

ナノスケール物性研究部門

勝本研究室

<https://kats.issp.u-tokyo.ac.jp/>



メンバー (平成31年6月現在)

教授	勝本 信吾
助教	遠藤 彰
助教	中村 壮智
技術専門職員	橋本 義昭
秘書	永山 順子
D2	鬼寄 誠
D1	清水 貴勢

研究分野

勝本研究室では、半導体・金属・超伝導体などの超格子や超薄膜、あるいはそれらに微細加工を施すことによって作製される、いわゆるメゾスコピック系を主な研究対象としている。量子トンネル現象、量子干渉効果、量子ホール効果、超伝導、スピントロニクス、スピン自由度が関係する現象など、電子系が低温において示す特徴的な量子現象を探索・追求している。

研究キーワード

半導体二次元電子系, 量子ホール効果, 分数量子ホール効果, 複合フェルミオン, 平面超格子, グラフェン, アンチドット系, 整合磁気抵抗振動効果, アハラノフ・ボーム効果, ファノ効果, 近藤効果, スピノール干渉, 希薄磁性半導体, 金属絶縁体転移, 巨大磁気抵抗効果, スピントロニクス, クーロンブロッケード, 単電子素子, 量子ドット, 量子ポイントコンタクト, 超伝導/強磁性体複合系, 微小ジョセフソン接合, 超伝導ネットワーク, マヨラナフェルミオン

卒業生の研究テーマ

博士論文

強磁性/超伝導微小接合系
Ⅲ-V族希薄磁性半導体の磁性と伝導
量子ドットのコヒーレント伝導
横結合型量子ドットにおける電子輸送現象
量子構造によるスピン偏極生成と検出

修士論文

メゾスコピック超伝導体における磁束状態
微小トンネル接合における
帯電効果とJosephson効果
微小トンネル接合におけるジョセフソン電流
希薄磁性半導体(Ga,Mn)Asの金属絶縁体転移
半導体量子ドットにおける電気伝導と
コヒーレンス
量子ホール効果におけるエッジ状態の単電子
トランジスタによる研究
量子ドット・Aharonov-Bohmリング複合系に
おける電子のコヒーレンス
希薄磁性半導体を用いた
スピン依存伝導の実験
Aharonov-Bohm リングにおける
電子のコヒーレンス
量子ドットの共鳴/反共鳴と近藤効果
2次元正孔系を用いたスピン依存伝導の実験

横結合型量子ドットにおける電気伝導特性
二次元正孔アンチドット系における電気伝導
微小Josephson接合系を用いた量子
コヒーレンスの実験
InAsドットと二重障壁ダイオードを含んだ
電気伝導
Josephson charge qubit を用いた量子
コヒーレンスの実験
(Ga,Mn)As微小系の磁化の振舞い
スピン軌道相互作用のある系における
量子ポイントコンタクトの電気伝導
量子ドットを用いた微小系の状態密度測定
超伝導体/半導体/超伝導体接合の電気伝導
InAs 2次元電子系へのスピン注入
超伝導接合へのスピン軌道相互作用の影響
量子構造によるスピン偏極生成と検出
超伝導体-二次元電子系接合の磁気伝導現象
量子ホールエッジ状態における非断熱変化

卒業生の進路

特許庁, マツダ, 三井住友銀行, 三菱電機, 東芝, 京セラ, 富士通, NEC, 野村證券, 富士ゼロックス, 理研, 日本銀行, 日本生命, アルバック, 簡保生命, 日立精機, KAIST, 日本総研, 東京エレクトロン, 他

試料作製関係

分子線エピタキシー装置 RIBER	(高移動度2次元電子系作製用)
分子線エピタキシー装置 Viotech	(希薄磁性半導体等 作製用)
真空蒸着装置	(金属薄膜作製用, 電極形成用など4台)
電子ビーム蒸着装置	(高融点金属蒸着用2台)
超高真空蒸着装置	(高純度アルミニウム薄膜作製用)
3元スパッタリング装置	(各種金属薄膜・多層膜作製用)
イオンビームスパッタリング装置	(各種金属薄膜作製用2台)
デュアルビームスパッタリング装置	(超伝導薄膜作製用)



微細加工・評価関係

高分解能電子ビーム描画装置 Elionix7700	(電子線リソグラフィ用)
電界放射型電子ビーム描画装置 JEOL6340F	(リソグラフィおよび観察用)
汎用電子ビーム描画装置 Elionix3300	(電子線リソグラフィ用)
フォトリソグラフィ設備(マスクアライナー等)	(リソグラフィ用)
走査プローブ顕微鏡 (AFM/STM/MFM/KFM)	(表面構造・磁化・電位等観察用)
レーザー顕微鏡	(表面凹凸・高分解能観察用)
イオンビームシャワー装置	(イオンミリング・反応性エッチング用)
ドライエッチング装置	(ドライエッチング用)
クリーンルーム・ドラフト・超純水製造装置等	



測定関係

低温・強磁場発生装置

トップローディング型 ^3He - ^4He 希釈冷凍機 + 15/17 T超伝導マグネット

可搬型 ^3He - ^4He 希釈冷凍機(4台)

無冷媒 ^3He - ^4He 希釈冷凍機(1台)

^3He 冷凍器(ガス操作系2台, 自作プローブ多数)

* その他各種の実験用のクライオスタットを自作し,
下記のマグネットと組み合わせて使用している。

15/17 T超伝導マグネット

8 T超伝導マグネット, 7 T超伝導マグネット

水冷式電磁石(4台)+回転テーブル(2台)

伝導測定関係

各種輸送現象測定システム多数

(電気伝導, ホール効果, トンネル効果, 電流電圧特性など
各種の測定を行っている。特にメゾスコピック系の研究では
微小信号検出技術の開発も行っている。)

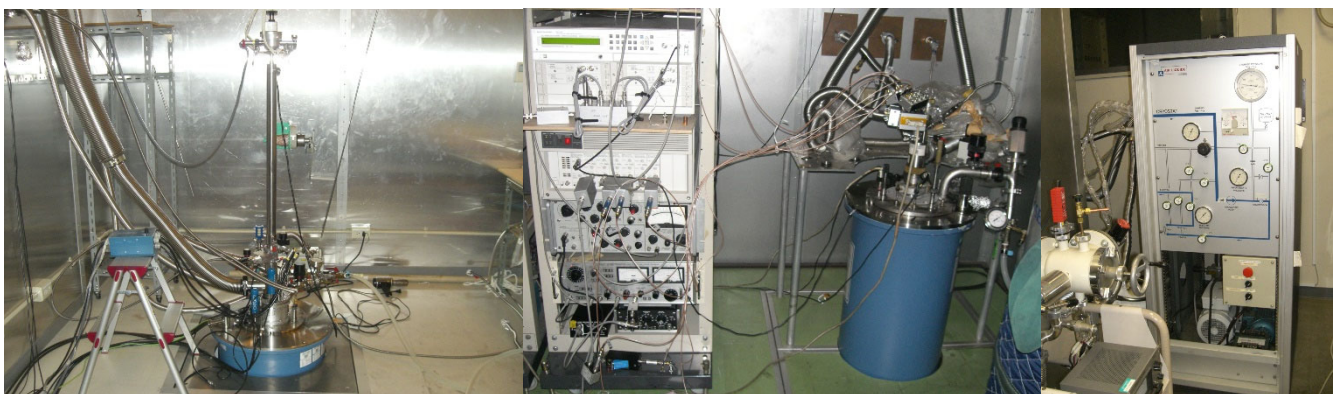
磁気測定関係

SQUID磁化測定装置(MPMS)

光学測定関係

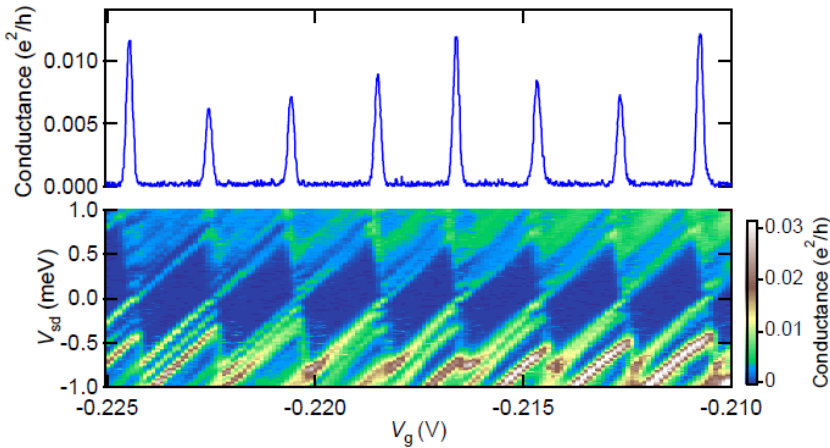
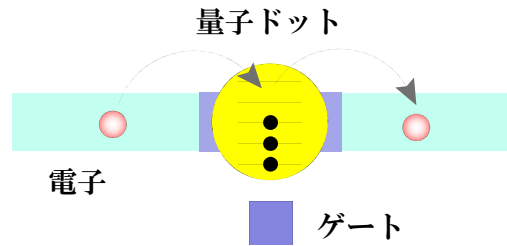
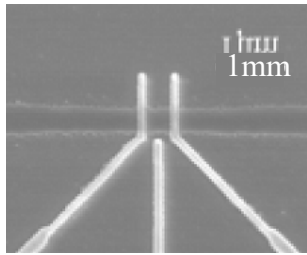
フォトルミネッセンス測定システム

光学測定用超伝導スプリットマグネット(7/8T)



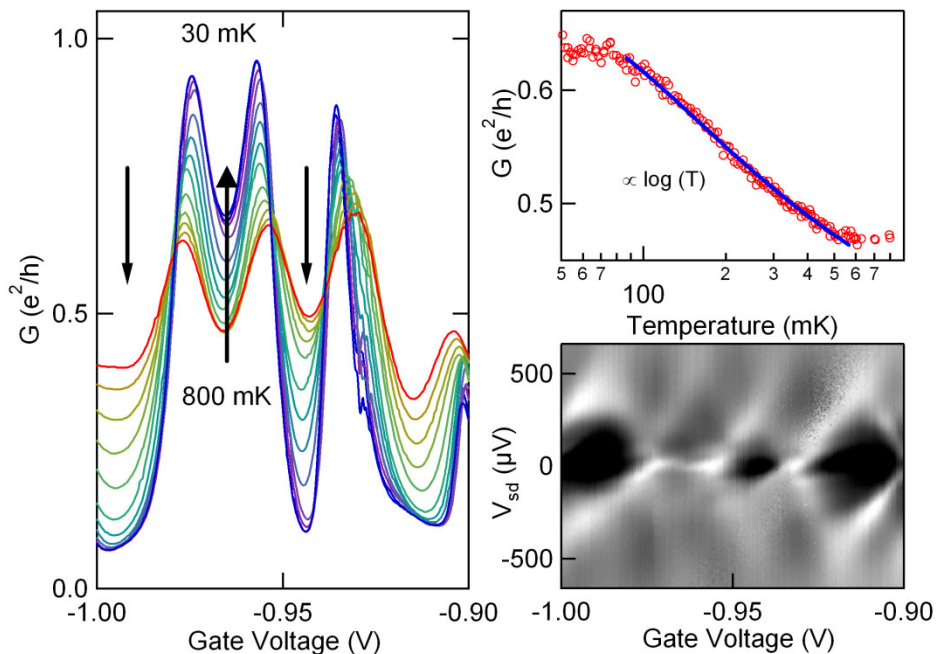
各装置についてはホームページにより詳しく載っています。

半導体量子ドットを使って電子を1個1個動かす



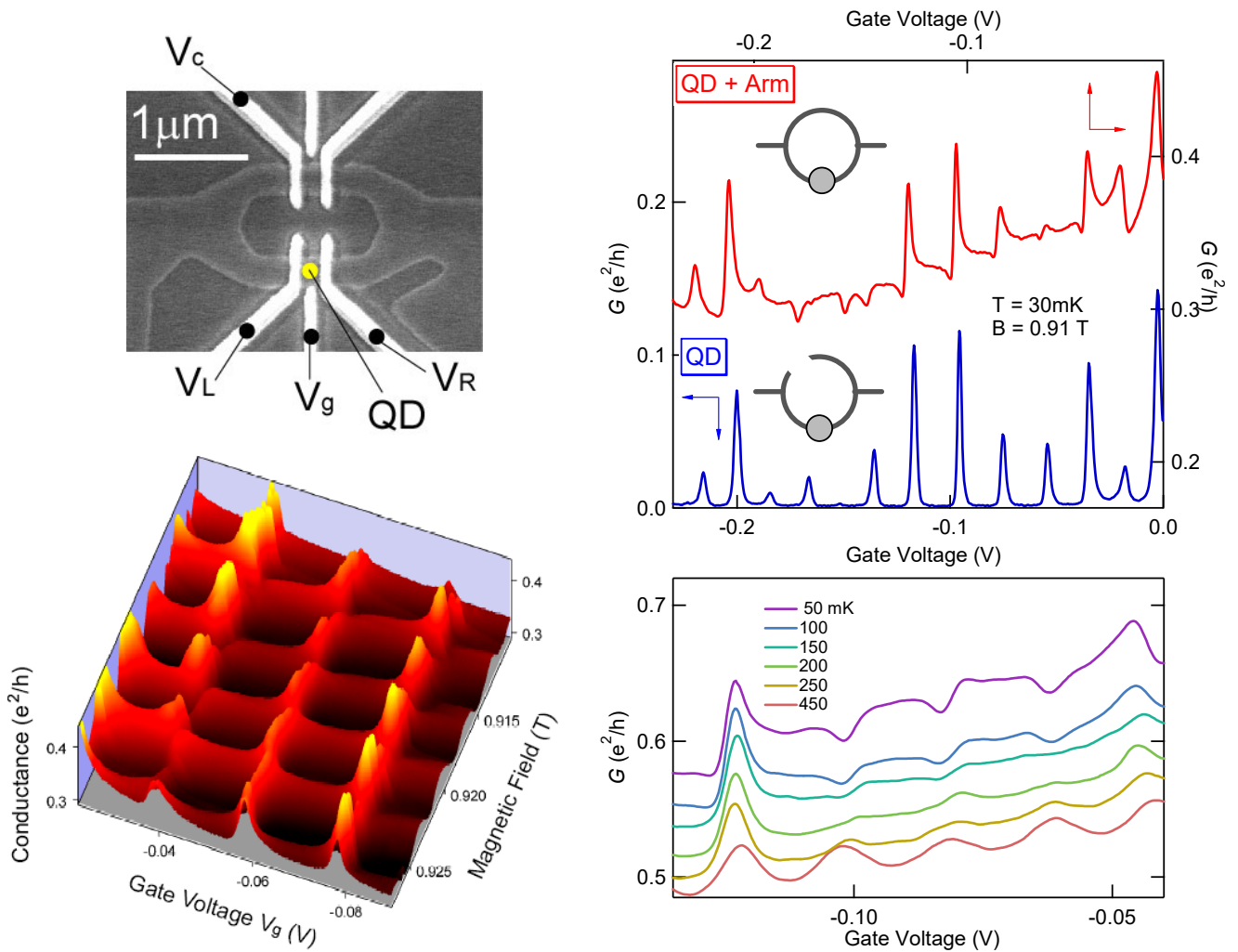
GaAs/AlGaAs二次元電子基板にリソグラフィ技術を用いると、電子をごく狭い領域に閉じ込めた構造—量子ドット—を実現できる。量子閉じ込めによってエネルギー準位は離散的となり、伝導は電子間の反発によってクーロン振動と呼ばれる周期的なピーク構造を示す。ピークをまたぐとドット中の電子数が1だけ変化する。

孤立電子スピンと「フェルミの海」の電子スピンとの多体効果：近藤効果

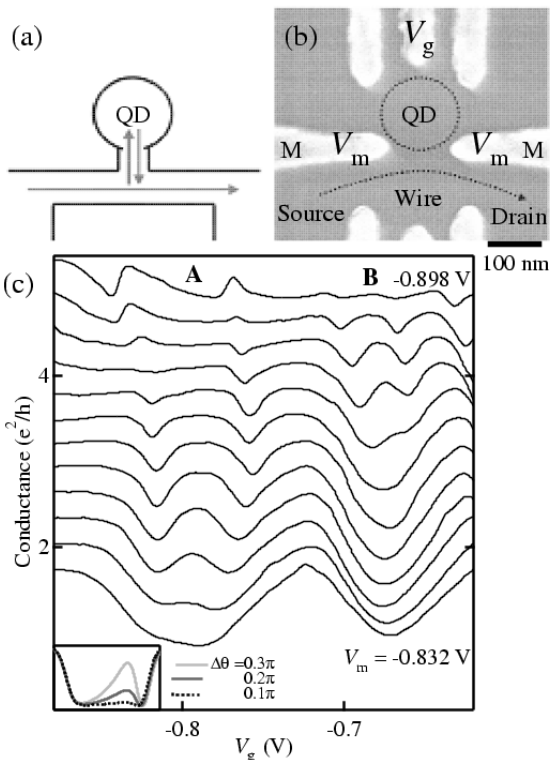


量子ドット内の電子スピンは電極内の「フェルミの海」を形成している電子のスピンと相互作用する。この時、近藤効果と呼ばれる量子多体効果によってクーロン振動のピークの間で伝導度が上昇する。

量子ドット・ABリング複合系におけるファノ効果



ファノ-近藤効果

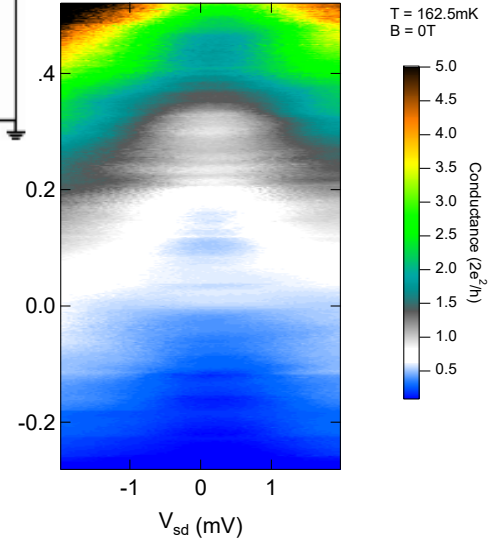
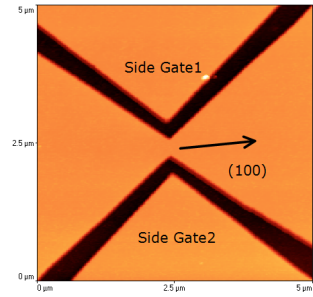
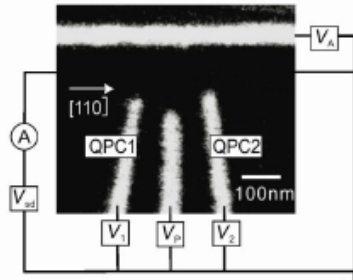
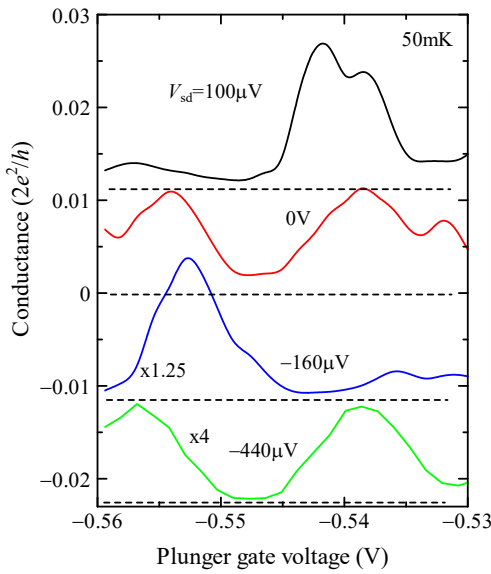


微小なリングの電気抵抗は、リングを貫く磁場に対して周期的に振動する。これはアハラノフ・ボーム (AB) 効果と呼ばれ、電子の波の位相が磁場により変調されることを意味する。リング中に量子ドットを配置した系の伝導では、クーロン振動ピークが非対称な形状をとるファノ効果が生じる。共鳴点で位相シフトが π 変化することを反映した現象である。

ファノ効果は、量子ドットと量子細線が一点で結合した構造にも現れる。

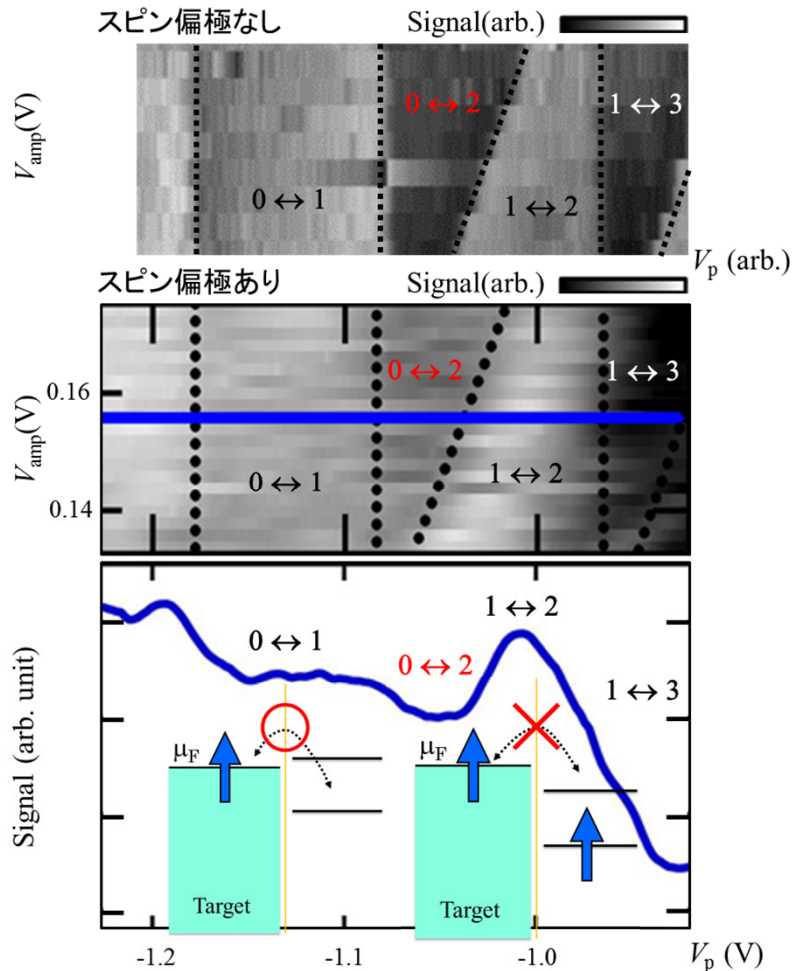
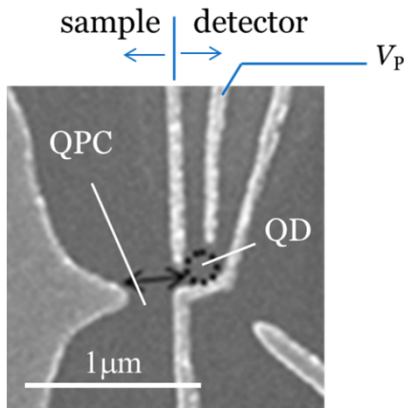
系の形状による共鳴と多体の共鳴とが同時に生じる現象がファノ近藤効果(左図)である。

InGaAs量子ポイントコンタクトを用いたスピン偏極



InGaAs 2次元電子系はスピン軌道相互作用が強く、閉じ込めポテンシャルと非平衡電流によってスピン偏極が生じることが指摘されていた。我々は量子ポイントコンタクトにスピン選択性があることを、量子ドット構造を用いて実証した。

スピン軌道相互作用によって創り出されるスピン偏極電流の検出

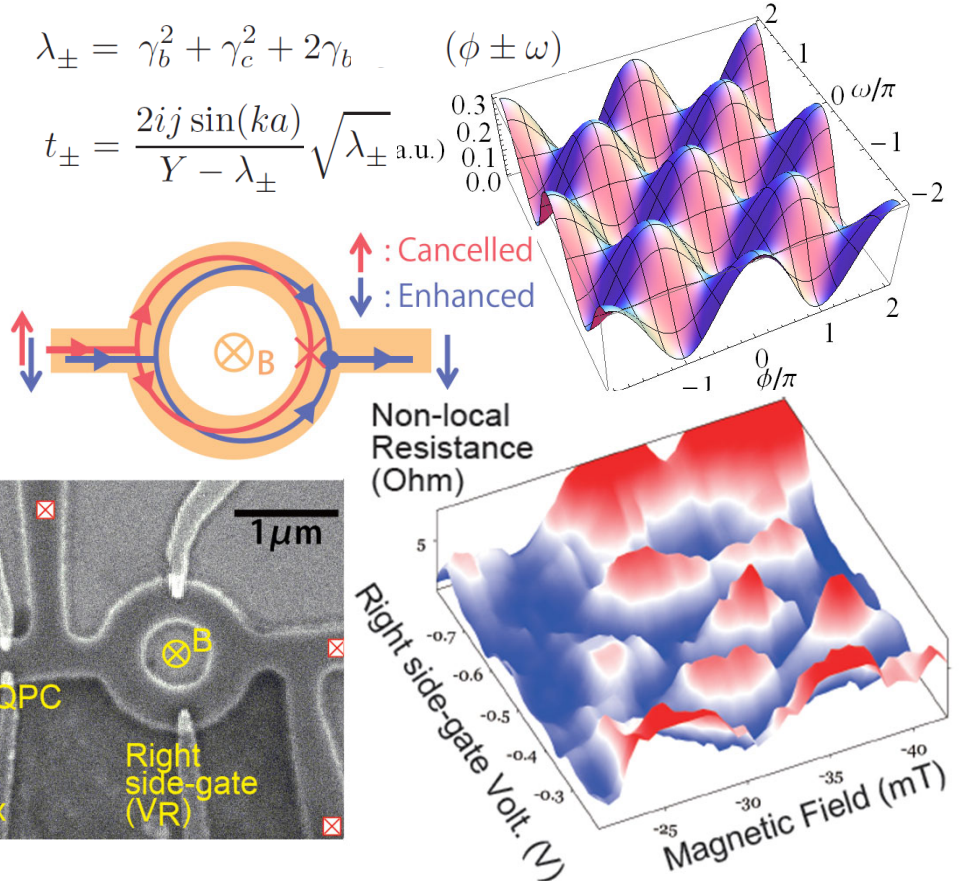


スピン軌道相互作用のある系の量子ポイントコンタクトは e^2/h の伝導度プラトーをもつ。我々はこの時の量子ポイントコンタクト近傍のスピン偏極率を側面結合型量子ドットを用いて直接測定した。この測定ではパウリの排他律によるスピントロッキング現象を利用した新しい手法を用いることで、一切の磁場や強磁性体を用いることなくスピン偏極やスピン緩和時間を測定することに成功し、さらに e^2/h の場合だけでなく $2e^2/h$ の場合でもスピン偏極が生じることを示した。

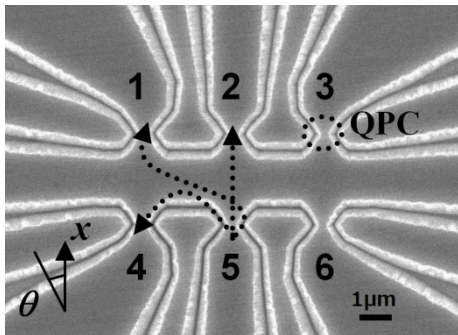
スピン軌道相互作用のある系のAB効果

スピン軌道相互作用によるスピン回転とアハロノフ-ボーム効果を組み合わせると、スピンも含めた波動関数の干渉を起こせる。これにより特定のスピンのみを残す干渉を引き起こすことで極めて高い効率のスピンフィルタリングが可能になる。

我々はこのようなスピン波動関数の干渉を量子ポイントコンタクトと組み合わせることで伝導度における特徴的なピーク構造として観測することに成功した。

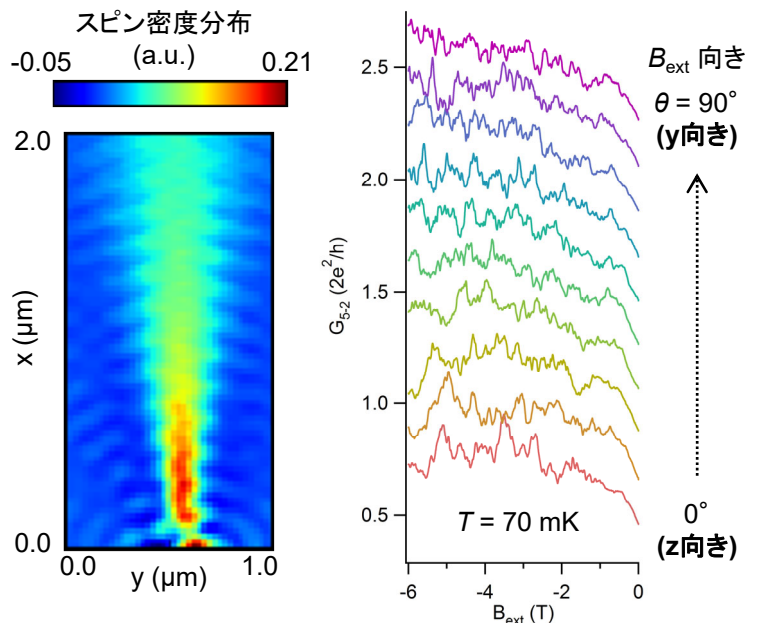


InAs 量子ポイントコンタクト系における Zitterbewegung の観測



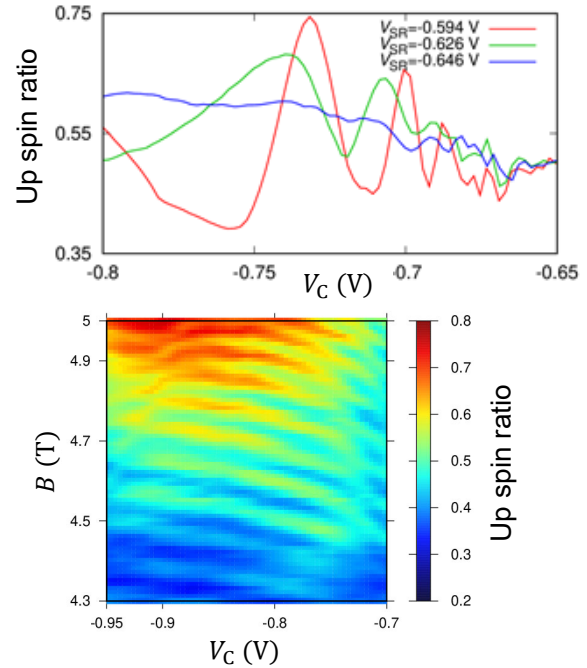
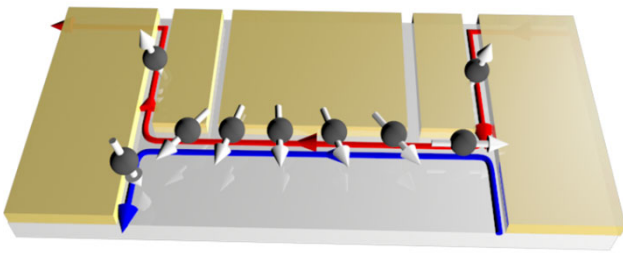
Zitterbewegung (ZB) は 1930 年に Schrödinger が命名した現象で、粒子と反粒子の干渉から生じる微振動を言う。粒子が力を受けずに加速度を持つかのように見える ZB は、量子力学の未解明問題の一つと考えられている。固体中の Rashba 型スピン軌道相互作用が強い系では ZB は電子の蛇行運動として発現し、実験で可観測だと言われている。

我々は InAs 二次元電子系の量子ポイントコンタクト系において、面内磁場に応答する伝導度ゆらぎを発見した。揺らぎの磁場角依存性やスピン偏極依存性を測定することで、この揺らぎが ZB の存在の証拠となる事を示した。さらに実験系の量子伝導をシミュレーション計算する事で電子の蛇行を可視化し、不純物の導入により実験結果を再現した。



量子ホールエッジチャンネルにおける電子スピン操作

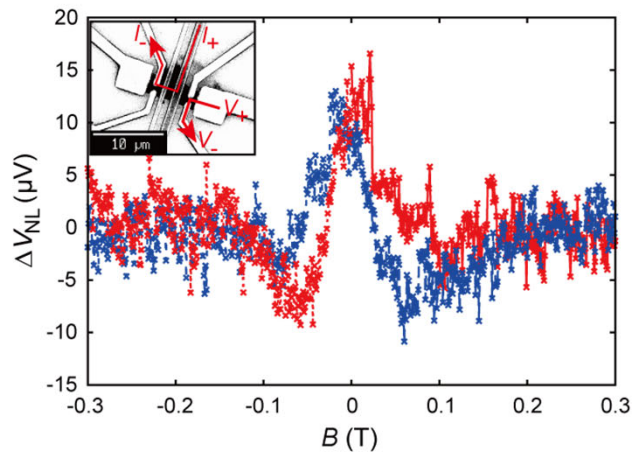
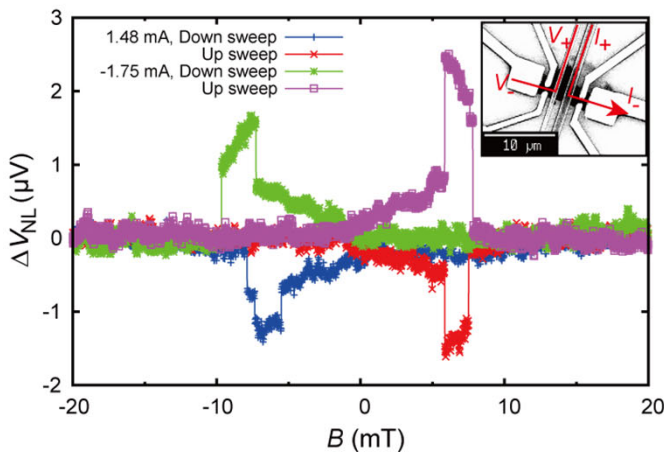
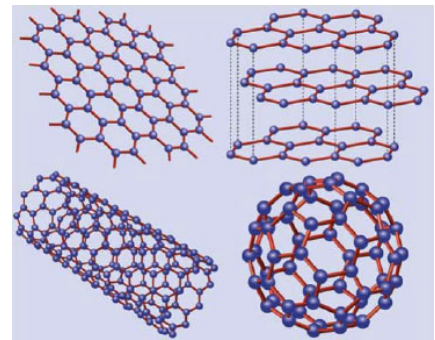
二次元電子系に垂直に高磁場を印加すると、量子ホール効果によって試料端にカイラリティを持った一次元のエッジチャンネルが生じ、ここを走る電子は高い量子コヒーレンスを持つ。近年、空間移動する量子ビット（飛行量子ビット）の候補としてこの電子のスピンの注目されているが、各エッジチャンネルは外部磁場と電子間相互作用のために完全スピン偏極しており、スピン操作は難しい。そこで我々は複数のエッジチャンネルを組み合わせ、その間の遷移確率をスピン軌道相互作用と軌道の非断熱変化を組み合わせることでコントロールし、エッジチャンネルの電子スピン操作を実現した。



水素化グラフェンスピントロニクス

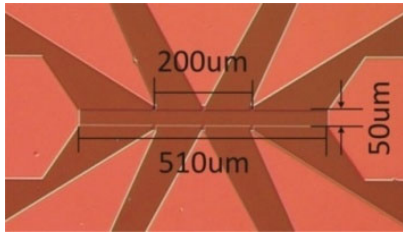
炭素は軽い原子であることなどからグラフェンのスピン軌道相互作用は極めて弱く、スピン生成や検出、制御が難しい。そこでグラフェンへの水素修飾によるスピン軌道相互作用の増大を検証し、軽元素のみでスピン生成・検出・操作を行えるスピントロニクスデバイスの開発を目指している。またスピン軌道相互作用の導入によるトポロジカル絶縁体の実現可能性についても検証を行っている。

我々は水素化グラフェンを用いた横型スピバルブ素子において逆スピンホール効果の観測に成功し、水素化によってスピン軌道相互作用が増大していることを明らかにした。

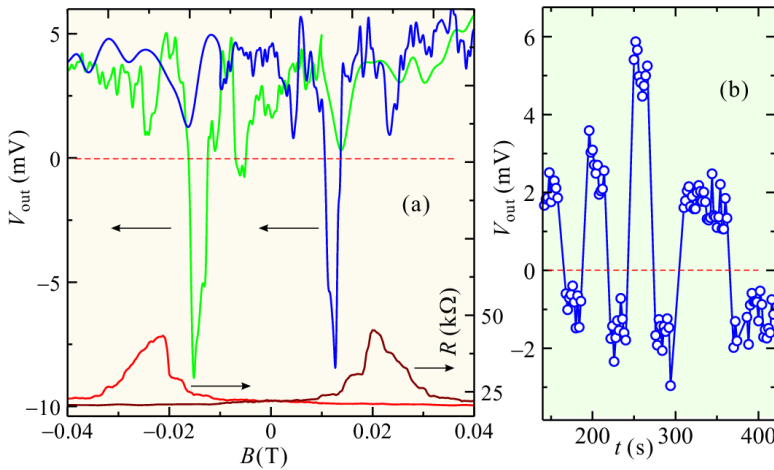


勝本研 研究内容紹介

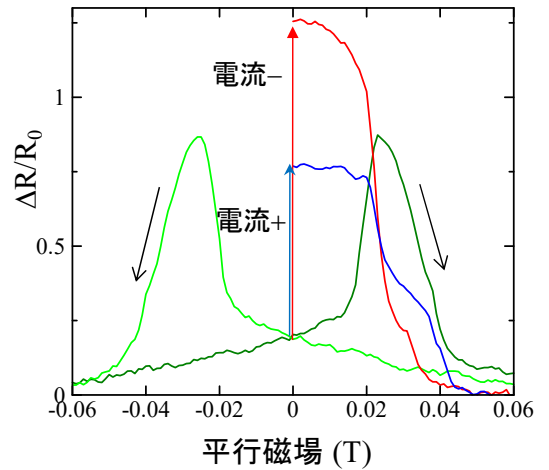
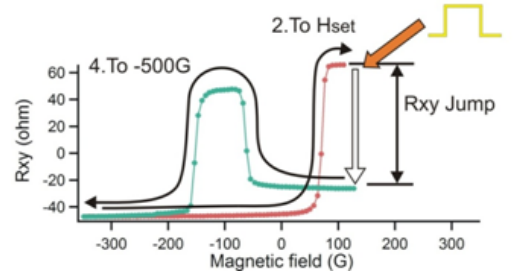
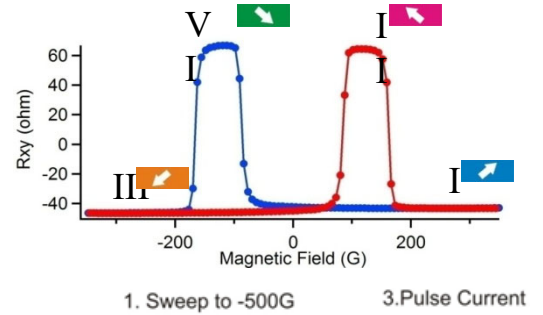
希薄磁性半導体 (Ga,Mn)As とその微細構造, 電流磁化反転



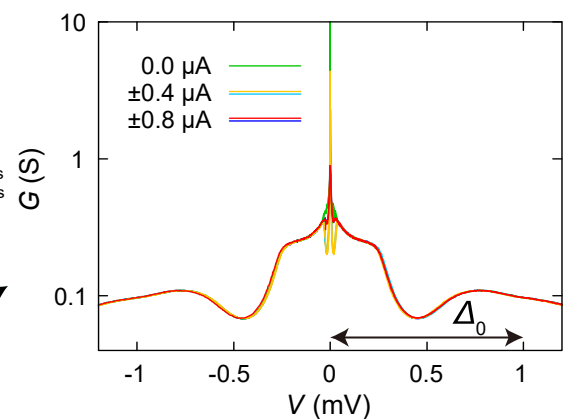
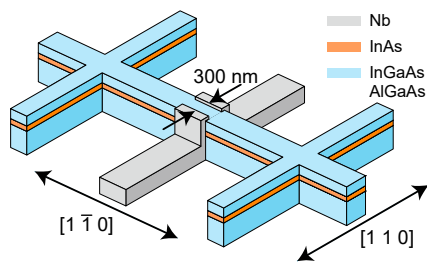
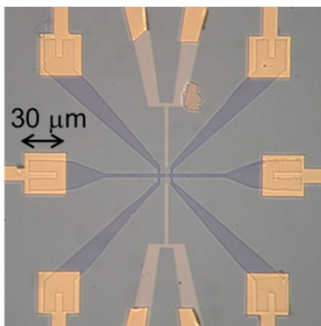
(Ga,Mn)As 15nm
GaAs 5nm
(Ga,Mn)As 5nm
GaAs 5nm
(Ga,Mn)As 30nm
GaAs



希薄磁性半導体(Ga,Mn)Asは分子線エピタキシーによる超構造の作製が可能で, 超薄膜や量子井戸, 量子ドット構造で磁化を電流や電場で操作できる。マイクロ波によるスピンプンプ実験も行っている。



超伝導/半導体接合特性の電流操作



超伝導体と金属の接合界面では電子がホールとして反射されるアンドレーエフ反射が起きる。金属を超伝導体で挟むことでアンドレーエフ反射が繰り返し生じることでアンドレーエフ束縛状態が生じ, これが超伝導電流を運ぶ。我々はこのアンドレーエフ反射や束縛状態を流れる超伝導電流をコントロールする研究を行っており, 半導体中のスピホール効果を用いることで微小電流で束縛状態をコントロールすることに成功している。

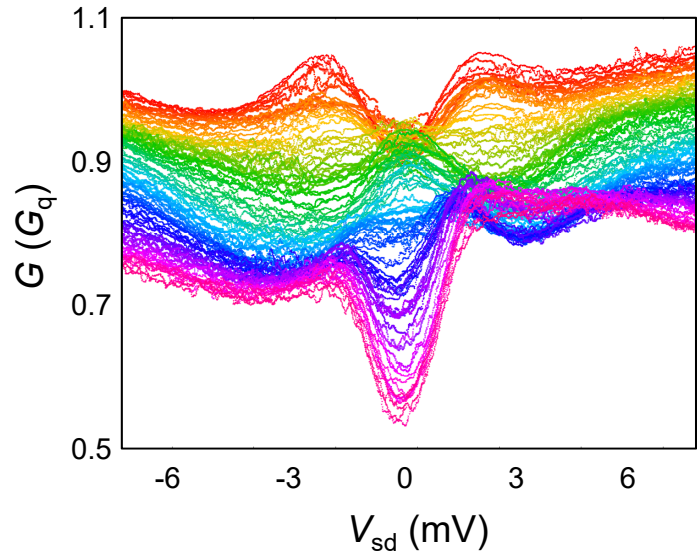
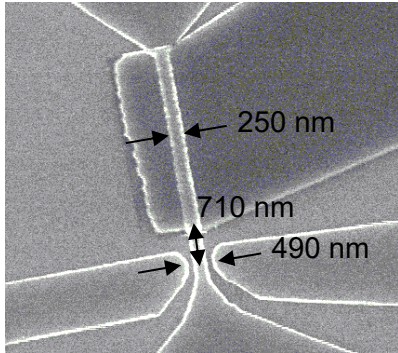
さらに近接効果で超伝導ギャップを半導体内に誘起し, スピン軌道相互作用によってクーパ対のスピンを変調する研究や, 強磁性半導体と超伝導の接合の研究を行っている。

勝本研 研究内容紹介

マヨラナ粒子の探索

スピン軌道相互作用の強い量子細線に近接効果によって超伝導オーダーパラメータを導入すると、磁場の印加によってトポロジカル転移がおき、マヨラナ粒子が生じる。マヨラナ粒子は非可換統計に従い量子計算の有力なツールになりうると考えられているが、検出が極めて困難であることから存在そのものが確立されていない。

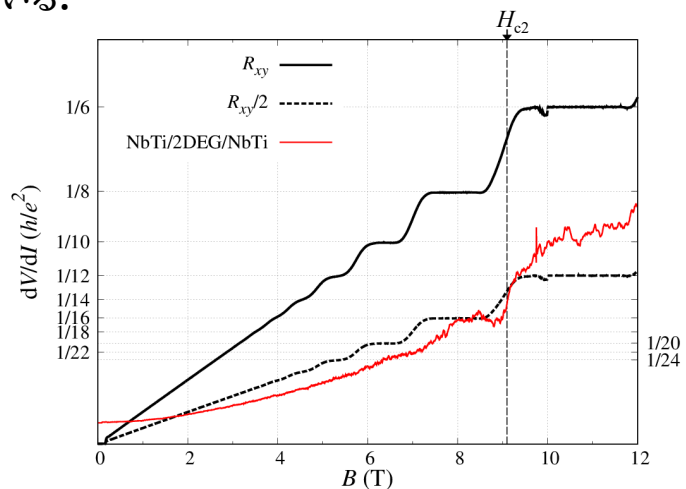
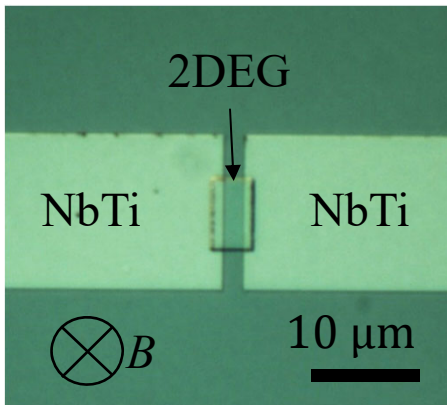
そこで我々はこのトポロジカル超伝導によって量子ポイントコンタクトの伝導度が特異なゲート依存性を示すという理論予想を基に、半導体/超伝導接合におけるマヨラナ粒子の探索を行っている。



量子ホール領域のアンドレーエフ反射

超伝導体/量子ホール絶縁体/超伝導体の接合では、通常の電子伝導チャネルに加え、アンドレーエフ反射機構によって正孔伝導チャネルが形成されるため、伝導度が2倍に上昇すると予想される。しかしながらこれまでの実験的な探索では、極低温で僅かな伝導度の上昇が観測されるに留まっている。

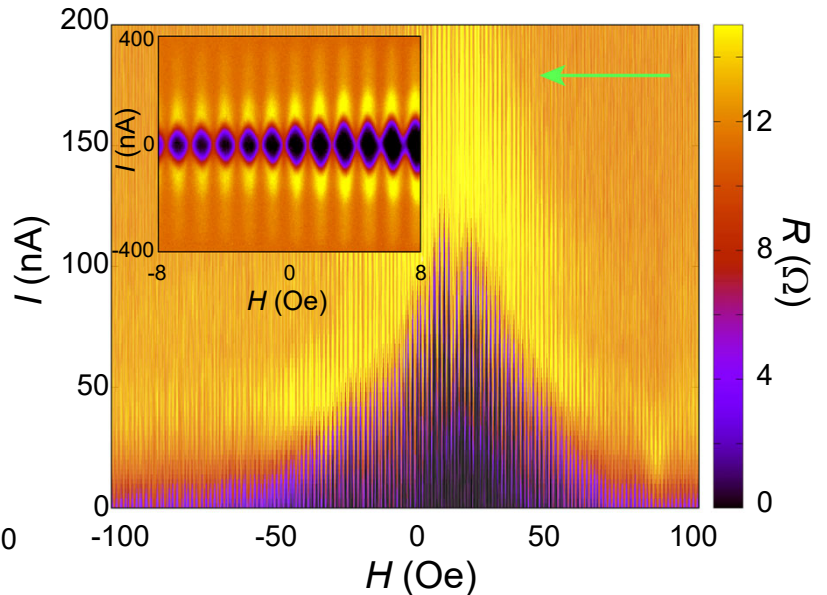
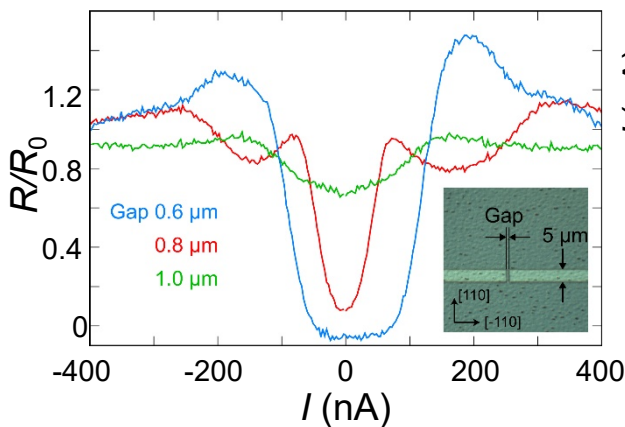
我々はInAs二次元電子系とNbTi電極を用いた超伝導接合において、伝導度が通常の量子ホール伝導度の2倍に上昇する現象を初めて観測することに成功した。現在はこれが正孔伝導チャネルを起源とすることを裏付けるために研究を進めている。



強磁性半導体と超伝導体の接合

強磁性半導体と超伝導体との接合はこれまで多くのグループによって研究されてきたが、これまで強磁性半導体中への近接効果の導入に成功した研究室はなかった。そこで我々は、東大工学系研究科の田中・大矢グループと共同し、強磁性半導体(In,Fe)Asへの近接効果の導入を試みた。その結果、世界で初めて有限の臨界電流を持つ超伝導体/強磁性半導体/超伝導体接合の実現に成功した。

この強磁性半導体中を流れる超伝導電流は通常のBCS超伝導のクーパー対とは違って、スピン三重項のクーパー対であり、超伝導スピントロニクスへの応用も期待される。



当研究室の研究内容に興味のある人，大学院生活について質問のある人は，遠慮なく訪ねてきてスタッフや院生から話を聞いて下さい。

勝本所員室

本館 A327号室

電話番号 04-7136-3305

助教・技術専門職員・院生居室

本館 A328号室

電話番号 04-7136-3306