

No.2
2016/06

ハイブリッド量子ニュース

新学術領域ハイブリッド量子科学 ニュースレター

Scientific Research on Innovative Areas
Science of Hybrid Quantum Systems
Newsletter

HQ Interview

実験から見てきた「第二次量子革命」

理化学研究所 石橋幸治 × NTT物性科学基礎研究所 山口浩司 × 東京大学 平川一彦

About HQ Project

新規公募採択研究について

Research Highlights

- ☐ 分子吸着によるカーボンナノチューブのフォノンの変調
- ☐ 量子ドットとメカニカル振動子のハイブリッド素子による
高感度変位検出と振動増幅

Hot Topics

- ☐ 国際共同研究加速基金「ハイブリッド量子科学の進展に向けた国際活動強化支援」
- ☐ ニューサウスウェールズ大学での「正孔と核スピンの相互作用」に関する共同研究
- ☐ 量子ドットを用いたスピンと光子の相互変換を目指して
- ☐ 第2回領域会議概要

Science of Hybrid
Quantum Systems





山口 浩司

フォノングループ研究代表者
NTT物性科学基礎研究所

平川 一彦

フォトングループ研究代表者
東京大学生産技術研究所

石橋 幸治

スピン・電荷グループ研究代表者
理化学研究所 石橋極微デバイス工学研究室

実験から見えてきた 「第二次量子革命」

1900年に初めて「量子」が提唱されてから1世紀あまり。21世紀初頭ごろからは特に量子情報の分野での実証実験が急速に発展し、実験室では、あれほど難しいといわれた量子のふるまいが、徐々にコントロールできるようになってきました。そして古典的なシステムのなかで部分的に量子的な現象を使う、半導体量子効果デバイスのような技術から、システム全体が量子的に働くようなシステムへ、いま新たなステージが拓かれつつあります。この潮流を「第二次量子革命」といい、物理の探究だけでなく量子制御技術の高度な発展、革新的な精度を持つ計測への応用など、さまざまなイノベーションが期待されています。新学術領域研究「ハイブリッド量子」第二回のインタビューは、実験を担う3つの研究班の代表者にお話を聞きました。



エレクトロニクスは量子でどう変わるのでしょうか？

石橋（電荷・スピン班）：私の専門であるナノデバイス工学の分野で、量子を使って新しいデバイスを作ろうという流れが始まったのは、江崎玲於奈先生が1969年に発表された「半導体超格子」が最初でした。これは電子を閉じ込めることでエネルギーがとびとびになるという、量子力学に基づく現象を使ったもので、1980年代になると、江崎先生のアイデアを使った実験が盛んになりました。

ただ今から見ると、このデバイスは、量子力学のごく限られた部分を使ったものなんですね。教科書に書いてある量子的な体系は、「波であり粒子である」という原理に基づく非常に奥が深いものだし、量子の振る舞いには、アインシュタインが「spooky（幽霊のような）」と言ったような実に不思議なさまざまな現象があります。僕らはこのような量子の性質をもっとダイナミックに使いたい……しかし、そのような量子の性質がどうしたらデバイスに活かせるのか、当時は誰にもわかりませんでした。それで実は、ずーっと悩んでいたんです（笑）。



転換期は1995年頃だったと思います。僕は海外からの研究員を通じて、量子ビット（キュービット）がヨーロッパで盛り上がりを見せているという話を聞き、「量子力学の教科書そのものだ！」と気づきました。それは、量子的な状態を保つ「コヒーレンス状態」を使ったデバイスであり、江崎先生が提案された「量子デバイス」よりもっと”量子”を利用していたので、デバイス・エンジニアとしては、ぜひともこれを作りたいと思ったのです。たとえば、電子は、 10^{-19} 乗クーロンという量の電荷チャージを持って

います。電荷はスピンのようにくるくる回っていて、上向き・下向きという2つの状態があります……。

山口（フォノン班）：そうですね。「量子デバイス」と言っていた頃は、スピンといっても、まずはないものと考えておいて、2つの状態があることをあとから考慮するために2倍しておくぐらいの役割しかありませんでした。本当は、2つのスピンの状態は区別して測定することができるはずなのですが、上向きのスピンの下へ向いたりということがものすごく頻繁に起きて、明確に2つの状態を区別することはできませんでした。ですから、当時はそういったところは捨てて、全体として2倍の状態数があると考えました。今は1つの向きにしばらく留めておくといった制御ができるので、われわれはそのような状態をはっきりと区別することができるようになっていきます。



フォノンとはどんな研究分野なのでしょう？

山口：机の片端をコン、と叩くと、その振動がもう一方の端まで伝わっていきます。量子力学に従えば、このような固体中の弾性波にも、その最小単位があるはずです。光の最小単位が光子（光子）であるのと同じように、弾性波の振動にも単位があり、これはフォノン（音子）と呼ばれています。これを制御しようというのが、フォノン班の研究の発端です。以前はまったく注目されていなかったのですが、最近技術が進んで、その1粒1粒が見られるかもしれないという状況になってきました。欧米で大きな予算がついたり、日本でも大きなプロジェクトが立ち上がる動きがあったりと、今たいへん活発な研究分野です。

このような流れの中で、われわれは非常に小さな橋桁や太鼓の振動膜のような構造を作って、その中にフォノンを閉じ込め、量子的な振る舞いを見るという実験を進めています。フォノンを閉じ込めるというのは、たとえばお寺の鐘のような形状を作ると、これをコンとたたいても、振動がぐるぐると鐘の中を回って外へ出ていきません。結果として、鐘はしばらくの間振動を続けることになります。似たような構造を電子顕微鏡でも見えない



ような小さいサイズで作ると、やはりある程度の時間、微小な振動を閉じ込めておくことができます。このような状態で時間をかけて振動の詳細な振る舞いを見てやると、フォノンの粒々が見えてくるはずです。この「いかにフォノンを見る——あるいは“聴く”——か」というところに、実はハイブリッドの必要性があるんです。

フォトン1個1個を捉えるにはフォトンカウンター（光子検出器）がありますが、フォノン1個を見つけるのは非常に難しく、むしろフォノンの情報を電子やスピンの移してやるのが有効です。このような「トランスデューサー（変換器）」として、われわれはハイブリッド素子を使おうとしています。実は音を聴くには、昔からトランスデューサーが使われてきたんですね。たとえばマイクロフォンは、空気の振動を電気に変えたものですし、昔使われていたレコードも、レコード針が検出した振動を電気に変えていたのです。

石橋：実際に人間が音を聴くときには、人間のセンサーである耳の中にある鼓膜が振動をキャッチしているわけですね。いずれにしても何かへ移さなければいけない、そこにトランスデューサーが必要です——フォノンの場合も最終的にはやはり電気ではないでしょうか？

山口：ええ、そうですね。電気とそれから光も用いられています。それから音を聴くのと、フォノンを聴く（測る）の違いですが、量子を使うと非常に小さな振動が測れるため、これまでとは桁違いの感度を持つセンサーなども作れるんですね。時計や携帯電話等の中にも入っている、振動の持つ歪みを電気に変える「圧電素子」と呼ばれる検出器も、量子によって非常に微弱なものが検出できるようになります。今年話題になった重力波検出も——こちらは逆に非常に大きな装置で検出しますが——揺れるものを検出するという意味では、とても近いものなんですね。ここでも量子を使ってより高感度の測定を行おうという試みが進められているのです。



光にはどんなハイブリッドが期待できますか？

平川（フォトン班）：光(電磁波)は、電子、スピンやフォノンを制御するとともに、さらにそこにある情報を読み出して別のところへ伝送するという役目を持っています。制御がうまくいくためには、ナノ構造に閉じ込めてある制御の対象が、光以外のものによって乱されないようにしなければなりません。できるだけ系を乱さず、電子やスピンと電磁波が相互作用できるようになることが重要ですから、電子を閉じ込めるナノ構造の研究に取り組んでいます。

また、われわれのフォトン班は、グループ内がすでにハイブリッドであるという点に特徴があります。フォトン班の中にはいろいろな研究者がいます。私は波長の長いテラヘルツ電磁波を用いて、微小なエネルギーの電子励起を起こす研究を行っています。一方、可視光や近赤外の波長の光を研究している人もいて、そのような光で電子を励起したり、スピンを回転させたり……というように、光は量子制御のツールという役割があるんですね。制御したい対象がいろいろあれば、それぞれの対象が持っているエネルギー差にぴったり合った波長の光を使わないと制御ができません。グループとして、いろいろな波長をカバーできればと考えています。

様々な光の波長帯の中では、可視光付近の技術が最も成熟しています。一方、これから技術をビルドアップしていかなければならないのがテラヘルツ光です。テラヘルツ光は、光の持つ粒子の性質と電波の持つ波の性質のちょうど中間にあたり、半導体や金属中で起こる現象のうち多くのものが、テラヘルツの周波数で起きることが知られています。この研究が進めばいろいろな固体物理や量子技術の研究が可能になります。最近やっとテラヘルツ電磁波の発生や検出といったコントロールができるようになってきました。



グループ間はどうにつながっていますか？

石橋：粒であり波であるというのが私たちは好きなんだけれども（笑）、周波数で見えていくと、エレクトロニクスの分野では、トランジスタが直流から始まってだんだん速く

なっていき、今の携帯電話などはギガですね。このもう一方の極にX線のような高い周波数がある。この中間というのが絶対あるはずなんです。エレクトロニクスが周波数を上げるのか、光の周波数を落とすのか、融合していかなければいけない領域ですね。その意味でテラヘルツ光は面白くて、電子はもちろん、分子もいいターゲットになると思います。

平川：光を使って電子やスピンを制御しようというときに、多くの場合、制御対象に比べて光の拡がりや圧倒的に大きいんですね。たとえば見たいものが数ナノメートルの大きさなのに、光の波長は数百ナノメートルから数百ミクロンであるといったことが多いわけです。それを制御したいもの、見たいものにぎゅっと集めるために、新学術では、材料のハイブリッド性を使ったいろんな操作が試せるのではないかと考えています。たとえば半導体と金属という性質の違うものを組み合わせて、長い波長の光をナノメートルまでぎゅっと絞る……といったことを考えています。

石橋：これまでは量子といっても半分量子、半分古典であって、電子や原子は量子として扱い、光は古典的に扱えば済んでいた——ところが今や光も粒になり、どちらも量子で扱う世界になってきたんですね。電子、スピン、フォノン、フォトンがどれも量子として、最大限活躍できる場をつくりたいと考えると、材料のハイブリッドは大切です。僕の研究室でも、なるべく今までの材料にこだわらず、小さいものを作りたいということで、たとえばカーボンナノチューブを使ってみるといったことにも取り組んでいますね。



新学術ならではの一步先のビジョンをお聞かせ下さい



平川：私はハイブリッド量子で、今まで見えなかったものが見えるようになるといったような超高感度の検出をやりたいですね。たとえばビッグバン解明の手掛かりでもある宇宙から飛んでくる黒体輻射は、テラヘルツの領域にあるんですね。現在では、テラヘルツのフォトン数を数えるというデバイスも出来つつあって、それを使うと、可視光にたとえると120億光年先にある銀河の微弱な光を見るといった感度の測定が可能になりつつあります。観測にはまだ使われていないんですけれどもそれくらいの感度があるものができる可能性があります。宇宙にある光の90%ぐらいがテラヘルツ光だと言われていて、これが検出できると、見える世界が大きく変わりますよね。

山口：「シュレディンガーの猫」で知られる量子に特徴的な「重ね合わせ」という状態がありますが、さきほど少し触れたフォノン班の「橋桁のような構造」でも、猫が生きている／死んでいる状態に対応するものを作ろうという話があります。板のような形状の両端を持って力を加えると、一般に真ん中あたりで座屈が起こりますが、それが上側に起こる／下側に起こる重ね合わせ状態を作ろうというわけです。猫ほどは大きくありませんが、電子ほど小さくないスケールでも、やはり起こるという、いわゆる「巨視的な量子」の世界が見られるのではないかと考えています。またその時に重ね合わせ状態を観測すると上／下いずれかの状態になるのですが、もし強く観測したら、弱く観測したら、あるいは中途半端に観測したらどうだろうか？——となると、どんどん本質的な問題へ入っていき、理論も実験も発展します。これまでずっと古典力学で技術を作ってきた立場からすると、「重ね合わせを本当に自由自在に操れる！」というのはまさに革命と言えるほど、技術的な飛躍が大きいんですね。ハイブリッド量子の世界での重ね合わせとは、例えば光半分、フォノン半分とか、スピンとフォトンが半分半分の状態とか、半分物質なんだけれども半分光とかいった状態を意味しますが、これらを自在に制御できれば、というわけです。たとえば光だと思ったんだけど観測してみたら音に変わっていたとか、あるいは音からスタートして次にスピンになり、さらに光へと変化するといったもので、我々の常識に反するかもしれませんが、ハイブリッド素子の研究の進展によって、今まさにこれらの状態が自在に操れるようになっていっています。

取材・文：池谷瑠絵（情報・システム研究機構）

新規公募採択研究について

公募研究スタート

平成28年4月から公募研究がスタートし、領域の全体像がよりクリアになりました。すでに実績のある研究者からの卓越した提案に若手の新しい発想が加わり、素晴らしい陣容になったこと、領域代表者として大変嬉しく思っています。新たにスタートする公募研究のタイトル、研究担当者、概略を以下に紹介します。便宜上それぞれの公募研究が所属する計画研究班は決まっておりますが、私どもの新学術領域では計画研究班を超えた交流、共同研究を促進しております。従って、ここでは所属計画班は敢えて記載しません。実際、研究の概略を見ると、スピンとフォトンやフォノンの結合、フォトンとフォノンの結合など計画班の枠にしばられることなく、真に「ハイブリッド」する、将来が楽しみな「量子」の研究が期待通りにたくさんあります。扱う材料も通常の半導体量子系から酸化物系、ダイヤモンド、光格子中の量子気体と多岐にわたります。理論分野からも物性的な理論から量子システムの

提案まで含まれています。2年間という短い期間ですが、公募研究が計画研究をつなぎ、領域を活性化する大きな起爆剤となるとともに、各公募研究が、本新学術領域に所属することで、他の研究費では得られなかった素晴らしい成果を上げてくれることを期待しています。また、そうなるように領域としてしっかりサポートしていく所存です。なお、公募研究の審査は文部科学省の指導のもと厳正に行われました。今回は予想以上に素晴らしい研究者からの優れた提案があり、競争率も高く、どれを採択するかは大変難しい判断でした。面白い研究提案をして頂いた多くの研究者に心より感謝するとともに、お忙しい中、領域外からこの審査に加わって頂いた方（ここでは名前は明らかにしませんが）に心より御礼申し上げます。なお、新学術領域「ハイブリッド量子科学」では第2期の公募研究（平成30-31年度）を平成29年度に募集する予定です。

東北大学 教授 平山 祥郎

氏名	所属	テーマ	概略
 古賀 貴亮	北海道大学・情報科研・准教授	インターバンドラッシュバを用いたスピン軌道プロケードの最適化	半導体二重量子井戸を用いて、スピンホール効果と並ぶ電氣的スピン生成法であるエデルシュタイン効果(電流誘起のスピン生成)を飛躍的に増大させる手法を開発します。
 黒田 眞司	筑波大学・数理物質・教授	格子歪を介した単一スピンと機械的振動との結合	遷移元素の原子1個を含む半導体ドットを作製し、ドット中の単一磁性スピンの振舞いを明らかにします。さらに微小共振器とドットのハイブリッド構造を作製し、単一磁性スピンと機械的振動との結合を目指します。
 高橋 義朗	京都大学・理学系・教授	量子気体顕微鏡による光格子中原子スピンとフォンのハイブリッド量子制御	光格子中に閉じ込められた量子気体の個々の原子スピンを光と結合させ、原子スピンの量子フィードバック制御などを施すことにより、光格子中の原子スピンと光のハイブリッド量子技術を開拓することを目的とします。
 小坂 英男	横浜国立大学・工学系研・教授	光子・電子・核子スピン量子もつれエンジニアリング	ダイヤモンドに内在する光子、電子、核子の間の量子もつれの探求により、ハイブリッド量子間を自在に変換する量子メディア変換を実現し、量子メモリー、量子センサー、量子計測などの量子技術応用につなげます。
 青木 隆朗	早稲田大学・理工学術院・教授	共振器量子電気力学系の非局所コヒーレント結合の研究	複数のキャビティQED系が光ファイバーを介してコヒーレントに結合した系を実現し、巨視的距離を隔てたキャビティQED系間の非局所相関や量子状態の伝搬ダイナミクスの観測を目指します。
 俵 毅彦	NTT物性科学基礎研・研究員	ノンスピバス希土類フォトニック結晶によるフォノン・スピンコヒーレント結合	ホスト結晶の核スピン分極の除去とフォトニック結晶構造により、添加希土類 4f軌道における光子-電子スピン間の高効率なハイブリッド量子コヒーレント結合の実現を目指します。
 田畑 仁	東京大学・工学系研・教授	傾斜歪超構造によるスピン・フォノン結合制御とフォトン励起	ガーネット型鉄酸化物のエピタキシャル傾斜格子歪により空間反転対称性の破れによる双極子強結合の実現と、傾角スピン効果相乗(DM相関)によりスピン・フォノン結合型マグノン誘起の実現を目指します。
 山本 俊	大阪大学・基礎工学研究科・准教授	超高Q値トル型光共振器によるフォトン・フォノン量子系	微小な光共振器の機械振動(フォノン)と光(フォトン)が結合したハイブリッド量子系の実現を目指して研究を行います。
 泉田 渉	東北大学・理学系・助教	カーボンナノチューブのスピンメカニクス	カーボンナノチューブにおいて、スピン、軌道、格子の結合を理論的に研究することで、量子状態を明らかにします。また、スピンや格子運動を制御する方法を調べます。
 青野 友祐	茨城大学・工学部・准教授	量子ポイントコンタクト構造における微小磁化と核スピン相関の理論的解明	量子サイズのくびれである量子ポイントコンタクトの近傍には、単純な構造にもかかわらず、自明でない電子状態が実現している。この電子状態の性質を周辺に存在する核スピンとの相互作用を通して明らかにします。
 村尾 美緒	東京大学・理学系・教授	ハイブリッド量子系を用いた量子操作・量子測定アルゴリズムの実装理論	ハイブリッド量子系の特性を活かして物理系と小規模量子計算機系の結合系を構成し、量子アルゴリズムを用いた物理系の制御や量子操作の実現を目指した量子版組み込みシステムの理論提案を行います。

研究成果

分子吸着による カーボンナノチューブの フォノンの変調

東京理科大学 本間グループでは、単層カーボンナノチューブ(SWNT)の外表面への分子吸着や内部空間への分子内包がSWNTのフォノンの振動数に与える影響を、単一SWNTのラマン散乱分光／蛍光発光分光同時計測により評価しています。1原子層の筒状物質であるSWNTには、固有のフォノンモードがあり、1原子層であるがゆえに、それらの振動数は分子吸着により影響を受けます。このため、SWNTのフォノン物性の理解やその応用には、分子吸着をはじめとするSWNT周囲環境の影響を精密に評価することが重要です。これまでに、疎水性であるSWNT表面に大気中で2分子層の水吸着層が形成されることを、分光計測と分子動力学計算により明らかにしました [1]。この水吸着層は、SWNTの直径が伸縮するradial breathing mode (RBM)と呼ばれるフォノンの振動数を 6cm^{-1} 程度アップシフトさせることを見出しました。解析の結果、これはSWNTの振動と吸着層の振動がvan der Waals相互作用を通じて結合する結果であることが分かりました [2]。振動数シフトの大きさは、ラマン散乱測定が可能な直径2nm

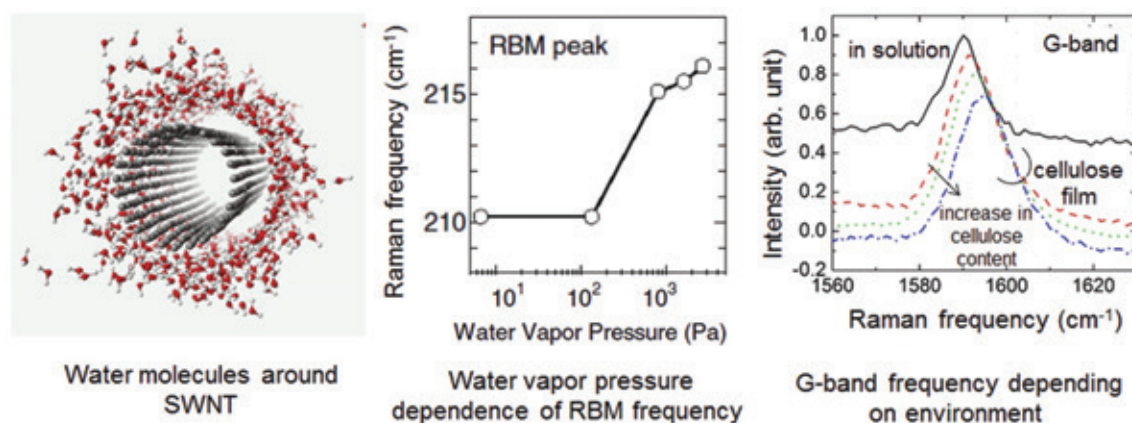
程度までは直径に寄らず一定で、van der Waals相互作用の大きさが同じ程度であれば、物質にも依存しません。

このため、SWNTが束になった場合も同様なシフトが生じます。一方、水吸着層はG bandと呼ばれるSWNTの格子の面内振動には影響しません。これに対し、SWNTをセルロースファイバーの膜中に分散した場合にはG bandの振動がアップシフトします。

これは、セルロースファイバー膜がSWNTを軸方向に縮ませるような応力を及ぼすためであることが、蛍光発光における励起光と発光の波長シフトの解析から明らかになりました [3]。このように、SWNTのフォノンは分子や物質の吸着によって変調することができます。

今後は、これを積極的に利用して、SWNTの内部空間に内包させた分子の構造や状態(液相・固相)によりフォノン周波数を制御を検討するとともに、SWNT中のフォノンと励起子とのカップリングによる現象を追求し、フォノン・光ハイブリッドへの展開を図ります。

東京理科大学 教授 本間 芳和



1. Y. Homma, S. Chiashi, T. Yamamoto, K. Kono, D. Matsumoto, J. Shitaba, and S. Sato, Phys. Rev. Lett. 110, 157402 (2013)
2. S. Chiashi, K. Kono, D. Matsumoto, J. Shitaba, N. Homma, A. Beniya, T. Yamamoto, and Y. Homma, Phys. Rev. B 91, 155415 (2015)
3. M. Ito, F. Yajima, and Y. Homma, Jpn. J. Appl. Phys. 55, 075101 (2016)

研究成果

量子ドットとメカニカル振動子のハイブリッド素子による高感度変位検出と振動増幅

高感度センサや高精度発振器に広く用いられているメカニカル振動子と量子ドットを結合した新しい半導体素子を作製し、量子効果を用いた超高感度の振動計測手法を実証しました。今回得られた成果は、力や磁気などの極限計測技術の感度を、量子限界にまで向上させる可能性のある新しい手法として期待されます。

鉄琴の板や鐘など、決まった周波数で振動が続く人工構造はメカニカル振動子と呼ばれます。昨今ではナノテクノロジーの進展により微細化や集積化が進み、MEMS (Micro-electromechanical Systems) 振動子として形を変え、センサや精密振動子などの微小素子として広く用いられています。このメカニカル振動子の振動を高感度に検出する手法は、重力波検出をはじめとした様々な極限実験における重要な要素技術であり、レーザ干渉計や超伝導素子などを用いた種々の方法が開拓されてきました。研究チームでは、これまで培ってきた半導体素子技術の新しい応用として、MEMSや、さらにそれを微細化したNEMS (Nano-electromechanical Systems)の研究を進めてきました。半導体MEMS/NEMSは集積化や多重化に優れたプラットフォームであり、光・電子デ

バイスとのハイブリッド化により、これまでとは全く異なる機能を持つ集積回路の実現が期待されています。特にメカニカル振動子と量子ドットに代表される半導体量子ナノ構造の融合は、量子効果を用いた超高感度の計測手法などへの応用が期待されています。

今回、振動が引き起こす「歪」に対して敏感に特性が変化する量子ドットをメカニカル振動子に組み込んだ新構造の半導体ハイブリッド素子を試作し、量子ドットの抵抗値の変化より、振動子の微細な動きを高感度に検出することに成功しました。

この結果は、半導体チップに集積可能な分子や磁気センサの感度や機能を極限にまで高める可能性を有する手法として、今後の発展が期待されます。

また、メカニカル振動子の振動特性が、量子ドット中の電子状態により大きく変化することも観測されました。特に、量子ドットにより振動の増幅（Q値の向上）が見られた結果は世界で初めてで、電流によるメカニカル振動の増幅作用を実証したことに相当します。

NTT物性科学基礎研究所 上席特別研究員 山口 浩司

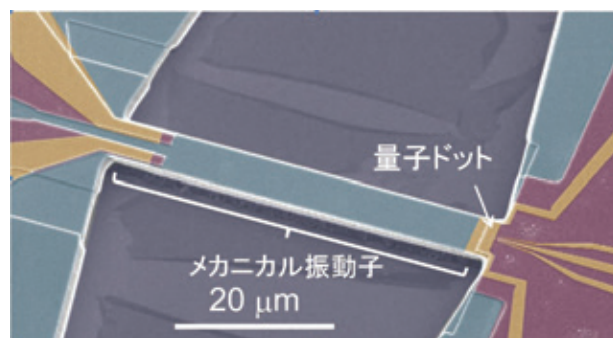


図:作成した量子ドットとメカニカル振動子のハイブリッドデバイスの電子顕微鏡写真。
機械共振器の振動が、量子ドットの抵抗値の変化として検出できます。

掲載論文:

Y. Okazaki, I. Mahboob, K. Onomitsu, S. Sasaki, and H. Yamaguchi
"Gate-controlled electromechanical backaction induced by a quantum dot"
Nature Communications 7, 11132 (2016), (doi:10.1038/ncomms11132)

ニュースリリース: <http://www.ntt.co.jp/news2016/1604/160411a.html>

EVENT

国際共同研究加速基金「ハイブリッド量子科学の進展に向けた国際活動強化支援」

本新学術領域「ハイブリッド量子科学」から応募した国際共同研究加速基金が採択されました。ハイブリッド量子科学の革新的な技術は、一国で確立することは不可能で、世界的な連携の中で生まれてくるという認識が多くの研究機関にあります。この世界的な連携に日本が積極的に絡んでいくことは非常に重要です。本新学術領域では、この国際共同研究加速基金をバネにして、国際交流活動を、個々の研究グループの交流実績をさらに発展させるボトムアップ的な活動と、国際的な研究コミュニティの中での本領域の存在感の維持・向上を図るトップダウン的な取り組みの両面から推進していくことを計画しています。本領域の各研究グループは、これまでも個別に海外の研究グループ・研究拠点と連携して研究を進めてきています。これらのボトムアップ的な国際共同研究を一層強化するために、海外の研究機関から研究者を招聘したり、本領域の研究者、大学院生を海外へ派遣する支援を行います。平成27年度は、Harvard大(米)からの若手研究者の招聘、およびCNRS(仏)、Twente大(蘭)、McGill大(加)、New South Wales大(豪)への研究者、大学院生の派遣を行いました。一方、トップダウン的な国際交流の取り組みとして、世界的に著名な研究者からなる国際諮問委員会を設置し、本新学術領域の研究活動への評価とアドバイスを頂くとともに、本領域の成果の世界的なアピールにも繋げることを計画しています。さらに、世界的な研究拠点を本領域の重点研究機関と定めて、領域として組織的に人的交流を進めるとともに、定期的な研究交流会などを開催し、世界に向けて本領域のアピールを推進して行きます。平成28年度はポール・ドルーデ研究所(独)との交流ワークショップを企画しています。

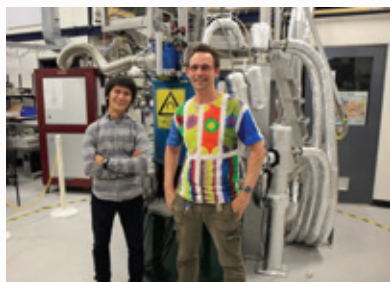


東京大学生産技術研究所 教授 平川 一彦

写真は、本基金で招聘したハーバード大学の荒井慧悟氏。

ニューサウスウェールズ大学での「正孔と核スピンの相互作用」に関する共同研究

RESEARCH



私は、シドニー・ニューサウスウェールズ大学のAlex Hamilton教授の研究室に8月から3ヶ月間滞在し、2次元正孔系における核スピンの抵抗検出に関する研究を行いました。教授の研究室では、同一試料中で電子と正孔の両方を扱うことができる「両極性量子ポイントコンタクト」の試料作成に成功[1,2]しており、今回の実験のために貴重な試料を提供していただきました。実験の目的は、電子系で偏極した核スピンを正孔系で抵抗検出することで、正孔と核スピンの相互作用を観測することでした。ただ、残念なことに、3ヶ月間の実験では、高感度な測定をするために必要なゲートの安定性を得ることができず、正孔系における測定をすることはできませんでした。しかし、私自身にとっては、低いノイズレベルを達成する為の対策や測定手法を学べたこと、異なる研究分野に対する見識を深め、自分の研究を異なる視点から見る事ができたという点で非常に良い経験であったと思います。何よりも実験の難しさ、物理学の面白さを再認識することができてよかったです。このような素晴らしい機会を与えてくれたHamilton教授、一緒に研究の支援をしてくださったポスドクのAshwin博士、そしてシドニーでの生活を経済的に支援してくださった海外共同研究プログラムに感謝いたします。

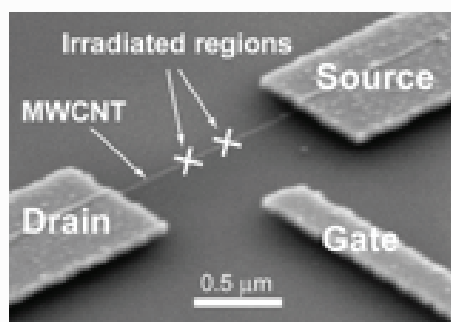
東北大学 白井 翔太

[1] J. C. H. Chen et al., Appl. Phys. Lett. 106, 183504 (2015)

[2] Z. K. Keane, et al., Nano Lett. 11, 3147 (2011)

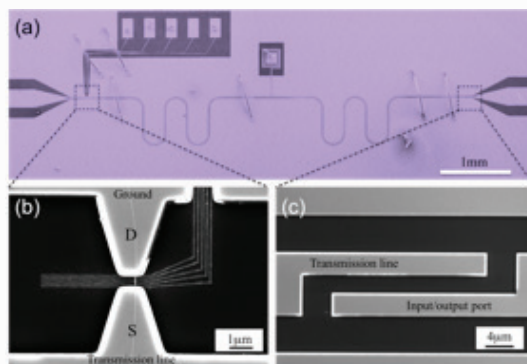
量子ドットを用いたスピンと光子の 相互変換を目指して

RESEARCH



本研究グループでは電子の持つ電荷とスピンに着目し、これらと他の量子の変換にかかわる物理を明らかにし、様々なナノ材料においてその量子変換技術の開発を行っています。スピンや電荷を1量子単位で変換するために電子を閉じ込める量子ドットを利用します。そのための材料として自然にナノスケールの構造が形成されるナノカーボンや半導体ナノワイヤを使います。図1は多層カーボンナノチューブ(MWCNT)を利用して作製した量子ドットの電子顕微鏡写真です。カーボン材料は核スピンをもつ原子が少ないのでスピンに対する量子コヒーレンスが長いことが期待でき、スピン量子変換デバイス材料に適しています。

しかし、量子ドットをデバイス化し、回路化するためには、任意の位置に制御性のよいトンネル障壁を形成することが必要です。そのために本研究では局所的にイオンビームを照射して生じるダメージをトンネル障壁に利用することを検討しています。これまでに3重トンネル障壁を作製して2重結合量子ドットの特性を得ることに成功しました。2重結合量子ドットはスピン・電荷変換機能を持つ最も基本的な構造なので、カーボンナノチューブをもちいてそれを形成できたことは今後につながります。しかし、まだまだトンネル障壁の信頼性は十分よいとは言えないので、より小さな領域にイオン照射が可能な集束イオンビームを用いる方法も試んでいます。スピン軌道相互作用(SOI)は電圧でスピンを制御するために大変有効な効果です。本研究グループでは大きなSOIを得ることができると期待される狭ギャップ半導体のInSbナノワイヤ(NW)やホールを伝導キャリアとするGe/SiコアシェルNWを用いて量子ドットを作製しています。ここではスピン・(マイクロ波)光子変換の実現を目指して、量子ドットをマイクロ波回路共振器に組み込むことを試んでいます(図2(a-c))。量子ドット構造はナノワイヤの下に作製した細いゲートに電圧をかけて形成します(同図(b))。この構造で、最終的にSOIを通して共振器中の電界(光子)と量子ドット中のスピンを相互作用させようという目論見です。スピンと光子の変換の実現を成功させるためには、まだまだ克服すべき課題が多いのですが、予備的な実験では2重結合量子ドットの1電子の電荷状態が共振器の共振特性に反映されることを見出しています。今後この効果をより大きくするとともに、そのメカニズムを明らかにすることが必要です。



理化学研究所 石橋極微デバイス工学研究室 主任研究員 石橋 幸治

図1:多層カーボンナノチューブ(MWCNT) (b)に作製した単一量子ドット

図2:マイクロ波コプレーナ導波路で形成した共振器中に組み込んだナノワイヤ量子ドットの全体写真。(a)量子ドット部分の拡大図。

信号線とグラウンドの間に量子ドットを形成する。共振器中で最も電界が大きくなる位置に設置する。(c)信号線内に共振器を形成するための切断部分。

この部分がコンデンサとして働き、反対側に設けた同様の構造との間に電磁界が閉じ込められる(共振器構造)。

EVENT

第2回領域会議概要

平成28年3月2日から3日に大阪大学中之島センターで第2回領域会議を開催しました。国内外から荒井先生(マサチューセッツ工科大、米)、Santos先生(PDI、独)、Nori先生(理研)、新田先生(東北大)の招待講演者を迎え、全体で66人が参加して活発な討論が行われました。領域会議が新学術領域の目的である共同研究の促進を手助けするために、今回は単なる成果発表ではなく、



領域をまたいで行っている研究に焦点をあてたプログラム構成にしました。また、国際共同研究加速基金の採択に合わせて、国際共同研究のセッションを設け、国際共同研究を支援する姿勢もクリアにするとともに若手の英語発表にも力を入れました。また、今回初めて領域アドバイザーとして青野先生、横山先生にご参加頂き、いろいろ有意義なアドバイスを頂くとともに、企業アドバイザーの活動もスタートし、東先生(島津製作所)、棚本先生(東芝)、綿引先生(三菱電機)、小田川先生(パナソニック、藤井先生代理)からも企業の立場からの様々なコメントを頂きました。これらを参考に、領域内の皆様の意見も加えて、今後の領域会議、さらには領域運営に結び付けていく所存です。なお、次回の領域会議は8月25日から26日に東京理科大で開催される予定です。

東北大学 教授 平山 祥郎

出会いと、垣根を超える行動力

京都大学化学研究所 教授 水落 憲和

それはある出会いから始まりました。平成22年度の新学術領域「量子サイバネティクス」の公募研究に採択された私は、その新学術領域とFIRST「量子情報処理プロジェクト」の合同研究会に出席していました。その際、NTT物性科学基礎研究所の仙場浩一主幹研究員（現NICT上席研究員）と初めてお会いし、超伝導量子ビット-ダイヤモンドハイブリッド系について議論をしました。これがきっかけで、私にとって超伝導量子ビットとのハイブリッド系の研究が始まり、その後のNTT物性科学基礎研究所の方々やNIIの根本先生との共同研究にも発展しました。

研究者は自分の専門分野に籠りがちになりますが、少し分野が離れている方との共同研究、特にハイブリッド研究には、分岐点となる出会いと、その機会を活かすために垣根を超える行動力が重要と感じます。本稿では特に若い人に参考になればと思い、いくつかの例を紹介させていただきます。

最初は、単一NV中心観測の論文（1997年）を書かれたWrachtrup教授です。彼はベルリン自由大学の博士課程在籍時に、ボルドー大学のOrrit教授（現ライデン大）らの単一分子観測の研究を知りました。当時、電子スピン共鳴を用いた研究をしていた彼は、単一分子の光励起三重項状態の光学観測の研究を着想し、共同研究をOrrit教授に申し込みました。結果は分子における初めての単一スピン検出（蛍光観測）の成功となり、1993年に彼の初めての発表論文がNature誌（Nature 363, 244 (1993)）に掲載されました。学生時に国境を越えた共同研究を申し込み、短期間で大きな成果に繋げた行動力は驚きです。

次は、私がWrachtrup教授の研究室に滞在していた際のグループリーダーであるJelezko博士（現ウルム大教授）

です。彼はベラルーシ出身ですが、Orrit教授の研究室に大学院生として留学し、そこで博士号を取得しました。当時、彼は既に家族を持っていましたが、異国の地へ向かったその行動力には目を見張るものがあります。その後も彼はNV中心研究の第一人者の一人として大活躍中です。

さて、自身の話に戻って、私がNV中心を初めて知った時に感じた事は、その優れた特性を用いれば、学生時代に魅力を感じつつも参入できなかった研究分野で研究ができるということです。その研究分野とはOrrit教授らの単一分子分光や、NMRを用いた量子情報の研究でした。（ちなみにOrrit教授らの単一分子発光観測発表の前年の1989年にスタンフォード大のMoerner教授らは単一分子の吸収観測について報告していました。Moerner教授はその後もこの分野をリードし、2014年にノーベル化学賞を受賞しています。）私がOrrit先生らの研究を初めて知ったのは学部4年生の時（1995年）でした。その時は衝撃的なほどに感銘を受けたものの、Orrit先生の研究室へ留学するほどの行動力はありませんでした。私とWrachtrup教授らとの共同研究は、私が大学で職を得た後、2005年に先生に電話で直接、申し込みました。当時のある状況から、会ったこともない先生に電話をして共同研究を申し込むというのは、当時の私としては思い切った行動でしたが、彼らの行動力に比べると大したことではありません。もっと早くに世界に向けて行動していればと悔やまれます。分野を超えた研究は、なかなか大変な面もありますが、本新学術領域でも垣根を超えた研究ができるよう励む所存です。

第1回若手研究会 日程:8月24日(水) □

会場:東京理科大学

参加対象者: 39才以下の本領域メンバーグループの研究者
若手研究会は、この分野の次代を担う研究者を育てるために立ち上げられました。各グループの若手委員が、研究会の企画から運営まですべて受け持ちます。今回は、記念すべき第1回の研究会になります。チュートリアル的な招待講演3件とポスター発表を予定しています。

□ 第3回領域会議 日程:8月25日(木)、26日(金)

会場:東京理科大学

4月から新たに本領域で公募研究を開始された方々による研究発表が中心になります。領域内外との共同研究の進捗や成果につきましても、引き続き議論いたします。さらに、すべてのグループからポスター発表を予定しています。

Science of Hybrid
Quantum Systems

<http://quant-trans.org/hybridqs/>

