

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料  
〔平成29年度研究進捗評価用〕

平成26年度採択分  
平成29年3月15日現在

量子対の空間制御による新規固体電子物性の研究

Exploring the novel quantum electronic physics in solid state using spatial control of paired quantum states

課題番号：26220710

樽茶 清悟 (TARUCHA SEIGO)

東京大学・大学院工学系研究科・教授



研究の概要

本課題では電子対、光子-スピン対などの対状態に空間自由度を導入し、また量子技術を活用して量子物性の新概念と手法を開拓する。これまでに様々なナノ構造を用いて、電子スピンの非局所もつれの生成と多スピンの量子制御、表面弾性波による電子のスピン保持移送と電子対の空間分離、空間の制約を受けないクーパ対分離、単一電子-光子対生成などの成果を上げた。

研究分野：数物系科学

キーワード：半導体物性、光物性、量子もつれ、量子コンピュータ、量子ドット

1. 研究開始当初の背景

ナノ構造の量子状態を制御する技術を用いて相関電子系、異種の量子系、量子凝縮の研究分野が開拓され、また、量子情報への応用が進められている。代表者らは早くから当該分野に参入し、先駆的成果を上げてきた。その中で、電子対、光子-スピン対などの対相関に空間の自由度を導入し、さらに量子情報の技術を活用すれば、量子電子物性、量子制御の新概念と手法を開拓できると着想した。その中核研究項目として①多重ドット列の電子相関、②スピン対の量子電子光学、③超伝導-量子ドット（細線）接合の非局所電子対、④光子-スピン対の相関を設定した。

2. 研究の目的

①では量子制御技術を拡張して、多重ドットの電子相関に由来する電子状態を検出する。同時に、誤り訂正計算の基本ゲートを実現する。②では表面弾性波によって動く量子ドット中の孤立した電子スピンのコヒーレント性を検証した後、非局所量子もつれスピン対を生成、観測する。③では並列2重ドット超伝導接合において固体系で初となる非局所量子もつれを検証する。また、超伝導体-ナノ構造、トポロジカル絶縁体の接合においてマヨラナ粒子などのトポロジカル物理を探索する。④では光子対から電子-光子対への変換の技術を確認し、異種粒子相関の物理、量子中継への応用を議論する。

3. 研究の方法

①多重ドットの電子状態制御、量子ビット化、

非局所量子もつれ生成を行い、スピン相関の物理を解明する。また誤り訂正計算に必要な種々の基本ゲートを開発する。

②表面弾性波で運ばれる単一電子スピンのコヒーレント性を確認した上で、電子対の高効率分離と伝送の技術を確認する。次に、表面弾性波中の電子対を分離し、その非局所性を干渉計、電流雑音相関測定で評価する。

③並列二重 InAs 量子ドットジョセフソン接合の超伝導電流の測定からクーパ対分離ともつれ相関保持を実証する。また、トポロジカル絶縁体、半導体ナノ構造と超伝導体接合を用いてトポロジカル物理を探索する。

④単一光子から単一スピンへの情報転写、もつれ光子対生成、偏光光子-電子スピン対を生成を行い、特性を評価する。

4. これまでの成果

①3, 4重ドットの電子状態制御とスピン量子ビット化を達成した。3, 4量子ビットは初めての実現例であり、これにより基本の量子アルゴリズムに必要な量子ビット技術を確認した。また、拡張性の高い5重ドットの作製に成功し、量子計算の規模拡大の指針を得た。

3重ドットを中心に量子もつれの研究を展開し、量子もつれが固体の空間制約を受けないことを初めて示した。また、量子非破壊測定を電子スピンのみで初めて実証した。

量子計算の実行に必要な基本ゲート（単一スピンの回転、量子もつれ操作、制御 NOT）を2-4重量子ドットにおいて実現した。

②単一電子移送のスキームで静的量子ドット中の電子を表面弾性波の作る「動く量子ド

ット」へと断熱的に移し、基底状態のままスピンを保持して伝送できることを示した。また、この動くドット中の電子対を分岐導波路で別々の動くドットへ高効率で空間分離することに成功した。

グラフェンと超伝導体の接合を電子分離の有望な系とし計画に追加し、新たな方向性を示す成果を得た。まず、鉛電極にグラフェンの量子ドットを2つ取り付けた系において、2次元系で世界最高効率(~62%)のクーパ対分離を達成した。また、量子ホール状態にあるときにクーパ対がグラフェンの両端に分離して流れる超伝導流を初めて観測した。これと並行して、グラフェンのジョセフソン接合を用いて臨界電流のスケールングを初めて実験的に解明した。また、グラフェンのバレー(K, K')自由度を利用したクーパ対分離に向けて、二層グラフェンにおけるバレーホール効果の検証に成功した。

③並列二重 InAs ドットジョセフソン接合用いてクーパ対分離による超伝導電流増大を検出し、空間的に分離した電子の対相関を初めて実証した。

トポロジカル絶縁体 HgTe のジョセフソン効果実験でマヨラナ粒子の新たな痕跡を捉えた。InAs ナノ細線では、同粒子の生成に必要なヘリカル状態の兆候を検出し、並列二重ナノ細線では、パラフェルミオンの生成に必要なクーパ対分離を観測した。また、トポロジカル粒子生成の舞台の一つである超伝導-スピン分離量子ホール接合において、アンドレーエフ反射の新奇な現象を見出した。

④もつれ光子対から生成された光子と電子の同時検出、光学スピン閉塞を用いた単一光子励起の単一電子-軽い正孔のコヒーレント生成を実証し、光子-スピン対の実験は大きく前進した。電子スピンの新検出法として量子ホールエッジ状態を利用する方法、3値スピン測定法を開発した。

## 5. 今後の計画

①高速測定、また Si 量子ドットの採用により量子ゲートの忠実度を上げる。これを利用して、量子技術が多体電子相関を解明するための強力なツールであることを示す。

②まず、電流雑音相関の測定による分離効率の評価と分離電子対の衝突干渉実験による非局所もつれの検証を目指す。その後、スピン軌道相互作用によるスピン制御を利用したベル測定に取り組む。

グラフェン量子ドットを用いたクーパ対分離の効率をベル測定に必要な水準まで引き上げ、量子もつれの検証を目指す。また、量子ホール状態やバレーホール効果を利用した新しいクーパ対分離を試みる。

③トポロジカル粒子の生成と制御に向けて、トポロジカル絶縁体、量子井戸、ナノ細線と超伝導体の接合の高品質化、最適化を図る。

④今までの成果を発展させて、電子-光子対(異種量子対)の量子もつれ相関の実証、光子-電子変換の高効率化を達成する。

6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

1. A. Oiwa, T. Fujita, H. Kiyama, G. Allison, A. Ludwig, A.D. Wieck, and S. Tarucha, "Conversion from single photon to single electron spin using electrically controllable quantum dots", J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 011008 (2017).
2. A. Noiri, J. Yoneda, T. Nakajima, T. Otsuka, M.R. Delbecq, K. Takeda, S. Amaha, G. Allison, A. Ludwig, A.D. Wieck, and S. Tarucha, "Coherent electron-spin-resonance manipulation of three individual spins in a triple quantum dot", Appl. Phys. Lett. **108**, 153101 (2016).
3. M.R. Delbecq, T. Nakajima, P. Stano, T. Otsuka, S. Amaha, J. Yoneda, K. Takeda, G. Allison, A. Ludwig, A.D. Wieck, and S. Tarucha, "Quantum dephasing in a gated GaAs triple quantum dot due to non-ergodic noise", Phys. Rev. Lett. **116**, 0468020 (2016).
4. J. Wiedenmann, E. Bocquillon, R.S. Deacon, S. Hartinger, O. Herrmann, T. M. Klapwijk, L. Maier, C. Ames, C. Brüne, C. Gould, A. Oiwa, K. Ishibashi, S. Tarucha, H. Buhmann, and L.W. Molenkamp, "4 $\pi$ -periodic Josephson supercurrent in HgTe-based topological josephson junctions", Nature Commu. **7**, 10303 1-7 (2016).
5. Y. Shimazaki, M. Yamamoto, I.V. Borzenets, K. Watanabe, T. Taniguchi, and S. Tarucha, "Generation and detection of pure valley current by electrically induced Berry curvature in bilayer graphene", Nature Phys. **11**, 1032 (2015).
6. R. S. Deacon, A. Oiwa, J. Sailer, S. Baba, Y. Kanai, K. Shibata, K. Hirakawa, and S. Tarucha, "Cooper pair splitting in parallel quantum dot Josephson junctions", Nat. Commu. **6**, 7446 1-6 (2015).

受賞

山本倫久 船井学術賞 H29.4

木山治樹 船井研究奨励賞 H29.4

新聞

日刊工業新聞 2015年7月2日付 21面

「もつれ電子対 離れた量子ドットに分離  
理研など 新ナノデバイス開発」

ホームページ等

<http://www.meso.t.u-tokyo.ac.jp/>

<http://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/qse/>