

N.6
2017/11

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

量子情報の視点でダイヤモンドを眺めると？

About HQ Project

- 第2回HQS2017開催
- 第3回若手研究会報告

Research Highlights

- フォノンエンジニアリングによるフォノン輸送と熱伝導制御
- 量子ホール系における核スピン偏極の相反性

Hot Topics

- 半導体量子ドットと2次元超格子のハイブリッド構造の作製
- 第3回フォノン勉強会
- NII市民講座報告
- ボトル型微小光共振器におけるフォノンモードの観測

Science of Hybrid
Quantum Systems





小坂英男
公募研究
横浜国立大学

根本香絵
理論グループ研究代表者
国立情報学研究所

Andrew Greentree
RMIT University,
Melbourne, Australia

量子情報の視点で ダイヤモンドを眺めると？

今回は、本プロジェクトに国際連携として参加いただいているAndrew Greentree教授の来日に合わせて、公募班でダイヤモンドの実証実験に取り組む小坂教授と、Greentree教授の共同研究者でもある理論班の根本教授にお集まりいただきました。Greentree教授はダイヤモンドを量子情報の舞台に上げた世界的なパイオニアのひとりであり、また理論家として、現在豪州メルボルンのRMIT Universityで実験チームを率い、基礎～応用にわたる量子情報に関わる幅広い研究成果を挙げています。ハイブリッドのこれまでとこれからを巡って、議論いただきました。



ダイヤモンドで量子リピータを作る

小坂(公募研究): 僕の場合は大学で勉強してから半導体レーザーの実験研究などを行って来て、量子情報を始めたのは2000年ぐらいからなんです。半導体の量子ビットの研究に取り組んでいたのですが、当時は量子状態を維持できる「コヒーレント時間」がものすごく短かった。ある日ダイヤモンドに接して、結晶内のスピン状態が非常に安定していて、いつまでもぐるぐる回せることに非常に驚いて、それ以来ダイヤモンドに取り組んできました。

中でも私のフォーカスは量子リピータの実現にあります。量子通信はセキュリティが高く、たとえば量子鍵配送は理論的に絶対安全な通信を実現するわけですが、現在のところ最長約100キロメートルしか通信距離が伸ばせません。東京・大阪間を通信しようという時には、途中で通信を「中継(リピータ)」していく必要があります。しかしせっかくセキュアな量子通信も、古典的な中継器でつないでしまえば、そこで盗聴される危険性が生じますから、量子リピータは量子通信が長距離を実現するために不可欠なのです。これを実現するためにはまずミリ秒のオーダーで情報が保存できる量子メモリーが必要であり、それにはダイヤモンドの他にないのではないかと考えています。

私の研究室ではNVセンターにある電子スピンと光だけでなく、原子核スピンも含めてさまざまなハイブリッド化に挑戦しています。ダイヤモンドは炭素原子が作る結晶ですが、NVセンターとは、その結晶中の炭素があるべきところに窒素が存在し、隣接する位置に空孔がある複合欠陥のことを言います。ここにできる電子状態の量子的な性質はとても安定していて、読み出し、書き込み、メモリーなどの操作も、他の材料に比べて操作しやすい特徴があります。

Greentree(国際連携): 量子的な状態が保たれたシステムは、環境から隔離されていると状態を保つことができ、メモリー保持時間が長いという利点を引き出すことができます。しかし同時にシステムが完璧で、よく隔離されているほど、読み出

しなどの操作が難しい。この意味でNVダイヤモンドは、スポットなんですね。特に光とのハイブリッドでは、十分隔離されていて、かつアクセスできるという大きな長所を生みます。

小坂: ええ。光が相互作用を起こすのはスピンの軌道状態です。ダイヤモンドでは基底状態と励起状態でスピンの軌道と光の相互作用の大きさが大きく違います。基底状態はこの相互作用がとても小さいために状態がとても安定していてメモリーに向いている。そこに光でアクセスができることは、ダイヤモンドの素晴らしい点のひとつですね。



ダイヤモンド×量子情報のパイオニアとして

Greentree: 私がダイヤモンドのNVセンターに取り組み始めたのは……なんと22年前です(笑)。まだ博士課程の学生で、どのように光が物質に相互作用するかという研究は「量子光学」と呼ばれていました。私は基礎物理を学び、非常に面白い物理がたくさんあったダイヤモンドに注目しました。ただ当時は、まだ誰もそれが量子コンピュータにつながるとは考えていませんでした。ところが1つ2つ論文が出たら、たちまちダイヤモンドの量子情報に関わる研究者コミュニティが形成されていきました。いつも新しい仲間が加わって、ダイヤモンドのここがいい、なぜならあだからこうだから……とわれわれが思っていなかったアイデアを持って来る、そんな研究領域が活発に動き始めたのです。実際ダイヤモンドは非常に柔軟性の高い材料であり、今でもベストな系だと私は考えていますし、魅了され続けています。

根本(理論班): われわれは、ダイヤモンドは「高価なのではないか?」という質問を受けることがありますね?

Greentree: そう、それはよい質問です。実際、私が初めてダイヤモンドの応用研究を提案した時、査読者が聞いてきたんです「なぜあなたは(わざわざ)世の中で最も高価な材料を使うのだ?」と(笑)。

小坂・根本: (笑)

Greentree: 確かにダイヤモンドというと一般に、たとえば結婚指輪の宝石といったイメージを抱きがちです。しかしダイヤモンドはむしろ安い物質と言えます。私たちが使うのは天然ダイヤモンドではないし、ナノサイズのダイヤモンドは実際、袋一杯でいくらといった材料なんです(笑)。



ハイブリッドはこうして始まった

Greentree: さて、その後冷却原子やシリコンを用いた量子情報処理の研究等を得て、私は2004年に、より量子情報の視点からふたたびダイヤモンドに取り組むことになりました。ダイヤモンドのNVセンターの電子状態を励起状態へ持ち上げ



ると、1光子を得ることができます。このように物理現象を操作することによって、得られた光子を量子通信に使ったり、顕微鏡のカリブレーションに用いたりという使い道があります。幸運なことに、その後私は根本教授と共同研究を開始することになりました。量子テレポーテーションや電磁誘導透過などの研究を共同で始め、光と固体物理のハイブリッドというアプローチによって、量子コンピュータを進展させることができました。この機会に、新しい考え方に気がつき、それに基づいて研究を進められたこと、またこの機会を通じて、日本の量子情報の研究者コミュニティを知り、目が開かれたことは大きな実りのひとつでした。

根本:以前このニュースレターにも書いたのですが2003年にドイツで国際会議があった時に「ハイブリッド」をテーマにした講演をしたんです。当時はまだよくわからないものという扱いで、「変わり種」という名の分科会でした。

Greentree:そうそう!あのころはまさにこれからどの材料が勝つか、分野対抗のレースをしているような状況でした(笑)。線形光学、イオントラップ、シリコン、固体物理、超伝導、単一電子トランジスタ……等があって、研究者も「○○の人」というふうに、分類されていましたね!

根本:それぞれの系だけでは限界があることを理論家が見出し始めたのは……2000年頃だったのではないのでしょうか。

Greentree:ええ。続いて実験家も、自分の系が一番と主張するばかりではなく、新しい材料に触れてみたり、他の専門家とも積極的に話すようになりました——そのようなことは、それまでは決して起こらなかったことです。理論家と実験家の連携も進むようになりました。

根本:そして2005年頃になると、どの系で何ができるというのではなく、それぞれの系における量子という共通の性質を解明しながら、より大きな全体像として何ができるのかを念頭に置きながら、議論ができるようになっていきました。

Greentree:同感です。そのキーワードがまさにハイブリッドなわけですが、量子情報処理だけでなく、量子システムでできる新しいこと、特に現在の技術ではまだ実現できない研究開発にこそ威力を発揮するものだと私は考えています。たとえ

ばたくさん原子が並んでいて相互作用をしているようなシステムやシステム同士の相互作用を解こうという時、またそれぞれの小さなシステムを集積させて互換性を保ちつつ大きなシステムへ拡張していこうという時などです。このような時に私たちは以前取り組んだハイブリッドをそのまま役立てることができます。だから前回より比較的簡単に開拓することができますね。なぜなら金属、超伝導などいろいろなシステムがありますが、どれも同じ物理を対象としていることがわかるからです。



量子の新しい性質が開拓する 有望な応用例

根本:ハイブリッドの面白さは、基礎研究のみならず、まさに量子の新しい性質が開拓するさまざまな応用的な研究開発を刺激するところにもあるわけですね。実際に、Greentree教授は近年、そのような展開に取り組まれていますね?

Greentree:はい、その通りです。私たちはダイヤモンドを使った量子技術を生物学に持ち込み、他の方法では知ることができない、新しい測定・検査を実現しようとしています。ナノダイヤモンドを体内に入れてプローブとして使い、細胞に傷害を与えずに、体内の情報をメモリーします。この情報を光で安定的に読み出すことにより、生物学的に重要なタンパク質の動きを跡づけることなどに応用を実現することができます。ダイヤモンドに格納された情報は1日でも1カ月でも、おそらく1年でも状態を保つことができるでしょう。これは相当に画期的なことだと思うのです。ハイブリッド量子システム技術への基礎的な理解に基づいて、われわれはどんな問いを問うことができるのか、どこへ持っていくことが有意義なのかという意味で、重要なステージだと考えています。

われわれが行わなければならないことは、量子の技術を開発し続けて、若い学生達にその技術に触ってもらって、彼らが何か新しいアイデアを思いつく機会を提供することです。そのアイデアが、この分野をそれまでは思いもつかなかった方向へ導いていくはずですが、そのためにはまずシステムの基礎を理解し、一生懸命勉強する必要がありますね。さらに創造的であれば——きっと面白いことが起こるのです。

小坂:それに関連して、量子認証の話をつけ加えたいと思います。量子コンピュータ以外で、さっそく応用できるものの例として、通信も大事だけれども、私は量子認証も大事だと思うんですね。私たちは現在、ほぼそれなしには生活できないほどICT技術に取り巻かれて生活していますが、そのセキュリティはあまり高くないし、たくさんパスワードを覚えるなんて、基本的には人間が得意なことではありません。そこでダイヤモンドを使った量子認証は、サイバーアタックから私たちを守るのに好適なのです。しかも、技術的にもさほど実現困難ではないと私



は考えています。

根本: Greentree教授が指摘されたことは、新領域「ハイブリッド量子」のフォーカスのひとつでもあります。われわれは量子コンピュータや大規模な量子情報システムだけを追求しているのではなく、イノベーションにつながるようなまったく新しいテクノロジーを目指しています。また必ずしも量子力学的に制御しなければならない——具体的にはたとえば「コヒーレントでなければならない」——わけでもありません。量子が可能にする概念や発展を元に、むしろ古典的なところうまく採り入れていく必要があります。新しい物理的なリソースを技術的に可能にして、それを使って現在の技術でできないことをやろうというわけなのです。

Greentree: それこそがまさに、われわれが取り組むべきことです。ちなみに、それは自然界からも学ぶことができるのではないかと、という観点から、私は量子光合成にも興味を持っています。地球上の植物は、小規模ながら、光から非常に効果的に収穫を得ている……これを私たちは小さな量子コンピュータを使って生命活動を維持していると見ることもできるかもしれません。つまり、われわれが量子情報を理解して作ろうとしている技術を、自然界はすでに使っている——こんなところにこそ、さきほど根本教授が指摘したような応用があります。1世紀かけて人類が学んできた量子という知見を活用して、今あるシステムよりもより安い、より完全で、より小さな、新しいシステムが可能はずです。

根本: そしてもちろん、私たちは同時に、自然界にないリソース



を開発し、自然界にないシステムを理論的にデザインすることもできますね。

Greentree: そうそう、それこそまさに興味深い、開発すべき点です。実際、前世紀に実験室でやっていたことを振り返ると……

小坂・根本: (笑)

Greentree: ルビジウムやストロンチウム原子をコントロールするだけで、てんてこ舞いでした!(笑)それが原子は人工原子になり、現在まで発展してきたわけですから——ここからがさらに、非常にエキサイティングだと私は考えています。

取材・文: 池谷瑠絵 (情報・システム研究機構)

翻訳監修: 根本香絵



新領域の活動から

第2回International Symposium on Hybrid Quantum Systems (HQS2017)が開催されました

新学術領域研究「ハイブリッド量子科学」が主催した第2回International Symposium on Hybrid Quantum Systems (HQS2017) (<http://hybridqs-workshop.com>)が、宮城県蔵王で平成29年9月10日(日)から13日(水)にかけて開催されました。HQS2017は、ハイブリッド量子系の物理と応用に関する最新の成果を議論するために開催され、国内外の第一線の研究者、若手研究者、大学院生が参加して活発に議論を行いました。蔵王という都会から離れた自然豊かな場所で、ゆっくり議論することができる大変いい機会になりました。また、海外から、一般投稿を含めて、12ヶ国(国籍では19ヶ国)から合計120人の参加があり、国際シンポジウムという名に相応しいものになりました。海外からの参加者にとっても、日本の自然や食事に触れつつ、サイエンスの議論ができるよい機会になったことと思います。

会議では、ハイブリッド量子系に関する様々な発表と議論がなされましたが、全てを網羅することは不可能ですので、私の個人的趣味で、いくつか印象に残った発表について紹介したいと思います。

電子・スピン系を中心とした議論では、2つの量子ドット間のLandau-Zenerトンネルを用いて電荷を用いた量子操作ができることや量子シミュレーションに応用できるこ

とが示されました。さらに、ブレイクジャンクション法で作製された1原子で2つの超伝導体が弱く結合した系では、エネルギー障壁がなくても、基底状態、電子が1個束縛された状態(スピンup, down)、1個のクーパーペアが束縛された状態という4つの状態をとるAndreev量子ドットという状態になり、新しい量子操作の舞台になることが紹介されました。また、電子スピンと核スピンの相互作用、超伝導キャピティを用いた深強結合状態の実現や超伝導キャピティと電子2準位系の相互作用に関する報告などがありました。

フォトンをベースにしたハイブリッド量子系に関しては、ダイヤモンドを共振器中に入れてレーザにすることによるNV中心を用いた磁場センシングの高感度化や、強い電界印加によるNV中心のコヒーレンスの向上等に関する議論がなされました。また、新しい方向性として、フォトニック結晶を用いて光のトポロジカルエッジ状態を実現したという試みやErイオンを用いて1.55 μm 帯での3準位 Λ 状態系の量子操作に関する報告がありました。

メカニカルな構造やフォノン制御に関するセッションでは、新しいオプトメカニクスの可能性やグラフェンのナノラムの物理に関する講演がありました。さらに結晶歪みを利用してbright excitonとdark excitonの結合を誘起することができることや、AFMを用いたナノ領域のポテンシャルセンシング、表面弾性波を利用した二重量子ドットの制御、フォノンの集光技術など、新しい方向性を感じさせる講演が多くなされました。

新しい電子材料系に関する講演も多くなされ、InSeなど層状物質の中で現れる新しい光学・伝導特性の話題に加え、トポロジカル材料を用いた超伝導接合の特異な伝導特性、さらにInSbナノワイヤーやナノフレークと超伝導接合におけるトポロジカル状態の観測についての講演がなされました。さらにそれに関連して、スピン軌道相互作用が弱いカーボンナノチューブにおいても、曲がった形状のものではスピン軌道相互作用が発生し、トポロジカルな状態が形成されうることも紹介されました。また歪みを



会場の様子。研究発表に関して活発な討論がなされました。

導入してグラフェン中にバンドギャップを誘起する新しい方法や、カーボンナノチューブを裂いてナノリボン構造を作製する方法など、新しい電子材料の可能性に関する発表も多くなされました。

会議終了後、蔵王のお釜へのエクスカージョンを行いました。幸い天候にも恵まれ、緑から様々に表情を変えるお釜(クレーター湖)を見ることができ、海外の参加者とともに、改めて日本の変化に富んだ自然を満喫することができました。

今回のHQSは、約120人の参加者が、3日間、蔵王のホテルに缶詰になって議論を行うという環境で、非常に密な議論ができたことと、国内外の研究者間の新たな交流を生み出し、共同研究の種を育むのに大いに役立ちました。今回のHQSの成功を受け、本新学術領域では引き続き同様な会議を企画していく予定です。

最後になりましたが、HQSの開催を支えて下さいました東北大のスタッフの方々や大学院生の皆様に厚く御礼申



蔵王で開催されたHQS2017の集合写真

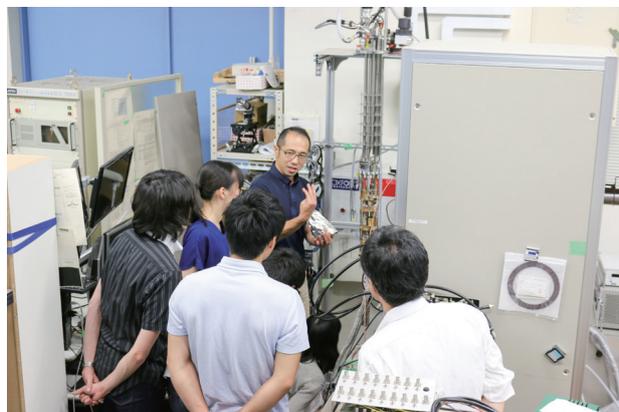
上げます。

HQS2017プログラム委員長 平川一彦

第3回若手研究会報告

手探りで始まった若手委員会ですが、9月14日の開催で第3回を迎えました。第2回の理研での開催では、若手研究者にアイデア段階の研究について語ってもらおうという新しいスタイルに挑戦しましたが、今回は初心に戻り、第1回と同じく量子情報科学の各分野をリードする研究者として早瀬潤子准教授(慶応大)、橋本克之助教(東北大)、小林嵩助教(東北大)、樋田啓研究員(NTT物性科学基礎研究所)に講演をしていただきました。

ところで毎回参加していると思うのですが、この委員会を一番楽しんでいるのは我々運営委員ではないでしょうか。自分達が聞きたい講演者を呼ぶことができ、学部生もわかるような内容をと依頼してはいるものの、わかりやすく



講演後の自由参加の研究室紹介も盛況

て助かるのは実は自分たちだったりします。さて今回まさにそのような機会となりましたが、さすがは世界的に活躍している研究者達、基礎的な内容から出発しても講演は徐々に熱を帯びていき、1時間後には我々をしっかりと最先端の研究の地平まで連れて行ってくださいました。講演後はこれまでで最も多くの質問の手が寄せられ、白熱しました。

盛り上がりを見せつつある若手会、次回は来年1月の開催を予定しています。相当斬新な内容となるはずですので、ぜひ楽しみに。

国立情報学研究所 特任研究員 仲山将順



橋本助教の走査型顕微鏡に関する講演

研究成果から

フォノンエンジニアリングによるフォノン輸送と熱伝導制御

半導体中の熱伝導は、主にフォノンの移動で説明され、ほぼ全ての熱伝導現象は粒子的な描像で説明されてきました。しかし、熱の本来の姿は原子や分子などの振動であり波動性を持つため、コヒーレンスが保たれた周期構造中では干渉を起こし、熱伝導が変化する可能性が指摘されていました。これは、熱制御を粒子的描像から波動的描像で表現する領域に拡張する第一歩になるため、多くの研究グループが興味をもって挑戦してきました。しかし、周期構造を形成し熱伝導の変化を観測しても、その変化が干渉効果に起因するのか、構造形成によって新たに導入された界面におけるフォノン散乱効果に起因するのかが区別できず、明確な実証は困難でした。

本研究では、その実証を一つの目的として行い、高精度で測定可能な、レーザ光を用いた非接触型の測定系を構築し様々なフォノンナノ構造における熱伝導を測定しました [1]。図1 (a) に示すような厚さ145 nmの単結晶シリコン薄膜に周期300 nmで円孔を形成した構造（フォノン結晶）と、その周期性をわざと乱した構造を作製し、熱伝導を比較しました [図1 (b)]。構造は、下部のシリコン酸化膜を除去することで両持ち梁構造となっており、測定したい構造を通じてのみ熱が散逸する構造になっています。中央のアルミ薄膜に加熱用パルスレーザ光と温度変化による反射率変化を観測する連続光を集光し、熱散逸

時間を測定しました。295 Kでは、フォノン-フォノン散乱頻度が高く、熱フォノンのコヒーレンス長が周期より短いため、熱伝導は人工結晶の周期の乱れに鈍感です。一方、約10 K以下になるとコヒーレンス長が長くなって熱の波動性が顕著になり、熱フォンは周期構造を感じて伝導するようになります。4 Kにおける実験では、円孔位置のずれ量が小さくなり、完全結晶に近づくにつれて散逸時間が長くなる（熱が逃げにくくなる）様子が観測されました。これは、直感に反する結果のように感じますが、完全結晶ではブリルアンゾーンの高対称点近傍で群速度が大幅に低減されるため、熱伝導率が大幅に抑制されるという物理で説明されます。

本研究により、十分に低温では、トップダウン的に高い設計自由度を持ったフォノン結晶系で、バンドエンジニアリングに基づいたフォノン輸送・状態密度制御が可能であることが実証されました。また、フォノン輸送制御にとどまらず、様々なフォノンモードの集団輸送である熱伝導まで制御できることが実証されました [2]。今後、フォノンバンドエンジニアリングに基づいた、より高度なフォノン場・輸送制御技術および熱伝導制御技術の実現が期待できます。

東京大学生産技術研究所 准教授 野村政宏

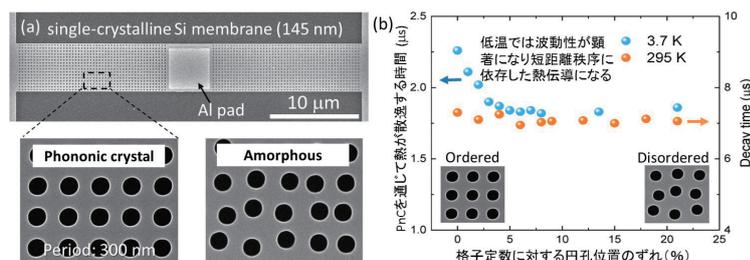


図1: フォノン結晶と周期性を乱した系での熱拡散の違いを観測し、低温では熱の波動性に基づいた干渉効果により熱伝導が変化するを実証した。(a)測定したシリコンフォノン構造のSEM写真。(b)短距離秩序を変えて作製した構造の熱散逸時間の比較。

References

- [1] R. Anufriev, A. Ramiere, J. Maire, and M. Nomura, "Heat guiding and focusing using ballistic phonon transport in phononic nanostructures," *Nat. Commun.* 8, 15505 (2017).
- [2] J. Maire, R. Anufriev, A. Ramiere, R. Yanagisawa, S. Volz, and M. Nomura, "Heat conduction tuning by wave nature of phonons," *Sci. Adv.* 3, e1700027 (2017).

量子ホール系における核スピン偏極の相反性 ～量子ホール系における核スピン偏極の基本的な特性の解明～

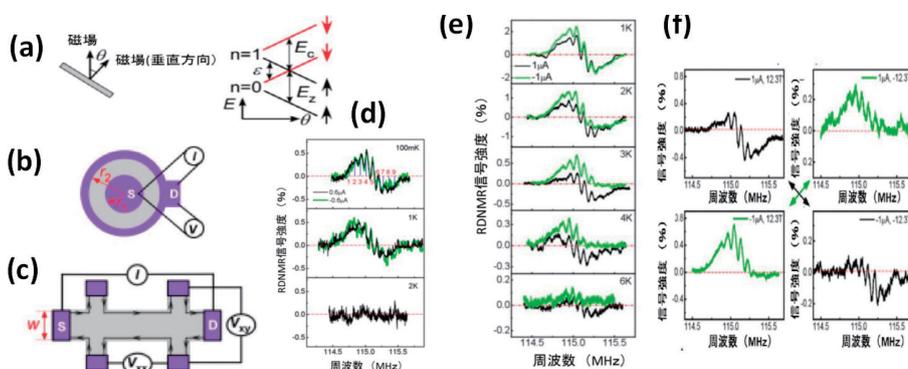
抵抗検出NMRは半導体量子構造における電子のスピン状態の計測や核スピンの量子状態制御に用いられてきましたが、核スピン偏極が量子ホール効果の基本的な特性とどのように関連するかは未解明な部分が残っています。量子ホール状態で核スピンを偏極する代表例は、異なるスピン状態が島構造を作る量子ホール強磁性状態を利用して、島から島に電子が移るときに、電子スピンと核スピンの同時反転するフリップフロップ・プロセスです。InSb量子井戸構造中の電子はg因子が極めて大きいため、試料を磁場中で傾けるだけで容易にランダウ準位が交差する特徴があり、交差点では異なるスピン状態が島構造を作ります。InSb二次元系で実現される量子ホール強磁性は整数量子ホール状態を使った基本的なもので、核スピン偏極ならびに抵抗検出NMRが実現しています [1, 2]。

今回の実験では、このような状態を試料端がないコルピノ構造と、試料端がある通常のホールバー構造で実現し、それぞれの系で核スピン偏極に伴う信号を測定しました。コルピノ構造では電流の向きに依存しない信号が測定温度2Kで消失するのに対し、ホールバー構造では、電流の向きに依存する信号が6Kの高温

まで出現しました [3]。これは、低温ではバルク部分での核スピン偏極が支配的であるのに対し、高温では試料端が重要な役割を果たすためです。温度が上がり、電子が島の間を行ったり来たりする状況でも、カイラルなエッジチャンネルがある試料端では電子が一方方向に流れることで、異なる方向の核スピン偏極が打ち消しあうことなく高温まで信号が観測されるものと考えられます。

この量子ホール端のエッジチャンネルの影響をより明確にするために、試料端の信号しか出なくなる3Kの温度を選んで、電流の向き、磁場の向きを変える実験を行いました。磁場と電流の向きを同時に入れ替えると同じ端が核スピン偏極に寄与するため同じ信号が得られますが、電流だけ、あるいは磁場だけを反転させると信号が変化します [3]。この核スピンに由来する信号の相反性は、量子ホール端が量子ホール系における核スピン偏極に重要な役割を果たしていることを明確に示しています。

東北大学 教授 平山祥郎



(a) 整数量子ホール効果でスピン分離したランダウ準位の磁場中での試料傾斜による交差、(b) 試料に端のないコルピノ構造、(c) 試料に端のあるホールバー構造、(d) コルピノ構造で得られた核スピン偏極に伴う信号、(e) ホールバー構造で得られた核スピン偏極に伴う信号、(f) ホールバー構造において、試料端しか信号に効かなくなる3Kの温度を選んで、電流の向き、磁場の向きを変える実験を行ったときの核スピン偏極に伴う信号とその相反性。すべての信号はももとの抵抗が何%変化したかで示されており、 ^{115}In の核スピンの対称的な特徴的な周波数で出現している。信号に存在する微細構造は ^{115}In のスピンの数が $9/2$ であることに由来する。

References

- [1] H. W. Liu, K. F. Yang, T. D. Mishima, M. B. Santos, and Y. Hirayama, *Phys. Rev. B* 82(RC), 241304 (2010) [Editor's suggestion].
- [2] M. Korkusinski, P. Hawrylak, H. W. Liu, and Y. Hirayama, *Scientific Reports*, 7, 43553 (2017), doi: 10.1038/srep43553.
- [3] K. Yang, K. Nagase, Y. Hirayama, T. D. Mishima, M. B. Santos, and H. Liu, *Nature Communications*, 8:15084 (2017), doi: 10.1038/ncomms15084.

RESEARCH

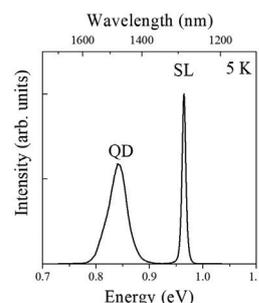
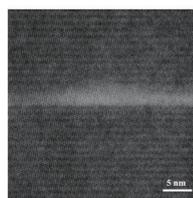
半導体量子ドットと2次元超格子のハイブリッド構造の作製

情報通信研究機構の赤羽浩一主任研究員らの研究グループは、自己形成法により作製される半導体量子ドットを2次元構造である量子井戸の超格子中に形成する技術を確認することに成功しました。

半導体量子ドットは電子やホールを3次元的に閉じ込め構造(0次元構造)であり、その状態密度がデルタ関数型の離散的な準位になるため、量子現象の解明に使われているだけでなく、様々なデバイスの高性能化に寄与できると考えられている半導体のナノ構造です。サイズが100nm未満の量子ドット構造は半導体の結晶成長における歪の効果を利用した自己形成法が一般的に利用されています。今回、情報通信研究機構の研究グループはこの手法を高度化し、0次元構造である量子ドット構造を2次元構造である量子井戸の周期構造(超格子)中に埋め込む構造の作製に成功しました。

得られた構造の断面の透過電子顕微鏡観察では量子ドットの構造が超格子中にきれいに埋め込まれていることが確認できます。また、フォトルミネッセンス法により発光特性を評価した結果、半導体量子ドットと半導体超格子双方からの発光が明瞭に観察されました。これらの結果は、半導体における2次元構造と0次元構造の相互作用を解明するための理想的な試料を作製する基盤技術を確認したことになります。

情報通信研究機構 主任研究員 赤羽浩一



(左) 半導体超格子中に埋め込まれた半導体量子ドット構造の透過電子顕微鏡像

(右) 5Kにおけるフォトルミネッセンス測定結果
QD:量子ドットからの発光、SL:超格子からの発光

参考情報: Kouichi Akahane, Naokatsu Yamamoto, Toshimasa Umezawa, Tetsuya Kawanishi, Takehiro Tanaka, Shin-Ichi Nakamura, and Hideyuki Sotobayashi, "Control of wavelength and decay time of photoluminescence for InAs quantum dots grown on InP(311)B using the digital embedding method", Physica Status Solidi B 253, pp.640-643, (2016).

第3回フォノン勉強会

新学術領域研究「ハイブリッド量子科学」では、電荷・スピン、光子とともにフォノンが量子情報を担う重要な要素と位置づけ、関連する研究を進めています。フォノンは低エネルギーであるため制御が難しく、その応用はまだ開拓されていない部分が殆どです。今回、東京理科大学総合研究院ナノカーボン研究部門との共催で、東京理科大学神楽坂キャンパスにて、第3回目のフォノン勉強会を平成29年5月10日に開催しました。昨年より公募研究として新しく参加された先生の話を中心に、最新の成果というよりは、研究の大きな狙いや流れをわかりやすくお話しただく機会を設けました。

まず、東大の田畑仁先生より「酸化鉄ガーネット格子歪構造によるスピン・フォノン結合およびフォトン励起」というタイトルにより、ヘテロエピタキシャル成長により生成した人工的な歪制御により、マルチフェロ物性を出現させる試みについての講演が行われました。続いて、阪大の山本俊先生より「ボトル型光共振器によるフォトン-フォノン量子系」というタイトルで、光ファイバーを熱処理することによって作製した、高Q値の光・機械ハイブリッド共振器を用いたオプトメカニクス実験の結果について紹介がありました。最後に、NTTの畑中大樹氏より「フォノン結晶を用いた超音波フォノン制御」のタイトルで、化合物半導体圧電機械共振器を用いたフォノン結晶によるフォノン伝搬の電気制御の研究に関する基礎と最先端の研究結果についての講演が行われました。

一般の参加者も含め約20名が勉強会に参加し、終了予定時刻を大幅に超過するなど、多くの活発な議論が交わされました。新学術領域研究では、領域間ならびに公募研究と計画研究間との連携を念頭に、引き続き関連した会合を積極的に開催していく予定です。

NTT物性科学基礎研究所 上席特別研究員 山口浩司



EVENT

EVENT

NII市民講座報告

平成29年8月25日に開催された、国立情報学研究所の市民講座において、公募班の小坂英男教授（横浜国立大学）が「ダイヤモンドと量子情報」と題して、一般向けの講演を行いました。本講座にはほぼ満員となる200名以上の方が参加され、量子情報科学への関心の高さが伺われました。講演ではまず、世界各国における量子情報技術の重要性の高まりや研究が加速されている状況が紹介され、続いてなぜダイヤモンドが量子情報技術に重要なのか、量子とは何か、量子もつれとその作り方、量子テレポーテーション等が解説されました。量子テレポーテーションの解説では、ダイヤモンドを用いた量子通信システムについても紹介されました。最後に身近な例として量子機械学習による量子認証が紹介され、量子中継や量子通信と組み合わせた次世代ネットワークに向けた取り組みの展望が示されました。本講演では、短い時間でできるだけ多くの方に理解いただけるような配色や図表の工夫に加え、テレポーテーションの説明の際には身近なキャラクターを活用するなど、聴講者を引き込むスライドも印象的でした。また、講演の途中で会場に質問を投げかける等、聴講者の関心を持続させながら、ダイヤモンドと量子情報という「固い」話を柔らかく説明されていました。

国立情報学研究所 編集部 松岡史晃

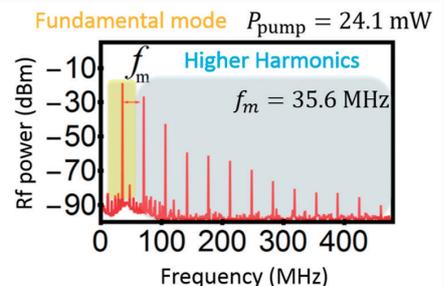
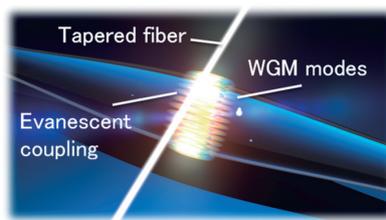


ボトル型微小光共振器におけるフォノンモードの観測

近年、非常に高いQ値をもつウィスパリングギャラリーモードを利用した微小光共振器が高い注目を集めています。その強い光閉じ込めにより様々な現象が観測され、新しい光機能として応用されようとしています。ボトル型微小光共振器の歴史は中でも比較的新しく2003年に提案され、その高いQ値や3次元光閉じ込めの性質から注目されています。最近、我々は図にもあるようなボトル型微小光共振器を光ファイバーを加熱して伸長する方法により作成することに成功し、幾つかの実験を行っています。特にフォノンモードの観測や制御はハイブリッド量子系を実現するものとして強い興味を持っています。我々の最近の実験では共振器内の非常に強い輻射圧による機械振動[1]や Brillouin 散乱に代表される音響フォノン[2]といったフォノンモードの観測に成功しています。特に機械振動は大気下で数十MHzの高い周波数および 10^4 程度の高いQ値を持つことが確認できています。光学的にも高いQ値とあわせるとレーザー冷却によるフォノンモードの冷却も可能となります。現在、更なる高性能化に向けて研究を進めているところです。

大阪大学 准教授 山本俊

ボトル型微小光共振器とテーパ光ファイバーによる光結合(左)、および共振器内の光の輻射圧によるフォノンモードのスペクトラム(右)



[1] M. Asano, Y. Takeuchi, W. Chen, S. K. Ozdemir, R. Ikuta, L. Yang, N. Imoto, T. Yamamoto, "Observation of optomechanical coupling in a microbottle resonator" *Laser & Photonics Reviews* 10, 603 (2016).

[2] M. Asano, Y. Takeuchi, S. K. Ozdemir, R. Ikuta, L. Yang, N. Imoto, T. Yamamoto, "Stimulated Brillouin scattering and Brillouin-coupled four-wave-mixing in a silica microbottle resonator" *Opt. Express* 24, 12082 (2016).

RESEARCH

HQS2017に参加して

早稲田大学 教授 青木隆朗

この原稿の依頼をいただいたものの、エッセイは全く書き慣れていないもので、困っているうちに締切日を迎えてしまった。ちょうど国際会議HQS2017の帰り道なので、それに参加した感想を中心に書いてみようと思う。

エッセイということを言い訳に、研究とは関係のない話題から入って恐縮だが、夏の蔵王はとて涼しく気持ちのよいところであった。仙台に着いた時はまだ蒸し暑さが感じられたが、蔵王は肌寒いくらいで、晴れた日にハイキングなどしてみたいものと思った。Excursionに参加できなかったのが残念である。会場も（良い意味で）昭和の香りの残る居心地のよいホテルで、朝に早起きして入る温泉は格別であった。

そしてもちろん、会議そのものが何よりも素晴らしかった。“Hybrid Quantum Systems”と一口に言っても、hybridizeする量子系の組み合わせはいろいろとあるわけで、講演やポスターのテーマの幅広さに改めて圧倒された。招待講演者の方も、新学術領域メンバーの方も、領域外からの参加者の方も、みなさん本当に質の高い研究を進めていらっしゃる、とても勉強になると同時に刺激になった。

中でも特に感じたのは、多くの研究において、微細加工技術・結晶成長技術・デバイス作製技術といった「ものづくり技術」が、極限的（曲芸的？）に高度化された

上にこそ、新しい科学が展開されていることである。言い古されたことではあるが、やはり日本のものづくり技術は強い。

一方で、そのような研究には欠かせないクリーンルームの維持はとて大変であり、クリーンルームを使い続けること、あるいはクリーンルーム自体を維持し続けることが必ずしも当たり前ではないということも、会議の間に何人かの先生から伺った。結局のところ、いかに予算を確保し続けるかに尽きるそうだ。研究費が減少傾向にある中で、クリーンルームに限らず、現在の研究環境・体制を維持しつつ研究を発展させていくことは、つくづく大変なことだ。

少し話がそれてしまった。さて、私自身の研究は、レーザー冷却原子と共振器光子のハイブリッド系であり、この会議の中では超少数派に属するため、正直なところ完全には理解しきれなかった発表も多くあった。新学術領域の中でも、私の研究は、特に実験技術の面でかなり異質なのかもしれない。（さらに言えば、レーザー冷却原子実験、あるいは量子光学実験としても、私の研究はちょっと変わっている。）しかし、異質な実験技術どうしを組み合わせる（hybridize）ことで、何か新しい、面白いことができるのではないかと思う。もしどなたかご興味をお持ちでしたら、一緒に何かやりませんか？と、共同研究を呼びかけたところで筆を置くことにする。

「新学術領域」事務局からのお知らせ

□第4回若手研究会（大規模若手研究会）

日程：2018年1月5日（金）～6日（土）

会場：国立情報学研究所

新学術領域関係の若手講師5名による講義（各1時間）および参加者によるグループディスカッションを予定しています。学部4年生や異分野の学生も対象に基礎から最新の研究内容まで幅広く概観する講義をおこなう予定です。学生、若手研究者の皆さまのご参加をお待ちしております。

□第6回領域会議

日程：2018年2月15日（木）～16日（金）

会場：NTT物性科学基礎研究所（神奈川県厚木市）

領域の研究成果や進捗について、また領域内外の共同研究について全グループから口頭発表とポスター発表をおこない活発な議論を展開する予定です。

Science of Hybrid
Quantum Systems

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

