

「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」  
平成14年度採択研究代表者

高柳 英明

( NTT物性科学基礎研究所 所長、NTT R&Dフェロー )

## 「超伝導磁束量子ビットによる量子もつれの実現」

### 1. 研究実施の概要

私達は、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ケ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ス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。本研究チームは、3つのグループから構成されており、研究課題の実現のため下記の方針に従い研究を実施する。

東工大上田研究室を中心とする理論グループは、現在進行中の希薄原子ガスのBEC状態の理論的解明を進めるのと並行して、超伝導磁束量子ビットの最大の課題であるデコヒーレンスと状態読み出しの問題を中心に、量子ビット状態読み出し用のSQUID測定系を含めた全系を量子力学的に取り扱い、長いコヒーレンス時間と高い量子効率での読み出し実現方法を見出すことを目標とする。

横国大グループは、磁氣的に結合した2つの超伝導磁束量子ビットを作製し、その古典領域での回路動作の解明に取り組んでいる。進行中の実験から基礎データを得ると共に、今後は、ジョセフソン電界効果トランジスタの使用も視野に入れつつ、量子的に結合した2量子ビット回路設計へ具体的な情報を提供することを目標とする。

NTTグループは、希釈冷凍機温度での外部環境を制御した高速低雑音パルス測定系の立ち上げによって、1量子ビットのコヒーレントな量子振動の観測、多光子ラビ振動の観測、及び外部共振回路と量子ビットとの量子的結合に成功した。今後、理論グループで得られた成果を基に、長いコヒーレンス時間と高い量子効率での状態読み出しが可能な改良された1量子ビット実現のために 試料作製・測定 を繰り返す。同時に、外部共振回路によって結合した2量子ビット回路の 設計・測定 を繰り返し、量子もつれ回路の最適動作条件を見出すことにより、量子演算の基本素子である 1量子ビットでの回転ゲート動作 および、2量子ビット間での制御NOT動作 実現を目標とする。

## 2. 研究実施内容

<NTTグループ>

### 磁束量子ビットの動作環境の改善

新たな実験室にもう一台の測定系を立ち上げ、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ため、全磁束バイアスにおいて量子ビットの分光が可能となった。読み出しパルスに同期させて、RFラインに断熱磁束シフト用のDCパルスを印加することにより、 $dE/d\phi=0$  を満たす安定動作点いわゆる sweet spot での分光データを採ることに成功した。しかし、残念ながら、読み出し回路付随のLC共振器の周波数 4 GHz が sweet spot での量子ビットのギャップ周波数 1.7 GHz よりも大きいため、読み出し時にLC共振の影響を避けられず、長いコヒーレンス時間が期待される縮退点でのラビ振動の観測にはまだ成功していない。

### 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

従来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。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。実際、われわれは、この方法を用いて、11 GHz 以上で高速に回転する量子ビットの自由歳差運動をストロボスコピックに観測することに成功した。

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。

### 多光子ラビ振動の観測

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。これに伴い、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( $J_1 \sim J_4$ )に従うことが明らかとなり、共同研究者の上田正仁氏による理論との一致は極めて良い。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はるかに非効率

ので、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。

#### コヒーレンス時間の改善

量子ビット直近の電磁環境をクリーンな状況に近づけることができるようになったことや、数GHz程度の大きさの大きな準位分裂をもつ量子ビット試料を作製できるようになったため、まだ最適な sweet spot でのデータでないにもかかわらず、ラビ振動中のコヒーレンス緩和時間を、約0.1  $\mu$ s にまで延ばすことに成功した。

#### 量子もつれの実現と制御

同一チップ上だが、量子ビットと空間的に離れているLC共振器の振動量子との量子もつれ状態の分光およびその時間領域での制御に成功した。LC共振器は調和振動子であり、2つ以上の量子状態を含んでいるために、厳密な意味での量子ビットではないが、われわれは、サイドバンド連成振動エネルギーに同調したマイクロ波パルスを用いることによって、この結合量子系の条件付分光スペクトルを観測することに成功した。すなわち、量子ビットの  $\pi$ パルス（あるいは、 $2\pi$ パルス）印加直後に分光を行うことで、量子ビット遷移に伴う吸収の他に、LC調和振動子との連成振動に相当する低(高)周波数側サイドバンド遷移に伴う吸収を観測した。

#### <理論グループ>

1. NTTグループが観測した多光子吸収を記述する論理を作り、実験結果と良い一致を得た。
2. 相対論的效果によりスピンのデコヒーレンスを起こすことを示した。
3. ボース・アインシュタイン凝縮を回転させることにより、固体物理と同様のブロッホ構造を示すことを明らかにした。

#### <横国大グループ>

今年度は年度途中で希釈冷凍機システムを導入し、量子ビット実験のための測定装置を製作した。量子ビットの動作に大きく影響する雑音を低減するために、希釈冷凍機のリード線に接続する高周波フィルタとマイクロ波フィルタを製作し周波数特性を調べた。マイクロ波フィルタについては、さまざまな製作条件で製作したフィルタの周波数特性を測定し、最適な製作条件を求めた。年度末には、高速測定のための高速プリアンプ、高速臨界電流測定回路等の製作を行なった。

希釈冷凍機の動作確認をかねて、2個の磁束量子ビットの結合系の試料の測定を実施した。最低到達温度20mK以下において、2ビットの作る磁束を高精度で測定することができることを確認した。磁束信号のステップ幅から有効温度を導出し、試料温度が十分に下がっていることを確かめた。2ビット系は4つの状態をもつが、適当な有効温度を仮定したときのこれらの状態のつくる磁束信号の熱平均値を計算し、実験結果と比較した。実験結

果は計算結果と一致せず、マイクロ波を印加していない場合でもピークとディップがみられ、非熱的励起現象の存在を示唆している。ピークとディップの形状はDC-SQUIDのバイアス電流の大きさに依存し、ある場合には明瞭な2個ずつのピークとディップを観測した。観測された励起には、DC-SQUIDが電圧状態にあるときにつくるジョセフソン振動数のマイクロ波が関係していると考えられるが、ジョセフソン振動数から見積もられるエネルギーは観測された励起のエネルギーよりはるかに大きく、励起のメカニズムはまだ解明されていない。このような励起は量子ビットの操作の障害となるので抑制されるべきである。DC-SQUIDが電圧状態にある時間を減らすことによって励起を抑えることができると予想される。次年度にそれを実験的に確認し、励起のメカニズムの解明をめざす予定である。

この実験において、2ビットを個別に操作するための制御コイルの動作を確認した。マイクロ波分光も試みたが、マイクロ波発生器の作るマイクロ波の周波数スペクトルが広がっていたため、ブロードな共鳴ピークが観測されたのみで、正確な分光データを得ることはできなかった。しかし、試料のパラメータはほぼ設計どおりの値であることが確認できた。

次年度には、エネルギー分光及び量子コヒーレンス振動の観測、デコヒーレンス時間の測定などの実験を予定している。本研究で測定している試料は、従来測定されている2ビット系と比べて結合度が大きいいため、反強磁性状態の間のエネルギー分裂や量子コヒーレンス振動が観測できることが期待される。量子コヒーレンス振動の観測のためには、DC-SQUIDの電磁場環境制御を行なうことがおそらく必要である。今年度測定した試料では2ビット間の結合度は固定されていたが、次年度にはジョセフソン接合を使って結合度を制御する方法についての実験研究を実施することを予定している。

### 3. 研究実施体制

#### <NTTグループ>

- ① 研究分担グループ長：高柳 英明（NTT物性研究所 所長、NTTフェロー）
- ② 研究項目：超伝導磁束量子ビットによる量子もつれの実現

#### <理論グループ>

- ① 研究分担グループ長：上田 正仁（東京工業大学大学院理工学研究科 教授）
- ② 研究項目：量子計算と固体素子を原子系で実現するための基礎研究

#### <横国大グループ>

- ① 研究分担グループ長：島津 佳弘（横浜国立大学大学院工学研究院、助教授）
- ② 研究項目：磁束量子ビットの2ビット系の実験

#### 4. 主な研究成果の発表

##### (1) 論文発表

<NTTグループ>

##### 【仙場 浩一】

- 著者名 : P. Bertet, I. Chiorescu, K. Semba, C. J. P. M. Harmanns and J. E. Mooij  
発表論文タイトル : Detection of a persistent-current qubit by resonant activation  
掲載誌名 : PHYSICAL REVIEW B  
巻号頁 : Volume 70, Pages 100501-1 ~ 100501-4  
発行年 : 2004
- 著者名 : I. Chiorescu, P. Bertet, K. Semba, Y. Nakamura, C. J. P. M. Harmanns and J. E. Mooij  
発表論文タイトル : Coherent dynamics of a flux qubit coupled to a harmonic oscillator  
掲載誌名 : Nature  
巻号頁 : Volume 431(9 SEPTEMBER 2004), Pages 159 ~ 162  
発行年 : 2004

<理論グループ>

- T. Hyouguchi, R. Seto, M. Ueda, and S. Adachi,  
"Divergence-free WKB theory"  
Ann. Phys. vol. 312, 177-267 (2004).
- H. Terashima and M. Ueda,  
"Einstein-Podolsky-Rosen correlation in a gravitational field"  
Phys. Rev. A, vol. 69, 032113(1)-032113(9) (2004).
- H. Saito and M. Ueda,  
"Bose-Einstein droplet in free space "  
Phys. Rev. A vol. 70, 053610(1)-053610(5) (2004).
- 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).
- 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)
- 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)

○ H. Terashima and M. Ueda,

”Spin decoherence caused by spacetime curvature ”

J. Phys. A: Math. Gen. **38**, 2029-2037 (2005)

<横国大グループ>

○ Y. Shimazu

Coupling Effect in Dual Three-Josephson-Junction Loops in Classical Regime

J. Phys. Soc. Jpn. 73, 1914-1921 (2004).

○ 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, 1451-1454 (2004).