「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

髙柳　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

アインシュタインが量子論に内在する不可思議な性質として指摘した「もつれた量子状態」は、最新の物理学でも、なぜこのような直感に反する奇妙な性質が存在するのかという根本的な説明はできていない。それでも今日では、従来の情報通信技術の限界を突破する技術として期待される量子情報処理の最も重要なリソースの一つとみなされ、積極的に活用され始めている。この研究プロジェクトでは、ＮＴＴ物性基礎研究所が培ってきた超伝導体・半導体 微細加工技術、極低温での低ノイズ高周波測定技術等を背景に、超伝導磁束量子ビットを用いて、この 「量子もつれ」を観測・制御することを研究の主なねらいとしている。これまでに、我々は多光子を用いた１つの量子ビットの量子重ね合わせ状態の制御に成功し、さらに外部共振回路（LC 共振器）と１つの量子ビット間の量子もつれの形成にも成功した。次のステップはこの外部共振器と相互作用している２つの量子ビット間のもつれの制御である。このために、光子系と量子ビットとの結合度のより強い回路を設計し、今後この新しい回路でのもつれ生成に挑戦する。

一方、理論面でも以下のような成果が得られた。量子論における測定行為は非可逆な過程と考えられることが多いが、実際には可逆な量子測定というものも存在しうる。そのような測定は、量子計算での応用が考えられているものの、まだ実験的な実証には至っていない。そこで我々は、可逆な量子測定の実験的実現に向け、理論的なモデルを構築した。このモデルの利点は、被測定系と測定系が任意のスピン系であるという汎用性と、それらの間の相互作用がイジング型であるという容易性にあり、これまで知られていたモデルよりも様々な物理系で実現が期待できる。さらに、このモデルにおいて、相互作用が十分に弱ければ、猫状態でも近似的に可逆であることを示した。

２．研究実施内容

「NTT グループ」

本年度は、１ビットに関する量子操作の多様化（多光子過程を用いた量子ビットのコヒーレント操作・異なる波長の光子の組み合わせを用いたパラメトリック制御）、および、LC

回路共振量子（１光子）とのエンタングルメント制御に関して進展が見られた。特に後者は、多ビット化展開の際に重要となる拡張可能な多ビットゲート制御スキームに関して、一部その可能性を実証したものである。

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、原子と光子などミクロな対象では実現可能なことが知られていた。図１のモデル図に示すように、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〉 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〉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〉 と |g,1〉 間を時間的に規則正しく振動することが知られている。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てる。

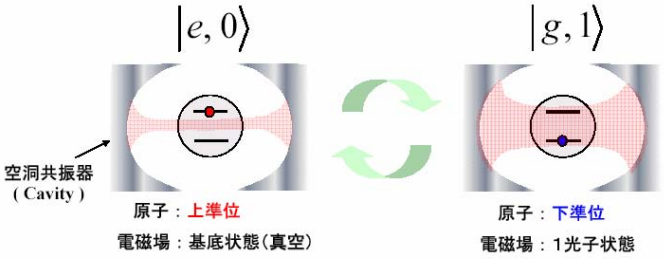

図１．真空ラビ振動の説明図

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ミクロな系においてさえ容易ではなかった。 近年になり、微細加工技術を用いて超伝導体で形成した超伝導量子ビットと呼ばれる電気回路の電流状態が、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言されていた。この現象を確認しようとする試みが、米国イェール大やオランダのデルフト工科大等の研究機関で進められて来たが、こ

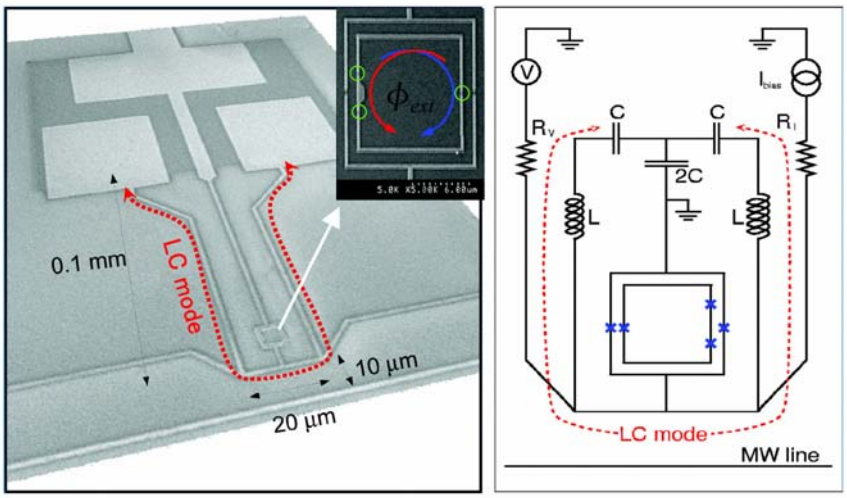

図２．実験に用いたアルミニウム製の電気回路（左図）とその等価回路（右図）。
拡大図は、量子ビット（内側の四角いループ） と その測定回路。

れまで明瞭な真空ラビ振動を観測した例はなかった。

本研究では、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回路が単一光子の共振器となりうることに注目した。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２）。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。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３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、

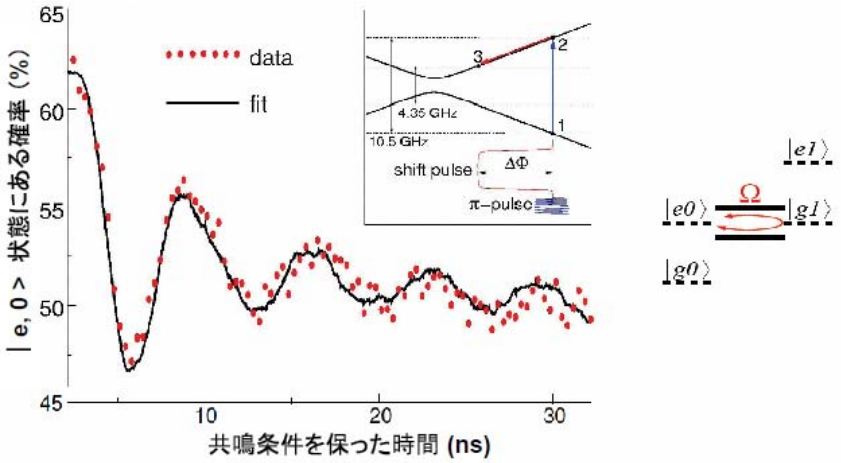

図３．観測された真空ラビ振動（左図）と、複合系の準位模式図（右図）

測定に成功した。|e,0〉（量子ビット:励起状態，ＬＣ回路中光子数:0）⇔ |g,1〉（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。

尚、本成果については 3 月 30 日に JST-NTT 共同でプレスリリースを行った。下記 URL 参照。
http://www.jst.go.jp/pr/announce/20060330/index.html

「東工大理論グループ」

大きさｓのスピン系に対し、大きさｊのスピン系を測定のプローブとして、以下のような可逆な量子測定を考えた。

（１）プローブのスピンを（θ，φ）方向に向ける。

（２）プローブと被測定系でイジング型の相互作用をさせる。

（３）プローブのスピンをｙ軸周りに９０°回転させる。

（４）プローブのスピンのｚ成分を測定する。

このような間接的な測定によって、被測定系の状態についての情報を得ることができるが、一方でその状態を破壊してしまうことになる。ただし、この測定は物理的に可逆な測定であり、さらなる測定（逆測定）をすることによって、最初の状態を確率的に復元することができる。実際、この測定に対する逆測定は θ →π－θ，φ →π－φ と置き換えたものであり、最初の測定と逆測定の結果の和が０であるとき、状態が完全に復元されることを示した。さらに、状態の復元の度合いをフィデリティーによって定量化し、近似的ではあるが復元されるための条件を導き出した。また、この測定を猫状態に対し行う場合について解析した。その結果、相互作用が十分に弱ければ、測定による状態の変化は大きくとも、ほぼ確率１で近似的に復元できることがわかった。

多成分のグロス・ピタエフスキー方程式を数値的に解くことによって、ＢＥＣのスピンダイナミクスを研究した。原子種は、スピンダイナミクスの実験的研究でも扱われているルビジウム８７を仮定した。この原子種のスピン１の状態は強磁性的な相互作用を持つため、自発的な磁化が発生すると予想される。しかしながら、単純な一方向への磁化はスピン保存則を破るため禁止されている。従って、磁化とスピン保存則を両立させるために系は空間的なスピン構造を自発的に形成することが期待される。これを明らかにするために、初期条件は磁化を持たない磁気副準位０に準備した。

図１は細長い葉巻型のポテンシャルに閉じ込められたＢＥＣに形成されたスピン構造である。初期状態はスピンを持たない状態だが、約３００ミリ秒後には互い違いのドメイン構造が形成されている(図 4(a))。このようなドメイン構造は従来の磁性体でも見られるが、生成の物理的なメカニズムは本質的に異なっている。さらに時間発展をさせると、ドメイン構造から螺旋構造が一時的に生成される（図４(b)）。これは螺旋構造の方がより低いエネルギーを持つ安定な状態であるためである。

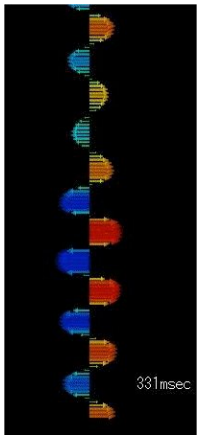

図４(a)

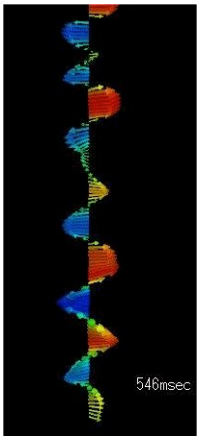

図４(b)

形成されるスピン構造は系のジオメトリーに大きく依存する。右下図は二次元的に平たいパンケーキ型のポテンシャル中のＢＥＣの場合である。初期状態は同様に磁化していない状態であるが、図５のような同心円状のスピン構造が自発的に形成される。それぞれの

同心円においては互い違いの方向に磁化している、いわば同心円状のドメイン構造となっている。

ドメイン構造が形成されると、隣り合うドメインの境界でスピンが急激に変化しなければならないため、運動エネルギーが増加する。従って、強磁性相互作用エネルギーと運動エネルギーが同程度となるような場合には、ドメイン構造の生成が抑制され、図 6(a)のようなトポロジカルなスピン構造が自発的に形成される。ドメイン構造と比較するとトポロジカルな構造は中心以外でスピンが滑らかに変化しているため、より運動エネルギーが低く安定である。

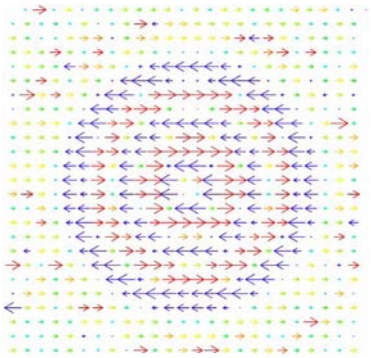

図 5

トポロジカルなスピン状態の磁気副準位１だけをシュテルン・ゲルラッハ法を用いて取り出すと、図 6(b)のように量子渦を持った状態になっている（色は位相を表す）。すなわち、一つの磁気副準位に着目すると、自発的に回転を始めるという大変興味深い現象が起こる。一方、磁気副準位－１の状態は逆方向に回転しているため角運動量は保存されている。

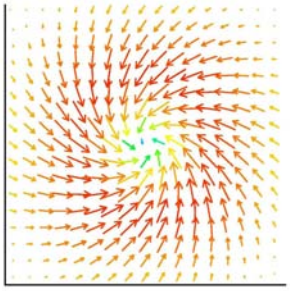

図 6(a)

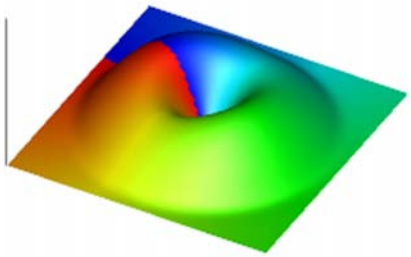

図 6(b)

「横浜国大グループ」

<u>磁束量子ビットの結合回路の研究</u>

結合度を制御することのできる磁束量子ビットの結合回路を作ることを目的として、DC-SQUID の構造を含む超伝導磁束輸送回路について、理論的および実験的に研究を実施した。本年度はこの磁束輸送回路の古典的動作を調べたが、この系は、磁束量子ビットとして使用することもできるものである。作製した磁束輸送回路の特性を、入力コイルによって磁束を入力し、出力される磁束を読み出し用の DC-SQUID で検出することによって測定した。実験結果は理論計算の結果とよく一致しており、制御電流によって磁束輸送特性を制御できることを実証することができた。この回路では、適当な動作点を選ぶことによって、完全に結合度を０にすることができることを示した。これは、類似の磁束輸送回路では得ることのできない特徴であり、この回路の有利な点であると考えられる。

高速パルスを使った量子ビット測定系の製作と予備的実験

磁束量子ビットの量子コヒーレンス時間の測定のためには、高速パルスによってDC-SQUIDのバイアス電流と制御用マイクロ波を印加しなければならない。この測定のための高速測定系を製作した。NTTグループで作製された単一量子ビット試料について測定を行い、測定系が正常に動作していることを確認した。測定した試料では、量子ビットの状態によってスイッチング確率がほぼ0%から100%まで変化しており、高感度で量子ビットの状態を読み出すことができることがわかった。しかし、縮退点付近では、マイクロ波を印加していないときでも量子ビットの励起が頻繁に起こっていたため、この付近での量子ビットの分光を行うことは困難であった。また、磁束信号のパルス周期に対する依存性が約1ms程度までの広い範囲で観測されたが、緩和時間がその程度まで長いことは考えにくい。これらの測定結果の原因について、検討中である。次年度には、測定系を最適化するとともに、1ビット試料と2ビット試料において長いコヒーレンス時間を実現するための条件等を調べ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：髙柳　英明（NTT物性基研　所長、R&Dフェロー）

②研究項目：2超伝導量子ビットによる量子もつれの実現

「東工大理論」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：量子計算を固体素子と原子系で実現するための基礎理論の研究

「横浜国立大学」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：磁束量子ビットの実験

４．主な研究成果の発表（論文発表および特許出願）

（１）　論文（原著論文）発表

○ J. Johansson, S. Saito, T. Meno, H. Nakano, M. Ueda, K. Semba, and H. Takayanag
``Vacuum Rabi Oscillations in a Macroscopic Superconducting Qubit LC Oscillator System"
Phys. Rev. Lett. **96**, 127006 (2006) [published online, 31 March 2006]

○ 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]

○ 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.

○ 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)

○ 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).

○ H. Terashima and M. Ueda, Spin decoherence caused by spacetime curvature,
J. Phys. A: Math. Gen. 38, 2029-2037, 2005.

○ H.Terashima and M.Ueda, Nonunitary quantum circuit, Int. J. Quantum Inf.
vol.3, 633-647, 2005.

○ 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.

○ 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.

○ K. Kasamatsu, M. Tsubota, and M. Ueda, Vorticies in Multicomponent Bose-Einstein Condensates, Int. J. Mod. Phys. B, vol. 19, 1835-1904, 2005

○ 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.

○ 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.

○ 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.

○ Y. Kawaguchi, H. Saito, and M. Ueda, Einstein-de Haas Effect in Dipolar
Bose-Einstein Condensates, Phys. Rev. Lett. vol. 96, 080405, 2006.

○ 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

pp. 679-683 (2005).

○ 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).

（２） 特許出願

H17 年度出願件数：3 件（CREST 研究期間累積件数：3 件）