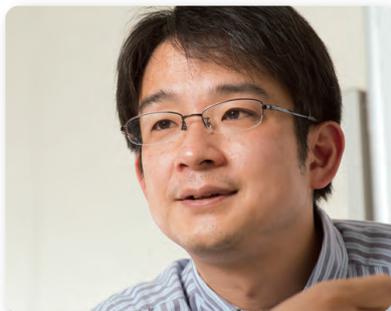


量子ニュース

CONTENTS

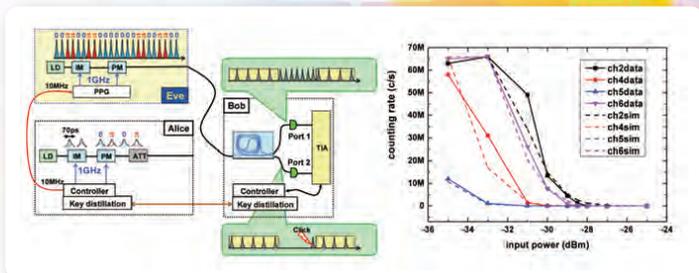
量子科学最前線

量子力学原理で暗号の安全性を測る



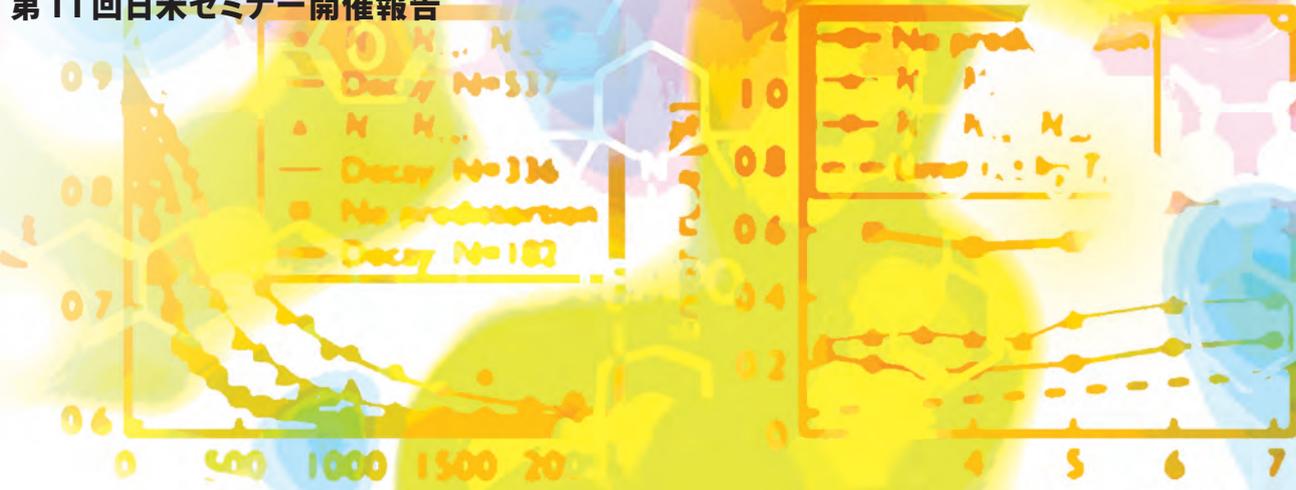
最近の研究成果

超伝導単一光子検出器の連続パルス入射時の応答特性の解析



海外研究動向 量子暗号のセキュリティ研究の動向

第11回日米セミナー開催報告



●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(NII／スタンフォード大学) ○山西 正道(浜松ホトニクス) 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(NEC／理化学研究所) 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(産業技術総合研究所) 日高 睦夫(産業技術総合研究所) フランコ ノリ(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)
ロドニー パン ミーター(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(産業技術総合研究所) 小山 泰弘(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(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)
佐々木 理恵子(スタンフォード大学/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)
塩田 容子(国立情報学研究所/山本研究室)
窪田 しおり(国立情報学研究所)
- 社会連携推進室 最先端研究開発支援チーム
係長 昨岡 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

■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」の研究体制の見直しについて

昨年9月に行われたFIRST中間評価における評価委員会からの勧告に基づき、プロジェクトの研究体制を以下のように変更しました。これまでの8サブテーマ体制から、光を中心とする光量子情報システムサブテーマ(リーダー：山本)、半導体・分子結晶を中心とするスピン量子コンピューターサブテーマ(リーダー：樽茶)、超伝導回路を中心とする超伝導量子コンピューターサブテーマ(リーダー：蔡)、原子を中心とする量子シミュレーションサブテーマ(リーダー：高橋)、更に従来からある量子通信サブテーマ(リーダー：井元)、量子標準サブテーマ(リーダー：香取)の6サブテーマ体制に変更しました。これにより、研究リソースの集約を図り、最終年度によりインパクトのある成果を挙げることを目指します。

● AWARD

- 2012年12月：Angewandte Author Profiles 森田 靖(大阪大学)
- 2013年 2月：井上研究奨励賞「弱い量子測定と量子パラドクスの観測」横田 一広(大阪大学)
- 2013年 3月：第53回東レ科学技術賞「光格子時計の発明と原子時計の超高精度化」香取 秀俊(東京大学)
- 2013年 3月：第1回(2012年秋季大会)日本物理学会 領域1学生プレゼンテーション賞「イッテルビウム原子の量子気体顕微鏡の開発1」柴田 康介(京都大学)
- 2013年 3月：第1回(2012年秋季大会)日本物理学会 領域1学生プレゼンテーション賞「低温動作ストロンチウム光格子時計」牛島 一郎(東京大学)
- 2013年 3月：日本物理学会 第18回論文賞「Improved frequency measurement of a one-dimensional optical lattice clock with a spin-polarized fermionic ⁸⁷Sr isotope」高本 将男(東京大学)、洪 鋒雷(産業技術総合研究所)、東 亮一(東京大学)、藤井 靖久(産業技術総合研究所)、今江 理人(産業技術総合研究所)、香取秀俊(東京大学)

量子暗号の セキュリティ研究の動向

東京大学 教授
小芦 雅斗



量子力学の性質をうまく利用して通信することで、盗聴者がどんな技術を駆使したとしても、大事な情報が漏れてしまう心配は事実上ありません、と言えるのが量子鍵配送 (QKD) の謳い文句であり、「無条件安全性」という言い回しもよく使われる。ただし、「無条件」というのはあくまでも盗聴者の戦略のことを指していて、送信者、受信者の装置については無条件という訳にはいかない。極端な話、出来上がった秘密鍵の値をこっそり無線で盗聴者に送る仕掛けが仕込まれていたら、明らかにダメである。送受信装置に対する仮定は当然緩いほどいいが、そうすると一般には鍵生成の効率が悪くなる。そのような訳で、装置は理論モデルどおりに動くとして高い鍵生成率を目指す方向から、効率を度外視するかわりに、送受信装置にどんな細工をされてもセキュアにしたいという偏執狂的な方向まで、多彩な研究が進められている。

実用重視の方向では、普及したレーザー光源を用い、シンプルな光学系を利用することで、高い繰り返しレートを安価に実現することを狙ったプロトコルがあり、日本で提案された DPS 方式と欧州からの COW 方式が有名である。いずれも位相がロックしたパルス列を用いるため、多数のパルスが絡み合ってセキュリティの証明が難しい。昨年、両方式についてようやく無条件安全性が証明されたが、まだ保証できる鍵生成率が低く、改善が望まれる。

現実的な送受信装置では、生成した光の状態が微妙にずれているとか、盗聴者がわざと多光子を検出装置に入れても判別できないなど、理想から外れていることが想定される。このような、技術的な限界から来る問題については、適切なモデルを用いてセキュリティを証明することで対処できる。この場合、理想からのずれは通常わずかであり、鍵生成率へのペナルティも小さい。ただ、モデルが複雑になれば解析も面倒で、BB84 や 6 状態方式などの基本的なプロトコルの解析が中心になっている。

一方、納入された送受信装置が盗聴者によって細工

されていたとか、意図しない形で装置の動作の痕跡が外に漏れていたなど、想定外の事態も含めてセキュリティを確保するため、装置の具体的なモデルに依らない議論を行う潮流もあり、Device-independent QKD と呼ばれている。実用との妥協点として、外から意図しない介入を受けやすい検出器側を Device-independent にして、光源は信頼するという枠組みなら、鍵生成率はそれほど低下しない。BB84 では、検出効率が基底に依存しないことだけ保証されれば、鍵生成率は理想的な場合と変わらないことがわかっている。また、量子もつれ対を送受信者に配る方式を逆転させた方式が Loらによって提案されており、この場合は検出器が盗聴者の支配下にあると考えても安全になる。

送受信者ともに Device-independent にすると、話は全く変わってくる。ベルの不等式の破れの議論を思い出すと、隠れた変数で測定結果が説明できてしまったら、盗聴者は原理的に全ての測定結果を把握していると考えなければならない。逆に、ベルの不等式が破れているなら、盗聴者が把握しきれていない相関が送受信者の測定結果に含まれるので、そこから秘密鍵を作る余地が生じる。最近までは、一回一回の測定が独立な装置によって為される、という「個別攻撃」的な仮定を置くのが一般的であったが、昨年からこの条件が緩和されつつあり、通常のように同じ装置で何度も測定する場合の証明が進んでいる。なお、ベルの不等式の破れの検証における loophole が閉じていなければ、それはそのまま盗聴の可能性に結びつく。そのような訳で、Device-independent な QKD の実現にはもう一段階の技術の進歩が必要である。例えば、効率は悪くてもいいから量子状態を壊さずに光子の到着を検知し、検出効率の高い物質の qubit に移す技術が有用なのだが、これは量子中継にも関連するので、実験として面白いターゲットのひとつと言えるだろう。

断熱的手法による多粒子 Dicke 状態の生成

論文情報 Atsushi Noguchi, Kenji Toyoda, and Shinji Urabe, "Generation of Dicke States with Phonon-mediated Multilevel Stimulated Raman Adiabatic Passage", *Physical Review Letters* 109, 260502(2012)

大阪大学
占部 伸二

関連URL <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.109.260502>

多数個の量子ビットのエンタングルド状態は、量子情報処理において大きなリソースであるが、デコヒーレンスなどの影響により個数が増えるにつれて生成は難しく、ノイズに強い適切な生成方法が必要となる。イオントラップの実験では、GHZ 状態については Mølmer-Sørensen 法という優れた手法を用いて 14 個の生成が報告されている。一方、別のエンタングルド状態である Dicke 状態に関しては、忠実度が高く多数個に拡張できる良い方法がこれまでなかった。特に、半数励起の Dicke 状態はスピンスクイズド状態であり、高分解能分光や計測への応用にも注目されているにもかかわらず、実際に発生することは困難で、2 個以上の発生例はなかった。今回、我々は多数個への拡張可能な半数励起の Dicke 状態の生成方法を提案し、発生に成功した。今回提案した方法は、イオンに照射するレッド及びブルーサイドバンドのレーザーパルスを、誘導ラマン断熱通過 (STIRAP) におけるストークス及びポンプパルスとしてそれぞれ働かせるものである。この操作は振動準位を仲介にした多準位縮退の STIRAP プロセスと見なすことができる。このプロセスでは、振動状態まで冷却されたイオンは断熱的に暗状態を保って変化し、中間地点で半数励起の Dicke 状態が生成される。実験では 4 個のイオンを用いて、生成された状態についてウィットネス演算子を使って評価したところ、

Dicke 状態の生成が確認された。さらに、グローバルな測定のみから忠実度を評価したところ、下限と上限として、それぞれ 0.84 および 0.88 という高い値が得られた。この方法は、集団的なアドレスによってシンプルに操作できること、断熱的な過程を用いているため、実験パラメーターの変動に強いなどの特徴がある。AC シュタルクシフトによる誤差要因等を制御することによりさらに多数個の Dicke 状態の生成が期待できる。

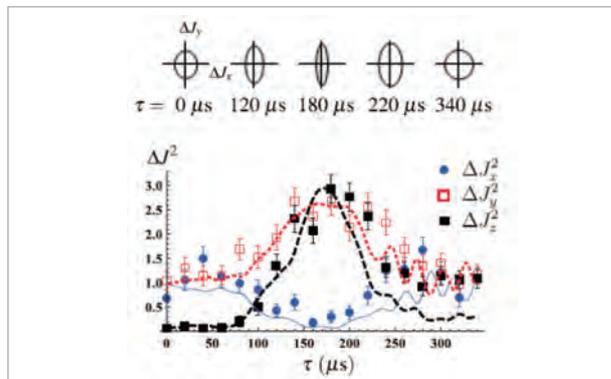


図 多準位 STIRAP プロセスにおける 4 イオンのスピンノイズの時間発展の様子。170 μs あたりで擬スピンの x 方向に最も大きくスクズされ、半数励起の Dicke 状態が生成されていることが分かる。

3 重量子ドット中の電子スピンの初期化に成功

論文情報 S. Amaha, W. Izumida, T. Hatano, S. Teraoka, S. Tarucha, J. A. Gupta, and D. G. Austing, "Two- and Three-Electron Pauli Spin Blockade in Series-Coupled Triple Quantum Dots", *Phys. Rev. Lett.* 110, 016803 (2013)

東京大学
樽茶 清悟

関連URL <http://prl.aps.org/abstract/PRL/v110/i1/e016803>

量子ドット中の電子スピンを量子ビットとする量子計算を実装するために必要となる技術として、我々は、量子ドットを多く結合させることを試みています。今回、我々は、2・3 量子ビットの初期化に利用できる方法として、3 重量子ドットでの 2 電子・3 電子のスピンの電気閉塞を実現しました。

実験では、3 つの量子井戸をもつ半導体基板を加工し、直列 3 重縦型量子ドットを作製しました (図 1)。極低温で測定した電気伝導特性を解析し、(1) 1 つの量子ドットを仮想的にトンネルする 2 電子の電気伝導 [図 2 (a)], (2) 3 つの量子ドットを連続的にトンネルする 3 電子の電気伝導 [図 2 (b)] が生じる領域を同定しました。(1) では、2 電子スピンの初期化に相当する電流閉塞が観測されました [図 2 (c)]。実験では、電流閉塞に電子・正孔対称性が破れるという特徴が見られ、仮想的なトンネル過程を考慮することで、理論的な数値計算でも、再現することができました。一方、(2) では、3 つのスピンの揃った 3 電子の初期化によって、電流閉塞が生じるものと期待できます [図 2 (b)]。今回、我々

は、2 つのスピンの揃い、かつ、1 個のスピンの追加される条件において、有限磁場下で 3 つの電子スピンの初期化に相当する電流閉塞を確認しました [図 2 (c), (d)]。これらの知見は、多重結合量子ドットを用いて多数のスピンの量子ビットを構成した際の初期化に有用な原理を提供するものです。

本研究は、理化学研究所・東北大学・JST・カナダ NRC との共同研究として行われ、*Phys. Rev. Lett.* 110, 016803 (2013) に掲載されました。

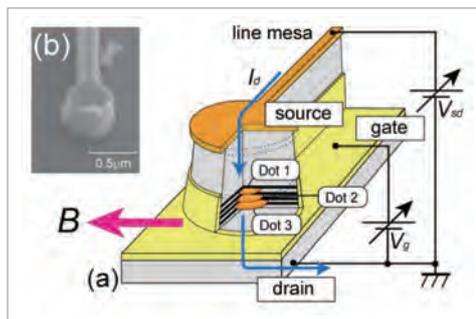


図 1 (a) 直列 3 重量子ドット模式図。(b) ゲート蒸着前の試料の SEM 写真

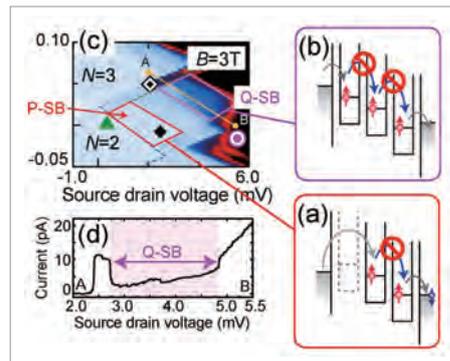


図 2 直列 3 重量子ドット中の (a) は 2 電子、(b) は 3 電子のスピンの閉塞となる場合の電気伝導の模式図。(c) 磁場が 3T の場合のクーロンダイヤモンド。P-SB と書かれた領域では、(a) の過程によって、2 電子のスピンの閉塞が生じ、Q-SB と書かれた領域では、(b) の過程によって、3 電子のスピンの閉塞 (d) が生じている。

3 超伝導量子ビットのゲート忠実度改善方法

論文情報 S. Gustavsson, O. Zwiernik, J. Bylander, F. Yan, F. Yoshihara, Y. Nakamura, T. P. Orlando, and W. D. Oliver, "Improving quantum gate fidelities by using a qubit to measure microwave pulse distortions", Phys. Rev. Lett. 110, 040502-1-5 (2013).

関連URL <http://prl.aps.org/abstract/PRL/v110/i4/e040502>

東京大学/理化学研究所
中村 泰信

超伝導量子回路における量子ビットのデコヒーレンス時間は近年飛躍的な増大を示している。初期の実験におけるナノ秒オーダーに始まり、最近まで専らマイクロ秒程度だった値が、この2~3年で一気に100マイクロ秒超へと改善された。超伝導電極の表面あるいは基板との界面における欠陥に起因する誘電損失がデコヒーレンスの主要因のひとつであるという状況証拠が積み重なり、その問題を解決する努力が材料・プロセスや設計の面からなされてきたことがこの進展につながっている。

素子に起因するデコヒーレンスが改善してきたことにより、量子状態制御における制御パルスの不完全性によるゲート忠実度の限界がクローズアップされるようになってきている。今回の実験では、超伝導磁束量子ビットの制御において、マイクロ波パルスが室温環境に置かれた制御用エレクトロニクスから伝送線路を通して冷凍機中の素子に到達するまでに受ける歪の影響を、量子ビット自身を検出器として用いることにより調べた。パルスを繰り返し印加した際に増幅される制御の不正確さを、量子ビットの終状態確率分布を測定することで検出し、その結果をもとにして、忠実度を最適化すべくパルス波形に歪補正を加えた。さらに補正の効果を調べるために、ランダムな順番と回転軸で印加される多数の π パルス・ $\pi/2$ パルスからなるパルス列を印加した際のク

ヒーレンスの低下を観測するRandomized benchmarkingと呼ばれる手法を用いて平均ゲート忠実度を評価した。その結果、パルス歪補正をかけない場合に比べてゲート忠実度が大きく改善し、99.8%にまで到達することを示した。この成果は、今後の研究において、量子制御の忠実度向上のために回路実装技術への配慮や制御パルスの歪補正が不可欠になってくることを示すと同時に、それに向けた対処方法を実証したものである。

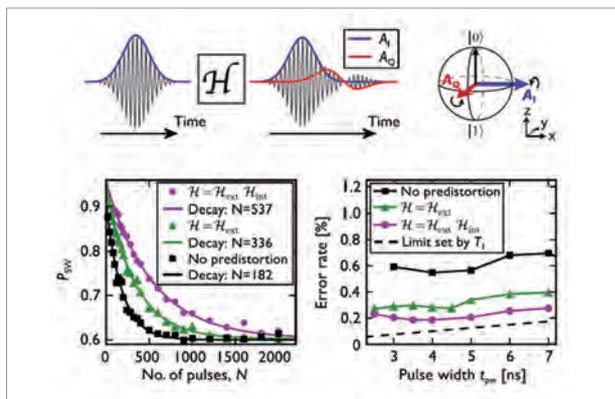


図 超伝導量子ビット制御用マイクロ波パルス歪の模式図(上段)とゲート忠実度の評価結果(下段)

4 超伝導単一光子検出器の連続パルス入射時の応答特性の解析

論文情報 Mikio Fujiwara, Toshimori Honjo, Kaoru Shimizu, Kiyoshi Tamaki, and Masahide Sasaki, "Characteristics of superconducting single photon detector in DPS-QKD system under bright illumination blinding attack," Optics Express 21, 6304-6312 (2013)

関連URL <http://www.opticsinfobase.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-21-5-6304&origin=search>

情報通信研究機構
藤原 幹生

量子通信の光受信機を構成する光検出器として有望な超伝導単一光子検出器は通信波長帯の光子に対しても高感度、低タイミングジッタ、低暗計数などが特徴であり、量子鍵配送等にも応用されている。超伝導薄膜 (<4nm) を100nm程度のライン&スペースのメアンダー状に成型し、臨界電流の90%程度の電流バイアスを印加した状態で光子が超伝導体に吸収されるとナノ細線を横切るように常伝導転移が起こる。この常伝導転移時に発生する電圧を計測することにより光子の到来を知ることができる。現在の超伝導単一光子検出器の問題点の一つとして超伝導体自身が持つ大きいインダクタンス成分による高速繰り返しパルスに対する検出感度の劣化が挙げられる。近年量子鍵配送では光子検出器の不完全性をついた攻撃が提案・デモされており、NTT-NICTのDPSQKDシステムに対してより微弱な光を用いた攻撃と其の対策を我々自身の手により実証している。更に本論文では窒化ニオブ超伝導単一光子検出器のパル

ス列に対する感度特性を与える式を導出、超伝導体の物性値とdiscriminatorの特性を考慮してパルス列に対する感度を見積り、1GHzの多光子パルス列実験結果と比較した。導出した式は実際の光検出器の挙動と良い一致を得た。この式を用いることによりQKDシステムに対する攻撃・対策方法検討の他、検出器性能の時間依存性考慮した量子受信機の構成・検出戦略を考案することが可能となり、符号設計と合わせて量子通信システムの実現に生かす予定である。

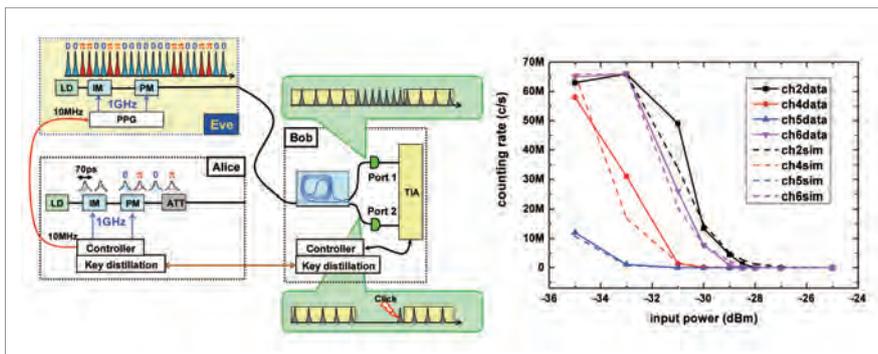


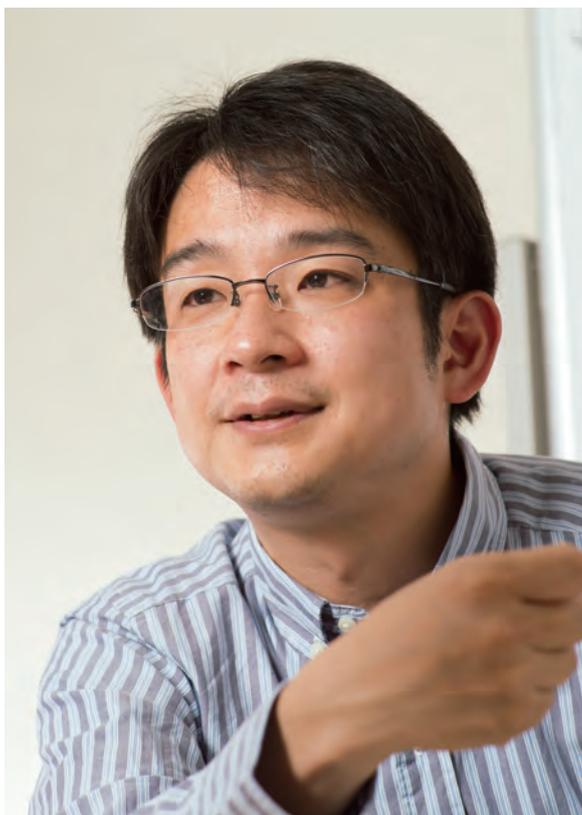
図 DPS-QKD装置への明光攻撃の概念図(左)および超伝導単一光子検出器のパルス列に対する応答の実験・シミュレーション結果(右)



量子力学原理で 暗号の安全性を 測る

あらゆる攻撃を織り込んで
量子暗号の真の実力を判定

小芦雅斗



(こあし・まさと) 東京大学光量子科学研究センター教授

1969年埼玉県生まれ。1992年東京大学物理学科卒業、95年に同博士課程終了、博士号(理学)取得。NTT基礎研究所研究員をへて99年総合研究大学院大学助教授、2004年大阪大学准教授。2011年から現職。

「絶対破られない暗号」。量子暗号のキャッチフレーズだ。現在の暗号は解法は存在するが、計算に膨大な時間がかかり現実には実行できないという物理的制約によって安全を保証する。一方量子暗号は、物体の量子的な状態を痕跡を残さずに測定することはできないという物理法則によって安全を担保する。今の暗号は将来新たな解法が発見されれば解読されるが、量子暗号は量子力学が崩れない限り破れない。

だが現実にはそれほど単純ではな

い。どんなシステムにもエラーがある。情報を記録した光子が伝送中に失われたり、送受信器が誤動作したりし、その不備を突いて情報を盗まれることはあり得る。東京大学の小芦雅斗教授は、そうした現実の量子暗号の実力を評価する研究で、世界の先頭を走る。

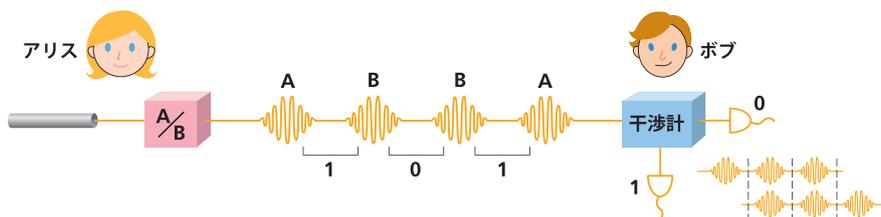
日本で開発された暗号

暗号通信のゴールは、発信者(業界ではアリスと呼ぶ)から受信者(ボ

ブと呼ぶ)に暗号の鍵となる秘密のビット列を送ることだ。2人が同じ鍵を共有すれば、それを使って、鍵と同じ長さのメッセージを完璧に暗号化できる。

2002年、NTTの井上恭氏(現大阪大学教授)が新しいプロトコルを見いだして注目を集めた。この「差動位相シフト(DPS)量子鍵配送」は、隣り合う光パルスの位相(波の形)の差によって情報を伝える。アリスは光パルスを発生し、その位相をAかBかに切り替えながらボブに送る。ボブは受け取ったパルスを直後のパルスと干渉させ、干渉パターンから位相差を読み取る。

ここまでは通常の光通信と同じだが、量子暗号では使っている光を弱め、1パルスあたりの光子数を例えば0.1個程度に減らす。それでも干渉は



日本で開発された量子暗号 アリスは光パルスの位相を切り替えながらボブに送り、ボブは受け取ったパルスを直後のパルスと干渉させて位相差を測る。位相が同じなら情報は「0」、逆なら「1」だ。

同じように成立し、情報を送ることができる。だが光子レベルに弱めたパルスは、盗聴者(イブと呼ぶ)が位相を読み取ると、その痕跡がはっきり残る。このため干渉が不完全になり、盗聴がわかる。

個々の光子に情報を乗せて情報を送る従来のプロトコルでは、送信機のエラーでたまたま光子が2個同時に出てしまうと、イブがその片方を盗んで情報を読み出すことができるという問題があった。DPS法ではこの方法では盗聴しにくく、安全性が高いと期待された。

ただし情報の一部がイブに漏れても、すぐに秘密が漏れるわけではない。「秘匿性増幅」と呼ばれる数学的な手法で、残ったビット列から安全な鍵を抽出できるからだ。光子の一部はもともと伝送途中で失われる。なくなった理由を調べることはできないので、すべてイブに盗まれたと仮定し、増幅によって安全鍵を生成する。量子暗号の安全性は、届いたビットからどれくらいの長さの安全鍵が生成できるかで評価する。

小芦教授は独自に開発した手法を用いて、DPS法は通信距離を伸ばしても安全鍵の生成スピードが比較的落ちず、安全性が劣化しにくいことを明らかにした。量子暗号では通信距離が長くなるほど失われる光子が増えて安全鍵の生成速度が落ちるが、DPS法はその落ち方がゆっくりなのだ。

相補性を使った証明

小芦教授の安全性評価法は、具体的な盗聴の手段に依らない点に強みがある。盗聴には様々な手段があり、イブが新たな手段を密かに開発している可能性もある。どんな手段で攻撃されても安全な鍵の生成速度を突き止めることができれば、それが暗

号の実力だ。

小芦教授が目にしたのは量子力学の根本的な性質のひとつ、物理量の「相補性」だ。量子力学によれば、物体にはしばしば同時に測定することができない相補的な性質がある。例えば光は波と粒子の両方の性質を持つが、波の性質を測定すると粒子の性質は見え、粒子として検出すると波の性質が見えなくなる。光子の波の形である位相と光子の数は、相補的な物理量だ。

今、仮にアリスからボブにDPS法と同じ微弱なパルスを送り、アリスに「ボブはいつ光子入りのパルスを受け取ったと思うか」と聞いてみよう。アリスとボブはどんな量子的な操作や測定をしてもよいし、結果を相手に連絡してよい。盗聴やエラーがゼロならば、アリスは100%正確に当てることができる。しかし現実には盗聴や通信エラーがあるので、一定の確率で間違える。小芦教授はアリスの間違い率から、もとのDPS法の安全性を計算できることを示した。

なぜそんなことが可能なのか。ここで問うたのは「伝送した個々のパルスについて、位相と相補的な関係にある光子数がわかるか」という問題だ。パルスは装置のエラーや盗聴によって乱されるが、そこから光子数を推定できるなら、光子数と相補的な関係にある位相は誰にも読めない。この関係があるために、アリスの間違い確率からイブに漏れ得る情報量を計算することができるのである。

小芦教授の方法は、いわば量子暗号のプロトコルを相補的な物理量を送る別の実験に書き換え、そこから暗号鍵を抽出できるかどうかを見積

もるものだ。それは実用面だけでなく、量子力学を理解するための強力なツールになっている。量子力学では、その人が観測する対象について何を知っているかによって対象の物理的な状態が変わるといふ奇妙な現象が起きる。持っている情報が異なるアリス、ボブ、イブの3者が絡み合う量子暗号は、こうした常識外れの現象に情報の側面から光を当てる。アリスとボブの連絡手段を古典通信に制限したら何が起こるか。違いはどこからくるのか。そうした点を調べることで、量子の本質が見えてくる。

量子暗号研究の面白さを問うと、



小芦教授は「量子力学の基本的なところを扱いながら、最終的には常に数字で答えることを求められる点ですね」と答えた。量子力学の基本問題はアインシュタインをはじめ多くの物理学者たちの関心をかきたててきたが、とかく観念論に陥りがちな面がある。量子暗号は量子力学の基礎に直接にかかわると同時に産業技術でもあり、答えは定量的に詰める必要がある。「そうした制約がかかるのが面白い」という。すでに選挙データ送信などへの応用が始まった量子暗号だが、基礎と応用の両面で、まだまだ根本的な進展がありそうだ。

この記事は『日経サイエンス』2013年7月号に掲載されたものです。

第11回日米セミナー開催報告

The 11th US-Japan Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy “Ultimate Quantum Systems of Light and Matter-Control and Applications”

日程：平成25年4月4日(木)～12日(金)

会場：奈良県新公会堂

主催：国立情報学研究所 FIRST「量子情報処理プロジェクト」

共催：Center for Ultra Cold Atom (CUA)

オーガナイザー：高橋 義朗教授 (京都大学)

Vladan Vuletic 教授 (マサチューセッツ工科大学)

参加者数：99名

第11回日米セミナー： 日本側オーガナイザーからの報告

オーガナイザー (日本)：
京都大学 高橋 義朗

量子エレクトロニクスおよびレーザー分光に関する第11回の日米セミナーが本年4月に奈良新公会堂で開催された。日本側のオーガナイザーは高橋義朗(京大)が務め、アメリカ側のオーガナイザーを、Vladan Vuletic氏(MIT)が務めた。特に今回は、前半の4月4日から7日までの4日間、スクールが行われ、後半の4月9日から12日まではセミナーが行われた。また、これまでの日米セミナーでは、日本学術振興会およびNSFからの財政的サポートを受けてきたが、今回は、FIRSTプロジェクトから財政面および事務的なサポートを頂いた。また、MIT-HarvardのCUA (Center for Ultracold Atoms) によるサポートも頂き運営を行うことができた。

この日米セミナーは、1977年に始まり、通常、3年～4年ごとに日本および米国において開催されてきた伝統あるセミナーである。日本と米国だけでなく、欧州からも数名参加し、最新の研究成果に関するホットな議論が交わされてきた。常連の参加者の中から、多くのノーベル物理学賞受賞者が輩出している。

今回は、中心テーマを、Ultimate Quantum Systems of Light and Matter-Control and Applications に設定し、セミナーでの招待講演者は、日本から18名、米国から11名、欧州から3名、という構成であった。講演のトピックスは広く、光(単一光子、連続量、など)、原子、固体(量子ドット、NVセンター、超伝導など)を用いた量子情報処

理から、量子気体を用いた量子シミュレーション、精密測定(光格子時計、反水素分光、電気双極子モーメント探索、など)、さらに、全く新しい提案(イジングマシン)など、これらについて非常に活発な議論が行われた。

スクールにおいても、14の講義(日本側8人、米国4人、欧州2人)が行われ、FIRSTプロジェクトのテーマだけでなく、リドベルグ原子や、冷却分子、またオプトメカニクスなど、新しいトピックスに関する丁寧な講義が行われた。ポスター発表もスクールおよびセミナーで行われ、設定した時間を超えて活発な議論が行われた。スクールには、各研究機関からの優秀な若手研究者が、50名弱参加し、大変有意義なものであった。特に、若手の参加者から活発に質問があったことは大変頼もしい限りであった。これは、FIRSTプロジェクトにおいてこれまで沖縄で行ってきたサマースクールの成果と言えるであろう。米国から参加された講師も「interactiveですばらしい」と感心していた。

日米セミナーの次回のオーガナイザーを、香取秀俊氏(東大)、Mark Saffman氏(Wisconsin)およびCheng Chin氏(Chicago)と決め、満場一致で承認された。

今回の日米セミナーは、大島ルミさんをはじめとするNII事務スタッフ、京都大学の寺川公美子さん、中島秀太氏をはじめとする人たちの協力を得て初めて可能になった。この場をお借りして感謝したい。



Report on the Japan-US seminar in Nara, April 9 -12, 2013

オーガナイザー(米国):
マサチューセッツ工科大学 Vladan Vuletic

The 11th Japan-US Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy entitled “Ultimate Quantum Systems of Light and Matter - Control and Applications” was held in Nara from April 9 through April 12, 2013. The event featured 32 prominent speakers of whom 18 were Japanese researchers, 11 were US researchers, and 3 were well-recognized guest speakers and leaders in their fields from outside the two organizing countries. The Seminar was preceded by a School predominantly for select Japanese students and postdocs, where some of the seminar speakers held longer didactic lectures to prepare the students better for the topics of the Seminar. The School lasted for four days from April 4 through April 7, and more than 40 students participated in it. The Seminar and School were primarily supported by the FIRST project “Quantum Information Processing (QIP)”, with a contribution from the Center of Ultracold Atoms funded by the US National Science Foundation.

The topics of the Seminar ranged from quantum information processing using atoms or solids to quantum simulation. The talks were 30 minutes in duration, with 5 minutes reserved for questions. All talks

were followed by lively discussions and exchange of ideas that continued into the breaks, and beyond. It is likely that several future Japan-US collaborations will arise from the presentations and discussions, especially since quantum information science is a scientific strength of both Japan and the United States. The informal feedback from the speakers as well as the students on the presentations and the Seminar as a whole was very positive, and there is great enthusiasm among the participants to continue this type of focused meetings with select participants in the future. Profs. Hidetoshi Katori on the Japanese side and Mark Saffman and Cheng Chin on the US side have already agreed to serve as the Chairs of the next meeting, to be held in two or three years’ time in the United States in a location to be determined. Informal feedback from the students also indicated great satisfaction with the topics and quality of the presentations in the Student School. The Japanese Chair, Prof. Yoshiro Takahashi, was greatly credited for a smooth and efficient organization of the Seminar that significantly contributed to its success.



第11回日米セミナーオーガナイザーのVladan Vuletic先生(マサチューセッツ工科大学)と高橋 義朗先生(京都大学)

“量子エレクトロニクスとレーザー分光”の35年

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

日米セミナーは1970年代半ば頃、日本の学術振興会 (JSPS) と米国の NSF (National Science Foundation) の間の協定によってできた研究集会です。日米一人ずつの chair がアレンジし、双方6名ずつの一流研究者がその時々の科学上の重要課題について議論する、という構図でした。レーザー関係では故宅間宏先生らのご努力によって1977年に量子エレクトロニクスとレーザー分光のセミナーが箱根で開催されることになりました。日米セミナーは特定の研究分野に与えられた継続的な会議ではなく、毎回異なった主題で開かれる趣旨でしたが、この量子エレクトロニクスに関するセミナーでは常に次回の chair をセミナー中に選出し、彼らが新しい話題を立案して応募することでここ30年間、2ないし3年おきに開催することに成功してきました。毎年採択されるセミナーの数は3-5件ですから、これは大成功でしょう。継続できたのは立案や計画性のよさもあるでしょうが、なによりも量子エレクトロニクスの基礎分野が科学の発展に大きな貢献してきたことが認められてきたことによると思います。ちなみに、量子エレクトロニクス関係で20名近いノーベル物理学賞受賞者がでていますが、その大部分がこのセミナーに参加しています。しかも、箱根セミナーに参加した C.H. Townes を除いて、すべて受賞前のセミナーの出席者です。

シリーズ会議ではないので、記憶が消えてしまわないように開催地を書いておくと、箱根 (1977年)、Kauai 島 (Hawaii)、奈良、Monterey (California)、比叡山、Napa Valley (California)、草津温泉、Newport (Rhode Island)、ハケ岳高原、Breckenridge (Colorado 2006年) と続き、今回再び奈良で開催

されました。

1970年代は世界第二の経済大国となった日本が大発展した時期ですが、量子エレクトロニクス分野では米国が圧倒的な力を持っていた時代です。国外で開催される会議に出席することが経済的にも容易でなかった日本の研究者にとって、少人数で緻密な議論ができる日米セミナーのような会議ができたことはよい刺激になったと思います。ただ、参加人数が極端に制限されていたのは残念です。当時は、米国で開催されるときには旅費を再分割したり、日本開催の際には会議場にいた人数が報告書よりかなり多かったりと、より有用なセミナーにするための工夫がなされていました。

1980年代以降、状況は大きく変わってきました。日本の科学研究費が定常的に増え続け、また使途に関する規制が少なくなったおかげで、少人数で特定の話題を議論する国際研究集会がより容易に開催できるようになってきました。特定の資金源に頼らず開催できることはより大きな自由度が保証されることです。今回の FIRST-CUA の資金で運営されたセミナーは過去の日米セミナーとはかなり異なっています。参加者数はこれまでの2倍以上の百名近くに上り、多数の学生、若手研究者が参加しました。併設して school が開催されたのも、ポスターセッションがあったのも初めての試みです。次回は、例えば、第三国からの招待者をずっと増やすのはどうでしょう？

研究者の行動は、まず、自らの価値判断に基づいた構想があって、次に、それを実現するための手段を探すのが正しいのではないのでしょうか。次回 co-chairs の創造的な運営に期待します。



本プロジェクトアドバイザー清水 富士夫先生 (電気通信大学) と藪崎 努先生 (京都大学)

参加者 感想

日米セミナーに参加して

(独) 産業技術総合研究所波長標準研究室 主任研究員
赤松 大輔

奈良で開催された第11回日米セミナーに参加させて頂き、大変有意義な一週間を過ごさせて頂きましたのでご報告したいと思います。

私は、web上でinvited speakersのlistを見てすぐにセミナーの参加登録をしました。listには大御所から中堅、若手とバランス良く混ぜ込まれており、極上のセミナーである事は明らかでした。果たして、talkでは、現在のhot topicからこの先hotになるであろうtopicが次々と紹介され、毎日わくわくした気分で過ごす事が出来ました。Lukin先生のnarrow fiberとNV centerを用いたsensingに関する実験の紹介は、この分野の更なる発展の可能性を感じました。また、沙川先生がご自身の見出された熱力学と量子力学の関係式を大変わかりやすく説明されていたのはとても印象的でした。

また、個人的な事になりますが、山本先生とランチをご一緒させて頂きながらコーヒーレントコンピュータの展望に関して活発に議論が出来た事は、一日をさらに充実したものにさせてくれました。

その他にも、休憩時間やポスター発表の時間などにおいて、同年代の研究者の人たちと分野の垣根を越えて議論することで、talkの理解をさらに深める事が出来ました。また、参加者の多くは奈良駅近くに宿泊しており、夕食をともにしながら議論を続ける事が出来た事も良かったと思います。

最後になりますが、このような素晴らしいセミナーを企画して頂いた先生方や事務の方々から心から感謝したいと思います。



参加者 感想

日米セミナーでの経験

東京大学 中村・宇佐見研究室 博士課程
増山 雄太

桜の咲く古都・奈良で第11回日米セミナーは行われました。日米セミナーは約3年に一度開催され、第一回から数えて30年以上の伝統があるイベントです。9日間にわたるFIRSTのスクール及び日米セミナーに、米国、日本を中心として世界中の優れた研究者の方々が集結し講義して下さいました。

私にとっては、海外の研究者の方の研究内容をじっくりと伺える初めての機会でした。様々な質問に対して丁寧に分かりやすく答えて下さる先生方に感激し、発表される輝かしい研究成果の数々に驚愕し鳥肌がたつたときまでありました。

また、普段の食事や自由時間を第一線で活躍されている研究者の方々や同世代の日米の学生と過ごせたことも、私にとって大切な経験となりました。Imamoglu先生と居酒屋へ行き、Oliver先生と冗談を言い合い、Stamper-Kurn先生に今回の研究成果までの経緯を伺いと様々な機会に多くの方々と話すことができました。普段、論文でしか拝見できなかった方々と直接話すことができ、人柄や研究に対しての姿勢、生活スタイルなどを伺い知ることができました。斬新な成果を出し続ける天才的な方々が、試行錯誤と論

理的な積み重ねという研究の基本とも感じられることを特に強調していたのは印象的でした。次々に出てくる周囲の研究成果が輝かしく、自分の研究の方向性が周囲に流されることもありましたが、研究の現状をしっかりと見つけ1つずつ新しい知見を積み重ねていこうと感じました。

このような素晴らしいセミナーが日本で開催されたお陰で、上記の貴重な経験ができました。運営に関わって下さった皆様に深い感謝を述べ、本報告を終わらせていただきます。



Yap Yung Szenさん(大阪大学)と筆者

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、「量子標準」の研究活動について解説します。

次世代時間標準をにらむ 光格子時計の展開

高精度な原子時計は、地球規模での高速大容量通信やGPS衛星搭載によるナビゲーションシステムの構築など、グローバル化した現代社会を支える基盤技術となり、その精度向上はますます重要になっています。本サブテーマでは、従来のセシウム原子時計をはるかに凌駕する精度をもつ「光格子時計」の実現を目指しています。このような時計の基準信号を、精度を損なわずに遠隔地に伝送する超高精度周波数配信技術を開発し、将来の秒の再定義に貢献する基礎データを集積するとともに、重力による相対論的な時間遅れを利用する「相対論的測地学」の開拓や、異種原子時計の高精度比較による物理定数の恒常性の検証など基礎物理学への応用も視野に入れて研究を進めています。光格子時計の開発では、各チームにおいて、異種原子種を用いた光格子時計の開発とその高精度化を進めています。また、周波数配信技術の開発では、後述のさまざまな手法を駆使して、それらの原子時計の周波数比較を行っています。

光格子時計に用いる原子種の選択

光格子時計では、原子を「魔法波長」と呼ばれる波長のレーザー光で生成する光格子ポテンシャルの中に閉じ込めることで、運動によるドップラー効果を低減し、高精度な遷移周波

数の計測を実現します。「魔法波長」のアイデアは、「レーザー波長」という1つのパラメータだけで光格子ポテンシャルを制御することにより、それが原子の遷移周波数に及ぼす摂動を 10^{-18} の不確かさで制御することです。この手法は、全軌道角運動量がゼロである2つ以上の電子状態をもち、これらの電子状態間を時計遷移として使用可能な原子種に実装することができます。具体的にはII族、IIb族を始めとするアルカリ土類様原子に適用でき、これまでに、ストロンチウム(Sr)、イッテルビウム(Yb)、水銀原子(Hg)を用いた光格子時計が開発されています。

ストロンチウム原子を用いた光格子時計は、2001年の提案以来、研究が先行し、現在では世界で10ヶ所の研究機関で研究が進められています。2003年に東大で光格子中での時計遷移分光、魔法波長の測定が初めて行われ、2006年には、

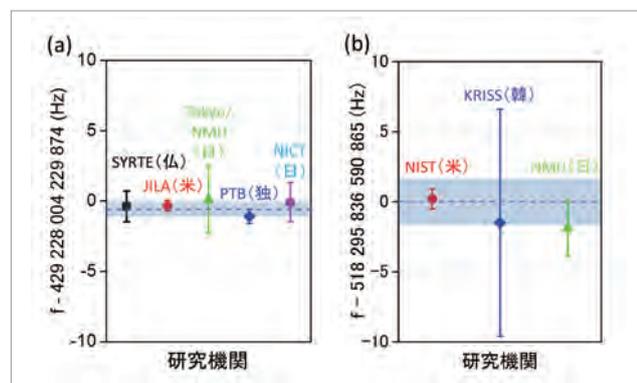


図1 (a) 世界の5グループでの ^{87}Sr 時計遷移絶対周波数の測定結果。(b) 米国NIST、韓国KRISs、及び産総研の ^{171}Yb 時計遷移絶対周波数の測定結果。点線は、表1に示された2012年国際度量衡委員会で決められた新しい秒の定義で採用された中心値と不確かさ

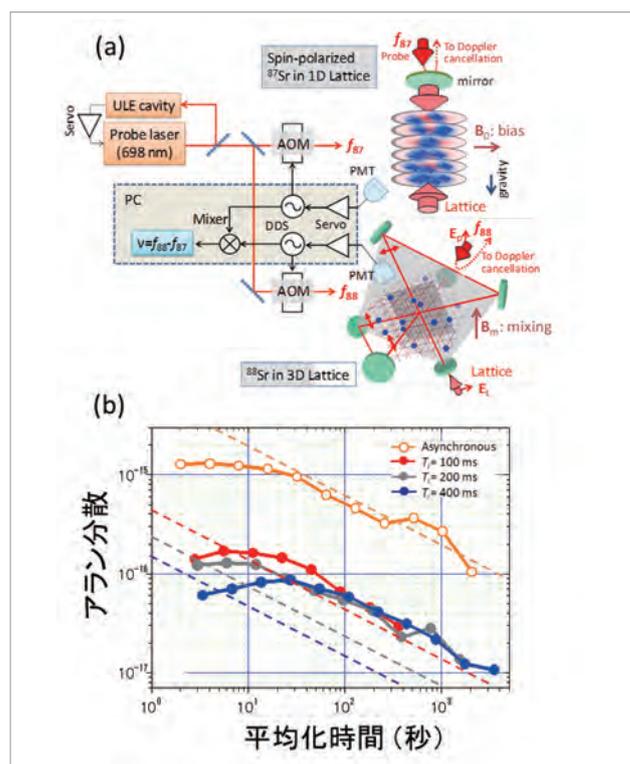


図2 (a) 2台の光格子時計の周波数比較により (b) 2,000秒の平均時間で17桁の周波数比較を実現した。



東京大学

香取 秀俊

量子エレクトロニクス・量子計測、光格子時計の高精度化と応用



産業技術総合研究所

洪 鋒雷

量子エレクトロニクス・レーザー分光と光周波数標準



情報通信研究機構

小山 泰弘

計量標準(時間・周波数)、宇宙測地、電波科学

東大-産総研(日)、JILA(米)、SYRTE(仏標準研)の3グループの周波数計測値が精度 7.5×10^{-15} で一致し、「秒の二次表現」に採択されました。世界の研究機関のSr光格子時計の周波数測定結果を図1(a)に示します。現在、この周波数計測精度はセシウム原子時計の精度だけで制限されています。このため、近年の研究は、複数台の光格子時計間の周波数比較による評価へと移行しつつあります。2011年には、レーザー光源の周波数ノイズを相殺する周波数比較実験を行い、光格子時計の量子ノイズ限界での周波数測定に成功し、17桁の周波数比較が実現しました(図2)。

産総研グループでは、光ファイバー周波数コムを中心とした独自の光源開発やシステム設計を行い、イッテルビウム光格子時計の開発に取り組んできました。2009年にイッテルビウム光格子時計の開発に成功して以来、レーザー光源や原子に対する量子操作などの改良を続け、2012年の研究で測定されたイッテルビウムの周波数の値は、518,295,836,590,863.1 Hzで、不確かさが2.0Hz(相対不確かさ 3.9×10^{-15})となりました。この不確かさは、測定に用いた周波数基準である現在の原子時計の精度で制限されています。図1(b)に、 ^{171}Yb 時計遷移絶対周波数の最新測定結果を示します。測定結果が不確かさの範囲内で一致しており、イッテルビウム光格子時計の有効性を示しています。

また近年、上述の光格子時計の精度向上のネックとなる黒体輻射シフトを低減できる水銀原子を用いた光格子時計の開発も行われています。今後は、原子種固有の特性である黒体輻射シフト、高次の光シフト、原子間相互作用、使用するレーザー光源、等の得失を評価することによって、時計実現の最適原子種が議論されていくことでしょう。この一方で、異原子種を用いた時計の高精度周波数比較は、基礎物理定数の恒常性の検証を可能にすることから、基礎物理学的にも大きな意義があります。

秒の定義の変遷と再定義に向けた動向

秒の定義の変遷を図3に示します。1956年までは、1秒は地球の自転から定義され、1日(平均太陽日)の86400分の1と決められていました。相対不確かさは 10^{-7} 程度で、潮汐摩擦などによる地球自転の不整が不確かさ要因でした。1956~1967年の間では、1秒は地球の公転から定義され、1太陽年の31556925.9747分の1とされていました。この定義による秒の相対不確かさは約 2×10^{-9} です。1967年に、第13回国際度量衡総会において「秒はセシウム133原子の基底状態の2つの超微細準位間の遷移に対応する放射の9192631770周期の持続時間である」という新しい定義が採択されました。ついに秒の定義は量子力学の原理を利用した「量子標準」へと進化し、原子時計が誕生しました。

光時計に関する研究の飛躍的な発展は、光時計の正確さがセシウム原子時計で制限される事態を招きました。光時計同士の直接比較によって光時計がより良い再現性を持っていることを示しても、秒の定義であるセシウム原子時計以上の正確さで絶対周波数を決定することは原理的にできません。国際度量衡委員会は、このような状況を分析し、「秒の二次表現」という周波数リストを構築することを決めました。秒の二

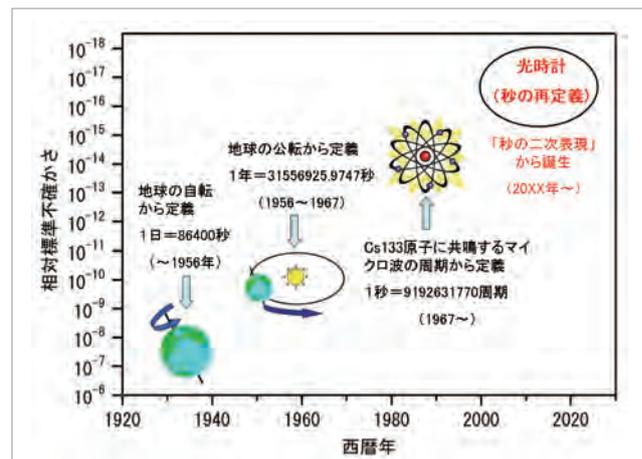


図3 秒の定義の変遷。

次表現は秒の再定義の候補となります。秒の二次表現を用いれば、光でもマイクロ波でも「秒」を実現することができます。もちろん、それでも秒の二次表現の正確さはセシウムを超えることはできません。しかし、このリストの構築は、もっとも高いレベルにおける再現性の評価や秒の再定義の準備過程における異なる標準の比較にとってたいへん有用です。

表1に、2012年10月にフランスの国際度量衡局で行われた国際度量衡委員会で決めた秒の二次表現を示します。光格子時計、単一イオン光時計及びマイクロ波時計を合わせて、全部で8種類となりました。光格子時計は他の原子時計と比べて、周波数安定度が高いのが特徴です。イッテルビウム光格子時計においては、産総研の新しい測定結果が国際度量衡委員会に報告されました。また、米国国立標準技術研究所がこの研究成果と整合性のある測定データを示しました。このように、複数の国際計量標準機関が整合性のあるデータを測定したことが高く評価され、イッテルビウム光格子時計は今回新しい秒の二次表現として採択されました。またストロンチウム光格子時計においては、情通機構とドイツPTB研究所の最新測定結果を取り入れて、従来の東大・産総研、米国JILA研究所及びフランスSYRTE研究所の測定結果を合わせて、秒の二次表現の勧告周波数値を更新しました。このような研究活動を通じて、秒の再定義に向けた世界的な検討が加速されることが期待されます。今後数年～10年間かけて新しい秒の定義が最終的に決まります。

方式	原子種	時計の周波数 (Hz)	時計の精度
光格子時計	⁸⁷ Sr	429228004229873.4	1×10 ⁻¹⁵
光格子時計	¹⁷¹ Yb	518295836590865.0	2.7×10 ⁻¹⁵
単一イオン光時計	²⁷ Al ⁺	1121015393207857.3	1.9×10 ⁻¹⁵
単一イオン光時計	¹⁹⁹ Hg ⁺	1064721609899145.30	1.9×10 ⁻¹⁵
単一イオン光時計	¹⁷¹ Yb ⁺ 、四重極遷移	688358979309307.1	3×10 ⁻¹⁵
単一イオン光時計	¹⁷¹ Yb ⁺ 、八重極遷移	642121496772645.57	1.3×10 ⁻¹⁵
単一イオン光時計	⁸⁸ Sr ⁺	444779044095485.3	4×10 ⁻¹⁵
マイクロ波	⁸⁷ Rb	6834682610.904312	1.3×10 ⁻¹⁵

表1 2012年国際度量衡委員会で決めた新しい秒の定義の候補

光周波数標準の遠隔比較

秒を定義するセシウム原子時計との比較や、提案されている原子種、イオンのどれを新しい秒の定義として採用するかを議論するためにも、それらを遠隔で相互比較することが必要となります。このような遠隔相互比較には、これまでGPSに代表されるグローバル測位衛星システム (GNSS) を用いるGNSS法と、通信衛星を介して2地点間で信号を送受信する衛星双方向時刻周波数比較 (TWSTFT) 法とが実用化されており、国際原子時の構築のために日常的に使用されてい

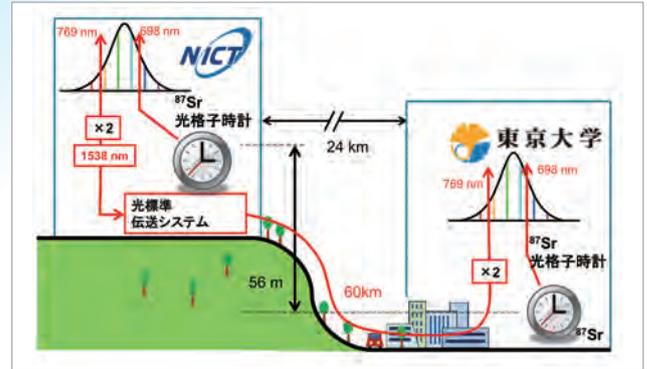


図4 東京大学—情通機構間光ファイバ比較実験。

す。しかし、これらの方法で光周波数標準の周波数を正確に評価するには非常に長い日数が必要となり、現実的ではありません。そのため、短時間で正確に遠隔比較をすることのできる比較法の開発が求められています。そこで、本サブテーマでは、光ファイバ比較法、超長基線電波干渉 (VLBI) 法、キャリアフェーズ衛星双方向比較 (TWCP) 法による遠隔比較の実証に取り組んできました。

光ファイバを用いて遠隔比較を行う方法として、キャリア光の周波数そのものを光周波数標準にリンクさせて伝送するシステムを開発しました。伝送中に付加されるノイズを補償するためのノイズキャンセリングとキャリアの偏波トラッキングの自動化を行い、東京大学と情通機構でそれぞれ独立に動作するSr光格子時計が生成される周波数が7.3×10⁻¹⁶の不確かさの範囲内で一致することを示すとともに、標高差56mに起因する一般相対論的重力シフトをリアルタイムに測定することに成功しました (図4)。遠隔地にある2台の独立した光周波数標準が16桁の不確かさで比較されたことは世界初の成果です。

一方、光ファイバでの直接比較は、米国や欧州にある研究機関との比較のような長距離での適用には困難な点が多く、長距離間の遠隔比較にはVLBI法とTWCP法を適用することを目指しています。VLBI法は、極めて遠方にある強い電波を放射している天体 (クエーサー) の電波を複数の電波望遠鏡で受信し、その信号を干渉処理することで精密な遅延時間を決めることが可能で、その結果から基準周波数の周波数比較を行うことができます。情通機構が技術開発センターとして参加している国際VLBI事業では、受信する周波数帯を大幅に拡大することによって遅延時間決定の不確かさを小さくする次世代観測システムの開発に取り組んでおり、情通機構ではこの広帯域化と合わせて小型の移動観測局を開発することで遠隔周波数比較を実現することを計画しています。また、情通機構では、TWCP法による計測が可能なシステムを開発しており、このシステムを用いて小金井—鹿嶋間、および小金井—沖縄間で評価をした結果、1秒平均で10⁻¹⁵台の測定不確かさを確認しました。図5に示すように、これらの新しい手法を用いることで従来よりも短時間で正確な周波数比較ができ

ると期待され、今後、これら複数の方法にて光周波数標準の遠隔比較の実証実験を行っていくことを計画しています。

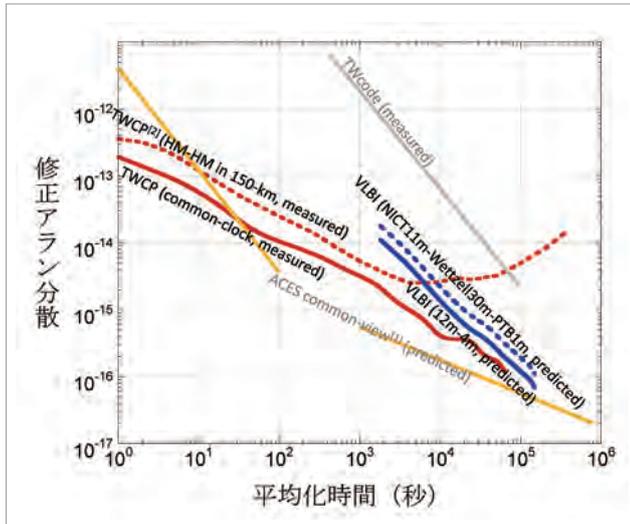


図5 各種の周波数比較手法において期待される測定不確かさ。

更なる高精度化に向けた戦略

ストロンチウムおよびイットルビウム原子を用いた光格子時計の更なる高精度化において、現在、最も重要な課題となっているのは、周囲の室温環境から放射される黒体輻射によって生じる周波数シフト（黒体輻射シフト）の抑制です。室温での黒体輻射によって、Sr原子では約2.3Hz、Yb原子では約1.3Hzの周波数シフトが生じます。これらの大きさを精度よく見積もるために、PTB（ドイツ）、NIST（アメリカ）の研究グループは、それぞれSr、Yb原子の静電場に対する分極率を測定し、黒体輻射シフトの大きさを算出しました。本サブテーマでは、低温に冷却した環境の中で時計遷移分光を行うことで黒体輻射シフトを除去する低温動作型光格子時計を開発しました。2台の光格子時計を開発し、1台を室温、もう1台を低温で動作させて、その周波数差を測定することによって、黒体輻射シフトを、直接分光により観測することに成功しました。このような制御された温度環境下で動作する光格子時計の実証はこれが初めてであり、18桁精度の実現に向けて、重要なステップとなります。

もう一つのアプローチとして、黒体輻射に対する感度の小さな原子である水銀原子を用いた光格子時計の開発も行っています。水銀原子は、黒体輻射に対する感度がSr原子に比べて1桁小さいため、室温環境下においても18桁精度を実現できる系として有望視されています。その一方で、水銀原子の光学遷移は、その多くが紫外光領域にあり、紫外光レーザー光源の開発が実験成功の鍵となります。この実験は、理化学研究所のグループで行われており、現在まで、水銀原子の磁

気光学トラップ、光格子トラップ、および光格子中での時計遷移の分光に成功しています。

18桁精度遠隔周波数リンクで目指す今後の展開

18桁の超高精度な時計が実現できると、わずか1cmの高さの違いをも一般相対論的な効果により周波数シフトとして検知できるようになります。このような高精度な時計を遠隔地に置き、それらの周波数を比較できれば、遠隔地間の重力ポテンシャルの差を高精度に時計で計測できるようになります。光格子時計の特長である、短い平均化時間で高い精度を実現できるリアルタイム性を生かせば、地殻変動のような重力ポテンシャルの時間変動も検知できます。我々は、東京大学一理化学研究所間を光ファイバーでつなぎ、光格子時計の遠隔周波数比較実験に着手しています。光ファイバー周波数伝送システムを構築し、1秒の平均化時間で17桁精度の周波数伝送を実現可能であることを示しました。今後、この光ファイバーリンクを用いて、光格子時計の遠隔高精度周波数比較を行い、重力ポテンシャルのリアルタイム計測を実現しようとしています。このような高精度時計比較を通した相対論的測地学、重力ポテンシャル計としての応用を目指して、今後、時計システムの長時間連続安定動作、小型化・可搬化の実現も重要な課題となっています。

執筆者：

香取 秀俊（東京大学）

執筆協力者：

光格子時計に用いる原子種を選択

高本 将男（理化学研究所）、洪 鋒雷（産業技術総合研究所）、香取 秀俊（東京大学）

秒の定義の変遷と再定義に向けた動向

洪 鋒雷（産業技術総合研究所）

光周波数標準の遠隔比較

小山 泰弘（情報通信研究機構）

更なる高精度化に向けた戦略

高本 将男（理化学研究所）、香取 秀俊（東京大学）

18桁精度遠隔周波数リンクで目指す今後の展開

高本 将男（理化学研究所）、香取 秀俊（東京大学）

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

高校生のための先進的科学技术体験合宿プログラム ウィンターサイエンスキャンプ '12-'13 量子効果を体験しよう～量子力学とその標準への応用～

■日程 平成25年1月7日(月)～1月9日(水) ■会場 独立行政法人 産業技術総合研究所 つくばセンター
 ■参加人数 高校生10名 ■主催 独立行政法人 科学技術振興機構 <http://rikai.jst.go.jp/sciencecamp/camp/>
 ■講師 金子 晋久(産業技術総合研究所)、中村 秀司(産業技術総合研究所)
 ■受入実施機関 最先端研究開発支援プログラム量子情報処理プロジェクト

講師からのコメント 「サイエンスキャンプ報告」

今年の1月7日から1月9日の3日間、ウィンターサイエンスキャンプが産業技術総合研究所において行われ、その講師を務めさせていただきました。今回のサイエンスキャンプは「量子効果を体験しよう～量子力学とその標準への応用」というタイトルで、電圧標準として用いられているジョセフソン効果を接合の作製から測定まで体験してもらいました。

一日目は、量子力学の基礎的な内容と、超伝導、ジョセフソン接合、シャピロステップなどの簡単な講義が行われ、各種国家標準の高精度化を行う研究室を見学しました。音響標準で用いられる無響室、シリコン球を用いてアボガド定数を精密に測定するための装置や次世代周波数標準の候補として有力な光格子時計など普段見慣れない様々な機器や装置類を高校生たちは興味を持って見学していました。二日目は高校生を二つのグループに分けて実験を行い、身近にある超伝導体の半田と鉛を用いてジョセフソン接合を作製し、低温環境下で高周波を印加することによって、シャピロステップを無事測定することができました。最終日は、実験データの解析を行い、その後発表会が行われました。

三日間を通して非常にタイトなスケジュールの中、高校生たちが普段聞きなれない言葉に戸惑いながらも理解しようと真剣

に講義や実験に取り組み、発表会ではお互いに活発な議論を交わしている様子は非常に印象的で、私自身多くのことを学ばせて頂きました。また同年代の優秀な学生や実際の研究者と触れ合う機会を与えてくれるこのような科学教育活動の重要性を再認識しました。

最後にサイエンスキャンプを行うに当たりご協力いただきました前澤正明様、福田大治様に感謝いたします。

[産業技術総合研究所 中村 秀司]



参加学生の声 「充実したサイエンスキャンプで感じたこと」

私は、科学技術振興機構が主催するサイエンスキャンプの、量子力学とその標準への応用に関するプログラムに参加させて頂きました。

本などで量子論に触れ、そのあまりにもの奇天烈さに困惑していた私にとって、このキャンプへの参加は願ってもみない事でした。正直なところ知識不足な私にとって、量子の性質は信じ難いもので、どれだけ調べても納得できませんでした。それは、キャンプ冒頭の講義で説明を受けた後でも変わりませんでした。

ところが、その後の実験で、いざジョセフソン効果やシャピロステップを自分たちの手で出現させることに成功したところ、今まで納得できなかったことによるモヤモヤ感が心の奥でスッと晴れた気がしました。読んだり聞いたりしただけでは受け入れられませんが、実験を通して体感することで、量子的な振る舞いが現実として起こっていることが実感できたのです。これらの実験の結果を目の当たりにした時の感動は、今となっても忘れられません。

その後の施設見学や講義で、量子論はほぼ矛盾なくミクロの世界の諸現象を説明でき、現実として多くの技術に応用され、私たちの日常生活を支えるほどにまで浸透しているということ学びました。そして私は、これから量子を利用した技術がさら

なる発展を迎え、人々の想像を超越するような事が成し遂げられるのではないかと期待と興奮で胸が一杯になりました。

また、キャンプの中で、私たちの常識的な考えからは理解しにくい変てこな真実を理解して立派に使いこなす科学者の方々に出会ったことで、私の物理学に対する憧れと熱意は度を増しました。

このような、物理学に興味のある高校生がさらに物理学を好きになれるような素晴らしいプログラムを、企画、運営して下さった全ての方々に感謝したいです。

[学校法人梅村学園 三重高等学校2年生 谷 健太郎]



化学から、 分子スピンQC/QIPの 開発に挑む

大阪市立大学大学院理学研究科物質分子系専攻 / 化学科の分子物理化学・QC/QIP研究室のグループは、FIRSTプロジェクト(研究分担者; 工位)では「スピン量子コンピューター」(東大・樽茶サプリーダー)サブグループに属し、化学の分野からスピン量子コンピューター(QC) / 量子情報処理技(QIP)の開拓に寄与するために、(課題I)分子スピン量子ビットの設計・物質開発、(課題II)スケーラブルなスピンQC(アンサンブル系)のアーキテクチャーの探索、(課題III)分子スピン(アンサンブル系)を活用したスピン状態制御の Pulsed Microwave Element Technology の開発・スピントクノロジーの確立、(課題IV)巨視的 / 秩序性ヘテロ量子ビット間を結合させるハイブリッド結合技術・物質開発と第一原理計算にもとづく理論的研究を行っています。これまで、化学と量子理工学/QIPをリンクする、国内外でも数少ない研究拠点として役割を果たしてきました。これらの課題はどれも、分子スピン系(開殻系分子における多電子スピン+多核スピン系を指す)そのもの、あるいはそれらのスピン物性 / 量子機能は化学的には無論、物理的及び物質科学的にも未知の領域に属するものばかりで、挑戦し甲斐のある課題にワクワクしながら研究しています。研究には Serendipity はつきものですが、新しい領域であるため自由な発想が求められる難しさもある一方、思わぬ発見もありました。

研究室グループは2013年度当初では、研究分担者の他に、教授、准教授、特任准教授、講師、特任助教が各1名、博士研究員2名(うち外国人1名)、後期博士課程2名、前期博士課程2名、学部4年次生が6名、客員准教授2名(うち海外1名)、客員研究員1名(海外外国人)の人員構成です。

分子スピンQCの開発に関わる課題を遂行するには、新規な開殻系分子種の設計が不可欠であり、これまでに研究グループで蓄積してきた、秩序性開殻系、及び高スピン分子系の量子化学の知識を活用してきました。これらの分子設計の基本概念は、開殻系電子スピンの物理量の特徴づけるgテンソル、及び電子スピン間の交換相互作用(J)をそれぞれ人為的に制御する、gテンソルengineering、及び分子 J -engineeringと呼ばれる分子スピントクノロジーの考え方です。個々の分子スピン(アンサンブル系)のaddressingには、これらのengineeringが不可欠ですが、さらに分子スピンを活用する演算には、電子スピン間に働く相互作用を自在に導入する必要があり、これは微細構造(ゼロ磁場分裂: D)テンソルを制御する、Dテンソルengineeringによって実行します。研究グループでは、分子スピンをscalableな量子ビットとして活用するための分子スピントクノロジーを、理論と実験の両面から確立してきました。

FIRSTに関する研究課題で、これまでに研究グループが達成してきた主な成果には、以下のようなものがあります。

- (1) 共鳴パルスマイクロ波とラジオ波をつかって、スピン量子数が1/2の粒子間にエンタングルメント状態をつくり、スピン間の位相制御を介して、電子スピンの固有状態が 4π 周期をもつことを直接実験的に初めて証明しました。
 - (2) 分子スピンにおいて、three-partite coherenceをどのように検出するかを、1電子スピン・2核スピン系の位相制御(Time-Proportional-Phase-Increment技術)を介して可能であることを実験的に証明しました。
 - (3) 分子スピンを量子ビットとするスケーラブルなスピンQC/QIPアンサンブル系のアーキテクチャー探索と物質開発の課題では、Lloydモデル((ABC)n、(AB)n系の1次元周期スピン鎖)の電子スピン版プロトタイプとなる、三重螺旋の対称構造を有する、含常磁性金属helicateを物質開発しました。ここでは、金属イオンをつかって初めてscalabilityをもつgテンソルengineeringを実現しました。
 - (4) 分子スピン系において、CNOTゲートを初めて実現し最小のスピン量子コンピューターを動作させました。
 - (5) 分子スピン系において、現代の古典的コンピューターでは解くことのできない、スピン角運動量の和をシミュレートする分子系を実際に見出しました。
 - (6) 複数の電子スピン間の位相制御を、パルスマイクロ波を使って行う方法を考案し、実際に2電子スピン間で実行できる実験系を構築し、coherent dual ELDOR (Electron electron DOuble Resonance)と命名しました。電子スピン量子ビットを制御する上で、不可欠なパルスマイクロ波要素技術となるものです。
 - (7) 多電子スピン系分子の磁氣的性質の量子化学計算、特にこれまで手法の開拓が最も遅れていた電子スピンの相対論的効果に由来するゼロ磁場分裂テンソルの理論計算では、スピン-軌道相互作用も精密に取り込んだ手法を開発し、分子スピン物性 / 機能の量子化学的な解明に寄与しました。
- 最後になりましたが、FIRSTの研究課題遂行に当たっては、阪大・院・理の森田靖・有機合成研究グループ、阪大・院・基礎工の北川勝浩研究室のグループとタイアップして行っています。超伝導磁束量子ビット回路系に適した分子スピンアンサンブル系の物質開拓の課題では、理研の蔡兆申研究室のグループ及び国内の安定開殻系高スピン分子の有機合成研究グループと協力しています。(工位 武治)



量子コンピュータへの 合成有機化学からの 挑戦

当研究グループは、学部・大学院学生5人、博士研究員6名、技術補佐員3名から構成されています(写真1)。グラフェンを形作っている縮合多環ベンゼン誘導体に類似した π 電子系有機物を主なターゲットとした合成有機化学に基づくモノ作りと、機能性材料への展開に日々挑戦しています(写真2)。ベンゼン誘導体からbottom-up手法で組み立てていくことから、構造が明確な単一の物質が合成できます。特に、空気中でも安定に取り扱うことができる縮合多環型の有機中性ラジカルに着目しており[Nat. Chem. 3, 197 (2011)]、特異な電子スピン構造に基づく分子の性質や、3次元集積体における分子間相互作用が鍵となる種々の物性を創出してきました。

●有機中性ラジカルとは？

有機分子の大部分は、分子全体として偶数個の電子を持ち、2個ずつが対を形成しています(閉殻有機分子、図1)。一方、電荷を持たず、対を形成しない不対電子を持つ分子も存在しており、これらは有機中性ラジカルと呼ばれています(図1)。こうした分子は不安定で短寿命な化学種と考えられていますが、適切な化学修飾を施すことにより空気中でも安定な誘導体が合成できます。不対電子の電子スピンの分布状態から、「電子スピン局在型」と「電子スピン非局在型」に大きく分類することができます。

●分子スピン量子ビット系

図1に示したニトロキシドラジカル類は、電子スピンのN-O部位に集中していることから、「電子スピン局

在型」の安定有機中性ラジカルに分類されます。私たちは、これらを利用して、様々な誘導体を設計・合成し、大阪市立大学の工位グループとの共同研究により分子スピン量子ビット系の開発研究を行っています[J. Phys. Chem. Lett. 2, 449 (2011); Phys. Chem. Chem. Phys. 14, 9137 (2012); Angew. Chem. Int. Ed. 51, 9860 (2012)]。また、独自に設計したイミダゾール連結体を用いた三重らせん金属錯体を合成し、遷移金属イオンの電子スピンを利用した一次元拡張量子ビット系の開発も行っています[J. Am. Chem. Soc. 132, 6944 (2010); Eur. J. Inorg. Chem. 3438 (2011)]。

●スピン増幅に向けた分子開発

閉殻有機分子である p -ターフェニル(図1)を重水素および炭素13で標識した分子の合成も行っています。大阪大学の北川グループとの共同研究により、大幅なスピン増幅に最近成功しました。

●電子スピン非局在型の安定有機中性ラジカル：TOT

当研究グループで最も注力している研究は、電子スピンの分子骨格全体に広く非局在化した有機中性ラジカルの設計と合成です。図2に示したTOTは、 25π 電子系を持つ安定な有機中性ラジカルであり、極小のフロンティア軌道エネルギー差と4電子授受能を有しています。最近我々は、この中性ラジカルを電極活物質に用いた高容量の二次電池の開発に成功しました[Nat. Mater. 10, 947 (2011); NHK ニュースおはよう日本, 2011年10月17日](図2)。

現在、FIRST量子情報プロジェクトの他に、高性能な二次電池や太陽電池・電気伝導物質の開発を目指した文科省委託事業元素戦略プロジェクト(2009~2013年度)やJST-CREST(2012~2017年度)も推進しています。ご興味のある方は、我々のホームページをご覧ください。(森田 靖)



写真1 全体写真



写真2 有機合成実験

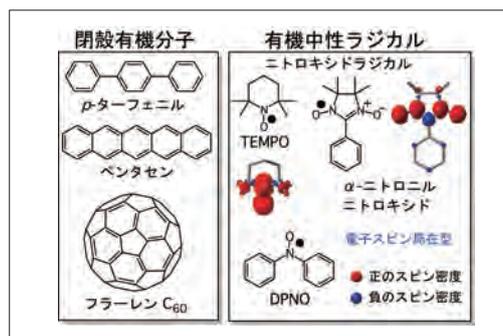


図1 閉殻有機分子と電子スピン局在型の有機中性ラジカルの電子スピン密度分布

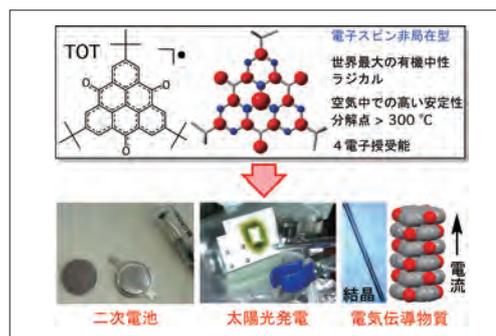


図2 TOTの分子構造・電子スピン密度分布と機能性材料への展開

量子を操る 達人を目指せ!

昨年4月に発足した当研究室もようやく2年目を迎えました。東京大学駒場(駒場I)キャンパスから徒歩で10分ほど離れた、駒場IIキャンパスにある先端科学技術研究センターに所属しています。設立に際して、量子情報処理技術の発展のための物理と工学の両輪を究めるという意味で、分野名を「量子情報物理学」と名付けました。そもそも、この研究室の誕生は、現在の内閣府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(FIRST)と、その前身となった科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」(CREST)の存在に多くを負っています。これらのプロジェクトの支援のもと量子情報科学に関する様々な分野で成長し活躍してきたメンバーをスタッフとして迎えて、これからの新たな展開を目指すとともに、量子情報研究の次世代を担う研究者が育つ場を実現したいと考えています。

現在、筆者並びにこの4月に着任した宇佐見康二准教授、昨年から精力的に研究室の立ち上げに関わってくれている山崎歴舟助教を含め、スタッフ6名が在籍しています。また本学物理工学専攻および物理工学科の学生6名が所属しています。元気者ぞろいで、朝から晩までにぎやかに議論をしながら過ごしています。

現在取り組んでいる主な研究内容は以下の通りです。

●超伝導量子回路を用いた量子情報処理

超伝導電気回路上に実現する超伝導量子ビットや超伝導共振回路における量子状態制御および観測の技術は、この10年あまりの間に飛躍的な進歩を遂げました。散逸機構の理解の前進に伴い、設計や材料の工夫によりデコヒーレンス時間が当

初の値より5桁以上も改善されています。それに付随して制御・観測過程の忠実度も向上し、99%を超えようとする勢いです。電気回路上の巨視的な人工原子としての超伝導量子ビットは、マイクロ波領域の電磁場と非常に強く結合するため、回路量子電磁力学の分野を生み出し、量子光学の研究に新たな風を吹き込んでいます。今後は、より大規模な量子演算回路の実現も期待されています。この研究は、理研/NEC・NICT・AIST・MIT・東京医科歯科大などのチームと共同で行っています。

●ハイブリッド量子系を用いた量子情報インターフェイス

超伝導量子回路技術の成熟化は、マイクロ波領域における従来にないフレキシビリティを持つ量子状態制御・観測ツールの実現と捉えることもできます。これを利用して他の物理系の量子力学的自由度を自在に制御する、ハイブリッド量子系の実現に挑戦しています。対象となりうる系は多数存在しますが、特に固体中の集団励起モードに着目し、具体的には、ナノメカニクスにおける機械的振動モード(フォノン)や強磁性体中のスピン励起モード(マグノン)などと超伝導回路との結合を量子レベルで実現しようとしています。平行して、これらの自由度の持つ量子状態を光を用いて制御する研究にも着手しており、将来的に、マイクロ波領域と光領域との、2つの大きく異なるエネルギースケールを持つ領域の間で量子情報を伝達することを可能にする量子インターフェイスを構築し、量子中継などの量子ネットワーク技術の実現に貢献したいと考えています。

当研究室ではいつでもお客様を歓迎いたします。議論・見学・サッカー・宴会、どんな目的でも結構ですので、是非気軽にお立ち寄りください。

URL: <http://www.qc.rcast.u-tokyo.ac.jp>

(中村 泰信)

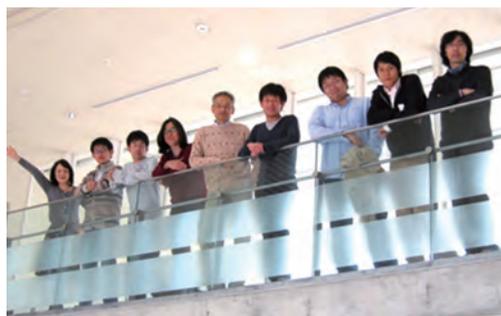


写真1 メンバーの集合写真(2013年4月2日)

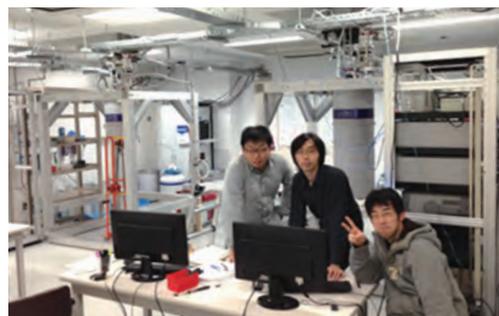


写真2 実験室の様子

エッセイ

Essay

私がイオントラップを知ったのは、今から35年ほど前、当時の電波研究所（現情報通信研究機構）に入所して3年目、セシウムビーム周波数標準器や水素レーザーの研究開発グループに所属していたときである。上司からレーザー冷却の文献などを渡され、今後の周波数標準の研究のためにこれらの動向を調べるように言われた。イオントラップを知ったのはその時である。イオントラップを使った分光実験は1960年代に開始され、周波数標準への応用についても、水銀イオンを使ったマイクロ波の高分解能分光実験などがなされていたが、当時はとても実用になりそうな状況ではなかった。

すぐに1978年にイオンのレーザー冷却の報告、さらには1980年には冷却された1個のイオンの画像の報告がなされた。この論文を知ったときの衝撃は大変大きなものであった。当時、セシウムビーム標準器では、マイクロ波に共鳴した原子の検出のためにホットワイヤを使い、 10^8 個/秒程度の原子ビームをイオン化して10pA程度の電流を検出していた。 10^8 個の原子の検出でも大変なのに、一個のイオンが検出できるということは全く信じられない思いであった。この時期に、来日した水素レーザーの大家に、イオントラップの研究についての意見を尋ねたことがある。“Young men’s game”という答えが返ってきた。当時最先端を走っていたNBS（現NIST）のワインランド博士（2012年ノーベル物理学賞）のグループを指したものと思われるが、当時の周波数標準の研究の主流からみると、危なっかしい、「遊び心を持った冒険」に見えたのかもしれない。

研究所で設備を整えて本格的な研究を開始した1990年に、ワインランドのグループのウェイン・イタノ博士を2カ月ほど招聘し、研究の立ち上げを指導して頂いた。イタノ博士は日系三世の物静かで非常に謙虚な方である。グループの中核メンバーの一人で、ワインランドの後輩にあたる

バード大学のラムゼイ研究室の出身である。イタノ博士からは、絶対にものになるからということで、単一イオンを使った光周波数標準の研究を強く勧められた。当時はマイクロ波領域の標準への応用も並行して進められていた時期で、研究所の性格から我々もそれを念頭に置いていたが、彼らはすでに単一イオンが本命であるとの強い確信を持っていたことになる。残念ながらイタノ博士の忠告をうまく生かすことはできなかったが、その後またたび来日してもらい、講演や助言を頂いた。

私が周波数標準の研究に従事した35年前には 10^{-13} を切る確度を目標に研究がなされていた。現在では 10^{-18} の実現が現実のものとなっている。この間の驚くほどの研究の進展は香取先生の光格子時計など目を見張るものがある。単一イオンに関して言えば、最初のアイデアから現在までに30年ほど経過して“Young men’s game”が結実しつつあることになる。基礎的な実験研究には如何に地道な努力と長い時間が必要かを示すものであろう。この間、多くのブレイクスルーや技術の蓄積があった。量子情報処理の実験研究はさらに難しく、実現には多くの課題が予想されるが、一見“Young men’s game”と見えるような研究から大きな飛躍が生まれるのかもしれない。

占部 伸二（大阪大学）

“Young men’s game”



図 来日中のイタノ博士と当時の通信総合研究所（現NICT）のイオントラップ研究グループのメンバー（1993年頃 神戸の関西先端研究センターにて）。左から早坂（現NICT）、大向（現埼玉大）、今城（故人）、イタノ博士、筆者、渡辺（現電通大）。

No.12 June 2013

最先端研究開発支援プログラム「量子情報処理プロジェクト」・国立情報学研究所量子情報国際研究センター ニュースレター

量子ニュース

NII 大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構
国立情報学研究所 <http://www.nii.ac.jp/>

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

〒101-8430 東京都千代田区一ツ橋2丁目1番2号 学術総合センター

本誌についてのお問い合わせ：

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

R100
公益社団法人の非営利活動を行っています