

No.8
2018/7

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

ここまで来た、ハイブリッド量子

About HQ Project

新規公募研究について

Research Highlights

- フォノン結晶導波路を用いた超音波振動のパルス圧縮技術
- 計測をハイブリッドにデザインする

Hot Topics

- 量子ネットワーク上で多体エンタングル状態を効率良く作成する
分散型量子アルゴリズム
- ナノ光ファイバーを用いたダイヤモンドナノワイヤー中の
NV中心からの高効率な光子の取り出し
- 半導体ドット中の単一Crスピンの検出と制御
- セミナー報告 「量子センサー」

Science of Hybrid
Quantum Systems





石橋幸治

電荷・スピングループ研究代表者
理化学研究所

根本香絵

理論グループ研究代表者
国立情報学研究所

平川一彦

フォングループ研究代表者
東京大学生産技術研究所

平山祥郎

領域代表者
東北大学

山口浩司

フォングループ研究代表者
NTT物性科学基礎研究所

ここまで来た、 ハイブリッド量子

平成27年度にスタートした新学術領域研究「ハイブリッド量子科学（～31年度）」が、いよいよ折り返し地点を通過しました。そこで今回は、これまでを振り返り、またこれからの実り多い展開へ向けて、領域代表者と4つのグループの研究代表者が集まって意見交換を行いました。フォトンとカーボンナノチューブはどう相互作用したのか、核スピンとフォノンはどこまで相互作用できたのか、理論の役割は?……それぞれの研究の現場から、今だからこそ見えてきた、新しい展望を報告します。



ハイブリッドはどう発展していますか？

平川(フォトン班)：フォトン班は、もともと光と何かを相互作用させるのが研究目的なので、ハイブリッドは進んでいます。ダイヤモンドと光はもちろん、フォトニック結晶と電子スピンとのカップリングなどが、着実に進んでいますね。また、この新学術に参加したことによって、共同研究の推進という課題に応えようと一生懸命考えるので、それがよい結果を生んでいると思います。例えば、これまで扱ったことのないカーボンナノチューブという材料の物理をやってみようとか、平山教授と一緒に単一分子とのハイブリッドをやってみようといった挑戦が始まっていますし、山口グループリーダーが作られた、ナノスケールの機械的な構造で光検出が行えるなど、いろいろなハイブリッド性が出てきています。

石橋(電荷・スピン班)：「ハイブリッド」という言葉自体もポピュラーになりましたよね。研究所内でも、我々以外に使っている人がいっぱいいる(笑)！ トポロジカル・コンピュータの人たちも多くがハイブリッドだし、材料系の人たちも、トポロジカルだけですべての機能を構築できるとは思えないので、異なる材料を組み合わせる方向へ進まざるを得ないわけですね。まさに時代の流れだなあ、と感じています。

ら以外のいろんなところから出てきて、それを実現するために、どうしてもハイブリッドが必要になってきているわけですね。このような動きが、世の中で言わば「自動的に」、広がりをもって進みつつあります。これらのニーズの多くは量子効果を出す操作にハイブリッドを使おうというのですが、今までとは違った操作を目指している点に特徴があって——最終的にどの程度の量子性があるかという点では0%~100%までであるけれども——結局そのどこかの過程で、ハイブリッドを使いこなしているわけですね。



量子性0%でも イノベーションを生まれますか？

石橋：私の班では、超伝導体という、その構造自体もハイブリッドな材料にすごく興味を持って、超伝導体全体をトポロジカルに制御するハイブリッド、そして超伝導体とナノワイヤーのハイブリッド材料の研究を進めています。しかしどうしたら量子コヒーレンスを維持できるのか、そのメカニズムにはまだよくわからないところがあり、やはり量子性の追求は、依然として、大きな課題です。

山口(フォノン班)：フォノンは比較的新しい領域ですけれども、これまでのところ量子ドットや励起子と、ナノスケールで作製された片持ち梁などの機械的な構造を合わせるハイブリッド化が、うまく進展しています。しかしこれらのハイブリッド構造において、フォノンがどこまで量子性を持っているのかは、やはり難しいところです。そこで、今のところフォノンの状態はまだ古典的なのですが、将来的には量子的に結合できるようなフレームワークの構築を進めており、これによってさまざまな新しい機能を実現しています。具体的には量子ドットで超高感度のセンシングを行ったり、機



平山(総括)：新しい材料は今や、何らかのハイブリッド系を入れなければ作れないと言っていいでしょうね。いろいろな材料を採り入れるという意味で、われわれは画期的な新規材料を作ったり、新しい材料の研究を巻き込んだりといったことをかなり積極的に行ってきました。逆に言うと、今までとは違った量子制御をしたいという欲求が、僕



械的な構造を使って核スピンの量子状態をコントロールしたり、また励起子が持つ光の遷移が可能な状態／不可能な状態(ダーク／ブライト)をスイッチさせたりといった制御が出来てきました。

ところでフォノンというのは音の量子であるだけでなく、熱の量子でもあります。もう1つわれわれは熱のマネジメントというテーマにも取り組んでいて、これは今後、非常に幅広い応用が考えられます。電流と同じように自在に制御できるかどうかはわかりませんが、熱という非常に小さなシグナルに対してダイオードやトランジスタのようなものを、積極的にエンジニアリングしていこうという流れが世界的に出てきています。

平山:電子1個が何に使えるのかといわれたのと同じように、熱も量子1個をコントロールできるとおもしろいという展開になるのか、あるいは集団としてのフォノンがある物性を示して、例えば廃熱のような応用に発展するのか、これからの展開が非常に興味深いところですね。

山口:今取り組んでいる中ではカーボンナノチューブやグラフェンで超格子構造を作れるようになってきていて、フォノンに波動性があることは確認できるかもしれませんが、量子性となるとなかなか難しいという状況です。けれどもフォノンの量子性はフレームワークとして作っておいて、そこで出てくる何らかのバイプロダクトを使っていくところにも、実は大きな魅力があります。もちろん目標としては、エンタングルメントを使った100%の量子性を目指すのですが、そこへ至る過程で見出される様々な現象の応用技術を探っていくことにも意義があると感じています。

根本(理論班):量子性が何%であるかというのは、実はあまり現実の過程を物語っていないようにも思います。量子性が100%というのは、量子制御の到達度という意味では



重要な指標ですが、量子性をどのくらい持たせるかは、バラエティに富んでいるほうが、物理的にも豊かで技術的にも実りが多い……というのは、特にこの新学術の前半で、ますます実感されてきたことのひとつなのではないでしょうか。

平川:「マクスウェルの悪魔」にも似て、どこが本質なのかを理解しつつ、少しずつでも量子性を上げていくことで、いろいろと使い途のあるものが出来てくるように思いますね。

山口:熱はこれまで——たとえば半導体を作るにしても——だいたいにおいて邪魔者だったわけですが、最近考え始められているのは、熱が情報を持っているとすると、そこに新しい物理がでてくるということです。これは今まで、全く行われていなかった領域で、実験で熱を飛躍的にコントロールできるようになってきたことによって、理論とも合わせて発展できる部分なのではないかと考えています。

根本:そうですね。フォノンと熱は悩ましいです(笑)。例えば理論的なモデリングでは、私達が注目している物理系の「系」とその周りにある環境「熱浴」を考えます。このとき、「系」の方はどういった相互作用をしているのかなど、ある程度中身がわかっており、モデル化することができます。「系」が周りから受ける影響を、「熱浴」との相互作用として取り扱うわけですね。この「系」と「熱浴」の境目が、フォノンと熱の場合、特に曖昧になるように思います。熱が伝導するという輸送現象においても、本当には何が輸送されているのか、きちんと考え直さないといけないように思います。

このような、これまでの方法では捉えきれていない現象も、さまざまなハイブリッド量子物理を通して、きちんとした視点で定式づけられていくはずなんです。そしてその先に、新しいかたちのハイブリッドが見え始めてきているのではないかという気がします。





後半へ向けてどう展望しますか？

平山: 僕らは量子的な状態で情報を変換したり、移したりすることを「量子トランスデューサー」と言っていますが、具体的に何ができつつあるのでしょうか。ただ厳密に何をもって「量子トランスデューサー」と言うのかについては、議論の余地があると思うのですが……。

根本: 公募班の小坂先生のダイヤモンドNVセンターを用いた実験の成果はよい例だと思います。量子トランスデューサーは少なくとも2つの物理系のハイブリッドになりますが、やりやすい組み合わせもあり、これとは違った組み合わせで実現されているものもあります。一方で、なかなか挑戦的な組み合わせもありますね。

平山: そうですね、その他、超伝導とダイヤモンドのハイブリッドでも出来ているし、平川教授のテラヘルツ波も面白い展開になっています。

山口: 超伝導量子ビットからパラメトリック変換で光に量子状態を移すフォノン系のトランスデューサーも広く関心を集めています。また、マイクロなデバイスの集積化において熱のマネジメントをするような、熱の集積回路みたいなものもできるかもしれません。量子井戸を使った電子の冷却技術なども提案されており、まったくこれまでにない方向性で、おもしろいと思いますね。

平山: 後半はやはり、新学術として“ハイブリッド量子”を始めたことの成果がよいよ上がってくる時期なので、いろいろ進められてきたハイブリッドの中から確かにこれはおもしろいものが出た、意味があったと言えるよう、がんばらなければいけないと思います。一方、これまで取り組んできてますますわかってきたことは、それぞれの系における量子化の度合いが0から100%まで、言わばグレイスケールにな



っていて、量子100%ばかりではなく、それぞれに役に立つ領域があることです。もちろん僕らは量子性100%へ向けてチャレンジを続けるのだけれども、量子性がほとんどないような領域でも、私たちの社会や産業に非常に役立つものが生み出せることは、大いにあります。

根本: 前半の成果の中に新しい物理の芽がたくさん出てきているので、理論班では、それらを芽のまままで終わらせないために、ハイブリッド量子科学の体系として理解できるところまで進めたいと考えます。例えばセンシングが量子によってどう改良されるかについてなどはかなりクリアになってきました。指針を出すような一般論としてのハイブリッド量子科学の理論を構築し、一方で各実験系での多様な展開を導く——系統的な理論とそこから生まれる多様性の発現は物理理論の基本です。この両面で、実験系と組んで進めていくことが必要だと考えています。

取材・文：池谷瑠絵(情報・システム研究機構)



新規公募研究について

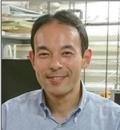
第二期の公募研究スタート

今年（平成30年）4月から、第二期の公募研究として、14件がスタートしました。ここに、本領域後半の公募研究のタイトル、研究担当者、概略を紹介します。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、本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ので、ここでは敢えて所属計画班は記載しません。電子波、スピン波による量子結合、超伝導系を中心にしたハイブリッド量子系、新しいTHz波の利用、複数の計画研究をまたぐ野心的な提案など、「これこそがハイブリッド量子系」と言わんばかりの挑戦的で質の高い研究が採択されました。ほぼすべての採択課題が計画研究と相補的になるもので、ハイブリッド量子に向けた領域全体のアクティビティを押し上げる素晴らしい陣容になったことを領域代表として大変嬉しく思います。また、5人の研究者が平成28年度からの前半2年に引き続き、後半も公募研究を継続することになりました。原子系と光のハイブリッド系の青木先生、光とフォノンのハイブリッド系の山本先生は新しい視点でのフォトンをベースにしたハイブリッド量子系の研究を推進しており、田畑先生は酸化物という計画研究にはない魅力的な材料系で、スピ

ン・フォノン結合を目指しています。泉田先生は計画研究で扱うことの多いカーボンナノチューブの新規量子物性を提案しており、ハイブリッド量子系の理論の本質的な部分を村尾先生が計画研究の理論班とも協力しながら推進しています。4年間公募研究を行うグループは、前半の成果が高く評価されたことを受けて、より一層の高みと完成度を目指して頑張ってくださいと思います。2年間はすぐに過ぎますが、すべての公募研究が計画研究をつなぎ、領域を活性化する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、2年後には次のステップに進んで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。今回も予想以上に素晴らしい研究者からの優れた提案が多数あり、どれを採択するかは大変難しい判断になりました。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）に心より御礼申し上げます。

東北大学 教授 平山祥郎

氏名	機関・所属・職名	テーマ	概略
 山本 倫久	理化学研究所・CEMS・ユニットリーダー	固体の電子波の量子もつれ制御	半導体量子干渉計中の電子波を電子間相互作用を介して結合させた電子波-電子波結合系や電子波-電子スピン結合系において、量子もつれを電氣的に制御する技術と学理を開拓します。
 島田 宏	電気通信大学・情報理工・教授	高品質トンネルスピインジェクタを用いた電荷・スピン・超伝導複合効果の研究	金属微小トンネル接合を舞台として、電荷・スピン・超伝導の複合効果を研究します。そのために、デバイス形成プロセスにイン・サイチュの室温原子層堆積法を導入し、高品質のトンネル・スピン・インジェクタの作製プロセスを開発します。
 安 東秀	北陸先端科技大・准教授	スピン波で接続したハイブリッド量子スピン系の実現	二つのスピン系をスピン波で接続したハイブリッド量子スピン系の実現を目指します。具体的には、ミリメートル以上のスピン波拡散長を有する磁性絶縁体のイットリウム鉄ガーネットを用い、長距離離れた磁性体とダイヤモンド中のNV中心スピンを接続します。
 毛利 真一郎	立命館大学・理工学部・助教	分極場による遷移金属ダイカルコゲナイドのバレー・スピン制御	窒化物半導体に原子層材料を埋め込んだ構造を作製し、窒化物半導体の分極場と原子層材料のバレー・スピン物性との関係を調べます。結晶方位の違いや圧力印可を利用して分極場を変化させ、バレー・スピン物性を制御することを目指します。
 久保 結丸	沖縄科学技術大学院大学・グループリーダー	ダイヤモンド超伝導3次元ハイブリッド量子系	3次元のマイクロ波共振器とダイヤモンド中の不純物スピンを用いて新規な超伝導-スピンハイブリッド量子系を実現します。
 野村 晋太郎	筑波大学・数理物質・准教授	光-電子スピン-核スピン格子ハイブリッド系の量子コヒーレント制御	光、電子スピン、核スピンのハイブリッド系の量子コヒーレント制御を行います。多数の電子スピン-核スピン間の相互作用の制御手法を追求し、ダイヤモンド中の核スピン格子間相互作用によって生じる量子状態を制御することを目指します。
 武田 淳	横浜国立大学・工学系研・教授	テラヘルツ近接場による超高速ナノ空間電子マニピュレーション	位相を完全制御した単一サイクルのテラヘルツ波と走査トンネル顕微鏡を組み合わせ、所望のテラヘルツ近接場を創り出し、トンネル電子を自在に量子操作する近接場分光技術を開発します。
 井上 修一郎	日本大学・量子科学研究所・教授	プラズモニック量子デバイスの開発とその量子ウォークへの応用	SiC中のSi空孔による単一表面プラズモンポラリトン(SPP)の励起、超伝導転移端センサによるSPPの直接検出・個数識別を実現し、最終的にはプラズモニック量子ウォーク回路の作製を目指します。
 青木 隆朗	早稲田大学・理工学術院・教授	多原子と多光子の強結合ハイブリッド量子系の研究	ナノファイバー共振器のウェスト部に多数の原子を同時にトラップすることで多原子強結合共振器QED系を実現し、この系における非線形光学現象や量子光学現象の観測を目指します。
 田畑 仁	東京大学・工学系研・教授	非対称人工格子によるスピン・フォノン結合制御とフォノン励起	立方晶ガーネット型酸化鉄薄膜において、部分的元素置換による3次元局所格子歪制御および非対称人工格子形成により空間反転対称性を人為的に破ることで、スピンフォノンカップリングと光励起相互作用の制御を目指します。
 山本 俊	大阪大学・基礎工学研究科・准教授	光とフォノンのハイブリッド量子システム	室温下で容易に量子性が観測される光と様々な物理系で実現されるフォノンとの結合を利用したハイブリッド量子系を目指して研究を行います。また、光の特性を利用した領域内の他の物理系とのハイブリッド量子系も模索していきます。
 泉田 渉	東北大学・理学系・助教	カーボンナノチューブにおけるマヨラナ粒子	カーボンナノチューブと超伝導体のハイブリッド構造において、ナノチューブの電子状態を理論的に調べます。これにより、チューブ表面の曲率により誘起されるスピン軌道相互作用と超伝導関連のもと、マヨラナ粒子がどのような状況において現れるのかを示します。
 村尾 美緒	東京大学・理学系・教授	ハイブリッド量子系における量子動力学プロセスの実装理論	未知のパラメータを特定することなく量子系の動力学を制御・加工する「量子動力学プロセッサ」をハイブリッド量子系で実現することを目指し、現実的な物理系に適応した量子アルゴリズムの提案を行います。
 内山 智香子	山梨大学・総合研究部・教授	光励起輸送の自律組織化を目指した制御プロトコルの開発	生体の環境系利用ストラテジーを応用し、自律的な光励起輸送を引き起こすプロトコルの開発を目指します。

研究成果から

フォニック結晶導波路を用いた 超音波振動のパルス圧縮技術

鐘をたたくと、その形や大きさによってきまる特定の周波数の音が発生することはよく知られています。このように機械的な振動に対して共振を持つ構造を機械共振器と呼びます。この音の高さは構造の大きさに反比例するため、最新のナノ加工技術を用いて作製した微小サイズの機械共振器では、超音波領域の高い周波数の振動が引き起こされます。最新の移動体通信システムでは、この現象を利用した表面弾性波フィルタや発振素子などが、送受信した高周波信号の処理に活用されています。

これまでNTTの研究チームでは、微小機械共振器の技術を用いて作製したフォニック結晶と呼ばれる新しい「音の人工結晶」を用い、超音波振動の伝搬を制御する技術の研究を進めてきました。研究で使用したフォニック結晶は、図に示すように太鼓の膜を一方方向に伸ばしたような微小な振動を伝える路（導波路）から構成されています。導波路端に設置した電極（図中右上）にパルス状の交流電圧を加えることで、圧電効果を通じて超音波振動のパルスを誘起することができます。この振動は導波路を伝搬していくわけですが、導波路の逆側（図中左下）における振動をレーザー干渉計を用いて計測することにより、フォニック結晶における振動パルスの伝搬速度（群速度）の周波数依存性、いわゆる群速度分散を実験的に明らかにすることができます。

一般に、群速度分散を持つ導波路では、異なる周波数の波が異なる速度で伝搬するため、異なる周波数成分を含んでいるパルスの形状は徐々に広がっていきます。しかし、逆にこの性質を利用し、導波路端から群速度分散の効果をキャンセルするように周波数変調した振動パルスを入力すると、パルス形状は伝搬とも

に狭くなり、結果としてピークにおける振動振幅を増大させることができます。今回、作製したフォニック結晶の群速度分散を精密に測定し、印加するパルスを最適化することにより、実際にパルス圧縮が実現できることを実証しました。この技術では、超音波振動波形の圧縮比や圧縮の場所、タイミングを精密に制御できるようになり、微小機械共振器を用いた信号処理デバイスの小型化や高集積化に繋がることが期待されます。

今回はフォニック結晶の分散効果を利用して振動の波形圧縮を実現しました。今後は、素子の非線形効果を取り入れて、ソリトンをはじめとするより高度な波形制御の実証に取り組んでいく予定です。さらに、素子の微細化を進めていき、ギガヘルツの超音波振動で動作する高周波フォニック結晶素子の作製も進めていきます。この構造はAlGaAs/GaAsのヘテロ構造で構成されているため、電子系やスピン系、フォトンなどとのハイブリッド構造への応用が期待されます。

NTT物性科学基礎研究所 上席特別研究員 山口浩司

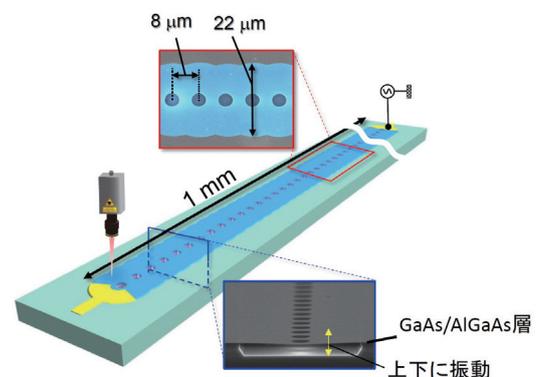


図 フォニック結晶導波路の構造

References

掲載論文:Nature Commun. 9, 1331 (2018) (DOI: 10.1038/s41467-018-03726-7)

著者:M. Kurosu, D. Hatanaka, K. Onomitsu, and H. Yamaguchi

題目:"On-chip temporal focusing of elastic waves in a phononic crystal waveguide"

計測をハイブリッドにデザインする

測定には、どこまで正確に測れるかという精度の限界があります。物理学でも科学技術でも、起こっている現象を確認し、実証するには「測定」が必須で、私たちの科学・技術は測定の上に成り立っていると言うこともできます。測定精度の限界は、すなわち技術の精度の限界であり、どこまで正確に測れるかという問いは物理学の根源的問いであるとともに、私たちの技術の限界にも直結している重要なテーマです。ナノテクノロジーでは、ナノメートル（1メートルの10億分の1の長さ）の物理的スケールを特徴とする技術で、この領域の一番小さなスケールではすでに私たちの測定の限界が見え始めています。この限界は、量子標準限界（またはショットノイズ限界）と呼ばれる限界で、測定方法が古典物理学的である限り、これ以上は精度をあげることができないという物理学が示す本質的な限界です。量子計測は、量子的な性質を用いて、この古典物理的限界をいかに破るかへの挑戦です。

量子の性質を用いることで、この古典的な限界を破る計測が可能になることはだいぶ前から知られています。しかしながら、この量子のもつ可能性を実際の計測として実現するのはなかなか難しいのが現状です。もっとも本質的な問題のひとつは、量子の性質を計測装置に（プローブ）に使うため、雑音に対して弱く、量子計測のもつ精度を取り出すことができないことです。私たちは、新学術領域の研究で、プローブの量子状態を工夫することにより、雑音に強い量子計測の方法を理論的に示しました。

まず、計測のターゲットとしては、スピン ($s=1/2$) の2つの状態（下向き状態と上向き状態）間の共鳴周波数の推定を考えることにします。N個のスピンからなる量子プローブを考えると、古典計測の感度限界はスピン数Nに対して

$S_{SQL} = Nt$ と線形であるのに対し、量子的な感度限界を与えるハイゼンベルグ限界では、 $S_{HL} = N^2t$ となり、因子Nの増強が期待できます。しかしながら、ハイゼンベルグ限界は、計りたい量に対して特定の量子状態に準備して、高い感度を達成することで得られるため、雑音に弱く量子的な状態は時間とともに劣化します。このため量子性によって得られる感度のゲインは、時間が長ければ長いほどよいわけではなく、もっとも効果的に得られる最適な計測時間 t_{opt} が存在し、量子的な感度限界は $\max_t(S(t))$ で与えられます。

そこで私たちは、これまであまり考えられてこなかった量子プローブの中における量子的な相互作用に着目し、スピン間にむしろ強い相互作用を与えることで熱雑音に対して強い量子測定の方法をデザインできることを見出しました。図1aに量子プローブの様子を示します。この量子系をプローブに用いて、図1bのように量子計測を行います。量子プローブのエネルギー・スペクトラムは、相互作用により変化するので、これをより安定な計測へ利用します。図2は2体のスピン相互作用の場合のときのエネルギー・スペクトラムを示したもので、 $J > \omega$ のときには、 ω の情報は2つの基底状態の相対位相が担っていることがわかります。この2つの場合の感度を数値的に比較したものが図3で、強い相互作用により t_{opt} が大きくなるようにすることができ、より高い感度を達成することが可能になっていることを示しています。

本研究はnpj Quantum Informationで論文発表された研究成果で、新学術領域「ハイブリッド量子科学」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

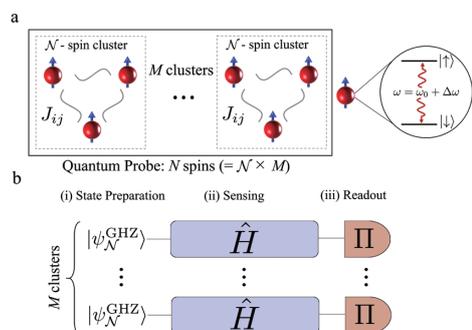


図1：aは量子プローブの様子で、bはそのプローブを用いた量子計測の概念図。

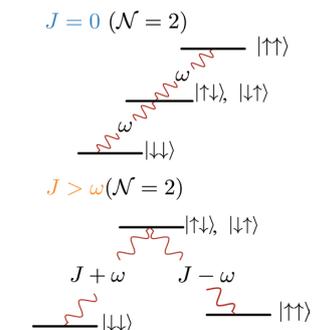


図2：量子プローブが2体のスピン相互作用の場合のときの $J = 0$ (上)と $J > \omega$ (下)に対するエネルギー・スペクトラム。

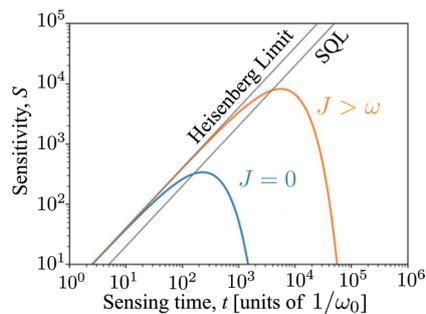


図3：量子プローブが2体のスピン相互作用の場合のときの $J = 0$ と $J > \omega$ に対する感度を数値的に比較したグラフ。

References

Shane Dooley, Michael Hanks, Shojun Nakayama, William J. Munro, and Kae Nemoto, "Robust quantum sensing with strongly interacting probe systems", npj Quantum Information, volume 4, Article number: 24 (2018)

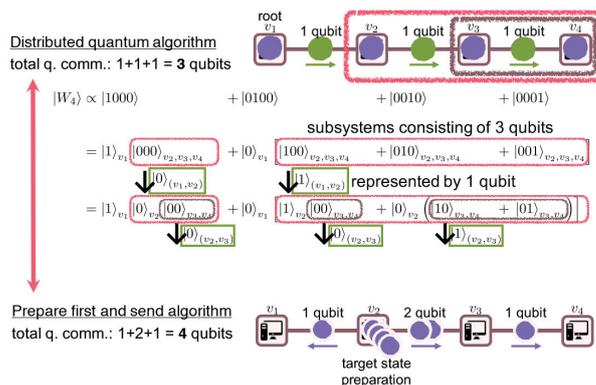
RESEARCH

量子ネットワーク上で多体エンタングル状態を効率良く作成する分散型量子アルゴリズム

各ノードに配置された量子計算機をツリー型の量子ネットワークで接続したクラスター量子計算機において、ノード間で共有する任意の多体エンタングル状態を、最小の量子通信によって作成する分散型量子アルゴリズムを構築しました。このアルゴリズムでは、ネットワークの形に応じた多体エンタングル状態の表現を求めることで、各ノードで行う量子計算とノード間での量子通信の最適な組み合わせを選び、エンタングル状態を量子ネットワーク上で少しずつ拡張して作成していきます。このため、量子通信のみならず、ノードでの量子

計算に必要な最大量子メモリも節約することができます。また本研究は、未解明の点が多い多体エンタングルメントに関して、ネットワークに応じて分配された2体エンタングル状態の集合から多体エンタングルメントを生成する変換という、操作論的な意味を持つ新しい多体エンタングルメント測度を提案するものです。情報論的な観点からこの新しい多体エンタングルメント測度を理解するために、ブロック符号化を用いた近似的な多体エンタングル状態の作成について2次の漸近論による解析を行い、多体エンタングルメントに特徴的な性質を見出しました。

東京大学 教授 村尾美緒



An example of generating a W-state over a line network

ツリー型クラスター量子計算機において任意の多体エンタングル状態を最小の量子通信で作成する分散型量子アルゴリズム

H. Yamasaki, A. Soeda and M. Murao, Phys. Rev. A 96, 032330 (2017)

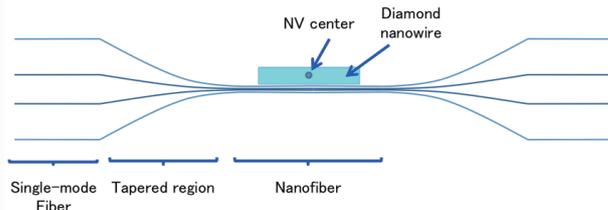
RESEARCH

ナノ光ファイバーを用いたダイヤモンドナノワイヤー中のNV中心からの高効率な光子の取り出し

ダイヤモンド結晶中のNV中心は優れた光学特性を持つことから、単一光子源や量子メモリ等、光子との相互作用を活用した多くの研究が進められています。ここで、ダイヤモンドの屈折率は2.42と高く、ダイヤモンド結晶外部への光子の高効率な取り出しは重要な課題です。我々は、ワイヤー状のダイヤモンドナノ結晶（ダイヤモンドナノワイヤー）の導波モードとナノ光ファイバーの導波モードを結合させることで、ナノワイヤー中のNV中心の放射を高効率に光ファイバーに集光できることを見出しました。図に示すように、ナノ光ファイバーの側面にダイヤモンドナノワイヤーを互いに平行に配置すると、それぞれの導波モードの重ね合わせによって表される2つのスーパーモードが固有モードとなります。NV中心の放射によって励起された2つのスーパーモードがナノワイヤー端面に到達したとき、2つの

モードの位相差が π の奇数倍であれば、これらの重ね合わせはナノ光ファイバーの導波モードに他ならず、高効率にナノ光ファイバーに結合します。ナノ光ファイバーの半径、ナノワイヤーの半径、およびナノワイヤーの長さに対する集光効率を電磁界計算により求めたところ、最大で75%の集光効率が見られました。

早稲田大学 教授 青木隆朗



ナノ光ファイバーを用いたダイヤモンドナノワイヤー中のNV中心からの高効率な光子の取り出しの概要

Y. Yonezu, K. Wakui, K. Furusawa, M. Takeoka, K. Semba and T. Aoki, Sci. Rep. 7, 12985 (2017)

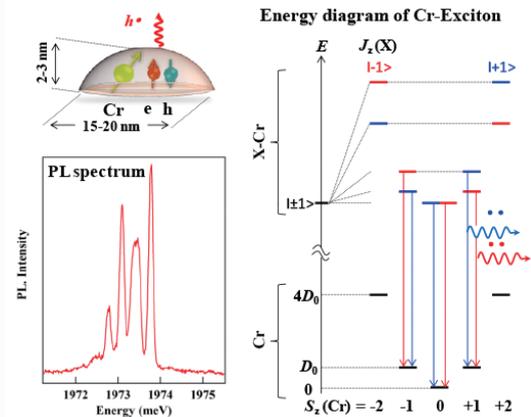
RESEARCH

半導体ドット中の単一Crスピンの検出と制御

近年、種々の系で単一のスピンを操作し、量子演算への応用を目指した研究が行われています。私たちは単一スピンの系として量子ドット中に遷移元素の原子1個を含む試料を対象とし、ドット中の単一磁性スピンの振舞いを調べ、制御する手法の開拓を目指して研究を行っています。ドット1個にちょうどCr原子1個を含むCdTe自己形成ドットをMBEにより作製し、ドット中の励起子発光測定によりCrスピンの状態を調べました。その結果、Crスピンの準位は格子歪により分裂し、さらに励起子との交換相互作用により分裂が生じるというエネルギー構造が明らかとなりました。さらに、共鳴励起によりCrスピンの特定の成分を生成し、発光の時間変化を測定することでCrスピンのダイナミクスを調べることができました。励起子の存在しない暗状態でのCrスピンの緩和過程の観測では、マイクロ秒オーダーの長い寿命を持つことが明らかにされ、単一Crスピンを量子ビットとして用いる量子演算の可能性が示されました。

今後は、格子歪によるCrスピン準位の分裂を利用して、表面弾性波によりCrスピンの状態を動的に変調することを目指して研究を進めます。

筑波大学 教授 黒田眞司



単一Crスピンを含むCdTeドット(左上)のPLスペクトル(左下)、格子歪および励起子との交換相互作用によるCrスピン準位の分裂(右)

EVENT

セミナー報告 「量子センサー」

2018年4月20日、ダイヤモンドを用いたセンサーの実験で世界的にご活躍されている東京工業大学の波多野睦子教授をお招きし、理論班の松崎雄一郎研究主任(NTT物性科学基礎研究所)と仲山将順特任研究員(東京大学)を迎えて、「量子センサー」と題したセミナーを国立情報学研究所で開催しました。まず波多野教授から、ダイヤモンドセンサーの実装・応用に関する実験技術の紹介と、量子情報科学の特性を利用するセンサー実現への展望についてお話し頂きました。続いて松崎研究主任より、量子センサーを雑音から保護するために量子テレポーテーションを利用する手法の理論的提案を解説頂き、最後に仲山特任研究員より、プローブとするスピン集団間の相互作用を利用して熱雑音下においても高精度な量子センサーを実現する手法の理論的提案を解説頂きました。講演の途中も聴講者から多くのご意見、ご質問が寄せられ、特に最先端の理論と実験から見えてくる量子センサー実現の将来展望について活発な議論が交わされました。量子センサーは計測技術だけに留まらず、量子コンピュータなどの要素技術としても重要な役割を果たします。量子センサーの実現やその研究を介した新たな発見を見出すためにも様々な理論や実験をハイブリッドしていくことは重要であるため、今後もセミナーを開催して知識の共有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



波多野教授の講演の様子

フィードバック

NTT物性科学基礎研究所 上席特別研究員 山口浩司

学生時代、その親しみやすい文章が気に入って、朝永振一郎先生の著書にしばしば目を通しました。中でも「物理学とはなんだろうか」は物理学の歴史的、社会的な意味を再認識させる名著であり、物理学科に入ってすぐに購入した本の一冊であったように思います。そこにノーベル物理学賞のメダルについて書かれている部分があります。科学 (Science) の神スキエンチアが自然 (Nature) の女神ナツラの顔のペールをそっと持ち上げ、女神の素顔を見ようとしている姿が描かれているとのこと。物理学には理論と実験という二人の役者が必要なのはご存じのとおりですが、実は実験という「人為的な」行為が本当に自然のありのままの姿を反映するののかという点について、物理学が確立する当初はいろいろと議論があったようです。

例えばガリレオは重力加速度が物の重さによって変わらないということ、坂を転がる球を用いた実験で示したことは有名です。これに対し、坂を用意するという「人為的な」環境によって観測できる姿は本当の自然ではない、という論調で反対したのは詩人のゲーテでした。見せたがっていない姿を実験により「むりやり」明らかにするのは、自然に対する冒涇だと。「実験」という強力な道具により支えられている物理学において、この主張は学問自体が否定されるかどうかの大問題です。メダルの絵は、女神の失礼にあたらないように「そっと」覗いて「実験」することにより自然の本質を探ることがサイエンスである、ということを表しているわけです。

さて、現代物理学においては、古典系であれ量子系であれ、測定系が被測定系に与える影響が重要になっていることはご存じのとおりです。我々が研究を進めている

ハイブリッド量子系というのを眺めてみると、それはこれら二つの相互作用を包括的に研究できる重要な実験プラットフォームであるということが出来ます。例えばフォトンとフォノンを結合させるオプトメカニクスの研究では、フォノンの状態変化をフォトンが検出し、それによる反作用によって再びフォノンの状態が変わります。このようなフィードバック効果はハイブリッド系において共通にみられる現象であり、それらをいかに活用するかは、その将来応用において極めて重要だと言えるのではないのでしょうか。

我々の住む人間社会においても、測定が与える反作用の影響がさまざまな社会現象として顔を出しています。例えば株値に目を向けると、株値を「測定」した人間（あるいは最近では人工知能でしょうか）が「株の売買」という反作用を与え、それがさらに株値を変動させることにより多くの予測不可能な経済状態を引き起こします。ある時は株値の暴落となり、ある時には乱高下となります。後者はフィードバックによる自励振動に他なりません。また、ラーメン屋に人が並び始めると、それを「測定」した人々がその列に続くことにより、さらなる行列を引き起こします。これも測定が与える反作用の効果を示す身近な例といえます。情報の伝達がますます速くなる昨今、このような「測定」の反作用がさらに大きな影響を社会に引き起こすのではないかと想像されますが、あまりに大きな反作用は社会を不安定にさせるだけでなく、我々人間もそれに振り回されたくありません。ノーベル賞のメダルの精神に立ち返り「そっと」素顔を観察する程度にできないかなと、超高速の情報化社会に生きる私はひそかに思う次第です。

「新学術領域」事務局からのお知らせ

□第7回領域会議

日程:2018年8月6日(月)~7日(火)

会場:名古屋大学

ナショナルイノベーションコンプレックス

本領域の研究成果や進捗状況、さらには領域内外の共同研究について、すべての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いたします。また、今年度から新たに加わった公募採択研究の皆さまにもご自身の研究紹介をしていただく予定です。

□第5回若手研究会

日程:2018年8月8日(水)

会場:名古屋大学 未来材料・システム研究所

研究所共同館 2Fホール

若手講師による講義のほか、アクティブラーニングを取り入れた討論会や他己紹介など、新たなイベントも企画しています。領域代表の平山先生にもご参加いただき、学生さんや若手研究者へ向けた特別講義も予定しています。

□国際ワークショップ(パリ)

日程:2018年10月1日(月)~2日(火)

会場:École Normale Supérieure

国際共同研究先のエコールノルマルにて国際ワークショップを開催します。日本とフランスから、それぞれ約10名の研究者が参加して口頭発表や議論をおこなう予定です。

Science of Hybrid
Quantum Systems<http://quant-trans.org/hybridqs/>