ISSN 2185-9671

FIRST/NII-GRC on Quantum Information Processing Newsletter

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

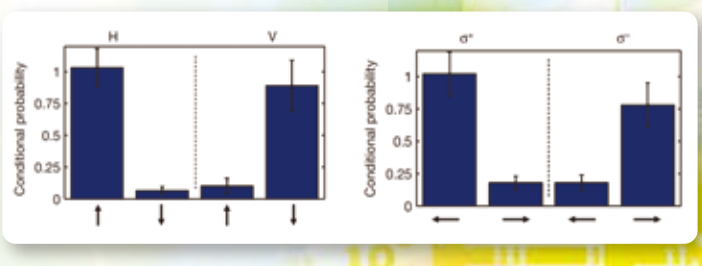
2013 March No.11

量子ニュース

CONTENTS

量子科学最前線
電子2個で計算する基本回路を作る

最近の研究成果
単一量子ドットスピンと通信波長帯単一光子のエンタングル状態の生成



海外研究動向
誤り耐性量子コンピュータ

2012年度ノーベル物理学賞

FIRST量子情報処理プロジェクト全体会議2012

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）国際超電導産業技術研究センター）

スピン量子コンピューター
○樽茶　清悟（東京大学）　北川　勝浩（大阪大学）　工位　武治（大阪市立大学）　伊藤　公平（慶應義塾大学）　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）　榊　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）
大島　ルミ（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

INFORMATION

■第11回日米セミナーのお知らせ

- The 11th US-Japan Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy.
- 日程：2013年4月4日（木）～12日（金）　• 会議場：奈良県新公会堂（奈良県）
- テーマ：Bose-Einstein condensates ／ Fermi gases ／ Cold molecules ／ Precision measurements ／ Quantum optics ／ Quantum information and quantum computation
- FIRST URL：http://first-quantum.net/symposium/2013/seminar.html
- オーガナイザー：Prof. Vladan VULETIC（MIT），Prof. Yoshiro TAKAHASHI（Kyoto Univ）　• 会議プログラム：TBA

【本会議スケジュール】
- スクール：4/4（木）～ 4/8（月）　• セミナー：4/9（火）～ 4/12（金）

【レセプション、昼食会、バンケット】
- 4/8（月）夜 レセプションと講演会（ホテルフジタ奈良または日航奈良ホテルを予定）　• 4/10（水）昼食会（招待講演者対象、奈良ホテル三笠）　• 4/11（木）夜 バンケット（奈良県新公会堂クインーンアリス）

AWARD

- 2012年12月：2012 Fellow of American Physical Society「For contributions to laser spectroscopy and photon science including nonlinear spectroscopy of semiconductors, high density phenomena, cold atoms and micro cavity structures」五神 真教授（東京大学）
- 2012年12月：2013 Fellow of The Optical Society of America「For contributions to laser spectroscopy and photon science including nonlinear spectroscopy of semiconductors, high density phenomena, cold atoms and micro cavity structures」五神 真教授（東京大学）

誤り耐性量子コンピュータ

大阪大学　特任研究員（4月から京都大学 白眉センター 特定助教）
藤井　啓祐

J. von Neumannは、世界初のプログラム内蔵型コンピュータEDVAC（1945年）の精度について"intelligent human intervention will in general be necessary"と述べている。当時、真空管の信頼性は低く、約8時間に一度は故障していた。その約10年後、彼は誤り耐性コンピュータの理論を構築している。

量子コンピュータにおける演算素子の不完全性の問題は、古典コンピュータが抱えていた問題よりも深刻かもしれない。このような問題は工学的な問題であるとして、エラーや雑音がない純粋基礎的研究に取り組むのも一つの手であろう。ただし、以下のような脚注をつけるべきだ。“This proposal, like all proposals for quantum computation, relies on speculative technology, does not in its current form take into account all possible sources of noise, unreliability and manufacturing error, and probably will not work”。これはIBMフェローであったR. Landauer による（建設的な）批判である。実際、無限精度の実数の加減乗除を行うアナログコンピュータがあれば、NP完全問題を解けることが70年代に示されているが、雑音の問題のため実現には至っていない。つまり、実在するデバイス・制御を用いてマシンを構成することができるかどうかは工学的問題より遥かに根深く、計算と物理にまたがる基礎的問題なのだ。

素因数分解アルゴリズムを発見したP. W. Shor は上記の脚注に感化され、1995年に自ら量子誤り訂正技術を開発した。それ以降の発展は目覚ましく、1996年頃には演算素子に要求されるエラー確率は10^{-6}程度であると見積もられたが、2005年にはE. Knillによって数％のエラーまで耐えうる手法が提案された。しかし、これらの手法は離れた量子ビット間の演算を多用しており、実装の観点からは非現実的であった。この状況を一変させたのが、2006年のR. Raussendorfらによる提案である。彼らの方法は、A. Kitaevによって提案された表面符号上の欠陥論理量子ビットをブレイドすることによって量子計算を行い、隣接2量子ビット演算のみを用いて1％近くまでエラーに耐えうる。この結果に基づいて、最近様々な物理系を想定した実装研究が行われている。

しかし、表面符号を用いた手法でも問題はある。例えば、1024bitの素因数分解を実行するためには、10^{11}個程度の$\pi/8$演算が必要となる。この計算において信頼に足る結果を得るためには一つの$\pi/8$演算あたり10^{10}程度のリソースが必要となる。この莫大なリソースは、マジック状態蒸留（magic state distillation=MSD）と呼ばれる$\pi/8$演算のための補助状態の準備に消費される。この問題を解決するためには、（1）効率のよいMSD法、（2）MSDに依存しない新奇な方法、（3）表面符号よりも良い性能（符号化率）を持つ符号の構築が不可欠である。

最後に、視点を変えて量子アルゴリズムついて考えてみる。素因数分解問題はBQP完全問題ではなく、必ずしも量子コンピュータの能力を反映しているとは限らない。最近、組み合せ最適化問題と密接な関係をもつJones・Tutte多項式［D. Aharonov *et al.*, quant-ph/07022008］、さらにはIsing模型分配関数を計算する量子アルゴリズム［G. De las Cuevas *et al.*, New J. Phys. 13, 093021（2011）］が提案された。素因数分解アルゴリズムとの違いは、物理の概念に基づいているため量子コンピュータとの相性も良く、またBQP完全である。このような量子コンピュータが得意とする量子アルゴリズムを探索することも、限られたリソースで誤り耐性量子コンピュータを実現させるために非常に重要である。

特集

2012年度ノーベル物理学賞

2012年のノーベル物理学賞は、パリ高等師範学校のサージ・アロッシュ教授と米国立標準技術研究所のデイビッド・ワインランド博士に授与されました。アロッシュ教授の研究・業績について山本喜久教授（国立情報学研究所／スタンフォード大学）、ワインランド博士については占部伸二教授（大阪大学）にそれぞれ解説して頂きました。

共振器量子電気力学実験

国立情報学研究所／スタンフォード大学
山本 喜久

映画のオールドファンにはなつかしい1944年のカサブランカ。サージ・アロッシュはその年その町で生まれた。夫人のクロディーンも同じ年、同じ町で生まれ、２人は同じ小学校へ通った。その後、北アフリカを離れパリへ渡ったアロッシュは1972年パリ高等師範学校のクロード・コーエン=タヌージ（1997年ノーベル物理学賞）の下で博士号を取得した。

博士号を取得した後、アロッシュはすぐに渡米してスタンフォード大学のアーサー・ショーロー（1981年ノーベル物理学賞）の下でポスドクとなった。ショーローは、レーザー光を用いて白い風船の中に閉じ込められた青い風船だけを、破裂させて見せた人物である。これは、レーザー光を用いると物質の中に隠されているある対象だけを選択的に励起できること（レーザー分光の原理）を象徴的に示す実験であった。アロッシュはショーローを物理学者としてよりも、研究室メンバーのことを常に思いやる人格者として尊敬していた。30歳になった時、アロッシュは、コーエン=タヌージの精緻な量子力学とショーローの明快な実験という２つの因子をDNAとして引き継いだ。

アロッシュの研究は一貫して共振器量子電気力学と呼ばれる分野で行なわれた。この研究分野の歴史は、アロッシュの生まれた1944年に遡る。この年、スタンフォード大学のフェリックス・ブロッホとハーバード大学のエドワード・パーセルが独立して核スピン共鳴を発見した（理論家である２人はこの画期的な実験によりノーベル物理学賞を同時受賞した）。

当時のNMR実験の大きな障害は、核スピンのエネルギー緩和時間T_1が長すぎることであった。NMRが発見された2年後、パーセルはT_1時間を短くする新しい手法について、半ページほどの短い、しかし重要な論文を発表した。「エネルギー緩和時間T_1は、双極子モーメントと遷移周波数だけで決まる原子に固有な定数ではなく、共振器ミラーを用いて短くできるものである」というのが論文の主旨であった。これは今日、パーセル効果と呼ばれている。その後ほどなくして、人々は共振器ミラーを用いれば原子の自然放出を可逆過程にすることすらできることを理解した。これが共振器量子電気力学の基本原理であり、アロッシュの実験の舞台となった。

さて、アロッシュの実験系はパーセルが思い描いたものとは大分様相を異にしている。たった一つのリドベルグ状態に励起された原子が、～50GHz帯のミリ波に対する超伝導キャビティーに打ち込まれる。アロッシュは、この単一原子と単一モード電磁波という極めて単純な系を用いて、量子論の中核的な概念の実験的検証に次々と成功していった。これらの実験を通して、我々の量子力学に対する理解は格段に深いものとなったが、これを可能にした精巧な実験系はアロッシュの研究室にだけ存在することは広く知られている。

彼のチームでは、物理的直感力に優れたアロッシュに加え、数学に強いジョン・ミッシェル・レイモンド、実験技術に長けたミッシェル・ブルーンという３人の教授があたかも１人の研究者であるかのように一心同体となって長年研究室の運営にあたってきた。グループには常にジョークと笑いが絶えなかった。

最後に、最も重要な研究成果が挙げられた10年間、グループの研究資金の一部はJSTにより支えられたことを付記する。彼の最近のメールにも、この点が言及されている。

1997年スタンフォード大学で開催された量子光学に関する国際シンポジウムにおける写真。左から、（筆者の学生であった）オーリー・オルター、ダン・ルーガー、サージ・アロッシュ、故ロルフ・ランダウアー。

Dear Yoshi,

Your message, sent on October 10th, has touched me very much., particularly coming from you who makes so remarquable contributions to our field of research. Our collaboration during the years of the JST program has been very fruitful and very stimulating for my group and for me. Our friendship has been one of the priviledges of our lives as scientists, which gives us the opportunity to meet so interesting peoples working in other parts of the world and sharing the same passion for curiosity driven science.

Serge

イオントラップ―個々のイオンの量子状態の操作―

大阪大学
占部 伸二

2012年のノーベル物理学賞は、“個々の量子系に対する計測と操作を可能にする画期的な実験的な手法”の業績に対して、フランスのサージ・アロッシュ教授とアメリカのデイビッド・ワインランド博士に送られた。ワインランド博士は、米国標準技術研究所（NIST）のイオントラップグループの卓越した研究リーダーである。アロッシュ教授が原子を使って光の量子状態を操作する実験手法を用いたのに対し、ワインランド博士は光を使ってイオントラップ中のイオンの量子状態を操作する手法を用いた。イオントラップは電磁場によるポテンシャルの中に、1個のイオンでも数日あるいはそれ以上といった長期間にわたって捕獲しておくことが可能であり、同じイオンを繰り返し使って量子状態を操作することや観測することも可能である。また、超高真空の中に電場が零の位置にイオンを静止させることができるため、周囲からの擾乱も非常に小さい。このため個々のイオンの量子状態を制御するには最適であり、光時計や量子情報処理の物理的実現のための代表的な実験系の一つとなっている。

ワインランド博士は、ラムゼイ共鳴やセシウム原子時計の研究で有名なハーバード大学のノーマン・ラムゼイ（1989年ノーベル物理学賞）のもとで博士号を取得した後、イオントラップの先駆的な研究で有名なワシントン大学のハンス・デーメルト（1989年ノーベル物理学賞）のもとでポスドクとなり、1975年にはデーメルトとともにイオンのレーザー冷却の提案を行った。その後、NBS（現NIST）に移り、ウェイン・イタノらとともに、イオンのレーザー冷却の実現、1個のイオンの量子跳躍の観測や光遷移スペクトルの観測、光遷移のサイドバンド使ったイオンの振動基底状態までの冷却などを実現し、1990年代までにデーメルトの提案した1個のイオンを使った光領域の原子時計の基礎技術を築いた。この技術は、イオンを使った量子情報処理の実験の基礎技術になっている。1995年にイオントラップを使った量子計算の理論的な提案がなされると、いち早く、クリス・モンロー（現メリーランド大学）らとともに、1個のイオンを用いて量子ゲートを実験的に実現し、引き続いてシュレーディンガー猫状態の発生とデコヒーレンスの実験的な解析、少数個イオンの量子もつれ状態の発生などの研究を行った。2000年代に入ると、インスブルック大学のライナー・ブラットらのグループと歩調を合わせるように研究を進め、少数個のイオンを使った量子ゲート、量子テレポーテーション、量子フーリエ変換、量子誤り訂正等の検証実験を次々に行い、2005年くらいまでに小規模ながらイオンを使って量子計算が原理的に可能なことを実証した。最近では、平面型トラップを提案し、微小なトラップを平面状に集積してイオンの移動により演算を行うといった量子計算の大規模化に向けた研究を進めている。また、量子情報処理技術のスペクトロスコピーへの応用にも先駆的な研究を行っている。光時計への応用として量子状態を異種イオン間で移動させて、高感度に遷移スペクトルを測定する量子論理分光法を提案し、Al^{+}イオンを使って現時点で最も正確な10^{-17}以下の確度を持つ単一イオン原子時計の開発にも成功している。

ワインランド博士は、卓越した研究者であるばかりでなく優れた研究リーダーであり、優れた先見性、指導力、統率力により、多くの共同研究者とともにこの40年間競争の激しいイオントラップの分野でずっとトップを走り続けてきた。

図　2010年4月に東京で開かれた量子情報国際シンポジウムにおけるワインランド博士。まわりは占部研究室の大学院生（当時）と田中歌子講師。

最近の研究成果 Research Achievement

① 量子メモリーがなくても量子通信できる方法を提案

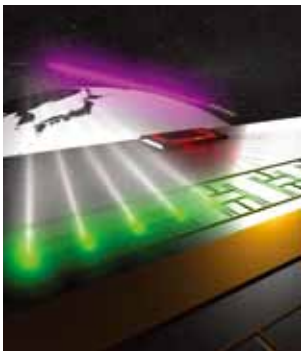
論文情報 W. J. Munro, A. M. Stephens, S. J. Devitt, K. A. Harrison and Kae Nemoto, "Quantum communication without the necessity of quantum memories", Nature Photonics 6, 777–781 (2012)
関連URL http://www.nature.com/nphoton/journal/v6/n11/full/nphoton.2012.243.html

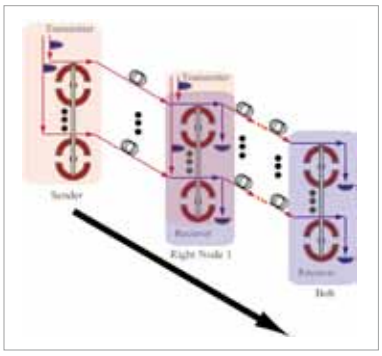
国立情報学研究所
根本　香絵

壊れやすい量子情報を遠くへ運ぶためには、光ファイバー等の経路上で、光の損失から情報を守るため、たくさんの中継器（ノード）を経由して行きます。量子通信ではエンタングルメントを中継器でつないで、距離を伸ばしていくわけですが、この間、量子状態を保持する必要があると考えられます。しかし、通信距離が伸びると、世の中でいちばん速い光でも、量子的な状態を保持できる「コヒーレント時間」を超えてしまうという問題がありました。今回の成果に先立つ2010年、私たちは量子メモリーが必要とするコヒーレント時間を、通信距離から光がノード間を往復する時間へと大幅に短縮し、通信距離が伸びても、必要となる量子メモリー時間は増えないことを示しました。

今回の新しい量子通信の方式の提案は、量子メモリーは本質的には必要でないということを具体的に示したものです。新しい方式では光損失に対する情報の保持を徹底的に行うような誤り訂正の方法を開発しています。各ノードで、中継器が信号を増幅する代わりに、誤り訂正をかけることで量子情報を精製し補修しながら通信していきます。量子メモリーに情報を保持する必要がないので、次々と情報を送ることができ、高い通信レートが期待できることも特徴の一つです。

ところで、「量子通信に量子メモリーは必要ない」ということは、「量子メモリー開発は要らない」ということでは決してありません。私たちが取り組む理論のアイデアは、新しい通信を構成する不可欠な要素とは何か、に新しい視点を持ちこむものだと言えるでしょう。今回の研究結果は、量子中継の本質を明らかにすることによって実現化の可能性を大きく広げるとともに、むしろ量子メモリーの本質的に有効な使い方を示唆するものと考えています。





右図は中継点をつなぎながら量子状態を通信するしくみを示したもの。
左図は量子通信によって量子情報網がグローバルに広がる様子を表しています。

② 超広帯域もつれ合い光源の構築に成功

論文情報 Akira Tanaka, Ryo Okamoto, Hwan Hong Lim, Shanthi Subashchandran, Masayuki Okano, Labao Zhang, Lin Kang, Jian Chen, Peiheng Wu, Toru Hirohata, Sunao Kurimura, and Shigeki Takeuchi, "Noncollinear parametric fluorescence by chirped quasi-phase matching for monocycle temporal entanglement", Optics Express 20, 25228 (2012)
関連URL http://www.opticsinfobase.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-20-23-25228

北海道大学
竹内　繁樹、岡本　亮

我々は、光を用いた量子計測の研究に取り組んでいます。量子力学的にもつれ合った光子を用いることで、通常の光を用いた計測の限界を超えることが可能です。たとえば、広い周波数にわたって相関をもつ光子対を用いると、現在、目の検査などで利用されている光コヒーレンストモグラフィー（OCT）の分解能を超えることが出来るとして期待されています。今回我々は、本FIRSTプロジェクトの浜松ホトニクスグループ、ならびに物質・材料研究機構、南京大学と共同で、世界最大の790nm-1610nmという超広帯域なもつれ光子対の実現と観測に成功しました。

実験では、物質・材料研究機構が開発した高精度10%チャープ擬似位相整合素子を用いて、非同軸条件でのパラメトリック蛍光対生成を実現しました。そのスペクトルを、浜松ホトニクスグループの開発した広帯域光電子増倍管で取得したものを図に示します。可視域から、赤外域にまで、広帯域に蛍光が発生している様子が分かります。光電子増倍管の感度が下がる1550nmより長い波長での発生状況については、中国南京大学と共同研究で開発した、超伝導ナノワイヤ光子検出システムで確認しました。この光源を用いた量子OCTでは、理論上0.5μmの分解能を達成可能です。また用いた広帯域の周波数相関をもつ光子対は、時間領域では、非常に短い時間相関を持ち得ます。計算では、2光子の時間相関幅として1.2サイクルに到達可能です。今後、光の1サイクル内で起きるような高速な量子光学的な現象の観測への応用も期待されます。

この成果は、Optics Express 20, 25228（2012）に掲載されました。

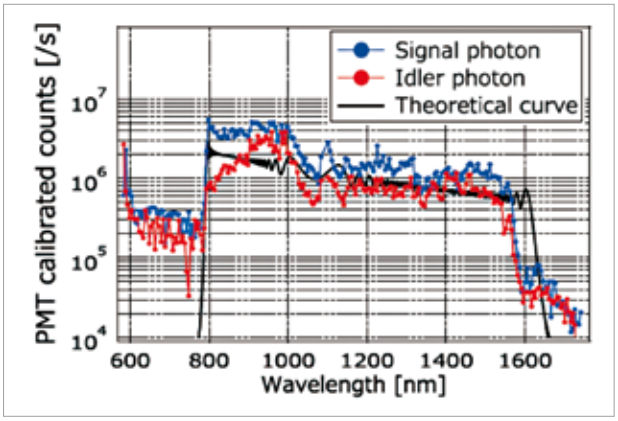


図　超広帯域光子対のスペクトル測定結果

3 単一量子ドットスピンと通信波長帯単一光子のエンタングル状態の生成

論文情報 Kristiaan De Greve, Leo Yu, Peter L. McMahon, Jason S. Pelc, Chandra M. Natarajan, Na Young Kim, Eisuke Abe, Sebastian Maier, Christian Schneider, Martin Kamp, Sven Höfling, Robert H. Hadfield, Alfred Forchel, M. M. Fejer & Yoshihisa Yamamoto, "Quantum-dot spin–photon entanglement via frequency downconversion to telecom wavelength", *Nature* 491, 421–425 (15 November 2012)

関連URL http://www.nature.com/nature/journal/v491/n7424/full/nature11577.html

国立情報学研究所／スタンフォード大学
山本　喜久

量子情報処理ネットワーク実現の鍵を握る技術は、遠隔量子メモリー間にエンタングルメントを配信し、これを純粋化して保存することである。この基本技術無くして量子テレポーテーションも量子中継も実現できない。エンタングルメント配信技術が満たすべき性能は、

1. 量子メモリーとなるノードは小、中規模の量子コンピューターであるから、誤り耐性機能を持たせるため10^2〜10^5程度の量子ビットを集積化できる物理系で構成されなければならない。
2. ノード間をつなぐのは光ファイバー伝送路であるから、量子メモリー内のスピン量子ビットと通信波長帯（1.5μm）の光子量子ビット間にエンタングルメントが形成できなければいけない。
3. 光ファイバー伝送路は長距離干渉計として動作するため、その位相安定化が自動的に達成されているプロトコルを採用しなければいけない。

の3つに要約される。我々は、条件1を満たすために2次元プレーナ共振器中に埋め込まれたInAs量子ドットスピンを用い、条件2を満たすためPPLN導波路ダウンコンバーターによる0.9μmから1.5μmへ単一光子波長変換を用い、条件3を満たすため自然放出で生成された2光子を同時検出するスキームを開発している。今回の実験では、単一InAs量子ドット中の電子スピンと波長1.5μmの単一光子の間のエンタングル状態の生成に成功した（図1）。尚、エンタングルメント・フィデリティーは固体量子ビット系では最高の90%以上を達成している。

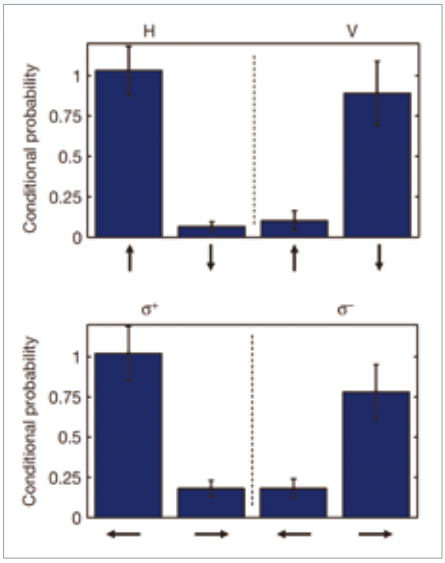


図　1.5μm単一光子の偏光状態（H, V）又は（σ^+, σ^-）が量子ドットスピンの状態（↑, ↓）又は（←, →）と強い相関を持つことを示す結果。

4 Lattice surgery—量子計算に必要なリソースを減らす理論研究

論文情報 Clare Horsman, Austin G. Fowler, Simon Devitt and Rodney Van Meter, "Surface code quantum computing by lattice surgery," New J. Phys. 14, 123011, Dec. 2012

関連URL http://iopscience.iop.org/1367-2630/14/12/123011/

慶應義塾大学
Rodney Van Meter

我々は量子計算機への採用が目されている表面符号（surface code quantum computation）を拡張し、必要な計算リソースを減らすことに成功した。表面符号のリソースである格子（lattice）から取り、lattice surgeryと呼んでいる。表面符号には1量子ビットを符号するplanar-based codeと、多量子ビットを符号するdefect-based codeがある。これまでのplanar-based codeにはdefect-based codeより少ないリソースで1量子ビットを符号できる長所があったが、多量子ビット計算を行えない欠点があった。本研究では、planar-based codeを用いて多量子ビット計算を行う手法を開発した。図はplanar-based codeで多量子ビット計算（CNOTゲート）を行う様子である。図中の球は全て電子やイオンなどの物理的な量子であり、格子の各辺に存在する計算リソースである。これらの物理的な量子をそのまま量子ビットに利用するとエラー確率が高くなりすぎるため、複数の量子を利用して1量子ビットを符号する。エメラルドグリーンの量子は9個1セットで1量子ビットを符号しており、図中には3つの量子ビットがある。ピンクの量子は量子ビットに挟まれる位置にあり、多量子ビット計算に利用する。各量子ビットでエラー訂正を行う際にピンクの量子を巻き込んで量子ビットを合成したり、ピンクの量子を測定して量子ビットを分離することが多量子ビット計算になることを発見した点が本研究の本質である。これにより、距離3の表面符号のCNOTゲートが53量子で達成できるようになり、必要な計算リソースが1/3となった。

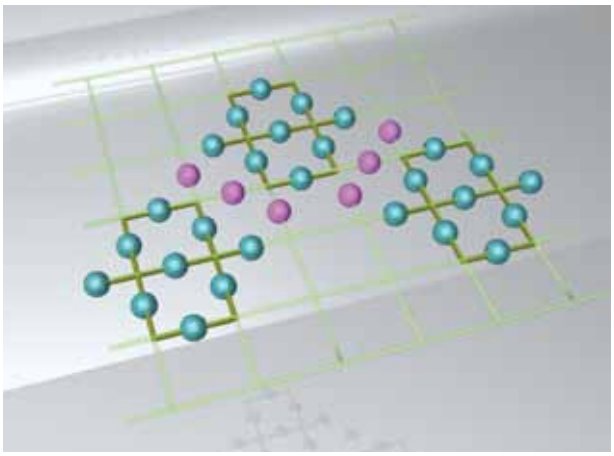


図　lattice surgeryの制御NOT

量子科学
最前線

電子2個で計算する基本回路を作る

量子コンピューターの制御NOTを固体中の電子スピンで実行

樽茶清悟

（たるちゃ・せいご）東京大学大学院工学系研究科教授
1953年愛媛県生まれ。78年東京大学大学院修士課程修了，日本電信電話公社（現NTT）入社。86年博士号（工学）取得。1998年東京大学大学院理学系研究科教授，2005年より現職。2012年から理化学研究所創発量子機能研究チームチームリーダーを兼任。

「固体の中の電子を，光子みたいに使いたいんです」。東京大学の樽茶清悟教授はそう話す。個々の電子の量子状態を制御し，その状態を保ったまま遠くに飛ばす。それを固体中の電子で実現したいという。

簡単なことではない。光子は周囲の分子に量子状態が乱されることはなく，そのまま宇宙の彼方にも飛んでいく。だが固体中の電子は，量子状態に影響を与える原子や電子が周囲にひしめいている。光子と同じには扱えない。

飛行する電子量子ビット　固体の中で電子が光子のように飛び，量子情報を運ぶ（イメージ図）。

だがほかならぬ樽茶教授がこう言うと，できそうな気がする。1996年に「人工原子」を作り，世界の注目を集めた。半導体の中に作った薄い円形の箱に電子を入れたもので，原子の中の電子が満たす「パウリの排他律」や「フントの規則」が，人工的に作った“原子”の中でも成り立つことを実証した。

時間との勝負

10余年後の今，樽茶教授は同じ半導体の技術を使って，量子コンピューターの基本となる演算回路「制御NOT」の構築を目指している。計算データを記録するのは，電子の自転に当たるスピンだ。自転が時計回りか反時計回りかによって「0」と「1」とを記録する。今のコンピューターの古典ビットは「0」と「1」のどちらかしか記録できないが，電子は測定するまで「0」かつ「1」であるという重ね合わせになり，両方の値を同時に記録できる。これを量子ビットと呼ぶ。

制御NOTは，0と1の重ね合わせになった電子を別の電子と相互作用させ，重ね合わせを全体に広げる演算回路だ。2つの電子のスピンが「0，1」かつ「1，0」という状態になる。これを「量子もつれ状態」といい，量子コンピューターならではの計算を実現するカギとなる。

固体中の電子は，そのままでは1

個ずつ操作できない。半導体の中に量子ドットと呼ばれる微小な箱を作り，この中に電子を入れ，電場をかけてスピンを変化させる。具体的には①2つの箱にそれぞれ電子を入れてスピンを初期化する②一方を0と1の重ね合わせにする③一方に電場をかけてもう一方と相互作用させ，量子もつれを作る④その結果を読み出す――という手順になる。だが，量子状態の操作にはエラーが起きやすい。周囲から計算を監視し，間違いを直ちに訂正するための回路が必要になる。

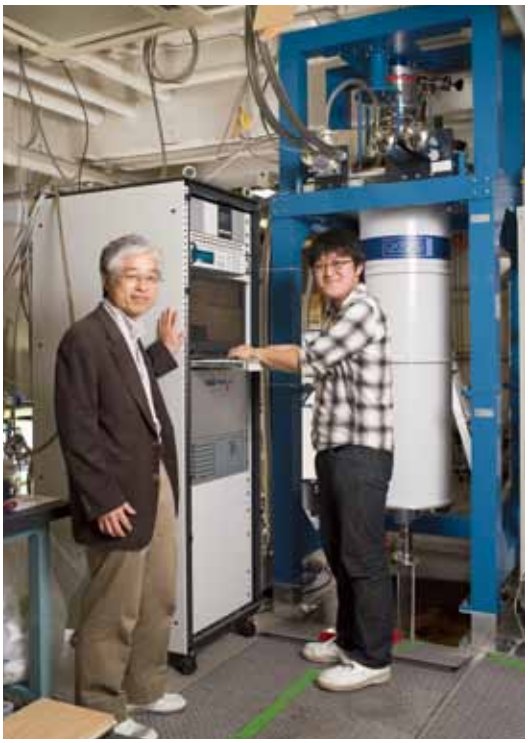
量子コンピューターの最大の強みは膨大な計算を一度に実行でき，計算が驚異的に速くなる点にある。だがその強みは，1000個程度の量子ビットを使う計算で初めて発揮される。それ以下でできる計算は今のコンピューターを使ってもそこそこ速くできるからだ。

エラー訂正の仕組みが必要なため，1000量子ビットの計算をするためには，実際には1億個の量子素子を集積する必要がある。また個々の制御NOTは，99.9％の確率で正しい結果を出さなくてはいけない。しかも電子の量子状態は時間がたつと壊れてしまうので，いかに短時間で演算するかが決め手になる。

①～④の各ステップを実行する個々の技術は，着実に蓄積されている。初期化や読み出しに用いる1量子ビットの演算は，2～5ナノ秒でできることを確認した。これまでより10倍以上速く，世界最速だ。

2つの電子を量子もつれにすることにも成功した。以前は量子ビット同士を金属の配線でつないで相互作用させていたが，一様でない磁場の中に2つの電子を置き，その一方を動かすことで，2個を量子もつれにできることを見いだした。一方にかける磁場を変化させるのと同等の効果が生じるためで，実験で量子もつれの度合いが時間的に変化することを確かめた。

これらの技術を組み合わせることで，30ナノ秒程度で制御NOTの演算を実行できる見通しが立った。「技術的な工夫を重ねることで，13～15ナノ秒まで短縮できると思う」と言う。電子の量子状態が壊れるまでの時間は技術の工夫で約10マイクロ秒に伸ばせるとみられ，意味のある計算を実行できるメドがついた。



膨大な数の量子ビットをつないで回路を作るには，個々の量子ビットをどう配線し，どうやって駆動するかも重要になる。計画では2次元的に量子ビットを配置し，強磁性体を使って配線，そこに金属電極の層を重ねて演算する。

最近，仏ネール研究所と共同で，電子1個を量子的な情報を保ったまま固体中で伝送する新たな実験を始めた。半導体表面に細い金属電極を付けて表面弾性波を発生させ，これに乗せる形で目的の電子1個を運ぶ。1ナノ秒で約3μmの距離を移動できることを確認。数100μmまで延ばすことが可能とみられる。

固体中でテレポーテーション

この技術で量子もつれになった電子を互いに引き離すことが可能になり，遠隔地での相関という，量子力学に特徴的な現象が利用できるようになった。光子でしか実験できなかった量子テレポーテーションや，測定を繰り返すことによって演算する新しいタイプの量子コンピューターを，固体中で実現する道が開けたと言える。量子コンピューターのプロセッサーを今のマルチコアプロセッサーのようにいくつかに分け，量子情報を電子でやりとりすることにもつながりそうだ。

量子コンピューター研究は，基本のアーキテクチャーと素子などに求められる性能がほぼ固まり，工学者と連携して具体的な技術を開発していく段階に入っている。だが，樽茶教授の発想はその先を行く。「だって，実験はfunny（ヘンテコ）なアイデアでやらないと面白くないじゃないですか?」

現在研究が進んでいるアーキテクチャーが，唯一の正解というわけではない。今後も新しいアイデアは出てくるだろう。電子の量子状態を1個ずつ制御し，観測する樽茶教授の実験は，どんなアイデアが出てきても，その基盤技術となるに違いない。

この記事は『日経サイエンス』2013年4月号に掲載されたものです。

FIRST 量子情報処理プロジェクト 全体会議2012

日程：平成24年12月12日（水）～15日（土）
会場：東京大学 小柴ホール
主催：国立情報学研究所 FIRST「量子情報処理プロジェクト」
共催：理化学研究所　　参加人数：217名

2012年全体会議に寄せて
―新しい量子情報処理の潮流を創出しよう―

国立情報学研究所／スタンフォード大学
中心研究者　山本 喜久

最先端研究開発支援プログラム（FIRST）も残り1年半となり、プロジェクト終了時の着陸点を見据え、次の5年、10年の研究開発の方向性を提案するフェーズに来ました。1994年にショアの量子アルゴリズムが発見されると、量子光学、トラップ・イオン、冷却原子、超伝導回路、半導体量子ドットなど独立して発展してきた研究領域が量子情報処理という新しい分野に合流し、大きな学際領域として発展してきました。

特に、このFIRST量子情報処理プロジェクトの期間内に明らかになったことは、量子計測や量子標準とは異なり、大規模なシステムとならざるをえない、量子コンピューターや量子中継の実現には、新たな量子誤り訂正コードの発見もしくは今までの概念を全く変える新しい量子情報処理方式の着想が必要だということです。“ポスト量子コンピューター”を合言葉に新たな挑戦を開始しなければなりません。

この分野における日本の強みは何でしょう。第1には優秀な若手の団結力が挙げられます。大学や研究グループの壁を越えて、協力し合う風土ができあがっており、それを応援するベテランがいることが挙げられます。第2には、我々にとっては捨てるべき古い概念が自分達のものでなく、ほんのわずかな勇気で新しいものへ挑戦できる立場にいることが挙げられます。

本命が見えない“夜明け前”の分野に身をおく研究者ほど幸福な研究者はいません。心を研ぎ澄まし、アンテナを世界に張って、新しい量子情報処理の潮流を創出しましょう。

FIRST　量子情報処理プロジェクト　全体会議 2012
FIRST-Quantum Information Processing Project Annual Meeting 2012

Date	Time		Presentator
DAY1 12/12 WED	9:30―10:00	Welcome Speech	相澤総合科学技術会議議員ご挨拶
	10:00―12:00	量子情報システム	山本（NII/スタンフォード大学）、河原林（NII）、宇都宮（NII）、阿部（NII）
	13:30―15:00	量子シミュレーション	高橋（京大）、占部（阪大）、五神（東大）
	15:30―17:00	量子標準	香取（東大）、洪（産総研）、小山（NICT）
	17:15―19:00	ポスターセッション	◆量子情報システム◆量子計測◆量子標準
DAY2 12/13 THU	9:00―12:30	量子計測	山西（浜ホト）、藤澤（東工大）、太田（NTT）、竹内（北大）、平野（学習院）、向井（NTT）
	14:00―17:00	スピン量子コンピューター	樽茶（東大）、伊藤（慶應）、北川（阪大）、工位（大市大）、森田（阪大）
	17:15―19:00	ポスターセッション	◆スピン量子コンピューター◆量子シミュレーション
DAY3 12/14 FRI	9:00―11:00	量子通信	井元（阪大）、佐々木（NICT）、古澤（東大）、小坂（東北大）
	11:20―12:00	プロジェクト全体報告	山本（NII/スタンフォード大学）、仙場（NII）
	12:00―12:30	知財セミナー「サイエンスしながら特許は書ける」	前田裕司先生（大阪大学　審良プロジェクト　知財戦略コーディネーター）
	14:00―17:00	超伝導量子コンピューター	蔡（理研）、中村（東大）、佐藤（ISTEC）、高柳（理科大）、齊藤（NTT）
	17:15―19:00	ポスターセッション	◆理論◆量子通信◆超伝導量子コンピューター
DAY4 12/15 SAT	9:00―12:30	理論	都倉（筑波）、小川（阪大）、Nori（理研）、Van Meter（慶應）、根本（NII）、小芦（東大）
	14:00―15:45	量子サイバネティクス	
	15:45―16:00	閉会の言葉	

量子情報システム

サブテーマリーダー
国立情報学研究所 / スタンフォード大学　山本 喜久

FIRST 量子情報処理プロジェクト 全体会議 2012

量子情報システムサブテーマでは、光パルス制御量子ドットスピンを用いた量子コンピューター／量子中継、励起子ポラリトン凝縮体を用いた量子シミュレーター、注入同期レーザーネットワークを用いたコヒーレント・コンピューターの３つのテーマで研究を展開している。今回の全体会議では、スピン-光子エンタングル状態の生成実験とコヒーレント・コンピューターによるNP困難・完全MAX-CUT問題のアナログ計算について報告した。

将来の量子情報処理ネットワーク構築のためには、大規模なシステムへスケール出来る量子コンピューターと光ファイバー伝送路をエンタングルメントでつなぐ技術が不可欠である。今回は、この要素技術として単一量子ドットスピンと通信波長帯の単一光子のエンタングル状態の生成に成功した結果を報告した。

現在、計算機科学が抱えている問題の一つに、大規模なNP困難・NP完全問題を（近似的にでも）解くマシーンが存在しないということが挙げられる。例えばソーシャルネットワークの解析には10^9という巨大なノード数を持つ組み合わせ最適化問題を解く必要がある。このような要求を実現する可能性の一つとして、開放散逸系であるレーザーネットワーク（図１）における量子相転移を用いて３次元イジング問題を解く新しい計算手法の数値シミュレーションによる評価と２サイトのレーザーネットワークの実装実験について報告した。

その他、励起子ポラリトンにおけるBEC-BCSクロスオーバー、様々な２次元格子構造における長距離秩序相の発現などについてポスター発表を行った。

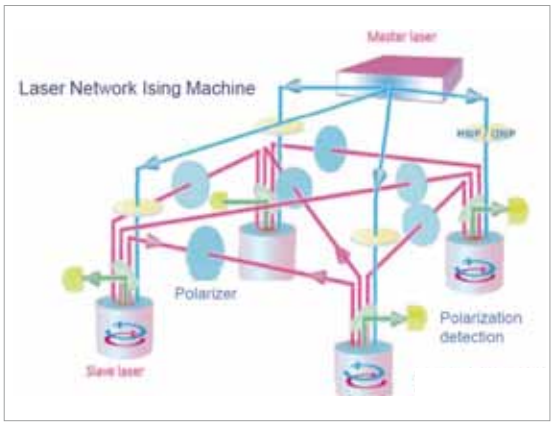


図1　レーザーネットワークへのM=4MAX-CUT問題の実装例

量子シミュレーション

サブテーマリーダー
京都大学　高橋 義朗

FIRST 量子情報処理プロジェクト 全体会議 2012

当サブテーマでは、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。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。

高橋グループ（京都大学）では光格子中の冷却原子を用いたハバードモデルの量子シミュレーションについて以下の報告を行った。まず、Yb原子を用いたユニークなモット絶縁体の生成について報告を行い、さらに、基底状態と準安定状態との間の磁場フェッシュバッハ共鳴を新たに観測したことを報告し（図：散乱長の磁場による共鳴的変化）、これが異方的な原子間相互作用によって生じる効果であることを突き止めた。この応用として、一次元トポロジカル超流動体のマヨラナエッジ状態の観測を提案し、それに向けた第一歩として、基底状態と準安定状態との間に有効スピン軌道相互作用を誘起することに成功したことを報告した。

占部グループ（大阪大学）では、イオン結晶のメルティングの問題を、再結晶化法などの導入により解決し、多数個のイオンの量子もつれ状態の発生が可能になった。これにより、振動状態を介した多準位誘導ラマン断熱通過を用いて４個のイオンの対称Dicke状態の発生に成功した。また、イジングモデルのシミュレーションに向けての実験準備状況、２列配列型イオントラップの実験結果、２個のイオンを用いたJaynes-Commings-Hubbardモデルの予備的な実験結果についての報告を行った。

最後に、五神グループ（東京大学）では、半導体励起子BECの観測実験における進捗として、希薄かつ凝縮体の占める割合が高い状態の生成のために進めている、希釈冷凍機を用いた実験を紹介した。歪誘起トラップ中に捕獲されたダーク励起子は予想を超えて100mKを下回る低温まで冷却されており、その冷却機構について議論を行った。また、三回回転対称性を有する非線形結晶を活用して実現できるテラヘルツパルス波の時空間制御法として、ねじれ偏光近赤外パルス励起による偏光や帯域の制御、ベクトルビームの生成法について紹介した。

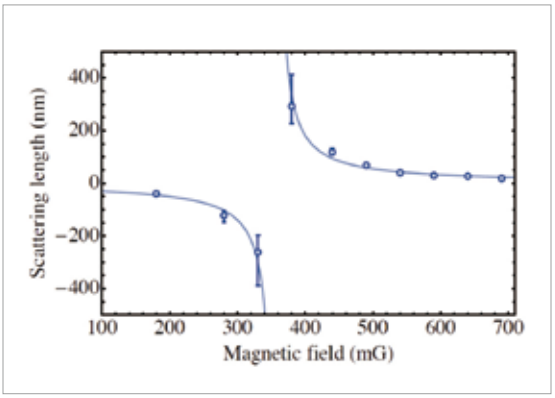


図1　散乱長の磁場による共鳴的変化

超伝導量子コンピューター

サブテーマリーダー
理化学研究所　蔡　兆申

FIRST 量子情報処理プロジェクト 全体会議 2012

●本サブテーマの主要な目標である超伝導量子コンピュータへの可能なシナリオとその課題を整理し提示した。表面コード量子誤謬訂正を行うフルスケールの量子コンピュータを考慮し、集積化とゲート精度を重要な課題として取り上げ、その解決策を示した。小型でスケーラブルな回路結合方式を示した。またゲート制御精度も、1ビット、2ビット操作ともに99.9%程度確保できる見通しを示した。（理化学研究所　蔡 兆申）

●量子ビットの単一事象非破壊読み出しは量子計算機の実現に向けた研究において重要な要素技術となる。ジョセフソンパラメトリック増幅器の適用によりそれを実現し、量子跳躍の観測に成功した。読み出し精度は、緩和なしでは99.9%程度と見積もられる。

（東京大学　中村 泰信）

●フルスケールの量子コンピュータの大規模集積に対応した量子ビットの集積化プロセス開発をISTECとAISTで開発中である。二段階平坦化プロセスの導入、アルミニウムの微細加工条件改善などにより、量子ビットに適用できる極微小積層型ジョセフソン接合作製の見通しを得たことなどを報告した。

（国際超電導産業技術研究センター 佐藤 哲朗）

●分散型量子コンピュータや量子中継に対応した光／超伝導量子ビット変換を目指した研究では、自己成長InAs極小リングの輸送特性を報告した。このリングは超伝導特性を示し、外部磁場に対して高磁場ではh/2eに相当する振動、低磁場では位相の揺らぎに起因する揺らぎを示した。また量子位相すべりを強く示唆する現象も報告した。

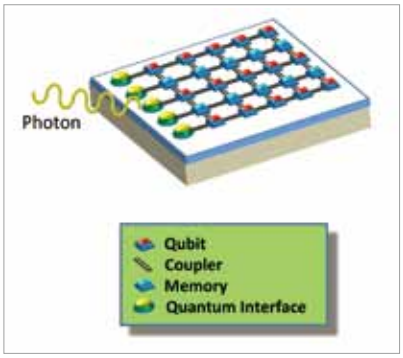


図　超伝導量子チップ模式図

（東京理科大学　高柳 英明）

●超伝導・ダイヤモンド複合系における量子メモリ動作について発表した。超伝導磁束量子ビットに準備した任意の量子状態を、ダイヤモンド中のNVスピン集団に書き込み、保存し、そして読み出すことに成功し、量子ビットとスピン集団間のもつれ状態の保持も確認した。

（NTT物性科学基礎研究所　齊藤 志郎）

スピン量子コンピューター

サブテーマリーダー
東京大学　樽茶　清悟

FIRST 量子情報処理プロジェクト 全体会議 2012

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、伊藤公平（慶應義塾大学 教授）、北川勝浩（大阪大学 教授）、工位武治（大阪市立大学 教授）、森田靖（大阪大学 准教授）をメンバーとして、「拡張性のあるスピン量子コンピュータ、スピン―光子・超伝導量子ビット量子インターフェース」の研究を行なっている。

樽茶チームは最速の単一電子スピンX、Z回転ゲートの実現、3量子ビット用の新型3重ドットの開発（図1）、表面コード化のための浮遊ゲートの開発を報告した。この他、固体系で初の非局所量子もつれの観測、Si系量子ドットの安定化、単一光子-スピン量子転写の最終段階としてg因子制御量子ドットの実現と光子検出を報告した。

伊藤チームはシリコン半導体中の29Si安定同位体核スピンを量子ビットとして用いた量子情報処理の実現、シリコン中のビスマスドナー不純物電子スピンを量子ビットとした量子情報処理とそれらの超伝導量子ビットとの結合にむけた方向性について報告した。

北川チームは個別アドレスと射影測定を用いずに量子誤り耐性を持たせる方法について、井元チーム藤井氏との共同研究による進展を報告した。また、動的デカップリング波形の数値的生成法を提案した。さらに、森田チームで合成した分子を用いた動的核偏極とスピン増幅のブレークスルーを報告した。

工位チームは、1分子中の識別可能な2電子スピン量子ビット間に弱交換相互作用を導入し、かつビット間には量子演算用の磁気双極子相互作用を持たせた、分子スピンアンサンブル系について、2量子ビット演算である「制御NOT」ゲートを実現し、最小の分子スピン量子コンピュータを稼働させた。

森田チームは、精密有機合成化学と物性有機化学を基盤として、Lloyd's電子スピン量子ビットの実現に向けた三核三重らせん金属錯体の合成と磁気的希釈単結晶化、およびtriplet-DNPやスピン増幅に向けた、位置選択的同位体標識化誘導体であるp-ターフェニル体を設計・合成した。

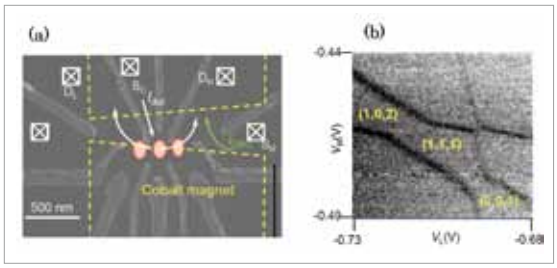


図1　(a)3スピン量子ビット化に適した3重量子ドット（各ドットにトンネル接合を介したオーミック電極、上部に微小磁石が付いている）と(b)測定した電子状態図。(1,1,1)状態で作られるスピン閉塞を利用して3ビットを作る。

量子通信

サブテーマリーダー
大阪大学　井元 信之

FIRST 量子情報処理プロジェクト 全体会議 2012

最初にサブグループの活動状況について簡潔な紹介がリーダーからあり、特に共著論文に至った共同研究やその前の段階にある共同研究が進展していることが紹介され、またグループ内のみならずグループ間の共同研究についても言及があった。各グループの報告は以下の通りである。

阪大グループでは①波長変換量子インターフェース、②DFS利用雑音除去の効率の最適化、③4量子ビット局所系を用いた分散型量子計算、④マルチパーティもつれ状態の融合ゲートの成果項目のうちポスター発表の③および以前紹介の④を除き、①と②について発表した。①は量子メモリ波長である可視に近い近赤光子を通信波長帯光子に変換し、アンチバンチング性の保存実験および量子もつれの保存実験が紹介された。②については、位相雑音を除去する従来法では光通信路の透過率Tの冪乗の効率になるところを、Tそのものとする実験が紹介された。

NICTグループは量子通信の要素技術である超伝導転移端センサ（TES）を用いた光子数識別システムの開発状況と、今後の量子暗号についての提案が報告された。光子数識別検出器は数光子までヒストグラムが0まで落ちる（すなわち光子数のクロストークのない）検出器の開発に成功した。これは非古典光子統計の直接測定に資するものである。一方、量子暗号については、普及版から究極システムまで段階的普及のためには、unconditionalな安全性に固執しない現実的条件下での安全性証明も並行して研究して行く必要があるのではないかという提案があった。

東大グループは世界最先端を行く連続量量子情報処理を用い、新たに単一光子とのハイブリッド量子情報処理の実験を行った。連続量を用いるとエンタングリングが容易な操作となり、ユニバーサルゲートも構成できるため、事後選択のないテレポーテーションベース量子情報処理が期待される。一方、操作のフィデリティを1にするには原理的に無限のエネルギーが要る。その克服のため、情報のエンコードは光子の量子ビットで行い、テレポーテーションベースの連続量量子情報処理を行うアイデアを示し、実験的にも実証した。

東北大グループでは、量子中継システムの実現に向け、光子から量子メモリへの量子メディア変換の研究を行っている。その際用いる量子メモリの候補の中でも最もメモリ時間が長いことが期待されるダイヤモンドのNV中心を用いた実験進捗について報告があった。これは光子からスピンメモリへの情報転写を量子テレポーテーションの原理を用いて行うもので、NV中心に付随する電子スピンと核スピンをエンタングルさせ、入力状態として与えられた光子の偏光状態と電子スピンをベル測定することにより、光から核スピンへの転写を図るアイデアである。今回は基礎実験の進捗について報告があった。

理論

サブテーマリーダー
筑波大学　都倉 康弘

FIRST 量子情報処理プロジェクト 全体会議 2012

当サブテーマでは、物理的量子デバイス系を都倉康弘（筑波大学教授）、小川哲生（大阪大学教授）、Franco Nori（理化学研究所チームリーダー）、また量子システムをRodney Van Meter（慶應義塾大学准教授）根本香絵（国立情報学研究所教授）、小芦雅斗（東京大学教授）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、実験グループと密接な連携をしながら目的達成を目指している。今年度の全体会議で各担当者が紹介した最新の研究概要の概略を述べる。

半導体量子ドットを用いた電子スピン量子ビットにおいて、パウリスピン閉塞という効果が二つのスピンの初期化や読み出しに用いられている。これをより多くのスピン系に拡張する可能性を検討した。3量子ドットの場合に、スピン選択則に加えコヒーレントポピュレーショントラッピング（CPT）効果が重要になる場合があり、完全な初期化が得られない場合がある。（都倉）

微小共振器中に量子井戸を埋め込んだ構造における半導体レーザー発振と共振器ポラリトン凝縮に関して、多体効果を含めて両者の定常状態を同等に取り扱える理論を提案した。この理論は、熱平衡状態と非平衡定常状態とをつなぐことのできる理論である。これを用いて、発光スペクトルと利得スペクトルの評価を行い、実験と比較している。（小川）

Noriは最近出版された「強結合で弱い非放物性の超伝導回路における二量子ビットゲート操作」について報告した。（New J. Phys（2012））（Nori）

Van Meterは量子計算システムの様々な最近の最先端の成果について強調した：表面符号（Surface code）量子計算におけるlattice surgeryはリソースへの要請条件を緩和してくれるとともに、表面符号の実験的実証を加速する事ができるだろう。（7ページ関連記事参照）また幾何学的最近接接合樹形を用いる事により一定のゲートの組で単一量子ビットの回転のより良い近似を見いだす事ができる。（Van Meter）

誤り耐性のある量子情報処理のスケーラブルな実現方法についての研究成果について発表した。3次元トポロジカル量子計算モデルを用いた分散型の量子計算について、固体素子を基本にした実現化方法を提案した。ダイヤモンドNVセンターを実現系の実例に、実現化方法を細部にわたり解明し、物理的条件を明確に示した。図は、光学キャビティと結合したダイアモンドNVセンターの概念図である。（根本）

小芦は、差動位相シフト量子鍵配送方式のセキュリティ理論の進展について報告した。レーザーパルス列の相対位相にビットを載せるこの方式は、簡単に実装できる半面、セキュリティの解析が難しく、セキュリティについてはながらく未解決であったが、今回、測定された誤り率から安全な鍵生成率を算出する理論が構築できた。（小芦）

図1　光学キャビティと結合したダイアモンドNVセンターの概念図

量子標準

サブテーマリーダー
東京大学　香取 秀俊

FIRST 量子情報処理プロジェクト 全体会議 2012

当サブテーマは、香取秀俊（東京大学）をリーダーとし、洪鋒雷（産総研）、小山泰弘（情通機構）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、17桁超の光格子時計の実現を目指した研究の展開を報告した。17桁の不確かさ達成における最大のハードルは黒体輻射シフトの低減である。スターリング冷凍機を導入した低温光格子時計がほぼ完成し、評価中である。これと並行して、17桁の遠隔時間比較を目指した東大・理研のファイバリンクが開通し、安定度の評価を行なった。今後の展開として、ポータブルクロックによる相対論的測地の可能性を議論した。

産総研グループからは、Yb及びSr光格子時計開発の進捗状況、光時計による秒の再定義への道筋について報告を行った。Yb光格子時計については、絶対周波数測定を3.9×10^{-15}の不確かさで行い、この測定結果を国際度量衡委員会時間周波数諮問委員会へ報告し、Yb光格子時計の秒の二次表現への採択に貢献した。Sr光格子時計では、狭線幅光コムを用いて、冷却用光源及び時計遷移レーザの安定化を同時に行った。さらに、光格子中の冷却Sr原子に対する分光を行った上、時計遷移レーザの安定化を行った。

情通機構グループからは、周波数安定化キャビティの振動による周波数揺らぎを能動的に補正してSr光格子時計の安定度を改善する取り組みや、キャリア位相を用いた衛星双方向比較方式とVLBI比較方式による精密周波数比較技術の研究開発の進捗状況などについて報告した。キャリア位相衛星双方向比較方式では、距離約109kmの2地点間で0.4psの精密さでの時刻差測定を達成し、短時間で光周波数標準の遠隔地間評価に有望であることが示された。

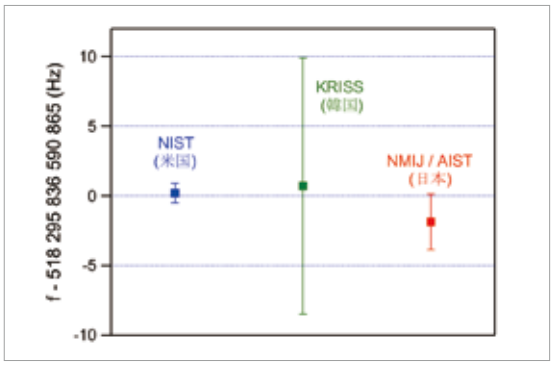


図　産総研及び他の研究機関が測定したYb光格子時計の絶対周波数

量子計測

サブテーマリーダー
浜松ホトニクス　山西 正道

FIRST 量子情報処理プロジェクト 全体会議 2012

[光子検出／光源開発]　浜松ホトニクス　山西正道

中赤外領域の量子計測という立場から、プラズモンキャビティーという概念を導入した中赤外光検出器の可能性と、同構造を用いたサブバンド間のBECの可能性とその中赤外ポラリトンレーザーへの応用について報告した。

[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

単一量子ドットを流れるスピン偏極電流の単一スピン計数に成功したことと、スピン閉塞状態にある二重量子ドットを流れるリーク電流による動的核スピン分極の時間変化について調べ、電流ノイズによって核スピンゆらぎの安定性が明らかにできることを報告した。

[半導体量子ドットを用いた量子計測]　NTT　太田剛

半導体2重量子ドットの1電子状態においてLandau-Zener-Stückelberg量子干渉による振動パターンが現れることを示した。また、3端子3重量子ドットにおいて、少数電子領域でスピンブロッケード状態を実現し、2つのスピンブロッケードが交差する領域でブロッケードの協力的解除が起こっていることを示した。

[光を用いた量子計測]　北海道大学　竹内繁樹

光子を用いた量子計測として、微分干渉顕微鏡に2光子もつれ合い光源を組み込んだ「もつれ合い顕微鏡」による画像取得を報告した。ガラス板を微細加工して作成した厚み20nmの文字を観察、もつれ合い光源によりより鮮明な画像を得られることを示した。

[Magnetometer using spinor Bose-Einstein condensates]　学習院大学　平野琢也

冷却ルビジウム原子を用いた磁力計として、スピン2ボース凝縮体のラムゼー干渉を用いたAC磁力計を開発した。感度は、10μmの空間分解能、100Hz程度のAC磁場に対して、数十pT/√Hzであり、初期のスピン状態の制御により1桁以上の改善が期待できる。

[超伝導チップによる原子干渉計を使った量子計測]

NTT　向井哲哉

超伝導チップ型原子干渉計のコヒーレントな原子源として、超伝導永久電流アトムチップ上でルビジウム原子のBEC生成に成功した。BECは飛行時間法とトラップ中の原子損失率（3体損失＋非個別性を含む理論計算値と実験値との比較）により確認した。

全体会議2012に参加しての感想

アドバイザー
東京理科大学　上村　洸

FIRST 量子情報処理プロジェクト 全体会議 2012

会議の冒頭、総合科学技術会議の相澤益男議員から9月に実施された中間評価に関する報告がありました。「誤り訂正のある量子コンピューターの全体像を明らかにしようとする研究は順調に進捗している。量子コンピューターを設計し、小規模ながらもハードを実現するテーマも設けて進んでよいのではないか」との大変好意的な内容で、山本喜久中心研究者の報告が高く評価されたことに安堵感を覚えました。量子コンピューターが、現代コンピューターでは不可能な整数の因数分解を行なうには10の9乗の量子ビット数が必要との山本喜久中心研究者の要請に関連して、10の9乗の集積回路を作成するにはどのような量子ビットが適しているかについて活発な議論が行なわれました。候補になる量子ビットとして、光パルス制御型並びに電界制御型半導体スピン量子ドット、ダイアモンド格子の複合不純物欠陥（NV中心）にトラップされた電子スピン量子ドット、ドープしたリン電子スピンのコヒーレンス時間を延ばすために核スピンを排除したシリコン28同位体スピン量子ドット、分子並びに錯体スピン量子ドット、超伝導位相、磁束及び電荷量子ビットなどが報告され、実現への展望に向けてホットな議論が行なわれました。特に、ジョセフソン結合を用いた超伝導量子ビットでは、10の5乃至6乗の集積が可能との報告があり、量子化学で現代コンピューターの限界とされる基底状態100からなる分子のエネルギースペクトル計算には、10の5乗のオーダーの集積回路の量子コンピューターで可能なことから、今回の全体会議の報告により、アーキテクチャーを含めて量子コンピューター実現の可能性に大きく前進したのではないかとの印象をもつことができ、大変嬉しく思いました。

若手研究者からの全体会議報告

NTT物性科学基礎研究所
松崎 雄一郎

FIRST 量子情報処理プロジェクト 全体会議 2012

FIRSTの全体会議では、大変刺激的かつ有意義な経験をさせていただきました。そこで得ました感想を、以下に述べさせていただきたいと思います。

量子計算機の分野では「Scalability（拡張性）をいかに獲得するか」が大きなテーマになりつつあるのでしょう。一昔前であれば、例えば量子ビットを構成する、あるいは二量子ビットゲートを実行するといった要素技術の実証だけでも大きな成果とみなされていたかと思います。もちろん今でも要素技術の獲得は重要ですが、それ以上に、いかに多量子ビットへと拡張していくのか、そのシステムで本当に10^8や10^9といった量子ビットのコヒーレント操作が可能なのかといった、大規模量子計算実現への明確なストラテジーが求められる時代になったのだと感じさせられました。そのため、各々のシステムでsurface codeを実装するためにどのような技術が必要か、そのためにはどのような研究を行うべきかが真剣に議論され始めてきていることは大変興味深いです。例えば、scaleが困難であると考えられてきたNMR量子計算の世界でさえ、大規模量子計算への拡張可能性についてのアイデアが議論され始めてきているのは印象的でした。

また量子情報の分野において、量子計算機以外のapplicationについても大きな進展が出ています。量子中継、量子磁場センサー、量子シミュレーション、光格子時計、そして注入同期レーザーネットワークを用いた計算などは、商業化までにかかるリソースが量子計算に比べれば少なくてすむ可能性があります。さらに、ただ実現がしやすいのみならず、そこで培われた技術は、量子計算機実現のためのマイルストーンとしての役割を果たすことになるでしょう。量子計算の実現にはまだ時間がかかるでしょうから、その前に何か量子的性質を用いた情報処理システムを世に出すことができれば素晴らしいですし、実際そのための進展を目の当たりにすることができたのは、非常に刺激的でした。

まだまだ、量子計算機の実現には多くのハードルが存在することは事実です。しかし、その中でも確実な進展とそして希望が見出せる、そのような素晴らしい場を全体会議は提供してくださいました。このような場を設けてくださった先生方、スタッフの皆様に心より感謝をいたします。

[サブテーマ紹介]
第3回
スピン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「スピン量子コンピューター」の研究活動について解説します。

半導体スピン、分子スピンを用いた量子コンピューターの実現に向けて

本サブテーマでは、スピンを量子ビットとして、拡張性のある量子コンピューターを実現するためのガイドラインを作ることを目指しています。具体的な目標は以下の通りです。

(1) 半導体スピン、分子スピンを用いて、拡張性のある小規模量子システムを実現する。

(2) スピンと超伝導、光子の量子結合制御を実現する。

以下では、半導体スピンとして、量子ドット、シリコン中の不純物スピン、分子スピンとしてこれらの課題に関する各チームの研究状況を以下にまとめました。

半導体量子ドットを用いた量子回路

電気的制御によって電子スピンを量子ビット化し、量子ゲート制御、誤り訂正、多ビット化を経て、拡張性のある量子計算の回路系を構築することを目指しています。最終的に大規模な量子計算を行うには、誤り耐性のある量子ビットの集積化が必要です。現在最も有用な誤り耐性コードとして2次元、あるいは3次元格子型の表面コードが知られています。しかし、固体量子ビット系は、通常1次元格子型に作られており、2、3次元への拡張には技術開発が必要です。本研究では、1次元型の量子ビットを用いて、量子ゲートの忠実度の向上と誤り訂正を含むアルゴリズムの実証と2次元型への技術拡張を研究しています。

本研究の中では、微小磁石の作る磁場勾配の中で電子を交流電圧で振動させるという独自の方法で、電気制御によるスピン量子ビットを作っています。この量子ビットは、同様な他のスピン量子ビットに比べて操作性、集積性に優れており、これまでに基本ゲートとしてX、Z軸回転、SWAP$^{1/2}$、量子もつれ操作などを達成しました（図1）。しかし、SWAP$^{1/2}$がナノ秒であるのに比べて、回転ゲート時間がデフェージング時間T2*=50～100ナノ秒（デコヒーレンス時間はT2echo~100マイクロ秒）と同程度であること、そのため忠実度が50～60%と低いことが問題でした。最近、微小磁石の構成法、交流電圧の増大などを行うことによって、1桁以上の短縮（数ナノ秒）に成功しました。これにより、全てのビットゲートをT2*に比べて2桁近く短時間で行うことができるようになり、また、ゲート忠実度も90%程度にあげることができました。この結果は、制御NOTゲートを10ナノ秒程度の短い時間で完了できることを意味しています。さらなる時間短縮と忠実度向上のために傾斜磁場を用いたワンステップ制御位相ゲート、交流法による読み出しの高速化に取り組んでいます。

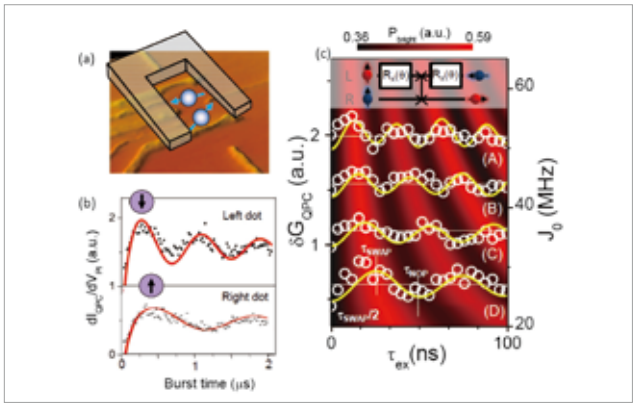


図1　**(a)** 微小磁石を備えた2重結合ドット、**(b)** 2スピン量子ビットの回転ゲート、**(c)** 回転ゲートとスピン交換ゲートによる量子もつれ操作。

一方、集積化に関しては、単に二次元格子状に量子ドットを配置するだけでなく、最近接スピン間の相互作用が制御できるようにする必要があります。このための技術課題の一つが、空間的にミクロン程度離れたドット間の相互作用を検知し、制御する技術です。最近、この基盤技術の一環として、1ミクロン程度離れた2つの2重ドットを浮遊ゲートで静電結合させる技術を開発しており、ゲートの幅などの最適化で、適当な結合が得られることを確認しました（図2）。

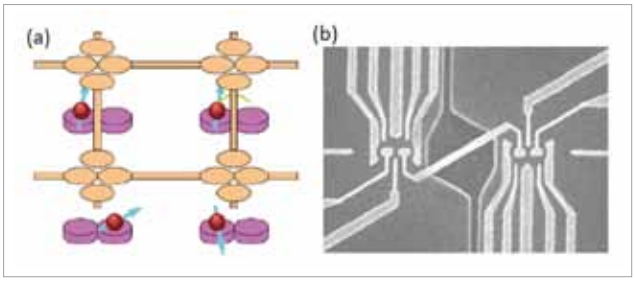


図2　**(a)** 2次元格格子配置の量子ドット、**(b)** 2重ドット浮遊ゲートの写真。

また、光子-スピンの量子結合の技術として、量子ドット系への単一光子照射を行うことにより、信頼性の高い単一光子から単一電子、単一円偏向光子から単一電子スピンへの角運動量転写を実現しました。現在単一円偏向重ね合わせ状態からスピン重ね合わせ状態へのコヒーレント量子情報転写の段階へと進んでいます。

シリコン中のビスマスを用いた量子計算の実現にむけて

シリコン中のドナーに束縛された電子は秒オーダーの長いコヒー

東京大学
樽茶 清悟
半導体量子ドットを用いた
量子回路

慶應義塾大学
伊藤 公平
シリコン中のビスマスドナーの
低磁場電子磁気共鳴の実現

大阪大学
北川 勝浩
量子情報科学、磁気共鳴

大阪市立大学
工位 武治
分子スピンアンサンブル
物質系、及びQC/QIPSスピン
テクノロジーの開発

大阪大学
森田 靖
有機合成化学を基盤にした
スケーラブル分子スピン
量子ビット系への挑戦

レンス時間を有するため量子メモリーとしての活用が有望視されています。一方、プロセッサーとしては高速性に優れた超伝導量子ビットの活用が期待されています。そこでシリコン中のドナー量子ビットと超伝導量子ビットをコヒーレントに結合するハイブリッド量子コンピューターの開発が重要となります。

ハイブリッド化のためには超伝導量子ビットが動作する低磁場（<10mT）において、超伝導量子ビットの0と1状態のエネルギー差（1〜10GHz）と同じ0と1のエネルギー差を有するシリコンドナー電子を選ぶ必要があります。シリコン中の量子ビットとして最も研究が進んだリンドナーの場合、磁場ゼロ付近の超微細相互作用による分裂は0.12GHz程度しかなく利用できません。そこで私達が着目したのがビスマスです。^{209}Bi安定同位体は核スピン9/2と大きく、また、超微細相互作用におけるゼロ磁場分裂が7.377GHzと巨大です。この分裂は超伝導量子ビットのエネルギー領域にありハイブリッド化に向けて理想的です。

そこでシリコン中に^{209}Biを添加し、ゼロ磁場付近で磁気共鳴に成功したのが私達の2012年度の成果でした。ハイブリッド量子コンピューターは、表面近傍数10nmの深さにBiが添加されたシリコンウエハーの上に超伝導量子ビットを作製し、Biドナーと超伝導量子ビットをマイクロ波導波路で繋ぐことで完成します。よって、本研究の第1ステップは、イオン注入を用いてシリコンウエハー表面にBiを添加し、それを上手に活性化することです。ドナーとして働くためにはBiがSi格子点を置き換えなければなりませんが、注入されたBiがSiを置換する熱処理条件を見出すことは容易ではなく、一般的には極めて困難とされました。それを私達は実現し、第2ステップとして、ゼロ磁場付近での磁気共鳴検知に取り組みました。通常の電子磁気共鳴装置では信号強度が測定に用いる磁場の2乗に比例するために低磁場での測定はできません。そこで低磁場において磁気共鳴が誘起されたときに試料の電気伝導度が変化する現象を利用した信号検知を試み図3に示す一連のBi磁気共鳴ラインの観測に成功しました。100mT以下の低磁場でも磁気共鳴がしっかりと測定されていることに注目してください。また、測定に用いたXバンド（9.08GHz）のマイクロ波に加えて、もう1種類のマイクロ波を照射することで、ビスマスドナーの0と1状態のエネルギー差が微調整され、超伝導に合わせる事が可能であることを示すことにも成功しました（図4）。今後は実際の結合に取り組んで行きます。

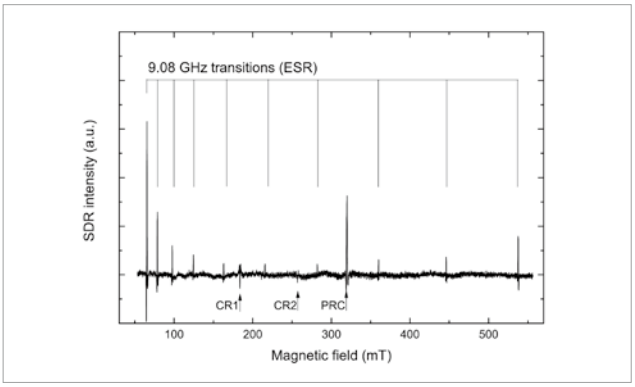


図3 シリコン中に添加されたビスマスドナーの低磁場電子スピン磁気共鳴スペクトル。

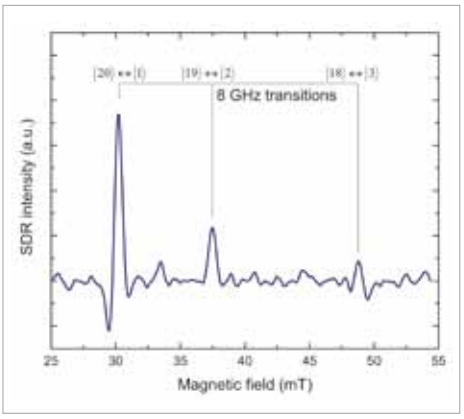


図4 ビスマスドナーの0と1状態のエネルギー差が微調整可能（tunable）であることを示した実験結果。

本研究の成果は“Spin Dependent Recombination Based Magnetic Resonance Spectroscopy of Bismuth Donor Spins in Silicon at Low Magnetic Fields,” Appl. Phys. Lett. 101, 082409 (2012) として刊行されました。

分子の核スピン・電子スピンのスケーラブルな精密制御

本研究では、分子の核スピンや電子スピンを量子ビットとする大規模な量子コンピューターの実現に不可欠なスピン量子ビットの精密かつスケーラブルな制御方法を探求しています。分子の核スピンや電子スピンは10の9乗個オーダーの特性の揃った量子ビットを分子や超分子の結晶によって規則正しく配列することが期待されます。これらのスピン量子ビットは、環境との結合が疎でデコヒーレンス時間が長く、その一方、隣接する量子ビット間には演算に適したダイポール相互作用が存在するという望ましい性質を持っています。しかし、量子ビットの空間密度が高いために、磁場勾配などで全ての量子ビットに番地付けして個別に制御することは困難です。

また、スピン1個の磁気誘導信号は熱雑音より何桁も小さく、射影測定は困難です。これらの困難を回避しながら、量子誤り耐性のある量子コンピューターを実現するために、下記の研究を行っています。(詳しくは、本号の研究室紹介もご参照ください。)

量子ビットの初期化：

核スピンは室温では僅か10のマイナス5乗しか偏極していません。そこで、ペンタセン分子の光励起三重項状態の高偏極電子スピンと結合させることによって核スピンを高偏極化させる動的核偏極(DNP)を研究しています。また、電子スピンについては、高磁場・極低温下で高偏極化して演算を行うKuバンド多重共鳴装置を開発しました。

スピン増幅：

スピン1個の状態が|0>か|1>かの情報を膨大な数のスピンにコピーすることができれば、スピン量子コンピューターの読み出しが可能となります。これを個別のCNOTを用いず、包括的制御によるスピン拡散を用いてスケーラブルに実現し、140倍の高利得を得ました。[Phys. Rev. Lett. 107, 050503 (2011)] [図5] さらに、森田グループで新たに合成した分子を用いて、被測定スピンの情報を量子非破壊的に増幅する真のスピン増幅に成功しました。

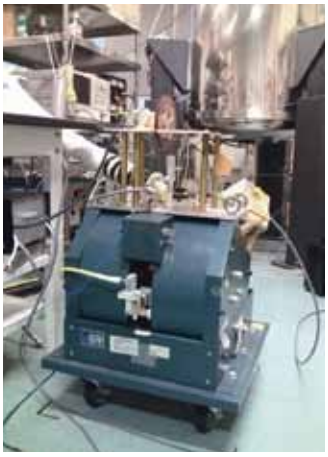


図5 スピン増幅の実験装置。

量子ビットのスケーラブルな制御：

Lloydが1993年に提案した(ABC)nタイプの量子コンピューターは、16の周波数の選択的パルスによる包括的な制御だけでユニバーサルな量子回路が構成できますが、それには全ての周波数で精密なパルス振動磁場を照射する必要があります。そこで、共振器などの分散を予め補償することによって歪みの無い波形を多周波数で実現する方法と波形の数値的最適化の研究を行っています。最近、平均ハミルトニアン法と最適制御理論の利点を併せ持つ動的デカップリング波形の数値生成法を開発しました。[quant-ph: arXiv:1208.5218] [図6] また、Lloydのアーキテクチャーの拡張とその制御法について研究しています。

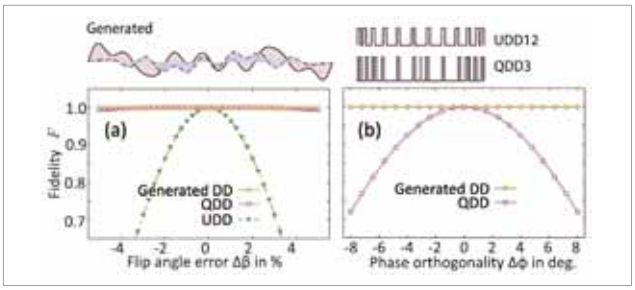


図6 数値的に生成した動的デカップリング波形と従来の動的デカップリングパルス系列の **(a)** パルス強度エラーと **(b)** 位相直交性のエラーによる忠実度変化。

誤り耐性アーキテクチャー：

さらに、大規模な量子コンピューターの実現を目指して、分子スピンの個別アドレス困難性と射影測定困難性を回避して包括制御と冷却によって量子誤り耐性を実現する方法とそのための分子系を、井元グループの藤井氏、森田グループと共同で研究しています。

分子スピンアンサンブル物質系、及びQC/QIPSスピンテクノロジーの開発

共有結合に与らない電子スピン(不対電子)をもつ化学種を分子スピンと総称します。分子スピンは電子構造が開殻系であるがゆえに、これらを構成要素とする物質(分子のアンサンブル系)は一般に不安定で短寿命の反応中間体等としてしか存在しないと思われがちですが、最近では合成有機化学と量子化学の著しい進歩のおかげで、不対電子を顕わに持たない化学種(閉殻系物質)と同じように空気中でも安定に扱えるようになりました。絶対ゼロ度から高温まで、温度を色調によって直接計測できるラジカル結晶温度計、既存のリチウムイオンバッテリーの技術水準(電気容量)を越える有機スピンバッテリー等への応用が実現されています(Y. Morita, S. Suzuki, K. Sato, T. Takui, *Nature Chemistry*, 2011, *3*, 197-204.)。しかしながら、分子スピンを量子ビットのスピンリソースとして物理的に活用することは、量子スピン状態を今日の技術水準のパルスマイクロ波・ラジオ波技術によって人為的に制御できる人工系スピンplatformを物質系として実現することを意味し、新規な物質合成を使命とする化学者・物質科学研究者にとって大きなチャレンジです。電子スピン1個を持つ分子スピンの量子ビットの状態制御・1量子ビットの任意のゲート操作はパルスマイクロ波技術で実現でき、電子スピン固有のスピノール性も直接実験的に初めて証明しました。さらに量子コンピューターを構築していく上で、最も重要なゲート操作である、2量子ビットのゲート(制御NOTゲート)を実験的に実行できれば、最小のスピン量子コンピューターが動作したことになります。最小のスピン量子コンピューターでは、分子スピン内に、スピン物性(gテンソル)が異なる電子スピンを二つもち、かつ電子スピン量子ビット間には、量子演算を行うために適当な大きさの相互作用が存在することが不可欠です。図7には、このような条件を満足した、最初の分子スピン1を示します。赤と青で区別した部位には、gテンソルが異なる電子スピンが

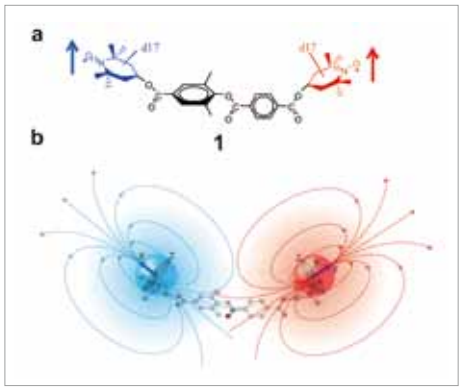


図7 制御NOTゲート操作を実現した最小の分子スピン量子コンピューター **a.** 二つの異なる電子スピンgテンソルをもつ分子スピン1の分子構造。矢印は電子スピンを示す。**b.** 量子演算には電子スピン間に働く磁気的双極子相互作用を用いる。

局在し、スピン間には弱い磁気的双極子相互作用が働くように設計されおり、量子ビット固有の制御NOTゲートを、電子スピンを扱うパルスマイクロ波テクノロジーで実現しました。

実用的なスピン量子コンピューターを実現するには、個々に識別可能なスピン量子ビットを大規模に集積化する仕掛け（スケーラブル量子コンピューター／量子情報処理システム（QC/QIPS））が必要です。何百万個の分子スピン量子ビットを空間的に集積化するアプローチに対して、（ABC）n（A, B, Cは電子スピンgテンソルが異なる）型の1次元周期系（ABCスピン1次元鎖）を構築することができれば、空間的に多数の量子ビットにアクセスして情報の書き込み・読み出しを行う代わりに、限られた異なる周波数で情報のやり取りを実行する、Lloydモデルアプローチがあります。（ABC）n系を構築するには、（1）自己組織能をもつ特別のリガンドを用いて三重螺旋構造内に、電子スピンをもつ同一の金属イオンを三個配位させる、超分子化学アプローチ（後述）、（2）DNAの周期性二重螺旋構造に働く、相補的水素結合のモードを利用して、gテンソルが異なる分子スピンを螺旋構造内に配列させるアプローチがあります。（2）のアプローチでは、二重螺旋構造内に設計通り配列されていることを同定する必要があります。DNAオリゴマーの内側、及び外側にぶら下がることができる分子スピンを設計・合成し（H. Atsumi, T. Takui, K. Nakatani, et al., *Chem. Euro. J.,* 2011, 18, 178-183.）、オリゴマー内における、分子スピン間の配向と距離を同定するためのマイクロ波スピンテクノロジーを確立しました。図8には、パルス電子スピン二重共鳴法及び分子力学場法によって決定した、二重螺旋構造内に配向した分子スピン対を示します。これにより、DNA周期系内に配向した分子スピンを同定できることが分かりました。

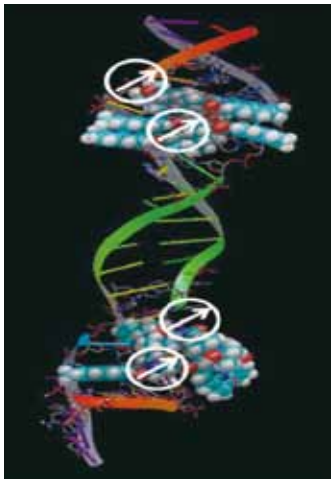


図8　パルス電子スピン二重共鳴法、及び分子力学場法によって決定した、DNA二重螺旋構造内に配向した分子スピン対。

有機合成化学を基盤にしたスケーラブル分子スピン量子ビット系への挑戦

量子コンピューターの実現には、10^9個の適切な相互作用で配列させたaddressableな量子ビットが必要であると考えられています。有機分子を基盤にした分子スピン量子ビット系では、化学結合の長さや結合角、より高次な構造（超分子）の構築により、電子および核スピン間の相互作用やg値の制御が可能です。さらに結晶や薄膜においては、構成（超）分子単位の周期性が確保されることから、scalabilityという観点からも有望です。このようなアイデアと指針を持って量子ビット系に挑戦した研究は、これまでにほとんどありませんでした。私たちは、π電子系有機分子、特に有機中性ラジカルを中心とした有機物の基礎と物性応用に関する経験と知識（「合成有機スピン化学」）を駆使することで、分子スピン量子ビット系の構築に挑戦してきました。その結果、電子スピン量子ビット系に向けたニトロキシド（N–O）型中性ラジカルを基盤とした有機モノラジカルやビラジカル誘導体の合成・単離（図9a、b）、核スピン量子ビット系に向けた*p*-ターフェニル誘導体の合成等に成功しました（図9c）。これらの分子群は、任意の水素原子、窒素原子および炭素原子が同位体標識されていることが特徴です。一般に、有機分子に位置特異的に同位体原子を導入することは困難であり、合成原料の選定、合成反応の選択・効率化が重要な鍵となり、有機合成化学者の知識と技量が試されます。また、遷移金属元素の電子スピンを活用した$(ABC)_n$周期構造の構築によるLloydモデルを志向した遷移金属三重らせん錯体の合成においては、従来にまったく知られていないπ電子系有機配位子を独自に設計し、磁気的希釈単結晶の合成も達成しました（図9d）。現在、10^9個オーダーのaddressableな量子ビットの配列を目指し、安定有機中性ラジカルや核スピン系を組み合わせた超分子構造を利用したアプローチを進めています。

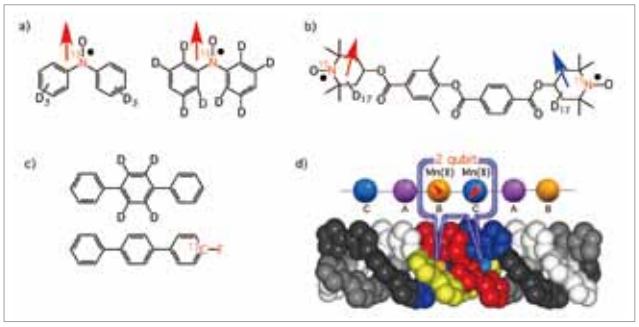


図9　スケーラブルな分子スピン量子ビットの実現に向けたπ電子系有機分子と金属錯体。

執筆者：
半導体量子ドットを用いた量子回路
樽茶 清悟（東京大学）

執筆協力者：
シリコン中のビスマスドナーの低磁場電子磁気共鳴の実現
伊藤 公平（慶應義塾大学）

分子の核スピン・電子スピンのスケーラブルな精密制御
北川 勝浩（大阪大学）

分子スピンアンサンブル物質系、及びQC/QIPSスピンテクノロジーの開発
工位 武治（大阪市立大学）

有機合成化学を基盤にしたスケーラブル分子スピン量子ビット系への挑戦
森田 靖（大阪大学）

特集

松尾財団宅間宏記念学術賞受賞　高橋 義朗教授

本プロジェクト量子シミュレーションサブテーマリーダーの高橋義朗教授（京都大学）が「光格子にトラップされた冷却原子を用いた量子多体系のシミュレーション」に関する研究で2012年度松尾財団宅間宏記念学術賞を受賞されました。

松尾財団宅間宏記念学術賞とは

松尾学術振興財団は主として自然科学の学術研究の助成、振興し我が国の学術及び文化の向上、発展に寄与することを目的とした財団であり、松尾財団宅間宏記念学術賞は原子分子物理学と量子エレクトロニクスの研究で特に業績の顕著な研究者を顕彰するものです。

（松尾学術振興財団より抜粋）

皆さんのおかげで

京都大学　高橋 義朗

今回、「光格子にトラップされた冷却原子を用いた量子多体系のシミュレーション」という授賞理由で、H24年度松尾財団宅間宏記念学術賞を頂きました。身に余るこのような立派な賞を頂くことができ、あらためて多くの皆様に対する感謝の念を新たにしております。実際、これまで、多くの方々のご指導やご協力があったからだと思っております。まず、山本先生には、JSTクレスト研究や本FIRSTプログラムで領域総括および中心研究者として、世界的な研究の動向を踏まえて、研究の方向性を決定づける非常に重要なご指導をいただき、現在もご指導いただいております。実際、受賞の理由にあります光格子の研究は、山本先生のプロジェクトのもとで始めさせて頂いた研究テーマであります。また、本FIRSTプログラムのアドバイザーの藪崎先生には、私の博士論文の指導をしていただきましたし、その後も先生のもとで、研究をさせていただき、長年にわたって直接ご指導いただきました。物理的な直観を大変大事にされる藪崎先生の研究姿勢は大変勉強になりました。また、本FIRSTプログラムのアドバイザーの清水富士夫先生にも、大変お世話になりました。清水先生がリーダーとして推進されました科学研究費のプロジェクトで研究をさせていただいたおかげで、本受賞のもととなりますイッテルビウム原子のボース・アインシュタイン凝縮を実現することができました。

また、大変優秀な学生さんや博士研究員の方々にも恵まれて、成果を挙げることができました。この場をお借りしてあらためて感謝いたしたいと思います。現在、研究室に在籍しているメンバーと同時に、すでに研究室を離れて、国内外で活躍している卒業生の貢献なくしては、授賞理由にあげられた研究は達成できていなかったと思っております。

ただ、大変残念なのは、松尾財団および我が国の量子エレクトロニクスの発展に多大な貢献をされた宅間先生がいらっしゃらないことです。もしいらっしゃったら喜んでいただけたものと思います。

現在、超低温のイッテルビウム原子を用いた量子シミュレーションの研究は、世界的な広がりを見せています。アメリカワシントン大学のグプタ教授のグループ、イタリアLENSのイングシオ教授のグループ、ドイツマックスプランク研究所のブロッホ教授のグループ、およびドイツハンブルグ大学のゼンクストック教授のグループ、といった錚々たる人たちが、すでにイッテルビウム原子のボース・アインシュタイン凝縮を生成させ、新しい実験を立ち上げています。また、フランスENSのダリバード教授のグループもイッテルビウムの研究を推進している、という状況で、今後、極めて激しい競争が展開されると考えられます。今後も、これら競合グループとの競争に勝ち抜き、この賞に恥じないよう、光格子中のイッテルビウム原子を用いた量子シミュレーション研究を進めていきたいと思っております。今後も引き続き、ご指導・ご協力頂けたら幸いと存じます。

大阪府立大手前高等学校出張授業

■実施日 2012年12月7日（金）　**■対象・参加者人数** 大阪府立大手前高等学校1-2年生27人（物理志望）
■授業名「量子力学はユビキタス ―量子・情報と渡り鳥」　**■担当者** 工位 武治（大阪市立大学）

大手前高校では前回の大学院学生による出張授業が好評で、2012年度も出張授業（午前）を実施されました。今回は、担当の安永晃教教諭が履修希望の生徒に対して事前アンケートを実施してくれましたので、出張授業はアンケート内容にもすべて応える形で準備致しました。（以下、◎印は事前アンケート質問事項）

◎この講座（見学）を選んだ理由（省略）

◎この講座で学びたいこと・期待していることはなんですか?

（一部省略）

・「原子」「量子」「情報」と、この3つがどう関係しているのか。・量子力学は何に役立っているか。・物理の世界に触れることによって、自身の視野を広げたい。また、自身の進路選択の参考にしたい。・素粒子の対称性や4つの力など宇宙のはじまりや仕組みについて学びたい。・ユビキタスにひかれてこの講座を選んだので量子力学のことはあまりわかりませせが、「量子力学とは何か」と「ユビキタスの社会での使われ方」を知りたい。・量子力学と渡り鳥にどう関係するか。

◎講師の方に質問したいこと（一部省略）

・原子力だけでなく、新エネルギー事情についても知りたい。・最近話題の「ヒッグス粒子」について教えてほしい。CERNのLHCを見学することは可能か。・前回の講座で、質問しても納得できなかったが、「物質の瞬間移動」は不可能だが「情報の瞬間移動」は可能だと学んだが、どうして情報は瞬間移動できるのか。また、どうやって瞬間移動するのか。・物理が得意になれる方法。・研究で楽しいと感じるのはどんな時か。・この道を選んで本当に良かったと思う点、後悔している点があれば教えてください。・研究をどのように役立てようと思うか。・今は何の研究をしているか。・実は身近にある「これも物理なんだ～」というものはあるか。・スピンや色力学など抽象的なことを教えてほしい。・ノーベル物理学賞受賞の教授たちは主に何で功績をあげたのか。また、その影響は?・いつからこの分野に興味を持ったのか。・量子力学によって世界がどう変わるのか知りたい。

授業は、3時間（10分休憩、2分の光干渉実験）を少し越えましたが、生徒の皆さんは熱心に聴いてくれました。終了後女子生徒を含む数人が直接質問を希望し、2時間近くにわたって量子論的な考え方、日頃からの物理の疑問に応えました。後日、安永教諭から、生徒のコメントが送られてきました。紙面の関係で、コメントの一つのみを以下に紹介します。

「私はこの講座は器械の話ばかりするのではないかと考えていました。ですが、生活の上でも役に立つことから夢のある話まで、沢山のことを知れてとても楽しかったです。家族に今回の内容を話すと驚いてくれました。“常識”が実は間違っていたりすることが知れて良かったです。「いかに」よりも「なぜ」を問題にして、これからも頑張っていきたいです。」

名古屋市立向陽高等学校での出張授業

■実施日 2012年12月11日（火）　**■対象・参加者人数** 名古屋市立向陽高等学校1年生、2年生26名
■授業名「量子の世界にようこそ ～光の不思議と量子暗号～」「巨視的量子現象 ～超伝導を体験しよう!～」
■担当者 稲垣 卓弘（NTT 物性科学基礎研究所）、仙場 浩一（国立情報学研究所）

NIIの仙場浩一先生と共に、名古屋市立向陽高等学校の1・2年生を対象に出張授業を行いました。ノーベル物理学賞を受賞された益川敏英先生の母校でもあり、教師・生徒の皆さんのサイエンスに対する強い関心を感じました。出張授業が放課後に行われたにも関わらず、興味を持った生徒さんが26人も足を運んでくれてビックリしました。

前半はミクロな視点に立って、光子のもつ量子性について講義をしました。風船を使ったレーザ光の紹介を皮切りに、2重スリットや回折格子を使った実験を通して光子のもつ「波と粒子の二重性」について悩んでもらいました。また、液晶ディスプレイにも使われている光子の偏光状態を、偏光フィルムを通して実際に感じてもらい、光子のもつ量子重ね合わせ状態やその応用である量子暗号通信を紹介しました。後半は、仙場先生がマクロな系において生じる量子性について、超伝導回路をテーマに講義をされました。単一の光子で生じていた量子的な現象が、どの程度の大きさの系にまで現れるかというお話は横で聞いている私自身も興味深い内容でした。実験では、高温超伝導体の上で浮上した磁石をピンセットで触ってみてもらい、生徒の皆さんが交代でつついては「ほぉ～」と声を上げていました。瑞々しい反応にこちらまで嬉しくなります。

物理の授業がこれから本格化するということで、教室で出会う数式が無意味な変数の羅列ではなく、自分たちの世界を記述してくれる便利な道具なのだと感じてくれれば、今後の学習の一助になるものと思います。また研究者にとっても、自身の研究がどれほど世の中では凄いことなのかを再認識する場として、出張授業は大変良い機会だと感じました。

［NTT物性科学基礎研究所　稲垣 卓弘］

●産業技術総合研究所　ナノデバイスセンター／計測標準研究部門／ナノエレクトロニクス研究部門

超伝導量子ビットを集積回路で作る

●オープンイノベーションしませんか?

産業技術総合研究所（産総研）は、関東平野の真ん中からやや東に位置する茨城県つくば市にあります。環境・エネルギー、ライフサイエンス、情報通信・エレクトロニクス、ナノテクノロジー・材料・製造、計測・計量標準、地質の６分野にまたがる幅広い研究を行っている日本最大級の公的研究機関です。

われわれのチームは、FIRST量子情報処理プロジェクトのサブテーマ「超伝導量子コンピューター」で、国際超電導産業技術研究センター（ISTEC）と連携して超伝導量子ビットの大規模集積化技術の研究開発を分担しています。チーム構成は、ナノデバイスセンター、計測標準研究部門、ナノエレクトロニクス研究部門の３部署が関わる混成部隊です。それぞれ本来は量子情報処理とは直接関係のない研究をしていますが、産総研のミッションである「オープンイノベーションハブ機能の強化」の一環として産総研の技術をイノベーション創出に活用すべく、量子情報処理プロジェクトの一員として量子コンピューター実現を目指しています。

●プロジェクト参加部署の紹介

ナノデバイスセンターは、ナノテクノロジー・ナノエレクトロニクスにおける「協創の場」を構築し産学官連携によるオープンイノベーション推進を目的とする組織です。つくばイノベーションアリーナ（TIA）の三つのコアインフラ運営の中心であり、TIA構想全体の推進も担っています。超伝導量子ビットの研究開発も、これらのTIAコアインフラに含まれるナノプロセシング施設（NPF）やスーパークリーンルーム（SCR）100mmφ研究開発ラインを活用して行っています。

計測標準研究部門では、計量標準（国家標準）の研究開発、産業界への標準供給、標準の国際相互承認体制整備などを行っています。本プロジェクトに参加している電気標準第２研究室では、ジョセフソン効果による電圧標準や量子ホール効果による抵抗標準など量子電気標準を取り扱っています。最近は、量子情報処理の派生技術として、超伝導素子を用いた量子電流標準の研究も行っています。また、今年１月にはアウトリーチ活動でサイエンスキャンプを実施し、電圧標準の基礎となるジョセフソン接合を作って測る実験を高校生に体験してもらいました。

筆者はナノエレクトロニクス研究部門に所属し、超伝導デジタルアナログ変換器や量子雑音電圧源など超伝導回路を研究しています。超伝導回路作製用クリーンルームは2012年に新たに整備され、CRAVITYという名称の共用施設として外部公開が開始されました。超伝導量子ビット作製にもこのCRAVITYを一部利用しています。

●技術を社会へ

「研究成果を広く社会に還元し、わが国の産業の発展に貢献します」（産総研憲章より）。産総研の技術や施設にご興味があればぜひお気軽にご相談ください。

（前澤 正明）

図1　産総研つくばセンター中央地区。
都心から約一時間半、北に筑波山を望む程よい田舎です。

図2　産総研スーパークリーンルーム（SCR）
100mmφ研究開発ラインの電子ビーム露光装置。

図3　サイエンスキャンプ「量子効果を体験しよう～量子力学とその標準への応用～」。ジョセフソン接合の特性を評価している参加者。

図4　超伝導回路作製用クリーンルーム「CRAVITY」。
2012年から共用公開施設として運用しています。

●大阪大学　北川研究室

分子のスピンを操って大規模な量子情報処理をめざす

当研究室は、大阪大学基礎工学研究科システム創成専攻電子光科学領域にあり、スタッフは教授の北川と助教の香川晃徳、根来誠の３名、院生は後期課程２名、前期課程各学年４〜５名、学部４年生５〜６名である。メインテーマは、分子の核スピンや電子スピンを量子ビットとして大規模な量子情報処理を実現することで、下記の研究を行っている。

●**核スピン量子ビットの初期化**　核スピンのゼーマンエネルギーは11.7Tの高磁場下でも室温の熱エネルギーより５桁も小さく、僅か10のマイナス５乗しか偏極していない。核スピン1個を射影測定することができないため、これを初期化するのは困難である。そこで、ペンタセン分子の光励起三重項状態の電子スピンが数十％に偏極することを利用して、これと交差分極（SWAPの小数乗）することによって核スピンを偏極させる動的核偏極（DNP）を研究している。このテーマは、京大の藪崎研から寺尾研を経て実験装置を引き継いで取り組んで来た。最近、分子を重水素化することによる高偏極化のブレークスルーがあった。

●**スピン増幅**　核スピン1個の信号は熱雑音より6桁小さいため観測できない。そこで被測定スピンの状態が｜0>か｜1>かの情報をN個のスピンにCNOTでコピーして信号をN倍にするスピン増幅が量子コンピュータの読み出しに必要となる。ところが10の6乗個のスピンに個別にCNOTを行うのは困難であり、従来は数スピンで数倍の利得しか得られていなかった。この個別CNOTの代わりにスピン拡散を用いて分子結晶の多数の核スピンに情報をコピーするスケーラブルな方法を考案して140倍の高利得を実現した。[Phys. Rev. Lett. 107, 050503 (2011)] 最近、森田研で新たに合成した分子を用いて、被測定スピンの情報を量子非破壊（QND）的に多数のスピンにコピーする真のスピン増幅（図1）を実現した。

●**スピンの超精密制御**　量子誤り耐性のある量子コンピュータを実現するには、誤り耐性閾値を高くするとともに量子ゲートの誤りを出来る限り低く抑える両面からのアプローチが必要である。後者に関して、NMRのハミルトニアン工学として培われて来たパルス系列による動的デカップリングが有用であるが、これらはδ関数やせいぜい矩形パルスで設計されてきた。ところが、磁場を発生する共振器の過渡現象などのために波形が時間反転対称性を失う結果、量子ゲートの忠実度が低下するという困難が予想された。そこで、共振器などの分散を予め補償して時間反転対称性のある滑らかな波形の振動磁場を発生する方法を考案して実現した。[J. Magn. Reson. 204, p.327 (2010)] 最近、平均ハミルトニアン法と最適制御理論の利点を併せ持つ動的デカップリング波形の数値生成法を開発した。

●**電子スピン量子ビット**　電子スピンが極低温・強磁場で初期化されることに着目して、Kuバンドで任意のパルス波形が照射できる電子スピン多重共鳴装置を開発した。

●**量子シミュレーション**　ハミルトニアン工学で相互作用を比較的自在に設計できることと分子を設計できるという２つの利点を生かして、分子結晶の核スピンを用いた量子シミュレーションの研究に着手した。

●**量子コンピュータアーキテクチャー**　大規模な量子コンピュータの実現を目指して、分子スピンの個別アドレス困難性と射影測定困難性を回避して包括制御と冷却によって量子誤り耐性を実現する方法とそのための分子系を研究している。

（北川　勝浩）

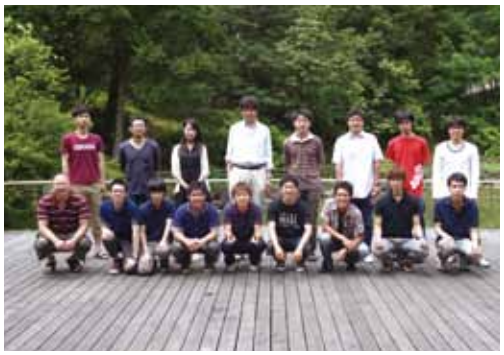


写真1　2012年夏の研究室集合写真

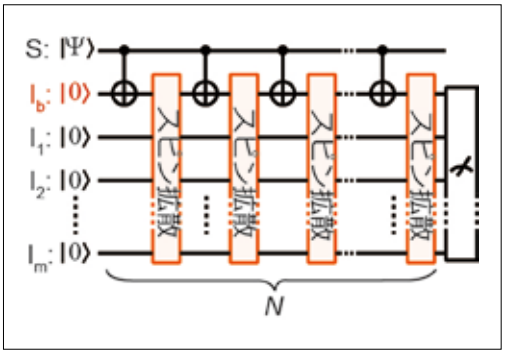


図1　真のスピン増幅の量子回路

エッセイ

Essay

大学人としての2013年

この原稿は2013年のお正月に書いています。久しぶりの思索の時間。学者に戻った気分の中で、この頃思うことを脈絡無く書き連ねます。

まず、大学や大学院での教育について。途中に数年間だけ民間企業（NTT）の経験を挟みましたが、大学の教員になって24年以上が経ちました。若い頃の自分に学問や学術への夢があったのは当然としても、「頭は下げるためにある」ことなんぞ露も知らず、組織管理や運営などにまったく向いてないと思ったからこそ、大学院博士課程に進学してアカデミアを目指したわけです。ところが24年も経ってみたら、最も苦手で避けたかった管理運営の仕事が多くなっているではありませんか。教育や研究に没頭するために大学教員を目指したのではなかったのか…、若かりし頃の憧れや希望をかなえる人生を送っているのだろうか…、などと自問自答しながらの毎日です。もっとも、管理運営公務を課されながらも、ポスドク問題に頭を悩ませながらも、優秀な若者らが研究をトップギアで疾走しているのを近くで見るのは楽しいですし、自主的に仕事ができる職に就いていることには感謝です。

国公立大学で多くの学生を見てきましたが、彼らの気質は時代とともに変わりつつあります。最近特に目に付くのが、教育をビジネス的にとらえる思考です。「大学に学費を払い、その対価として教育サービスを手に入れる」とか「大学は、付加価値を付けた『製品』として学生を社会に送り出し、その品質管理する」などの考え方です。大学と学生とを、お金を媒介とした教育サービスの生産者と消費者ととらえる構造です。研究型大学では、この考え方に立つと、研究を目指すための教育の本質が損なわれると危惧しています。

教育は、それを受けたら直ちに効果が現れるとは限りません。よく分からないままだからこそ悩み考え、大学や大学院を卒業した後でも考え続けるのです。この作業ができるようなメンタリティを植え付けるのが教育の大切な面だと考えています。ところが、上記のビジネス思考では、教育サービスを購入する際に、すぐに効用が得られなければ買わない、となってしまいます。このような、学習や仕事に面白さややりがいのみを直結させた価値観（やるに値することのみやるという態度）では、まともな勉強や仕事はできません。研究は、「必ず成果が得られる」ことは分からずとも、前へ進んだり後ろに戻ったりの努力をするわけで、この過程を面白いと思うわけですが、この立場と直交しています。

そこで私は、「登山における幸せは、登頂ではなく登山の過程にある」とか「登山の方法は誰も知らないからこそいろいろと試そう」とか「問題を解くだけでなく問題を発見しよう」と学生たちに日々口を酸っぱくして言っていますが、この真意を理解して実行してくれる学生はほんの一握りです。こんな時代に、大学教員はどうすればいいのか？ 2013年もこの悩みは続きます。そう言えば、豪快な学生も減りました。20年くらい前に「原子核はどんな粒子から構成されているか？」という質問をしたら、「ニュートンとプラトン」と答えてきた学生が居ました。確信犯です。いいですね、こういう学生。

最後に、突然話題を変えて、光についてです。私の研究テーマは、一貫して「光」に関連する物理学です。最近、湯川秀樹先生の対談集「天才の世界」（光文社知恵の森文庫）を読んでいたら、湯川先生は弘法大師を天才だと評していたので、真言宗について少し調べました。そうすると、「光」は、物理学などの自然科学だけの研究対象ではなく、宗教学、心理学、哲学でも「光」は今でも重要な中心課題のようです。（素人の私の解釈では）弘法大師は多芸型の科学者・工学者でもあり、光を司る「この世の一切を遍く照らす最上の者」（大日如来）を中心とする宇宙的生命論に基づいて、人間と自然の一体論を提唱しています。「光を超える」ことにも言及しており、兵庫県三田市にある名刹の本堂には、写真のような額が掲げられています（小川撮影）。私の目指すべきことが示唆されているようです。ちなみに、弘法大師は、「思うこと」と「言うこと」と「行うこと」を高いレベルで一致させなければならない（三密加持）と説いています（孔子も同じようなことを言っています）。これも、研究に携わる我々に対してもピッタリの警句で、心に留めながら2013年を過ごそうと思います。

小川 哲生（大阪大学）

No.11 March 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

R100 古紙配合率100%再生紙を使用しています