

No.7  
2018/2

# 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

フォノンに聞く21世紀の回路設計

## About HQ Project

公募研究の成果と共同研究

## Research Highlights

- 光格子中原子の単一原子の観測と制御法の開発
- ダイヤモンドNVセンターを用いたハイブリッド量子系における双安定性

## Hot Topics

- 疑似乱数を使った弱反局在の汎用モデルの開発
- カーボンナノチューブのエネルギー準位
- 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
- セミナー報告 一ナノ材料のフォノンと熱輸送一

Science of Hybrid  
Quantum Systems



**有江隆之**

フォノングループ研究分担者  
大阪府立大学

**野村政宏**

フォノングループ研究分担者  
東京大学生産技術研究所

**森伸也**

理論グループ研究分担者  
大阪大学

## フォノンに聞く21世紀の 回路設計

今回は、フォノンをテーマに、フォノングループの野村政宏東京大学准教授と有江隆之大阪府立大学准教授、そして理論グループの森伸也大阪大学教授にお集まりいただきました。近年注目を集める音子（フォノン）が、光子、電子などの他の量子系とどう連続性を持って扱えるようになるのかは、本新学術領域「ハイブリッド量子科学」の重要な課題のひとつです。フォノンが操れるようになることで初めて可能になる21世紀の回路設計や熱電変換等の研究開発について、フォノンニック結晶、ナノカーボン、シミュレーションというそれぞれの研究の現場から報告いただきました。



## 時代は熱からフォノンへ

**野村(フォノン班)**：固体中の結晶は原子が周期的に並ぶ格子の構造をしていて、ブルブルと振動します。この振動を粒に見立てたのが「フォノン」で、日本語で「音子」とも呼ばれます。一方、様々なエネルギーをもつ音子が集団で移動しているような現象が、私たちがよく知っている熱伝送です。近年、半導体は、その超小型化によって、量子領域に入りつつあるという問題が顕在化してきていますが、このようなスケールでは、量子的な性質を考慮しなければなりません。ふだんは私たちも数ナノメートルの厚みの周期構造内では波として、波長に比べて周期がずっと長い系では粒として、フォノンを表現していますが、この中間領域をどう取り扱うかという課題へ向けて、フォノンエンジニアリングという新しい分野で議論が始まっています。

具体的に私の研究室では、フォノン結晶という人工的な周期構造を作り、固体中でのフォノンの輸送を制御しています。フォノン結晶中で、フォノンの存在確率を減らしたり、特定の方向に運んだりすることで、構築したハイブリッド量子系の中に邪魔になるフォノンを侵入させない

構造を目指しています。この他、現在の半導体から熱をうまく逃がして演算性能の上限の緩和、IoTやスマート社会に対応した熱電変換材料開発といった応用にも、もちろんつながります。

歴史的に見るならば、産業革命で熱の制御が発達し、続いて電子工学、さらに前世紀にはレーザーなどのフォトニクスの時代があつて、21世紀の今、再び熱、しかし今度はフォノンエンジニアリングによる技術革新の時代を迎えていると言えるのではないのでしょうか。現代の電子回路に対応するような熱回路を作り出そうという大きな流れの中で、われわれは今、熱をコントロールするための素子ひとつひとつを作ろうと、各研究者それぞれに取り組んでいる段階にあるのだと考えています。



## ナノカーボンでフォノンをコントロールする

**野村**：ところが、そもそも熱は電池のように溜められないし、ガラス基板の上に金属配線しても電子と違って熱はダダ漏れ……つまり、たいへん分散する系だという特徴があります。では、ハイブリッド量子系で要請されるきれいなフォノンをどうやって用意するのかということ、まずフォノングループ山口浩司研究代表者が作られているような両持ち張り構造があります。そしてナノカーボンなどの二次元材料で作る方法なども注目されています。

**有江(フォノン班)**：私は、二次元材料のナノカーボン(グラフェン)を使って、きれいなフォノンが励起できるようなシステムを作る研究を行っています。グラフェン中の熱伝導はほぼフォノンが担っているため、熱伝導をコントロールするには、フォノンの伝導をよく知ることが重要です。フォノンの波長に合わせてグラフェン中のカーボン原子を違う原子に変えてみたり、原子を1つ抜いてみたり、さらには材料自体を歪ませてみたりして、いろいろな構造によるフォノン伝導への影響を調べています。このように材料を工夫することで、ある周波数のフォノンが存在しないようにしたり、熱伝導率を極端に下げたり、



ダイオードのように一方向にしか流れないようにしたり、あるいは物質中の熱を局在させ、高いところと低いところを自在にコントロールできるようになるのではないかと考えています。これによつてたとえば現在の半導体も、ファンがなくても意図的に熱を思ったところに逃がすとといったことができるようになりますね。

**野村:** 固体中における熱の認識が今とは変わってきますね。またフォノンから電子、光子などの他の量子へつなぐトランジューサーの実現も、本プロジェクトの主要テーマの1つです。固体内で演算を行うには溜められる電子がいいし、一方光は、溜めるのは難しいけれども通信に向いています。このように既に開発が進んでいる中へフォノンはどう入っていくかという、電子とのハイブリッドが一番つながりそうですね。

**有江:** 私もそう思いますね。

**野村:** ただ難しいのは、他の量子とのエネルギーに大きな違いがあつて、フォノンは室温でも20ミリエレクトロンボルトぐらい低エネルギーで、実験では一般に冷却するため、さらにその1/100ぐらいのエネルギーになることで

す。それから、これは遠い将来のテクノロジーですが、もし原子間ポテンシャルが制御できれば、フォノンの分散をすぐ変えることができます。二原子間の距離が近づくと安定し、あるところから近づきすぎると斥力が働きます。そのちょうどいい底のところ格子定数になるのですが、ある材料の原子間ポテンシャルを二次関数でよく近似できる調和振動子系のようにすれば、フォノンでも散逸が少ない系を作ることができると考えられるのです。シリコンを歪ませて半導体の動作速度を上げたように、フォノンでも材料の工夫や歪みのエンジニアリングでできないかと、有江准教授の歪エンジニアリングに期待しています。

### シミュレーションが デバイス開発を牽引する

**森(理論班):** 私はシミュレーションを行っています。これまで半導体素子で電子がどう流れるかを調べてきて、今、波動性を考慮したフォノン輸送シミュレーションを行っています。波動性を含めると計算量が多くなるので、数学的な手法を用いて処理を速くするなどの工夫が必要になります。電子輸送シミュレーションは割とうまくいくのですが、フォノン輸送については、熱伝導度などを計算してみても、なかなかうまくいきません。得られた計算結果が、直観とも反するんですね。

その第一の問題は、電子の場合、関与する波長領域が狭いのに対して、フォノンの場合、波長範囲が広いことです。ミリメートルからナノメートル単位のフォノンをすべて矛盾なく扱うことがなかなかできません。今あるシミュレーション手法の多くが電子輸送をベースとしていることを考えると、もっとフォノンに合った新しい手法を考えなければいけません。

第二の問題は、フォノンの系は……どうしても自己言及的な構造なんですね。つまり見ている系の外に熱浴があり、熱浴もまたフォノンでできているために、開放系にしたいのだけれども、開いた先もフォノンであつて、実は同じものなんです。計算していると時々、これは相当に気持ち悪い(笑)。

**野村:** エレクトロニクスがそうだったように、デバイス開発にシミュレーションは欠かせません。ナノスケール熱伝導の特性を取り込んで、



精度の高いシミュレーションができれば、熱設計が非常に現実的になってきます。特にデバイスではマイクロメータ、フォノンはナノメータとスケールが異なるので、今後2つの物理を接続するシミュレーションによって、数マイクロメータぐらい大きな系の熱設計ができるようになってくれば、と期待しています。

取材・文：池谷瑠絵  
(情報・システム研究機構)



## 新領域の活動から

# 公募研究の成果と共同研究

### 第1期の公募研究を振り返って

時間が経つのは早いもので、2018年3月末で私たちの領域の最初の公募研究が2年の期間を経て終了します。新学術領域がスタートした時には、ハイブリッド量子の実験の難しさなどから公募研究が集まるかどうかの心配もありましたが、お陰様で多数の応募があり、質の高い公募研究をアクティブに遂行して頂きました。計画研究を超えるような成果、計画研究にない新しい視点、計画研究をつなぎハイブリッド化を促進する研究成果が多数生まれ、領域会議などではいつもワクワクしながら公募研究の皆様からのお話を聞いていました。高いレベルの研究が行われてきたことは、現在の公募研究から、高橋先生、青木先生、小

坂先生がJST-CREST「量子状態の高度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出」領域の課題に採択されるなど、多くの発展例が出ていることから良く分かります。そのなかで、今回のニュースレターでは3人の先生に活動状況を紹介してもらいました。他の公募研究の先生方の研究内容についても、これまでに発行したニュースレターのリサーチハイライトやホットトピクスなどで紹介してきましたので、面白い公募研究が走り、ハイブリッド量子科学が一步前進したことが皆様に伝わったのではないかと思います。2018年4月からは新しい公募研究がスタートします。どのような新しい風がハイブリッド量子科学に加わるのか、楽しみです。

領域代表・東北大学教授 平山祥郎

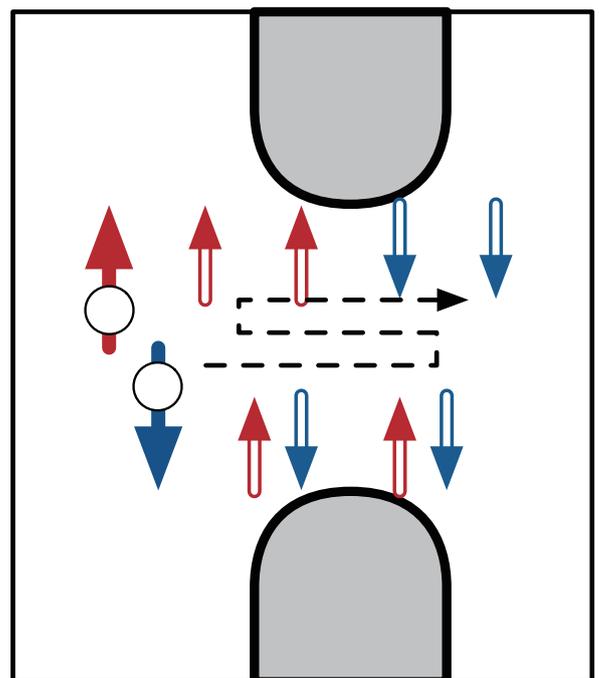
## ハイブリッド量子系としての量子ポイントコンタクト

半導体量子ポイントコンタクト(QPC)は、量子サイズのくびれ構造であり、半導体ナノ構造における最も単純な構成要素です。QPCを流れる電流は量子化されており、このことがナノ構造電気伝導研究の出発点となりました。今日では、QPCは量子微細構造や半導体スピントロニクスにとって不可欠な素子となっており、電荷・スピン状態の生成、制御、検出ために使われています。

本研究では、QPCを用いた電荷・スピン状態について、ハイブリッド量子系の観点から2つのテーマで共同研究を進めています。ひとつめは、半導体中に多数存在する核スピンとの結合系に関するものです。QPCに電流を流すことで核スピンを自発的に偏極させることが可能で、またその核スピン偏極状態を同じQPCを流れる電流の変化で読み出すことができることがわかりました。この研究は、電荷・スピングループの理化学研究所の川村稔研究員、ピータースタノ研究員らとの共同研究です。ふたつめは、QPC上でのファブリーペロー共鳴状態に関する研究です。QPCの形状を工夫することで、共鳴箱として機能させ、擬閉じ込め状態が形成されることが実験的に示されており、加えて電子間スピン相関が強いことも示唆されています。この研究は、電荷・スピングループの東北大学の平山

祥郎教授のグループとの共同研究にもとづいています。

茨城大学 准教授 青野友祐



QPCを通過する電子(実矢印)により、核スピン(白矢印)を偏極させます。また、電子はQPC内散乱によって、ファブリーペロー状態を形成します。

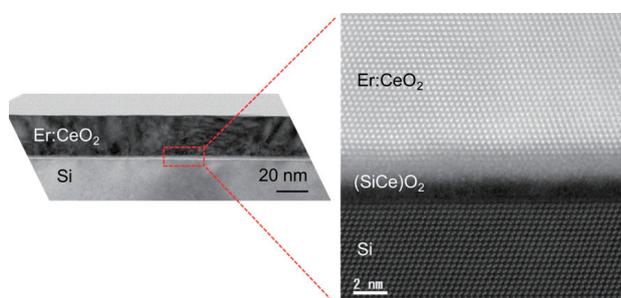
# 光子-電子コヒーレント結合に向けた 希土類イオン位相緩和時間の長寿命化

希土類元素はその特異な4f軌道遷移により、添加母体結晶や温度に依存せず原子状の離散的量子準位を形成し、かつ長いエネルギー緩和時間 $T_1$ （～ミリ秒）を示すため、光子との量子コヒーレント結合の実現に有望な物質です。しかし希土類元素自身のもつ電子スピンや添加される母体結晶構成原子の核スピンから生じる磁気揺らぎにより、一般に横緩和時間は理論的な限界（ $T_2=2T_1$ ）からはるかに短く（ピコ秒程度）なります。この短い $T_2$ 時間が光子-電子（スピン）コヒーレント結合時間を制限しています。本研究では通信波長帯光子と相互作用する希土類元素エルビウム（Er）に着目し、材料科学の側面から $T_2$ を長寿命化することを目指しています。これまでに希土類自身の電子スピン揺らぎを抑制するため、添加するErイオンの同位体制御を行い、 $0.39\mu\text{s}$ から $1.50\mu\text{s}$ への $T_2$ の長寿命化を実現しました。また母体結晶構成原子の核スピンの揺らぎを排除するため、核スピンを持たないセリウム（Ce）と酸素（O）の化合物母体結晶 $\text{CeO}_2$ のエピタキシ

ャル成長技術を確認しました（図）。現在この母体結晶へErを添加し、核スピン揺らぎの無い母体結晶がErイオンの $T_2$ へ与える効果について調べています。

またフォノン班と共同でGaAs明/暗励起子の機械振動による結合状態制御について研究を進め、励起子光物性とその測定において貢献しています。

NTT物性科学基礎研究所 主幹研究員 俵毅彦



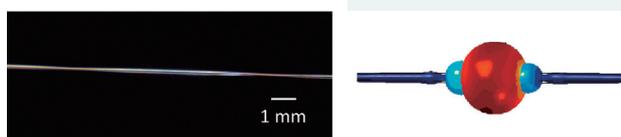
Si(111)基板上にMBE成長されたEr添加 $\text{CeO}_2$ エピタキシャル薄膜の断面TEM像。界面には非晶質 $(\text{SiCe})\text{O}_2$ 層が結晶成長後に形成されている。

# 微小光共振器における 光とフォノンのハイブリッドシステム

この公募研究では微小光共振器に誘起されるフォノンモードを中心に研究を進めています。光ファイバーから作成するボトル型微小光共振器は、光共振器として非常に高いQ値（ $\sim 10^8$ ）を持つだけでなく、機械振動子としても高いQ値（ $\sim 10^4$ ）を持つことがわかってきました。典型的な機械振動（フォノン）モードはRadial Breathing Modeと呼ばれるもので、光共振器が動径方向に振動します。Whispering Gallery Mode型の光共振器であるため、強く閉じ込められた光の輻射圧によって、この機械振動モードを励起することができ、強く励起することで発振し狭線幅化するPhonon Lasingをボトル型微小光共振器で初めて観測することに成功しました。フォノン周波数は30MHz程度でしたが、より小さい共振器にすることで160MHz程度の高い周波数も実現しています。光領域での差周波発生のように、このフォノンを光に変換することで系のフォノン数を減少させるレーザー冷却も可能にな

ります。さらに高い周波数の音響フォノン（ $\sim 11\text{GHz}$ ）に起因するブリルアン散乱も確認し、光とフォノンのハイブリッドシステムを実現する良いプラットフォームであることがわかってきました。別のフォノン系とのハイブリッドシステムを構築することも可能で、現在、フォノン班との共同研究が進行中です。光は室温でも量子性を保持することができる理想的な物理系です。光を介した様々な物理系とのハイブリッド量子系を探索することで領域内研究の量子的結合が強まることを期待しています。

大阪大学 准教授 山本俊



(左)作成したボトル型微小共振器。(右)Radial Breathing Modeのシミュレーション。

## 研究成果から

光格子中原子の単一原子の観測と  
制御法の開発

近年、2次元光格子に導入された超低温の原子集団について、単一サイトの空間分解能で単一原子を観測する技術である量子気体顕微鏡が開発されました。その高い制御性から究極の量子シミュレーターの実現が期待されています。実際、この技術により、2次元光格子中に導入されたアルカリ原子のスピン2成分フェルミ気体の反強磁性秩序相が観測されています。

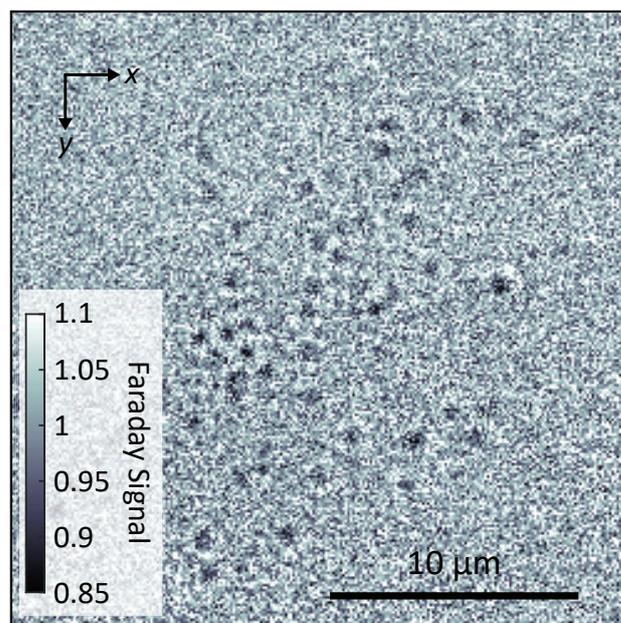
最近、我々はアルカリ原子とは異なるユニークな応用が期待されている2電子系原子のイットルビウム原子に対して、量子気体顕微鏡の開発に成功しました [1,2]。論文 [1] では、原子の測定時に、2電子系原子に特有の狭線幅の光学遷移を用いた冷却を駆使することで、プローブ光による発光を高効率で検出することにより、サイトを分解して高感度に単一原子を観測することに成功しました。一方、論文 [2] では、こうした発光を検出する方法ではなく、分散型相互作用に基いた、非共鳴なプローブ光の偏光回転（ファラデー回転）を検出する、ファラデー量子気体顕微鏡の開発に成功しました（図参照）。この方法で、単一原子に対して最大約 $10^\circ$ の回転角を得ることに成功しています。この手法では、測定時における原子の加熱を抑えられることが期待されますが、我々は最近、コヒーレント光を用いた場合のファラデー量子気体顕微鏡の限界を理論的に明らかにし、さらにこの限界を超える新しい方法として、プローブ光に加えて、スクイズド真空を用いる手法を考案し、共焦点型顕微鏡の配置にすることにより、測定時の光吸収を抑えて単一原子の検出を可能にする非破壊測定の可能性を理論的に明らかにしました。

また、2次元光格子中の個々の原子について、その測定結果をもとに内部状態の操作を行うフィードバック制御の準備として、空間光変調器であるデジタルマ

イクロミラーデバイスによって、様々な空間パターンを短時間で生成するシステムを構築しました。特に、観測されたCCD上の2次元原子分布に関するイメージングデータを高速に転送・画像解析し、これをデジタルマイクロミラーデバイスへ転送するシステムを構築し、原子分布に対応した光ビームを生成することに成功しました。また、このシステムを現有の量子気体顕微鏡装置へ実装し、デジタルマイクロミラーデバイスによって生成したガウスビームを原子集団に集光し、原子集団への影響を確認することができました。

さらに、測定を介さずにフィードバックする手法も検討していて、異なるサイト間の原子に相互作用を誘起する方法として確立することを目指しています。

京都大学 教授 高橋義朗



ファラデー量子気体顕微鏡による光格子中単一原子の観測

## References

- [1] R. Yamamoto, J. Kobayashi, T. Kuno, K. Kato and Y. Takahashi, "An ytterbium quantum gas microscope with narrow-line laser cooling", *New J. Phys.* 18, 023016 (2016).
- [2] R. Yamamoto, J. Kobayashi, K. Kato, T. Kuno, Y. Sakura, and Y. Takahashi, "Site-resolved imaging of single atoms with a Faraday quantum gas microscope", *Phys. Rev. A* 96, 033610 (2017).

# ダイヤモンドNVセンターを用いたハイブリッド量子系における双安定性

ハイブリッド量子系では、異なる物理系や物理量などを組み合わせることで、今までは考えられなかった新しい性質や、実験的に実現が難しい量子系固有の性質を生み出すことができると考えられています。これまでに、様々な物理系を用いたハイブリッド量子系が理論的に提案され、個別の物理系では出現しない、ハイブリッド系固有の性質が予言されてきました。私達はオーストリアのウィーン工科大学、NTT物性科学基礎研究所と共同で、これらハイブリッド系の中でも、量子的に優れた性質をもつダイヤモンド格子中のNV（窒素-空孔）センターの電子スピン集団と超伝導共振器とのハイブリッド系を用いて、ハイブリッド量子系の示す非線形量子現象を実証することに成功しました。

本研究で用いたハイブリッド量子系は、ダイヤモンドNVセンターの電子スピン集団、超伝導共振器、ドライブ光（入力光）からなる系で、入力の強度を変化させることで、ハイブリッド系の示す応答を観測しました。NVセンター集団の大きさは約 $10^{12}$ 個と見積もられ、この電子スピンの状態は、低温（25mK）においてはほぼすべて（99%）の電子スピンの基底状態へ偏極した状態になっていると考えられます。このハイブリッド量子系はドライブのあるTavis-Cummings型の相互作用でモデル化でき、それぞれの電子スピンのゼロ磁場分裂は2.878GHz、共振器との相互作用は平均12Hzの結合としました。

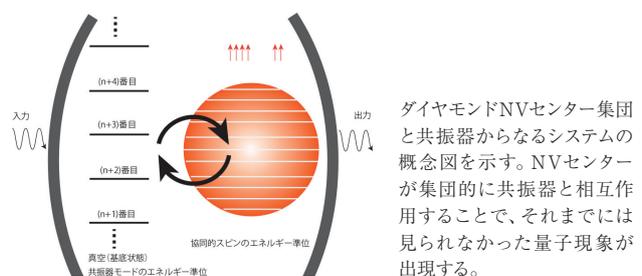
このハイブリッド量子系の入力光（ドライブ）に対する応答から、系の定常状態における2重安定現象を解析しました。入力光のパワーを上げるにつれて、電子スピン系は共振器からデカップルをおこし、共振器内の光強度が臨界値に達したところで完全にデカップルすることがわかります。この非線形飽和現象は2重安定

性に必須な性質で、系が協同的に振る舞うことにより初めて実験的に検証が可能となります。実際のサンプルが作る電子スピン集団には協同現象を妨げる不均一性があるため、実験とともに数値解析を行いました。不均一性を9.5MHzと仮定した場合には、相互作用の臨界値は $C_{\text{coll}}=42.4$ と見積もることができ、これより小さい値では、共振器内の光強度は入力光の連続関数となりますが、臨界値ではシステム応答はステップ関数となり、2つあるドライブ強度の臨界点では相転移現象を示します。

さらに、系のダイナミクスを実験的・理論的に調べ、定常状態への緩和時間の入力光強度依存性など、NVセンターのスピン集団による協同的な非線形現象を実験的に検証し、理論的にそのメカニズムを明らかにしました。

本研究は、NVセンターのスピン集団のもつ量子性を生かし、これまでにない長い時間で共振器の光の状態に非線形性を引き出すことに実験的に成功したもので、非線形な量子現象の新しい可能性を拓く研究結果です。本研究は、オーストリアのウィーン工科大学との共同研究は、新学術領域国際化加速基金の支援を受けて行われました。

国立情報学研究所 教授 根本香絵



## References

Andreas Angerer, Stefan Putz, Dmitry O. Krimer, Thomas Astner, Matthias Zens, Ralph Glattauer, Kirill Streltsov, William J. Munro, Kae Nemoto, Stefan Rotter, Jörg Schmiedmayer and Johannes Majer, "Ultralong relaxation times in bistable hybrid quantum systems", *Science Advances* Vol. 3, no. 12, e1701626 (2017).

## RESEARCH

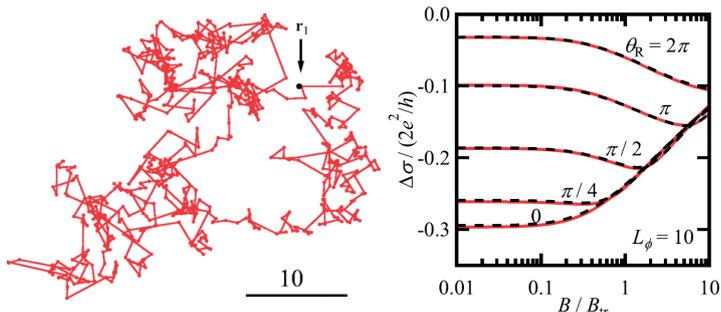
## 疑似乱数を使った弱反局在の汎用モデルの開発

アンダーソン局在の前駆状態とされる弱局在／弱反局在効果は、「拡散近似」の範囲内で、1980年代に理論、実験の両面から解明されました[1]。1990年代にはラシュバ効果を前提としたモデルが開発され、ゲート変調による「弱局在－弱反局在転移」も実験的に確認されました[2]。その後、弱反局在効果は、スピン軌道相互作用(SOI)を探求する有益なツールとして認識され、今後はグラフェンや遷移金属カルゴゲナイドなどの「2Dマテリアルズ」にもその適用範囲が広がつつあります。今回、我々は、(1) 拡散近似に依らず広範囲な磁場で定量的に正しく、(2) 様々なSOIを自由に取り入れられ、(3) 簡単なプログラムで計算可能な、汎用性が極めて高い弱反局在の数値モデルの開発に成功しま

した[3]。このモデルでは

2次元空間での電子(2DES)の再帰ループを酔歩運動により考えます。これらの再帰ループは個別の2DESにおける平均自由行程でスケールすることが出来るため、あらゆる2DESに対して汎用的に使用することが出来ます。疑似乱数の予測可能性をうまく用いたことが、プログラムの高速化の鍵となったと言えます。

北海道大学 准教授 古賀貴亮



平均自由行程を1とした場合の2次元酔歩運動による再帰ループの例(左)。我々のモデルがラシュバSOIを仮定した解析解を再現した図(右)。

[1] G. Bergmann, "Weak localization in thin films: a time-of-flight experiment with conduction electrons", Phys. Rep. 107, 1 (1984).

[2] T. Koga, J. Nitta, T. Akazaki, and H. Takayanagi, "Rashba spin-orbit coupling probed by the weak antilocalization analysis in InAlAs/InGaAs/InAlAs quantum wells as a function of quantum well asymmetry", Phys. Rev. Lett. 89, 046801 (2002).

[3] A. Sawada and T. Koga, "Universal modeling of weak antilocalization corrections in quasi-two-dimensional electron systems using predetermined return orbitals", Phys. Rev. E 95, 023309 (2017).

## RESEARCH

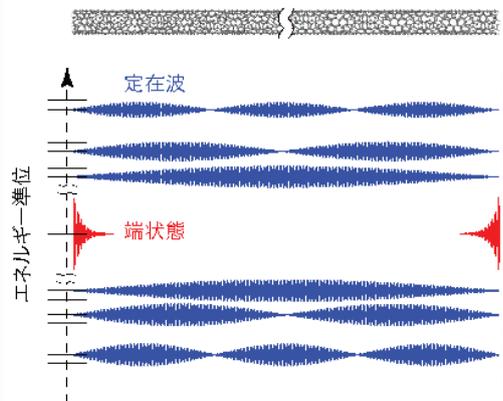
## カーボンナノチューブのエネルギー準位

カーボンナノチューブの発見以降、これまで多くの研究がなされてきました。なかでも電子スピン状態に関する知見はスピントロニクス観点からも重要です。しかしスピン状態に関する詳細がわかってきたのは比較的最近のことです。私たちはナノチューブの電子状態を理論計算により調べました。有限の長さのナノチューブに閉じ込められた電子のエネルギー準位は、ナノチューブの結晶構造やナノチューブ端の原子構造に敏感であることがわかりました。従来は、エネルギーバンドの最小点(谷)が2箇所が存在することを反映して、エネルギー準位の縮退が起こると考えられていました。しかし、多くのナノチューブにおいて谷間結合が起こり、これにより縮退が解けることがわかりました[1]。

このときナノチューブの電子スピン状態は電子数の偶奇によって決まります。

上記研究の過程で、ナノチューブ端付近に局在した電子波が重要な役割を果たすこともわかりました。この点をさらに調べることで、端状態とトポロジカル不変量との対応関係[1]や、外場によりトポロジカル相転移が引き起こされる[2]といった、トポロジカル物質としての性質も示されました。

東北大学 助教 泉田渉



有限長ナノチューブに閉じ込められた電子のエネルギー準位

[1] W. Izumida, R. Okuyama, A. Yamakage, R. Saito, Phys. Rev. B 93, 195442 (2016).

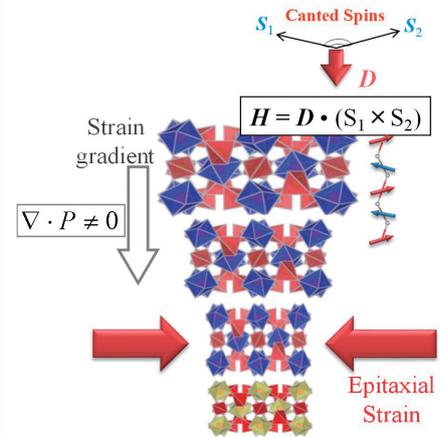
[2] R. Okuyama, W. Izumida, M. Eto, J. Phys. Soc. Jpn. 86, 013702 (2017).

## RESEARCH

## 傾斜歪超構造によるスピン・フォノン結合制御と フォノン励起

ガーネット単結晶基板 (GGG) 上に結晶成長させたサマリウム鉄ガーネット (SmIG) 薄膜において、基板との格子不整合 (1%) により、50nm厚さの正方晶歪層 (5%均一歪) と、約20nm範囲にわたって傾斜格子歪層 (5%~0%) が形成されていることが高分解能電子顕微鏡により明らかになりました。そして、この空間反転対称性の破れにより、誘電率が1桁近く増大し、フォノン緩和に対応する光学的特性の消衰項が減少することを見つめました。さらにこの傾斜歪層が支配的な薄膜において、O (2p) から Fe (3d) への電荷移動遷移とFeのd-d遷移に対応するフォノンエネルギー励起による磁気円二色分光より、スピン配列が垂直方向に数倍安定化 (プロット磁壁移動のピンングが増大) することが分かりました。一方、格子ミスマッチが約2%のルテチウム鉄ガーネット (LuIG) /YAGや、ほとんどミスマッチの無いヘテロエピタキシャル系では、そのようなピンングは全く観察されず、面直磁気異方性も非常に小さいものであることが分かりました。これらの成果は、室温で安定動作するスピンとフォノン励起素子のデバイス設計の鍵になるものと思われま

東京大学 教授 田畑仁



ガーネット型酸化鉄の極薄膜において、傾斜格歪の存在を実験的に明らかにし、空間反転対称性の破れに伴う、電氣的・光学的物性異常を確認しました。

## EVENT

## セミナー報告 — ナノ材料のフォノンと熱輸送 —

2017年11月28日、フォノングループから野村政宏准教授 (東京大学) と有江隆之准教授 (大阪府立大学)、理論グループから森伸也教授 (大阪大学) をお招きして「ナノ材料のフォノンと熱輸送: シミュレーションと実験からのアプローチ」と題したセミナーを国立情報学研究所で開催しました。野村准教授より「ナノ構造化による熱輸送制御」、有江准教授より「歪みエンジニアリングによる熱輸送制御の可能性」の実験に関する解説を、また森教授からは「非平衡グリーン関数法を用いたフォノン輸送シミュレーション」の理論について解説をいただきました。「熱輸送制御」といっても、野村准教授が解説する光の波動制御にヒントを得た熱制御と、有江准教授の電子とフォノンのグラフェン上での振る舞いの違いに着目したフォノン制御では、手法や観点が全く違っており、フォノンのもつ多様性が実感できました。また、森教授からはフォノンと電子の輸送を同時に扱うシミュレーション開発など話題が提供され、光や電子の制御とは異なるフォノンならではの難しさに、講演の途中でも聴講者から多くの質問が寄せられ、活発な議論が交わされました。本セミナーの聴講を通して、熱・フォノン特有の性質をより明らかにしていくためには、様々な分野の専門家による多角的な議論が非常に重要であり、いかにハイブリッド量子科学が重要であることを再認識しました。今後もセミナー等の開催を通じて、今ホットなテーマや新しいアイデア等について新学術領域内外の研究者の議論の場を提供していく予定です。

国立情報学研究所 編集部 松岡史晃



野村准教授の講演の様子

# ナノ物理・デバイス研究が始まった頃

理化学研究所 主任研究員 石橋幸治

新学術領域では異分野交流・共同研究により新たな学問を創出されることを期待されているがそれは実際容易ではない。今でこそナノエレクトロニクス、スピントロニクス、Beyond CMOSなどのように物理とエレクトロニクスの融合は当たり前だけれど、私が学生だった80年代はそんなことは全くなかったと思う。時代はバブルで明るかった。電機メーカーの半導体は絶好調でアメリカを抜き、Japan as No.1などともてはやされていた。のちに半導体ロードマップで言われるEmerging Deviceという言葉も気分もなかった。大学でも工学部電気系学科と理学部物理学科が共通の興味を持つ雰囲気はなかった。それが大きく接近するきっかけとなったのは、80年代中頃から始まったメゾスコピック系物理ではないだろうか（その頃はまだ“ナノ”は使われていなかった）。当時、SEMを改造した電子ビーム露光装置で50nm程度の幅の金属細線を簡単に作ることはできたが、あくまでも半導体の微細化プロセス研究の一環だった。私が修士1年の頃、恩師である故難波進先生（阪大基礎工電気）がアメリカの国際会議（だと思っただが）から帰ってこられて、「ベルやIBMでは微細加工を使って物理をやろうとしている、お前うちの電子ビームを使って何かやってみろ」、と言われた。確かに、その頃からPRLなどで金属細線やSi-MOSFETの1次元アンダーソン局在に関する論文を見かけるようになっていた。明らかに電気系の微細加工屋と物理屋が共同研究を始めていた。今では物理屋もナノ加工は当たり前になるようになったが、当時そのような協力はどのように始まったのかと思う。思えば、IBMではBroersをトップとする電子ビーム露光屋、低温物理

実験屋のWebb、そして理論家のLandauerやButtikerと一緒にやっていたのだろう。1984年のIBMの電子波干渉に関する最初の論文を見て俺もやってみようと思ったが、試料を作ることはできても電気工学科の学生である私にとってミリケルビンなんて測定温度は想像すらできなかった。今でこそ希釈冷凍機はそこら中にあるが、私が阪大理学部故邑瀬和生先生の研究室へ出かけて測定を始めた頃は、ガラスデュアーにヘリウムをためてロータリーで引く程度の低温だった。この程度の低温で電子の干渉など見えるはずがなかった。しかし、私は何としても電子の干渉を見たかった。半導体ならばもっと高温でも干渉が見えるのではないかと思い、苦労してなんとかGaAs/AlGaAsの試料を手に入れた。今から思えば、東大では榊裕之先生のところでMBEをやっておられ、平川先生が学生としておられたはずで、そちらに頼めば高品質の試料が簡単に手に入っていただろう。残念ながら、当時、大阪から東京は遠く、学生レベルでそんな気楽な交流はなかった。卒業してIBMのWebbのところを見学に行き、オックスフォードの黒く巨大な希釈冷凍機のデュアー（昔のオックスフォードのデュアーは青ではなく黒だった）を見たとき、これではとても勝負にならない、とがっかりしたものである。1990年、電気系の先生に加えて、福山秀敏先生、川畑有郷先生、川村清先生、安藤恒也先生、川路紳治先生、小林俊一先生、邑瀬和生先生などそうそうたる物性物理の理論家、実験家も参加して、難波先生を代表とする重点領域研究（新学術領域研究の前身）が組織され、日本でもナノ物理・デバイス研究が本格的に開始された。

## 「新学術領域」事務局からのお知らせ

### □新学術領域セミナー「量子センサー」

日程:4月20日

会場:国立情報学研究所 19階1901会議室

量子センサーに関するセミナーを開催します。詳細はハイブリッド量子科学webサイトにて告知いたします。

### □若手研究会の内容に関するご意見・ご提案の受付

本領域では、学生・若手研究者の異分野交流のために、肩肘張らずに参加できる若手研究会をどんどん開催していく予定です。今後の研究会の内容に関して、希望や企画のアイデアなどございましたら、ぜひ事務局までご意見をお寄せください。通常の会議とは趣の異なるユニークな企画など、お待ちしております。

Science of Hybrid  
Quantum Systems

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

