

量子ニュース

CONTENTS

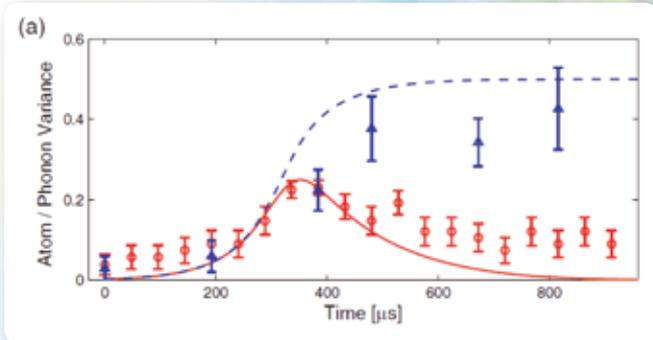
量子科学最前線

量子世界から外へ 若手研究者が語る未来像



最近の研究成果

冷却イオンを用いた “ポラリトニックな励起”の量子相転移の実現



海外研究動向
光量子計測の研究動向

2013年度 仁科記念賞受賞

FIRST量子情報処理プロジェクト全体会議2013

●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) 榎 裕之(豊田工業大学)
- 超伝導 井口 家成(元東京工業大学) 前川 禎通((独)日本原子力研究開発機構)
- 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

■事務局よりご挨拶

最先端研究開発支援プログラムが平成25年度末をもって終了するのに伴い、本「量子ニュース」の発行は今号が最終号となります。

この原稿の作成時点では、プロジェクト終了後の研究体制、及びその支援体制は確定しておりません。確定次第、関係各位には別途お知らせを差し上げます。なお、本プロジェクト参加各位におかれましては、プロジェクト終了後も報告や評価等の業務に対応いただきますので、各機関の支援組織も含め引き続きご協力願います。

末筆となりますが、本紙を愛読くださった皆様に改めて感謝を申し上げますとともに、これまでプロジェクト運営及び資金面でサポートいただいた内閣府・日本学術振興会の関係各位に、厚く御礼申し上げます。量子情報処理分野の研究は今後も息の長い活動となりますが、引き続きご理解とご支援を賜りますよう、何卒よろしくごお願い申し上げます。

● AWARD

- 2013年11月：応用物理学会 第35回(2013年秋季)応用物理学会講演奨励賞 大間知 潤子(東京大学)
- 2013年11月：応用物理学会 第35回(2013年秋季)応用物理学会講演奨励賞 大久保 章((独)産業技術総合研究所)
- 2013年11月：GeneExpression Systems & ARCEI Quantum Innovator Award 蔡 兆申((独)理化学研究所／日本電気(株))
- 2013年12月：公益財団法人仁科記念財団 第59回仁科記念賞 高橋 義朗(京都大学)
- 2013年12月：公益財団法人仁科記念財団 第59回仁科記念賞 香取 秀俊(東京大学)

光量子計測の研究動向

北海道大学 教授
竹内 繁樹

量子情報科学は、情報の根幹を、0と1の何れかの値のみをもつ(古典的な)ビットから、量子力学的な重ね合わせ状態や量子もつれ状態を取り得る「量子ビット」へと置き換える試みである。その対象として、量子コンピュータや量子暗号の研究が急激に進展したことにともない、単一光子源や光子検出器の性能が近年著しく向上してきた。このような背景のもと、量子情報科学の「計測」への応用が最近新たに注目されている。「情報」と「計測」に大きな隔たりを感じられるかもしれないが、計測は「パラメータを出来る限り高い精度で推定する」行為であり、情報科学と極めて密接に関連している。本稿では、特に光を用いた量子計測に特化するが、他の媒体については、量子ニュースno.7の、平野琢也先生による「磁力計について」も参照して欲しい。本稿では、大きく3種類の光量子計測を紹介する。

1つ目は、干渉計の位相測定感度を、標準量子限界と呼ばれる通常の光の限界を超えて向上させようとするものである。光の経路を半透鏡で2つに分けた後で再び合波し、その2つの経路差の情報を得る「干渉計」は、重力波検出から、顕微鏡による生体の無染色観察まで、非常に幅広い分野で用いられている。その位相差(経路差の 2π 倍を波長で規格化したもの)の精度は、通常の光(レーザー光など)では、入力する光の光量、すなわち光子数を N とすると、光の粒子性に起因するノイズにより $1/\sqrt{N}$ で与えられ、これは標準量子限界またはショットノイズ限界と呼ばれる。これに対し、ある種の量子もつれ光を用いると、標準量子限界を超え、極限的には、光子数 N に対して $1/N$ の精度(ハイゼンベルク限界と呼ばれる)を得ることができる。標準量子限界を超えるには、量子的な光の状態(単一光子源、量子もつれ光源)が必須であり、測定を工夫しても得られないことも明らかになっている^[1]。我々は、4つの量子もつれ光子を用いた実験^[2]を進展させ、最近、標準量子限界を超える位相差顕微鏡^[3]をFIRSTプロジェクトにおいて実現した。他にも、英国ブリストル大から導波路干渉計による蛋白質濃度測定^[4]が、豪州国立大からは微粒子のトラッキング^[5]など、様々な計測に実際に用いる試みが注目されている。

次に紹介するのは、量子推定理論に基づいた計測技術である。量子推定理論とは、量子力学によって記述される対象について知りうる情報の限界を統計学の立場から明らかにする理論である。長岡、藤原らは、未知状態の光子が有限個

与えられた際に、その状態を最も精度よく適応的に推定する方法(適応量子状態推定)を提案、その漸近的な最適性を証明した。この方法を用いると、通常の固定された状態基底を用いた量子状態トモグラフィーに比べ、状態によっては10倍以上高い精度で推定できることが示されている。最近我々は、光子の1つのパラメータに対して適応的な測定を実施する、量子状態推定の検証実験を実現した^[6]。この研究は、たとえば、細胞内の蛍光蛋白質の「方向」を、わずかに検出される光子から、可能な限り正確に推定することなどへの応用も期待できる。類似の研究が、最近カナダ・トロント大^[7]、露国モスクワ大^[8]からも、個々の光子に対する逐次適応ではない方法について最近発表されるなど、関心が高まっている。

最後に、量子もつれ光を用いた特長をもつ新しい計測技術である。光の干渉縞は、さまざまな計測技術に応用されている。特に最近急速に発展しているものの一つが、光コヒーレンストモグラフィ(OCT)と呼ばれる技術であり、眼科における診断では、無くてはならない装置となっている。その際に問題になるのが、媒質中の位相分散の影響である。OCTの分解能が $10\mu\text{m}$ 程度で制限されているのは、位相分散の影響で干渉縞が引き延ばされることが原因の一つとなっている。ところで、パラメトリック下方変過程等で発生した光子対は、その2つの角振動数の和が一定という、角振動数についての量子もつれ状態にある。このような光子対を用いた場合、2光子量子干渉縞の形状は、2次以上の偶数次の位相分散の影響を受けない。この性質を利用した、量子OCTにより、 $1\mu\text{m}$ を切る分解能の実現が期待されている^[9]。

これらの研究は、量子情報科学が、量子暗号や量子コンピュータに留まらず、より広い科学の諸分野と接点を見いだす好例と思われる。また、上記のいずれについても、量子情報、量子光学の立場から解明すべき重要課題が山積している。応用と手を携えるかたちで、これらの研究の発展が期待される。

[1] Phys. Rev. Lett. 96, 010401 (2006) [2] Science, 316, 726 (2007) [3] Nature Commun. 4, 2426 (2013) [4] Appl. Phys. Lett. 100, 233704 (2012) [5] Nature Photon. 7, 229 (2013) [6] Phys. Rev. Lett. 109, 130404 (2012) [7] Phys. Rev. Lett. 111, 183601 (2013) [8] Phys. Rev. A 87, 062122 (2013) [9] Phys. Rev. A 88, 043845 (2013)

量子コンピュータを構成する全ステップを示し、評価可能に

論文情報 Simon J. Devitt, Ashley M. Stephens, William J. Munro, and K. Nemoto, "Requirements for fault-tolerant factoring on an atom-optics quantum computer", *Nature Comm.* 4, 2524-1-8 (2013)

関連URL <http://www.nature.com/ncomms/2013/131003/ncomms3524/full/ncomms3524.html>

国立情報学研究所
根本 香絵

量子制御は近年飛躍的に進展し、実験的な成果では、世界的にも10量子ビット程度のもや、90%以上の精度を持つゲートもさまざまな系で見られるようになった。一方で実験研究においても、理論的な指針に沿った将来の量子情報システムの基礎素子としての機能の実現へ向けた研究が主流になってきている。これらの基礎素子が実現し、大規模な量子コンピュータを構築するならば、どのくらいの性能で、どのくらいのリソースを必要とするだろうか？

これを考えるためには、まず量子コンピュータの組み立て方を明らかにする必要がある。量子コンピュータの基本素子からの組み立てを示すのは、アーキテクチャだが、実際に量子コンピュータを動作通りに評価するためには、素子だけでなく制御方法(ソフトウェア)まで含めて考慮する必要がある。しかしアルゴリズムから素子に至る全技術レイヤーを統合する困難さから、これまでは量子コンピュータ全体としての評価は不完全であった。今回当研究室では、世界で初めて最下層の構成素子から最上層のアルゴリズムまで、新たに必要となるレイヤーも含めて特定し、大規模な誤り耐性のある量子コンピュータに不可欠なすべてのステップを明らかにした。

誤り訂正、量子コンピュータアーキテクチャ、ゲート分解などの各ステップは、それぞれ独立した分野として研究されてきたものだが、今回の統合化によりアルゴリズムの振る舞いを、素子の振る舞いへと変換することができ、量子コンピュータのリソースと性能の

評価が可能となった。

これにより素子の高精度化よりもソフトウェアによる高速化の方が有効であることも明らかになり、ソフトウェアの重要性が示される一方、実現すべき素子の技術レベルの低減化が可能とも示唆するものである。



NIIにおけるプレス発表の様子 (2013年10月8日)

冷却イオンを用いた“ポラリトニックな励起”の量子相転移の実現

論文情報 K. Toyoda, Y. Matsuno, A. Noguchi, S. Haze, and S. Urabe, "Experimental realization of a quantum phase transition of polaritonic excitations", *Phys. Rev. Lett.* 111, 160501-1-5 (2013)

関連URL <http://prl.aps.org/abstract/PRL/v111/i16/e160501>

大阪大学
占部 伸二

固体物理などの強い相関を持つ多体系の量子シミュレーションとして、原子を含む結合した光共振器列のモデルが提案されている。このモデルは、各サイトへの個別アクセスなどが容易なことから、光格子中の冷却原子の系の相補的なモデルとして期待され理論的な解析が進められてきた。各共振器内の二準位原子と光電場の強い相互作用を用いる場合にはJaynes-Cummings-Hubbard (JCH) モデルと呼ばれる。イオントラップなど様々な系での実現の提案がなされてきたが、実験的な実証は未着手であった。今回、我々のグループは、リニアトラップ中に捕獲されたイオンの内部状態と振動フォノンを用いて、JCHモデルの実証実験に初めて成功した。

リニアトラップの横方向のポテンシャルの束縛が強い場合には、イオン振動の横モードのフォノンは各イオンに局在し、クーロン相互作用によりイオン間をホッピングすると見なされる。このイオン鎖に、イオンの内部状態とフォノンを結合するレッドサイドバンド遷移を励起するレーザー光を照射すると、JCHモデルのハミルトニアンが実現される。実験では、振動基底状態まで冷却した二個のイオンに対し、二個の励起が各イオンの内部状態に局在した初期状態を作り、レーザーの離調と振幅を変化させて系の基底状態を断熱的に移行させることにより、量子相転移の観測を行った。この結果、励起がイオンの内部に局在した“絶縁体”の状態から、原子とフォノンが結合した“ポラリトニックな超流動状態”を経て、フォノンが系全

体に広がる“フォノン超流動状態”へ量子相転移することが確認された。図は各サイトにおける原子の励起数とフォノン数の分散を示したもので、上記の三つの相が実現していることを示している。今後は、より多くのイオンを用いた実験に発展させていくことが課題となる。この成果は、注目論文として米国物理学会のオンラインジャーナル (*Physics* 6, 112, 2013) にViewpointとして解説付きで紹介された。

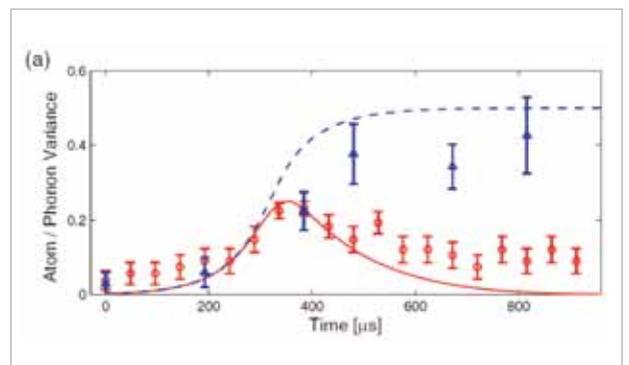


図 基底状態を断熱的に変化させた場合の、各サイトにおける原子の励起数の分散 V_a (赤○) とフォノン数の分散 V_p (青△) の測定値。実線と点線はそれぞれの理論値。左端は V_a, V_p ともに零の“絶縁体”状態、中間地点は V_a, V_p ともに分散が有限な“ポラリトニックな超流動状態”、右端は V_a が零、 V_p が有限な“フォノン超流動状態”を示す。

3 従来比 1000 倍超の超大規模量子もつれを実現

論文情報 S. Yokoyama, R. Ukai, S. C. Armstrong, C. Sornphiphatpong, T. Kaji, S. Suzuki, J. Yoshikawa, H. Yonezawa, N. C. Menicucci, and A. Furusawa, "Ultra-large-scale continuous-variable cluster states multiplexed in the time domain", Nature Photonics 7, 982-986 (2013)

関連URL <http://www.nature.com/nphoton/journal/v7/n12/full/nphoton.2013.287.html>

東京大学

横山 翔竜、古澤 明

量子コンピューター実現への鍵は超大規模量子もつれの生成技術である。2000年頃からさまざまな量子系を用いて量子もつれを大規模化する試みが盛んになされ始めたが、イオンを用いた14量子間のもつれの生成が最大であった。光を用いる場合、スクイズド光を干渉させることで容易に量子もつれを生成できるが、従来の手法では大規模化に伴い装置が拡大してしまうという問題のため、9量子間のもつれの生成が限界であった。量子もつれ生成の大規模化は非常に困難であり、量子コンピューター実現への大きな障壁となっていた。

今回、我々は時間領域多重の手法を基に超大規模量子もつれ生成装置を開発し、量子もつれの規模という問題を初めて解決した。時間領域多重という手法を適用すると、一つのスクイズド光発生機には複数のスクイズド光があるとみなすことができ、二台の発生機のみで超大規模量子もつれを生成できる。具体的には、時間的に分割された多数のスクイズド光を一度干渉させ、光ファイバーで時間をずらし時間的に前後の光を再び干渉させることで、時間的に前後のスクイズド光がもつれあった状態を生成することができる。我々は時間領域多重化のための損失の非常に少ない光遅延系など、多くの技術開

発を行い、装置を構築した。その結果、従来比1,000倍超となる16,000量子以上がもつれあった超大規模量子もつれの生成に成功した。

連続量の手法を用いて量子ビットを処理するハイブリッド量子情報処理では、有限のスクイズド光を用いてエラー耐性のある量子コンピューターを構築できることが最近報告されている。本成果により、大規模量子もつれ生成という最重要課題が十分に克服されたため、今後は超大規模量子もつれをハイブリッド量子情報処理へ活用するなどの応用展開が期待される。

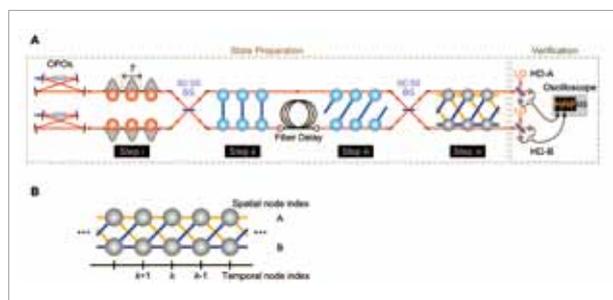


図 (A) 時間領域多重による超大規模量子もつれの生成方法。(B) 生成した超大規模量子もつれのイメージ図。丸とそれらをつなぐ線は、光の波束モードと量子もつれを表している。

4 量子コンピュータの青写真

論文情報 R. Van Meter and C. Horsman, A blueprint for building a quantum computer, Communications of the ACM, 56(10), 84-93 (2013)

関連URL <http://cacm.acm.org/magazines/2013/10/168172-a-blueprint-for-building-a-quantum-computer/fulltext>

慶應義塾大学

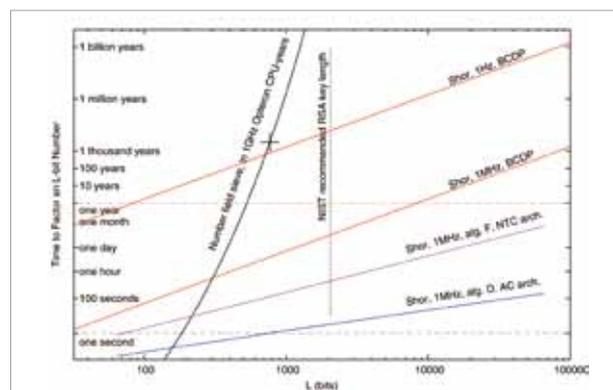
Rodney Van Meter

この十年間で量子計算の実験は多くの面で進んでいる。たとえば、理研の蔡兆申先生によれば、超伝導量子ビットの保存時間が毎年倍程度に改善しており、量子エラー訂正の効果が出る状況に近づいているとのことである。半導体と古典コンピュータアーキテクチャの場合と同様に、量子コンピュータを実現する技術と、量子コンピュータアーキテクチャは別の分野である。古典コンピュータでは解けない問題を解ける量子コンピュータの設計を考案し、技術を適用し、実用的な装置を作成するのが目標である。このような取り組みは、世界中の様々な研究所で進んでいる。

最も大きな壁は量子エラー訂正である。エラー訂正のために必要な量子ビットの数が増えるに伴い、Solovay-Kitaev分解後のゲート数が増大するが、エラー訂正の関係で用いることができる論理ゲートの種類に限られる。そのため、エラー訂正を適用した実装のゲート数が増えてしまう。たとえば、物理層におけるユニタリ演算とくらべ、論理 Toffoliゲートの実行時間が千倍程度になる可能性がある。

ある量子アルゴリズムのおかげで、計算量のクラスは指数時間から多項式時間になるので、一つのゲートあたりの所要時間はさほど影響しないと思われるかもしれないが、そうではない。図を見て欲しい。この図で、横軸は素因数分解しようとしている数のビット

長である。黒い線は古典アルゴリズムで分解の解ける時間。色のついた線は Shor のアルゴリズムを利用した量子コンピュータで解ける時間を示している。それぞれのプロットは論理ゲートの速さとアーキテクチャが異なる。物理層と論理層でゲートの並列化は重要である。たとえば、量子ドットの技術で、2010年に我々が提案したシステム [Int. J. Quantum Information 8, 295, 2010] では、千ビットの数を分解するのに年単位の時間を必要としたが、2012年に Jonesら提案したシステム [Phys. Rev. X, 2, 031007, 2012] では、週単位に減少できている。



本プロジェクト 量子標準 サブテマリーダーの香取秀俊教授(東京大学)と量子シミュレーション サブテマリーダーの高橋義朗教授(京都大学)が、仁科記念賞を受賞されました。

仁科記念賞は 故仁科芳雄博士の功績を記念し、原子物理学とその応用に関し、優れた研究業績をあげた比較的若い研究者を表彰することを目的とします。受賞者には賞状と賞牌、および1件に対し50万円の副賞が贈呈されます。ここにいる原子物理学とは、原子、分子、原子核、素粒子はもちろんのこと、これらの関与する基礎的なミクロの立場に立った物理学であるが、直接原子物理学に係わるものに限らず、理学、工学、医学等あらゆる分野において原子物理学に深い関連のある研究を含むものとします。

2013年度の仁科記念賞は次の方々に贈られます。

受賞者：香取 秀俊 氏(東京大学大学院工学系研究科教授、理化学研究所主任研究員)／受賞者業績：光格子時計の発明

受賞者：高橋 義朗 氏(京都大学大学院理学研究科教授)／受賞者業績：イッテルビウム超低温量子系の創出

受賞者：近藤 敬比古 氏(高エネルギー加速器研究機構特別教授)、小林 富雄 氏(東京大学素粒子物理国際研究センター教授)、

浅井 祥仁 氏(東京大学大学院理学系研究科教授)／受賞者業績：ヒッグス粒子発見に対する貢献

(仁科記念財団ホームページより抜粋)

15年目の光格子時計

東京大学 香取 秀俊

このたび「光格子時計の発明」に対して仁科記念賞を頂戴し、いくつかの奇遇と合わせ、望外の喜びを感じています。1つは、同じ研究分野で、もうかれこれ20年以上にわたって切磋琢磨してきた高橋義朗さんと同時に受賞できたことです。もう一つは、山本喜久先生が領域統括、中心研究者として推進されたCREST、FIRSTプロジェクトを通じて、10年近くにもわたって研究支援を頂いた節目の年に、光格子時計の研究を評価いただけたことです。

この2つをとっても、1つの研究が多くの方々との関係性と、ご支援から成り立っていることを思わずにはいられません。さらに遡れば、この研究の出発点となった五神先生のERATOプロジェクト、そして、高橋さんと私を、この研究分野に誘ってくださった、藪崎努先生と私の恩師の清水富士夫先生に辿り着きます。学生の頃参加した研究会で、藪崎先生と清水先生が仲良く並んで座り、スピーカーそっちのけで楽しそうに研究のお喋りに興じている風景を目にして、ああなりたいものだと思ったものでした。両先生が築いてくれた日本の原子分光の研究を、高橋さんと私とで上手くバトンを受けとり、次世代の研究者に引き継ぐ重責を感じています。

私が、大学院生から駆け出しの研究者だった頃の年中行事は、毎年冬に伊豆の温泉で行われていた、量エレ研究会でした。光格子時計へ繋がる第一歩の《光シフトのチューニング》のアイデアを発表したのも、1998年前後の伊豆の温泉場、学会と言えば当然のように、みんなで和室に雑魚寝していた頃のことでした。学会スタイルはずいぶん変わりましたが、もう15年以上も同じスライドを使って、延々と同じ話を続けていることに少々後ろめたさを感じる昨今です。これと平行して、3年毎に開かれた日米セミナーは、アメリカグループとの交流の機会でした。今回の受賞につな



がる光格子時計実験を初めて報告した2003年は八ヶ岳での日米セミナーでした。発表後誰からも質問がなく、「上手く伝わらなかったかな?」と悄気していたら、宅間宏先生がやってこられて、「よく設計し尽くされた実験ですね」と賛辞を頂き、俄然勇気が沸いたのを昨日のこのように思い出します。

2005年にCRESTに参加させてもらって以降、このような研究交流の場が、山本先生が毎年主催される12月の研究会になりました。私が参加するのは今回で9回目になりますが、ホームグラウンドに帰ってきた気分になります。その会議中に時間を取っていただいた、仁科記念賞のお祝いは格別の思い出になりました。

日々行きつ戻りつする実験を、一喜一憂しながら近視眼的にみていると、大して前進しているようにも見えないものですが、長いスケールでは確かに前進していました。15年前の空想が、10年前には実験になりました。その当時、18桁の時間測定はとてつもないゴールでした。しかも、新手で得体の知れない「光格子時計」を使ってそれを実現す

るとは、荒唐無稽な戯言にしか聞こえなかったことと思います。光格子時計のアイデアを温めていた頃、イオン時計を研究していた友人に、「イオン時計で真っ向勝負しても勝てないから、(光格子時計で) 100万倍速で追いつくよ」と強がり言っていたものでした。

この10年あまりの光格子時計実験の最大の功労者は、高本将男君をはじめとする研究室メンバーです。5年前には2台の光格子時計の同期比較という強力なツールを手

に入れ、その後、メンバーの努力の甲斐あって、ついに18桁の時間比較に辿り着きました。この間、昼夜を問わず実験を続けてくれた研究室メンバーには感謝に堪えません。

やっと新たな時間リソースを手に入れたこれからが正念場です。光格子時計で、どんな新たな物理と工学が発掘できるか、次世代を担う研究者たちが、このツールを使ってどんな新たな挑戦をしてくれるか、5年後、10年後が楽しみです。きっと予想もできない、新たな展開が待っているはずですよ。

仁科記念賞を受賞して

京都大学 高橋 義朗

今回、「イッテルビウム超低温量子系の創出」という授賞理由で、第59回仁科記念賞を頂きました。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。

私が、イッテルビウム原子のレーザー冷却の研究を始めたのは、15年以上前になります。その当時、ほとんどのレーザー冷却の研究がアルカリ原子を用いたもので、アルカリ原子以外で、しかも希土類原子のイッテルビウムを用いた実験は、当時、全く興味をもってもらえなかったのを記憶しています。それが今では、私の知るだけでも、アメリカワシントン大学のグプタ教授のグループ、アメリカNISTのトレイ・ポルト博士のグループ、イタリアLENS研究所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、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、また、フランスENSのダリバード教授のグループ、といった欧米の多くの有力研究グループでイッテルビウムのボース・アインシュタイン凝縮やフェルミ縮退した原子気体を用いた研究が進められていて、この10年で、状況が大きくかわってきているのが大変印象的です。

私が受賞できたのは、ひとえに、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います。本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」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。さらに、本アドバイザーの清水先生には、先生の科研費のレーザー冷却のプロジェクトで、研究をさせて頂いたおかげで、本受賞のもととなりました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。それが2003年のことで、ちょうど10年前になります。

その2003年からは、山本先生のもとで、科学技術振興機構のCREST研究、引き続いて本FIRSTプログラム、さらには、蔡先生が領域代表をされている新学術領域研究「量子サイバネティクス」に参加させて頂き、量子情報処理に関

するいろいろなことについて研究および勉強させていただく機会を得られたのは、大変大きな収穫でした。また、これらのプロジェクトに関連したサマースクール等で講師として毎回参加させて頂き、若手の方々も含めて様々な方々と交流させていただいたのも大変貴重なものだったと考えています。

京都大学の研究室では、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。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います。この場をお借りしてあらためて感謝いたします。

今後も、この賞に恥じないよう、研究を進めていきたいと思います。量子情報分野の皆さま方と一緒に、この分野の研究を盛り上げていけたら幸いです。今後ともご指導頂けたら幸いです。





量子世界から外へ 若手研究者が語る未来像

技術は進化し、課題も見えてきた
今後重要なのは他分野とのつながりだ



宇都宮聖子 × 赤松大輔 × 山崎歴舟 × 藤井啓祐

量子情報科学の今を率いる研究者を紹介してきた「量子科学最前線」は今回で最終回。最後に、次代を担う4人の若手研究者に、量子情報科学の現在と未来を語ってもらった。

司会 2010年にFIRST量子情報処理プロジェクトが始まって4年たった。何が変わったか。

山崎 以前は超伝導や量子ドット、量子光学などのチームがそれぞれ独立に、量子計算の基本となる数ビット演算の実現を競っていたが、この4年で、それらを統合したシステムの構築を目指す流れが定着した。複数の物理系を組み合わせたり、古典力学を盛り込んだり、柔軟なアイデアが色々出てきた。それが一番大きな変化だと思う。

赤松 フェイズが変わったという感じはあるね。基本演算を実現して喜んでいた時代が終わり、量子コンピューターを実現するアーキテクチャを真面目に考えるようになった。さらに、そもそも量子コンピューターの必要性って何なのか、とにかく計算を速く

したいのか、それならそこまで量子にこだわる必要はないんじゃないかという議論も出ている。研究の進化は予想以上に速く、こういう事を考えなくてはいけない日が来たのかとびっくりしている。

藤井 今の方向で量子コンピューターを作るとしたら、巨大なシステムになることがわかってきた。ビット数は 10^6 個、制御部分の開発だけで何10チームも必要だ。ヒッグス粒子の探索のように2000人の共同プロジェクトを組めばいずれできると思うが、それが本当に我々がやりたいことかどうか、正直悩むところもある。



山崎歴舟 (やまざき・れきしゅう)
東京大学先端科学技術研究センター助教

量子でなくてもいい

宇都宮 実際の需要が高い大規模な最適化問題を解くためには、従来の量子コンピューターとは異なる発想が必要だと思う。古典的な環境から孤立させて量子的な状態を守るのではなく、環境をうまく計算の高速化に利用した方がいい。そんなアイデアから、「コヒーレントコンピューター」を提唱した。

司会 最適化問題は量子コンピューターでも速くは解けないとみる人が多い。それを超える可能性があるのか。

宇都宮 コヒーレントコンピューターは量子コンピューターとは計算原理が全く異なる、最適化問題を解くためのマシン。実験とシミュレーションの結果を検討すると、可能性はあると思う。

藤井 僕は理論屋として、いかなるコンピューターも量子コンピューターを超えることはないと思っている。だけどコヒーレントコンピューターが、古典計算で模倣しようとしても爆発的な時間がかかって模倣できない計算をすることはあり得ると思う。だとした



赤松大輔 (あかまつ・だいすけ)
産業技術総合研究所計測標準研究部門
主任研究員

ら、たとえ実態として速くならなくてもすごく興味深い。

宇都宮 私はもともと情報処理や人工知能に興味があり、それを基礎から考えたいと思って量子の世界に入ってきた。情報処理を根本的に変えていく力があるなら、量子でも他の何でも使ってみたい。何が何でも量子でなきゃ!というこだわりはあまりない。

司会 今後の研究の中で、これができたら面白いと思っていることは。

藤井 量子と古典の境界がどこにあるのかを知りたい。量子系はデコヒーレンス(情報が周辺環境に漏れること)によって古典になるとされているけど、その境界がどこにあるかは全然自明ではない。僕は2つの間を線引きするのは計算量だろうと思っている。古典コンピューターで効率良く模倣できないような計算をするものは「量子系」と呼んでいいと思う。今のところ誰も賛成してくれないけど(笑)。

山崎 僕は直接のアプローチで古典と量子の境界を探るような実験をしている。使っているのは1mm角と、目に見えるくらい大きな膜だ。これまでマクロなものは量子的に振る舞わないと考えられてきたが、今では環境から十分に隔離し、量子的な状態を作り出す事が可能になってきている。この系の特徴の1つは、どんな波長の光とも自由に結合できること。可視光

に記録した量子情報を、その量子的な性質を保ったままマイクロ波に移す「量子波長変換器」が実現できるかもしれない。

赤松 18桁の精度で動作する「光格子時計」を作り、物理の基礎を検証するような実験をやりたい。そんな精度の時計を実現するには光の周波数を超精密に制御しなくてはならず、邪魔する要因をどう除去するかが課題になる。逆に言えば、時計はそうした要因を検出する最高のツールになる。例えば重力ポテンシャル。高さが1cm変わっただけで、時間の進み方が変わる。あるいは微細構造定数。電磁気力に関連する物理定数だけ



藤井啓祐 (ふじい・けいすけ)
京都大学白眉センター特定助教

ど、長い間にわずかに変化しているのではないかと指摘がある。これが変わると原子が発する光のスペクトルが変わる。測定する方法はいくつかあって、例えば宇宙の彼方にあるクェーサーが何十億年前に発した光の周波数を測定して、地球の現在のそれと比べる。時計ができれば、昨年と今年の原子のエネルギースペクトルを超精密に測って比較してみることが可能になる。宇宙観測で起きるエラーは理論的なモデルを考えて排除していくしかないが、時計なら装置はテーブルの上にある。自分で操作してエラーを検証できるのが強みだ。

宇都宮 コヒーレントコンピューター



宇都宮聖子 (うつのみや・しょうこ)
国立情報学研究所情報学プリンシプル研究系
特任准教授

にどのようなアイデアを入れていけばより速くなるか考えている。それは例えば、連想記憶や学習ではないか。仮にそれらを取り入れても速くならないなら、それはそれで面白い。人間が大人になるのになぜ20年かかるのか、その理由が説明できるかもしれない。

他分野との連携を

司会 今後、量子情報科学はどのような方向に発展していくと思うか。

宇都宮 今の量子情報という枠組みを越え、もっと視野を広げていってもいいのではないかな。生物学や脳科学といった分野と連携していけたら面白い。

藤井 以前は数個の粒子で考えていたが扱う粒子数も増えてきたし、統計力学とか量子多体系とか、色々な分野と融合していくとよいと思う。そうした分野の人たちも高い関心を持っている。

山崎 量子情報科学の中での交流が進み、様々な物理系を持つ新たな分野として成長してきた。今後外にネットワークを広げていく基盤ができたと思う。

司会 どうもありがとうございました。

この記事は『日経サイエンス』2014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 2013

日程：2013年12月9日(月)～12日(木)

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」

参加人数：180名

FIRSTプロジェクトの4年を振り返って

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の終了にあたって、この4年にわたる研究開発の成果を簡単にまとめます。まず、実用技術として社会への貢献が期待できる研究成果としては、コヒーレント・コンピューター、光格子時計、差動位相シフト量子鍵配送の3つが挙げられます。コヒーレント・コンピューターは、レーザーや光パラメトリック発振器における相転移現象を利用して、NP困難・NP完全問題である組み合わせ最適化問題、特に(3次元)イジングモデルを解くマシンです。光格子時計は、魔法波長と呼ばれる特別の波長で発振するレーザー光で3次元の光干渉縞(光格子)を作り、その中へ冷却原子を閉じ込めて、極めて小さな不確かさを実現した原子時計です。(総当たり)差動位相シフト量子鍵配送は、多数のパルスに同時に存在する単一光子の波動関数を、測定により任意の間隔の2パルスに収縮させることにより、盗聴を不可能にした量子暗号通信のプロトコルです。これら3つの技術は、いずれも我が国発の全くオリジナルなそして驚くべき発想に基づいており、本プロジェクトが世界に誇れる成果と考えています。3つのテーマに共通した特徴として、発想の根底に深い量子論的考案を抱えつつも、提案された方式は極めて単純で実用的なものであることが挙げられます。コヒーレント・コンピューターは、非平衡開放系における自発的対称性の破れによるオーダーパラメーターの出現という量子ダイナミクスに対する深い理解に、光格子時計は原子の光(AC)シュタルクシフトや黒体輻射のメカニズムに対する深い理解に、(総当たり)差動位相シフト量子鍵配送は量子測定における因果律の欠如に対する深い理解に、それぞれ根ざした発明でしたが、提案された方式は“simple, elegant

and practical” なるものでした。

プロジェクトはもう一つ重要なミッションを持ってスタートしました。それは量子情報科学という新しい学問分野を深化させ、また更なる発展を可能にする実験技術を磨くことであります。このミッションに関しては、2012年にノーベル物理学賞が出され、Serge HarocheとDavid Winelandが受賞しました。このミッションで先行する原子物理から2名が選ばれたわけですが、本プロジェクトで中心的に取り組んできた固体物理にも同様の重要性があります。代表的な成果として、超伝導量子ビットの長寿命化、半導体・分子スピンの制御技術、遠隔2地点に量子エンタングル状態を配送する量子中継、異なった量子ビット間をつなぐ量子インターフェース、遠隔点へ量子情報を転送する量子テレポーテーション、冷却原子・イオンや励起子ポラリトンを用いて多体系物理を検証する量子シミュレーション、などの研究があります。このような基礎研究では、科学的に“deep”なものの発見を目指して、我々は研究を進めているわけですが、これを誰にでもわかる定量的な指標に置き直すことは容易ではありません。数十年という時間の流れ、歴史の検証に生き残る本物が本プロジェクトから生み出されたのかどうかは今も分かりません。歴史的評価に代わるものとして、有名雑誌への論文掲載数や引用回数などの手軽な指標を評価に使うことが最近では流行しています。表1に、高いインパクトファクターを持つ主要雑誌での発表論文数と引用数トップ1%の論文数をまとめました。結果は満足いくものでした。最後になりましたが、本プロジェクトに参加していただいた200名余りの研究者、学生、アドバイザーの皆さまの不断の努力と協力に感謝いたします。

表1 主要雑誌での論文発表数と引用数トップ1%の論文数(()内赤で表示)
青の数字はインパクトファクター数

Nature (38.597) 9 (5)	Nature Chemistry (21.757) 1 (1)	Rev. Mod. Phys. (44.982) 3 (3)
Science (31.027) 3 (2)	Nature Communications (10.015) 7	Phys. Rev. Lett. (7.943) 51 (3)
PNAS (9.737) 2	Nature Materials (35.749) 2 (2)	Reports on Progress in Physics (13.232) 2 (1)
	Nature Nanotechnology (31.170) 2	Phys. Rev. X (6.711) 2 (1)
	Nature Photonics (27.254) 8 (1)	
	Nature Physics (19.352) 7 (3)	
全世界での引用数トップ1%の論文22編以上を創出 (Thomson-Reuters Essential Science Indicator database での調査 平成26年1月現在)		



FIRST 量子情報処理プロジェクト 全体会議 2013

FIRST-Quantum Information Processing Project Annual Meeting 2013

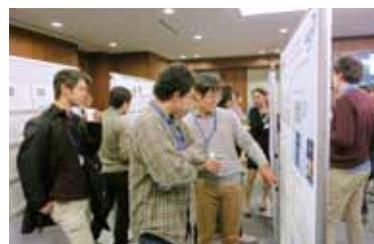
Date	Time (min)	Title	Presentator
DAY1 12/9 Mon	9:30— 9:40	内閣府 総合科学技術会議有識者議員 久間和生 議員 ご挨拶	
	9:40—10:10	領域全体まとめの挨拶	山本 喜久(NII/スタンフォード大)
	10:10—14:30	量子情報システム	山本 喜久(NII/スタンフォード大)、河原林 健一(国立情報学研究所)、 小芦 雅斗(東京大学)、小川 哲生(大阪大学)、竹内 繁樹(北海道大学)、 山西 正道(浜松ホトニクス)
	14:30—17:00	量子通信	井元 信之(大阪大学)、佐々木 雅英(情報通信研究機構)、 古澤 明(東京大学)、小坂 英男(東北大学)
	17:15—17:45	仁科記念賞受賞のスピーチ	
	17:45—19:30	ポスターセッション	
DAY2 12/10 Tue	9:00—10:30	量子標準	洪 鋒雷(産業技術総合研究所)、小山 泰弘(情報通信研究機構)、 香取 秀俊(東京大学)
	11:00—16:30	超伝導量子コンピューター	蔡 兆申(理研/NEC)、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)、 日高 睦夫(産業技術総合研究所)、前澤 正明(産業技術総合研究所)、 根本 香絵(国立情報学研究所)、Franco Nori(理化学研究所)
	16:45—19:00	ポスターセッション	
DAY3 12/11 Wed	9:00—17:30	スピン量子コンピューター	樽茶 清悟(東京大学)、太田 剛(NTT物性科学基礎研究所)、 藤澤 利正(東京工業大学)、都倉 康弘(筑波大学)
	11:30—13:00	自由討論:量子情報の将来に関して	司会: 仙場 浩一(国立情報学研究所)
	14:30—17:30	スピン量子コンピューター	Rodney Van Meter(慶應義塾大学)、関口 武治(慶應義塾大学)、 工位 武治(大阪市立大学)、北川 勝浩(大阪大学)、森田 靖(大阪大学)
	17:45—19:30	ポスターセッション	
DAY4 12/12 Thu	9:00—12:00	量子シミュレーション	高橋 義朗(京都大学)、平野 琢也(学習院大学)、 向井 哲哉(NTT物性科学基礎研究所)、占部 伸二(大阪大学)、 吉岡 孝高(東京大学)
	12:00	閉会の言葉	



会議の様子



仁科記念賞受賞者を囲んで



ポスターセッション



光格子時計群の周波数比較

東京大学
香取 秀俊

量子標準グループでは、「国際原子時の不確かさを1桁以上凌駕する 10^{-17} の不確かさの光格子時計のネットワークを東京圏で世界に先駆けて実現」を目標として掲げ、FIRST研究に取り組んできた。1) 黒体輻射シフトを大幅に低減する低温動作光格子時計の開発により、 10^{-18} 台の不確かさ評価を行うとともに、2) 東大、理研で構築した低温動作光格子時計をつなぐ光ファイバーリンクを完成し、光格子時計の高精度・遠隔比較実験がスタートした。この一方、Sr光格子時計は、世界の6グループ(日、仏、米、独)で評価が行われ、現行のSI秒の不確かさのみが制限する周波数リファレンスとなった。これにより、今後は、同種、異種の光時計比較が原子時計実験の主役となっていく。

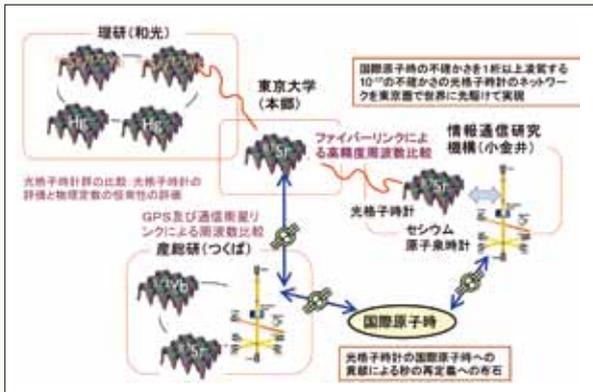


図1 量子標準グループで想定した研究内容

1. 17桁精度の到達を阻む黒体輻射シフトを低減する

光格子時計の提案の時点から、黒体輻射シフト—室温の壁からの黒体輻射が誘起する原子のシュタルクシフト—は大きな不確かさ要因の1つと予想された。この低減のために、提案当初から低温動作光格子時計が想定されていた。(Phys. Rev. Lett. 91, 173005 (2003).) プランクの輻射則によれば、

黒体輻射は、 $u(\nu) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$ で与えられ、そのエネルギー密度は、 $\langle E^2 \rangle = \int_0^\infty u(\nu) d\nu = \frac{8\pi^5 k_B^4}{15c^3 \epsilon_0 h^3} T^4 = c_1 T^4$ (シュテファン・

ボルツマン則) で与えられる。黒体輻射が寄与する低周波数領域では、原子分極の大部分は静的分極率で記述できるため、黒体輻射シフトは、

$$\delta\nu_{BBR}(T) \approx -\frac{1}{2h} (\alpha_p(0) - \alpha_s(0)) \langle E^2 \rangle = -\frac{1}{2h} \Delta\alpha(0) c_1 T^4$$

と近似できる。ここで $\alpha_s(0)$ 、 $\alpha_p(0)$ は時計遷移 $1S_0 \rightarrow 3P_0$ の電子状態に対応する静的分極率である。この T^4 依存性の結果、原子のスペクトル観測領域を低温化することで黒体輻射シフトの大幅な低減が期待できる。例えば、70Kまで冷却すれば、黒体輻射シフトは10mHzに低減し、 $\pm 1K$ の温度計測の

不確かさを見込んでも、黒体輻射シフトの不確かさは ± 0.5 mHzとなり、 1×10^{-18} の相対的不確かさを実現できる。

我々は、低温環境で動く2台のSr光格子時計(クライオ時計)の開発を行い、それらの周波数比較によって、18桁精度での時計動作を実証した。温度95 Kで運転する時計Sr1をリファレンスとして、温度 T で運転する時計Sr2の周波数計測、 $\Delta\nu = \nu_{Sr2}(T) - \nu_{Sr1}(95)$ 、を行った(図2)。この結果は、シュテファン・ボルツマン則の T^4 依存性を再現するとともに、(静的分極率で記述できない)動的補正項と呼ばれる T^6 に比例する寄与を抽出可能にする。ドイツのPTBグループでは、原子に強いDC電場をかけてシュタルクシフトを観測することで、Sr時計遷移の静的分極率差 $\Delta\alpha(0)$ を決定している(PRL 109, 263004 (2012))。我々の測定結果は、PTBグループの測定ともよい一致を示した。

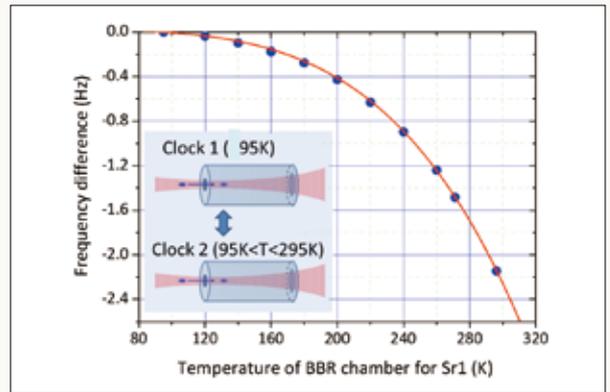


図2 黒体輻射シフトの測定。

このクライオ時計の開発により、黒体輻射シフトは17桁精度の不確かさ要因から外れ、光格子時計固有の不確かさ評価に近付いた。図3に2台の低温動作光格子時計の周波数比較の結果を示す。時計遷移を観測するレーザーの周波数ノイズに由来するディック効果を排除する2台の時計の同期運転手法(Nature Photon. 5, 288-292 (2011).)を用いることで、2台の時計の安定度は、わずか2時間の積算時間で 2×10^{-18} に達した。このように18桁の時間領域に短時間で迫れるようになったのは、量子射影ノイズを大幅に低減した光格子時計の功績である。光格子時計のライバルである単一イオン光時計では、同様の測定に実に10日の積算時間を要する。この計測時間短縮の結果、18桁レベルでの不確かさ評価も著しく高速化された。2台のクライオ時計の周波数比較を図3(下)に示した。2台の周波数の一致は 1×10^{-17} で実証されているものの、まだ未解明の周波数変動が存在している。1) 1次元光格子時計での多重極光シフトの対策、2) 1格子あたりの原子数の制御による衝突シフトの不確かさの低減、3) 分光環境のストレイ電場・磁場の制御が次の課題である。

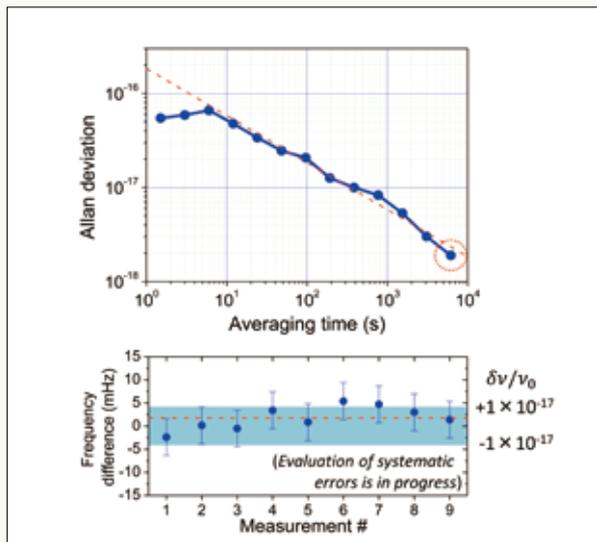


図3 (上) 2台の低温動作光格子時計比較の安定度。(下) 2台の光格子時計の周波数差。

2. 東大・理研の光格子時計のリンク

地上の重力加速度 g のもとでは、上方の励起原子から放出される光の振動数は $\delta\omega/\omega = g\Delta h/c^2 \approx 1.1 \times 10^{-16} \text{m}^{-1}$ だけ高くなる。1960年に行われた、ハーバードタワー実験では、Feの原子核からのガンマ線のメスバウワー分光によって、22mの高低差に対応する重力赤方変位 10^{-15} を実証した。最近では、この重力赤方変位は30cmの高低差を付与した2台の単一オン時計で約一日にわたる積算時間で測定された (Science 329, 1630-1633 (2010))。光格子時計ではこの測定時間を大幅に短縮可能である。図3で到達した安定度を仮定すれば、2台の時計2cmの高低差を2時間で判別可能になる。時計は、まさに重力で歪んだ時空間をプローブする新たな役割を担うことになる。

我々は、理研と東大で開発したクライオ時計をつなぐファイバリンクを構築し、その周波数比較を開始した (図4)。理研から時計遷移波長のサブハーモニクス光 (波長 $1.397\mu\text{m}$) を、30kmの商用ファイバを経由して東大に送る。東大側では、受信した光をリピーターレーザーにより増幅後、理研と同じファイバ回線を使って打ち返す。これを理研側でローカル光によってヘテロダイン検波することで、ファイバ回線での光位相

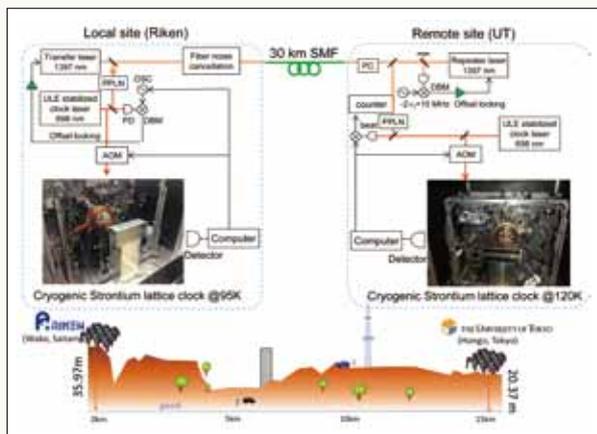


図4 理研-東大の低温動作光格子時計のファイバリンクと時計比較

の擾乱を検出し、ファイバ長安定化のサーボを施す。この結果、1秒で 1×10^{-17} のリンク安定度を実現した。

この系を用いた、時計比較のファーストランが2013年12月9日に行われた。およそ3時間の積算時間で、 10^{-16} 台の時計評価が実現された。現在、ファイバリンクによる同期比較実験が進行中である。これによって、図3と同程度の安定度での周波数比較が可能になる。最終的には、時計運転シーケンスと原子数の最適化により100秒積算で 1×10^{-18} の比較を見込む。これは、遠隔地間で1cmに対応する重力ポテンシャル差の判別手段を与えるだろう。重力による時間の相対論的な遅れを使った「相対論的測地」と言うべき新たな計測手段が誕生しようとしている。

3. ポータブル光格子時計へ：光ファイバ中の光格子分光

光格子時計の研究は、当初の原理検証のフェイズから、その測地応用等、相対論エンジニアリングのツールに変貌しようとしている。これまで地上スケールでの相対論的効果はセンシングの対象とは想定されてこなかったが、18桁精度の光格子時計では、例えば半径1kmの鉄球があれば、20km程度離れた2台の光格子時計の周波数差として読み出すことができる。これらは、富士山のマグマだまり、地下の空洞形成の追跡に役立つかもしれない。従来の代表的なセンシング技術であるレーダー等と大きく違うのは、プローブの反射を見る代わりに、物体による空間のゆがみを直接見ている点である。この意味では、従来のステルス化の戦略を無効化しうる新しいセンシング技術である。

我々は、実験室からフィールドへの持ち出しを目指して、ポータブルクロックに向けた技術開発を開始した。例えば、車載にできれば、相対論的カーナビ、それを使った資源探査も夢ではない。中空のフォトニッククリスタルファイバ中に魔法光格子を形成し、Srの $^1S_0 \rightarrow ^3P_1$ ($m=0$) 遷移の無反跳分光を行った (図5)。この結果、ほぼ自然幅で制限されるスペクトルを得た。40mmのファイバを用い、さらに原子間衝突が無視できる10原子/格子程度を想定すれば 10^6 個の原子を準備できる。このような原子数の増大の努力は、光格子時計が当初目論みた原子数を実現するばかりか、超放射レーザーや原子の位相整合効果による超狭域フィルタなど、新たな原子時計構築の可能性を与えるだろう。

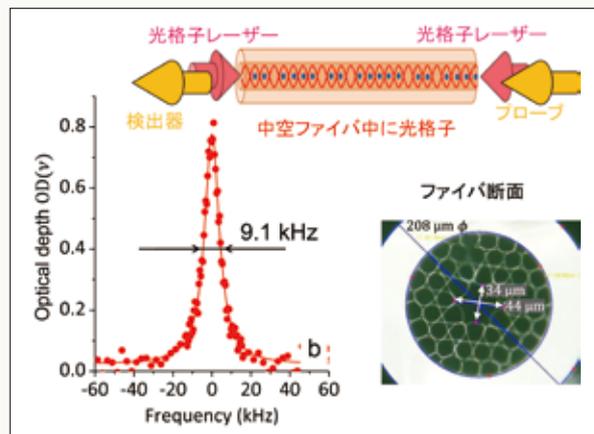


図5 中空フォトニッククリスタルファイバ中の光格子分光



新しい原理に基づく量子鍵配送

東京大学
小芦 雅斗

本 FIRST プロジェクトでは、応用としての出口を見据えた研究対象として、量子鍵配送 (QKD) 方式の中でも実装面での優位性が期待されている DPS (差動位相シフト) QKD 方式のセキュリティ証明に力点を置いて進めてきた。DPS-QKD は、レーザー光源からのコヒーレントパルス列に対して、光学位相シフト $0, \pi$ をランダムに切り替えて送信するだけ、という簡潔さが大きな特長であり、高いパルス繰り返しレートでの動作が期待できる。また、通常のレーザー光源を用いながら、光子分離攻撃に耐性を持つことも期待されている。今回は、この DPS-QKD の変種である、RR (Round-Robin; 総当たり式) DPS-QKD について報告する。

図 1 は RRDPS-QKD の概念図で、受信者 Bob の装置は可変遅延路 (variable delay) を含んでいる。この部分がちょうどパルス間隔 T に等しい遅延を常に与える場合が通常の DPS-QKD で、Bob が光子検出に成功すれば隣り合ったパルスの位相差が 0 か π かがわかるので、それをもとに秘密鍵を生成する。RRDPS-QKD では、可変遅延路が、所定の長さ L のパルス列毎に、 $T, 2T, \dots, (L-1)T$ の $(L-1)$ 種類の遅延をランダムに切り替える。この場合、Bob の測定結果は、 L 個のパルスのうちの任意の 2 個のパルス間の位相差を与えることになる。これが総当たり式と呼ぶ所以である。簡潔さが特長である DPS-QKD に、可変遅延路という装置を追加しなければならないので、これが単に鍵生成レートが多少良くなるというだけの話であれば、わざわざ RRDPS-QKD を導入する動機にはならない。ところが、RRDPS-QKD は、驚くべきことに、従来の QKD とは全く異なる原理に基づいて動作することが判明した。いわゆる、「量子状態を測定すると壊れる」というハイゼンベルクの不確定性

原理では定性的にも説明できない別の仕組みで秘匿通信が成立するのである。また、200km 程度の光ファイバー通信や地上一衛星間通信で想定される 40~50dB 程度の通信路損失の状況下で、デコイ QKD 方式に比肩する鍵生成レートが予想される上に、新しい動作原理に由来する高い雑音耐性や、有限長のデータ処理コストでの優位性を持つ。すなわち、RRDPS-QKD は、基礎・応用の両面において、非常に魅力的な量子鍵配送方式だと言える。

RRDPS-QKD の特徴を理解するために、まず、一般の QKD の仕組みを簡単にまとめておく。送信者 Alice と受信者 Bob は、Eve が介入する量子通信路を利用して長さ N ビットのシフト鍵を作る。このシフト鍵に、誤り訂正と秘匿性増幅の手続きを行い、最終鍵を作って秘密鍵とする。鍵の長さは、この処理の際に短くなり、最終鍵の長さは $N(1-H_{ER}-H_{PA})$ と書ける。 H_{ER} は誤り訂正のコストで、ビット誤り率 e_{bit} に対し、漸近極限 (N が大きい極限) ではシャノン理論によりバイナリエントロピー $h(e_{bit})$ に等しい。 H_{PA} は秘匿性増幅のコストで、最終鍵が安全になるようにこの大きさを定めることが、QKD のセキュリティ理論の役割である。理想的な BB84 方式では、 H_{PA} は $h(e_{bit})$ に等しい。一般には、 H_{PA} は、信号変化を示す他のパラメータにも依存する関数である。いずれにせよ、Eve の介入による信号変化の量を見積もり、それに応じて秘匿性増幅を行う度合い H_{PA} を決定する仕組みになっており、その根底にあるのは、Eve が情報を多く取得すればするほど、信号に対する擾乱が大きくなるという量子力学の基本的性質である。 H_{PA} の計算を容易にするために、量子もつれや相補性などの概念が用いられるが、本質的には、従来の QKD は全

てこのハイゼンベルクの不確定性原理に基づいており、「Eve に見られるかもしれないが、見られたら痕跡が残るので、それを手がかりに何とかする」という仕組みであることに変わりはない。

これに対して、RRDPS-QKD では、

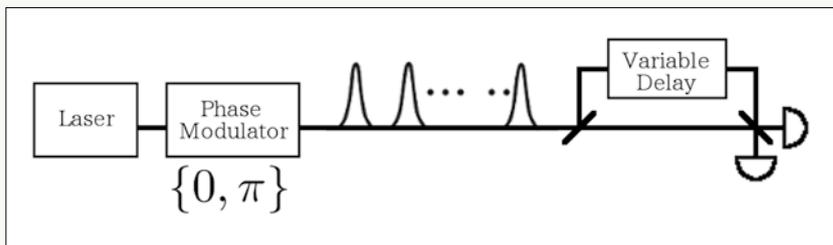


図 1

本質的に $H_{PA} = h(v/(L-1))$ となることが明らかになった。 v は、Alice が L 個のパルス中に放出した合計の光子数である。Eve の介入による信号の変化とは無関係に H_{PA} が定まることに着目してほしい。この方式では、はじめから Eve は一定以上情報を取れないことが保証されており、情報取得と擾乱に関するハイゼンベルクの不確定性原理は全く関係ないのである。

では、RRDPS-QKD のセキュリティは何に由来するのだろうか？ Alice のシフト鍵のビット値は、Bob の光子検出が成功した時に関与した 2 つのパルス間の位相差である。この 2 つのパルスが L 個のパルスの中からどう選ばれるかを考えると、パルス間隔については可変遅延回路が勝手に決めているので、Eve は関与できない。つまり、特定のパルスの強度を Eve が強くすれば、そのパルスは確かに選ばれやすくなるが、もう一方のパルスはランダムに決まってしまう。「位相差」という量は、一方のパルスの位相だけがわかっている、もう一方がわからなければ全く推定できない量である。 $v/L \ll 1$ であれば、Eve が L 個のパルス全ての位相を知ることはできないので、Alice のシフト鍵のビット値を完全に予想することはできないという結論になる。

応用的な観点から見ると、新しい原理に基づく QKD は、2 つの利点を持つ。通信路の質が低下すると、従来の QKD では H_{ER} も H_{PA} も増加するのだが、新しい QKD では H_{PA} は定数である。その結果、雑音耐性が高いという特長が生まれる。もう一つは、信号変化の大きさを推

定する必要がないという点である。従来の QKD では、この推定用に、信号の一部をサンプリングして使い、捨てなければならない。漸近極限ではこのロス割合は小さくなるが、有限長の解析によると、現実的な実装ではこの点が効率にかなり影響することが知られている。新しい QKD では、サンプリングの必要がないので有利である。

図 2 は、漸近極限の鍵生成率を通信路透過率の関数として計算した対数グラフである。単純な BB84 方式 (i, ii) では光子数分離攻撃により鍵生成率が $O(\eta^2)$ で悪化してしまうが、RRDPS は $O(\eta)$ に近い依存性を持つ。デコイ方式には一桁劣るが、ビット誤り率がもっと大きくなって 10% 程度を越えると、RRDPS のレートが圧倒的になる。さらに、現実的な有限長の場合を考えると、多数のパラメータ推定を含むデコイ方式では N を大きくする必要が生じ、その際のデータ処理コストが問題になるが、RRDPS はその心配がほとんどない。

量子暗号の最初の方式である BB84 の提案から 30 年経つが、基本的な動作原理のレベルで新しい手法が眠っていたことは驚きである。RRDPS-QKD は、新原理に基づく最初の方式であるが、それでも既存の方式と比較し得るレベルの性能が予想されている。今後、この原理の基礎的な理解が深まり、より優れた QKD 方式の発見に結びつくことに期待したい。

本研究は、佐々木寿彦氏 (東大)、山本喜久氏 (スタンフォード大・NII) との共同研究により実施されました。ここに謝意を表します。

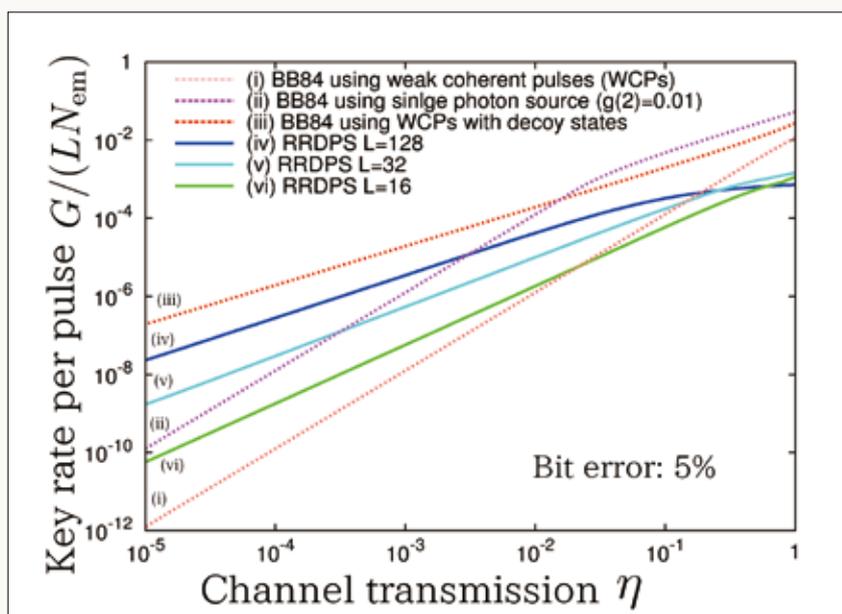


図 2



コヒーレント・コンピューティング

国立情報学研究所
山本 喜久・宇都宮 聖子

組み合わせ最適化問題は現代社会の様々な局面で扱われる重要な問題である。生物学におけるたんぱく質の折りたたみ問題、無線通信における周波数割り当て、交通経路検索、集積回路設計、機械学習における画像・音声認識、ソーシャルネットワークの解析などは全て組み合わせ最適化問題と呼ばれ、そのほとんどは計算量理論でいうNP困難・NP完全クラスに属し、問題サイズの増加と共に計算時間が指数発散する。これを解決できる古典アルゴリズムも量子アルゴリズムも未だに見つかっていない。スピングラスの特性を記述する理論モデルであるイジングハミルトニアン基底状態を求める問題は、1・2次元グラフに対してはクラスPであるが3次元グラフの場合NP困難のクラスに属する。多くのNP困難・NP完全問題が多項式リソースで3次元イジングモデルへマッピング出来ることから、これを解くアルゴリズムの開発が様々試みられてきた。古典シミュレーテッドアニーリング（焼きなまし法）、ニューラルネットワーク、量子アニーリングなど枚挙にいとまがない。

我々は2011年に独自に、組み合わせ最適化問題の一つであるイジング問題を解くためのコヒーレント・イジングマシンを提案した。図1はそのコヒーレント・イジングマシンの概念図で、1台のマスター発振器とM

台のスレーブ発振器がネットワークを構成している。イジングスピンの上向きと下向きはスレーブ発振器（レーザー）の場合には、右回り又は左回りの円偏光での発振に対応し、縮退型パラメトリック発振器（OPO）の場合には、0相または π 相での発振に対応する。イジング結合項 $J_{ij} \sigma_{iz} \sigma_{jz}$ は、2つのスレーブラーザーの間に水平偏光子を挿入し、その位相を0相もしくは π 相に設定することによりイジング結合の位相が実装され、レーザー間の相互結合振幅によりイジング結合の振幅を実装する。また、ゼーマン項 $\lambda_i \sigma_{iz}$ はマスター発振器からスレーブ発振器への注入光の位相と振幅を制御することにより実装される。イジングスピン系が持つハミルトニアン（エネルギー）は、このマッピングプロトコルではネットワーク全体の損失（光子の減衰レート）に転写される。この系において、外部からのポンピングにより発振器の利得を上げていくと、全てのスレーブ発振器の利得の総和がネットワーク全体の損失に一致したところで発振が起こる。損失の最も小さいモードはイジングハミルトニアンの基底状態と一致するため、ネットワークは自然に基底状態を探し出して発振する。この発振モードにおける個々のスレーブ発振器の偏光状態や位相を測定することにより、計算は終了する。

このコヒーレント・イジングマシンを現代のデジタル

コンピュータやニューラルネットワークと比較してみると、前者ではネットワーク全体に広がったコヒーレントな波動関数が干渉効果によりイジングハミルトニアンを実装し、レーザー・OPO相転移を介して一気にこれを解くアナログ的計算をするのに対して、後者では局所情報を逐次転送してデジタル処理しなければならない。

また、コヒーレント・イジングマシンを量子コンピューティングや量子アニーリングと比較してみると、前者では、 $10^3 \sim 10^6$ にも及ぶ（光子の）世代交代を介して最適解を選択していく

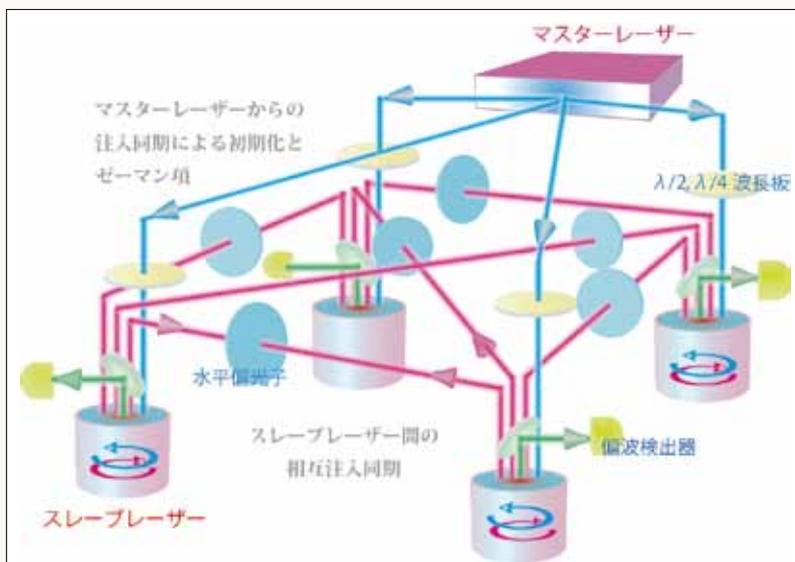


図1 空間配列型コヒーレント・イジングマシン

のに対し、後者では一世代だけの量子ビットのユニタリ回転だけを用いて最適解に加工しなければならない。この基本原理の違いがコヒーレント・イジングマシンの組み合わせ最適化問題への適応性の高さの根底にある。

図2にNP困難問題の一つであるMAX-CUT-3問題をコヒーレント・イジングマシン(OPO)で解いたベンチマークの結果を示す。MAX-CUT-3は、例えば、図2aに示したような10個の頂点それぞれが必ず3つの辺を持つグラフが与えられたとき、この頂点を2つのグループ(A、B)に分け、そのA、B間の境界を切る辺の数が最大になるグループ分けを求める問題である。例えば頂点の数が20であるグラフは全部で510,489通りあるが、その全てを解いて最も計算時間が長かったものを評価しなければならない。結果を図2bに示す。青線は全ての場合の平均値であり、緑線が最悪値であるが、計算時間は問題サイズ(グラフの頂点数)に対し緩やかな線形で抑えられる増加を示している。図2cには正解を求める成功確率の平均値と最悪値を示している。総あたり法は、成功確率は頂点の分け方(場合の数)の逆数に等しくなるが、この値は、頂点数が20の時には 10^{-6} のオーダーになる。一方、コヒーレント・イジングマシンでは成功確率は5桁以上大きな

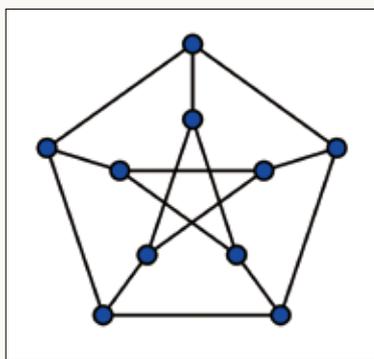


図2a M=10のピーターセングラフ

0.1~0.5の間にある。MAX-CUT問題に対しては、基底状態12.2%以内の近似度を持つ励起状態を多項式時間で求めることを保証する Semi-Definite

Programming (SDP) というアルゴリズムが見つっている。一方、正解(基底状態)へ6%以内の近似度を持つ誤った解(励起状態)を捜すこともNP困難クラスに属することが知られている。そのため、MAX-CUT問題はPクラスとNP困難クラスが6%の差まで接近している特別な問題なのである。頂点の数がM=50から800までの比較的大きな問題をコヒーレント・イジングマシンで解いてみると、計算時間は頂点の数Mに比例する($\sim O(M)$)ことが分かる。これは、SDPの計算時間($\sim O(M^3)$)よりも優れた特性である。また、基底状態への近似度においても、SDPに比べて4~6%良い結果を示した。

コヒーレント・イジングマシンの実装は、注入同期半導体レーザーを用いた計(サイト数M=2)、PPLN結晶を用いた縮退型光パラメトリック発振器を用いた系(サイト数M=4)、ファイバーを用いた4光波混合発振器を用いた系(サイト数M=2500)、の3つの実験系で成功に至っている。第2、第3の実験では、単一の発振器中に発生する、多数の独立したコヒーレントなパルスをそれぞれスレーブ発振器としている。また、M個のスレーブ発振器間の結合光路は最大で $\sim M^2/2$ 個が必要であるが、これを量子フィードバックという技術で1個の結合光路で置き換えるアイデアも登場し、大規模システムへの足掛かりが出来た。今後、ニューラルネットワーク理論におけるシナプス可逆性などの概念を取り入れて、より優れたコヒーレント・イジングマシンへの拡張を期待する。

本研究は、NIIの高田健太氏、顔開氏、理研の玉手修平氏、スタンフォード大学のAlireza Marandi氏、Zhe Wang氏、Kai Wen氏、NTTの武居弘樹氏、阪大の井上恭氏との共同研究として実施されました。ここに謝意を表します。

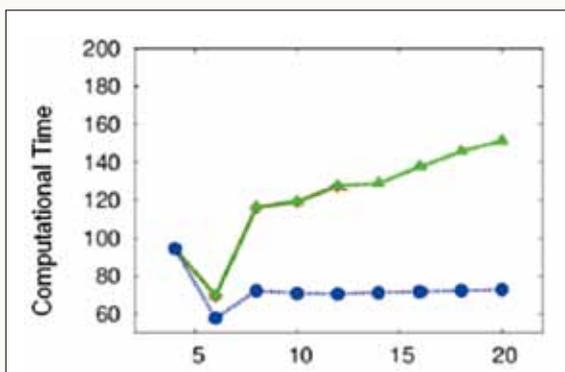


図2b 計算時間のベンチマーク

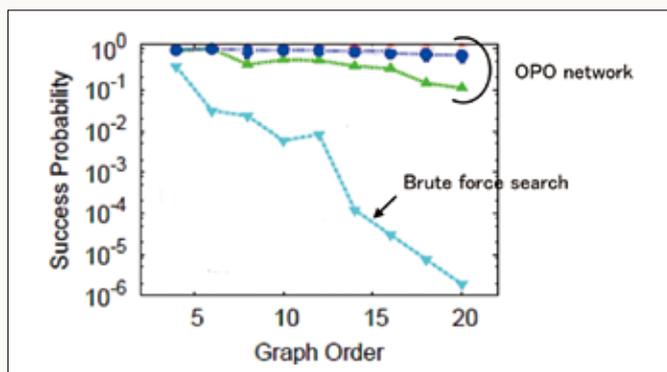


図2c 誤り率のスケールリング

量子情報システム・サブテーマでは光を用いた様々な量子情報処理システム(量子コンピューター、量子シミュレーター、コヒーレントコンピューター、量子中継、量子暗号、量子計測)の研究開発を行ってきた。これらのシステムの大きさ(量子ビット数)とシステムの複雑さ(量子ビットの制御技術)を図1にまとめた。

量子コンピューターの研究(山本, Forchel, Lischka)では、半導体量子ドットスピンの光パルスによる制御技術に着目し、スピン量子ビットの初期化、1ビットゲート、2ビットゲート、射影測定、の全てを共振器ポラリトン共鳴を利用した光パルス制御で実現する手法を提案し、その原理実証実験を行ってきた。また、トポロジカル表面コードをベースにした誤り耐性階層アーキテクチャーを提案し、実現に必要なリソース(量子ビット数、計算時間)を定量的に見積もった。

量子中継の研究(山本, Forchel, Lischka)では、量子ドットスピン・単一光子間の高フィデリティ量子もつれ状態の生成実験に成功した。また伝送路の中央に量子もつれ光子対光源を置き、ベル測定を伝送路端末で行なう新しい量子中継システム構成を提案し、伝送路中央でベル測定を行なう従来方式に比べて、高効率化が達成されることを確認した。

量子シミュレーターの研究(山本, Forchel, 山西, 小川)では、様々な2次元(正方、三角、蜂の巣、カゴメ)格子中の励起子ポラリトンの動的量子凝縮のダイナミクス(p波、d波、f波凝縮相、フラットバンド、量子渦・反量子渦格子、ディラック分散など)を実現するとともに、pn接合を埋め込んだマイクロキャビティー構造において、初めて電流注入励起による量子凝縮を達成した。また特殊な超格子構造を用いたサブバンド間ポラリトン素子を開発し、線形および非線形な発光特性を確認した。さらに、電子・ホール系におけるBEC-BCS-レーザークロスオーバーを記述できる統一理論を構築し、これが高密度下でBCS相を記述するギャップ方程式に、低密度下でBECを記述するグロス・ピタエフスキー方程

式に帰着することを示した。

コヒーレントコンピューターの研究(山本)では、注入同期レーザーネットワークへのイジングモデルのマッピングプロトコルを見出し、その性能を明らかにするためNP困難問題の一つであるMAX-CUT問題に対してベンチマーク検証を行なった。その結果、現在コンピューター科学で広く用いられている多項式時間近似解法であるSemi-Definite Programming (SDP) よりも4~6%良い近似解が $\sim O(M)$ の計算時間で求まることがわかった(Mは問題サイズ、SDPの計算時間は $\sim O(M^3)$ でスケールする)。また、マスターレーザー1台とスレーブレーザー2台からなる注入同期レーザーネットワークを構築し、原理実証実験に成功した。

量子暗号の研究(小芦)では、系の構成が比較的シンプルで高速での秘密鍵配送が可能な差動位相シフト量子鍵配送(Differential Phase Shift DPS - QKD)の改良版である総当り差動位相シフト量子鍵配送(Round Robin DPS - QKD)を提案し、その絶対安全性の証明に成功した。このシステムの性能は、現在の量子暗号方式の主流となっているDecoy BB84方式に匹敵し、系がシンプルである分だけ実用的であると期待される。

量子計測の研究(竹内)では、NOON状態あるいは光ドブロイ波と呼ばれる光の量子もつれ状態を発生し、これを用いて高感度検出が可能な光学顕微鏡の開発を行なった。この新しい光学顕微鏡は微弱な光で高いS/N比を確保できるため、脆弱な生体の観測などに適していると期待される。

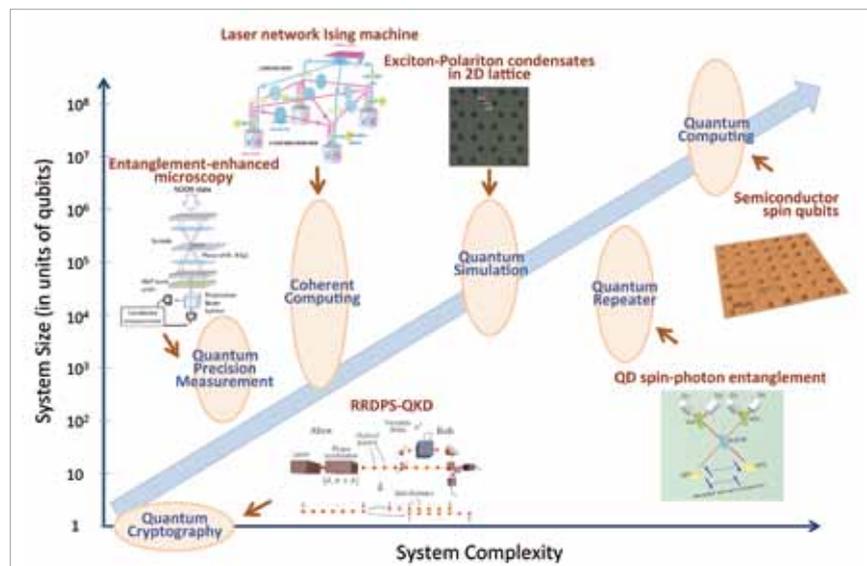


図1

最後の全体会議に当たり、本サブテーマが目指してきた超伝導量子コンピューターを構成するための基本的物理、設計理念、各コンポーネントの性能評価、回路作成技術の進展などが発表された。

スケーラブルな量子ビット結合方式は様々な要素を含め検討がされてきた。本会議では、回路 QED 方式の光子を介在する結合方式と、非線形な結合器を介在させる新規な回路方式の提案を報告した。前者の方式では、イオントラップ型の量子ビットで成功している縦型結合での Cirac/Zoller 方式の量子ビット演算方式を可能とする、共振器中の 2 つの光子を介在させ量子演算を行う回路である。隣接する量子ビットは完全に切り離されており、2 ビット操作のマイクロ波を照射するときのみ所望の量子ビットと結合し、制御付位相論理動作を行う。この回路方式での読み出し時には、共振器に光子を励起させそれをジョセフソンパラメトリック増幅器を使い単事象の読み出しが可能になる。この回路方式で量子誤り訂正を行う 2 次元 (または疑似 3 次元) アレーにより量子コンピューターを構成すると、物理的に約 40cm 立方程度の空間に収まり、マイクロ波入力線のピッチは約 40 ミクロン程度と見積もられる。

前記の量子回路は、大きなマイクロ波共振器を介して結合するものなので、回路自体大きくならざるを得ない。その代り、高精度な読み出し回路やマイクロ波信号線を配置するスペースが比較的確保しやすくなっている。一方回路の小型化を追求した新規なスケーラブルな量子ビット結合方式も報告された。これは磁束量子ビットを基本とした非線形結合器を使った回路方式で、量子ビット同士は微調整なしで完全に孤立しているのでスケーラブルな回路規模拡張方式である。非線形結合器にマイクロ波を照射したときのみ 2 ビットの制御付位相論理動作を遂行する。この回路方式で量子誤り訂正を行う 2 次元 (または疑似 3 次元) アレーにより量子コンピューターを構成すると、物理的に約 10cm 平方のチップに収まる。しかし大量のマイクロ波入力線をそれぞれの量子ビットにつなげるためには、新たな 3 次元構造を持つ接続用のインターフェイスのような構造が必要になるだろう。

量子ビットの高忠実度な状態操作と読み出し実験の成果も報告された。長寿命の磁束量子ビット早いゲート速度で動作をさせた 1 ビット操作の実験では、

99.8% という高忠実度での状態操作が実現していることが報告された。2 ビットの操作に関しては、前出の 2 種類の論理回路を使うと、原理的には同様に高い忠実度の状態操作が可能であることが指摘された。量子ビットの読み出しに関しては、共振器を使った分散読み出しと、ジョセフソンパラメトリック増幅器を組み合わせた読み出し方式で、単事象読み出しに成功したことが報告された。この読み出し法で、連続した読み出し条件下での量子ビットの状態変化が「量子跳躍」として観測された。このような実験から、この読み出し法が真に量子非破壊であることが示唆されている。読み出しの忠実度は約 74% であり、これは量子ビットの寿命によって律速されている。ジョセフソンパラメトリック発振現象を読み出しに応用すると、読み出し忠実度が格段に向上することも報告された。同様な回路を使ったマイクロ波の波長変換や単一マイクロ波光子の検知などの成果も報告された。

超伝導メモリの研究に関しては、磁束量子ビットとダイヤモンド中の多数の NV センターのアンサンブル状態での量子状態の受け渡しの実験に成功したことが報告された。メモリ時間はまだ比較的短いのが、これから改善していく計画である。

半導体量子ドットと超伝導量子干渉計を使った波長変換量子インターフェイスの研究では、光子の円偏光の量子ドット状態への転写と、量子ドット状態の超伝導永久電流の方向への転写にそれぞれ成功していることが報告された。最終目的である光子状態の超伝導電流状態への転写は、量子ドットと超伝導体間の結合の強さを調整することにより達成できるとの予想であると報告された。

超伝導量子ビットの高度な集積化を目指して開発されてきた、多層膜超伝導量子ビット作成技術では、プロセス条件が絞り込まれたことを踏まえ、それを使った実際の量子ビット回路の試作が行われた。数種類の超伝導量子ビットがこの新プロセスにより作られた。その初期的分光実験の結果が報告され、量子ビットの作成に成功したことが示された。

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 2013

当サブテーマでは、樽茶清悟(東京大学)をリーダーとし、伊藤公平(慶大)、北川勝浩(阪大)、工位武治(大阪市大)、森田靖(阪大)の各氏、そして本年度は新たに量子計測デバイスの藤澤利正(東工大)、太田剛(NTT物性基礎研)、理論の都倉康弘(筑波大)、Rodney Van Meter(慶大)の各氏をメンバーに加えて、「小規模量子計算」の要素技術と拡張化技術、「量子インターフェース」の要素技術の研究を行なっている。

樽茶) スピン回転ゲートの高速化により核スピン環境の影響を抑制でき、これによりゲート忠実度を大幅に向上した(図1a)。また、3ビット化に目途をつけ、4以上の多ビット化も視野に入ってきた。ネットワーク化に有用なビット転送技術として、単一電子のコヒーレントビームスプリッターを実現した。量子インターフェースに関しては単一光子から単一電子への角運動量転写に初めて成功し、光-スピンのコヒーレント転写に大きく前進した。

都倉) 微小磁石を用いた電場による量子ドット中の電子スピンのコヒーレント制御を調べている。従来は放物型量子ドットの閉じ込めポテンシャルを仮定していたが、電場が大きくなるにつれ、閉じ込めポテンシャルの非放物性や磁場勾配の非線形性が重要になると考えられる。解析の結果Rabi振動数は電場の振幅に対して線形の依存性からずれてくる事を示し最近の東京大学の実験グループの100MHzを越えるRabi振動数での実験結果と比較議論している(図1b)。

藤澤) 電子スピン量子ビットのデコヒーレンスの主要因は、母体原子の核スピン揺らぎであり、核スピン揺らぎの抑制は重要な研究課題となっている。我々は、電子スピンと核スピンのフィードバック制御によって能動的に揺らぎを抑制する手法について研究を進めてきた。二重量子ドットのスピン閉塞状態の電流レベルや電流ノイズの統計的解析によって、2つのドットの核スピン偏極のz成分を揃えるフィードバック機構を明らかにした。本手法は、電子スピンの緩和を抑制する有効な手法になると期待する。

太田) 半導体素子の電荷や電子スピンの量子状態や相関状態を検出することを目的として、半導体ナノ構造を用いた量子計測素子の開発に関する研究を行っている。二重量子ドットとそれに近接した量子ポイントコンタクトに独立に高周波電圧を印加することにより、一電子、二電子状態において広帯域のキャパシタンス測定を行った。ドット間の電荷移動に伴うキャパシタンス信号の周波数依存性が、電子の軌道状態やスピン状態が関与するダイナミクスを反映していることを明らかにした。

伊藤) 28Si安定同位体純度を99.98%まで高めたjシリコンウエハーを豪New South Wales大学のグループに提供し、シリコン中の単一のリンドナーに束縛された「単一の電子スピン」と「単一の31P核スピン」を2つの量子ビットとして初期化、操作、検知することを実行した。ここでは位相緩和時間測定といっ

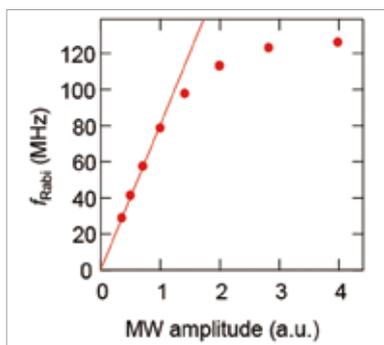


図1a 新型磁石によるラビ振動の高速化

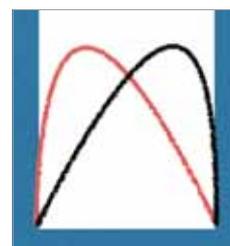


図1b 矩形ポテンシャルでの電場による電子の確率分布の変化

た基本的な特性評価も実施し、表面近傍に添加された単一のリンドナーのスピン状態に対しても背景29Si核スピンを除去することが極めて重要である事を実験により示す事に成功した。

工位) 物質創成の課題では分子スピン量子ビット系の小規模、及びスケラブル量子ビット系構築のためのmolecular optimizationを、スピン量子制御の要素技術の開発では分子スピン系の電子と核のスピンを等価に扱うことができる電子スピントクノロジーの開拓を行ってきた。最終年度では特に後者の課題で、パルスマイクロ波(Xバンド)の多周波励起、多周波数の相互位相及び振幅制御、任意波形成励起などを実現しNMRパラダイム型のパルス電子スピントクノロジーを完成させた。

北川) 静磁場0.6Tで電子スピンの偏極率が99%になる極低温(150mK)下で、高度な変調パルスを用いて電子スピンの超精密操作を実現した。選択平均パルスなどを従来よりも精密に実現するパルス系列を数値的に設計する手法を開発し、スピンスクイーミングや量子シミュレーションのためのパルス設計に応用した。観測を用いずに並進対称的な操作のみによってトポロジカル量子誤り訂正を行うアーキテクチャを示し、それを実現するための分子系を森田グループと共同で探索した。

森田) 精密有機合成化学と物性有機化学を基盤として分子スピン量子ビット系への挑戦を行っている。Lloyd's電子スピン量子ビット系の実現を目指し、オリゴイミダゾールを配位子に用いた三重らせん型金属錯体の合成と、スピンマニピュレーションに向けた磁氣的希釈単結晶の作製を行った(図2a)。さらに、北川グループと共同で設計した $\sim 10^9$ 電子スピン量子ビット系のユニットとなる安定有機ラジカルの合成検討も行った(図2b)。

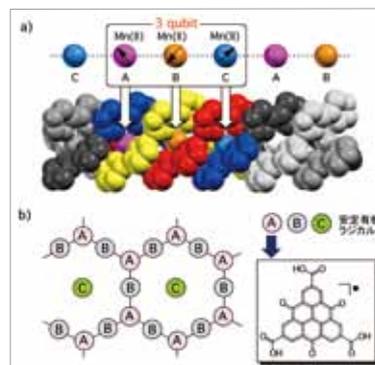


図2 a)オリゴイミダゾール三重らせん型金属錯体とb)安定有機ラジカルの自己配列による $\sim 10^9$ 電子スピン量子ビット系と合成した安定有機ラジカルユニット

当サブテーマでは、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報告を行った。まず、銅酸化物の高温超伝導体で重要な役割を演じるCuO₂ 2次元面の構造を持つ、いわゆるLieb型光格子を、Yb原子を用いて生成した研究について報告を行った。Lieb格子に導入したYb原子のBECの物質波干渉パターンを観測することにより、Lieb格子が生成されていることを確認した（図1）。このLieb型光格子の実現により、高温超伝導体に対するd-pモデルの量子シミュレーションへの可能性を広げることができたと言える。さらに、一次元ボロジカル超流動体のマヨラナエッジ状態の観測に向けた研究として、

Yb原子のフェルミ同位体について、基底状態と準安定状態との間の磁場フェッシュバハ共鳴を新たに複数観測することに成功したことを報告した。

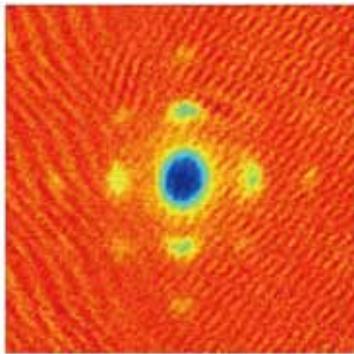


図1 Lieb型光格子からの物質波干渉パターン

平野グループ（学習院）では、冷却リビジウム原子を用いた磁力計について、低周波数の磁場変動や磁場勾配の影響を低減できる量子縮退原子AC磁力計を初めて実現した。磁力計の感度は、原子ショット雑音限界に近い $12\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}@10\mu\text{m}$ であり、従来の最高感度とほぼ同等である。そして、この磁力計を用いることで、50Hzの電源ラインに同期した微弱な環境磁場ノイズの高感度検出を実現し、さらに、この磁場と逆相の磁場を人為的に印加することにより、環境磁場ノイズを1nT以下まで小さくすることができた。これらは、量子縮退した集団的な原子スピンのコヒーレンス制御技術にも基くものであり、微弱磁場環境の生成技術とあわせ、今後の応用が期待される。

向井グループ（NTT）では「超伝導チップ上のボース凝縮を用いた量子制御」について報告した。「量子

情報処理システムの実現を目指した新技術」として独自に開発した超伝導永久電流アトムチップ上のボース凝縮体が、当初直面した「侵入する磁束」と「早く切れない永久電流」の課題を、温度制御・数値計算・スピン制御により克服することで、RF共鳴によるラムゼー干渉、および、内部状態の量子制御までが可能となった。更に、従来技術の3~4倍の電流が作る安定な磁場を利用して、1次元光格子、および、光共振器を組み合わせた「オンチップ光子-原子ハイブリッド量子系」を開発することで、将来の量子ネットワークへの応用が期待できることを報告した。

占部グループ（大阪大）では、イオントラップを用いた量子シミュレーションについて、二準位原子を含む結合した光共振器列で構成されるJaynes-Cummings-Hubbardモデルを、リニアトラップ中に捕獲された二個のイオンの内部状態と局在フォノンを使って実験的に実証した結果について報告を行った。この実験では、二個のイオンという最も単純な系ではあるが、系の基底状態を断熱的に変化させることにより、量子相転移の観測に成功している。また、ポスターセッションにおいて、リニアトラップ中の三個のイオンを用いた量子回転子の実現とアハラノフ・ボーム効果の観測、2フォノン量子干渉実験、個別アクセスによる量子シミュレーション、二列配列型イオントラップなどの成果発表を行った。

最後に、五神グループ（東京大学）では、バルク半導体亜酸化銅中の励起子ボース・アインシュタイン凝縮の観測について進捗を報告した。励起子間非弾性散乱の頻度を低減して安定な凝縮体を形成するために、2010年に報告したヘリウム3冷凍機を用いた実験と比べてさらに低温化する必要があり、希釈冷凍機を用いた冷却実験について最近の成果を報告した。歪誘起トラップ中では横波音響フォノンと励起子の結合が許容となるため、励起子温度を目標値かつ歴史的な低温となる100mK領域へ冷却できることを実証した。また、間接遷移型半導体のダイヤモンドにおいて少数多体の励起子が束縛したポリエキシトン状態を発見し、その束縛エネルギーのユニバーサルな性質について議論した。



量子標準

(独) 産業技術総合研究所 洪 鋒雷
(独) 情報通信研究機構 小山 泰弘

FIRST 量子情報処理
プロジェクト 全体会議 2013

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ことを旨とした研究開発に取り組んできた。東大グループの成果は別稿にて紹介しているので、ここでは残る2グループの成果について紹介する。

産総研グループからは、Sr 及び Yb 光格子時計開発の進捗状況、セラミック材料を用いた光共振器の開発、及びデュアル光周波数コムを用いた分光研究について報告を行った。Sr 光格子時計の時計遷移を観測する狭線幅レーザーは、高速制御可能な光周波数コムを用いて、レーザー線幅を 1064nm のマスターレーザーから 698nm のスレーブレーザーへ転送することにより実現した。このレーザーを使って、光格子中の冷却 Sr 原子に対する分光を行い、周波数安定化を実施した。また国際原子時を用いて、開発した Sr 光格子時計の周波数計測を行った結果、⁸⁷Sr の絶対周波数を 3.7×10^{-15} の不確かさで決定した。図1に今回産総研の絶対周波数測定結果に加えて、これまでの各研究機関の測定値を示す（文献番号は Appl. Phys. Express 7, 012401 (2014) を参照）。これらの測定値はそれぞれの不確かさの範囲内で一致している。さらに、開発した Sr 光格子時計に対し不確かさ評価を実施した結果、絶対周波数計測の不確かさを除いた Sr 光格子時計自身の不確かさが 3.8×10^{-16} であることがわかった。光時計の周波数比を計測することにより、現在の SI 秒の不確かさを超えた形で周波数計測をすることができる。光周波数コムによる光リンクを用いて、先に開発した Yb 光格子時計と Sr 光格子時計の周波数比を 1.5×10^{-15} で決めることができた。この Yb/Sr 周波数比は、これまでの最も小さい不確かさを実現し、かつ他の測定結果との一致も非常に良い。セラミック光共振器に関しては、光周波数コムを用いて評価した結果、熱膨張係数がゼロとなる温度が存在し、それが 16.4°C であることがわかった。デュアル光周波数コムを用いた分光に関しては、狭線幅ファイバーコムを用いた

デュアルコム分光計を構築し、1.5μm のアセチレン分子吸収線を観測した。現在、デュアルコム分光計の広帯域化を進めている。

情通機構グループでは、情通機構小金井本部-大手町間で構築した光ファイバリンクを東大本郷キャンパスまで延伸して、東京大学と情通機構の2台の独立した Sr 光格子時計を直接比較し、これまでに実現されなかった 16 桁の精度での周波数一致を確かめた。現在のところ光ファイバーによる周波数伝送手法が最も高精度ではあるが、現状では大陸間での周波数伝送にはこの方法を採用することは難しい。これは日本のような島国にとって国際比較が困難であることを意味するため、これを克服する周波数伝送システムの開発は日本が世界をリードするために非常に重要な課題の一つである。そこで、我々はこれまで行ってきた静止衛星を用いた周波数伝送技術をさらに押し進め、この伝送手法を用いてドイツ物理工学研究所 (PTB) と情通機構の Sr 光格子時計の間で世界初となる大陸間の直接周波数比較を行った。この結果、国際原子時を用いた間接的な比較精度と同程度の 1.8×10^{-15} の不確かさで互いの周波数が一致することを確かめられた (図2)。今後は周波数伝送技術をさらに追求することで、16 桁での大陸間比較実現を目指す予定である。国際原子時の構築のために使用されている従来の方式としては、コードを用いた衛星双方向比較法と衛星測位システムを用いる GNSS 法とがあるが、いずれも光周波数標準を正確に評価するには非常に長い日数を必要とする。これに対して、今回の実験で用いたキャリア位相衛星双方向比較法では比較に必要な積算時間の大幅な短縮を可能にする可能性がある。この手法に加え、我々は VLBI による周波数比較手法の開発を進めている。これまでに移動可能な小型アンテナの開発を行い、産総研との間での実証実験を実施するための準備を進めている。これらの技術の研究開発によって、遠隔地にある複数の独立な光格子時計の等価性を正確に検証することができるようになり、秒の再定義に向けた技術課題の一つを克服しつつある。

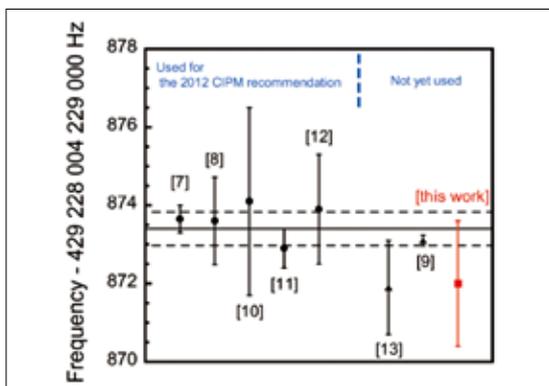


図1 産総研及び他の研究機関が測定した Sr 光格子時計の絶対周波数

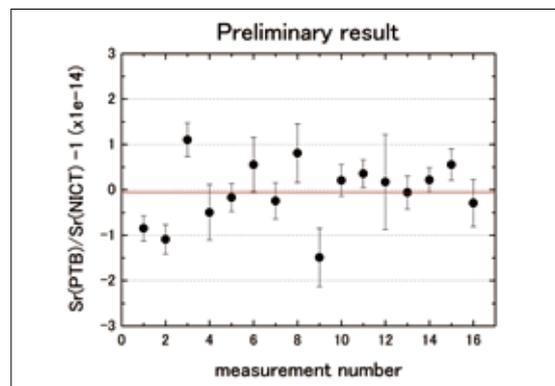


図2 PTBとNICTの Sr 光格子時計の周波数比較実験の結果 (preliminary result)

量子通信サブテーマでは光を媒体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きた。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などの幅広い要素技術の研究が行われた。各グループの研究だけでなく、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、またサブテーマ内のみならずサブテーマ間の共同研究についても言及があった。各グループからの報告は以下の通りである。

阪大グループでは光の量子状態を様々な波長に移すために有用な波長変換量子インターフェース、量子状態を雑音から守るための Decoherence Free Subspace (DFS) を利用した量子プロトコル、4量子ビット局所系を用いた分散型量子計算、マルチパーティ量子もつれ状態の融合ゲートなどの研究が紹介された。波長変換量子インターフェースは量子メモリとして利用が考えられている原子や物質系に光で量子状態を転写可能な波長から、光ファイバー通信に利用されている通信波長帯への波長変換を主に行っている。量子もつれを保存した波長変換の実証実験に成功し、量子メモリへの適用の可能性が報告された。DFSを利用した量子情報通信実験はその効率化の実証実験が行われ、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 そのものとできることが示された。また、従来は位相雑音だけでなく偏光回転による雑音が同時に起こる場合には4量子ビットが必要と考えられていたが、それを2量子ビットで可能にし、かつ透過率 T そのものとできる新しい方法が提案された。理論的な研究成果についても紹介され、効率的なマルチパーティ量子もつれ状態の生成から量子計算に用いられる量子系の新しいアーキテクチャーといった研究の進展が報告された。

NICTグループは新しい信号増幅の手段として量子増幅転送の実証実験、今後の量子暗号についての提案、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通信波長帯における高効率な光子対光源の実現が報告された。量子増幅転送は微弱な光信号を遠く離れた場所に増幅して再生する新しい方法であり、受信者が予め量子もつれ状態を用意し、そこへ送りたい情報を転写するものである。従来の光増幅器とは異なり、無雑音の信号増幅が可能となる。この量子増幅転送の実証実験および、これを用いた量子暗号の長距離化などの新展開が報告された。また、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。光子数識別検出器は数光子までヒストグラムが0付近にまで落ちる(すなわち光子数のクロストークの非常に小さい)検出器の開発に成功し、スキューズド光の偶数光子統計性の直接測定を実現した。PPKTP結晶を用いた通信波長帯における光子対光源の高効率化を実現し、非常に高い4光子同時検出率を実現した。

東大グループは世界最先端に行く連続量子情報処理を用い、単一光子とのハイブリッド量子情報処理の実験を行っている。連続量を用いると量子もつれ生成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子情報処理を行うアイデアを示し、実験的にも実証した。更に、時間領域多重量子情報処理を新たに進め、time-bin量子ビットの連続量子テレポーテーションの実証実験が報告された。2つの時間スロットを用いた量子ビットとすることにより、1台の連続量子テレポーテーション装置で実現可能となった。また、この時間領域多重化をone-way量子コンピューティングに応用した2本の連続波スキューズド光ビームによる16000モードの大規模クラスター状態の生成が報告され、one-way量子コンピューティング実現に大きく前進した。

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。その際用いる固体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中心を用いた研究について報告があった。光子から核スピンメモリへの量子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、まずNV中心に付随する電子スピンと核スピンに量子もつれを生成させ、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のである。その実現に向けた実験として、ダイヤモンドNV中心を用いた光子と電子スピンの量子もつれ検出の基礎実証が報告された。また、同様の機構による、光子と核スピンの量子もつれ検出および光子から核スピンへの量子状態転写についてもその可能性が報告された。更に、量子中継の具体的な方法としてダイヤモンドのNV中心の光子吸収をうまく利用した中継効率の向上方法やバタフライ型の量子中継ネットワークの構成による必要量子メモリ時間の短縮について報告がなされた。



全体会議2013に参加しての感想

アドバイザー
電気通信大学レーザー・新世代研究センター
清水 富士夫

FIRST 量子情報処理
プロジェクト 全体会議 2013



FIRST 量子情報処理プロジェクトでは、毎年、プロジェクト全体を対象とした夏期研修会と全体会議が開かれてきましたが、半ば引退してしまった私にとっては、このような会議で広い分野の話が聞けるのは常に楽しいことでした。今回は最後の全体会議ということでプロジェクトを担当した方々の

成果報告に限られているようですが、過去5年間の研究として十分な成果をあげているように思えます。私の研究分野に近い分光関係では、香取氏の光格子時計の精度は目標値の 10^{-18} 台に到達しつつあるし、京大高橋氏らのグループが始めたYbのBEC関連の研究は非常に多彩な成果を出している。(後発で同じシングレット2電子系のCaやSrのBECより遙かに進展している。)中村氏らの超伝導キュービットの原子光学研究、樽茶氏らの量子ドット、北川氏らのNMR、占部氏らのイオントラップの研究も量子情報に絡んだ分野での現状の一端を知ることが

できました。直接自分でタッチした話題以外の話は聞くだけでは、正確な理解を得ることはできないので、聞きながら文献資料を集めるのですが、残念ながら、大抵はそれら文献を読むことなく時間が過ぎてしまっています。

ところで、評価する立場の人々にとって大勢の研究者が参加するプロジェクトでは個々の研究の集積だけではご満足いただけないようです。まず、多人数による相乗効果の具体的な証拠が求められます。さらに、初期計画に対する研究の整合性と最終プロダクトに対して工学的に意味を持った数値目標も求められます。このような要求は私などには煩わしいことです。今回の会議でも各自の興味や価値判断にしたがって自由に研究を行っていると思える発表がいくつもありました。ただ、プロジェクト代表者やサブテーマ代表者の方々は、評価者の価値基準との整合性を考えて行動されたと思います。それが自身の研究上の価値判断と常に一致していれば問題はありませんが、必ずしもそうでなかったのではなかったのではないかと察します。5年間ご苦労さまでした。



若手研究者からの全体会議報告

FIRST 量子情報処理
プロジェクト 全体会議 2013

関西学生チャプター
大阪大学大学院 基礎工学研究科 井元研究室 遠本 吉朗



FIRSTの全体会議には初めて参加させていただきましたが、普段の学会とは違い、それぞれの分野の研究状況を包括的に聞くことができ大変勉強になりました。その中でも印象的だったのが、量子通信や量子計算機にも用いられる技術が別の分野で活躍している研究が数多くあるということ、そして量子計算機の実装に対する多角的なアプローチです。例えば、量子通信の分野では、離れた二者間で長距離エンタングルメントを共有する為にエンタングルメントスワッピングが用いられますが、その時に重要な役割を果たす二光子干渉が、量子光コヒーレンストモグラフィとして高分解能なイメージング技術に応用されつつあります。量子計算機の分野では、1995年のシラック・ゾラーの論文で理論提案されたイオンコンピュータで用いられるイオントラップの技術が、光格子時計や量子シミュレーションとして素晴らしい成果をあげていることも大変刺激的でした。

量子計算機の実装については、超伝導回路やスピ

ンを利用した素子の開発状況を知る事ができたのと、従来の回路型とは異なったイジングマシンのようなアプローチもあるということに驚きました。

ポスター発表では、関西、関東学生チャプターでお会いしたことのある学生の方々の発表を聞いたり、自分の研究内容に対して意見をいただいたりできて大いに励みになりました。

会議を通して、広い視野を持って研究を進めていくことの重要さを感じ、また、技術の確立や実装の為のアイデアにとどまらず、量子情報理論が物理学や計算機科学にどのような形で貢献できるのかを考えさせられました。このような素晴らしい場を提供してくださった先生方、スタッフの皆様に心より感謝いたします。

若手研究者からの全体会議報告

若手研究者
分子科学研究所 協奏分子システム研究センター
鹿野 豊

FIRST 量子情報処理
プロジェクト 全体会議 2013



FIRST量子情報処理プロジェクトの最終年度の全体会議では、各グループの研究成果発表にとどまらず、現在の量子情報処理に関する個々の分野の世界の研究動向の紹介やこれまで行ってきたサマースクールやスチューデントチャプターに代表される若手育成活動やアウトリーチ活動に対するリフレクションもあり、最終年度にふさわしい濃密な時間を過ごすことが出来ました。

今回の会議のテーマは大きく言って2つあったように思えます。1つ目は「感謝」です。研究プロジェクトの統括である山本先生、共同提案者の樽茶先生、蔡先生はもちろんのこと、内閣府の総合科学技術会議の委員の先生方、研究の方向性をご指導いただいているプロジェクトのアドバイザーの先生方、今回の全体会議はもちろんのこと研究支援統括機関として尽力していただいた国立情報学研究所の皆さまなど。量子計算機の実現という大

きな旗印のもと、巨大なチーム戦で戦ってきたことへの感謝に堪えなかった会議だと思えます。私個人としてもFIRSTプロジェクトには大変お世話になりました。この場を借りて御礼を申し上げたいと思います。2つ目は「新しいことへの飽くなき挑戦」です。既存の分野区分では出会うことのなかった人たちの中から協働し、今足りない量子情報処理のコンセプトが徐々に出てきたと感じております。その素地は個々人の信頼関係であり、FIRSTのプロジェクトの人たちは年代を超え、研究分野を超え、公私ともに仲が良いというのが「新しいことへの挑戦」を可能にしているのではないかと個人的に感じております。そして、今後ともこのようなものを支えてきたサマースクールやスチューデントチャプターを多少形態は変化してでも続けていこうという動きがありました。目に見える形での研究業績ではありませんが、日本の量子情報分野が一步強固になったのだと感じた瞬間でした。だからこそ、これからもしっかりと量子情報の分野の歩みを止めてはならないと実感させられた全体会議でした。

若手研究者からの全体会議報告

東京理科大学大学院 理学研究科応用物理学専攻 高柳研究室 佐久間 大輔 (関東学生チャプター 2013 年度代表)
東京大学大学院 情報理工学研究科コンピュータ科学専攻 今井研究室 佐藤 貴彦 (関東学生チャプター 2012 年度代表)

FIRST 量子情報処理
プロジェクト 全体会議 2013

このFIRST量子情報処理プロジェクトでは、とても有意義な時間を過ごさせていただきました。この場を借りて再度感謝の意を表したいと思えます。

そのFIRSTプロジェクトも今年度で終わるとい事で、当初は不安を感じながらの会議への参加となりました。しかしながら、終わってみれば今後も研究が発展していったほしい、また発展させていきたいと思える良い会議であったと思えます。

量子情報処理の研究は、ようやくいろんな道具が準備できてきたのではないかと思います、これからはそれらを使って、融合させて、もっと面白いことが出来るのではないかと期待が膨らみました。一つ一つの量子ビットの状態生成・操作・検出や、エンタングルメント生成などの量子情報処理を行うための基本技術が成熟してきており、これからはそれら要素技術の一つ一つを融合させようという流れにもあると思えます。

これからの量子情報を支える若手の力を集わせる研究会運営についても、議論させていただく機会もあり良かったです。これからも頑張りたいと思えます。(佐久間)

関東量子情報 Student Chapter の運営委員代表として、FIRST量子情報処理プロジェクトの共催により3回の研究会を開催させていただきました。世話を引き受け

て下さった先生方および各研究施設の皆様に改めて御礼申し上げます。FIRST量子情報処理プロジェクトは情報・物理・数学など幅広い領域から構成されています。関東SC研究会では、学部生・博士課程を中心とした若手研究者たちを対象に活動を行ってきました。気楽な雰囲気の中での講義や見学会、討論、懇親会を通じて異なる分野の研究者たちとの交流促進に貢献できたのであれば幸いです。FIRST量子情報処理プロジェクトは今年度で終了となりますが、将来の量子情報処理技術は本プロジェクトにより育まれた人材・技術を中心に展開していくことが期待されます。その中で貢献できるよう努力を続けたいと思えます。(佐藤)



写真は2012年5月30日、第15回研究会(日本大学・駿河台キャンパスにて)

若手研究者の声を聞いてみました！



学生チャプターやサマースクールなど 若手研究者間の交流を通じて感じたことはなんですか？



小野 貴史 (北海道大学 博士研究員)

異分野の方々と知り合いになることができて、とても良かったです。

田中 陽 (大阪大学 博士3年)

理論／実験を問わず、方法論こそ違っても量子の世界を楽しむ学生がお互いの研究や人となりに歩み寄れる希有な環境だと思います。



不破 麻里亜 (東京大学 修士2年)

楽しい！自分と同じように博士課程に進んでいる女性に出会えて、励みになった。

土井 悠生 (大阪大学 博士1年)

自分の理解の範囲を越えた研究がたくさんある。なにやらすごいなあと思いをひかされると同時に勉強してもっと深く理解したいと思った。学生が互いに刺激しあう環境として素晴らしいと思う。先輩たちからも夢のある話や現実的な話までいろいろきける。



石川 豊史 (東京大学 博士研究員)

様々な分野の最先端の研究を行っている研究者・学生からの生の声を聴けて議論できるというのは非常に貴重な機会であったと感じております。同時に、同世代の方々がどれだけ凄いことを研究しているかを知る機会でもありました。大変刺激になり、交流することの重要性を実感する場でした。

小川 和久 (京都大学 博士1年)

量子情報の研究を始めてすぐの時期から、サマースクールや学生チャプターを通じて同じ研究分野の学生や先生方と知り合えた事は非常に幸運だったと思います。そのおかげで、(人見知りながらも)これまで外で行われるワークショップやセミナーにも進んで参加し、自分の研究に還元することができたと思います。



中島 秀太 (京都大学 博士研究員)

講義やポスター発表は少し違う分野の知識や知り合いが増える良い機会ですが、実験家にとっては、何かあった時に議論しやすい理論家の友人が出来る良いきっかけだと思います。また、学生主体のポスター発表は良いと思う。孤高の天才は誰に認められなくとも自分が興味を持ったことに邁進できるかもしれないが、大抵の人はそれだけではモチベーションを保てないんじゃないかと。ポスター発表で近い分野の同年代の人に説明し、面白い研究だねと興味を持ってもらったり、そこから議論したり、そういう事がなんだかんだ研究を続けるモチベーションに結びついてくと思う。



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 陽 (大阪大学 博士3年)

量子化された電磁場等を用いないと導出できない結果を実験室で目の当たりにできる点が楽しいです。用語や概念がかっこいい！というのも初期の動機付けになりました。



鹿野 豊 (分子科学研究所 特任准教授)

量子情報は物理学の見方を変えてくれた学問だと思うので、それが自分の研究で出来るかもしれないと思うとワクワクします。

増山 雄太 (東京大学 博士2年)

量子論に対する様々な考え方・扱い方を教えてくれるところ。SFのような新しくワクワクする技術の可能性を見せてくれていること。(僕達の世代がより具体的な形にする必要があるので大変でもあるかもしれませんが、笑)





玉手 修平 (理化学研究所 特別研究員)

量子情報は量子に関わる研究の共通言語だと思っています。あまり馴染みのない物理系の話でも、量子情報だと思えば理解できて、量子情報の言葉を使えば語り合える、そんなところが楽しいです。

根来 誠 (大阪大学 助教)

現時点で示されている量子コンピュータの道筋は非常に狭く長く険しいものです。あと少しのアイデアで道が大きく拓ける可能性を感じるけど、世界中の天才がまだそれを見つけられないでいます。量子コンピュータ実現という人類の一大挑戦に貢献できるかもしれないと思うとワクワクします。



野口 篤史 (大阪大学 博士研究員)



私は量子力学の不思議さ、また多粒子系が示す性質に興味があつて物理の世界に入りました。これらの不思議さを実験的に同時に感じられる(もしくは、感じる事を目指す)のが量子情報の実験だと思っています。実際に自分の手でそのような不思議な現象を引き起こす事ができるのが何よりの楽しみだと思っています。また、他分野の事をそんなに知っているわけではないのですが、量子情報の実験は一人である程度の規模の実験系を把握できるという楽しさもあると思っています。もちろん毎日の実験では数多の実験的な問題が起こるわけですが、一人でその問題点を探し出し、解決していくのも楽しみの一つだと思います。



量子情報の未来について期待することはなんですか？

小野 貴史 (北海道大学 博士研究員)

量子情報の研究を通じて、量子力学に対する共通の理解が得られると良いと思います。



増山 雄太 (東京大学 博士2年)



他分野との交流が一層盛んになり、その中から新しいアイデアが生まれると良いなと思います。

鹿野 豊 (分子科学研究所 特任准教授)

量子情報と自然現象との繋がりを探る方向に活路があるのではないかな。



不破 麻里亜 (東京大学 修士2年)



量子情報の研究を通じて開発された、量子を制御する技術が新しい研究分野を誘発すること。

石川 豊史 (東京大学 博士研究員)

「夜明け前」を越えて黎明を迎え、サイエンスとテクノロジーの両者に新たな視点・価値観を提供する、パラダイムシフトをもたらすようになることを期待しております。尤も、他人事ではないので、そうなるよう日々精進する次第です。



土井 悠生 (大阪大学 博士1年)



量子情報の研究の世界に身を投じたいと考える人たちのためにも、研究がより発展し、量子情報がさらに多くの人達に認知されることを期待します。

玉手 修平 (理化学研究所 特別研究員)

「情報」との接点をきちんと見つけて、実験的に計算機科学との関わりを持つようになることに期待しています。今までは、量子情報というよりは量子物理の実験がほとんどだったように感じるので、今後は、新しい情報処理ができるような量子系が実際に実現されることに期待しています。



小川 和久 (京都大学 博士1年)



量子計算における、次の革新的アルゴリズムの発見、実現に近づく実験的ブレイクスルー。量子情報の花形である量子計算が盛り上がる事は、分野全体の活気につながると思います。

根来 誠 (大阪大学 助教)

量子コンピュータの実現を目指し続けることが重要だと思います。量子コンピュータは「京」では到達できない人類に許された究極の能力が約束されています。この能力を得た先に、必ずや新しい科学が拓けると私は信じています。



量子ビット周辺回路として有望なSFQ回路シンポジウム開催

■日程：2013年11月21日(木)～22日(金) ■参加者人数：62名
 ■シンポジウム名：SSV (Superconducting SFQ VLSI Symposium) 2013 ■報告者：日高 睦夫 (産業技術総合研究所)

SSV (Superconducting SFQ VLSI Symposium) は、単一磁束量子 (SFQ) を情報媒体とする超伝導デジタル回路の国際ワークショップであり、2008年から毎年開催されている。第6回目の今回はつくばの産総研で国内およびアメリカ、オランダ、南アフリカ、中国から62名の参加者を集めて2013年11月21日と22日に開催された。本シンポジウムで取り扱うのは古典的な超伝導デジタル回路であり、量子情報処理とは異なるが、極低温で動作し、消費電力が極めて小さなSFQ回路は、量子コンピュータの周辺に配置可能な制御回路として期待できるため、量子情報処理とも関係が深い。

今回のシンポジウムの大きな話題は、アメリカで超伝導スーパーコンピュータを目指した大きなプロジェクトが始まることと、SFQ回路のさらなる低消費電力化であった。アメリカのプロジェクトを取りまとめるHolmes氏から京コンピュータの100倍の計算能力を持つ1ExaスパコンではCMOS技術は消費電力的に行き詰まり、本質的に低消費電力な超伝導技術がその壁を乗り越える可能性を持っていることが述べられた。また、このプロジェクトで開発されるプロトタイプの様子が紹介された。横

国の竹内氏からAdiabatic quantum-flux-parametron (AQFP) と呼ばれる回路で5GHz動作時に10ZJ (1×10^{-20} J) のビットエネルギーが実測されたことが報告された。また、シャントされていない接合を用いることでエントロピーの減少がない場合に 5.8×10^{-23} J の4.2Kにおける熱エネルギー以下の動作も可能であることが示された。筆者はジョセフソン接合の小型化によるSFQ回路の消費電力低減とAI超伝導量子ビットを目指した究極の小面積接合作製技術について述べた。AI微小ジョセフソン接合では、 $0.005 \mu\text{m}^2$ の接合まで正常な電流-電圧特性が得られていることを報告した。



SSV 2013参加者の集合写真

第7回分子スピンドバイス日露国際WS・淡路夢舞台

■日程：2013年11月17日(日)～20日(水) ■参加者人数：94名
 ■シンポジウム名：The 7th Japanese-Russian International WS on Open Shell Compounds and Molecular Spin Devices
 ■報告者：工位 武治 (大阪市立大学)

分子磁性及び分子スピンドバイステクノロジーを討論主題とする日露国際WSは、2007年以来毎年ほぼ日露交互で開催され、2013年で7回目を迎えました(2007年6/7月ノボシビルスク、2008年11月エカテリブルグ、2009年11月淡路夢舞台、2010年9月ニズニイ・ノブゴロド、2011年11月淡路夢舞台、2012年9月ロストフ(Rostov-on-Don)、2013年11月淡路夢舞台)。分子磁性・分子スピン関連の研究分野は1960年後半日本発の独創的な学際領域として始まり、その後著しい発展を遂げ、多くの関連する大きな国際会議のトピックスとして取り上げられるまでに成長してきましたが、最新の研究課題を迅速に議論するために100名規模(口頭招待講演・ポスター一般講演形式)のWSが日欧で毎年恒常的に開催されるのがトレンドになってきました。ここ数年間この分野は、化学、物理、物質科学、バイオスピサイエンスのみならず、新たに医学・医療に寄与する分子スピンのNMR利用(安定開殻分子系DNPや化学反応開裂を利用するDNP)、及び量子情報処理・量子コンピュータサイエンスをも横断する新しい学際領域として新たな展開を見せ始めています。第7回WSでは、特に量子コンピュータ・量子情報処理関連の動向に注目が集まり、日露の関連する第一線の研究者を中心にそれぞれが得意とする最先端領域

で協力して新しい方向へ発展させていくだけでなく、これまで以上に国際的な視野に立った研究ネットワークを構築していくことになりました。海外招聘者が1/3近くを占め、若手の台頭が目覚ましい日露国際WSでは、共通の関心課題について密度の高い議論を行うだけでなく、萌芽的な研究を発掘し、人的相互交流の見地からは若手の研究者・学生を育成することを目的として活動してきた伝統があり、今回はロシアアカデミーのreformingを契機に新たな枠組みでの共同研究などが具体的に提案されました。第8回(2014年)は、カザンで開催されます。

第7回日露国際WSのURL: <http://www.qcqiis.sci.osaka-cu.ac.jp/molspin/awaji2013/>



京都大学ELCAS

■実施日 2013年10月5日(土)、19日(土) ■参加者人数 9名
 ■授業名「ELCAS 最先端科学の体験型学習講座」 ■担当/報告者 吉川 豊(京都大学)

京都大学では高校生を対象とした体験型学習講座(通称ELCAS)を実施しています。今年度は10月5日と19日の2日間、「光と物質」に関する講義・実習を担当しました。参加者は事前の選抜試験に合格した高校1、2年生です。

ELCASの目的の1つに「基礎的な物理だけでなく、最先端科学にも直に触れてもらう」ことがあります。そのため今回は、偏光や回折などの光の基本的性質、原子の構造、光の吸収・放出からレーザー冷却まで、大学生が4年程度かけて学習する内容を2日間(時間にして6~7時間)に凝縮した超特急コースとなりました。

1日目は主に光について講義を行ったあと、偏光板や回折格子フィルム、レーザーポインターなどの簡単な装置で実習してもらうとともに、レーザーの波長測定やCD・DVDのトラックピッチ測定などの精密計測を体験してもらいました。中には回折などの基礎知識はすでに知っているという参加者もいましたが、それを計測に活かすという体験は新鮮だったようで、終了予定時刻を過ぎても装置にかぶりつきで実験する生徒の姿が印象的でした。2日目には、回折格子フィルムで簡易分光器を作成し、様々な光源のスペク

トルを観測しました。また、太陽光のスペクトルに見られるフラウンホーファー線を通して原子の構造と分光学の基礎を学習してもらいました。そして最後に、それらの応用であるレーザー冷却の原理を紹介し、実験装置の見学をしてもらいました。

高校生に理解してもらえる物理は非常に限定的でしたが、2日間の実習を通して「それらの基礎を積み重ねた先に最先端の研究があるんだ」という実感を持ってくれた生徒が多く、これから本格的に物理を学ぶ彼らにとって、良い刺激になったのではないのでしょうか。



青森県立三本木高等学校附属中学校 出張授業 ~踏み出す力を育む~

■実施日 2013年11月27日(水) ■参加者人数 80名
 ■授業名「計測を制するものが世界を制す」(講義Part) / 「光の干渉-かんしょうってなんだ?」(実験Part)
 ■担当/報告者 久富隆佑、山崎歴舟(東大)、木戸耕太、志賀信泰(NICT)

中学3年生の2クラス(共に男女比1:2)に対して、講義形式の授業(木戸、志賀担当)と実験デモを中心とした構成の授業(久富、山崎担当)の2種の授業を行いました。その中で4人の多様な経歴紹介をじっくり行うことで、色々な生き方を伝えることも重視しました。以下初参加の2人の感想です。(志賀、山崎)

私は今回の出張授業において、講義パートのサポートを担当しました。授業では、時計について話をし、雰囲気も良く、笑いあいの授業となりました。また授業の中で生徒たちに実際に計測してもらいました。各自持ってきてもらった定規は最小メモリが1mmのもので円柱を0.1mmの桁で測定してもらい、それらの値(1クラス40名)をこちらで集計しグラフと平均と分散から考察をしました。外れた値もありましたが、こちら側の意図としては、円柱の値に正解は無いことと、外れた値があっても平均値を出す上では価値がある、ということなので、それが少しでも伝わったら成果があったのだと思います。先生方も温かい方々でしたのでやりやすかったです。(木戸)

終わって、一番残っている感情は、中学生って若いな~という気持ちでした。とにかく純粋で、かつ色んなことを敏感に捉えられる時期なんだと改めて思いました。こういう機会が初めてだった僕は、次の2つのことを大切にしようと考えていました。

1つ目は、自分が面白いと思っていることを素直に表現しようということ。2つ目は、ちょっと変わった人生(実は皆変わっていましたが(笑))を送ってきた自分が、とある転機に感じたことを、皆に率直に話そうということでした。終わってみて、自分がどこまでできたかはわかりませんが、誰かの何かの“きっかけ”になってくれたら嬉しいなと、今思っています。(久富)



大活躍の新任教師2人とワンバク中学生(左:木戸、右:久富)

JST ERATO 河原林巨大グラフ プロジェクトに関する紹介

● 1. センター発足 —JST・ERATO・河原林巨大グラフプロジェクト始動—

本研究センターは、2012年10月に、著者がJSTの戦略的創造研究推進事業(ERATO)に採用されたのを受けて、ERATOの受け皿として、国立情報学研究所に発足した。ERATOには、山本FIRST関係者では、山本先生を始め、東大の樽茶先生、香取先生(2010年に発足)の研究が採用されている。したがって量子(情報)関係者の中では、なじみのあるファンディングであると思う。しかしながら情報学(コンピューターサイエンス)としては、私の研究提案を含め、まだ5つほどしかERATOに採用されていない。その背景として、実験系とは違い、実験器具等が必要でないことがあげられる。高性能なサーバーは必要となってくるが、2, 3百万程度の初期投資で十分である。したがって、ERATOの研究規模(5年間で12億円)の研究を行うためには、多くの研究者がかかわる研究チームを組織する必要がある。このような大きな研究組織の必要性は、情報学全体としては懐疑的に見られていた。

しかしながら、2005年に発足した特定領域研究「情報爆発」(代表:喜連川先生)を契機に流れが変わってきた。この特定領域研究は、国内の研究者200人以上が参加する巨大組織から成り立ち、従来の情報学分野の特定領域研究とは異なる「巨大」組織から成り立っていた。背景として、Google, Yahooなどを代表するシリコンバレーのIT巨大企業や、マイクロソフトなどの巨大PC企業は、自前の研究所を作り、基礎研究者を「高給」で雇っている。しかも100人以上の「超一流」研究者を採用する企業も生まれてきた。これらの企業は、基礎研究者がIT分野に果たしてきた決定的な役割を認識しているのだ。実際、これらの企業の創成期では、スタンフォードのPDや学生などの研究によって発展してきた。したがって、100人以上の超一流研究者を抱えるIT企業に立ち向かうためには、オールジャパンで世界に挑まないといけない状況であると考えていいだろう。

● 2. 若い力 —IT産業の推進力—

私の研究プロジェクトと研究センターは、若手研

究者を主体として成り立っている。ITの歴史では、20代、30代の研究者が常に決定的な役割を果たしてきた。したがって現在20代、30代の若手研究者を育てなければ、日本のITに未来はないと思っている。

またIT産業の現状は、残念ながらアメリカ(とくにシリコンバレーなどの西海岸)の大学、IT企業のタッグに「独占・独走」されている状態である。このような世界の潮流を打破するために本研究センターでは5年後、10年後に世界のトップクラスになる研究者を最低5人生み出したい。そして、彼らの若い力と、日本企業の「ものづくり」の技術を融合して、IT分野での日本の地位向上を目指したい。

● 3. 具体的研究課題

インターネットのWeb構造や、Facebook、Twitterなどのソーシャルネットワークに代表される巨大なネットワークは、各々10億人に近いユーザーが利用し、現代社会に欠かせない存在となっている。これらのネットワークは年々急速に膨張し、近い将来には100億を超えるサイズになると予想されている。このような背景の下、本プロジェクトでは、巨大なネットワークを膨大な点と辺の接続構造持つ「巨大グラフ」として表現し、理論計算機科学や離散数学などにおける最先端の数学的理論を駆使してそれを解析する、高速アルゴリズムの開発を目指す。

研究課題のひとつに、「MAX-CUT問題」がある。この問題は、組合せ最適化問題の中でもっとも重要な問題のひとつであり、過去20年でもっとも大きな進展があった。その中でも、理論計算機科学の指導原理のひとつである「PCP定理」を使用して、93%近似はNP困難であることが証明された。また「半正定値計画問題(SDP)」により88%近似は多項式時間で解けることが明らかになっている。しかしながら、この手法では、1万点以上のグラフではスケールしないことが知られている。われわれの研究グループでは、1億点の巨大グラフでもスケールするようなSDPをベースとするアルゴリズムの開発を目指している。MAX-CUT問題は、D-WAVEでも、山本FIRSTプロジェクトでもベンチマークとして使用されている。われわれの研究と山本FIRSTの実装比較実験が可能になれば、世界的にもインパクトのある研究成果であると思う。

(河原林 健一)

超伝導を用いた新たな量子情報処理デバイスを目指して

私たちのグループは、神奈川県厚木市にあるNTT物性科学基礎研究所に所属しています。研究所からは丹沢山系の大山を望むことができ、所内の敷地では野生の猿や鹿を見かけることもあるという豊かな自然の中で研究を進めております。超伝導量子回路を研究するメンバーは、スタッフ4名、リサーチスペシャリスト1名、客員研究員1名、学生5名から構成されています。

超伝導磁束量子ビットでは、数百nAという巨視的な超伝導電流が右回りに流れる状態と左回りに流れる状態との重ね合わせが実現されています。NTTで磁束量子ビットの研究を始めたころは、量子計算・量子情報処理への応用はもちろん、巨視的な量子コヒーレンスが実現するか否かという物理的興味を持って研究しておりました。しかし、今では当たり前のように磁束量子ビットのコヒーレント操作が行われ、複数量子ビットの量子演算も実現されています。超伝導量子ビットのコヒーレンス時間は、この10年ほどで1nsから0.1msへと5桁も改善しており、この分野の進展の著しさが伺えます。私たちは、このように制御性・拡張性に優れた超伝導量子ビットを用い、新たな量子情報処理デバイスの実現を目指して、以下のテーマに取り組んでおります。

●超伝導量子ビットと電子スピン集団のハイブリッドシステム

超伝導量子ビットのコヒーレンス時間は改善していますが、ミクロな量子系である電子スピンや核スピンの持つコヒーレンス時間には遙かに及びません。例えば、ダイヤモンド結晶中のNV中心の電子スピンは、0.6sのコヒーレンス時間を示します。そこで、両者の特徴を生かすべく、超伝導回路と電子スピン集団を結合したハイブリッド系の研究が盛んに行われています。私たちは、これまでに超伝導磁束量子ビットとダイヤモンド結晶中の電子スピン集団との間の強結合を実現し、量子メモリ動作を実証しました。このハイブ

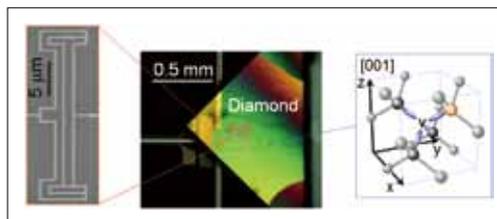
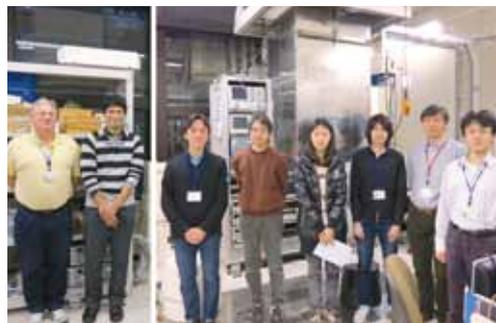
リッド系は、一つのマクロなサイズの量子ビットと数千万個というマクロな数の電子スピントが協調的に結合している興味深い系で、実験家と理論家が協力し合い、そこで起こる物理現象の解明を進めています。将来は、超伝導量子ビット上で制御できるマイクロ波領域の量子情報を、量子通信で用いられる光学波長帯の量子情報へ変換する量子周波数変換素子や、大規模量子計算で用いられる長寿命メモリ付き量子演算素子などへの応用を目指します。

●超伝導量子ビットのジョセフソン分岐増幅による読み出し

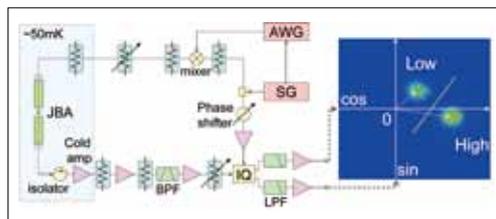
現在の情報処理が誤り検出訂正を用いているように、量子情報処理においても量子エラー訂正が必須になります。その時に必要となる技術が、量子非破壊測定と量子フィードバックです。超伝導磁束量子ビットの状態を読み出すための従来技術では、読み出しの際に発生する発熱で、読み出し後の量子状態が破壊されてしまいました。そこで、私たちは、低侵襲測定のためにジョセフソン分岐増幅器を開発し、読み出し後の量子状態を破壊しない測定(量子非破壊測定)に成功しました。この技術を用いて、量子ゼノ効果の観測やチップ上での量子フィードバックに成功しました。現在は、量子非破壊測定を複数回繰り返すことで、読み出しのVisibilityを向上する実験を進めています。

最後になりましたが、これらの研究は、NIIの仙場先生、根本先生、大阪大学の水落先生との共同研究を通して行われたもので、これからも様々な共同研究を通して量子情報処理分野の発展に貢献していきたいと考えております。

(齊藤 志郎)



超伝導・ダイヤモンド量子ハイブリッド系



ジョセフソン分岐増幅による読み出し

エッセイ

Essay

「数学の考究においては何より妨げられない時間が必要である。虚空に漂う精霊の影を捉えようとして頭が一杯になっているさなかに講義の時刻が来る。まるで違った世界へ心に向け変えねばならない。その苦しさは言語に絶する。しかし愚痴を並べるとは止めよう。この不愉快から逃れることは僕の身分が許さないのだから何とも仕方あるまい(1826年)。」これは最近、韓太舜氏(電気通信大学名誉教授)から教えてもらったガウスの愚痴である。

現代の研究者が置かれている状況はこんな甘いものではない。日々降ってくる書類仕事の山を締め切りに追われてこなすのは大変な作業である。作文に行き詰まりヒントを求めて文献検索していると、最近では相当古い論文も自席で簡単に入手できる。金字塔と言われる論文に始まり、それが如何にして生み出されたかをたどる検索は、あたかもタイムマシンで過去へ旅する気分である。どんな偉大な論文もゼロからビッグバンのように突如生まれたのではなく、必ず前駆となる複数の論文があり、それらをなぞり何かを付けくわえる形で生まれている。ちょっと救われた気分になる。

1948年のShannon理論の前には、1928年のNyquistやHartleyの論文がありShannon定理の萌芽となる対数関数による情報量の表現が示唆されている。Holevo情報量に代表される量子通信理論の源流も1950年代まで遡る。1950年、GaborはShannon理論を物理学の一分野として捉えるべきであるとして量子論との統合を試み、光子検出器があれば通信路容量は古典論より上がるだろうと示唆した。それを受けてGordonはShannon理論に量子的離散性を取り入れ拡張を試みる。彼はのちにHolevo情報量と呼ばれることになる表現を1964年に通信路容量の上界予想として発表した。当時、量子測定を定式化する理論は未完成で、Gordonは量子測定を頭に考慮することなくエントロピー最大化のみを頼りにShannon定理にPlank定数を入れ込んだ。彼は論文の脚注に困惑を記している。「量子系は測定によって信号状態が影響を受けるので通信路のモデル化は

自明ではなく、量子測定モデル化まで頭に考えない限り具体的システムに対する通信路容量を導いたとは言えないだろう。自分が導いた量はその上限値にすぎない」と。彼の上界予想がHolevo情報量として、線形損失通信路の真の通信路容量だと証明されるのは40年後のことである。

Gordonの脚注を前に我々は未来からの訪問者のようである。1970年代にはHolevoやStratonovichら旧ソ連の学者が量子一括測定という概念をGordon予想に持ち込み、上界が実は真の通信路容量だろうと証明を試みる。しかし当時はまだ成功しない。再び進展し始めるのは1990年代にアメリカのSchumacherらが典型的部分空間という概念を導入してからである。偉大な先駆者たちも、当時の知識を総動員しつつもクリアカットできない難問に悶々としながら不安を抱えていわば強制的に論文を脱稿していたことが伺える。しかし、金字塔の論文やそこで引用される論文は例外なくイントロが良い。物事の根幹に立ち戻って考え抜く丁寧な解説があつてわかりやすい。完全な解決を見なくても、優れた問題を提起して終わっている。

本務を逃避してそんな拾い読みを繰り返していると、ひとつの分野の歴史絵巻が出来上がることもある。そこから将来の方向性が見える(と錯覚する)瞬間さえある。量子情報の分野も世紀のスケールでみると始まったばかりである。華々しく進展したテーマもあれば予想外の壁が立ちだかっただけのテーマもある。予想外の壁こそ良い問題設定のチャンスである。今の知識と技術を総動員して何が限界かを徹底的に突き詰める。たとえ自分の世代でクリアカットできなくとも、良い問題を遠い未来へ提起できるよう試みたい。何が阻害要因かあぶり出し、そこに何か工夫を加えれば再び大きく進展することは歴史が教えるところである。それがいつできるかは神のみぞ知るで、必要な時間を個人も組織も耐えねばならない。だから研究環境を維持するための書類仕事はルーチンでこなすしかあるまい。それから逃れることは今の身分が許さないのだから。

佐々木 雅英 ((独) 情報通信研究機構)

古典を読む楽しみ

No.15 March 2014

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

R100
公益社団法人の認定を受けています