

近藤状態によって散乱される電子波の位相のずれを初めて観測 ～40年前の予言を初めて実証～

1. 発表者： 樽茶 清悟 (東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 教授)
山本 倫久 (東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻 講師)

2. 発表のポイント：

- ◆近藤状態(注1)によって電子が散乱されると、その波動関数の位相が90度ずれると理論的に予測されており、その様子(近藤の位相シフト)を干渉実験によって初めて捉えました。
- ◆独自に開発した2経路干渉計(注2)を用いて精密かつ信頼性のある位相測定を実現したことが成功の鍵になりました。
- ◆本成果は「近藤の位相シフト」という物性物理学における40年来の問題に決着をつけたもので、固体の電子物性分野の歴史的業績の一つとして位置づけられます。

3. 発表概要：

1964年に近藤淳によって初めて理論提唱された近藤効果(注1)は、電子スピン(注3)が関与する多電子の相互作用効果の中で最も代表的なものとして知られています。近藤効果は、局在スピン(注3)とそれを取り囲む多数の伝導電子(注4)との間の相互作用によって生じ、局在スピンの磁気が伝導電子との結合によって打ち消される現象です。近藤状態(注1)の電気的な性質は、近藤状態に入射する電子がどう散乱されるかで説明されます。局在スピンの遮蔽されることから、散乱される電子のスピンは保たれます。しかし、局在スピンの遮蔽の痕跡が、散乱される電子の波動関数の位相の90度のずれとして現れることが約40年前に予言されました。これは近藤効果の最も重要な性質ですが、その検証は技術的に難しく、検証を試みた世界中の研究者の挑戦を跳ね返してきました。

東京大学大学院工学系研究科博士課程の高田真太郎大学院生(当時)、山本倫久講師、樽茶清悟教授らの研究グループは、独自に開発した2経路干渉計に量子ドット(注5)を埋め込んで、この位相の90度のずれを初めて実験的に確認しました。その結果の明瞭さと重要性から、本成果は固体の電子物性分野の歴史的業績のひとつに位置づけられます。

本研究の成功の鍵となった2経路干渉計は、電子の散乱位相を高精度で検出できるものです。今回、この干渉計の有用さが改めて実証されました。この干渉計を電子デバイスとして見ると、波動関数の位相を情報のリソースとして利用できることがわかります。将来的には、この干渉計の原理を用いた量子情報デバイスの開発も期待されます。

4. 発表内容：

1964年に近藤淳によって初めて理論提唱された近藤効果は、電子スピンが関与する多電子の相互作用効果の中で最も代表的なものとして知られており、歴史的に、その理解が電子関連の物理の解明に大きな役割を果たしてきました。その波及範囲は電子間相互作用によって電子が動きにくくなる重い電子系から素粒子物理まで幅広く、例えば高温超伝導体でも近藤効果が重要な役割を果たしていることが知られています。近藤効果は、局在スピンとその周囲の伝導電子との間の相互作用によって生じます。その本質は、局在スピンと多数の伝導電子との間に多

体のスピン一重項状態（近藤基底状態、注6）が形成されることにあり、その結果局在スピンの遮蔽されます。フェルミ流体理論に従えば、近藤基底状態によって散乱される電子はスピンを保ちますが、スピンの遮蔽の痕跡が波動関数の位相の90度のずれとして現れることが約40年前に予言されました。この位相の90度のずれは、近藤効果の最も重要な性質として世界中の研究者に知られています。

微細加工技術の進歩によって、奇数個の電子、すなわち電子スピン $\neq 0$ を持つ量子ドットを用いて、単一局在スピン（量子ドット中の電子スピン）のエネルギー準位や伝導電子との結合の強さを変えながら近藤効果を制御できるようになると、アハロノフボーム（Aharonov-Bohm: AB干渉計、注7）の中に量子ドットを埋め込み、位相の90度のずれを検証する試みが世界中で行われました。しかし、それらの試みは技術的な問題から成功には至りませんでした。むしろ理論予言と異なる結果が相次いで報告されるなどして、謎が一層深まる状況でした。AB干渉計を用いた位相測定の大変しさは、ABリングを周回する経路の寄与によって測定結果が乱されてしまうことにあります。周回経路の寄与を抑えるような設計を施すと、逆に干渉の可視度が低下するという問題から、精密かつ正確な測定は不可能とされていました。

東京大学大学院工学系研究科博士課程の高田真太郎大学院生（当時）、山本倫久講師、樽茶清悟教授らの研究グループは、独自に開発した2経路干渉計（図1）を用いて正確かつ精密な位相測定を実現し、近藤基底状態による散乱によって生じる位相シフトが、理論による予言に従って90度に固定されることを初めて明確に示しました（図2）。また、位相シフトの観測は、近藤共鳴準位の形を直接追跡（プローブ）することに対応しています。近藤共鳴準位には、近藤効果に寄与するほぼ全てのパラメーター（局在電子と伝導電子との間で形成される多体状態の安定度を示すエネルギースケールとして知られる近藤温度、量子ドット中の局在準位と熱浴との結合の強さ、近接軌道の偶奇性など）の情報が含まれています。研究グループは、位相の振る舞いを数値繰り込み群による理論計算と比較することにより、これらのパラメーターを高精度で得ることに成功しました。これは、通常の電気伝導実験では得られない結果です。特に、近藤温度は約10mK（10ミリ℃）の精度で決定することができました。精密で信頼性の高い結果を得た本研究は、近藤の位相シフトの問題に決着をつけました。

本研究では、独自に開発した干渉計を用いたことが成功への鍵となりました。この干渉計はABリングとトンネル結合細線から形成されており、ABリングにおける周回経路の寄与の有無を干渉の結果から判定できます。そして、周回軌道を抑えると2経路干渉計として動作し、位相情報を正確に出力できます。研究グループでは、2012年にこのような干渉計の開発を発表していましたが、本研究によってその干渉制御の精密さと有用性が証明されました。将来的には、この干渉計の位相制御の精密さを利用した量子情報デバイスの開発も期待されます。そのためには、干渉の可視度を更に高めることが必要です。

また、近藤効果に関連する未踏の重要問題として、近藤基底状態の空間的な広がりへの検証が挙げられます。その広がりへの大きさは、電子相関が強い物質中の基底状態を決定する重要なパラメーターです。2経路干渉計に量子ドットを埋め込んだ系は、干渉計の経路長が有限であることから、その検証にも適しています。位相測定による近藤状態の精密なプローブが可能になった今、この長年の課題も精密実験によって解決する準備ができたと言えます。

本研究は、理化学研究所創発物性科学研究センター、仏国立科学研究センターネール研究所（Institut Néel）のChristopher Bäuerle博士の研究チーム、独ルートヴィヒ・マクシミリアン大学（Ludwig-Maximilians University）のJan von Delft教授の研究チーム、独ルール大学ボーフム校（Ruhr-Universität Bochum）のAndreas D. Wieck教授の研究チームとの共同

研究で行われました。また、科学技術振興機構 さきがけ（領域名「素材・デバイス・システム融合による革新的ナノエレクトロニクスの創成」）（研究代表者：山本倫久）、文部科学省科学研究費補助金（新学術領域研究）「量子サイバネティクス」（領域代表者：独立行政法人理化学研究所基幹研究所 巨視的量子コヒーレンス研究チーム 蔡兆申 チームリーダー）、JST 国際科学技術共同研究推進事業（戦略的国際共同研究プログラム）「トポロジカルエレクトロニクス」などの研究の一環として行われました。

5. 発表雑誌：

雑誌名：「Physical Review Letters」（オンライン版：9月10日）

論文タイトル：Transmission Phase in the Kondo Regime Revealed in a Two-Path Interferometer

著者：Shintaro Takada, Christopher Bäuerle, Michihisa Yamamoto, Kenta Watanabe, Sylvain Hermelin, Tristan Meunier, Arne Alex, Andreas Weichselbaum, Jan von Delft, Arne Ludwig, Andreas Wieck, Seigo Tarucha*

6. 問い合わせ先：

樽茶 清悟(タルチャ セイゴ)

東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻 教授

〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

山本 倫久(ヤマモト ミチヒサ)

東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻 講師

〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

7. 用語解説：

(注1) 近藤状態・近藤効果

局在スピン（注3参照）とそれを取り囲む伝導電子（注4）との間の相互作用によって生じる、スピンの遮蔽された多電子の基底状態（最もエネルギーの低い状態）を近藤状態と呼ぶ（注6も参照）。また、これが生じることを近藤効果と呼ぶ。磁気不純物を持つ金属の電気抵抗が低温で上昇することに関して、その物理原理である近藤効果を近藤淳が初めて理論的に解明したことから、それが知られるようになった。

(注2) 2経路干渉計

ふたつの経路だけの寄与によって波の干渉が起こるようなシステム。電子系の場合には、電子が干渉計から出た後再び干渉計に戻るような経路があると、2経路干渉ではなくなってしまう。低磁場下で動作する固体中で集積可能な2経路干渉計は、当研究グループによって2012年に発表された（Nature Nanotechnology 7, 247-251 (2012)）。本研究でも同様の2経路干渉計が使用された。

(注3) 電子スピン、局在スピン

電子が電荷のほかに持つ、上向きと下向きに対応する磁石のような性質（磁気モーメント）のこと。

(注4) 伝導電子

物質中を動き回り、電気伝導の担い手となる電子のこと。

(注5) 量子ドット

電子を閉じ込める、ナノメートルサイズの微小な空間。量子力学で記述される離散的な電子状態を持ち、原子との類似性から人工原子とも呼ばれる。半導体中ではゲート電圧を用いて電氣的に形成することが可能であり、電子数を1個単位で制御できる。奇数個の電子を閉じ込めた量子ドットは局在スピンを持つ。

(注6) スピン一重項状態

二つの電子が互いに逆向きのスピンを持ち、磁気モーメントが打ち消された状態。近藤状態では、局在スピンと伝導電子のうちのひとつとの間でスピン一重項が形成されるが、近傍にある多くの伝導電子が同様にスピン一重項を形成できるので、それらの状態の重ね合わせが基底状態となる。

(注7) アハラノフボーム干渉計（AB干渉計）

リング（ABリング）に2つ以上の端子を接続した干渉計。一方の端子から入力した電子が別の端子に到達する際に取り上下ふたつの経路の位相差が磁場に依存することから、電気抵抗が磁場の関数として振動する。これをアハラノフボーム振動（AB振動）と呼ぶ。

8. 添付資料：

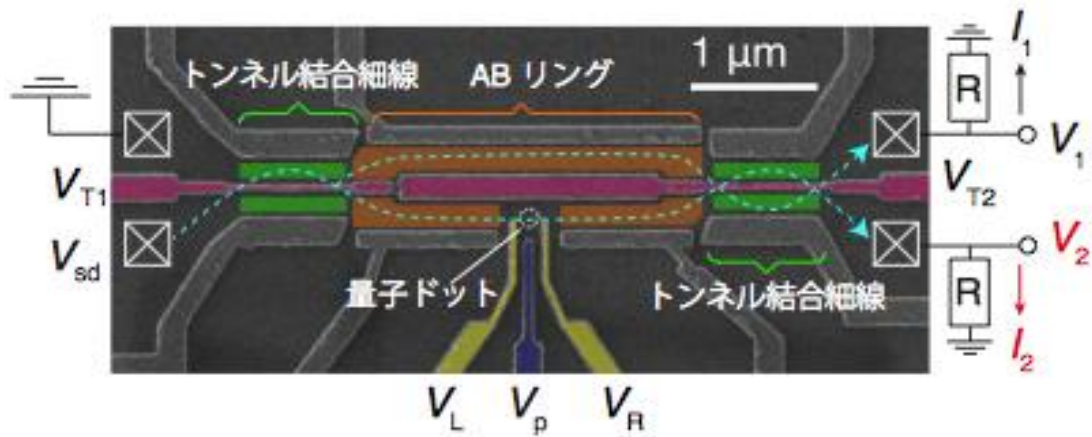


図1：本研究で用い2経路干渉計の試料の電子顕微鏡写真と測定模式図。干渉計の中に量子ドットが埋め込まれていて、ゲート電圧によって近藤状態に調整できる。ABリングにおける上下の経路の位相差に応じて出力電流 I_1 、 I_2 が逆位相で振動する様子から、量子ドットを通過する電子が獲得する位相を測定した。

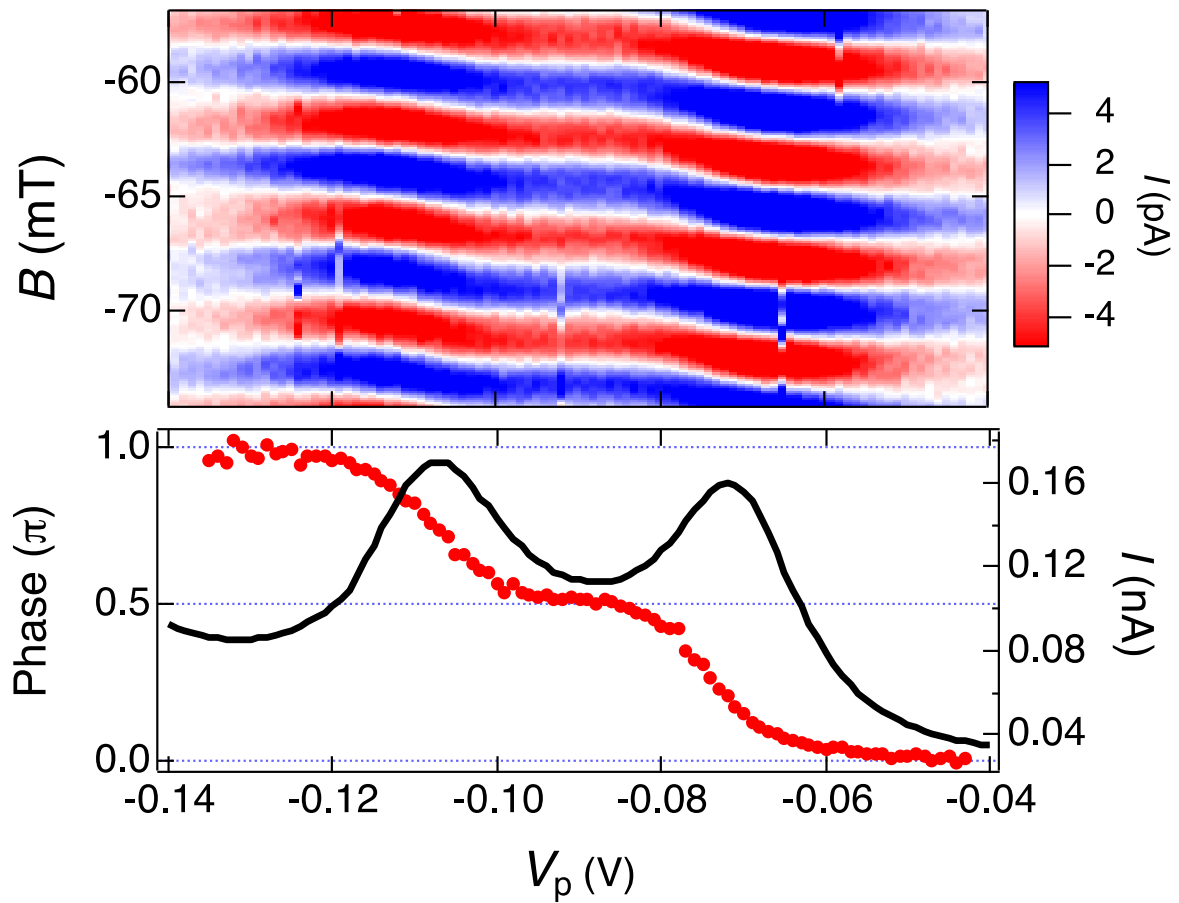


図2：近藤状態にある量子ドットを通過する電子が獲得する位相の測定結果。上図は、AB振動（磁場の関数として振動する電流成分）を量子ドットの準位を変調するゲート電圧 V_g をパラメータとして示したもの。下図は、上図の結果をもとに位相変化を V_g の関数として抽出したもの（赤線）。黒線は量子ドットを流れる電流値を示していて、ふたつのピークは量子ドット内の局在準位に対応する。これらのピークの間 V_g では近藤状態が形成され、そこでは位相変化が90度に固定される。