

論文の内容の要旨

論文題目 Superconducting transport phenomena in ballistic nanowire
Josephson junctions (弾道的ナノ細線ジョセフソン接合における超伝導輸送現象)

氏名 上田 健人

近年量子コンピューターの実現に向けて世界中で研究が盛んに行われている。現在の量子コンピューターの課題として考えられているのが量子計算の過程で生じるエラーである。この課題を解決することのできる手法がマヨラナ粒子を利用したトポロジカル量子コンピューターである。マヨラナ粒子は電子と正孔の重ね合わせで記述され、その非可換統計性という大変興味深い物理的な性質から将来のトポロジカル量子コンピューターへの応用が期待されている。マヨラナ粒子の実現方法には様々な実験舞台が提案されており、いくつかの系でマヨラナ粒子の観測報告がある。その中で実現性の観点から最も期待されている実験系がs波超伝導体とスピン軌道相互作用の強いナノ細線の接合に磁場を印加することで実現されるトポロジカル超伝導体である。その接合端にはマヨラナ粒子が一つずつ局在することになる。しかし、超伝導体と磁場の相性は決して良好とは言えず、磁場の印加によりトポロジカル保護が崩されてしまうのではないかと懸念がある。それを克服する手法として高効率のクーパー対分離を利用することが提案されている。s波の超伝導体に並列に二本のナノ細線を接合した系では、2本の細線にクーパー対が分離するエネルギーを利用することでトポロジカル遷移を起こしマヨラナ粒子を発現させることができる。従って、まず一次元細線でクーパー対分離を実現する必要があるが、これまでに一次元細線によるクーパー対分離の実験例はない。そこで我々は無磁場におけるマヨラナ粒子の観測を最終的な目標として以下の二つのテーマに取り組んだ。

- ① 並列二重半導体InAsナノ細線に対して従来の加工技術を改良して超伝導体Al間の距離を極端に短くすることで弾道的なジョセフソン接合試料を作製する。この接合には、分離トップゲートを取り付けて、それぞれのナノ細線の電子密度を独立に制御できるようにする。クーパー対の分離効率は一次元細線の電子間相互作用が大きいほど上昇することが理論予測されているので、各細線の電子密度、伝搬モード数と分離効率の関係を明らかにする。実験では、多くの試作を繰り返して、上記条件を満たすような並列二重ナノ細線を用いた弾道的なジョセフソン接合試料の作製に成功した。この試料を用いて、超伝導電流の伝搬モード数や磁場依存性の詳細を調べることにより、一次元伝導体におけるクーパー対分離現象を実証した。また、その分離効率は、各細線のモード数が小さいほど相互作用が強くなることを反映して、上昇することを確認した。 (K. Ueda, S. Matsuo, H. Kamata, S. Baba, Y. Sato, Y. Takeshige, K. Li, S. Jeppesen, L. Samuelson, H. Xu, and S. Tarucha, Science advances 5, eaaw2194 (2019).)
- ② 高周波電圧をジョセフソン接合に照射すると電流の掃引に対して電圧のプラトー構造が量子化値($h/2e \times$ 周波数)の整数倍に出現する。マヨラナ粒子が存在する場合、ジョセフソン接合に形成されるアンドレーエフ束縛状態の周期が変化し、その変化を反映して奇数倍のシャピローステップが消失する。我々はシャピローステップの測定によってマヨラナ粒子の観測を目指すために、まず単一の半導体ナノ細線ジョセフソン接合の物理を解明する必要がある。特に超伝導体間距離が超伝導体コヒーレンス長と半導体ナノ細線の平均自由行程よりも短い弾道的な接合を交流ジョセフソン測定すると分数化したシャピローステップの観測が生じると理論的に予測されているが、実験的には観測されていない。最終的に弾道的な接合において高効率のクーパー対分離を実現して無磁場でマヨラナ粒子の観測を目指すにあたり、分数化したシャピローステップの観測が必須である。そこで我々は単一の半導体InAsナノ細線を用いて弾道的なジョセフソン接合を作製し分数化したシャピローステップの観測を目指した。分数化したシャピローステップのゲート依存性や温度依存性、そして超伝導電流のゲート依存性を測定し、シャピローステップの分数化が弾道的な接合の電流位相関係に起因していることを実証した。このことにより、弾道的な接合に無磁場でのマヨラナ粒子観測に道筋を示した。 (Kento Ueda, S. Matsuo, H. Kamata, Y. Sato, Y. Takeshige, K. Li, L. Samuelson, H.Q. Xu, and S. Tarucha, Phys. Rev. Research 2, 033435)