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 December No.14

量子ニュース

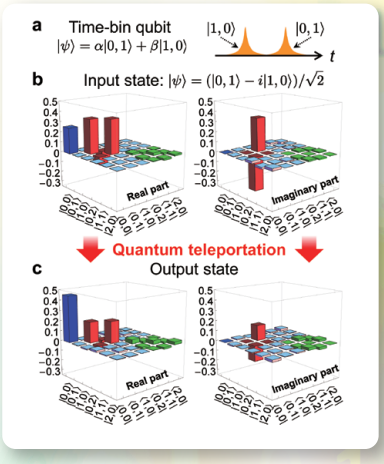
CONTENTS

量子科学最前線

時間はパーソナル 究極の時計で見えてくる世界像

最近の研究成果

光量子ビットの決定論的・無条件量子テレポーテーションに成功



海外研究動向
量子標準と「測る」

サブテーマ紹介
量子通信

プロジェクト組織

中心研究者：山本 喜久（国立情報学研究所／スタンフォード大学）
共同提案者：樽茶 清悟（東京大学）、蔡　兆申（（独）理化学研究所／日本電気（株））
研究支援統括者：仙場 浩一（国立情報学研究所）

サブテーマ紹介

（◎サブテーマリーダー、○サブリーダー）

量子情報システム
◎山本　喜久（国立情報学研究所／スタンフォード大学）　○山西　正道（浜松ホトニクス（株））　小川　哲生（大阪大学）
小芦　雅斗（東京大学）　竹内　繁樹（北海道大学）　河原林　健一（国立情報学研究所）　Alfred Forchel（Universität Würzburg）
Klaus Lischka（Universität Paderborn）

超伝導量子コンピューター
◎蔡　兆申（（独）理化学研究所／日本電気（株））　中村　泰信（東京大学）　齊藤　志郎（NTT物性科学基礎研究所）
高柳　英明（東京理科大学）　前澤　正明（（独）産業技術総合研究所）　日高　睦夫（（独）産業技術総合研究所）
Franco Nori（（独）理化学研究所）　根本　香絵（国立情報学研究所）

スピン量子コンピューター
◎樽茶　清悟（東京大学）　○都倉　康弘（筑波大学）　北川　勝浩（大阪大学）　工位　武治（大阪市立大学）
伊藤　公平（慶應義塾大学）　森田　靖（大阪大学）　藤澤　利正（東京工業大学）　太田　剛（NTT物性科学基礎研究所）
Rodney Van Meter（慶應義塾大学）

量子シミュレーション
◎高橋　義朗（京都大学）　五神　真（東京大学）　占部　伸二（大阪大学）　平野　琢也（学習院大学）
向井　哲哉（NTT物性科学基礎研究所）

量子標準
◎香取　秀俊（東京大学）　洪　鋒雷（（独）産業技術総合研究所）　小山　泰弘（（独）情報通信研究機構）

量子通信
◎井元　信之（大阪大学）　佐々木　雅英（（独）情報通信研究機構）　古澤　明（東京大学）　小坂　英男（東北大学）

アドバイザー

光　末松　安晴（（公財）高柳記念財団）　覧具　博義（元東京農工大学）
原子　清水　富士夫（電気通信大学）　藪崎　努（京都大学）
半導体　小宮山　進（東京大学）　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）
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（（独）理化学研究所/山本研究室）

人材育成チーム
技術参事　宇都宮　聖子（国立情報学研究所）
窪田　しおり（国立情報学研究所）
相原　理佐（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）
中山　陽子（国立情報学研究所）

プロジェクト事務局からのお知らせ

INFORMATION

■国際シンポジウム「トポロジカル量子技術」開催のお知らせ（続報）

FIRSTの3プロジェクト（十倉PJ、山本PJ、外村PJ）合同で開催するシンポジウムについて、海外からはノーベル賞受賞者3名（Prof. Albert Fert, Prof. Anthony J. Leggett, and Prof. Klaus von Klitzing）を含む著名研究者の講演を予定しています。ポスターセッション及び聴講の参加者を受け付けていますので、ぜひご参加ください。

日時：2014年1月27日（月）～30日（木）
場所：東京大学伊藤国際研究学術センター（27・28日）東京大学小柴ホール（29・30日）、武田ホール（29日パラレルセッションのみ）
受付：以下のホームページから登録ください。締切はポスター：12月20日（金、※アブスト提出含む）、聴講：1月15日（水）です。
http://www.cems.riken.jp/2014first_sympo/

AWARD

- 2013年3月：北海道大学 平成24年度北海道大学研究総長賞 竹内繁樹（北海道大学）
- 2013年4月：RSC ESR Group Bruker Lectureship Award 2013「Recent trends in organic high-spin /open-shell chemistry: Electron spin technology」工位 武治（大阪市立大学）
- 2013年6月：The Optical Society of America（OSA）2013 Fellow of Optical Society of America「Citation: 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（東京大学）
- 2013年6月：日本化学会Bulletin of the Chemical Society of Japan誌 Selected Paper「Syntheses, Redox Properties, Self-Assembled Structures and Charge-Transfer Complexes of Imidazole- and Benzimidazole-Annelated Tetrathiafulvalene Derivatives」村田 剛志（大阪大学）、山本 陽介（大阪大学）、焼山 佑美（大阪大学）、中筋 一弘（大阪大学）、森田 靖（大阪大学）
- 2013年7月：Wiley-VCH社 Chemistry A European Journal誌 frontispiece「Control of Exchange interactions in π Dimers of 6-Oxophenalenoxyl Neutral π Radicals: Spin-Density Distributions and Multicentered–Two-Electron Bonding Governed by Topological Symmetry and Substitution at the 8-Position」西田辰介（大阪大学）、河井潤也（大阪大学）、森口実紀（大阪大学）、大場友裕（大阪大学）、羽田直樹（大阪大学）、福井晃三（大阪大学）、冬広 明（大阪大学）、塩見大輔（大阪市立大学）、佐藤和信（大阪市立大学）、工位武治（大阪市立大学）、中筋一弘（大阪大学）、森田 靖（大阪大学）
- 2013年8月：大阪大学 平成25年度 大阪大学総長顕彰 研究部門（2013 Osaka University Presidential Awards for Achievement）森田靖（大阪大学）

量子標準と「測る」

(独) 産業技術総合研究所　計測標準研究部門　研究科長
洪　鋒雷

「測る」という言葉を大辞泉で調べると、「ある基準をもとにして物の度合いを調べる」とある。私自身の場合、大学4年生や大学院生での物理実験において、「測る」ことに関してあまり深く考えたことがなく、ただオシロスコープなどの測定機器で対象となる物理現象を観測するだけであった。実験で使われる測定機器は、内部の基準をもとにして物理量を測る。そして多くの場合、被測定対象よりも内部基準のほうが精度が高いので、測定が正確に行われる。しかし、被測定対象のほうが精度が高い場合、より高精度な内部基準を持つ精密な測定機器を用意しなければならない。稀に、被測定対象の精度があまりにも高く、世の中にそれを測る機器が存在しない、もしくは存在してもめったに手に入らない場合がある。この場合は、同じ性能の実験装置をもう1つ作って、相互比較をすることにより装置の性能評価ができる。精密計測では、「測る」=「比べる」ということは、計量研究所（後に産総研に改組）に入ってからわかったことである。

さて、電圧、電気抵抗及び周波数などの量子力学の原理に基づく現象を利用した標準（量子標準）は精度が高いことで知られている。中でも近年、原子の量子遷移に基づく周波数標準の発展が目覚ましい。ここでは、「測る」という視点から周波数標準の研究動向を紹介する。

まず、2009年に産総研グループが実現したYb光格子時計は、2012年には国際度量衡委員会によって新しい秒の定義の候補である「秒の二次表現」として勧告された。勧告の周波数値は、産総研とNIST（米）の測定値から決められ、その不確かさは2.7×10^{-15}である。ここでは、それぞれの研究所において、測定に使ったセシウム原子時計や水素メーザーなどの基準がYb光格子時計よりも精度が悪いので測定値の精度は基準の精度で制限されている。また2012年の勧告では、すでに秒の二次表現となっているSr光格子時計の周波数値も更新している。従来の、東大-産総研、JILA（米）、SYRTE（仏）の3グループによる測定に加えて、新たにPTB（独）及び情報通信研究機構の測定結果も取り入れ、加重平均処理して勧告周波数値を決めている。新しい勧告値の不確かさは1×10^{-15}で、前回と同じである。これは、現在の基準であるセシウム原子時計を使って測っている限り、光格子時計の測定精度が上がらないことを意味する。

光格子時計の精密測定は、2台の光格子時計の相互比較によって実現可能となる。SYRTEのグループが2台のSr光格子時計を開発し、その相互比較により2台の時計が1.5×10^{-16}という小さい不確かさで一致し、光格子時計自身の精度が測定リミットとなった［Nat. Commun. 4, 2109 (2013)］。現在、光格子時計自身の精度を制限しているのは黒体輻射による原子の周波数シフトである。理研では、一歩進んで、黒体輻射シフトを低減したSr光格子時計の開発を進めており、その相互周波数比較も実施している［日本物理学会2013年秋季大会, 28aBA9］。そこでは、18桁の測定精度が期待されている。また、NISTのグループが2台のYb光格子時計を開発し、その相互比較を行った。精度評価はまだこれからだが、少なくとも測定の安定度は1.6×10^{-18}に達した［Science 341, 1215 (2013)］。

異種の光格子時計の直接比較も、セシウム原子時計を使わないので、精密測定となる。産総研では、Yb/Srデュアル光格子時計の開発を進めている。この場合、両方の原子が1つの真空チェンバーで同じ温度環境を共有するので、比較測定では黒体輻射の影響を一部キャンセルすることができる。また、理研では黒体輻射シフトを低減したSr光格子時計のほかに、黒体輻射シフトのほとんどないHg光格子時計の開発も進めている。この両者の比較測定も18桁の測定精度をもたらすだろう。

2012年の国際度量衡委員会勧告では、単一イオン光時計も含めて秒の二次表現は全部で8つとなった。今後5-10年をかけて、新しい秒の定義を決めるために必要な光時計に関する研究成果が揃うのを待って、秒の再定義を行うことを目指している。

最近の研究成果 Research Achievement

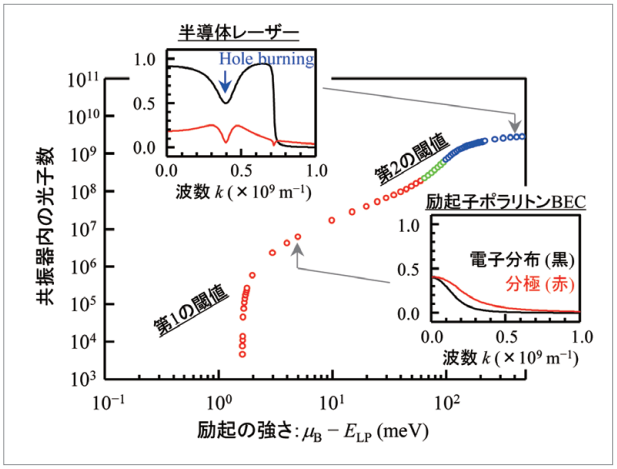
① 励起子ポラリトン系におけるBEC-BCS-Laser crossover

論文情報 Makoto Yamaguchi, Kenji Kamide, Ryota Nii, Tetsuo Ogawa, and Yoshihisa Yamamoto, "Second thresholds in BEC-BCS-laser crossover of exciton-polariton systems", Physical Review Letters 111, 026404-1-5
関連URL http://prl.aps.org/abstract/PRL/v111/i2/e026404

大阪大学
山口　真、小川　哲生

励起子ポラリトンとは、Coulomb相互作用によって引き合う電子と正孔の束縛状態（励起子）と、共振器中の光子が強く結合することで新たに生じる準粒子のことである。このような準粒子は、極めて低い閾値密度からBEC（Bose-Einstein凝縮）を生じることで、コヒーレントな光を出力できると期待され、次世代を担う量子光源として注目を集めている。この系は基本的には面発光型半導体レーザーと同一の構造をもつため、熱平衡凝縮相と考えられている励起子ポラリトンBECと本質的に非平衡現象であるレーザー動作との関連は、10年以上前から議論されてきたにも関わらず、理論的には未解明のままであった。

そこで本論文では、以前に提案したBEC-BCS-Laser crossover理論［量子ニュースNo.9; M. Yamaguchi *et al.*, NJP 14, 065001 (2012)］を用いて、この問題を解析した。その結果、励起を徐々に上昇させていくとBEC領域と半導体レーザー領域は連続的につながってクロスオーバーし、両者の遷移領域付近には第2の閾値が存在することが明らかになった（図参照）。さらに、これまでは電子正孔対が解離することでレーザー動作に移行するという仮説が主流であったが、電子正孔対の解離は伴わない遷移であることが解明された。これらの成果は、BECやBCS状態と半導体レーザーを統一的な視点で見ることによって初めて明らかにされた物理であり、熱平衡領域と（それとは程遠い）非平衡領域がつながっている物理現象を解明したことで、今後、光物理学だけでなく非平衡統計物理学などの分野への波及効果も期待される。

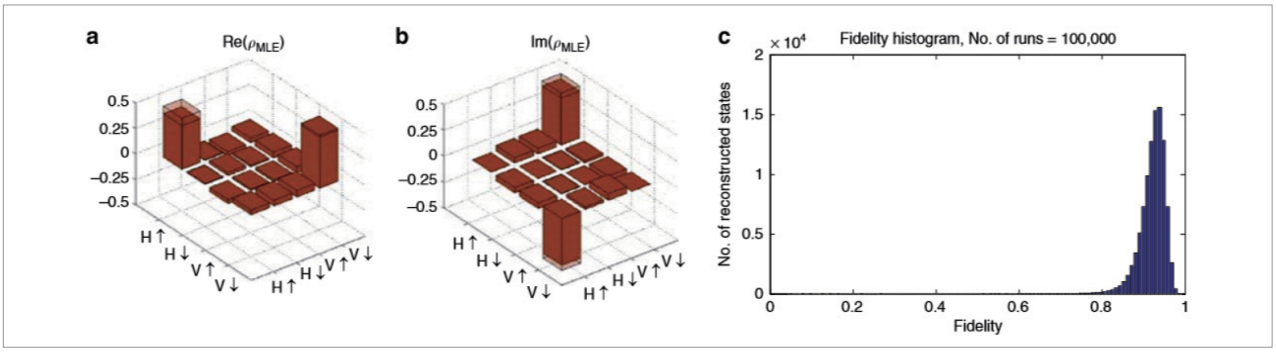


② 高フィデリティースピン—光子量子もつれ状態の量子トモグラフィー測定

論文情報 K. De Greve, P. L. McMahon, L. Yu, J. Pelc, C. Jones, C. M. Natarajan, N. Y. Kim, E. Abe, S. Maier, C. Schneider, M. Kamp, S. Hoefling, R. H. Hadfield, A. Forchel, M. M. Fejer, and Y. Yamamoto, "Complete tomography of a high-fidelity solid-state entangled spin-photon qubit pair", Nature Communications 4, 2228(July 2013)
関連URL http://www.nature.com/ncomms/2013/130726/ncomms3228/full/ncomms3228.html

国立情報学研究所／スタンフォード大学
山本　喜久

量子メモリー中にトラップされたスピン量子ビットと伝送路を伝搬する光子量子ビットの間に量子もつれ状態を高フィデリティーで生成することは、将来の量子ネットワークを支える中核技術である。外界からのじょう乱を遮断しやすいトラップイオンを用いた実験では、高いフィデリティーの量子もつれ状態が既に生成されているが、固体系で生成されるスピン－光子量子もつれ状態は外界からの雑音により低いフィデリティーしか実現されていなかった。我々は直流磁場を印加したInAs量子ドットのトライオン（帯電励起子）基底状態から1電子ゼーマンサブレベル状態への自然放出過程で生成されるスピン－光子量子もつれ状態（Nature491, 421, 2012）の量子トモグラフィー測定を行い、そのフィデリティーを評価した。図（a, b）には、Maximum Likelihood Estimateによって決定されたスピン－光子量子もつれ状態の密度行列の実部と虚部が示されている。図cには、10万回のフィデリティー測定結果のヒストグラムが示されている。平均フィデリティーは92%、分散は3.2%であった。99.9%のconfidenceで純粋化可能な71%以上のフィデリティーを持つ量子もつれ状態が生成されていることを確認した。



3 光量子ビットの決定論的・無条件量子テレポーテーションに成功

論文情報 S. Takeda, T. Mizuta, M. Fuwa, P. van Loock and A. Furusawa, "Deterministic quantum teleportation of photonic quantum bits by a hybrid technique", Nature 500, 315-318 (Aug. 2013)

関連URL http://www.nature.com/nature/journal/v500/n7462/full/nature12366.html

東京大学
武田 俊太郎、古澤　明

光量子ビットを離れた場所へ転送する量子テレポーテーションの技術は、長距離量子通信や光量子コンピューティング回路構築の基盤であり、量子情報処理の実用化へ向けた最重要課題の一つである。しかし、1997年に初めて実現された光量子ビットのテレポーテーションは、転送効率が原理的に低く制限され（1%未満）、拡張性に乏しかった。加えて、転送後の量子ビットを測定して成功事象のみを選び出す必要のある「条件付き」であるため、応用範囲が制限された。今日に至るまで多数の関連実験が行われたが、本質的な問題点は未解決のまま、実用化へ向けた障壁となっていた。

今回、我々は初となる光量子ビットの決定論的・無条件テレポーテーションに成功した。本成果のポイントは、連続量量子テレポーテーションを光量子ビットに適用させる「ハイブリッド方式」である。連続量テレポーテーションは光の波動的状態を決定論的・無条件に転送する手法であるが、従来は光の狭帯域な成分のみしか転送できず、パルス状で広い帯域を持つ光量子ビットへの適用は難しかった。そこで、我々は連続量テレポーテーション装置を広帯域化した上で、これに最適な光量子ビットを開発して組み合わせた。更に、連続量テレポーテーションの古典情報チャネルゲインという調整機構を用いて、量子ビットの情報を劣化させることなく転送できることを発見・実証した。実験では4種類の量子ビットに対して転送忠実度79～82%を達成し、いずれも古典限界を上回った。

本成果により、従来の量子テレポーテーションの問題点が一挙に克服され、各種量子情報処理への応用展開が可能となる。また、量子ビットと連続量の双方の利点を活かしたハイブリッド量子情報処理への新たな展開が期待される。

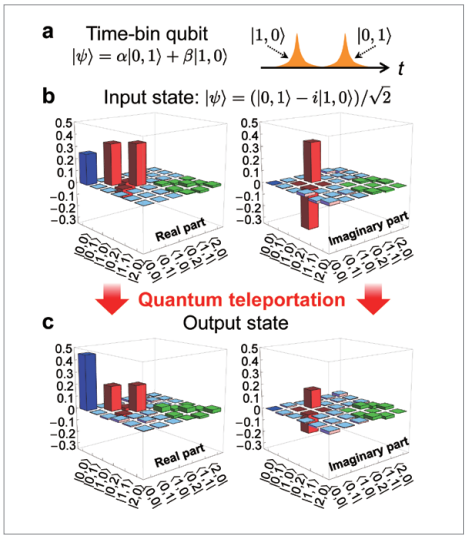


図　(a) 用いた光量子ビット。(b) 入力状態の密度行列。(c) 出力状態の密度行列。密度行列は2モードの光子数基底で表示され、赤が量子ビット成分を表す。

4 超伝導磁束量子ビットの量子跳躍観測に成功

論文情報 Z. R. Lin, K. Inomata, W. D. Oliver, K. Koshino, Y. Nakamura, J. S. Tsai, and T. Yamamoto, Single-shot readout of a superconducting flux qubit with a flux-driven Josephson parametric amplifier", APPLIED PHYSICS LETTERS 103, 132602-1-4 (2013)

関連URL http://apl.aip.org/resource/1/applab/v103/i13/p132602_s1

（独）理化学研究所／日本電気（株）
山本　剛

量子計算機の実現に向けて、量子ビット読出しは重要な要素技術である。超伝導体を用いた量子ビット研究においては、近年分散読出しと呼ばれる手法が盛んに用いられている。これは量子ビットを共振器と分散的に結合させ、量子ビットの状態に応じて共振器の共振周波数が変化することを利用するものであり、高い読出し精度や非破壊性がすでに実証されている。この読出しの方法の一つの問題は、読み出し信号の信号雑音比を大きくするのが困難であることである。量子ビットに対する読出しの反作用を抑えるため、非常に微弱なマイクロ波プローブ信号を、量子ビットの緩和時間（～1 μs）内に検出する必要があるが、ノイズ温度2-5Kといった市販品で最高性能のHEMT増幅器を用いても、単一試行で高精度の読出しを実現することは困難である。

この問題を克服するために、近年パラメトリック増幅器など超伝導体を用いた低雑音増幅器が注目されている。当研究室でも数年前に磁束駆動型パラメトリック増幅器と読ばれる独自のデバイスを開発し研究を進めてきた。本成果では、この磁束駆動型パラメトリック増幅器を、HEMT増幅器の前置増幅器として超伝導磁束量子ビットの読出し実験に使用し、単一試行での読出しを用いたラビ振動の観測に成功した。さらに|1>状態に励起した量子ビットを連続的に測定し、エネルギー緩和による|0>状態への遷移（量子跳躍）を観測することにも成功した。試行ごとに異なる遷移が起こるまでの時間は、独立な実験で確認された量子ビットのエネルギー緩和時間を正しく反映したものとなっており、このことは我々の読出しが理想的な射影測定になっていることを示している。

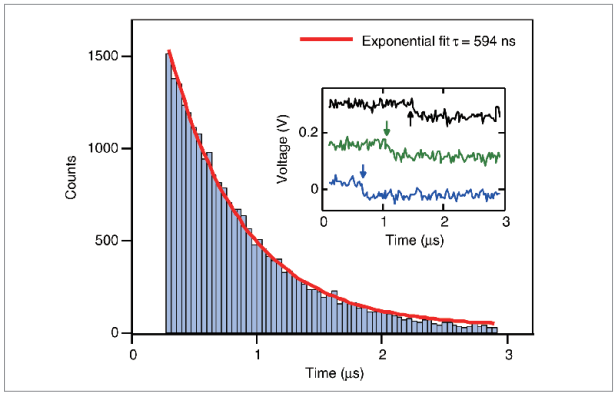


図　量子跳躍観測の生データ（挿入図）と跳躍時間のヒストグラム。挿入図では、典型的な3つのデータが示されており、それぞれ矢印の時刻で量子跳躍に対応する不連続な跳びが観測される。ヒストグラムは量子ビットのエネルギー緩和時間を反映した指数関数形の減衰を示している。

量子科学
最前線

時間はパーソナル 究極の時計で 見えてくる世界像

時間を18桁の世界最高精度で測る時計は日常生活に潜む相対論をあぶり出す

香取秀俊

（かとり・ひでとし）東京大学大学院工学系研究科教授 1994年東京大学大学院工学系研究科修了，工学博士。マックス・プランク量子光学研究所客員研究員を経て99年東京大学総合試験所助教授，2010年から現職。11年から理化学研究所香取量子計測研究室主任研究員を兼任。仁科記念賞，日本IBM賞，朝日賞，ラビ賞など受賞多数。

香取秀俊教授が主任研究員を務める理化学研究所の研究室には，文字盤も針もない2つの時計が並んでいる（右ページの写真）。2つの誤差は1秒につきわずか0.0000000000000000003秒。17桁までぴたりと一致する。香取教授が考案した「光格子時計」である。現在の時間標準であるセシウム原子時計より3桁高い18桁の精度を1秒の観測時間で計測するという目標を達成しつつあり，次の時間標準になると期待されている。

精度の検証は容易でない。これ以上正確な時計は存在しないので，同じものを2つ作って比較するしかないが，それには2つの時計をきっちりと同じ標高，同じ環境に置く必要がある。もし片方を1cm持ち上げたら，18桁目の数字がずれてしまう。アインシュタインの相対性理論によれば，「時間」はどこでも同じではなく，重力や速度によって進み方が変わる。1cm地球から離れたらその分だけ重力が弱くなり，時間はわずかに速く進むのである。

理研から15km離れた東京大学にも同じ時計を設置した。光ファイバーで両者を接続し，比較する計画が進んでいる。東大は理研よりも13m標高が低いので，時間が少しだけゆっくり進む。またこれだけ離れていると，局地的な重力変動の影響も無視できない。「例えば集中豪雨で地下に大量に雨が溜まれば，そこだけ重力が強くなり，時間の進み方が遅くなるのが見えるかもしれません」と香取教授は話す。

こうした相対論的な時間の変化は，これまで衛星の軌道計算や宇宙観測の際に問題になることはあっても，日常生活の中で検出されることはなかった。だが香取教授が開発した光格子時計は，日常生活の中に潜む相対論的な効果をあぶり出す。「時間が皆に共通の物差しではないことを教えてくれます」と香取教授は言う。

100万個の時計で測る

集中豪雨による一時的な重力変動を検出できるのは，光格子時計ならではの特徴だ。この時計は原理的には，1秒を測るのに1秒しかかからない。当然のように聞こえるが，そうではない。光格子時計より先に研究が始まった単一イオン時計は，奇妙なことに，1秒を18桁の精度で測るのに実に10日以上かかる。

超精密時計は，原子やイオンが吸収する光の周波数を測定して時間を測る。例えばストロンチウムの光格子

時計は，吸収する光が429兆2280億422万9873.4回振動する時間を1秒とする。

単一イオン時計は，電場の壁によってイオン1個を空中の1点に閉じ込め，その光の周波数を測定している。周波数を決めているのは，原子が励起した時と元に戻った時のエネルギー差だ。これを測定すると，量子ゆらぎによって値が毎回ばらつく。18桁の精度を実現するには，100万回測って平均する必要がある。このため10日かかるのだ。従って数時間しか降らない豪雨の影響を見ることはできない。

一方，光格子時計は，1個のイオンを100万回測定するのではなく，空中に原子を100万個並べて一度に測定する。単一イオンを100万回測定したのと同じ精度が得られ，極めて短時間で測定できる。だから重力の短時間の時間変動も検出できる。

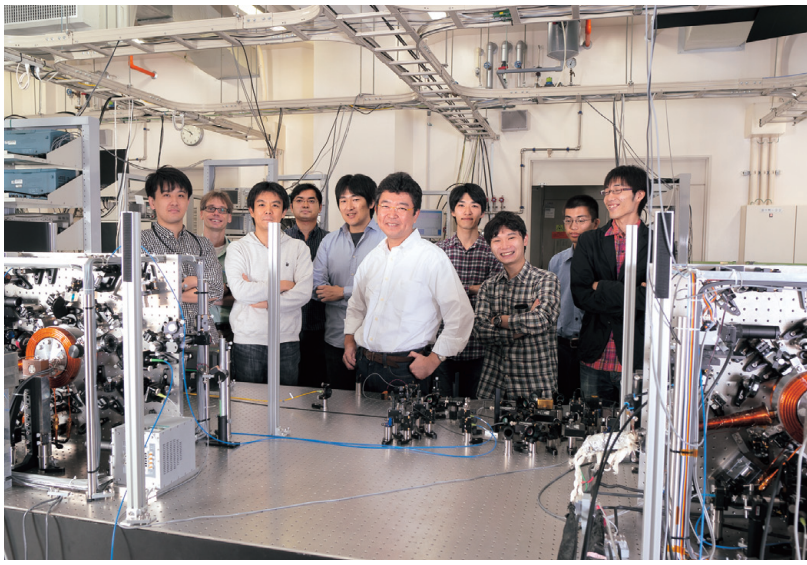
光格子時計の中ではストロンチウムなどの気体にレーザー光を照射し，鏡で反射させて定在波の1次元格子を作っている。空中を飛び回っていた原子が電場が強い定在波の腹のところにトラップされ，静止する。こうして整列させた原子の集団が吸収する光の周波数を測ることで，時間を計測している。

発想の原点となったのは，1994年の国際原子物理学会議だった。量子情報研究の草分けA. エカート博士が「もし単一粒子を量子制御することができたら，量子コンピューターを作ることができる」と講演し，それまでもっぱら基礎的な興味の対象だった量子制御に魅力的な応用があることを示した。

翌年単一イオンを使って量子計算をする理論が提唱され，実験の機運が盛り上がった。先陣を切ったのは米国立標準技術研究所のD. ワインランド博士だ。イオントラップを使って量子計算の基本操作を実行し，2012年にノーベル物理学賞を受賞した。

単一イオン時計は，量子コンピューターと同じ技術を用いている。ともにきれいな量子ビット（2つのエネルギー準位を持った孤立粒子）を作るのが重要で，量子計算機ではエネルギー状態の正確な制御が，時計ではエネルギー差の精密な測定がカギになる。

香取教授も，当時滞在していたドイツのマックス・プランク量子光学研究所でイオン量子ビットの研究に取り組んだが，はかばかしい結果が出なかった。そこで発想を変え，イオンならぬ中性の原子を，電場ならぬ光を使って閉じ込めることを考えた。これが大量の原子を光格子に閉じ込め，時計として使うアイデアにつながった。



だが実現にはハードルがあった。原子にレーザー光を当てると原子の2つのエネルギー準位が変化して，吸収する光の周波数がずれてしまう。香取教授は，2つのエネルギー準位をちょうど同じだけシフトさせ，エネルギー差を変えない「マジック周波数」が存在することをつきとめた。この周波数のレーザーで光格子を作ればシフトの影響はなくなり，正確な値を測ることができる。こうして光格子時計実現への道が開けた。

物理定数は変化するか

香取教授が提唱した光格子時計は，世界的に高く評価されている。現在，世界の15機関が開発し，7機関が試験運転を進めている。新たな時間標準として認められるためには，技術として確立し，どの機関でも安定的に使えるようにしなくてはならない。今後も検証を続ける必要があるが，10年以内に国際度量衡総会で新たな時間標準として採択されるとの見方が強まっている。

時間の測定は，昔から富と権力のインフラだった。かつて天文学者は日食を予測して王の権威をもたらし，18世紀には揺れる船内で機能するクロノメーターが船の現在地の把握を可能にして大航海時代を支えた。光格子時計も今後，時計の新たな使い方をもたらすだろう。例えばこの時計であちこちの時間を計測して精密な重力マップを作り，地下資源の探査や地球環境研究に利用するなどだ。

あらゆる量の中で最も精密に測定できるのは時間である。温度や質量など，さまざまな物理量の精密計測は，時間計測に移し替えることで精度が向上すると期待されている。

「ある種の物理定数は，宇宙の始まりからわずかに変化し続けているとの説があります。その検証も可能になりそうです」と香取教授は話している。

この記事は『日経サイエンス』2014年1月号に掲載されたものです。

[サブテーマ紹介]
第6回 量子通信

最先端研究開発支援プログラム量子情報処理プロジェクトでは、量子情報システム、超伝導量子コンピューター、スピン量子コンピューター、量子シミュレーション、量子標準、量子通信の6つのサブテーマについての研究活動を行っています。全6回にわたり各サブテーマの紹介をしています。今回は、「量子通信」の研究活動について解説します。

光で紡ぐ量子情報通信の着実な進歩と新展開

サブテーマ「量子通信」では、光をキャリアとした量子情報の伝達および操作を主題として、広く量子情報処理の研究を進めています。光の離散的な自由度から連続的な自由度、テーブルトップで実現するものから長距離通信を念頭に置いたもの、そのための中継ノードでの量子情報の操作や保存を担う物質系、量子情報を自在に操るための要素技術からそれらを効率よく利用し構築された量子プロトコルにいたるまで、基礎研究を含めた広範な領域をカバーしつつ、それらがシームレスにつながる研究を行っています。今回はこれらの研究の一端として各グループから順に「量子情報を保存した光波長変換」「通信波長帯量子ノード技術のツールボックス」「時間領域多重量子情報処理」「量子もつれ中継のための量子メディア変換」を取り上げて、各チームの研究状況を紹介します。

量子情報を保存した光波長変換

インターネットなどを利用した現在の情報処理ネットワークの多くでは、ハードディスクや集積回路メモリーを使って0か1かのビット情報を保持し、メモリーに読み書きした情報をリンクするために光通信を利用しています。同様に、量子コンピューター・量子通信・量子暗号などいわゆる量子情報処理においても、量子ビットを保存できる量子メモリー間を光でリンクして量子情報をやりとりすることが重要となります。ところが、量子メモリーの候補に挙がる物質系はすべてといってよいほど可視光付近（波長にしておよそ400〜900nm）であるのに対し、長距離光ファイバー通信においては1.3μm近辺か1.5μm近辺（以下通信波長と呼ぶ）しか通常使われず、他の波長では著しく効率が低下してしまいます。この波長の不一致を整合させるために、量子情報を保持したまま光の波長変換を行なう研究を進めています。そのような光波長変換器には、波長変換前後で量子情報を壊さないこと、様々な種類の量子メモリーに対応できるために広い波長領域で動作すること、の2点が重要です。

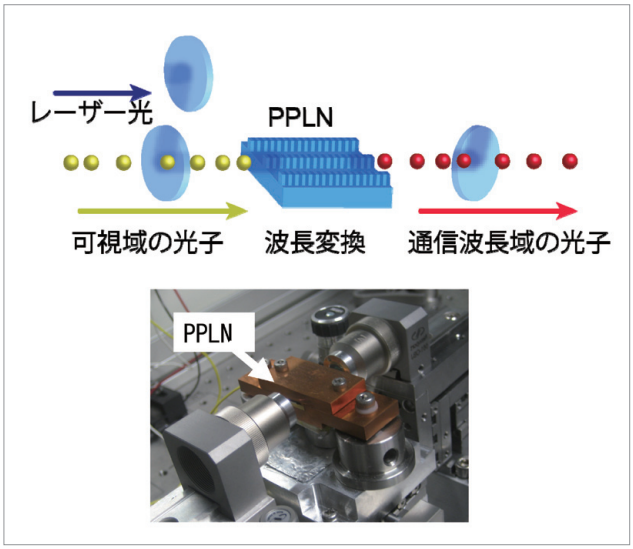


図1　PPLNを使った波長変換

井元グループの一つの課題として、周期分極反転ニオブ酸リチウム（以下PPLNと呼ぶ）という特殊な人工結晶を用いて、光の差周波発生を利用し、「可視域から通信波長への量子状態を保存した波長変換」を行っています。実験では、95%という高い忠実度を持つ可視域量子もつれ光子対を準備し、その一方の光子の波長を通信波長に変換しました。こうして得られた変換光子ともう一方の光子について忠実度を評価したところ75%という値が得られ、波長変換後も依然として高い量子もつれ状態を保持していることが分かりました。更に、以下でも登場する情報通信研究機構で開発された超伝導単一光子検出器を用いて93%までの高い忠実度を確認しています。これら結果は、本研究で作った波長変換器が、単に量子もつれを保存するということだけでなく、光子の持つ任意の量子状態を壊さずに波長変換できるということを意味します。

最近では、波長変換後の光子が量子プロトコルに応用可能かどうかを確認するために重要な2光子干渉の観測を行いました。この実験では、独立に用意された2つの光子を波長変換器に入力し、通信波長帯に変換された2光子の強度干渉を見ることになります。観測された明瞭度は76%と古典限界を

大阪大学
井元 信之
光子を使った量子通信

情報通信研究機構
佐々木 雅英
通信波長帯量子ノード技術のツールボックス

東京大学
古澤　明
時間領域多重量子情報処理

東北大学
小坂 英男
量子もつれ中継のための量子メディア変換

破る高いものが得られました。また、解析結果から波長変換器の不完全性から決まる明瞭度は91%であることもわかりました。今後は明瞭度を向上させ、量子プロトコルに応用していくことを目指して研究を行っていきます。その他にもいくつかの研究を進めていますが、別の機会に紹介したいと思います。

通信波長帯量子ノード技術のツールボックス

量子通信や光を用いた量子計算では、高効率の光子数識別器や高輝度の単一光子光源がさまざまな量子プロトコルを実装する上で重要なリソースとなります。NICTグループでは光通信インフラへの適用を目指し、通信波長帯において非古典光源と光子数識別器の開発に取り組んでいます。

特に、光子数識別器は量子通信や量子計算に必須のツールであり、我々は超伝導転移端センサ（TES）を用い、産総研と共同で、通信波長帯において90%を超える量子効率と0.2eVの高い光子数識別性能を実現しました。さらに、この光子数識別器は通信波長帯のS、C、Lバンド（おおよそ1460～1625nmの波長帯）にわたって高い検出効率を有しており、波長1535nmを中心として150nmの波長幅で生成した超広帯域スクィーズド光の顕著な偶数光子統計性を観測することに成功しました。この偶数光子統計の非古典性はKlyshkoの判定条件によっても確かめられました（図2）。

一方、通信波長帯での非古典光源の開発では、周期分極反転チタンリン酸カリウム（PPKTP）結晶を用いてパラメトリック下方変換の郡速度整合条件を制御し、高輝度の伝令付き単一光子源を開発しました。ここでは、伝令付き単一光子生成の元となる2光子状態において、シグナルとアイドラー光子が周波数相関を持たないため、バンドパスフィルタを用いることなく単一の周波数モードに単一光子を生成することができます。この2光子状態を複数用意し、低雑音・高感度の超伝導ナノワイヤ単一光子検出器（SNSPD）で検出することにより、4光子同時計数率の世界記録（0.56counts/s）を達成しました（R-B.

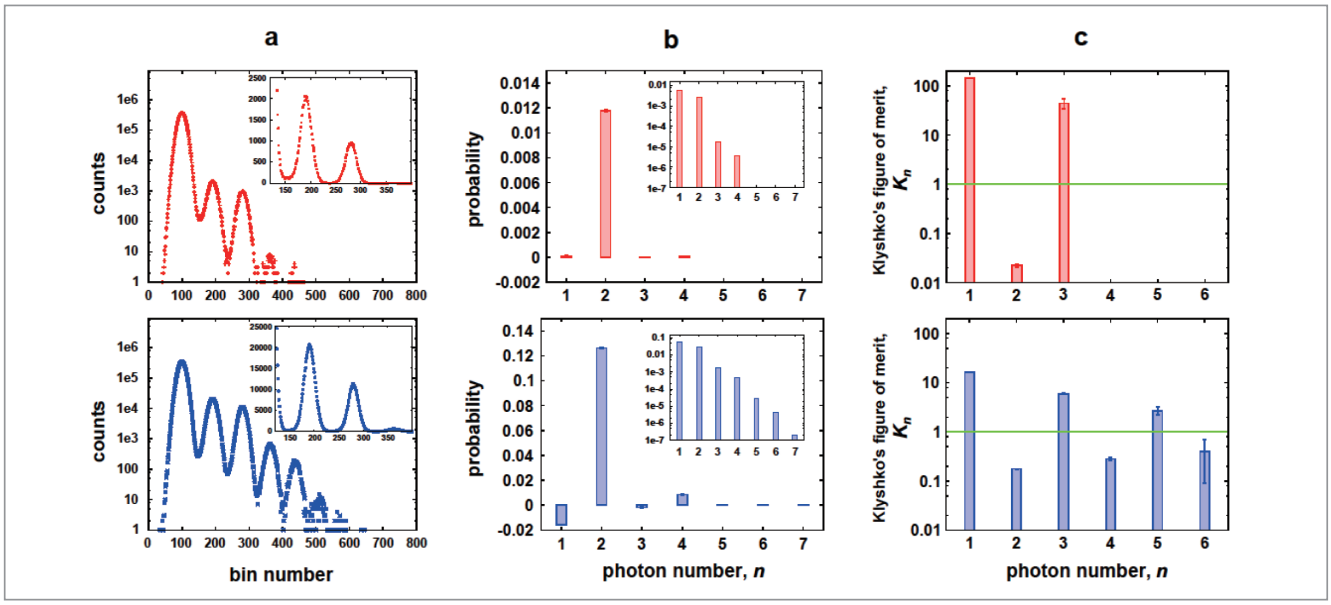


図2　超広帯域スクィーズド光の光子統計：上下のパネルはそれぞれ二つの異なる強度のポンプ光による実験結果。双方において偶数光子が非古典性判定条件（Kn<1）を破っている（cのコラム）。

Jin, et al, Phys. Rev. A 87, 063801 (2013).)。これは通信波長帯において従来比37倍の改善であり、また、他の波長帯での記録をも凌駕する値です（図3及び表1）。これまで、量子情報光学の実験の主戦場は主にSi APDの感度波長帯（600〜900nm）でしたが、今やSi APDを凌駕する性能を持つSNSPDとPPKTP結晶による高輝度光源の組み合わせは、光通信インフラ上での量子通信や光量子計算に基づく量子ノード技術の実用化に向けて、大きな一歩となるものです。

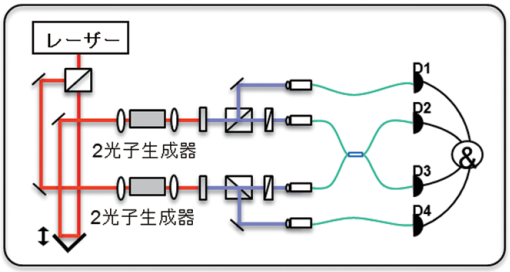


図3　通信波長帯における4光子同時計数の実験系。

文献	材料	波長	4光子同時計数率	検出器	明瞭度
1.Kaltenbaek2006	BBO	788nm	0.17cps	Si APD	83%
2. Mosley2008	KDP	830nm	0.25cps	Si APD	94%
3. Tanida2012	BBO	780nm	0.45cps	Si APD	95%
4. Soller2011	fiber	715nm	0.3cps	Si APD	84%
5. Takesue2007	DS Fiber	1551nm	0.06cps	InGaAs APD	53%
6. Xue2010	PPLN WG	1550nm	0.015cps	InGaAs APD	74%
7.Harada2011	Si WG	1551nm	0.011cps	InGaAs APD	73%
8. Our result	PPKTP	1584nm	0.56cps	SNSPD	85%

世界最高記録

表1　これまでの主な4光子同時計数の実験結果の比較。

時間領域多重量子情報処理

古澤グループでは、時間領域多重量子情報処理をテーマに研究を行っています。そのひとつのかたちが、time-bin量子ビットの連続量量子テレポーテーションです（S. Takeda et al., Nature 500, 315 (2013)、図4）。ここでは、従来、単一光子の縦横偏光のような2モードを用いて構成していた量子ビットを、

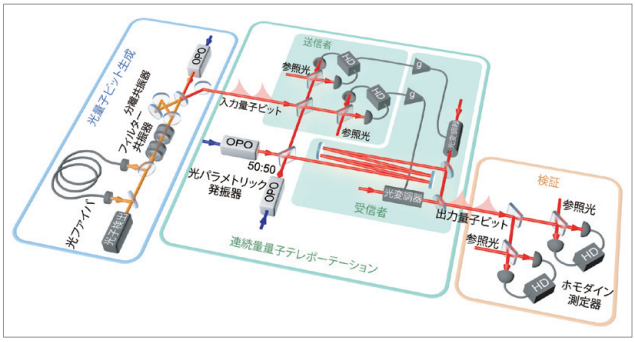


図4　time-bin量子ビットの連続量量子テレポーテーション

2つの時間スロットを用いた量子ビット（先に来る光子と後に来る光子の重ね合わせ）に置き換えることにより、1台の連続量量子テレポーテーション装置によって決定論的にテレポートすることを可能にしています。つまり、同じ量子テレポーテーション装置を、時間を分けて（コヒーレントに）2回使うという、時間領域多重を行うことにより、2モードの量子テレポーテーションを1モードの量子テレポーテーション装置で成し遂げました。平たく言うと、この方法を用いれば、2台の量子テレポーテーション装置が必要な操作を、半分の1台で成し遂げることができます。

同じような考え方をone-way量子コンピューティングにも応用しました。one-way量子コンピューティングは、クラスター状態と呼ばれる大規模多者間量子エンタングルド状態に、測定・フィードフォワードを繰り返すことにより量子コンピューティングを行うものです。簡単に言うと、入力と出力が異なる一般化された量子テレポーテーションを繰り返すことにより、量子コンピューティングを行うことになります。これを実現するためにはクラスター状態を生成する必要がありますが、現実には10者間ぐらいの量子エンタングルド状態が限界でした。我々は時間領域多重の手法を用い、2本の連続波スクイーズド光ビームにより、16000モードの多者間量子エンタングルド状態である超大規模クラスター状態の生成に成功しました（S. Yokoyama et al., Nature Photonics DOI 10.1038/nphoton.2013.287、図5）。これにより、one-way量子コンピューティング実現に大きく前進したことになります。

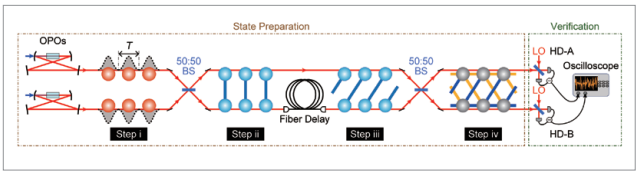


図5　時間領域多重の手法を用いた超大規模クラスター状態の生成

量子もつれ中継のための量子メディア変換

小坂グループでは、量子中継システムの実現に向けた量子インターフェースの研究を行っている。量子には様々な形態があるが、どれ一つとして万能なものはなく適材適所に利用しなければならない（図6）。特に光子は長距離伝送に、電子スピンは演算に、核スピンは長時間メモリーに適しており、これらを互いに量子情報をやり取りする量子メディア変換の必要がある。本グループでは、GaAsやInPなどのⅢ-Ⅴ族半導体量子構造

を用いて量子メディア変換の基礎実験を行ってきたが、近年ではより長時間の量子メモリー時間が容易に得られるダイヤモンド中の単一窒素空孔欠陥（NV中心）に注力して研究を進めている。

ダイヤモンドのⅢ-Ⅴ族に対する利点は、ホスト材料に核スピンを含まず、単一の核スピンを長時間量子メモリーとして利用できる点である。その位相緩和時間は現在では「秒」のオーダーでしか実証されていないが、適切に測定すれば「時間」のオーダーになると言われている。同じくⅣ族半導体であるシリコンに対する利点は、光量子ネットワークに欠かせない光子の発光・吸収効率が極めて良好な点である。さらに、スピンだけを利用するのであれば室温で、光子との接続を必要とする場合でも約10K以下であればよいのも、大きな利点である。

最近の当グループの実験成果は、ダイヤモンドNV中心を用いた単一光子と単一電子スピンの量子もつれ検出の基礎実証である（図7）。同様の機構により、単一光子と単一核スピンのもつれ検出および単一光子から単一核スピンへの量子状態転写の実験も進めている。量子中継には量子もつれの生成と検出の両方が必要であるが、現状ではもつれ検出にはビームスプリッターおよび光子検出器が使われている。これに対し、ダイヤモンドのNV中心の光子吸収にもつれ検出の機能を合わせ持たせることにより、中継効率を少なくとも4倍向上できると考えられる。また、発光と受光を組み合わせたバタフライ型の量子中継ネットワークを構成することにより、各中継ノードの量子メモリー時間を最小限に抑えることができる。

本グループでは、上記のような光子―電子スピン―核スピンの量子接続に留まらず、超伝導量子など他の量子メディアとの接続を目指し、FIRST内およびNICT委託研究における共同研究を行っている（図6）。

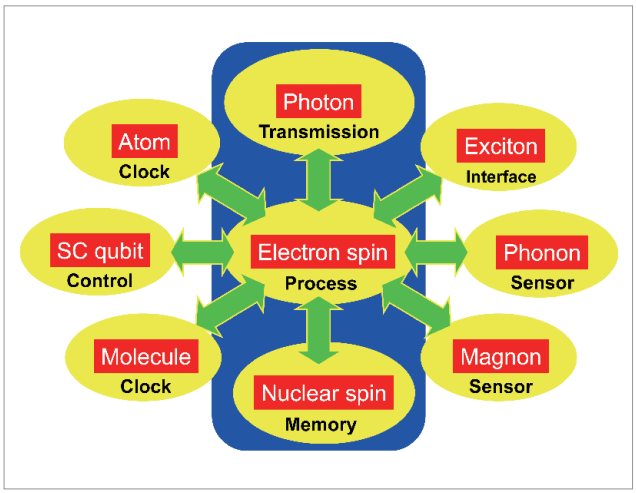


図6　時間領域多重の手法を用いた超大規模クラスター状態の生成

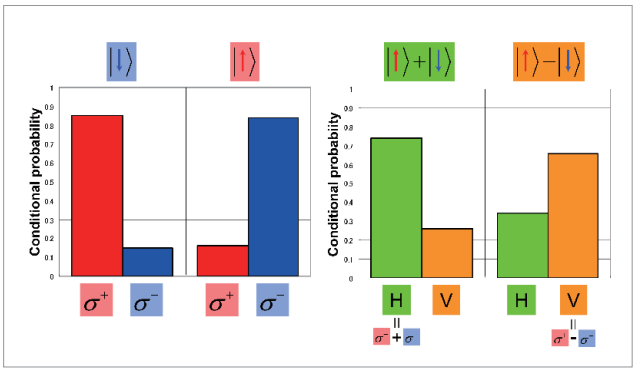


図7　光子偏光と電子スピンの量子相関検出

執筆者：

量子情報を保存した光波長変換
井元 信之（大阪大学）

通信波長帯量子ノード技術のツールボックス
佐々木 雅英（情報通信研究機構）

時間領域多重量子情報処理
古澤　明（東京大学）

量子もつれ中継のための量子メディア変換
小坂 英男（東北大学）

The 1st Awaji International Workshop on Electron Spin Science & Technology: Biological and Materials Science Oriented Applications (AWEST 2013)

■日程：2013年6月16日（日）～18日（火）　■会場：淡路夢舞台国際会議場
■参加者数：94名　■報告者：工位　武治（AWEST国際組織委員会委員長）

2013年6月16-18日の会期で、淡路夢舞台国際会議場にて、AWEST 2013 (The 1st Awaji International Workshop on Electron Spin Science & Technology: Biological and Materials Science Oriented Applications) が開催されました。AWESTは、今後「淡路アイランドコンファレンス」の愛称名で、毎年、同国際会議場にて、同じ時期に恒常的に開催されます。この国際会議は、太平洋を挟んで対岸に位置する米国のロッキーマウンテンにて開催されてきた、「ロッキーマウンテンコンファレンス」（55回、2013年）のカウンターパートとしての地位を目指して、米国の関係研究者との間で4年間をかけて計画されて実現したものです。AWESTは以下の三つの特徴を備えています。(1) 海外から参加者と国内参加者の比率は、1：2を下らないで、参加者総数は100名を超えない、(2) 若手研究者や大学院学生の会議での発表を重視し、優れた発表を国際標準で顕彰（Springer国際賞授与）し、学生の国際化に貢献する、(3) 関連分野を超えて、第一線で活躍する研究者を広く招聘し、融合研究・共同研究、及び人的交流を促進するだけでなく、若手育成のために会議運営に深くかかわっていただく。

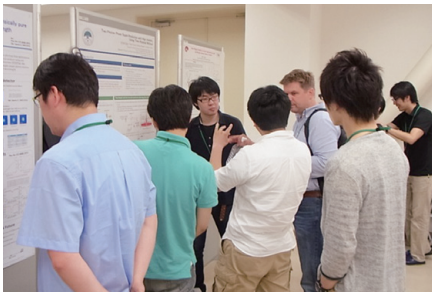
第一回の淡路アイランドコンファレンスでは、電子スピンサイエンスとスピンテクノロジーに関連して、スピン化学、スピン状態制御・量子情報処理、バイオスピンからマテリアルサイエンスに及ぶトピックスが取り上げられ、若手博士研究員や大学院学生を含めて、海外13カ国から33名の招聘者（総参加者94名）が参加しました。ポスター発表者全員が会議冒頭に2分制限のフラッシュ口頭発表を致しました。会議は午前8時15分から始まり、夜遅くまで口頭、ポスター発表が続き、学生の皆さんも短い時間でしたが非日常的な国際環境を愉しみました（http://www.qcqis.sci.osaka-cu.ac.jp/awaji/2013/）。来年のAWEST 2014も、有力国際学会のご支援をうけ、世界に「淡路アイランドコンファレンス」を定着させていきたいと思います。

The international workshop on new science and technologies using entangled photons (NSTEP 2013)

■日程：2013年7月8日（月）～9日（水）　■会場：大阪大学産業科学研究所
■参加者数：60名　■報告者：竹内　繁樹（北海道大学）

光量子情報科学の進展に伴い、量子もつれ光子対の発生技術は大きく進展しています。また、そのような量子もつれ光子対の応用も、量子情報通信に留まらず、従来の光計測を超える計測技術や、物質との相互作用を制御・探索する新たなツールとして注目されています。そのような新しい量子もつれ光子対の応用展開について、広く議論する場として、The international workshop on new science and technologies using entangled photons (NSTEP 2013) を、2013年7月8日と9日の2日間にわたり、大阪大学産業科学研究所において開催しました。会議は、国内外の招待講演者による1件の基調講演、14件の招待講演と、28件の一般申し込みによるポスター発表があり、9ヶ国から60名が参加しました。丁度会議の直前に梅雨が明け、酷暑の大阪での開催となりましたが、非常に活発な議論と親密な交流の場となりました。

基調講演では、光量子コヒーレンストモグラフィの発案と展開をはじめとし、量子もつれ光と応用に関する研究のパイオニアである米国ボストン大学のTeich名誉教授から、「多光子・もつれ光子によるイメージング、リソグラフィとスペクトロスコピー」と題する講演がなされました。他に、大阪大の栖原教授、スウェーデン王立工科大のCanalias教授、および物質・材料研究機構の栗村博士から、擬似位相整合素子によるもつれ光発生について、中国南京大のWu教授（代理Chen教授）からは、超伝導光検出器について、またカナダウォータールー大のResch教授、名古屋大の西澤教授、および北海道大の岡野研究員からは、量子および古典光コヒーレンストモグラフィについて、九州大の横山教授からは有機・無機ハイブリッド光導波路デバイスについて、また韓国浦項工科大のKim教授、大阪大の井元教授からは、量子もつれ光の光量子情報応用について、またイタリア・パビア大のMaccone教授、広島大のHofmann教授、新潟大の岡教授からは、量子もつれ光応用の理論研究について、それぞれ最新成果が報告されました。また、竹内は、量子もつれ光を用いた顕微鏡の実現に関する最新成果などを報告しました。ぜひ、今後も継続的な交流の場として発展させられればと願っています。



屋代中学・屋代高校出張授業

■**実施日** 2013年7月19日　■**対象・参加者人数** 中学生:80名、高校生:40名、韓国人高校生:40名
■**授業名**「長野県屋代高校での出張授業」　■**担当／報告者** 藤井啓祐（京大）、玉手修平（理研）、田島裕康（東大）

屋代高校における出張授業では、中学生向け、高校生向けにそれぞれ以下のような授業を行いました。中学生向け（玉手さん担当）：「身近な光と“量子”たち」量子力学における粒子・波動の二面性について説明。高校生向け（藤井さん担当）：「見るだけで変わる（分かる?）不思議な量子の世界」情報取得による干渉縞の消失からはじめて、コペンハーゲン解釈などの説明。その後、班に分かれてレーザーの干渉実験を行い、干渉を作る為に用いた針の太さを推定してもらいました。高校生の皆さんは非常に闊達に議論、実験を行い、正解を導く事が出来た班もいくつかありました。［田島 裕康］

中学生向けの授業では、量子を身近に感じてもらうために、自分たちでできるような干渉実験を中心に授業を行いました。授業をして驚いたのは、授業でこちらの使った”例え”や”イメージ”について質問されることが多かったことです。自分たちの物理に対する印象が直接生徒たちにも伝わるものなのだなと思い、アウトリーチの楽しさと難しさを同時に実感できたように思います。［玉手 修平］

高校生向けの授業においては、日常で身近に感じることが難しい「量子」を楽しく学んでもらうことに加え、「研究者」という職業を身近に感じてもうらうことにも主眼を置きました。授業では、量子の世界における現象についてクイズ形式で答えてもらいましたが、予想もしない独創的な回答があったのが印象的でした。アンケートでは、「量子について、こんなわかりやすく説明できる部分があることに驚いた。」「物理とはすごく堅苦しいものだと思っていたが、意外と身近」等の感想を頂きました。

また、研究者像に関しても、「自分が好きでしょうがないという仕事に就けるのは羨ましい。そうなりたい。」等、嬉しい反応が多々得られるとともに、一研究者として身の引き締まる思いでした。［藤井 啓祐］

コラム

青森県立三本木高等学校・附属中学校 SSH特別講演 ～科学する心を育む～

青森県立三本木高等学校・附属中学校 教諭　嶋　文子

本校は平成22年度にSSH校に指定され、“科学する心を育む”ための様々な事業を展開しています。生徒たちが最先端の研究に触れ自分自身で科学への興味関心を深める機会になれば、との思いから国立情報学研究所の出張授業をお願いし、この三年間お世話になってきました。出張授業での量子力学の講義や実験を通して、目に見えない量子の世界を理解することで、生徒は科学の世界への想像力を膨らませ、好奇心や探求心を高めてきたと感じています。さらには講師の方々の研究者になった経緯や研究生活の話は、生徒が科学者の世界を身近に感じ、自身の進路設計を描くための大きな指針にもなってきました。

昨年の出張授業で大変生徒たちの興味を引いた山本喜久先生、宇都宮聖子先生の講義を、今年は全校生徒にも聴かせたいとお願いしたところ、お忙しい中快くお引受け頂き、全校生徒対象の講演会を実施していただきました。量子コンピュータの研究紹介に生徒たちは科学への興味を揺さぶられ、スタンフォード大学の教育のあり方・考え方、学生へのスタンスを知ることは、生徒が現在や将来の学びを考える大変良い機会になりました。生徒とのセッションでは両先生に多くの質問に丁寧に答えていただきました。「海外で働くために必要とされることは何か」との生徒の質問に、「人に対してどれだけ優しくなれ、どれだけ人を思いやれるか、その人がいることで周りがどのくらい明るくなれるか、技術的なスキル以上に心を豊かにすることが人種を越えて伝わるものがある。」と山本先生に答えていただいたことは、参観していた全員の心に響いたと感じています。“君たちは世界の子供だ”の講演タイトルにも表れているように、これからを生きる高校生が、将来有為な存在になって欲しいという深い思いや温かいメッセージが山本先生の講演に込められていることに、私は深い感謝の気持ちを感じています。貴重な機会を与えていただいたことに心からお礼申し上げます。

●東北大学　電気通信研究所　量子物性分野　小坂グループ

震災からの復興
—輝く量子へ向けて—

当研究グループでは、量子中継システムの実現に向けた量子インターフェースの研究を行っている。様々な量子の中でも光子は長距離伝送に、電子スピンは演算に、核スピンは長時間メモリーに適している。これらの量子を適材適所に利用するには、互いに量子情報をやり取りする必要がある。

●量子情報に入ったきっかけ

きっかけは、NEC勤務時代に休職して渡米した2000年からのUCLA勤務時代に遡る。当時私はフォトニック結晶の研究に取り憑かれていたが、そのつながりでフォトニック結晶研究の創始者Eli Yablonovitch教授の元で働くことになった。当時DARPAのSpinsというプロジェクトが始まったばかりで、その中でCoherent detectorと呼ぶ光子から電子スピンへの量子変換検出器の開発を手がけたのがきっかけである。帰国後のNECではしばらく量子通信の長距離化に関わる実験を担当したが、まもなくして東北大通研の枝松圭一先生と共に研究室を立ち上げ、どうしてもやりたかった量子インターフェースの研究に戻った。幸い異動2年目にはFIRSTの前身のCRESTや総務省のSCOPEの代表をさせていただき、速やかに研究を立ち上げることができた。その中で、GaAs半導体量子井戸を用いた偏光から電子スピンへの状態転写、光による電子スピンのコヒーレンスのトモグラフィ読み出し、量子ドットを用いた単一光子から単一電子スピンへの変換、コヒーレント操作、検出など、UCLAでは消化不良だった仕事を一通り終え、今では次のフェーズに入っている。

●ダイヤモンド量子ビット

ダイヤモンドの研究に着手して5年目、SCOPE（2回目）やNICT委託研究のご支援で漸く成果が出始めた。ダイヤモンドの良い点は、とにかく長い量子メモリー時間が期待できることである。光子の吸収効率も極めて良好で、光量子インターフェースとしては最適である。ダイヤモンドの単一窒素空孔欠陥（NV中心）を用いた最近の実験成果は、単一光子と単一電子スピンの量子もつれ検出である。HarvardのMikhail Lukinのグループが2010年に成功した光子とスピンのもつれ生成の逆過程である。この二つが揃えば、量子中継を非常に簡素化することができる。私はもともと半導体レーザ屋で昔は発光のことばかり考えていたが、量子情報の分野に入ってからはなぜか受光のことばかりを考えている。量子の本質は観測者側に視点を移すことなので、当然のなりゆきかも知れない。発光と受光という極めて素朴な過程で量子中継ネットワークを構築することが今の夢である。学生時代の格子欠陥の研究やNEC時代前半に勢力を傾けた光電融合素子・光インターコネクションの研究も無駄ではなかったようだ。量子情報分野に入ってからは、多くの方々との共同研究のおかげでたくさんのことを学び、日増しにこの途方もない夢に近づいていると感じる。本研究の糸口を作っていただいた現阪大基礎工の水落憲和先生、何度も滞在させていただいき学会でも会うたびに懇意にしていただくドイツStuttgart大のJoerg Wrachtrup先生、日ごろからご議論いただくNIIの根本香絵先生、通研の枝松圭一先生を始めFIRSTおよびNICT委託研究チームの方々には特に感謝している。

●震災からの復活

この量子ニュースでどうしても触れなければならないのは東日本大震災である。当日は卒論発表会で研究室のあるナノスピン研究棟の最上階に皆集まっており、思い出すのも恐ろしい体験をしたが、幸いけが人はなかった。しかしながら実験室は壊滅的な状況で1年近く実験が全くできず、北大の竹内繁樹先生を始め多くの先生方に学生の短期滞在を申し出ていただいた。特に、FIRSTの支援でスタンフォードの山本喜久先生の研究室に3ヶ月間学生を滞在させていただき、学生には大変貴重な機会を与えていただいた。NIIのスタッフの方々にも多大な事務的負担をお掛けした。今では少なくとも見かけ上はすっかり復活し、輝く量子の実現に向けて気持ちを入れ替え、以前にも増して実験に没頭している。FIRSTに関わる多くの方々に多大なご心配とご支援をいただき、この場で深くお礼を申し上げます。

（小坂 英男）

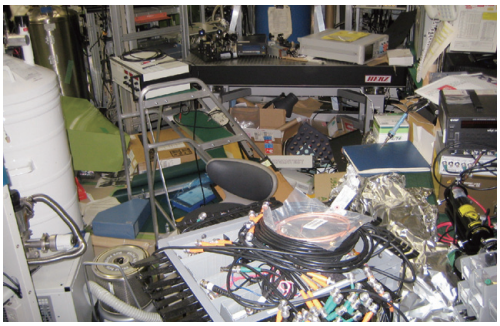


図1 震災直後の実験室

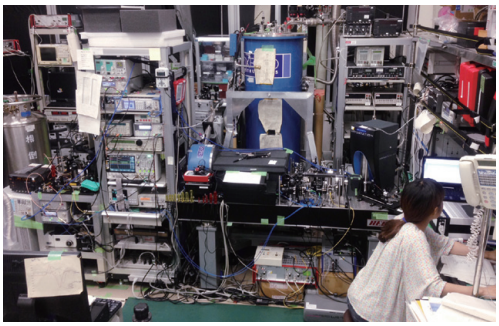


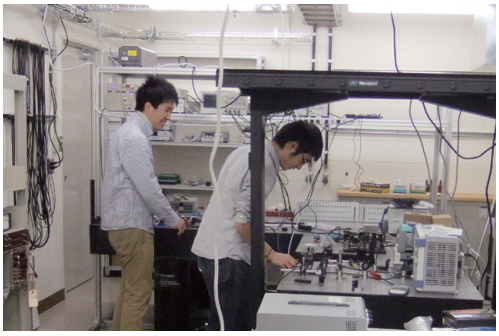
図2 現在の実験室

東京大学大学院工学系研究科　光量子科学研究センター　小芦研究室

物理の本当の理解とは、美しい説明ができること

当研究室は、東大の本郷キャンパスから１ブロック離れた浅野キャンパスにある工学部９号館を本拠にしており、光量子科学研究センターに属しています。また、筆者は物理工学専攻で講義を行い、研究室の学生はみな物理工学専攻、物理工学科の学生ですから、物工の研究室と言ってもよいと思います。現在はスタッフ２名、ポスドク１名、学部・修士課程の学生６名の体制ですが、来年度からは博士後期課程の学生も増え、よりにぎやかになると期待しています。当研究室の属する光量子科学研究センターは、光科学研究教育の中核を担う国際拠点形成を目指して設立されたセンターで、先端光科学を分野横断的に展開するための教育研究を進め、理学、工学の枠を超えた活動を行っています。当研究室の学生の中には、センターのプロジェクトに加わって、理学系の学生と一緒に日夜実験を重ねている方もいます。

最先端研究開発支援プログラム（FIRST）「量子情報処理プロジェクト」では、量子暗号の新しいプロトコルのセキュリティの確立や、現実的な装置を用いた場合のセキュリティの問題に取り組んでいます。最近は、レーザーパルス列の位相を２値で切り替えるだけ、というシンプルな構成の方式のセキュリティ証明が可能になりました。数多くの光パルスがつながっているので、かなり複雑な理論なのですが、そのからくりを紐解いていくと、量子暗号の根本原理に関わる新しい性質が姿を見せはじめていて、自然法則の奥の深さに驚いているところです。



新学術領域研究「量子サイバネティクス」（代表：理研・蔡兆申）では、光を軸足とした量子情報の研究を、大阪大基礎工の井元・山本研究室と共同で担当しています。光が主役となるのは通信ですから、通信に絡んだ問題を取り上げ、雑音から量子情報を効率よく保護する手法や、ファイバ通信に適した波長と可視付近の波長を量子的に結ぶインターフェースの研究を行っています。

一方、光系だけでできることは限られていますので、物質系と組みあわせてそのポテンシャルを拡げていくことがこの分野の必須課題だと思います。当研究室では、真空誘起透明化（VIT）の現象を初めて実験検証した丹治はるか氏を助教に迎え、中性原子集団と光共振器の実験系を立ち上げています。光量子科学研究センターには冷却原子系の専門家が揃っていますから、この方面でも新たな展開が生まれることを期待しています。

タイトルには、何だか偉そうなフレーズを書いてしまいましたが、筆者が研究で一番喜びを感じるのは、わかった、と感じるそういう瞬間なのです。研究室のゼミは、納得のいく説明にたどり着くまで何時間も終わらない、ということもよくあります。理論研究であれ、実験研究であれ、そういった喜びを共有できる研究室でありたいと思っています。

（小芦 雅斗）

エッセイ

Essay

夏休みの工作

小学生の頃、夏休みの工作で何を作るかを考えるだけで心が踊った。大したものを作れる知識も技術も持っていなかったが、自分なりに思いを馳せてあれこれと思案したものだった。ある日、ゲームセンターにあるピンボールに目がとまった。常連の中学生が巧みなフリッパーさばきで高得点をあげていた。ボールは電気仕掛けの衝撃で盤面を勢い良く駆け巡り、ランダムな運動と、重力に従った美しい軌道を繰り返していた。限られた小遣いで自分もやってみるとすぐにゲームオーバーになってしまうところが悲しい。何回かトライしたがそれほど上手になる気配はなく、ゲームで小遣いを使い果たす気もなかったのであきらめて帰宅した。でも、あの洗練されたボールの運動は衝撃的で、無性にピンボールが作りたくなった。再び、ゲームセンターに行き、ボールを弾き飛ばす機構を観察したが、それをどうやって作ればよいのかは全く見当がつかなかった。その後も、ピンボールを作りたいという衝動はやまず、仕組みをあれこれ思案するようになっていた。電気仕掛けを作ることは到底無理なので、機械仕掛けのフリッパーを考案していたが、試作とも呼べないような残骸（ジャンク）ができただけで夏休みは終わってしまった。形にこそならなかったが、アイデアを練ることや、作ることの面白さを味わった。

大学に入ると少しは知恵がついてきて、旋盤やフライス盤を使えば自由な形状のパーツが作れるし、簡単なアナログ回路やデジタル回路なら作れるようになり、出始めのパソコンでプログラムも作れるようになった。夏休みになると、何らか工作をしては残骸も増えていった。つい工作に熱中してしまうので、夏休み後の試験の成績はいつも悲惨だった。ある年は、半導体レーザーという魅力的な言葉に惹かれて、（単に、光らせてみたかっただけなのだが）レーザーポインターのようなものを作ってみた（今でも自宅のジャンク箱に眠っている）。半導体レーザーダイオードを買ってきてレンズで集光してみると、可視域ぎりぎりだったのでかなり暗かったが、壁に赤い点が投影された。フォトダイオードで光出力を見ると、閾値以上の電流で発振する様子を感じることができた。また、別の年には、CCDイメージセンサーに目が止まった。光電変換で生成された電荷をバケツリレーによって電荷を伝達していることを知り驚きだった。自分が電子1個の量子状態を操作するようになるとは全く想像していなかったが、半導体の中で電荷を自由に操れることは衝撃的だった。半導体に深く興味が湧いてきた頃だった。

半導体の研究室に所属すると、毎日が夏休みのような気がした。正直いって、研究というよりは、8割くらいの時間は測定装置を作ることに専念していたような気がする。いいデーターを取ろうと思うといい装置を作りたくなるし、自分で作った方があとで容易に改良することができるなど利点も多い。夏休みという期限もないし、一人で実験していたので気ままに工作を続けていたが、改良を重ねるたびに古い装置や部品は残骸の山に消えていった。先日、ある先生から「君が作った測定装置がうちにある」と言われ、20年以上前の残骸を保存してくれていることに驚いた。

年を重ねると、日々の仕事に追われて、自分でモノを作る機会が減ってくる。簡単なものは学生に作ってもらったり、技術を要するものは業者に依頼したり、その度に自分の工作の楽しみが減っていくような気がする。自分で作っていく中で、新しいアイデアがうまれたり、感動に出会えたりするので、実験研究家として工作は重要だと思う。積み重なる業務からの逃避なのか、夏休みになると工作をしたくなってしまう。今年の夏休みも、つい工作に走ってしまった。実験用の小物なので、ここで紹介するほどのモノではないが、新たな残骸ができてしまったことは確かである。

藤澤 利正（東京工業大学）

No.14 December 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:03-4212-2757 FAX:03-4212-2817 e-mail:first_jimu@nii.ac.jp