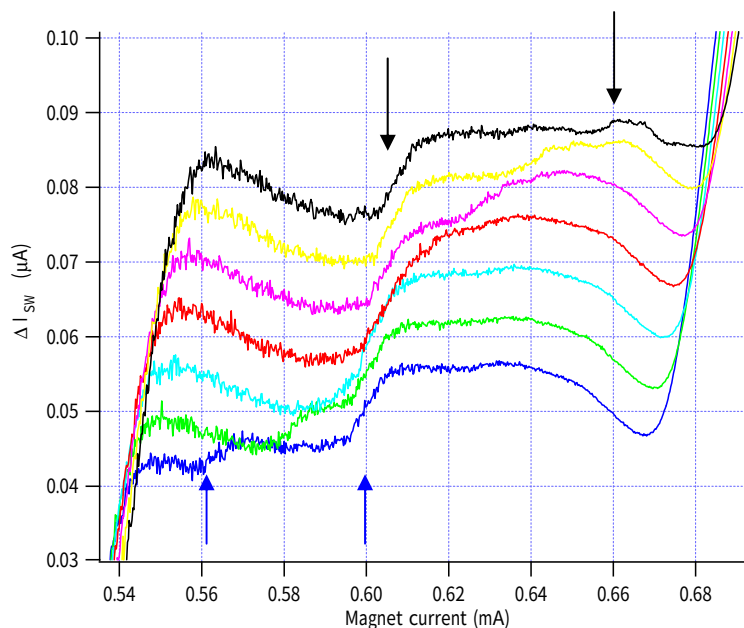


図4.1 図4.0の結果から、線形のバックグラウンドを引いた結果。矢印で示す位置にある2段のステップ（高さは異なる）が、2個の量子ビットの反転を示すものである。

に量子的領域にあることが期待される。後で述べるように、共鳴ピークおよび量子コヒーレンス振動の観測には、まだ到っていないが、この試料の今後の測定では共鳴ピークが観測できるものと期待している。

量子ビットの間の結合度または相互インダクタンスの大きさは、原理的には、図4.3に示されるステップの位置を示す2直線が交差点の両側でもつオフセットの値から評価することができる。しかしながら、ステップがブロードであるために、ステップの位置の測定精度があまり高くないため、小さな結合度をこの結果から見積もることはできない。図4.2の結果からは、相互インダクタンスが約20 pH程度以下であることがわかるのみである。磁束輸送回路の結合度を制御し、結合度が変化することを観測することをひとつの目的としているが、結合度は数 pH 以下であると見積もられるので、今回のステップ位置の測定結果だけからそれを観測することは不可能と考えられる。ただし、この試料では巡回電流が

約 $0.30\ \mu\text{A}$ と比較的小さかったが、より大きな巡回電流の量子ビットを使えば、ステップ位置の測定からも、数 pH のビット間の相互インダクタンスを評価することも可能である。

マイクロ波による共鳴ピークが観測できれば、共鳴ピーク幅は非常にシャープ（通常、磁束のスケールで磁束量子の 1 万分の 1 程度）であると期待されるので、ピーク位置の変化を詳細に調べることで、今回の試料においてもビット間の結合度を測定し、可変結合回路によってそれがどのように変化するかを測定することができるものと考えられる。しかしながら、この試料の測定はまだ 1 回しか行っていないが、そのときは共鳴ピークを観測することはできなかった。その理由は、この実験のときはツイストペアを使った 2 端子測定で測定していたので、パルスバイアスを使った測定を行うことができなかったためである。本試料では、DC-SQUID が比較的大きく、DC-SQUID のバイアス電流が量子ビットに与える影響が大きいため、共鳴ピークの観測には、パルスバイアスによる測定が必要と考えられる。次回以後の測定では、パルス測定による共鳴ピークの観測を実施し、その結果に基づいてビット間の結合度を測定し、量子ビットに対する可変磁束輸送回路の動作を実証できるものとする。さらに、2 ビット系における量子コヒーレンス振動の観測、2 ビットゲートの動作の実証などに研究を発展させる予定である。

2 ビットゲートの実現を念頭においた 2 ビット系の実験の成果が、最近いくつかのグループから報告されているものの、本研究で対象としている磁束輸送回路で結合した 2 ビット系の実験はほかにない。この研究を続行することにより、この磁束輸送回路の優位性または欠点が明らかになるものと期待される。

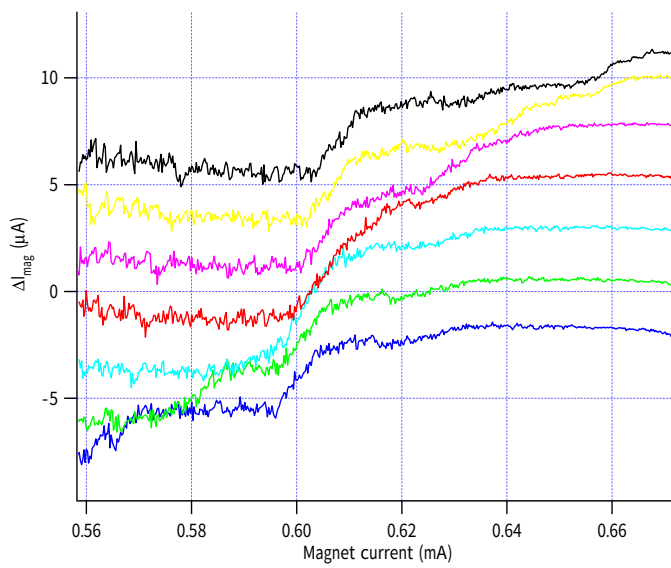


図4-2 DC-SQUID の特性に由来する非線形のバックグラウンドを引いて得られた結果。量子ビットのつくる磁束信号に対応する。

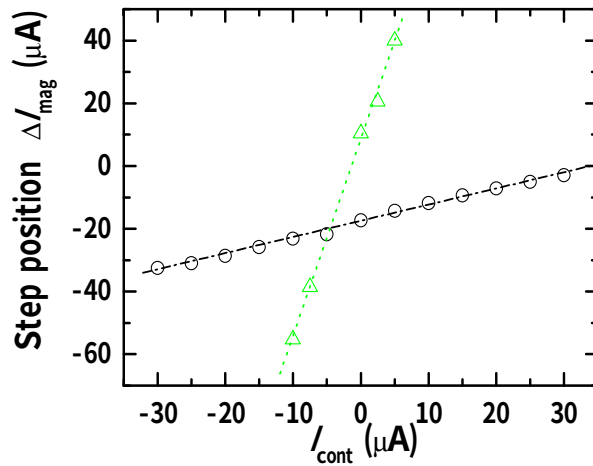


図4-3 図4-2の結果から求めたステップ位置の、制御電流に対する依存性。2つのステップの位置は、制御電流に対して線形に変化する。このふるまいは、量子ビットと制御線の相互インダクタンスによって決まっている。

(2) 研究成果の今後期待される効果

われわれのグループでは、平成 16 年度に希釈冷凍機を導入し、測定系を建設しながら前節で述べたような研究を進めてきた。研究期間の多くの部分を、測定系の立ち上げや回路工作に費やしたこともあり、試料作製と実際の測定自体には十分に時間をかけられたとはいえないことが残念なことである。前節で報告した、[3]「結合度が固定された 2 個の非対称量子ビットの理論解析と実験」、[5]「可変磁束輸送回路で結合した 2 個の量子ビットの作製と測定」については、研究期間がまだ短く、研究は初期段階であり予備的な実験結果しか得られていないといえる。いずれの研究テーマについても、これから多くの試料を作製、測定し、研究を展開していく予定である。

適当な試料が得られていない、あるいは十分な測定時間を費やしていないため、磁束量子ビットにおける量子コヒーレンス振動の実験結果はまだ得られていないものの、量子ビットの測定および高速操作に必要な、電流バイアスパルスとマイクロ波パルスを使う測定系は、本研究期間内の開発の結果、今後の研究を展開できる程度に完成したものと考えている。特に、研究期間の終了前後に、われわれのグループで作製した単一磁束量子ビット試料（従来の研究例よりも回路が若干異なっている）について、マイクロ波共鳴ピークを差動信号によるパルス測定によって明瞭に観測し、エネルギー分裂 Δ を決定することができたことに注意したい。

今後は、作り上げた測定系を使い、量子ビットの 1 ビット、2 ビット、さらには 3 ビット以上の複数ビットの系、および量子ビットの結合回路の研究を継続して展開する予定である。特に、本研究期間に着手した、非対称 2 ビット系および可変磁束輸送回路で結合した 2 ビット系は、これまでに他のグループでもほとんど研究されていない研究対象であり、これらを研究することで磁束量子ビットの研究分野において注目すべき結果が得られるものと考えられる。磁束量子ビットについては、世界のいくつかのグループが近年めざましい成果を次々と報告しており、2 ビット量子論理ゲートも基礎的なレベルで実現しつつあるが、いまだに最適な量子ビットの回路形態、操作方法、結合方法および読み出し方法は、見つからない。したがって、本研究期間に着手した、他では研究されていないタイプの 2 ビット系およびビット間の結合回路を研究し、過去に結果が報告された実験と比較検討することは、非常に有意義であると考えられる。本終了報告書には記載していないが、研究期間の終了直後に、研究目的の一つとして掲げていた、エネルギーギャップを制御することのできる新しいタイプの磁束量子ビットの基本的動作を実証することができたことを補足しておきたい。

本研究において開発した測定系に関しては、差動信号パルスを用いた測定系が、今後、多ビット系の研究に発展する際に特に有効なものであり、さらに、量子ビットの測定に限らず、高周波数帯での輸送現象測定に活用することのできる波及効果の大きい技術であると考えられる。

本研究のテーマである超伝導量子ビットは、量子情報処理技術の実現へむけての重要な研究課題であり、科学技術および社会への波及効果が極めて大きいことにあらためて注意しておきたい。

3. 3 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(理論グループ)

(1)研究実施内容及び成果

我々のグループは、測定の可逆性に着目した、量子情報の理論的な研究を行った。この測定の可逆性とは、以下のようなものである。通常、量子論における測定は、系の状態についての情報をもたらす代わりに、その状態を別の状態へと変化させてしまう。例えば、ある状態 $|\psi\rangle$ に対して測定を行い、 m という測定結果を得たとすれば、系の状態はその結果に応じた別の状態 $|\phi_m\rangle$ へと変化してしまう(図44)。このような状態変化は、以前は非可逆だと信じられていたが、実際には必ずしも非可逆というわけではなく、可逆な場合には測定前の状態を確率的に復元できるということがわかっている。すなわち、測定後の状態

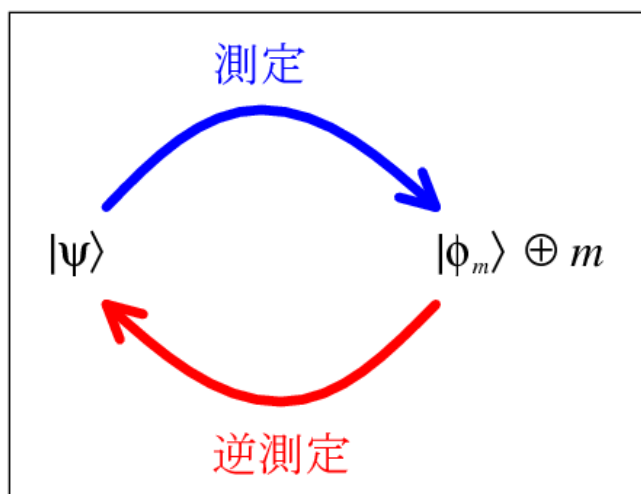


図44. 可逆な測定

態 $|\phi_m\rangle$ に逆測定という測定をさらに行い、特定の結果を得ることができたならば、測定前の状態 $|\psi\rangle$ を復元することができる。我々はこのような可逆性について、理論の立場から基礎的研究を進め、量子情報処理における応用を探求しつつ、実験家に様々な提案をすることを目指した。

(A) 可逆な測定の 実験可能なモデルの構築

まず、我々は実験的実現が可能であるような、可逆な測定のモデルを新たに提案

することを行った。これは、今まで知られているモデルは、実験的な実現が困難なものであったためである。特に、始めの測定が実験的に容易なものであったとしても、その逆測定は実験的には困難なものであることが多かった。そこで我々は、始めの測定とその逆測定の両方が容易であるようなモデルを考案することを行った。さらに、そのモデルに対して定量的な解析を行い、レーザー光を使った原子ガスのスピン測定での実現可能性を議論した。

我々のモデルでは、任意の大きさのスピン系(スピン s)である、システムの状態を測定する

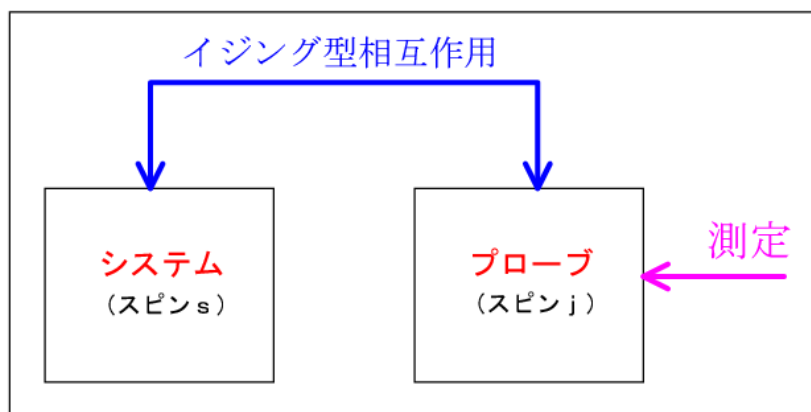


図45. モデルの構成

る(図45)。そのシステムを直接的に測定するのではなく、別のスピン系(スピン j)をプローブとして間接的な測定をおこなう。また、プローブとシステムは、イジング型という単純な形の相互作用で互い

に相互作用するものとする。測定の手順は以下の通りである。(i) プローブのスピンを(θ , ϕ) 方向に向ける。(ii) プローブとシステムを相互作用(実効的な強さ g)させる。(iii) プローブのスピンを y 軸周りに 90° 回転させる。(iv) プローブのスピンの z 成分を測定し、測定結果を得る。この測定による結果は、ある確率分布に従って、 $-j$ から j までの離散的な値のいずれかをとることになる。その結果に応じて、我々はシステムの状態についての情報を得ることができるものの、一方でその状態を破壊してしまう。ただし、それでもこの測定は可逆な測定であり、逆測定を行うことによって元の状態を確率的に復元することができる。実際、この場合の逆測定とは、始めの測定の手順(i)におけるスピンの方向を($\pi - \theta$, $\pi - \phi$)に置き換えてから、残りの手順を実行したものである。その逆測定を行い、もしも始めの測定結果と逆測定の結果の和がちょうど0であるときには、元の状態が復元されることが示される。特に、システムのスピンスが $1/2$ の場合には完全に復元されるが、そうでない場合でも相互作用が弱いときには近似的に復元される。

このようなことを具体的に見るために、数値計算によるシミュレーションを行った(図46～48)。これらは、スピンスが $1/2$ であるシステム($s=1/2$)をスピンスが10であるプローブ($j=10$)で測定した場合の結果である。システムの状態は $|\psi\rangle = 1/\sqrt{2}(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle)$ であるとし、プローブを向ける方向は $\theta = \phi = \pi/6$ 、実効的な相互作用の強さは $g=0.25$ として計算を行った。図46は、始めの測定における測定結果の確率とそれぞれの場合での状態の変化を示している。状態変化については、測定の前後の状態間のフィデリティで定量化している。この場合では、平均すると、測定によってフィデリティは0.57まで減少してしまうことになる。このような状態の変化を元に戻すために、上で述べた逆測定の方法を行った場合を考える。図47は始めの測定結果が m 、引き続き行われた逆測定の結果が m' であるような確率を示していて、図48はそのときのフィデリティを示している。特に、 $m+m'=0$ であるような対角線上では、図48よりフィデリティが1となっているので、逆測定の効果により状態が完全に元に戻ったことがわかる。しかも、図47より、そのような事象が起こる確率は非常に高いものであるといえる。実際、フィデリティが1までもどる確率は0.13であり、0.95以上にまでなる確率ならば0.57である。平均をとったとしても、フィデリティは0.93まで回復する。

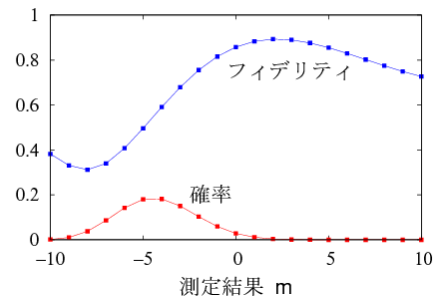


図46. 測定による結果

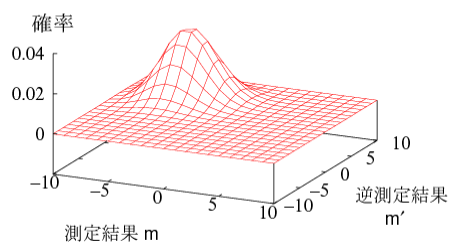


図47. 逆測定による結果(1)

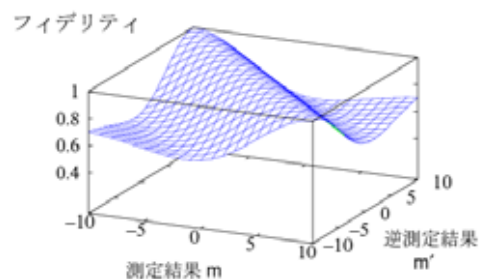


図48. 逆測定による結果(2)

以上のような測定と逆測定を物理的に実現する例としては、レーザー光を使った原子ガスのスピン測定の場合が考えられる。システムとして2s個の原子の全スピンをとり、プローブとして2j個の光子の偏光をとれば、イジング型相互作用はパラマグネティック・ファラデー一回転によって実現できることが知られている。そうすると、我々の測定は図49のような装置で実現できると考えられる。

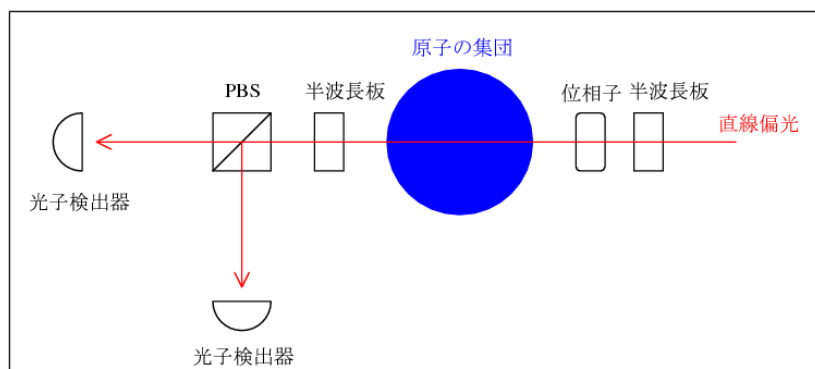


図49. 実験装置の提案

測定の手順は、(i) 右から直線偏光の光を入射し、半波長板や位相子に通す。(ii) その光を原子の集団に当てて相互作用させる。(iii) 出てきた光を半

波長板に通す。(iv) 偏光に応じてビームスプリッターで分け、それぞれ光子数を測定する。以上のような操作で、上で述べた測定を原子の集団のスピン状態に対して実行することができる。逆測定もまた同様で、手順(i)における半波長板や位相子を取り替えれば、そのままのセットアップで実行することができる。

(B) 可逆性を応用した量子状態の修復

次に我々は、環境との相互作用によって壊されてしまった量子状態を、逆測定に基づく方法で復元することを考えた。これは、環境との相互作用も測定的一种であるとみなすことができるためである。特に、相互作用が弱いときには、それは可逆な測定に対応しており、その逆測定を使うことによって、元の状態を復元できると期待できる。ただし、逆測定の決定には通常、始めの測定結果の情報が必要になるが、環境との相互作用では測定の結果が読み出されることはない。そのため、可能な測定結果の平均を考えることにより逆測定を決定するので、結果として状態の復元も近似的なものになる。

我々は、このようなこと示すためのモデルとして、環境と弱く相互作用する巨視的な量子状態の重ね合わせ(猫状態)を考えた。この猫状態は、量子論の基礎や量子情報処理において非常に興味深い状態であるが、環境と弱く相互作用するだけで大きく変化してしま

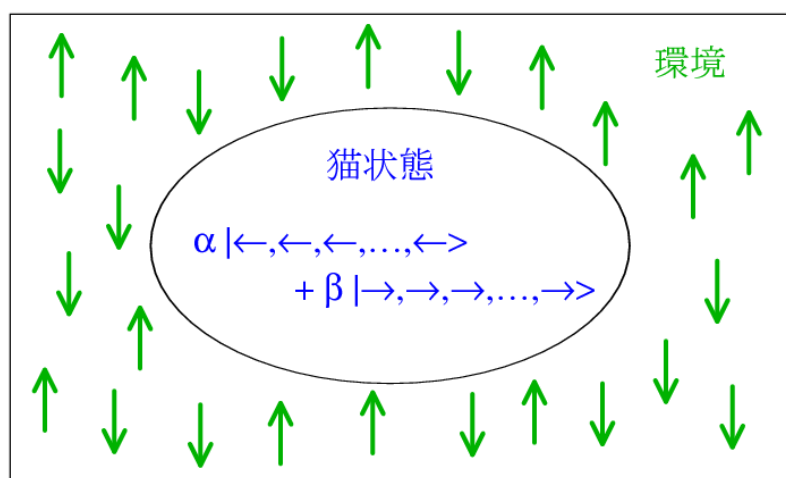


図50. モデルの構成

い、忠実度(フィデリティ)や純粋度(ピュリティ)を減少させてしまう。このような減少を、逆測定に基づく方法を使って増加させることができないかを探索した。我々のモデルでは、2s個のスピン1/2系からなるシステムにおいて、スピンがすべてx軸方

向を向いているか、すべて $-x$ 軸方向を向いているかという猫状態を考えた(図50)。一方、環境は $2j$ 個のスピンの $1/2$ 系とし、その一部のスピンの z 軸方向、それ以外のスピンの $-z$ 軸方向を向いているような混合状態(例えば、熱平衡状態)にあると仮定した。また、この環境はシステムと、イジング型の相互作用をするものとする。そうすると、例えばこの相互作用

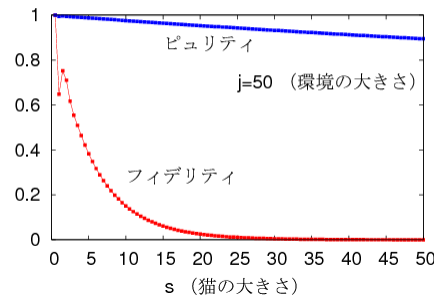


図51. 環境による影響

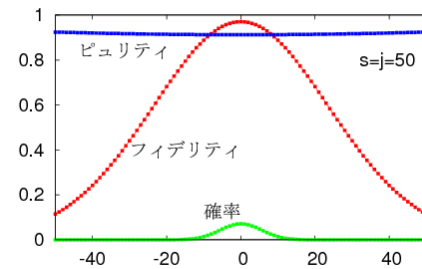


図52. 逆測定による効果

用の大きさが小さくても、システム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わかる。図51は、環境のスピンの数が $j=50$ で、そのスピンの93.3%が z 軸方向を向いているような場合に、相互作用の実効的な強さを $g=0.01$ として、数値計算によるシミュレーションを行った結果である。この結果から、猫状態の大きさ s が大きくなると、フィデリティは特に激しく減少し、ピュリティもまた同時に減少することがわかる。そこで、この状態変化を復元する逆測定を考えた。その逆測定はこの場合、先の研究「(A) 可逆な測定の実験可能なモデルの構築」で考えられた逆測定とまったく同じものになる。ただし、 θ は環境のスピンの z 軸方向を向いている割合から計算される量で、 ϕ は $\pi/2$ である。この逆測定を行い、 $m=0$ という結果が得られたときには、フィデリティを大きく改善させ、さらにはピュリティも上昇させることができることがわかった。図52は、図51での $s=50$ の場合に対して、この逆測定を行った結果である。横軸は測定結果であり、その結果が得られる確率、そのときのフィデリティおよびピュリティが示されている。この例では、 $m=0$ の結果が得られた場合には97.1%のフィデリティの回復と17.2%のピュリティの回復が達成できることがわかった。

(C) 可逆な測定における情報量と状態変化の関係

最後に、我々は可逆な測定における情報量と状態変化の関係に着目した。これは、従来の逆測定による復元には、情報量という観点から、次のような欠点があることが知られていたからである。すなわち、逆測定の方法は状態を完全に復元するものの、その代わりとして、始めの測定で得ていた情報まで同時に消し去ってしまうというものである。これでは、そもそも測定したことの意味がなくなってしまう。そこで我々は新たな復元方法として、状態を近似的に復元しつつ、情報はむしろ増加させることができるような方法を、弱い測定の場合に対して考案した。直観的には、状態を完全に復元すれば情報がすべてなくなってしまうことから、近似的に復元するような場合では情報がわずかに残るのみと考えられる。しかし、我々の方法は情報を減少させるどころか、さらに増加させることができるという点で特徴がある。

我々の方法が従来の逆測定の方法と大きく異なる点は、測定演算子のエルミート共役に着目するという点である。すなわち、測定による状態変化は、測定結果 m に応じた非ユニタリーな測定演算子によって記述することができる。従来の逆測定の方法(図44)では、それをキャンセルするために、測定後の状態に逆測定を行い、事後選択(ポストセクション)によって測定演算子の逆演算子を状態に作用させていた。それに対し、我々の方法(図53)では逆測定の代わりに、測定演算子のエルミート共役演算子を作用させるような

測定 (共役測定) を行う。もちろん、測定演算子はユニタリーではないので、逆演算子とエルミート共役演算子は同一のものではない。しかし、始めの測定が弱い場合には、それらの差は小さいものであるので、その時にはエルミート共役演算子も近似的には始めの測定をキャンセルすることができる。しかも、逆演算子がすべてをキャンセルするのとは違い、エルミート共役演算子は、測定演算子に含まれる、系の情報とは無関係な部分のみをキャンセルし、関係する部分は逆に増幅するということが示される。

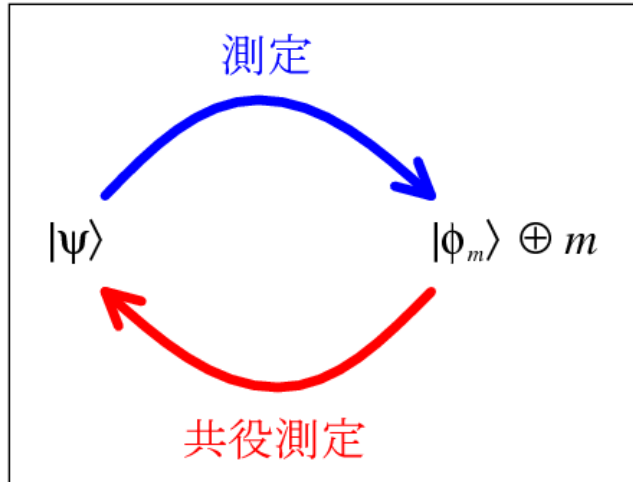


図53. 我々の復元方法

このことは、測定演算子を極分解して考えると、理解することができる。この分解によって、測定演算子はユニタリー演算子とポジティブ演算子の積として書くことができる。このうち、ユニタリー演算子は、系の状態変化には関係するが、情報の取得には関係ない部分である。それに対して、ポジティブ演算子の方は情報の取得と状態の変化の両方に関係する部分となっている。そうすると、エルミート共役演算子を作用させるということは、情報の取得には無関係であるユニタリー演算子をキャンセルしつつ、情報の取得に関係するポジティブ演算子の方は逆に増幅していることになる。しかも、弱い測定の場合には、この残ったポジティブ演算子単体による状態変化は小さいので、同時に近似的な復元も達成することができるのである。

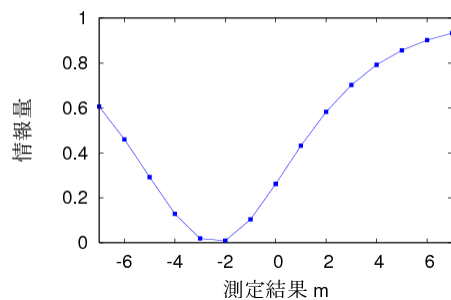


図54. 測定による情報のゲイン

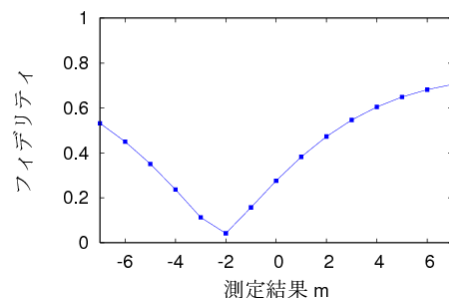


図55. 測定による状態の変化

このようなことを見るために、我々は「(A) 可逆な測定の実験可能なモデルの構築」で考えられたモデルを使って解析を行った。図54、55は、 $j=7$ 、 $g=0.25$ 、 $\theta=\pi/6$ 、 $\phi=\pi/4$ というプローブで、 $s=1/2$ のシステムの $|\psi\rangle=1/\sqrt{2}(|\uparrow\rangle+|\downarrow\rangle)$ という状態を測定した場合の、数値計算によるシミュレーションの結果である。それぞれの測定結果を得たときの情報のゲイン (図54) と状態の変化 (図55) が示されている。このように、測定は系の状態についての情報をもたらす代わりに、その状態を別の状態へと変化させていることがわかる。

このような状態変化を元に戻すために、まず従来の逆測定による復元方法を行った場合の結果を示す。この場合の逆測定は、「(A) 可逆な測定の実験可能なモデルの構築」

で述べられているように、始めの測定の手順 (i) におけるスピンの方向を $(\pi - \theta, \pi -$

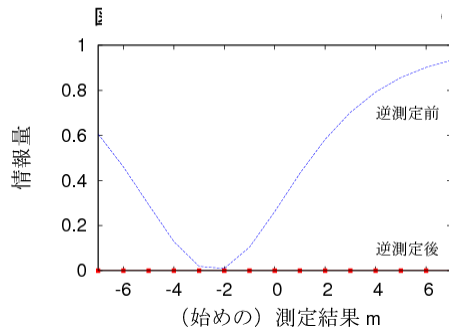


図56. 逆測定の効果 (情報ゲイン)

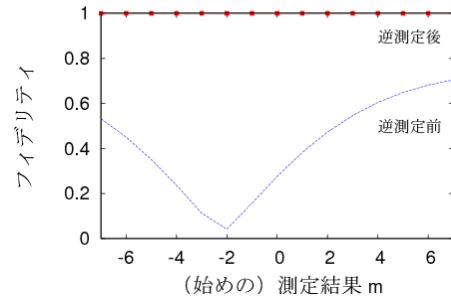


図57. 逆測定の効果 (状態変化)

ϕ) に置き換えたものである。この逆測定の結果 m' が始めの測定の結果 m と $m + m' = 0$ の関係を満たすものであったならば、システムに測定演算子の逆演算子が作用することになる。そうすると、状態は完全に復元され、その代わりに情報はすべてキャンセルされるということが起こる。実際、先ほどの例でシミュレーションした結果は図56、57のようになる。横軸は始めの測定結果 m で、それぞれにおいて逆測定が成功した場合を示している。これらの図から、逆測定の成功によって減少していたフィデリティが完全に1になり、一方で始めの測定によって得られていた情報量が0になることがわかる。つまり、逆測定が成功したときには、状態が完全に復元されるものの、情報がすべてなくなってしまうといえる。

それに対して、我々の共役測定による復元方法を行った場合を考える。このモデルでの共役測定は、始めの測定の手順 (i) におけるスピンの方向を $(\pi - \theta, \phi + \pi)$ に置き換えたものである。この共役測定の結果 m' が始めの測定の結果 m と $m + m' = 0$ の関係を満たすものであったならば、システムに測定演算子のエルミート共役演算子が作用することになる。その結果、状態は近似的に復元され、かつ、情報のさらなるゲインが得られるということが期待できる。先ほどの例でシミュレーションした結果が図58、59である。横

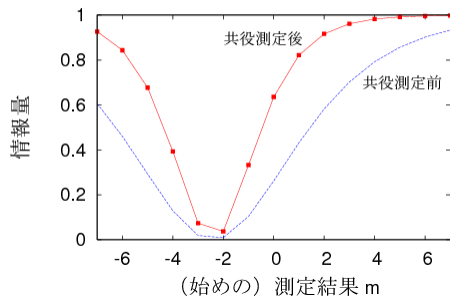


図58. 逆測定の効果 (情報ゲイン)

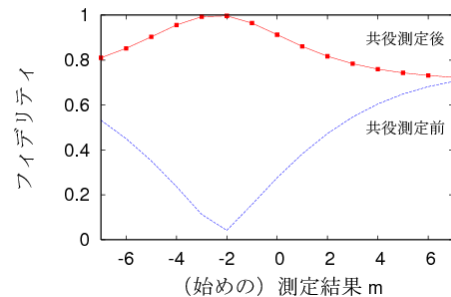


図59. 逆測定の効果 (情報ゲイン)

軸は再び、始めの測定結果 m で、それぞれにおいて共役測定が成功した場合を示している。図59より共役測定の成功によってフィデリティが上昇し、図58より情報量が増加していることがわかる。このように、我々の復元方法ならば、状態の近似的な復元と情報のさらなるゲインを達成できるといえる。

(2) 研究成果の今後期待される効果

我々のグループの可逆な測定に関するこれらの研究成果は、それぞれ以下のような効果があるであろうと期待している。

(A) 可逆な測定の実験可能なモデルの構築

量子論における測定は、長い間、非可逆だと信じられてきたが、今では可逆な測定も存在することが理論的にはわかっている。この可逆な測定を実際に実験で実現し検証することは、単に量子論の基礎論にとって意義深いというだけでなく、量子状態をより完全に制御するための技術の確立につながり、その結果として量子計算機の実現に大きく貢献するであろうと考えている。我々のこの研究成果は、そのための出発点になると期待している。

今後は、他の物理系においても実験可能なモデルを構築したいと考えている。特に最近、量子光学の光子数測定において、可逆性の条件を一部満たす光子検出器が実現されたので、このような系でモデルを構築し、実験家に提案することを目指したい。

(B) 可逆性を応用した量子状態の修復

環境との相互作用による状態変化は、量子計算機実現のための大きな障害であるが、我々のこの研究成果は、それを軽減するためのひとつの方法を提示している。特に我々は、巨視的な自由度をもっている猫状態に対して考察を行った。この状態は、量子論の基礎や量子情報処理、量子測定などにとって重要な状態であるので、いろいろな場面で我々の方法が有効に利用できると考えられる。

今後は、その他の状態や環境の場合についての解析を行っていきたいと考えている。

(C) 可逆な測定における情報量と状態変化の関係

状態を近似的に復元し、情報量を増加させるということは、量子暗号において次のような可能性が考えられる。例えば、盗聴者が実行できる測定の種類が限られている場合、盗聴者の盗聴の効率は一般には低下してしまう。しかし、盗聴者が我々の方法を用いれば、盗聴の効率を上げることができるかもしれない。逆に言えば、暗号の送受信者の立場からは、このような方法に対しての防御も考えておく必要があるといえる。

これまで、非ユニタリーな演算子のエルミート共役を作用させるという操作は、量子情報ではあまり議論されてこなかった。今後は、このようなエルミート共役演算子の役割を量子情報処理におけるさまざまな状況で議論したいと考えている。

3. 4 量子ビット用接合の評価(東京理科大グループ)

(1) 研究実施内容及び成果

2006年4月に、高柳の東京理科大異動に伴って、このグループは発足した。その担務は、NTTで製作された量子ビットのジョセフソン接合の評価と、その特性をNTTにフィードバックすることである。実際の研究は、高柳や学生などが、NTTでの研究に参加して行ったので、NTTグループの実施内容および成果と基本的に同じである。

4 研究参加者

【NTT グループ】

超伝導磁束量子ビットを用いた量子もつれの実現の研究を担当

氏名	所属	役職	参加時期
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	H14.11～H20.3
中ノ 勇人	NTT 物性科学基礎研究所	主任研究員	H14.11～H20.3
田中 弘隆	NTT 物性科学基礎研究所	研究主任	H14.11～H20.3
齋藤 志郎	NTT 物性科学基礎研究所	研究主任	H14.11～H20.3
角柳 孝輔	NTT 物性科学基礎研究所	社員	H17.4～H20.3
Jan Johansson	NTT 物性科学基礎研究所	CREST 研究員	H16.2～H18.1
Yingdan Wang	NTT 物性科学基礎研究所	ポスドク	H18.9～H20.3
Alexandre Kemp	NTT 物性科学基礎研究所	CREST 研究員	H18.12～H20.3
Frank Deppe	NTT 物性科学基礎研究所	大学院学生	H15.6～H17.8
毛利 拓也	東京理科大	研究補助員	H15.6～H17.3
沓澤 竜弥	東京理科大	研究補助員	H15.6～H18.3
南 さゆり	NTT 物性科学基礎研究所	チーム事務員	H15.1～H17.2
川口 真知子	NTT 物性科学基礎研究所	チーム事務員	H17.2～H17.12

【理論グループ】

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

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
上田 正仁	東京工業大学	教授	理論	H14.11～H20.3
足立 聡	同上	助手	同上	H14.11～H17.3
斉藤 弘樹	同上	助手	同上	H14.11～H18.3

川口 由紀	同上	助手	同上	H17.4－H19.9
寺嶋 容明	同上	CREST 研究員	同上	H16.10－H19.9
Dennis Dickerscheid	同上	(学振 外国人特別研究員)	同上	H19.4－H19.9
手塚 真樹	同上	(学振研究員)	同上	H19.4－H19.9
関沢 鉄兵	同上	(博士課程)	同上	H14.11－H18.3
荒井 ひろみ	同上	(修士課程)	同上	H14.11－H18.3
村田 佳史	同上	(修士課程)	同上	H16.4－H18.3
Neil Mochan	同上	(修士課程)	同上	H16.4－H18.3
黒谷 雄司	同上	(修士課程)	同上	H17.4－H19.3
中島 秀太	同上	(修士課程)	同上	H18.4－H19.9
沙川 貴大	同上	(修士課程)	同上	H18.4－H19.9
井口 光治	同上	(修士課程)	同上	H19.4－H19.9
渡辺 優	同上	(修士課程)	同上	H19.4－H19.9
大熊 孝宏	同上	(学部4年)	同上	H16.4－H17.3
鈴木 康朗	同上	(学部4年)	同上	H16.4－H17.3
大河原優子	同上	研究補助員	データ解析、 事務	H15.4－H17.3
吉田 茜	同上	研究補助員	データ解析、 事務	H15.6－H16.4
伊藤 綾子	同上	研究補助員	データ解析、 事務	H17.4－H17.5
大島 ルミ	同上	研究補助員	データ解析、 事務	H17.6－H18.9

【横浜国立大学グループ】

結合量子ビットおよび量子ビット結合回路の研究

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
島津 佳弘	横浜国立大学	准教授	研究全般	H14.11～ H20.3
中野 剛善	同上	学部4年	試料作製	H14.11～ H15.3
横山 朝夫	同上	大学院前期課程	試料設計・作製	H15.4～ H17.3
和田 洋一	同上	大学院前期課程	試料設計・作製	H16.4～ H18.3
新関 嵩	同上	大学院前期課程	量子ビット結合回路	H17.4～ H19.3

和田 全平	同上	大学院前期課程	単一磁束量子ビット	H18.4～ H19.9
齊藤 友貴	同上	大学院前期課程	4接合磁束量子ビット	H18.4～ H19.9

【東京理科大学グループ】
量子ビット用接合の評価

氏名	所属	役職	担当する研究項目	参加時期
高柳 英明	東京理科大学	教授	量子もつれの実現・ 全体の取りまとめ	H14.11～ H20.3
井上亮太郎	同上	助教	ジョセフソン接合の測定・評価	H19.4～ H20.3
小川 英輔	同上	M1	ジョセフソン接合の測定・評価	H18.5～ H20.3
影井 誠一郎	同上	M1	ジョセフソン接合の測定・評価	H18.5～ H20.3
本田 賢一	同上	M1	ジョセフソン接合の測定・評価	H18.5～ H20.3
井村 彩子	同上	チーム事務員	CREST 事務一般	H18.5～ H20.3

5 招聘した研究者等

氏名	所属・役職	滞在先	滞在期間	招聘の目的
Jhon Clarke	Prof. UCB	厚木ロイヤル パークホテル	H18.2.26～3.2	国際シンポMS+S2006 で招待講演のため
Rober G. Clark	Direc. Quautum Computer Tech. Univ.New South Wales	厚木ロイヤルパ ークホテル	H18.2.26～3.2	MS+S2006
Daniel Esteive	Dirc. Quantum group SPEC,CES-Saclay	厚木ロイヤル パークホテル	H18.2.26～3.2	MS+S2006
Yuval Gefen	Prof.Dep.Condensed MatterPhysics,Weizmann Inst. Of Sci.	厚木ロイヤル パークホテル	H18.2.26～2.28	MS+S2006
Thierry D.Martin	Prof.Centre de physique Theorique Univ. de la Meditrranee	厚木アーバン ホテル	H18.2.26～3.2	MS+S2006
Charles M.Marcus	Dierc. Centoer for NanoscalSystems,Harvard Univ.	厚木ロイヤル パークホテル	H18.2.26～2.27	MS+S2006
CJPM Harmans	Sen.Researcher Delft Univ. of Technology	厚木ロイヤル パークホテル	H18.2.26～3.2	MS+S2006
Andreas Wallraff	Ast. Prof. Yale Univ.	厚木ロイヤル パークホテル	H18.2.26～3.2	MS+S2006

Hartmut Haffner	Senior. Resercher Inst. Of Quantum Info. Of Austrian Academy of Science	厚木ロイヤル パークホテル	H18.2.26～3.1	MS+S2006
Alexander Shnirman	Ast.Resercher Karlsruhe	厚木アーバン ホテル	H18.2.12～3.10	共同研究のため
Allexandre Blais	Yale Univ.	厚木ロイヤル パークホテル	H18.2.26～3.5	共同研究のため

6 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内誌 1 件、国際誌 60 件)

◎2007 年度

【NTT グループ】 (国内誌 0 件、国際誌 3 件)

1. H. Nakano, K. Kakuyanagi, M. Ueda, K. Semba: Long range and selective coupler for superconducting flux qubits; Appl. Phys. Lett. 91, 032501 (2007).
2. H. Nakano, H.Tanaka, S.Saito, K. Semba, Practical Impossibility of observing a Rabi Oscillation in a Superconducting Flux-Qubit without Averaging over many detections; P.397 in “Quantum Commun,Measurement and Computation” (NICT Press,2007).
3. F. Deppe, M. Mariani, E. P. Menzel, S. Saito, K. Kakuyanagi, H. Tanaka, T. Meno, K. Semba, H. Takayanagi, and R. Gross: Phase coherent dynamics of a superconducting flux qubit with capacitive bias readout; Phys Rev, B76, 214503 (2007)

【理論グループ】 (国内誌 0 件、国際誌 6 件)

1. Y. Kawaguchi, H. Saito, and M. Ueda: Can Spinor Dipolar Effects Be Observed in Bose-Einstein Condensates?; Phys. Rev. Lett. 98, 110406, 2007.
2. Y. Kurotani and M. Ueda: Circuit analysis of quantum measurement; Phys. Rev. A 75, 012110, 2007.
3. K. Murata, H. Saito, and M. Ueda: Broken-axisymmetry phase of a spin-1 ferromagnetic Bose-Einstein Condensate; Phys. Rev. A 75, 013607, 2007.
4. H. Saito, Y. Kawaguchi, and M. Ueda: Topological defect formation in quenched ferromagnetic Bose-Einstein condensates; Phys. Rev. A 75, 013621, 2007.
5. H. Terashima and M. Ueda, Probabilistic reversing operation with fidelity and purity gain for macroscopic quantum superposition Physical Review A 75, 052323(1)-(8), 2007.

6. Hiroki Saito, Yuki Kawaguchi, and Masahito Ueda, Kibble-Zurek mechanism in a quenched ferromagnetic Bose-Einstein condensate, *Physical Review A* 76, 掲載予定 (10 pages) , 2007

【横浜国立大学グループ】（国内誌 0 件、国際誌 2 件）

1. Y. Shimazu, T. Niizeki, Z. Wada, Y. Saito: Circulating current in a superconducting loop interrupted by a DC-SQUID with asymmetry, *Physica C* 463-465, 1056 (2007).
2. Y. Shimazu, T. Niizeki: Characteristics of Switchable Superconducting Flux Transformer with DC Superconducting Quantum Interference Device, *Jpn. J. Appl. Phys.* 46, 1478 (2007).

【東京理科大学グループ】（国内誌 0 件、国際誌 0 件）

◎2006 年度

【NTT グループ】（国内誌 0 件、国際誌 4 件）

1. 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).
2. 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).
3. Fei Xue, Y. D. Wang, C. P. Sun, H. Okamoto, H. Yamaguchi, K. Semba: Controllable Coupling between Flux Qubit and Nanomechanical Resonator by Magnetic Field; *New Journal of Physics* **9**, 35 (2007).
4. 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).

【理論グループ】（国内誌 1 件、国際誌 8 件）

1. H. Saito, Y. Kawaguchi, and M. Ueda: Breaking of Chiral Symmetry and Spontaneous Rotation in a Spinor Bose-Einstein Condensate; *Phys. Rev. Lett.* vol. 96, 065302(1)-065302(4), 2006.
2. Y. Kawaguchi, H. Saito, and M. Ueda: Einstein-de Haas Effect in Dipolar Bose-Einstein Condensates; *Phys. Rev. Lett.* vol. 96, 080405, 2006.
3. R. Kanamoto, H. Saito, and M. Ueda: Critical fluctuations in a soliton formation of attractive Bose-Einstein condensates; *Phys. Rev. A* 73, 033611, 2006.
4. M. Ueda and T. Nakajima: Nambu-Goldstone Modes in a Rotating Bose-Einstein Condensate; *Phys. Rev. A* 73, 043603, 2006.
5. T. Ohkuma and M. Ueda: Quantum-statistical mechanics of an atom-dimer mixture: Lee-Yang cluster expansion approach; *Phys. Rev. A* 73, 063608, 2006.
6. H. Terashima and M. Ueda: Reversible quantum measurement with arbitrary spins; *Phys. Rev. A* 74, 012102, 2006.

7. Y. Kawaguchi, H. Saito, and M. Ueda: Spontaneous Circulation in Ground- State Spinor Dipolar Bose-Einstein Condensates; Phys. Rev. Lett. 97, 130404, 2006.
8. 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.
9. 寺嶋容明、上田正仁：アインシュタイン・ポドルスキー・ローゼン相関に関する相対論的效果; 日本物理学会誌 61, No.6, pp.420-423, 2006.

【横浜国立大学グループ】（国内誌 0 件、国際誌 1 件）

1. Y. Shimazu, T. Niizeki, Y. Wada: Fabrication and characterization of a switchable flux transformer using a DC-SQUID, Physica C 445-448, 971 (2006)

【東京理科大学グループ】（国内誌 0 件、国際誌 0 件）

◎2005 年度

【NTT グループ】（国内誌 0 件、国際誌 5 件）

1. J. Johansson, S. Saito, T. Meno, H. Nakano, M. Ueda, K. Semba, and H. Takayanagi: Vacuum Rabi Oscillations in a Macroscopic Superconducting Qubit LC Oscillator System; Phys. Rev. Lett. **96**, 127006 (2006) [published online, 31 March 2006]
2. S. Saito, T. Meno, M. Ueda, H. Tanaka, K. Semba, and H. Takayanagi: Parametric Control of a Superconducting Flux Qubit; Phys. Rev. Lett. **96**, 107001 (2006) [published online, 13 March 2006]
3. P. Bertet, I. Chiorescu, G. Burkard, K. Semba, C. J. P. M. Harmans, D. P. DiVincenzo, and J. E. Mooij: Dephasing of a Superconducting Qubit Induced by Photon Noise; Phys. Rev. Lett. **95**, 257002 (2005).DOI: 10.1103 (Received 19 July 2005; published 13 December 2005) issue of Dec 16 2005.
4. Tatsuya Kutsuzawa, Hirotaka Tanaka, Shiro Saito, Hayato Nakano, Kouichi Semba, and Hideaki Takayanagi: Coherent control of a flux qubit by phase-shifted resonant microwave pulses; Appl. Phys. Lett. **87**, 073501 (2005).
5. H. Takayanagi, H. Nakano, H. Tanaka, S. Saito, K. Semba, and M. Ueda: Observation of Multiphoton Absorption and Switching Current Behaviors in Superconducting Flux-Qubit Readout; in Realizing Controllable Quantum States, H. Takayanagi and J. Nitta ed. (World Scientific, Singapore,2005)

【理論グループ】（国内誌 0 件、国際誌 9 件）

1. R. Kanamoto, H. Saito, and M. Ueda: Symmetry Breaking and Enhanced Condensate Fraction of an Attractive Bose-Einstein Condensate; Phys. Rev. Lett. vol. 94, 090404(1)-090404(4), 2005.
2. H. Terashima and M. Ueda: Spin decoherence caused by spacetime curvature; J. Phys. A: Math. Gen.38, 2029-2037, 2005.
3. H. Terashima and M. Ueda: Spin decoherence caused by spacetime curvature; J. Phys. A: Math. Gen. 38, 2029-2037, 2005.
4. H.Terashima and M.Ueda: Nonunitary quantum circuit; Int. J. Quantum Inf. vol.3, 633-647, 2005.

5. R. Kanamoto, H. Saito, and M. Ueda: Symmetry Breaking and Enhanced Condensate Fraction of and Attractive Bose-Einstein Condensate; Phys. Rev. Lett. vol. 94, 090404(1)-090404(4), 2005.
6. K. Kasamatsu, M. Tsubota, and M. Ueda: Spin textures in rotating two-component Bose-Einstein condensates; Phys. Rev. A vol. 71, 043611(1)-043611(14), 2005.
7. K. Kasamatsu, M. Tsubota, and M. Ueda: Vortices in Multicomponent Bose-Einstein Condensates; Int. J. Mod. Phys. B, vol. 19, 1835-1904, 2005
8. Hiroki Saito and Masahito Ueda: Spontaneous magnetization and structure formation in a spin-1 ferromagnetic Bose-Einstein condensate; Phys. Rev. A vol. 72, 023610(1)-023610(7), 2005.
9. Hiroki Saito and Masahito Ueda: Diagnostics for the ground-state phase of a spin-2 Bose-Einstein condensate; Phys. Rev. A vol. 72, 053628(1)-053628(12), 2005.

【横浜国立大学グループ】（国内誌 0 件、国際誌 1 件）

1. Y. Shimazu, Y. Wada, T. Niizeki, Y. Yamamoto, T. Yoshida, Z. Wada and T. Yokoyama: Observation of excitation in asymmetric flux qubits coupled inductively, Physica E, 29/3-4, 679 (2005).

◎2004 年度

【NTT グループ】（国内誌 0 件、国際誌 3 件）

1. P. Bertet, I. Chiorescu, K. Semba, C. J. P. M. Harmans and J. E. Mooij: Detection of a persistent-current qubit by resonant activation; Phys. Rev. B 70, 100501(R) (2004).
2. I. Chiorescu, P. Bertet, K. Semba, Y. Nakamura, C. J. P. M. Harmans and J. E. Mooij: Coherent dynamics of a flux qubit coupled to a harmonic oscillator; Nature Vol 431, Pages 159-162, (2004).
3. S. Saito, M. Thorwart, H. Tanaka, M. Ueda, H. Nakano, K. Semba, H. Takayanagi: Multiphoton transitions in a macroscopic quantum two-state system; Phys. Rev. Lett. 93, 037001(2004).

【理論グループ】（国内誌 0 件、国際誌 7 件）

1. H. Saito and M. Ueda: Split-merge cycle, fragmented collapse, and vortex disintegration in rotating Bose-Einstein condensates with attractive interactions; Phys. Rev. A vol. 69, pp. 013604(1)-013604(10), 2004.
2. K. Kasamatsu, M. Tsubota, and M. Ueda: Quadrupole and scissors modes and nonlinear mode coupling in trapped two-component Bose-Einstein condensates; Phys. Rev. A vol. 69, 043621(1)-043621(10), 2004.
3. T. Hyouguchi, R. Seto, M. Ueda, and S. Adachi: Divergence-free WKB theory; Ann. Phys. vol. 312, 177-267, 2004.
4. H. Terashima and M. Ueda: Einstein-Podolsky-Rosen correlation in a gravitational field; Phys. Rev. A, vol. 69, 032113(1)-032113(9), 2004.
5. H. Saito and M. Ueda: Bose-Einstein droplet in free space; Phys. Rev. A vol. 70, 053610(1)-053610(5), 2004.

6. H. Saito and M. Ueda: Emergence of Bloch bands in a rotating Bose-Einstein condensate; Phys. Rev. Lett. vol. 93, 220402(1)-220402(4), 2004.
7. K. Kasamatsu, M. Tsubota, and M. Ueda: Vortex molecules in coherently coupled two-component Bose-Einstein Condensates; Phys. Rev. Lett. vol. 93, 250406(1)-250406(4), 2004.

【横浜国立大学グループ】（国内誌 0 件、国際誌 2 件）

1. Y. Shimazu: Coupling Effect in Dual Three-Josephson-Junction Loops in Classical Regime, J. Phys. Soc. Jpn. 73, 1914 (2004).
2. Y. Shimazu and T. Yokoyama: Measurement of Kinetic Inductance of Superconducting Wires and Application for Measuring Flux State of Josephson-Junction Loops, Physica C, 412-414, 1451 (2004).

◎2003 年度

【NTT グループ】（国内誌 0 件、国際誌 2 件）

1. H. Takayanagi, H. Tanaka, S. Saito and H. Nakano: Readout of the qubit state with a dc-SQUID; Superlattice and Microstructures. Vol. 32, Issues 4-6, Pages 221-229, (2002).
2. Frank Deppe, S. Saito, H. Tanaka, and H. Takayanagi: Determination of the capacitance of nm scale Josephson junctions; Journal of Applied Physics. Vol. 95, Pages 2607-2613, March 1, (2004).

【理論グループ】（国内誌 0 件、国際誌 6 件）

1. T. Nakajima and M. Ueda: Energy gaps and roton structure above the $\nu = 1/2$ Laughlin state of a rotating dilute Bose-Einstein condensate; Phys. Rev. Lett. vol. 91, 140401(1)-140401(4), 2003.
2. K. Kasamatsu, M. Tsubota, and M. Ueda: Vortex phase diagram in rotating two-component Bose-Einstein condensates; Phys. Rev. Lett. vol. 91, 50406(1)-50406(4), 2003.
3. R. Kanamoto, H. Saito, and M. Ueda: Stability of the quantized circulation of an attractive Bose-Einstein condensates in a rotating torus; Phys. Rev. A vol. 68, 043619(1)-043619(12), 2003.
4. H. Saito and M. Ueda: Measurement-induced spin squeezing in a cavity; Phys. Rev. A vol. 68, 043820(1)-043820(9) (2003)
5. H. Terashima and M. Ueda: Einstein-Podolsky-Rosen correlation seen from moving observers; Quantum Inf. Comput. vol. 3, 224-228, 2003.
6. H. Terashima and M. Ueda: Relativistic Einstein-Podolsky-Rosen correlation and Bell's inequality; International Journal of Quantum Information vol. 1, 93-114, 2003.

【横浜国立大学グループ】（国内誌 0 件、国際誌 1 件）

1. Y. Shimazu: Inductive coupling of two superconducting loops with three Josephson junctions, Physica E, 18 /1-3, 23 (2003).

◎2002 年度

【NTT グループ】

該当なし

【理論グループ】

該当なし

【横浜国立大学グループ】

該当なし

(2)その他の著作物（総説、書籍など）

◎2007 年度

【NTT グループ】

1. 仙場浩一：超伝導量子ビットと単一光子の量子もつれ制御；NTT 技術ジャーナル, 11月号, p.18-23, 2007.
<http://www.ntt.co.jp/journal/0711/files/jn200711018.pdf>
2. Kouichi Semba: Entanglement Control of Superconducting Qubit Single Photon System; NTT Technical Review, 1月号, 2008.
<https://www.ntt-review.jp/archive/ntttechnical.php?contents=ntr200801sp6.html>

【理論グループ】

該当なし

【横浜国立大学グループ】

書籍

1. Y. Shimazu, T. Niizeki: Characteristics of a switchable superconducting flux transformer using a DC-SQUID, to be published in the proceedings of International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics MS+S 2006 (World Scientific, Singapore) (2008).

その他

1. 島津佳弘、新関嵩、和田全平：結合度を制御することのできる磁束輸送回路Ⅱ：DC-SQUID の非対称性の評価、日本物理学会講演概要集、第 62 巻第 1 号、第 4 分冊、p.654 (2007).
2. 新関嵩：ジョセフソン接合を用いた制御可能な磁束輸送回路の研究、修士論文、横浜国立大学 (2007).
3. 島津佳弘、新関嵩、和田全平：磁束量子ビットの結合のための可変結合回路、第 16 回量子情報技術研究会資料 p.160 (2007).

【東京理科大学グループ】

1. 高柳英明、“量子コンピュータの実現に向けて”、技術と経済、No.473, p.18-28 (2006.7)

◎2006 年度

【NTT グループ】

1. 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.

【理論グループ】

該当なし

【横浜国立大学グループ】

書籍…該当なし

その他

1. 島津佳弘、新関嵩：DC-SQUID構造をもつ制御可能な磁束量子ビット結合回路、東京工業大学21世紀COEプログラム「量子ナノ物理学」第2回公開シンポジウム講演概要集 p.128 (2006).
2. 島津佳弘、新関嵩：ジョセフソン接合を使った制御可能な磁束輸送回路の実験、日本物理学会講演概要集、第61巻第1号、第4分冊、p.705 (2006).
3. 和田 洋一：電子線リソグラフィによる DC-SQUID の作製およびその特性の測定、修士論文、横浜国立大学 (2006).
4. Y. Shimazu, Control of a switching current of a DC-SQUID with an electric current in comparison with control with magnetic field, Proceedings of International Symposium on Magneto-Science, 2P30 (CD-ROM, ed. M. Yamaguchi et al.) (2006)

【東京理科大学グループ】

該当 なし

◎2005 年度

【NTT グループ】

1. “Realizing Controllable Quantum States”, Proceedings of MS+S2004 (Atsugi), ed. By H. Takayanagi and J. Nitta (World Scientific, Singapore) 2005.
2. 高柳英明 “超伝導を用いた量子計算” 学術月報 (日本学術振興会)、58巻、4号、p.46 (2005)

【理論グループ】

該当なし

【横浜国立大学グループ】

書籍

1. Y. Shimazu: Asymmetric flux bias for coupled qubits to observe entangled states, *Realizing controllable quantum states*, ed. H. Takayanagi and J. Nitta (World Scientific, Singapore) pp. 263-268 (2005).

その他

1. 島津佳弘、山本勇太、和田全平、新関嵩、吉田大紀、和田洋一：金属粉末を使用した低温実験用マイクロ波フィルターの特性、日本物理学会講演概要集第60巻第1号第4分冊 p.737 (2005)

2. 島津佳弘、横山朝夫、和田洋一、新関嵩、山本勇太、吉田大紀、和田全平：超伝導磁束量子ビットの研究、横浜国立大学学長裁量経費プロジェクト研究成果報告書 p.93 (2005).
3. 横山朝夫：超伝導磁束量子ビットのエネルギー準位分裂の制御に関する研究、修士論文、横浜国立大学 (2005).
4. 島津佳弘、新関嵩、和田全平、和田洋一：磁場で制御される超伝導ナノデバイスの実験、強磁場新機能ニューズレター、No.9、p.23 (2005).
5. Y. Shimazu, T. Yokoyama, Y. Wada, T. Niizeki, Y. Yamamoto, T. Yoshida, Z. Wada: Spectroscopy on asymmetric flux qubits coupled inductively, Abstracts of 1st International Symposium on Nanometer-scale Quantum Physics, p.95 (2005).
6. Y. Shimazu, Y. Wada, T. Niizeki, Y. Yamamoto, T. Yoshida, Z. Wada, T. Yokoyama: Observation of persistent current states and excitation in coupled flux qubits, Abstracts of International Conference on Nanoelectronics, Nanostructures, and Carrier Interactions, p.159 (2005).

◎2004 年度

【NTT グループ】

1. Shiro Saito, Hirotaka Tanaka, Kouichi Semba, and Hideaki Takayanagi: Multiphoton Transitions in a Superconducting Flux Qubit; NTT Technical Review, 12 月号 p.12-18, (2004).

【理論グループ】

該当なし

【横浜国立大学グループ】

その他

1. 島津佳弘：超伝導細線のインダクタンス測定及び相互インダクタンスで結合した磁束量子ビットの作る磁束信号の解析、日本物理学会講演概要集 第 59 巻第 1 号第 4 分冊 p.679 (2004).
2. 島津佳弘、横山朝夫、和田洋一、新関嵩、山本勇太、吉田大紀、和田全平：結合した磁束量子ビットの基底状態とエネルギー分光、「新しい物理現象や動作原理に基づくナノデバイス・システムの創製」研究領域第一回領域シンポジウム発表要旨集 p.113 (2004).

◎2003 年度

【NTT グループ】

1. 仙場浩一：超伝導量子ビットの現状と課題；機能材料、シーエムシー出版、12 月号 P.29-42, 2003
2. 仙場浩一：超伝導磁束量子ビットの単一回読み出し、NTT 技術ジャーナル、1 月号 P.42-45, 2004.
3. 高柳英明 “量子コンピュータを材料から見る”、材料科学、23 巻、12 号、p.5

(2003).

【理論グループ】

該当なし

【横浜国立大学グループ】

書籍

1. Y. Shimazu, J.E. Mooij: Collective measurement of many equivalent three-junction loops, Toward the controllable quantum states, ed. H. Takayanagi and J. Nitta (World Scientific, Singapore) p.353-358 (2003).

その他

1. Y. Shimazu and T. Nakano: Continuous measurement of magnetic flux of two qubits with Josephson junctions coupled through mutual inductance, Abstracts of 'Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures' (CISN2003), p.34 (2003).
2. 島津佳弘：超伝導細線のインダクタンス測定及び結合した磁束量子ビットの実験とシミュレーション、第9回量子情報技術研究会資料、p.163-166 (2003).
3. 島津佳弘、中野剛善：結合した2個の磁束量子ビットの磁束測定、日本物理学会講演概要集第58巻第1号第4分冊 p.607 (2003).
4. 島津佳弘：超伝導量子ビットデバイスの量子コヒーレンスと量子状態制御、「光による物質反応機構の制御と超高速光デバイス・ナノデバイスの探索」第一回研究会報告書、p.22 (2003).

◎2002年度

【NTTグループ】

1. 高柳英明、田中弘隆、斎藤志郎、中ノ勇人、“超伝導の磁束状態を用いた量子ビットの状態測定”、応用物理、72巻、1号、p.36 (2003)

【理論グループ】

該当なし

【横浜国立大学グループ】

その他

1. 島津佳弘、中野剛善： ^4He 温度における Al の DC-SQUID の特性、日本物理学会講演概要集第57巻第2号第4分冊 p.565 (2002) .
2. 島津佳弘、中野剛善：微小ジョセフソン接合で作られる磁束量子ビット素子の結合系の研究、横浜国立大学 VBL エコテクノロジーシステムラボラトリー年報第6号、p.120 (2002) .
3. Y. Shimazu and T. Nakano: Two flux qubits with Josephson junctions coupled through mutual inductance, Abstracts of the Second International Workshop on Quantum Nonplanar Nanostructures & Nanoelectronics, AIST-Tsukuba Research Center, p.129-131 (2002).

(3)学会発表 (国際学会発表及び主要な国内学会発表)

- ① 招待講演 (国内会議 30 件、国際会議 46 件)

◎2007 年度

【NTT グループ】 (国内会議 2 件、国際会議 1 件)

1. 仙場浩一: ジョセフソン量子ビットを用いた circuit QED; 日本学術振興会、未踏・ナノデバイステクノロジー第151委員会「極限と量子情報処理」研究会, 日本, 2007/07/13
2. 仙場浩一: ジョセフソン量子ビットを用いた circuit QED; 第3回量子情報未来テーマ開拓研究会(JST), 日本, 2007/8/29
3. S. Saito: Non-destructive quantum measurement of a flux qubit; ISS2007, Nov. 5-7, Tsukuba, Japan, 2007

【理論グループ】

該当なし

【横浜国立大学グループ】

該当なし

【東京理科大学グループ】 (国内会議 0 件、国際会議 1 件)

1. H. Takayanagi, S. Saito, J. Johansson, H. Tanaka, K. Kakuyanagi, H. Nakano, M. Ueda and K. Semba: Flux Qubit LC-Resonator coupled system; The 10th Asia Pacific Physics Conference, 21 August 2007, POSTECH, Korea

◎2006 年度

【NTT グループ】 (国内会議 2 件、国際会議 6 件)

1. K. Semba, J. Johansson, S. Saito, T. Meno, H. Tanaka, H. Nakano, M. Ueda, and H. Takayanagi: Vacuum Rabi oscillations observed in a flux qubit LC-oscillator system; International workshop on Macroscopic Quantum Coherence and Computing, Citta' della Scienza, Napoli, Italy, 2006/6/12-16.
2. K. Semba, J. Johansson, S. Saito, T. Meno, H. Tanaka, H. Nakano, M. Ueda, and H. Takayanagi: Vacuum Rabi oscillations observed in a flux qubit LC-oscillator system; 6th Rencontres du Vietnam, Hanoi, 2006/8/6-12.
3. H. Nakano, S. Saito, H. Tanaka, M. Ueda, H. Takayanagi, K. Semba: Some theoretical aspects in superconducting flux-qubit systems; Vietnam, Hanoi 2006/8/6.
4. 仙場浩一: 超伝導回路を用いた量子もつれの実現と制御; 電子情報通信学会シンポジウム, 機械振興会館, 2006/8/23.80
5. 仙場浩一: LC共振量子・超伝導磁束量子ビット結合系での量子状態操作; 電子情報通信学会ソサイエティ大会シンポジウム, 金沢大学 2006/9/19.
6. K. Semba: discussion leader of the session : Josephson Junction Qubits; 2006 US-Japan Workshop on Quantum Information Science (Maui, Hawaii) 2006/10/16-19.
7. K. Semba: Superconducting flux qubit coupled to an LC-oscillator; ISS2006 Nagoya Japan 2006/10/30.

8. K. Semba: Vacuum Rabi oscillations observed in a flux qubit LC-oscillator system; American Physical Society March Meeting 2007, Denver, USA 2007/3/5.

【理論グループ】（国内会議 1 件、国際会議 0 件）

1. 上田正仁: Reversibility in quantum measurement processes; CREST/IRCS Workshop 'Quantum Information and Computation', 2006 年 8 月 9 日, 東京工業大学

【横浜国立大学グループ】

該当なし

【東京理科大学グループ】（国内会議 0 件、国際会議 6 件）

1. H. Takayanagi, "Superconducting Flux Qubits", Ad International Workshop on Solid-State Quantum Computing, Nanjing University, P. R. China, 10 June 2006.
2. H. Takayanagi, "A flux qubit coupled with an LC-resonator", The 8th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity (M2S-HTSC VIII), Dresden, Germany 13, July 2006.
3. H. Takayanagi, "A flux qubit coupled with an LC-resonator", Vith RENCONTRES DU VIETNAM, Nanophysics ; from fundamentals to applications, Hanoi, Vietnam, 7 August 2006.
4. H. Takayanagi, "A flux qubit coupled with an LC-resonator", Trends in nanotechnology, Grenoble, France, 8 September 2006.
5. H. Takayanagi, "Flux Qubits at NTT", Symposium on Fundamentals of Superconducting Quantum Devices, TU Delft, The Netherlands, 19 October, 2006.
6. H. Takayanagi, "Flux Qubit LC-Resonator coupled System", 2nd CREST Nano-Virtual-Labs Joint Workshop on Superconductivity, Kyoto, 11 December, 2006.

◎2005 年度

【NTT グループ】（国内会議 7 件、国際会議 11 件）

1. H. Takayanagi: Readout of Flux Qubits; ESF Workshop "Physics of Superconducting Phase Shift Devices" (Ischia, Italy), April 03, 2005.
2. 高柳英明 (NTT): 超伝導磁束量子ビット; テラヘルツテクノロジーフォーラム, 東京, 2005/5/10.
3. H. Takayanagi (NTT-BRL): Readout of Flux Qubits; 低温物理学研究所コロキウム (ヘルシンキ工科大学, Finland), May 30, 2005.
4. 仙場浩一: 超伝導磁束量子ビット研究の現状; 応用物理学会超伝導分科会主催 第 31 回研究会, 東京, 2005/6/24.
5. H. Takayanagi: Nanotech Research Activities at NTT BRL; NANOMAT-Birkeland conference 2005 (Trondheim, Norway), June 03, 2005.

6. H.Tanaka: Superconducting flux Qubits; Spin and Qubit 2005 Symposium at the Niles Bohr Institute (Copenhagen, Denmark) June 2005.
7. H. Takayanagi: Readout of Flux Qubits; Workshop on Macroscopic Quantum Phenomena (Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, 北京), June 07, 2005.
8. H. Takayanagi: Readout of Flux Qubits; 南京大学コロキウム (南京大学, China) , June 13, 2005.
9. 仙場浩一: マイクロ波による超伝導磁束量子ビットのコヒーレント操作; 第 7 回分子ダイナミック分光ワークショップ, 浜松, 2005/7/7.
10. H. Nakano: Superconducting qubits and their interaction; International Symposium 'Quantum computing 2005', (Kinki University, Higashi-Osaka, Japan,)Sept. 1, 2005.
11. H. Takayanagi: Readout of Flux Qubits; ESF Research Conference on Fundamental Problems of Mesoscopic Physics, (Acquafredda di Maratea, Italy) September 04, 2005.
12. H. Takayanagi: Readout of Flux Qubits; Vortex IV Conference (Crete, Greece), September 09, 2005.
13. 仙場 浩一: 超伝導量子ビットにおける最近の研究 -量子計算素子への道; 日本物理学会2005年秋季大会, 同志社大 (京都), 2005/9/20.
14. 高柳英明: Flux Qubit coupled with a LC-resonator; 東大ーミュンヘン工科大共同会議, 東大先端研, 2005/10/5.
15. 高柳英明: 量子コンピュータへの道; CAMM フォーラム, 東京,2005/10/7
16. 仙場 浩一: 超伝導を用いた量子ビットの最近の進展 ~見えてきた LC 共振量子との相互作用~; 電子情報通信学会 超伝導エレクトロニクス研究会, 機会振興会館, 2006/1/27.
17. K.Semba: Coherent control of a flux-qubit coupled to a quantum LC-resonator; Winter Seminar of Superconductivity, (Finkenberg, Austria) March 22, 2006.
18. K. Semba: Coherent control of a flux-qubit coupled to a quantum LC-resonator; Institute of Quantum Optics and Quantum Information (Innsbruck, Austria) March 24, 2006.

【理論グループ】 (国内会議 0 件、国際会議 7 件)

1. H.Saito and M. Ueda: Self-trapped Bose-Einstein condensates stabilized by oscillating interactions; Solitons in Bose-Einstein Condensates (Almagro, Spain, 2005)
2. M. Ueda: Coherent Nonlinear Dynamics of Collapsing and Exploding Bose-Einstein Condensates, The Fourth IMACS International Conference on Nonlinear Evolution Equations and Wave Phenomena: Computation and Theory; April 11-14, Athens, GA (USA, 2005)
3. M. Ueda: Symmetry breaking in a rotating Bose-Einstein condensate, 14th International Laser Physics Workshop (LPHYS'05); July 4-8, Kyoto (Japan, 2005) (*invited*)

4. M. Ueda: Spinor Bose-Einstein Condensate" (lecture), School on Quantum Phase Transitions and Non-Equilibrium Phenomena in Cold Atomic Gases; July 11-22, Trieste (Italy, 2005)
5. M. Ueda: Symmetry Breaking in Scalar, Spinor, and Rotating Bose-Einstein condensate, Few- and Many-Body Physics IN Quantum Liquids and Gases; August 1-26, Seattle (USA, 2005)
6. M. Ueda: Spinor Bose-Einstein Condensates", Workshop on Spinor- and Multi-Component Bose-Einstein Condensates; September 8-9, Barcelona (Spain, 2005)
7. 11 M. Ueda: Symmetry Breaking in Scalar, Spinor, and Rotating Bose-Einstein Condensate, Nanoscience and Quantum Physics; Univ. of California Berkeley and Tokyo Institute of Technology Interdepartment Symposium January 4-6, Berkeley (USA, 2006)

【横浜国立大学グループ】

該当なし

◎2004 年度

【NTT グループ】（国内会議 8 件、国際会議 6 件）

1. H. Takayanagi: Superconducting Flux Qubit; Spin Qubit Symposium; Old Niels Bohr Institute, Copenhagen, May 4-5, 2004.
2. K. Semba: Superconducting qubits; Experimental forefront and challenges: Are the DiVincenzo Criteria fulfilled in 2004, 大阪 近畿大学, 2004 年 5 月 7 日～8 日
3. H. Takayanagi: Superconducting Flux Qubit; Foundation of Probability and Physics-3; Vaxjo University, Sweden, June 7-12, 2004.
4. 高柳 英明: NTT 物性科学基礎研究所における量子コンピュータの研究; 樽茶多体 相關場プロジェクトシンポジウム、アルカディア市ヶ谷、2004 年 9 月 3 日
5. 高柳 英明: Superconducting Qubit; 日本物理学会 秋季大会, 青森大学, 2004 年 9 月 13 日
6. H. Takayanagi: Solid State Qubits; Solid State Based Quantum Information Processing; Cooperative Research Center (SFB631), Germany, September 16-17, 2004.
7. H. Takayanagi: Readout of Superconducting Flux Qubits; 第 4 回日本・台湾マイクロエレクトロニクスシンポジウム; 新竹, 台湾, October 28-29, 2004.
8. K. Semba: Superconducting Flux Qubits; ISS2004; 新潟コンベンションセンター, 2004 年 11 月 23 日～25 日
9. K. Semba: Coherent control of superconducting flux qubits; NFS2004/VPJ12; 大阪大学, 中ノ島センター, 2004 年 12 月 1 日～2 日

10. H. Takayanagi: Readout of a Flux Qubit with a dc-SQUID; Processing of Quantum Information in RSFQ Circuits and Qubits; Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Germany, November 29 - December 2, 2004.
11. 高柳 英明、超伝導磁束量子ビット, CREST 「量子情報処理シンポジウム」; 一橋記念講堂, 2004 年 12 月 20 日～21 日
12. K. Semba: Coherent control of superconducting flux qubits; 10th International Vortex Workshop; Mumbai, India, 2005 年 1 月 9 日～14 日
13. 高柳 英明、Advances in Science and Technology for Quantum Computing ; JapanNano2005、東京ビッグサイト(江東区有明), 2005 年 2 月 22 日
14. 高柳 英明、量子情報の最近の進展, 日本学術振興会協力会; 東京グリーンパレス(千代田区市ヶ谷), 2005 年 2 月 23 日

【理論グループ】(国内会議 2 件、国際会議 2 件)

1. M. Ueda: "Coherent Nonlinear Dynamics of Collapsing and Exploding Bose-Einstein Condensates", International Seminar on Atomic Processes in Intense Fields and Related Many-Body Phenomena; January 20-23, Kanagawa (Japan, 2005)
2. H. Saito and M. Ueda: "Dynamically stabilized bright solitons", International Workshop on Solitons in Bose-Einstein Condensates; February 9-12, Almagro (Spain, 2005)
3. 上田正仁: 内部自由度をもったボース・アインシュタイン凝縮、日本物理学会、野田市 (2005.3.26)
4. 斎藤弘樹: 原子気体のボース・アインシュタイン凝縮の二次元ソリトンと三次元ドロプレット、日本物理学会、野田市 (2005.3.25)

【横浜国立大学グループ】

該当なし

◎2003 年度

【NTT グループ】(国内会議 8 件、国際会議 6 件)

1. 高柳 英明、超伝導量子ビット: 量子スピニエレクトロニクス分科会・有機・分子エレクトロニクス分科会合同分科会; 国際高等研究所, 2003 年 6 月 20 日～21 日
2. 仙場浩一, 高柳英明, 中ノ勇人, 田中弘隆, 斉藤志郎: 磁束量子ビットの単一回読み出しについて; Hot Topics in Quantum Statistical Physics The coordinator of the Leiden q-conference, オランダ Leiden August 11-16, 2003.
3. 仙場浩一, 高柳英明, 斉藤志郎, 田中弘隆: 超伝導量子ビットの現状と可能性について; 秋季第 64 回応用物理学会学術講演会; 福岡大学七隈キャンパス, 2003 年 8 月 30～9 月 2 日
4. 高柳 英明: Single-shot measurement of the qubit-state with a dc-SQUID; The 9th Japan-US Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy; 八ヶ岳, 2003 年 9 月 17 日～19 日

5. 高柳 英明: 量子コンピュータ; 2003年度 新機能素子シンポジウム; 経団連会館 東京・大手町, 2003 年 10 月 9 日
6. 高柳 英明: Superconducting Flux Qubit: Quantum Information; Quantum Computation and Nanotechnology; 早稲田大学, 2003 年 10 月 29 日～31 日
7. 高柳 英明: Superconducting Flux Qubit: International Conference on Quantum Information; 東京理科大学, 2003 年 11 月 1 日～3 日
8. 高柳 英明: Superconducting Quantum Computing Device; 第 10 回量子効果エレクトロニクス国際シンポジウム; 東京工業大学, 2003 年 11 月 27 日
9. H. Takayanagi: Superconducting Flux Qubit; Workshop on Quantum Transport in Low Dimensional Systems, 台湾 December 4-6, 2003
10. 高柳 英明: 磁束量子ビット; 応用物理学会超伝導分科会主催第 28 回研究会; 東京都港区芝公園 機械振興会館, 2003 年 12 月 11 日
11. H. Takayanagi: Superconducting Flux Qubit as a Macroscopic Artificial Atom; XXXIXth Rencontres de Moriond, Italy Jan 25-Feb 1, 2004.
12. 高柳 英明: Quantum Information Technology at NTT; 量子情報通信と量子ナノデバイスに関する国際シンポジウム; 三田共用会議所, 2004 年 3 月 11 日～12 日
13. 高柳 英明: Quantum Information Technology at NTT; 東京工業大学 21 世紀 COE プログラム「量子ナノ物理学」第一回公開シンポジウム; 五反田ゆうぽうと, 2004 年 3 月 17 日～18 日
14. H. Takayanagi: Superconducting Flux Qubit; Quantum Technologies 2004, UBC campus (Canada) March 30-31, 2004.

【理論グループ】

該当なし

【横浜国立大学グループ】

該当なし

◎2002 年度

【NTT グループ】

【理論グループ】

該当なし

【横浜国立大学グループ】

該当なし

② 口頭発表

(国内会議 69 件、国際会議 16 件)

◎2007 年度

【NTT グループ】（国内会議 3 件、国際会議 2 件）

1. 中ノ勇人, 斉藤志郎, 仙場浩一, 高柳英明: ジョセフソン分岐アンプによる量子ビット読み出しにおける量子的振る舞い; AQIS2007, 日本, 2007/9/6.
2. Y. D. Wang, K. Semba, H. Yamaguchi: Self-cooling of a Micro-mechanical Resonator by Lorentz Force; AQIS2007, 日本, 2007/9/6.
3. ワンインダン, 仙場浩一, 山口浩司: Self-cooling of a Micro-mechanical Resonator by Lorentz Force; 日本物理学会第 62 回年次大会(社団法人日本物理学会), 日本, 2007/9/21.
4. 中ノ勇人, 斉藤志郎: 非調和振動子による量子ビット読み出しの量子古典対応とデコヒーレンス II; 日本物理学会第 62 回年次大会(社団法人日本物理学会), 日本, 2007/9/21.
5. 角柳孝輔, 仙場浩一: 磁束量子ビットの周波数アドレス読出しスキーム; 日本物理学会第 62 回年次大会(社団法人日本物理学会), 日本, 2007/9/21

【理論グループ】（国内会議 5 件、国際会議 0 件）

1. 川口由紀, 斎藤弘樹, 上田正仁: 磁場中のスピノル BEC におけるダイポール相互作用; 日本物理学会秋季大会（北海道大学、札幌、2007 年 9 月 21-24 日）
2. 寺嶋容明, 上田 正仁: 測定された状態の近似的な復元とさらなる情報のゲイン 日本物理学会秋季大会（北海道大学、札幌、2007 年 9 月 21-24 日）
3. 黒谷雄司, 沙川貴大, 上田正仁: Upper bound on our knowledge about noncommuting observables for a Qubit System; 日本物理学会秋季大会（北海道大学、札幌、2007 年 9 月 21-24 日）
4. 渡辺 優, 沙川貴大, 上田正仁: 測定によって得られる情報量という観点からの新しい No-cloning 不等式; 日本物理学会秋季大会（北海道大学、札幌、2007 年 9 月 21-24 日）
5. 手塚真樹, 上田正仁: 粒子数不均衡なフェルミオン系の超流動: 密度行列繰り込み群によるアプローチ; 日本物理学会秋季大会（北海道大学、札幌、2007 年 9 月 21-24 日）

【横浜国立大学グループ】（国内会議 1 件、国際会議 0 件）

1. 島津佳弘, 新関嵩, 和田全平: 2 ビットの可変結合器としての制御可能な磁束輸送回路の研究、ナノテクデバイス研究会、つくば (2007.7.10).

【東京理科大学グループ】（国内会議 0 件、国際会議 0 件）

◎2006 年度

【NTT グループ】（国内会議 7 件、国際会議 0 件）

1. 角柳孝輔, 中ノ勇人, 上田正仁, 仙場浩一: ジョセフソン LC 回路を介した超伝導

磁束量子ビット間の量子ゲート; 物理学会秋期大会 2006/9/23.

2. Fei Xue, Y.D Wang, C. P. Sun, H. Okamoto, H. Yamaguchi, K. Semba: Controllable Coupling between Flux Qubit and Nanomechanical Resonator by Magnetic Field; 第15回 量子情報技術研究会 (QIT15) 2006/11/21.
3. 中ノ勇人: 調和振動子を媒介とした量子ビットエンタングルメント形成とデコヒーレンス; 第15回 量子情報技術研究会 (QIT15) 2006/11/21.
4. 中ノ勇人: デコヒーレンスのある量子共振器を媒体とした超伝導量子ビットエンタングルメント; 日本物理学会 2007/2/19.
5. 角柳孝輔, 齊藤志郎, 中ノ勇人, 仙場浩一, 影井誠一郎, 高柳英明: 超伝導磁束量子ビットによる LC 共振回路の非古典的状態の生成; 日本物理学会春季大会 2007/3/18.
6. 齊藤志郎, A. Lupascu, T. Picot, P.C. de Groot, C. J. P. M. Harmans, J. E. Mooij: 超伝導磁束量子ビットの量子非破壊測定; 応用物理学会春季大会 2007/3/27.
7. 角柳孝輔, 齊藤志郎, 中ノ勇人, 仙場浩一, 影井誠一郎, 高柳英明: 超伝導 LC 共振器の光子数状態の生成; 応用物理学会春季大会 2007/3/27.

【理論グループ】 (国内会議 3 件、国際会議 0 件)

1. 寺嶋容明、上田正仁: 任意のスピンによる可逆な量子測定; 日本物理学会 2006 年秋季大会 (千葉大学、千葉、2006 年 9 月 23-26 日)
2. 寺嶋容明、上田正仁: 任意のスピンによる可逆な量子測定; 第 15 回量子情報技術研究会 (QIT15) (キャンパスプラザ京都、京都、2006 年 11 月 21-22 日)
3. 沙川貴大、上田正仁: Jarzynski Equality with Maxwell's Demon; 日本物理学会春季大会 (鹿児島大学、鹿児島、2007 年 3 月 18-21 日)

【横浜国立大学グループ】 (国内会議 1 件、国際会議 0 件)

1. 島津佳弘、新関嵩、和田全平: 結合度を制御することのできる磁束輸送回路 II: DC-SQUID の非対称性の評価、日本物理学会 2007 年春季大会、鹿児島 (2007.3.18).

【東京理科大学グループ】 (国内会議 0 件、国際会議 0 件)

◎2005 年度

【NTT グループ】 (国内会議 11 件、国際会議 5 件)

1. 仙場浩一、齊藤志郎、目野誉喜、Jan Johansson、中ノ勇人、田中弘隆、高柳英明: Coherent control of a superconducting flux qubit coupled to a harmonic oscillator; 量子情報技術研究会 (QIT12) NTT 厚木研究開発センター 2005/5/12
2. 中ノ勇人、田中弘隆、齊藤志郎、仙場浩一: 磁束量子ビットを Rabi 振動の単一回測定法で検出することは可能か?; 第 12 回量子情報技術研究会 (QIT12), NTT 厚木研究開発センター, 2005/5/12.

3. S. Saito: Multi-photon Rabi oscillations observed in a superconducting flux qubit; IQEC and CLEO-PR2005 (Tokyo) July 13, 2005.
4. H.Saito and M.Ueda: Self-trapping of Bose-Einstein condensates by oscillating interactions; The 8th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology (Japan) August, 2005.
5. H. Nakano , S. Saito, T. Mouri, H. Takayanagi, and R. Fazio: Berry Phase Detection in Charge-Coupled Superconducting Flux-Qubits and the Effect of Decoherence; International Symposium ISQM-Tokyo'05 (Hatoyama, Japan) August 23, 2005.
6. 齊藤志郎、沓澤竜弥、目野誉喜、田中弘隆、上田正仁、仙場浩一、高柳英明: 超伝導磁束量子ビットのパラメトリック制御; 第66回応用物理学会学術講演会, (徳島大) 2005/9/7.
7. Jan Johansson、齊藤志郎、目野誉喜、中ノ勇人、仙場浩一、高柳英明: 超伝導磁束量子ビットの真空ラビ振動; 第66回応用物理学会学術講演会, (徳島大) 2005/9/7
8. 齊藤志郎、沓澤竜弥、目野誉喜、田中弘隆、上田正仁、Jan Johansson、仙場浩一、高柳英明: 環境と結合した超伝導量子ビットのラビ振動; 日本物理学会2005年秋季大会, (同土社大, 京都) 2005/9/20.
9. 坂下忠, 渡辺信嗣, 長井智, 佐々木進, 平山祥郎, 田中弘隆 (NTT) : 多重パルス列による Ga, As 核スピンの T_2 II; 日本物理学会2005年秋季大会, (同土社大, 京都) 2005/9/22.
10. Jan Johansson、齊藤志郎、目野誉喜、中ノ勇人、上田正仁、仙場浩一、高柳英明: Vacuum Rabi oscillations in a macroscopic solid state system; 日本物理学会2005年秋季大会 (同土社大, 京都) 2005/9/22
11. 中ノ勇人, 仙場浩一, 高柳英明: 非線形振動子のバイファクションによる qubit 測定の量子論; 第13回量子情報技術研究会 (QIT13) (東北大学電気通信研究所) 2005/11/24.
12. J. Johansson, S. Saito, T. Meno, H. Tanaka, H. Nakano, M. Ueda, K. Semba, and H. Takayanagi: Vacuum Rabi oscillations observed in a flux qubit LC-oscillator system; International conference MS+S2006 (Atsugi, Japan) March 2, 2006.
13. K. Semba, J. Johansson, S. Saito, T. Meno, H. Nakano, M. Ueda, and H. Takayanagi,: Quantized Rabi oscillation observed in the superconducting flux qubit LC-harmonic oscillator system; APS-Mar06 (Baltimore MD, USA) 17 March 2006.
14. 角柳 孝輔, 齊藤 志郎, 仙場 浩一, 高柳 英明: Phase-Cycle 法による超伝導量子ビットの緩和時間の測定; 第53回応用物理学関係連合講演会, (武蔵工業大学) 2006/3/24.
15. 中ノ勇人, 仙場浩一、高柳英明: 非調和振動子による量子ビット読み出しの量子古典対応とデコヒーレンス; 日本物理学会第61回年次大会 (愛媛) 2006/3/30.

16. 角柳 孝輔, 齋藤 志郎, 仙場 浩一, 高柳 英明 : 磁束量子ビットの縮退点近傍でのコヒーレンス時間; 日本物理学会第 61 回年次大会 (愛媛大) 2006/3/30.

【理論グループ】 (国内会議 4 件、国際会議 4 件)

1. H.Saito and M. Ueda: Self-trapped Bose-Einstein condensates stabilized by oscillating interactions; Solitons in Bose-Einstein Condensates (Spain), 2005.
2. H.Saito and M.Ueda: Stabilization of Bose-Einstein droplets by oscillating interactions; The 14th International Laser Physics Workshop (Kyoto, 2005)
3. H.Saito and M.Ueda: Self-trapping of Bose-Einstein condensates by oscillating Interactions; The 8th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology (Saitama, 2005)
4. 斎藤弘樹・上田正仁, スピンを持つ BEC における自発磁化と構造形成, 日本物理学会 2005 年秋季大会 (同志社大, 京都) 2005/9.
5. 斎藤弘樹、上田正仁: スピンを持つ BEC における自発磁化と構造形成; 日本物理学会 2005 年秋季大会 (同志社大学、京都、2005 年 9 月 19-22 日)
6. 黒谷雄司: 回路を用いた量子測定の分析; 量子論の諸問題と今後の発展 (高エネルギー加速研究所、茨城、2006 年 3 月 10-11 日)
7. 黒谷雄司, 上田正仁: 量子測定の回路による分析; 日本物理学会 2006 年春季大会 (松山大学、愛媛、2006 年 3 月 27-30 日)
8. Y. Kawaguchi, H. Saito, and M. Ueda: Einstein-de Haas Effect in Dipolar Bose-Einstein Condensates; International workshop Cold Atoms Meet Condensed Matter, Mar 27-31, . Dresden (Germany, 2006)

【横浜国立大学グループ】 (国内会議 1 件、国際会議 0 件)

1. 島津佳弘、新関嵩: ジョセフソン接合を使った制御可能な磁束輸送回路の実験、日本物理学会第 61 回年次大会、松山 (2006.3.30).

◎2004 年度

【NTT グループ】 (国内会議 9 件、国際会議 2 件)

1. 田中弘隆, 沓澤竜弥, 斎藤志郎, 仙場浩一, 高柳英明: 超伝導リングでの巨視 2 準位状態の位相測定; 日本物理学会 秋季大会; 青森大学, 2004 年 9 月 12 日~15 日
2. 中ノ勇人, 仙場浩一, 高柳英明: Analysis on flux qubit readout through SQUID plasma frequency measurement; Int. Sympo. on Solid State Based Quantum Information Processing; Herrsching, Bavaria, Germany 2004 年 9 月 13 日~17 日
3. 中ノ勇人: 量子系の制御理論的記述; 量子情報技術研究会(QIT11); 京都大学 2004 年 12 月 6 日~7 日

4. 田中弘隆, 沓澤竜弥, 齊藤志郎, 仙場浩一, 高柳英明: 超伝導磁束量子ビットでの位相制御パルスの最適化; 量子情報技術時限研究会; 京都大学百周年時計台記念館, 2004 年 12 月 6 日～7 日
5. Jan Johansson, 齊藤志郎, 仙場浩一, 高柳英明: Qubit-qubit coupling via resonantor; 量子情報技術時限研究会; 京都大学百周年時計台記念館, 2004 年 12 月 6 日～7 日
6. 中ノ勇人: Adiabatic Berry phase detection only by controlling external magnetic-fluxes in coupled flux-qubit system: Topology in Ordered Phases; 札幌グランドホテル, 2005 年 3 月 7 日～10 日
7. 中ノ勇人: 2 磁束量子ビット系における磁束の制御のみでベリー位相を検出する断熱過程; 日本物理学会 年次大会; 東京理科大学 野田キャンパス, 2005 年 3 月 24 日～27 日
8. 齊藤志郎, 沓澤竜弥, 目野誉善, 田中弘隆, 中ノ勇人, 仙場浩一, 高柳英明, 東京工業大学 上田正仁: 超伝導磁束量子ビットにおける多光子ラビ振動の観測; 日本物理学会 年次大会; 東京理科大学 野田キャンパス, 2005 年 3 月 24 日～27 日
9. Frank Deppe, 目野誉善, 齊藤志郎, 田中弘隆, 仙場浩一, 高柳英明, KTH スウェーデン王立工科大学 David Haviland: Flux Qubit Readout via a Series Capacitor; 日本物理学会 年次大会; 東京理科大学 野田キャンパス, 2005 年 3 月 24 日～27 日
10. Jan Johansson, 目野誉善, 齊藤志郎, 仙場浩一, 高柳英明: Qubit-qubit coupling via resonantor; 日本物理学会 年次大会; 東京理科大学 野田キャンパス, 2005 年 3 月 24 日～27 日
11. 田中弘隆, 沓澤竜弥, 齊藤志郎, 仙場浩一, 高柳英明: 超伝導リング量子 2 準位系での効率的な量子状態制御～アダマール変換～; 応用物理学会 春季講演会; 埼玉大学, 2005 年 3 月 29 日～4 月 1 日

【理論グループ】 (国内会議 3 件、国際会議 0 件)

1. 関澤鉄兵、上田正仁: スピンボーズ 1 ボース気体の超流動密度、日本物理学会春季大会、2005 年 3 月 24 日、野田市
2. 村田佳史、上田正仁: スピン 1 ボース・アインシュタイン凝縮体の ボゴリウボフ励起: 二次ゼーマン効果、日本物理学会春季大会、2005 年 3 月 24 日、野田市
3. 大熊孝広、上田正仁: 同一粒子の原子-分子混合気体の粒子統計、日本物理学会春季大会、2005 年 3 月 24 日、野田市

【横浜国立大学グループ】 (国内会議 1 件、国際会議 0 件)

1. 島津佳弘、山本勇太、和田全平、新関嵩、吉田大紀、和田洋一: 金属粉末を使用した低温実験用マイクロ波フィルターの特性、日本物理学会第 60 回年次大会、千葉県野田市 (2005.3.25).

◎2003 年度

【NTT グループ】 (国内会議 16 件、国際会議 3 件)

1. 齊藤志郎, 田中弘隆, 中ノ勇人, 仙場浩一, 高柳英明, デュッセルドルフ大学, デルフト大学 Michael Thorwart, 東工大 上田 正仁: 超伝導磁束量子ビットにおける多

光子吸収過程; Hot Topics in Quantum Statistical Physics, Leiden, Netherlands 2003
年 8 月 11 日～8 月 16 日

2. フランクデッペ, 齊藤志郎, サンドリースブホー, 田中弘隆, 高柳英明: 磁束量子ビットのジョセフソン接合容量の評価; 第64回応用物理学会秋季学術講演会; 福岡大学七隈キャンパス (福岡市), 2003 年 8 月 30 日～9 月 2 日
3. 田中弘隆, 高柳英明, 量子もつれを目指した結合超伝導リングの固有状態の解析: 第64回応用物理学会秋季学術講演会; 福岡大学七隈キャンパス (福岡市), 2003 年 8 月 30 日～9 月 2 日
4. 齊藤志郎, 高柳英明, 仙場浩一, 中ノ勇人, 田中弘隆, 東京工業大学 上田正仁: 超伝導磁束量子ビットの読み出しの温度依存性; 日本物理学会 2003 年秋季大会; 岡山大学 (津島キャンパス), 2003 年 9 月 20 日～9 月 23 日
5. 仙場浩一, デルフト工科大学応用物理学科 I.Chiorescu, C.J.P.M.Harmans, J.E.Mooij, NEC 基礎研究所 中村泰信: Flux-qubit のスピンエコー; 日本物理学会 2003 年秋季大会; 岡山大学 (津島キャンパス), 2003 年 9 月 20 日～9 月 23 日
6. 仙場浩一, デルフト工科大学応用物理学科 I.Chiorescu, C.J.P.M.Harmans, J.E.Mooij, NEC 基礎研究所 中村泰信: Flux-qubit のパルス測定 readout fidelity; 日本物理学会 2003 年秋季大会; 岡山大学 (津島キャンパス), 2003 年 9 月 20 日～9 月 23 日
7. 毛利拓也, 中ノ勇人, 高柳英明: 2つの磁束量子ビットにおけるエンタングルした状態の時間発展とデコヒーレンス; 第9回量子情報技術研究会; NTT 厚木研究開発センタ, 2003 年 12 月 11 日～12 月 12 日
8. 中ノ 勇人: SQUID インダクタンス測定による超伝導磁束量子ビットの状態測定について; 第9回量子情報技術研究会; NTT 厚木研究開発センタ, 平成 15 年 12 月 11 日～12 月 12 日
9. 仙場浩一: Incompleteness of the Operating Pulses and Decoherence of a Superconducting Flux Qubit. (制御パルスの不完全性と超伝導磁束量子ビットのデコヒーレンス); 第9回量子情報技術研究会 (QIT9); NTT厚木研究開発センター, 2003 年 12 月 11 日～12 月 12 日
10. 田中弘隆, 齊藤志郎, 沓澤竜弥, 仙場浩一, 高柳英明: 超伝導ジョセフソン接合リングの量子状態制御; MS+S2004; NTT 先端技術総合研究所, 2004 年 3 月 1 日～4 日
11. Franc Deppe, 田中弘隆, 齊藤志郎, 高柳英明: ナノメートルサイズのジョセフソン接合の容量評価: DC-SQUID 共鳴電圧ステップと量子ビット測定の比較検討; MS+S 2004; NTT先端技術総合研究所, 2004 年 3 月 1 日～4 日
12. 仙場浩一, 田中弘隆, 齊藤志郎, 沓澤竜弥, 中ノ勇人, 高柳英明, 東工大 上田正仁: Rabi Oscillation in a Superconducting Flux Qubit (超伝導磁束量子ビットのラビ振動); Annual APS March Meeting 2004; カナダ Montreal, March22-26, 2004.
13. 毛利拓也, 中ノ勇人, 高柳英明: 2つの磁束量子ビットにおけるエンタングルした状態

のデコヒーレンス; 日本物理学会 第59回年次大会; 九州大学箱崎地区, 2004 年 3 月 27 日

14. 齊藤志郎, 田中弘隆, 中ノ勇人, 仙場浩一, 上田正仁, 高柳英明, NTT 物性科学基礎研究所 Michael Thorwart: 超伝導磁束量子ビットにおける多光子吸収過程; 第 51 回応用物理関係連合講演会 応用物理学会; 九州大学箱崎地区, 2004 年 3 月 27 日～30 日
15. 田中弘隆, 齊藤志郎, 沓澤達弥, 仙場浩一, 高柳英明: 超伝導リングにおける巨視的量子重ね合わせの実現; 第 59 回年次大会; 九州大学箱崎地区, 2004 年 3 月 27 日～30 日
16. 田中弘隆, 沓澤竜弥, 齊藤志郎, 上田正仁, 中ノ勇人, 仙場浩一, 高柳英明: 超伝導磁束状態を用いた量子ビット; 第 59 回年次大会; 九州大学箱崎地区, 2004 年 3 月 27 日～30 日
17. 齊藤志郎, 田中弘隆, 中ノ勇人, 仙場浩一, 上田正仁, 高柳英明, NTT 物性科学基礎研究所 Michael Thorwart: 超伝導磁束量子ビットにおける多光子吸収過程; 第 51 回応用物理関係連合講演会 応用物理学会, 東京, 八王子市, 2004 年 3 月 28 日
18. 沓澤竜弥(東京理科大), 田中弘隆, 齊藤志郎, 仙場浩一, 高柳英明: 超伝導磁束量子ビットにおけるラビ振動の観測; 応用物理学会; 東京, 八王子市, 2004 年 3 月 28 日～30 日
19. 中ノ 勇人: SQUI のプラズマ振動数測定による磁束量子ビットの読み出しメカニズム; 日本物理学会 第59回年次大会; 九州大学箱崎地区, 2004 年 3 月 30 日

【理論グループ】

該当なし

【横浜国立大学グループ】 (国内会議 2 件、国際会議 0 件)

1. 島津佳弘: 超伝導量子ビットデバイスの量子コヒーレンスと量子状態制御、「光による物質反応機構の制御と超高速光デバイス・ナノデバイスの探索」第一回研究会、横浜 (2003.7.25)
2. 島津佳弘: 超伝導細線のインダクタンス測定及び相互インダクタンスで結合した磁束量子ビットの作る磁束信号の解析、日本物理学会第 59 回年次大会、福岡 (2004.3.27)

◎2002 年度

【NTT グループ】

該当なし

【理論グループ】

該当なし

【横浜国立大学グループ】 (国内会議 2 件、国際会議 0 件)

1. 島津佳弘、中野剛善： ^4He 温度における AI の DC-SQUID の特性、日本物理学会 2002 年秋季大会、中部大学 (2002.9.7)
2. 島津佳弘、中野剛善：結合した 2 個の磁束量子ビットの磁束測定、日本物理学会第 58 回年次大会、東北大学 (2003.3.28)

③ ポスター発表 (国内会議 19 件、国際会議 32 件)

◎2007 年度

【NTT グループ】 (国内会議 4 件、国際会議 1 件)

1. 中ノ勇人：エネルギー固有状態の視点からのジョセフソン分岐アンプの量子的分析; Quantum Information Science, Gordon Research conf.イタリア,2007/4/15.
2. 角柳孝輔, 斉藤志郎, 中ノ勇人, 仙場浩一, 目野誉喜, 高柳英明, Frank Deppe, Alexander Shnirman: Dephasing of a superconducting flux qubit; 第3回量子情報未来テーマ開拓研究会(JST), 日本, 2007/8/28
3. 角柳孝輔, 斉藤志郎, 中ノ勇人, 仙場浩一, 誠一郎, 高柳英明: Non-classical excitation of an LC resonator coupled to a superconducting flux qubit; 第3回量子情報未来テーマ開拓研究会(JST), 日本, 2007/8/28
4. 山田義春, 角柳孝輔, 斉藤志郎, 仙場浩一: 磁束ノイズ耐性のある量子ビット構造; 第3回量子情報未来テーマ開拓研究会(JST), 日本, 2007/8/28
5. 角柳孝輔, 斉藤志郎, 中ノ勇人, 仙場浩一, 影井誠一郎, 高柳英明: Non-classical excitation of an LC resonator coupled to a superconducting flux qubit; AQIS(2007), 京都, 日本, 2007/9/3

【理論グループ】

該当なし

【横浜国立大学グループ】 (国内会議 2 件、国際会議 0 件)

1. 島津佳弘、新関嵩、和田全平：磁束量子ビットの結合のための可変結合回路、第 16 回量子情報技術研究会、NTT 厚木研究開発センタ (2007.5.18).
2. 和田全平、齊藤友貴、島津佳弘：新規構造をもつ磁束量子ビットデバイスの作製と測定、ナノテクノロジーシンポジウム 2007、横浜 (2007.8.2).

【東京理科大学グループ】 (国内会議 0 件、国際会議 1 件)

1. K. Kakuyanagi, T. Meno, S. Saito, H. Nakano, K. Semba, H. Takayanagi, F. Deppe, and A. Shnirman, "Dephasing of a superconducting flux qubit", Fifth Int. Conf. on Vortex Matter, 13 September, 2007, Rhodes, Greece.

◎2006 年度

【NTT グループ】 (国内会議 0 件、国際会議 4 件)

1. H. Nakano, H. Tanaka, S. Saito, K. Semba: Practical Impossibility of Observing a Rabi

Oscillation without Averaging over Many Detections; 8Th Int.conf.Quantum communication, Measurement and Computing Tsukuba Japan 2006/12/2.

2. Fei Xue, Y.D Wang, C. P. Sun, H. Okamoto, H. Yamaguchi, K. Semba: Controllable Coupling between Flux Qubit and Nanomechanical Resonator by Magnetic Field; International Conference on Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interactions, NTT Atsugi R&D Center, Kanagawa, Japan 2007/2/22.
3. K. Kakuyanagi, S. Saito, H. Nakano, K. Semba: Coherence time measurement of a flux qubit near the degeneracy point; International Conference on Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interactions, NTT Atsugi R&D Center, Kanagawa, Japan 2007/2/22.
4. K. Kakuyanagi, S. Saito, H. Nakano, K. Semba, T. Meno, H. Takayanagi, Fank. Deppe, Alexander. Shnirman: Dephasing of a superconducting flux qubit; APS March Meeting 2007, Denver, USA 2007/3/5.

【理論グループ】

該当なし

【横浜国立大学グループ】（国内会議 3 件、国際会議 1 件）

1. 島津佳弘：微小ジョセフソン接合で作られる量子効果ナノデバイスの研究、ナノテクノロジーシンポジウム2006、横浜市立大学エクステンションセンター (2006.8.2).
2. Y. Shimazu, T. Niizeki, Z. Wada, Y. Saito: Circulating current in a superconducting loop interrupted by a DC-SQUID with asymmetry, 19th International Symposium on Superconductivity ISS2006, Nagoya (2006.11.1).
3. 和田全平、新関嵩、島津佳弘：超伝導磁束量子ビットとその結合回路の研究、第2回ナノテク交流シンポジウム、横浜市立大学 (2007.3.8)
4. 島津佳弘、新関嵩、和田全平：結合度を制御することのできる磁束輸送回路 II：DC-SQUID の非対称性の評価、日本物理学会 2007 年春季大会、鹿児島 (2007.3.18)

【東京理科大学グループ】（国内会議 0 件、国際会議 0 件）

◎2005 年度

【NTT グループ】（国内会議 0 件、国際会議 7 件）

1. S. Saito T. Kutsuzawa, T. Meno, H. Tanaka, M. Ueda, H. Nakano, K. Semba, and H. Takayanagi: Coherent control of a flux qubit with two-tone microwave pulses; 24th International Conference on Low Temperature Physics (LT24) (Orlando, Florida) August 12, 2005.
2. K. Semba, S. Saito, T. Meno, J. Johansson, H. Takayanagi: Coherent control of Coupled Superconducting Macroscopic Quantum Systems; 24th International Conference on Low Temperature Physics (LT24) (Orlando, Florida) August 12, 2005.
3. H. Nakano, H. Takayanagi, and R. Fazio: Berry Phase and Effect of Decoherence in

Coupled Superconducting Flux-Qubits; ESF International Symposium "Fundamental Problems in Mesoscopic Physics", (Maratea, Italy) September 4, 2005.

4. K. Kakuyanagi, S. Saito, K. Semba, and H. Takayanagi: Coherence time measurement of a flux qubit near the degeneracy point; GDEST Workshop on Quantum Information and Coherence, Max Planck Society (Munich, Germany) 9 December 2005.
5. K. Semba, J. Johansson, S. Saito, T. Meno, H. Nakano, M. Ueda, H. Takayanagi: Quantized Rabi frequencies observed in the superconducting flux qubit LC-harmonic oscillator system; GDEST Workshop on Quantum Information and Coherence, Max Planck Society, (Munich, Germany) 9 December 2005.
6. K. Kakuyanagi, S. Saito, K. Semba, and H. Takayanagi: Coherence time measurement of a flux qubit near the degeneracy point; International Symposium 'Mesoscopic Superconductivity & Spintronics 2006', (Atsugi,) 27 February 2006.
7. H. Nakano, K. Semba, and H. Takayanagi: Inductive Readout of Superconducting Flux-qubit with Nonlinearly-coupled Resonator; International Symposium 'Mesoscopic Superconductivity & Spintronics 2006', (Atsugi) 28 February 2006.

【理論グループ】

該当なし

【横浜国立大学グループ】（国内会議 3 件、国際会議 3 件）

1. 島津佳弘、新関嵩、和田全平、和田洋一：磁場で制御される超伝導ナノデバイスの実験、特定領域研究「強磁場新機能の開発」「ナノデバイスと磁場」研究会、千葉(2005.7.1).
2. 島津佳弘：超伝導ナノデバイスにおける量子効果の研究、ナノテクノロジー・シンポジウム 2005、横浜 (2005.8.3).
3. Y. Shimazu, T. Niizeki, Y. Wada: Fabrication and characterization of a switchable flux transformer using a DC-SQUID, 18th International Symposium on Superconductivity, Tsukuba (2005.10.26).
4. Y. Shimazu, Control of a switching current of a DC-SQUID with an electric current in comparison with control with magnetic field, International Symposium on Magneto-Science, Yokohama (2005. 11.15).
5. Y. Shimazu, T. Niizeki: Characteristics of a switchable superconducting flux transformer using a DC-SQUID, International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics MS+S 2006, Atsugi (2006.2.28).
6. 島津佳弘、新関嵩：DC-SQUID 構造をもつ制御可能な磁束量子ビット結合回路、東京工業大学 21 世紀 COE プログラム「量子ナノ物理学」第 2 回公開シンポジウム、五反田 (2006.3.17).

◎2004 年度

【NTT グループ】（国内会議 2 件、国際会議 7 件）

1. 仙場浩一、田中弘隆、斉藤志郎、沓澤竜弥、中ノ勇人、東京工業大学 上田正仁、高柳英明: Operation and readout of a superconducting flux qubit; FQMT04, Prague;

Czech Republic, 2004 年 7 月 26 日～7 月 29 日

2. Frank Deppe, 田中弘隆, 仙場浩一, 高柳英明, David Haviland: Electric Environment for a Flux Qubit: Design and Measurements; 日本学術振興会 茅コンファレンス; 宮城蔵王ロイヤルホテル(宮城県刈田郡蔵王町), 2004 年 8 月 22 日～25 日
3. 齊藤志郎, 田中弘隆, 中ノ勇人, 仙場浩一, 高柳英明, 東京工業大学 上田正仁, Heinrich-Heine 大学 Michael Thorwart: 超伝導磁束量子ビットにおける多光子吸収過程; 量子情報未来開拓研究会; 沖縄県知念村, 2004 年 8 月 1 日～12 日
4. 中ノ 勇人: Block Diagrams for Quantum Dynamics; NNCI2005; NTT 厚木研究開発センター, 2005 年 1 月 30 日～2 月 2 日.
5. 毛利拓也、中ノ 勇人: Time evolution and decoherence of entangled states in coupled flux qubits; NNCI2005; NTT 厚木研究開発センター, 2005 年 1 月 30 日～2 月 2 日
6. 齊藤志郎, 沓澤竜弥, 目野誉善, 田中弘隆, 中ノ勇人, 仙場浩一, 高柳英明, 上田正仁: Multi-photon Rabi oscillations observed in a superconducting flux qubit; NNCI2005; NTT 厚木研究開発センター, 2005 年 1 月 30 日～2 月 2 日.
7. Frank Deppe, 目野誉善, 齊藤志郎, 田中弘隆, 仙場浩一, 高柳英明, David Haviland: Flux Qubit Readout via a Series Capacitor; NNCI2005; NTT 厚木研究開発センター, 2005 年 1 月 30 日～2 月 2 日
8. Jan Johansson, 目野誉善, 齊藤志郎, 仙場浩一, 高柳英明: Qubit-qubit coupling via resonator; NNCI2005; NTT 厚木研究開発センター, 2005 年 1 月 30 日～2 月 2 日
9. K. Semba : Superconducting flux qubits; Quantum Information Science GRC2005, Ventura; CA, USA, 2005 年 2 月 27 日～3 月 4 日.

【理論グループ】

該当なし

【横浜国立大学グループ】 (国内会議 3 件、国際会議 2 件)

1. 島津佳弘: 超伝導ナノデバイスの実現のための電磁場環境制御、横浜国立大学 ナノテクノロジー・シンポジウム、横浜 (2004.8.4).
2. 島津佳弘、横山朝夫、和田洋一、新関嵩、山本勇太、吉田大紀、和田全平: 結合した磁束量子ビットの基底状態とエネルギー分光、「新しい物理現象や動作原理に基づくナノデバイス・システムの創製」研究領域第一回領域シンポジウム、東京 (2004.10.4).
3. Y. Shimazu, T. Yokoyama, Y. Wada, T. Niizeki, Y. Yamamoto, T. Yoshida, Z. Wada: Spectroscopy on asymmetric flux qubits coupled inductively, 1st International Symposium on Nanometer-scale Quantum Physics, 東京工業大学 (2005.1.26).
4. Y. Shimazu, Y. Wada, T. Niizeki, Y. Yamamoto, T. Yoshida, Z. Wada, T. Yokoyama: Observation of persistent current states and excitation in coupled flux qubits, International Conference on Nanoelectronics, Nanostructures, and Carrier Interactions, 厚木 (2005.1.31).

5. 島津佳弘、横山朝夫、和田洋一、新関嵩、山本勇太、吉田大紀、和田全平：超伝導磁束量子ビットの研究、横浜国立大学学長裁量経費プロジェクト研究成果報告会、横浜 (2005.3.11)

◎2003 年度

【NTT グループ】 (国内会議 0 件、国際会議 2 件)

1. 仙場浩一, I.Chiorescu, C.J.P.M.Harmans, J.E.Mooij, 中村泰信: Readout Fidelity of the Superconducting Flux Qubit through a DC-SQUID(超伝導磁束量子ビットの読み出し忠実度); The 15th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-15); 奈良県新公会堂, 2003 年 7 月 14 日～7 月 18 日
2. Chiorescu, P. Bertet, 仙場浩一, 中村泰信, C.J.P.M.Harmans, J.E.Mooij: Coherent dynamics of two coupled quantum systems (結合した 2 量子系のコヒーレントダイナミクス); Annual APS March Meeting 2004; カナダ Montreal, March 22-26, 2004.

【理論グループ】

該当なし

【横浜国立大学グループ】 (国内会議 1 件、国際会議 2 件)

1. Y. Shimazu, T. Yokoyama: Estimate of Kinetic Inductance of Superconducting Wires and Application for Measuring Flux State of Josephson-Junction Loops, The 16th International Symposium on Superconductivity, Tsukuba (2003.10.28)
2. 島津佳弘：超伝導細線のインダクタンス測定及び結合した磁束量子ビットの実験とシミュレーション、第 9 回量子情報技術研究会、厚木 (2003.12.11)
3. Y. Shimazu, T. Yokoyama: Asymmetric flux bias for coupled qubits to observe entangled states, International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics (MS+S2004), Atsugi (2004.3.2)

◎2002 年度

【NTT グループ】

該当なし

【理論グループ】

該当なし

【横浜国立大学グループ】 (国内会議 1 件、国際会議 2 件)

1. Y. Shimazu: Inductive coupling of two superconducting loops with three Josephson junctions, 23rd International Conference on Low Temperature Physics, Hiroshima (2002.8.20-27).
2. Y. Shimazu and T. Nakano: Two flux qubits with Josephson junctions coupled through mutual inductance, Second International Workshop on Quantum Nonplanar Nanostructures & Nanoelectronics '02, AIST-Tsukuba Research Center (2002.9.10).
4. Y. Shimazu and T. Nakano: Continuous measurement of magnetic flux of two qubits

with Josephson junctions coupled through mutual inductance, 'Carrier Interactions and Spintronics in Nanostructures' (CISN2003), NTT Atsugi R&D center (2003.3.10-12)

(4)特許出願

【NTT グループ】

①国内出願 (6 件)

1. 「量子回路および複数の量子ビット素子間の量子もつれ状態制御方法」
仙場浩一、高柳英明、齋藤志郎、田中弘隆、中ノ勇人
出願人:NTT
出願日:2004.12.3
出願番号:特願2004-351753(特開2006-165812)
2. 「量子ビット装置及び量子ビットの制御方法」
齋藤志郎、山本秀樹、仙場浩一、高柳英明、上田正仁(東工大)
出願人:NTT
出願日:2005.8.11
出願番号:特願特願2005-233066
3. 「可変共振器を用いた量子もつれ制御スイッチ」
角柳孝輔、中ノ勇人、仙場浩一、上田正仁(東工大)
出願人:NTT
出願日:2005.8.15
出願番号:特願特願2006-221435
4. 「素子状態読み出し装置、方法、および透過型ジョセフソン共振回路」
角柳孝輔、仙場浩一
出願人:NTT
出願日:2007.8.17
出願番号:特願2007-212733
5. 「量子計算装置および量子もつれ制御方法」
角柳孝輔、中ノ勇人、上田正仁(東工大)、仙場浩一
出願人:NTT
出願日:2006.6.2
出願番号:特願2006-221435
6. 「Scalable entangling scheme for flux qubits/超伝導量子マルチビット素子及びそれを用いた集積回路」
Jan Johansson
出願人:JST
出願日:2004.3.17
出願番号:特願2006-071232

- ②海外出願 (0 件)
該当なし

【理論グループ】

- ①国内出願 (0 件)
該当なし

- ②海外出願 (0 件)
該当なし

【横浜国立大学グループ】

- ①国内出願 (2 件)

1. 「超伝導量子干渉素子用電子回路」
島津佳弘
出願人：JST
出願日：2005.5.26
出願番号：特願 2005-154619.
2. 「超伝導量子ビット素子及びそれを用いた集積回路」
島津佳弘
出願人：JST
出願日：2007.5.23
出願番号：特願 2007-137282.

- ②海外出願 (0 件)
該当なし

【東京理科大学グループ】

- ①国内出願 (0 件)
該当なし

- ②海外出願 (0 件)
該当なし

(5)受賞等

【NTT グループ】

- ①受賞

高柳英明 第7回超伝導科学技術賞受賞 2003年6月

- ②新聞報道

1. 2006.3.31 日刊工業新聞
“量子もつれ”振動を観測 (NTT と JST)
～ 超伝導回路と単一光子 集積化技術へ進展へ ～
<http://www.jst.go.jp/pr/announce/20060330/index.html>
<http://www.ntt.co.jp/news/news06/0603/060330a.html>

2. 2004.9.10 日刊工業新聞

“多光子制御に成功” 超伝導磁束量子ビット (NTT と JST)
<http://www.ntt.co.jp/news/news04/0409/040909.html>

2004.9.10 日経産業新聞

“量子コンピューター、要素技術を考案”

3. 2004.9.9 日刊工業新聞

“量子コンピューター、NEC, NTTなど 実現へ一歩”

2004.9.9 日経産業新聞

“量子もつれ合い、固体デバイスで操作”

③その他

該当なし

【理論グループ】

①受賞

上田正仁、文部科学大臣表彰科学技術賞 (研究部門)、2007 年 4 月

②新聞報道

該当なし

④ その他

該当なし

【横浜国立大学グループ】

①受賞

該当なし

②新聞報道

該当なし

③その他

該当なし

【東京理科大学グループ】

①受賞

該当なし

②新聞報道

該当なし

③その他

該当なし

7 研究期間中の主な活動 (ワークショップ・シンポジウム等)

【NTT グループ】

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2003/10/7	研究進捗報告会	厚木 R&D センター	6 名	一年を経過した時点での進捗報告と今後の進め方に関するヒアリング会
2004/3/1～ 3/4	メゾスコピック超伝導とスピントロニクスに関する国際会議 MS+S2004	厚木 R&D センター	約 200 名	メゾスコピック超伝導、スピントロニクス量子コンピュータ、量子情報、アンドレーエフ反射半導体ナノ構造、超伝導・磁性体構造、希薄磁性半導体ナノ構造における量子効果、その他
2006/2/27～ 3/2	メゾスコピック超伝導とスピントロニクスに関する国際会議 MS+S2006	厚木 R&D センター	約 180 名	メゾスコピック超伝導、スピントロニクス量子コンピュータ、量子情報、アンドレーエフ反射半導体ナノ構造、超伝導・磁性体構造、希薄磁性半導体ナノ構造における量子効果、その他

【理論グループ】

該当なし

【横浜国立大学グループ】

該当なし

【東京理科大学グループ】

該当なし

8 研究成果の展開

(1) 他の研究事業への展開

以下のように、仙場リーダーを中心に、2件の大規模な科研費プロジェクトへと展開している。

1. 科研費特別推進研究

課題番号: MEXT-KAKENHI(18001002)、2006 年度より5年間

研究課題名 コヒーレント状態と固体量子ビットに基づく量子情報処理の研究

<http://www.mext.go.jp/b.menu/houdou/18/10/06092713/004/006.pdf>

研究代表者名 山 本 喜 久 (国立情報学研究所・情報学プリンシプル研究系・教授)

研究分担者: 根本 香絵 (国立情報学研究所・情報学プリンシプル研究系・助教授)

伊藤 公平 (慶応義塾大学・理工学部・教授)

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

研究の目的

大規模な量子コンピュータを実現するための基盤技術として、最も有力視されている量子ビットを

含む共振器量子電磁気学(以下 cavity QED と略す) システムをコヒーレント状態にある電磁波(以下 photon bus と略す) で相互に結合する手法を、半導体素子と超伝導素子によって実現するための基礎技術を確立することをめざす。本研究では、この qubus 量子コンピュータの中でも将来の集積化・大規模化に有利な異なる特色を持つ3種類の固体素子系(半導体素子:19F:ZnSe, Si 核スピン, および 超伝導ジョセフソン量子素子)に的を絞って研究を行なう。

2. 科研費基盤研究A

課題番号:JSPS-KAKENHI(18201018)、2006年度より4年間

研究課題名:超伝導人工原子を用いた量子物理

研究代表者名:仙場 浩一(NTT 物性科学基礎研究所・量子電子物性研究部・超伝導量子物理研究グループリーダー)

本研究の目的は、大きく分けて2つある。一つは、【A:超伝導人工原子を用いることにより、通常の原子を用いた量子光学実験では到達不可能な条件下での量子物理実験を行うこと】である。超伝導磁束人工原子は、巨視的数の電子対が凝縮した量子状態(巨視的量子状態)であり、原子に比べ、単一光子との結合定数が桁違いに大きく、不純物原子等によるノイズ耐性、コヒーレンス保持時間、等の点でも非常に有利である。もう一つの目的は、【B:超伝導人工原子技術をナノメカニクス加工技術と組み合わせることにより、量子レベルでのナノ構造体の振動量子 検出・制御 や、新たな量子情報担体の可能性を追求すること】である。磁束量子ビット状態 や LC 共振量子の検出でわれわれのグループで既の実績のある SQUID による超伝導磁束人工原子の状態検出技術を用いて、ナノ構造体の振動変位の検出を試みる。これを推し進めて、究極的な ナノ構造体の 振動量子 を検出・制御できれば、ナノスケール構造体の振動状態を量子系の量子状態の伝送・メモリ・演算 等に使える可能性が開かれることを意味し、非常に意義深い。

(2)実用化に向けた展開

該当なし

9 他チーム、他領域との活動とその効果

(1)領域内の活動とその効果

該当なし

(2)領域横断的活動とその効果

該当なし

10 研究成果の今後の貢献について

(ア) 科学技術の進歩が期待される成果

物質と光の基本的な相互作用を光子1個のレベルで取り扱う共振器量子電磁力学 いわゆる cavity-QED は、従来 Q 値が大きいシングルモード空洞共振器中の光子と二準位原子を使って研究されてきた。この原子を超伝導量子ビットに、空洞共振器中の光子を超伝導回路中のマイクロ波光子に各々置き換えて同様な実験が可能だと理論的には予想されていた。本研究計画で得られた我々の実験結果[1]は、そのような具体例の最初の一つとなるもので、超伝導量子ビットとマイクロ波光子系の相互作用が、従来知られていた原子とマイクロ波光子の相互作用に比べて数千倍も強く cavity-QED 実験に不可欠ないわゆる強結合条件を比較的容易に実現できるため、基礎研究はもとより、応用の面から見ても大変魅力的な系である事を示している。量子もつれを自在に操ることを対象とする、このような、チップ上の超伝導回路を用いた共振器量子電磁力学実験(circuit-QED)や、本研究計画で得られた超伝導量子ビットを

含むジョセフソン量子回路の位相緩和やエネルギー緩和からの知見[2]、そして超伝導量子ビットのパラメトリック制御[3]等の技術は、今後、超伝導量子回路を用いたコヒーレンス時間が長い人工原子の作製や、その特性をさらに洗練されたものにし、量子計算等の量子情報処理へと進歩するために貢献できる成果であると考えられる。

関連論文

[1] Vacuum Rabi oscillations in a macroscopic superconducting qubit LC oscillator system; J. Johansson, S. Saito, T. Meno, H. Nakano, M. Ueda, K. Semba, and H. Takayanagi, Phys. Rev. Lett. 96, 127006 (2006)

[2] Dephasing of a superconducting flux qubit; K. Kakuyanagi, T. Meno, S. Saito, H. Nakano, K. Semba, H. Takayanagi, F. Deppe, and A. Shnirman, Phys. Rev. Lett. 98, 047004 (2007)

[3] Parametric control of a superconducting flux qubit; S. Saito, T. Meno, M. Ueda, H. Tanaka, K. Semba, and H. Takayanagi, Phys. Rev. Lett. 96, 107001 (2006)

(2)社会・経済の発展が期待される成果

量子コンピューター研究は、やっと離陸できそうな段階に達したばかりで、実用化を見極めるまでには、まだ10年や20年はかかりそうである。その意味では、社会や経済への貢献はまだ目に見えた形にはなりそうもない。しかし、我々がこの5年で追求してきた過程において、多くの副産物を得ることができた。その最たるものが、雑音を限りなく除去した、高速測定技術である。この技術は、他の基礎的物理計測だけでなく、将来産業にも生かされると確信する。

11 結び

外部共振器を介した2量子ビットの量子もつれ状態の実現、という最終目標まで、後一歩まできたが、2007年9月時点では、まだ達成していない。回路作成法も、量子もつれ制御法も全て確立しているが、肝心の作成プロセスで、つまづいている。この作成プロセスの問題は、研究開始当初も起こり、約1年近く主要な実験が出来なかった苦い経験を持っている。

このような状況で、とにかく外部共振器と磁束量子ビットという共に巨視的な系の間の量子もつれ状態を実現したことは、おおいに誇れる成果である。本CRESTを遂行させていただいた、JSTと梶村先生をはじめとするCREST事務所の方々には、心より感謝申し上げたい。また、上田、島津両先生にも、その大きな貢献に感謝したい。上田先生は、実験結果の理論的解釈と、より基本的な理論展開の両輪で大いに力を発揮された。実験の中心は何と言っても仙場リーダーを中心とするNTTグループで、その成果は二つの大きな科研費プロジェクトに引き継がれることになった。2つの量子ビット間の量子もつれだけでなく、量子バスという概念の基に、更にこの研究が発展することを確信している。高柳自身は、LC共振器と磁束量子ビットの量子もつれを用いた、量子インターフェースの研究、そしてここで得られたSQUID技術を、Nano-SQUID研究へ展開したいと考えている。

本プロジェクトには、実に多くの研究者、学生が参加してくれたが、この5年間でみな大きく成長し、また多くの若者が巣立って行った。代表者である高柳の喜びとするところである。最後に、各グループの写真を載せて、この報告を終了する。

