

量子ニュース

CONTENTS

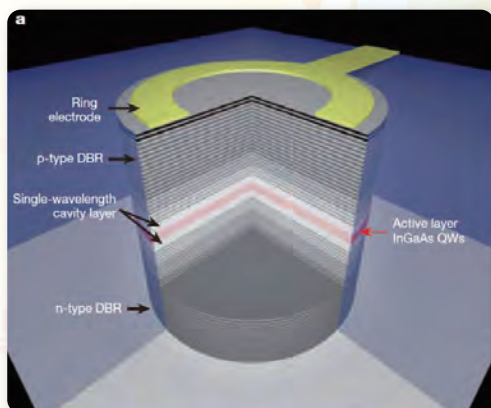
量子科学最前線

量子情報のインターフェースを作る



最近の研究成果

電流励起ポラリトンレーザー

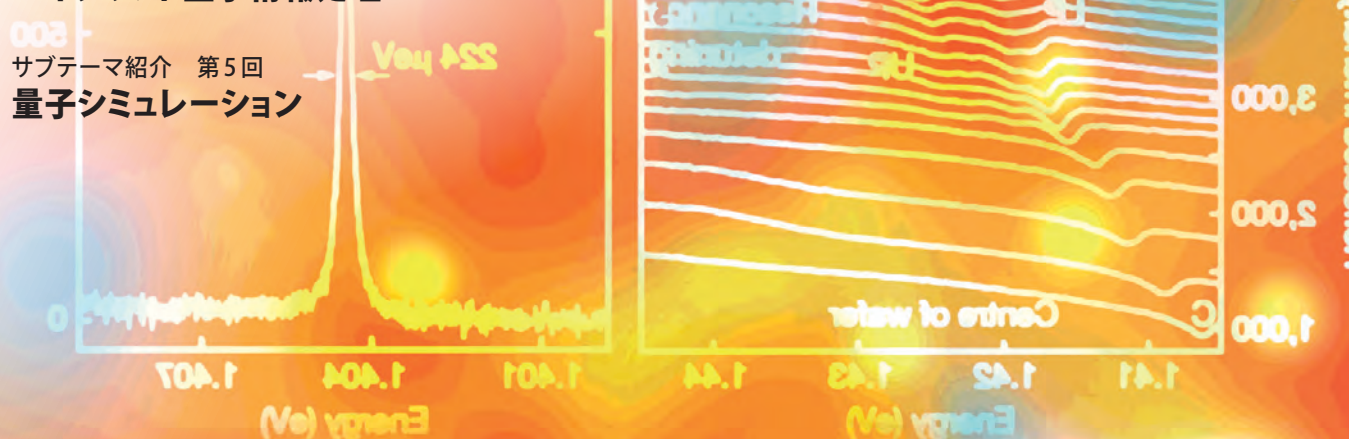


海外研究動向

ハイブリッド量子情報処理

サブテーマ紹介 第5回

量子シミュレーション



●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))

研究支援統括者：仙場 浩一(国立情報学研究所)

サブテーマ紹介

(◎サブテーマリーダー、○サブリーダー)

●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) ○山西 正道(浜松ホトニクス(株)) 小川 哲生(大阪大学)
小芦 雅斗(東京大学) 竹内 繁樹(北海道大学) 河原林 健一(国立情報学研究所) Alfred Forchel(Universität Würzburg)
Klaus Lischka(Universität Paderborn)

●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(東京大学) 齊藤 志郎(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((独)産業技術総合研究所)
Franco Nori((独)理化学研究所) 根本 香絵(国立情報学研究所)

●スピン量子コンピューター

◎樽茶 清悟(東京大学) ○都倉 康弘(筑波大学) 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) 森田 靖(大阪大学) 藤澤 利正(東京工業大学) 太田 剛(NTT物性科学基礎研究所)
Rodney Van Meter(慶應義塾大学)

●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) 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)

アドバイザー

- 光 末松 安晴((公財)高柳記念財団) 覧具 博義(元東京農工大学)
- 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 井口 家成(元東京工業大学) 前川 禎通((独)日本原子力研究開発機構)
- 理論 上村 洸(東京理科大学)

プロジェクト事務局

- 研究推進チーム
技術参事 堀切 智之(国立情報学研究所)
佐々木 理恵子(スタンフォード大学/山本研究室)
- 人材育成チーム
技術参事 宇都宮 聖子(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)
窪田 しおり(国立情報学研究所)
- 社会連携推進室 最先端研究開発支援チーム
係 長 昨間 融(国立情報学研究所)
中山 陽子(国立情報学研究所)

プロジェクト事務局からのお知らせ

● INFORMATION

■量子情報処理プロジェクト全体会議2013開催のお知らせ

日時：2013年12月9日(月)～12日(木) 場所：東京大学小柴ホール

詳細は、決まり次第プロジェクトホームページにてお知らせいたします。

<http://first-quantum.net/symposium/2012/project.html>

■国際シンポジウム「トポロジカル量子技術」開催のお知らせ

FIRSTプログラムの最終年度にあたり、量子物理学のトポロジ的性質を探求してきた3プロジェクト合同で(十倉PJ、山本PJ、外村PJ)、これまでの成果のまとめと今後の展望を行う国際シンポジウムを、ノーベル賞受賞者を含む海外研究者を招待して開催する予定です。

日時：2014年1月27日(月)～30日(木)

場所：東京大学伊藤国際研究学術センター(27・28日)※29・30日は東大近辺予定

広く参加者を募る予定ですが、詳細は今後シンポジウムホームページにてお知らせいたします。

● AWARD

- 2013年3月：日本物理学会第18回論文賞「Improved Frequency Measurement of a One-Dimensional Optical Lattice Clock with a Spin-Polarized Fermionic ^{87}Sr Isotope」高本 将男(東京大学)、洪 鋒雷(産業技術総合研究所)、東 亮一(東京大学)、藤井 靖久(産業技術総合研究所)、今江 理人(産業技術総合研究所)、香取 秀俊(東京大学)
- 2013年4月：文部科学省科学技術分野の文部科学大臣表彰科学技術賞「ナノ領域における物理現象の理論的研究」Franco Nori(理化学研究所)
- 2013年4月：Angew. Chem. Int. Ed. Hot Paper「Hexamethoxyphenalenyl as a Possible Quantum Spin Simulator: An Electronically Stabilized Neutral π -Radical with Novel Quantum Coherence Owing to Extremely High Nuclear Spin Degeneracy」上田 顕(大阪大学)、鈴木 修一(大阪大学)、吉田 健太(大阪大学)、福井 晃三(大阪大学)、佐藤 和信(大阪市立大学)、工位 武治(大阪市立大学)、中筋 一弘(大阪大学)、森田 靖(大阪大学)
- 2013年6月：公益財団法人藤原科学財団第54回藤原賞「光格子時計の発明と実現による高精度原子時計技術の開発」香取 秀俊(東京大学)

ハイブリッド量子情報処理

東京大学 教授
古澤 明



量子情報科学分野で伝統ある国際会議の1つであるQCMC (Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing) が昨年夏、ウィーンで開催され、筆者は講演を行った。そこで気づいたのであるが、“Hybrid” がタイトルに入った講演が5つもあった。明らかに“Hybrid” が量子情報科学の分野でキーワードになりつつある。本稿では、近年筆者らが唱え始めたハイブリッド量子情報処理について紹介する。

皆さんご存じのとおり、量子は粒子性と波動性を有する。量子情報処理ではその両面を使ってはいるものの、粒子性に重きを置いた量子ビット、波動性に重きを置いた連続量ベースの量子情報処理に大きく分かれている。これは、コンピューターが、デジタルコンピューターとアナログコンピューターに分かれているのと同じようなものだと考えられる。ただ、量子情報処理の場合、量子ビットと言っても重ね合わせであるため、ある意味ではアナログ演算を行っているようなものなので、量子ビットと連続量の間にはそれほど大きな違いはないのかもしれない。

しかし、これらは独自の発展を遂げてきた。特に光の場合、量子ビットは単一光子により構成され、基本的なテクノロジーは単一光子源とフォトンカウンティングであるのに対し、連続量は光の振幅変調と位相変調にコードされ、基本的なテクノロジーはスクイーズ光源とホモダイン測定というように、厳格に分かれていた。もう少し言うと、量子ビットは単一光子のパルス(波束)であるのに対し、連続量は連続波であり、両者には大きな溝があった。

ところが、それらが歩み寄ろうという機運が生まれつつある。その背景には、単一光子ベースの量子情報処理を、これまでのように単一光子源とフォトンカウンティング

一辺倒で行っていたは色々な点で大きな困難が伴うこと、および連続量の量子情報処理でもスクイーズレベルが10デシベル程度で頭打ちとなり、情報処理の忠実度がエラーフリーを実現するレベルには届きそうもないことがある。

どのように歩み寄ろうとしているかは以下のとおりである。例えば、単一光子ベースの量子ビット量子情報処理において、ホモダイン測定を用いた連続量ベル測定を行う。ベル測定とは、元々独立だった2つの入力をエンタングルさせる測定で、量子テレポーテーションやそれを基礎にした量子情報処理(量子ゲートテレポーテーション)における中心的な存在である。このようなことを行う理由は、フォトンカウンティングを用いた通常のベル測定で高い効率を出すことは非常に困難であるが、ホモダイン測定を用いた連続量ベル測定ではこれが可能だからである。また、連続量テレポーテーションにのみ存在する、古典情報チャネルゲインという調整機構を用いれば、単一光子ベースの量子ビットを連続量テレポーテーション装置でテレポートするとき、有限のスクイーズレベルでもエラーフリーに十分な忠実度が達成できる。

このように、量子ビットと連続量の手法のハイブリッド化を行えば、従来それぞれで困難とされていたことを回避することができ、究極の目標であるエラーフリーの量子情報処理も夢ではないように思われる。今までそれぞれは独立に発展してきたが、双方の良い点を取り入れ、大きく飛躍したいところであるし、その素地は出来上がっていると思う。筆者はそれなりにこの分野に長くいるが、今のように大きなチャンスに満ちた瞬間は無かったように思う。

量子フィードバック制御による無条件な量子ノイズ圧搾に成功

論文情報 Ryotaro Inoue, Shin-ichi Ro Tanaka, Ryo Namiki, Takahiro Sagawa, and Yoshiro Takahashi, "Unconditional Quantum-Noise Suppression via Measurement-Based Quantum Feedback", Phys. Rev. Lett. 110, 163602-1-5 (2013)

関連URL <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.110.163602>

京都大学
高橋 義朗

近年、個々の量子系の制御技術は非常に高度なレベルに達しており、昨年度のノーベル物理学賞が、個々の光子およびイオンを制御・観測する技術の発展に関する研究に与えられたことは記憶に新しいところです。京都大学では、これまで、原子スピン集団を対象としてスクイズドスピン状態を生成する研究を行ってきました。今回、原子スピン集団に対して量子非破壊測定を行うことによって得られたスクイズドスピン状態に対して、測定結果に基づくフィードバック制御を施すことにより、測定結果によらず、同じスピンの期待値をもったスクイズドスピン状態を生成することに成功しました。

実験では、まず、基底状態に核スピン1/2のみを持つイッテルビウム171原子をレーザー冷却により低温高密度の状態を集め、光ポンピングにより一方向に偏極させ、コヒーレントスピン状態を準備しました。そこに、非共鳴の直線偏光した光を入射して、その偏光回転を測定しました。このままでは、測定結果に応じて異なるスピンの期待値をもったスクイズドスピン状態が生成されているわけですが、得られた測定結果を、FPGAを用いて制御用の円偏光した光パルスのパルス長に変換し、その光パルスにより測定結果に応じて異なる角度だけスピンを回転させる、という

量子フィードバック制御を行いました。その結果、測定結果によらず、同じスピンの期待値をもったスクイズドスピン状態を生成することに成功しました。また、フィードバック制御を多数回施すことにも成功し、量子トラジェクトリの観測を可能にしました。また、こうした過程は、量子版のマックスウェルの悪魔に対応します。

今回実現された量子フィードバック制御の実現は、量子制御の研究にとどまらず、量子限界を超えた精密測定、などにも大きな進展をもたらすことが期待されます。

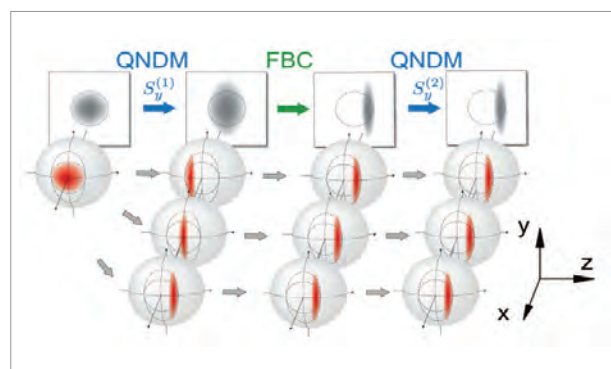


図 量子フィードバックによるスピンノイズの無条件圧搾

縮退原子集団スピンのエコー法によるコヒーレンス制御

論文情報 Yujiro Eto, Sawako Sekine, Sho Hasegawa, Mark Sadgrove, Hiroki Saito, and Takuya Hirano, "Control and Detection of the Larmor Precession of F=2 87Rb Bose-Einstein Condensates by Ramsey Interferometry and Spin-Echo", Applied Physics Express 6, 052801 (2013)

関連URL <http://apex.jsap.jp/link?APEX/6/052801/>

学習院大学
衛藤 雄二郎、平野 琢也

高感度磁力計は多種多様な応用の可能性を持っており、量子技術を利用した標準量子限界を超える感度の磁力計の開発は重要な研究課題である。磁力計の感度と空間分解能には一般にトレードオフの関係があり、冷却原子を用いることで、数ミクロン程度の空間分解能の高感度磁力計を実現できる。その際、感度の向上には、原子集団のスピンのコヒーレンス時間が長いことが重要となる。

本論文は、量子縮退したルビジウム原子気体のスピンに対してスピンエコー技術を適用することで、コヒーレンスの制御に成功したことを報告したものである。交差型光トラップ (Crossed FORT) 中のボース・アインシュタイン凝縮体 (BEC) にラジオ波パルスを照射することで、原子のスピンを $\pi/2$ または π 回転させることができる。 $\pi/2$ パルスを照射すると、原子スピンは磁場中でラーモア歳差運動を行う。磁場勾配が存在すると、場所によって磁場の大きさが異なるので、原子集団のスピンはらせん構造を持つようになる。図の吸収イメージング像の一番右の $m_F=2$ 以外の成分が分裂しているのは、らせん構造によるものである。本論文では、 π パルスを照射すると、らせん構造を逆戻しにすることが可能であり、更に、DC的な磁場変動の影響も除去でき

ることを実験的に示した。このようなスピンエコー法は、特定の角周波数の交流磁場のみに感度を持つ交流磁力計に応用することが可能であり、実際、我々は高い感度を持つ交流磁力計としての動作を確かめることができた。この磁力計は、環境磁場の制御が不完全な時でも特定の交流磁場を検出することが可能であり、従来実現されていたBEC磁力計よりも実用性が高いと考えられる。

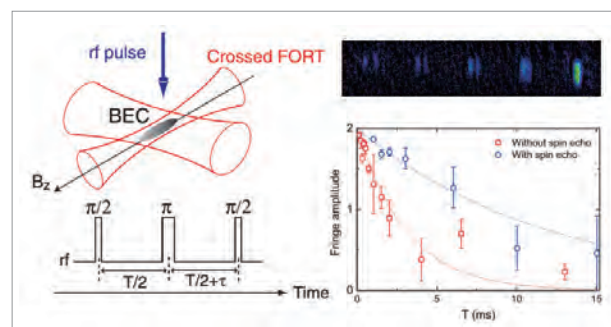


図 実験概略図 (左上) およびパルスシーケンス (左下)。スピン5成分の吸収イメージング像 (右上) および原子集団の平均スピンのコヒーレンス時間 (右下)

3 電流励起ポラリトンレーザー

論文情報 C. Schneider, A. Rahimi-Iman, N. Y. Kim, J. Fischer, I. G. Savenko, M. Amthor, M. Lerner, A. Wolf, L. Worschech, V. D. Kulakovskii, I. A. Shelykh, M. Kamp, S. Reitzenstein, A. Forchel, Y. Yamamoto, and S. Höfling, "An electrically pumped polariton laser", Nature 497, 348–352(2013)
 関連URL <http://www.nature.com/nature/journal/v497/n7449/full/nature12036.html>

国立情報学研究所／スタンフォード大学
 山本 喜久

原子のボーズ・アインシュタイン凝縮体の登場は、コヒーレントな物質波を用いた量子シミュレーションや精密計測という新しい分野の扉を開くこととなった。もし、半導体チップ上に集積化された小型デバイスで直接電流注入励起によりコヒーレントな物質波を連続して生成することができれば、更に新しい応用分野が開かれる可能性がある。ウルツブルグ大学・スタンフォード大学・国立情報学研究所のチームは、pn接合を介して量子井戸へ電子とホールを注入するマイクロキャビティーを開発した(図1a)。電子とホールはフェルミ粒子であるが、クローン引力により束縛され、励起子と呼ばれる“水素原子”様の複合ボゾン粒子を形成する。しかし励起子はその質量が重く、結晶の格子欠陥などにトラップされ易く、そのボーズ粒子性は直ぐに失われてしまう。そこで、量子井戸に閉じ込められた励起子をマイクロキャビティーに閉じ込められた光子と強結合させ、励起子の質量を1万分の1以下に軽くして、格子欠陥にトラップされにくくした。また、このようにすれば、ボーズ・アインシュタイン凝縮を起こす温度を1万倍以上高温にできる。素子からの反射スペクトルは、5.5meVのポラリトン分裂を示しており(図1b)、これはキャビティーの共鳴幅0.224meVよりも十分に大きい。この素子に直流磁場をかけて、ポラリトンにゼーマン分裂を与えながら、電流レベルを上げていくと、ゼーマン分裂を残したまま、コヒーレントな発光が観測された。

これにより、励起子と光子が強結合を保持したまま、凝縮相を生成したことが確認された。

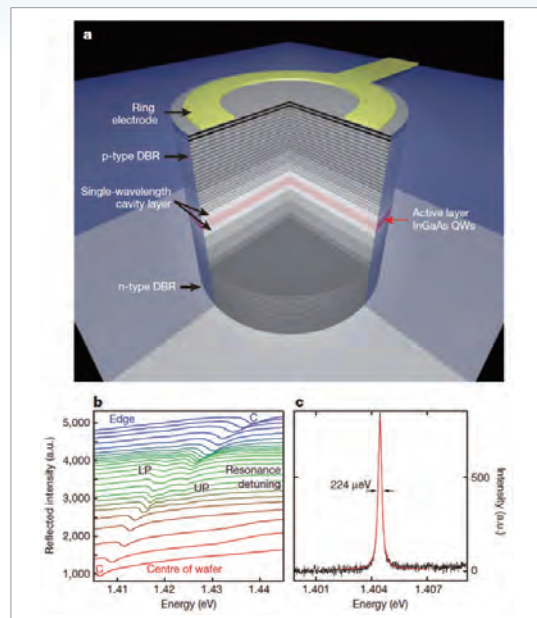


図 電流励起ポラリトンレーザーの素子構造と正規モード分裂、発光スペクトル

4 2重量子ドットを用いて光生成単一電子及びそのスピンの非破壊で信頼性の高い検出に成功

論文情報 T. Fujita, H. Kiyama, K. Morimoto, S. Teraoka, G. Allison, A. Ludwig, A. D. Wieck, A. Oiwa, and S. Tarucha, "Nondestructive Real-Time Measurement of Charge and Spin Dynamics of Photoelectrons in a Double Quantum Dot", Physical Review Letters, Published online: doi:10.1103/PhysRevLett.110.266803 (June 2013)
 関連URL <http://prl.aps.org/abstract/PRL/v110/i26/e266803>

東京大学
 樽茶 清悟

東京大学・樽茶清悟のサブグループは、半導体量子ドット中の電子スピンを用いた小規模量子システムを拡張する量子インターフェースの開発のため、電気制御量子ドットの電子スピンの光子の偏光状態と「単一量子」で結ぶ量子状態転写の実現を目指しています。これまで単一量子ドットで単一光子検出に成功していましたが、今回2量子ビット操作が実現している2重量子ドットを用い、非破壊で信頼性の高い単一光子検出とそのスピン検出に成功しました。

本研究では、GaAs/AlGaAs二次元電子系に形成された2重量子ドットと近傍の量子ポイントコンタクト電荷計、直上に形成した金属遮光電極を組み合わせた試料を用いました(左図)。本成果のポイントは、量子化準位が左右の量子ドットで一致するときの電子が繰り返し左右にトンネルする共鳴トンネル信号を利用したことです。典型的な光生成単一電子の捕捉信号には光パルス照射直後の共鳴トンネルを示す振動電流が見ら

れます(右図)。共鳴トンネルは背景の電流変化や雑音に左右されないで高感度で信頼性が高い単一光子検出が可能となり、さらに捕捉した電子を失わない非破壊の検出を実現しています。

スピン測定の実験として、2重量子ドット中のスピン相関現象に代表されるスピン閉塞領域において実験を行い、光励起したスピンの用意したスピンと平行の場合に見られる共鳴トンネルの抑制の観測に成功しました。今後は生成電子スピンをより高い精度で測定することで光の円偏光情報を読み取る予定です。

この成果は、Physical Review Letters 110, 266803 (2013)に掲載されました。

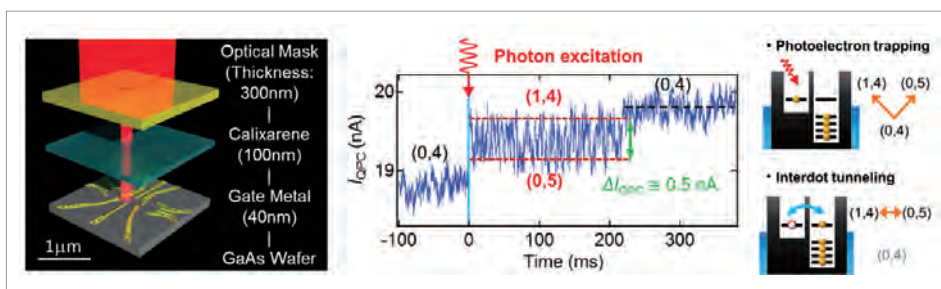


図 (左) 試料の構造。(右) 典型的な光生成電子の捕捉信号。光生成した電子が左右のドット間を繰り返しトンネルし、電極へ抜けた様子が見られる。



量子情報の インターフェース を作る

異なる物理系をつなぐ
「ハイブリッド量子系」の実現へ

中村泰信



(なかむら・やすのぶ) 東京大学先端科学技術研究センター教授 1968年大阪府生まれ。1992年東京大学大学院修士課程修了, NEC入社。2002年理化学研究所客員研究員兼務。05年NEC主席研究員, 2011年東京大学から博士号(工学)取得, 12年から現職。

「超伝導量子ビットの中村」の名は世界に聞こえている。1999年, NEC基礎研究所の主任だった中村泰信氏は超伝導素子で量子的な重ね合わせ状態を作り, *Nature* 誌の表紙を飾った。それ以前, 量子コンピューターの演算素子となる量子ビットは, 液体中の分子のスピンや光回路だった。シリコン基板にアルミで配線した初の固体の超伝導量子ビットは集積化への期待を抱かせ, 量子コンピューターを夢から現実の目標へと引き寄せた。

だが昨年, NECから東京大学先端科学技術研究センターへと転じた中村教授の研究室に, 今まで超伝導を研究してきた研究者は見当たらない。メンバーのこれまでの専門は原子実験, 光量子実験, 電子スピン制御と多様だ。中村教授は「超伝導をやっ

てきたのは僕だけなんです」と笑う。理由は「超伝導とほかの量子系を組み合わせる研究に取り組みたい」からだという。目標はこれまで培った超伝導回路の技術を使い, 光や電子など他の量子系を制御する「量子情報インターフェース」の実現だ。

超伝導素子のブレイクスルー

中村教授がこれまで手がけてきたのは, 超伝導回路に流す電流で「0」と「1」を記録する「超伝導磁束量子ビット」だ。左周りに流せば回路に上向き, 右回りに流せば下向きの磁束が生じ, 両方を重ね合わせにした量子状態を作ることができる。

超伝導量子ビットについては最近, 2つのブレイクスルーがあった。1つは素子の寿命を大幅に伸ばす方法が

見つかったことだ。超伝導量子ビットは, 制御や読み出しに利用する共振器と組み合わせて使う。通常は基板上に微細加工で作り込むが, 米エール大学のグループはこれをやめ, 金属をくり抜いた3次元の共振器を作って素子を基板ごと中に入れた。「2次元のチップから3次元の箱に先祖返りするような」アイデアだったが, これが奏功。量子状態を保てる時間は一桁延びた。

量子計算が実現するかどうかは, 素子の計算動作をどれだけ正確に制御できるかにかかっている。それを決める最大の要素が, 素子の寿命だ。寿命が延びれば, 動作精度は向上する。

3次元のままで素子を集積するのは難しいが, 3次元共振器での実験から, 2次元チップを作る際の重要なヒントが得られた。回路表面の結晶

欠陥が量子ビットのエネルギーを吸収してしまい、寿命を縮めていることがわかったのだ。2次元でも結晶の作製法を工夫し、表面欠陥を少なくすることで、寿命を延ばせるメドがたったという。

もう1つは量子ビットに記録された「0」「1」の値を、量子状態を壊さずに読み取る技術の開発だ。NEC・理化学研究所のチームにいたとき、超伝導量子ビットの新たな読み出し装置を開発した。量子ビットを入れた共振器に微弱なマイクロ波を照射すると、内部の超伝導量子ビットと相互作用し、その情報が位相に記録されて戻ってくる。この信号を「パラメトリック増幅」と呼ばれる手法で増幅して読み出す。

一般に量子ビットの値を測定すると、その量子ビットの量子状態は壊れてしまう。だがこの装置では照射するマイクロ波がごく弱く、量子状態を壊さない「非破壊測定」が可能だ。量子ビットの値を繰り返し連続的に測定することができる。

この分野には近年、海外の有力

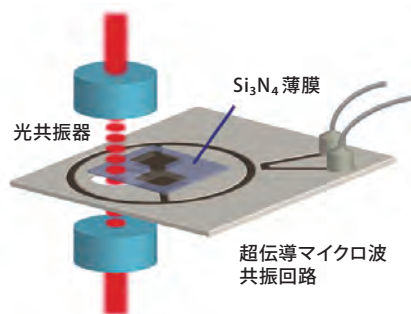
チームが相次いで参入している。オランダのデルフト工科大学やカリフォルニア大学バークレー校、カリフォルニア大サンタバーバラ校、スイス連邦工科大学チューリッヒ校などがしのぎを削る。

「演算や読み出しなど全てを含めた全体の動作精度を99.9%に高めることができれば、途中でエラーが起きても、それを修正しながら量子計算を進めることができます」と中村教授は話す。「20～30ビット程度の量子コンピュータモデルを構築して、それを実際に示したいと思っています」。

集団の運動を量子化する

これらの超伝導実験の蓄積を生かし、中村教授が東大で新たに取り組みたいと考えているのが、複数の量子系を結ぶ「ハイブリッド量子系」の構築だ。量子情報処理は、どんな物理系を使うにしても一長一短がある。超伝導量子ビットは制御はしやすいが冷凍機の外に出せない、光子は通信には向くが量子もつれは作りにくいなどだ。もし光ファイバーで通信されてきた光子に記録された量子情報を磁束量子ビットに移し替え、量子もつれにして、再び光子に乗せて送り出すといったことが可能になれば、量子情報処理の可能性は大きく広がる。

最近、特に興味をもっているのは、ナノ領域のメカニクスを利用した、異なる量子系のインターフェースだ。シリコン基板に500μm四方の窓を開け、厚さ50nmの窒化ケイ素の薄膜を張る。こ



量子情報インターフェース 薄膜の機械的な振動を介して、光とマイクロ波の間で量子情報をやりとりする構想中のデバイス

れを光共振器の中に入れ、さらに周辺の基板に超伝導で作ったマイクロ波の共振回路を配置する(右上の図)。そして全体を極低温に冷やす。

光共振器の中に光を入れると薄膜が振動し、それが量子化されてフォノンになる。次にそのフォノンをマイクロ波共振回路で吸収すると、薄膜は冷やされ、回路はマイクロ波を発振する。こうして光に記録された量子情報が、薄膜のフォノンを介してマイクロ波に伝わる。

異なる量子系の間を中継する媒体としては、こうしたメカニカルな振動のほか、強磁性体材料の中の電子スピンの振動が量子化されたマグノンなども有力候補だという。

超伝導量子ビットのキャッチフレーズは「巨視的コヒーレンス(量子可干渉性)」だった。量子的な効果は通常、電子や光子など微細なものでしか観測されないが、超伝導量子ビットは、回路を流れる膨大な数の電子集団が右向きと左向きの重ね合わせになっている。それが「巨視的」の名の由来だ。

フォノンやマグノンも同様に、結晶格子の振動や電子スピンの集団が担っている。「そうした集団的な運動の量子化を切り口に、新しいことをやりたいですね」と中村教授は声を弾ませた。

この記事は『日経サイエンス』2013年10月号に掲載されたものです。



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、量子情報システム、超伝導量子コンピューター、スピン量子コンピューター、量子シミュレーション、量子標準、量子通信の6つのサブテーマについての研究活動を行っています。全6回にわたり各サブテーマの紹介をしています。今回は、「量子シミュレーション」の研究活動について解説します。

高度に制御可能な物理系を用いた 量子シミュレーションの新展開

サブテーマ「量子シミュレーション」では、高度な量子制御可能な物理系である、「冷却原子」、「固体電子系と光の結合系」、および「イオントラップ」を実験対象として、ハバードモデルや量子スピンモデルなどの、凝縮系のなかでも特に強相関系の物理として重要な問題について“量子シミュレーション”を実行することを目的としています。特に、それぞれの系が得意とする量子シミュレーション研究を行うと同時に、同一の強相関量子多体系の量子シミュレーションを遂行しそれぞれの実験結果を比較検討することにより、量子シミュレーション結果の正当性を検証することを目的としています。

以下では、高度な量子制御可能な物理系として、「光格子中の冷却原子」、「スピノールBEC」、「アトムチップ」、「励起子」、および「イオントラップ」、を用いて取り組んでいる各チームの研究状況を以下にまとめました。

光格子中の冷却原子を用いた 量子シミュレーション

まず、「光格子中の冷却原子」では、豊富な同位体が存在すること、長寿命の準安定励起状態が存在すること、準安定状態を用いた高分解能レーザー分光によるプローブが可能であること、など、多くのユニークな特徴をもつ2電子系原子のイッテルビウム (Yb) 原子を用いて、ハバードモデルの量子シミュレーション研究を行っています。

まず、ボース・ハバードモデルについて、高分解能レーザー分光を駆使して、その有限温度の量子相を決定することを行っ

ています。図1がモット絶縁体状態のレーザー分光の例です。この手法により、超流動・モット絶縁体転移、および、常流動・モット絶縁体転移の振る舞いが明らかになりつつあります。

また、Yb原子のフェルミ同位体には、これまでの固体系に存在しないユニークな、SU(6) という高いスピン対称性を持っているものが存在します。これに着目して研究を進め、ボメラント冷却機構により、いわゆるSU(6) モット絶縁体の生成に最近成功しました。また、ボソンとフェルミオンが一緒になって各格子点に1原子が存在する、というボース・フェルミ混合モット絶縁体を初めて実現し、その振る舞いを明らかにしました。

また、Yb原子を用いた量子シミュレーションの新しい方向として、光格子中の単一サイトの観測・選択的操作の実現を目指しています。自由に任意の場所に格子欠陥を導入することにより、例えば、長岡強磁性などの遍歴磁性の重要問題に応用できると期待しています。

また、Yb原子とリチウム (Li) 原子の同時量子縮退および光格子の構築にも成功し、Li原子のFermi Seaの中に、不純物のように局在したYb原子の高分解能レーザー分光を行うことができています。その大きな質量比のため、この系は、アンダーソン局在の研究に適した系になっています。

さらに、原子間相互作用を制御する新しい方法として、光により高速かつ高空間分解能で散乱長を制御する方法である、いわゆる光フェッシュバッハ共鳴法の開発に成功しています。さらに最近、基底状態と準安定励起状態間の原子間相互作用を制御する新しいフェッシュバッハ共鳴を発見しました。これにより、異なる電子軌道間のクーパー対の異方性超流動という大変ユニークな量子凝縮相が実現できるものと期待しています。

ごく最近では、標準的な立方格子ではなく、「リープ格子」と呼ばれる格子を光格子で実現しました。図2にその結果を示します。この研究を推進して、いわゆる平坦バンド強磁性の理解や超固体の観測などにつなげたいと考えています。また、すでに我々が実装に成功しているYb原子系のスピン軌道相互作用と、この「リープ格子」を組み合わせることにより、新規なトポロジカル相が実現できるとの理論研究もあり、この方向でも今後研究を進めたいと考えています。

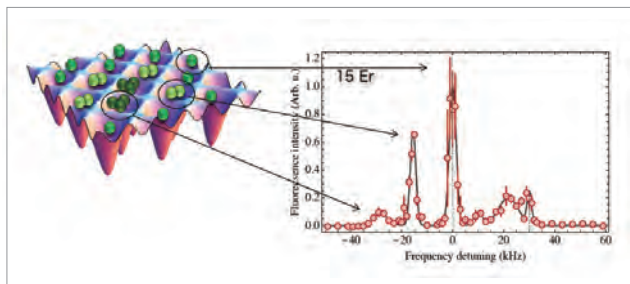


図1 モット絶縁体相中の原子の高分解能レーザー分光。光格子点中の異なる占拠数の共鳴が分離して観測できる。



京都大学

高橋 義朗

光格子中の冷却原子を用いた量子シミュレーション



学習院大学

平野 琢也

原子BECを用いた磁力計



NTT 物性科学基礎研究所

向井 哲哉

超伝導チップを用いた冷却原子の量子状態制御



東京大学

五神 真

多体電子系の量子現象とその光機能



大阪大学

占部 伸二

冷却イオンを用いた量子シミュレーション

なお、これらの量子シミュレーションの研究では、NTT 物性科学基礎研究所の山下・稲葉両氏と共同研究を行っています。

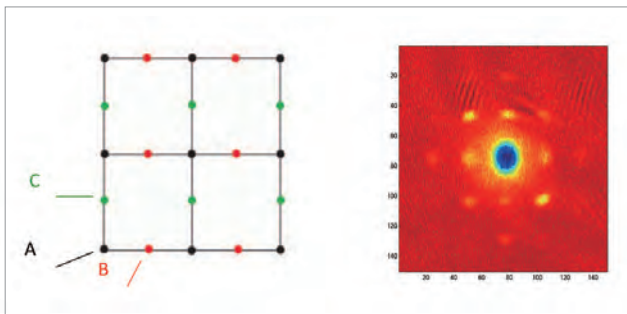


図2 リープ型光格子(左)とそこに導入されたYbボース凝縮体の干渉パターン(右)

原子BECを用いた磁力計

スピン自由度を持った量子縮退原子集団は、様々な応用の可能性を持つ研究対象です。原子気体ボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)は豊富な内部自由度を持ち、その内部自由度を生かした量子情報処理を行うことが可能ですが、その基本的な性質には未解明の部分が少なくありません。本研究は、昨年度までは量子計測サブグループの一つのテーマとして研究を進めていましたが、今年度から量子シミュレーションサブグループに所属が変更になりました。そのため、当初の研究目標である磁力計の開発の達成も継続しつつ、スピン自由度を持つ原子気体BECの基礎的な性質の解明などを通して、量子シミュレーションの研究への貢献を目指しています。

本研究で用いるルビジウム87はスピンの大きさが2の基底状態を持っています。スピン2のBECはサイクリック相と呼ばれる従来にないスピン秩序を示す可能性が理論的に指摘されていますが(M. Koashi and M. Ueda, PRL, 84, (2000) 1066.)、ルビジウムがこの相を示すかどうか今でも決着がついていません。量子情報処理への応用を考えると、例えば、スピンの書き込んだ情報は、スピン間相互作用により失われると予測されますので、その基礎物性の理解は必要不可欠と考えられます。磁力計への応用でも、BECの集団的なスピンのコヒーレンス時間が重要となります。

最近、私たちは原子BECを交流磁力計として動作させることに成功しました(Y. Eto, *et al.* arXiv:1306.1011)。この交流磁力計は、スピンエコー技術を用いるもので、DC的な変動磁場や磁場勾配の影響を低減することができます(本ニュースレター「最近の研究成果」参照)。現状の感度は、空間分解能 $100\mu\text{m}^2$ に対して $12\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ と、従来の最高感度とほぼ同等であり、原子ショット雑音限界に近い感度です。交流磁力計の利点の一つは実環境下の動作が容易なことです。私たちのBEC生成装置は磁気シールド内に設置されていますが、この交流磁力計を用いた測定により、50Hzの電源ラインに同期した微弱な交流磁場を検出することができました。さらに、測定された磁場と逆相の磁場を人為的に印加することにより、磁場変動を小さくすることができました。このような微弱磁場生成技術は、量子シミュレーションなどの応用に有用であると考えられます。

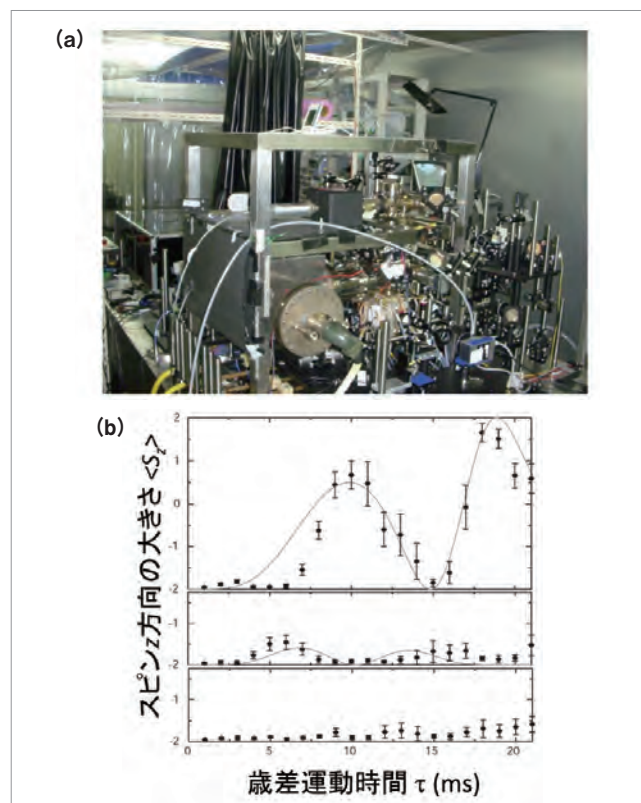


図3 磁気シールド内のBEC生成装置と交流磁力計による環境磁場測定とその低減

超伝導チップを用いた 冷却原子の量子状態制御

量子縮退した原子集団を、光の双極子力による周期ポテンシャルに閉じ込めることで「量子シミュレーション」の研究に道が拓かれましたが、中性原子の運動を制御する強い閉じ込めは、磁場によっても可能です。その代表例が、微細加工された電線で作られたアトムチップを用いる方法です。私達のチームでは、究極的に安定な磁場と考えられる超伝導永久電流の磁場を利用して原子の運動を制御し(図4)、擬1次元の量子縮退原子気体による量子シミュレーションから、物質波を利用した量子計測の実現までを視野に、冷却原子の量子状態制御の研究に取り組んでいます。

この研究の最大の特徴は、超伝導永久電流を用いることで、金や銅を用いる従来のアトムチップでは問題になる熱的雑音の影響を無くし、電流から数十マイクロメートル以内の距離でも原子を安定に保持できることです。その結果、電流近傍の強い磁場勾配を利用した擬1次元のポテンシャルが実現できます。光による擬1次元ポテンシャルが、2次元的な定在波を基本とするトラップの集団平均であるのに比べ、アトムチップによる単独の擬1次元ポテンシャルは、トラップ中の原子数の多さ、観測の容易さに優れ、ボース凝縮体の低次元特性を調べる上で優位性があります。

このアトムチップによる擬1次元ポテンシャルの応用の一つは、電線のパターンを比較的自由に配置できることを利用して、単一モードの原子導波路を形成し、原子干渉計を作ることです。また、光ポテンシャル／1次元光格子をアトムチップの磁場ポテンシャルに重畳することで、原子を移動させる、あるいは、複数のトラップサイトを1列に並べ、個々のサイトの原子集団に独立にアクセスすることも期待できます。

最近の技術的な進展として、超伝導永久電流アトムチップ上でのボース凝縮体の生成、並びに、ボース凝縮体を内部状態の異なる状態へコヒーレントに遷移させることも可能になってきました。その結果、内部状態を利用した原子干渉ができるだけでなく、多成分ボース凝縮体を利用した量子シミュレーションへの道も拓けてきました。

超伝導永久電流アトムチップは、オリジナルなアプローチに

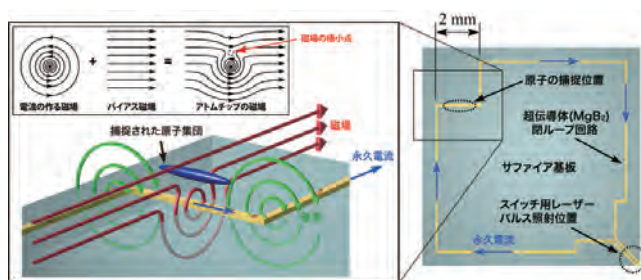


図4 超伝導永久電流アトムチップの概念図

よって、学術と応用の両面を視野に、冷却原子の量子状態制御への挑戦を続けています。

サブケルビン温度における 励起子ボース・アインシュタイン 凝縮体の安定化

五神グループでは、半導体励起子系・電子正孔系・励起子共振器ポラリトン系における量子縮退状態の研究や、人工ナノ構造を用いた非線形光学過程や光学活性の巨大化の設計に取り組んでいます。ここでは、励起子のボース・アインシュタイン凝縮(BEC)に関する実験的研究について紹介します。

励起子は、半導体において光吸収の際に生じるフェルミ粒子である伝導電子と正孔が水素原子と類似の束縛状態を形成するものです。亜酸化銅(Cu_2O)におけるスピン禁制励起子は光との相互作用が特に弱いために再結合寿命が特異的に長く、一旦生成されると励起光遮断後も長く結晶にとどまります。いわば光励起で作られる「物質系」として捉えることができます。

励起子のBECの可能性が理論的に予言されてから既に50年程が経過しますが、3次元トラップ中のサブケルビン温度の励起子を用いた我々の2011年の報告までBEC転移の条件を実験的に実現することすら困難でした。このような素励起集団の凝縮状態が物質相としていかに振る舞い、量子光学的機能を示すかは理論的にも未知の問題です。現在よく知られている希薄原子や液体ヘリウムのBECの枠組みに当てはまらない特徴が励起子系には存在すると我々は信じ、精密な実験でそれを明確に示すことを目標としています。

現在我々が取り組んでいるのは、BEC転移条件を満たす段階までは到達できたこの凝縮体を安定化し、巨視的なものとする事です。この系の難しさは、我々が「励起子ライマン分光法」を用いて定量的に示したように(2010年)、二体非弾性散乱の断面積が非常に大きく、高密度化することができないことにあります。散乱によるロスを低減し凝縮体を安定化するためには励起子温度をさらに下げ、希薄なBEC転移条件を設計する必要があります。精密な設計のもと希釈冷凍機を用いた光学実験に挑戦し、半導体結晶に対する応力印加によって励起子の新たな冷却チャンネルが発現することを見出す等

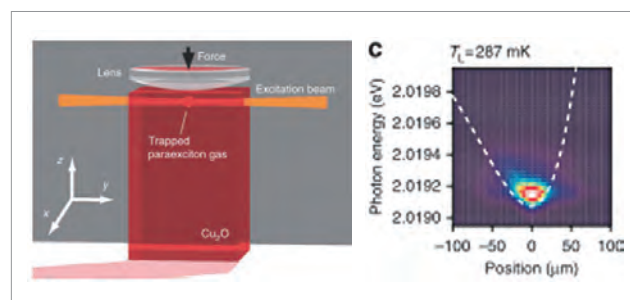


図5 バルク半導体励起子のサブケルビン温度におけるトラップ。

した結果、100mK程の、歴史的にも低温の励起子集団の生成に成功しています（2013年）。現在、実際に凝縮体を安定化できた証拠をとらえるための実験を進めています。

冷却イオンを用いた 量子シミュレーション

イオントラップを用いた量子シミュレーションは、個別のイオンの操作や状態観測が可能などの利点から、強磁性体のIsing模型の実験や固体のHubbard模型についての提案などがなされています。当研究プロジェクトでは、Jaynes-Cumming-Hubbard (JCH) 模型の量子シミュレーション実験を行いました。この模型は、共振器・原子結合系のアレイによる人工的な強相関系を記述するものとして提唱された模型であり、Bose-Hubbard模型で表される光格子中の中性原子と類似性を持っています。イオン内部の励起状態（局在した原子励起の状態：絶縁体相）に準備した2個のイオンにサイドバンド遷移にはば共鳴した光を照射し、その離調と振幅を時間的に変化させることにより、断熱的に基底準位を保ったまま終状態（非局在フォノンの状態：フォノン超流動状態）に移行させ、量子相転移を観測しました（図6）。また中間状態における秩序パラメタの評価を行い、原子とフォノンが結合したポラリトンの超流動相が実現していることを確認しています。

また、サイドバンド遷移を用いた多準位誘導ラマン断熱通過を利用し、4イオンのディッケ状態の生成を行いました。この方法ではイオンのレッドおよびブルーサイドバンドに共鳴した二色光を用い、それらの二色光の強度を独立に変調することによりディッケ状態の生成を行います。この方法によるディッケ状態生成は系が直積状態で表される常磁性相からディッケ状態で表される強磁性相に断熱的に移行するという量子シミュレーションとしても理解することができます。生成されたディッケ状態

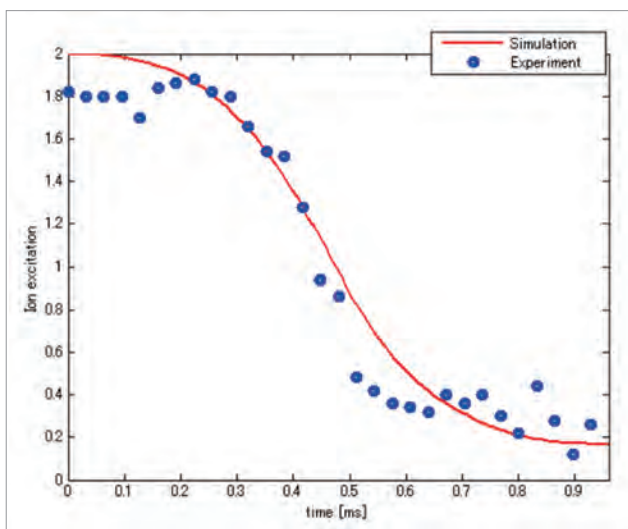


図6 原子絶縁体相からフォノン超流動相への断熱的な遷移。
縦軸は原子の励起数。

態のフィデリティは0.84以上でした。

量子シミュレーションの大規模化に向けて、マイクロ運動フリーで、イオンが2列に配列することが可能な平面型トラップを作成し、イオンの捕獲に成功しています。rf電圧の制御によりrfポテンシャルのノードが可変なトラップを作製し、2列にrfポテンシャルのノードを配置できる条件において、イオンが2次元的に配列するのを確認しました（図7）。通常のリニア型トラップでのジグザグ配置とは異なり、各イオンがrfポテンシャルのノード上にあるので、原理的にはDC電圧を調整してマイクロ運動を最小にでき、振動基底状態までの冷却が期待できます。

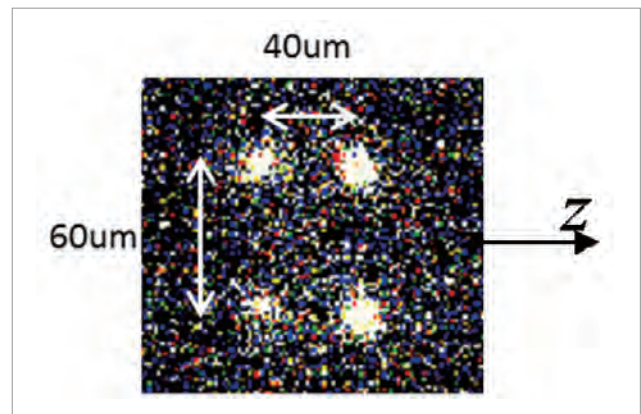


図7 z軸に平行に2列に並んだ4個のカルシウムイオン

執筆者：

光格子中の冷却原子を用いた量子シミュレーション
高橋 義朗（京都大学）

執筆協力者：

原子BECを用いた磁力計
平野 琢也（学習院大学）

超伝導チップを用いた冷却原子の量子状態制御
向井 哲哉（NTT 物性科学基礎研究所）

サブケルビン温度における励起子ボース・アインシュタイン凝縮体の安定化

五神 真（東京大学）
吉岡 孝高（東京大学）

冷却イオンを用いた量子シミュレーション
占部 伸二（大阪大学）

サイエンス アウトリーチ

理化学研究所 和光研究所 一般公開

■実施日 2013年4月20日(土) ■対象・参加者人数 一般 約8,500名 ■展示・デモンストレーション名 「物理のおもちゃであそんでみよう!」
■担当者 Franco Nori, 蔡 兆申、山本 喜久(理化学研究所)

4月20日(土)に理化学研究所和光研究所にて、一般公開が開催され8,500人もの来場者を迎えました。我々のチーム(Franco Nori, 蔡 兆申、山本 喜久)によるデモンストレーションにも約2,000人の方が参加して下さいました。子供から大人まで様々な物理の原理を用いたおもちゃを通して、遊びながら学べるような展示を設けました。家族に連れられたお子さん方も、様々な「教育用科学おもちゃ」など、インタラクティブな展示をみなさん楽しまれたようです。中学校や高校から来られた学生は、時々質問をしてはノートにその答えを自身の考察ともに書き込んでいました。

展示の一部は電気と磁気についてのものでした。電磁気は回路の理解につながりますし、また我々の研究分野の一つでもあります。(我々は量子回路について研究していますが、オープンハウスではわかりやすい古典物理に関連した現象をあつかいました。)

電気と磁気の展示では、教育的かつ実際に手で触れて操作できる多くの対話型デモを用意しました。様々な物理法則を

使った楽しめる展示を行いました。

また、ミクロの世界への入り口として、学生や子供や大人が微視的世界を直接間近で見ることができるよう、いろいろなサンプルとデジタル顕微鏡を設置しました。

体験型の展示を使って、物理の他の側面も見ていただきました。たとえば、エアガン、落ちていくコインの位置エネルギーを回転エネルギーに変換するパラボラ型の漏斗、オイラーの円盤(これも回転する大きな円盤の位置エネルギーを速くなっていく軸回転のエネルギーに変換します)、ソリトン波の発生、定在波を使った様々な現象、真空を作り出してものを表面でくっつけ合わせる方法、沢山のこま、角運動量の体験、表面張力や泡、液体の中の相分離などです。

一般公開の詳細な情報は下記サイトよりご覧頂けます。

<http://openday.riken.jp/>

[理化学研究所 Franco Nori]



国立情報学研究所 オープンハウス

■実施日 2013年6月14日(金)、15日(土) ■対象・参加者人数 一般 1,376名
■ポスター展示名 「コヒーレント光と物質波を用いた量子情報処理」 ■担当者 山本研究室(国立情報学研究所)

国立情報学研究所では、研究所で行われている研究の成果や活動について、広く一般の方々に知って頂けるように毎年オープンハウス(一般公開)を開催しております。山本研究室では、「コヒーレント光と物質波を用いた量子情報処理」というタイトルで2枚のポスター発表を行いました。このポスター発表では、FIRST量子情報プロジェクトで行っている「注入同期レーザーネットワークを用いたコヒーレントコンピュータ」と「励起子ボラリオン凝縮体を用いた量子シミュレーション」の研究の進捗状況について発表いたしました。

例年、国立情報学研究所のオープンハウスは平日に開催されていたため、来場者の多くは大学生や社会人の方でした。今年度のオープンハウスは例年と違い、6月14日(金)・15日(土)と土曜日にも開催されたため、2日目に多くの中高生の方にお越しいただきました。山本研究室のポスター発表でも多くの中高生の方にお越しいただき、「量子情報」について興味を持っていただく良い機会になったと思います。もしかしたら今回のオープンハウスで「量子情報」に興味を持ち、将来は大学でこの分野について勉強がした

い、研究者の道に進みたいと考えた中高生の方がいらっしゃるかもしれません。そのような機会が増えたということで、今年度のオープンハウスは例年にも増して有意義になったものと思われます。

今年はFIRSTプロジェクトの最終年度に当たりますので、来年度のオープンハウスではさらなる研究成果が発表できますように、研究を進めて参りたいと思います。

[国立情報学研究所/東京大学 松尾 康弘]



東京理科大学 高柳研究室

自己組織化InAs 微細構造

東京理科大は、今年の3月に新しく葛飾キャンパスを開設し、高柳研究室も、葛飾に移転しました。新しい実験室で、研究を開始しています。また、高柳は、(独)物質・材料研究機構(NIMS)のWPIセンター国際ナノアーキテクトニクス研究拠点(MANA)の主任研究員も兼務しているため、NIMSでも、素子の製作と測定を行っています。構成員は、理科大に助教2名、MANAにポスドク1名、私を加えて4名です。このほかに、大学院生が10名程おります。研究対象は、いわゆるメソスコピック超伝導で、超伝導素子のさまざまな特性を扱っています。例えば、グラフェンを超伝導体で挟んだ素子や、p波超伝導などです。FIRSTのテーマとしては、自己組織化InAs量子ドットと、量子リングの輸送特性を扱っています。

●自己組織化InAs量子ドット

光量子ビットと超伝導量子ビットを直接むすびつけるには大きな困難があります。それは、光のエネルギーは $1.5\mu\text{m}$ 帯なのにたいして、超伝導量子ビットのギャップはGHz帯と大きく異なっているからです。そこで、量子ドット中のスピンを用いて、この両者を結び付けようというのが、発想の原点です。そこでまず、InAs量子ドットをジョセフソン素子として用いたSQUIDを作成しその特性を測定しました(図1参照)。この素子にはバックゲートとサイドゲートが設けてあり、前者はドット中の電子数を、後者は、量子ドットとアルミ超伝導電極との結合度を制御します。2つのゲートを制御することにより、 π 接合の作成に成

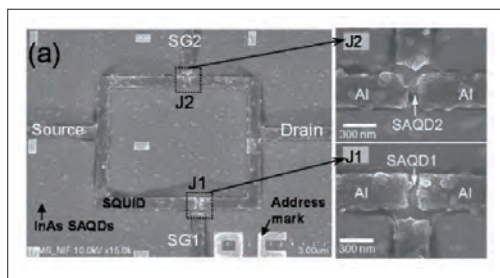


図1 InAs量子ドットで結合したSQUID

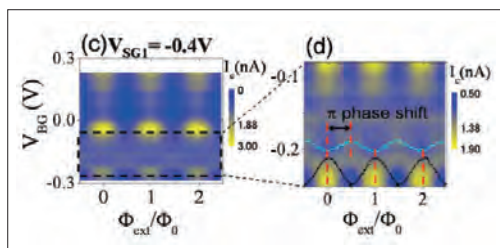


図2 超伝導電流の外部磁場依存性

功しました(図2参照)。 π 接合とは、通常のジョセフソン素子にたいして、その位相が π ずれたもので、超伝導電流が逆に流れます。つまり量子ドット中のスピン数の偶奇性によって超伝導電流の向きを制御できることになったわけです。そこで、現在は、量子ドットに光を照射して、スピンを制御し、さらにそれによって、超伝導電流を制御しようとしています。ちなみに、SQUIDは最も有望な超伝導量子ビットの一つです。

●自己組織化InAs量子リング

NIMSでは、MBE法を基にした、droplet epitaxyという手法によって、極微のInAs量子リングを作成することに成功しました。その大きさは、 $10\sim100\text{nm}$ というサイズで、これは電子ビーム露光のような従来の手法では作成できない大きさです。このリングの輸送特性を測定する理由は、一つには量子ドットと同等の機能を期待してですが、もう一つ別の特性を期待しているからです。それは量子位相すべりという現象で、超伝導の極微細線を磁束がよぎるときに、位相の滑りがおきる現象です。このような素子にマイクロ波を照射すると、ACジョセフソン効果の時のシャピロステップのようにステップがあらわれます。ただし、今度の場合は、定電圧でなく、定電流ステップです。ですから、量子位相すべりは、ジョセフソン効果の双対効果ともいえます。我々の量子リングは、量子位相滑りが期待できるほどに細いので、この効果が期待できるわけです。図3はリング両端の抵抗の外部磁場依存性で、1.8T以下では、抵抗の振動が不鮮明になっています。これは量子数と位相の関係において、位相がゆらいているものと考えられます。つまり、低磁場領域で、量子位相すべりが起きていると、推測されるのです。ちなみに、我々のInAs量子ドットは、In過剰のために、数テスラでも超伝導状態でいられます。現在、この現象の再現性を確認すると共に、リングに光を照射して、特性変化を見ようとしています。(高柳 英明)

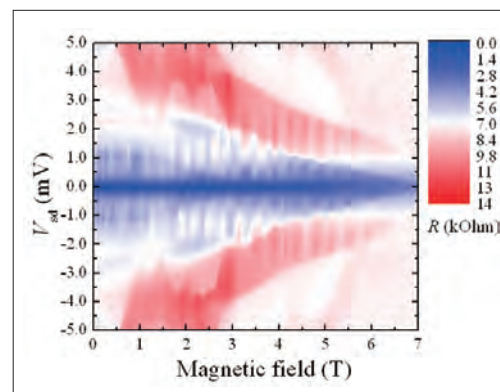


図3 InAsリングの抵抗の外部磁場依存性

●慶應義塾大学理工学部 伊藤公平研究室

私達が量子情報を始めたきっかけ

当研究室は、半導体同位体工学を専門とし、1995年から活動してきました。発足当初はゲルマニウムとシリコンの安定同位体を変化させたときに生じる電気・光学・格子振動(熱)特性の変化、すなわち同位体効果を調べていました。また、モット・アンダーソン転移と呼ばれる電子相関と乱れが拮抗した状況で金属状態と絶縁体状態が変化する、いわゆる量子相転移の臨界状態を、同位体によって得られる超均一・精密ドーピングを利用して調べていました。そのころ(1998年)に発表されたのがBruce Kaneによるシリコン量子コンピュータの提案です。同位体純化されたシリコン中にリンドナーを周期的に配置し、となり同士のリンの電子相関を用いて量子計算を実行するという有名なアイデアですが、これはまさに私達が取り組んでいた研究内容の延長です。当時、Bruceが直々に当研究室を訪ねてきてくれ、シリコン同位体結晶開発の可能性などを議論しました。このとき、私はすぐにも量子コンピュータ研究に移りたかったのですが、量子情報に関する知識が決定的に不足していました。そこで他のプロジェクトを進めながら勉強する方策として、コロラド州のアспен物理学研究所で夏休みの1ヶ月以上を過ごすことにしました。そこは主に理論家が集まる自然豊かな避暑地の研究所で実験設備はありません。できるのは物理に関する議論と勉強だけです。誰でも受け入れられるわけでもないので、私は金属・絶縁体転移の研究を実施する事を名目に応募・採択され、実際に1/3は量子相転移の議論、残りの2/3を量子情報の勉強に費やしました。ここでラッキーだったのがIsaac Chuangが名著”Quantum Computation and Quantum Information”の最終稿を仕上げていたことです。よって最終稿を読みながらわからないことをIkeに直接質問できました。また、量子情報と言えばStanford大の山本喜久先生だ! ということで連絡をとったところ、面識のない私の訪問を快く受け入れてくださいました。そこで私が「 ^{29}Si 核スピンを量子ビットとして利用したい」と相談したところ「一列に並べる事ができるならOKだが、それができる見込みを示して欲しい」とアドバイスされました。その翌年(2001年)春に当時私の大学院生だった阿部英介さん(現在は理研・山本喜久グループ)と私の二人で

Hawaii・Spintech Iという会議に参加し、招待講演者として来られた山本先生に「 ^{29}Si は一列に並べられる」という宿題の回答を提示したところ、山本先生が「では一緒にやろう!」ということになりました。その夏には阿部さんがStanfordに滞り、当時の山本研大学院生のThaddeus Laddらと”An all-silicon quantum computer (2002年PRL)”構想を仕上げました。この夏も私はアспенで過ごしStanfordと電話やメールで連絡をとりながら構想の完成に参加しました。

あれから10年! 当研究室のHPの発表論文リストをご覧になればわかるとおり、Si量子情報研究は当初の予想を上回るペースで進み、一昨年には同位体シリコン中のリンの電子・核スピン間の2量子ビットエンタングルメント生成・検知にOxford大らと共同で成功し、今は単一リン量子ビット研究を豪New South Wales大学と共同で進めています。この間、一人でも多くの優れた学生を世界中の研究室に送り出すことに私は努めて来ました。また、自分の研究室内で完結する研究を避け、常に世界中のどこかの研究室と共同で取り組む研究を実施して来ました。これは学生に世界とつながることの大切さと大変さを教え、その環境のなかで成長してもらうためです。

シリコン量子情報研究はコンセプトの実証段階を終了し、単一スピンの集積化という工学研究ステージに入っています。ここからが勝負であることは間違いないのですが、新しいコンセプトの実証も研究者としては実施しなければいけません。そこで並行して進めているのがダイヤモンドを用いた量子センシング研究です。これは1つまたは少数の量子ビットを用いて古典限界を打ち破る高感度測定を実現しようというものです。同位体結晶技術、磁気共鳴技術といったシリコンで蓄積されたノウハウがそのまま適用できるのが最大の魅力で、国境を越えた協調を更に拡大させてくれる研究です。

URL : http://www.appi.keio.ac.jp/ltoh_group/jp/
(伊藤 公平)



金属系超伝導デバイス 作製拠点を目標して

● 私たちは何をしているのか

私たちのグループは、金属超伝導体であるNbを使った集積回路プロセスの開発と研究機関への超伝導デバイスの供給を行っています。研究の進展とともにより高度なデバイスが必要となります。しかし、そのような高度なデバイスを作るには、高価な設備と高度な技術が必要となります。昔はそれぞれの研究機関がデバイスを自作していましたが、それでは追いつかなくなってきました。また、コストのかかるデバイス作製を外部に任せることで、各研究機関は自分の得意なところに研究資源を集中することができます。そこで、デバイス作製を専門に行う作製拠点が必要となります。

図1はNb9層、Nb/AlOx/Nbジョセフソン接合(JJ)層、Mo抵抗層からなるデバイスの断面写真です。このデバイスは、超伝導デジタル回路用に作製されており、7万個のJJを用いた単一磁束量子(SFQ)回路が動作するなど、私たちは高い信頼性で超伝導デバイスを作ることができます。長年培ってきた超伝導プロセス技術を活かして、金属系超伝導デバイスの信頼性の高い作製拠点となることを私たちは目指しています。

● この4月に産総研に移ってきました

私たちは2002年から国際超伝導産業技術研究センター超伝導工学研究所において活動を行っていましたが、2013年の4月からグループ(スタッフ4名、試作契約職員3名)ごと産業技術総合研究所(産総研)に移ってきました。産総研に2012年11月にオープンされた超伝導クリーンルームCRAVITYを利用して、研究機関に超伝導デバイスを供給する活動を強化する計画です。

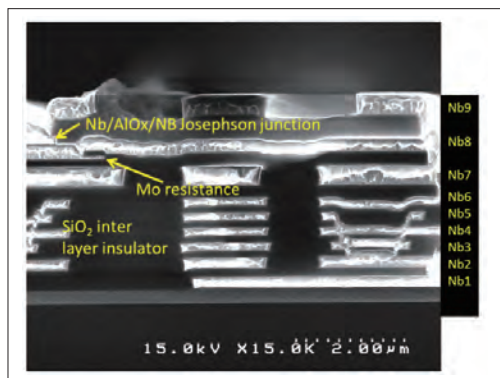


図1 Nb9層デバイスの断面写真

CRAVITYについては、<http://unit.aist.go.jp/riif/openi/cravity/ja/index.html>をご覧ください。CRAVITYだけでなく、産総研はスーパークリーンルーム(SCR)を始めとしてデバイス製造環境が充実しています。今後この環境を有効に利用して、より高度な超伝導デバイスの作製技術を構築していきたいと考えています。

● 量子情報処理プロジェクトでの役割

FIRSTの量子情報処理プロジェクトでは、SCRのグループと協力して、AIを超伝導材料とする量子ビットを集積回路プロセスで作製するための技術を開発しています。現在AI量子ビットは“斜め蒸着法”という特殊な方法で作製されていますが、この方法は配線の交差ができないなど回路規模の拡張性がないことが欠点でした。私たちが開発しているプロセスが完成すれば、通常集積回路プロセスを用いて超伝導量子ビットの規模を飛躍的に拡大することができるようになります。

AI量子ビット集積回路プロセスにおいて最も困難なパートは、AI微細JJの作製です。私たちはこれまでの研究によって図2に断面写真を示す直径100 nm以下のJJ作製に目処を付けることができました。このJJは、私たちのNbデバイスにおけるJJ最小面積の1/100以下の大きさです。プロセス上最も困難なパートに目処をつけることができたことから、今年度はこのJJを用いたAI量子ビット作製を目標にしています。

金属系超伝導デバイスが必要な方は、m-hidaka@aist.go.jpまでご連絡ください。私たちの技術がお役にたてるかもしれません。

(日高 睦夫)

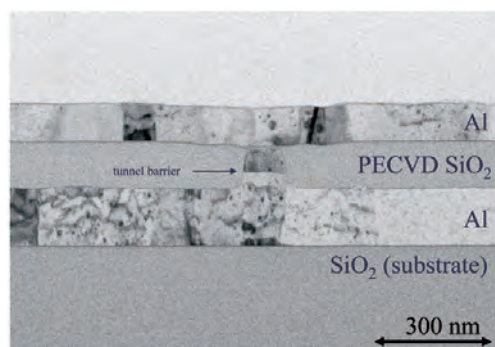


図2 集積回路プロセスで作製された直径100 nmの微小AIジョセフソン接合の断面写真

エッセイ

Essay

先日、コンピュータサイエンスの科学者が研究室を訪れて、「物理学者に」と言って、お土産のチョコレートくれた。物理学の研究には大きく分けて理論と実験があるが、私たちは理論の研究室だ。実験家は実験をしているから、基本的には理論家は理論をやっているということになっている。研究の日々は実験も理論も同じかと言えば、違うことも多いかもしれない。私たちにとって大変重要なもののひとつが、ディスカッションである。そのために当研究室では、海外の研究者を積極的に受け入れたり、セミナーを行ったりと、ビジターの行き来が活発だ。もちろん教育的な目的もある。

さてそのチョコレートなのだが、実はタイトルにあるように、ノーベル賞のゴールドメダルをかたどった、本物と見紛うばかりのお土産アイテムなのである。金色の固い包み紙にくるまれ、レリーフになっていて、その大きさといい重さといい、存在感抜群である。これを取りだして机の上に並べて見ると、チョコレートながらなかなかの壮観だ。そこでこの「ありがたい」メダルを、研究室のみんなに配ることにした。一人ひとりに手渡ししながら、私はこのように言った。「これからノーベル賞のゴールド・メダルを配るから、追って本物をもらって私に返すように」

軽いジョークなので、みんな気軽にチョコレートを受け取って食べていたけれども、こういう時に「またそんなあ〜」などと言いながら迷惑そうな顔をするのは、どうも日本人の研究者に多いようである。気軽に受け取るのは、もちろんジョークだと思っているからだ、それだけではないと思う。つまり……もしかして、万が一巡り巡れば、そんなことが起こらないこともないと思っているからでもあるのだ。

実際、その予測は、さほどの外れでもない。量子の分野は、20世紀の終わりから最近にかけて、非常に多くのノーベル物理学賞受賞者を出しているジャンルと言っても過言ではない。たとえば2012年にデービッド・ワインランド博士とセルジュ・アロシュ博士が、量子コンピュータを実現するため

の基礎となる、量子系の計測と制御の先駆的な実験に対して同賞を受賞したことは、記憶に新しい。だが、それだけではない。遡れば1997年にはスティーン・チュー博士らがレーザー光による原子冷却で、続く1998年には励起状態、2001年はボース＝アインシュタイン凝縮、2005年には光学コヒーレンスの実績に対して贈られており、この傾向はおそらくこれからも続くだろう。量子の基礎的な研究業績が評価され、量子的な原理が、応用技術を含めたさまざまな形で広く社会へ浸透する時代の到来を告げるようでもある。ノーベル賞などという遠い星のように思われるかもしれないが、特にこのプロジェクトに関わる若い研究者の方々には、ぜひそんな大志を抱いてほしいと思う。

一方、物理学者はノーベル賞のために研究しているのかといえば、かのワインランド博士にしても、そうではなかっただろう。研究の日々においては、ノーベル賞をとるとか、一番になるといったことは目標にならない。ひるがえって「大志」とは、誰も思いつかないような新しい、ユニークなことであり、それを実現するにはどうしたらいいか全くわからないようなアイデアを持つということである。できなかったことを可能に。0を1に。物質のごくごく基本的なところで、それを実現するのが物理学に他ならない。

というわけで話は終わりだから、チョコレートを食べたら、みんなさっさと仕事に戻るように。

根本 香絵 (国立情報学研究所)



「AQIS2010」にて、ワインランド博士と著者

ノーベル・チョコレートのはなし

No.13 September 2013

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」・国立情報学研究所量子情報国際研究センター ニュースレター

量子ニュース

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 量子情報国際研究センター <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：

量子情報国際研究センター TEL:03-4212-2506 FAX:03-4212-2641 e-mail: first_jimu@nii.ac.jp

R2100
当誌は公衆利用の目的で発行されています