

半導体ナノ構造における量子相関の生成と検出 Generation and Detection of Quantum Correlation in Semiconductor Nanostructures

小林 研介 (KOBAYASHI KENSUKE)

京都大学・化学研究所・准教授



研究の概要

エンタングルメントは、量子力学において最も特異な概念であると同時に、今日の量子情報技術の基盤概念でもある。本研究は、半導体ナノ構造において電子系のエンタングルメントを生成し、新たに開発する高精度の量子雑音相関測定によって、それを検出することを目的とする。さらに、本研究によって電子系特有の非平衡量子多体状態という広大な研究領域の開拓を行う。

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 I

キーワード：メゾスコピック系、量子雑音

1. 研究開始当初の背景

二つ以上の粒子の間に非局所的な量子相関が保持されている状態をエンタングルメントと呼ぶ。エンタングルメントは、量子力学において最も特異な概念であると同時に、今日の量子情報技術の基盤概念であるため、その生成と制御は極めて重要である。

近年の微細加工技術の進展により、我々は様々な半導体ナノ構造を作製し、量子効果を制御できるようになった。しかしながら、典型的な量子状態であるエンタングルメントの生成に関しては、光子系では既に実現されているのに対し、電子系においては現在も挑戦的な課題として実験家に残されている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、固体素子において電子系のエンタングルメントを生成し、量子雑音相関測定によってそれを検出することである。本研究によって固体素子中に電子のエンタングルメントが生成できることが実証されれば、現実的な量子情報処理システムの構築にとって大きな一歩になる。

3. 研究の方法

エンタングルメント生成を行う系は、主として、半導体二次元電子系上に作製される電子干渉計と量子ドットの二つである。エンタングルメント生成を実証するために、量子雑音測定法および量子相関測定法を新規に開発し、ベル不等式の破れを検証する。

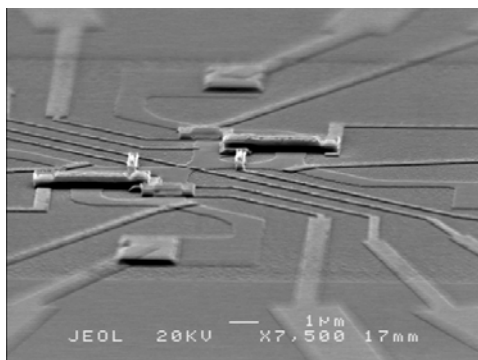
4. これまでの成果

エンタングルメント検出を目指す本研究の核となるのは、高精度の量子雑音測定技術である。しかしながら、検出に必要とされる精度は市販の測定器の組み合わせでは実現できない。そこで、本研究はこの技術を開発することから開始した。その結果、電子温度 20mK において、測定感度 $10^{-29} \text{A}^2/\text{Hz}$ という、世界有数の高感度量子雑音測定系を構築することに成功した。

現在、電子波干渉計などのエンタングルメント生成と検出の舞台となる半導体ナノ構造を用いて量子雑音測定を行い、非平衡電子ダイナミクスの研究を行っている。光子とは異なり、電子は電荷・スピンを有するフェルミオンであるため独自の多彩な量子・多体現象が発現するが、我々の量子雑音測定によってその新たな一面が明らかとなってきた。以下に、本研究において現在までに達成した成果の一部を述べる。

(1) 量子雑音放射の精密測定

典型的な半導体ナノ構造である量子ポイントコンタクト (QPC) における量子雑音に関しては、理論的によく調べられている。我々は対向した一組の QPC を有する素子を作製し、一方で発生した量子雑音が他方に与える影響について調べた。発生した量子雑音は、他方の QPC へと受け渡され、熱へ変換される。このことを利用して、感度 1 fW 程度という高精度の熱放射測定を実証した。



我々が作製したマッハ・ツェンダ電子干渉計の走査型電子顕微鏡写真

(2) 電子干渉計におけるコヒーレンス

マッハ・ツェンダ干渉計は、エンタングルメント生成の舞台となる。我々はこの系を用いて、干渉強度の温度依存性と量子雑音を測定した。我々の実験の特色は、熱雑音を測定することによって正確な電子温度が決定できることであり、それによって、コヒーレンスの温度依存性を正確に明らかにした。

(3) 電子干渉計における非平衡位相緩和

マッハ・ツェンダ干渉計において、近年見いだされた特徴的な非平衡位相緩和現象は、起源が不明であった。我々は、ファブリ・ペロ干渉計とアハロノフ・ボームリングという、二種類の電子干渉計においても同様の非平衡位相緩和の観測に成功し、その緩和を特徴付けるエネルギースケールが干渉計の大きさでほぼ決まることを見出した。このような非平衡位相緩和現象の普遍性は本研究で初めて見いだされたものであり、干渉計内におけるクーロン相関の重要性を示唆する。

(4) 量子系における揺らぎの定理の検証

物理学においては、系の応答を記述する理論として線形応答理論が確立しているが、その限界を超えて非平衡系をよりよく理解しようという試みが長年行われてきた。その一つが「揺らぎの定理」である。我々は、電子干渉計を用いて量子雑音の精密測定を行い、非線形性と非平衡性を定量的に結びつける関係式を見だし、その結果が揺らぎの定理に基づく予想に合致することを見いだした。この結果は量子系における揺らぎの定理を世界で初めて実験的に検証したことになる。このような研究は、量子力学と統計力学の両方に関わる根源的な問題に実験的にアプローチしていく端緒を与え、非平衡統計物理学の新しい展開を生み出す点で多方面に大きなインパクトを与える成果である。

高精度量子雑音測定によって得られた上記の成果は、エンタングルメント生成と検出に必要な不可欠の基盤を与えるものである。

5. 今後の計画

(1) マッハ・ツェンダ干渉計において、現在 50%を超える高い干渉強度を得ると同時に、量子雑音の測定にも成功している。今後、量子雑音相関の測定を行いベル不等式の破れを実証する。

(2) 我々は、近藤状態にある量子ドットにおける量子雑音が多体効果を反映して増大することを示した。今後は、スピン重項形成によるエンタングルメントを実証する。

(3) 我々は量子細線内に動的核スピン偏極状態を生成することに成功した。今後は核スピン集団のエンタングルメントを実証する。

6. これまでの発表論文等

S. Nakamura, Y. Yamauchi, M. Hashisaka, K. Chida, K. Kobayashi, T. Ono, R. Leturcq, K. Ensslin, K. Saito, Y. Utsumi, A.C. Gossard: "Nonequilibrium Fluctuation Relations in a Quantum Coherent Conductor", *Phys. Rev. Lett.* **104**, 080602-1-080602-4 (2010).

M. Hashisaka, A. Helzel, S. Nakamura, L. Litvin, Y. Yamauchi, K. Kobayashi, T. Ono, H-P. Tranitz, W. Wegscheider, C. Strunk: "Temperature dependence of the visibility in electronic Mach Zehnder interferometer", *Physica E* **42**, 1091-1094 (2010).

Y. Yamauchi, M. Hashisaka, S. Nakamura, K. Chida, S. Kasai, T. Ono, R. Leturcq, K. Ensslin, D. C. Driscoll, A. C. Gossard, K. Kobayashi: "Universality of bias- and temperature-induced dephasing in ballistic electronic interferometers", *Phys. Rev. B* **79**, 161306-1-161306-4 (**Rapid**) (2009).

S. Nakamura, M. Hashisaka, Y. Yamauchi, S. Kasai, T. Ono, K. Kobayashi: "Conductance anomaly and Fano factor reduction in quantum point contacts", *Phys. Rev. B* **79**, 201308-1-201308-4 (**Rapid**) (2009).

M. P. Delmo, S. Yamamoto, S. Kasai, T. Ono, K. Kobayashi: "Large positive magneto resistive effect in silicon induced by the space-charge effect", *Nature* **457**, 1112-1115 (2009).

M. Hashisaka, Y. Yamauchi, S. Nakamura, S. Kasai, T. Ono, K. Kobayashi: "Bolometric detection of quantum noise in coupled mesoscopic systems", *Phys. Rev. B* **78**, 241303-1-241303-4 (**Rapid**) (2008).

小林研介、第三回日本物理学会若手奨励賞、「半導体メゾスコピック系における電子のコヒーレンスと多体効果の制御に関する研究」(平成 21 年 3 月 28 日)

ホームページ等

<http://sscl.kuicr.kyoto-u.ac.jp/indexj.html>