

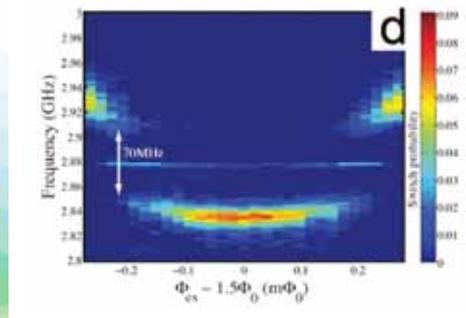
# FIRST/NII-GRC on Quantum Information Processing Newsletter

# 量子 ニュース



## CONTENTS

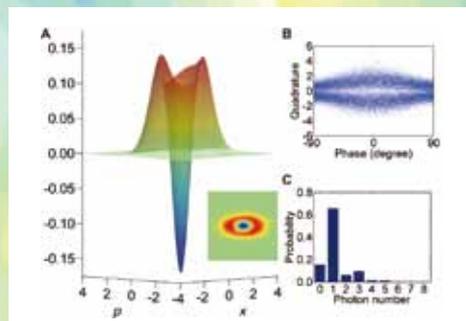
- 02 プロジェクト事務局からのお知らせ
- 03 海外研究動向
- 04 最近の研究成果
- 06 FIRST 量子情報処理プロジェクト全体会議 2011
- 16 サイエンスアウトリーチ
- 18 研究室紹介
- 20 エッセイ



P4 最近の研究成果より



P16 サイエンスアウトリーチより



P19 研究室紹介より

# 磁力計について



学習院大学 教授 平野 琢也

量子技術を用いた磁力計の開発と聞くと、牛刀割鶏などではないかと思われる方もいるかもしれない。従来は不可能であった、質的に新しい応用を可能にするのが量子情報技術であり、古くからありふれた磁力計に量子技術を用いるのは大げさなのではないかという見方である。

しかし、実際には、身近にある磁場の測定を改善できることは、多種多様な応用につながるものであり、量子技術により、それを改善できる道が見通せるという現状は、量子技術と磁力計を結びつける研究に多くの注目をひきつけている。

米国の国防高等研究計画局 (DARPA) は、萌芽的ではあるが重要な応用の可能性を持つ技術の開発を後押しし、実績をあげてきたことで知られる研究機関である。具体例としては、インターネットの原型やGPSの開発が有名である。2011年の予算総額は30億ドルなので、ほぼ日本の科学研究費に匹敵する。どのようなプログラムに投資しているかということは unclassified であり、DARPAのwebページで見ることができる。

現在、その一つとして、Quantum-Assisted Sensing and Readout (QuASAR) というプログラムが実施されている。これは、原子や人工原子の系を使ったセンサーの感度を標準量子限界近くまで向上させ、さらに、センシングと読み出しの量子系の結合により標準量子限界を超えることを目指したもので、磁力計はその一つの重要なターゲットとなっている。

磁力計の原理には様々あり、例えば、誘導起電力を利用した探りコイル、ホール素子、超伝導量子干渉計 (SQUID) などである。図は、様々な方式の磁力計の感度と空間分解能の

現状をまとめたものである (Nature 435, 440 (2005) の補足情報等を参考に作成)。この図より、感度と空間分解能にはトレード・オフの関係があること、しかも、方式の違いによらず、現在実現されている性能が一つの直線上に乗るように見えることに気付く。量子技術を用いることで、この限界線を超える性能を実証することは、大変興味深い挑戦といえる。

高感度磁力計の応用で重要なものに、医療への応用がある。神経活動によって電流が流れると、電流は磁場をつくるはずであり、その磁場を測定することで、神経活動についての情報が得られる。ヒトの脳が刺激を受けたときは、 $10^{-13}$  T 程度の磁場を発生することが知られており、SQUIDを使った脳磁計が実用化されている。脳磁計を用いることで、脳内のどの部位が活動しているのかを大まかに知ることができ、脳疾患の診断などに役立つ (応用物理 80, 420 (2011))。もしも、十分な感度と空間分解能を持つ磁力計があれば、ヒトの神経活動について、外部から非侵襲に詳しく知ることができるはずである。

高感度磁力計の方式として、最近注目を集めているのは、アルカリ金属の原子ガスを用いる方式である。原子はそれ自身が小さな磁石であり、磁場中で歳差運動を行うので、歳差運動を測ることで磁場の情報が得られる。ガラスセル中の温度 180 度のカリウムガスを用いた実験では  $10^{-15}$  T/√Hz を超える感度が報告されている (左下図参照)。この方式は他の方式よりも優れた感度を実現でき、また、SQUID のような冷却装置が不要である。但し、空間分解能は原子の拡散によって制限される。そこで、レーザー冷却した原子を用いると、空間分解能を向上させることができる。さらに、原子や光の量子状態を制御することで、標準量子限界を超えられることが原理検証実験により示されている。量子縮退した原子集団は、運動状態も究極的に制御された状態にあり、磁力計の感度の原理的な限界を追求する最適対象と考えられる。

量子ビットの候補としても注目を集めているダイヤモンド中の NV 中心は量子技術を用いる磁力計としても注目されている。量子ビットの制御技術を応用することで、シングルスピンの読み出しが可能なナノスケールの磁力計や、 $10^{-15}$  T/√Hz の感度を持つマイクロメートルスケールの空間分解能の磁力計の可能性が議論されている (Nature Physics 4, 810 (2008))。

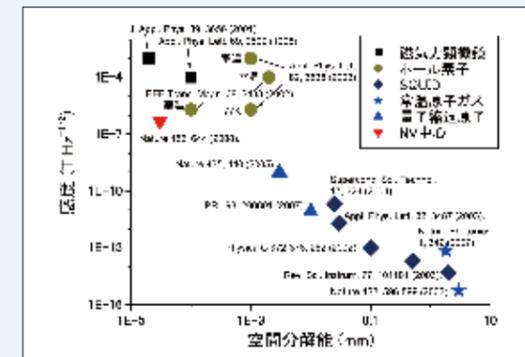


図 様々な方式の磁力計の感度と空間分解の現状

## 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：東倉 洋一(国立情報学研究所)

### サブテーマ紹介 ○印…リーダー

- 量子情報システム**  
○山本 喜久(国立情報学研究所／スタンフォード大学) Alfred Forchel(Universität Würzburg) Klaus Lischka(Universität Paderborn)
- 量子計測**  
○山西 正道(浜松ホトニクス(株)) 藤澤 利正(東京工業大学) 太田 剛(NTT物性科学基礎研究所) 竹内 繁樹(北海道大学)  
平野 琢也(学習院大学) 向井 哲哉(NTT物性科学基礎研究所)
- 量子標準**  
○香取 秀俊(東京大学) 洪 鋒雷((独)産業技術総合研究所) 小山 泰弘((独)情報通信研究機構)
- 量子通信**  
○井元 信之(大阪大学) 佐々木 雅英((独)情報通信研究機構) 古澤 明(東京大学) 小坂 英男(東北大学)
- アナログ量子コンピューター／量子シミュレーション**  
○高橋 義朗(京都大学) 五神 真(東京大学) 占部 伸二(大阪大学)
- 理論**  
○都倉 康弘(NTT物性科学基礎研究所) Franco Nori((独)理化学研究所) 小川 哲生(大阪大学) 小芦 雅斗(東京大学)  
根本 香絵(国立情報学研究所) Rodney Van Meter(慶應義塾大学)
- 超伝導量子コンピューター**  
○蔡 兆申((独)理化学研究所／日本電気(株)) 中村 泰信(東京大学) 仙場 浩一(NTT物性科学基礎研究所)  
高柳 英明(東京理科大学) 前澤 正明((独)産業技術総合研究所) 日高 睦夫((財)国際超電導産業技術研究センター)
- スピン量子コンピューター**  
○樽茶 清悟(東京大学) 北川 勝浩(大阪大学) 工位 武治(大阪市立大学) 伊藤 公平(慶應義塾大学) 森田 靖(大阪大学)

### アドバイザー

- 光** 末松 安晴((財)高柳記念財団) 梶具 博義(元京農工大学)
- 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(筑波大学) 前川 禎通((独)日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター)
- 理論** 上村 洸(東京理科大学)

### プロジェクト事務局

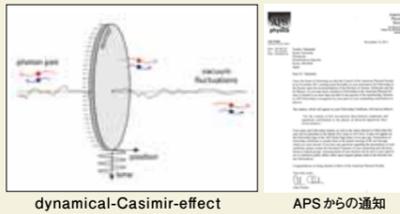
- 技術担当** Tim Byrnes(国立情報学研究所) 宇都宮 聖子(国立情報学研究所)
- 事務担当**  
室長 片山 秀(国立情報学研究所)  
事務参事 山本 浩幾(国立情報学研究所)  
事務参事補 青木 香穂里(国立情報学研究所)  
窪田 しおり(国立情報学研究所)  
塩田 容子(国立情報学研究所／山本研究室)

## プロジェクト事務局からのお知らせ

### NEWS

■Dr. Franco Nori (理化学研究所) の研究 (the Observation of the dynamical Casimir effect in a superconducting circuit [Nature 479, 376 (2011)]) が、英国物理学会 Physics World誌の2011Breakthrough of the Yearの第5位に選ばれました。(発表日：2011年12月16日)

コメント：この研究成果は、Nature Newsより2011年で最も読まれたニュース記事とされ、フォーブス誌でも「物理学者、無から光を生成する」というタイトルで掲載されました。量子現象が一般大衆をも魅了することができたことは、大変に嬉しかったです。この研究においては理論と実験の連携・相互作用が非常にうまくいったので、とても興奮させられた価値のある経験でした。



■高橋 義朗教授(京都大学)に、アメリカ物理学会 (APS) フェローの称号が授与されました。

これは、"the creation of first two-electron Bose-Einstein condensate and significant contributions to the physics of ultracold degenerate Bose-Fermi mixtures" の業績が評価されたものです。(連絡日：2011年11月14日、2012年3月号 APS News で発表予定)

コメント：これまでの我々の研究を高く評価していただき、大変光栄に思います。研究に携わって頂いた多くの方々、およびご指導いただいた先生方に深く感謝し、今後なお一層研究に励みたいと思います。

■Luciano Aparicio さん(東京大学)が、Asian Internet Engineering Conference (AINTEC, Bangkok) 2011 で Best Student Paper 賞を受賞しました。(受賞日：2011年11月11日)

Luciano Aparicio (東京大学)、Rodney Van Meter (慶應義塾大学)、江崎浩 (東京大学) は、"Protocol Design for Quantum Repeater Networks," という論文において、量子リピーターの purification と entanglement swapping を管理する手法が古典的なネットワーク工学の概念を用いた通信システムで正しく運用できることを、状態機械を用いて明らかにしました。

コメント：Best Student Paper 賞の受賞について事前連絡がなかったため、私の名前が発表された時は驚きました。私たちの研究が表彰され、とても嬉しく思っています。



表彰状授与風景



### INFORMATION

#### ■夏期研修会2012の開催予告

1. 日程：2012年8月8日(水)～18日(土)
  2. 場所：沖縄(宮古島)※予定
  3. 募集：3月下旬頃より※予定
  4. 人数：50名程度(先着順)
- 詳細はHPをご覧ください。http://first-quantum.net/symposium/2012/summerSchool.html

## 1 超伝導量子ビットの有望な量子メモリー候補を発見

**論文情報** Xiaobo Zhu, Shiro Saito, Alexander Kemp, Kosuke Kakuyanagi, Shin-ichi Karimoto, Hayato Nakano, William J. Munro, Yasuhiro Tokura, Mark S. Everitt, Kae Nemoto, Makoto Kasu, Norikazu Mizuochi, Kouichi Semba, "Coherent coupling of a superconducting flux qubit to an electron spin ensemble in diamond", *Nature* 478, 221-224 (2011). DOI: 10.1038/nature10462  
**関連URL** <http://www.nature.com/nature/journal/v478/n7368/full/nature10462.html>

NTT 物性科学基礎研究所  
仙場 浩一

NTT 物性科学基礎研究所 超伝導量子物理研究グループ(リーダー: 仙場浩一)では、量子プロセッサ候補として期待されている超伝導磁束量子ビットの任意の量子状態を一時的に保存可能な「量子メモリー」の候補となる物理系を探してきましたが、このたび、図aに示すダイヤモンド中の窒素(N)空孔(V)複合欠陥中心(NVセンター)からなる電子スピン集団と超伝導磁束量子ビット系でコヒーレントな量子結合を観測することに世界で初めて成功しました。

これは、超伝導量子ビットの重ね合わせ状態をダイヤモンド結晶中のスピン集団へ移した後に再び読み出せることを意味しており、量子通信や量子情報処理に不可欠な、量子メモリーの実現にとって、ダイヤモンドが極めて有望な候補であることを示すものです。

実験で用いた試料(図b)では、トンネルバリア可変型超伝導磁束量子ビット(図c)と測定回路を覆うように高濃度( $10^{18}\text{cm}^{-3}$ )にNVセンターを含むダイヤモンド単結晶が固定されています。系の基底状態近く12mKで測定されたエネルギースペクトル(図d)には、電子スピン集団と超伝導磁束量子ビットとの強結合を示す70 MHzに及ぶ明瞭な真空ラビ分裂が観測されました。この時、スピン集団は、どのNVセンターがエネルギー量子を受け取ったかを測定されていないので、全ての可能な組み合わせの線形重ね合わせ(1励起ディッケ状態)である「スーパースピン」として振舞うと考えられます。

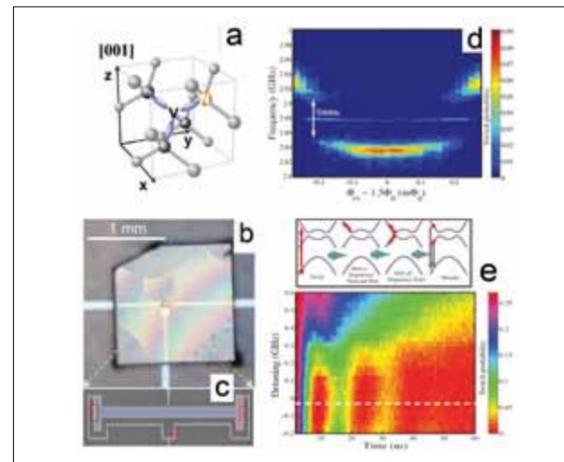
真空ラビ分裂の大きさから、およそ数千万個ものNVスピンのコヒーレントに参加していると考えられ、相互作用は1個のスピンと比較すると約1万倍にも増強されています。このようにスピン集団を使うと、短時間で

量子状態を転写するには大変都合です。この効果は図eに示す時間域の真空ラビ振動周期からも確認されました。

今後、結合系のコヒーレンス時間を改善し、超伝導量子ビットの量子メモリーとして機能させるための質の向上を目指す予定です。

本研究は大阪大学 水落憲和のグループ、国立情報学研究所 根本香絵のグループとの共同研究として行われました。

この成果は、*Nature* 478, 221-224 (2011) に掲載されました。

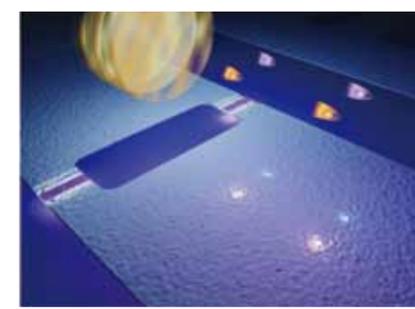


## 3 真空から光子を作る

**論文情報** C. M. Wilson, G. Johansson, A. Pourkabirian, M. Simoen, J. R. Johansson, T. Duty, F. Nori, & P. Delsing, "Observation of the dynamical Casimir effect in a superconducting circuit", *Nature* 479, 376-379 (2011)  
**関連URL** <http://www.nature.com/nature/journal/v479/n7373/full/nature10561.html>

(独) 理化学研究所  
Franco Nori

現代の量子理論における最も驚くべき予言の1つは、真空が空ではないということである。実際のところ、量子論における真空は生成・消滅を繰り返す仮想粒子で満ちている。初めは理論的な興味の対象であったが、すぐにこれらの真空揺らぎは観測可能な結果—例えば、原子スペクトルのラムシフトや電子の磁気モーメントの変調—をもたらすことが分かった。この真空揺らぎに起因する繰りこみは、現代では我々の自然に対する理解の中心を担っている。しかしながら、これらの効果は、真空揺らぎの間接的な証拠しか与えない。初期のころから、量子真空を構成する仮想粒子をより直接的に観測できないか議論されていた。40年前、相対論的な運動をしている鏡が、仮想光子を光子に変換すると提唱された。後に動的カシミア効果と名付けられたこの現象は、過去



An illustration of the dynamical-Casimir-effect experiment. The round mirror at the top of the image symbolizes the vibrating mirror that is created in the SQUID below. (Courtesy: Philip Krantz, Chalmers University)

実際に観測されていない。我々はこの動的カシミア効果を、超伝導キュービットを用いてどのように実現するか、理論的に研究してきた[1, 2, 3]。最近、我々は実験的にも、電気長が調整可能なコプラナー伝送線路からなる超伝導回路において動的カシミア効果を観測した[4]。超伝導干渉デバイスのインダクタンスを10GHzより大きい周波数で変調させることで、電気長は高速で変化させることができる。我々は実在光子の観測だけでなく、その放出光の2モードスクイーミングも観測した。これは、光子の生成過程の量子的な性質の一つである。参考文献[4]では、この効果とパラメトリック増幅、ホーキング輻射、そしてウンルー効果などほかの現象との関係性についても議論されている。また、本研究は世界中で幅広く報道されている[5]。

- [1] J.R. Johansson, G. Johansson, C.M. Wilson, F. Nori, Dynamical Casimir effect in a superconducting coplanar waveguide, *Phys. Rev. Lett.* 103, 147003 (2009).
- [2] J.R. Johansson, G. Johansson, C.M. Wilson, F. Nori, Dynamical Casimir effect in superconducting microwave circuits, *Phys. Rev. A* 82, 052509 (2010).
- [3] P.D. Nation, J.R. Johansson, M.P. Blencowe, F. Nori Stimulating uncertainty: Amplifying the quantum vacuum with superconducting circuits *Reviews of Modern Physics*, Vol.84 pages 1-24 (2012).
- [4] C.M. Wilson, G. Johansson, A. Pourkabirian, J.R. Johansson, T. Duty, F. Nori, P. Delsing, Observation of the dynamical Casimir effect in a superconducting circuit *Nature* 479, 376 (2011). The supplementary material is here (local PDF). This work was featured in a Nature "News & Views" (local PDF) and was selected as a Physics World top five Physics breakthrough of the year 2011: <http://physicsworld.com/cws/article/news/48126>. Also, according to Nature, coverage of our work on "Nature News" was "The most read news story of 2011": <http://www.nature.com/news/news-readers-choice-1.9643>.
- [5] <http://dmlriken.jp/outreach.php>

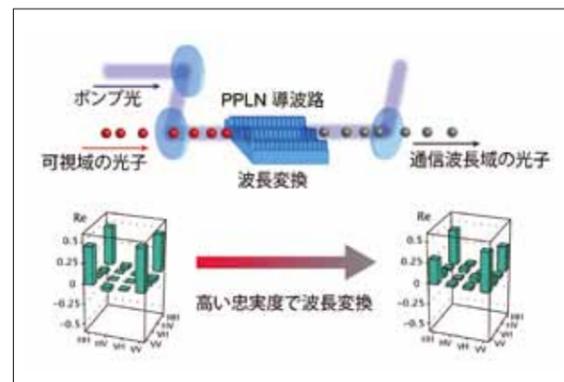
## 2 量子メモリー読み書きのための光波長変換ラインナップ完成

**論文情報** R. Ikuta, Y. Kusaka, T. Kitano, H. Kato, T. Yamamoto, M. Koashi, and N. Imoto, "Wide-band quantum interface for visible-to-telecommunication wavelength conversion", *Nature Communications* 2, 537 (2011).  
**関連URL** <http://www.nature.com/ncomms/journal/v2/n11/full/ncomms1544.html>

大阪大学  
井元 信之

量子中継などを利用する長距離量子情報通信において量子ビットを保存する量子メモリー間で光でリンクして量子情報をやりとりすることが非常に重要となります。ところが、量子メモリーにアクセスして情報を読み書きできる光は可視域付近(波長にしておよそ400~900nmであり、近赤外も含むが、以下可視域と呼ぶ)であるのに対し、光ファイバー通信においては1.3μm近辺か1.5μm近辺しか通常使わず、他の波長では著しく効率が低下してしまいます。この波長の不一致を整合させるために、量子情報を保持したまま光の波長変換を行なう研究が盛んに行われてきました。そのような光波長変換器には、波長変換前後で量子情報を壊さないこと、様々な種類の量子メモリーに対応できるように広い波長領域で動作すること、の2点が重要です。これまでの研究において、通信波長から可視域への量子的広帯域波長変換、可視域から通信波長への量子的狭帯域波長変換、可視域から通信波長への非量子広帯域波長変換を行う量子インターフェースが実現されてきましたが、「可視域から通信波長への量子的広帯域波長変換」が最後の砦として残っていました。本研究では、周期分極反転二オプ酸リチウム(以下PPLNと呼ぶ)を用いて、光の差周波発生を利用して、「可視域(780nm)から通信波長(1522nm)への量子的広帯域波長変換」を実験的に実証しました。実験では、光パラメトリック変換によって

発生させた95%という高い忠実度を持つ可視域量子もつれ光子対を準備し、その一方の光子の波長を通信波長に変換しました。こうして得られた変換光子ともう一方の光子について忠実度を評価したところ75%という値が得られ、波長変換後も依然として高い量子もつれ状態を保持していることが分かりました。今後は忠実度の低下原因である雑音光子をより低減し雑音のない量子インターフェースを目指します。この成果は、*Nature Communications* 2, 537 (2011) に掲載されました。



## 4 シリコン中の電子スピンのコヒーレンス1秒以上を達成

**論文情報** Alexei M. Tyryshkin, Shinichi Tojo, John J. L. Morton, Helge Riemann, Nikolai V. Abrosimov, Peter Becker, Hans-Joachim Pohl, Thomas Schenkel, Michael L. W. Thewalt, Kohei M. Itoh, and S. A. Lyon, "Electron spin coherence exceeding seconds in high purity silicon", *Nature Materials* Volume 11, pp. 143-147 (2012)  
**関連URL** <http://www.nature.com/nmat/journal/vaop/ncurrent/abs/nmat3182.html>

慶應義塾大学理工学部  
伊藤 公平

半導体中の電子スピンのコヒーレンスは、母体半導体の高純度を追求し結晶性を高めたとしても、半導体を構成する安定同位体の核スピンの磁気揺らぎによって最長でも数μ秒程度しか得られていない。そこで母体半導体から核スピンを除きたいのであるが、自然が与えた同位体構成比の関係で、核スピンゼロの半導体を得られるのは実質的にダイヤモンド(炭素)、シリコン、ゲルマニウムに限定される。そこで筆者らはシリコン中の $^{29}\text{Si}$ 核スピンを50ppmまで減らした高純度 $^{28}\text{Si}$ 結晶を成長し、その中のリン不純物ドーピングを $10^{14}\sim 10^{16}\text{cm}^{-3}$ の範囲で系統的に変化させ、パルス電子磁気共鳴によるスピンエコーによりリンに束縛された電子スピンのコヒーレンスに対する温度およびリン濃度依存性を調べた。図1に示すのがスピン緩和時間( $T_1$ )とスピン位相緩和時間(コヒーレンス時間:  $T_2$ )の温度依存性である。図中の $10^{14}$ 、 $10^{15}$ 、 $10^{16}$ がリン濃度( $\text{cm}^{-3}$ )である。 $10^{14}$ と $10^{15}$ には●と★があるが、●が不均一拡散を排除した通常のスピンエコーの結果で、★はスピンエコー測定により生じるspectral diffusionというartifactを除去した結果である。すなわち★が目的としたコヒーレンス時間測定結果であり、最低濃度の $10^{14}\text{cm}^{-3}$ 試料で $T_2=2$ 秒が得られた。さらに $T_2$ の温度依存性を定量的に解析した結果、7K以上では縦緩和による位相情報の消失、5K以下では平均距離にして200nm以上離れたリン電子スピン間

の双極子相互作用、そして5~7Kの間では離れた2つのリン電子スピンのフリップフロップが他の電子スピンの位相緩和を誘発することを明らかにした。そこで1.8Kにおいて双極子相互作用を低減する電子パルス列を照射したところ $T_2$ が10秒まで延長された。すなわち、量子情報処理および局所磁場測定などの長い $T_2$ を必要とする応用において高純度 $^{28}\text{Si}$ 結晶の優位性が実験的に証明された。

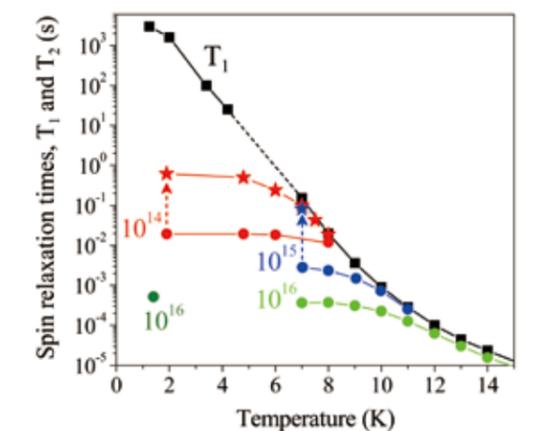


図1 スピン緩和時間 $T_1$ (■)とスピン位相緩和時間 $T_2$ (●、★)の温度依存性

# FIRST 量子情報処理プロジェクト全体会議2011

日程：平成23年12月13日(火)～平成23年12月16日(金)  
 会場：京都国際ホテル 二条の間1・2  
 主催：国立情報学研究所 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」  
 共催：理化学研究所 参加人数：162名

## 2011年全体会議に寄せて —このチャンスを活かそう—

国立情報学研究所／スタンフォード大学  
 中心研究者 山本 喜久

まだ若かった頃、国際会議で耳にした2人の研究者の何気ない言葉がその後の研究活動に少なからぬ影響を与えた。一人は、レーザーを発明し量子エレクトロニクスという分野を創出したCharles Townesである。研究者にとって一番大切なものは何ですか、という質問に対して、「PhysicsとEngineeringの間を行ったり来たりすること。どちらに片寄ってもいけない。」と答えていた。もう一人は、朝永振一郎、Julian Schwingerと共に量子電磁気学を確立したRichard Feynmanである。彼が量子コンピューターの講演を行った後、確かベル研究所の若い研究者からの質問であったと思うが、「あなたがコンピューターの話をするということは、物理学にはもうフロンティアはないということですか」と言った内容であったと記憶している。Feynmanの答えは「全ての物理の問題はつまるところEngineeringの問題ですから」であった。自分は、Physicistだ、Engineerだといって、そこへ逃げ込んでは何事も成し得ない、ということと理解した。

さて、我々は量子コンピューターを実現しようとしている。実際の量子メモリは必ず有限のデコヒーレンス時間で量子情報を失ってしまう。量子ビットのゲート操作には必ず回転角誤差が伴う。デコヒーレンスとゲート誤りのある現実のハードウェアを使って、誤りのない量子計算を実現する唯一の方法は、今のところ量子誤り訂正コードを用いた誤り耐性量子計算だけである。最近の検討結果によれば、現代コンピューターでは不可能な2048ビットの整数の因数分解を行う量子コンピューターに必要とされる量子ビット数は、 $\sim 10^9$ と見積られている。これは、誤り耐性しきい値の最も高い( $\sim 1\%$ )トポロジカル表面コードをゲート誤り0.1%(99.9%のゲートフィデリティ)のハードウェアで実装した場合の見積りである。デコヒーレンス時間の長短はこの値にあまり影響を与えない。もう一つの注目されている目標、量子化学計算に目を転じてみよう。<sup>2)</sup>やはり現代コンピューターの計算限界とされる基

底状態100からなる分子のエネルギースペクトル計算を行う量子コンピューターに必要とされる量子ビット数は、同じゲート誤り0.1%を仮定すると、 $\sim 5 \times 10^8$ と見積られている。

因数分解アルゴリズム、位相推定アルゴリズム、量子誤り訂正コード、誤り耐性しきい値定理、トポロジカル表面コードの発見、と我々の知識が遂にここまで到達したことを思う時、この20年足らずの間の量子情報科学の目覚ましい進展に疑いの余地はない。しかし、この検討結果の意味するところは、我々はまだengineering solutionからほど遠いところにいるという事実である。量子コンピューターを現実的な開発目標にするためには、画期的な量子誤り訂正コードが発見されるか、量子ビットの集積化とゲートフィデリティを大幅に改善する技術が開発されなければならない。決定的なブレークスルーはこの2つのミッションの中で起こるかもしれないし、全く別の処で起こるかもしれない。例えば、壊れやすい量子ビットを捨て多数の同一粒子を代わりに使う。ゲート誤りが起こりやすいユニタリ変換を捨て、非平衡開放系での相転移を代わりに使う。デリケートな粒子エンタングルメントを捨て、robustなモードエンタングルメントを使う。など。我々はわくわくするような刺激的な時代に入ろうとしている。戦国時代である。我々全員にチャンスが与えられている。人と違うことを考えよう!

<sup>1)</sup> N. C. Jones et al., arXiv: 1010. 5022 (quant-ph)  
<sup>2)</sup> I.Kassal et al., Annu.Rev.Phys.chem.62,185 (2011)



## 量子計測

サブテマリーダー  
 山西 正道  
 FIRST 量子情報処理  
 プロジェクト全体会議 2011

当サブテマでは6テーマの研究が進められており、各テーマの代表者より最近の成果について以下の内容で口頭発表が行われた。

### 「低ダークカウント検出器及び低消費電力中赤外光源の開発」

浜松ホトニクス 山西 正道

量子計測に必要な光検出器と中赤外域光源の開発を行っている。光検出器においては通信帯域の波長1.55 $\mu$ mにおいて、熱電素子を用いた低ダークカウント近赤外PMTモジュールの動作特性を示すとともに、より高速時間応答可能なハイブリッド光検出器の開発状況を説明した。発光素子においては、波長4.4 $\mu$ m帯の室温動作量子カスケードレーザーにおいて、周波数揺らぎ260Hzと極めて線幅の狭い光源が実現できていることを示した。分子の冷却や中赤外領域の波長の物差しへの利用が期待される。また $\Delta\lambda/\lambda_0 \sim 40\%$ という極めてブロードなゲインスペクトルを持つ中赤外量子カスケードレーザーの開発についても報告した。

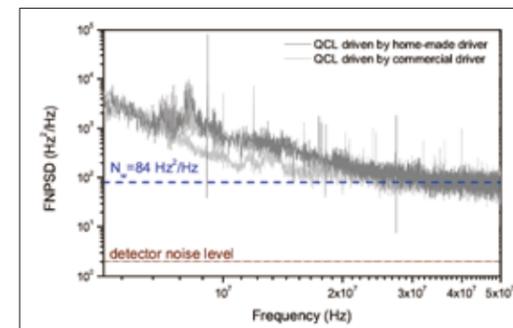


図 量子カスケードレーザーの周波数雑音スペクトル

た。電荷量子ビットの主なデコヒーレンス要因としては、電荷ノイズ、量子ドット-電極間のコトネリング効果、電子-フォノン散乱が挙げられる。今回は、電荷ノイズ低減のための低ノイズウエハーの作製とデバイス作製プロセスに依存したノイズの影響の検討を行い、また、コトネリングの影響低減に向けた量子状態の読み出し方法の検討を行った。

### 「光量子回路による量子サイバネティクスの実現と光量子計測」

北海道大学 竹内 繁樹

北大グループは、「対象物を通過する光子数を一定にした際に、古典限界を破る位相測定の実現」について研究をすすめている。今回の報告会では、具体的な将来の測定装置のイメージとして、微分干渉顕微鏡に光子数重ね合わせ光源を組み込んだ「もつれ合い顕微鏡」の構築と検証実験が報告された。実際に、100nmの段差をもつガラス板をサンプルとした実験により、もつれ合い光源を用いた方がより少ない雑音で段差を検出できることが示された。

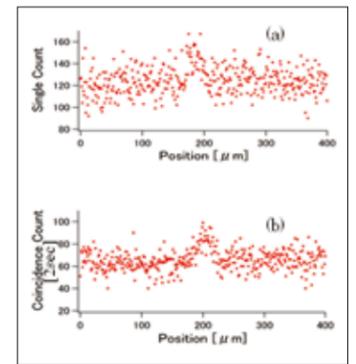


図 光子検出数を同一にした条件下での一軸操作の実験結果。(a)の古典位相顕微鏡に対して、(b)の量子もつれ顕微鏡の方が、雑音が低減している。

### 「ボース・アインシュタイン凝縮を利用した磁力計」

学習院大学 平野 琢也

学習院大学では冷却ルビジウム原子を用いた磁力計の開発を行なっている。今年度は、量子縮退したルビジウム原子集団に対して適用できる位相コントラストイメージング法の開発を進め、同一の冷却原子集団に対する複数回測定を実現した。また、交流磁場による原子スピンの制御手法を開発した。これらを組み合わせることで、BEC原子が磁場中で起こすラモア歳差運動を観測することに成功し、磁力計としての基本的な動作を確認することができた。

### 「超伝導チップによる原子干渉計を使った量子計測」

NTT 向井 哲哉

超伝導チップの強く安定な磁場を利用した単一モード導波路型の原子干渉計による、小型で高感度な量子計測装置の開発を目指している。今回は湾曲した原子導波路について考察し、昨年実現した数百kHzの閉じ込めポテンシャルの場合、基底状態の数倍の運動エネルギーでも、曲率半径が1 $\mu$ m程度までは、基底状態が保持できることを報告した。また、より自由度の高い導波路ポテンシャルの設計に関する報告も行った。

### 「表面弾性波フォノン共振器中の半導体量子素子」

東京工業大学 藤澤 利正

我々は、半導体量子素子の電子格子相互作用を積極的に活用するため、フォノン共振器中に置かれた電子状態に関する研究を行なっている。半導体表面に周期的金属構造を形成することにより表面弾性波フォノンの反射器や共振器を作製し、共振器中の量子ポイント接合におけるピエゾポテンシャルの時間応答を測定した。時間応答、周波数応答、空間分布測定などから、ブラッグ反射によるフォノンの禁制バンドの形成や、ブラッグ反射共振器の共振特性を明らかにした。フォノンに対する共振器量子電磁気学の効果を期待している。

### 「半導体ナノ構造を用いた量子計測」

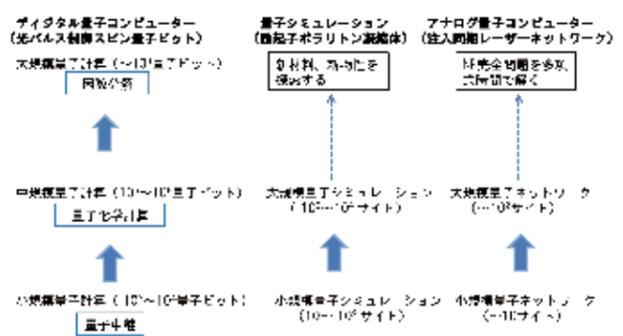
NTT 太田 剛

半導体ナノ構造を用いた量子計測に関して、一電子を含む半導体2重量子ドットを用いた電荷量子ビットにおけるコヒーレンス時間の伸長化を目的とした研究成果を報告し

## 量子情報システム

サブテマリーダー  
 山本 喜久  
 FIRST 量子情報処理  
 プロジェクト全体会議 2011

量子情報システムサブテマグループの研究を右図にまとめた。第1の柱は、半導体スピン量子ビットの光パルスによるユニタリ変換を用いた量子情報処理で、量子中継(量子ビット数 $10^3 \sim 10^4$ )、量子化学計算(量子ビット数 $10^5 \sim 10^6$ )、因数分解(量子ビット数 $\sim 10^9$ )などを目標にすえている。第2の柱は、励起子ポラリトンの動的凝縮相を用いた量子シミュレーションで、非平衡開放系での統計力学をターゲットとしている。第3の柱は、自己学習機能を持った注入同期レーザーネットワークを用いたアナログ量子計算で、3次元イジング問題をはじめとするNP完全問題を多項式時間で解くことを目標にしている。



当サブテマは、香取秀俊（東京大学）をリーダーとし、洪録雷（産総研）、小山泰弘（情通機構）をメンバーとして、各研究グループの保有する光格子時計の高精度化、遠隔比較、異種・同種の光格子時計の比較を行い、光格子時計の次世代原子時計としての技術基盤を構築する。今年度の全体会議では、これらの研究の進捗状況が報告された。

東大グループからは、光格子時計研究の現状と今後の実験の展望が報告された。2台の光格子時計の同期計測によりディック効果を同相除去し、観測原子数（ $\approx 10^9$ 個）で決まる量子射影ノイズ限界の安定度に迫った昨年度の成果は、多数原子を観測する光格子時計の設計思想の実証として大きな意義をもつ。このディック効果は、周波数ノイズがあるレーザー光による不感時間を伴う周期的な周波数計測に起因するため、2台の光格子時計を交互運転し周波数計測をシームレスに行い不感時間を無くせば、ディック効果を本質的に排除することができる。これは時計の不感時間無し運転（No dead time operation）と呼ばれ、20年以上前のディック効果の議論と同時期に提案されている。この手法を採用すれば、光格子時計の安定度は、サーボ・アタック時間（ $t_a \sim$ 数秒）から $1/\tau$ （ $\tau$ は平均時間）で改善し、量子射影ノイズ限界の $1/\sqrt{\tau}$ に到達する。例えば観測原子数 $10^9$ 個、時計レーザー安定度 $0.8 \times 10^{-16}$ を仮定すれば、このクロスオーバーは平均時間 $\tau \approx 200$ 秒で生じ、このときの安定度は $2 \times 10^{-18}$ に達する。

このような時計精度ではSr原子の室温の黒体輻射シフト（約2.4Hz）が不確かさを支配する。これを改善するため、Sr原子を囲む壁面の温度を70K程度に冷却する低温光格子時計の開発を進めている。一方、黒体輻射シフトの感度は観測する原子種を選ぶことによっても低減し、（Srに比べ黒体輻射シフト感度が1桁以上低い）Hg原子を使えば室温動作でも黒体輻射シフトによる不確かさを $10^{-18}$ のレベルに抑えることができる。現在、Hg、Sr原子を用いた連続運転光格子時計の開発が進行中であり、数百秒で $10^{-18}$ の周波数不確かさでの異種原子時計比較を目指している。

産総研グループからは、光時計による秒の再定義への道筋、Yb及びSr光格子時計の開発の進捗状況、狭線幅化レーザーと光周波数コムについて報告を行った。Yb光格子時計においては、昨年度に行った原子数の規格化による原子スペクトル信号対雑音比の向上を利用し、時計遷移レーザーの周波数安定化に成功した（図1）。Sr光格子時計においては、その第二段階の原子冷却である赤色磁気光学トラップを観測した。また、光格子によるSr

冷却原子の捕獲にも成功し、Sr光格子時計の周波数計測及びSr/Yb光格子時計の周波数比の精密な決定を目指している。光周波数コム及び時計遷移レーザーの開発においては、高速制御可能なファイバ型光コムを開発し、これを利用した578nm Yb光格子時計の時計遷移レーザーと1064nmの狭線幅化レーザーとのビート周波数測定では、時計遷移レーザーの線幅が2.5Hz以下であることを確認した。

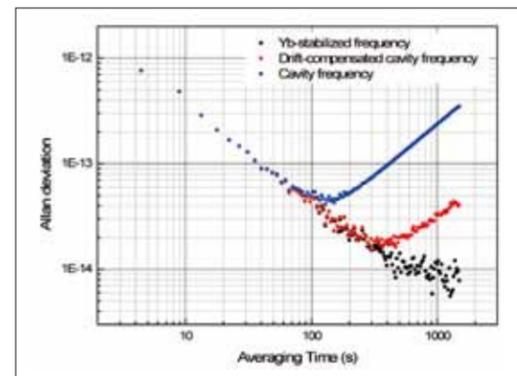


図1 光周波数コムによる時計遷移レーザーの安定度評価

情通機構グループからは、Sr光格子時計の開発の進捗状況と、光ファイバを経由した比較により、東京大学のSr光格子時計との同一性の検証に16桁の不確かさで成功したことについて報告がされた。Sr光格子時計の開発では、単イオン捕獲型光周波数標準用に開発した安定化レーザーを光周波数コムを介して参照することで、異波長スレーブクロックレーザーによる原子時計動作を実現し、トータル周波数の不確かさとして $5 \times 10^{-16}$ を得た。光ファイバ比較システムでは、徹底したノイズキャンセリングの追及とキャリアの偏波トラッキングの自動化を行った結果、東京大学のSr光格子時計と $7.3 \times 10^{-16}$ の不確かさの範囲内で生成される周波数が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た。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ある。

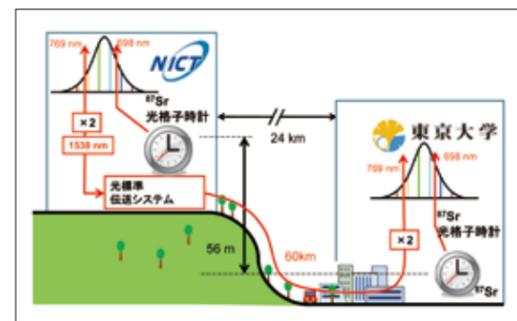


図2 2地点における光格子時計の周波数比較実験

当サブテマでは、井元信之（大阪大学 教授）をサブテマリーダーとし、佐々木雅英（情報通信研究機構）、古澤明（東京大学 教授）、小坂英男（東北大学 准教授）をメンバーとして、量子もつれを利用した多者間情報処理の提案と実現をめざし、そのブレイクスルーとなる要素技術の実証を行う。今年度の全体会議では前回のように網羅的になりすぎないようポイントを紹介する形で発表した。

1. 量子通信の基本である量子もつれ配布を雑音と損失の存在下で行う研究に進展があった。まず雑音の主要因である位相雑音をDFS (Decoherence-Free Subspace: デコヒーレンスに感じない部分空間) へのエンコード・デコードにより除く研究については、これまで効率低下を光透過率の二乗にとどめる方法まで達成できていたが、今回一乗（原理的にこれ以上はない）まで達成する方法を提案し実証実験を行った。また損失については、大多数の量子メモリがread/writeに用いる可視光では光ファイバ損失が甚大なため、波長変換の研究が行われて来た。これまで先行研究として量子情報を保持する通信波長→可視光への変換、保持しない可視光→通信波長の変換、保持するが狭帯域な可視光→通信波長の変換があったが、最後の砦として残っていた「量子情報を保持する広帯域な可視光→通信波長の変換」の実証実験に成功した。これにより量子メモリ使用に必要な量子的波長変換のラインナップが揃った。

2. 量子暗号の現状と課題、及び低電力・大容量化に向けた量子通信に関する取り組みの現状を報告した。量子暗号の現状として、波長多重を用いた最新のQKD装置について紹介し、中長期課題として数10km圏のクラスター群とそれらを結ぶハブと太いリンクからなるスケラブルなマルチユーザネットワークのアーキテクチャとノード技術について議論した。QKDクラスターは、全光ノードによるトランスパレントなネットワークで構成し、ハブには波長多重-QKD装置を設置して、太いリンクを支えデータセンターのように必要なコストをかけて運用することで、最小のコストで実用的な量子暗号ネットワークを構築できると期待できる。また、装置に不完全性があっても量子効果で無条件安全性を保証するDevice independent QKDの研究動向を概説した。これは現代暗号とは決定的に異なる量子特有の質的に新しい点で量子暗号の新しいフロンティアである。

低電力・大容量化に向けた量子通信に関して、最新理論を用いて光ファイバ通信系及び、深宇宙通信での光空間通信系の通信方式の比較検討結果を報告した。大まかには、電力制限がさほどきつくない光ファイバ系では多値コヒーレント伝送で周波数利用効率を上げるのが有利で、電力制限がきつい深宇宙光通信や悪天候下での光空間リンクではパルス位置変調によりエネルギー利用効率を上げるのが優位であることが分かった。後者は、災害時

等のアドホックな大容量光リンク等で重要な技術になると予想される。最後に、アレイ型の高時間分解能の超伝導ナノ細線光子検出器の最新結果と量子受信器の実証実験についても紹介した。

3. 前回報告したように、量子版コヒーレント光通信として、1997年に佐々木らによって提案された量子最適受信機を用いたものがある。ここで、量子最適受信機とは、レーザー光線の状態であるコヒーレント状態にコードされた情報を、量子操作により状態変換してから測定することにより、古典的通信容量の限界であるシャノン限界を破って情報通信を可能にするものである。量子最適受信機では、コヒーレント状態の状態変換（量子情報処理）を行うことから、連続量の量子情報処理が非常に重要である。

前回、その取り組みの一環として、位相反転したコヒーレント状態の重ね合わせ状態であるシュレーディンガーの猫状態の量子テレポーテーションについて報告した。今回は、その手法を応用した非ガウス型状態のスクイズ操作について報告した。この手法は量子テレポーテーションの量子回路において、補助入力としてスクイズド光を用いるものとなっている。

量子テレポーテーション回路を用いた量子情報処理のうち1つの例として、3次位相ゲートの実現を目指している。ここで、3次位相ゲートとは、古典コンピューターにおけるNANDゲートのように、ユニバーサル量子ゲートの1つである。3次位相ゲートは、量子テレポーテーション回路の補助入力として、3次位相状態を用いれば良いことが知られているが、我々は3次位相状態の生成を変位操作と光子検出を用いて試みている。その現状について報告した。

高安定性、省スペース化を目指して、光導波路回路を用いて量子回路の作製を行っている。今回、1チップの光導波路回路を用いて、量子エンタングルメントの生成と検証に成功したことを報告した。

4. 量子情報通信の長距離化に欠かせない量子中継器の実現に向け、伝送媒体である光子の量子状態をメモリー媒体となる固体中スピンの量子状態へと転写する量子メディア変換の方法を研究している。今回の発表では、まずは量子中継器の基本構成要素と各要素のさまざまな実現法について整理し、具体的な物理系の候補をまとめた。次に、特に量子メモリー時間を優先する場合に最有力候補となる、ダイヤモンドのNV中心を用いた量子系の研究現状を紹介し、これを用いた光子から核スピンへの量子状態転写のアイデアについて概要を紹介した。さらに、高い変換効率を優先した場合に最有力候補となる、半導体励起子を用いた量子系の現状を紹介し、この場合に克服すべき課題となる縮退A型準位の不要な新たな転写機構として、独自のタイムビン量子状態転写の手法を紹介し、その実験成果を詳細に報告した。

当サブテームでは、高橋義朗(京都大学 教授)をリーダーとし、五神 真(東京大学 教授)、占部伸二(大阪大学 教授)をメンバーとして、アナログ量子コンピューターおよび量子シミュレーターに関する研究を展開している。当サブテームは、高度な量子制御が可能ないくつかの量子多体系を実験対象として、ハバードモデルや量子スピンモデルなどの、凝縮系の中でも特に強相関系の物理として重要な問題について、量子シミュレーションを実行することを目的としている。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。

高橋グループでは光格子中の冷却原子を用いてハバードモデルの量子シミュレーションを行っている。主な研究成果として以下の報告を行った。

まず、3次元光格子中のYb原子ボース凝縮体について、その超流動-モット絶縁体転移における、超狭線幅光学遷移の高分解能レーザー分光スペクトルを詳細に調べること成功した。これは、従来の物質波干渉を用いた方法よりも豊富な情報を含んでおり、特に有限温度での量子臨界現象についての研究に応用できうることを議論した。

また、スピン6成分をもつYbフェルミ同位体を3次元光格子に導入し、ボメランチュク冷却として知られる冷却法がこの系で有効に機能して、超低温の原子系である6成分モット絶縁体が実現できていることを、2重占有率測定、光格子強度変調分光法、および高温近似を用いた理論計算などにより明らかにした。特に、2成分と6成分の系を実験的に比較することでスピン自由度が本質的に重要な役割を演じていることを明らかにした。さらに、この系が、量子磁性の観測に極めて有望であることを議論した。

最後に、Yb原子の光超格子を実現したことを報告し(図1参照)、今後、これを用いて様々な興味深い格子系を研究することが可能であることを報告した。

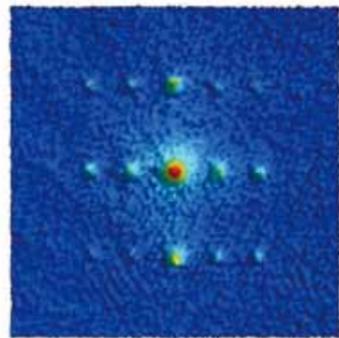


図1 Yb原子ボース凝縮体の光超格子からの多重物質波干渉。

次に、占部グループは、イオントラップ中の冷却イオンを対象として、ボースハバードモデル、イジングモデルの量子シミュレーションを行っている。主な研究成果としてCaイオ

ンを用いた以下の実験結果を報告した。

まず、幾何学位相制御による単一キュービットゲートの実験的な実現について報告し、次に、RFドレスト状態とMSゲートの組み合わせによるデコヒーレンスフリーな量子もつれ状態の発生について報告した(図2参照)。そして、最後に、量子シミュレーションに向けた横モードフォノンのホッピングの観測および新たに開発した横方向二重ポテンシャル構造を持つプレーナートラップへのイオンの捕獲について詳細に報告を行った。

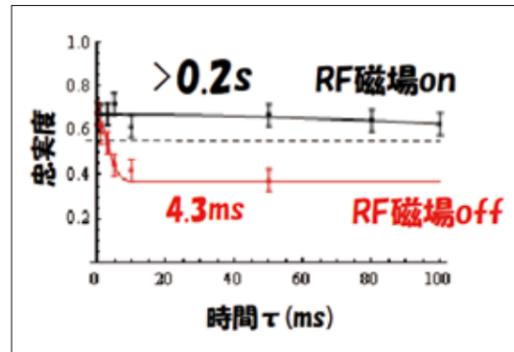


図2 RFドレスト状態とMSゲートの組み合わせによる量子もつれ状態発生の実験結果。図の黒線はデコヒーレンスフリーな量子もつれ状態のコヒーレンス時間の測定結果(A.Noguchi et al., to appear in PRL)。

最後に、五神グループは励起子BECなどの固体電子系およびその光との結合系(ポラリトン)の量子多体系を対象として、その物性解明と量子シミュレーションを行っている。主な研究成果として、バルク半導体励起子系の安定なBEC相の実現・観測に向けた最新の研究成果を中心に紹介を行った。励起子間衝突による励起子消失レートの定量的な評価結果に基づき、ヘリウム3冷凍機及び希釈冷凍機を用いて励起子のサブケルビン領域への冷却を行った。その結果観測された、トラップしたスピン禁制励起子のBEC転移を示唆する閾値的な緩和爆発現象について解説を行った。(図3参照)

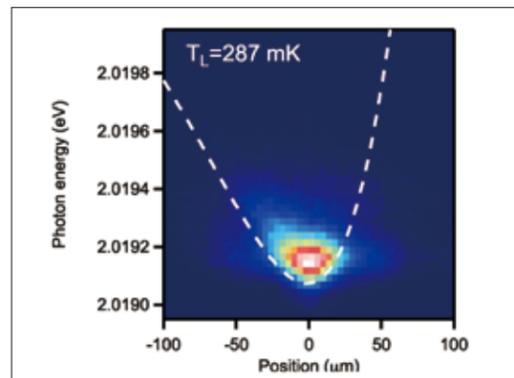


図3 0.8ケルビンに冷却された酢酸銅におけるスピン禁制励起子の空間分解スペクトル

当サブテームでは、物理的量子デバイス系を都倉康弘(NTT物性科学基礎研究所 研究部長)、Franco Nori(理化学研究所チームリーダー)、小川哲生(大阪大学教授)、また量子システムを小芦雅斗(東京大学教授)、根本香絵(国立情報学研究所教授)、Rodney Van Meter(慶應義塾大学准教授)をメンバーとして理論研究を展開している。物理現象、デバイス技術に基盤をおくボトムアップ的アプローチと、システム・アーキテクチャーから出発するトップダウン的なアプローチの両面を持ち、実験グループとの密接な連携をしながら目的達成を目指している。今年度の全体会議で各担当者が紹介した最新の研究概要と今後の計画の概略を述べる。

1. 根本は、量子システム性能を評価する為の因子を階層的に整理した。特にトポロジカル量子計算によるショアのアルゴリズム実現に関して最近の検討結果を紹介した。また確率的なゲートと決定的ゲートを組み合わせたハイブリッド系の可能性も検討し、その一例としてダイヤモンドNV中心と超伝導磁束量子ビット系に関する最新の成果を紹介した。Van Meterは、lattice surgeryと呼ばれる、プレーナサーフェスコードの一種を提案した。このプロトコルは比較的少ない数の量子ビットを用いた実験に向いている。具体的に53個の物理量子ビットを用い、各論理キュービットに対する一つのX, Zエラーから完全に保護されているdistance 3 code制御ノットの構成を説明した。(図1) また昨年2月に行ったサーフェスコード量子誤り訂正に関するチュートリアルビデオによる提供も紹介した。小芦は、差動位相シフト量子鍵配送プロトコルの安全性証明に関して研究の進展を報告した。この問題に関してはまだ解決が得られていないが、Mパルス中に単一光子が存在する場合の無条件安全性は与えられている。今回その光子数を増やした場合について検討を加えた。

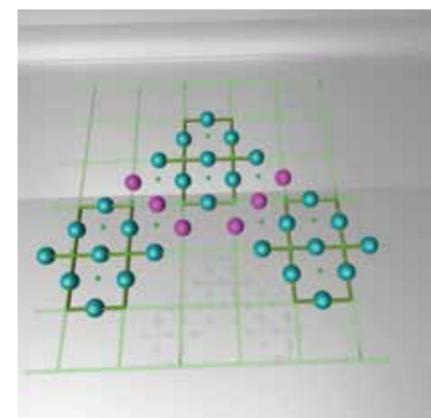


図1 Lattice surgeryによる制御NOTゲートの構成(Horsman et al., arXiv: 1111.4022v2 [quant-ph])

2. Noriは、超伝導量子ビットの研究に関して最近の成果を紹介した。特に、人工原子としての超伝導量子ビット回路がマイクロ波領域の光子と相互作用する事により期待される過程、波長変換、電磁誘導透明化、レーザー発振、冷却等を解析した。また最近の光格子中の冷却原子やイオントラップ、超伝導量子ビットや半導体スピン量子ビットからダイヤモンドNV中心まで、それらのハイブリッド系も含め比較検討した。(図2) 小川は、光子と電子/正孔系が結合した系で物質系を用いた光子の完全制御を目指して研究を進めている。特に、非平衡レーザー物理を記述するマックスウェル半導体ブロッホ方程式と、ポラリトン凝縮平衡系を記述するBCS理論でのギャップ方程式をつなぐ理論を提案している。この理論はそれぞれ高温極限と、位相緩和やキャビティモードの緩和が無視でき、かつ低温の極限で従来の記述と一致する。都倉は、半導体電子スピン量子ビットで量子ビットコヒーレント操作と交換相互作用を用いたSWAP操作を初めて組み合わせる事に成功した成果を報告した。また量子ドット中のスピン・軌道相互作用のゲート制御に関する研究成果を述べ、高速のスピン操作の可能性を明らかにした。

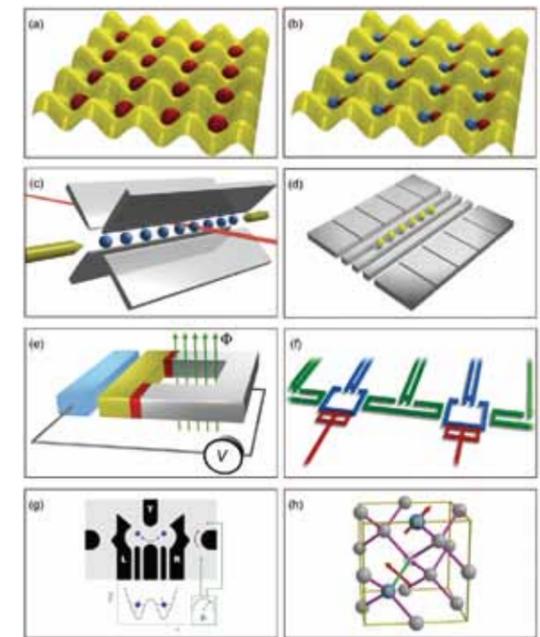
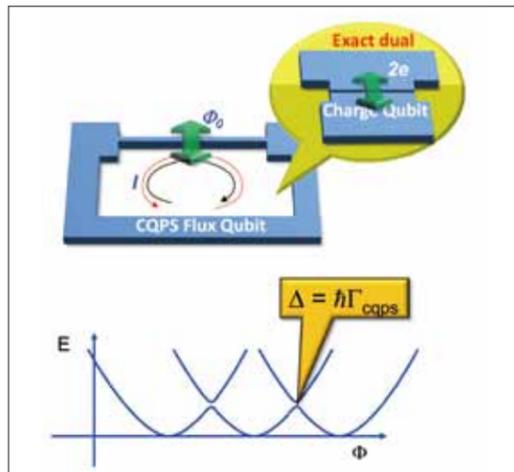


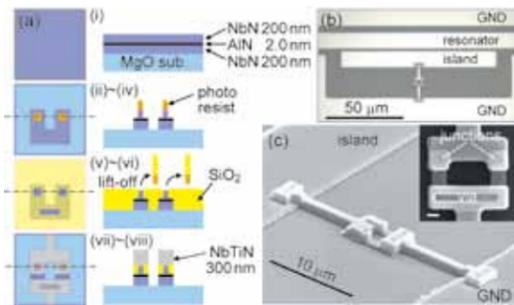
図2 現在量子計算実現の為に検討されている主要な量子ビット(I. Buluta, S. Ashhab, F. Nori, Natural and artificial atoms for quantum computation, Reports on Progress in Physics 74, 104401 (2011). [PDF] PDF is located here: [http://dml.riken.jp/pub/nori/pdf/RepProgPhys.104401\\_2011.pdf](http://dml.riken.jp/pub/nori/pdf/RepProgPhys.104401_2011.pdf))

理研チームは、高い常伝導抵抗 ( $R_0=1.7k\Omega$ ) を持つ超伝導細線を使った新規の量子ビットを作成し、その分光実験から、コヒーレント量子位相スリップ (CQPS) 現象を突き止めた。これはジョセフソン効果と完全に双対な効果で、超伝導細線を量子磁束がコヒーレントにトンネルする現象である。超伝導細線には  $\text{InOx}$  薄膜を使い、線幅は約  $40\text{nm}$  であった。この効果の応用に一つとして、現在まだ存在しない量子電流標準の実現が期待される。(蔡)



コヒーレント量子位相スリップ細線を含む磁束量子ビット、と完全にその双対である電荷量子ビット (上図)。そのエネルギーバンド (下図)

理研チームは更に以下の発表を行った：①超伝導磁束量子ビットと超伝導共振器の間のキャパシタを介した強結合を実現し、非常に大きい分散シフトおよび離散化した交流シュタルクシフトを観測した。今後、量子ビットの読み出しなどに応用する予定である。②超伝導量子ビットにおけるデコヒーレンスの要因を解明・抑制するためのひとつのアプローチとして  $\text{NbN}/\text{AlN}/\text{NbN}$  のエピタキシャルジョセフソン接合を用いた量子ビットを実現し、 $T_1 \sim 0.5\mu\text{s}$  のコヒーレンス時間を観測した。今後、製膜やプロセスのさらなる改善を目指す。(中村)



(図a)  $\text{NbN}/\text{AlN}/\text{NbN}$  エピタキシャルバリアを持つ量子ビットの作成プロセス  
(図b) 共振器と容量結合した量子ビットの写真  
(図c) 量子ビットの SQUID 部の電子顕微鏡写真

NTT チームは、「ダイヤモンド中の電子スピン集団と超伝

導磁束量子ビット系で観測されたコヒーレントな量子結合」と題して Nature 誌に発表したハイブリッド量子システムの可能性を報告した。置換窒素 約  $100\text{ppm}$  を含むダイヤモンド単結晶にイオン注入とアニール処理で得られた NV (窒素空孔複合中心) スピン集団を超伝導磁束量子ビットの上に設置して両者に強結合条件をつくり、およそ数十ナノ秒続く、マイクロ波 ( $2.88\text{GHz}$ ) エネルギー量子1個の交換振動の観測に成功した。今後メモリー時間を改良する必要があるが、ダイヤモンドの NV スピンが、高速量子プロセッサ候補である超伝導量子ビットの性能を補完する量子メモリーとして有望であることを示す結果と考えられる。(仙場)

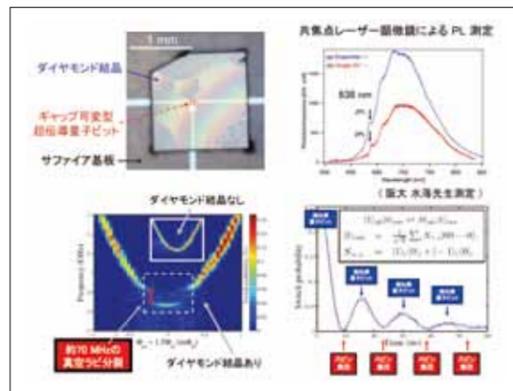


図 左上：磁束量子ビットの上にダイヤモンド結晶を載せた測定試料  
右上：単一 NV 中心 (赤)、測定に用いた試料 (青) のフォトルミネッセンス スペクトル  
左下：磁束量子ビットのスペクトル ( $70\text{MHz}$  の真空ラビ分裂から強結合を確認)  
右下：真空ラビ振動 (磁束量子ビットと NV スピン集団の間で1個のエネルギー量子を交換)

ISTEC と AIST チームは、両者が連携して実施しているアルミニウムを用いた超伝導量子ビットの集積化プロセス開発について報告した。はじめに、東日本大震災による研究遅延と研究設備の復旧状況を報告した。次いで、アルミ微小接合の最初の試作プロセスの結果、明らかになった問題点を述べ、これらの結果を反映したプロセスの改良とテスト接合用マスクの設計を報告した。これまでの成果として、改良版プロセスにおいてレジストスリミング技術などを導入することにより、左下の図のような直径  $50\text{nm}$  以下のアルミピラー構造を作製できることなどを報告した。(日高；前澤)

Design	200nm	150nm	120nm	100nm
after EBL/dev	189nm	132nm	91nm	56nm
after slimming (ashing)	171nm	114nm	71nm	41nm
after RIE	168nm	109nm	64nm	33nm

図 レジストスリミング技術を利用して作製したアルミナピラー

当サブテマでは、樽茶清悟 (東京大学 教授) をリーダーとし、伊藤公平 (慶應義塾大学 教授)、北川勝浩 (大阪大学 教授)、工位武治 (大阪市立大学 教授)、森田靖 (大阪大学 准教授) をメンバーとして、「拡張性のあるスピン量子コンピューター、及び超伝導系・光子系量子ビットとの結合を制御する量子インターフェース」の研究を行っている。

樽茶チームは新しい GaAs 系 2 重量子ドットを用いて、ラビ振動の高速化、局所ゼーマン磁場の電氣的制御 (図 1) を実現し、それを利用した高速 Z ゲート、CPHASE を提案した。また、量子ビット系の新しい拡張法として、表面弾性波を利用した遠隔量子ドットの単一電子輸送に成功し、これが遠隔ドット間での量子もつれの実現に有用であることを示した。このほか、InAs ドットを用いた g テンソルの電氣的制御、Si/SiGe 系 2 重量子のドットの実現を報告した。量子インターフェースに関しては、2 重量ドットの共鳴トンネルの単一ショット測定を利用した忠実度の高い単一光子-単一電子変換に成功した。

伊藤チームは核スピンを排除した  $^{28}\text{Si}$  高純度同位体結晶を準備し、その中に添加されたリン電子スピンのコヒーレンス時間が 1 秒以上にのぼせることを実験により示した。この成果は、本ニュースレターの「最近の研究成果」欄で紹介されている。また、シリコン中の酸素-空孔における電子スピン三重項欠陥と  $^{29}\text{Si}$  核スピンの相互作用を利用して、 $^{29}\text{Si}$  核スピんに量子情報を読み込み操作することに成功した [Phys. Rev. Lett. 印刷中]。

北川チームは量子ビットを個別に古典系で制御すること起因する問題を回避して

スケラブルな量子コンピュータを構成する方法として、量子ビットを少数の古典系で包括的に制御しながら、射影測定なしで量子誤り耐性をもたせる新しいアーキテクチャを提唱した。高利得を実証した広義のスピン増幅 (図 2 (c))

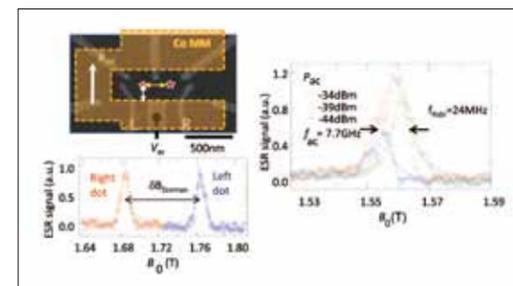


図 1 局所ゼーマン磁場の電圧制御用 2 重量子ドット。新デザインの微小磁石による高速スピン回転 (EDSR 幅で  $24\text{MHz}$  相当) と大きいゼーマン磁場勾配 (ドット間最大  $100\text{mT}$ )。

に基づいて、被測定スピンを量子非破壊測定する真のスピン増幅 (図 2 (d)) を実現する分子と量子回路構成法を提案した。さらにスピン増幅の高速化を提案した。

工位チームは極低温において、巨視的な超伝導回路量子ビットと結合できる微視的な量子スピンアンサンブル系の分子設計法を量子化学的に確立し、実際に基底三重項有機分子を設計・合成し、室温・空気中でも安定な物質として単離した。これらの開殻系分子系のスピン物性の素性を実験的に解明し、超伝導量子ビットと結合できるスピン機能を備えていることを示した。また、化学量子シミュレータの探索 (佐藤)、部分からスピネットワーク全体を同定する理論的試み (丸山) などを発表した。

森田チームは、分子スピン量子ビットを具現化するために、精密有機合成化学と物性有機化学を基盤として、各種の有機分子の設計と合成を行っている。電子スピン系においては、空気中でも安定なニトロキシドラジカルに同位体元素を導入したモノラジカルや、g-/A- テンソルエンジニアリングを施したビラジカルを合成した (図 3)。また、Lloyd's 電子スピン量子ビットの実現に向けて、三重らせん型金属錯体の合成と磁氣的希釈単結晶化も行った。さらに、核スピン増幅を行うために、位置選択的に同位体元素を組み込んだ閉殻型  $\pi$  共役系有機分子の合成も行った。

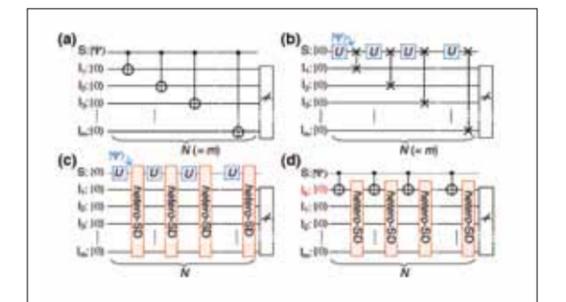


図 2 スピン増幅量子回路。(a) 真のスピン増幅、(b) 広義のスピン増幅、(c) と (d) は (b) と (a) のスケラブル版。

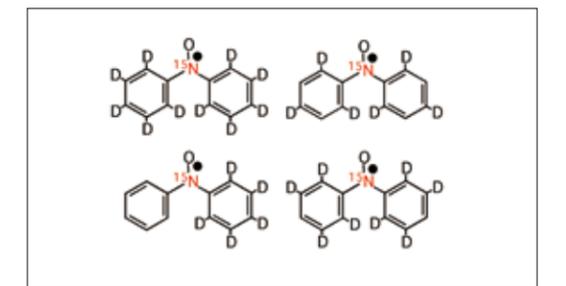


図 3 同位体ラベル有機分子ラジカル。分子スピン量子ビットに向けて合成した位置選択的に重水素原子を導入した各種  $^{15}\text{N}$ -標識ジフェニルニトロキノン誘導体。

## アドバイザーのコメント



### 2012年の初夢

アドバイザー：上村 洸（東京理科大学）

「全体会議2011」に出席して、各サブグループとも、量子コンピューターの開発、或いはそれに関連する諸問題の発展・解決を目指して、興味ある研究を推進されている報告を伺い、心からの敬意と深い感銘を受けました。他方、会議中に、「量子情報処理プロジェクト全体が、一丸となって目的を達成しようとするスキームになりつつあるのか」との総合科学技術会議による中間評価の紹介を伺い、同じ懸念を持ったことも事実です。この懸念の解決策を思案していて、以下の思いに至りました。19世紀最後の頃、多くの物理学者が、新しい物理学の誕生につながるかもしれないという好奇心から、溶鉱炉の中の光のスペクトル分布の実験に強い興味を持ちました。RayleighとJeansは、エネルギー等分配の登山道を登って長波長側のスペクトル分布を説明しました。Wienは、炉の中の電磁波を分子のように振舞うと考えて、マックスウエルの速度分布則を適用する登山道を開き、短波長側のスペクトル分布の振る舞いを説明しました。他方、Max Planckは、高いところからこれら

の登山道を俯瞰的に眺め、両者を融合した式を導き、一つの定数の値（プランク定数 $h$ ）を調整して、全波長領域で実測のスペクトル曲線を正確に再現する公式を導きました（1900年）。この結果から、「炉の中の振動数 $\nu$ をもつ固有振動のエネルギーは、 $h\nu$ の整数倍の値しかとることができない」という、当時の古典物理学では得られない画期的な結論を得て、「エネルギー量子」の存在を発見し、量子力学という学問体系への道を開きました。

「量子情報処理」プロジェクトの研究においても、「量子コンピューター」という山頂を目指して、各自が新しい登山道を開拓するべく研究を進めていますが、将来、何方かが、登山道を辿らずに、高所からすべての登山道を俯瞰して、新しい画期的な概念、方法論、実験手段を発見し、量子コンピューターの完成を祝う日が来ることを願っています。終わりに、2012年の皆様の益々のご活躍を祈念して、Isaac Newtonの言葉「If I have seen a little further, it is by standing on the shoulders of Giants.」を贈ります。



### 感想

アドバイザー：清水 富士夫（電気通信大学）

全体会議が基礎科学に関する大きなプロジェクトで通常行われる報告会の一つと捉えるなら、会場の選定、会議の運営からプログラムまでよく計画され、スムーズに運営されていたし、各研究グループの研究発表もそれなりの進展がみられ、会議は成功したと言える、グループ間の研究協力も密接であり、グループによっては引用ランクの高い雑誌に数多くの論文を発表しており、評価委員にも十分満足してもらえと思われ。

ところで、このプロジェクトに研究費が割り当てられているのは「量子計算機」実現に向けた工学的目標があったからではないだろうか。過半数のメンバーがこの方向の研究を進めているが、実現への展望が開けてきたと言えるだろうか。そもそも量子計算は現在使われている「二値の演算素子」を任意の「ユニタリ演算素子」で置き換

えれば何ができるか、という科学的興味から始まったことで、原理的に実現可能な工学的課題として考案されたものではない。90年代にShorによって、素因数分解を多項式時間で解けるという理論が出たおかげで世間の注目を引き、多額の研究費が支出されるようになった。そのほかにも科学的に面白い研究成果が多数発表されている。しかし、これらの成果に何を補えば「量子計算機」ができるのか、秩序だった論理的議論がなされているだろうか。もし、量子計算機を作ることを目標とするのなら、ここで一度、もっとも基礎的な事項から始めて、何が要求され、何が解決され、何が残された課題かについて論理的に厳密な議論をする場を作るのはいかがでしょうか。

## 若手研究者の声

NTT 物性科学基礎研究所 量子物性研究部 量子光制御研究グループ ポストドク 丹治 はるか

私がFIRST量子情報プロジェクトの会合に参加させていただいたのは昨年の夏期研修会に続いて今回が2度目で、全体会議としては初めてでした。「量子情報処理」という大きなくくりで研究者が一堂に会したため、テーマが多様であったことが印象的でした。発表内容は、量子情報理論から、様々な物質系を用いた量子計算・通信技術の実験的研究、光や物質の量子的性質を用いた精密測定や量子標準、そして量子情報技術に用いるための高感度検出器の開発や分子の化学合成に至る、非常に多岐に渡ったものでした。興味深い最新の研究成果が数多く報告されており、大いに刺激を受けました。その中で、スピン増幅の実験とそれに用いる分子の合成といった形で、従来の分野の枠組みを超えた研究協力も行われているということを知り、量子情報処理の分野の奥行きを感じました。全体会議は、

実際の内容が自分の研究に近くても、物質系が異なるというだけの理由で通常の学会等では聴く機会が限られてしまうような講演が聴ける、貴重な機会でもあると思います。

テーマが多分野に渡るこのような会議の魅力は、自分にとっては専門外の疑問に答えてくださる専門家の方々が会場に沢山いらっしゃるのだと思います。定例会議という形で、多様な研究者の方々と継続的に会いして議論できるという経験は、私たち若手研究者にとってかけがえのないものです。また、個人的には、夏期研修会で出会った同世代の方たちと再会して交流が深まったことも大きな収穫でした。

最後になりましたが、非常に有意義な会議を企画・運営くださった先生方ならびにスタッフの皆様、本当にどうもありがとうございました。

京都大学 量子光学研究室 ポストドク 井上 遼太郎

京都で開催されたプロジェクト全体会議2011に参加させていただき、日常の研究活動では得がたい貴重な経験の機会をいただきました。全体会議の場を私たちにも開放して下さっている先生方に感謝いたします。グループを率いる先生方からの成果発表は大変刺激的で、自身の進めている研究やその立ち位置を見つめ直す良い機会をいただいていると感じています。

毎年の全体会議は、私たちにとって、サマースクールや学生チャプターで得た仲間たちと最新の結果を持ち寄り、自由に議論できる舞台としても機能しています。「量子情報処理」という大きな背景のもとに集まった私たちですが、扱う物理系が多岐にわたるために、議論の中で自分の扱う系での常識が通用しないケースに直面することが多々あります。分野を異にする相手と議論できる機会は、日ごろとは異なる視点からの指摘や質問が飛び交う点で、大変貴

重なものであると実感しています。深夜の"informal meeting"でも、つつい研究やアウトリーチ活動の話題で盛り上がりすぎてしまうようで、各所で交わされていた白熱したやりとりが印象的でした。

今回の全体会議では、真に実用的な量子情報処理技術—特に量子計算機—の開発へ向けた道のりがいかに険しいものであるかが強調されているように感じられました。学生をはじめ若手の研究者も含めて、その問題意識の共有は十分になされているように思います。同時に、若干の閉塞感をおぼえていることも否めませんが、仲間たちとの切磋琢磨を通じてブレイクスルーを実現したいとの思いを新たにさせられる有意義な場であったのではないのでしょうか。次回もまた、新しい成果を持って会議に参加できるよう、日々の研究に励みたいと思います。



## SSH青森県立三本木高等学校附属中学校での出張授業

■実施日 2011年10月11日(火) ■対象 青森県立三本木高等学校附属中学校 3年生 71名  
 ■授業名 「量子の不思議を体験してみよう」 ■担当者 向井哲哉 (NTT 物性科学基礎研究所)

「世界には不思議な事が沢山あって、その理屈がわからず、とても楽しい。また、その知恵で未来をちょっと良くできたら、どんなに素晴らしいだろう。」企業研究者のささやかなメッセージを携えて、青森県十和田市にある、県立三本木高等学校の附属中学校を訪れました。オープンハウス等の研究所公開のイベントでは、大学院生を相手に冷却原子について話すことはあるが、今回の対象は中学3年生。しかも内容は「量子」と決まっているので、さてどうしたものか。物質波や原子干渉の説明はどうだろう。レーザー冷却を説明すると主題が曖昧になるか。欲張って消化不良に終わるより、少しのことで「不思議」であると感じる事と、それが「わかった」という感動を味わってもらいたい。あれこれ考えた末に、やはり「光」に話題を集中させることに決めた。

授業は1クラス約40名を対象に100分間。午前と午後の2クラスを担当。自己紹介を兼ねて、ドイツ人大学院生と実験をするビデオを見せ、研究という職業に国際的で明るい印象を与えつつ授業を始める。まずは、手作り感満点のMach-Zehnder型干渉計で干渉縞を見せ、光の波動性を十分に確認させる。その後、光子数計測による光の粒子性を示す実験

結果を見せる。直感に反する「量子」の世界を学生同士に議論させ、各グループから意見を出し合った後に、種明かし。このようなグループ討論を繰り返しながら、量子相関光子対と量子テレポーテーションまでを説明して授業終了。

アンケートの結果から、科学的な事を考えて知る楽しさは伝わったようである。中学生達の溢れんばかりの好奇心に触れて、普段とは違う清々しい気持ちになれた一日でした。

[NTT 物性科学基礎研究所 向井 哲哉]



## SSH青森県立三本木高等学校での出張授業

■実施日 2011年10月20日(木) ■対象 青森県立三本木高等学校 高校1年生  
 ■授業名 「量子の世界をのぞいてみよう〜ミクロな世界、光のふしぎ〜」 / 「超伝導ってなに?」  
 ■担当者 宇都宮聖子 (国立情報学研究所)、吉原文樹 (理化学研究所)、稲垣卓弘 (東北大学)

NIIの宇都宮さん、東北大学の稲垣さんと、青森県立三本木高等学校の1年生を対象に出張授業を行いました。物理を習ってない高1に超伝導をどのように教えるかを考えるのは、私自身大変勉強になりました。また、何か実験を見せたいと考えていたところ、たまたまミュンヘンのドイツ博物館(科学博物館)で液体窒素を使った実演を見てとても楽しかったので、会社の実験室でこっそりと、見様見真似で再現し、幾つか実演することにしました。

前半は宇都宮さんがレーザー光、風船、2重スリット、回折格子、偏光板を駆使した多彩な実験を織り交ぜつつ学生達に語りかけるように巧みに授業を進め、「光は波と粒子の両方の性質を持つ」ということを学生達にうまく伝えてくれました。稲垣さんもナイスアシストでした。後半は私の担当です。少しスライドを見せた後、液体窒素を使った実演を行いました。練習の甲斐あって実演はどれもうまく、最後に高温超伝導体の上で磁石が浮上するのを見ると学生達は大興奮でした。その後、スライドを用いた授業に戻った瞬間にあからさまに学生達のテンションがガクッと下がりましたが、挫けずに授業を続けました。光の話を引き継いで、超伝導体中の電子2個が結合した「ク-

パー対は波と粒子の両方の性質を持つ」ということから始めて、磁束の量子化、直流ジョセフソン効果、dc-SQUID、と続き、最後に磁束量子ビットの話も少ししました。

アンケートの回答では、「授業の理解」で、「よく理解できた」1人で「わかりにくかった」が1割いましたが、「授業の感想」で、「おもしろかった」が8割いました。全て理解出来ないけど面白そうだから勉強してもっと知りたいという気持ちを持ってくれて少しは役に立てたと感じています。

[理化学研究所 吉原 文樹]



## SSH(スーパーサイエンスハイスクール)とは

文部科学省よりSSHの指定を受けた学校では、科学技術系人材の育成のため、各学校で作成した計画に基づき、独自のカリキュラムによる授業や、大学・研究機関などの連携、地域の特色を生かした課題研究など様々な取り組みを積極的に行っています。

## 灘中学・高等学校での出張授業

■実施日 2011年10月22日(土) ■対象 灘高等学校 1年生および2年生64名、中学生若干名  
 ■授業名 「高校生のための量子力学入門」 ■担当者 高倉 樹 (東京大学)、米田 淳 (東京大学)

去る2011年10月22日、母校である私立灘中学・高等学校で高校1~2年生を対象に量子力学に関する出張授業を行いました。灘高等学校では様々な分野で活躍する卒業生を講師として授業を開講する「土曜講座」を実施しており、今回はその一環として量子力学に興味を持つ高校1~2年生を対象に講義を行いました。受講者の中には意欲的な中学生も若干名含まれていることに驚かされました。

今回の授業では、まず前半部分で量子力学の基本的な考え方を概観し、量子の世界の不可思議さを感じてもらうことを目標としました。特に、「粒子性と波動性」「シュレーディンガー方程式と波動関数」という2つの概念について重点的に説明しました。大学初年度程度のレベルの内容も含まれていたため、質問を促したりすることで理解度を確認しながら講義を進めるように意識しました。

授業の後半では、量子力学の実際の応用例として量子ドットの物理について簡単に話をしました。量子ドット中の電子が「人工原子」として振る舞うことや、そのようなデバイスを作るための半導体微細加工の話を中心に講義を行いました。予定の時間を30分ほど超過したにもかかわらず、生徒は集中して授業に取り組んでくれたように思います。

[東京大学 高倉 樹]



今回、高校生を対象に講義を行ってみて気付かされたのは、限られた時間の中で彼らの持つ物理学の知識で内容を理解してもらうことの難しさです。一方で、全てを完全に理解できなくても、何かひとつでも興味を持ってもらうことを目指し、幅広い内容を極力平易に説明するように心掛けました。先方の物理の先生から「最近の生徒は医学部志向が強く、自然科学に興味を持つ子が少なくなった」というお話を伺いましたが、この出張授業が若い世代の物理への探求心を促す一助となれば幸いです。

## 慶應義塾大学 SFC Open Research Forum 2011

■実施日 2011年11月22日(火)、23日(水) ■場所 東京ミッドタウン ■対象 一般来場者 5,160名  
 ■講義名 「Key Concepts in Quantum Computation and Communication (量子情報の基本概念のアニメーション)」 ■報告者 Rodney Van Meter (慶應義塾大学)

毎秋、慶應義塾大学湘南藤沢キャンパスはOpen Research Forumという展示会を開催します。昨年、FIRSTに参加しているバンミーター研究室は量子力学と量子情報の基本概念を説明する3次元のアニメーションを制作しました。ORF 2011は六本木ミッドタウンで行われ、二日間で5千人以上のお客様が来場されました。

このプロジェクトはClare Horsman特任講師によって提案され、彼女の指導の下、学部生がアニメーションを制作しました。水谷伊織君(環境情報学部一年生)は量子鍵配送について説明する3分間のアニメーションを制作しました(図1)。このアニメーション内では、BB84のアルゴリズムが可視化されており、英字幕で解説されています。送信と受信の基底の基本形を説明し、通信傍受で締めくくっています。

干渉を理解しないと、量子計算は理解しにくいものです。そこで、村

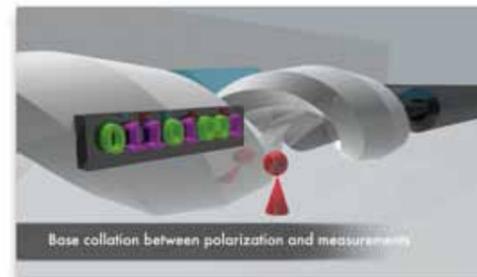


図1 量子鍵配送のアニメーションの一場面。アリスさんが光子を送信中。

田紘司君(環境情報学部二年生)は干渉を理解するための3分間のアニメーションを制作しました(図2)。まず半透鏡の効果から始まり、古典的な干渉計を説明します。続いて、単一光子を放射し、量子干渉を説明しています。最後に、Elitzner-Vaidman爆弾測定器が登場させました。

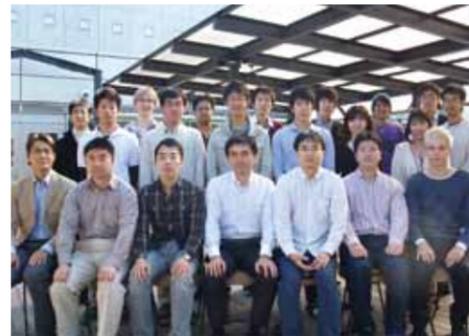
波の干渉、エンタングルメント、量子の測定、量子テレポーテーションを説明するアニメーションも他の学部生達によって作られました。

このアニメーションの目標は、高校生や後輩学部生の研究グループの参加促進であったため、わかりやすく、目を引くようにしました。また、一般の方にも量子情報に興味を持っていただくことも目的としています。ですから、他のFIRSTの研究者、学生の方にも積極的に使っていただけると幸いです。

<http://aqua.sfc.wide.ad.jp/ORF2011/ORF2011-teaching-videos.html>



図2 量子マッハツェンダー干渉計の全体図。



した量子もつれを用いて量子テレポーテーションすることに成功した。この成功は、量子力学の相補性(波動性・粒子性)を巧みに用いることに成功しただけでなく、量子情報処理においても、離散量(量子ビット)と連続量を統合したハイブリッド量子情報処理の幕開けとなっている。このように、本研究室では、ショットノイズレベル以下のゆらぎや単一光子といった極限レベルの光の状態を用いて、量子情報処理の研究を行っている。

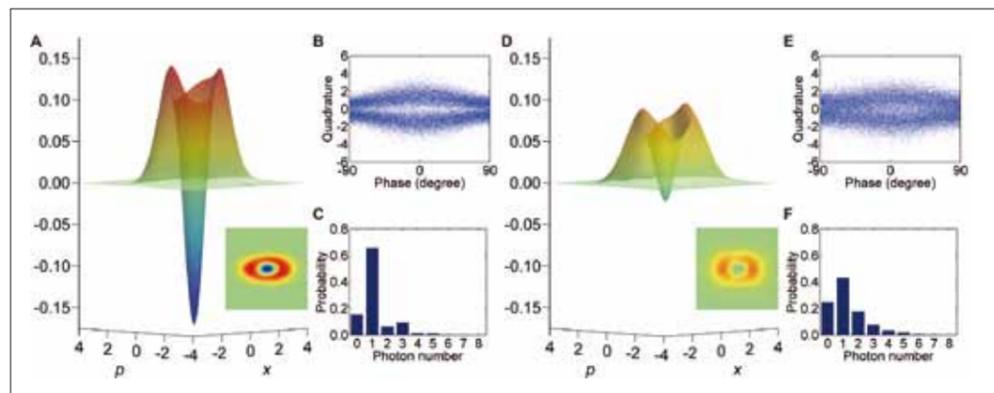
運営上の本研究室の特徴は、海外の研究室と頻りに学生交換(お互いに数ヶ月ずつ滞在する)を行っていることである。過去に学生交換を行った大学としては、エアランゲン-ニュルンベルグ大学(ドイツ)、コペンハーゲン大学、デンマーク工科大学(デンマーク)、ブリストル大学(イギリス)、オーストラリア国立大学、ニューサウスウェールズ大学(オーストラリア)、カリフォルニア工科大学、バージニア大学(アメリカ)、パリ第6大学(フランス)、パツキー大学(チェコ)などがある。また、本研究室の学生にも外国人がいる。本研究室の学生は、このような国際的な環境で研究をエンジョイしている(と思っている)。

本研究室では、量子光学、量子情報物理の研究を行っている。その中で最も重要テーマは、高レベルスクイズド光の生成である。スクイズド光は、ハイゼンベルグ描像では、2つの直交位相成分のうち1つにおいて、量子ノイズが標準量子限界(ショットノイズレベル)を破って低減された状態であり、粗密波(縦波)のような「波動的」イメージである。一方、シュレーディンガー描像では、偶数個(ペア)の光子の重ね合わせ状態であり、「粒子的」イメージでもある。また、この粒子的イメージでは、ペアになっている光子は、量子もつれ(量子エンタングルメント)の関係になっている。

我々は、これらの二面性を巧みに用いる。例えば、波動的イメージでは、ホモダイン測定により、ノイズレベルや相関測定を行い、スクイズド光により生成された量子もつれ光の検証を行う。また、スクイズド光により生成された量子もつれを用い、最も基本的な量子情報処理プロトコルである量子テレポーテーションを行う。ここで、量子テレポーテーションとは量子状態転送のことであるが、見方を変えると、入出力が等しい恒等量子演算となっている。

粒子的イメージでは、フォトンカウンティングを用い、光子検出の有無により条件付き光子数状態およびその重ね合わせ状態を、スクイズド光から生成する。特に、光子検出によりスクイズド光から1光子のみ除去した状態は「シュレーディンガーの猫状態」と呼ばれ、位相反転したコヒーレント状態(準古典的波動)の重ね合わせ状態となる。

2011年我々は、波動的イメージと粒子的イメージを統合し、スクイズド光から生成した「シュレーディンガーの猫状態」を、スクイズド光から生成



## ● 東京大学 古澤研究室

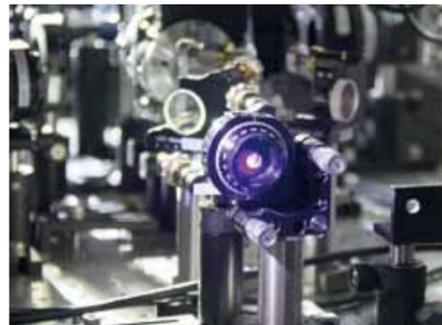
力も非常に重要なのですが、より高次の光子分布に関する情報を得ると、 $g^{(2)}$ が比較的大きいにも関わらず長距離の量子暗号通信が可能となる方法があることがわかりました。ここで重要なのは、光子数分布を測定により推定し、2光子以上の分布の裾がポアソン分布よりも速く落ちる傾向(“サブポアソン傾向性”)を精度よく確認することです。(ビームスプリッターによるモニター光との量子相関を利用する方法なので、実はスーパーポアソン傾向性でも機能します。)2光子以上が放出されても、この傾向に従う部分は盗聴行為から保護することが可能となり、理想単一光子光源に近づけた場合と同様の長距離通信が可能になることがわかりました。

実験では多光子を利用した量子もつれ生成・制御の研究を中心に量子情報処理の研究を行っています。量子もつれは様々な量子操作に利用できるリソースとして重要な役割を果たします。もつれた光子対は非線形光学効果の一つである光パラメトリック変換を用いて発生させることができます。これを用いて、これまで量子もつれ抽出実験や4光子クラスター状態の発生及びそれを用いた一方向性量子演算の古典限界を超える初めての検証実験を行いました。また任意のサイズの多体もつれ状態の融合ゲートや拡張ゲートの提案、およびそれを用いた3光子及び4光子W状態の発生などを行いました。また、量子もつれの性質をうまく利用した雑音耐性のある量子情報の送信方法としてDecoherence free-subspace上の状態を利用する方法を提案し、実際に量子もつれを忠実かつ安定に送信できることを確認しました。これらを利用した量子テレポーテーションや量子中継といったより複雑なプロトコルへ研究として更なる多光子化に向けた研究も行っています。また、これらの研究は可視光領域で研究を行ってきましたが、最近では光通信波長帯でも研究を行っており、量子中継等に必要と考えられる可視光から通信波長への波長変換のための量子インターフェースの実証も行っています。詳細は本号の最新の研究成果をご参照ください。

井元研究室は大阪大学大学院基礎工学研究科物質創成専攻・物性物理学領域において量子情報に関する理論および実験研究を行っています。学部4年生からスタッフまで含めると例年20名程度になります。理論では物理系に依存しない一般的な量子情報理論から具体的な物理系に関するもので幅広く扱います。一方、実験では光を利用した量子情報処理の実証実験を行っています。

量子情報が盛んに研究される以前から光を量子力学的に扱う量子光学は精力的に研究されており、当研究室のスタッフはこの量子光学を基礎として量子情報を研究してきました。現代の情報通信において光が非常に重要な情報のキャリアとなっているのと同様に量子情報通信においても光は重要な役割を果たします。光と光の相互作用は一般に非常に弱く演算という観点からはさほど魅力的ではないと考えられていましたが、通常の線形光学および非線形光学を介した光-光相互作用と強い非線形性の極致であるフォトンカウンティングを巧みに組み合わせることで万能な量子演算が可能となることが示されています。また、基本となる量子演算の多くは実現しており、量子情報処理の研究において非常に重要な物理系となっています。

光に関連する理論的な研究として、初期の段階から線形光学素子と光子検出器を用いたC-NOTゲートやエンタングルメント抽出法や新しい量子暗号法の提案、そして最近では量子中継法の研究などを行っています。量子暗号法に関する最近の我々の結果で興味深いものとして光源の高次光子統計を事前に測定しておくことによる長距離量子通信の提案があります。近年、単一光子発生が盛んに研究されていますが、このような光源はHanbury BrownとTwissの実験でよく知られている2次の強度相関 $g^{(2)}$ で評価されます。 $g^{(2)}=0$ すなわち多光子放出確率が0である単一光子光源が望まれています。実験的に $g^{(2)}=0$ に非常に近い光源を作り出すことは技術的に難しい課題です。多光子発生確率を0に近づける実験的な努



## ● 大阪大学 井元研究室

# エッセイ

Essay

物理の基本精神は物を壊して中身を覗くことだ。高エネ実験とは縁遠い小学生も、ごみ箱から拾った回路を壊すのに夢中だった。その中には、今やガラスの展示ケースでしか見ることができない、缶入りGeトランジスタがあった。ニッパで缶をこじ開けると、白い乾燥材がころんと落ち、ベースのGeの円板の両側にIn合金がついた回路記号そのままのトランジスタが顔を出す。その当時のテレビには必ず回路図が付いてきた。水平偏向の高圧が壊れたら勝手に直せとのメッセージだろうが、テレビが家に来るや、私はその回路図を眺めながら、故障して大量の部品箱となる日を心待ちにした。ジョブズのapple IIにも回路図が付き、6502と数点の部品を除けばあとは汎用のTTLで構成されていた。秋葉原には模造基板が出回り、せつせと半田付けに励んだ。6502のマニュアルを手に入れて、アセンブラでレジスタにアクセスすれば、まだCPUとやり取りしている実感のあった最後の時代だ。でも悲しいかな、そんなapple IIは趣味以上の世界に入り込むことはなかった。これらは嬉々としてエレクトロニクスの砂場で遊んだ子供の頃の思い出である。

この原稿を書くノートパソコンには寸分の隙もない。フリーズしてコマンドラインが現れることはなく、マルチコアのCPUが何を考えているかさえ分からない。パソコンは完全にブラックボックスとなり、実用に供する魔法の箱になった。家電製品に回路図が同梱されたのも今は昔、こじ開けても漆黒のASICが悲しく横たわり、子供が興味津々と壊して学ぶ機会は閉ざされた。工学の進歩は、装置のブラックボックス化であり、我々はそれをユーザーフレンドリーと称して受け入れる。自分で修理する権利を放棄した代償に、故障しないブラックボックスを手に入れた。

レーザーユーザーにはすっかりお馴染みのコヒーレント・Verdiは、我々の研究の世界にもこの思想を持ち込んだ。研究者は、故障しても手も足も出せない代わりに、レーザー調整の役務から解放された。このVerdiの出現が、光周波数コムを実用に供する代物

とし、光時計の黄金期が幕を開けた。ターンキーのファイバレーザー、半導体レーザー、ファイバーコンポーネントの充実により、光技術はコネクタをつなぐだけのRF技術の延長と化し、光通信をはじめとする光技術が普及する。

提案から丸10年たった光格子時計も、この転機に差し掛かっている。空中に光を飛ばして、無数のミラーマウントのノブをいじる、楽しく苦しい時代は早晩終わらせなくてはいけない。レーザー調整で手一杯のうち、時計と呼べる代物は作れない。いま我々の関心事は、すべてのレーザーをファイバ接続のターンキーにすること、空間を縦横無尽に飛び交う光をファイバの中にぎゅっと押し込むことである。かつて何百と並んだミラーマウントを両手で数えられるほどにしてみたい。きれいに光る真空管ラジオの時代から、せめてトランジスタの時代には移行しよう。光格子時計が新しいサイエンスのツールになるのは、それがターンキーの無味乾燥なブラックボックスと化すときだ。

この20年ほどは、半導体レーザーやレーザー制御技術の成熟とも相まって、冷却原子実験は、手軽に量子力学の核心に迫れる美しさに光輝いた。これは、子供の頃のGeトランジスタを壊して覗いた—シンプルでシンプルな物理—を垣間見た感動にも相通じる。しかし、量子のマジックで永遠に観客を沸かせることはできないだろう。この研究が今後も有用で輝きを保つためには、超精密実験で今の物理学の枠組みの外側に迫るか、みんなが欲しがらるブラックボックス化されたツールを目指すかだろう。流行りのCSAC (Chip Scale Atomic Clock) や表面原子トラップは後者の方向性を視野に入れた第一歩である。成熟しつつあるシリコンフォトリソグラフィやDLPプロジェクタを実現するMEMS技術は、新時代のステアリングミラーになるだろう。ブラックボックスになり、壊し甲斐がない原子応用の新時代を築くことが、実験家として幸せな子供時代を送った者の次の使命と思う。

香取 秀俊 (東京大学)

## 幸せな実験家の時代

No.7 March 2012

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

量子ニュース

**NII** 国立情報学研究所 大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 <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 総務部 研究促進課 最先端研究開発支援室 <http://www.first-quantum.net/>

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

〒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

本紙についてのお問い合わせ：

最先端研究開発支援室 TEL：03-4212-2117 FAX：03-4212-2817 e-mail：first\_jimu@nii.ac.jp

量子情報国際研究センター TEL：03-4212-2506 FAX：03-4212-2641

**R100**  
国立情報学研究所の未来を創っています