

量子情報の視点でダイヤモンドを眺めると？

(小坂 英男 根本香絵 Andrew Greentree)



Andrew Greentree
RMIT University, Melbourne, Australia

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

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の実験研究などを行ってきて、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、いつまでもくるく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、スイート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くる、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：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ろいろ使い道があります。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のか、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「〇〇の人」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て、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。たとえばたくさんの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、たくさんの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、サイバー攻撃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。

●量子の新しい性質が開拓する有望な応用例



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も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というわけです。

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も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——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