

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 量子情報国際研究センター設立キックオフシンポジウム
- 10 サブテームミーティング
- 15 サイエンスアウトリーチ
- 18 研究室紹介
- 20 エッセイ

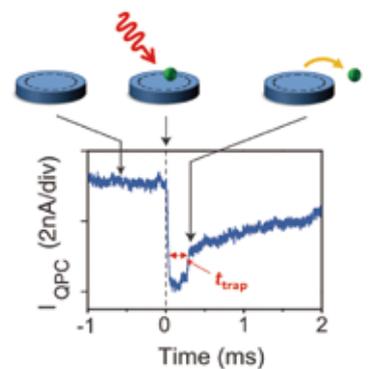


図2 光生成単一電子の実時間検出を示す量子ポイントコンタクト電流。上は対応する光生成単一電子の挙動

P5 最近の研究成果より



P6 NII 量子情報国際研究センター設立キックオフシンポジウムより

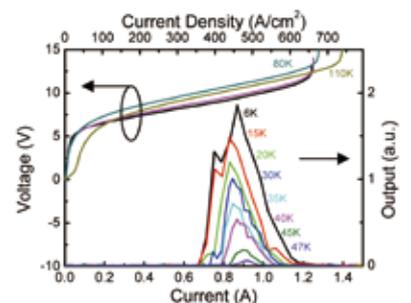


図3 IDP THz-QCLの素子特性

P18 研究室紹介より

## ●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))

研究支援担当機関総括責任者：東倉 洋一(国立情報学研究所)

### サブグループ紹介

○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((独)理化学研究所／日本電気(株)) 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)国際超伝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)

### アドバイザー

- 光 末松 安晴((公財)高柳記念電子科学技術振興財団) 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(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) 和達 三樹(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)

## ● INFORMATION

### ■夏期研修会 2011 変更のお知らせ

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、本年度8月に沖縄県宮古島で開催を予定しておりました「夏期研修会2011」を下記の日程、場所にて開催することに変更致しました。詳細なプログラムと募集情報につきましては、プロジェクトホームページをご覧ください。(http://first-quantum.net/)

期間：2011年8月12日(金)～17日(水) (12日～15日の各夜：ポスター発表、13日～17日：講義)

会場：京都大学 吉田キャンパス 百周年時計台記念館

### ■量子情報処理プロジェクト・量子サイバネティクス全体会議 2011 開催のお知らせ

下記の通り、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・新学術領域量子サイバネティクスの全体会議2011を開催いたします。詳細につきましては決まり次第ご案内させていただきます。

期間：2011年12月13日(火)～16日(金)

会場：京都国際ホテル

### ■3・11 震災被害調査報告

3月11日の大震災で、被害を受けた量子情報処理プロジェクトの研究委託先の状況を調査しています。そのうち産業技術総合研究所(AIST:つくば)を4月6日(水)に訪問しました。その時の状況として、外見的被害は大きくないものの事業所として空調(温湿度調整)使用禁止の指示が出ており、実験機器の計測精度調査が出来ず、被害実態の把握が困難な状況でした。その他、NEC研究所(つくば)、東北大学(仙台)も被害を受けています。支援室では山本先生のご指示のもと、これら研究委託機関と緊密に連携して様々なサポートをしていく予定です。



一部壊れ立ち入り禁止になった建物あり



大きな装置の足が台からはみ出した

## 欧州の研究者達に接して

大阪大学 教授  
井元 信之



欧州滞在中にこれを執筆している。先方の研究室に滞在する形で、研究室向けからより広い対象、ときには外部聴講者も対象とした長めの講演を何回か行い、討論を通じて情報交換から研究協力の芽を育むという滞在中である。行ってみると、ホスト役の当の教授の多忙なこと。EUやERCの評価の仕事であるとか、私の他にも頻繁に出入りするヴィジターの対応など、年中飛び回っている。そういうことはどこも同じではあろうが、中堅という年の割には研究科長に準ずるまとめ役まで任されているなど、特定の人への集中度が高い。院生指導はどうかというと、こういう状況であるからそういう場面はたまにしか見ない。もちろん授業も担当している。

こういう場合のしわ寄せは研究室の准教授や助教へ向かうと思われるかもしれないが、少し日本と違うかなと思われたのは、その研究科長相当の前任者とそのまた前任者というのが週に二日ほどやって来て、学生指導を行っている。そういえば「光の量子論」の著者であるラウソン先生も正規の退職後「リタイアはしていない」という状態が続いていた。それが一般的なことかはわからないが、特に基礎教育ではそういうことも（准教授や助教の稼働が軽減されているとするならば）あっていいあり方かもしれない。

先ほどヴィジターの出入りが多いと書いたが、これは本当にそうで、私のような講演する立場からポストドクや大学院生に至るまで、明日次のところに行く、とか、昨日から来たという調子である。むしろ「私はここポストドクです」という人に出会う方が少ないほどである。こういう交流は、すぐ近くに外国がたくさんあるという恵まれた環境もあるが、研究の相互刺激という点で大変よい状況にある。またそれを促進するファンディングが組織内部外部を問わず多いことは間違いない。日本でもそういうスキームはあるので、手続きを面倒がらず交流をより活発化する必要があると感じる。

ところで数回ほど前のこの欄で「アメリカでは量子情報への研究助成が下火になったあと復活のきざし」という記事があった。EUの場合EU Commissionが打ち出す理念のもとに研究助成プログラムが走っている。ちなみにEUの打ち出す理念というのは人口予測や経済予測にもとづくもので、

2000-2010はリスボン戦略、その後継となるのはEurope2020というもので、smart growth、sustainable growth、inclusive growthの三つを掲げている。研究プログラムの枠組みとしてはFP7 (Seventh Framework Programme) という大きなものがあり、これは1984年のFP1から始まる7番目のもので2007-2013年のプログラムである。あらゆる分野を対象としているので量子情報は当然one of themである。とはいえ上記の教授以外にも連絡をとった量子情報関係者で「ブリュッセルの評価の仕事に出かける」という人が見受けられるほど活動があるということだ。ちなみにFPの理念の一つに国間相互研究協力というのが従前からあるが、これが若手の交流・移動を容易にしていることは間違いない。

さてこういうプロジェクトの話とは別に、欧州の研究者達の面白いところは、非常に基本的な研究をしている人達がいることである。こういう研究があると面白いだろうなと思っていると、既にやっている人がいるということがまます。一例を挙げると、ベル不等式が破れていけば局所実在論は成り立たないわけであるが、では局所性が誤りなのか実在論なのかあるいは両方誤りかという問いはけりがついていない。局所性をはずすとベル不等式が量子力学を越えて4まで行くことはすぐわかるが、では4まで行く世界は必ず局所性がないか？これについてはたとえば2年前に欧州で出席したシンポジウムで「ブラックボックス」の応答に関する研究を2人ほど発表していた。結果は「必ずしもそうでない」ということで、ものごとは単純ではない。量子力学が誤りということは考えられなくても、量子力学と異なる世界を考えてみることは、量子力学をより理解することに繋がるのではないだろうか。携帯電話の電波の強い所を探すときのように、何かの極値の位置を求めるためには、前後左右ずらしてみないとわからない。ヨーロッパの人がすべてこういう話題に乗ってくれるわけでもないが、乗ってくれる率が高いのは確かである。欧州に来ると、量子力学のユーザーで済ましてしまうのではなく、量子力学を産み出した手前ずっと気にかける、とでもいうようなスタンスがときに感じられて、大変面白い。

## 1 制御のいらぬ制御

制御のいらぬ制御では、限られた種類の測定を使って量子系の操作を可能にする。

理化学研究所F. Noriグループ [1] の研究成果は最近、Nature誌の“News and Views”欄に“量子制御”に関する論文 [2] として掲載された。下に示すものはその研究 [1] の要約である。

制御理論は科学・工学の様々な分野で利用されている。例えば、ある装置（デバイス）は一定の条件下で操作される必要があるが、環境からの揺らぎの影響により最適操作条件から逸脱してしまう場合、デバイス・パラメータを安定化し、デバイスの性能を向上させるために制御理論が適用される。この種の制御は閉ループ制御またはフィードバック制御と呼ばれている。閉ループ制御システムの基本構造は2段階から成っている：測定およびフィードバック制御の2段階である。第1段階では、システムの状態に関する情報を取得し、目標とする状態からどれほど逸脱しているかを知る。第2段階では、システムの状態を変化させ、目標とする望ましい状態へと導くために、システムに対し、ある“制御”、すなわち信号または力が加えられる。

古典物理学（量子論以前の）において、測定過程で引き出されるのはシステムの状態に関する情報のみであり、（理想的な条件の下で）対象システムの状態がそれにより変化することはない。この事実は過去一世紀にわたり、制御システムの設計における基本原理のひとつであった。

量子力学においてはこの原理は破綻する：測定そのものが、それがいかに理想的であろうと、システムの状態を変えてしまうのである。古典物理学と量子物理学の間の根本的な相違は制御システムの設計に影響を及ぼす。量子論的（な対象の）制御の諸問題を扱うには、古典的（巨視的対象の）制御の諸問題を取り扱う場合とは異なった考

方を取り入れる必要がある。

測定に起因する不可避な反動に対処する最も分かりやすい方法は、影響による変化を計算し、それに応じて制御信号を設計することである。この方法は、1980年代後半から今日まで量子制御に関する多くの研究において用いられてきた。もうひとつの可能性、それは概念的にはさらに抜本的であろうが、システムの状態を操作するための唯一の手段として、測定によって生じた変化を利用することである。この場合には、閉ループフィードバック制御は測定段階のみから成るため、“制御”はもはや必要でなくなる。

過去2、3年の間に、測定（過程）のみから成るフィードバック制御の実現性を検討する研究は、それほど多くないものの、いくつか行われてきた。

最初の研究では、実施される測定において特別な制約のないものが仮定されていた。つまり、多くの場合、強い測定の標準的な理論または代わりに弱い測定の理論のいずれかが適用されてきた。

引用文献 [1] の著者はこうしたアイデアをさらにすすめ、利用可能な制御パラメータとして測定強度を調整できることを使い、こうした量子制御システムのパフォーマンスを向上させた。彼らはさらに、単一の測定設定のみを使って、望みの量子状態を準備できるという、制御システムに関する伝統的な思考法では不可能であるかに見える概念を報告している。

### References:

[1] S. Ashhab and F. Nori, Control-free control: manipulating a quantum system using only a limited set of measurements, Phys. Rev. A 82, 062103 (2010).  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.82.062103>

[2] Howard M. Wiseman, Quantum control: Squinting at quantum systems, Nature 470, 178 (2011).  
<http://www.nature.com/nature/journal/v470/n7333/pdf/470178a.pdf>  
<http://www.nature.com/nature/journal/v470/n7333/full/470178a.html>

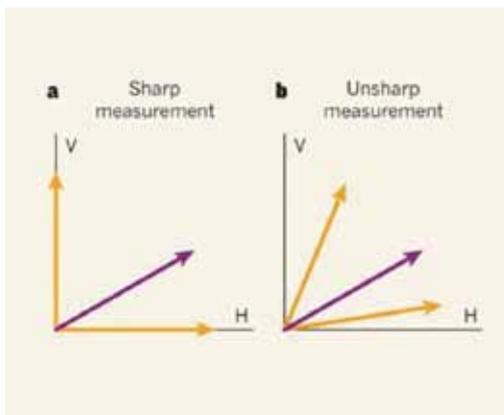


図: 引用文献 [2] より この図の中の紫色の矢印は2次元量子システム—例えば光子の偏光—の初期状態を概略的に示している。ここに、方向Vは垂直偏光状態を、方向Hは水平偏光状態を表している。ここでの初期状態（紫色の矢印）はこれら状態のある特定の（VよりHより近い）重ね合わせである。偏光の鋭いまたは強い（射影）測定の後では、(a) に示すように、光子はV（垂直）偏光状態またはH（水平）偏光状態のいずれかにある（オレンジ色の矢印）。不鋭度測定または弱い測定（ここでは鋭度または強度が50%）の後では、(b) に示されるように光子ははまだ重ね合わせ状態にあるが、Vに関する測定の効果が状態をV（垂直）偏光状態（上側のオレンジ色の矢印）に向かわせる程度よりもHに関する測定の効果の方が状態（下側のオレンジ色の矢印）をH（水平）偏光状態により近く向かわせる。引用文献 [1] の著者は、測定の強度を正しい値に調整することにより、測定により引き起こされる状態の変化が最適化されることを示している。

# 単一光子が半導体量子ドットに生成する単一電子とそのスピンの検出

「スピン量子コンピューター」の東京大学・樽茶清悟のサブグループは、半導体量子ドット中の電子スピンを用いたスピン量子素子からなる小規模量子システムを拡張する量子インターフェースの開発のため、半導体量子ドットの電子スピンと整合性のよい光子の偏光状態とを「単一量子」で結ぶ光子-電子スピン量子状態転写の実現を目指しています。これまで、光子の偏光状態から電子スピン状態への量子状態転写は量子井戸中の「スピン集団系」を用いた実験で実証されました [H. Kosaka et al., Phys. Rev. Lett. (2008)]。この手法を発展させ単一ビット間での量子状態転写を実証するには、単一電子スピン制御が実現されている量子ドットで単一光子を単一電子に変換して、そのスピンを検出することが不可欠な課題です。

本研究では、GaAs/AlGaAs 2次元電子系に形成された量子ドットとそれに近接させた量子ポイントコンタクト (QPC) を用いました (図1 (a))。量子ドット直上に開口を持つ遮光マスクが取り付けられており (図1 (a))、ドットに飛来する平均光子数を1個以下まで強度を下げたパルス光 (波長780nm) を照射しました。図1 (b) のように、光子は主に GaAs 層で電子-正孔対を生成します。そしてバンド構造に起因する内部電場により電子のみが GaAs/AlGaAs 界面に移動し、量子ドットに捕捉されます (図1 (b))。この光生成単一電子が量子ドットで捕捉される過程を、高感度電荷計である QPC で検出しました。

図2は典型的な、光生成単一電子の実時間検

出を示した QPC 信号です。パルス光を照射した時刻ゼロで、光生成単一電子が量子ドットに捕捉され、量子ドット中の電子数が1個増えたことを反映して、急峻な QPC 電流の減少が観測されます。その後、光生成電子はある時間 (捕捉時間  $t_{\text{trap}}$ )、滞在した後、近接する電極へ出て行きます。このとき量子ドット中の電子数が1個減るため、QPC 電流は急峻に増加します。こうして単一光子が生成した単一電子が、量子ドットで捕捉される過程を実時間測定で検出することに成功しました。

さらにゲート電圧を調節して量子ドットを電子が占有する平均時間  $\tau_t$  を変えて単一光子検出を行うと、 $t_{\text{trap}}$  を数十 ms まで広範囲で制御できることを確認しました。最も速い  $t_{\text{trap}}$  は  $300\mu\text{s}$  程度で、典型的なスピン緩和時間よりも十分速く、電子スピンが緩和して情報を失う前に、検出・操作が可能であることを示しています。そこで実際に光生成単一電子のスピン検出を試みました。試料面に垂直に磁場を印加すると、試料の端に沿って運動する電子状態、すなわち端状態が電極中に形成され、量子ドットから電極へのトンネル頻度は電子スピンに依存するようになります (図3 (a))。この原理に基づいて、無偏光照射により生成された上向きまたは下向きスピンを持つ単一電子のスピン選択トンネルの検出に成功しました (図3 (c))。これは、単一光子の偏光に対応した光生成単一電子スピンをひとつずつ検出することが可能であることを示しています。この成果は、Physical Review Letters 106, 146804 1-4 (2011) に掲載されました。

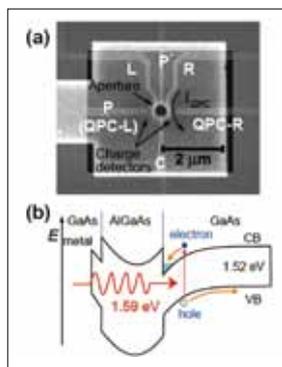


図1 (a): 試料の電子顕微鏡写真。  
(b): 半導体基板のエネルギー状態図と光照射による電子正孔対生成

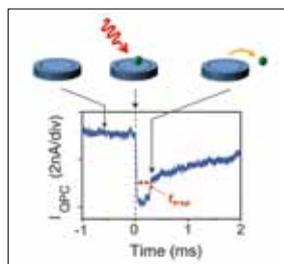


図2 光生成単一電子の実時間検出を示す量子ポイントコンタクト電流。上は対応する光生成単一電子の挙動

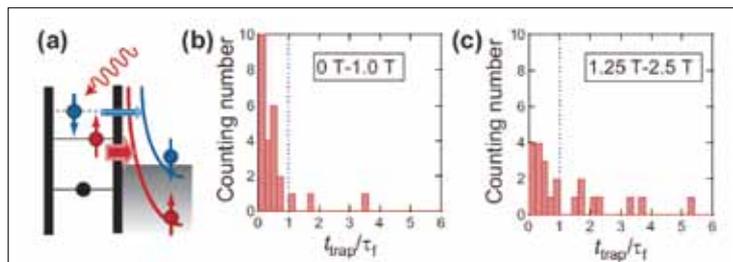


図3 (a) スピン分裂端状態によるスピン依存トンネルの概念図と、端状態が形成されていない低磁場 (b) と形成されている高磁場 (c) で測定した単一光子検出の規格化された捕捉時間  $t_{\text{trap}}/\tau_t$  に対するヒストグラム。高磁場では下向きスピンのトンネルに対応する長い捕捉時間 ( $t_{\text{trap}}/\tau_t > 1$ ) 成分がより多く検出されている。

# 国立情報学研究所 量子情報国際研究センター設立 キックオフシンポジウム 大川賞記念講演会

## 量子情報国際研究センターに期待する



国立情報学研究所 所長  
坂内 正夫

国立情報学研究所は、2010年11月にソフトウェア工学国際研究センターなどに続く研究所8つ目として、量子情報国際研究センター（センター長、山本喜久教授）を設立しました。

その使命は大きく2つあると思っています。第一は、いまでもなく山本教授を中心研究者とするFIRST（量子情報）プログラムを組織的に強力支援することです。量子情報研究は、現在の情報処理装置の能力をはるかに超える言わば夢の新技术として、大きな可能性をもっています。このFIRSTプログラムが、その可能性の実現への強力な武器になり、設立したセンターがそれを支援するという構図です。

第2の使命は、量子情報国際研究センターのもつ時間的、空間的、機能的展開力です。FIRSTプログラムは4年という限られた時間内で、主に国内の共同研究者という任を負うメンバーが集中して具体の目的を果たします。しかし、一方で量子情報処理は未知の展開を内包する将来技術でもあります。研究が、より長期の持続性を持ち、海外を中心とする多様なメンバーが集い、若手の新たな人材を幅広く吸収するプラットフォーム（オープンな研究拠点）が、不可欠である訳です。

新センターは、このような展開機能を実現するのです。そして、それはとりもなおさず、国立情報学研究所がめざす大学共同利用機関としてのグローバルオープン拠点の理念にも合致するものです。

FIRST量子プログラムを強力に推進し、海外にもオープンに展開するプラットフォームともなる、量子情報国際研究センターの今後に大いに期待したいと考えます。

## センター長からの挨拶



国立情報学研究所 山本 喜久

政府が進める最先端研究開発支援プログラム30チームの1つに、実用技術からはまだ遠い“量子情報処理プロジェクト”が選ばれた最大の理由は、“この研究分野で学問を深化させ、人材を育成しておくことが我が国の科学技術の将来の発展に資する”との期待感からであったと理解しています。しかし、政府と国民のこの期待に5年という短期間で答えることは容易ではなく、特に当該分野がインパクトの大きな将来技術であると同時に、息の長い基礎研究分野であることを考えると、研究開発の長期戦略を練り、大型国家プロジェクトの間を埋め、橋渡しを行う継続的な組織が必要であります。今回、国立情報学研究所の中に量子情報国際研究センターが設立されたのは、そのような背景からでした。

量子情報処理プロジェクトに参加している研究者は、計算機科学／応用数学、光科学、半導体／強相関物理、超伝導エレクトロニクス、原子物理、ナノテクノロジーなど、多岐にわたる分野の出身者から構成されていますが、未来を開拓する人材とブレークスルーは、こうした異分野間の交流、

融合から生まれるものと確信しています。隣接分野との連携を図りつつ、開かれた研究者集団を作り上げることをセンター運営の要としたと考えています。

そのための施策として以下のような試みを含む様々な活動をセンターでは行っています。

- 1. 量子情報レクチャーシリーズ：**量子情報のような新しい知識と技術が爆発的に生産されている分野において世界と戦える人材を育成するためには、学問的基礎から最先端までを最短距離でつなぐ教材（レクチャーノート）が必要です。また、そのような教材を執筆することで、研究者自身も学問を深化させ、視野を広げることができます。
- 2. 学生チャプター：**各大学、各研究室には独自の伝統とカルチャーがありますが、お互いに良いところを吸収し合うことも大切です。学生達が決して特定の大学や研究室に属しているのではなく、量子情報というコミュニティに属しているのだという広い視野、連帯感を持てるよう、関東と関西に学生の独自組織が作られています。
- 3. サイエンスアウトリーチ：**宇宙や生命科学に比べ、難しい、退屈という印象を払しょくし、国民が誰でも知っている、慣れ親しんでいる“量子”という風土を日本に定着させたいと考えています。このため、小中高校の学校現場に研究者、学生を派遣し、その場での実験を通して、“鋭い発見の喜び”を早くから知ってもらうよう活動しています。

### ■ 荒川 泰彦 (東京大学 教授)

#### 「量子ドットと光ナノ共振器による量子結合系の実現とその展開」

概要：1982年に提案された量子ドットは、四半世紀を経て量子ドットレーザとして実用化段階に入り、既に市場に出荷されている。一方、ナノ技術の発展により、単一量子ドットとフォトニック結晶ナノ共振器の結合系は、固体系の共振器量子電磁力学の舞台を提供し、量子光学の発展に大きく貢献してきた。講演では、まず、量子ドットレーザの歴史的展開と最近の進展が紹介された。さらに、単一量子ドット・2次元フォトニック結晶ナノ共振器系におけるフォノンとの相互作用や単一人工原子レーザ動作が論じられるとともに、3次元フォトニック結晶ナノ共振器レーザ発振の成功も示された。

### ■ 蔡 兆申 (理化学研究所 チームリーダー / NEC 主席研究員)

#### 「超伝導量子情報の最近の成果」

概要：ジョセフソン接合を含む超伝導回路の巨視的超伝導状態は量子コヒーレンスな操作が可能なが1999年に示された。この回路の量子情報処理を目指した研究が世界的に進められている。その基本ユニットである超伝導量子ビットには多くの回路方式がある。量子情報処理を行うには、コヒーレンスを長く保つ必要があるが、超伝導量子ビットのデコヒーレンス時間は2年間で10倍という目覚ましい進歩をつづけていて、現在では数十マイクロ秒のものが実現している。量子論理演算に不可欠なビット間の結合方式をいくつか紹介し、最近提案された量子ビットの数のスケールアップが可能と考えられる方式を紹介した。

### ■ 樽茶 清悟 (東京大学 教授)

#### 「量子ドットスピンを用いた量子情報研究の進展」

概要：半導体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の研究動向について紹介した。これまでに、多ビット化に適した電圧駆動法による1、2量子ビット、2スピン交換結合のパルス操作によるSWAP、SWAP<sup>1/2</sup>、それらを組み合わせた量子もつれ状態の変調と評価などが実現されている。課題としては、ここ数年、核スピン環境の揺らぎによるデフェーシング時間の制限が議論されている。その改善策として、わずかに核スピンを偏極させる方法が注目されている。最後に、最近の話題として、3ビット化のための3重量子ドット作成、単一光子-単一電子スピンの情報変換実験などについて紹介した。

### ■ 都倉 康弘 (NTT物性科学基礎研究所 グループリーダー・研究部長)

#### 「量子情報通信技術の進展」

概要：量子情報の通信への応用として量子暗号は最も成熟した段階にある。この技術の最近の進展を簡単に紹介した後、2010年秋に日本と欧米の研究機関の協力の元行われた「東京QKDネットワーク」というフィールドデモ実験に関して述べた。鍵を配送する距離の限界を大きく打ち破る次世代の技術として量子中継が期待されている。その要素技術である通信波長帯の量子もつれ光子対の生成や、光子対の波長非識別性を得る方法、さらには量子メモリとのインターフェースとして期待される周波数下方変換、量子もつれの交換等の最近の実験について述べた。

### ■ 香取 秀俊 (東京大学 教授)

#### 「光格子時計の17桁の周波数比較の実現とその展望」

概要：光格子時計は観測する原子数の増大による著しい安定度の向上を目指して提案された。ところがこの期待に反し、有限の周波数ノイズをもつレーザーによる周期的な原子遷移観測が引き起こす「ディック効果」が、これまで安定度を制限していた。我々は、2台の光格子時計の同期比較により「ディック効果」を除去することで、その量子射影ノイズ限界に迫る時計安定度、1,600秒の測定時間で $1 \times 10^{-17}$ の周波数比較、を実現した。この測定の不確かさは、地上に置かれた2台の時計の高度差10cmに対応する一般相対論的な時間の遅れ(重力シフト)の検出をも可能にする。

### ■ 根本 香絵 (国立情報学研究所 教授)

#### 「量子情報理論の深化と展開」

概要：量子情報処理を可能にする量子情報デバイスの実現化へ向け、将来の拡張性を備えたスケーラブルなシステムを構築可能にする量子情報素子の条件は何か? その明確化が今、求められている。われわれは、素子からシステム構成までを統合した、世界でも初めての量子情報システムの青写真を構築し、量子素子の必要条件、さらにはシステム設計に伴うデバイスや情報処理の条件をも明確化した。この具体的な例として、光を用いた大規模量子情報処理のシステムを紹介した。このような拡張性の高い研究は、今後の量子情報処理の研究課題の中でも重要性が高く、今後のセンターの主要研究テーマの1つと位置づけられる。そこで理論・実験の両面から、統合的なシステムと量子デバイスの実現化について展望を述べた。

## 大川賞の概要

大川賞とは、財団法人大川情報通信基金により設けられた賞であり、情報・通信分野における研究、技術開発および事業において顕著な社会的貢献をされた方の労に報い、その功績を表彰する国際賞です。1992年に設けられたこの賞は、今回で19回目を迎えました。2010年度の大川賞には、「量子光学および量子情報処理分野において世界的な業績を挙げ、同分野の飛躍的發展に対する多大な貢献」により国立情報学研究所

教授 兼 スタンフォード大学 教授の山本 喜久博士と「量子暗号のコンセプトの提案をはじめ、近代量子情報理論創始者の一人として、量子情報通信分野の發展に対する多大な貢献」によりIBMワトソン研究所フェローのチャールズ H. ベネット博士が選ばれました。

NII量子情報国際研究センターキックオフシンポジウムでは、この大川賞を受賞されたお二方からの受賞を記念した講演がありました。

## 大川賞受賞者談話

おおよそ我々研究者の仕事というものは、先人の切り開いた知見を引き継ぎ、これにわずかばかりの加工を施した後、次世代の人々に継承していくメッセンジャーのようなものと理解しています。このようにして何百年という歳月にわたる知と業の継承がなされてきました。2010年度の大川賞は量子情報という研究分野に与えられました。IBMワトソン研究所のチャールズ・ベネットと国立情報学研究所/スタンフォード大学の山本喜久が理論家、実験家を代表する形で受賞致しましたが、もとよりこの分野の誕生に至る100年以上も前からの情報科学と物理学の歩みを考えれば、個人が果たした役割は極々小さなもので、賞はコミュニティーに帰属するものと思っています。

情報科学の分野で、情報と熱力学第2法則の関係に言及した最初の研究者は、ジェームス・クラーク・マクスウェルで19世紀後半のことでした。彼の仕事は、“マクスウェルの悪魔”のパラドクスとして知られ、その後100年にわたるこの分野の發展の動機づけとなりました。私(ベネット)も1980年代後半に“悪魔払い”の理論構築に貢献致しました。量子情報を表わす単位(qubit)を実現する物理現象を最初に発見した研究者の一人は、ピーター・ゼーマンで、やはり19世紀後半のことでした。彼の仕事は、1902年のノーベル物理学賞の対象となり、その後100年にわたる磁性、磁気共鳴の發展の基礎を作りました。私(山本)も1980年代後半に“スピン量子ビットの光制御”の研究に着手し、現在に至っています。

写真は、15年ほど前に量子情報科学に関するシンポジウムをスタンフォード大学で開催した時に撮ったものです。写真の左側は、MITの“Institute Professor”であった故ハーマン・ハウス教授です。私(山本)をこの研究分野に導いて下さったmentorでした。量子雑音の理論



研究に生涯を捧げた人でした。写真の右側は、IBM研究所の“フェロー”であった故ロルフ・ランダウアー博士です。私(ベネット)をこの研究分野に導いて下さったmentorでした。情報と量子力学の関係を明らかにする理論研究に生涯を捧げた人でした。私達が尊敬してやまないこの2人の先人は、共に量子情報処理技術の前に立ちはだかる壁の高さを早くから痛感していました。その壁を乗り越える知力と忍耐力が我々に備わっているのかどうか、何処からか、やさしく見守ってくれているような気がしています。

[国立情報学研究所/スタンフォード大学 山本 喜久/  
IBMワトソン研究所 チャールズ・ベネット]

追記：写真の背景に写っている3人は、現在米国エネルギー長官であるスティーブン・チュウ教授、カレッジ・ド・フランスのサージ・ハロッシュ教授、ウィーン大学のアントン・ザイリンガー教授の若き日の姿です。ちなみに、この時の3人の予想は、“量子コンピューターは夢ではなく悪夢だ(ハロッシュ)”、“いづれ全ての技術は量子になる(ザイリンガー)”、“目の覚めるようなアイデアを持った若者が現れて状況は一変する(チュウ)”と別れました。

## 大川賞贈呈式

財団法人大川情報通信基金では2011年3月9日(水) ANAインターコンチネンタルホテル東京において「2010年度大川賞・大川出版賞・研究助成贈呈式」を開催いたしました。当日は学界、産業界、政府関係者などを含め250名を超える多数の方々にご出席をいただくことができました。

贈呈式では、大川賞として前述の山本 喜久博士と、チャールズ H. ベネット博士に対し、それぞれ賞状ならびに副賞として金メダル、賞金1000万円が手渡された他、財団のもうひとつの顕彰事業である「大川出版賞」や日本ならびに中国・韓国の情報通信分野における研究者27名に対する助成金の贈呈が行われました。(米国の研究者6名に対しては、別途、米国内で贈呈式を行っております。) また、ご来賓を代表して、総務省総合通信基盤局長 桜井 俊様の祝辞に続き、駐日中国大使、韓国大使からもそれぞれ、ご祝電を賜り、山本博士ならびにベネット博士からも大川賞受賞のスピーチをいただきました。贈呈式後の懇親会では、それぞれの研究者や産学関係者の交流と懇親を深めることができ、式典は盛況のうちに終了しました。

大川財団は今年設立25周年を迎えます。今後とも情報通信分野の国際的な学術・文化交流と発展に向けて、このような公益活動を通じて、いささかなりとも貢献し続けたいと考えております。

関係各位の今後とも変わらぬご理解とご厚情のほど、よろしく願い申し上げます。

[(財)大川情報通信基金 専務理事 松本 卓士/  
事務局長 前川 博樹]

### 財団会長五十嵐三津雄氏より大川賞贈呈



山本 喜久博士



チャールズ H. ベネット博士

## NII 量子情報国際研究センターキックオフシンポジウム懇親会報告

3月10日(木)の18:00より、講演会に引き続き如水会館オリオンルームにて、懇親会が開かれ多数の皆さんのご参加を頂きました。その時の模様を簡単ですがご報告致します。

国立情報学研究所(NII)の東倉副所長の司会で、まず開会の挨拶がNIIの坂内所長からありました。今回の量子情報国際研究センター(QIS)設立の意義、NIIとして量子情報処理プロジェクト(QIPP)を長期的にバックアップしていくことなどを話されました。

続いて公益財団法人高柳記念電子科学技術振興財団理事長の末松安晴様より、乾杯のご発声を頂いて、和やかな雰囲気ですべてがスタートしました。

ひと通りご歓談して頂いた頃に、来賓スピーチとなりました。初めに山本先生がNTTに勤務していた時の上司で(株)NTTデータの社長も務められた青木利晴様よりご祝辞を頂きました。山本先生がNTTに勤務されていた頃に、青木様が山本先生の将来を考えスタンフォード大学への転出を強力に後押ししたいきさつなどが紹介されました。

東京大学/慶應義塾大学名誉教授の霜田光一様より、



お祝いのメッセージを頂き、引き続いて量子情報処理分野の萌芽期にあたる固体レーザーが発明された頃の状況が、スライドを使って説明されました。スライド説明の途中ではQIPPアドバイザーの上村洸先生も説明に加わり、当時の活気ある研究状況を感じさせるような雰囲気になりました。

その後QISセンター長の山本先生よりお礼と抱負のご挨拶がありました。懇親会にはQIPP共同提案者の樽茶先生、蔡先生はじめ多くの研究者の皆様が参加されQIS設立にふさわしい楽しく活気のある懇親会だったと感じました。

[国立情報学研究所 最先端研究開発支援室  
室長 片山 秀]

幹事(報告者)：洪 鋒雷(産業技術総合研究所)

リーダー：香取 秀俊(東京大学)

開催日：2011年2月18日

場所：産業技術総合研究所

参加人数：18名

### 報告概要

第二回のサブグループミーティングでは、量子標準サブテーマを構成する3機関の代表者、香取(東京大学、高本が代理発表)、洪(産業技術総合研究所)、小山(情報通信研究機構)が、現在までの各機関での研究の進捗状況と、今後の研究の見通しを発表し、その技術的な詳細についての議論を行った。午後の発表・質疑応答の後、自由討論を行い、宇宙ステーションACESによる高精度周波数リンクの可能性の議論や、光ファイバーリンクを用いた光格子時計の比較実験の進め方についての打ち合わせを行った。夕方、産業技術総合研究所・波長標準研究室の光格子時計群、超高安定化レーザー、光周波数コム、原子泉セシウム時計等の研究室見学を行った。午後の発表内容のサマリーは以下の通り。

**東大：高本「光格子時計の同期比較」**：東大で行った2台の光格子時計(1次元・3次元光格子時計)の同期比較実験について報告した。この実験では、レーザーの周波数ノイズを同相除去することにより、2,000秒ほどの短い積算時間で $1 \times 10^{-17}$ の高い安定度が達成され、光格子時計において多数の原子を用いる優位性が示された。発表ではまた、この周波数比較手法の遠隔地間、異原子種間周波数比較への応用、 $10^{-18}$ での周波数比較に向けた展開として水銀光格子時計、クライオ光格子時計について議論した。

**産総研：洪「産総研における光格子時計と光周波数コムの研究」**：産総研で展開されているYb光格子時計、Sr光格子時計、狭線幅化レーザー、ファイバー型光周波数コムの研究について、現状及びFIRSTプログラム量子標準における研究計画を説明した。特に、Sr光格子時計の研究においては、高速制御可能な光周波数コムを利用した冷却用狭線幅光源の開発に成功し、

第2ステージのレーザー冷却を達成した。高速制御可能な光周波数コムにおいては、ファイバー雑音を低減させることにより、長期安定度が $10^{-20}$ 台に達した。また時計遷移用の狭線幅化レーザーにおいては、線幅が3.5Hz以下であることが確認された。さらに、それぞれの研究テーマのロードマップを提示し、研究の進捗状況や今後の展開について議論した。

**NICT：小山「NICTにおける光周波数標準の研究開発と東大-小金井間ファイバー伝送比較実験の計画」**：2010年9月に実施したファイバー伝送実験以降、NICT小金井の光周波数コムシステムとキャリア伝送システムの間を接続する約40mのファイバーにノイズキャンセル機構を追加する改良を行ったことと、NICTの $^{87}\text{Sr}$ 光格子時計において偏極による一次ゼーマンシフトのキャンセルを行ったことにより、200秒程度の計測時間で東大-NICT間の相対周波数差を不確かさ $10^{-16}$ 台で計測することに成功したことが報告された。また4-5Hz程度の計測された周波数差に対して標高差に起因する重力シフト量等を考慮すると不確かさの範囲内で両者の周波数が一致することや、最近行われた $^{87}\text{Sr}$ 光格子時計と $^{40}\text{Ca}^+$ イオントラップシステムの周波数比較で、 $3 \times 10^{-16}$ の計測不確かさを達成したことも報告された。



## 【第2回】

幹事(報告者)：古澤 明(東京大学)

リーダー：井元 信之(大阪大学)

開催日：2010年11月16日

場所：東京大学

参加人数：9名

## 報 告 概 要

今回も前回同様、各グループから進捗状況の報告や問題提起があり、活発な議論が行われた。以下、各グループの報告内容について記す。

## 【阪大グループ】

今回は光子 qubit 伝送における位相雑音から量子情報を回復する研究を中心に報告した。複数光子が形成する DFS (デコヒーレンス不感部分空間) を利用する方法が有力であるが、従来法では効率が透過率の  $n$  乗 ( $n$  は 1 qubit あたり使用する光子数) になってしまう点で、伝送損失の影響が大きな足かせであった。新しく提案した方法はそれを 1 乗にしてしまう方法である。実験担当者から  $n=2$  の場合の実験詳細および 1 乗に比例することの実証実験結果を報告した。これは信号 1 光子と DFS 形成のため有強度コヒーレント光を使う方法であるため、1 光子と連続量の両パラダイムを結ぶ好例ではないかという質疑があった。

## 【東北大グループ】

今回は、小坂から「固体中のスピン測定における弱測定」と題した発表を、また D2 学生の稲垣から「量子メディア変換におけるプロセストモグラフィ」と題した発表を行った。前者の発表は、前回のサブグループミーティングにおける井元グループの発表 (Hardy のパラドックス実証実験における弱測定) に関連した宿題事項であった。後者の発表は、東北大グループにてこれまでにやってきた、



光から電子スピンへの量子メディア変換の量子性を証明する過程をまとめて詳細に紹介したものである。

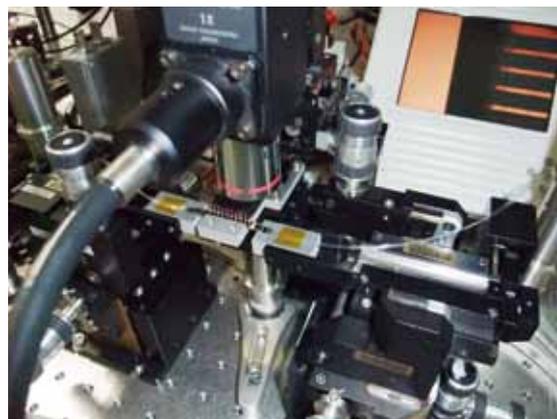
## 【NICTグループ】

1対1の通信プロトコルが主体になっている現在の量子情報通信に対して、新たに多者間ネットワーク上で量子効果を有効活用する新プロトコルの開拓を目指し、量子ネットワーク符号化という研究テーマについて発表を行った。

ネットワーク符号化では、ノードに適切なエンコーダを内蔵することで、回線を増やすことなく情報渋滞を緩和でき、またネットワーク全体での情報安全性を高めることができる。

## 【東大グループ】

我々は、1997年に佐々木らにより提案された、超加法性を示す量子最適受信機作製を目指している。その最も重要なエッセンスは、レーザーの状態であるコヒーレント状態  $|a\rangle$  を量子力学的に自在に操ることである。特に、その重ね合わせ状態であるシュレディンガーの猫状態  $|a\rangle \pm |-a\rangle$  を操ることは重要である。今回、その重要な一歩として、シュレディンガーの猫状態  $|a\rangle - |-a\rangle$  の量子テレポーテーションを行い、それに成功したことを報告した。また、英ブリストル大学の O'Brien 教授と協同して始めている、導波路を用いた量子光学・量子情報実験について報告した。



## アナログ量子コンピューター／ 量子シミュレーション

【第2回】

幹事(報告者)：高橋 義朗(京都大学)

リーダー：高橋 義朗(京都大学)

開催日：2010年10月19日

場所：京都大学

参加人数：20名

### 報 告 概 要

#### 1) 山本グループからの発表と質疑応答

エキシトンポラリトンを用いた量子シミュレーションの最新の結果について山本先生より発表があった。具体的には、i) 2次元系におけるBKT転移の振る舞い、ii) 高密度励起時のBEC-BCSクロスオーバー現象の観測、iii) p軌道やd軌道などの高次の軌道を持った超流動状態の観測、そして、iv) 量子フィードバック制御とボソニック誘導冷却を利用したイジングスピンモデルのシミュレーターの提案、について詳しい説明があり、いくつかの質疑応答があった。

#### 2) 高橋グループからの発表と質疑応答

光格子中のイッテルビウム(Yb)原子を用いたハバードモデルの量子シミュレーションの今後の予定とイジングスピンモデルのシミュレーターの提案、について高橋より報告があった。具体的には、i) Yb原子のフェルミ系に特徴的な高次スピン対称性とその研究のための光フェッシュバッハ共鳴の探索の重要性、ii) d波超流動の物理解明に向けた超格子系を用いた取り組みの可能性、iii) イジングスピンモデルのシミュレーターの提案、について説明があり、いくつかの質疑応答があった。

#### 3) 占部グループからの発表と質疑応答

占部研において最近行われたイオントラップ実験に関する発表が占部先生からあった。具体的には、i) イオントラップにおけるスピン依存性をもった力の原理に関する詳しい解説と占部研でのこれをデモンストレートする最近の実験、ii) ゼーマン量子ビットの長いデコヒーレンス時間の観測実験、について説明があり、いくつかの質疑応答があった。

#### 4) 五神グループからの発表と質疑応答

Cu<sub>2</sub>O中のエキシトンのボース・アインシュタイン凝縮実験および反強磁性体におけるねじれ励起実験に関する発表が五神先生よりあった。具体的には、i) Cu<sub>2</sub>O中のエキシトンのボース・アインシュタイン凝縮の相転移点近傍での非弾性散乱に起因する異常な振る舞い、ii) 3回対称性を有する反強磁性体における角運動量のやり取りに関する詳しい解説とねじれ励起の実験結果、について説明があり、いくつかの質疑応答があった。

#### 5) 全体質疑応答

幾つかの質疑応答があった。イジングスピンモデルのシミュレーターに関しては、モンテカルロ法などの計算法に対する優位性に関する議論や、特定のカップリングについてのみのシミュレーターの物理・化学問題として意義の議論、などがなされた。また、高速光子検出器の有用性に関する議論やロスが大きい系のBECに関する議論がなされた。



サブ  
テーマ

## 理論サブグループ

【第2回】

幹事(報告者): 小芦 雅斗(東京大学)

リーダー: 都倉 康弘(NTT 物性科学基礎研究所)

開催日: 2011年2月24日

場所: 大阪大学

参加人数: 11名

## 報 告 概 要

プロジェクトメンバー6名が約30分ずつの講演を行い、その後の質疑を通して議論を深めた。

都倉は、スピン量子ビットグループと共同で進めている研究の現状として2量子ビット演算による量子もつれ制御について報告した。また電子スピンの読み出しにスピン・電荷の変換が用いられていることから、電荷の読み出しとその反作用に関して理論的な考察を開始した。最後に、電子スピンをflying qubitとして使う為に必要な要素である理想的なスピンフィルタをスピン・軌道相互作用のある干渉計で実現する方法を提案した。

Noriは、超伝導導波回路を用いて動的カシミア効果を観測する可能性について報告した。真空状態の光共振器の端におかれた反射鏡を動かすと、境界条件が動的に変化し、絶対零度であっても共振器中に光子が発生する現象が動的カシミア効果であるが、鏡を機械的に動かす程度では、光子の発生頻度が小さすぎて観測にはかからない。Noriらは、超伝導導波回路の反射端への印加磁場を高速に変調することで、実効的に反射端の位置を高速に変位させる手法を提案した。熱的な励起との区別や、自発的パラメトリック変換との関連性について議論があった。

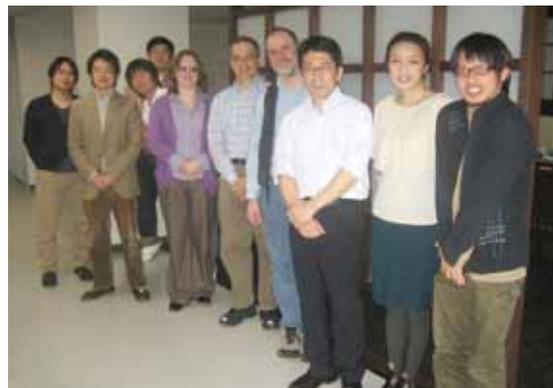
上出健仁(小川グループPD)は、単一モード発振する半導体レーザーの微視的な理論計算について報告した。上出らが与えた定常発振条件が適切にホールバーニング効果や利得飽和を記述することや、閾値キャリア密度の共振器離調依存性に低温において異常が見られること、それが電子正孔対のBCS的な不安定性に起因することを示した。発振解の具体的な計算方法、マイクロな分極間相互作用の物理的な意味、実験との比較に関して議論があった。

根本は、スケーラブルな大規模量子情報処理のシステムを構成するために、計算モデルから始めて、システムの基礎となる基本素子、またその物理過程へと分解する

ことで、スケーラブルな量子情報処理の構成方法を示した。また、そのような量子情報処理システム上に、情報処理の性能や機能、システム構成を変えることなしに、新たに構成素子に確率的な性質を取り込む方法を示し、必要となる基本素子の実現化方法を議論した。

小芦は、現実的な光子検出器を用いた際の、6状態量子暗号のセキュリティについて報告した。6状態量子暗号は、BB84方式に簡単な拡張を加えるだけで、鍵生成レートや到達距離を向上できる手法として知られているが、1光子と2光子以上の峻別が不完全な検出器を用いた場合に、その特長が維持されるかが不明であった。小芦らは、同時検出率により多光子攻撃を監視し、BB84方式を常に上回る鍵レートが得られることを示した。

Van Meterは、topological surface 符号に関する最近の研究成果について報告した。量子計算において、topological surface 符号は、最近接キュビット間の単純な操作に基づき高い誤り率のしきい値を達成できる有力な手法と考えられている。Van Meterらは、2次元格子構造におけるキュビットの欠陥の影響について、欠陥の頻度と実効的な符号距離の関係を定量的に明らかにした。また、Van Meterらが最近進めている、小規模なtopological surface 符号を量子シミュレーションに応用する可能性について議論がなされた。





## スピン量子コンピューター

【第2回】

幹事(報告者)：伊藤 公平(慶應義塾大学)

リーダー：樽茶 清悟(東京大学)

開催日：2010年12月2日

場所：慶應義塾大学

参加人数：7名

### 報告概要

スピン量子コンピューターサブグループの第二回サブグループミーティングを実施し、さらに慶應の関連研究施設のツアーを行った。各グループの発表と議論のサマリーは下記の通り。次回までの課題として、他サブグループのメンバーとの共同を検討することがあげられた。

**東大：樽茶、大岩「GaAs量子ドット中の電子スピンを用いた2ビットゲート操作とSi量子ドットへの技術拡張」**：磁石法によるスピン量子ビットの回転ゲートと交換結合操作を利用したスピン1重項制御と検出の実験実証、多ビット化のための量子ドット構成の提案、Si量子ドット作成のためゲート材料と構造の検討結果について報告、議論した。「光子—電子スピン量子状態転写」：GaAs2重量子ドットのパウリスピンブロックドを利用した単一光子—単一電子スピン間の角運動量転写実験と、コヒーレント転写に必要となるg因子制御量子井戸構造の評価について議論した。

**慶應：伊藤「シリコン量子コンピューター実現に向けたリン不純物エンタングルメント生成と検出」**：シリコン(Si)中のリン(P)不純物を用いた量子コンピューターの開発に向けて、P電子スピンと核スピンの間での2量子ビットエンタングルメントの生成と検知を行った実験が紹介された。 $^{28}\text{Si}$ という核スピンを持たない種類の同位体のみでの結晶成長に成功し、その中に添加されたPの不純物集団において、それぞれのリンの電子スピンと

核スピンのエンタングルメントをトモグラフィー測定で示すことに成功した。今後はP核スピン共鳴周波数に対する同位体効果の解析を行う。

**阪大：北川「Scalable and Practical Spin Amplifier with a Gain over 100」**：熱雑音に埋もれた微弱なスピンの信号を検出し、究極的にはスピン量子コンピューターの読み出しを可能にするスピン増幅の概念を、フォトン増幅と比較しながら論じ、そのスケーラブルな実現法を提案した。これまで疑似初期化した数量子ビットの実験で4倍程度の増幅率しか得られていなかったが、三重項状態を用いた動的核偏極によって核スピンを高偏極化した結晶全体に量子回路を拡張することによって140倍のスピン増幅に成功し、分光への応用も示した。

**大阪市大：工位「Molecular Spin Based Small-Scale Systems of Synthetic Qubits」**：小規模な1次元系分子スピン量子ビットの集積に関するtailor-made型の分子設計に基づき、分子スピン2-qubitアンサンブル系作成した。結晶格子内で、二つの電子スピンqubitのg-テンソルが異なるように配列させ、マイクロ波によって選択励起ができる。この系のすべての磁氣的テンソルを決定し、特定の静磁場方向を見出して、分子の電子スピンqubit系において、初めてCNOTゲートを実現した。



## 『理科好き』の子どもを育てるために —「教員」と「研究者」の連携への可能性—

品川区立小中一貫校 伊藤学園 主任教諭 富本 保明

2011年3月8日(火)、9日(水)、宇都宮聖子先生(国立情報学研究所)に品川区立小中一貫校へ来校いただき、「光」をテーマにした出張授業を本校の小学5・6年生を対象に行いました。今回の出張授業に向けて事前に5年生100名を対象にアンケートを行いました。下の表はその中の「出張授業で行ってみたいことはありますか。」という質問に対する回答の一部です。

- プリズムを見たい。
- 暗いところで小さい穴に光を通すと、物が逆に見えるという話を聞いたのでぜひやってみたい。
- 光が動くところを見たい。
- 光と光がぶつかるところを見たい。
- 虹を作りたい。

小学校での「光」に関する学習は、3年生で行うのみですから、学習経験から得た知識がたくさんあるとは言えません。しかしながら、記述内容からも子どもたちは光についての高度な内容に興味をもち、実際にやってみたと感じていることが分かりました。

今回の出張授業は、緑色の固体レーザーを使って水の中での光の進み方を調べたり、色の異なる風船の割れかたを調べたりするなど様々な実験を通して、「光の性質」について分かりやすく解説する内容でした。子どもたちにとっては、研究者による授業を受けることができるといって自体が大きな喜びであり、小学校にはない特殊な実験器具を使って実験ができたことが誇りとなりました。また、今回の授業のために何度も打ち合わせを行い、事前に様々な準備をすることで、私自身も子どもたちの知的好奇心を十分に満たす授業づくりの大切さを改めて感じるよいきっかけとなりました。

一方で、特に小学校の教員の多くが理科の授業を行うための準備、研修の時間が十分にとれないと感じていることが様々な調査結果として明らかになっています。学校現場の教員がゆっくりと授業の準備をしたり勉強したりする余裕がないということで、子どもたちの「な



ぜ」「どうして」に答える授業づくりが十分にできないという現場の実態が大きな課題です。そのためにも外部の様々な機関と連携して知識や技術を共有し、協力して授業づくりを行っていくことが重要であると考えます。

宇都宮先生は本校の理科支援員として前年度一年間勤務した経験があり、研究者から見た学校現場の現状と課題に対して、様々なアプローチで理科の授業づくりに取り組まれていました。また、小学校5・6年生の実態をしっかり把握し、目の前の子どもたちの悩みや疑問を見つけ、授業の中で分かりやすく教えてくだっている姿が多くありました。学校現場の教員が研究者の方や高度専門機関などと連携して授業づくりをしたいという気持ちは強くあっても、日々の教育活動に追われるあまり「すぐに活用できるもの」「即効性のあるもの」「誰でもできるもの」を求める傾向があります。一方で研究者の方々がご自身の専門分野を学校現場で子どもたちに伝えようと考えても、子どもたちの実態の把握が難しいために、十分な手応えが得られないという懸念も残されています。

今回の出張授業は、本校の子どもたちの実態を良く知っている研究者と教員による相互協力型の授業体制によって、一定の成果を挙げることができました。しかし、このような取り組みを多くの学校で実施するには、さまざまなハードルがあると思います。このハードルを教員、研究

者双方から取り除き、無理なく連携を図っていくための「フォーマット」作りを今後も継続して行っていきたいと思います。



## 理工学部進学予定のSSH高校生に対する出張授業

■実施日 2011年2月23日(水) 13:40～15:10(90分) ■対象 早稲田大学本庄高等学院 高校3年生(早稲田大学先進理工学部への進学予定者32名)、ほか教諭3名  
 ■授業名 「進学準備セミナー～量子力学、時間標準を通して～」 ■担当 志賀信泰(JSTさきがけ、情報通信研究機構)、蜂須英和(情報通信研究機構)、宇都宮聖子(国立情報学研究所)

大学進学が決まった理系の高校3年生、理科の先生方に対して、「どのような現象が量子力学で説明できるか、またその理論が実際の生活の中にどのように応用され、生活に役立っているのか」をテーマに、90分の講義を行いました。

生活に密着した話題である「時間・周波数標準」をイントロに「原子時計」の話につなげ、さらに量子力学を用いたアドバンスな話として「原子のレーザー冷却技術」についてスライドを用いて紹介しました。途中、今回の授業のキーワードである「分光」の概念を説明するために数種類の色の風船をレーザー光で割るという実験デモを行いました。

好奇心を持った生徒さんが多く、積極的に授業に参加していただきました。授業後のアンケートでは、「今まで授業を受けていて、遠い世界の話だと思っていたようなことが、とても身近に感じられた」「量子力学、時間、レーザー冷却、原子などについて大学でもっと勉強、研究したくなった」という内容のコメントをいただくことができ、授業内容は難しすぎず、かつ大学での学習意欲を刺激するような内容も盛り込むことができたようです。今回の授業の目的が果たせたのではないかと考えています。

アンケートの「研究職のイメージ」を問う質問に対しては、「実

際に研究職に就かれている方のお話をきいて、より具体的にイメージできるようになりました。研究職楽しそうだなと思いました。」というように、「面白そう」「楽しそう」「かっこいい」という言葉が多く(のべ13名)見られました。若者の理系離れが問題となっています。私たちのような現役の研究者が彼らに研究の面白さや楽しさを伝えることは、この問題を解決する一つの特効薬となるとともに、私たち研究者はこの問題を解決する重要な役割を担っているのだと今回の出張授業を通して実感しました。

[JSTさきがけ、情報通信研究機構 志賀信泰、  
 情報通信研究機構 蜂須英和]



## SSHを通じて高校生に何が残せるのか

■実施日 2011年2月2日(水) ■対象 兵庫県立神戸高校 1年生(40名)  
 ■授業名 「情報と量子—速くて安全な情報への試み」 ■担当 松原健祐(情報通信研究機構)、佐藤貴彦(学生チャプター・東京大学 今井研)

実験や視覚を利用したアプローチが難しい『情報の授業』において、高校1年生に対してどんな話題なら興味を持ってもらえるだろうか?と話し合った結果、松原が『量子暗号』を、佐藤が『計算機の歴史と量子コンピュータ』をテーマに授業することに決定。せっかく貴重な機会をいただいたので、生徒一人一人が授業の結果を何か一つでも忘れない知識として持ち帰ってもらえるような話をすることを念頭に置きながら準備しました。

当日の講義では、『自分が普段乗っているグライダーの話』や『情報科学が目指した人工知能は、何故現在も実現していないのか?』などの話から導入(講師、生徒双方硬さが取れずお互いに緊張気味)。しかし、本題の計算機の歴史に入り、対話型の授業を進めていくうちに、お互い緊張が解け始め、ひと安心しました。

情報科学における階差数列の汎用性やコンデンサの発明が持つインパクトなどの『教科書では公式として記号化してしまっている項目の重要性』や、バベッジ・チューリングなどの『革新的な発明を行った人の人物像』を軸に話を進め、最後は『計算量問題と量子コンピュータ』について出来るだけ平易な説明を締めくくりました。

少し難しい話をしてしまったのではないかと不安もありましたが、バス停までの帰り路で会話を交わした生徒の満足そうな様子から、SSHを通じて科学や学問の持つ本来の楽しさを、一端でも伝えられたのではないかと感じました。

最後に、今回のSSH出張授業の経験を生かし、今後は準備における早い段階で、発表者と学校側の担当の先生が直接コンタクトを取る体制を作るべきだと思います。これにより、SSH出張授業に対する誤解などが発生した際に、現場の意見を十分に理解・反映した授業を行うための柔軟な対応が可能になると考えます。

[東京大学 佐藤貴彦]



## SSH戸山高校公開講座での講演

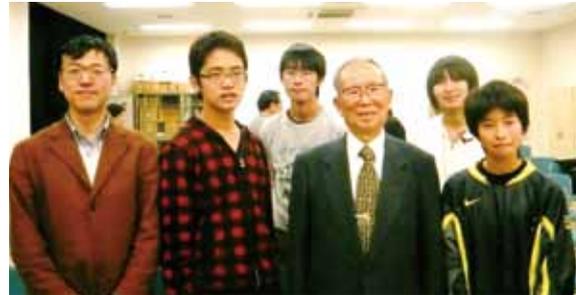
■実施日 2011年1月29日(土) 14:00~16:30(150分)

■授業名 「物理学(特に量子物理)と日常生活・社会との関わり」(講演内容の詳細は、戸山高校ホームページ「公開講座」をご覧ください。)

■担当 アドバイザー上村 洸(戸山高校の前身・旧制都立四中最後の卒業生)

母校の公開講座では、SSH生(1, 2年)、保護者、同窓生、都民、教員という聴衆の層の広さと、年齢分布がSSH生の15歳から筆者と同期のシニア世代まで広範囲であるために、講演の構想作りに苦労しました。最初にSSH生向けに、「物理にどの様にして興味をもち、研究を進展させてきたか」との話をし、次に「物理学と社会との関わり」、最後に、筆者が所属の「東京理科大における教育と研究」の3部に分けて話をしました。ここではSSH生向けの話に絞って報告します。「毎日空を眺めて、空が何故青いかと考えたことがありますか」という問いかけから、自然科学では好奇心が重要との趣旨の講演を始めました。我々の日常生活が快適になるように、科学者やエンジニアが好奇心と英知を結集し、どのようにして半導体から素晴らしいデバイスを作成しているかのスライド(浜松フォトニクス作成)を見せながら、このようなデバイスを作るには、「量子の世界」の物理をしっかりと勉強することが重要との話をしました。「量子の世界」で、量子力学がどのようにして誕生したかの説明で、アインシュタインの光量子

仮説とレイ・ドゥブローイの「電子は波」の二つを例にとりて話をしたところ、SSH2年物理コースの生徒から、数々の質問があり、その質疑のやり取りから、会場全体が盛り上がり、講演の目的を達成することができました。講演後、SSH生から質問や相談が多数あり、大変実りの多い公開講座となりました。写真は、その時SSH生と一緒に撮ったものです(左端は、東京大学ポスドク笹岡健二博士)。また後日、上記SSH2年生から、「大学では物理学を勉強したい」との嬉しい礼状を頂き、感激した次第です。



## 九州大学/アントレプレナーシップ・プログラム学生のスタンフォード大学訪問記

九州大学 産学連携センター教授 谷川 徹

九州大学は、学生のチャレンジ意識やグローバル意識の涵養を目的として毎年、20数人の学生を引率しシリコンバレーで1週間にわたる研修プログラムを実施しています。九州大学/ロバート・ファン/アントレプレナーシップ・プログラム(略称QREP)といい、単位を与える正規のプログラムですが、イノベーションのメッカといわれるシリコンバレーの独特の雰囲気の下、ベンチャー、大企業、大学、地方自治体、NPO等、様々な分野で活躍する現地のアントレプレナーを招聘し講義して頂くほか、企業訪問、大学訪問、スタンフォード大学の学生との討論等も盛り込み、1週間に20数科目の授業を提供しています。このプログラムはいわゆるベンチャーの起業を促進するためのものだけでなく、社会の様々な分野で、自らの夢を実現すべく新しい価値創造にチャレンジすること、またグローバルな環境での個人の競争力醸成を意識すること等の重要性に気づかせるためのものですが、短期間に学生たちの意識は劇的に変化し大きな効果上げています。

2011年3月には、スタンフォード大学で量子コンピュータの研究を行っている、山本喜久教授の研究室とラボを訪問させていただきました。日本の大企業研究者からスタン

フォード大学教授に転じ数々の業績を挙げている山本教授から、日米の大学の研究環境、研究者の意識の違い、学生の意識や立場の相違などのレクチャーを受け、またラボツアーもさせていただきました。理系学生だけでなく文系の学生もいたのですが、研究成果に対する厳しい緊張感や、海外の大学に留学して異なった環境に身を置き、多様な価値観を持つ世界の学生と切磋琢磨することの重要性等に多くの学生が気づき、大いに触発された様子でした。世界に通用する研究者になるための意識改革に大いに役立ったと感謝しています。



● 浜松ホトニクス中央研究所材料研究室

当グループでは、浜松ホトニクス中央研究所材料研究室において、山西正道リサーチフェローの指導の下、6名で研究を行っています。研究は大きく2つのテーマからなっています。1つは量子計測に重要な低ダークカウントの光検出器の研究で、もう1つのテーマが中赤外領域の光源の研究です。

1.55 $\mu\text{m}$ 帯単一光子検出器の開発

光検出器の研究においては光子検出に重要なダークカウントの低減に力を入れて研究を行っています。通常の量子型光検出器においては熱的に励起される電子がダークカウントの源になるため、検出器を冷却して使いますが、1.55 $\mu\text{m}$ 帯のような近赤外領域においても検出器の感度が高くなると、光学系などから発せられる黒体放射によるダークカウントの上昇が支配的となります。そこで当研究室では、検出したい光は冷却器内に導光できるが黒体放射は導入されない仕掛けを作り、低ダークカウントの光検出モジュールを作製しました。この結果、簡便なペルチェ素子による冷却(187K)においても、ダークカウント72cps、量子効率2.1%(1.55 $\mu\text{m}$ )の近赤外PMTモジュールを得ることができています。

このPMTモジュールの作製以外に、以下の光検出の研究も着手しています。

- ①高速応答が可能な近赤外用ハイブリッド光検出器(HPD)の開発に取り掛かりました。HPDの構造概念図を図1に示します。時間広がり15psの設計値を得ています。
- ②中赤外領域の単一光子検出を波長変換技術によって達成しようとしています。

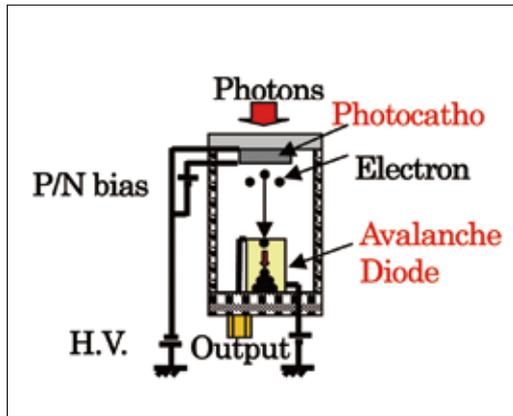


図1 近赤外HPDの構造概略図

中赤外量子カスケードレーザーの低閾値化

中赤外領域の光源に関しては消費電力の小さい量子カスケードレーザー(Quantum Cascade Laser, QCL)の研究を進めています。これまでのところ、内部損失を大幅に低減できる間接注入励起構造<sup>†</sup>(indirect pump scheme, IDP)を活性層に利用し、素子を短共振器化することによって実効的な駆動電流の低減に成功しました。発振波長8 $\mu\text{m}$ 帯で共振器長500 $\mu\text{m}$ の素子において発振閾値電流100mA以下を実現しました。さらなる短共振器化を目指してFIB加工によるエッチドミラー構造の作製にも着手しました。今後は共振器構造中の光と電子の強い相互作用によるポラリトン状態を利用したこれまでにない新しい発光素子の実現も期待されます。

間接注入励起構造はさらに波長の長いTHz帯でも威力を発揮しています。上位準位と下位準位のエネルギー差が15meV程度と非常に接近している場合であっても、選択的に上位準位にキャリアの注入が行なわれ、効率的な反転分布の形成が可能であることが分かりました。図2に発振波長3.9THz(77 $\mu\text{m}$ )の素子特性を示します。動作温度15Kにおける閾値電流密度は350A/cm<sup>2</sup>とTHz-QCLとしては極めて低い値を達成しました。活性層構造の最適化によりTHz領域でもペルチェクーリング可能(~250K)な素子の実現が期待されます。

<sup>†</sup>) Yamanishi et al., US-PAT No.7843981

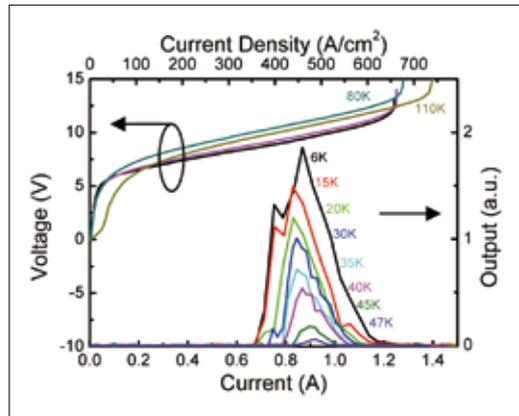


図2 IDP THz-QCLの素子特性

NTT物性科学基礎研究所

当研究所はNTT事業への貢献に加え普遍的知見の獲得を目指す学術的貢献をミッションとして、機能物質科学、量子電子物性、量子光物性という三つの研究分野で活動しています。神奈川県厚木市森の里と言う、大山の麓の自然豊かなロケーションに百名弱の研究者から構成されています。FIRST量子情報処理プロジェクトには3つの研究グループが参加しています。以下簡単に各グループの概要を紹介します。

量子光制御研究グループ(グループリーダー: 都倉康弘、社員・研究員16名)では理論チームと冷却原子実験チームが量子情報処理の研究を行っています。その他光非線形や単一光子検出の実験等も進めています。

理論チームは、固体量子ビット、特に半導体量子ドットに閉じ込められた電子スピンをもとにした量子ビット系のコヒーレント制御や測定に関して調べています。またスピン・軌道相互作用やフォノン、核スピンとの結合等の様々な自由度を如何に抑制、活用するかを検討しています。また量子暗号や量子中継の基礎的な理論研究、光格子中の冷却原子物性や励起子制御などにも取り組んでいます。冷却原子実験チームは、中性原子のボース凝縮まで実現できる原子冷却技術に超伝導永久電流を組み合わせた「超伝導アトムチップ」を開発し、世界に先駆けるオリジナルな研究を進めています。(図1)我々の技術によれば、原子を非常に強く且つ安定に捕捉できることから、外部自由度までも量子化した原子の全量子的制御が当面の課題です。将来的には、全く区別のつかない同一の物理的実在としての原子を数多く並べて、互いに量子的な相関を持たせて制御することも視野に入れています。また、光ファイバーのような2次元的な閉じ込めをド・プロイ波に適用できる単一モード原子導波路の開発にも取り組んでいます。この研究が成功すれば、同サイズの光干渉計の百億倍の高感度を持つ原子干渉計が実現することでしょう。「原子と光と超伝導の持つ量子の力で未来をちょっと良くしよう」それが我々の目標です。

超伝導量子物理研究グループ(グループリーダー: 仙場浩一、社員・研究員7名、大学院生1名)が取り組んでいる主なテーマは、ジョセフソン接合を含む超伝導磁束量子ビット(超伝導人工原子)を用いた量子情報処理研究および分子線エピタキシー結晶成長技術を用いた機能素子開発等です。これまでに超伝導人工原子における多光子遷移の観測(Phys. Rev. Lett. **93**, 037001 (2004).)、複数の制御周波数を用いるパラメトリック・ラビ振動の観測(Phys. Rev. Lett. **96**, 107001 (2006).)、人工原子

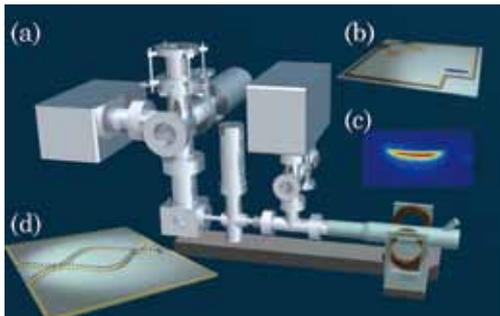


図1 (a):実験装置の概要図。(b):超伝導アトムチップの概要図。(c):図(b)のチップに捕捉された原子集団。(d):原子干渉計の参考イメージ。

とLC共振回路間での真空ラビ振動の観測(Phys. Rev. Lett. **96**, 127006 (2006).)、LC共振回路の非古典的光子状態生成(Apl. Phys. Express **3**, 103101 (2010).)等に成功してきました。最近、コヒーレンス時間内に周波数を何回も変えられる量子ビット作製に成功しました(Apl. Phys. Lett. **97**, 102503 (2010).)。(図2)この素子は、デコヒーレンスに有利な最適動作点でnsの時間スケールで量子ビットの周波数を自由に変わるので、量子バスや量子メモリーなど他の量子系との結合を同調/離調によって制御する際に活躍するものと期待されます。

量子固体物性研究グループ(グループリーダー: 村木康二、社員・研究員10名)では、半導体ヘテロ構造や量子ドットなどの半導体ナノ構造において、電子の干渉や電子間相互作用によって生じるさまざまな量子相関状態の生成・制御を行い、それらを用いた量子計測技術や新機能量子デバイスの開拓を目指して研究を行っています。そのために、超高純度ヘテロ構造の結晶成長や電子線描画を用いた微細加工、極低温や強磁場、高速パルス測定、低温走査型トンネル顕微鏡・分光など、さまざまな技術を駆使しています。半導体量子ドットを用いた量子ビット研究に関しては、これまでに二重量子ドットを用いた電荷量子ビットの研究を進めてきました。2組の二重量子ドットを静電的に結合させ、2量子ビット演算を実証しました(東京工業大学藤澤教授との共同研究)。また、最近では二重量子ドットに電子1個だけを閉じ込め、高速パルスによって、その量子状態を自在に制御することに成功しています。(図3)当研究グループでは、これまでの量子ビット研究の延長線上にない、グラフェン、ナノワイヤー、分子などの新材料の探索や、トポロジカル量子計算など、まったく新しい手法の検討にも取り組んでいます。

[NTT物性科学基礎研究所 都倉康弘、向井哲哉、仙場浩一、太田 剛]

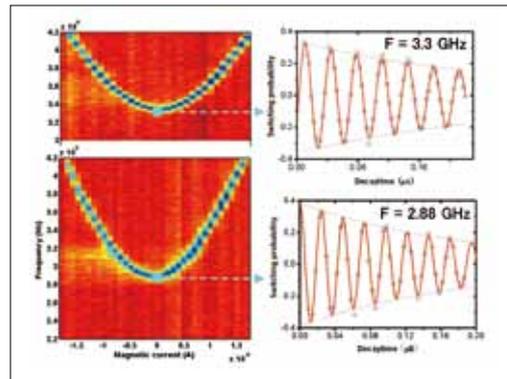


図2 量子ビットの異なる周波数の最適動作点におけるRamsey干渉

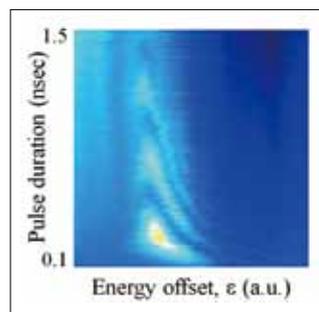


図3 単一電子二重量子ドットにおける電荷状態のコヒーレント振動

# エッセイ

Essay

3月11日の震災とその後の津波の被害は甚大であり科学技術の無力さを思い知らされている。現在も避難されている方々の健康と、被災地の復興を願ってやまない。さて、ここ数年地球温暖化の原因として温室効果ガス排出が問題視され、これを削減する為に「エコ」が強調されてきた。しかし今回の震災による福島第一原発の障害がもたらした首都圏のエネルギー危機は「エコ」のレベルを遥かに超え、人々の生活パターンを変えざるを得ない深刻な状況となって来ている。しかしながら、人類の知恵をしぼる事によって様々なレベルで我々が使用するエネルギーを減らして行く事は可能であると信じている。本稿ではこの機会に「量子情報」の研究が長期的視点から省エネルギーの側面にどのように貢献できるかを考察しようと思う。

計算すなわち情報処理を物理系と切り離して議論する事ができない事は大変重要である。1961年にIBMのロルフ・ランダウアーは通常の計算に伴う熱の発生に関して議論している。この熱の発生は計算の過程が不可逆である事と関係している。例えば二つの数23と7からその和30を求める計算を考えてみよう。この逆、30から23と7を求めるのは不可能である。ベネットとランダウアーはこの不可逆性が計算過程での情報の消失に起因するとした。物理的「情報」が失われる時、必ず何らかのエネルギー散逸が起こり熱の発生が見られる。もし情報を失わない様に計算を進めれば(上の例では、和30に加えて、最初の数の一つ7を保存しておく)必要な最小エネルギーは無いとされる。この様な可逆的計算システムの代表的一例がフレドキングゲートである。またその様な可逆ゲートの量子版を使用しているのが量子計算機である。では量子計算機は(少なくとも計算に関わる)エネルギー問題を一切解決するだろうか？

我々が1ビットの情報を観測(記憶)する際にはまず我々のメモリを1ビットクリアする必要がある。そろばん

でも計算を始める際にはまずは珠を一定の位置に設定する必要がある。上で述べた様にこの物理的「情報」の消去は熱の発生を伴う。ユニタリ演算で構成される量子計算機であっても最終結果を観測して人間に役に立つ古典的情報に還元する際には少しエネルギーを消費する。さらに物理系で必ず存在するデコヒーレンスや量子ゲート操作に伴うエラーを訂正する為の「量子エラー訂正」では計算途中で量子ビットの測定を行う必要があり、この過程での熱の発生は避けられない。一方クラスター量子計算では巨視的にエンタングルした量子ビットを順次観測して行く事により計算を進めるので、消費エネルギーの面で課題が無いだろうか？ ごく最近(古典)情報をエネルギーに変換する実験が中央大学の鳥谷部氏らにより報告された。(Nature Physics 2010) エネルギー勾配のある状態間を移動する粒子のブラウン運動を観測し、その結果をリアルタイムにフィードバック制御する事により粒子を駆動するというものだ。この成果は情報とエネルギーをうまく扱う事によりお互いに変換できる事を示している。これを進めた「量子情報」とエネルギーの間の変換は、量子フィードバックとも関係する大変興味あるテーマである。

これまで観測に伴う熱の発生のみを考察したが、その他外部からの制御パルスに伴う散逸や、系全体を冷却する為のエネルギー等、他にも検討すべき事項は残されている。量子計算機は古典計算機には処理できない種類の問題を解決できるという質的に優れた性能を持つ。また地球シミュレータの様な膨大なエネルギーを消費する汎用計算機で行われている物理シミュレーションを量子計算機が行う事も考えられている。これを古典計算機に比べ非常に小さな消費エネルギーで実行する可能性は大いにあると思われる。量子情報がエネルギーをもっと「上手に」制御できる技術に発展する事を祈念して、筆を置く。

## 量子情報はエネルギー危機に貢献できるか？

都倉康弘

No.4 June 2011

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 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 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再生産を促進しています