

研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：2006～2009
 課題番号：18201018
 研究課題名（和文） 超伝導人工原子を用いた量子物理
 研究課題名（英文） Quantum Physics using Superconducting Artificial Atoms
 研究代表者 仙場 浩一（SEMBA KOUICHI）
 日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所
 量子電子物性研究部 主幹研究員
 研究者番号：50393773

研究成果の概要（和文）：①メゾスコピックな超伝導人工原子を量子もつれ生成スイッチとして用い、大きさも種類も異なる2つの量子系：ジョセフソン接合中の量子二準位系(マイクロ)と超伝導伝導線路共振器中の光子状態(マクロ)の間における量子もつれ状態を生成し、その時間発展の様子を観測することに成功した。②人工原子系の可干渉時間内に複数回測定が可能な程高速かつ被測定系との相互作用の大きさを自由に制御可能なため、低侵襲性を併せ持つ Josephson 分岐増幅測定技術の開発に成功した。さらに、この JBA 測定系を用いて、超伝導人工原子の重ね合わせ状態の射影測定条件を明らかにした。③磁束量子ビットと強く相互作用しているマイクロ波光子系の二光子遷移の実験で見出した回路 QED 系のパリティ対称性の破れとその制御に関する知見を得た。((独)マイスナー研究所との共同研究)④Nb-SQUID の一部に両持ち梁構造(板バネ)を組み込み、この梁構造の変位を標準量子限界の 36 倍に相当する 約 10fm という極微細な振動の検出に成功した。(Delft 大との共同研究)

研究成果の概要（英文）：① We have succeeded to generate and observe the time evolution of the entanglement between microscopic two level system in the Josephson junction and electro-magnetic field in the superconducting transmission line resonator by using a mesoscopic flux-qubit as an entanglement generator and a part of readout device. ② By using a Josephson bifurcation amplifier which is characterized by its very fast detection speed and small back action to the measured system, we have clarified the condition for the projection measurement of a quantum superposition state of a macroscopic superconducting artificial atom. ③ We have observed parity symmetry breaking in a strongly coupled flux-qubit microwave resonator circuit QED system. (collaboration with Walther Meißner Institut, Germany) ④ We have succeeded to detect ultra-small displacement of suspended mechanical resonator embedded as an arm of Nb-SQUID. The sensitivity of detection as small as 10 fm which is 36 times of the standard quantum limit has been achieved. (collaboration with Delft university of technology, Netherlands)

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|------|------------|------------|------------|
| 18年度 | 10,000,000 | 3,000,000 | 13,000,000 |
| 19年度 | 9,200,000 | 2,760,000 | 11,960,000 |
| 20年度 | 9,200,000 | 2,760,000 | 11,960,000 |
| 21年度 | 9,800,000 | 2,940,000 | 12,740,000 |
| 総計 | 38,200,000 | 11,460,000 | 49,660,000 |

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ構造科学

キーワード：人工原子,微小共振器,超精密計測,量子エレクトロニクス,メゾスコピック系

1. 研究開始当初の背景

近年、原子冷却技術やレーザー安定性の飛躍的な進歩に伴い、光子・原子・イオンに代表されるいわゆる単一量子系にアクセスしてそのダイナミクスを測定することや、より積極的に量子状態を人為的に制御することが可能となってきた。これに伴い、単一量子系の量子状態の「重ね合わせ」や、複数量子系間での「量子もつれ」の性質を解き明かす等の量子力学の原理に直接関わるような実験が、思考実験ではなく、実際の実験として実行可能となっている。このような単一原子系の実験の延長上でNTT物性研の我々のグループでは、メソスコピックスケールのリングを巡る巨視的な数の電子対からなる超伝導電流でできた人工原子とLC共振回路との間で、新しい種類のEPR(Einstein-Podolsky-Rosen)量子もつれ状態の生成および時間領域での制御が量子(光子)1個レベルで可能なことを、世界に先駆けて示すことに成功した。実際、この超伝導人工原子を用いれば、通常原子を用いた量子光学実験では到達不可能な強結合条件が比較的容易に実現可能である。さらに微細加工技術を援用して数的拡張性にも優れた特性を活かすことによって、量子情報処理技術への応用をも視野に入れた量子状態制御の実験が可能となる。一方、NTT物性研では、ナノメートル領域の優れた加工技術と、メソスコピックスケールの化合物半導体(および超伝導体)および電磁気制御技術の組み合わせによって、サブオングストロームスケールでのナノ構造体の振動変位検出に成功しており、実際の実験でナノスケール構造体の量子性を扱う必要性が現実味を帯びてきた。このナノスケール構造体を新たな量子系と捉え、振動量子(フォノン)1個レベルの実験が可能となる超伝導人工原子系と組み合わせることによって、新しい量子力学基礎実験のフィールドが開ける可能性があると考えられる。

2. 研究の目的

本研究課題の主目的は、敢えて超伝導量子系に閉じることなく、新たな量子系であるナノ構造体との相互作用をも含めて【超伝導人工原子を用いたチップ上での量子力学基礎実験】を行うことである。

3. 研究の方法

超伝導人工原子を用いることにより通常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の実施、および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。

4. 研究成果

【A:超伝導人工原子を用いた量子物理】

4年間の研究期間に得られた最大の成果は2つある。1つ目は、人工原子のエネルギー緩和を抑制できる設計された電磁環境を備えた測定試料を再現性よく作製する技術を獲得できたこと。これによって、チップ上での量子力学基礎実験を安定的に行なうことが可能となった。2つめは、超伝導人工原子の理想的な測定を可能とするジョセフソン分岐増幅(JBA)現象を使った高速・低侵襲測定技術を手に入れたことである。JBA測定では準粒子が発生しないため、SQUIDスイッチングを用いる従来法に比べ測定時間を約3桁高速化することに成功した。また、このJBA測定では、量子系と測定装置の相互作用の大きさを測定毎に人為的に調節可能であり、従来思考実験しかできなかった量子測定の詳細を研究する手段として優れている。以下では、個々の成果について、詳しく述べる。

【成果:A-1】3種類の量子系を用いたエンタングルメントの生成と時間発展の測定に成功:

異なる3種類の量子系:ジョセフソン接合中の量子二準位系(TLS:マイクロ)⇔超伝導人工原子(メソスコピック)⇔超伝導伝導線路共振器中の光子状態(マクロ)間におけるエンタングルメントの生成と超伝導人工原子を用いた時間領域での制御およびエンタングルメントの発展の様子を観測することに成功した(論文投稿準備中)。原子を用いた実験との差という観点からは、三者間の相互作用が十分強く、強結合条件が保たれている条件でスイッチ役の超伝導人工原子を用いているため、系全体のコヒーレンス時間内にマイクロなTLSと共振器中のマイクロ波光子とのエンタングルメントを比較的自由に複数回生成したり、解除/移動が可能なが挙げられる。また、超伝導人工原子の重ね合わせ状態をSWAPパルスを用いて他の寿命の長い量子系に移し、一定時間後に読み出すという、量子メモリー動作の初歩的実験にも成功した。

【成果:A-2】被測定系との相互作用の強さをプログラム可能な状態測定装置を用いた超伝導人工原子の射影測定に成功:

ジョセフソン分岐増幅(JBA)現象を使った高速(JBA共振器周波数:9GHz人工原子の量子状態分別時間100~300ns)・低侵襲測定技術を単一量子系である超伝導人工原子の重ね合わせ状態に関してジョセフソン分岐増幅(JBA)測定を用いた、量子状態の射影測定が成功する条件を明らかにした(論文投稿中)。さらに、超伝導人工原子の量子状態を、測定器であるジョセフソン分岐増幅(JBA)回路を用いて測定する

場合の量子測定過程のダイナミクス およびデコヒーレンスの役割について量子論的見地から理論的に解明することに成功した。(5-① H. Nakano et al., PRL 102, 257003 (2009).)

【成果:A-3】(独)マクスナー研究所 R. Gross グループとの共同研究により、超伝導人工原子(磁束量子ビット)と強く相互作用しているマイクロ波光子系の二光子遷移のスペクトロスコピー実験によって、回路 QED 系のパリティ対称性の破れとその制御に関する知見を得た。(5-④: "Two-photon probe of the Jaynes-Cummings model and controlled symmetry breaking in circuit QED.", F. Deppe et al., Nature Physics 4, 686-691 (2008).)

【成果:A-4】緩和時間の精密測定(5-⑥: K. Kakuyanagi et al., Phys. Rev. Lett. 98, 047004 (2007))で得られた指針に基づき、GHz 以上の高周波ノイズを低減して光子の放出を抑え、超伝導人工原子のエネルギー緩和時間と位相緩和時間を約 $3 \mu s$ へと約 30 倍の改善に成功した。

【成果:A-5】コヒーレンス時間に比べて2桁以上短い時間スケールで、超伝導人工原子のトンネルエネルギーをその場制御することに成功した(論文投稿中)。この成果は、超伝導人工原子の新たな制御方法を導く可能性を有する。

以上、最近の研究成果に関しては、物理学雑誌と応用物理 共に 2009 年1月号の解説記事 5-③および 5-②のレビュー論文で発表した。"Quantum state control, entanglement, and readout of the Josephson persistent-current qubit", K. Semba et al., Quantum Information Processing: Volume 8, Issue2(2009), 199-215.

【B:超伝導人工原子ナノメカ結合系】

【成果:B-1】本研究の分担研究者 山口浩司の研究グループとデルフト工科大 van der Zant グループは、Nb-SQUID の一部に両持ち梁構造(板バネ)を組み込み、この梁構造の変位を標準量子限界の 36 倍に相当する 約 10fm という極微細な振動の検出に成功した。5-⑤: "Motion detection of a micromechanical resonator embedded in ad.c. SQUID", S. Etaki, M. Poot, I. Mahboob, K. Onomitsu, H. Yamaguchi, and H. S. van der Zant, Nature Physics 4, 785-788 (2008). この結果は、超伝導人工原子ナノメカ結合系の調節可能な相互作用スキームとして 5-⑦: New Journal of Physics. 9,35 (2007).で我々が提案してきた超伝導量子ビットと板バネの振動量子のエンタングルメント状態実現へ向けての大きな一歩と捉えることができる。また、超伝導共振器中に設置されたキャパシタンスとしての梁構造を冷却する (PRB78,134301(2008).)あるいは、人工原子を流れる超伝導電流のローレンツ相互作用

の反動によって、両持ち梁構造の振動を効率よく抑制(冷却)する実験スキームに関して検討した (New Journal of Physics. 10,043015 (2008).)

【成果:B-2】山口らを中心にシリコン FET とキャパシタンスを介して結合した二次元電子ガス層を含む電気機械共振器を用いて、室温における最高感度の変位検出 ($6 \times 10^{-12} \text{ mHz}^{-1/2}$ at 131kHz)に成功した。(APL95, 233102 (2009).)

【成果:A&B 国際会議の開催】

4年間の研究期間の最終年度(H21 年度)に、本基盤研究で主要な研究成果を挙げた研究者が一同に会し、その成果を発表する機会を提供すると共に、この分野関連で活躍している研究者や、今後、共同研究を行なう研究者にも参加していただき、現在取り組んでいる研究や、今後の研究展望について最先端の研究者が意見交換を行う場を提供することを目的として、H22年3月4日、5日 NTT 厚木研究開発センター講堂にて、QPSAM2010 : Workshop on Quantum Physics using Superconducting Artificial Atoms and Nano-Mechanics を開催した。
<http://www.brl.ntt.co.jp/event/qpsam/>
参加者は2日間で延べ約 100 名。講演数:17 件内招待講演 11 件(海外 5 件,国内 6 件を含む)。講演者および会議参加者間での活発な意見交換が行なわれた。会議は非常に盛況であった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

【雑誌論文】(計 19 件)

①Hayato Nakano, Shiro Saito, Kouichi Semba, Hideaki Takayanagi, Quantum Time-evolution in Qubit Readout Process with a Josephson Bifurcation Amplifier, Phys. Rev. Lett. 102, 査読有, 2009, 257003

②K. Semba, J. Johansson, K. Kakuyanagi, H. Nakano, S. Saito, H. Tanaka and H. Takayanagi, Quantum State Control, Entanglement, and Readout of the Josephson Persistent-Current Qubit, Quantum Information Processing, 査読有, 8, 2009, 199-215

③仙場浩一、齋藤志郎、角柳孝輔、中ノ勇人、超電導回路で共振器量子電磁力学実験が可能に! 'ジョセフソン Cavity-QED', 日本物理学会誌, 査読有, 1月号, 2009, 37-41

④F. Deppe, M. Mariani, E. P. Menzel, A. Marx, S. Saito, K. Kakuyanagi, H. Tanaka, T. Meno, K. Semba, H. Takayanagi, E. Solano, R. Gross, Two-photon probe of the Jaynes-Cummings model and controlled symmetry breaking in circuit QED, Nature Physics, 査読有, 4, 2008, 686-691

⑤S. Etaki, M. Poot, I. Mahboob, K. Onomitsu, H. Yamaguchi, and H. S. van der Zant, Motion detection of a micromechanical resonator embedded in a dc-SQUID, Nature Physics, 査読有, 4, 2008, 785-788

⑥K. Kakuyanagi, T. Meno, S. Saito, H. Nakano, K. Semba, H. Takayanagi, F. Deppe, A. Shnirman, Dephasing of a Superconducting Flux Qubit, Physical Review Letters, 査読有, 98, 2007, 047004

⑦Fei 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, 査読有, 9, 2007, 35

[学会発表] (計 63 件)

①K. Semba, Quantum state control, entanglement, and readout of the Josephson persistent-current qubit, The 3rd International Workshop and School on Solid State Based Quantum Information Processing (QIP 2009), 2009. 6. 30-7. 3, Herrsching Munich, Germany (Invited talk)

② K. Semba, Quantum control of the flux qubit coupled to microwave photon system. Int. Conference on Solid State Quantum Information, 2008. 12. 3-6, SNS-Pisa, Italy. (Invited talk)

③Kouichi Semba, Vacuum Rabi oscillations observed in a flux qubit LC-oscillator system W1.00003: APS March Meeting 2007; Denver, Colorado USA. (March 5-9, 2007) (Invited talk)

[図書] (計 1 件)

著者名: F. Wilhelm and K. Semba
出版者名: World Scientific Pub Co Inc., New Jersey, 2006 ISBN981-256-473-X.

書名: Physical Realizations of Quantum Computing

発行年: 2006

ページ数: pp. 38-107

[産業財産権]

○出願状況 (計 3 件)

名称: 超伝導非線形共振回路を用いた、測定回路の常伝導転移を伴わない、磁束量子ビットの高速非熱的状態測定装置

発明者: 角柳孝輔, 仙場浩一

権利者: 日本電信電話株式会社

種類: 特許

番号: 特願 2009-121380

出願年月日: 2009 年 5 月 19 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 2 件)

名称: 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

発明者: 角柳孝輔、仙場浩一

権利者: 日本電信電話株式会社

種類: 特許

番号: P2009-49631A

取得年月日: 平成 21 年 3 月 5 日

国内外の別: 国内

[その他] ホームページ等

http://www.brl.ntt.co.jp/J/group_007/group_007.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

仙場 浩一 (SEMBA KOUICHI)

日本電信電話(株)NTT 物性科学基礎研究所
量子電子物性研究部 主幹研究員

研究者番号: 50393773

(2) 研究分担者

山口 浩司 (YAMAGUCHI HIROSHI)

日本電信電話(株)NTT 物性科学基礎研究所
量子電子物性研究部 部長

研究者番号: 60374071

中ノ 勇人 (NAKANO HAYATO)

日本電信電話(株)NTT 物性科学基礎研究所
量子電子物性研究部 主任研究員

研究者番号: 60393774

齋藤 志郎 (SAITO SHIRO)

日本電信電話(株)NTT 物性科学基礎研究所
量子電子物性研究部 主任研究員

研究者番号: 90393777

角柳 孝輔 (KAKUYANAGI KOUSUKE)

日本電信電話(株)NTT 物性科学基礎研究所
量子電子物性研究部 社員

研究者番号: 40417093

岡本 創 (OKAMOTO HAJIME)

日本電信電話(株)NTT 物性科学基礎研究所
量子電子物性研究部 研究主任

研究者番号: 20350465

田中 弘隆 (TANAKA HIROTAKA)

日本電信電話(株)NTT 物性科学基礎研究所
量子電子物性研究部 研究主任

研究者番号: 80393776

(平成 18 年度, 平成 19 年度: 研究分担者)

Wang Ying-Dan

日本電信電話(株)NTT 物性科学基礎研究所
量子電子物性研究部 リサーチアシスト

研究者番号: 40451083

(平成 19, 20 年度: 研究分担者)