

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 | 8
June
No.

量子ニュース

CONTENTS

特集

香取 秀俊先生 朝日賞受賞「光格子時計に関する研究」



インタビュー

～若手研究者コミュニティ関東・関西学生チャプターに聞く～ 「コミュニティの継続と新たな挑戦」



最近の研究成果／特許出願

量子メモリーなど他の量子系との結合に有利な 超伝導磁束量子ビット

サブテーマ紹介 第1回

量子情報システム 量子コンピューターのあるべき姿を探索する

●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)

●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(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)

●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((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)

アドバイザー

●光 末松 安晴((公財)高柳記念財団) 賢具 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)

●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

■支援体制の変更について

新年度より、NIIの研究支援体制を大幅に見直し、機能強化を図ることとしました。

NTT物性科学基礎研究所の仙場先生を研究支援統括者にお迎えし、これまでの量子研究の知識や経験に基づく視点でプロジェクト運営全体を統括します。加えて、研究推進・人材育成各担当として技術参事が就任しました。事務部門は、最先端研究開発支援チームに衣替えて企画課社会連携推進室の傘下に入り、各機関との連絡調整や会計処理を進めるほか、同室傘下の知的財産担当と連携を深めて知的財産の創出に当たる予定です。引き続きご支援賜りますよう、よろしくお願いいたします。

●EVENT

■2012年度 夏期研修会(サマースクール)開催のお知らせ 夏期研修会2012～量子情報未来テーマ開拓研究会～

日程：2012年8月8日(水)～18日(土) 場所：沖縄(宮古島) 募集人数：50名程度

応募資格：①全日程に参加可能であること ②指導教官からの推薦があること

③自身の研究成果についてポスター発表を行えること、または、量子情報の未来を開拓する新しい研究テーマの提案ができること

応募方法等、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/summerSchool.html

■量子制御ワークショップ「PRACQSYS 2012」開催のお知らせ

東京大学の古澤明教授がオーガナイザーを務める、量子制御のワークショップが下記の通り開催されます。参加登録等詳細については、下記websiteをご覧ください。

日時：2012年9月10日(月)～13日(木) 場所：東京大学 小柴ホール 後援：APSA、FIRST、GCOE

参加登録：右記websiteより登録してください。http://pracqsys2012.com/index.php

■ICSCE-6開催のお知らせ

スタンフォード大学の山本喜久教授がオーガナイザーを務める、半導体凝縮相に関する国際会議が下記の通り開催されます。参加登録等詳細については、下記websiteをご覧ください。

日時：2012年8月27日(月)～31日(金) 場所：スタンフォード大学

参加登録：右記websiteより登録してください。http://icsce6.stanford.edu/index.html

●AWARD

2011年10月 第6回(2012年)日本物理学会 若手奨励賞(領域1) 吉川 豊先生(京都大学)

2012年 3月 大阪スマートエネルギー・ビジネスシーズコンペ 最優秀賞 森田 靖先生(大阪大学)

2012年 3月 大阪スマートエネルギー・ビジネスシーズコンペ 最優秀賞 佐藤 和信先生(大阪市立大学)

海外研究動向 Overseas Research Activity

アンサンブル量子計算の研究動向



大阪大学 教授 北川 勝浩

アンサンブル量子計算、特に核磁気共鳴(NMR)を用いた量子計算の研究動向について紹介する。NMRを用いた量子計算の研究は1996年のMIT／ハーバードの2つのグループの提案に始まる。いずれも室温の熱平衡状態というエントロピー最大近傍の乱雑な状態を物理的な初期状態として実験を行いながら、 n 量子ビットの純粋状態 $|00\cdots 0\rangle$ を初期状態としたかのような出力を得る疑似初期化と呼ばれる実験上の工夫が提案の核心であった。疑似初期化では、 2^n 個の状態の混合からただ1つの純粋状態に対応する出力を抽出するので、原理的に信号強度が $1/2^n$ になり、それを補うために古典計算と同じ指数的な資源を要求するという意味で量子計算の優位性を発揮することができない。そのため疑似初期化に基づくNMR量子計算は真の量子計算ではないとみなされた。

この問題を解決するには、物理的な初期化によってエントロピーを下げ、さらにデータ圧縮などのアルゴリズム的な初期化を併用すればよく、我々は主にペンタセンの三重項状態を用いた動的核偏極による物理的な初期化の研究に取り組んできた。海外では2004年のAnwerらによるパラ水素を使った初期化、2005-08年のBaughらによる熱浴アルゴリズム冷却の実験などがある。これらの初期化を行うと、NMRでも指数的な資源を必要としない真の量子計算が可能となる。

初期化の問題を除けば、NMR量子計算は、12量子ビット程度までの分子が存在し、NMR分光で長年培われたパルス技術によって、ユニバーサルな量子回路が比較的精度良く実現できるという利点があり、最近でも盛んに研究されている。量子アルゴリズムでは、2001年にVandersypenらが7量子ビットの分子でShorのアルゴリズムによる15の素因数分解を行った。2012年にはXuらが4量子ビットの断熱量子計

算で143の素因数分解を行った。新しい方向としては、少し遡って、2002年にWeinsteinらが、量子フーリエ変換を用いて量子パイコね変換を実装し、3量子ビットで量子カオスの実験を行った。2005年にRyanらは、3量子ビットで4点の離散時間量子ウォークの実験を行った。2009年にPassanteらとMarxらは結び目理論のJones多項式を近似計算した。

NMRを用いた量子シミュレーションの実験は1999年頃から行われていたが、PengとDuらは2005年にハイゼンベルグ・スピン鎖の量子相転移のシミュレーション、2010年に水素分子の基底状態エネルギー計算を行った。

最近では、パルス波形を数値的に最適化してさらに高精度のユニタリー変換を実現する方法として、2002年にFortunatoらが提案したStrongly Modulating Pulseや2005年にKhanejaらが提案したGRAPE(Gradient Ascent Pulse Engineering)などの手法が用いられており、上述したさまざまな量子計算実験を可能にしている。これらの手法は他の量子系にも応用可能であり、実験精度の向上におおいに資すると考えられる。

量子誤り訂正は以前から実験されてきたが、2011年にMoussaらが3量子ビットの固体分子で位相誤り訂正を連続して行った。またSouzaらはフォールトトレラント量子計算に有用なマジック状態蒸留を行った。アンサンブルでは射影測定ができないことがフォールトトレラント量子計算への最大の障害と考えられる。射影測定を用いずに、量子ビットの初期化と制御演算によってフォールトトレランスを確保するスキームの構築が今後の課題である。

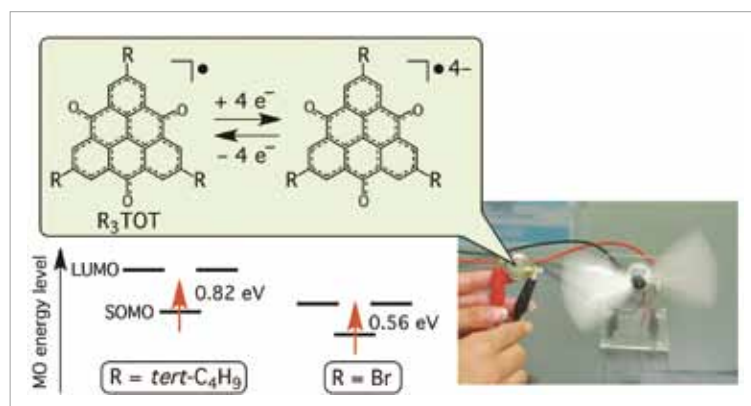
有機スピン分子を利用した高容量分子スピン電池の開発

論文情報	Yasushi Morita, Shinsuke Nishida, Tsuyoshi Murata, Miki Moriguchi, Akira Ueda, Masaharu Satoh, Kazunori Arifuku, Kazunobu Sato and Takeji Takui, "Organic tailored batteries materials using stable open-shell molecules with degenerate frontier orbitals", Nature Materials 10, 947-951 (2011)	大阪大学 森田 靖
関連URL	http://www.nature.com/nmat/journal/v10/n12/full/nmat3142.html	

スマートフォンの急速な普及や電気自動車の実用化により、リチウムイオン電池 (LIB) に代わる高性能二次電池の需要が高まっており、有機物は新たな電極活物質として有望視されている。有機ラジカルポリマー化合物を用いた電池では、すでに LIB に匹敵する出力電圧と高いサイクル特性が実現されているが、その放電容量は LIB に比べて低いことが短所であった。我々のグループでは、分子スピン量子ビットの開発を目指して、空気中でも安定に取り扱える有機スピン分子の開発を行っている。

我々が独自に設計・合成したトリオキソトリアンギレン (TOT) は、単占分子軌道と2個の縮重した最低非占有分子軌道を有する中性ラジカルであり、一分子当たり4電子授受能を有する。TOT の誘導体である (*tert*-C₄H₉)₃TOT および Br₃TOT は、市販の原料から短段階で合成でき、空気中でも高い安定性を有する。(*tert*-C₄H₉)₃TOT を正極活物質に用いた二次電池の初回放電容量は、311 Ah/kg であり、LIB (150~170Ah/kg) の2倍近い値を実現した。さらに、Br₃TOT を用いた場合、平均出力電圧とサイクル特性が大幅に向上した。こ

れらの有機スピン分子は、「合成有機スピン化学」の設計概念に基づいて合成されたことから、この新しい高性能二次電池を「分子スピン電池」と命名した。TOT 類が有する電子スピンの非局在性や高い安定性は、従来の有機スピン分子とはまったく異なっており、分子内での電子スピン—核スピン相互作用や分子間での電子スピン—電子スピン相互作用を利用した量子シミュレーターへの展開が興味深い。



集積可能な2経路干渉計と固体飛行量子ビットの制御を実現

論文情報	Michihisa Yamamoto, Shintaro Takada, Christopher Bäuerle, Kenta Watanabe, Andreas D. Wieck and Seigo Tarucha, "Electrical control of a solid-state flying qubit", Nature Nanotechnology 7, 247-251 (2012)	東京大学 樽茶 清悟
関連URL	http://www.nature.com/nnano/journal/v7/n4/abs/nnano.2012.28.html	

古くはヤングの光の干渉実験で、より最近では二重スリットの実験などで知られる2経路干渉は、光や電子といった量子の波としての性質 (= 位相情報) を最も端的に示す現象です。このような2経路干渉が集積可能な固体中で実現すれば、電子の波としての性質を利用した量子力学的なデバイスを、量子ドットのような固定系ではなく、開放系において構築することが可能になります。しかし、見た目の単純さとは裏腹に、その実現は困難を極め、世界中の研究者の挑戦を跳ね返し続けてきました。その難しさは、個々の電子が2つの経路の繋ぎ目で反射波と干渉すると、各経路で得た位相情報の多くを確実に損失してしまうことに由来しています。その結果、電子の到達を観測する電極では、各経路で得られる位相があたかも固定されているかのように見えることがよく知られています (これは位相剛性と呼ばれています)。

本研究では、一次元細線を2本並べ、これらを2つの経路として用いました。そして、干渉を起こすために、これらの細線の両端を量子力学的なトンネル結合によって結びました。本研究チームは、トンネル結合の強さを電氣的に調整することによって経路の繋ぎ目 (トンネル接合面やその出入口) で各電子が通過する経路を量子力学的に限定し、集積可能な2経路干渉計を初めて実現しました。更に、2経路干渉計中で「どちらの経路に電子が存在するか」とい

う量子力学的な状態を“飛行量子ビット”として定義し、その状態を電氣的に任意に操作できることを示しました。この技術を利用することにより、量子情報を半導体基板上で自由に伝送したり、高速で運動する電子を使って量子情報を従来と比べて遥かに高速で制御したりすることが可能になります。また、その電氣的制御の容易さや長いコヒーレンス長から、飛行量子ビットを用いた固体量子素子の集積化が期待されます。

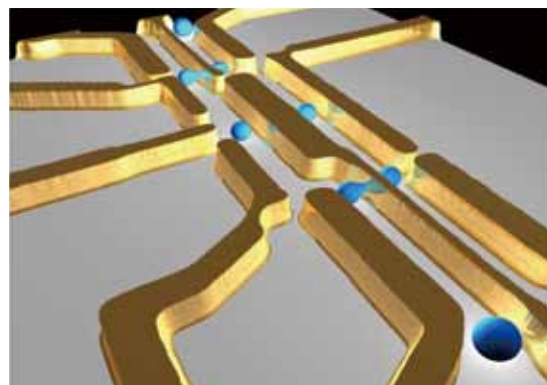


図1 本研究で用いた半導体試料の電子顕微鏡写真を元に作成した2経路干渉計のイメージ図。半導体表面にゲート電極を配することにより、一次元細線からなる経路を2つ並べた (http://www.t.u-tokyo.ac.jp/pdf/2012/120319_YTFB.pdf 参照)。

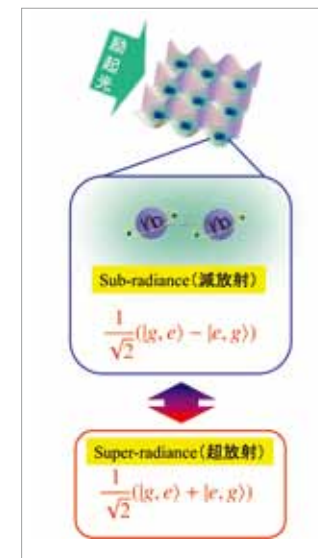
光格子中でディッケの減放射状態を生成

論文情報	Yosuke Takasu, Yutaka Saito, Yoshiro Takahashi, Mateusz Borkowski, Roman Ciurylo, and Paul S. Julienne, "Controlled Production of Subradiant States of a Diatomic Molecule in an Optical Lattice", Phys. Rev. Lett. 108, 173002 (2012)	京都大学 高橋 義朗
関連URL	http://prl.aps.org/abstract/PRL/v108/i17/e173002	

原子やイオンを用いた量子情報処理において、光との相互作用を有効に活用できることは大きな特徴です。二つの原子、特に、それを光の波長程度以内に用意した場合に、光との相互作用はどのようにふるまうか、というのは極めて基本的な問題で、1950年代にディッケによって理論的に研究されました。ディッケは自然放出レートが2倍に増強された超放射 (super-radiance)、および自然放出を起こさない減放射 (sub-radiance) という現象が起こることを明らかにしています。ほぼ同時期に、原子分子の分光研究においても同じ問題が議論されていました。

超放射・減放射ともに、二つの原子の量子エンタングル状態に対応していますが、超放射現象の方は、様々な系で実験が行われてきた一方で、減放射現象は、単一原子の場合よりも光との相互作用が弱くなるため生成・観測が難しくなり、ほとんど実験が行われてきませんでした。この減放射状態は、自然放出というデコヒーレンスに対して二つの原子が逆位相に 대응することを利用してデコヒーレンスを回避している状態であり、一種のデコヒーレンスフリーサブスペースの状態であると言えます、大変興味深いものです。

我々は、最近の研究で、光格子中に導入したイッテルビウム原子のモット絶縁体状態を生成することにより、トラップの中心付近に一格子サイトに2原子が充填された状態を用意して、そこに光会合用レーザーを照射し、その励起波長を選択することにより、超放射状態および減放射状態を選択的に生成することに成功しました。励起スペクトルの共鳴位置、スペクトル線幅、そして、ゼーマン効果などを調べ、減放射状態の同定に成功しました。特に、減放射状態への励起スペクトルは kHz 以下のスペクトル幅をもつことが期待されるため、光格子中に生成された量子多体系の高分解能分光としての応用も期待されます。



特許出願

量子メモリーなど他の量子系との結合に有利な超伝導磁束量子ビット

発明名称	超伝導磁束量子ビット回路	特許出願公開番号	特開 2012-15878	国立情報学研究所
発明者	ズー・シャオボ、齊藤 志郎、ケンブ・アレクサンダー、仙場 浩一 (日本電信電話株式会社)			仙場 浩一

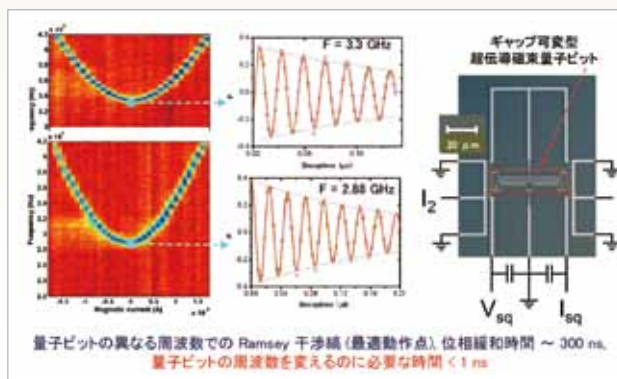
従来の超伝導磁束量子ビットでは、閉回路を時計廻りと反時計廻りに巡る2種類の永久電流状態間のトンネルエネルギーは素子作製過程で決定され、動作中には変えられませんでした。量子ビットを構成するサブマイクロメートルの微小なジョセフソン接合の1つを超伝導量子干渉素子 (SQUID) で置き換え、この SQUID を貫く磁場を高速に制御することによって、永久電流状態間のトンネルエネルギーをその場で所望の時間変えることのできる超伝導磁束量子ビットを開発しました。また、デコヒーレンスの影響が最小となる磁束動作点での量子コヒーレント (Ramsey) 振動の観測にも成功しました。この素子はデコヒーレンスの観点から有利な最適磁束バイアスで動作するため、異なるエネルギー (周波数) をもつ他の量子系への状態転送や量子もつれ形成にも有利です。この素子には主に次のようなメリットがあります：

- ①この種の量子ビットを1個作製すれば、トンネルエネルギーの異なる量子ビットを多数作製する必要はありません。実験に使う量子ビットのエネルギー (周波数) 目的に合わせて、必要な時、その都度 素早く選択できます。
- ②量子回路中のジョセフソン接合を微小 SQUID 化することにより、元のジョセフソン接合部分の最大超伝導電流すなわちジョ

セフソンインダクタンスを高速に制御することが可能になりました。この技術を使えば、量子ビットとマイクロ波光子等の他の量子系との相互作用の大きさを弱結合から超強結合まで自在に変えることができます。

- ③エネルギー共鳴・離調型量子系結合スイッチとして磁束量子ビットの重ね合わせ状態を別のエネルギーの量子バスや量子メモリーへ転送する可能性が拓かれます。

この特許で使われた技術は、NTT 物性科学基礎研究所での研究から得られたものです。



量子ビットの異なる周波数での Ramsey 干渉縞 (最適動作点). 位相緩和時間 ~ 300 ns. 量子ビットの周波数を変えるのに必要な時間 < 1 ns.

朝日賞受賞 香取秀俊先生

本プロジェクト量子標準サブテーマリーダーの香取秀俊先生（東京大学）が「光格子時計に関する研究」で2011年度朝日賞を受賞されました。

受賞を記念し、香取先生に受賞についてのご挨拶を頂きました。朝日新聞社の金井様には朝日賞についての概要を、同じく朝日新聞社の小坪様には1月に開催された授賞式の様子をお伝え頂きました。また学生時代からの香取先生の恩師であり、本プロジェクトのアドバイザーを務めていらっしゃる電気通信大学の清水先生、長年香取先生と共同研究をされている本プロジェクトメンバー産業総合技術研究所の洪先生からお祝いの言葉を頂きました。

朝日賞とは

学術、芸術などの分野で傑出した業績をあげ、日本の文化、社会の発展、向上に多大の貢献をされた個人、団体に贈る賞です。1929年（昭和4年）に朝日新聞創刊50周年を記念して創設しました。毎年元日紙面で発表し、受賞者は2011年度までに443人26団体に上ります。

文化、福祉、体育の3部門に分かれていた時期もありましたが、1975年度に総合賞とし、福祉と体育は独立した賞になりました。物理学者の小柴昌俊さん、化学者の野依良治さんはじめ、後にノーベル賞や文化勲章を受ける方が多く、「民間の文化勲章」とまで言われています。1992年に朝日新聞文化財団が授賞事業を引き継いでいます。全国の大学、研究機関、有識者に推薦を依頼し、財団の選考委員会が決定します。受賞者には正賞のブロンズ像と副賞500万円をお贈りしています。

2011年度は、香取先生と、美術家の横尾忠則さん、作曲家の富田勲さん、社会学者の上野千鶴子さん、免疫学者の坂口志文さんの5名が受賞されました。

〔朝日新聞社 CSR推進部 金井 直樹〕

研究を紡ぐ

東京大学 香取 秀俊

今回の受賞につながる研究は15年前、マックスプランク量子光学研究所（MPQ）で2年半のポストドクを終えて帰国し、グループリーダーとして参加した五神先生のERATOプロジェクトに遡ります。MPQでは、名立たる研究者が最新の成果を携え毎週のように来訪し、世界の研究動向をつぶさに見たのが最大の収穫でした。反面、思い通りに実験が進まない歯がゆさから、自分で思う存分手を動かせる環境を渴望していました。

日本で研究を始めたのは、かながわサイエンスパーク（KSP）の一室、APSに入会して購読したPRLだけが世界との接点でした。当時はBEC花盛り、しかしMPQで海外の情報流通を見た私には、海外の研究のフォローは負け戦にしか思えなかった。「MPQで見聞きた世界中の研究者が大切に研究、だけど誰も考えていないこと」を羅針盤に研究に着手しました。



普通じゃない原子時計—光格子時計—に賭けた思いです。

先行研究がないので情報収集の必要もなく、井戸君（現・NICT）たちと実験室に閉じ籠る楽しい日々、KSPの離れ小島でまさにガラパゴス的な進化を辿った研究です。

[学生時代の希ガスの冷却で学んだこと] に「MPQでのイオントラップ実験」を足して、原子物理の研究者が大事にする精密計測のエッセンスを振りかけて「光格子時計」が誕生しました。今までの研究経験、恩師・同僚との議論の断片がきれいに紡がれた瞬間でした。

東大の最初の学生の高本君（現・理研）がうまく実験を立ち上げ、洪さん（産総研）の国際原子時リンク、その間、花村先生のPRESTO、山本先生のCREST、FIRST量子標準と、光格子時計の研究は、多くの共同研究者と研究アドバイザーに恵まれ進展しました。4年生で清水研究室に配属されてから四半世紀、この間にお世話になった恩師、研究・議論をともにした同僚、友人に心より御礼申し上げるとともに、この奇跡的な出会いに感謝いたします。



熱い思い 聴衆を魅了

朝日新聞東京本社 科学医療部 小坪 遊

1月27日、帝国ホテルで朝日賞の授賞式が開かれました。「私は場違いじゃないですかねえ」。昔からファンだったという美術家の横尾忠則さんら、他の受賞メンバーを前に、最初は少し心配をしていた香取秀俊教授でした。

しかし、スピーチが始まると「非常識なアプローチで大きな

壁にぶつかってみたかった」などと研究への熱い思いを語りました。

締めくくりには、「壇上の私の時間は、重力が弱い分、皆さんの場所より少しだけ早く進んでいます」と、光格子時計で見てくる世界を紹介していました。会場の一番後ろにいた私には、観衆が何人か動いているのが見えました。もしかしたら思わず腕時計を見た人がいたのかもしれない。

後で社会学者の上野千鶴子さんからは「香取さん、スピー

チ面白かったわよ～」と笑顔で直接褒められ、香取さんの顔からも笑みがこぼれていました。

レセプションでは、ゆっくり食事をとる間もなく、研究者や記者らと談笑していました。会場にはいすもありましたが、立ちっぱなしでした。香取さんの顔がうっすら赤くなっていたのはお酒だけでなく、次の研究への気持ちが高まっていたせいかもしれません。

レセプション会場隣には、受賞者の業績などを紹介するコーナーがありました。香取さんのコーナーには、研究を紹介した論文の別刷りが置かれていました。ご本人が「研究を広く知って欲しい」ということで希望されたものです。

記事やパンフレットでは研究のごく一部しか紹介できません。きっと香取さんの話を聞いて、「もっと知りたい」と、興味を持たれたのでしょうか。日頃は量子情報の分野などとは縁の薄そうな方も、手に取ったり、持ち帰ったりしていました。



香取君、朝日賞受賞おめでとうございます。

電気通信大学 清水 富士夫

受賞対象になった時間標準の研究は孤立した原子のスペクトルをより高い精度で測定するという比較的地味な研究ですが、自然科学の研究にとっても、また、工学的にも欠かすことのできない基礎研究です。精度を向上するにはより振動数の高い原子遷移を用いるほうが有利なわけで、マイクロ波領域にある超微細構造遷移を使った現在の時間標準から、電子の主量子状態が変わる光の領域の遷移に置き換えるための研究が行われている。ここで一番問題になるのが原子を（もっと正確には標準に利用する原子の量子状態を）いかにして自然な状態に保つかである。まず、ドブラーシフトを消すために原子は静止していなければならない。このため、原子を空間に留めるために使う相互作用とスペクトルに關与する原子の内部量子状態を決める相互作用がいわば独立しているイオントラップ中のイオンが次期時間標準の候補として長年研究されてきた。香取君は、たとえこの二つの相互作用が影響を及ぼしあっても標準遷

移にかかわる二つの量子状態に同じように作用するならば問題ないはずと考え、この条件を満たす波長で作った光双極子トラップに多数の中性原子をトラップした装置を提案した。この提案は大きな反響を呼び、わずか数年で、彼のグループをはじめとして多数の研究機関で、当時、遙かに先行していたイオントラップと同じ性能の標準を作るのに成功した。今の時点ではイオンと中性原子のどちらが次期標準に選ばれるか決まっているわけではないが、香取君の光格子時計が選ばれる可能性は十分高いと思われる。今日、日本の物理関係の研究レベルは非常に高くなっているが、基本的なところから初めてというインパクトの高い研究は意外と多くないのではないだろうか。

学部4年の時から、学位を取ってマックスプランク研究所のPDとして就任するまでの長い間研究を共にしてきた香取君が、このようなインパクトある研究で受賞したことは喜ばしいことです。今後、益々のご活躍を期待します。

香取さんとの出会い、そして共同研究

産業技術総合研究所 洪 鋒雷

香取さんと最初に出会ったのはアメリカコロラド州のボルダーであった。ボルダーという町は、マラソンランナーの活躍によって日本でも有名なが、大学や複数の国立研究所を有する科学都市である。1998年当時、私はヨウ素安定化Nd:YAGレーザーの周波数を測るために、JILA研究所のホール（John L. Hall）研究室に滞在していた。あいにく不在だったホールさんの代わりに、訪ねてきた香取さんを研究室に案内し、いろいろな実験を説明した。この交流で、強く印象に残ったのは、香取さんの研究テーマに関する見通しの良さと確固たる信念であった。当時の私は、次世代の原子時計として、イオントラップにたいへん興味を持っていたが、香取さんはイオンよりも中性原子のほうが絶対良いと言い切っていた。2001年の中性原子を用いた光格子時計の提案から研究の成功、そして今日の朝日賞の受賞、すべては神様がまっすぐなレールを引いたように見えるが、ご本人の物理学に対する知見と努力によるものだと言ひ様がない。

さて2004年頃、いよいよ光格子時計の周波数を測ろうと、産総研の実験器材を東大の香取研に運び込み、私も足繁く本郷へ通った。共同研究は多くの成果を生み出したが、ただま

さかその後5年間も通い続けることになるとは思っていなかった。それは、こちらから持ち込む測定道具を次から次へと精度の高いものへと替えても、ついに光格子時計自身の精度に届くことがなかったからである。ならば、光格子時計を基準に他のものを測ったほうが精度が上がり、時間の単位である秒の定義も光格子時計にしたほうがいいということになる。ホール博士は、レーザー分光とレーザーの周波数計測の研究業績が認められて、2005年ノーベル物理学賞を受賞している。香取さんも、という声が周りから聞こえてくる。神様はレールの向かう先を知っているに違いない。朝日賞受賞、おめでとうございます！



～若手研究者コミュニティ 関東・関西学生チャプターに聞く～「コミュニティの継続と新たな挑戦」



量子情報・量子物理に携わる学生・ポスドクなど若手研究者が中心となり研究会等を運営している、量子情報学生チャプター（以下SC）は、JST-CREST「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」主催のサマースクールの参加学生たちによって、2008年に関東と関西に独立してスタートしました（現在はFIRST-QIPPより活動の一部をサポート）。精力的に新しい試みに挑戦している関東と、つながりを大事にしながらわいわいやっている関西の考え方の違いに迫るべく、関東・関西SCの運営委員代表のお二人と今年度4月からそれを引き継ぐ新しい運営委員のお二人に、活動の様子とこれからの意気込みなどを熱く語っていただきました。

▶活動の様子を教えてください。

杉山（関東・現代表） 若手間の交流の促進を目的に、講演会、ポスター発表、実験室見学会を含めた年4回の研究会を開催しています。講演会では学部生レベルの量子力学の知識で理解できるような、分野の初歩的な講義をお願いしています。

玉手（関西・現代表） 関西は年に2回ほど、研究室見学とセミナーを関西の大学で開催しています。講演内容は、関西の大学の人たちに自分たちの研究室で行っている内容を学部生にもわかりやすいよう初歩的なレベルで話してもらっています。関西はSCが研究室の行事に組み込まれていて、幹事は持ち回り制。研究室単位で予定を合わせて開催日程を決定しています。

▶講演の内容はどのように選んでいるのですか？

玉手 専門的な内容は学会などで聞けると思うので、身近なところでこの分野の雰囲気がつかめるようなきっかけになればいいなと思っていますね。担当幹事の人が考える今面白そうな人、なるべく若い人、実際にその研究をしている人、に喋ってもらおうという趣旨でずっと続けてきています。

杉山 量子情報って境界領域じゃないですか。物理と計算と通信と数学と…実験にしても光学・超伝導・半導体・冷却原子・分子・NMRなどいろいろな実現手段があって。P.W.Shorさんの最初の提案というのは情報や計算などいろんな知識を総動員されていますし、最近では光と物質の系を組み合わせたりと、分野間の協力によって新しいものを作っていったりしていますよね。今後量子情報のブレークスルーのためには違う分野の人と交流していくのが大事だと思うので、実験であればいろんな物理系、理論であれば物理に限らず量子制御・通信・計算などをなるべく入れていこうとしています。

▶発足から3・4年が経ちましたが、活動の様子や参加者の層などに変化はありましたか？

玉手 僕はあんまり関西はかわってない気がしていますね。本当に集まることが目的…みたいなノリなので（笑）。変わったのは、どんどん人数が増えてきている、ということくらいですね。

杉山 このあいだの関西SCは80人を超えていたよね？関東は多くて100人、平均的に40人前後。参加者は理論の人が多ですが、量子情報を今まであまりやっていなかったり、知合いが少ないという人でも気軽に来られるようにと、オープンな会を意識して取り組んでいます。



玉手 修平

京都大学 博士課程2年
関西学生チャプター
運営委員代表

杉山 太香典

東京大学 博士課程2年
関東学生チャプター
運営委員代表

境界領域であるからこそ、 分野の交流を大切に

玉手 関西でも最近は関東からも来てくださる人が増えてきたので、交流が広がってきているのかなと思います。4年生でも素人質問ができるような雰囲気があるといいですね。関東は積極的な修士1・2年生の人たちが参加しているのかなというイメージなんですけど、どうでしょう？

杉山 今は学部生や修士1年生の参加者が多いですね。下の学年の人でも積極的に発言してくれる人がいてくれると助かります。若い人ばかりだと縦のつながりがなかなかできないのが問題ですね。

▶この4月からの運営委員の世代交代にあたって、今後の方針について何か新しいアイデアなどはありますか？

佐藤（関東・新代表） 関東はこの四月から、早稲田・理科大などいろいろな大学にまたがって運営委員を8人に増やしたんですよ。運営委員は今少ない実験家と理論家が半々くらいになるとバランスがいいですね。学部4年生から修士2年生は外のことを一番知るべき時期で、博士課程の人たちは下を育てることは仕事の一環かなと思うので、各研究室の博士課程の人たちにはもっと下を積極的に連れてきて欲しいです。今はまだそういう感じではないんですけど、僕らくらいの若い世代が育っていったら、そういう文化が根付いていくんじゃないかな。まだ学会発表をしたことがない学部生や修士の学生さんがポスターセッションの練習の場として使って欲しい、という意味で僕はポスターセッションを一番大事にしたいと思っています。

土井（関西・新代表） 本番の学会では失敗できないけど、失敗

してもいい場所が用意されているというのはありがたいですね。

佐藤 それから新しい試みとして、年に何回か、一つの分野についてある程度詳しい人を講師と呼んで、一日中座談会のような形で最初から最後まできちんと勉強するという、例えばHolevo boundみたいなコアなトピックに特化したインフォーマルな勉強会も考えています。易しく広くというのと深くコアにというのとうまく二層化できるといいなと思っています。

玉手 コアなミーティングをSCでやる意義というはあるんですか？コアな人たちが集まらないような気もするんですが（笑）

佐藤 僕は今の方針のマンネリ感を打破したいと思っています。関東は組織を立ち上げるのに凄くエネルギーが要るので、SCが立ち上がっているならそれを拡張して試していこうかなと。



土井 悠生

大阪大学 修士課程1年
関西学生チャプター
運営委員新代表

佐藤 貴彦

東京大学 修士課程2年
関東学生チャプター
運営委員新代表

強いつながりを保ちながら、 無理なく続けていくために

▶関東と関西では運営についての考え方に少し違いがあるようです。

玉手 関東と合同で研究会をやろうと言われたことがあったんですが、お断りしたことがあります。関東と関西では運営方針が違うので一緒にやるのは難しいと感じたからです。関西はあまり無理をせず、強いつながりを保ったまま、比較的足を運びやすい場所で続けられたいなと思っています。コミュニティのつながりを続けていくというのと、新しい参加者を積極的に増やしていくという作業を両立させるのは難しいと思うんですよ。例えば修士の学生さんが発表を失敗してもよい場所にしたいのに、高度な質問をする知らない参加者が多かかると、緊張感が出てきて難しくなってしまうので、どちらかを切り捨てなければならないといけな。実験で困ったことがあったら携帯で気軽に相談できるようなつながりを保っていくのも一つのコミュニティと

してはいいんじゃないかな。

▶講演会後の懇親会が盛り上がっていて、とても楽しそうなのもSCの魅力ですね。団結力を保つための秘訣は？

玉手 関西は運営は何もしないというのが方針なんで（笑）飲み会がメインなんです。（※飲み代はあくまで個人負担です）幹事や発表者は飲み会で選んでいるし。

佐藤 関東は飲みが弱いですかね？

杉山 関西の飲み会のノリは凄いいよね。この前の関東SCでは僕も大声出したりして盛り上げようと奮闘したんだけど（笑）

土井 新しい学生にとってはコミュニティに入っていくところが難しいですよね。僕は量子情報に入って最初のイベントは「サマースクール」（FIRST-QIPP 夏期研修会）だったんですよ。いきなりいろんな分野のいろんな歳の人たちと一対一で討論できたり、こういうすごい文化があるんや！って。とても恵まれているなと思いましたね。僕は研究室の一期生で先輩もいなかったのサマースクールののおかげで、そこから先はすぐ入っていきやすかったですね。こうした土台の上にSCも続いていると思います。

玉手 サマースクールって、強制的に一週間二週間とみんなが隔離された場所に詰め込まれて、自由時間にはみんなで遊ぶしかない、というような環境なのがいいですね（笑）そこで10人くらいの仲のいい同世代の友達ができ、みんなが集まるならSCいこうか、みたいな流れができていると思います。FIRSTの恩恵が一番受けているのはきっとサマースクールですね。

杉山 僕が参加したシドニーやレズーシなど海外のサマースクールでは、みんなでカヤックをしたり山に登ったりして、一気に仲良くなりましたね。沖縄のサマースクールは夜のポスターセッションがすごかったみたいです。

▶最後に、今後の抱負を教えてください。

土井 関西は今とてもいい雰囲気を保ったまま、つながりが途絶えないように定期的に続けていきたいです。今はシニアメンバーが若い世代を引っ張ってくれているので、これから若い世代でそんな強力なつながりを作っていく場所としてはやっぱりサマースクールに期待をしています。運営方針を工夫したいという若い人がいたら、その企画を上にあげられるような体制にできればいいなと思います。

杉山 関東の新運営委員もとてもやる気になっているので、アンケートでいただいている内容も反映して、実験家と理論家のお互いの要求が満足できるようなSCになることを期待しています。（※学年・所属等はインタビュー時2012年3月26日のものです）

インタビュアーの声

▶国立情報学研究所
宇都宮 聖子

▶京都大学
山崎 歴舟

関東・関西SCそれぞれの立ち上げメンバーとして今回お話を聞かせていただきました。量子情報の分野の特徴と課題を鋭くとらえ、常に新しい挑戦を続けていこうというやる気に満ちた関東SCは、さまざまな大学や研究所との幅広いネットワークを生かして、量子情報の多様性をわかりやすく特に若手の学生に伝える工夫がなされています。一方多くのメンバーが研究室単位で毎回出席し、コミュニティの中での強い連携を軸に相互理解を深めている関西SCは、組織に対する思慮が深く暖く、活気と団結力が信頼の上に自然と形成されてきたものだと感じました。それぞれの文化を大切に、今後もみんなが楽しめる場所を提供していただけたらと、陰ながら応援しています。

関東関西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！

学生チャプターの参加者は、所属や分野によらず仲が良く、とにかく元気でノリがいい。
そんなみんなの集まりにお邪魔して、若手研究者の率直な意見を聞いてみました。

学生
チャプターの
どこが好き
ですか？



川久保 亮 (京大D3) いろんな人と知り合えたこと！
知田 健作 (京大D2) 自分と違う考え方の人たちと交わって視野が広がった。どんな分野の人でもおいでっ！という暖かい雰囲気が好き。
玉手 修平 (京大D2) 昔知らなかった話も「あ、この話あの人の専門やな」という感じで馴染みのある単語も内容も増えて興味の対象が広がった。
田淵 豊 (阪大D2) 先輩たちが若い世代に気軽に絡んでくれて、ポスターや講演でも気軽に絡める雰囲気がとてもいい。幹事をやるときに大事な飲み会。
その他大多数 みんなと飲みたくて集まってる。飲み会が楽しい！強烈に仲良くなったのは沖縄のサマースクールが原点。関西が仲が良いのは飲み会のおかげ！

量子情報の
どんなところが
楽しくて研究を
していますか？



田中 咲 (慶大M2) Conceptualに大事な本質を、実験で実現できる。学際的・異分野間における共同研究による研究の相互発展。
岡村 和弥 (京大D1) 普遍性と個別性の両極端の追求が可能。Backgroundが異なる人でも議論しやすい。
松尾 貞茂 (京大D1) 量子情報は難しい式を使っているけどよくわからない…
土井 悠生 (阪大M1) 目の前にある材料・自分の手で物理の根源に触れることができる。複雑な量子現象がシンプルな系で発現するのが興味深い。
小川 和久 (京大M1) 理論がシンプルでわかりやすい。
渡辺 優 (東大D3) 他に楽しみを知らない。ノリで。純粋に楽しい！
下岡 考明 (阪大M1) 分野は狭いが内容は深い。一人一人ですべてやってもドンブまる。みんなからいろいろな内容を聞けて自分の見識が広がる。

今後の
量子情報について
どう思いますか？



根来 誠 (阪大助教) 各大学に量子情報の研究室がもっと定着してほしい。
大塚 朋廣 (東大PD) 光デバイスで扱われていた波の性質から一歩進み、エンタングルメントなどを駆使すればもっと面白いことができるはず。
鹿野 豊 (分子研 AP) 量子情報自体は架空の学問。コンセプトが残せるようにしていきたい。
沙川 貴大 (京大 特定助教) ファインマンダイアグラムなど、どの分野でも使えるユニバーサルなツールとして広がってほしい。
杉山 太香典 (東大D2) ユニバーサルな量子計算機を実現してほしい！
玉手 修平 (京大D2) 量子情報はものの見方の学問なので、物理全体の中での共通言語として広がっていくといいと思う。
榎本 尚之 (東大D3) 量子計算のための技術が他の分野で役に立てばよい
中田 芳史 (東大D2) 量子情報で培われた手法・技術は物理全体の成長に貢献できると思う。そういうのって夢があつていい。

(※学年・所属等はインタビュー時2012年3月26日のものです)



第10回関西SC講演会



2012年3月26日 日本物理学会2012年春季大会後の懇親会にて



第9回関東SC 古澤研究室見学会

サイエンス アウトリーチ

高校生10名を迎え、2泊3日の合宿プログラムにて、講義と実験を通して量子の世界を体験していただきました

高校生のための最新科学技術体験合宿プログラム スプリング・サイエンスキャンプ2012 「量子の世界を見てみよう～光と物質の量子的なふるまい～」

■日程 平成24年3月19日(月)～3月21日(水) ■会場 東京大学 理学部物理学科五神研究室・工学部物理工学科樽茶研究室
■参加人数 高校生10名 ■主催 独立行政法人 科学技術振興機構 <http://ppd.jsf.or.jp/camp/>
■講師 小西 邦昭 (東京大学)、高倉 樹 (東京大学) ■受入実施機関 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

講師からのコメント 高校生と見た量子の世界

この三月に、スプリング・サイエンスキャンプがNIIの支援のもとに東京大学で開催され、樽茶研究室の高倉さんと共にその講師を務めさせて頂きました。今回のサイエンスキャンプのテーマは、「量子の世界を見てみよう～光と物質の量子的なふるまい～」であったため、参加者を2グループに分け、樽茶研究室では金属細線及び半導体ポイントコンタクトの量子化コンダクタンスの計測を、筆者の所属する五神研究室では単一色素分子からの発光の二次の光子相関関数の計測を行いました。どちらの実験も、光や物質の量子性を体感できる典型的な実験ではありますが、大学生の実験実習でもなかなか行わないような高度な実験テーマです。

初日は各講師による講義と実験室見学、二日目はそれぞれのグループに分かれて実験、三日目は実験結果のまとめとグループごとのプレゼンテーションという流れで進められました。光子相関計測のグループでは、光学系はこちらで事前調整を行いましたが、希薄分散試料の準備、試料のセット、単一分子の位置同定、光子相関測定という一連の流れを、実際に高校生の皆さんに行ってもらい、見事にアンチバンチングを観測することに成功しました。樽茶研の実験でも明瞭な量子化コ

ンダクタンスが観測されており、三日目の発表会でもお互いの実験結果の報告で大いに盛り上がっていました。

今回は、最先端の実験研究の現場を体感してもらうという趣旨のもとハイレベルなテーマ設定であったにもかかわらず、何とか理解しようと頑張る、得られた実験結果に一喜一憂する高校生の姿が非常に印象的でした。2泊3日の期間を通して、参加者同志の横のつながりもできたと思われます。新しい興味深い現象を目の当たりにしたときの高揚感や高校生活でも共有できるものであり、このプログラムが参加者にそのような面白さを伝えるきっかけとなるものであったらうれしく思います。 [東京大学 小西 邦昭]



参加学生の声 初めて垣間見た量子物理

科学技術振興機構主催のサイエンスキャンプで東大の研究を体験させて頂いた高校生です。

今回はキャンプの感想という形でこの量子ニュースに原稿を書かせていただくことになりました。

量子論について、簡単なイメージは持っていたのですが、やはり本から得たような知識であり、今の職業物理学者達が具体的にどんな研究をしているのかについては全く想像がついていませんでした。全国の物理系に興味のある高校生のほとんどが自分と同じような状況であつたらう事を鑑みるに、やはり今回は非常に貴重だったように思います。

自分は「光の量子性の観測～光の粒を数えてみよう～」というコースを五神研究室の小西先生の元で体験しました。全体の流れとしては、1日目にイントロダクション、2日目に実験の背景講義と実験、3日目に発表という形です。「院生でもそうそうやらないような実験」という言葉が時折先生方の口から出ているのには気が付いていました。

勿論先生方の準備、ご指導あってこそなのですが、そのようなハイレベルな実験において「成功」と言えるような結果を仲間と共に観測できて、非常に興奮し、またほっとするという奇妙な気分になりました。

さて、終えてみてどうかというと、「難しかった」というのが正直な感想です。理解できないながら作業を進めてしまっている部分もあったことは確かですし、正直もどかしく感じることもありました。しかし、同時にこの「理解できない」部分を大切にしたいとも強く思います。「分かってもらう」ことが自分の、ひいては人間の学問の探求につながると思っているからです。

何ヶ月も前からサイエンスキャンプの企画をして下さった東大、国情研の先生方、引率してくださった方々、そして3日間活動と寝食を共にした仲間にとっても感謝しています。



[筑波大学附属駒場高等学校 1年生 大平 俊介]

未来を創る子供たちのために ～小・中学校におけるサイエンスアウトリーチの必要性～

品川区立小中一貫校伊藤学園 主任教諭 富本 保明



最近では、多くの企業や団体が出張授業を実施しています。私たちの特別授業とそれらの大きな違いは、私たちは教員と研究者がチームティーチングのような形式で授業を進めていることです。研究者としてだけではなく、「先生」としても授業に臨んでもらっています。そのために、子供たち一人一人の理解度を把握し、学習のねらいに沿った授業の進め方、発問の仕方、子供の心を読み解くことなど、細部にわたり打ち合わせを行っています。このような綿密な計画のもと、単元指導の一部としてサイエンスアウトリーチに取り組んでいます。

私たちはこれまで、何度も議論を重ね、いくつかのアイデアを出し合い、試行錯誤しながらこの取り組みを進めてきました。異業種の者がゼロから始めたことですから、考え方の相違だけでなく、業務上の手続きなどの様々な問題もありました。それを解決できたのは、「子供たちに科学の楽しさを味わって欲しい」という共通の思いです。様々な制約の中でもこの思いがあればよりよい方向に進むと、これまでの経験から断言できます。

「教育」「研究」に携わる全ての人へ

これまで本校の特別授業に関わってくださった全ての方は共通して、次のようなことを話されています。「特別授業を受ける子供たちは目を輝かせている」「自分も小学生や中学生の頃、彼らと同じような感覚をもち、研究者の道を志した」「次世代を担う人材の育成は、研究者にとっても大切な仕事である」

今後少子高齢化が進むであろう我が国が、これからも世界の中で技術力を発揮し続けるためには、研究者や技術者を目指したいと思う子供たちの裾野を拡大していくことが不可欠であり、最先端の科学に触れることができる環境を整えていくことが必要です。そして、何よりも特定の教員や研究者だけでなく、「教育」「研究」に携わる全ての者が「未来を創る子供たち」のためにできることを全力で取り組んでいかなければなりません。このコラムの読者の多くが最初の一步を踏み出してくださることを願ってやみません。



最先端研究開発支援プログラム量子情報処理プロジェクトでは、小中学校をはじめ高等学校を対象とした、量子力学・量子情報の出張授業を年間10校程度実施しています。

名古屋市立向陽高等学校での出張授業

■実施日 2011年12月7日(水) ■対象 名古屋市立向陽高等学校 2年生 29名
■授業名 「量子的世界」 ■担当者 平野 琢也(学習院大学)、根来 誠(大阪大学)

名古屋市立向陽高等学校は平成18年度にスーパーサイエンスハイスクール(SSH)の指定を受け、意欲的な活動を行なっている高等学校です。第2学年からはSSクラスを1クラス設置しており、今回の出張授業はSSクラスの2年生が対象でした。非常に学習意欲が高く、自分の頭で考えて、鋭い質問を発する生徒で構成された活発なクラスでした。

出張授業は2コマ実施し、前半は平野が担当しました。まず、準備として量子力学とはどのようなものであるかを説明したあと、ヤングの干渉実験のビデオを視聴し、単一光子でヤングの干渉実験を行った結果を説明する直前でビデオを一旦止めました。そして、持参したレーザーと二重スリットを用いて干渉の演示実験を行いつつ、単一光子で行なう干渉実験の結果を予測してもらいました。演示実験と考える時間を設けることは向陽高校の先生の要望に沿った構成でしたが、こうした構成にすることで、生徒の理解と興味が高まることを実感できました。その後、有機分子の干渉実験や量子暗号のデモ実験など最近の話題についても紹介を行いました。

[学習院大学 平野 琢也]

授業の後半は根来が、博士課程でおこなった「核スピンを用いた量子情報処理の実験的研究」について説明しました。これまでの研究の過程を説明するなかで、「研究とは?」「大学、大学院における研究とは?」「私が思う量子情報の面白さとは何か?」「私が研究職を目指すきっかけは?」を伝えられるように努めました。高校生の皆さんが授業中は真剣に説明を聞いており、休憩時間中も絶えることなく質問してくれたことは、とてもうれしく思いました。アンケート結果でも、物理、量子力学、量子情報はむずかしいけどもおもしろい!と答えてくれた人が多く、喜ぶ半面、量子力学をもっと深く理解して上手に伝えられるようになりたいと思いました。 [大阪大学 根来 誠]



コラム サイエンスアウトリーチ活動に対する私的理念

学生チャプター・東京大学村尾研 中田 芳史

これまで、大阪府立大手前高校・天王寺高校および品川区立伊藤学園などで計六回、サイエンスアウトリーチ活動に参加させていただいた。今回はその経験から、アウトリーチの意義についての個人的な考えを書こうと思う。

アウトリーチと言っても、生徒にとっては単なる授業の一環でしかない。勉強嫌いの生徒たちに私が何かを教えられるとは思えないし、勉強熱心な生徒にしても、講演で得た知識は大体すぐに忘れてしまうものだ。だから私は、講演では「何かを教えようとせず、物理を心の底から楽しむ私の姿・情熱を見せること」を心掛けている。「勉強」ではない「科学が持つ夢」を見せたいのだ。

学校で講演を行うと、教師の中にも「科学」と「勉強」を同一視する人が多いことに驚く。科学に勉強は必須とはいえ、科学の醍醐味は「新しい何か」を追い求める自由な発想にあるはずだ。しかし、このことが教育現場には案外伝わっていない。その結果、「科学＝勉強」、そして「勉強嫌い＝科学嫌い」に繋がっているように思う。「勉強は嫌いでも、科学の話を聞くのは楽しい」という生徒たちがいてもいいはずなのに…。

しかし冷静に考えると、ほとんどの教師は科学の虜に

なった経験はないだろうから、教育現場で「科学＝勉強」とみなされがちなのも道理である。やはり、科学の醍醐味は科学者自身が発信すべきだ。「子供たちの育成」という社会的役割において、教師と科学者は、「教育者」と「夢を与える者」という意味で、両輪をなすべきではないだろうか。

サッカー選手がサッカー教室を開催するように、科学者は科学の魅力をもっと発信すればよいと思う。そのことは、教育の充実と共に科学の将来的成長にも繋がるのだから決して悪い話ではないと思うのだが、どうだろう。



[サブテーマ紹介]

第1回

量子情報システム

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、アナログ量子コンピューター／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。今回より全8回にわたって各サブテーマの紹介をしていきます。初回は「量子情報システム」の活動方針と研究活動について解説します。

量子コンピューターのあるべき姿を探索する

本サブテーマは、将来の量子情報処理システムのあるべき姿を広い視野から眺め、FIRST 量子情報処理プロジェクト全体の研究開発計画に指針を与えるパイロットプログラムの役割を担っています。表1に現在提案・研究されている4つの量子情報処理システムをまとめました。

デジタル・量子コンピューターはスピン-1/2粒子（量子ビット）をベースにし、ユニタリ変換を用いて情報処理を行うもので、通常の量子回路モデルと比較的新しい量子断熱計算の2つに大別されます。デジタル・量子コンピューター開発の鍵は量子誤り耐性コードを用いた誤り耐性機能の実現にあります。そのため必要とされるゲートフィデリティとリソースは現状の実験値と大きくかけ離れているのが実情です。そのため、当サブテーマでは、比較的少ないリソースで実現可能と思われる量子中継をターゲットとして研究を行っています。一方、アナログ・コヒーレントコンピューターはコヒーレント状態（光・物質波）をベースにし、量子相転移を用いて情報処理を行うもので、注入同期レーザーネットワークによる組み合わせ最適化問題の計算とボラリトンBECネットワークによる多体系の量子シミュレーションに大別されます。アナログ・コヒーレントコンピューターの長所は、その圧倒的な実用性にあります。

量子ドットスピンを用いた量子中継技術

量子もつれ状態の配信

インターネットを利用した電子商取引、電子メールが広く普及した反面、秘匿性の高い情報の漏洩がしばしば新聞やニュースに取り上げられるようになりました。量子暗号通信は、絶対に安全な通信プロトコルとして知られていますが、日本全体を網羅する量子暗号通信ネットワークを実現するためには、量子もつれ状態を遠く離れた2地点に生成・保存する技術—量子中継技術—の開発が不可欠です。量子中継技術は、より高度な量子通信プロトコルを実現する上でも鍵となる技術です。量子中継器に用いられる量子メモリには、光とのインターフェイスが容易であること、誤り耐性機能を有することが求められ、直接遷移型半導体による自己形成量子ドットやドナー不純物、ダイヤモンド中の窒素空孔（NV）中心、捕捉イオンなどが有望な物理系の候補であると考えられています。

実用に耐える量子中継器の実現に向けて

国立情報学研究所とスタンフォード大学のグループでは、自己形成量子ドット中の単一スピンを量子メモリとして用いた、遠隔2地点間の量子もつれ生成を目指して研究を行っています。その生

成原理は以下の通りです。試料面内に強い磁場をかけると、トライオン（電子2個と正孔1個からなる準粒子）状態と単一電子のゼーマン・サブレベルの間に、いわゆるラムダ型の3準位が形成され、トライオン状態から放出される光子のエネルギーと残された電子スピン状態の間に量子もつれが生成されることが期待されます（図1左）。遠隔量子ドットから放出された2つの光子を伝送路の中間地点で衝突させた後に2つの光子を同時計測し（図1右）、このとき2つの光子のエネルギーが異なっていると、どちらの量子ドットからどちらのエネルギーの光子が放出されたか分からないために、2つの量子ドット中のスピンの間に量子もつれが形成されることになります。私たちは、これまでに、量子ドットの電子スピンや正孔スピンの光パルスによるコヒーレント制御技術を確認し、数マイクロ秒というコヒーレンス時間を達成しました。そして目下のところ、スピン間量子もつれ生成の第一歩となるスピン・光子間量子もつれの実証実験に取り組んでいます。競争相手である捕捉イオンとNV中心ではスピン・光子間量子もつれはそれぞれ2004年と2010年に実証され、さらに捕捉イオンでは2地点間の量子もつれが2007年に実現しています。これらの系と比べてとき、量子ドット系の最大の魅力は、集光効率が極めて高いことで、NV中心や捕捉イオンの1000倍近い量子もつれ生成レートが見込めます。このような高い量子もつれ生成レートは、実用に耐える量子中継器開発を目指す上で重要な要件と考えられます。

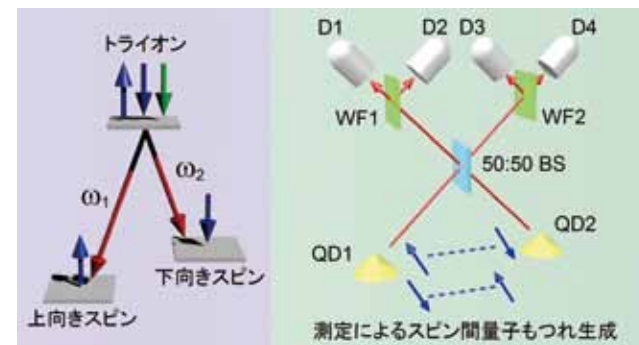


図1 面内磁場中の量子ドットエネルギー準位（左図）と遠隔スピン間の量子もつれ生成実験の概念図（右図）。QD: 量子ドット、BS: ビームスプリッター、WF: 波長フィルター、D: 検出器

位置制御 InGaAs 量子ドット成長技術

生成された量子もつれ状態は、それを用いて量子暗号通信プロトコルを実行するまで、長時間にわたって保持されなければなりません。したがって、量子メモリが高度な誤り耐性機能を有することもまた、量子中継器にとって必須となります。量子ドットスピン系においては、多数の量子ドットを2次元正方格子上に規則的に配列することで、2次元トポロジカル表面コードと呼ばれる量子誤り訂正コードを実装することが可能となります。この2次元トポロジカル表面コードは、ゲート誤りが1%程度であっても正しく動作する、これまでに発見されている中で最も優れた量子誤り訂正コードです。その一方、光学活性な砒化インジウムガリウム（InGaAs）量子ドットでは、砒化ガリウム（001）基板上に、格子ミスマッチから生じる歪みを利用したストランスキー・クラスタノフモードによって自己形成結晶成長を行います。その結果形成される量子ドットは位置・サイズともにランダムとなります。ウルツブルグ大学のグループでは、位置制御されたInGaAs量子ドット成長技術を確認すべく研究を進めています。位置制御は、基板上に周期的なナノホールを予めパターンしておき、ホール上への選択的核形成を促すことにより実現しますが、このようにして成長された量子ドットの光学特性は、従来の自己形成量子ドットと比べて著しく劣化し、単一量子ドットの線幅は典型的には数100μeV程度に広がっていました。最近、私たちは、ほぼ完全に位置制御された量子ドット

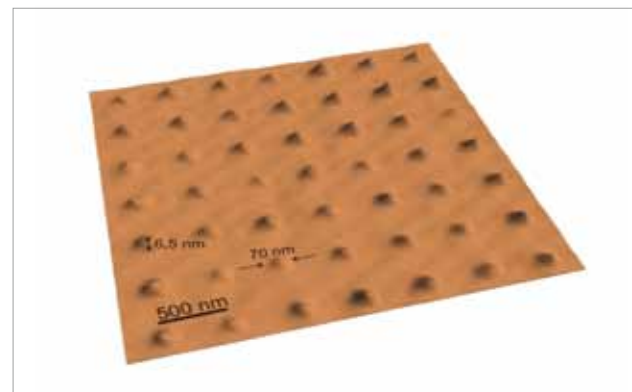


図2 500nm間隔で位置制御された量子ドット正方格子の原子間力顕微鏡像

	デジタル・量子コンピューター		アナログ・コヒーレントコンピューター	
物理系	スピン-1/2粒子		コヒーレント状態（光・物質波）	
動作原理	ユニタリ変換（閉鎖系）		量子相転移（開放系）	
実験手段	量子回路モデル	量子断熱計算	注入同期レーザーネットワーク	ボラリトンBECネットワーク
応用（アルゴリズム）	素因数分解 量子化学計算 量子中継	組み合わせ最適化問題	組み合わせ最適化問題	多体系シミュレーション

表1 現在、提案・研究されている量子情報処理システム

[サブテーマ紹介]

第1回 量子情報システム

正方格子を作成し(図2)、さらにその光学特性を大幅に改善するという大きなブレイクスルーを成し遂げました。閉じ込めの強い量子ドット試料における単一量子ドットの発光線幅は、測定装置分解能の40 μ eV程度と、自己形成量子ドットのそれに迫っています。この技術を用いることで、原理的には、2次元トポロジカル表面コードを実装するために必要となる $10^3\sim 10^5$ 個という多数の量子ドットを数ミリ角のチップ上に用意することが可能となります。高い集積性と優れた光学特性を兼ね備えたスケーラブルな量子ドットスピンの実現へ向けた重要な一步と言えます。

ZnSe へのフッ素イオン注入技術

半導体中の不純物原子は、量子ドットに比べ発光線幅の均一性に優れていることから、量子中継器の量子メモリーとして有望な系であると期待されます。ところが、シリコン、ダイヤモンドなどのIV族系半導体は光学遷移が弱く、砒化ガリウムなどのIII-V族系半導体には、母体結晶の核スピンとの相互作用によって生じるデコヒーレンスの問題が技術的課題として残されています。そこで、パダボーン大学とスタンフォード大学のグループでは、母体核スピンをゼロに同位体制御可能なII-VI族系半導体セレン化亜鉛(ZnSe)に着目して研究を進めています。ZnSe中のフッ素ドナーは、強い光学遷移を持ち、ラムダ型3準位の形成を可能とし、さらにフッ素原子が常に1/2の核スピンを有する量子メモリーとして電子スピンと同居していることなど、多くの利点を持っています(図3)。問題は、量子ドットの場合と同様に、不純物の位置を制御することが困難な点です。最近、私たちは素子基板上の特定箇所へ、直接フッ素原子をイオン注入する技術を開発しました。この手法では、微小なマス目構造のマスクを用いて、少数の単一フッ素イオンをナノメートルレベルで位置制御することで、基板上の不要なフッ素化合物の生成を大幅に減らすことが可能となります。この手法でドーブしたデバイスからは強い発光が観測され、発生した単一光子が識別できない量子粒子になっていることも確認されています。また、このデバイスを用いた束縛電子スピンの位相緩和時間(T_2^*)の温度依存性を調べたところ、広い温度領域でほぼ一定の30nsという値を得ています。

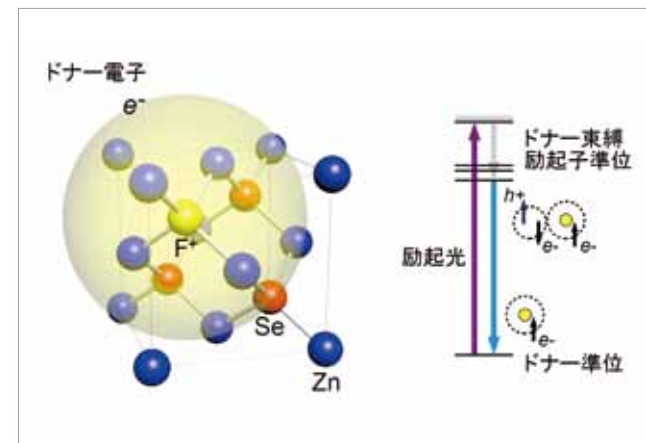


図3 フッ素をドーブしたZnSeの格子構造とそのエネルギー準位

注入同期レーザーネットワークを用いたアナログ・コヒーレントコンピューター

新薬の開発、気象予測、通信・物流網のルーティングなど、私たちの身の回りの数多くの問題は組み合わせ最適化問題に帰着されます。しかし、その不確定要素の数が増えるにつれ、厳密な解を求めるのにかかる時間は指数的に増加していきます。組み合わせ最適化問題は一般的にNP完全問題と呼ばれる最も難しい計算量の問題に分類されます。いずれかひとつのNP完全問題を多項式時間で解くことができれば、すべてのNP問題は多項式時間でこのNP完全問題にマッピングして解くことができることが知られているため、通常の量子回路モデルに加え量子アニーリングマシンや量子断熱計算機などの様々な手法が提案されてきましたが、未だに多項式時間で解く方法は発見されていません。

レーザーネットワークでNP完全問題を高速に解く

私たちは、注入同期レーザーでネットワークを構成し、これにNP完全問題である3次元イジングモデルという磁性(スピン)の問題をマッピングして、多項式時間で最適解(基底状態)を探す手法を提案しています(図4)。イジングモデルとは、スピン間の相互作用の組み合わせにより格子点上のスピンが上向きまたは下向きの2値のいずれかをとるものです。安定なマスターレーザーによって周波数と位相がロックされたM個(イジングモデルの格子点数に対応する)のスレーブレーザーの出力光を別のスレーブレーザーに相互注入し、その相互結合の強度と位相をイジングモデルの格子間結合に対応させると、各レーザーは一定時間後に定常状態に落ち着きます。相互注入により結合したM個のスレーブレーザーは全体として一つの複合レーザーシステムとして考えることができ、定常状態での各レーザーの偏光(右回りまたは左回り円偏光)は、イジングモデルの最低エネルギー基底状態のスピン成分として読み出すことができます。量子アニーリングマシンなど従来の手法では、問題サイズが増えていくにつれて、準安定状態に間違っ

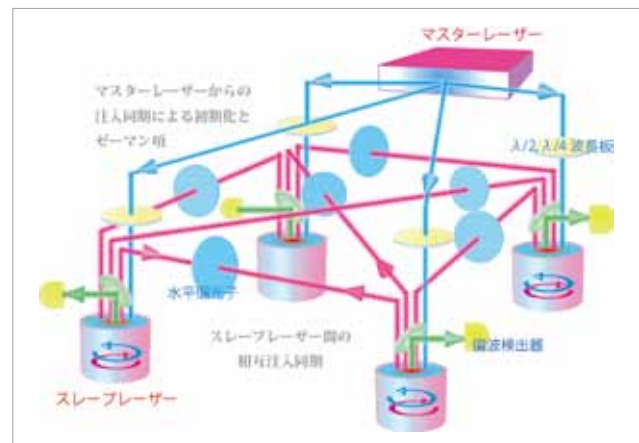


図4 MAX-CUT-3問題(M=4)をマッピングした注入同期レーザーネットワーク

的に増大していくことが問題となっていました。このシステムでは非平衡開放系であるレーザーの量子相転移を用いているため、負の温度領域(レーザー発振しきい値以下)からシステムの温度を上げていくと(Tを $-\infty$ から-0へ上昇すると)、イジングモデルの解であるシステムの基底状態が、最初に発振する偏光モードの組み合わせとして選択されます。また常にレーザーから出力される光子の状態をモニターすることができるため、間違っ

励起子ポラリトン凝縮体を用いた量子シミュレーター

汎用量子コンピューターに対して、特定の量子多体問題に特化し、この量子多体系のモデルハミルトニアンをマッピングした人工系において、パラメータをコントロールすることにより実験的にそのハミルトニアンをシミュレーションするアプローチを量子シミュレーションと呼びます。代表的な人工系である冷却原子系では、光を用いた原子に対するポテンシャル変調や、磁場や光を用いた相互作用の変調が可能です。運動エネルギーとオンサイト相互作用エネルギーの競合を表すハバードモデルにおいて、運動エネルギーが支配的な超流動(ボーズ粒子系)／金属(フェルミ粒子系)状態から、相互作用エネルギーが支配的なモット絶縁体状態への相転移が、ボーズ粒子、フェルミ粒子それぞれの原子系で観測されています。最近では、実験的に実現が容易ではない相対論的な粒子の振る舞いを表すディラック方程式に対する量子シミュレーションもイオンを用いて行われています。また、軌道が空間異方性を持つ励起状態へのボーズ凝縮など新しい物性現象についても研究が行われています。

2次元格子構造中のポラリトンを操り、新多体現象を探索する

私たちは励起子ポラリトン(以下ポラリトン)を用いた量子シミュレーターの開発を行っています。ポラリトンとは、量子井戸を微小共振器中に埋め込んだ半導体デバイスにおいて、量子井戸中の励起子と共振器中の光子が強結合して生じる準粒子です。ポラリトンはボーズ粒子であり、その質量が原子に比べて約10桁も軽いことから、室温近くの高温でも量子凝縮を起こすことができます。2次元ポラリトン系では、漏れ出てくる光子がポラリトンの面内運動量とエネルギー、位相情報を運んでくるため、凝縮体の情報に直接アクセスできます(図5)。また、寿命が短く非平衡系であり、励起状態に凝縮したポラリトンが低いエネルギー状態に落ちる前に光子として出てくるため、励起状態への凝縮が容易に観測でき

ます。そして、凝縮体の運動量空間、実空間における波動関数を直接観測することができます。ポテンシャルの幾何学的構造はリソグラフィーを用いて任意に決定できるため、様々な格子構造を作ることが可能です。これらの特徴を生かし、私たちは様々な周期ポテンシャル中のポラリトン凝縮において、新物性・新多体現象を探索しています。これまでに、ポラリトン量子シミュレーターで観測された物性・多体現象を表2にまとめます。

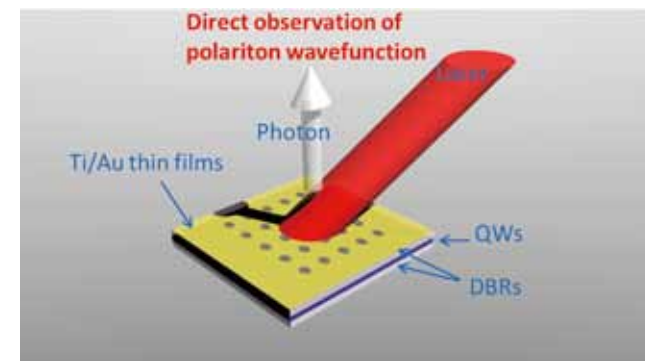


図5 ポラリトン量子シミュレーターデバイスの概念図

システム	シミュレートされた多体現象
均一2次元系	BKT相転移 ・相関関数 $g^{(1)}(r)$ のベキ乗減衰 ・量子渦-反量子渦束縛対 ・ボゴリューボフ励起スペクトル(BEC-BCSクロスオーバー)
0次元トラップ	BEC相転移 ・一定の相関関数 $g^{(1)}(r)$ ・ $\Delta \times \Delta k$ 最小不確定状態
1次元周期ポテンシャル	s波-p波凝縮相のクロスオーバー
2次元正方格子ポテンシャル	d波凝縮相
2次元カゴメ格子ポテンシャル	量子干渉による局在(平坦バンド)
2次元蜂の巣格子ポテンシャル	(反強磁性秩序(量子渦-反量子渦格子構造))
2次元三角格子ポテンシャル	(線形分散を持つディラックボゾン)

表2 ポラリトン量子シミュレーターで観測された物性・多体現象。()内は現在進行中の実験

執筆：

山本 喜久(国立情報学研究所／スタンフォード大学)

執筆協力：

量子もつれ状態の配信

阿部 英介(国立情報学研究所)

位置制御InGaAs量子ドット成長技術

Alfred Forchel(ウルツブルグ大学)、Sven Höfling(ウルツブルグ大学)、阿部 英介(国立情報学研究所)

ZnSeへのフッ素イオン注入技術

Klaus Lischka(パダボーン大学)、Alex Pawlis(パダボーン大学)、佐中 薫(スタンフォード大学)

注入同期レーザーネットワークを用いたアナログ・コヒーレントコンピューター

宇都宮 聖子(国立情報学研究所)

励起子ポラリトン凝縮体を用いた量子シミュレーター

楠戸 健一郎(国立情報学研究所)

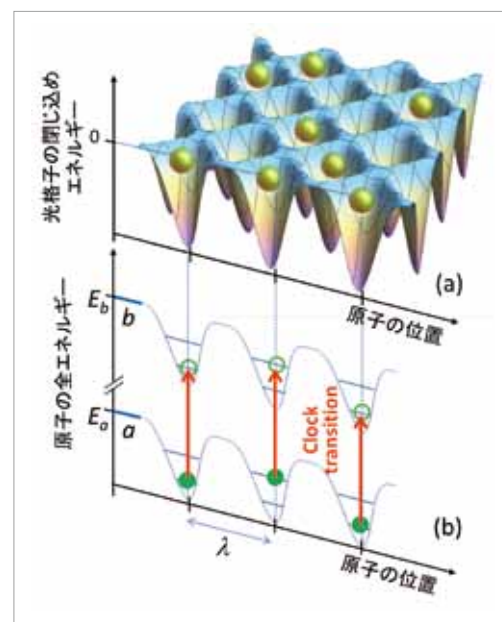
東京大学 香取研究室／理化学研究所 香取量子計測研究室

原子スペクトル計測の極限的精度の追求は、量子力学の誕生や現代物理学の発展に大きく貢献してきました。この成果として実現される高精度原子時計は、GPSによる測位や超高速大容量通信ネットワークのタイミング制御など、現代生活を支える基幹技術です。

東大・香取研究室では、「魔法波長・光格子」を用いる新しい原子時計手法を2001年に提案しました。原子の光トラップを魔法波長に合わせたレーザー光で構成すると、その光による原子の電子状態のエネルギー変化（シュタルクシフト）が時計遷移の基底状態と励起状態で相殺し（図b）、光の摂動を受けない原子の遷移周波数が測定できます。この原理を用いる「光格子時計」では、光の定在波に原子を閉じ込め、ドップラーシフトや原子間相互作用を低減することで、およそ100万個の原子の同時観測を実現します（図a）。これにより分光精度は劇的に向上し、理論的には1秒の測定で18桁の遷移周波数計測も可能になります。この光格子時計の研究は世界中で行われるようになり、その精度は現行のSI秒にのみ制限されるまでになりました。

最近では、同一のレーザー光で2台の時計の原子を同時に励起し、レーザー光の周波数雑音の影響を同相除去する手法を開発し、1600秒の平均時間で17桁の周波数比較に成功し、 $N \approx 1000$ 個の原子数に相当する量子雑音限界の安定度を達成しました。これは原子数の増大で飛躍的な安定度の向上を狙う光格子時計の設計思想を初めて実証する成果です。

このような、光格子時計のアイデアの実証フェイズでは、まさに大学の研究のフレキシビリティが最大



の勝因でした。しかし、研究が軌道に乗り、世界中の標準研究所との競争になると、今度は研究の継続性が勝負となり、毎年学生の入替わる大学での研究が厳しくなってきました。

ちょうどいいタイミングで、2011年4月から、和光の理化学研究所で香取量子計測研究室が始動しました。本郷一和光の実験室は1時間弱なので、学生・スタッフは2か所を行ったり来たり、一体となって研究が進んでいます。探索的・萌芽的な研究は東大で行い、長期スパンで精度を極限まで追求する時計の研究は理研に軸足を移そうとしています。例えば、異種原子時計の周波数比較による物理定数の恒常性の検証など、装置を維持改良しながらの5-10年スケールの研究では、まさに研究所の出番です。

光格子時計が実現しつつある18桁の時間計測では、相対論的効果が日常の運動スケールに介入し、これらが数秒という実時間で見えてきます。ダリの「記憶の固執」に登場する「やわらかい時計」を髣髴とさせる世界観が現実のものとなります。原子時計はもはや時間合わせの道具ではなく、曲がった時空を照らし出すプローブの役割を担うことになります。

本郷・和光と研究拠点が2つできたおかげで、まさにこの夢のような実験に取り組む環境が整いました。目下、2か所同時進行で17桁超の精度を目指した光格子時計を開発中で、今秋には直線距離で15km離れた和光一本郷の実験室間に光ファイバーを開通させる予定です。この高精度ファイバリンクを駆使すれば、17桁の時計なら、和光・本郷で10cmの重力ポテンシャル差が、18桁にすれば僅か1cmの差が見えてくるはずで、重力シフトを高精度に検出して、地下資源の探索や地殻変動を観測する、相対論的測地学ともいうべき、時計の新たな応用の第一歩です。いずれこのような、高度な時間資源は東京圏、関東、日本全域と広がり、相対論的な時空間の歪みを測る時計のネットワークができることでしょう。GPS測地とは対極にある相対論的でローカルな新しい時空間の使い方に夢をはせています。

（香取 秀俊）



京都大学 高橋研究室

当研究室は、京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻・物理学第一分野において、量子情報処理の研究分野のうち、光格子を用いた量子シミュレーションおよびスピン集団に対する量子制御に関する実験研究を行っています。学部4年生からスタッフまで含めると例年20名程度になり、およそ4つのグループに分かれて研究を進めています。特に当研究室では、全ての研究テーマにおいて、希土類で2電子系原子のイッテルビウム (Yb) 原子を用いて研究を行っています。それは、Yb原子にはユニークな特徴がいくつか存在するからです。まず1) 2種のフェルミ同位体と5種のボース同位体という豊富な同位体が存在すること、2) また、基底状態と準安定励起状態の間には1Hz以下の超狭線幅遷移が存在し、高分解能分光への応用などが期待できること、3) さらに基底状態には電子スピンの存在しないため、浮遊磁場による影響を受けにくく、長いコヒーレンス時間が期待できること、などです。当研究室ではこれらの特徴を最大限に生かしたテーマを設定し、研究を行っています。

まず、量子シミュレーションの研究では、これまでボース同位体を用いて超流動・モット絶縁体転移の観測を行ってきましたが、ごく最近、この転移について高分解能レーザー分光を行い、その詳細な振る舞いを調べ、光格子中での原子の温度など、様々な情報を引き出せることがわかりました。フェルミ粒子についてもモット絶縁体の生成に成功しています。ただし、このYb原子のフェルミ同位体はSU(6)という高い対称性を持っていることが特徴で、固体系にも存在しなかったユニークなものになっています。また、最近、ボソンとフェルミオンが一緒になって各格子点に1原子が存在する、というボース・フェルミ混合モット絶縁体を初めて実現し、その振る舞いを明らかにしました。

また、Yb原子を用いた量子シミュレーションの新しい方向として、光格子中の単一サイトの観測・選



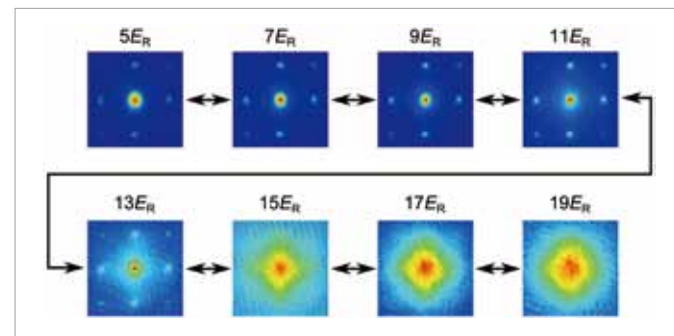
択的操作の実現を目指しています。自由に任意の場所に格子欠陥を導入することにより、例えば、長岡強磁性などの遍歴磁性の重要問題に応用できると期待しています。また、Yb原子とリチウム (Li) 原子の同時量子縮退にも成功しています。この混合系の光格子実験を現在準備中ですが、Li原子の超流動にとって、局在したYb原子が不純物として振る舞うため、アンダーソン局在の研究に適した系になっています。

さらに、高速かつ高空間分解能で原子間相互作用を制御する新しい方法として、光による散乱長の制御法、いわゆる光フェッシュバハ共鳴法の開発も手がけています。特に、超狭線幅遷移を用いることにより、原子のロスの影響を抑えて、大きく散乱長を変えることが可能です。そのため高感度な分子検出方法も最近新たに開発しました。

以上の量子シミュレーションの研究のほかに、レーザー冷却されたYb原子の核スピン集団の量子制御の研究も行っています。これまでに、ファラデー回転を用いた量子非破壊測定を行い、スピンスクイズド状態を生成することに成功しています。最近では、生成したスピンスクイズド状態の回転制御や、量子フィードバック制御に成功しています。今後は、光トラップ中に原子集団を導入することで、高いスクイーミングレベルと多数回の操作を可能にしたいと計画しています。また、Yb原子は光格子時計の有力な候補であり、スピンスクイズングを時計遷移の精密測定に応用することも計画しています。

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

（高橋 義朗）



エッセイ

Essay

いつもいつも前提を疑っていたら日々の仕事が進まないで、時々でいいと思いますが、定説といわれているものの前提について考えを巡らしてみるのは、楽しいことでもあります。考えた結果やはり前提は正しかったとなることが多いとは思いますが、ここでは「量子情報処理は現在普及している古典情報を用いた通信や情報処理では全く実現できず、光や物質の量子力学的性質を使わなければならない」という、ほとんど自明のように思えることについて考えてみたいと思います。

まず量子暗号。そもそもその存在意義は、計算量的安全性でなく情報理論的安全性を提供する点にあります。公開鍵暗号のような計算量的安全性に基づく暗号ではどうしていけないのでしょうか？ 計算量的安全性に基づく暗号は「順方向計算は楽だが逆方向計算は困難」という関数を使います。暗号のユーザーであるアリスとボブは順方向計算のみを行い、攻撃者であるイヴは逆方向計算をしなければならない仕組みにしておけば安全というわけです。困難な逆方向計算の代表例は素因数分解なのですが、これは量子コンピューターができれば（できなくてももしかすると）困難ではなくなるので、イヴが量子コンピューターを持っていれば公開鍵暗号は用をなさなくなります。その点、量子暗号は量子コンピューターをもつても破ることができない暗号なので大変結構というわけです。

しからば「順方向計算は古典コンピューターでも楽にできるが逆方向計算は量子コンピューターでも困難」という関数があればどうでしょう。これならイヴが量子コンピューターを持っても安全です。一方アリスとボブは古典通信と古典コンピューターしか使っていません。つまり「イヴが量子コンピューターを使っても安全であることを保証する」という意味で立派に量子情報処理まで考慮した暗号通信ですが、ユーザーは古典的手段しか使っていません。

したがってこのような関数を使った計算量的安全性を有する暗号は、量子暗号のハードの実用化の開発研究全体に対する一つのオルタナティブになり得るかもしれないわけです。もっとも、たまにはこんなこ

とを考えるのもいいと思いますが、それによって量子暗号のハード開発にあたっている人が意欲を減退させる必要は全くありません。というのも、この種の研究は15年くらい前から聞いていますが、いまだにそのような関数の発見のニュースは聞いていません。そもそも素因数分解でさえ古典計算の範囲でP型でないということは予想であって証明されていないということなので、仮にそういう関数の候補が見つかったとしても「順方向計算は古典コンピューターでも楽だが逆方向計算は量子コンピューターでも困難」であることの証明は一層難しいのでしょうか。

ところで楽とか困難とか言いましたが、これは「楽＝P型、困難＝非P型」という前提でいいのでしょうか？

たとえばある問題が楽すなわちP型であることが証明されたとして、その次数が200だったとしましょう。つまり入力サイズをn倍にすれば計算ステップ数はnの200乗倍になるわけです。それでも「ある定数のn乗倍」よりよっぽどマシ…なののでしょうか？ 仮にn=2として、2の200乗とはどれくらい大きな数でしょうか？

実は宇宙の年齢をプランク時間で割ると大体そのくらいになります。プランク時間より短い時間の出来事の記述は恐らく量子重力理論の成立を待たなければならないので、当面これより短いクロックタイムつまり量子重力理論を使うようなコンピューターを考えなくてもよいでしょう。すると次数が200以下ならP型とか非P型の違いは意味があるかもしれませんが、それ以上はそれとは無関係に「困難な問題」ではないのでしょうか。すると実用的見地から証明すべきは「ある具体的な計算問題（入力サイズも特定して）を解くために必要なステップ数が2の200乗以上か否か？」で十分なのかもしれません。

いずれにせよ、いま扱っている問題の前提になっていることは何かということについてたまには考えを巡らしてみるのは、楽しいことであるとともに、必要なことだと思います。「この分野でこれが成立するとあの分野のあれは前提がくずれる」といった大域的な論理構造を見過ぎて足下をすくわれたいためにも。

井元 信之（大阪大学）

たまには前提を疑ってみる

No.8 June 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 <http://www.nii.ac.jp/>

発行：大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立情報学研究所 量子情報国際研究センター <http://www.first-quantum.net/>

〒101-8430 東京都千代田区一ツ橋2丁目1番2号 学術総合センター

本誌についてのお問い合わせ：

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

R2100
当誌は公衆利用の目的で複製されています