



FIRST Project on Quantum Information Processing

News Letter

最先端研究開発支援プログラム「量子情報処理プロジェクト」ニュースレター

December 2010

No.

2

CONTENTS

- 02 プロジェクト事務局からの連絡等
- 03 海外研究動向
- 04 最近の研究成果
- 06 サブテーマミーティング報告
- 09 サイエンスアウトリーチ
- 10 夏期研修会
- 14 研究室紹介
- 16 エッセイ

●プロジェクト組織

中心研究者：山本 喜久(国立情報学研究所/スタンフォード大学)

共同提案者：樽茶 清悟(東京大学)、蔡 兆申((独)理化学研究所/日本電気(株))

研究支援担当機関総括責任者：東倉 洋一(国立情報学研究所)

サブグループ紹介

○印…リーダー

●量子情報システム

○山本 喜久(国立情報学研究所/スタンフォード大学) Alfred Forchel(Universität Würzburg) Klaus Lischka(Universität Paderborn)

●量子計測

○山西 正道(浜松ホトニクス(株)) 藤澤 利正(東京工業大学) 太田 剛(NTT物性科学基礎研究所) 竹内 繁樹(北海道大学)
平野 琢也(学習院大学) 向井 哲哉(NTT物性科学基礎研究所)

●量子標準

○香取 秀俊(東京大学) 洪 鋒雷((独)産業技術総合研究所) 小山 泰弘((独)情報通信研究機構)

●量子通信

○井元 信之(大阪大学) 佐々木 雅英((独)情報通信研究機構) 古澤 明(東京大学) 小坂 英男(東北大学)

●アナログ量子コンピューター/量子シミュレーション

○高橋 義朗(京都大学) 五神 真(東京大学) 占部 伸二(大阪大学)

●理論

○都倉 康弘(NTT物性科学基礎研究所) フランコ ノリ((独)理化学研究所) 小川 哲生(大阪大学) 小芦 雅斗(大阪大学)
根本 香絵(国立情報学研究所) ロドニー バン ミーター(慶應義塾大学)

●超伝導量子コンピューター

○蔡 兆申((独)理化学研究所/日本電気(株)) 中村 泰信((独)理化学研究所/日本電気(株)) 仙場 浩一(NTT物性科学基礎研究所)
高柳 英明(東京理科大学) 前澤 正明((独)産業技術総合研究所) 日高 睦夫((財)国際超電導産業技術研究センター)

●スピン量子コンピューター

○樽茶 清悟(東京大学) 北川 勝浩(大阪大学) 工位 武治(大阪市立大学) 伊藤 公平(慶應義塾大学)

アドバイザー

●光 末松 安晴((公財)高柳記念電子科学技術振興財団) 覧具 博義(東京農工大学)

●原子 清水 富士夫(電気通信大学) 藪崎 努(京都大学)

●半導体 小宮山 進(東京大学) 榎 裕之(豊田工業大学)

●超伝導 立木 昌(筑波大学) 前川 禎通((独)日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター)

●理論 上村 洸(東京理科大学) 和達 三樹(東京理科大学)

プロジェクト事務局

●技術担当 Tim Byrnes(国立情報学研究所)
宇都宮 聖子(国立情報学研究所)

●事務担当

室長 片山 秀(国立情報学研究所)
事務参事 山本 浩幾(国立情報学研究所)
事務参事補 青木 香穂里(国立情報学研究所)
窪田 しおり(国立情報学研究所)
塩田 容子(国立情報学研究所/山本研究室)

NEWS

■山本喜久教授(国立情報学研究所/スタンフォード大学)がHermann Anton Haus Lecturerに選ばれました

賞の概要：MIT Institute Professorであった Hermann Anton Haus教授の教育・研究における卓越した業績を記念して設けられたレクチャーシリーズであり、これまで以下6名がMITで記念講演を行っている。Herwig Kogelnik (2004)、H. Jeff Kimble (2006)、Eli Yablonovitch (2007)、Stephen E. Harris (2008)、Paul B. Corkum (2009)、山本 喜久 (2010)。

講演内容の詳細はHPをご覧ください。http://www.rle.mit.edu/hausfund/

受賞者のコメント：

30年ほど前のHaus先生との出会いが、私が量子光学の研究分野へ入るきっかけとなりました。Hermann Anton Haus Lecturerに選ばれ、大変嬉しく、光栄に思っています。4月21日“A Half-Matter/Half-Light Laser”というタイトルで講演し、Erich Ippen先生、Dan Kleppner先生、Wolfgang Ketterle先生などたくさんのMIT研究者の方々に聞いて頂きました。



INFORMATION

■今後のサイエンスアウトリーチ活動

*本プロジェクトでは、サイエンスアウトリーチ活動の一環として、国立情報学研究所市民講座で毎年一般市民向けの講演をすることになりました。本年度は、2011年3月23日(水)平成22年度国立情報学研究所市民講座特別回「新しい情報社会の扉を開く量子技術～量子コンピューターは本当に実現できるのか?～」(講師：山本 喜久(国立情報学研究所))です。

関連サイト：<http://www.nii.ac.jp/>

*全国のスーパーサイエンスハイスクール(SSH)に出張講義を予定。詳細はHPをご覧ください。http://www.first-quantum.net/

■国立情報学研究所量子情報国際研究センター設立に伴うシンポジウムを開催します

最先端「量子情報処理プロジェクト」をサポートするため、国立情報学研究所は、2010年11月1日に量子情報国際研究センターを設立しました。これを記念して、以下のシンポジウムを開催します。

開催日：2011年3月10日(木) 13:00～17:10 開催場所：如水会館(千代田区一ツ橋2-1-1)

講演者：坂内正夫所長(国立情報学研究所)、荒川泰彦(東京大学)、蔡兆申(理化学研究所/NEC)、樽茶清悟(東京大学)、都倉康弘(NTT物性科学基礎研究所)、香取秀俊(東京大学)、根本香絵(国立情報学研究所)、Charles Bennett(IBM)、山本喜久(国立情報学研究所/スタンフォード大学)

問合せ先：国立情報学研究所山本研究室 (tel:03-4212-2506)

光格子時計の10年とこれから

東京大学 教授
香取 秀俊



アルカリ原子のBECフィーバーの論文競争を横目に次の研究を模索していた1997年、日々の論文に一喜一憂せずに自分のストーリーでゆっくり研究を楽しめる原子を探していた。精密計測に適し、その当時のレーザー技術で手が届くのがアルカリ土類だった。Mg、Ca原子は光標準候補としてPTB(独)、NIST(米)、Hannover大がラムゼー分光、原子干渉実験で成果を上げていた。その点、Sr原子は90年代初めの東大・清水研グループの報告が最後だった。

分光のデモンストレーションに重宝される線幅7kHzのスピン禁制遷移でレーザー冷却すると、Sr原子は0.5 μ Kまで冷えた。流行りのBECを目指して光トラップ中でレーザー冷却するには、トラップの光シフトが邪魔に思えた。これが時計につながる光シフト除去の発想の原点だ。光格子時計の設計図を示したのは2001年の9月、フィールドの研究者が一堂に集う古き良き時代の会議、後の光格子時計の主要プレーヤーはその聴衆だった。東大グループが魔法波長で時計遷移の光格子分光をし、一方、SYRTE(仏)グループが飽和吸収分光でその周波数を計測した03年は、光格子時計実験の幕あけになった。初期のSrの実験を一緒に立ち上げた井戸君(現NICT)が02年にJILA(米)に渡るとJILAは急速に実験を立ち上げた。06年、東大・産総研、JILA、SYRTEグループによる世界三極でのSr光格子時計の比較が実現し、同年9月の国際度量衡委員会でSrの時計遷移周波数が「秒の二次表現」に採択される。

「光格子時計」手法は電子の全軌道角運動量がゼロの2つの(準)安定状態をもつ原子種に適用できる。06年にNIST、09年に産総研グループがYb光格子時計を実現し、08年には東大、SYRTEグループが(黒体輻射シフトが一桁小さい)Hg原子への一步を踏み出す。これら光格子時計の開発は約20のグループで進む。

なかでもSrの3拠点とNISTのYbでは、国際原子時(TAI)で制限される不確かさが実現し、事実上、SI秒は光格子時計で読みかえ可能になった。当初目論んだ静かな研究のパラダイスは戦場と化した。標準の人はこれをFriendly competitionという。みんな揃って比較精度を上げることが、標準としての最高のアピールとなるからだ。

光格子時計の好敵手のイオン光時計は、30年前のDehmeltの夢を、その流れをくむWineland(NIST)らがAl⁺(とHg⁺)で実現した。これらは黒体輻射シフトの少なさで他の光時計を圧倒する。これまで実験的に解明された10⁻¹⁷の不確かさでは、光格子、イオンとも致命的な困難はないが、10⁻¹⁸で光格子の多体物理が研究の興味となるか、あるいは、単一イオン時計の量子射影ノイズ以上の悪夢となるか、今後の展開が楽しみだ。

次の目標は、TAIの不確かさ1 \times 10⁻¹⁵を超えて光時計を繋ぐことだ。欧州圏では光ファイバによる広域の周波数リンクが検討され、ドイツでは既に1000kmが繋がった。本邦では産総研(つくば)ー東大のファイバリンクが08年に実現し、東大ーNICT(小金井)で光格子時計のファイバリンクが進行する。欧州宇宙機構(ESA)ではEGE(Einstein Gravity Explorer)で宇宙運用できる光時計の開発を進めている。

光格子時計とイオン光時計は、2019年の国際度量衡総会で議論が予定される次世代時間標準の有力候補だ。人類が1 \times 10⁻¹⁸の不確かさの原子時計を手にするとき、時計の同期の概念は一変する。地上わずか1cmの高度差が、重力で歪んだ時空での時間合わせの困難を露呈させる。これは超高精度原子時計の新たな役割を創出し、一方で、時計を時空間の歪みの少ない深宇宙へもちだす議論は一層現実味を帯びることだろう。

1 ナノメートルスケールでの原子間相互作用の制御

興味ある量子多体系を制御性のいい別の量子多体系でシミュレートすることは、量子情報処理研究の重要な研究分野であるという認識が近年高まっています。特に、中性原子から構成される量子多体系においては、原子間の相互作用はその系の振る舞いを決定する重要なパラメーターであり、これを制御する技術を開発することは、量子シミュレーションの研究において大変重要です。幸い、超低温の量子気体の研究においては、「フェッシュバハ共鳴」と呼ばれる技術があり、さまざまな可能性を広げてきました。たとえば、超低温分子の生成、分子のボース・アインシュタイン凝縮とバーディーン・クーパー・シュリーファー状態のクロスオーバー現象の研究、さらには、ボースノバと呼ばれる超新星のシミュレーション、さらにエフィモフ状態と呼ばれるユニバーサルな3体束縛状態の研究などが、この「フェッシュバハ共鳴」

法を駆使することにより、可能になってきました。

ただし、これらの研究では、磁場を用いて「フェッシュバハ共鳴」現象を誘起しているため、通常の原子集団の大きさである数10ミクロンの大きさでは、空間的にはほぼ均一な制御しか可能ではありませんでした。京都大学の研究グループ（リーダー：高橋義朗）では、これまでに、光を用いた新しい「光フェッシュバハ共鳴法」の開発に成功していましたが、今回、この方法の可能性をさらに発展させて、ボース・アインシュタイン凝縮体に対して、ナノメートルスケールでの空間分解能で原子間相互作用を高速に制御することに成功しました。これにより、これまで考えられなかった様々な量子シミュレーション研究が可能になります。この成果は、Phys. Rev. Lett. 105, 050405 (2010)に掲載されました。

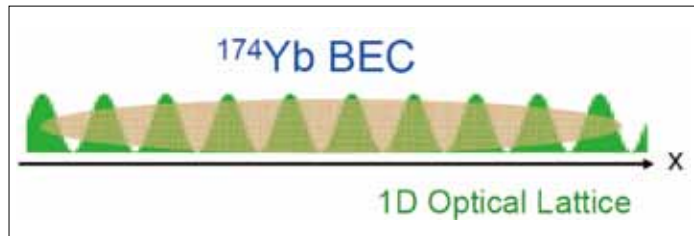


図1 (a)

図1 (a): 今回の実験の配置。イッテルビウム原子 (^{174}Yb) のボース・アインシュタイン凝縮体に278nmの格子間隔の光定在波を照射して、この間隔で、原子間相互作用を変化させる。

(b): 位相変調されたボース・アインシュタイン凝縮体の回折パターン。図1 (a) のような周期的な強度分布をもった光を加えることにより、原子は回折させられる。

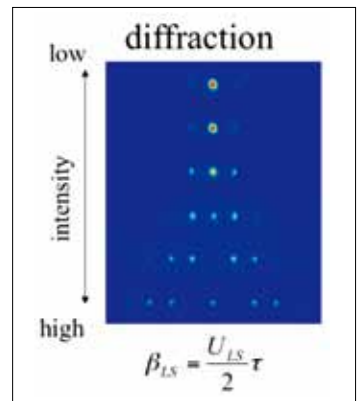


図1 (b)

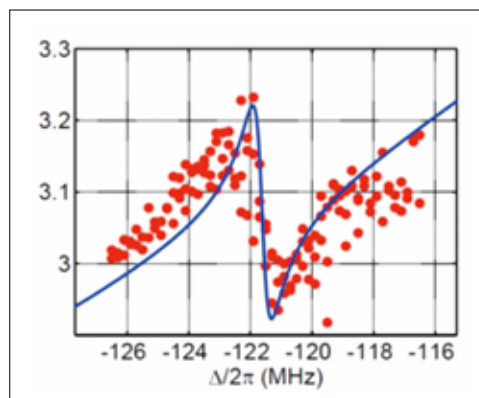


図2 変調指数の分散的振る舞い。光会合共鳴の付近での、分散的な変調指数の変化が、原子間相互作用が周期的に変化していることを意味している。

1次元周期系スピン鎖Lloydモデルの構築

三重らせん対称性をもつスケラブルな電子スピン

スケラブルな量子ビット系の構築は、量子コンピューターの実現を目指すすべての量子ビット系が直面する共通の難題です。これを解決するアプローチとして、Seth Lloydはaddressableな莫大な数の量子ビットリソースを準備する代わりに、周期性をもつスピン量子ビット系の1次元鎖モデルを提案しました(S. Lloyd, *Science*, 261, 1569-1571 (1993); S. Lloyd, *Sci. Am.* 73, 140-145 (1995)).。本プロジェクトのサブテームグループ「スピン量子コンピューター」の北川らは、このLloydモデルを量子コンピューターに実装する量子回路を2005年に発表し、1次元鎖モデルである(ABC)nスピン系に対してはそれぞれのスピン量子ビットを操る16種類のパルス共鳴周波数を用意するだけで、計算時間がnの指数関数のオーダーでスピードアップすることを理論的に示しました(Y. Kawano, S. Yamashita, M. Kitagawa, *Phys. Rev. A* 72, 012301-13 (2005)).。しかしながら、この有用なLloydモデルを検証するスピン量子ビット系が物質系(Matter Spin-Qubits)として具体的に提案されたこともなく、またどのような指針で構築すればよいのか、無論、物質系が合成されたことは、これまでありませんでした。

一方、分子の電子スピンを量子ビットとする実験な試みは、量子コンピューター／量子情報処理技術の研究分野では最も遅く登場しましたが、tailor-madeの設計技術を適用できる分子スピンが、上記の共通の課題を克服するアプローチとして注目され始めました。「スピン量子コンピューター」のサブテームグループ(大阪市大・院・理の工位ら、大阪大学・院・理の森田ら、同基礎工の北川)は、電子スピン量子ビット系のABCをaddressableに識別するには、A、B、Cに属する電子スピン量子ビッ

トのgテンソルが互いに異なるように設計することが不可欠であることをすでに示していました(g-tensor engineeringと命名)。今回、同サブテームグループは、三重らせん対称性を巧みに利用して超分子化学的に設計したmetallo-helicates(金属イオンを内包するヘリックス構造をもつオリゴイミダゾール錯体分子、図1参照)を初めて合成・単離し、金属イオンの電子スピン量子ビット間でg-tensor engineeringが実現していることを証明しました。

緑色で示す金属陽イオンは、電子スピン量子ビットをもつ開殻系でも、電子スピンの打ち消しあった閉殻系でもよいだけでなく、溶液中でもこれらのhelicatesの右巻き・左巻きのらせん構造は解けることはない、極めて安定な大きな錯体分子であることも示しました。この安定な性質を使って、少量の開殻系helicate qubitを大量の閉殻系結晶格子中に自在に希釈することができるので、量子ビットのデコヒーレンス時間を延ばすことができます。

論文では、DNAバックボーンの利用にも言及して、高度な分子合成技術をもつ化学者や物質科学者にとって、量子コンピューターの研究領域が非在来型の思考では捉えきれない魅力ある、チャレンジな物質開発の課題を提供していることを指摘しています。

この成果は、アメリカ化学誌、*J. Am. Chem. Soc.*, 132, 6944-6946 (2010)に掲載されました。

(Y. Morita, Y. Yakiyama, S. Nakazawa, T. Murata, T. Ise, D. Hashizume, D. Shiomi, K. Sato, M. Kitagawa, K. Nakasuji & T. Takui, "Triple - Stranded Metallo-Helicates Addressable as Lloyd's Electron Spin Qubits", *J. Am. Chem. Soc.*, 132, 6944 - 6946 (2010) : DOI : 10.1021/ja102030w)

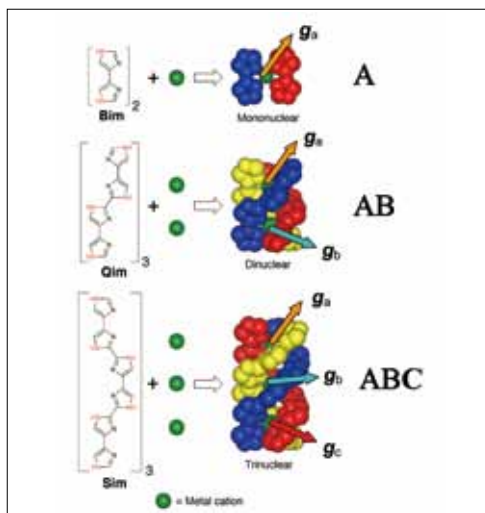


図1 オリゴイミダゾールを配位子(Bim, Qim, Sim)とする、三重らせん対称構造をもつ、Lloydモデルの電子スピン量子ビット版。3種のオリゴイミダゾールを左に示す。AB及びABCでは三重らせん対称性の起源によって、不對電子をもつ開殻系金属陽イオンのg-テンソルがすべて異なるだけでなく、らせんの巻く向き(chirality)によって、キララ量子ビットをもつ。

超伝導量子コンピューター

【第1回】

幹事(報告者)：蔡 兆申 ((独)理化学研究所／日本電気(株))

リーダー：蔡 兆申 ((独)理化学研究所／日本電気(株))

開催日：2010年6月28日

場所：NEC 筑波研究所

参加人数：17名

報 告 概 要

理研：蔡「プロトタイプ超伝導量子ビットチップ」：

サブテーマグループの最終目標であるプロトタイプ超伝導量子ビットチップの内容の概要を説明し、そのアプローチを議論し、各メンバーの役目を説明した。ソフトウェア無線の手法を使った、多チャンネル量子ビット駆動・制御回路の研究の概要が報告された。多層超伝導膜量子ビット集積回路の開発には、低温での電氣的評価を必要とするが、その部分の仕事は、理研とNTTが手分けして担当することに合意した。中村「理研の最新の研究成果」：1次元導波路に結合した磁束量子ビットでの光子の巨視的量子散乱、光子のコヒーレント増幅、電磁透明化などが紹介された。量子ビット間の結合は、電磁共振器を使う方式の将来性を推測した。

NTT：仙場「超伝導磁束量子ビットを用いた量子バス量子計算」：磁束量子ビット系に最適化されたゲートスキーム、量子準位間隔をnsで変えられる量子ビットの実験が紹介された。この素子は量子バスを介して量子ビット集団にワンステップでクラスター状態を形成する可能性を拓く。その後、3種類の異なる量子系(マイクロ波共振器、超伝導量子ビット、接合中の量子二準位系)におけるエンタングルメント形成と量子メモリの原理確認実験が紹介された。さらに、ジョセフソン分岐増幅回路を用いた超伝導磁束量子ビットの量子状態射影測定実験の紹介があった。

理科大：金(高柳代理)「自己形成InAs量子ドットと結合したSQUIDのゲート制御」：光子量子ビットと超伝導量子ビット間のインターフェース開発に向けた、自己形成InAs量子ドットと結合した超伝導量子干渉素子(SQUID)の最近の研究結果を報告した。量子ドット内の単一電子スピン検出に向けた実験方法の一

つとしてサイドゲート制御による π 接合転移などを議論した。今後遂行する光照射実験のための、サンプル最適化及び無冷媒希薄冷凍装置内の光学システム設置を提案した。

超電導工学研究所&産総研：日高「超伝導集積回路の開発」：

アルミニウムを超伝導材料として用いた多層超伝導量子ビット作製プロセスの概要を報告した。この中で日高グループはプロセス全体の取りまとめと成膜、リソグラフィーを主に担当する。前澤グループはアルミニウムのドライエッチングを主に担当する。また、一部の工程に関しては両者が協力して進める。層構造、各層の材料、具体的な形成方法、使用装置の選択、予想される課題、1ランに要する予想日数、開発線表などについての検討結果を示し、質疑応答や課題についての議論を行った。

討議終了後、理研・NECグループの低温実験室の見学を行い、研究情報の交換を行った。



【第1回】

幹事(報告者)：都倉 康弘 (NTT 物性科学基礎研究所)

リーダー：都倉 康弘 (NTT 物性科学基礎研究所)

開催日：2010年6月28日

場所：国立情報学研究所

参加人数：11名

報 告 概 要

理論グループは6名の研究者から構成されるが、今回はすべての研究者から FIRSTプログラムにおけるミッションと研究計画、これまでの研究の紹介と今後の共同研究のあり方について各自30分程度報告し、その後全体討論を行った。

- (1) 都倉は量子ドット中の電子スピンを用いた量子ビットの構成に関して報告した。スピン読み出しの新しい方法を提案し、その特性と集積化の際の課題が議論された。
- (2) Noriは超伝導量子ビットと結合した共振器において期待される量子光学的な現象に関する理論的解析を紹介した。量子情報処理との関連性について質問を受けた。
- (3) 小川は動的な相関電子系として励起子系やポラリトン系の相関に関する理論計算結果を紹介した。特に相関のある原子系からの放射光の特徴について議論した。
- (4) 根本は大規模量子計算機での課題を整理し、一つのプロトタイプである光子を量子ビットとするトポロジカル量子計算と量子中継の説明をした。1000ビット以上の因数分解に必要なリソースに関して質問があった。
- (5) 小芦はさまざまな量子秘匿通信プロトコルの基礎となる相補性を用いた安全性解析について紹介した。共同研究の種として量子メモリに課せられる物理的制限を提案した。また期待されるプロトコルについて整理して欲しいという要望があった。
- (6) Van Meterは大規模な量子計算機を構成するために、システムの立場からの検討結果を紹介した。特に欠陥がある系でどのように処理を進めるかを議論した。

全体討論として、理論グループの位置づけに関して山本氏から期待が述べられた。量子計算機実現の為には大きなブレークスルーが本質的に重要であり、これが理論グループへの課題でもある。ブレークスルーは個々の研究者の頭から生まれる訳だが、その為に研究者間の交流が重要であることを確認した。次回のミーティングは2月後半に大阪で開催予定。



サブ
テーマ

量子通信

【第1回】

幹事(報告者): 古澤 明(東京大学)

リーダー: 井元 信之(大阪大学)

開催日: 2010年8月11日

場所: 東京大学

参加人数: 7名

報 告 概 要

第1回量子通信サブテーマミーティング

ミーティングに先立ち、東大工物理工学科の古澤研究室の見学を行った。高レベルスクイーズ光生成実験、シュレディンガーの猫状態のテレポーテーション実験、量子クラスター状態を用いた量子演算実験等を見学した。オンサイトでの活発な質疑応答が行われた。

引き続きミーティングを行った。ミーティングでは、阪大グループ、NICTグループ、東北大グループから研究の現状についての説明および質疑応答があった。特に、質疑応答では、学会等では味わえない深い議論をすることができた。以下に、グループごとにその内容を記す。

【阪大グループ】

阪大グループで行われている「光子を用いた量子情報処理」の研究が報告された。主なものは「雑音から量子情報を守る方法」「多体エンタングルメントの拡張法」「クラスター状態を用いた一方向量子計算」「量子弱測定値の異常な振るまい」であり、全て自前の理論と実験の組合せによる研究である。特に最後のものはアハロノフによる「ハーディのパラドクスにおける異常な弱測定値」の予言を実証する実験であり、担当者から詳しい説明があった。全体を通じ活発な質疑応答が行われ、その結果「弱い測定」の不思議さについての理解が深まり、他のグループとの連携の可能性も模索された。

【NICTグループ】

NICTグループにおける研究活動についての説明があった。主なものは以下の通りである。

連続量子光学・通信実験関連に関しては、スクイーズ真空状態とスクイーズ単一光子状態を任意

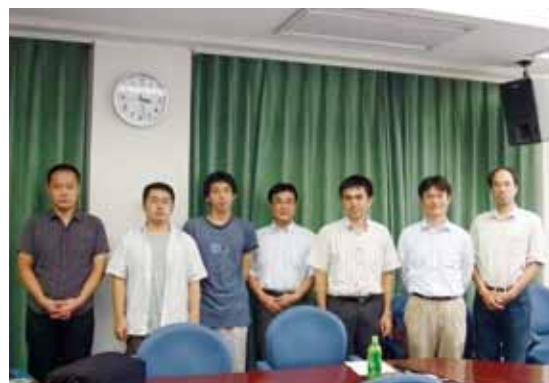
位相で重ね合わせる技術について(原理の説明と実験結果)、および連続量子もつれ蒸留について(プロトコルの説明と実験結果)について説明があった。

超伝導光子検出器関連に関しては、Superconducting Single Photon Detector (SSPD) の開発状況について、およびTransition Edge Sensor (TES) の開発状況について説明があった。

また、本研究プロジェクトにおけるNICTのアジェンダについての説明があった。

【東北大グループ】

東北大グループからは、量子メモリーを実現する上でのキーテクノロジーとなる、光子と電子スピンの量子状態交換に向けた実験の現状と最新のアイデアが紹介された。また、量子状態の書き込みと同時に重要となる読み出しに関し、最近注目を浴びている「弱い測定」と東北大グループの実験との関係についても紹介され、意見交換が行われた。特に、阪大グループではこの「弱い測定」を実際に行っていることから、とても深い議論ができた。ただし、東北大グループの実験と「弱い測定」との関係に関する結論は、次回会合への宿題となった。



量子情報レクチャーシリーズ

量子情報処理のような学際的な最先端研究分野を目指す学部学生、大学院生、企業の研究者、技術者にとって、その背景となる基礎知識を体系的に、また効率良く身につけることは容易なことではありません。最先端研究開発支援プログラム「量子情報処理プロジェクト」では、このような状況に鑑み、量子情報レクチャーシリーズを電子出版することにしました。関連する重要なテーマ毎に講義ノートを作成・配信し、各大学での講義、各研究室での輪講、研究者の個人的勉強などの為に使って頂こうと考えています。今回は、「雑音過程の基礎」の講義ノートを配信しました。主な内容は、以下の通りです。

■ サイトURL : <http://www.first-quantum.net/>

「雑音過程の基礎」

微弱な信号を検出しようとする実験においては、常に対象とするシステムの観測量（電流、電圧、振幅、位相、位置、運動量、軌道およびスピン角運動量など）にわずかに存在するゆらぎにより、その測定限界が決定されます。このわずかなゆらぎは雑音と呼ばれ、熱雑音や量子雑音のような本質的に除去できないものと、 $1/f$ 雑音のようにシステムの欠陥によるものに分類されます。この講義ノートでは、まず雑音の数学的基礎、量子統計理論、等価回路表示を述べた後、代表的デバイス（抵抗体、 pn 接合素子、MOS構造、レーザー、パラメトリック発振器など）の雑音特性を明らかにします。最後に、雑音の様々な通信・情報処理システムへのインパクトを記述しました。具体的なシステムとして、光通信、量子暗号、量子中継、量子コンピューターを取り上げました。

I. 基礎編

- 1章 確率過程とフーリエ解析
- 2章 量子統計力学
- 3章 古典及び量子回路理論

II. デバイス編

- 4章 抵抗体の熱雑音と量子雑音
- 5章 メゾスコピック抵抗体のショット雑音とその抑圧
- 6章 pn 接合のショット雑音
- 7章 メゾスコピック pn 接合におけるクーロンブロックと単一光子発生
- 8章 pn 接合レーザーとフォトダイオードにおける雑音の抑圧（スキージング）
- 9章 MOS素子における $1/f$ 雑音とランダムテレグラフ雑音
- 10章 レーザー：負性抵抗発振器
- 11章 パラメトリック増幅：非線形リアクタンス発振器

III. システム編

- 12章 PCM-IM光通信とコヒーレント光通信システム
- 13章 量子暗号と量子中継
- 14章 量子コンピューターのためのスピン量子ビット
- 15章 スピン量子ビットのデコヒーレンス、リフォーカシング、デカップリング
- 16章 誤り耐性量子コンピューター

[国立情報学研究所 / スタンフォード大学 山本 喜久]

「夏期研修会」に寄せて

オーガナイザー：東京大学 樽茶 清悟

先の8月、沖縄において「量子情報処理プロジェクト」の夏期研修会が、大学院生、若手研究者を対象に10日間に渡り開催された。同スクールは、平成16年から科学技術振興機構CREST「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」で開催されてきたものの発展版である。今回は基礎から最先端にいたる知識と技術を習得できるように講義科目、形式を衣替えて行われた。私も講義の一コマを分担したが、参加者の熱気と活発さ、そして良く準備された講義に感心させられる毎日であった。

外国では、伝統的に、様々な研究分野で若手のためのスクールが開催されている。日本でもいくつか開かれているが、残念ながら、なかなか定着しているものは無いように思う。しかし、量子情報のような、まだ歴史が浅く、将来へ向けて次々と新しい知識や技術が開発されている分野では、スクールのもつ意味は大きい。例えば、量子情報の研究対象となる物理系は、

光、原子、超伝導、スピンなど多岐にわたる。その原理や技術には関連しているものも多く、詳細を知ることで研究の視野を大きく広げられる。この役割を大学のカリキュラムに求めることは難しいが、スクールでは、各物理系の知識と技術を短期間で集中的に提供することができる。これに加えて、一定期間、研究意識や動機を共有することは、同世代の若い人たちにとって良い刺激となり、また将来にわたり得難い研究仲間を得られるきっかけにもなると思う。

我が国の若手研究者は、優秀さでは世界に引けを取らないと思えないが、外国に比べて外部と交流する機会が少ないように思う。量子情報の研究は、全般に、理論、実験とも高度なレベルを必要とし、個々の研究室で多くをカバーすることは難しい。スクールを契機として、若手の人たちの共同研究や研究交流の機会が広がることを期待したい。

プログラム概要

幹事(講師担当)：大阪大学 小芦 雅斗

夏期研修会の講義講演プログラムの作成にあたっては、将来を期待される受講生の方々に、量子情報分野の研究を進めていくために必要な基礎を固めてもらい、同時に最先端の研究成果にも触れていただくことを念頭においた。受講生は、博士後期課程の学生から若手のポスドクまでを中心とした構成で、レベルとしては揃っているのだが、多岐に渡る物理系に関わる量子情報の分野では、ある受講生にとっては当然の内容だが、別の受講生にとっては初めて聞く話題というケースも多くなる。その状況で、基礎から最新までを全員に興味を持って学んでもらうためにはどうすればよいか、というのが永遠の課題である。今回は、シリーズ講義で基礎を学ぶ基幹講義、1時間で最新の研究内容を紹介するコロキウムに加えて、野心的な試みとして、基礎から始めて3時間で最新の研究内容につなげてもらうという先端講義の枠を用意した(別表)。先端講義をお願いした講師の方々には、難題をお引き受けいただき、いずれも個性的で素晴らしい講義を展開していただいたことに改めて謝意を表したい。また、コロキウム講演では、短い時間で広いスペクトルの受講生に理解できるよう、様々な工夫が見受けられた。基幹講義の講師の方々には、ご自身の研究を披露したいという本能的な気持ちを抑えて、基礎を固めるために最適な構成を模索していただいた。いずれも時間的にあまり余裕のない時期の依頼に快く応じていただき、大変感謝している。また、従来の印刷ベースに替わり、受講生のボランティア的な協力も得て最新の講義資料等を電子的に供給する体制が整ったことも、想定外の効果をもたらし、嬉しい驚きであった。

講義中の質疑の様子や、早朝の出席率、そして受講生の表情や目の色から判断するに、今回の11日間の講義内容が多くの受講生にとって有意義な形で吸収されたのではないかと感じている。ただ、今回集まった受講生の皆さんの意欲が、プログラム構成の拙さを補った面も大いにあるので、いろいろな感想を踏まえて有意義なプログラムの在り方を今後も模索していきたい。また、今回の受講生層よりもさらに若い博士課程前期の学生向けのプログラムの可能性も同時に検討していきたいと考えている。

■基幹講義

- 根本香絵 (NII) 量子計算I
- R. Van Meter (慶大) 量子計算II
- 香取秀俊 (東大) 量子計測
- 高橋義朗 (京大) 量子シミュレーションI
- Tim Byrnes (NII) 量子シミュレーションII
- 小芦雅斗 (阪大) 量子情報基礎

■先端講義

- 竹内繁樹 (北大) 光量子回路
- 北川勝弘 (阪大) スピンとNMR
- 上妻幹男 (東工大) 共振器QED
- 仙場浩一 (NTT) 超伝導と回路QED

■コロキウム

- 山口浩司 (NTT) ナノ機械構造の物理と応用
- 青木秀夫 (東大) 強相関係の物理と光格子
- 井元信之 (阪大) 光子を用いた量子情報処理
- 平野琢也 (学習院大) 冷却原子を用いた精密計測
- 都倉康弘 (NTT) Qubits by electron spins in quantum dot system - Basic theory
- 大橋洋士 (慶大) 極低温フェルミ原子ガス：超流動現象の統一的理解と物質科学研究のための量子シミュレータの可能性
- 山本喜久 (NII/Stanford) Ultrafast optical control of semiconductor spin qubits toward surface code quantum computing
- 中村泰信 (理研/NEC) 超伝導回路におけるマイクロ波量子光学
- 向山 敬 (電通大) Universal thermodynamics of strongly interacting Fermi gases
- 樽茶清悟 (東大) Implementation of spin qubits and qubit gates with quantum dots: Experiment
- 占部伸二 (阪大) イオントラップを用いた量子ゲート実験

ポスター発表概要

幹事(学生担当)：京都大学 高橋 義明

今回の夏期研修会では38件のポスター発表があった。発表論文の概略は以下の通りである。まず、実験に関するものが27件で、分野別では、A) 冷却原子関係7件(内訳：光格子量子シミュレーション3件、光格子時計2件、量子計測1件、光源開発1件)、B) 半導体関係6件(内訳：励起子ポラリトン量子シミュレーション4件、量子ドット2件、光電子スピン転写1件)、C) 量子ナノデバイス関係6件、D) 超伝導回路関係3件(内訳：磁束量子ビット2件、量子ドット1件)、E) スピン量子計算関係3件(内訳：核スピン1件、電子スピン2件)、F) 光量子情報2件(内訳：量子計測1件、量子通信1件)、であった。また、理論に関するものが11件で、分野別では、G) 量子計算関係3件、H) 量子測定・相関3件、I) 励起子ポラリトン量子シミュレーション2件、J) 量子ネットワーク2件、K) 量子ドット1件であった。

全体的に、高いレベルで、しっかりとした内容の発表が多かったとの印象を受けた。また、大変興味深い新しいアプローチの研究・開拓に関するものが多くみられ、本領域がさらに大きく発展しつつあることを実感させられた。また、異なる物理系を扱っていても、共通の物理を研究・探索している例が多くみられた。参加者が、分野の垣根を越えて夜遅くまで熱心に議論して相互理解を深めていたのはとても印象的であった。



参加者について

幹事(施設担当)：NTT物性科学基礎研究所 仙場 浩一
国立情報学研究所 宇都宮 聖子

量子情報の若手夏期研修会(夏期研修会)は、ホテルサンライズ知念にて2004年に第一回が開催されて以来、同ホテルにおいて今回で4回目の開催となりました。全国各地から、原子物理・量子光学・半導体物性を中心に、学部生から企業や大学の研究員助教まで、量子情報処理を主な研究対象としている38名の参加者たちが集まりました。

今回は、過去にも本夏期研修会に参加経験がある参加者たちが、初めて参加する学生たちを丁寧にサポートする体制が自然とできあがっていました。10日間という長丁場のスクールの中で、量子情報処理分野の今後を担う同世代同士で交流を深め、互いに切磋琢磨する喜びを感じ、日焼けをしながら日に日に逞しくなっていく皆の姿はとても印象的でした。

講義では毎回学生参加者からレベルの高い質問が飛び出し、毎晩夜遅くまでポスターセッションなどで熱い議論を交わし、朝になると再び食卓を囲み、また講義に向かう、という、密度の濃い生活スタイル。異なる大学や研究所から参加している講師陣と学生たちの間で、普段ゆっくりと腰を据えて話し込む機会がないような人たちと、一日で解決できない議題をそれぞれが持ち帰り、また次の日にじっくり議論する、という日常なかなかできない深いコミュニケーションにより、研究の幅を広げられることも本研修会の醍醐味です。

スクール後、参加者から開口一番に上がったのは、「楽しかった!」という一言。若手の多く活躍する量子情報コミュニティは、沖縄のきれいな海や空と、おいしい空気と食事により更に団結力の強いものとなりました。本研修会の約1ヶ月後に大阪で開催された日本物理学会では、沖縄の熱が冷めやらぬスクール参加者たちが再び集結し、スクールの思い出話や更なる研究のディスカッション、学生チャプターの運営などについて、熱い議論が交わされました。この夏培ったアイデアや豊かなネットワークが、一人一人のこれからの研究にどのように華開いていくのか、とても楽しみです。



夏期研修会報告：<http://www.first-quantum.net/summerSchool/index.html>

ベストポスター賞

受賞者：京都大学 研究員 山崎 歴舟

先日沖縄で開かれた夏期研修会2010でのポスターセッションは大盛況というのが私の実感です。参加者の中でもシニアの研究員は若手の興味深い質問や熱意に押され、若手は多くの鋭い質問や意見に刺激されながら、夕食後8時から9時までという当初の予定を皆忘れ、朝の1-2時まで(いくつかのポスターでは朝3-4時まで!) 毎日のように議論されていました。毎日顔を合わせ、食事を共にし、一緒に海で遊ぶ仲間たちに囲まれたアットホームな環境で、特に参加した大学院生にとっては日頃学会では聞けないような質問、自分の専門とする物理系とは異なるシステムに関する素朴な疑問などを、納得行くまで聞けるこのような場は、貴重なものだったと思います。

私は今回「光フェッシュバツハ共鳴のYb原子凝縮体への応用」という題で、冷却原子における相互作用をコントロールするフェッシュバツハ共鳴という手法を、通常使われる磁場によるコントロールから光を用いたコントロールへの拡張を報告しました。光の波長以下という小さな空間における相互作用のコントロールについての実験報告、また非平衡系などの新たな物理の可能性を発表し、とてもうれしい事に今回ポスター賞を頂きました。先日出席した、冷却原子を一つの大きなトピックとする国際会議(ICAP)のポスター発表とは異なり、冷却原子の専門家以外の人にどう伝えるか、詳細ではなく大きな物理のイメージをわかりやすく説明するか、なども今回の発表におけるチャレンジでした。そのような中、若手や他分野の人の「ふとした疑問」から出てくる豊かな発想や着眼点に触発され、自分の研究を今までとは異なる視点から見直すチャンスにも恵まれました。

本スクールのポスターセッションは、多岐にわたるトレーニング

グとなっているという感想が強くあります。それは日頃あまりチャンスが無い「(年齢の異なる、他分野の人との)コミュニケーション能力の育成」、「異なる物理系の理解と洞察力の育成」、また「議論などを通じた他の科学者たちとのネットワーク形成」といった機会が存分に与えられたセッションだったように思

います。沖縄から帰ってきてこの数週間、参加メンバーから数々のメールをもらったり、リユニオン開催の話を聞いたりしています。本研究会は、多くの若手にとって意義のあるつながりを与え、これからの働きに大きな実りを持たせるきっかけを与えてくれたのではないのでしょうか。



高橋研究室サマースクールメンバー
(左より：山崎歴舟、田家慎太郎、柴田康介)

コラム 海外サイエンススクール事情

フランスのレズーシ (Les Houches)、イタリアのエンリコフェルミ (Enrico Fermi)、米国のアスペン (Aspen) など、世界には数十年の歴史を持つサイエンススクールが存在する。これらのスクールは通常大自然の中に設置されている。例えば、レズーシはモンブランの山麓にある小さな村で、講義室、食堂、キッチン、学生と講師の宿舎だけの簡単な施設が人里を離れた林の中にひっそりと建っている。日常の喧騒から離れ、数週間にわたって深く静かにサイエンスに没入する仕掛けがそこにある。

サイエンススクールには通常のオンキャンパス大学院教育が持ちえない3つの重要な役割がある。

1つ目は、スクール講師となる研究者の学問を深化させ体系化させる機能を持つことである。世界中から集められた、その専門分野の優秀な学生、ポスドクに、新しい概念、理論体系、実験手法を講義するためには、講師は多大な時間とエネルギーをかけて準備をしなければならない。そうしたプレッシャーは、一般の学生を対象としたオンキャンパスの大学院教育では味わえないものである。例えば、2005年にノーベル物理学賞を受賞したRoy Glauber (Harvard) の受賞対象となったコヒーレント状態の理論は1964年のエンリコフェルミでの講義の為に準備されたものであった。また、1995年にノーベル物理学賞を受賞したClaud Cohen-Tannoudji (College de France) の受賞対象となったドレストアトムの理論は1975年のレズーシでの講義の為に準

国立情報学研究所/スタンフォード大学 山本 喜久

備されたものであった。サイエンススクールは研究者が自身の学問を完成させる上で欠くことのできない仕掛けなのである。

2つ目は、最先端を目指す学生やポスドクを最短距離でフロンティアに導くことにある。現在では、どの研究分野でも最先端に出る為に必要な知識は広範囲にわたり、一つの大学院大学でその全てを教えることは出来ない。独学でこうした知識をひとつずつ学び取るには長い時間とエネルギーを必要とする。サイエンススクールでは、こうした広範囲にわたる知識を最適な講師を集めて一挙に体系的に教えることが出来る。最先端で活躍できる若手研究者を彼らに無駄な時間とエネルギーを浪費させずに育成できるかどうか、はその国の科学技術国際競争力を決定する上で重要な要素である。

3つ目は、研究を自身の職業に選択した大学院生、ポスドクに、世界の最先端とは何か、そこで活躍する研究者はどんな人達なのかを直接に見せることにある。これは、論文を読んだり、国際会議で講演を聞くだけでは入手出来ない貴重なものである。最先端を走っている講師から直接講義を受け、長期間にわたって講師と寝食を共にする体験は、時に学生達が自身の人生の目標を設定するきっかけとなることもある。また、スクールで一緒に学んだ学生の間形成された多国間の友情と人脈は、その後数十年という歳月に渡って学生たちの貴重な財産となる。

サイエンススクールは小さな施設であるが、先進国にとって大きな存在なのである。

参加者
感想

産業技術総合研究所 研究員 赤松 大輔

沖縄における量子情報サマースクールに参加させていただき、貴重な体験をさせて頂きましたのでご報告したいと思います。

「量子情報」というただ一つのキーワードで集まった生徒たちですので、それぞれの研究分野は多岐にわたってありました。しかしながら、おおよそ同年代であり、また都会の喧騒を離れた青と緑が包む場所ということで、すぐに互いに打ち解け深い議論ができる「仲」になることができました。

講義の内容は、小芦先生の量子情報の基礎的な話から中村先生のCircuit QEDに関する最前線の研究の話まで、非常にバランスよく構成されていて毎日わくわくした気持ちで講義を聴くことができました。印象的だったのは、ロドニー先生の講義で実際に“使える”量子コンピュータの満たすべきスペックに関するお話があり、量子コンピュータという研究分野がその基礎研究から殻を破り始めた事を実感いたしました。

もうひとつ印象的だったのがポスター発表です。初日から、活発に熱い議論が行われており人気のポスターには何層にもわたって人だかりができていました。ポスター発表の時間は8時から9時までとなっていたのですが、多

くの発表が日をまたいで行われ、全ての発表が終わるのは2時過ぎという大変活気のあるポスター発表でした。

第一線の研究者による量子情報に関する講義があり、生徒同士の情報交換があり、そのなかで多くの人との横のつながりを持つ事が出来るサマースクールに参加し経験したことは、これからの研究生活において間違いなく重要な役割を果たすと思われれます。

最後になりますが、このような素晴らしいサマースクールを企画して頂いた先生たちや事務の方々から感謝したいと思います。

参加者
感想

東北大学 電気通信研究所 枝松・小坂研究室 博士課程2年 稲垣 卓弘

2010夏期研修会に参加して、私は沖縄から様々な収穫を持ち帰ることができました。その中でも量子情報の研究者が一堂に会して、寝食を共にしながら互いの研究について語り合った時間は、どのような学会においても得難いものであったと感じます。連日の講義では、小芦先生の基礎講義から始まり、それに続いて各分野における理論と実験が初学者にも分かるように解説され、最先端の研究へと一歩ずつ登っていける内容でした。量子情報の研究では、扱う媒体を何とするかで、その実験の様相は大きく異なってきます。しかし、それが半導体中の電子スピンや超電導回路であっても、トラップされた原子やイオンであっても、その根元に流れる本質はどれも同じなのだ実感することができました。それは当たり前なことなのかも知れませんが、自分の研究分野に集中しているとなつて忘れてしまうことでもあります。また、学生と先生、実験と理論、関西人と関東人のように、普段意識しつつも容易には交われない相手と、垣根なく交流できる下地として、沖縄の青い海と美味しい食事は力強く作用していたと思います。食事と寝床の心配

もなく、ともすれば明日の予定すら心配することなく、ポスター発表での議論に没頭することのできる環境はなによりも貴重なものでした。そして、自分と同世代の仲間達の、研究や勉強だけでなく、余暇での娯楽においても全く妥協することのない姿勢には、鮮烈な刺激を受けました。今後の私の研究生活において、より良い指針となると思います。沖縄の青い空の下で、毎日へとへとになるまで駆け抜けた10日間でしたが、これほど有意義な夏はありません。



● 東京大学 樽茶研究室

当研究室は東京大学工学系研究科物理工学専攻に所属しており、樽茶清悟教授の指導の下、大岩顕講師、山本倫久助教をはじめ研究員・職員7名、大学院生11名、学部学生3名の総勢24名が日夜研究に励んでいます。学生が多いためか研究室の雰囲気は大変明るく、また海外の研究者との国際交流が多いのが特色です。

当グループは低次元電子系の量子輸送、電子状態とスピン相関、さらにスピンを利用した量子情報処理の物理とハードウェアの実験研究をテーマとしています。系の寸法が電子のド・ブロイ波長程度になると、電子の量子性に由来する干渉効果、電子間の相互作用に起因する相関効果などが、系全体の性質を左右するようになります。私たちは半導体を微細化することによってできる0~1次元の電子系に着目し、人工原子・分子における多体効果、強磁場中での相関現象、電子スピンや核スピンの関与する伝導現象、1次元朝永ラッティンジャー相互作用液体の電子物性、スピン量子計算の基礎物理(量子コヒーレンスや量子もつれ状態)などの研究を行ってきました。最近では具体的に以下のような内容を盛んに研究しています。

1. 半導体2次元電子系にゲート電極を微細加工した横型量子ドットを用いて、電子スピンの量子ビットへの応用を進めています。当グループで開発された微小磁石による漏れ磁場を用いる方式で、すでに2量子ビット系が実現されており、スピン回転操作のさらなる高速化や量子ビットの集積化の基礎研究を行っています(図1)。また、デコヒーレンスの要因となる核スピンの少ないSi系デバイスの開発も進行中です。
2. 光子の偏光状態と量子ドット中の電子スピン状態との間でのコヒーレントな量子情報転写を目指した研究を行っています。これは、集積化



に優れた半導体デバイスと、擾乱に強く情報の転送に有利なレーザー光を組み合わせた量子情報処理ネットワークの実現に向けた基盤技術となります。

3. グラフェンにおける電子物性の研究とナノデバイスの開発を行っています。グラフェンは近年非常にホットな研究テーマであり、2010年のノーベル物理学賞の受賞対象になりました。私たちは主に2~3層グラフェンを利用したデバイスを作製・評価することで、グラフェンの特異な電子状態の制御を目指しています(図2)。
4. 自己形成InAs量子ドットの物性を、金属電極との接合を介した電気伝導測定によって実験的に探求しています。特に、スピン軌道相互作用の電氣的制御や、電子スピンの多体効果と超伝導の競合といった研究を通して、自己形成量子ドットにおける電子状態のコヒーレント制御とデバイス応用を行っていこうと考えています。

その他にも、表面弾性波による量子細線中の単一電子輸送やABリングと量子細線の結合系を用いた飛行量子ビットの研究、さらに超微細相互作用を介した核スピン偏極のダイナミクスの解明など、0~1次元電子系に関連した幅広い研究が行われています。

[東京大学 高倉 樹]

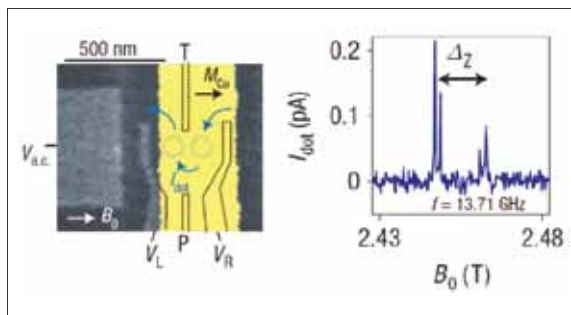


図1 2量子ビットデバイスと各ビットに対する電子スピン共鳴ピーク

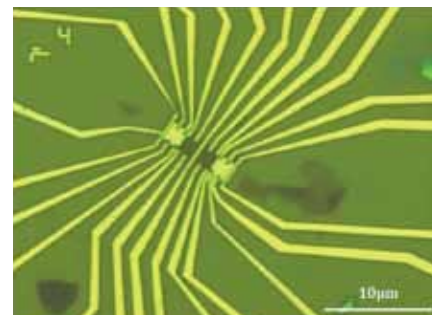


図2 2層グラフェンを微細加工したPN接合ダイオード

●理化学研究所／日本電気(株) 蔡・中村研究室

当グループは理研・基幹研究所・巨視的量子コヒーレンス研究チーム(研究員9人)とNEC研究所(研究員3名)より共同研究チームを構成し、研究拠点をつくば市のNEC筑波研究所内に置いて研究活動を実施しています。研究の主な対象は、ジョセフソンネル接合を使った量子コヒーレントな現象を用いた量子情報処理であります。

微小なジョセフソン接合を含む超伝導回路では、「電荷数」と「位相」の自由度が存在し、これらをコヒーレントに制御する事により、量子コンピュータの基本素子である量子ビットとして利用する事が可能です。我々はこれまで世界に先駆けてこの超伝導回路でのコヒーレンスを実証し、それを利用した量子ビット回路技術を開発し、小規模な量子プロトコル演算などの実現に成功しました。

量子情報処理を量子演算ゲートと用いて実現するには、2つの大きな克服すべき課題がある。一つは量子コヒーレンスを保てる時間(デコヒーレンス時間)をできるだけ長くすること。もう一つは量子ビットを複数集積することである。このような集積回路では、2つのビット間の結合を任意にオン・オフさせ、1ビットの制御と、2ビットの論理演算を行うことが可能になる。

超伝導量子ビットのデコヒーレンス時間は1999年の最初の量子ビット実現より、着実に長くなってきています。我々の研究室は、ジョセフソン量子ビットのデコヒーレンス長期化の研究で、数多くの成果を上げてきました。これまで2~3年で一桁のデコヒーレンスの長期化が実現しています。現時点では20マイクロ秒という記録的デコヒーレンス時間を実現しています。これは磁束の自由度を利用した磁束量子ビットというデバイスで行った実験で得られた結果です。デコヒーレンスを制限している要因が正確には把握されていなく、実

験の再現性もまだ不十分であると考えています。この要因の解明とその解決策の開発が、今後の研究の大きな目標の一つです。

量子ビットの結合方式に関しての研究も、これまでに幾つかの重要なブレイクスルーを達成してきました。量子ビット型の結合デバイスを使い、二つの磁束量子ビットを用いた実験で、3ステップの量子演算を行うことに成功しています(Science, 316, 723, 2007)。

現在更に正確な量子制御が可能な新たな量子ビット結合方式を研究しています。特にコプレーナ型マイクロ波導波路を使った電磁共振器を使った量子ビットの結合方式に関し、研究を進めているところです。この場合、量子ビットと導波路間のコヒーレントな結合が一つの重要な課題であります。当チームはこのような量子ビットと導波路が結合した系で、最近以下に示す幾つかの成果を上げました。

磁束量子ビットとコプレーナ型マイクロ波導波路が自己インダクタンスを介して結合している系では、マイクロ波光子と超伝導量子ビット間に数十メガヘルツの比較的大きな結合エネルギーが得られます(図1)。これは開放系に置かれた人工原子であり、このコヒーレントな結合系を使い、最近一連の実験を行いました。量子ビットエネルギーに相当する光子を導波路に入力すると、その入力光子はほぼ100%反射されるという共鳴蛍光現象が観測されました(図2)。またマイクロ波の強度を増す実験では、マイクロ波吸収ピークのトリプレット(図3)が観測されました(Science, 327, 840, 2010)。量子ビットの3準位を使い、マイクロ波の増幅(図4, Phys. Rev. Lett., 104, 183603, 2010)や電磁誘導透明化(図5, Phys. Rev. Lett., 104, 193601, 2010)などの現象も観測しました。

[理化学研究所／日本電気(株) 蔡 兆申]

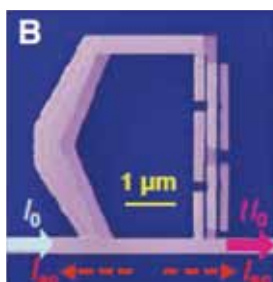


図1 伝送線と結合している磁束量子ビット

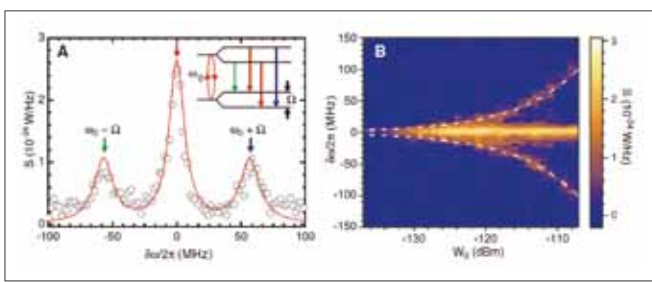


図3 図1の量子ビットに更に強いマイクロ波を照射すると、吸収ピークが3つに分裂する。
A:横軸は出力変調周波数、縦軸は出力強度。
B:横軸は入力マイクロ波強度、縦軸は出力周波数変調。

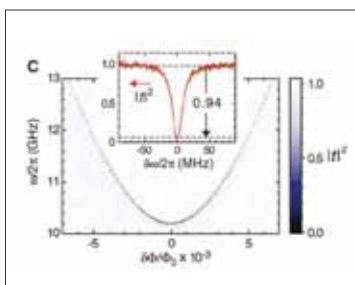


図2 図1の量子ビットにマイクロ波を照射時のスペクトル。共振時にはほぼ全て反射される(インセット)

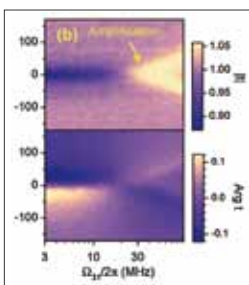


図4 量子ビットの3準位を使った増幅。
横軸はポンプ光強度、縦軸は出力周波数変調。
上は透過光強度、下は透過光位相。

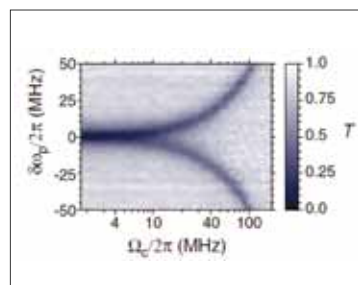


図5 量子ビットの3準位を使った電磁誘導透明化。
横軸は透明化を誘起するマイクロ波強度、
縦軸は反射マイクロ波の周波数変調。

エッセイ

Essay

科学・技術の進歩は目覚ましいものがあるが、その成果はまだまだ生物の進化には全く歯が立たない。ここでは、生物進化と科学・技術の進化を比較し、そこから何が学べるかを考察する。

生きとし生けるものが延々と繰り返してきた進化は、種分化のプロセスの積み重ねにより、無数の生物種を作り出してきた。生物進化の分類図は、無数に枝分かれする分枝を持つ1本の巨木のような形状を特徴とする(図1)。このような形状は、生物進化のメカニズムが遺伝子の変異に基本的に頼っているからである。分化と真逆な「融合」プロセスによる新種の出現は、進化の初期の例外的なイベント(例えば:細胞核、葉緑素、ミトコンドリア等の融合)を除いては、生物界では決して起ることはない。

一方人類の科学・技術の進化は、「科学的真理」の追求と、人類社会での有用性の追求という淘汰圧下で繰り返される生存競争を駆動力とする。また科学・技術の進歩は過去の成果に強く根差した継続的な進化であり、生物種の進化と大局的な類似点がある。実はこの類似性は表面的なものではなく、両者には大変深い関係がある。

生物は「遺伝子形」とその設計にのっとり作られた「表現系」(個体)に分けられる。蜂、蟻、蜘蛛、鳥類、そしてビーバーやヒトなどは精巧な巣を作るが、このような体外構造物は表現系の「延長」である。高等動物では、このような体外構造物に関する情報が、遺伝子ではなく神経細胞や体外記憶装置に蓄えられる。このような非遺伝子的な情報は、「ミーム」とも呼ばれる文明を構成する観念の小単位に分解できる(ミーム<memes>)は遺伝子<genes>をもじった造語)。ミームも遺伝子同様、環境で

の自然淘汰の対象となり、両者とも、究極の目的は己自身のコピーをできるだけ世の中に広めるように振る舞う。

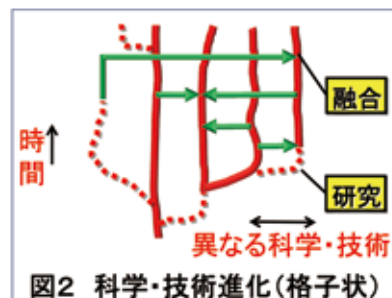
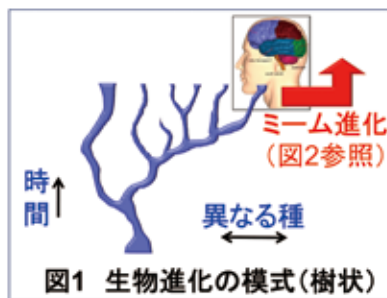
我々の科学・技術もミームの集合体に他ならない。この場合、「種」に相当する単位の定義は厳密には出来ないが、一般的に使われるXX学、XX技術、といったものを充当して差し支えない。

しかし両者には少なくとも以下の大きな相違点がある:①遺伝子進化では遺伝子の融合は許されないが、ミーム進化ではミームの融合は随時起っている。②遺伝子進化では、有用でない遺伝子はたちまち淘汰されるが、ミームの淘汰は比較的寛容である。③遺伝子進化ではランダムな変異は環境で淘汰されるが、科学・技術を含む全てのミームの新発想は、まず脳裏ですばやくスクリーンされ(「考える」プロセス)、その後環境の淘汰に晒される。④科学・技術での進化は、環境の淘汰圧のみではなく、実験手法を使ったアイデアの淘汰が重要。これらの効果により、ミームの進化は図1と相当異なる格子状の系譜を示す(図2)。図2中、点線は「ただちには有用」でない研究対象のアイデア、緑矢印はアイデア融合のためのミーム転送を示す。

科学・技術の研究では、①は異分野のアイデアの融合による斬新なパラダイムの開拓を可能にし、②は比較的長期な研究を可能にし、③と④は淘汰をより早く行える。これは遺伝子の進化と比べると大変大きな利点である。量子情報の研究も、量子力学、情報科学、固体物理、量子光学、ナノテクノロジー等の先駆的アイデアを拝借し融合させ、国家予算を運用して進められている。生態進化にはないこれらの利点を十二分に発揮し、是非素晴らしい成果を上げ、図2の実線で示せるような分枝を作り上げたいものだ。

科学・技術と生物の進化論

蔡
兆
申



No.2 December 2010

最先端研究開発支援プログラム

「量子情報処理プロジェクト」ニュースレター

NII 大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構
国立情報学研究所 <http://www.nii.ac.jp/>

発行: 大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立情報学研究所「最先端研究開発支援室」<http://www.first-quantum.net/>

〒101-8430 東京都千代田区一ツ橋2丁目1番2号 学術総合センター

本誌についてのお問い合わせ:

総務部 研究促進課 最先端研究開発支援室 TEL: 03-4212-2117 FAX: 03-4212-2817 e-mail: first_jimu@nii.ac.jp

R2100
Copyright © 2010 NII. All rights reserved.