

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01821

研究課題名（和文）真空中の捕獲電子と超伝導量子ビットの結合系

研究課題名（英文）Hybrid quantum systems with trapped electrons via superconducting circuits

研究代表者

野口 篤史（Noguchi, Atsushi）

東京大学・大学院総合文化研究科・准教授

研究者番号：60761525

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：Paulトラップを用いて真空中に電子を捕獲し、その振動状態と電気回路とを結合させるハイブリッド系の実現に向けて研究をおこなった。室温での捕獲実験を極低温での実験とを並行にすすめた。まず、室温超高真空環境においては、100個程度の電子集団を捕獲し、その振動に由来する輻射をマイクロ共振器と結合させ効率的に検出することに成功した。真空中で少数個の低エネルギー電子からの輻射を測定した世界初の実験である。また、低温実験では、超伝導細線を用いることで、単一電子を検出可能な電子検出器を開発した。これらの実験技術は、極低温における電子トラップに向けた基盤技術であり、新たな量子技術開拓の道筋を示したものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

真空中に荷電粒子を捕獲するPaulトラップの技術は、半世紀ほど前から研究されてきた技術であり、レーザー冷却イオンを用いることで、近年では量子コンピュータの開発まで行われるようになってきた。一方で、同じ荷電粒子である電子の捕獲には高いマイクロ波の技術や効率的な輻射冷却などの技術が必要になり、これまであまり着目されてこなかった。しかし、イオントラップ量子コンピュータにおける欠点を克服する技術として、電子トラップを用いた量子コンピュータがいくつか提案されるようになってきた。本研究は、量子コンピュータ実現に向けた新奇な量子系実現のための最初の一步となり、大きな学術的・社会的意義を持った研究である。

研究成果の概要（英文）：We studied the realization of a hybrid system in which electrons are trapped in vacuum using a Paul trap and their vibrational state is coupled to an electric circuit. The room temperature trapping experiments were carried out in parallel with the cryogenic experiments. First, in the room temperature UHV environment, we succeeded in trapping 100 electrons and efficiently detecting the radiation originating from their vibrations by coupling with a high-Q microwave cavity. This is the first experiment in the world to measure radiation from a small number of low-energy electrons in vacuum. In the cryogenic experiment, an electron detector capable of detecting a single electron was developed by using a superconducting micro-wire. These experimental techniques are fundamental technologies for electron trapping at cryogenic temperatures and pave the way for pioneering new quantum technologies.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：量子エレクトロニクス 量子技術 量子コンピュータ 超伝導検出器 高Q値マイクロ波技術

1. 研究開始当初の背景

パウルトラップ中のトラップイオンや超伝導量子ビットを用いた量子コンピュータに関する研究が加速している。そうした研究のなかで、量子レベルでの増幅を可能にした増幅器、量子限界での超高感度測定、周波数変換器の実現など、様々な量子技術が発展している。こうした量子技術は、量子計算だけでなく、近年では核磁気共鳴の高感度化による医学・化学への応用、また磁気センサーによる生体磁場の高感度検出など、様々な分野への応用が行われるようになってきた。これらの系では、様々な種類の量子系を互いの利点を活かす形で結合させたハイブリッド量子系の構築が重要となる。現在の計算機が、半導体技術・磁性体技術・光技術などを組み合わせて構成されているように、量子情報処理や量子技術においても、異なるキャリア間を結ぶ技術が応用に向けたイノベーションを創出する。

イオントラップ量子技術は、真空中に孤立したイオンを用いるため、離れたトラップ同士を互いに結合させることが難しく、その集積性に難点がある。超伝導量子ビットは、固体デバイスであるため、量子ビットのコヒーレンスや個体差が課題としてあげられる。とくに電気回路の基板による誘電損失は本質的に不可避であり、量子ビットのコヒーレンス改善には限界がある。これら二つの優れた量子系における課題を克服する技術として、真空中の電子トラップ技術を提案する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ハイブリット量子技術のさらなる発展を目指し、真空中に電子集団を捕獲し、その振動状態と電気回路とを結合させる技術を実現することである。

3. 研究の方法

3. 1 室温環境下での電子トラップ

電子振動を量子系として用いるため、高安定度で位相緩和の少ない振動状態を持つ Paul トラップを用いて電子を捕獲する。荷電質量比の大きい電子の捕獲のためには、高い周波数の大きな電圧を電極に印加する必要がある。さらにイオントラップと異なりレーザー冷却が行えない電子を捕獲するためには、その他の冷却機構が必要になる。これらの問題を解決するため、室温で動作する高 Q 値マイクロ波共振器を開発し、増幅器から出力された高強度のマイクロ波を効率よく電極に印加する。この振動電場によって電子を真空中に捕獲する。さらに、捕獲された電子の付近に読み出し用の電極を配置する。浮遊電子の振動により、読み出し電極には鏡像電流が流れる。この鏡像電流をタンク回路に通すことで効率よく検出することができる。さらに、タンク回路の Q 値を挙げることで、共振器電気力学 (Cavity QED) の効果によって、電子振動は効率的にタンク回路に輻射するようになる。その結果、電子振動のエネルギーは電磁波となり外部に出力し、電子を冷やすことができる。このような冷却手法を輻射冷却と呼ぶ。これらの技術を開発し、真空中の電子の冷却と、浮遊電子の振動に由来する電磁波の検出をおこなう。

3. 2 低温環境での単一電子検出

前節で述べたように、捕獲した電子は輻射冷却によって冷却される。しかし、電子の振動が効率的に輻射するという事は、逆に電子振動が外部の電磁波ノイズに敏感になることを意味する。このことから、輻射冷却の冷却限界は、結合したタンク回路の温度と等しくなる。そのため、電子トラップ量子系の実現のためには、低温環境で電子を捕獲する必要がある。しかしながら、低温環境では、その発熱のために、従来の実験で電子検出器として用いられる電子増倍管や MCP と呼ばれる装置を使うことができない。そこで低温での電子トラップを目指し、まずは低温で動作する単一電子検出器を開発する。

3. 3 電子トラップ量子系に向けて

トラップ電子の振動状態を輻射冷却によって量子基底状態にまで冷やすには、希釈冷凍機温度での電子トラップが必要になる。しかしながら、電子の捕獲には高強度のマイクロ波が必要になるため、冷却能が低い極低温冷凍機を用いることができない。そこで、より冷却能が高い 300 mK 環境や、室温環境において電子を冷やす技術が必要になる。そこで、超伝導量子ビットやレーザー冷却トラップイオンとそれぞれ結合したトラップ電子系のダイナミクスをモデル化し、トラップ電子の新しい冷却方法を開発する。

3. 4 クライオ電子トラップ

前節までの研究開発の結果を総動員し、低温環境下での電子トラップを目指す。超伝導体で高 Q 値マイクロ波共振器を構成しマイクロ波を増幅することで、クライオ環境でも電子トラップに必要な大きさの電圧を実現する。

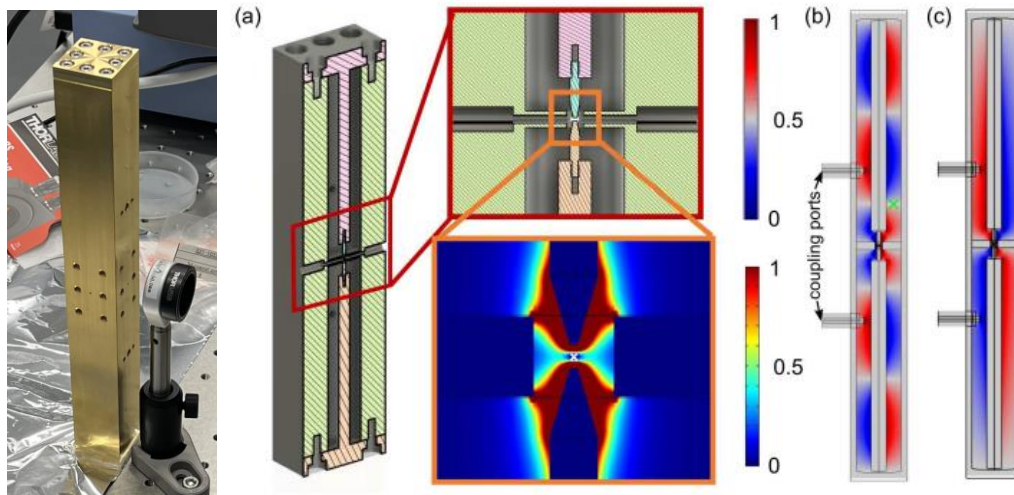


図 1 : (左写真) 結合同軸共振器。(a)同軸共振器の内部図と電子に対して誘起される捕獲ポテンシャル図。(b)捕獲のための 4 重極場モード(c)読み出しのための双極子場モード。

4. 研究成果

3章で述べた研究方法に沿って研究成果を述べる。

4. 1 室温環境下での電子トラップ

電子を捕獲するための高電圧を印加する共振器と、電子からの輻射を効率的に検出する読み出し共振器を兼ねる構造として、「結合型同軸共振器電子トラップ」を発明した。その概略図を図 1 に示す。二つの同軸共振器がキャパシティブに結合した 1 対の同軸共振器から構成されており、図 1(b)と図 1(c)のような共振モードが現れる。図 1(b)は中心の向かい合う電極が等しい電位になり、中心に 4 重極電場が生じる。この 4 重極電場が電子に対して作る有効ポテンシャルを図 1(a)に示す。中心に電子を捕獲するためのポテンシャルが形成されていることがわかる。また、図 1(c)のモードでは、中心で向かい合う電極が互いに逆符号の電位を取る。そのため、このモードは、電子が捕獲される場所に双極子電場を作る。この双極子電場とトラップ電子の振動による電気双極子が相互作用し、電子振動が効率的にこのモードのマイクロ波光子への変換される。

この同軸共振器電子トラップを用いて、電子を捕獲することに成功した。捕獲された電子に由来する信号を図 2 に示す。横軸の 0.15 秒あたりで電子が発生し、サブ秒にわたってトラップ内に電子がいることがわかる。トラップ中の信号の減衰は輻射冷却によって電子がエネルギーを失っていることを表していると考えている。また、電子が冷却され、密度が高くなると、電子自身がトラップ用の電場を遮蔽してしまい、トラップされているすべての電子が一度に逃げている。信号の強度から、捕獲されている電子は約 100 個であると見積もられている。

4. 2 低温環境での単一電子検出

低温環境下で、加熱少なく単一電子を検出するため、超伝導光子検出器に着目した。超伝導光子検出器では、バイアス電流が流れた超伝導細線に光子があたって超伝導が破壊されることで、抵抗が生じ、電圧信号として光子を検出することができる。この際に、光子の代わりに電子を照射することで、同様の過程が起こり、単一の電子が検出可能であると考えた。また、良く用いられる光子検出器は、1eV 程度のエネルギーの光子を検出している。これまでに良く用いられている電子増倍管や MCP では、測定のために keV 程度にまで電子を加速する必要がある一方、本手法によって低エネルギーの電子の検出が可能になると予想される。図 3 に光子検出器の実験系と結果を示す。光電

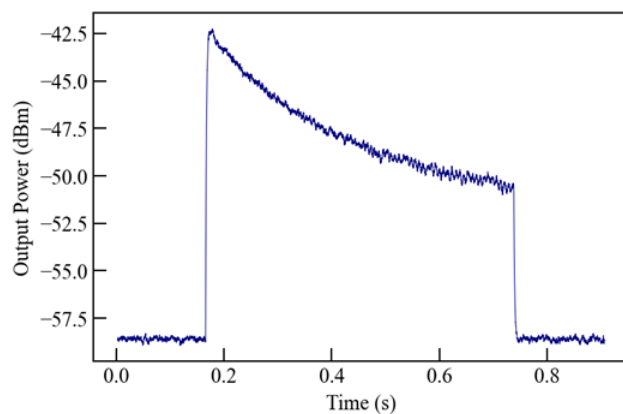


図 2 : 捕獲電子からのマイクロ波信号。

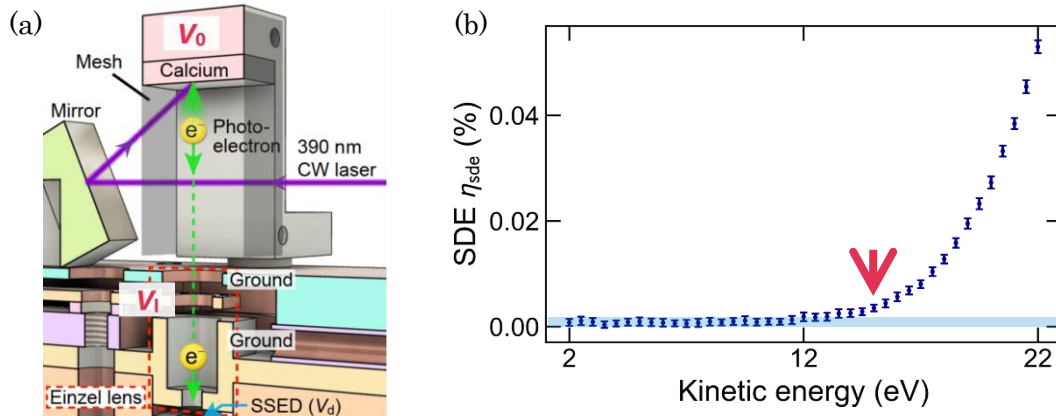


図3：超伝導細線による低エネルギー単一電子検出。(a)実験系全体概略図。(b) 電子の運動エネルギーの違いによる測定効率の変化。

効果によって発生した電子を超伝導細線にまで導き、超伝導が壊れることにより、電気信号が生じ、単一の電子を検出することができる。図3(b)に示すように、12-15 eV程度エネルギーの電子を検出することに成功しており、これは従来の検出器の性能を大きく上回っている。これらの成果を論文にまとめ、現在投稿中である。

4. 3 電子トラップ量子系に向けて

トラップ電子を量子基底状態にまで冷やす方法を検討し、その実現可能性について検討した。とくにトラップ電子とレーザー冷却トラップイオンとクーロン力で相互作用させることで、イオンと電子の協働冷却が可能であることをモデル計算によって確かめ、その効率について議論した。イオンと電子は質量が大きく異なり、振動周波数も大きく違うが、外部からのその周波数差を埋める電場を印加することで、回転座標系で両者の振動が共鳴することを発見した。この手法を用いることで、室温環境で電子の基底状態冷却が可能となる。一方で、4. 1節で実現した同軸共振器の読み出し共振器を利用することで、超伝導量子ビットとトラップ電子の結合系を構築することができる。この系を用いることで、トラップ電子の振動を超伝導量子ビットを利用したサイドバンド冷却によって量子基底状態にまで冷やせることを明らかにした。これらの冷却手法を提案し、その実験的な実現可能性についてまとめた論文は Phys. Rev. Research 誌に出版された。

4. 4 クライオ電子トラップ

4. 1節で実現した同軸共振器電子トラップを、超伝導体を用いて低温環境で実現する研究を行った。超伝導体の熱伝導の低さのため、トラップに必要な高電圧を印加する強度では、共振器の温度が上昇し、共振器 Q 値の著しい低下が観測された。そのため、より大型の常伝導同軸共振器により、超伝導体に依らずに高 Q 値なマイクロ波共振器を実現する研究を進めている。現在、低温環境におけるトラップ実験を準備中である。

4. 5 低周波数の量子系と超伝導量子ビットのハイブリッド系

トラップ電子の振動周波数はサブ GHz であるため、5 GHz 程度である超伝導量子ビットとは周波数が異なる。そこで、大きく周波数の異なる量子系同士を結合させる方法として、2次の非線形性を持つ超伝導回路を用いて、外部から差周波数に対するマイクロ波を駆動する手法を開発した。本研究では、トラップ電子の振動状態の代わりに、低周波数の量子系として表面弾性波と呼ばれる音波を用いた。ピエゾ効果による電場と音波の相互作用を利用して、超伝導回路と表面弾性波が結合する。超伝導回路の2次の非線形性を制御することで、非常に大きな相互作用を誘起することに成功し、単一光子レベルの外部からの駆動によって大きく周波数が異なる量子系の間で強結合と呼ばれるハイブリッド量子系を作ることに成功した。この実験は Nature communications 誌に出版された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Masato Shigefuji, Alto Osada, Masahiro Yabuno, Shigehito Miki, Hiroataka Terai, Atsushi Noguchi	4. 巻 arXiv:2301
2. 論文標題 Efficient low-energy single-electron detection using a large-area superconducting microstrip	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 11212
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.48550/arXiv.2301.11212	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Alto Osada, Kento Taniguchi, Masato Shigefuji, Atsushi Noguchi	4. 巻 4
2. 論文標題 Feasibility study on ground-state cooling and single-phonon readout of trapped electrons using hybrid quantum systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Research	6. 最初と最後の頁 33245
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.4.033245	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Atsushi Noguchi, Rekishu Yamazaki, Yutaka Tabuchi and Yasunobu Nakamura	4. 巻 11
2. 論文標題 Single-photon quantum regime of artificial radiation pressure on a surface acoustic wave resonator	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1183
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-020-14910-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 8件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 木名瀬哲, 谷口建人, 重藤真人, 長田有登, 野口篤史
2. 発表標題 真空中に補足された電子・イオンの共同冷却及びその実装方法の検討
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 Masato Shigefuji, Alto Osada, Masahiro Yabuno, Shigehito Miki, Hirotaka Terai, Atsushi Noguchi
2. 発表標題 Low-energy single-electron detection using a large-area superconducting micro-strip
3. 学会等名 The 35th International Symposium on Superconductivity (ISS2022), (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masato Shigefuji, Alto Osada, Masahiro Yabuno, Shigehito Miki, Hirotaka Terai, Atsushi Noguchi
2. 発表標題 Low-energy single-electron detection using a large-area superconducting micro-strip
3. 学会等名 APS March Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 野口篤史
2. 発表標題 ハイブリッド量子系と量子コンピューター
3. 学会等名 第18回AMO討論会 (招待講演)
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 野口篤史
2. 発表標題 ハイブリッド量子系と量子制御
3. 学会等名 応用物理学会フォトニクス分科会第7回フォトニクスワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 Atsushi Noguchi
2. 発表標題 Quantum manipulation with hybrid quantum systems
3. 学会等名 Quantum Seminar Series, Rice university (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 重藤真人, 長田有登, 野口篤史
2. 発表標題 超伝導単一光子検出器を用いた極低温下での電子検出
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野口篤史
2. 発表標題 超伝導量子回路と電子トラップを用いたハイブリッド量子系
3. 学会等名 応用物理学会 春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野口篤史
2. 発表標題 イオントラップ&電子トラップ
3. 学会等名 2021年度量子情報工学研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Atsushi Noguchi
2. 発表標題 The hybrid quantum circuits with trapped electrons
3. 学会等名 Quantum Innovation 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野口篤史
2. 発表標題 ハイブリッド量子回路
3. 学会等名 ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構設立15周年記念シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 重藤真人, 長田有登, 野口篤史
2. 発表標題 極低温電子トラップのための低エネルギー電子源開発
3. 学会等名 第76回年次大会(2021年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野口篤史
2. 発表標題 ハイブリッド量子系を用いた量子計算技術の展望
3. 学会等名 非ノイマン型情報処理へ向けたデバイス技術分科会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Noguchi Laboratory
<https://www.sqei.c.u-tokyo.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------