

電子の「震え」現象と伝導度揺らぎ

ナノスケール物性研究部門 中村 壮智、勝本 信吾

1 はじめに

量子力学の講義で Zitterbewegung (ZB) というのが出てきて、戸惑われた経験のある方はいらっしゃるだろうか。ドイツ語で、「震え運動」のような意味を持つ（西島和彦「相対論的量子力学」では「ジグザグ運動」）。量子力学の創始者の一人、Schrödinger が理論的に見出した現象で[1]、Dirac 方程式に従う自由粒子の速度は良い量子数にはなり得ず、瞬時速度は光速 c または $-c$ で、この間を揺れ動きながら光速以下の平均速度で重心は進む。 c と $-c$ の状態の間に Higgs 機構により相互作用が発生し、質量を持った粒子と反粒子とが生じることを考えると、自然に理解されることではある。しかし、この世界の成り立ちを考えるうえで基本的な意味を持ち、実験にかかれれば面白かろうと思われるが、例えば真空中電子の ZB 周波数は、 2.5×10^{20} Hz となり、もちろん検出不能である。

何とか、物理的に ZB と等価な現象を検出できないか、ということで、いくつかの実験が試みられ、冷却原子気体を使ったものなど[2]、注目を集めてきた。固体中電子では、結晶のポテンシャルを上下する運動が ZB に相当するが、これも検出不能である。もっと弱い相互作用ということで考えられるのはスピン軌道相互作用(SOI)で、Rashba型 SOI のある 2次元電子系での ZB などが検出可能ではないかと期待されてきた[4]。Fig.1(a)は Rashba-SOI のある系で、進行方向と平行のスピンを持つ電子の ZB を模式的に示している。Rashba-SOI は運動量に垂直な有効磁場としてスピンに働き、このためスピンは歳差運動を起すすが、ZB は SOI を通した反作用で軌道が蛇行する効果として理解される。この ZB も、蛇行の曲率を大きくしようとすると周波数がミリ波程度に上がり、測定は容易ではない。また、スピン偏極のない電子系では、ZB も全くランダムな運動となり、これも困難要因となる。

本稿では、実験系の工夫により ZB を意外なほど大きな伝導度ゆらぎとして捉えた実験について紹介する[5]。

2 実験セットアップ

InAs の非対称量子井戸中 2次元電子系を Fig.1(b) のように加工した。この系は Rashba-SOI が強いことで知られており、実際、SdH 振動のビート構造から SOI 係数 $\alpha = 4 \times 10^{-11}$ eVm を得ている。グレー部分に 2次元電子系が残っており、1~8 と番号を付した電極のうち、3 と 7 以外の接触部分は、細くくびれていて量子ポイントコンタクト(QPC)と呼ばれる。Rashba-SOI を持つ系の QPC を通すと、電子スピンの高い偏極度で偏極することが我々の実験で確認されている[6]。また、この 2次元電子系の平均自由行程は約 $1 \mu\text{m}$ で、試料幅はその 2~3 倍であるから、試料を横切るときに電子は数回の不純物ポテンシャル散乱を経験する。この数回から十数回程度の準弾道的領域で実験することが重要で、試料が小さくて弾道的に近い場合、逆に拡散的伝導の場合のいずれも後述する伝導度揺らぎは小さくなってしまいます。

電子が進行方向に対して ZB を起こしていると、ZB によってポテンシャルに突入するときの偏り、いわゆる衝突

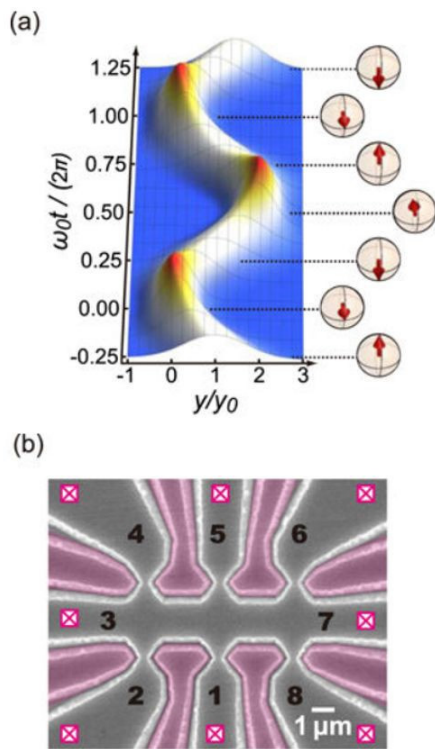


図1 (a) Rashba-SOI系でのZBで電子波束が蛇行する様子。右側にスピンをブロッホ球面に示した。(b)試料の電子顕微鏡写真。グレー部分がInAs2次元電子系。

パラメーターが変化するから散乱角はどう蛇行したかで大きく変化する。すなわち、蛇行をポテンシャル散乱により増幅できる。これを、やはり狭い入射角の電子が通過できる QPC で収集する伝導経路を設定することで、伝導に ZB に依存する大きな揺らぎが現れる。試料は希釈冷凍機で冷却し、簡単な機構によって 7T までの磁場中で向きを回転できるようにしている。

3 実験結果と議論

Fig.1(b) の試料で QPC1 と QPC5 との間の伝導度 G_{1-5} を 2 次元面に平行な磁場 B_y の関数として様々な温度で示したのが Fig.2(a)である。冷却に伴い、細かな非周期的振動が現れ、その平均振幅は温度低下とともに大きくなる。この振動（ゆらぎ）は、一見ランダムなノイズのように思われるが、そうではなく、2 回独立した磁場掃引を行って測定すると Fig.2(b)のように、非常に良く再現するパターンが現れる。

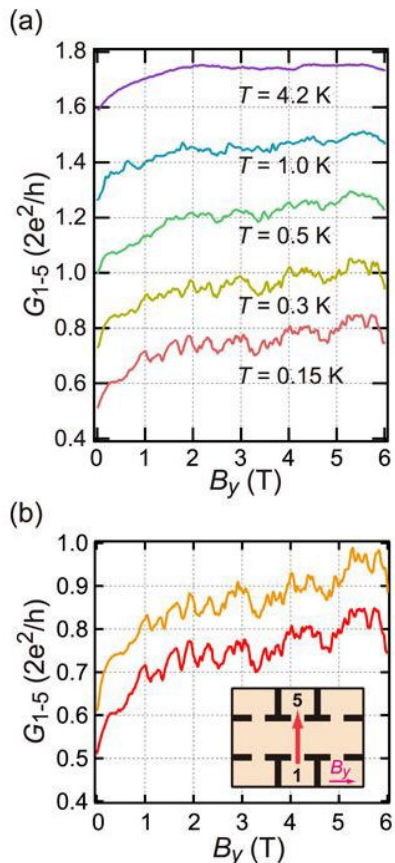


図 2 (a) QPC1 と 5 との間の電気伝導度 G_{1-5} を面内磁場 B_y の関数として測定した結果。縦軸の単位は量子化伝導度 $2e^2/h$ 。0.15K での結果から、0.2 ずつのオフセットを付けて示している。(b) 0.15K で、 G_{1-5} の磁場依存性を 2 回独立した測定をした結果。オフセットを付けて示している。

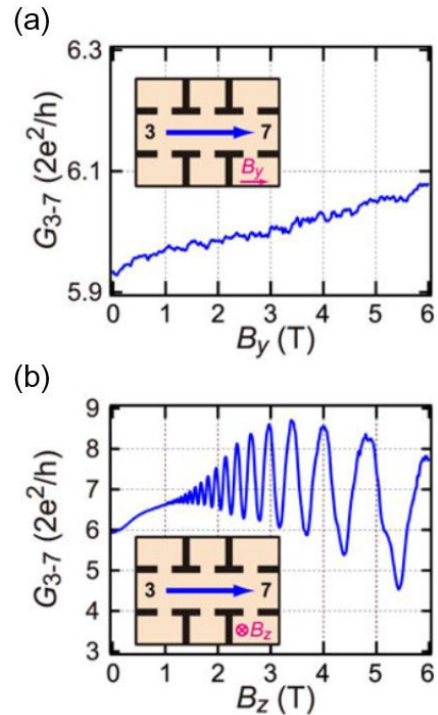


図 3 (a)QPC を介さない電極 3 と 7 の間の伝導度 G_{3-7} を面内磁場 B_y の関数として測定した結果。(b)(a)と同じ配置で 2 次元面に垂直な磁場の関数として測定した結果。

これは、メソスコピック伝導体にしばしば現れる普遍的伝導度ゆらぎ (universal conductance fluctuation, UCF) と共通する特徴である。が、もちろん、AB 位相の変化により量子干渉効果を通して現れる通常の UCF ではないことは、面内磁場であることから明らかである。更に決定的なのは、Fig.3 の測定で、QPC を通さない端子 3 と 7 の間の伝導測定では、全く同じ 2 次元電子ストリップ部分を測定しているにもかかわらず、面内磁場にはほとんど磁気伝導度がなく、面直磁場には SdH 振動が現れてしまった。すなわち、QPC 端子とそうでない端子との違い：1) スピン偏極電子の準弾道的伝導；2) 少数の伝導経路を選別的に測定していること、が明瞭な影響を生じるような現象でなくてはならず、通常の UCF でないことは明らかである。

「通常でない」UCF として、面内磁場である、というだけではスピン干渉による UCF を排除できない。すなわち、Rashba-SOI によって偏極電子スピンの決まった歳差運動をし、量子干渉しているという可能性である。が、これも、Fig.3 の実験ではほぼ否定される。更に、磁場を面内から面直に回しながらこのゆらぎのパターンを調べると、パターンは変化はするものの、フーリエ変換してみるとスペクトルがほとんど変わらない。スピンの量子干渉が

あるような伝導では、面直磁場が現れると通常の AB 位相による干渉パターンも入ってきて高い周波数成分がどんどん増えるはずであるから、実験結果は明らかにこれに反する。

残る可能性は、やはり ZB による衝突パラメータの変調である。面内磁場を加えると Rashba-SOI による有効磁場との合成ベクトルがスピン歳差運動に働き、蛇行運動が磁場で変調される。これが終点の QPC に飛び込む電子の数を変調してゆらぎが現れると考える。この考えは、これまで見てきた実験結果をすべて自然に説明できる。更に、面内磁場を面内で回転させながらゆらぎパターンを測定すると、Fig.4(a)のように、今度は明らかに振動の細かさが変化する。フーリエ変換したものを面内角 ϕ に対してカラープロットすると、Fig.4(b)のように周波数の上限値が $\cos\phi$ のように変化している。これは、ZB を仮定した半古典的な簡単なモデル計算と一致する。更に、強束縛近似を使い量子力学的なシミュレーションを行い、これまで見たすべての実験結果を定性的に再現し、ZB によって確かにこのようなゆらぎが生じることを確認できた。

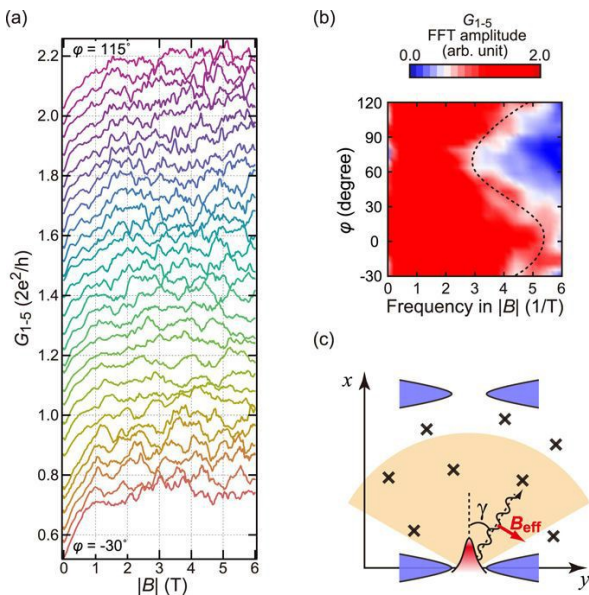


図 4 (a)磁場を 2 次元面内で回転させながら磁場に対するゆらぎを測定した結果。(b)(a)をフーリエ変換したものを y 軸からの角度 ϕ に対してカラープロットしたもの。(c)ZB によるゆらぎパターンの上限周波数を出すための半古典モデルを模式的に描いたもの。

4 結論

細くくびれた出入口を持つ Rashba-SOI の強い 2 次元伝導体では、電子の「震え」現象(ZB)が、これを要因とする伝導度ゆらぎという形で明瞭で大きな効果として現れることを確認できた。ZB を固体中電子でこれほど明瞭に捉えたのは著者らが知る限り初めてであり、UCF とは似て非なる伝導度ゆらぎ現象も新しい発見である。

本研究は、新学術領域研究ナノスピ変換科学—電氣的スピン変換の援助を受けて行われた。

参考文献

- [1] E. Schrödinger, Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Berl. Phys.-math. Kl. **24**, 418-428 (1930).
- [2] R. Gerritsma *et al.*, Nature **463**, 68-71 (2010).
- [3] W. Zawadzki and T. M. Rusin, J. Phys.: Condens. Matter **23**, 143201 (2011).
- [4] J. Schliemann, D. Loss and R. M. Westervelt, Phys. Rev. Lett. **94**, 206801 (2005).
- [5] Y. Iwasaki, Y. Hashimoto, T. Nakamura and S. Katsumoto, Sci. Report **7**, 7909 (2017).
- [6] S.-W. Kim, Y. Hashimoto, T. Nakamura and S. Katsumoto, Phys. Rev. B **94**, 125307 (2016).