

FIRST/NII-GRC on Quantum Information Processing Newsletter

量子 ニュース



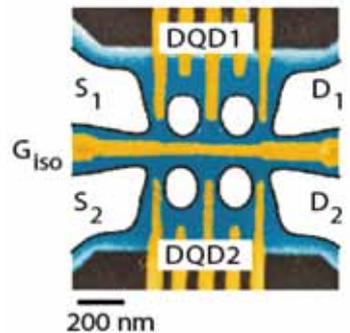
- CONTENTS
- 02 プロジェクト事務局からのお知らせ
 - 03 海外研究動向
 - 04 最近の研究成果
 - 06 プロジェクト全体会議
 - 14 サイエンスアウトリーチ
 - 18 著書の紹介
 - 19 研究室紹介
 - 20 エッセイ



P06 プロジェクト全体会議より



P14 サイエンスアウトリーチより



電荷量子ビットによって実現された二量子ビット系

P19 研究室紹介より

●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)

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(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(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)

※超伝導グループのアドバイザーが立木 昌(筑波大学)から井口 家成(筑波大学)に変更になりました。

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)

● INFORMATION

■2011年度 夏期研修会(サマースクール)開催予告

〈趣旨〉量子情報処理のような先端研究分野においては、専門の異なる講師陣のチームティーチングにより、学術的基礎から最先端の知識・技術までを最短距離でカバーする集中講義を行う機会が重要です。またこのような新領域においては、他の分野との交流による境界領域の開拓が大きなブレークスルーにつながるものが多々あります。そこで、2011年度の夏期研修会は量子情報と光科学(量子エレクトロニクス)の接点に焦点を当てて開催することにいたしました。

〈日程〉2011年8月9日(火)～19日(金)中の10日間

〈場所〉沖縄(宮古島)

〈対象〉上記日程にすべて参加可能であり、量子情報や光科学(量子エレクトロニクス)に興味を持ち、自身の研究成果についてポスター発表を行える者。

〈募集人数〉50名程度

〈費用〉参加費無料、交通費・宿泊費は主催者・共催者で負担

〈問合せ先〉NII最先端研究開発支援室 TEL 03-4212-2117

<http://www.first-quantum.net/>

※募集開始は3月末頃を予定しています。

■タイトル変更のお知らせ

本号より、『News Letter』は国立情報学研究所量子情報国際研究センターと共同発行となり、『量子ニュース』としてリニューアル致しました。

旧：『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)

新：『量子ニュース』(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」・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)



量子暗号通信について

情報通信研究機構 グループリーダー
佐々木 雅英



1996年の春、筆者はそれまで勤めていた鉄鋼メカを辞め、通信総合研究所（現NICT）に研究員として着任した。間もなく量子情報分野でおびただしい論文が発表されるようになった。JSTなど国の研究資金が流れ始め、企業は事業化を目指し量子暗号の研究に着手し始めていた。2000年には欧米で量子暗号のベンチャーが誕生した。日本では郵政省が国家プロジェクトを2001年に立ち上げ、三菱電機、NEC、NICTが中核となって取り組みを開始した。

2003年頃から米国でボストン地区20km圏に世界初の都市圏量子暗号ネットワークが構築されはじめ、EUでは14カ国連携の量子暗号プロジェクト（SECOQC）が始まった。日本では三菱電機、NECがフィールド伝送や相互接続実験を行うとともに、NTTが本格参入し、2006年順調に第2期5カ年計画に移行した。NICTに最新の超伝導光子検出器が整備されたのを機に2007年夏、京都と奈良の県境にある敷設ファイバでNECと本格的なフィールド実験に踏み切った。当初計画には無かったが、SECOQCが2008年に大規模なフィールド実験を予告していたし、日本でも早急に経験値を上げておく必要があった。

2008年10月8日、ウィーンでSECOQCのフィールド実験が研究者や報道陣に公開された。30km圏で音声の秘匿化を実現できる性能だった。しかし、記者からは将来性に関する厳しい質問が飛んだ。量子情報分野が初めて受ける社会的洗礼だったと思う。筆者は併催された会議で日本の取り組みや2010年東京で計画しているフィールド実験構想を紹介した。正直、SECOQCの主要メンバーは上の空でさしたる関心も無さそうだった。舞台裏では、プロジェクト継続に苦慮しており、特に現代暗号分野の抵抗が強いという声が聞えた。そんな中、東芝欧州研究所のAndrew Shieldsだけは早速筆者のところに来てフィールド実験への参加を表明してくれ、2010年10月のTokyo QKD Network実験への国際連携が始まった。

内心、当時の達成状況や残り予算からして底知れぬ不安も感じていた。2009年、EUでの大規模なファンディングは途絶えたが、ジュネーブ、マドリッド、ダーバン、蕪湖（Wuhu）でフィールドテストベッドが開設され、MIT、Telcordiaでも肅々と取り組んでいた。

日本でも強化策を明示してチーム全体で結束する必要があった。幸い総務省が追加支援をしてくれて、ID Quantique、オーストリア工学研究所やウィーン大学も参加してくれた。2009年後半から日に日に準備作業は苛烈さを増し、あっと言う間に2010年10月を迎えた。できるはずの単純な動作ができずデモ前日まで修正に追われた。当日ミスなく動画の秘匿伝送を世界で初めてデモできたのはチーム全員の献身的努力の賜物である。続く国際会議UQCC2010では、SECOQCの教訓を受け、現代暗号分野との公正な議論を行った。RSA暗号の発明者の一人シャミア教授は、量子暗号は物理と暗号の融合という知的挑戦としては素晴らしいが、コスト、性能からセキュリティソリューションの積極的選択肢とはならないだろう、しかし私が間違っていることを示してほしいと結んだ。これを契機に議論や発表は白熱し、ロビーでは論戦の輪ができた。

浮き彫りになった今後の課題は大きく2つある。まず現代暗号分野など関連分野ともっと対話することである。それを繰り返す中でしか次世代に繋がる新しい閃きは生まれないと思う。量子暗号は今の形のままでは限定用途を抜け出せないことは誰の目にも明らかだろう。もう一つは、それでも実際に動くものを作り自ら問題点を発掘してその解決策を提示することである。こうすることで限定的ではあるがコストを厭わないハイエンド用途に適用できるようになる。省庁側もすぐに広い実用に繋がらずとも、国際情勢の変化への適用力、競争力維持の牽引役として、量子情報技術には必要なコストをかけるという姿勢である。研究者も分野連携でこれに応え、量子情報の夢を万民のものとするために取り組んでゆきたい。

励起子ポラリトン凝縮体中の 量子渦・反量子渦束縛対の観測

国立情報学研究所山本研究室では、励起子ポラリトン凝縮体を用いて様々な多体系の量子シミュレーション実験を行っています。今回2次元超流動現象の発現機構の鍵を握ると言われてきた量子渦・反量子渦の束縛対の存在を初めて観測することに成功しました。

摩擦のない粒子の流れは、極低温の液体ヘリウムや気体アルカリ原子でよく見られる超流動、ある種の金属や酸化物で電気抵抗がゼロになる超伝導として知られています。この不思議な現象は、相互作用するボーズ粒子が低温・高密度の条件下でボーズインシュタイン凝縮と呼ばれる相転移を起こすことによって発現すると理解されています。一方、ボーズ粒子を2次元系に閉じ込めた場合には、有限温度ではボーズインシュタイン凝縮が起こらないことが数学的に証明されています。その理由は、2次元系では有限温度で量子渦と呼ばれる欠陥（粒子密度のディップと粒子の量子化された回転運動）が熱的に励起され、この欠陥により凝縮体の波動関数が壊されてしまうためです。しかし、1970年代初頭に Berezinskii, Kosterlitz, Thouless の3人は、2次元系のボーズ粒子であっても十分低温に冷却されると、超流動現象が発現するという理論を発表しました。その理論モデルによれば、系に励起された量子渦には右回りに粒子が回転しているもの（量子渦）と左回りに粒子が回転しているもの（反量子渦）の2種類があり、この量子渦と反量子渦がペアとして束縛状態を作り、そのことによって凝縮体の波動関数への擾乱が抑圧され、超流動が発現する、というものでした。しかし、そのような量子渦・反量子渦の束縛対は、サイズが非常に小さく、今日に至るまで直接に観測されたことはありませんでした。

半導体マイクロキャビティー中の光子が量子井戸中の励起子（電子・正孔対）と強結合を起こして生成される素励起、励起子ポラリトンは、2次元系のボーズ粒

子であるばかりでなく、その有効質量がRb原子よりも10桁も軽い為、比較的高温、低密度で位相空間密度 ($n\lambda_T^2$, n :超流動粒子密度、 λ_T :熱的ド・ブロイ波長) が $n\lambda_T^2=4$ 以上となり、BKT相転移点に到達できます。更に、その軽い質量の為に量子渦対のサイズは数ミクロンにも達し、容易に観測できます。このような理由から、励起子ポラリトン凝縮体はBKT理論モデルの検証に適した系であると言えます。

図1に、この実験に使われたマイケルソン光干渉計を示します。励起子ポラリトン凝縮体からの発光をビームスプリッターで2つの経路に分岐し、その一方のビームを90°の角度を持つプリズムミラーで反射させ、凝縮体をその中心線で折り返した反転像をわずかな角度を持ってCCDカメラに入射させます。他方のビームは平板ミラーで反射させ、凝縮体の実像をCCDカメラ上に垂直入射させ、反転像に重ね合わせ干渉縞を作ります。図2(a)には、量子渦対の中心付近での凝縮体波動関数の位相分布の理論値が示されています。図2(b)は、このような位相分布を持った凝縮体を図1に示した光干渉計に通した時に予想される干渉パターンを示しています。量子渦と反量子渦の中心を終端とする特有な干渉パターンの欠陥及びその鏡像が出現します。図2(d)は、実際に観測された干渉パターンを示しています。この結果から再現された励起子ポラリトン凝縮体の位相分布を図2(c)に示します。理論値と実験結果の良好一致から、2次元超流動体での量子渦対の存在が初めて確かめられました。さらにプリズムミラーの向きを90°回転させ、量子渦と反量子渦の中間点を通る垂直線に関して像を反転させ、2つの渦を折り重ねると、量子渦の右回りと反量子渦の左回り回転が互いにキャンセルして干渉縞の欠陥は消えるはずですが、図3にこれを実証した実験結果を示します。この成果は、Nature Physics 7, 129-133 (2011) に掲載されました。

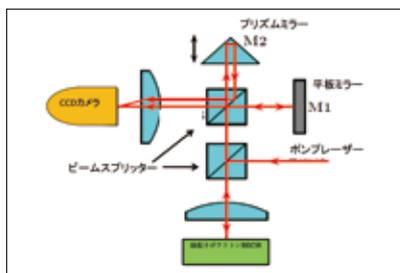


図1 マイケルソン光干渉計

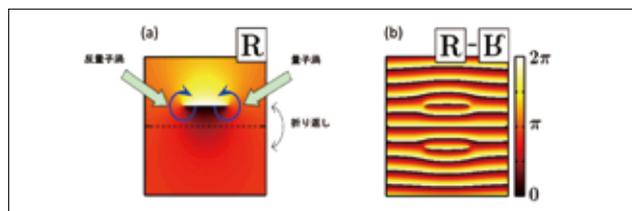


図2 (a) 量子渦対(ペア)の位相分布(理論値) (b) 量子渦対(ペア)の干渉縞(理論値)

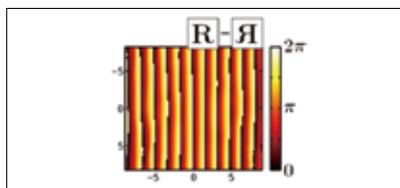


図3 量子渦と反量子渦を折り重ねた時の干渉縞(実験値)

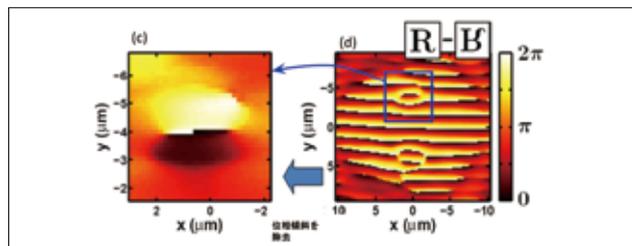


図2(c) 量子渦対(ペア)の位相分布(実験値) (d) 量子渦対(ペア)の干渉縞(実験値)

固体シリコン中での スピン集団エンタングルメント生成と検知

エンタングルメントは量子通信と量子計算の基礎を支える最も典型的な量子力学特有の現象です。最も進んだ量子計算例として頻繁に紹介されるのがIBM Almaden研究所の成果で、溶液中の分子集団の核磁気共鳴に基づき15の素因数分解に成功した実験です [L. Vandersypen et al, Nature 414, 883 (2001)]。この研究により溶液または固体中のスピン集団を用いて量子計算を実施する興味が一気に高まりました。しかし、IBMの実験では量子エンタングルメントは得られていませんでした。エンタングルメントが得られていないということは、古典計算を用いて量子アルゴリズムのシミュレーションを実施したことに相当します。そこで固体中のスピン集団でエンタングルメントを実現する方法が世界中のグループで模索されてきました。

このような背景において「スピン量子コンピュータ」の慶大理工・伊藤公平サブグループは、Oxford大学John Morton博士らと共同で、シリコン中のリン不純物集団を用いた2量子ビットのエンタングルメント生成・検出に成功しました。産業界ではシリコンにリン不純物が添加されてn型が作製されています。そのシリコン中のリン原子を、絶対温度20K以下の低温におくと、電子を一つ捉えて水

素原子のように振る舞います。この性質を利用し、リン原子核のスピンを一つの量子ビット、そこに捉えられている電子のスピンをもう一つの量子ビットとして扱い、この二つの量子ビットの間でのエンタングルメントを生成・検出することができました。ここでエンタングルメントを生成し検出するプロセスそのものが量子コンピューティングに相当します。

このような実験がこれまで報告されたなかった理由は、通常のシリコンでは量子ビットの量子情報保持時間(コヒーレンス)が短すぎたことです。リン不純物の量子情報がエンタングルメントを生成して検知されるまでに失われてしまいました。この課題に対し、慶應義塾大学では、シリコンを構成する原子をすべて ^{28}Si 安定同位体に揃えることによって量子情報保持時間を十分に長くすること、さらにオックスフォード大学が有する絶対温度3K以下で磁場3.4テスラを動作できる特別な磁気共鳴装置を用い、リン電子スピンと原子核スピンの高い分極(一方向に揃えること)を得ることの双方に成功し、このことが、本研究の成果を導きました。

この成果は Nature, 470, 69-72 (2011) に掲載されました。

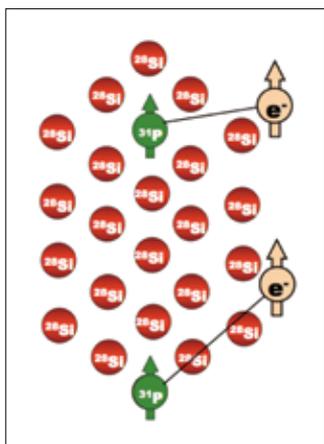


図1 ^{28}Si 安定同位体結晶中に添加されたリン不純物の模式図。個々のリンに束縛された電子スピン($S=1/2$)と中心の ^{31}P 核スピン($I=1/2$)の間にエンタングルメントが生成されました。

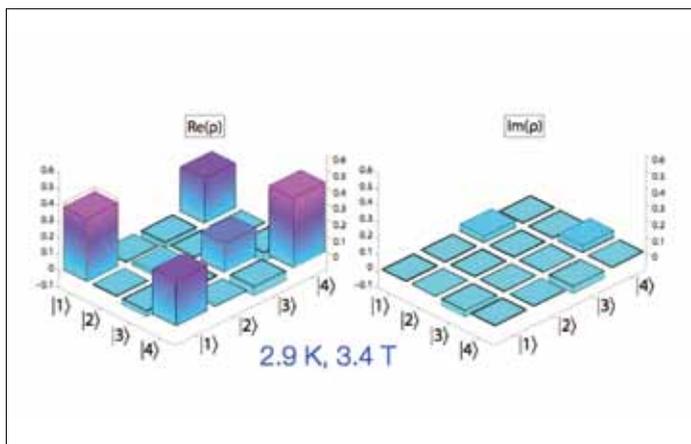


図2 電子スピン-核スピン2量子ビットのエンタングルメント生成後の密度行列トモグラフィ測定結果。左図が実部で右図が虚部を示します。実部において非対角要素である $|1\rangle|4\rangle$ および $|4\rangle|1\rangle$ の大きな値がエンタングルメント生成を示します。

量子情報処理プロジェクト全体会議

日時：2010年12月8日(水)～11日(土)

主催：最先端研究開発プログラム 量子情報処理プロジェクト

共催：新学術領域 量子サイバネティクス/JST CREST

場所：熱海ニューフジヤホテル 参加人数：約190名



量子情報システム

サブテーマリーダー
山本 喜久

量子情報処理プロジェクト
全体会議 2010

当サブテーマでは、山本喜久(国立情報学研究所/スタンフォード大学 教授)をリーダーとし、Alfred Forchel(ドイツ、Würzburg 大学 学長)、Klaus Lishka(ドイツ、Paderborn 大学 教授)をメンバーとして、量子コンピューター、量子シミュレーター、量子通信、量子計測の4つの分野で研究を展開している。他の7つのサブテーマが、量子情報処理技術を物理現象、デバイス技術に基盤をおくボトムアップ的アプローチで研究しているのに対し、当サブテーマは、システム・アーキテクチャーから出発するトップダウン的なアプローチを採用している。具体的な研究内容を表1にまとめる。今年度の全体会議では、発表時間の制約から量子コンピューターと量子シミュレーターに話題を絞って発表した。

表1 量子情報システムサブテーマの研究分野と研究テーマ

研究分野	研究テーマ
量子コンピューター	トポロジカル表面コードを用いた誤り耐性量子計算アーキテクチャーと光制御量子ドットスピンによる実装
量子シミュレーター	励起子ポラリトンBEC体を用いたBKT相転移、BCSクロスオーバー、ハバードモデル、イジングモデルの量子シミュレーション
量子通信	量子鍵配送、量子中継プロトコルと単一光子デバイス、量子メモリ素子を用いた実装
量子計測	単一スピンの射影測定(量子非破壊測定)

量子コンピューターの主な研究成果として以下の報告を行った。

1. 物理層、バーチャル層、誤り訂正コード層、論理層、アルゴリズム層からなる誤り耐性量子計算機のアーキテクチャーを、光制御量子ドットスピンの性能をベースとして理論的に構築した。その結果、2048ビットのShorアルゴリズムを実装するためには、 2×10^8 個の量子ドットスピンと6日間という計算時間を必要とすることを明らかにした。この理論研究の成果は、量子コンピューター・アーキテクチャーの1つのベンチマークを与えと共に、現存する提案方式の中で最も高速で、しかもワンチップに実装できる(量子テレポーテーションを必要としない)点でユニークなものである。

2. 上記アーキテクチャーを実現するための要素技術である、量子ドットスピンの光ポンピングによる初期化(10ナノ秒で92%のフィデリティ)、単一光パルスによる1ビットゲート(4ピコ秒で98~99%のフィデリティ、図1)、光スピネコー法によるデコヒーレンス時間の改善(温度 $\geq 4\text{K}$ 、磁場 $\geq 5\text{T}$ で3~7マイクロ秒)、2つの独立した量子メモリーからの識別できない単一光子の発生(ビジビリティ 65%)について報告した。

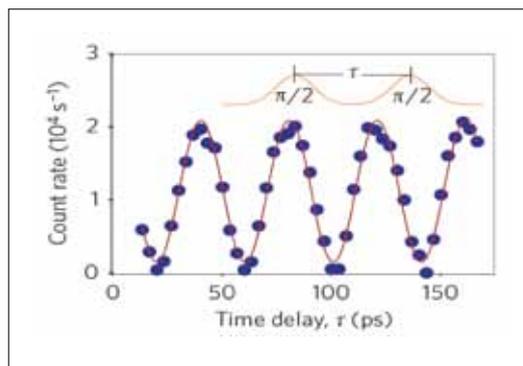


図1 2つの $\frac{\pi}{2}$ パルスで構成された電子スピンに対するラムゼー干渉実験。(Nature Photonics 4, 367(2010))

量子シミュレーターの主な研究成果として以下の報告を行った。

1. 2次元正方格子、三角格子、蜂の巣格子トラップ中に、励起子ポラリトンBEC体を捕獲し、理論的に予測されたs波、p波及びd波による超流動状態を実現した。また、量子渦格子構造を持つ超流動体の存在を確認した。今後、2次元系に特有なanyon物理の解明に挑戦していく予定である。

2. 2次元系での超流動発現のメカニズムとされるBKT相転移を励起子ポラリトンBEC体の空間コヒーレンス関数、ボゴリューボフ励起スペクトル、量子渦対の観測を通して確認した。

3. 低密度のBEC相から高密度のBCS相へのクロスオーバーをMollow tripletと負のボゴリューボフ分散の観測を通して確認した。

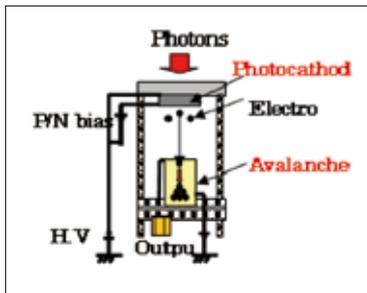


当サブテマでは6テーマの研究が進められており、各テーマの代表者より最近の成果について以下の内容で口頭発表が行われた。

「低ダークカウント検出器及び低消費電力中赤外光源の開発」

浜松ホトニクス 山西 正道

量子計測に必要な光検出器と中赤外域光源の開発を行っている。光検出器においては通信帯域の波長 $1.55\mu\text{m}$ において、サーモ熱電素子による冷却が可能な -75°C において、量子効率7%ダークカウント5cpsの検出器が得られることを報告した。これは量子情報通信の長距離伝送のための光検出器としての応用が期待されるものである。発光素子においては、波長 $\sim 8\mu\text{m}$ 帯の量子カスケードレーザーの開発状況について報告し、発光上位準位と前段からのキャリア注入準位を分離した Indirect Pump Scheme ならびに短共振器構造によって、低閾値・高効率な中赤外光源が実現できることを報告した。



高速の光応答が期待される設計中の近赤外 Hybrid Photo-Detector

「半導体ナノ構造による量子計測に関する研究」

東京工業大学 藤澤 利正

半導体量子ナノ構造による人工的な量子系とナノエレクトロニクスを融合した量子情報技術に関する研究開発を行う計画である。第一の目標は、量子ドットのスピニフィルターと単一電荷計測の組み合わせにより電流電子のスピ分解計数統計技術を開発し、ナノ構造におけるスピ相関を明らかにすることを目指す。第二の目標は、半導体表面に周期的構造を作製することにより表面弾性波フォノン共振器を設計・作製し、ナノ構造での電子格子相互作用の抑制や増強などの共振器効果の創出を目指す。

「単一電子を含む2重量子ドットを用いた電荷量子ビット」

NTT 物性科学基礎研究所 太田 剛

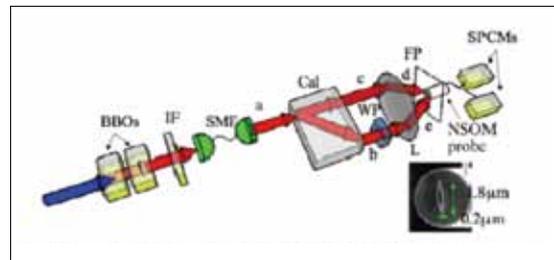
単一電子を含む半導体二重量子ドットを用いて、単一電荷の量子状態の制御と観測を行った。二重量子ドットに高速電圧パルスを印加して電荷状態の初期化、コヒーレント操作、読み出しを行い、コヒーレント振動を観測した。

「光子回路による量子サイバネティクスの実現と光子量子計測」

北海道大学 竹内 繁樹

光子量子計測に関して、次の2項目の報告を行った。

1. 量子もつれ合いにある光子対を用いることで、光の位相測定感度を増強することが可能である。その量子もつれ光を用いた、新しい原理に基づく顕微鏡（量子もつれ顕微鏡）についての光学系設計について報告した。
2. 従来の量子もつれ光を用いた位相感度の増強に関し、光干渉計内に損失が存在する場合についての最適な光源、観測系について、グループ員の小野らの発案した方法[1]を中心に検討した結果について報告した。
[1] T. Ono and H.F. Hofmann, Phys. Rev. A, vol. 81, 033819 (2010)



量子もつれ光を用いた干渉観測実験系 (Kawabe, et. al., Opt. Exp. vol.15, 14244 (2007)). 今回開発する、量子もつれ顕微鏡光学系のベースとなる。

「ボース・アインシュタイン凝縮を利用した磁力計」

学習院大学 平野 琢也

磁力計は自然科学の広い分野に様々な応用が期待される計測技術であり、原子気体BECを用いることで、高感度・高空間分解の磁力計を実現できる。光トラップ中の ^{87}Rb は豊富な内部自由度を持っており、成分間の相互作用を制御して、二成分の混合ダイナミクスが磁場に敏感に変化することを実験的に明らかにした。さらに磁場の制御を高度化するため、磁気シールド内でBEC生成装置を再構築するとともに、スピ歳差運動を測定するための準備を進めた。

「超伝導チップによる原子干渉計を使った量子計測」

NTT 物性科学基礎研究所 向井 哲哉

原子干渉計の優位性を述べると共に、測定感度に直接影響する「干渉計の囲む面積」の拡大に寄与する技術が、これまでの原子干渉計の開発において発展途上であったことを明らかにした。この解決策として、光のシングルモードファイバに相当する「単一モード原子導波路」の重要性を説き、その実現に向けた取り組みとして、超伝導アトムチップを用いて、数百kHzに相当する、原子の強い閉じ込めに成功したことを報告した。



当サブテマは、香取秀俊(東京大学)をリーダーとし、洪鋒雷(産業技術総合研究所)、小山泰弘(情報通信研究機構)をメンバーとして、各研究グループの保有する光格子時計の高精度化、遠隔比較、異種・同種の光格子時計の比較を行い、光格子時計の次世代原子時計としての技術基盤を構築する。今年度の全体会議では、これらの研究の進捗状況が報告された。

東大グループからは、2台の光格子時計の同期比較手法の開発が報告された。時計遷移を励起するレーザーノイズに起因する原子の励起率揺らぎを、2台の光格子時計の比較の際に同相除去することで、観測原子の量子射影ノイズのみによって制限される時計比較が可能になる。これまでに、偏極フェルミ粒子と孤立ボソン粒子を使った2台の光格子時計で、1600秒の平均時間で 1×10^{-17} の安定度に到達した。この実験結果により、原子数の増大で飛躍的な安定度の向上をねらう光格子時計の設計思想が初めて実証された。

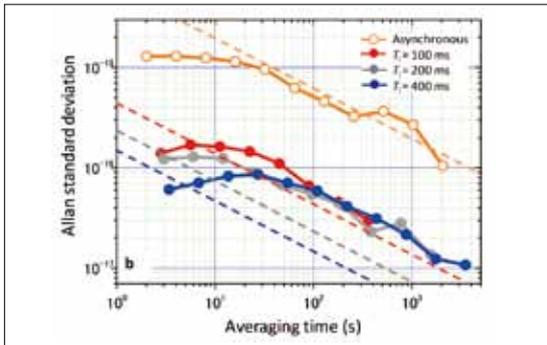


図1 2台の光格子時計の周波数比較のアラン標準偏差。橙色は非同期比較、赤、灰色は同期比較の結果。1600秒の平均時間で 1×10^{-17} の安定度を達成した。

産総研グループからは主な研究成果として以下の報告がされた。

1. Yb光格子時計においては、昨年度に行った絶対周波数計測の結果を向上させるために原子数の規格化を実施し、原子スペクトルの信号対雑音比を10倍以上増加させることに成功した。
2. Sr光格子時計においては、第1段原子冷却を行い、磁気光学トラップを実現した。さらに、この装置は同時にYb光格子時計(Sr/Ybのデュアル光格子時計)にもなっており、Sr/Yb光格子時計の周波数比の精密な決定を目指している。
3. 光周波数コム及び時計遷移レーザーの開発においては、高速制御可能なファイバ型光コムを開発し、相対線幅が極めて狭い光コムを実現している。また、この光コムを介して、578nmのYb光格子時計の時計遷移レーザーと1064nmの狭線幅化レーザーのピー

ト周波数測定を行い、時計遷移レーザーの線幅が20Hz以下であることを確認した(図2)。

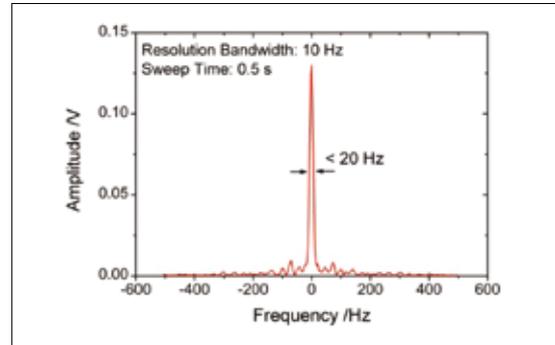


図2 狭線幅化光コムを介して測定された578nmと1064nmの狭線幅化レーザー間のピート周波数。

情通機構グループからは、東京大学と情通機構をつなぐ光ファイバ回線を開設し、この接続を利用したSr光格子時計の高精度周波数比較などの取り組みについて報告がされた。このために開発された、高安定なレーザー光を伝送するファイバノイズキャンセラシステムは、狭線幅化した波長 $1.55 \mu\text{m}$ のレーザーを光周波数コムによってSr光格子時計にロックすることで、Sr光格子時計の高安定な信号をそのままマイクロ波に変換することなく伝送できることが大きな特徴となっている。また、情通機構では、Sr光格子時計の開発にも取り組み、クロックレーザーの周波数をSr原子の量子遷移にロックさせる時計動作に成功した。その後、これらの開発したシステムを用いて、情通機構と東京大学で独立に運用したSr光格子時計の高精度周波数比較を実施し、 10^{-15} レベルで周波数比較が可能であることを確認した。今後、情通機構のSr光格子時計とファイバキャンセラシステムをともに改善することで、比較精度を向上させていくことが予定されている。

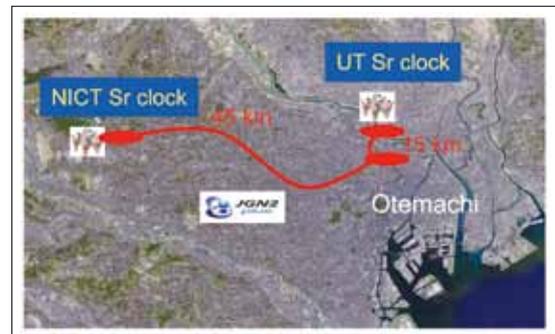


図3 東京大学と情通機構をつなぐ光ファイバ回線



当サブテーマでは、井元信之(大阪大学 教授)をサブテーマリーダーとし、佐々木雅英(情報通信研究機構)、古澤明(東京大学 教授)、小坂英男(東北大学 准教授)をメンバーとして、量子もつれを利用した多者間情報処理の提案と実現をめざし、そのブレイクスルーとなる要素技術の実証を行う。具体的な研究内容を表1にまとめる。今年度の全体会議では、各分野・テーマにおいて行って来たことを広く紹介する形で発表した。

表1 量子通信サブテーマの研究分野と研究テーマ

研究分野	研究テーマ
量子マルチパーティ情報処理	DFS利用雑音除去法において効率を劇的に向上する新方式提案・実証実験。多体もつれ(W状態)の融合ゲート・拡張ゲートの提案とその基本ブロックの実証実験。
ネットワークノードにおける量子情報処理技術	量子暗号の多ユーザ化、効率的鍵運用法としてネットワーク符号化の有効性を指摘・提言。低電力・大容量通信に向けては、ノードにおける非ガウス制御の重要性に鑑み、量子受信機や回路化に向けた要素技術「連続量子ビット」制御技術を開拓。
量子版コヒーレント光通信	量子版コヒーレント光通信実現へ向けた量子情報処理の最も基本的な量子操作として、コヒーレント状態の重ね合わせ状態であるシュレディンガーの猫状態の量子テレポーテーションを行い、出力側でウイグナー関数の負の部分の観測に成功。また、光導波路素子を用いた量子操作回路の実験を開始。
量子インターフェース	光子から電子スピンへの万能な量子メディア変換の手法開発。電子スピン状態トモグラフィによる転写の忠実度評価。半導体量子ドットを用いた量子メディア変換デバイスの開発。ダイヤモンドを用いた実用的な量子中継器を目指した完全ベル状態測定の実現。

量子通信の主な研究成果として以下の報告を行った。

1. 雑音のあるチャンネル(光ファイバー等)で忠実度の高い量子通信を行う一方法としてDFS(雑音不感部分空間)を用いる方法があるが、従来法はチャンネル損失値の「1qubitに用いる光子数」乗で効率が急速に落ちていた。これに対しチャンネル損失そのものに比例する方法を提案し実証実験を行った(2011年PRA)。また多体もつれ(W状態)の融合ゲートを提案しその最小単位(W2+W2→W3)実証実験を行った(2009年PRL)。同じく拡張ゲートも提案しその基本動作(W3の発生およびW4の発生)を確認した(2010年PRL)。
2. 安全で伝送効率に優れたネットワークの構築を目指して、「ネットワークノードにおける量子情報処理技術」と題した発表を行い、最新のネットワーク理論と光の量子制御を活用する方策を議論した。初めに、量子暗号分野の最新動向として2010年10月に試験運用を開始したTokyo QKD Networkについて紹介し、今後の課題として、多ユーザ化で急増する鍵の消費

量に対応するため、ネットワーク全体での効率的な鍵管理手法の開発が必要であり、ネットワーク符号化が有効な方法であることを示した。次に、低電力・大容量通信に向けた基礎理論を概説して、ノードにおける非ガウス制御の重要性を説き、非ガウス型量子受信機の成果と、回路化に向けた要素技術として連続量子ビットの制御技術の成果を紹介した。

3. 量子版コヒーレント光通信として、1997年に佐々木らによって提案された量子最適受信機を用いたものがある。ここで、量子最適受信機とは、レーザー光線の状態であるコヒーレント状態にコードされた情報を、量子操作により状態変換してから測定することにより、古典的通信容量の限界であるシャノン限界を破って情報通信を可能にするものである。量子最適受信機では、コヒーレント状態の状態変換(量子情報処理)を行うことから、連続量の量子情報処理が重要であり、中でもコヒーレント状態の重ね合わせ状態であるシュレディンガーの猫状態の処理が重要である。我々は、最も基本的量子情報処理として、恒等演算と見なすことができる量子テレポーテーションを行いそれに成功した。具体的には、出力側で入力ウイグナー関数の負部分を再現した。

量子情報処理を行うためには、複雑な量子回路を作製する必要があるが、フリースペースで作製するにはそのサイズ・安定性に限界がある。この困難を克服するため、光導波路素子を用いて量子操作回路を作製する実験を開始した。

4. 量子通信の長距離化に欠かせない量子中継器の実現に向け、光の量子状態を電子スピンの量子状態に転写する量子メディア変換の方法を研究している。今回の発表では、現在提案されている電子スピン以外の量子系一般にも適用可能な量子メディア変換手法について紹介した。これまでの量子状態転写では、光の偏光状態を電子のスピン状態に転写するため、電子系の特殊なバンド構造(V型遷移)と特殊なg因子(電子がゼロで正孔が大)という特殊な必要条件があった。一般の量子系ではこの条件を満たすことが難しく、手法の改良が望まれていた。今回、この条件を撤廃した万能な量子状態転写の手法を新たに考案し、半導体を用いた実験でこれを実証した。発表では、電子スピン状態トモグラフィによる転写の忠実度評価の結果、半導体量子ドットを用いた量子メディア変換デバイスの開発の状況、ダイヤモンドを用いた実用的な量子中継器を目指した完全ベル状態測定の実現についても合わせて報告した。



当サブテマでは、高橋義朗(京都大学 教授)をリーダーとし、五神 真(東京大学 教授)、占部伸二(大阪大学 教授)をメンバーとして、アナログ量子コンピューターおよび量子シミュレーターに関する研究を展開している。当サブテマは、高度な量子制御が可能ないくつかの量子多体系を実験対象として、ハバードモデルや量子スピンモデルなどの、凝縮系の中でも特に強相関係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る。本サブテマとして特に有望として選んだ高度な量子制御可能な物理系を、上記の3グループごとに表1にまとめて示す。今年度の全体会議では、各グループから、最新の研究結果についての発表があった。

表1 アナログ量子コンピューター／量子シミュレーションの各グループが対象とする物理系と研究内容

研究分野	研究テーマ
高橋グループ	光格子中の冷却原子を用いた、ハバードモデル、イジングモデルの量子シミュレーション
五神グループ	励起子BECなどの固体電子系およびその光との結合系(ポラリトン)の量子多体系としての物性解明と量子シミュレーション。フォトニックナノ構造の活用。
占部グループ	イオントラップ中の冷却イオンを用いた、ボースハバードモデル、イジングモデルの量子シミュレーション

高橋グループの主な研究成果として以下の報告を行った。

1. 光格子中のYb原子からなるモット絶縁体相について、超狭線幅光学遷移と用いた高分解能分光を行い、1重占有と2重占有のサイトで大きくスペクトル的に分離した信号を得ることに成功した。特に2重占有のサイトについて、collision blockadeの効果を見出した。
2. 薄型ガラスセル中でBECを生成し、1次元および3次元光格子に原子を導入することに成功した。さらに磁場勾配を印加して分光を行い、ほぼ格子間隔程度の空間分解能を得ることに成功した。
3. ボソンとフェルミオンからなる2重モット絶縁体状態を生成し、ボースフェルミ混合モット状態、相分離状態、複合分子相、など多様な量子相が発現されることを光会合実験と理論計算の比較により明らかにした。
4. 光フェッシュバハ共鳴の方法を用いて、ナノメートルスケールでBEC中の原子の原子間相互作用を

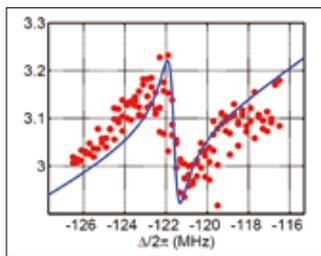


図1 光フェッシュバハ共鳴近傍での原子波回折の分散的振る舞い。これから、散乱長がナノメートルスケールで空間変調されていることが示される。

調べられることを原子波回折の振る舞いから実証した。(図1参照)

5. 量子スピンモデルのシミュレーションに応用可能な極性分子生成に向けてYb原子とLi原子の同時光トラップおよび共同冷却に成功したことを報告した。

次に、占部グループの主な研究成果として以下の報告を行った。

1. 冷却された2個のイオンを使って、イジングモデルの量子シミュレーションに必要なイオン間のスピン・スピン相互作用を発生し、その実験的な評価について報告した。
2. 2個のイオンの量子もつれ状態(Dicke状態)を、高速断熱通過法を使って実験パラメーターにロバストに発生することに成功した。
3. プレーナートラップのマイクロ運動の補正のために、パラメトリック励起による検出法を開発し、その有効性を示した。

最後に、五神グループの主な研究成果として以下の報告を行った。

1. バルク半導体Cu₂Oにおけるスピン禁制1sパラ励起子について、ヘリウム3冷凍機を用いたサブケルビン環境下で歪誘起トラップによる3次元閉じ込めを行い(図2)、励起子BEC転移の相境界を越える条件において熱的励起子成分が増強される特異な振る舞いを見いだした。
2. 位相制御したパルス光による2光子共鳴によって生成された極低温高密度1sオルソ励起子のLymanスペクトル形状を評価し、高密度励起子系の安定性を評価した。
3. 共振器ポラリトン凝縮の質量効果の実験の現状と、ポラリトン間散乱断面積の厳密な理論的評価について紹介を行った。
4. フォトンカウンティングストリークカメラを用いた高次光子相関計測法とその応用研究について報告を行った。
5. 半導体のナノキラル格子一導波路結合系により、左右円偏光に対する非対称な真空場分布を誘起する原理と実証結果について紹介した。

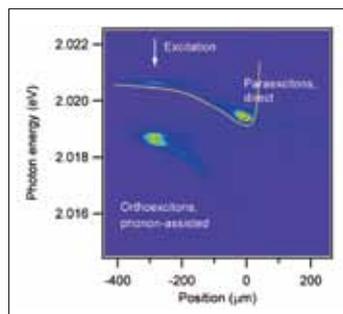


図2 ヘリウム3冷凍機を用いたサブケルビン環境下における亜酸化銅パラ励起子の捕獲。

当サブテーマでは、物理的量子デバイス系を都倉康弘 (NTT 物性科学基礎研究所 研究部長)、Franco Nori (理化学研究所 チームリーダー)、小川哲生 (大阪大学 教授)、また量子システムを小芦雅斗 (大阪大学 准教授)、根本香絵 (国立情報学研究所 教授)、Rodney Van Meter (慶應義塾大学 准教授) をメンバーとして理論研究を展開している。物理現象、デバイス技術に基盤をおくボトムアップ的アプローチと、システム・アーキテクチャーから出発するトップダウン的なアプローチの両面を持ち、実験グループとの密接な連携の元目的達成を目指している。今年度の全体会議では、各担当者が最新の研究概要と計画を紹介した。以下にその報告の概略を述べる。

1. 根本は、"High performance quantum computer (HPQC) and communication" と題し、量子計算における通信のインターフェースの重要性を強調した。その具体例として on-chip フォトニックデバイスから構成される3次元トポロジカル量子計算機を説明した。(図1) Van Meter は、"Advancing Quantum Architecture (AQUA)" と題し、古典計算/システムアーキテクチャーの考え方が量子計算の設計に使える事や、小規模で有益な Phase estimation algorithm の計画を紹介した。小芦は、最近の成果から現実的な光子検出器を仮定した量子鍵配送の安全性に関する検討や、新しく提案した遠隔非破壊パリティ測定法が多様な応用分野を持つ事などを紹介した。

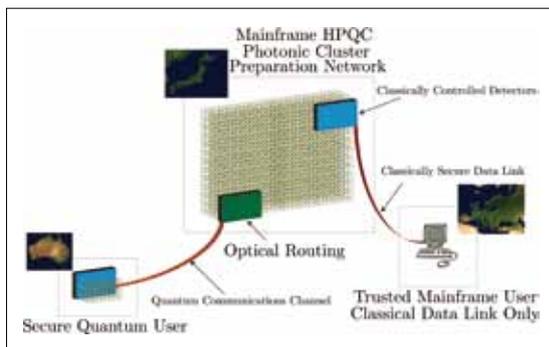


図1 HPQCと量子通信のイメージ図 S. Devitt et al., Progress in Informatics in press.

2. Nori は、超伝導量子ビットと(マイクロ波領域の)光子の相互作用に関して最近の成果を紹介した。具体的には、量子ビットと相互作用する一次元光導波路では反射や束縛状態の形成が期待され、さらには電

磁誘導透明化/吸収が外部パラメタにより制御可能である。小川は、光子と励起子(あるいは電子/正孔系)が結合した系の相転移とクロスオーバーについて解説した。数値解析により驚くべき多彩な相が実現する事を明らかにした。(図2) 今後は非平衡/協同的な光子・物質系に焦点を当てる予定。都倉は、理論グループの構成とミッションを紹介したあと、半導体電子スピン量子ビットの電氣的測定および制御方法について最近の進展を交え紹介した。またスピン量子ビットの位相緩和の主要因である核スピンを含むダイナミクスについて述べた。

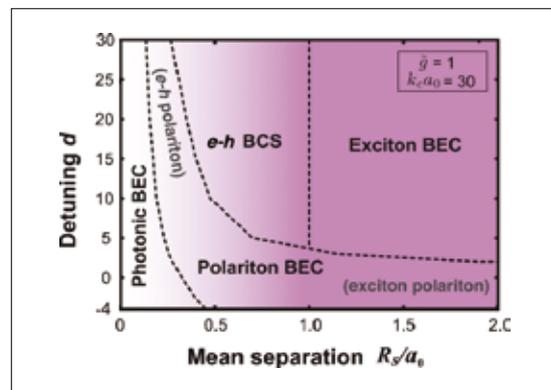


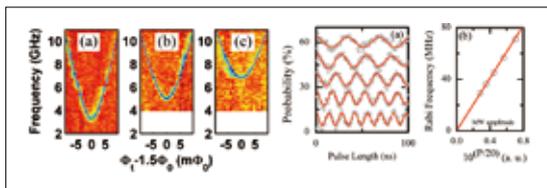
図2 絶対零度での相図。Detuning は共振器の光子エネルギーとバンドギャップエネルギーの差。K. Kamide and T. Ogawa, PRL 105, 056401(2010).



当サブテーマでは、蔡 兆申(理化学研究所/NEC)をリーダーとし、中村泰信(理化学研究所/NEC)、仙場浩一(NTT 物性科学基礎研究所)、高柳英明(東京理科大学)、日高睦夫(国際超伝導産業技術研究センター)、前澤正明(産業技術総合研究所)をメンバーとして、プロトタイプ型超伝導量子コンピューティングチップの実現を目指して研究を実施している。

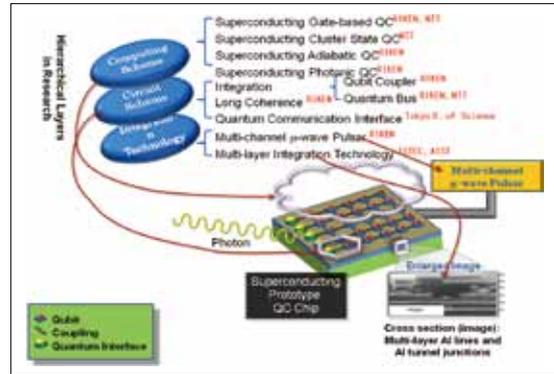
理研チームは、超伝導伝送線路と強く結合した磁束量子ビットにおけるマイクロ波伝搬に関する実験結果を報告した。磁束量子ビットは2準位系あるいは3準位系の人工原子として、その巨視的な磁気双極子モーメントゆえに伝送線路上の1次元電磁場モードと強く結合する。その結果、透過波と吸収・再放出された波の干渉が顕著に起こりうる。周波数領域の測定において、2準位系における共鳴周波数による透過の抑制、共鳴蛍光非弾性スペクトルに現れるMollow3重項、3準位系における電磁誘導透過現象、反転分布の形成と誘導放出によるマイクロ波の増幅を観測した結果などを報告した。

NTTチームは以下の成果を報告した：①量子ビットを最適磁束バイアスに留めたまま、エネルギー準位間隔をnsの時間で変化させることが可能な量子準位可変型の超伝導磁束量子ビット作製し、ラビ振動を確認した。光子寿命が μs 程度の高Q値マイクロ波共振器と組み合わせることにより量子バス量子計算の原理実証実験を目指す。②ジョセフソン分岐増幅(JBA)回路による巨視的量子系の量子状態測定での被測定量子系 \leftrightarrow 測定装置間の量子もつれの時間発展の詳細を理論的に解明。

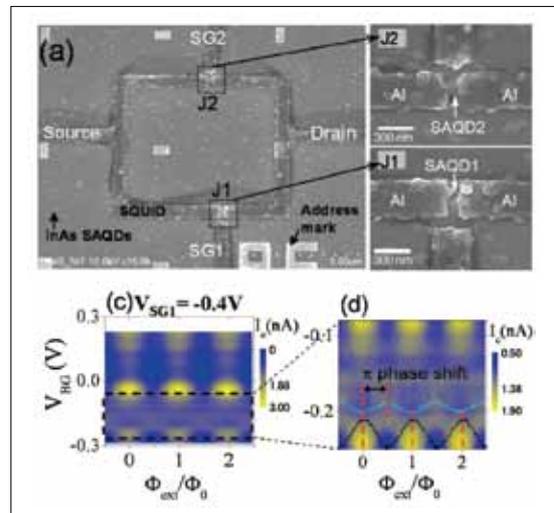


準位可変型超伝導磁束量子ビットエネルギー準位と最適磁束バイアスにおけるラビ振動。

東京理科大チームは、InAs量子ドットがSQUIDと結合した素子を作成し、その特性を報告した。直接電流一位相関係における π 位相シフトと、 π 接合としての挙動を意味する負の超伝導電流の観測に成功した。バックゲートによる量子ドットのエネルギーレベルを変化させ、量子ドットと電極との結合強度をサイドゲートで制御した。 π 接合遷移の結果は、量子ドットと超伝導電極間の結合度の変化によって、量子ドット中のスピンの状態のシングレット・ダブルレット遷移が起こったことによって説明される。

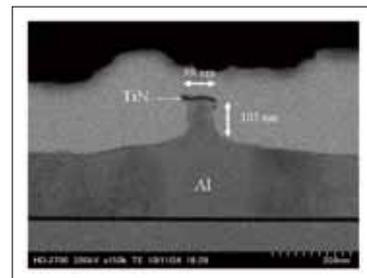


超伝導量子コンピューターサブテーマの研究テーマと研究担当。



(a) InAs量子ドットと結合したSQUID。(c) 最大超伝導電流の外部磁場とバックゲート依存性。(d) は(c)の拡大図。

ISTECとAISTは、両者が連携して実施しているアルミニウムを用いた超伝導量子ビットの集積化プロセス開発について報告した。これまでに開発してきたニオブ超伝導集積回路プロセスの概要紹介とそれを基に検討したアルミ量子ビットプロセス開発の全体構想を報告した。イオンリングによるアルミ加工技術、CMPを用いた平坦化技術、反応性イオンエッチングによるアルミナノ加工技術の進捗を発表した。線幅100nm以下のアルミ細線の作製結果などを報告した。



反応性イオンエッチングで加工したアルミナノ細線の断面写真

当サブテーマでは、樽茶清悟(東京大学 教授)をリーダーとし、北川勝治(大阪大学 教授)、工位武治(大阪市立大学 教授)、伊藤公平(慶應義塾大学 教授)をメンバーとして、「拡張性のあるスピ量子コンピューター、及び超伝導系・光子系の量子ビットとの結合を制御するための量子インターフェース」の研究を展開している。樽茶と伊藤は半導体中のスピ、北川と工位は分子のスピの研究を担当している。今年度の全体会議では、これまでの進捗と研究の方向性を中心に発表した。

- (樽茶) 微小磁石を取り付けたGaAs系2重量子ドットを用いて、電子スピンの2量子ビットを初めて実現し、さらにスピ回転と交換結合を組み合わせた2ビットゲートにより、スピ1重項状態の変調と検出に成功した。また、微小磁石法による非破壊スピ読み出しの原理確認(図1)、3ビット化を目指した3重量子ドットの作成、核スピ揺らぎの問題を解消できる材料としてSi/SiGe系のドットの作成を行った。単一光子-単一電子スピ変換については、2重量子ドットのスピ選択性(スピブロック/エッジチャネル)を利用して角運動量転写を初めて確認した。

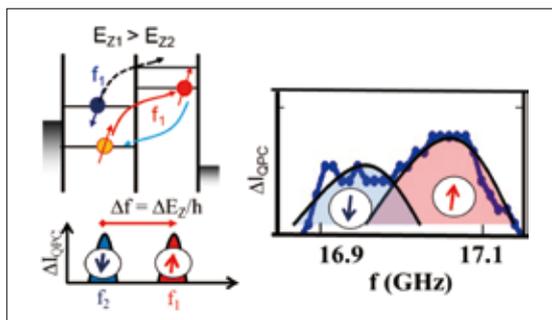


図1 非破壊スピ読み出し実験。微小磁石でゼーマンエネルギーの差を付けた2重ドットにおいて、ドット間共鳴トンネルの周波数差で上向き、下向きのスピを分離。(Phys. Rev. Lett. 104, 046802 (2010))

- (北川) 分子スピ超精密量子演算制御装置の開発の主な研究成果として以下の報告を行った。
 - (1) 共振器内で精密な磁場パルス照射可能なKu帯電子スピ多重共鳴装置を開発した。
 - (2) ペンタセンの光励起三重項状態を用いた動的核偏極で、重水素デカップリングによる高速化、フッ素核スピ2量子ビットの初期化を実現した。(図2)
 - (3) 有機結晶で140倍の核スピ増幅を実現した。

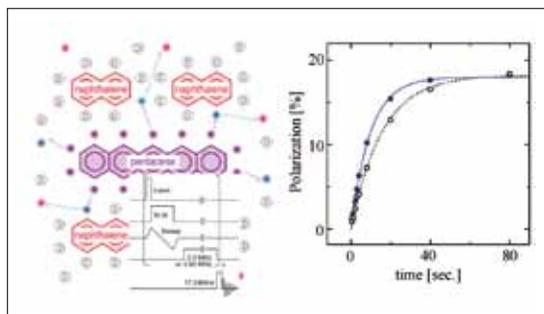
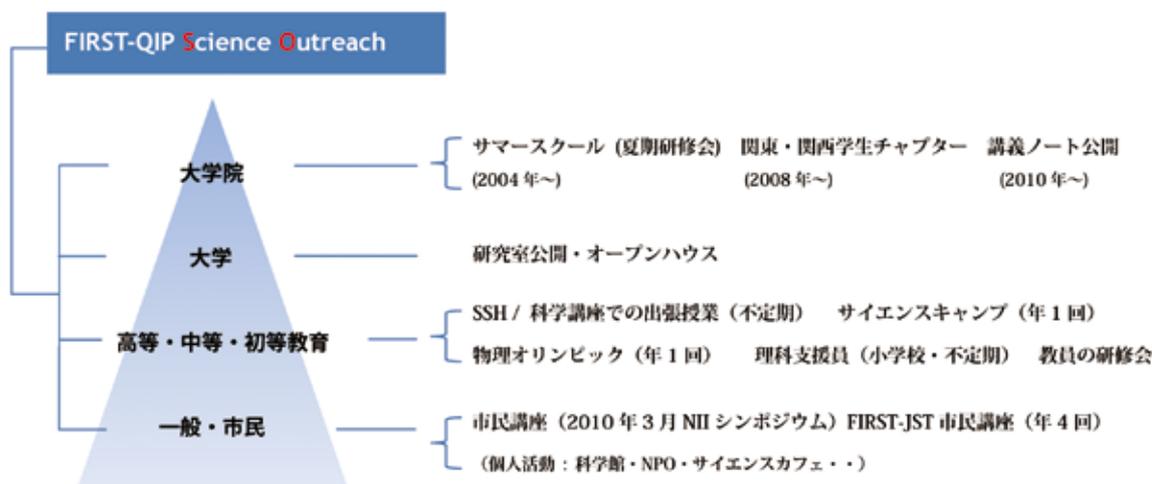


図2 部分的重水素化ナフタレン結晶におけるスピ拡散(左)と重水素デカップリングによるその高速化(右)。(J. Chem. Phys. 133, 154504 (2010))

- (工位) 小規模スケールの分子スピ量子コンピューター/量子情報処理技術(QC/QIP)を目指す、本グループが、2010年度内に実施してきた課題について、これまでの到達点を個別に紹介した。分子スピをQC/QIPのために利用する試みは、最近になって登場してきたが、分子スピqubitsの長所・短所を明らかにし、分子にg-/A-テンソルエンジニアリングを施すことができるtailor-madeの分子設計が必要であることを、安定なbiradical qubits, triradical qubitsを具体的に設計・合成して明らかにした。
- (伊藤) Oxford大学Morton博士らと共同で、シリコン中のリン不純物集団を用いた2量子ビットのエンタングルメント生成・検出に成功した。シリコン中のリン原子を、絶対温度20K以下の低温におくと、電子を一つ捉えて水素原子のように振る舞う。この性質を利用し、リン原子核のスピを一つの量子ビット、そこに捉えられている電子のスピをもう一つの量子ビットとして扱い、この二つの量子ビットの間でのエンタングルメントを生成・検出した。この成果は、本ニューレターの「最近の研究成果」欄で紹介されている。

量子情報処理プロジェクトにおけるアウトリーチ活動

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(以下FIRST-QIP)では、**その対象を大学院生、大学生、高校生、中学生、小学生、一般・市民と広くとらえ**、対象に応じた様々なアウトリーチプログラムを実施しています。特に、研究者が**教育の現場に出向き**、顔の見える双方向のコミュニケーションを大切にしたいアウトリーチ活動に力を入れています。これらを通じて、**教育現場からのフィードバック**を、我々のアウトリーチ活動の改善のみならず、自身の研究活動にも反映させることを意識しています。



FIRST-QIP が特に力を入れているアウトリーチプログラムの代表例

大学院 本プロジェクトの代表研究者である山本喜久教授が研究総括であったJST/CREST量子情報において、「量子情報未来テーマ開拓研究会」として2004年に発足した、**大学院生・ポスドクのためのサマースクール**を引き継ぎ、2010年夏にFIRST-QIPとしては第1回(通算5回目)の夏期研究会を開催しました。2008年に発足した**大学院生が独自に企画運営を行う若手研究会「関東/関西学生チャプター(SC)」**は、関東と関西に2つの拠点をもち、1年に4回ほど口頭・ポスター発表、研究室見学会を行い、量子技術に関わる物理・化学・応用数学・情報科学などの広い分野から若手研究者が参加しています。2010年には、大学院生・ポスドク用の**量子情報レクチャーシリーズ**として、様々なテーマごとに講義ノートの配信を、FIRST-QIPホームページ (<http://first-quantum.net/>)にて開始しました。

高等・中等・初等教育 スーパーサイエンスハイスクール(SSH)を中心とした高校での**研究者による出張授業**を今年度は全国8校で実施。また、国際物理オリンピックの日本国内予選などにおいて、量子干渉の実験と映像を使ったデモンストレーション、ポスターディスカッションを行いました。特に学校現場で慢性的に不足して

いる実験デモンストレーションを中心に、**物理の楽しさが生徒に伝わるような授業**を目指して、小学校での理科支援・特別授業などにも取り組んでいます。今後、高等・中・小学校と連携を図り、最先端の研究状況に関心のある物理・理科の教員の方々のための研修会も進めていく予定です。

HP・ニュースレター 上記ホームページと、四半期ごとに発行しているニュースレターで、アウトリーチ活動を随時報告しています。

高等教育におけるSSH出張授業、今年度(平成22年度)の活動状況

実施校(全8校)：広島大学附属高校、長野県屋代高校、大阪府立天王寺高校、大阪府立大手前高校、名古屋市立向陽高校、兵庫県神戸高校、東京都立戸山高校、早稲田本庄高校。

領域アドバイザー、代表・中心研究者、大学院生といった20～80代までの幅広い年齢層の講師を派遣し、量子力学を中心とした講義を実施しています。講義+実験・デモンストレーション形式で、出身高校のOBなどによる、研究者としてのキャリア教育を意識した講義を進めています。

[国立情報学研究所 宇都宮 聖子]

物理・理科教育におけるサイエンス・アウトリーチへの期待

アドバイザー 覧具 博義

今日の社会は科学技術に強く依存しています。そのさらなる進展のために、多くの若手人材に科学技術分野に目を向けてもらう必要があることは言うまでもありません。それだけでなく、地球温暖化対策、エネルギー確保などの科学性の強い世界的な重要課題への対応や研究投資などの政策選択に、広く市民の意志が反映されます。市民が妥当な選択を行いうるためには、理系・文系を問わず、すべての市民の科学技術に対する理解と信頼を得るためのサイエンス・アウトリーチがきわめて重要です。

■研究者との直接対話 先端領域で研究に邁進する研究者は、科学技術の魅力に惹きつけられて情熱的に研究に没頭しています。その情熱の息吹を、市民に、生徒に、児童に感じ取ってもらう研究者からの直接的な語りかけはきわめて効果的と思われます。第一線の研究者に直接して会話するという経験は、強いインパクトを持ちえます。

■持続可能で波及効果の大きなアウトリーチ 別の形態

のアウトリーチとして、初等中等教育の教員との連携が考えられます。日本の教員には、優れた教育研究・教材研究の伝統があり、教育センターや、物理教育学会等の学会・研究会、自主的サークルなどを通じて、新しい教材や教育手法を学ぶための努力があちこちで行われています。教員は、児童・生徒がどの段階でどこまで理解しているか、何をどう提示すれば能動的に学習できるか、を把握しているプロフェッショナルです。これらの教員に向けての先端領域からの情報発信は、大きな波及効果が期待できます。

■継続的な双方向交流 さらに、先端成果を教科に結びつけることを支援するフォローアップや、教員が橋渡し機能をつとめる共同作業としての特別授業や実験実習、などを通じての継続的な交流は、有効性が格段に大きいと考えられます。長期的な視点に立った、視野の広い、持続性のあるアウトリーチは、研究者の側にとっても得るものが少なくないと期待されます。

OFF CAMPUS

地域における科学講座の取り組み

「JST未来の科学者養成講座 科学先取り岡山コース」

■実施日 2010年11月5日(土) 13:30 - 17:00 (210分)

■対象 小学6年生・中学生・大学生・一般(約20名) ■授業名『量子の世界～粒子と波の二重性～』

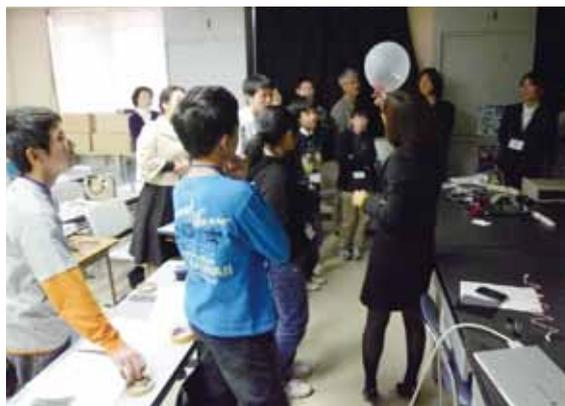
■担当 宇都宮聖子(国立情報学研究所)、山崎歴舟(京都大学 高橋研)、楠戸健一郎(国立情報学研究所 山本研)、中田芳史(学生チャプター・東京大学 村尾研)

岡山大学では、理数系に意欲や能力を持つ有志の中高校生のために、月に数回、大学教員らによる特別講義を開講しています。今回は、小学6年生から大学生、その保護者まで、非常に幅広い年齢層の方々に参加され、光と物質波の干渉を軸に、電磁波の性質と種類、量子力学における粒子と波の二重性や今後の発展性などを、グループディスカッションを交えて紹介しました。少人数制のクラスで比較的時間が長くとれ、参加者一人ひとりが難しい話題を咀嚼し、納得してから次の議題に進むことができる、というのが課外授業の特徴です。デモ実験では、煙を入れた水槽中を進むレーザー光の軌跡の観測、偏光板を使ったおもちゃ作り、ダブルスリットの干渉計と偏光板を用いた干渉計の量子消しゴムなど、量子現象の不思議に直接触れられるような実験を選びました。また、キャリア教育の一環として「理論物理学者の一日」というショートクリップを上映し、大学院生たちが研究室で議論している様子など、大学の研究室の雰囲気を覗いていただきました。

本講義での大きなチャレンジは、小学生を含めた幅広い層の子供たちに、いかに量子力学の面白さを知ってもらうかということでした。そのため、参加者と私たちが一緒になって行ったディスカッションでは、参加者の自由な発想や探究心を抑え込

むことのないように、最終解へ導くことを心がけました。科学を純粹に楽しんでいる子供たちの姿に触れられたことは、私たち4人にとっても大きな発見と喜びをもたらしました。「数式を使わずに量子力学を学ぶことができて驚いた」という感想を参加者からいただきましたが、学校の講義とは違った角度から量子力学を知っていただく、一つのきっかけとなったのではないかと思います。

【京都大学 山崎 歴舟 / 国立情報学研究所 宇都宮 聖子】



ON CAMPUS

SSHでの出張講義と今後の課題

■実施日 2010年12月3日(金) 13:20 - 14:20(60分) ■対象 2年生(長野県屋代高等学校 理数科生39名)

■授業名 SSHII(スーパーサイエンス物理講座)「量子力学—量子情報処理社会の到来と量子制御の時代へ」 ■担当 工位武治(大阪市立大学)

講義の翌々日、担当の清水久樹先生から、「お風呂の水をじーと見て色を確認した生徒が何人かおりました。常識が非常識であることを知ったときの驚きは、大人も子供も同じと感じました。」で始まるメールと、高校側のアンケート結果を送って頂いた。講義は生徒の予備知識なしを前提に、(1)講義前の休憩時間(5-7分間)に「情報通信革命/量子情報通信」のニュース(NICTの佐々木雅英さんが登場する)上映、(2)スライド講義(内1分間の光回折実験)で構成しました。また、女子生徒が比較的多いクラスであることを知らされ、彼等をエンカレッジする内容を追加しました。講義は、日常の現象を捉え非日常的な量子の法則で解き明かす手法に拠りました。

(アンケート結果)

- ①講義の内容はどうでしたか?: 大変面白かった(23%)、面白かった(54%)、普通(21%)、それほど(3%)、つまらない(0%)
- ②内容は理解できましたか?: 十分理解できた(0%)、理解できた(13%)、普通(31%)、あまり(49%)、ほとんど(8%)
- ③、④省略
- ⑤科学の知識はどうですか?: 非常に増えた(23%)、増えた(59%)、変わらない(18%)、減った(0%)、非常に減った(0%)
- 生徒側の総合評価は、「内容が難しく量も豊富で、屋代高校の2年生では難しい講義だった」ようです。他方、「時間が

短い、もっと聞きたいという生徒や難解の割には知識が増加したという生徒が多く、量子力学をもっと勉強したいと前向きに捕えている」というのが特徴でした。

今回の講義から科学・技術に親しむ文化を育む教育方法について、示唆を得たような気がします:「今回のご講義でSSHの第Ⅲ期に向けてヒントを頂いた気がします。授業に沿って理解を深めるための講義が主に組まれてきましたが、好奇心を煽る、未体験のゾーンで刺激する、そんな講義をもっと取り入れたら今以上にワクワクドキドキしながら普通の授業ができるような気がしました。」(清水先生)。 [大阪市立大学 工位 武治]



ON CAMPUS

SSH出張授業 アンケートによるフィードバック

■実施日 平成22年12月14日(火) 12:15 - 14:05(50分×2) ■対象 名古屋市立向陽高等学校 SSクラス第2学年 34名

■授業名 量子もつれとテレポーテーション ■担当 山本喜久(国立情報学研究所・スタンフォード大学)、宇都宮聖子(国立情報学研究所)

単一光子干渉、二光子干渉、量子もつれ、量子テレポーテーション、量子計算などの説明を行った。映画のビデオ・実験デモ・グループ討論などを取り入れて、生徒参加型の授業をめざした。アンケート結果を見ると、内容が面白いだけではなく、分かり易い授業に今後改善していく必要があると感じた。

1) この授業を通じて、大学でもっと理科の勉強をしてみたいという興味が湧きましたか?

- a. はい[76%] b. いいえ[0%] c. 分からない[24%]

2) 印象に残ったところは何か?

- ・映画の中でのこと(テレポーター)が実際に起こりうるということがびっくりでした。
- ・光子が1度に1つしか通らなくても干渉縞ができるということ。
- ・1つの量子に反応を加えると同時に遠くの量子にも同じ反応が起こること。

3) 授業で気になったこと、もっと勉強してみたいことはありますか?

- ・今、勉強している古典物理学が、量子力学とどのように関係するのか気になる。
- ・ボブ光子とアリス光子をさらに2つに分けたらどうなるのかなと。
- ・量子力学はまったく理解できない分野なので、一から全部聞きたい。

4) この授業を受けて、科学・物理に対するイメージはどのように変わりましたか?

- ・現実的なものだと思っていたが、夢のようなものを実現させるすごいものだった。
- ・自分の考えていた世界とは違う、常識が通用しない、奥が深い世界があるんだと思った。
- ・理論をたてて実験をし、その結果から仮説を実証していく「物理の仕方」が分かった。古典物理は“感覚”で理解できたが、量子力学は全くできなく、難しかったがとても面白かった。
- 5) 講演者の話を聞いて、研究者としての将来像はイメージできましたか?また、その授業を受ける前と受けた後とは、研究職のイメージはどのように変わりましたか?
 - ・研究者として携わることができる科学がここまで高度で面白いものだということを知り、研究者になりたいという考えがより強まった。
 - ・研究者はただ研究しているだけでなく、他の人に伝えることも大事だということがわかった。
 - ・好きなことや面白そうなことに打ち込めるのが楽しそう。
 - ・両教授とも笑顔のやさしい方で親しみやすいなあと感じた。

[国立情報学研究所・スタンフォード大学 山本 喜久]



大学院生による出身高校(SSH)での出張授業

■実施日 2010年12月10日(金) ■対象 大阪府立大手前高校 理数科1,2年生、大阪府立天王寺高校 理数科2年生 ■授業名「量子力学」
 ■担当 中田芳史(学生チャプター・東京大学 村尾研)、玉手修平(学生チャプター・京都大学 北野研)、杉山太香典(学生チャプター・東京大学 村尾研)

12月10日、自分たちの母校で出張授業を行う機会をいただき、高校生相手に量子力学の紹介を行った。大学院生による出張授業のメリットは「高校生に近い目線から伝えられる点」にあると考え、「日常生活の延長として身近に感じる」をテーマに授業を組み立てた。

当日は、生徒の心を掴むために用意したクイズや演出のおかげで活気にあふれる授業となった。中でも生徒の目が最も輝いたのは、「単一光子の二重スリット実験」について、生徒同士で議論させた後に実際の実験動画を見せた時であった。彼らの「日常」から導かれた予想とは大きく異なる「現実世界」を目の当たりにして、生徒は驚愕の声を上げ、それを「確率」で説明する量子力学に対して嵐のように質問を浴びせかけてきた。

今回は母校での授業だったこともあり、生徒たちはとても「素直な反応」を示してくれた。そのような気軽な雰囲気の中で量子力学を紹介できたという点で、大学院生による出張授業ならではの刺激を与えられたのではないだろうか。今後、機会があれば、今回以上に「生徒が素直になれる授業」を提供し、子供たちが自由闊達に科学的興味を育めるよう、微力ながら力になりたい。 [東京大学 中田 芳史]

私は今回の出張授業において実験を担当した。自分たちでできる量子力学実験をもっと知ってもらおうという思いのもと、レーザーポインタを使った二重スリットの干渉実験と、偏光板を使った測定の実験を行った。偏光板の実験は高校生が自らの手で実験を行い、光の偏光が測定によって変化する不思議な現象を確認した。

偏光板の間を巧みにすり抜ける光子を自分の目で見て、高校生たちも身近な不思議を存分に楽しんでくれたと思う。この授業を機に、日常の中に量子を感じ、身近な光にそと偏光板をかざしてみる遊び心を身につけてもらえたなら、本当の意味で大成功と言えるだろう。今回の授業では、そんな私たちの遊び心を少しは伝えられたのではないかと思う。

[京都大学 玉手 修平]



SSH指定校の海外研究機関訪問

本校は平成15年度より文部科学省のSSH校に指定され、本年度はⅡ期目の第5年次となります。生徒たちに、大学や大学院教育の場として海外も選択支の一つであることを認識してもらおう一助になればと思い、平成22年12月10日より4泊6日の日程で、生徒4名(2年生)と教員3名が米国西海岸の海外研究機関を訪問しました。研修ではヨセミテ国立公園でのフィールドワークにAGU(米国地球物理学連合)への参加。さらにスタンフォード大学やNASAエイムズ研究センター等を訪問しました。

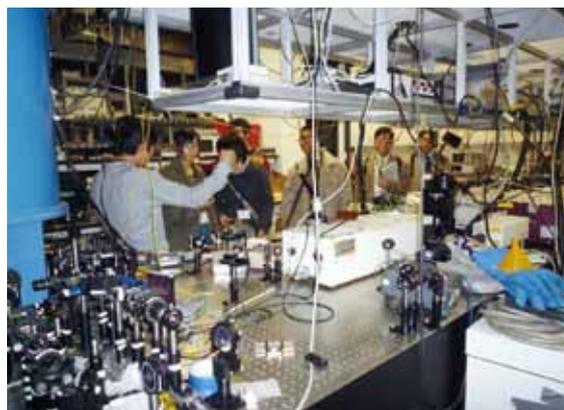
スタンフォード大学ではCenter for Nanoscale Science & Engineering内にある山本研究室で、佐中先生による量子コンピュータの仕組みについて講義を受けました。時間の節約で、用意して戴いた昼食を取りながらの受講となりました。<量子>自体が難しい言葉ではありますが、生徒の学習内容を確認しながらのお話で高校生でも理解できるよう配慮して戴きました。その後、研究室へ移動して実験装置を見学し、実際に青色のレーザー光線にて研究の様子を再現して戴きました。

講義に関する感想として生徒からは「物理で学んだ波の干渉や強め合いなどの話題が出てきて、高校生が習う基礎のようなことが、最先端の技術にも必要なのだと感心した。」「シリコンバレーで作られている半導体をスタンフォード大学で使いながら研究するのはとても効率的だと思った。」「炭素の原子が

単一光子光源と同じ働きをすることにびっくりした。』

科学が日々進化し他国との競争力が増している今日において、日本の学生が外へ飛び出さないという厳しい現状があります。若い時代に世界と競うための免疫をつくり広い視野で未来を見つめる力を育成するためには、高校と大学・研究所等との連携は欠かせません。今回ご協力戴いた山本研究室の方々に心から感謝申し上げます。

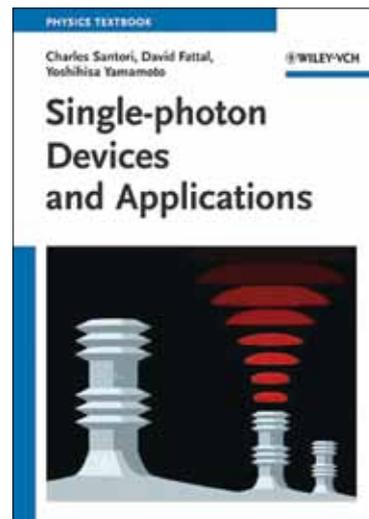
[長野県屋代高等学校 教諭 清水 久樹]



“Single-Photon Devices and Applications” Charles Santori, David Fattal, and Yoshihisa Yamamoto (Wiley-VCH, 2010)

最近の10年間、決められた時刻に単一光子を発生する光源が、中性原子、イオン、分子、量子ドット、格子欠陥、超伝導回路など様々な系で実現された。単一光子の発生と検出の研究の背景には、量子力学の基本仮説の実験的検証という基礎的側面と、量子暗号、量子中継、量子情報処理システムの実現という応用的側面の2つがある。この本では、単一光子光源の基本原理、実験手法、応用分野を特に安定な動作と大規模な集積化を可能とする半導体素子に焦点をしばって記述した。主な内容を以下にまとめる。

- 単一光子光源の基礎と歴史
- 2準位人工原子と共振器を用いた単一光子発生
- 3準位人工原子と共振器を用いたコヒーレントな単一光子発生
- 単一光子光源のデコヒーレンス特性
- 単一光子光源に係る測定技術
- 人工原子：量子ドット、ダイヤモンド中のNVセンター、ドナー／アクセプター不純物
- 単一光子光源に使われる微小共振器
- 応用分野：量子暗号、量子中継、量子情報処理



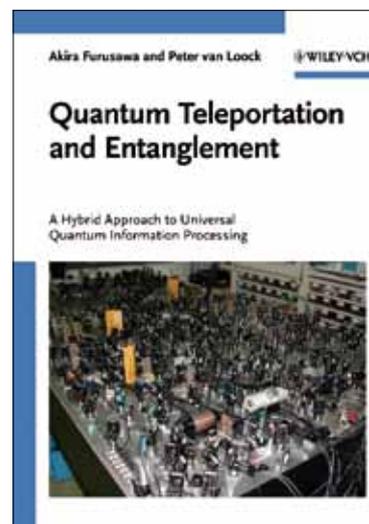
“Quantum Teleportation and Entanglement” Akira Furusawa and Peter van Loock (Wiley-VCH, 2011)

実験家と理論家が共著というユニークなモノグラフであり、量子テレポーテーションを基本的なサブルーチンとし、多者間量子エンタングルメントをリソースとした、ユニバーサル量子情報処理について解説している。ここで、実験家とはAkira Furusawa (古澤 明) であり、決定論的量子テレポーテーションを世界で始めて実現し、その拡張として量子テレポーテーションネットワーク、量子誤り訂正実験に成功している。一方、理論家はPeter van Loockであり、量子テレポーテーションネットワーク理論、連続量量子クラスター状態を用いたユニバーサル量子コンピューティングなど、独創的な理論を多数提案している。

この本の特徴は、これまで「量子ビット」と「連続量」として、別々に書かれることが多かった計算基底を、一冊の本の中で同一の視点から解説し、さらにその統合である「ハイブリッド量子情報処理」について述べていることである。歴史的にも「ハイブリッド情報処理」はアナログ・デジタル情報処理であり、量子ビット＝デジタル、連続量＝アナログと考えれば、ハイブリッド量子情報処理は歴史の必然であるとも考えられる。

さらに、この本のもう1つの特徴は、解説されている実験の多くが、著者自身によって行われていることである。したがって、理論的背景から実験の詳細まで、借り物ではない臨場感を持って書かれている。

物理学、理論量子光学、量子力学、量子情報の研究者、大学院学生対象。



東京工業大学藤澤研究室

当研究室は東京工業大学理工学研究科物性物理学専攻、及び極低温物性研究センターに所属しています。NTT物性科学基礎研究所の量子固体物性研究グループと連携しつつ、藤澤利正教授の下、総勢9名で研究を行っています。主な研究対象は半導体二次元電子系などの低次元系における量子輸送現象です。

現代の高度な情報処理技術を支えるエレクトロニクスは、トランジスタなどの半導体デバイスを用いて電子の電荷を精密に制御することで成り立っています。このような従来の半導体エレクトロニクスにコヒーレンスやスピン自由度といった量子論的概念を取り入れることで、革新的な量子情報技術の実現を目指す研究が世界的な潮流になっています。当研究室では、電子を静電的に微小領域に閉じ込めて作製される量子ドットを用いて電荷量子ビットを実現し、そのコヒーレント制御技術、あるいはそれを用いた量子計測技術の開発に取り組んできました。

電荷量子ビットは2つの量子ドットが静電的に結合した二重量子ドット(DQD)において、電子がどちらの量子ドットに存在するかをそれぞれ $|0\rangle$ 、 $|1\rangle$ 状態とみなすことで実現されます。各量子ドットのエネルギー準位やドット間結合強度などのパラメータは静電的に制御することができるため、電荷量子ビットは極めて制御性のよい量子ビットであるといえます。これまでに我々は、4つの量子ドット間の静電結合(図1(b))を精密に制御することで、二量子ビット系の量子状態(図1(c))を自在に制御し、CNOTやSWAPなどの論理演算が実現できることを示してきました。

現在当研究室では、この電荷量子ビットにおけ

るデコヒーレンスの起源の解明に取り組んでいます。我々はデコヒーレンスの主たる原因として、フォノン、特に結晶表面を伝搬する表面弾性波とDQD内の電子との電子-格子相互作用に着目しています。これまでに、ピエゾ効果を利用して楕円ゲート電極(図2(a))から表面弾性波を発生させ、DQD中の電子のフォノン吸収、放出を観測することに成功しています(図2(b))。このように、表面弾性波に着目すると固体中の電子-格子相互作用を人為的に制御することができます。今後はフォノン放出に起因する電荷量子ビットのデコヒーレンスの抑制を目指すとともに、より積極的に電子-格子相互作用を制御して、共振器量子音響力学と呼ぶべき新しい研究分野の開拓に挑戦したいと考えています。

また我々は、DQDを流れる電子を1つずつカウントすることにより、電子の完全計数統計を実現しました。この手法は電流を担う個々の電子のダイナミクスの実時間観測を可能にするもので、究極の電流測定の一つであるといえます。現在はこの技術をさらに発展させ、スピン流を担う単スピンの実時間観測の実現を目指して研究を行っています。このスピン流計測技術は、半導体デバイス中のスピン分極率測定や高効率スピンフィルターの実現に貢献するものであると考えています。

他にも、量子ホール端状態を伝搬する電子波束のダイナミクスの研究など、固体素子における量子輸送現象の研究を幅広く行っており、新しい量子状態制御技術の創出に向けて精力的に研究に取り組んでいます。

[東京工業大学 橋坂 昌幸]

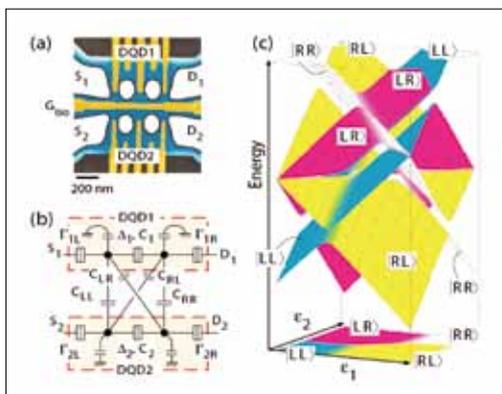


図1 (a) 電荷量子ビットによって実現された二量子ビット系
(b) 二量子ビットを構成する4つの量子ドット間の静電結合
(c) 二量子ビットの量子状態を表すエネルギーダイアグラム

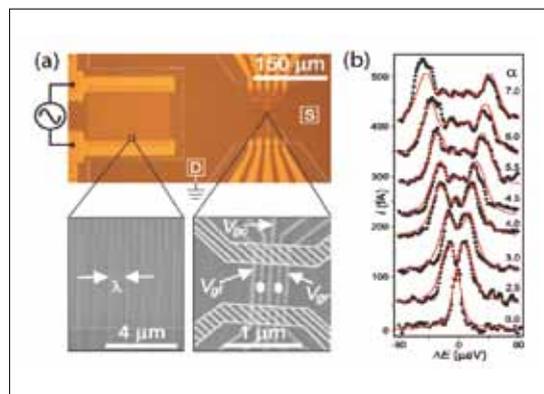


図2 (a) 表面弾性波発生器(左下)、二重量子ドット(右下)の電子顕微鏡写真、及び試料全体の光学顕微鏡写真(上)
(b) 表面弾性波の吸収・放出にともなう二重量子ドットの共鳴ピークの分裂

エッセイ

Essay

昨年3月頃のNature誌に“Esaki diode is still a radio star, half a century on” (L. Esaki, Y. Arakawa and M. Kitamura, Nature 464, 31(2010))と題する記事が掲載された。ノーベル物理学賞を受賞した江崎博士が発明した「エサキダイオード」の性能が、50年前と比べて僅か3.3%しか低下していないことを、江崎先生自身が確認されたという内容である。江崎先生がご講演でも紹介され、また新聞にも掲載されていたので、ご存知の方も多いと思う。エサキダイオードはトンネル現象を利用した典型的な量子効果素子であり、従って、構造の経年変化に敏感なのではという懸念があったが、余計なお世話だったようである。「あと50年後にまた誰かに測っていただきたい。」とも、江崎先生は話されていた。

寿命はデバイス性能の重要な要素であり、化合物半導体の高移動度変調構造トランジスタ (HEMT) やヘテロバイポーラトランジスタ (HBT) では数十年、最近のGaN系HEMTでは100年以上と言われている。これらのデバイスの劣化要因としては、不純物分布の変化、ヘテロ界面での原子拡散の進行、光や放射線による結晶欠陥の発生、結晶表面の酸化などが考えられるが、通常環境なら深刻な問題ではないようだ。半導体ナノデバイスでも同じだろうか。ナノデバイスがもつ微細な電極、形状、構造などと特性劣化の関係が具体的に調べられた例はほとんどないが、最近の量子ドットレーザーの報告によれば、寿命は20年以上という心強い話もある。

ところで、私は15年以上前に作った量子ドット(人工原子・分子)は、5、6年は繰り返し測定できていた

記憶がある。私たちが作る試料の多くは0.数ミクロンの加工や数10nmの金属ゲート電極でできている。このため、測定の度に繰り返される熱サイクル、表面酸化などの影響が避けられないが、通常はどうも静電気による電極の損傷のほうが問題のようだ。静電気の影響は絶縁性の高いSi系デバイスではよく知られている。III-V族系半導体は、Siに比べると純度が低く暗電流が大きいので、その分静電気を逃がし易いはずであるが、それでも電極間隔が数10nmの試料はその限りではないようだ。実際動作不良のデバイスを電子顕微鏡で見ると放電によって電極金属が変形しているように見える。このため、最近は人体を含めた接地に加えて、湿度などのデバイス環境にも注意を払うようにしている。

さて、私たちはFIRSTにおいて半導体量子ドット中のスピンを使った量子計算の研究をしている。もちろん、作ったデバイスは一時的にしか測定しないので、寿命は差し迫った課題にはなっていない。実際研究現場では、良好な試料を低温で正常に測定し続けている限り、半年以上経過しても特性が変化することはない。落雷による突然の停電を何度か被ったこともあり、その度に、急激なゲート電圧変化による試料の損傷を心配したが、多少条件が変化したもの的大抵は無事復帰した。しかし、将来、集積化そして実用化へと向かうことを考えると、いずれはデバイスの長期安定性を問題にするとときが来ると思う。

「そんなデバイスで大丈夫か?」と言われたとき「大丈夫だ、問題ない。」と江崎先生のような確信をもって答えたいものだ。

ナノデバイスは大丈夫か?

樽茶清悟

No.3 March 2011

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 情報・システム研究機構 国立情報学研究所 総務部 研究促進課 最先端研究開発支援室 <http://www.first-quantum.net/>

大学共同利用機関法 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

〒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

本紙についてのお問い合わせ：

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

量子情報国際研究センター TEL：03-4212-2506 FAX：03-4212-2641

R100
国立情報学研究所 100周年記念ロゴ