

固体中の電子の量子操作と計測

樽茶 清悟

東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻

本来量子状態は時空間で発展する位相で特徴付けられるもので、その振る舞いは、原子や光子など外乱を受けにくい量子系を中心に調べられてきた。一方、固体中の電子系では、強い相互作用をもつ外部環境や粒子間の相互作用のために位相が乱れやすく、従来電気伝導における弱局在、揺らぎといった、干渉によって生じる非オーム的な補正項として観測されてきた。最近になって、様々な微細構造を用いて電子の量子位相や相関を操作、計測する技術が開発され、これを基に、低次元系での量子相関や量子電子光学の研究、あるいは量子情報への応用が急速に進められている。例えば、量子ドットに閉じ込められた電子の電荷、スピンの位相や相互作用を電氣的、光学的に制御、計測することにより、コヒーレンス、量子もつれの問題を直接取り扱えるようになり、また、空間的に伝搬する電子についても、干渉計を用いた位相発展の検出、もつれ電子対源を用いた量子もつれの非局所性に関する実験が始まっている。本講演では、これらの話題を中心に、背景にある物理と量子情報への応用について紹介する。

時間領域の量子制御：

量子ドットなどの小さい空間に電子を閉じ込めて波数を量子化すると、状態ベクトルの位相は、量子化エネルギーに相当する周波数で時間発展する。このような電子の位相を電子 1 個の単位で制御、検出することが、量子情報処理の基本的な概念を与える。電子のスピンの場合、スピン量子情報は、上向き ($|\uparrow\rangle$) と下向き ($|\downarrow\rangle$) のスピンの重ね合わせで作られる。2つの向きのスピンの位相差を制御することによって、状態ベクトルの位相操作 (量子 Z ゲート) を行い、その結果は、上向き、下向きのスピンへの射影測定で検出される。また、同様なスピン状態ベクトル 2 個の相関を操作することによって、スピン 1 重項に代表される量子もつれ状態を制御することができ、その応用として量子論理演算が構成される。一方で、これらの手法を利用することによって、量子系の電荷やスピンのダイナミクス、位相デコヒーレンスの問題が解明され、さらには、核スピンやスピン軌道相互作用など、デコヒーレンスをもたらす要因の制御が行われている。

空間領域の量子制御：

伝搬する電子では、波数ベクトルの経路積分や Aharonov-Bohm (AB) 位相などにより、空間的な位相が発展する。これらの位相は、通常、2 経路の干渉効果を与える。よく知られた AB リングは、その干渉を制御、検出するためのデバイスとされている。しかし、実際には、リング中を周回する様々な軌道が干渉に寄与し、干渉の位相を正確にすることは難し

い. これは、2 端子の干渉計に内在する「位相剛性」に因るもので、例えば、磁場の関数として測定されたコンダクタンスは磁場の偶関数でなければならない、という制約がある。このため、2 経路の位相差は磁場について滑らかに変わるにもかかわらず、測定された位相差は 0 か π の 2 値しか取りえない。この問題を解消するため、干渉計に様々な工夫がなされてきた。最近になって漸く、リング両端の電流端子を結合量子細線に置き換えることにより、正確に位相差を制御できるようになった。また、表面弾性波を利用して、電子を 1 個単位で伝搬させる技術が開発され、干渉計と組み合わせることにより、単一電子、さらには、単一量子もつれ電子対の位相を空間領域で正確に制御することも可能になっており、固体中の電子の量子制御の研究は急速に進展している。

本講演では、上記時間領域、空間領域の量子制御と計測に関わる話題として以下の項目に言及する。

1. 時間領域の量子コヒーレンスと量子情報
 1. 1 量子ドットの電子状態と量子ゲート
 1. 2 単一電荷、単一スピンの検出
 1. 3 量子ビットと量子もつれの操作と射影測定
 1. 4 多重ドットへの拡張
2. 環境とデコヒーレンス
 2. 1 電氣的雑音と磁氣的雑音
 2. 2 スピン緩和 (スピン軌道相互作用と超微細相互作用)
 2. 3 デコヒーレンスとフィードバック制御
 2. 4 非エルゴート領域での不均一デコヒーレンス時間の拡張
 2. 5 核スピン環境の除去
3. 空間領域の位相制御と計測
 3. 1 位相の時空間発展
 3. 2 2 経路干渉計による位相制御と検出
 3. 3 量子ドットのフリーデル総和則
 3. 4 近藤位相の実証実験
 3. 5 非局所量子もつれの生成と検証

これらの項目の主なものについて、最近、筆者らが寄稿した以下の記事があるので講義の資料として参照されたい。

[1] 樽茶、大岩、山本 「電気制御電子スピンを用いた量子情報システムの現状と将来展望」 固体物理 (特集号) 48 巻、11 号、557-573 (2013).

- [2] 山本, 高田, 樽茶 「固体量子情報の長距離移送と量子電子光学実験への挑戦」 日本物理学会誌、68 卷、5 号、 288-295 (2013).