

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

2012
September

No. 9

量子ニュース

CONTENTS

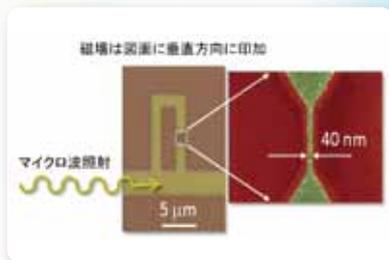
量子科学最前線

空中に浮かぶ原子の集団を操る



最近の研究成果

コヒーレント量子位相スリップの実現



中心研究者からのレター 特許のすすめ

サブテーマ紹介 第2回 超伝導量子コンピューター 超伝導回路で量子コンピュータの実現を目指す

$$\begin{aligned} \mu_1 \tau_1 &= R_1 \dots \\ \mu_1 \tau_2 &= R_2 \dots \\ \mu_1 \tau_3 &= R_3 \dots \\ \mu_1 \tau_4 &= R_4 \dots \end{aligned}$$

● 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

○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)
河原林 健一(国立情報学研究所)

● 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((公財)国際超伝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) 森田 靖(大阪大学)

● 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)

● 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)

● 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)

● 理論

○都倉 康弘(筑波大学) Franco Nori((独)理化学研究所) 小川 哲生(大阪大学) 小芦 雅斗(東京大学)
根本 香絵(国立情報学研究所) Rodney Van Meter(慶應義塾大学)

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 先端基礎研究センター)

● 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)
佐藤 由希子(国立情報学研究所/山本研究室)
青木 香穂里(国立情報学研究所)

● 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 勲(国立情報学研究所)
田原 真理(国立情報学研究所)

プロジェクト事務局からのお知らせ

● NEWS

■ 研究分担者の追加について

7月より、国立情報学研究所の河原林健一教授が量子情報システムのサブテーマに参加することとなりました。河原林先生には、コヒーレントコンピューターの計算機科学的考察に従事いただく予定です。

● INFORMATION

■ 量子情報処理プロジェクト・量子サイバネティクス全体会議2012 開催のお知らせ

下記の通り、プロジェクト全体会議2012を開催いたします。

日 程：2012年12月12日(水)～15日(土)

場 所：東京大学 小柴ホール

その他：詳細についてはプロジェクトホームページをご覧ください。

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



2011年度全体会議 研究発表



2011年度全体会議 ポスター発表

● AWARD

2012年4月 第44回市村学術賞貢献賞 稲場 肇先生、洪 鋒雷先生(産業技術総合研究所)

2012年5月 大阪大学総長による表彰 受賞 森田 靖先生(大阪大学)

2012年8月 大阪大学総長顕彰(研究部門)受賞 森田 靖先生(大阪大学)

量子情報における 同位体工学

慶應義塾大学 教授 伊藤 公平



金 (Au)、銀 (Ag) といった金属、シリコン (Si) やガリウムヒ素 (GaAs) といった半導体の性質は元素記号の種類とその組み合わせで決まります。しかし、元素の多くは何種類もの安定同位体から構成されています。例えば炭素は C-12 (98.9%) と C-13 (1.1%) の2種類の安定同位体から構成され、地球上で最も硬い物質は人工的に作製された C-13 ダイヤであることが知られています。このように同位体組成を変化させて物性を制御することを同位体工学と呼びます。

この同位体工学が固体量子情報処理の世界、特にシリコンとダイヤモンドを舞台とした量子演算開発の分野で大いに役立っています。シリコンは Si-28 (92.2%)、Si-29 (4.7%)、Si-30 (3.1%) という3種類の安定同位体から構成され、この中で Si-29 だけが核スピン 1/2 をもちます。Kane による世界初の Si 量子コンピュータの提案 [Nature, vol. 392, 133 (1998)] でも同位体工学の必要性が強調されましたが、それは背景に存在する Si-29 の核スピンが電子スピンや核スピン量子ビットのデコヒーレンスを誘発するからです。では背景の Si-29 を除去することでどれほどコヒーレンス時間 (量子情報保持時間) が伸びるのでしょうか? Si-29 濃度が 0.01% の試料を用いて、プリンストン大学・オックスフォード大学・慶應義塾大学らの共同研究チームはシリコン中の電子スピンのコヒーレンス 10 秒以上 [Nature Materials, Vol. 11, 143 (2012)]、サイモンフレーザー大学・オックスフォード大学らのチームは核スピンのコヒーレンス 180 秒以上 [Science, Vol. 336, 1280 (2012)] を得る事に成功しました。ここでは同位体工学に加えてデカップリング操作も行われましたが、通常シリコンにおける電子スピンコヒーレンスが数 10 マイクロ秒、核スピンコヒーレンスが数百ミリ秒程度であることを考えると同位体工学の大勝利と言えます。最近のオックスフォード

大学・慶應義塾大学・プリンストン大学らの共同チームによる、シリコン中でリンドナー電子スピンと核スピンのエンタングルメント生成実験では、Si-28 結晶の利用がポイントでした [Nature, Vol. 470, 69 (2011)]。スピンコヒーレンスの飛躍的向上により、計算完了まで量子情報が壊れなかったのです。この Si-28 同位体結晶は量子ホログラフィックメモリーの実証にも寄与しました [Physical Review Letters, Vol. 105, 14053 (2010)]。また、ミュンヘン工科大学が同位体工学に基づくシリコン量子ドットの作製に成功し [Applied Physics Letters, Vol. 100, 172104 (2012)]、ニューサウスウェールズ大学でもシリコン量子ドット研究に対する同位体工学を進めています。

ダイヤモンドを用いた量子情報処理でも同位体工学が威力を発揮しています。天然のダイヤモンドは核スピンゼロの C-12 と、核スピン 1/2 の C-13 から構成されます。スタッツガルト大学らのチームは C-13 を 0.3% まで減らすことで窒素-空孔 (NV) 欠陥に束縛された電子スピンのコヒーレンスを室温において 1.8 ミリ秒まで延ばすことに成功しました [Nature Materials, Vol. 8, 383 (2009)]。この結果を受け、ハーバード大学らのチームは同位体ダイヤモンド中の NV 電子スピンと C-13 核スピンを結合させて、室温で 1 秒以上の量子メモリー動作の実証に成功しました [Science, Vol. 336, 1283 (2012)]。さらに単一の NV 欠陥を用いた磁気センサの研究も進んでいます [Nature Nanotechnology, Vol. 3, 643 (2008)]。C-12 同位体ダイヤモンド単結晶の表面数 nm の深さにコヒーレンスの長い NV を置き [Nano Letters, Vol. 12, 2083 (2012)]、その NV をプローブとしてダイヤモンド表面上に置かれた単一原子や分子の核磁気共鳴測定を目指す量子計測実験が今後は盛んになると思います。

コヒーレント量子位相スリップの実現

論文情報 O. Astafiev, L.B. Ioffe, S. Kafanov, Yu.A. Pashkin, K.Yu. Arutyunov, D.Shahar, O. Cohen, and J.S. Tsai, "Coherent quantum phase slip", Nature 484, 355-358 (2012)

関連URL http://www.nature.com/nature/journal/v484/n7394/full/nature10930.html?WT.ec_id=NATURE-20120419

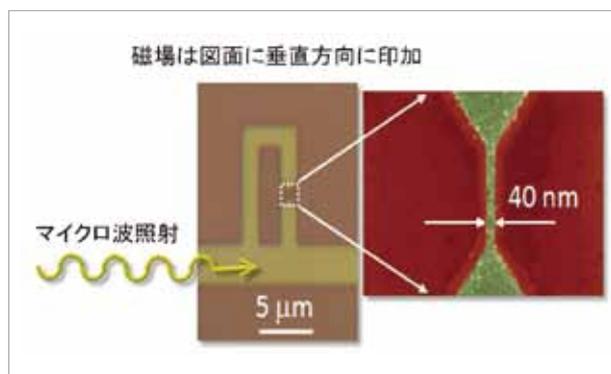
(独)理化学研究所/日本電気(株)
蔡 兆申

ジョセフソン効果と量子力学的に完全に双対な現象がコヒーレント量子位相スリップ (CQPS) 効果です。ジョセフソン効果は、弱く結合した2つの超伝導体の間に、超伝導体の電子対がトンネル (透過) することによって超伝導電流が発生する現象です。ジョセフソントンネルでは、電子 (電子対) がエネルギーを散逸せずトンネル障壁をすりぬけます。CQPS効果では、磁束がエネルギーを失うことなく量子的に超伝導細線を横切る現象です。ジョセフソン効果における電子対が絶縁体 (空間) をトンネルすることと類似しています。CQPS効果の場合、磁束のトンネル障壁は超伝導細線です。CQPS効果は理論上予言されていましたが、これまで実証されていませんでした。

我々はCQPS効果を明確に観測するため、酸化インジウム (InOx) 薄膜を用いて幅40nmの細線を含んだ4×8μmの大きさの超伝導ループを電子リソグラフィで作製しました (図参照)。このような構造では、完全反磁性に反して磁束がエネルギーを失うことなくトンネルすると、磁束が超伝導ループを出入りし、既に開発したジョセフソン接合を用いた磁束量子ビットに相当するデバイスが実現できることが予想されました。このような量子ビットは量子力学的なトンネルが発生すると、基底状態から励起状

態へとエネルギーを変化させ、ギャップ構造を生じることが分かっていました。

この量子ビットのエネルギー分光測定を行いました。その結果、エネルギーバンドには約5ギガヘルツのギャップが存在することを確認しました。これは磁束が量子的にトンネルしていることを証明するもので、理論上予想されていたCQPS効果を実証し、ジョセフソン接合を用いない新しい超伝導磁束量子ビットの試作に成功したことも意味します。



超伝導細線を含んだ超伝導ループ

BKT 相転移

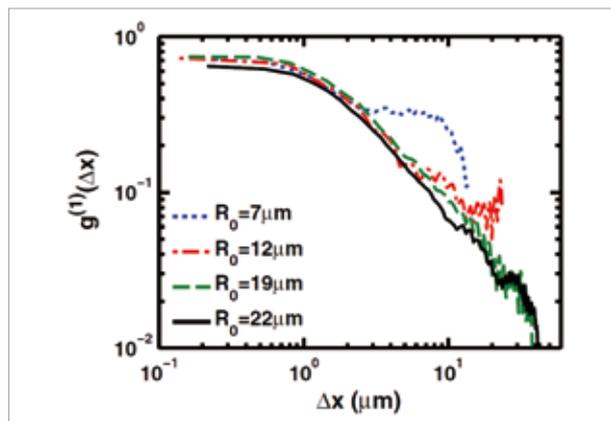
論文情報 G. Roumpos, M. Lohse, W. H. Nitsche, J. Keeling, M. H. a Szymańska, P. B. Littlewood, A. Löffler, S. Höfling, L. Worschech, A. Forchel, and Y. Yamamoto, "Power-law decay of the spatial correlation function in exciton-polariton condensates", Proc. Natl. Acad. Sci. 109, 6467-6472 (2012)

関連URL <http://www.pnas.org/content/109/17/6467.full.pdf+html>

国立情報学研究所/スタンフォード大学
山本 喜久

均一な2次元系では、有限温度でボーズアインシュタイン凝縮 (BEC) は起こらない。熱的ゆらぎにより量子渦が生成され長距離相関が壊されてしまうからである。しかし、2次元系であってもボーズ粒子の面密度 n と熱的ドブロイ波長 λ_T が、 $n\lambda_T^2 = \ln\left(\frac{380\hbar^2}{mg}\right)$ なる関数式を満たすと (m は粒子の質量、 g は相互作用パラメータ、 \hbar はプランク定数)、右回りに位相が回転する量子渦と左回りに位相が回転する反量子渦が束縛対を作り、凝縮相のグローバルな位相を安定化し超流動を発現することが知られている。これをBerezinskii-Kosterlitz-Thouless (BKT) 相転移と呼び、液体ヘリウム薄膜が示す超流動現象はこのためであると信じられている。BEC相転移とBKT相転移の際立った違いは、1次の空間相関関数 $g^{(1)}(r)$ がBEC相では一定値となるのに対し、BKT相では2点間の距離 r のべき乗で減衰していくこと ($g^{(1)}(r) \propto 1/r^\alpha$) とされている。しかし、これまで2次元系凝縮相でこの $g^{(1)}(r)$ のべき乗減衰が実際に観測されたことはなかった。今回我々は、2次元系である励起子ポラリトン凝縮体の $g^{(1)}(r)$ が $1/r^\alpha$ ($\alpha=0.9\sim 1.2$) に

従って減衰していくことを初めて観測することに成功した。熱平衡BKT相では $\alpha \leq 0.25$ であることが知られているが、これよりも大きな α が実験で観測されたのは、ポンプゆらぎのためであることが理論解析から示された。この結果は、励起子ポラリトン凝縮体が非平衡多体系の量子シミュレーション実験に適した系であることを示す一例である。



様々な大きさの励起子ポラリトン凝縮体の一次相関関数の2点間の距離依存性

3 半導体レーザーと励起子ポラリトン凝縮の接続理論

論文情報 Makoto Yamaguchi, Kenji Kamide, Tetsuo Ogawa and Yoshihisa Yamamoto, "BEC-BCS-laser crossover in Coulomb-correlated electron-hole-photon systems", New J. Phys. 14 065001 (2012)

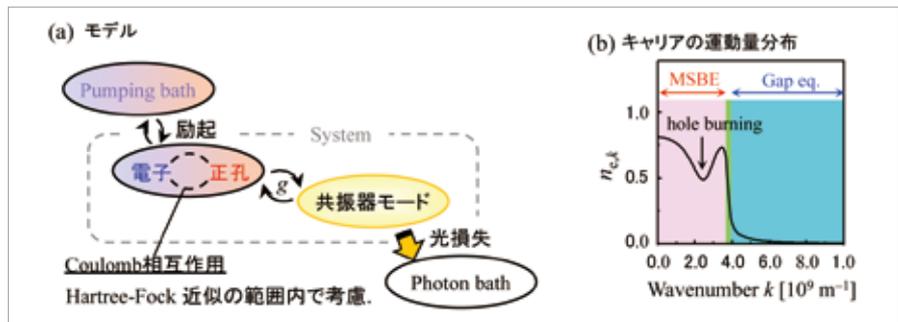
関連URL <http://iopscience.iop.org/1367-2630/14/6/065001>

大阪大学
山口 真

微小共振器中に量子井戸を埋め込んだ構造は、半導体レーザーとしての応用だけでなく、励起子ポラリトン凝縮のような基礎物理を調べる舞台としても注目されている。半導体レーザーと励起子ポラリトン凝縮は、それぞれ本質的に非平衡の現象、および、擬熱平衡の現象として大別されるが、多体効果を含めて両者を同時に取り扱える理論は存在しなかった。今回、我々は、定常状態において両者を同時に取り扱える理論を提案した(モデル: 図(a))。この理論は、系を擬熱平衡とみなせる状況では、BCS理論のGap方程式(熱平衡理論)に、非平衡性が重要となる状況では、Maxwell半導体Bloch方程式(MSBE; 非平衡理論)に帰着する。また、低密度を前提とした既存理論と比較して、高密度領域まで適用可能という特長をもつ。

そこで、両者の接続を詳しく調べた結果、極低温では、擬熱平衡凝縮相から、励起を上昇させていくと、MSBEに従う波数領域が徐々に増加していくことが分かった。最終的に

は、レーザー動作の特徴とされるキャリア分布のhole burningが得られたが、この状況下でも依然として、Gap方程式に従う波数領域が存在することが分かった(図(b))。これは、非平衡の影響を強く受ける波数領域と擬熱平衡とみなせる波数領域が、Coulomb相互作用により相関をもちつつ、レーザー動作に至ることを意味する。このような動作は、従来の電子・正孔プラズマ利得に基づく原理とは異なるため、量子情報処理のための新たな光発生方法としても期待できる。今後、光学応答や安定性の検討を進める他、光場も量子化した全量子論への展開も考えている。



4 高い同一性を持った伝令付き単一光子源の構築に成功

論文情報 Masato Tanida, Ryo Okamoto, and Shigeki Takeuchi, "Highly indistinguishable heralded single-photon sources using parametric down conversion", Optics Express 20, 15275-15285 (2012)

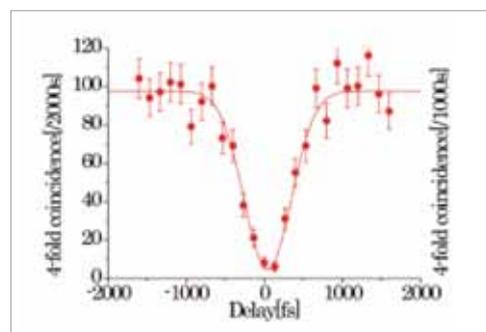
関連URL <http://www.opticsinfobase.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-20-14-15275>

北海道大学
竹内 繁樹

線形光学量子計算では、2光子量子干渉と呼ばれる光子間の量子干渉効果が重要な役割を持ちます。これは、全く見分けがつかない2つの光子が半透鏡に入射した際に、「両方の光子が共に反射するプロセス」と、「両方の光子が共に透過するプロセス」が干渉の結果互いに打ち消し合い、結果として2つの光子は、半透鏡の片側から共に現れるという現象です。この現象は、量子暗号の長距離化を目指す量子リピーターや、量子計測などでも重要になります。これらの応用に向けて、高い2光子量子干渉性(明瞭度)を実現可能な、伝令付き単一光子源の構築はとても重要です。

今回、パラメトリック下方変換を用いた伝令付き単一光子源において、高い同一性を実現するための条件を理論、実験の両面から明らかにしました。これまでの解析では、ポンプ光が結晶内を伝搬するとき、光子対の発生確率は、結晶内のどの場所でも均一であると仮定されていました。私たちは、結晶内でポンプ光が伝搬するに従って、光子対の発生数が線形的に増えていくことを考慮にいれ、理論を拡張しました。この拡張された理論を用いると、結晶長が1.5mm以上である場合、これまでの理論結果との差が顕著に現れることがわかりました。次に、

私たちは、結晶内の群速度不整合の効果を実験的に検証しました。その結果、拡張された理論に基づき数値計算を行った結果と、実験結果がよく一致することが確認でき、また、95.8±2%という高い明瞭度を達成しました。これは、これまでの既報告最高値と同じながら、4光子の同時計数率は4倍に向上しています。この光源をもちいる事で、複数光子を用いた量子情報処理のエラー低減や、量子計測の精度向上が期待できます。この成果は、Optics Express 20, 15275 (2012)に掲載されました。



異なる伝令付き単一光子源間の2光子量子干渉



空中に浮かぶ 原子の集団を 操る

スピン6成分の対称性があるとき
何が起きてくるだろうか

高橋義朗



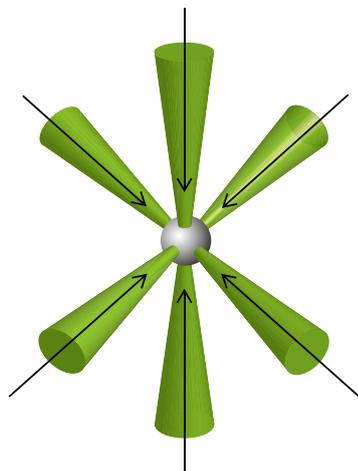
(たかはし・よしろう) 京都大学大学院理学研究科教授
1990年京都大学大学院理学研究科博士課程退学, 同大理学部助
手。92年博士号(理学)取得。講師, 助教授をへて2007年から現職。
08年に久保亮五記念賞受賞。2011年アメリカ物理学会フェロー。

物質を作る原子を, 思うがままに
操りたい。その運動や量子状態, 相
互に働く力を自由に変えて, 何が起
きるかを見てみたい——高橋義朗京
都大学教授は, かねてそう思ってい
たという。その答えが, 自身が構築し
たひとつの実験系だ。光を使ってイ
ッテルビウム原子を冷却し, 結晶のよう

に空中に並べた「光格子」である。

光格子は世界中が研究に取り組む
ホットなテーマだが, 通常使われる
のは, 磁性を持つアルカリ原子だ。
イッテルビウムは磁性を持たないた
め, 磁場を用いた標準的な冷却技術
が使えない。それでもあえてこの原
子を用いたのは, 「原子集団の性質
を自在にコントロールでき, いろい
ろなことが実現できるから」(高橋教授)
だという。

周期的なエネルギーポテンシャル
(下図)を作ると, 原子はポテンシャル
の底に落ちて整然と並び, 格子を
作る。実際には縦方向にもつながった
3次元ポテンシャルなので, 原子
はまるで光のジャングルジムに閉じ
込められたかのように, 空中に立体的
に並ぶ。

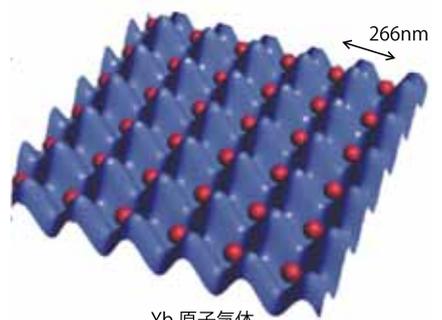


光で原子を冷やす イッテルビウムのガス
に3方向からレーザーを当て, 空中に止める。

空中に浮かぶ結晶格子

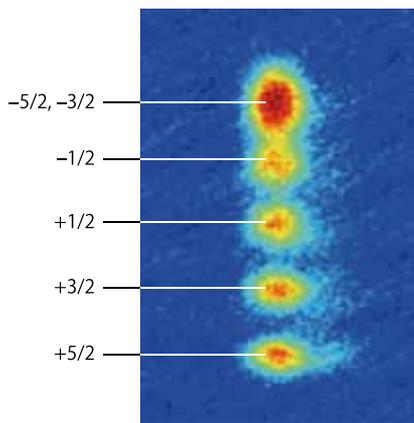
容器の中にイッテルビウムの気体
を入れ, 3方向からレーザー光を当
てると, 原子集団は光の交点で運動
エネルギーを失って冷え, 空中に縫
い止められるように静止する(左図)。
そこに光を使って卵のパックのような

光格子



Yb 原子気体

格子状に並ぶ原子 光で卵パックのような
ポテンシャルを作ると, 原子がその底に落ちていく。



6成分のスピン イッテルビウムの同位体¹⁷³Ybをスピン成分で分離し、撮影したもの。+5/2から-5/2までの6成分があることがわかる。

この宙に浮かんだ“結晶”では、現実の固体では実現できない様々な性質を実現できる。イッテルビウムは同位体が多く、その量子的な性質に様々な違いがある。7種類の安定同位体のうち、5つがボース粒子、2つがフェルミ粒子だ。ボース粒子は皆が一斉に同じ量子状態になりたがる“集団主義”で、低温では大量の原子が1つの波のように振る舞う「ボース・アインシュタイン凝縮」を作る。フェルミ粒子は逆にほかの粒子と同じ状態には入りたがらない“個人主義”で、電子の振る舞いをよくシミュレートする。

またイッテルビウムの原子間に働く力は、同位体同士の組み合わせによって、引力になったり、斥力になったりする。冷却イッテルビウムの光格子は、これら異なる性質を持つ同位体を混合することで、種々の量子状態を実現したり、原子間に働く力を自在に設計できるところに最大の強みがある。

スピ

ン6成分の対称性

高橋教授が今、この実験システムで狙っているのが、6つのスピ

ンに基づく現象の観測だ。

スピ

ンというのは粒子の自転に相当する量のことだ。最も馴染みがあるのは電子のスピ

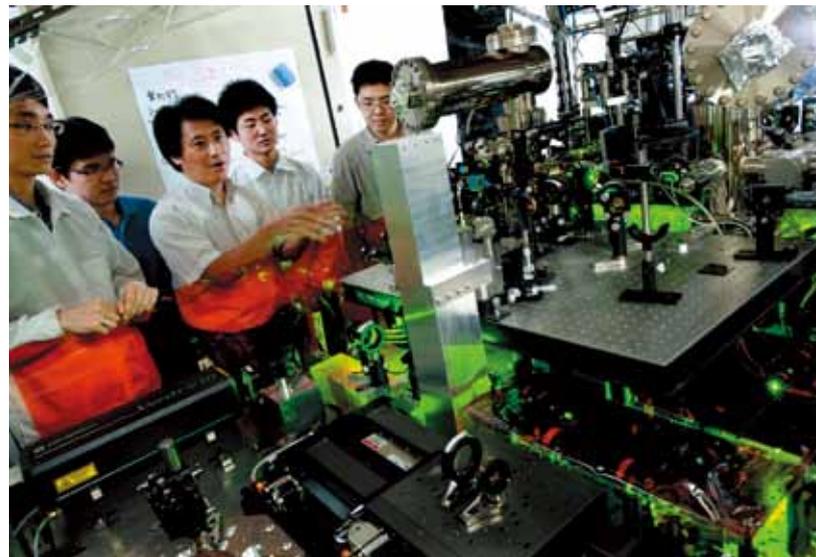
ンだろう。これは微小な磁石に相当し、上向き

の+1/2、下向きの-1/2の2つの成分がある。物理の言葉では、これをSU(2)対称性があるという。

物質中の電子スピ

ンは、温度が高い時はてんでに

あちこちを向いている。この状態を「常磁性」といい、スピ



のどの2つを入れ替えても、系全体の状態は変わらない。だが温度を下げていくと、ある時点で相転移が起き、スピ

ンが交互に上と下を向く秩序状態「反強磁性」になる。

高橋教授が注目している¹⁷³Ybは、核スピ

ンに±5/2, ±3/2, ±1/2の6つの成分があり、しかもスピ

ン間の相互作用がすべて同じという特徴を持つ。SU(6)対称性があるのだ。スピ

ンのSU(6)を持つ固体は自然には存在しないが、高橋教授らはこれを光格子で実現した。

¹⁷³Ybの気体中に光のポテンシャルを作り温度を下げていくと、原子は徐々に運動エネルギーを失って光の格子点に入り、数10nKですべての格子点を隙間なく埋めつくした。いわゆる「モット絶縁体」と呼ばれる状態だ。

各原子には、核スピ

ンの6成分がランダムに生じていた。電子スピ

ンにおける常磁性のような状態で、スピ

ン同士の相関がない時には、これがエントロピーが最小の状態になる。

高橋教授は現在、さらに温度を下

りも早く実験で答えを出したい」と高橋教授は言う。

競争は激しい。イッテルビウムの光格子は、「数年前までは僕らのところにしかなかった」(高橋教授)というが、今では独のマックスプランク研究所など、量子光学の有力研究グループが次々と研究に参入している。

気がつけば物理を志し、まっすぐにこの道を進んできたという高橋教授。「現象を観察しただけでは、本当にわかったことにはならないと思うんです。原子を思い通りに従わせ、面白いことを実現して、観測する。それで初めてわかったと言えるんじゃないかと」。穏やかな話しぶりの中に、強い意志が覗いた。

この記事は『日経サイエンス』2012年10月号に掲載されたものです。

[サブテーマ紹介] 超伝導量子 コンピューター

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、量子計測、量子標準、量子通信、量子シミュレーション、理論、超伝導量子コンピューター、スピン量子コンピューターの8つのサブテーマについての研究活動を行っています。全8回にわたり各サブテーマの紹介をしています。今回は「超伝導量子コンピューター」の研究活動について解説します。

超伝導回路で 量子コンピューターの実現を目指す

超伝導回路で 量子情報処理を行う

本サブテーマでは、超伝導回路を使ったアプローチで量子コンピューター実現への道筋を示すのが大きな目標であります。そのような量子計算システムの要素技術を取り入れたプロトタイプの量子ビットチップの実現を目指しています(図1)。

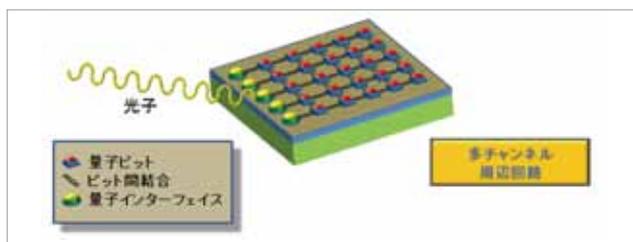


図1 超伝導プロトタイプ量子ビットチップ

提案されている量子計算方式の中で、最も研究が進んでいてアーキテクチャも明確になりつつある、量子ゲート操作に基づく万能量子計算機を第一の長期的目標ととらえて研究を進めてきました。このような長期目標を達成するために重要となる以下の重点研究課題を同定しました：

- (1) エラー訂正(表面コード型)を実現するための、結合のオンオフが可能な2次元量子ビットアレイを実現する回路方式実現。これは量子ビット数の増加に対してスケーラブルな回路方式でなくてはならない。
- (2) 99.9%程度の1ビットと2ビットゲート操作の忠実度、適度なデコヒーレンス時間とゲート速度、および高精度、高速読み出しの達成。
- (3) エラー訂正を行うための、物理量子ビット数の大幅な増加に対応するための、量子ビット集積回路技術および周辺回路技術の開発。
- (4) 分散量子情報処理のための光/超伝導量子インターフェイスの開発。

上記それぞれの課題に対応したこれまでの研究の進展を以下に簡単にまとめました。

スケーラブルな結合方式

この課題に関して、集積度のスケールアップ可能で、2次元配列を可能とするゲート結合方式を提案しました。この結合方式の特徴は、有害な残有結合がなく、ゲート操作が正確であり、デコヒーレンス時間の長い動作点での操作が可能な点であります。理研の

グループでは、2次元で集積化が可能な超伝導量子ゲート方式を初めて理論的に示しました(図2)。

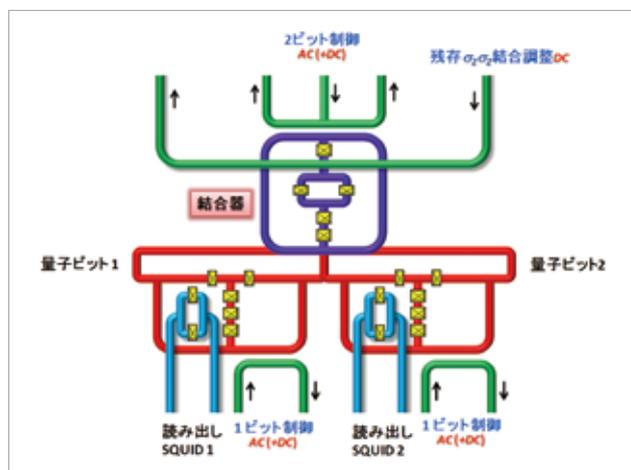


図2 2次元にスケーラブル磁束量子ビット結合方式(2ビット分を表示)

図2中、赤で示されているのは磁束量子ビットであります。黄色い四角はジョセフソン接合であります。量子ビット1と量子ビット2と二ビット分表示されています。紫で表示されているのは非線形結合器であります。緑色の線は制御線であります。この結合方式では、一回のゲート操作でCNOT論理が実現する、効率の良い量子ゲートであります。ゲート操作も幾何学位相の操作に基づく動作をするゆえ、精度の高いものであります。

この結合方式を使うと、2次元に配列した量子ビットの大規模なアレイが実現できます。これは万能量子コンピューターを実現するのに不可欠な量子エラー訂正を実行するのに都合のよい量子回路の構成であります。

高精度ゲート操作・読み出しと 量子ビット長寿命化

この課題に対して、量子ビット読み出し回路の実験において、ほぼ完全な忠実度で1ビットゲート操作を磁束量子ビットで行えることを理研のグループの実験は示しました。これは分散読み出しと呼ばれる、共振周波数の変化を利用する方式で行った実験です。共振器と磁束量子ビットが現実的なキャパシターで強結合させ、大きな周波数の変化が得られること特徴とします。周波数シフトは約80MHzという従来のインダクティブ結合の試料と比較して一桁程



(独)理化学研究所/日本電気(株)
蔡 兆申
 領域超伝導量子計算回路の研究



東京大学
中村 泰信
 超伝導量子計算回路の研究



NTT 物性科学基礎研究所
齊藤 志郎
 超伝導を用いた量子複合系の研究



東京理科大学
高柳 英明
 光系と超伝導系との量子インターフェースの開発



(独)産業技術総合研究所
前澤 正明
 超伝導量子ビット集積化プロセスのための微細加工技術



(公財)国際超導産業技術研究センター
日高 陸夫
 超伝導量子ビット集積化プロセスのための微細加工技術

度大きな値が得られています。この大きな分散シフトを利用して、磁束量子ビットの読み出し実験を行ったところ、約90%のコントラストのRabi振動が観測されました。

この読み出しのコントラストは、量子ゲート操作の π パルスの忠実度がほぼ完璧に近いことを示しています。読み出し時間中のエネルギー緩和がコントラストを下げる要因であります。量子エラー訂正には99.9%以上のゲートの忠実度が必要ですが、正確な忠実度の評価はこれから行う予定であります。

デコヒーレンス時間に関しては、磁束量子ビットで23マイクロ秒という記録的に長寿命な量子ビットを、理研のグループがMITと共同で実現しました(Nature Phys. doi:10.1038/nphys1994, 2011)。図3はこの量子ビットのラビ振動実験(上)、エネルギー緩和時間 T_1 の実験(左)、そして位相緩和時間 T_2 実験(右)の結果です。

1ビットゲート操作の時間を T_g とします。ゲート操作の間のエネルギー緩和でゲートの忠実度が劣化します。劣化の度合いは約 T_g/T_1 程度と見積もれます。このような寿命の量子ビットを使い、仮に2ナノ秒で高速にゲート操作を行った場合、ゲート操作の忠実度は最高で99.98%程度と見積もれ、誤り訂正を実行するのにふさわしい値です。

図1で示したスケール可能な回路方式では、99.9%忠実度で2ビットゲート操作時間を行うには、約100ナノ秒程度で操作する必要があると推測されます。このようなゲート時間で、99.9%の忠実度を達成するには、100マイクロ秒程度のエネルギー緩和時間を確保する必要があります。このような長寿命の超伝導量子ビットは、共振器でシールドすることにより実現することが知られています。一方「量子メモリ」を使い、量子ビットの実効的寿命を延長させる試みにも成功しています。それを以下に述べます。

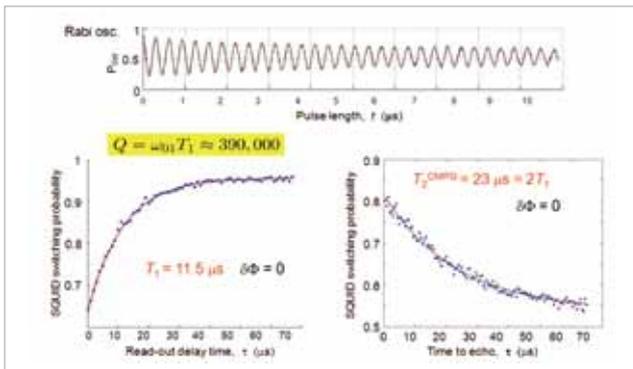


図3 長寿命磁束量子ビットの実験結果

超伝導量子ビット用の量子メモリ開発

超伝導量子ビットは、人工原子であるが故の制御性の良さ、および超伝導回路の設計自由度の広さによる拡張性が期待されています。一方、コヒーレンス時間は、飛躍的に改善されて数十 μ 秒まで延びてきていますが、天然の電子スピンや核スピンには遙かに及びません。そこで、両者の長所を生かした複合系が注目されています。NTTと大阪大学と国立情報学研究所のグループでは、ダイヤモンド結晶中のNV中心からなる電子スピン集団と超伝導磁束量子ビットとのコヒーレントな量子結合を観測することに成功しました(Nature, doi:10.1038/nature10462, 2011)。これは、超伝導量子ビットの量子状態をダイヤモンド結晶中のスピン集団へと書き込み、再び読み出せることを意味しており、量子通信や量子情報処理に不可欠な量子メモリの実現にとって、ダイヤモンドがきわめて有望な候補である事を示しています(図4参照)。

この実験で最も重要なのは、超伝導量子ビットとダイヤモンド中のスピン集団との間でエネルギー量子の授受を行うため、両者の遷移エネルギーを一致させるということです。そのために、ギャップ可変型の超伝導磁束量子ビットを開発しました。磁束量子ビットは、最適動作点と呼ばれるエネルギースペクトルの極小点で最も長いコヒーレンス時間を示します。この動作点でのエネルギーギャップをダイヤモンドの電子スピンの持つ遷移エネルギー 2.88GHzに合わせるために、磁束量子ビットを改良する必要がありました。

次に重要な点は、2つの系のコヒーレンス時間よりも、短い時間で量子情報の書き込み・読み出しを行うということです。書き込み・

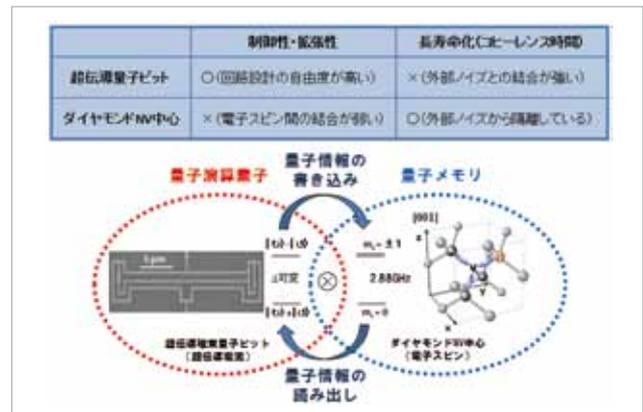


図4 超伝導・ダイヤモンド複合系

読み出しの速度は、両者の結合強度によって決まるため、出来るだけ強結合を実現する必要があります。そのために、まず、高濃度のNV中心 ($1.1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$) を含むダイヤモンド結晶を準備しました。何故ならば、超伝導量子ビットは電子スピン集団と協調的に結合するため、結合する電子スピンの数 N が増えると結合強度が \sqrt{N} 倍に増えるためです。また、両者は磁氣的に結合しているため、量子ビットとダイヤモンド結晶間の距離を短くすると、結合が大きくなります。実験では、ダイヤモンド結晶を量子ビットが作製されたサファイア基板に乗せるのですが、表面の洗浄性を保ち、注意深く貼り付けることで $1 \mu\text{m}$ 以下の距離を実現できます。この配置から見積られる単一の電子スピンと磁束量子ビットの結合は、約 8.8kHz です。

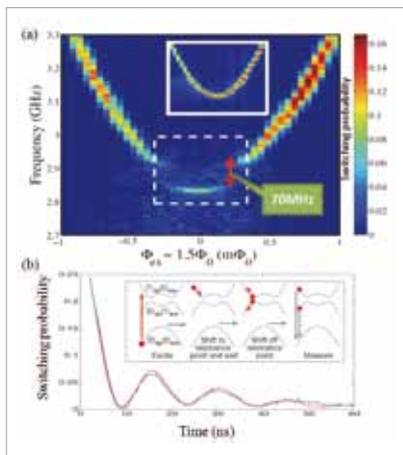


図5 (a) 超伝導磁束量子ビットの分光測定
(b) 磁束量子ビットとスピン集団間の真空ラビ振動

図5 (a) は、超伝導磁束量子ビットの分光測定結果を表しています。ダイヤモンド結晶に乗せる前は、量子ビットのエネルギー分散曲線を反映した通常のスペクトルが得られたのに対し(挿入図)、ダイヤモンド結晶に乗せた後は、 70MHz の真空ラビ分裂がはっきりと観測されています。これは、磁束量子ビットと電子スピン集団が強結合していることを示しています。真空ラビ分裂の大きさから数千万個の電子スピンの協調的に磁束量子ビットと結合していることが解ります。また、時間領域の実験を行い、真空ラビ分裂と同じ周波数で振動する、真空ラビ振動の観察にも成功しました(図5 (b))。この振動は、量子ビットの情報をスピン集団に書き込む、次にスピン集団から量子ビットに読み出す、という動作の繰り返しを表しています。今後メモリ時間を改善する必要がありますが、この成果は、ダイヤモンド結晶中の電子スピン集団が超伝導量子ビット用の量子メモリとして有望である事を示しています。

図5 (a) は、超伝導磁束量子ビットの分光測定結果を表しています。ダイヤモンド結晶に乗せる前は、量子ビットのエネルギー分散曲線を反映した通常のスペクトルが得られたのに対し(挿入図)、ダイヤモンド結晶に乗せた後は、 70MHz の真空ラビ分裂がはっきりと観測されています。これは、磁束量子ビットと電子スピン集団が強結合していることを示しています。真空ラビ分裂の大きさから数千万個の電子スピンの協調的に磁束量子ビットと結合していることが解ります。また、時間領域の実験を行い、真空ラビ分裂と同じ周波数で振動する、真空ラビ振動の観察にも成功しました(図5 (b))。この振動は、量子ビットの情報をスピン集団に書き込む、次にスピン集団から量子ビットに読み出す、という動作の繰り返しを表しています。今後メモリ時間を改善する必要がありますが、この成果は、ダイヤモンド結晶中の電子スピン集団が超伝導量子ビット用の量子メモリとして有望である事を示しています。

量子ビット集積化技術の開発

実用的な超伝導量子コンピュータを実現するには、量子ビットの大規模でスケラブルな集積化が必要です。現在本格的集積回路技術を産総研と超伝導工学研究所を中心に開発を進めて、初期的成果を上げつつあります。

これまでに動作実証されてきた超伝導量子ビットは、ステンシルマスクを介した傾斜蒸着法(図6 (a))で作製されています。この方法では、簡便に微小ジョセフソン接合を作製できる利点がありますが、素子・回路の物理的レイアウト構造が制限され多数の量子ビットの集積は困難です。この問題を克服して超伝導量子ビットの大規模集積を達成することを目指し、高いレイアウト自由度を持つ縦型ジョセフソン接合量子ビットの作製技術を開発しています。本サブテーマで

は、直径 100nm 以下の $\text{Al}/\text{AlOx}/\text{Al}$ ジョセフソン接合、インダクタンス、キャパシタンス、抵抗などで構成される超伝導量子ビット集積回路を安定して作製できるプロセス技術の確立を目標としています。

縦型ジョセフソン接合を用いた集積回路は、既に1980年代後半に $\text{Nb}/\text{AlOx}/\text{Nb}$ 三層積層膜をフォトリソグラフィ、ドライエッチング加工して接合を形成する技術が確立し、SQUID、SIS検出器、電圧標準などで実用化され普及しています。この三層縦型接合技術の信頼性は十分に高く、特に電圧標準応用では数万接合の集積を達成しています。しかしながら、接合寸法は一般に数マイクロン程度で、超伝導量子ビット作製に応用するには面積比で2桁以上の微細化が必要です。一方、最近のMRAM(磁気抵抗メモリ)生産では、ジョセフソン接合とよく似た構造を持つTMR(トンネル型磁気抵抗)素子の作製技術が急速に進んでいます。先端半導体製造ラインで、 100nm スケールTMR素子を集積したメガビット級MRAMが量産されるようになりました。しかし、鉄や銅を母材とする化学的・機械的に安定な材料で作られるMRAMの製造技術を、それらに比べて不安定なアルミニウムを用いる超伝導量子ビットにそのまま用いることはできません。また、半導体工場の最新鋭生産ラインを本プロジェクトで利用することは現実的に不可能です。

主な研究課題は、微小接合構造作製とアルミニウム微細加工の二つに整理されます。微小接合構造作製では、配線層との電気的接続のための接合上部電極の開口がポイントです。従来の縦型接合作製プロセス(図6 (b))では接合上部の絶縁層にビアホールを形成しますが、製造誤差を考慮すると 100nm オーダー微小接合への適用は困難です。それに代わる手段として、CMP(化学機械研磨)平坦化を利用するプロセスを採用しました(図6 (c))。ここでは、平坦化終点の高精度検出、CMPダメージの低減などが技術課題です。アルミニウム微細加工においては、材料の脆弱性への対処が主な課題です。アルミニウムは酸・アルカリの両方に反応し、また表面は容易に自然酸化されます。詳細は省きますが、電子ビーム露光用ハードマスク層、反応性イオンエッチング後の腐食対策、適切な表面保護膜作製、浸食の少ない洗浄工程などを確立しなければなりません。

これまでに、微小 $\text{Al}/\text{AlOx}/\text{Al}$ 接合を数回試作し、接合構造が形成されていることを電子顕微鏡観察により確認しました(図7)。

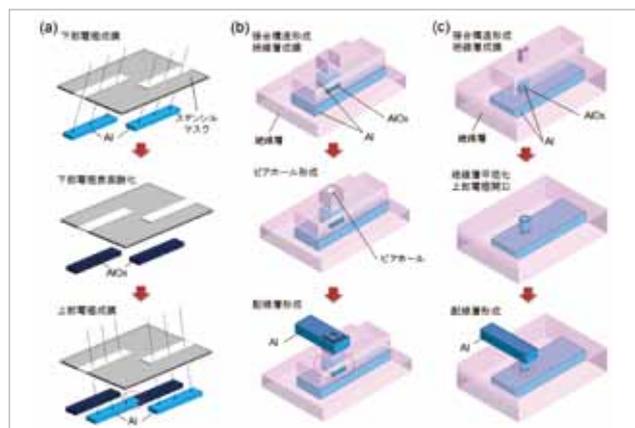


図6 ジョセフソン接合の模式図。(a) 傾斜蒸着プロセス、(b) 従来の縦型接合作製プロセス、(c) 平坦化による縦型接合プロセス。接合部を赤点線枠で示す

現在、電気特性測定、電子顕微鏡観察、組成分析などによる詳細な評価を進めています。

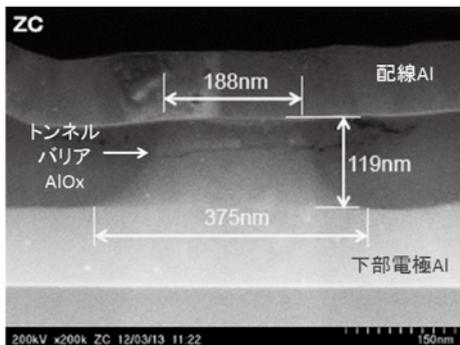


図7 Al/AlOx/Al接合断面の電子顕微鏡写真

光系と超伝導系との量子インターフェースの研究

量子情報の遠隔転送には光子量子ビットが使われることは明らかでしょう。一方、他の量子ビット、例えば、スピンや超伝導量子ビットを用いた量子計算のやりとりには、やはり光系を用いた量子インターフェースの利用が考えられます。例えば、光系と超伝導系との量子情報のやり取りを考えた場合、その扱うエネルギーの大きな違いが両者間の妨げになります。通信波長帯の1.5マイクロメートルは0.826eVであり、超伝導系の重ね合わせによるエネルギーギャップは、例えば10GHzとしても400マイクロeV程度です。そこで、この両者間の大きなギャップを埋めるものとして、スピン系を考えます。即ち、光系の円偏向の向きによってアップスピンとダウンスピンを量子ドット中に励起し、この量子ドットを埋め込んだ超伝導量子干渉装置(SQUID)を流れる超伝導電流の違いに、円偏向の違いを移し変えようという試みを、東京理科大グループにおいて行っています。

研究はまず、量子ドットを埋め込んだSQUIDの作成から研究を開始しました。使用した量子ドットは、GaAs上に自己成長させたInAs量子ドットで、直径は0.1~0.2マイクロmです。自己成長量子ドットは成長する位置がばらばらで、その内の2個をジョセフソン接合として働く量子ドットを埋め込んだDC-SQUIDを作成する必要があります。そこでAFM(原子間力顕微鏡)を用いて、2個の量子ドットの座標を正確に割り出し、電子ビーム露光法で超伝導電極であるAlを用いて、2個の量子ドットを埋め込んだSQUIDループを作成しました(図8参照)。量子ドット近傍には、図からもわかるように、サイドゲートを設けてあります。また基盤全体にはバックゲートが設けてあります。InAsという材料は、金属に対して負のショットキーバリアーを持ち、Alからの超伝導電流を流しこむのにも適した材料です。低温実験では2.5nAの超伝導臨界電流を観測しました。更に外部印加磁場に対して、臨界電流が周期的に変わる、いわゆるSQUID動作にも成功しました。2種類のゲートのうち、バックゲートはドット中の電子数を制御し、サイドゲートは量子ドットとAl電極との結合度を制御します。この両者をパラメータとして臨界電流を測定したところ、サイドゲートが-0.4Vの時、 π 接合動作に成功しました(図9参照)。 π 接合とは、通常のジョセフソン接合の臨界電流が $I=I_c \sin(\theta+\pi)$

という0接合特性を示すのに対して、 $I=I_c \sin(\theta+\pi)$ と位相差 θ が π だけずれているために、反転した臨界電流となる接合のことで、位相差が π だけずれる原因は以下のように説明されます。量子ドット中の電子数が奇数個の時、クーバー対のトンネリングがどう起きるかを考えます。例えばドット中にあったアップスピンが右のAl電極にトンネリングし、次に左のAl電極から、ダウンスピンがドットにトンネリングした後、さらに右のAl電極にトンネリングしたとします。最後に左の電極のアップスピンが量子ドットにトンネリングして、左から右の電極へのクーバー対のトンネリングは完了します。このトンネリングで、クーバー対はアップ・ダウンからダウン・アップへとそのオーダリングを反転します。これが π 結合の原因です。ポイントはドット中の電子数が奇数個という点です。

そこで、次に、ドットに光を照射すると、臨界電流がどのように変わるかの実験に取り掛かりました。Alの超伝導性を維持する金マスクで覆った試料で実験を行っているところです。これが直近の課題です。

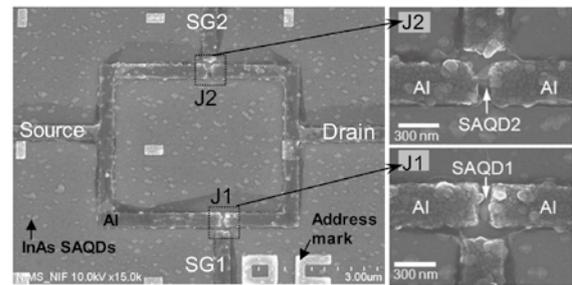


図8 量子ドットを埋め込んだSQUIDの電顕写真

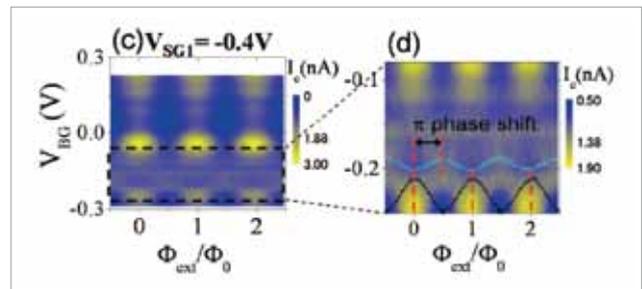


図9 臨界電流の磁場依存性

執筆者：

蔡 兆申 ((独) 理化学研究所 / 日本電気 (株))

執筆協力者：

スケーラブルな結合方式

中村 泰信 (東京大学)

高精度ゲート操作・読み出しと量子ビット長寿命化

中村 泰信 (東京大学)

超伝導量子ビット用の量子メモリ開発

齊藤 志郎 (NTT 物性科学基礎研究所)

量子ビット集積化技術の開発

前澤 正明 ((独) 産業技術総合研究所)

日高 睦夫 ((公財) 国際超伝導産業技術研究センター)

光系と超伝導系との量子インターフェースの研究

高柳 英明 (東京理科大学)

関東量子情報学生チャプター の みんなの声を聞いてみました！

関東量子情報学生チャプター第15回

2012年5月30日(水) 場所：日本大学駿河台キャンパス
 概要：講演会・ポスターセッション・実験室見学会 参加人数：40名
 講演者：行方 直人(日本大学)、東 浩司(NTT 物性科学基礎研究所)
 実験室見学会：単一光子検出器・光子数識別器・量子もつれ・レーザー注入同期
 主催：量子情報関東 StudentChapter 運営委員会
 共催：文部科学省・科学研究費補助金・新学術領域研究・量子サイバネティクス
 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

今興味のある 研究 トピックは？



佐久間 大輔(理科大M2) どのような状態の量子インターフェースを構成するか
 加藤 晃太郎(東大M1) 位相的エンタングルメント
 木村 淳(東大B4) 超電導を用いた集積回路
 加地 史也(東大B4) 超電導量子キュービット (3D cavity+qubit+spin)
 佐藤 貴彦(東大D1) 超電導・NVハイブリッド量子ビット
 田中 咲(慶大D1) 不確定性関係。ハイゼンベルグ、小澤の不等式などいろいろ話
 題になっていて、奥が深いから

理論家から 実験家へ 実験家から 理論家へ



理論家から実験家へ

中郷 考祐(東大M1) 常に実験面にも興味を持って定期的にお話を聞いていきたい
 熊谷 亘(東北大D2) 実験家が理論家の人に求めることをどんどん言ってほしい
 加藤 晃太郎(東大M1) 理論家がいいてもわかりやすい言葉を使ってもらえるとよい
 若桑 江友里(東大M1) 仲良くしてほしい

実験家から理論家へ

鷲尾 和久(東工大D2) 新しいメゾスコピック系の理論を提案してくれる理論家が日
 本にもいてくれたらいいと思う
 佐久間 大輔(理科大M2) 系のハミルトニアンと状態を素早くたてて、実験の系に
 応用させて欲しい

日本の科学の 将来に期待 することは？



土屋 翔吾(理科大M1) 量子コンピュータが実現できること
 鈴木 泰成(東大M1) 量子計算でNP完全がとけるようになること
 増野 こずえ(東医歯大技術補佐員) 少しでも科学の力で世の中の暮らしを救うこと
 松岡 耕司(早大M1) 「面白い=役に立つ」になれば…
 石崎 佳織(慶大M1) 分野間の垣根を小さくしたい
 木村 純(東大B4) 人々に夢を与える科学であり続ける
 加地 史也(東大B4) 「我々には先端に行く義務がある」(中村泰信) — 世界の最
 先端を走っていききたい

(※学年・所属等はインタビュー時2012年5月30日のものです)



量子通信に関する講演会



関東量子情報学生チャプター第15回 集合写真



日本大学井上研究室 実験室見学会

FIRSTのトップ科学者が研究の最前線を紹介し、高校生、高専生と「科学の未来と日本」について語り合いました

最先端研究開発支援プログラム 公開活動 一般シンポジウム FIRSTサイエンスフォーラム2～若者よトップ科学者と語れ! 科学の未来と日本～ 「第2回 科学で日本を元気にしよう!」

■日程 平成24年2月5日(日) ■会場 宮城/東北大学片平さくらホール
■参加人数 高校生・一般約138名 ■主催 独立行政法人科学技術振興機構 ■後援 内閣府 文部科学省 独立行政法人日本学術振興会

主催者からのコメント

「FIRSTサイエンスフォーラム2」を仙台で開催し、山本喜久教授にご登壇いただきました。同フォーラムは、最先端研究開発支援 (FIRST) プログラムの中心研究者と高校生等が語り合うことで、若者たちに「科学によって明るい日本の未来を切り拓く」気概を抱かせることをコンセプトとしたイベントです。今回は、山本先生とともに、江刺正喜 東北大教授、岡野光夫 東京女子医大教授のあわせて3名の中心研究者が登壇しました。

第一部は、研究内容とその活動自体について、中心研究者の講演と動画にて紹介しました。山本先生は、量子情報分野の研究の魅力とともに、「大学が社会から信頼されるためには、専門教育と社会教育のバランスを取りつつ、将来の知的リーダーをいかに育てるかによる」と大学における人材育成の重要性について話され、参加した若者たちは日米の学生の違いなどについて、興味深そうに質問していました。

第二部では、トークセッションとして、研究者の人柄に焦点を当てました。山本先生は「人との会話が研究には欠かせない。そこで生まれる『スパーク』と呼ばれるひらめきが科学の神髄かも知れない」と話されました。また、周囲からのインタビュー

で、「トーンやエネルギーは若い人と話しているのと変わらないです」(国立情報学研究所 楠戸特任研究員)と紹介され、会場からは笑顔がこぼれました。

最後に、「周りの人とは違うと感じた時は、自分だけの人生をつかめるチャンス。それを追いかけてほしい」と熱いメッセージが送られました(写真)。

本フォーラムでは、先生のお言葉等に真剣に聞き入る若者たちのまなざしが印象的で、彼らが何かしらの得て、将来の科学技術を支える人材の裾野拡大につながることを願っております。

なお、フォーラムの様相(動画)は、同フォーラム Web サイト (<http://first-pg.jp/forum/forum2-2nd.html>) からご覧いただけます。



独立行政法人科学技術振興機構 (JST)
科学コミュニケーションセンター
小長井 敬介

FIRST量子情報国際センター事務局の声

FIRST最先端研究開発支援プログラムでは、平成23年12月～平成24年3月にかけて、高校生などの若者と世界トップレベルの科学者が語り合う「FIRSTサイエンスフォーラム2」を開催しました。

第2回目に私は山本喜久教授の登壇に伴い、参加を致しました。

当日は地元の高専生や高専の学生も登壇し、世界的な科学者とともに、科学と日本の未来について熱い発表や討論、デモンストレーションを行いました。どの学生も先生方の講演に真剣に耳を傾け、学生からは鋭い質問も飛び交っていたのが印象的でした。

また、ロビーや廊下には研究者の紹介パネルが展示され、研究とともに研究者の人柄にもクローズアップし、研究者をより身近に感じてもらえる展示構成になっていました。展示されている資料は学生や教育関係者も自由に持ち帰れるものもあり、今後の参考資料にもなりました。

講演会終了後にはフリートークの時間が設けられ、参加者は自由に興味ある研究を行っている研究者のもとへ行き、研究の話をついたり質問をしたりも出来ました。どの先生方も学生達とざっく

ばらんに話し合い、予定より1時間以上も延長をして、フォーラムは終了となりました。

これからの社会を担う若者にとって、世界的な科学者の生の声を聞き、また最先端の科学と触れ合うことのできる良い機会であったと思います。そして、若者たちが「科学を楽しむ」ことと、「好きなことを追求していく姿勢」がやがて日本の科学技術の発展につながっていくのではないかと感じたフォーラムでした。

国立情報学研究所 量子情報国際研究センター
窪田 しおり



出身中学校における地域ぐるみの教育講演会

■実施日 2012年6月16日(土) ■対象 岐阜県八百津東部中学校生及び地域住民
 ■授業名 「世の中に絶対はない 最先端の原子時計の開発で感じたこと」 ■担当者 井戸 哲也 (情報通信研究機構)

私の出身中学校(厳密には統合後の中学校)である八百津東部中学校(岐阜県)では、卒業生の中から一人を毎年講師として招き、生徒のみならず地域住民も聴衆として参加する講演会を行い、これにより生徒のふるさとへの愛着を育み、将来の職業選択について学ぶこととしています。そして本年度は私に講演依頼があり、自らのアイデンティティを育んでもらった地域への恩返しということで快諾しました。講演では社会生活の基礎である時刻や私の研究テーマである原子時計について説明し、仮想的に世界中の300台以上の原子時計の平均を取ることによって、精度はそこそこでもリスクを世界中に分散して止まらない時の流れを作っていること、そして刻まれる時間を較正するためにCs原子泉時計、光格子時計等超高精度な原子時計が開発されていること、等を理解してもらい、これを通して、

- 全部の性能面で絶対優れたものはまず存在しないこと
- 多数の平均は頼りになることが多いが、盲信すると痛い目にあうこと
- 目的を明確にすると有効な手段が見えてくること

等を感じてもらいました。またNICT-東大間の光格子時計の比較実験で見えた、標高が高いとほんのわずか早くなる

取ってしまうという事実は山間地に暮らす生徒達にとっては少々衝撃的だったようでした。講演後の質疑応答では全校生徒41人のほぼ全員が勢よく積極的に挙手したのに驚き、またお礼に合唱してくれた「ふるさと」の美しいハーモニーからも少人数教育の有効性を実感しました。生徒の感想文の中には、「今まで絶対ムリ、と自分で諦めていたことも決めつけてはいけな」「自分の中で目前の高校受験が手段でなく目的になってしまっていた」等のきづきも多数見受けられ、講師冥利に尽きる非常に有意義なひとときでした。



理化学研究所 和光研究所一般公開サイエンスレクチャー

■実施日 2012年4月21日(土) ■対象 一般・120名
 ■講義名 「量子と情報」 ■担当者 蔡 兆申 (理化学研究所・巨視的量子コヒーレンス研究チーム)

4月21日(土)に行われた理化学研究所 和光研究所一般公開のプログラムのサイエンスレクチャーに於いて、「量子と情報」というテーマで30分の講演を行いました。当日は生憎の悪天候にも拘わらず盛況で、100名収容の大河内記念ホールが満席となり、立ち見のお客様もいらっしゃいました。

講演では、最近開発されつつある量子の波動性(コヒーレント性)を情報処理に利用する革命的な技術について、最前線の研究内容を、ピアノ演奏やオセロを例にして、動画等を用いて、出来るだけ分かり易く説明しました。講演後の質疑の時間には、皆様から活発な質問があり、内容に興味を持っていただけたとの手ごたえを感じました。

最後にお願したアンケートでは、6割近くの方が内容を理解され、9割の方が楽しんで下さったという結果になりました。特に若い世代の方々から、「エンタングルメント状態での不思議な相関性が面白かった」(20代男性)、「難しかったが、とても沢山図などが使われていて、印象に残った」(10代男性)、「古典実在論が否定されるまでの過程をもっと詳しく知りたい」(10代男性)、「物理に興味が出てきた」(10代男性)、「世界に役立つ研究だと思った」

(10代男性)、「自分もあの先生のようにになりたい」(10代男性)というコメントが寄せられて嬉しく思いました。若者の理科離れが問題となっている昨今、研究者や技術者を目指す若者の裾野を拡大し、最先端の科学に触れることが出来るこのような機会を増やす事は、少子高齢化が進む我が国が世界の中で技術力を発揮するために必要不可欠であり、我々研究者に与えられた使命でもあるとの思いを新たにしました。



国立情報学研究所 オープンハウス

■実施日 2012年6月7日(木)・8日(金) ■対象 NIIオープンハウス来場者
 ■展示・デモンストレーション名 「量子物理を用いて難解な物理や数学の問題を解明する」「光の干渉から量子コンピュータの原理を知る」「量子コンピュータはどうやって作るのか?」「量子コンピュータはどこまで進んだのか?」 ■担当者 国立情報学研究所 山本研究室/根本研究室/量子情報国際研究センター

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)を開催しています。山本研究室、根本研究室、量子情報国際研究センターでは、合計6枚のポスター展示を行ないました。それぞれのポスターでは、連成振り子、台車に載せたメロノーム3台を使った位相同期実験、超伝導体と永久磁石を用いたマイスナー効果や磁気浮上実験などの比較的簡単なデモンストレーションも併せて準備しました。これらの実験は、FIRST量子情報プロジェクトのアウトリーチ活動の一環である出張授業でも実施されているものを取り入れ、特に、今回のデモ展示では 中学生から社会人まで多くの来場者に実際に実験を体験してもらえるように心掛けました。例えば、超伝導のデモでは、銅製の10円玉の上に置いた磁石とは異なり、超伝導体の上に載せた磁石は、超伝導体が十分冷やされると超伝導体の相転移に伴って自発的に浮き上がる事や、浮いている磁石の向きをピンセットで変えるなど来場者に実際に

に体験してもらいました。特に真剣な眼差しの中高生達から、「これ、どんな姿勢でも浮くよ!」「何で~? 不思議!」など、活き活きとした反応が帰ってきて、驚きと共に楽しんでもらった様子でした。

今回のオープンハウスでは、のべ1,376名とたくさんの方が来場され、その来場者によるアンケートでは、興味度の高かった研究成果展示No.1に、山本研究室の展示が選ばれていました。このようなオープンハウスなどの場が、量子情報国際研究センターとFIRST量子情報処理プロジェクトの活動を広く一般の方にご理解頂く、良い機会になればと思います。

[国立情報学研究所量子情報国際研究センター 仙場 浩一]



北海道大学 電子科学研究所一般公開 ひかりの科学：体験塾

■実施日 2012年6月9日(土) ■対象 一般・約200名程度
 ■展示・デモンストレーション名 「ひかりの科学：体験塾(電子科学研究所一般公開展示)」
 ■担当者 江藤 祐、大山 悟、上岡 俊也、岡本 亮(北海道大学/大阪大学)

北海道大学電子科学研究所は、例年、北海道が新緑で包まれる時期、6月初旬に行われる学園祭に合わせ、一般公開を行なっています。研究所公開では、各研究室が、実施している研究内容の説明や、その基礎となる科学に関して、子供を含めた家族連れやお年寄りなど、一般の方に分かりやすく展示を行っています。私たち、北海道大学電子科学研究所光量子情報研究室(竹内研)では、最先端量子情報処理プロジェクトで実施している「光子を用いた量子情報技術の計測

応用」の基礎になる光の不思議な性質に関する展示を、「ひかりの科学：体験塾」として行いました。具体的には、文字が数センチも浮き上がって見える「石」(写真左)や、偏光素子を使った不思議な筒(写真右)などです。それらの装置は、現在常駐先である、阪



大基礎工学研究科の大学院生たちが作成し、当日の説明も行いました。当日は、研究公開全体で1000人程度、私たちの展示に200人程度、幅広い年代の方にお越しいただきました。皆さん、光を使った様々な不思議な現象を見て驚き、説明を聞き納得と、本当に楽しんでいられました。日常の光に「科学」を感じるきっかけになり、その先にある量子の不思議についても関心を頂けたのではと感じています。

[北海道大学/大阪大学 岡本 亮]

特許のすすめ

国立情報学研究所／スタンフォード大学
山本 喜久

基礎科学のフロンティアを目指している研究者にとって特許というものは余り馴染みのないものですが、今回はこの特許と発明というものについて書きます。

私が日本電信電話公社（現NTT）に入社した1978年頃には、DARPAはインターネットの起源となったARPANETの開発に遂に成功していましたが、日本ではe-mailは言うに及ばずfaxすらなく、外国とのコミュニケーションにはもっぱらテレックスが使われていました。しかし、新しく開発されたインターネットが21世紀の社会インフラの基幹になることは、当時のNTT幹部の目には明らかになっていったようでした。そのため、新入社員である我々に与えられたNTT幹部からの最初のメッセージは“君達はFiber to Home実現のために雇われたのだ”というものでした。事実、NTT研究所に入所した同期生の多くがファイバーの低損失化、低価格化、半導体レーザーとアバランシェホトダイオードと光変調器の開発に取り組みました。高速インターネット網を世界中に張りめぐらすためには、ファイバーケーブルを太平洋、大西洋、インド洋…などに敷設する必要があると考えられていました。しかし当時の光伝送技術では最大でも50kmの伝送距離が限界でしたので、海底で最低でも200回は光信号を電気信号に変換し、再生中継したのち再び光信号へと変換する中継技術を開発することが必要でした。私は光増幅器で減衰した光信号を線形増幅するだけで、Gbit/sの信号が10,000kmは飛ぶという計算を入社2年目の1979年には手にしていました。NTTは当時28歳だった私にこの光中継技術の研究を任せてくれました。私は、光中継に使う光増幅器は半導体レーザー増幅器だろうと決めつけ、特許を取り、実証実験を仲間と行ない実用化を目指しました。

それから9年後の1988年には世界初の大西洋横断光ファイバーケーブルが、翌年1989年には太平洋横断光ファイバーケーブルが敷設されました。今日、国際インターネット通信の実に99%はこの海底光ファイバーケーブル方式で運ばれています。そして、私の予想通り、そのシステムには光直接増幅中継が使用され

ています。しかし、私達が手がけた半導体レーザー増幅器の姿はどこにもありません。

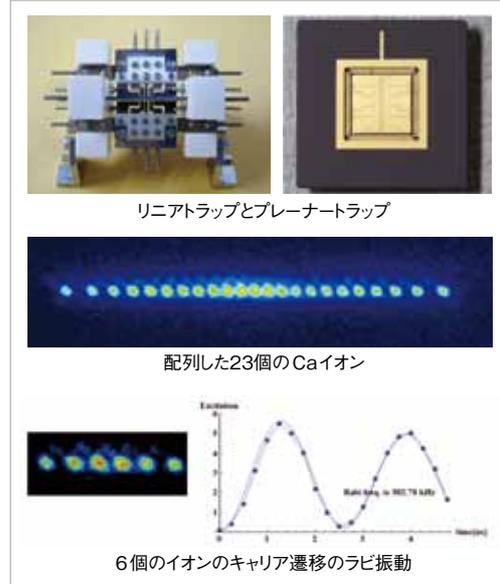
私たちが半導体レーザー増幅器の特許を申請した1979年頃、後に同僚となる米スタンフォード大学のH. John Shaw教授らはEr：ドープ光ファイバー増幅器の特許を申請していました。これが海底光ファイバーケーブル方式に採用されました。今日、地上と言わず海底と言わず、光ファイバー通信網を支えている光中継技術は全てこの光ファイバー増幅器です。NTT研究所がくれた最大のチャンスを逃した私の敗北は決して運がなかったからではなく、当時の私の学問が浅かったためでした。発振器にとって好ましい特性である“高い発光量子効率”は、増幅器にとっては好ましくない特性である“小さい利得飽和出力”を意味することを私は知りませんでした。これがレーザー物理の肝であることを知ったのはずっと後年になってからでした。Shaw patentは莫大な特許収入を本人のみならずスタンフォード大学応用物理学科にもたらしました。これは学科が自由に使ってよい資金であり、主に新任の若手教員の実験室の立ち上げやポストクのフェローシップに使われています。

発明と特許の重要性はお金だけの問題ではありません。Er：ドープ光ファイバー増幅器ぐらい成功した技術となると、後年になって“あれを発明したのは私だ”という人がたくさん現われます。光ファイバー、半導体レーザー、CCDなど後にノーベル物理学賞の対象となった発明も同様です。多くの論文が様々な雑誌に掲載される現代では、発明のプライオリティを論文で主張することは不可能です。しかし、特許は1つの基本発明に対して1つしか成立しないので、誰が発明したかを主張する有力な証拠となります。量子情報処理技術はまだ基礎研究の段階ですが、最終的に世の中に役立つ知識や技術を生産するための競争は遂に始まっています。研究が成功した時、特許が意味するところは非常に大きいことを理解していただきたいと思います。これは重要な発明だと思ふものが出てきた時にはまず特許を書いてください。

イオントラップ

当研究室は、研究スタッフ3人と学生十数人により研究室が構成されており、イオントラップを用いた高分解能分光と量子情報処理の研究を中心に研究を進めている。イオントラップ内のイオンは孤立系に近く、コヒーレンス時間の長い内部状態と零点振動状態まで冷やせる振動状態の量子制御が可能なこと、個別操作と個別観測や高効率状態検出が可能なことなどから、周波数標準や代表的な量子情報処理の実験系の一つとなっている。量子情報処理の研究についてはCRESTの量子情報処理研究の中の一研究課題として平成16年に採択されて以来、本格的に研究を行っている。量子情報処理のためのイオントラップ実験装置の開発を行い、イオンの振動基底状態までの冷却、Caイオンのテラヘルツ遷移を持つキュービットの開発等の研究を進めてきた。現在、これらの基盤技術のもとに、リニアトラップとプレーナートラップを用いて量子情報処理の実験研究を行っている。

リニアトラップを用いた実験では、実験パラメータにロバストな量子制御として、断熱的な手法によるキュービットの量子制御を行っている。高速断熱通過法を用いた2個のイオンのDicke状態の生成、誘導ラマン高速断熱通過における幾何学的位相の制御による単一キュービットの任意の回転の実験的实现、RFドレスト状態を用いた磁場変動に強いデコヒーレンスフリーな2個のイオンの量子もつれ状態の発生に成功している。この状態は通常の量子もつれ状態が磁場変動などにより、約5ミリ秒で崩壊するのに対し、200ミリ秒以上のコヒーレンス時間を持つことが確認されている。最近では、より多くのイオンを用いた量子制御、量子シミュレーションの実現に向けて、4個以上の量子制御の実験に取り組んでいる。また、量子シミュレーション実験として、最近、2個のイオン間の横モードフォノンのホッピングを観測した。イオントラップ内の2個のイオンはクーロン相互作用により結合しているため、振動



子としてみた場合、一種の練成振り子とみなせる。この系の1個のイオンにフォノン1個を励起すると、古典的にも知られているようにフォノンは2つのイオン間で往復する。この現象は固体のHubbardモデルを実現するための基本的な物理現象である。現在、サイト内の相互作用を付加することにより、物理的なモデルの実現に向けて実験を行っている。

イオンを用いた量子計算や量子シミュレーションを大規模化するには、集積化の容易な平面型のプレーナートラップの開発が必要である。当研究室でもこのトラップの開発を独自に進めている。これまでに、このトラップ特有の問題である、基板の垂直方向のマイクロ運動の補正を、イオン振動のパラメトリック励起による方法で解決した。また、複数個のトラップ領域を持つトラップアレー間の1個のイオンの輸送や、量子シミュレーションのための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トラップを作成し、イオンの捕獲に成功している。現在、強磁性体のIsingモデルの量子シミュレーションなどに用いるために、イオン列間の相互作用発生のための小型化、マイクロ運動の補正などの問題の解決に向けて研究を進めている。

この他、情報通信研究機構との共同研究として、周波数標準の基礎技術開発のために、InイオンとCaイオンの協同冷却の研究を行っている。InイオンとCaイオンがそれぞれ1個の系において冷却により振動基底状態を発生させた。現在Caイオンを状態検出イオンとして使う量子論理分光の研究を進めている。

(占部 伸二)

超伝導回路による人工原子を用いた量子情報処理

我々のチームでは、量子情報処理、計算物理学、輸送現象（渦、電子、水素イオンなど）、エネルギー変換、太陽エネルギーなどの凝縮系物理学を理論的に研究している。最近の研究は領域横断的に、原子物理学、量子光学、ナノサイエンス、計算科学の境界面を追及している。またハイブリッド量子電気機械的システム、量子ナノエレクトロニクス、量子エミュレーターの研究も行っている。特に超伝導ジョセフソン接合キュービット、大規模化可能な量子回路、そして量子制御のデザイン改良が挙げられる。我々の研究の根底にあるテーマはナノスケールの量子系をよりよく理解し、それらを制御する方法を考案する事である。実験的に検証可能かつ観測された現象をよく理解できるような物理モデルを用いて理論予測を行っている。

ジョセフソン接合に基づいた超伝導回路は、マクロスコピックな量子コヒーレンスを示し、人工原子のように振舞うので、原子物理学、量子光学の実験をチップ上で実装する事ができる。この成長分野と我々自身の寄与の概要が J.Q. You, and F. Nori, Nature 474, 589, 2011 に掲載されている。我々の研究は次の問題に対する（超伝導回路を用いた）初期の提案を含んでいる：二準位系を用いた量子メモリー、共振器内キュービット、ベル状態、エネルギー準位間遷移のオン・オフ、量子遷移の選択、三準位原子と周波数変換、1光子・2光子過程の共存、系のパリティ対称性制御、サイドバンド冷却、反転分布とレーザー動作、電磁誘起透明化、光子発生、共振器内光子状態の用意、共振器を用いた2静止キュービット間の量子情報転送、量子トモグラフィ、コヒーレントポピュレーション移動、

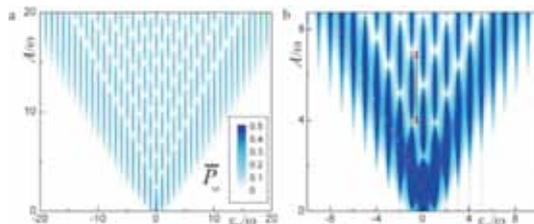
トポロジカル位相、スクイズド状態の発生、機械振動子への結合、可変鏡および干渉測定などである。また超伝導回路を用いたランダウ・ツェナー干渉測定の研究を行った。(Phys. Reports 492, 1, 2010)

超伝導回路はランダウ・ツェナー・シュタッケルベルク干渉法に用いる事ができるが、共面導波路に超伝導キュービットを結合させる事で、ファノやファブリー・ペロー干渉など他の干渉法にも用いる事が可能である。導波路に入射すると、光子はキュービットと道中干渉し、キュービットへ印加する電場もしくは磁場を調整することで制御され得る。人工原子は、可変鏡として働き、導波路中に閉じ込められた光子の反射・透過係数を変えられる。

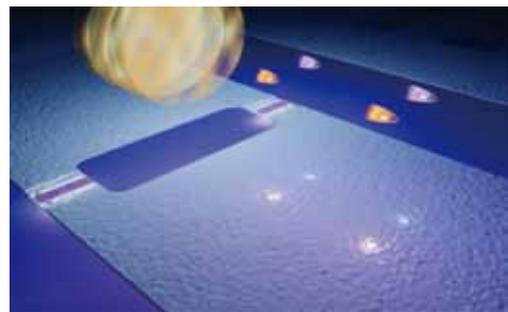
超伝導回路が他の量子系と相互作用するハイブリッド量子回路の研究 (Rev. Mod. Phys., in press, 2012)、超伝導回路を用いた量子真空増幅による不確定性の誘発に関する研究 (Rev. Mod. Phys. 84, 1, 2012) も行っている。論文 Observation of the dynamical Casimir effect in a superconducting circuit [Nature 479, 376 (2011)] は2011年の Physics World 誌におけるトップ5ブレイクスルーの1つに選ばれた。Nature 誌によると、我々の研究を取り上げた Nature News 記事は、2011年で最も読まれた。

また、他の量子系をシミュレートするために用いる事ができる制御可能な量子系である量子シミュレーターの研究も行っている。古典計算機では扱うのが困難な問題に取り組む事ができるため、量子シミュレーターは新しい物理現象探求の手段を提供する。(Buluta and Nori, Science 2009 and Rev. Mod. Phys. In press, 2012)

(Franco Nori)



超伝導回路における干渉測定



暗闇を光に振動している丸鏡は、下の光子対を発生させている SQUID を表わす。

[訳：堀切 智之(国立情報学研究所)]

量子コンピュータの 実現化へ向けて

国立情報学研究所根本研究室(QISTグループ)は、量子力学に基づく新しい情報処理の方法を可能にする「量子情報処理」の理論研究を行っています。当グループはこの量子情報処理の実現化へ向けて、世界の主要な量子研究拠点との共同研究を行いながら、最先端的な理論研究を推進しています。量子情報処理の研究は1990年後半から急速に発展し、これまでは表面的にしか見えていなかった量子の世界へ、科学的にアプローチできるようになってきました。量子情報処理が実現されるには、基礎研究と同時に、量子情報処理の実現化へ向けた融合研究が不可欠です。そこで当グループでもこの両方の観点から量子情報処理の研究を行っていますが、ここではFIRSTプロジェクトに最も関連の深い実現化へ向けた研究を中心に研究室の活動をご紹介します。

量子情報処理の実現化研究は、世界的には現在、数量子ビットを対象とする原理的な実証研究から、量子情報システムの構築へと動き始めています。量子コンピュータを構成するための基本素子は数量子ビット程度のもですが、これまでと大きく異なるのは、(大規模な)システムへと組み上げられるスケラビリティが必須と考えられている点です。私たちが2005年頃に発表したキューバス量子コンピュータは、当時、素子の将来性を意識した画期的なアイデアとしてスケラブルな量子情報素子の先駆けと言われ、「The New York Times」誌をはじめ各種メディアに取り上げられました。この頃から、素子のスケラビリティへの関心が世界的に高まり、また2つ以上の物理系の長所を融合するハイブリッド量子情報処理は世界的な主流となったことは広く知られる通りです。

ところがその後の私たちの研究から、素子レベルでのスケラビリティだけでは本当に役に立つシステムは組めない、ということが徐々に明らかになってきました。将来性のある量子技術の基礎を築くには、システム・アーキテクチャの考えが必要です。そこで2006年から始まった量子中継に関するNICT受託研究においてシステム・アーキテクチャに取り組み、量子通信の性能だけでなく、必要とされる素子の性能についても数桁にわたり改善できることを明らかにしました。

これらの先行研究をもとに、FIRSTプロジェクトではさらに現在の技術で実現化を見通せる新しいシステム・アーキテクチャの構築に力を注ぎ、素子の機能と精度を具体的、数値的に示すことを目指しています。昨年はNTT、大阪大学の実験グループとの共同研究により、ダイヤモンドと超伝導量子ビットのハイブリッド系の量子状態制御に世界で初めて成功し、量子メモリの原理実験として将来に向け重要な一歩を記すことができました。これからの実現化研究では、素子の原理となる、量子物理と大規模な情報システムを結びつける理論と実験の共同研究が不可欠となってくるでしょう。

このような理論を中心にした融合的な研究活動には、様々な視点から新しいアイデアと、自由に議論できる国際的な研究環境が必要です。当グループでは世界的拠点のリーダーを客員教授に迎え、海外から若手研究者が参加する他、学生の交流も活発に行われています。NIIには総合研究大学院大学の情報学専攻があり、大学院生の受け入れを行っています。研究室は自由な雰囲気でも、もちろんこれに戸惑う人もいますが、自由にできるということは自覚と責任を持つということ。それに気づいてしまえばどうすべきかを判断するのは、さほど難しいことではありません。定期ミーティングは週1回英語で行われ、研究の進展と問題点を共有し、議論を通して問題に対する理解を深め、解決策を探るのに役立っています。また、東大村尾研究室と共同でQulinkという量子情報研究者のネットワークを運営しています。定期的に行われるQulink Seminarは、早くから研究者であるという自覚に立って研究に取り組む若い人々を応援する場として、今年100回を数えます。

最後に、若手研究者に一言。研究のテーマは無限にあります。どれもそれなりに面白く、成果が挙げれば論文も書けるでしょう。しかし自分の研究を、過去・現在・将来にわたって、客観的に見通すことが重要です。その視点に立って、自分の研究を位置づけ、意義のある研究を行って下さい。

(根本 香絵)



NIQIST主催の2009年のコンフェレンスから

エッセイ

Essay

私は、今年の4月までNTTの物性科学基礎研究のグループリーダーでしたが、ここでは、私のグループで行っていた情報交換の方法についてご紹介したいと思います。

それまでのグループミーティングといえば、毎週月曜日の朝に、冒頭の数分間で、参加者全員に関する事務連絡があり、その後、事前に決まっていた発表者が、周到に準備してきた自らの研究進捗状況について約1時間程度セミナー形式で発表し適宜質問に応えながら討論するという形式で行っていました。内容に依っては、ミーティングの後で熱心な議論が続くほど、非常に活発な討論が行われることも珍しくないのに、何故かグループ全体の研究の進展が期待したほど捗っていない事に、あるとき気が付きました。そこで、試みに、“What’s New?”と称して、どれだけ短くてもいいから、必ず全員が何か話す時間をミーティングの前に導入してみました。内容は、何でもOKで、研究に直接関係なくても最近気になっている事なら、何でも良いことにしたのです。このやり方は、約10年ほど前に、Hans Mooij先生率いるデルフト工科大Quantum Transport (QT) グループに1年間客員研究員としてお世話になった時に、研究の現場でQTミーティングを仕切っておられたKees Harmans先生のやり方をヒントに、「必ず各人何か話す」ルールを加えたものです。ミーティングの参加者は、社員・ポストドク・実習生・短期滞在者・お隣のグループの共同研究者等々12名程度ですが、日本語を話せない参加者が常に3~4名程度いるので、“What’s New?”も英語でやりましたので、学生には大変だったかも知れません。始めのうちは、各人の週末の出来事や、グループ恒例のピクニックの事などを話したりしていました。毎日昼食時、必ずグループ全員が集う厳格な習慣もないので、情報共有の観点からは、それなりに有益だったのですが、すぐに、皆、最も気になっている情報を共有する時間になりま

した。例えば、「試料作製で困っている。装置の改造が必要と思うがどうか?」とか、「最新のデータが得られた。どう解釈したら良いだろう?」、「こんなアイデアを思いついたのだが、実験可能か?」、「試算ではこんなメリットがある新しい試料デザインどう思うか?」などです。今まで、グループミーティングで約2ヶ月に1回程度のペースで、かなりまとまった準備をして行っていた研究状況の共有化では、誰しも素晴らしい成果だけを強調してしまいがちで、最も大切なポイントだけを以前のやり方に比べるとほとんど何も準備せずに気軽にできるようになったので、実はそういう潜在的な要望があったのだと気づかされました。この“What’s New?”が定着してからは、グループのメンバーが互いに今何をやろうとしていて、どういう問題点を抱えているかが常に共有できるようになったので、当人が困っていた事がその場で解決されたり、解決の糸口となるアイデアが得られたりと、問題が滞ることが激減しました。考えてみれば、それまで、グループメンバー同士での情報共有の仕組みが個人任せであったため、普段あまり話さない人とは、情報共有がうまく行われていなかったのです。この方法のメリットは、共同研究による飛躍的な研究の進展や、分散コンピューティングの強みとも似ていると思います。始めて数年もすると、グループミーティングの前に、いつも約1時間必ず“What’s New?”をやるようになりました。“What’s New?”のみで、グループミーティングはキャンセルという「本末転倒?」なこともしばしば起こりました。

既に同様な機能を別の方法で実現されている研究室や、その必要すらない研究室も多いと思いますが、もしかすると…と、気になる場合には試す価値があるかも知れません。

仙場 浩一 (国立情報学研究所)

“What’s New?”で何か変わったことは?

No.9 September 2012

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 国立情報学研究所 大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 <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

R100
国立情報学研究所の再生産を促進しています