

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：21401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25390083

研究課題名(和文)量子測定を応用し、バイオ・有機材料に特化した透過電子顕微鏡の開発

研究課題名(英文)Development of a quantum-enhanced biological electron microscope

研究代表者

岡本 洋 (Okamoto, Hiroshi)

秋田県立大学・システム科学技術学部・准教授

研究者番号：70455799

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：今日の生物電子顕微鏡法には試料損傷という重大な問題がある。使う電子の数が少なすぎると画像のノイズが大きくなり、電子数が多すぎると冷凍試料を破壊してしまう。我々はこの問題を量子テクノロジーを使って解決しようと考えている。当初我々は、超伝導電荷量子ビットであるクーパーペア箱を透過型電子顕微鏡内の電子ミラーに装備することを提案していた。

本プロジェクトでは、我々は磁束量子ビットのほうが好適であることを見出し、その性質を理論的に分析した。この発見により、電子ミラー開発から研究の方向性が大きく変更された。実験的には、どの方向に進むにも必要な真空装置、極低温装置の整備・テストを行った。

研究成果の概要(英文)：Today's biological electron microscopy faces a significant problem: Radiation damage. Too few imaging electrons result in a noisy image, whereas too many electrons lead to destruction of the frozen biological specimen. This is the dilemma, which appears to be a fundamental barrier. We set out to solve this problem using quantum technologies. Initially we proposed to use the Cooper pair box that is a superconducting charge qubit, on an electron mirror inside a transmission electron microscope (TEM).

In the project we theoretically found that a flux-based qubit would work better and we further analyzed properties of it. Because of this finding, we had to make a major change in our plan and move away from the idea of electron mirror. Nonetheless, we tested the vacuum system as well as a pulse tube refrigerator, which will be necessary setups no matter how we will proceed in the future.

研究分野：量子荷電粒子光学

キーワード：電子顕微鏡 超伝導量子ビット

1. 研究開始当初の背景

生物電子顕微鏡法、特に分子分解能・原子分解能などの高分解能をターゲットにしたいいわゆるクライオ電子顕微鏡法の一の問題は、凍結生物試料の“放射線損傷”である(文献)。すなわち、生物試料は電子線を多く当てるとすぐに壊れるために、十分な数の電子をイメージングに使えない。逆に電子の数が少ないと、電子の粒子性が顔をだし、いわゆるショットノイズにより写真がザラザラになってしまっていて分解能があがらない。この問題は電子の粒子性に根ざしているために、本質的に解決不能と長い間考えられてきた。

私の同僚たちと私が2006年にこの問題が解決不能でないことを見出して以来(文献)私は量子力学の非日常的な性質を利用することにより生物電子顕微鏡の分解能を改善する方策を模索してきた。一つのブレークスルーは、最近、量子コンピューターにも関連して文献の研究以来盛んに研究されている超伝導量子デバイス(超伝導接合の量子的性質自体、例えば文献のMacroscopic quantum tunnelingなどは80年代から研究されている)を電子顕微鏡に組み込み、電子ビームと相互作用させることによって分解能を改善でき得るという理論的事実を認識した時に起こった(文献)。このスキームでは、文献で発表された種類のクーパーペア箱型量子ビットを透過型電子顕微鏡(Transmission Electron Microscope, TEM)に組み込んだ電子ミラーに搭載する。

2. 研究の目的

上述のスキームでは、数十ミリケルビン程度に冷却した超伝導量子ビットの近傍に、ほぼ静止した電子を置いて相互作用させるために、電子ミラーを使う。真空中電子は超伝導量子ビットの中の1個のクーパーペアを“検出”しなければならない。これを実現するため、まずは1個の素電荷に対する感度を持つ電子ビーム電子ミラー系を製作して予備実験をすることを計画した。また、将来はミリケルビン領域に進む必要があるため、まずはGifford-McMahon (GM)型冷凍機で4K程度の極低温に電子ミラーを冷却し、その性質を調べることも計画した。

3. 研究の方法

量子電子顕微鏡は本研究の代表研究者および同僚が提唱しはじめたものであり、理論的にも実験的にも萌芽的な段階である。よって、本研究は理論研究と実験研究の両輪で進めた。

理論研究の主な目的は、量子電子顕微鏡の設計そのものの確定である。(さもないと実験研究の方向が定まらない。)ごく小規模の数値シミュレーション(ノートPCで実施可能)を除けば、基本的には紙と鉛筆と頭のみで研究を進めた。

実験研究の主な目的は、(その時点で最も有力な)装置スキームのpreliminaryなテストを行うことである。そのためには既に立ち上がっていた真空装置の中でまずは電子ビームを発生できる状況を整える必要があった。また低温実験に備えて極低温冷凍機を選定調達してテストする必要があった。

4. 研究成果

本研究プロジェクトでは、理論面で予期していなかった進展があったため、電子ミラーを開発するという当初計画を大きく見直す経緯をたどった。

(1) 理論研究

クライオ電子顕微鏡では、電子線は比較的厚い(数十nm)生物試料を透過しなければならず(これは生物学的に興味ある分子の大きさが数十nmくらいのことがあるという単純な理由による)300keV程度の電子エネルギーが適切と言われている。この電子ビームを電子ミラー近傍で瞬間的に静止させるためには、基本的に電子ミラーを-300kVの電位に置くことになる。これは原理的には可能であるが、実際には(超伝導量子ビットの非常にノイズに影響されやすい性質等を考えると)技術的問題があまりにも多いと考えられる。よって出来れば高エネルギー電子のまま超伝導ビットと相互作用させたい。そこで静電相互作用よりも磁氣的相互作用の方が好ましいのではないかという考えに自然と導かれた(簡単な例を挙げると、ローレンツ力は電子の速度に比例する)。この考えはもっていたものの、磁束型超伝導ビットの周りの磁界は複雑な形をしており、簡単に思いつくような磁力線と電子ビームの相互作用は今一つ“美しく”ないものであった。

そのような折、本プロジェクトの成果の〔雑誌論文〕の共著者(Nagatani)から磁界を直接作用させる代わりにAharonov-Bohm (AB)効果はどうか、という示唆を頂いた。日立の外村らの有名な実験(文献)にもヒントを得て、中空ドーナツ型のrf-SQUID型超伝導量子ビットの着想に至った(〔雑誌論文〕)。これを使うと、相互作用がトポロジカルな性質を持つために、電子のエネルギーに無関係(実は荷電粒子の質量にも無関係)に一定の量子的相互作用を起こすことができる。これは本プロジェクトの主要な成果の一つである。

その後、全く同じデバイスが無擾乱型の荷電粒子検出にも使えることが分かった(〔雑誌論文〕)。ふつう、単一荷電粒子を検出するにはMicrochannel Plate (MCP)を使うが、これは単一荷電粒子が複数の電子を物質から放出させる過程を繰り返して信号を増幅する。当然、当初の荷電粒子はどこかに消えてしまう。私の提案する超伝導量子ビットを用いた荷電粒子検出器は、事実上荷電粒子に古典的な力を加えないので、検出した後

で当該荷電粒子を他の目的等に使うことができる。このような検出器には恐らく多くの応用があると思われる。例えば、現在では大きな生物分子を帯電させることもできるために、低速電子顕微鏡(Low Energy Electron Microscopy, LEEM)をミラーモードぎりぎりで使用すると、帯電した生物分子を一つずつ数えながら基板上の望みの位置に着地させていくことができるだろう。これは例えば合成生物学分野で強力な道具になるかもしれない(〔雑誌論文〕)。

以上の様に理論研究は一定の成功を見たが、実際の実験スキームに至るにはまだハードルが残っている。例えば、さまざまな技術的理由により磁束量子ビットは磁束量子分の磁束を量子力学的重ね合わせ状態でトラップすることが難しい。これを解決するため、複数の小型 rf-SQUID 素子を使い、これらを協同的に動作させるスキームを提案中である(査読中、〔その他〕の項のプレプリントを参照)。このスキームは複数の量子的物体を協同的に動作させるため、場の量子論や繰り込みの考えでデバイスの動作を解析する必要がある。逆に言えば本研究は、このような高度な理論物理学の成果が「測定装置の設計」という工学的な現実問題に適用される最初の例の一つということもできるだろう。

(2) 実験研究

実験研究は理論研究と異なり、まず実験セットアップをして土俵に乗るのにコスト・労力・時間がかかる。本研究プロジェクトでは、量子電子顕微鏡を開発するための実験環境の整備をおこなったが、「土俵に乗る」部分であり、論文発表できる世界最初の研究成果を得るには至っていない(しばらくは得られないだろう)。以下では幾つか行った環境セットアップについて述べる。

十分輝度の高い電子ビームを発生するために、電界放射型電子銃の製作とテストを行った。(輝度は我々の実験にとって本質的ではないが、実験がやりやすくなると考えられる。)走査型トンネル顕微鏡(STM)の短針作成法を使い、これを加熱ループに溶接して電界放射型電子銃を作成し、電子ビームを実際に発生させた。

前述の電界放射型電子銃は、安定に動作させるためには超高真空が必要である。このためにイオンポンプを選定し、真空装置にインストールした。現在ヒーティングテープの整備が不十分であり、超高真空にぎりぎり届かない程度の真空に留まっているが、早晚解決されると思われる。また、重いイオンポンプをインストールするための実験室のクレーン(車の整備用)や大型のジャッキ(オートバイ整備用)なども整備した。

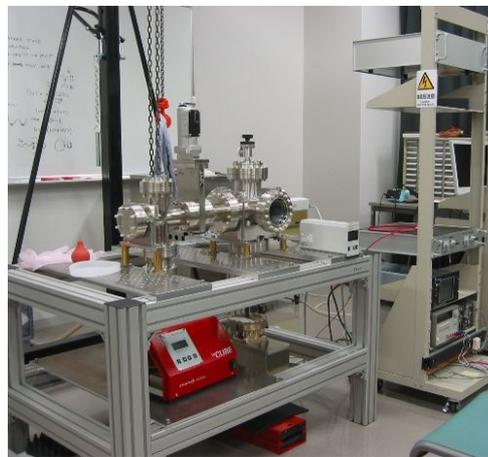


写真 1: イオンポンプ据え付け直前の状態。

現在作成しているのは量子電子顕微鏡に必要なユニットを研究開発するためのテストベッドであり、顕微鏡そのものではない。しかし、あらゆる種類の外乱やノイズを嫌う実験であることは明白なので、当初考えていた GM 冷凍機は振動の問題が心配であった。そこで、100 万円ほどのコストの上乗せがあったが機械的振動のずっと小さなパルスチューブ型冷凍機を選定した。これをテストするための真空チャンバー、輻射シールド、温度計格納ユニットなどを設計し組み立てを行った。試運転の際には仕様最低到達温度を下回る 2K 近くに到達した。

将来は、ヘリウム 4 ガスを循環させて動作する 1K ポットを設計製作し、パルスチューブ冷凍機に取り付けて作動させたいと考えている。また、少し先の将来の希釈冷凍機ユニット(1K ポットの下に取り付ける)製作を見据えてヘリウム 3 ガスを入手した。



写真 2: パルスチューブ冷凍機に輻射シールドを取り付け、クレーンを使って真空チャンバーに降ろしていくところ。

<引用文献>

R. Henderson, "The potential and limitations of neutrons, electrons and X-rays for atomic resolution microscopy of unstained biological molecules" Q. Rev. Biophys. 28, 171 (1995).

Hiroshi Okamoto, Tatiana Latychevskaia, and Hans-Werner Fink, "A quantum mechanical scheme to reduce radiation damage in electron microscopy", Appl. Phys. Lett. 88, 164103 (2006).

Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin & J. S. Tsai, Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box, Nature 398, 786 (1999).

Richard F. Voss and Richard A. Webb, "Macroscopic Quantum Tunneling in 1- μ m Nb Josephson Junctions", Phys. Rev. Lett. 47, 265 (1981).

Hiroshi Okamoto, "Possible use of a Cooper-pair box for low-dose electron microscopy", Phys. Rev. A 85, 043810 (2012).

Akira Tonomura, Nobuyuki Osakabe, Tsuyoshi Matsuda, Takeshi Kawasaki, and Junji Endo, "Evidence for Aharonov-Bohm Effect with Magnetic Field Completely Shielded from Electron wave", Phys. Rev. Lett. 56, 792 (1986).

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

Hiroshi Okamoto, "Quantum interface to charged particles in a vacuum", Phys. Rev. A 92, 053805 (2015). 査読有

Hiroshi Okamoto, "Measurement errors in entanglement-assisted electron microscopy", Phys. Rev. A 89, 063828 (2014). 査読有

Hiroshi Okamoto and Yukinori Nagatani, "Entanglement-assisted electron microscopy based on a flux qubit", Appl. Phys. Lett. 104, 062604 (2014). 査読有

〔学会発表〕(計5件)

岡本 洋, 超伝導量子ビットと荷電粒子光学、第6回情報ナノシステム研究会、2017年3月19日、仙台国際ホテル(宮城県仙台市)招待講演

Hiroshi Okamoto, Quantum enhanced electron microscopy: Possibilities and limitations, 情報ナノシステム研究会、2015年3月14日、笹谷温泉一の湯(宮城県柴田郡)招待講演

Hiroshi Okamoto, QEM with superconducting qubits: Possibilities and limitations, Biannual meeting for quantum electron microscopy, 2015年3月2-3日、Massachusetts Institute of Technology

(Boston, USA) 招待講演

岡本 洋, 量子もつれ: セキュリティから高精度計測まで、液晶フォトンクス・光デバイスフォーラム研究会、2014年10月25日、カレッジプラザ(秋田県秋田市)招待講演
金澤 里花, 宮澤 輔, 岡本 洋, 試料を傷めない量子もつれ顕微鏡の開発、細胞を創る研究会6.0、2013年11月13-14日、鶴岡市先端研究産業支援センター(山形県鶴岡市)

〔その他〕

ホームページ等

公開済みプレプリント Hiroshi Okamoto, "A Qubit Design Based on Many-Body Physics for Charged Particle Optics", arXiv:1608.02363 [quant-ph]
<https://arxiv.org/abs/1608.02363>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

岡本 洋 (OKAMOTO, Hiroshi)

秋田県立大学・システム科学技術学部・准教授

研究者番号: 70455799