

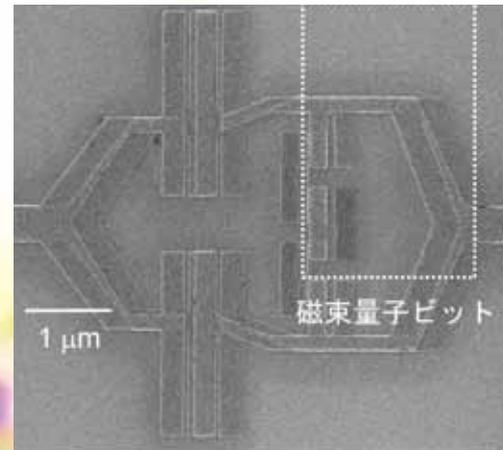
FIRST/NII-GRC on Quantum Information Processing Newsletter

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 中心研究者からのレター
- 04 海外研究動向
- 06 最近の研究成果
- 10 サブテーマミーティング
- 12 学生チャプター
- 14 サイエンスアウトリーチ
- 18 研究室紹介
- 20 エッセイ



P7 最近の研究成果より



P16 サイエンスアウトリーチより

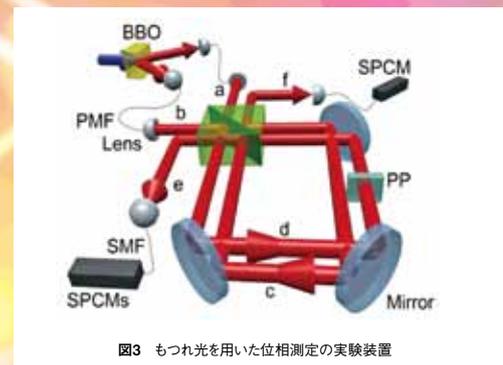


図3 もつれ光を用いた位相測定の実験装置

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))

研究支援統括者：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)

アドバイザー

●光 末松 安晴((公財)高柳記念財団) 寛具 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)

● NEWS

■樽茶清悟教授(東京大学)が、Fellow of The Institute of Physicsに選ばれました。

(授与日：2011年4月1日) IOP Fellowは、物理学の研究を通して直接的に、あるいは物理学の発展や振興を支援する形で専門分野において多大な貢献をしたIOP会員に授与されます。

コメント：思いもかけず、伝統あるIOP Fellow受賞のお知らせをいただき、喜んでます。研究をともにして頂いた多くの方々に感謝します。

■香取秀俊教授(東京大学)が、Philipp Franz von Siebold Awardを受賞しました。

(受賞日：2011年6月28日) 同賞は、日本とドイツ連邦共和国における文化および社会のよりよい相互理解に貢献し学問上優れた業績をあげた、50歳未満の日本人研究者に授与されます。賞は財団の年次大会で、ドイツ連邦共和国大統領より授与されます。

コメント：10年間進めてきた「光格子時計」の研究は、ドイツでのポストドク時代に行ってきたイオントラップ研究の経験を源泉としています。この技術が世界各国に広まり、この功績によって同賞を授与されたことは大きな喜びです。



● INFORMATION

■お詫びと訂正

「量子ニュース」4号の記事の中で、一部誤りがありました。謹んでお詫びするとともに下記のように訂正致します。

p.02「○プロジェクト組織」欄 誤：「小芦 雅斗(大阪大学)」 → 正：「小芦 雅斗(東京大学)」

■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、全体会議を開催致します。詳細は別途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

福島原発事故に思う

—国民の Educated Choice に果たすべき科学者の責任—

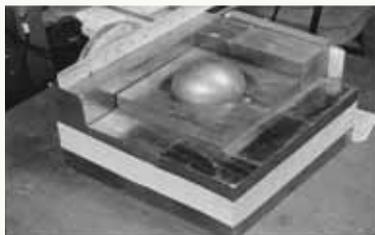
国立情報学研究所 / スタンフォード大学
山本 喜久

福島原発事故の後、科学者の責任を問われた際によく聞かれた回答は、“新しい知識を獲得するのが科学者の役目、その知識を元に新しい技術をその安全性も含めて開発するのは技術者の役目”という役割分担・門前払いの議論であった。その論旨に違和感を持った。電気工学がかってそうであったように、原子力工学も昔は物理学の一部であった。自分の教え子が社会に出て成長し一人前になった後も、その人の活躍を見守り続けることが教育者の大切な仕事の一部であるように、実用技術として社会に導入された基礎科学の成果の“光と影”を客観的に検証し、事実を社会に発信することは、科学者の大切な仕事の一つである。特に、大学に籍を置く科学者は、研究者である前にまず教育者であることが社会から期待されている訳であるし、政府や産業界からの独立性が担保された地位に就いているのであるから、この面での社会貢献は自らの存在意義に係る重要な役割であるはずである。

Introduction to Nuclear Energy
PH241 - Stanford University
R. B. Laughlin, 10 Feb 11



ここに一枚のスライドがある。米スタンフォード大学物理学科の講義で使われた冒頭スライドである。コース名は Physics241: Introduction to Nuclear Energy である。インストラクターは日本でもお馴染みのあの人 (1998 年分数量子ホール効果の理論でノーベル物理学賞) であった。このスライドから始まる講義は 2011 年 2 月 10 日に行われた。この日の講義では、過去原発事故の中でも炉心溶融と臨界という重大事故となった Chalk River, Kyshtym, Idaho Falls, Detroit, Three Mile Island,



ロスアラモスの“死球”



チェルノブイリの“核心”

Chernobyl, Tokaimura の 7 つの例が取り上げられ、事故の主な原因となった装置の欠陥、時間経過を辿った事故の再現が一つ一つの例で検証された。冷却能力の不具合が事故の主な原因となったのは上記 7 例のうち実に 4 例であった。

この講義の 2 日前、2011 年 2 月 8 日の講義では、放射線被曝による生体への影響が議論された。この日の講義は、“10 年を経過した使用済核燃料 1 トンから 3m 離れた位置に数分間いて浴びる γ 線被曝量はちょうど成人男性 (体重 100kg の人) の致死量に相当する”という簡単な計算からスタートした。その後、ハエや豚を使った被曝実験、ロスアラモス国立研究所での臨界事故 (生死を分けた線源からの距離の差はわずか数 m であった) が詳しく検証された。

34 名の学生がこのコースを履修した。彼等の中間および学期末レポートは、次の URL から見ることができる。http://large.stanford.edu/courses/2011/ph241/。一人の学生が、“日本における核燃料の再処理”についてレポートをまとめた。そのレポートは、以下の文で締めくくられている。“天文学的な開発費が投入された過去 50 年にわたる日本の原子力エネルギー開発の歴史は数多くの事故の歴史でもある。2003 年に発覚した原子爆弾 25 発分のプルトニウムの紛失事故は、テロリストや外国工員による仕業ではなく、単なる帳簿管理上のミスであったかもしれないが、非常に多くのプルトニウムが日本国内に蓄積されているという深刻な事実を国民に知らしめた。2007 年の中越沖地震で柏崎刈羽原発が被災した際には、活断層の上に国土全体がのっている日本で 54 基もの原発を安全に操業することの難しさを国民は知ることになった。にも関わらず、政府による強力な原子力エネルギー開発が進められてきたのは、決して経済効果 (コスト) などのためではなく、エネルギー資源の 4% しか国内で生産できないこの国をエネルギー独立国家にしたいという日本政府の願いが背景にあるからである。もし今後、更なる原発事故を回避することに成功したなら、日本は核燃料の再処理と高速増殖炉を車の両輪として、エネルギー問題の長期的解決策を他のエネルギー資源大国に先んじて手に入れることになるだろう。”このレポートは、2011 年 2 月 13 日に提出された。その 1 ヶ月後、日本政府の夢は福島で潰えた。

民主主義の根幹は、正確な情報を知らされた国民一人一人による選択 (Educated Choice) である。広い視野、正確な知識、公正な判断力を身につけた科学者を社会のオピニオンリーダーとして育てていくことが我々の責務である。国民が大学に期待しているものは、大学発のベンチャーや大学ランキングなどでは決してなく、やはり広義の教育なのである。

超伝導回路量子電磁力学の展開

(独) 理化学研究所 客員研究員 / 日本電気(株) 主席研究員
中村 泰信



冒頭から脱線して恐縮ですが、今年は超伝導発見100周年の記念すべき年です。また来年はジョセフソン効果提案50周年でもあります。ともに長い年月を経て基礎から応用まで大きな研究分野の礎となり現在に至っています。100年前といえばまだ量子力学も確立していなかった時代、思えば遠くへ来たものです。

さてタイトルに掲げました、いかにも大仰な「超伝導回路量子電磁力学」(漢字11文字!)は英語でcircuit QED (quantum electrodynamics)と呼ばれています。先に原子と光の分野で研究されていた「空洞共振器量子電磁力学」(こちらも11文字!)いわゆるcavity QEDをもじって名付けられました。人工原子としての超伝導量子ビット回路をチップ上の超伝導共振器回路と組み合わせ、マイクロ波帯の電磁場と量子ビットの相互作用を制御します。巨視的な超伝導量子ビットの持つ大きな電氣的・磁氣的モーメントを活かして、電磁場との強い結合が容易に得られることが特徴です。

circuit QEDの研究は2004年にYale大学のグループが原理実証したのを皮切りに、驚くべきスピードで進んできました。量子演算ゲートの実現ばかりでなく、量子光学分野の新しい物理を探求するための舞台として、マイクロ波帯で標準量子限界に迫りさらには凌駕するような比類無き低雑音計測を行うための観測器としてなど、様々な方向へ展開しつつあります。

最近の動向

最近一番のサプライズはセンチメートルスケールの空洞共振器と超伝導量子ビットの結合の実験でしょうか。あたかも歴史的流れに逆行しているような研究ですが、十分結合強度が取れることだけでなく、量子ビットのコヒーレンス時間(T_1)がこれまでの約 $10\mu\text{s}$ から $60\mu\text{s}$ 程度に伸びることが報告されました[H.Paik et al. arXiv:1105.4652]。まだまだ基礎に立ち返るといろいろ学ぶべきことがあるということを教わりました。量子ビットの入った共振器をSMAコネクタ(市販のマイクロ波コネクタ)で多数接続してレゴブロックのように量子計算機が組み立てられたら面白いでしょう。ちょっと大きくなりそうですが。

ハイブリッド量子系にも注目が集まっています。非常に高度化されてきた超伝導量子回路の制御技術を活かして、他の量

子系を制御・計測するのに用いたり、量子メモリとして他の量子系に量子情報を蓄えたりすることが研究されています。最近の白眉は力学的共振器の基底状態の実現と量子状態の制御[A.D.O'Connell et al. Nature 464, 697 (2010); J.Teufel et al. arXiv:1103.2144]でしょうか。またダイヤモンド中のNV中心など固体中のスピン集団と超伝導量子回路のコヒーレントな結合も実現されています。量子ネットワーク実現に向けたインターフェイス技術への応用も視野に入れた発展が期待されています。

研究のDNA

超伝導のそれと比べると遥かに短い歴史ですが、超伝導電気回路上の巨視的量子コヒーレンス(Macroscopic Quantum Coherence; MQC)の実現を目指した研究は、量子計算ブームに火が点くよりも以前の1980年代初頭から、純粋に物理的な関心に基づいて始まっていました。興味深いのは、現在この分野の牽引役となっている研究者の多くがその時代に若手研究者としてのキャリアをスタートしていることです。当初は誰も量子ビットのここと念頭に置いていなかったはずですが、30年後の現在における進歩はまさに当時の研究の蓄積のおかげです。

近年のこの分野の研究の急速な進展により、現在欧米ではかなりの研究資金が投入されています。その恩恵も受けて、世代交代へ向けて特にアメリカで若手研究者のポスト獲得が進み、ここ4~5年で研究グループの数が倍増したと言っても過言ではありません。MQC第1世代から数えると3番目ぐらいの世代に相当するでしょうか。ここにも開拓者世代の影響は大で、世代間の系統図が簡単に描けます。研究のDNAというのは綿々と受け継がれていくものようです。

一方で昔と違い現在は、実験設備も格段に向上し、情報も電子化されて容易に持ち運べるので、研究ノウハウの拡散係数は遥かに大きくなっているはず。その意味では世代のサイクルはこれからどんどん早まるのかもしれませんが。また量子情報という共通言語が生まれたおかげで、異分野からの参入障壁も昔よりずっと低くなり、交流も容易になっています。国内でも若い世代の優秀な研究者がこの分野にどんどん参入して活気をもたらしてくれることを期待しています。

超伝導キュービットを用いた 原子物理学と量子光学の 海外研究動向



理化学研究所 チームリーダー
フランコ ノリ

要約

最近Nature誌は9ページを割いて、超伝導キュービットを用いた原子物理学および量子光学の世界的な研究動向の解説を行った[1]。原子物理学、量子光学、ナノサイエンス、物性物理学など伝統的に分離していた分野は、相互に巻き込みあい新たな学際的領域として部分的に融合してきている。たとえば、超伝導回路は通常原子系で見られるような量子現象を示すように設計できるようになっており、従って原子物理学と量子光学における様々なアイデアのテストを行うプラットフォームを提供できることになる。参考文献[1]はこの分野における発展をレビューし、また将来研究における基礎および応用の方向性を検討している。

Article:

ジョセフソン接合を用いた超伝導回路は人工原子として振舞うことができる[1-4]。この量子回路ではジョセフソン接合は非線形回路素子として働き、その非線形性により非等間隔のエネルギー準位が保証される。その結果最低エネルギー準位群に対して外場により個々にアクセスする事ができる。実験においてはこれらの回路はマイクロメートルスケールで作成され、ミリケルヴィンスケールの温度で動作する。その低次元性と超伝導により、環境に起因する散逸とノイズは大きく抑制され、回路は量子力学的に振舞うことができる。

ジョセフソン接合にもとづく超伝導回路は、量子計算に用いるキュービット(制御可能な量子2準位系)として用いられる事から非常に活発な研究テーマになっている。この回路の典型的なデコヒーレンス時間は量子計算に必要な時間より短いが、マクロスコピックな量子コヒーレンスが顕著な量子的振舞いを示すには十分な時間である。この量子回路は多くの超伝導固有状態を持ち、その離散的な固有値はクーパ対の破壊を含む準粒子励起のエネルギー準位よりも小さい。この性質によってこの量子回路は超伝導人工原子のように振舞うことができる。実際自然原子と超伝導回路により作られた人工原子の間には深い類似がある。両者ともに離散的エネルギー準位を持ちそれらの準位間でのコヒーレント量子振動を示す。自然原子が可視域もしくはマイクロ波の光子によ

てある電子状態から他の状態へと制御されるのに対し、回路における人工原子は電流、電圧そしてマイクロ波により操作され、系はあるマクロスコピックな量子状態から別の状態へと励起される。

超伝導回路と自然原子の違いには、エネルギースケールと環境との結合の強さがある。その結合は自然原子では弱く、回路では強い。自然原子とは対照的に、人工原子はある特徴を持つようにデザインし、スタンダードナリソグラフィー技術でチップ上に作成する事ができる。応用を考えると、この制御性は自然原子に対する大きな利点である。したがって、超伝導回路は制御可能な方法によってマクロスコピックスケールでの量子力学の基本原理のテストや原子物理学、量子光学の実証に用いる事ができる。さらに人工原子は自然原子においては起こり得ない特異な性質を示すようにデザインすることも可能である。

[1-4]のレビューでは、超伝導回路中で観測される原子物理学および量子光学現象にスポットを当てている。自然原子では起こりえない現象を含む人工原子による新しい物理学が詳しく説明されている。[1]ではこの新しい学際的な分野の予想される方向性についてもまとめている。

[1]J.Q. You and F. Nori, Atomic Physics and Quantum Optics using Superconducting circuits, Nature 474, 589-597 (2011)
URL: www.nature.com/nature/journal/v474/n7353/full/nature10122.html.

Short summary in Japanese is also available online.

[2]S.N. Shevchenko, S. Ashhab, F. Nori, Landau-Zener-Stueckelberg interferometry, Phys. Reports 492, 1 (2010).

[3]F. Nori, Atomic physics with a circuit, Nature Physics 4, 589 (2008).

[4]J.Q. You and F. Nori, Superconducting circuits and quantum information, Physics Today 58 (11), 42-47 (2005). Translated to Japanese in the journal Parity.

(和訳: 堀切智之(国立情報学研究所))

冷却原子

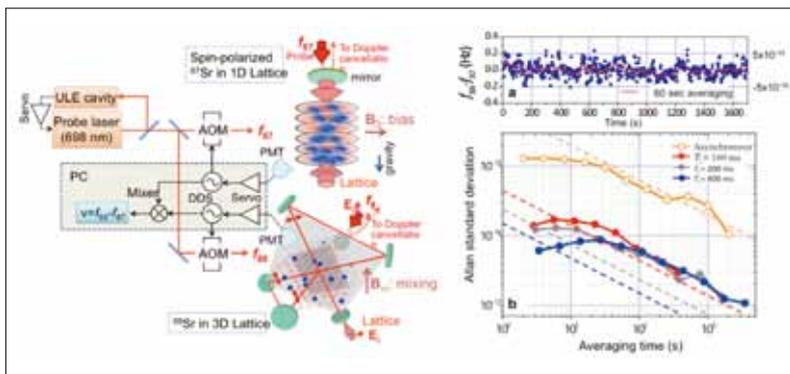
1 極めて安定な光格子時計の17桁の周波数比較に成功

東京大学・香取秀俊教授のグループは、光格子に閉じ込めた極低温原子を用いる「光格子時計」の研究を行っています。この手法は、「魔法波長」と呼ばれる波長のレーザー光で生成した光格子の中に、数100万個の原子を閉じ込め、その原子の共鳴周波数を基準として時を刻むことにより、短時間で高い精度を実現できる原子時計であり、現在「秒」の定義に用いられているセシウム原子時計の15桁強の精度限界をはるかに凌駕する18桁の精度を、わずか1秒の平均時間で実現できる次世代原子時計として期待されています。

これまで、2台の光格子時計の周波数比較は、原子の励起に用いるレーザー光の位相揺らぎによってその安定度が制限され、光格子時計本来の高安定性が示されていませんでした[Nat. Phys. 4,954 (2008)]。そこで我々は、同一のレーザー光で2台の時計の原子を同時に励起し、レーザー光の位相揺らぎを除去することにより、量子射影ノイズ限界の安定度を達成できる比較手法を開発しました(左図)。これにより、1,600秒の平均時間で17桁の周波数比較に成功し(右図)、原子数の

増大で飛躍的な安定度の向上をねらう光格子時計の設計思想が初めて実証されました。

この17桁の高安定な時計の比較手法は、地上に置かれた2台の時計の高度の差10cmを一般相対論的な時間の遅れ(重力シフト)としてリアルタイムに検出することを可能とし、高精度な重力場プローブ、地殻変動の検出等、時計の新たな応用を拓く手法として期待されます。この成果は、Nature Photonics 5, 288 (2011)に掲載されました。



2台の光格子時計の周波数比較の実験系(左)、周波数差とそのアラン標準偏差(右)。橙色は非同期比較、赤、灰、青色は同期比較の結果。1,600秒の平均時間で 1×10^{-17} の安定度を達成しました。

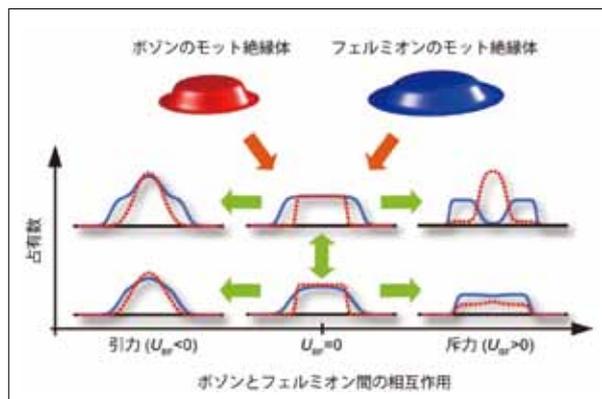
冷却原子

2 光格子中ボース・フェルミ混合系の新しい量子相

京都大学・高橋義朗教授のグループは、光格子と呼ばれるレーザー光の干渉によって形成された周期ポテンシャル中にナノケルビン領域まで冷却された極低温原子を導入し、量子統計性の異なるボゾンとフェルミオンからなる2つのモット絶縁体の混合系を生成することに成功した。これまで、ボゾンのモット絶縁体や2成分フェルミオンのモット絶縁体が知られていたが、本研究では、イッテルビウム原子の同位体を用いて、ボゾンとフェルミオンの2種類のモット絶縁体を光格子中に用意できるようにした。このとき、ボゾンとフェルミオンの間の相互作用、および相対的原子数の大小によって、それぞれのモット絶縁体相が新しい性質を持つ量子相へ変わることを、実験及び理論的に明らかにした。

図に本研究の概略を示す。2つのモット絶縁体を構成する粒子の間に相互作用が働かない場合、2つのモット絶縁体はただ重なりあい、互いに干渉しないはずである(図1中央)。しかし、比較的大きな相互作用が働く場合、量子相は劇的に変化する。斥力の場合、2つのモット絶縁体は、占有数によって混合モット絶縁体から相分離した状態へ変化する。一方、引力の場合、様々な複合粒子を形成することを明らかにした。この複合粒子は占有数によって、支配的な粒子の組み合わせが変わっていく。また、引力か斥力によって熱力学特性が全く異なることも明らかにした。

光格子へ原子を配列する過程で、斥力側では、断熱冷却の機構が働き、引力側では断熱加熱の機構が働くことを明らかにした。この成果は、Nature Physics, DOI 10.1038/NPHYS2028 (2011)に掲載されました。



量子ビット

3 長寿命量子ビットを使った磁束ノイズの解析

理化学研究所・巨視的量子コヒーレンス研究チームは、デコヒーレンスが最も小さなバイアス条件でデコヒーレンス時間が23マイクロ秒という超伝導量子ビットでは世界最長の寿命を持つ試料を用いることにより、詳細に磁束の揺らぎの周波数依存性を測定した。

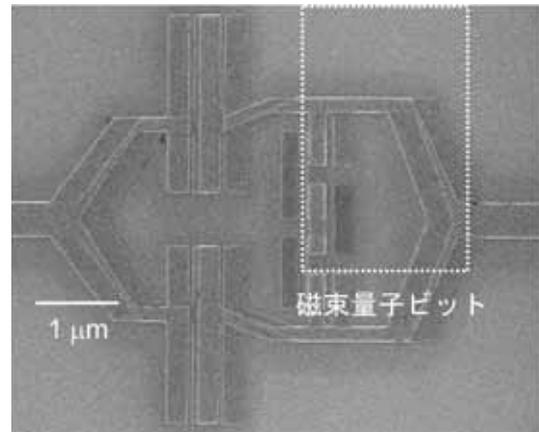
量子ビットは通常のコンピューターのビットとは異なり、0状態と1状態が任意の割合および位相で重なり合った状態をとれる。位相の情報は比較的壊れやすく、我々が研究を行っている超伝導磁束量子ビットでは最高でも数マイクロ秒程度で位相情報が失われる。これをデコヒーレンスと呼ぶ。磁束量子ビットでは、デコヒーレンスの一つの要因は磁束の揺らぎであるが、磁束の揺らぎの仕組みはおろか、詳しい振る舞いもまだ分かっていない。

磁束の揺らぎの周波数依存性はSQUID(超伝導量子干渉素子)などでも測られており、 $1/f$ (周波数)の依存性を持つことが知られている。 $1/f$ の揺らぎは様々な現象で見られるが、周波数が高くなるほど揺らぎが小さくなり観測が難しくなるため、数MHz以上の磁束の揺らぎを測定するためには磁束量子ビットのデコヒーレンスの評価を行うことが唯一の手段であるといえる。

磁束量子ビットに共鳴するマイクロ波の磁束のパルスを当てることにより、磁束量子ビットの状態を0状態と1状態の間で回転させることが出来る。パルスを連続して当てると、パルス間隔の逆数の

周波数の磁束の揺らぎの影響が強調される。パルス間隔を変えて、磁束量子ビットのデコヒーレンスの測定を行うことにより、0.2-20 MHzの範囲で磁束の揺らぎを測定することが出来た。また、今まで $1/f$ の依存性だと思われていたが、少し周波数依存性が弱い $1/f^a$ ($a < 1$)であることが観測された。磁束の揺らぎの仕組みを理解するために、今回の測定で得られた周波数依存性の情報は重要である。

この成果は、Nature Physics, DOI: 10.1038/NPHYS 1994, (2011)に掲載されました。



量子ビット

4 光子1個で動作するスイッチの集積化に成功

量子計測サブテーマに属する北海道大学・竹内繁樹グループは、最近、光の素粒子である光子1個レベルで動作する「非線形光スイッチ」を組み合わせた、光量子コンピューターの基本となる量子ゲート操作を初めて実現しました。

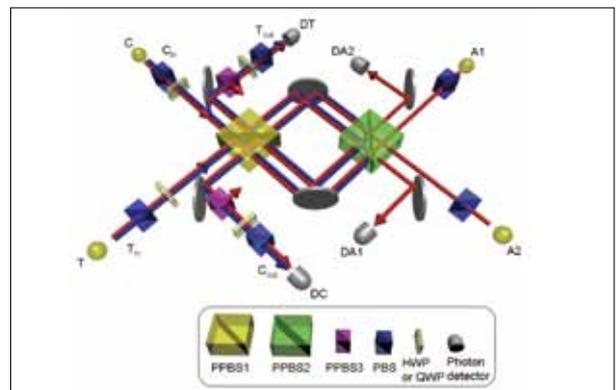
光の素粒子である光子は、量子コンピューターや量子通信における情報の伝達媒体として非常に有力です。ただし、2つの光子を相互作用させる方法の実現が困難でした。この問題に対し、米国およびオーストラリアのグループ(Knill, Laflamme, Milburn)は、半透鏡で生じる量子干渉を利用して、光子1個レベルで動作する「非線形スイッチ」が実現できること、またそのようなスイッチを組み合わせることで、光量子コンピューターが実現できることを示しました。この提案は大変注目されましたが、半透鏡上での光子間の良質な量子干渉が必要となること、また異なる光の経路を、百万分の1ミリメートルの精度で一致させる必要があるなど、その技術的な困難さから、提案後10年間実現されていませんでした。

私たちは、光子源の改良や、独自に開発した特殊な半透鏡、さらに光の干渉装置を工夫することで、コンパクトで非常に安定した実装を実現しました。その結果として、Knillらの提案した、光量子コンピューターの基本となる光量子回路を実現することに、初めて成功しました。得られた平均ゲート忠実度は0.82と、十分高い量子性を示しました。

今回の成果は、安全な通信を実現する量子暗号通信や、これまでに解けない問題を解く量子コンピューター、また、より少ないエネルギーでの通信を実現する量子情報通信への応用が期待されます。

この研究は英国・ブリストル大学のオブライアン・ジェレミ教授、広島大学のホフマン・ホルガ准教授らと共同で行われました。

この成果は、Proc. Natl. Acad. Sci. 108, 10067 (2011)に掲載されました。



今回実現した光量子回路。光子1個レベルで動作するスイッチを組み合わせることで光量子コンピューターの基本となる量子ゲート操作を実現。

量子光学

5 シュレーディンガー猫状態光パルスの量子テレポーテーションに成功

量子力学は黎明期に、その根幹を揺るがすいくつかのパラドックスが提案された。中でもシュレーディンガーの猫とアインシュタイン・ポドロスキー・ローゼン (EPR) のパラドックスは最も有名である。シュレーディンガーの猫とは、人間が直接見ることのできる巨視的なもの=猫が重ね合わせの状態になるのか、というパラドックスであり、EPRのパラドックスとは、量子もつれ状態にある2つの量子対は、空間的に離れていても片方の測定の影響がもう片方に及ぶのか、というものである。

これらは20世紀初頭の量子力学黎明期には頭の中で行う思考実験であったが、21世紀のテクノロジーにより、テーブルトップで同時に検証できるようになった。その具体的なかたちが、今回、東京大学の古澤研究室で成功したシュレーディンガー猫状態光パルスの量子テレポーテーションである。

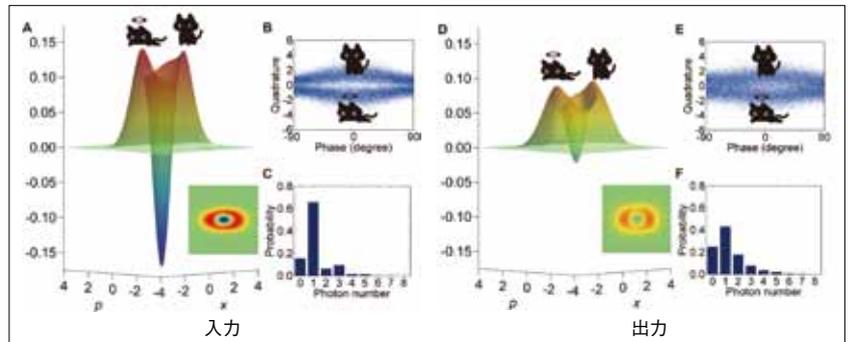
シュレーディンガーの猫とは、生きた猫と死んだ猫の重ね合わせの状態であり、観測すると生きた猫か死んだ猫のどちらかになる。本実験では、これを位相が反転した光の波動の重ね合わせとして実現した。また、量子テレポーテーションでは、量子もつれ状態にある2つの光ビームを生成し、片方への測定がもう片方へ及ぶことを用いて、シュレーディンガーの猫状態にある光パルスを伝送した。つまり、重ね合わせの

状態を保って伝送に成功した。

ここで重要なことは、シュレーディンガーの猫状態はそれを直接測定すると生きた猫か死んだ猫になってしまい、重ね合わせの性質が失われてしまうが、量子テレポーテーションでは、送信者側の測定が間接測定になるため、重ね合わせの性質を失わずに送ることができる。つまり、量子テレポーテーションは、測定により壊れてしまう重ね合わせ状態を送れる唯一の方法であり、今回、これを目に見える形で実現に成功したことになる。

この成果は、量子力学基礎の検証という意味ばかりでなく、量子情報通信・量子コンピューター実現に向けた大きな一歩である。特に、超大容量光通信への極めて重要な一歩である。

この成果は、Science 332, 330-333 (2011) に掲載されました。



量子光学

6 新しい量子中継システムの構築

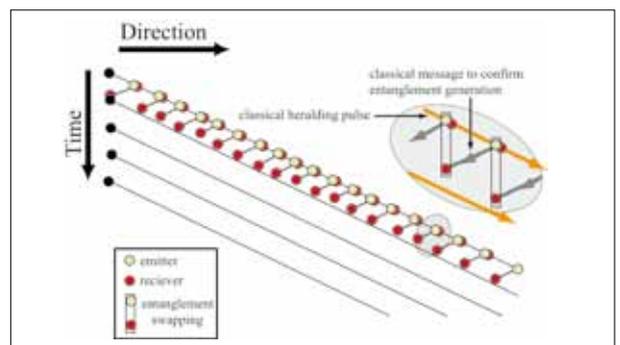
通信を長距離で行うときは、信号の減衰を増幅して劣化を防ぐ。量子通信の場合にも同じようにと考えるが、量子情報の信号は増幅することができない。量子情報は原理的にコピーすることができないという量子情報の定理のひとつからの帰結である。量子通信でこれと同じ働きをするのが量子中継であり、量子通信を可能にするための中核技術と位置づけられる。

量子中継は、情報の送り手と受け手の間に量子もつれを生成する。この量子もつれが通信のリソースであるが、この長距離間のもつれ配信を行うためには、3つの過程が必要である。まず、中継点間に量子もつれを生成する技術。中継点で量子もつれをつなぐ技術、途中劣化した量子もつれを精製する技術である。これに、制御信号系を統合して、量子中継が構築される。

量子中継の原理は1990年代から知られていたが、実現化にはいくつかの課題があることが徐々にわかってきた。量子計算では必ずしも問題とならない通信固有の問題が、通信“距離”から現れるからである。光ファイバー中を10km進むには50マイクロ秒かかる。一瞬よりも短いほどの時間に思われるが、量子性を保つことができる目安となる量子コヒーレント時間から見るとかなり長い。一方、光速には限度があるので、これを短縮することはできない。量子情報を格納しておくための量子メモリが必要で、しかも数時間から数日という長時間の量子メモリが必要だと考えられてきた。

QIS理論グループ(国立情報学研究所)では、量子もつれ精製に伴う問題点に注目し、高い精度の量子もつれを確実に配信する方法を組み立て、精製過程に誤り訂正を用いて、一方向通信制御を可能にすることで、新しい量子中継システムを開発することに成功した。この新しい中継システムでは、通信距離によらない高レートでの量子もつれ生成が可能となり、必要とされる量子メモリ時間をサブミリ秒へ短縮することにも成功している。堅牢なシステム構築方法と量子メモリ時間の短縮化は実現化上の技術的困難を取り除き、また将来の量子通信技術開発の指針としても重要である。

この成果は、Nature Photonics vol.4 no.11, pp.792-796 (2010) に掲載されました。



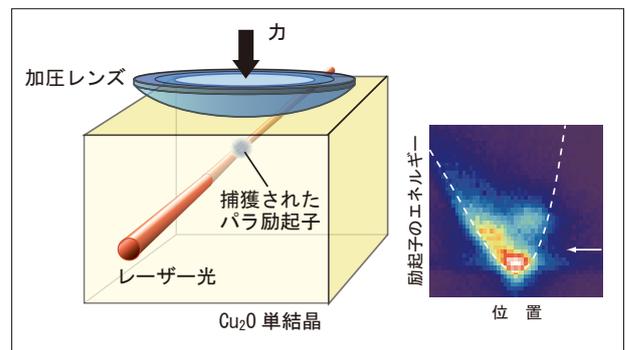
励起子

7 励起子ボース・アインシュタイン凝縮の実現

半導体中の電子と正孔はクーロン引力によって結合し、水素原子状の準粒子、“励起子”を形成します。励起子はボース統計に従い、準熱平衡下でボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) を示すことが予測されています。しかし、予言から約50年を経過しながらも実験的検証には至りませんでした。このたび、東京大学の五神研究室では、バルク半導体励起子系において準熱平衡でのBEC転移の観測に成功致しました。これは長年の懸案にひとつの解決を与え、量子情報処理を担う物理系として固体の電子正孔系の可能性を拓く成果です。

励起子は本来、固体中の多数の電子の場から生じた準粒子であり、多体系の複雑さが内在します。従って励起子が実在原子と同様にBECを示すか自明ではありません。亜酸化銅結晶の励起子(1sパラ励起子)は、光と結合しないため寿命が非常に長く低温にでき、BEC実現の最有力候補とされてきました。しかし、二個の励起子が衝突し消滅する過程が強く、密度が飽和することが最近判明しました。そこで本研究ではさらなる低温化により低密度なBECの形成を目指しました。ヘリウム3冷凍機を使用して結晶を0.3ケルビン以下に冷却し、準熱平衡状態にある温度0.8ケルビンの励起子雲を用意し、これを半導体中の微小空間に捕獲しました。理想系のBECでは、トラップの底の狭い

空間に大多数の粒子が凝縮するはずですが、ところが今回BEC転移条件に達すると、励起子雲の空間・エネルギー広がりが共に閾值的に増大しました。これは、衝突ロスが起こる場合に生じる、BECの「緩和爆発」と呼ばれ、水素原子のBECが示す挙動として予想されています。この現象を詳細に調べ、全体の約1%の励起子が凝縮体に転移していることを突き止めました。この成果は、*Nature Communications* 2:328 (2011) に掲載されました。



実験の模式図。亜酸化銅(Cu₂O)の半導体単結晶に対して、極低温下で不均一な歪みを加えてレーザー光で狙い撃ちすると、低温の励起子が局所的に捕獲され、量子縮退領域に到達する。(右図) 捕獲した凝縮体の緩和爆発の様子

励起子

8 正方格子ポテンシャル中でのd波対称性を持つ励起子ポラリトン凝縮体

異方性を持つ軌道の振る舞いは、高温超伝導体や巨大磁気抵抗など強相関物理において重要な役割を果たしていると考えられています。一方で冷却原子を用いた強相関物理の量子シミュレーションが成功をおさめてきましたが、これまで周期ポテンシャル中の励起バンドへのボース凝縮の観測は、第二バンド(p波)において、運動量空間の測定のみに限られてきました。

「量子情報システム」サブグループ(山本喜久(国立情報学研究所/スタンフォード大))では、今回二次元正方格子ポテンシャル中で第四バンドのM点におけるポテンシャル極小点において、d波対称性を持つポラリトン凝縮を実現しました。この凝縮体は、

運動量空間でのポラリトン分布測定に加え、実空間分布、運動量空間における平面波成分間のコヒーレンス測定を通して観測されました。

人工格子系におけるd波対称性を持つボース凝縮の観測は初めてのことであり、ポラリトンを用いた軌道物理量子シミュレーションの有用性が示されました。今後はこの人工格子に基づく量子シミュレーターの研究を通して、新しい秩序相が発見されるものと期待されます。

この成果は、*Nature Physics* online, doi:10.1038/nphys 2012 (2011) に掲載されました。

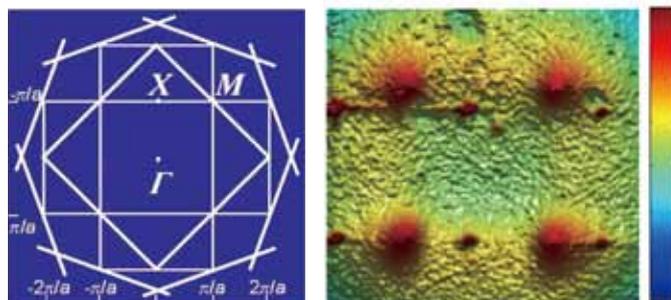


図1: (左) 正方格子のブリリアンゾーン。(右) 実験で得られた、ポラリトンの運動量空間分布。軸は運動量空間。左のブリリアンゾーンのM点に相当する運動量空間の点にポラリトン分布のピークが観測された。

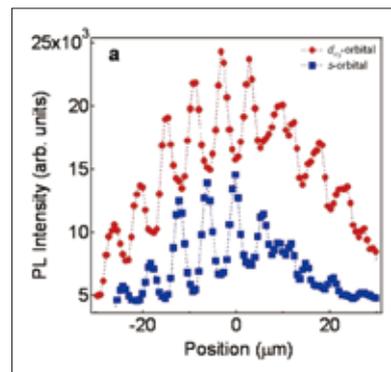


図2: 実験で得られたs波状態(青)とd波状態(赤)の凝縮体中のポラリトン空間分布。d波凝縮体のポラリトン分布はs波凝縮体の分布と空間的に周期的に半分のだけずれていることが確認できる。

超伝導量子コンピューター

【平成23年度 第1回】

幹事(報告者)：蔡 兆申((独)理化学研究所／日本電気(株))

リーダー：蔡 兆申((独)理化学研究所／日本電気(株))

開催日：2011年5月20日

場所：NEC グリーンイノベーション研究所

参加人数：25名

報 告 概 要

理研／NECチーム：

エピタキシャル成長したジョセフソン接合を用いた超伝導量子ビットの実現と評価について報告した。通常用いられるアモルファスの酸化膜トンネルバリアはデコヒーレンスの要因となる欠陥を多く含むと考えられている。MgO上にスパッタ成長したNbN/AlN/NbNは完全にエピタキシャル成長したジョセフソン接合の数少ない例であり、量子ビットのコヒーレンスの改善を目指して取り組んでいる。コヒーレンス時間は $0.5\mu\text{s}$ とまだ短く、その原因解明とさらなるプロセスの改善に取り組み中である(中村)。超伝導量子ビット間の可変結合方式の提案について報告した。オンオフ比が高く、対称性によって隣接する量子ビットにエラーが伝播することを防ぐ方式で、マイクロ波パルス駆動による条件付幾何学的位相ゲート操作を用いる(Billangeon)。

NTTチーム：

環境と強く結合する特徴を有する超伝導回路で多ビット量子計算システムを実現するには、長寿命の量子メモリとの結合が今後重要となると考えられることを紹介した(仙場)。超伝導磁束量子ビットのコヒーレンス時間の改善の試みに関して発表した。デコヒーレンスの主因を探る目的で磁束の揺らぎ、電荷の揺らぎ、制御線や読み出し線からのノイズなど様々な可能性を実験的に検討した(角柳)。量子メモリに量子状態を保存した際のデコヒーレンスの影響を理論的定量的に評価した。量子メモリに超伝導量子ビットなどの別の系を結合させた場合、量子アンチゼノン効果によるエネルギーの散逸が生じることに注意が必要である(松崎)。また、昨年10月より、NTTグループから丸山達郎氏がAI超伝導量子ビットを構成する微小ジョセフソン接合(JJ)作製プロセス開発に参加している。

東京理科大チーム：

光応答実験の準備を開始し、アルミニウムを金で覆ったサンプルも作成に成功した。しかし、3月11日の実験中に地震が起き、停電で全てがストップした。またこの停電で、希釈冷凍機のHe3/He4混合ガスももれてしまい、それ以降の実験もできなくなった。6月から実験を再開する予定である。

AIST・ISTECチーム：

AI超伝導量子ビットを構成する微小ジョセフソン接合(JJ)作製プロセスを開発した。微小JJ作製の課題は、JJ／上部配線間コンタクト形成とJJ微細加工である。コンタクト形成では、絶縁層SiO₂に埋もれたJJ頭部をCMP(機械研磨)で露出させ、良好なコンタクトの形成に成功した。JJ微細加工には電子ビーム露光と塩素系ガスによる反応性イオンエッチングを用い、最小100nmのドット形成を確認した。これらを統合してマスク寸法で直径100nmから3 μm までのJJを作製した。作製途中で震災に会い一時ストップしたが、ウエハに損傷はなくプロセスを続ける予定である。また、プロセス装置の震災後の復旧状況を報告した。



【平成23年度 第1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：2011年6月17日

場所：東京大学

参加人数：15名

報 告 概 要

【NICTグループ】

量子受信器と量子インターフェースに関する2件の報告が行われた。NICTの佐々木より、ホモダイン検出器のみからなる受信回路ではどんな非古典的補助光を用いてもビットエラーのホモダイン限界を超えられないこと、量子利得を得るには光子数検出による強い測定が重要であることが報告され、東大の古澤教授よりビットエラーに止まらず冗長性も入れた符号化まで拡張して利得を考察してはとの助言があった。また、H23年度から新たにFIRSTに加わった新メンバー、早稲田大の青木准教授が、酸化シリコンのトロイド型微小共振器を用いたキャビティQEDのこれまでの成果をまとめ、世界最高レベルのQ値 2.7×10^8 を持つ共振器の試作結果の紹介や、量子インターフェースへの展開に関する議論があった。

【阪大グループ】

阪大グループの活動近況要旨を井元から、その中で特に「可視域から通信波長域への非古典光の周波数下方変換」を日下から報告があった。長距離量子通信ネットワークの構築に必要な量子中継プロトコルにおいて、量子メモリと光ファイバ通信それぞれに適した周波数は必ずしも一致しない。このため光の量子状態を壊さず周波数変換することが必要となる。今回、導波路型周期反転分極構造LiNbO₃を用いた差周波発生過程による可視域から通信波長域への周波数変換手法、および非古典性や量子もつれを保った変換の実験結果が紹介された。他の系への応用可能性について質問やコメントがあった。この手法では変換前後の光の周波数を調整できるため、様々な物理系に対して有効であると考えられる。

【東大グループ】

前回報告したシュレーディンガーの猫状態の量子テレポーションが各国のマスコミで大きく取り上げられ、大きな反響がある旨の報告があった。コヒーレント状態を用いた量子最適受信機実現のためには、連続量に対する万能量子ゲートである3次元相ゲートが必要であるが、それに関する報告があった。3次元相ゲートは大きく分けて2つの部分に分けるこ

とができ、それはスクイーミング操作に代表されるガウス型操作と3次元相状態生成(非ガウス型状態生成)である。シュレーディンガーの猫状態の量子テレポーションは、非ガウス型状態であるシュレーディンガーの猫状態に対して、ガウス型操作の代表である量子テレポーションを行ったことになっており、そのテクノロジーを使えば原理的には3次元相ゲートを作製できる。その第一段階として、非ガウス型状態である単一光子状態に対してスクイーズ操作を行ったことの報告があった。また、導波路干渉計を用いたEPRビーム生成の報告があった。

【東北大グループ】

東北大学グループの最近の活動報告として、「時間とスピンの量子コヒーレンス変換」という題目で小坂准教授から報告があった。量子情報通信、特に量子鍵配送における長距離伝達にはタイムビンと呼ぶ2値の時間量子コヒーレンスにコーディングした光子状態が通常用いられる。これは偏光のコヒーレンスに比べて時間のコヒーレンスが外界からの擾乱に耐性があるためである。このタイムビン光量子状態を固体内のスピン量子状態に直接転写する独自の手法についての紹介があった。実際に、半導体中の電子スピンを用い、光の時間コヒーレンスがスピンコヒーレンスに転写されることが実証されたとの報告があった。この手法を用いれば、マイクロ波光子など偏光の使えない光子を含め、様々な波長域の光子と様々な形態の固体キュービットを接続することが可能となる。



量子情報関東 Student Chapter

報告者：運営委員 杉山太香典(東京大学村尾研究室)

報 告 概 要

量子情報関東 Student Chapterでは、量子情報分野の若手研究者に交流の機会を提供することを目的に、研究会開催等の活動を行っています。これまで主な参加者は関東周辺の学生・ポスドクでしたが、第9回研究会から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」および新学術領域「量子サイバネティクス」より参加者への旅費補助等ご支援を頂いているおかげで、関東以外の地域からの参加者も増えており、研究者間交流の機会としてよりよい研究会になってきていると感じております。

以下では簡単に、第10、11、12回研究会について報告いたします：

- **第10回研究会** (2010年9月3日、NECグリーンイノベーション研究所にて) 第10回では講演会・実験室見学会・ポスターセッションの3つの企画を行い、計46名の方が参加しました。講演会ではNECグリーンイノベーション研究所の萬伸一研究部長と中村泰信主任研究員にそれぞれ「NECの研究開発」と「超伝導量子ビット」という題目でご講演頂きました。実験室見学会では、NECグリーンイノベーション研究所のご厚意により、超伝導体を利用した量子コンピュータの評価装置とカーボンナノ構造作製実験室を見学させて頂きました。ポスターセッションでは17名(理論10名、実験7名)の参加者が発表を行いました。第10回研究会開催にご協力頂いたNECグリーンイノベーション研究所の皆様と世話人の白根昌之主任研究員に、この場を借りて感謝を申し上げます。
- **第11回研究会** (2010年12月2日、慶応義塾大学矢上キャンパスにて) 第11回では講演会、実験室見

学会、ポスターセッションの3つの企画を行い、計69名の方が参加しました。講演会では慶応義塾大学の伊藤公平教授と山本直樹専任講師にそれぞれ「シリコン量子コンピューティング」と「量子フィードバック制御理論の基礎」という題目でご講演頂きました。実験室見学会では慶応義塾大学伊藤研究室のご厚意により、結晶成長装置、電気伝導測定装置、磁気共鳴測定装置、光学測定装置を見学させて頂きました。ポスター発表では18名(理論10名、実験8名)の参加者が発表を行いました。第11回研究会開催にご協力頂いた慶応義塾大学伊藤研究室の皆様と世話人の平野梨伊・有川格両氏に、この場を借りて感謝を申し上げます。

- **第12回研究会** (2011年2月27、28日、東北大学電気通信研究所にて) 第12回では、口頭発表、実験室見学会、ポスターセッションの3つの企画を行い、計39名の方が参加しました。参加者による口頭発表は、過去のアンケートで参加者から寄せられた意見を反映したもので、27、28日の二日間にわたって5名の参加者が口頭発表を行いました。実験室見学会では、枝松・小坂研究室のご厚意により、量子もつれ光子対の発生・検出方法の開発、および光子・電子スピン間の量子メディア変換の実験室を見学させて頂きました。ポスターセッションでは、8名(理論5名、実験3名)の参加者が発表を行いました。第12回研究会開催にご協力頂いた東北大学枝松・小坂研究室の皆様と世話人の稲垣卓弘・金田文寛両氏に、この場を借りて感謝を申し上げます。



第12回研究会、参加者による口頭発表の一幕



第12回研究会、ポスターセッションの一幕

関西 Student Chapter

関西若手量子情報セミナー

報告者：運営委員 川久保 亮(京都大学 山本研究室)

運営委員 谷田 真人(大阪大学/北海道大学竹内研究室)

報告概要

第9、10回関西若手量子情報セミナーを開催しましたので報告いたします。

●**第9回研究会**は北大竹内研究室(阪大に駐在)で講演会と実験室見学を行いました。

講演会では講演者の生田力三氏(阪大井元研)には「DFSを用いたエンタングルメント配送の高効率化」という題目で、量子情報処理において重要なもつれ光子対をDecoherence Free Subspace (DFS) に符号化する事で、ファイバ伝送する際の位相雑音から保護できる事を説明して頂き、配送効率が劇的に向上するスキームの提案と実験報告をして頂きました。

次の講演者の山崎歴舟氏(京大高橋研)には「Interaction of Cold Atoms (for Dummies!!) & Optical Feshbach Resonances」という題目で、冷却原子系において原子間相互作用が引力から斥力まで制御可能な事を直感的に説明して頂き、光定在波パルスによる光 Feshbach 共鳴を介したサブミクロン領域での原子間相互作用制御の実験報告をして頂きました。

実験室見学の前に、竹内研究室の研究概要を田中陽氏(共同執筆者)から説明して頂きました。内容は、①擬似位相整合(QPM)素子を用いた高効率な光源開発。②線形チャープQPM素子を用いた超広帯域もつれ光子対の開発と量子計測や量子非線形光学への応用、超伝導単一光子検出器の開発。③テーパファイバ微小球共振器系を用いた光子-原子間非線形相互作用による固体量子位相シフト実現に向けた研究。④NOON状態(N光子もつれ状態)を用いた位相超敏感測定。でした。実験室見学ではそれぞれの実験担当者が実験系、及び、ポスターを用いて説明を行いました。講演会、実験室見学それぞれにおいて活発な議論が行われ、全体を通して盛況なセミナーでした。

●**第10回研究会**は京大吉田キャンパスで講演会とポスターセッションを行いました。3月11日に東日本大震災が発生し、

無事開催できるか不安な面もありましたが、関東からの8名を含む61名もの方々にご参加いただきました。

宇都宮聖子氏(国立情報学研究所 情報学プリンシプル研究系)には「励起子ポラリトンと超流動性」という題目で、マイクロキャビティと量子井戸構造を有する半導体の二次元構造内に生成される疑似粒子である励起子ポラリトンの凝縮現象について、基礎知識から、ボゴリューボフ理論に基づく励起スペクトルや超流動性、キャビティ外に放出される光の干渉効果などの最近の実験結果にいたるまで幅広いピックを説明していただきました。

渡辺優氏(東大上田研)には「量子推定理論における不確定性関係について」という題目で、量子測定の測定誤差についての不確定性関係についての最新の結果を報告していただきました。測定で得られる情報量を用いた測定誤差の定義、非可換な可観測量の誤差に対する最も強く新しい不確定性関係の導出、その不確定性関係の等号を達成する測定の具体的構成といったトピックの解説がありました。

講演会後、ポスターセッションを行いました(発表者21名)。量子光学、冷却原子、イオントラップ、NMRといった具体的な物理系についての研究に加え、量子計算の理論、量子力学における時間旅行など様々な発表が行われました。

●量子情報関西 Student Chapter

<http://yagura.scphys.kyoto-u.ac.jp/wakate/>



SSH名城大学附属高校での出張授業

■実施日 2011年6月7日(火) 15:30~17:10(100分) ■対象 名城大学附属高等学校 2年生29名
 ■授業名 量子力学出張授業 ミクロの世界“量子の世界を操る” ■担当 佐藤和信(大阪市立大学)

SSHコースに在籍する高校2年生を対象に、先端科学を紹介するカリキュラムの一環として、量子力学に関する約100分の授業を行いました。授業といっても正規の授業終了後の放課後に開催されたものですが、教室に入って生徒と顔を合わせた時に、真剣な眼差しがこちらに向いていたことを覚えています。理数系に興味を抱く生徒が中心でしたが、物理を学習し始めたところとのことでしたので、どうすれば量子の世界を感じてもらえるかをポイントに物質世界と現実のアナロジーを取り入れながら、内容を組み立てました。10⁻⁹メートル以下の世界をいかにイメージしてもらうかというところから始めて、そのミクロの世界における光の粒子性と物質の波動性を紹介し、さらには量子状態の重ね合わせと並列処理、量子コンピュータの話題にまで話を広げました。後半は、話が駆け足になってしまった感がありますが、昨年度に量子暗号通信の社会実験が行われたことを紹介して授業を締めくくりました。

授業の途中では、3色のレーザーポインター、プリズムや偏光板を使用した光の干渉など簡単な実験を行い、光の波動性や波長の違いを実際に感じてもらいました。いずれも初歩的なものですが、直交する2枚の偏光板の間に3枚目を斜めに

追加したときには、なぜだろうと疑問に感じた人が多かったようで、複数の生徒から後で質問を受けました。なかなか気のきいた実験を短い時間の中で行うには限りがありますが、簡単な実験を取り入れることで少しでも生徒に印象づけることができました。後日アンケートの結果を見せて頂きましたが、自然科学や科学技術に興味を抱き、より深く知りたいという好奇心への刺激になったのではないかと感じています。



SSHでの出張講義と今後の課題

■実施日 2011年7月15日(金) 13:20~15:40(140分)

■対象 長野県屋代高等学校 理数科2年生(40名)

■授業名 「量子力学を使った未来の暗号技術とテレポーション」

■担当 山本喜久(国立情報学研究所/スタンフォード大学)、宇都宮聖子(国立情報学研究所)

昨年12月3日に大阪市立大学の工位武治先生が出張講義をされ大好評でした。そのため、今年も同校より出張講義の依頼があり、NII山本と宇都宮が出張し、量子暗号に関して2時間ほど講義をしました。

まず、暗号の簡単な歴史を紹介しました。スパルタのスキュタレー、ローマのシーザー暗号、ドイツ軍のエニグマ、これを解読するために開発されたコロッサスなどについて話しました。特にエニグマの解読に成功したコロッサスの存在については、第2次世界大戦中はもちろんのこと、戦後も極秘扱いとされ、世界がこの事実を知ったのは、1970年代後半であったこと、開発グループのメンバーに現代コンピューターの祖とされるアーラン・チューリングがいたことなどを述べました。その事実から2つの結論を導き出しました。

1. 暗号通信にとって本当に脅威なのは暗号が解読されることではなく、その事実がずっと秘密にされることであること。ある日、遂に量子コンピューターの開発に誰かが成功したとしたら、その朝に世界中の秘話通信は一部の人々や政府によって解読され、その状態が永遠に続いていくことであること。

2. コンピューターと暗号はお互いに相手に勝つことを目指して進化を遂げ、これまで進歩してきたが、絶対安全性を約束する量子暗号の登場により、このサイクルには終止符が打たれること。

それだけの前置きをした後、レーザー光をつかったBB84量子鍵配送の実験を4つのグループに分かれた生徒達にやってもらいました。その後、量子暗号の安全性が不確定性原理に基づいていることを説明し、これを実験で確かめるためヤングのダブルスリット干渉計に偏光板で経路情報を入れたり、部分的に経路情報を消したりする実験デモを行い、2つのスリットを通過する光の光子数差と位相差は同時に測定できないことを実験を通して理解してもらいました。

2時間の講義が終了した後、担当の清水久樹先生から「生徒達はまだ光の偏光を勉強していないので……」と教えられ、今回の講義はスタート点を間違えたことを悟りました。事前に担当の先生と打合せを十分して、生徒の知識レベルを正確に把握しておくという基礎の大切さを知った一日となりました。

[国立情報学研究所/スタンフォード大学 山本喜久]

「光のふしぎ」を考える楽しさを、小学生に届けたい —京都府南丹市立園部小学校への出前授業—

■実施日 2011年2月24日(木) ■対象 京都府南丹市立園部小学校6年生(80名) ■報告者 竹内繁樹(北海道大学/大阪大学)

今回のお話は、ポラリス・セクレタリーズ・オフィスの笹部昌子様から頂きました。笹部様は、小中学校の児童・生徒が、第一線の研究者とふれあい、理科への興味を育むことが大切と考え、研究者と小中学校をつなぐ「理科教育コミュニケーター」を提案されています。その一環として、京都教育大の村上忠幸先生、京都府南丹市立園部小学校の新田早苗先生との連携授業を打診頂きました。メディアアーティストの岩井俊雄氏(子供が大ファン)の小学校出前授業の番組に感銘を受けていたため、喜んでお引き受けしました。

「思い切り楽しんでほしい。」その思いから、午前中2から4限目は6年生の3クラス(計80名)それぞれで、偏光フィルムを使って見つけた様々な「ふしぎ」な現象の発表や、また、「不思議なカベ」などのおもちゃも作ってもらいました。午後は全クラスの児童を対象に、ふしぎのなぞ解きを実験やコントを交えて行った後、浜松ホトニクスのご厚意でお貸し頂いたビデオを元に、光の粒子性や量子コンピュータなどについて話しました。

授業を始めるまでは、小学生に楽しんでもらえるのが正直不安でしたが、偏光フィルムを目の前にかざして歓声をあげる子供達をみて嬉しかったです。午後の講演での、ドッキリするよう

な質問や、また終了後の、持ち込んだ実験装置に群がる子供達に、授業をやって良かったとおもいました。アンケートでも、87.5%が「楽しかった」、98.7%が「よく/大体わかった」、70%が「もっと理科に興味があった」という結果でした。小学校としては、子供たちが将来の職業を考えるきっかけとしても重視しているとのことでした。

最後に新田先生はじめ園部小学校の先生方、村上先生および京都教育大の院生の皆様、笹部様、北大の笹木敬司教授のご協力に感謝いたします。また、当日補佐してくれた岡野博士研究員はじめ、準備にあたってくれた研究室諸氏にも感謝します。



研究者による小中学校理科教員のための研修会 —品川区教育会理科部実技研修会—

■実施日 2011年6月1日(水) 14:30~16:00(90分) ■対象 品川区立の小中学校の理科教員 約70名 ■講演題目「研究者と学校の連携の可能性~理科好きのこどもの育成のために~」
■担当 宇都宮聖子(国立情報学研究所)、Javed Rouf(東京大学/国立情報学研究所)、松尾康弘(東京大学/国立情報学研究所)、窪田しおり(国立情報学研究所 最先端研究開発支援室)

学校教育へ研究者が参入する際には、学校の教員との連携が不可欠となります。品川区立小中学校の理科教員の方々を対象とした実技研修会において、研究者と学校の連携の可能性をテーマとした講演の場を持たせていただきました。多忙を極める小中学校の先生方には、明日にでもすぐに授業に生かせる実験のアイデアなど、即効性のある内容が求められているという話を多方面からお聞きしており、今回は多くの時間を使って、音を光に変換してファイバ伝送を行う光通信デモ、回折格子を用いたプラネタリウム、見えない電磁波の可視化など、簡単に行える光の実験を数多く紹介しました。後日これらの実験を早速生徒に見せていただいたという話を伺いありがとうございました。安価で入手しやすい器具を使って、本質的な科学を簡単に実演できる、大人も驚くような実験というのが多くの先生方に扱っていただきやすいようです。

また、学校の理科教育が私たちの社会にどのように関わり発展していくのかという視点に立ち、実際に使用されている小中学校の教科書の光の単元を、身の回りの科学現象や、先端研究で実際に利用されている技術などと関連付けながら系統的に整理し、専門性を高めた解説を行いました。量子力学に関する光の話題として、レーザーを用いた分光と干渉の光学実

験を行い、直観に反する実験結果に対して、実験事実に基づいて真実を推論する、実証科学の考え方を紹介しました。教員研修会の目的は理解の追及や実験の研修など多岐にわたることと思いますが、私たち研究者が効果的に連携できる方向性を、このような機会を大切に、今後も検討していきたいと思っております。末筆ではございますが、このような貴重な機会を設けていただき、準備段階から多大なご協力を賜りました品川区立小中一貫校伊藤学園の富本保明先生をはじめ品川区の諸先生方にも、心より御礼申し上げます。

[国立情報学研究所 宇都宮聖子]



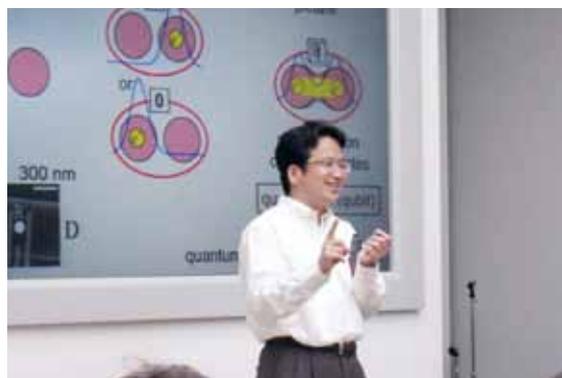
東京工業大学公開講演会 東工大の最先端研究

■実施日 2011年6月8日(水) 19:00 ~ 20:30 (90分) ■対象 東京工業大学公開講演会来場者
 ■講演名 「ナノエレクトロニクスの最先端 一電子1個をあやつる」 ■報告者 藤澤利正 (東京工業大学)

東京工業大学では、東工大の最先端研究に関する公開講演会をほぼ週1回のペースで開催しています。その一環として、「ナノエレクトロニクスの最先端 一電子1個をあやつる」と題して、社会人の方々を対象に約90分の講演を行いました。平日の夜7:00からの開催で、研究・開発に現役で携わる企業の方、定年を過ぎても科学技術への興味を持ち続けている方、学生・会社員など、20代から80代に至る幅広い年齢層の聴講者の中で、昨今のナノエレクトロニクス研究に関する概要と、量子ドットを用いた研究の最先端、そして量子コンピュータへの期待などについて講演しました。

まず、「ナノ構造をどのように作るのか」からはじめ、量子ドットを用いることで、電子1個を正確に制御し、観測できることなどをあまり専門的にならないように解説しました。特に、2つの量子ドットにおけるコヒーレント振動を、空間移動マジックにみたとて説明することで、ナノ構造の中で電子の振る舞いの一例を感じてもらえたのではないかと思います。さらに、その電子1個をソロバンの玉にみたとて、計算機ができること、量子のソロバンができること、それが量子コンピュータになることを解説しました。

質疑の約30分では、ナノ構造や量子計算に関する熱心な質問が多く聞かれ、講演会終了後にも質問にくる方も数名あり、関心は高かったように感じました。しかし、聴講者のバックグラウンドが大きく異なるため、質問して下さったハイレベルの方ばかりではなく、雰囲気は解ったが内容について行けなかった方、ほとんど理解できなかった方に別れてしまったと思われる。準備不足で、主にパワーポイントによる説明で終わってしまいましたが、何かの形が見える実演を交えて講演をしたほうがよかったのかもしれない。



国立情報学研究所 オープンハウス

■実施日 2011年6月2日(木)・3日(金) ■対象 NIIオープンハウス来場者
 ■デモンストレーション名 光の干渉から量子コンピューターの原理を知る 一量子が開く未来の情報社会—
 ■担当 国立情報学研究所 山本研究室 / 量子情報国際研究センター / 最先端研究開発支援室

国立情報学研究所では、研究所で行われている研究の成果や活動について、広く一般の方々に知って頂けるように、毎年オープンハウス(一般公開)を開催しています。

量子情報国際研究センターでは、「光の干渉から量子コンピューターの原理を知る」と題したデモコーナーを出展し、赤、緑、青の3色のレーザーを使った風船割り、光の干渉実験、など多くのデモンストレーションが行われ、それに基づいてポスターの内容も紹介されました。それらの実験は、FIRSTの事業の一環として小学校や高等学校の出張授業でも実施されている理解しやすいものが多かったこともあり、多くの方がデモコーナーの前で足を止めて、実験の様子に興味深くご覧になり、実験に関する質問がたくさん出ていました。

量子情報国際研究センター・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」について、量子計算機、量子標準、量子暗号、量子シミュレーションなどを説明する7枚のポスターの展示を行い、ポスターの前では、多くの方がその内容に興味をもたれ足を止め、こちらでも多くの質問が出ていました。サイエンスアウトリーチに関するポスターをご覧になった方から、「小学校でのとりくみとはどのような内容か?」との質問があり、実際の実験を交えながらそのとりくみの様子を紹介し、

日ごろから量子情報処理プロジェクトが取り組んでいるサイエンスアウトリーチの活動が、こうして少しずつではあるものの、確実に一歩ずつ広がりを見せている様子を目の当たりにしました。

今回のオープンハウスでは、のべ1,325名とたくさんの方が来場され、その来場者によるアンケートでは、多くの方から興味度が高かったデモのひとつに、山本研究室のこのデモを選んで頂く事ができました。こうしたオープンハウスなどの場が、量子情報国際研究センターとFIRST量子情報処理プロジェクトの活動を広く一般の方にご理解頂く、良い場所になっていく事と思います。

[国立情報学研究所最先端研究開発支援室 青木香穂里、
 国立情報学研究所 宇都宮聖子]



独立行政法人理化学研究所和光研究所 一般公開

■実施日 2011年4月23日(土) 9:30 ~ 16:30 ■対象 独立行政法人理化学研究所和光研究所一般公開来場者

講演会

■講演名 「量子の制御とコンピュータ —その実現に向けた超伝導デバイスの挑戦—
■報告者 蔡 兆申(独)理化学研究所/日本電気(株)

理化学研究所和光研究所の一般公開は、毎年4月に開催されており、今年に来場者数は約5,500人でした。その一般公開の場で、量子力学の説明と量子コンピュータの展望について、1時間の講演を行いました。当日は、ホールが満員となり、外のモニターから聴講される方も多数出るといった盛況ぶりでした。

講演では、古典コンピュータと量子コンピュータの比較を通して量子コンピュータの優位性について、またその展望について、動画等を用いてお話しをしました。それに加えて、量子重ね合わせ、量子絡み合いや量子干渉について、オセロモデルを利用し、できるだけ分かり易く説明しました。

皆さんに理解をしていただけたらどうかと心配をしていましたが、最後をお願いしたアンケートでは7割近くの方々に理解をしていただけたという結果となり、安心しました。コメントの中には、「量子という物質は、存在する場所が確率によってどこにあるのかわかり、観測する毎に異なる性質を持っている事が興味深く感じた(10代・男性)」、「いままでに比べてたくさんの情報を少ない量でできるということが印象に残った(10代・

男性)」、「いつごろ量子コンピュータが実現できるのだろうか(10代・男性)」といった声がありました。中でもうれしかったのは、「難しかったが、こういうことを分るようになりたい」、「物理は面白い・楽しい」や、「自分も研究職につきたいと思った」という意見が、若い世代から出たことです。若者の理科離れが進んでいると叫ばれる中、物理・科学が魅力ある楽しいものであるという啓蒙活動をすることが、研究者の後進を育てる意味でも、基礎研究への理解を得るためにも大切であり、研究者としての役割であると実感しました。



イベント/デモンストレーション

■デモンストレーション名 「磁気の不思議を見て知って触ってみよう!」
■報告者 Franco Nori (理化学研究所)

2011年4月、フランコ・ノリ博士のグループとして理研オープンハウスに参加しました。大勢の人々(約1000人以上)が我々の展示を訪れ、中には家族に連れられたお子さんもいらっしゃいました。様々な「教育用科学おもちゃ」など、インタラクティブな展示をみなさん楽しまれたようです。中学校や高校から来られた学生は、ときどき質問をしてはノートにその答えを自身の考察とも書き込んでいました。

展示の一部は電気と磁気についてのものでした。電磁気は回路の理解につながりますし、また我々の研究分野の一つでもあります。(我々は量子回路について研究していますが、オープンハウスではわかりやすい古典物理に関連した現象を扱いました。)

電気と磁気の展示では、教育的かつ実際に手で触れて操作できる多くの対話型デモを用意しました。例えば、金属管の中を落ちる磁石の輪のスピードを下げる方法(渦電流を利用します)、磁石を使った加速器、強磁性流体、透明アクリル樹脂の容器内に満たした砂鉄を使った磁場の3次元的な視覚化、真空ガラス球内の放電、ピンポン球に触れることで切り替わる電気スイッチ、手で充電できる懐中電灯(ファラデーの法則の応用です)、回る二つの磁石、磁石球、カオス的な動作を示す磁気デバイス、磁石のこま。他にも様々な物理法則を使った楽しめる展示を行いました。

ミクロの世界への入り口として、学生や子供や大人が微視的世界を直接間近で見られるよう、いろんなサンプルとデジタル顕微鏡を設置しました。

体験型の展示を使って、物理の他の側面も見ていただきました。たとえば、エアージェン、落ちていくコインの位置エネルギーを回転エネルギーに変換するパラボラ型の漏斗、オイラーの円盤(これも回転する大きな円盤の位置エネルギーを速くなっていく軸回転のエネルギーに変換します)、ソリトン波の発生、定在波を使った様々な現象、真空を作り出してものを表面でくっつけ合わせる方法、沢山のこま、角運動量の体験、表面張力や泡、液体の中の相分離などです。

(和訳：樹本尚之(東京大学大学院/国立情報学研究所))



北海道大学 竹内研究室

北海道大学電子科学研究所の量子情報フォニクス研究室は、竹内教授の他、助教2名、博士研究員4名、大学院生6名、学部生2名で構成されています(図1)。現在、研究所間連携プロジェクトの一環として、大阪大学産業科学研究所(産研)の一員として研究室全体が産研に常駐しており、学生は大阪大学基礎工学研究科所属です。

当研究室では、光量子情報およびナノフォトニクスの実験的研究に取り組んでいます。光量子情報に関しては、これまでに、光子を用いた量子情報処理の基本ゲートである制御ノットゲートの実現(PRL 2005)や、4つの光子のもつれ状態を用い、標準量子限界を超える位相感度測定の実験(Science2007)、2つの光子の量子もつれ合いを抽出する光量子回路の実現(Scienc2009)などを行ってきました。また最近では、光子1つレベルの非線形性を組み合わせた光量子回路を、理論提案から10年を経て実現に成功(PNAS, 2011、本ニュースの解説参照)しています。

ナノフォトニクスに関しては、光量子情報処理に必要な単一光子源や量子ゲート素子の研究を行なっています。そのためのデバイスとして、特に、直径数 $10\mu\text{m}$ のガラス微小球と、光ファイバをサブミクロンにまで引き延ばしたテーバーファイバに着目しています。前者は、 10^9 に達するQ値をもつ微小光共振器として、また後者は、光子の高効率入出力に使用できます。これまでに、極低温(8K)での両者の結合実験(Optics Express, 2010)や、単一光子レベルでの性能評価(Optics Express 2011)を行っていききました。現在、ダイヤモンド窒素欠陥中心などの単一発光体と光子との、非線形相互作用の研究を進めています。

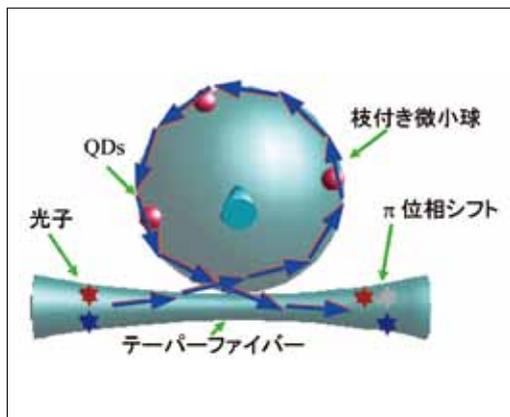


図2 微小光共振器を用いた量子ゲート素子概念図



図1 2011春の研究室集合写真。
滞在中のスタインベルク教授(上段左から3番目)と阪大産研にて。

本FIRSTでは、量子計測グループの一員として、量子もつれ光子を用いた新しい測定技術の実現に向けた研究を行っています。光位相測定は、媒質中の屈折率などの情報を得られるため、生物学から天文学に至るまで様々な分野で基盤となる技術です。先に述べた様に、我々は数年前に、量子もつれ状態の光子を用いると、通常の光にくらべて、位相をより高い感度で測定できることを示しました(図3)。「この研究を応用すれば、できるだけ少ない光量を用いて、高い精度での物質質量などの測定ができるのではないか?」この視点から、本プロジェクトでは量子もつれ光子を用いた新しい顕微鏡(もつれ合い顕微鏡)の研究に取り組んでいます。現在はプロトタイプとして、2光子もつれ合い状態を用いた顕微鏡作成に注力しています。これまで、顕微鏡部分及び、もつれ合い光子対源を構築し、ともに高い性能が得られています。今後両者を融合するとともに、プロトタイプ機の実現を目指します。

[竹内繁樹、岡本 亮、岡野真之、小野貴史]

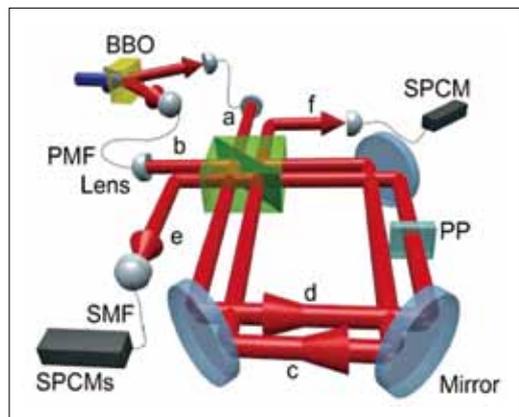


図3 もつれ光を用いた位相測定の実験装置

● 学習院大学 平野研究室

当研究室は学習院大学理学部物理学科に所属しており、構成メンバーは教授の平野琢也、東條賢助教、Mark Sadgrove 研究員のほか、9名の大学院生と7名の学部4年生です。Sadgrove氏は2011年7月から最先端研究開発支援プログラムの博士研究員としてメンバーに加わりました。現在、研究室には3つの研究チームがあり、中性原子気体のボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)の研究を行なっている原子チーム、連続量量子鍵配布の研究を行っている量子暗号チーム、それからパルス光を用いた連続量エンタングルメントの生成と応用実験を行っているエンタングルチームです。原子チームは、東條助教、Sadgrove 研究員と2名の大学院生、3名の学部4年生で構成されています。

最先端研究開発支援プログラムでは、量子計測サブグループに所属しており、原子BECを用いた磁力計の開発に力を注いでいます。

中性原子気体のBECが初めて実現されたのは今から15年前の1995年です。この15年間止まることなく驚くべき勢いで研究が進展し、その研究領域は大きく広がっています。当研究室では、原子BECの豊富な内部自由度に注目した研究をこれまで行ってきました。私達の実験室では、 ^{87}Rb のBECを生成しており、それは100nK程度まで冷却された100万個の原子が $10\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}\times 100\mu\text{m}$ の領域に閉じこめられた状態です。 ^{87}Rb の基底状態は全角運動量の大きさFが1と2の超微細準位からなり、それぞれ3つと5つの磁気副準位を持っていますので、最大で8つの成分からなる超流動体が実現されます。原子集団の振る舞いは、極低温における衝突を特徴付けるs波散乱長というパラメータを含む非線形方程式で非常に良く記述することができます。そして、s波散乱長の大きさは磁場によりコントロールすることができます(図1左)。図1(右)は2つの成分からなるBECを混ぜ合わせたと

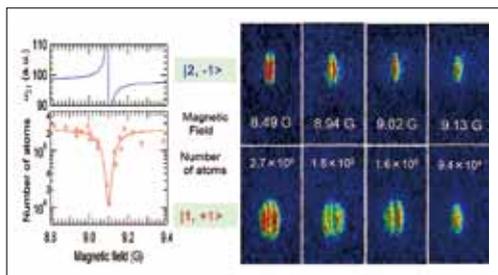
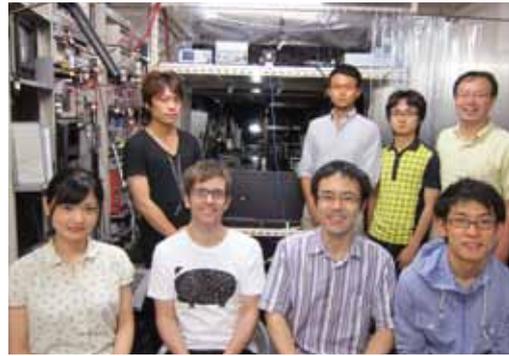


図1 磁場による原子間相互作用の制御(左図)とそれを利用した2成分BECの相分離の制御(右図)



きに、その相分離の様子が磁場により敏感に変化する様子を観測したものです(Phys. Rev. A 82, 033609, 2010)。

原子を用いた高感度磁力計は原子スピンの歳差運動を観測することにより実現することができます(図2左)。原子は小さな磁石ですので、磁場中では磁場の大きさに応じた周期で歳差運動を起こし、その周期を知ることで、磁場の大きさを測定することができます。実際、原子の歳差運動を利用して非常に優れた磁力計が実現されており、ガラスセル中の原子ガスを用いた実験では、 $10^{-15}\text{T}/\sqrt{\text{Hz}}$ を越える感度が達成されています。さらに、原子を冷却して拡散を抑えることにより、高感度と高空間分解能を両立できることも示されています。

当研究室では、原子BECを用いることで究極の感度と空間分解能を持つ磁力計を開発することを研究目標としています。原子スピンの向きは、位相コントラスト法により非破壊的に繰り返し測定することができます。図2(右)は、同一のBECを位相コントラスト法により、繰り返し撮影した画像です。原子BECは量子力学の許す限界まで位置と運動量を制御した状態であり、その振る舞いは上述した非線形方程式により良く記述できます。私達は、さらに原子のスピンを制御することにより、高感度・高分解能の磁力計を実現することを目指して、研究を行っています。

[学習院大学 平野琢也]

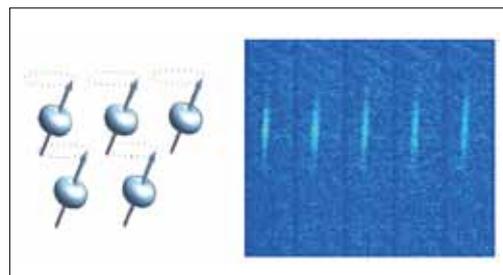


図2 原子スピンの歳差運動(左図)と原子BECの位相コントラスト像(右図)

エッセイ

Essay

今年の夏も、様々な国際会議が世界各国で開催されている。特に今年は超伝導発見100周年にあたるということもあり、低温関係では多くの国際会議・シンポジウムが開催されている。

量子情報の研究は、低温分野も含めて今や多くの分野と密接に関連し、各分野で重要なテーマとなっており、国際会議においても、量子情報のセッションがあることが当然のこととなっている。筆者の専門とする原子物理学関係では、5月、6月だけでも、5月の末にドイツでレーザー分光国際会議 (ICOLS2011)、6月中旬には米国アトランタで米国物理学会・原子分子光物理部会 (DAMOP)、6月末には、米国バーモント州でゴードン会議が開催されたが、このどれにも量子情報のセッションが設けられている。

会議それぞれに個性があり、出席者も、学生が多いもの、シニアな研究者が多いもの、それぞれである。筆者は今回初めて上記ゴードン会議に出席したのだが、多くの学生が出席していて、講演での質問も学生から多く出され、大変活気のあるものであった。原子物理関係のゴードン会議は、今年は例外的に場所を変えての開催だったが、2年に一度、同じ場所で開催されてきた。Excursionやdinnerはなく、ビジネスmeetingでは学生も含めて全員参加で、会議に関するアンケートを記入しながら、次々回のオーガナイザーを学生も含めた参加者全員によって、推薦と挙手による多数決で決める、という“民主的”なものであった。各セッションには、スピーカーとともにディスカッション

リーダーがいて、自分の研究成果報告だけでなく、当該分野のイントロダクションも行うようになっていいる。事前のアブスト提出や会議後のプロシーディング提出もなく、発表内容は、unpublishedの、最新の内容を多く含むことが要求されている。

この会議では、学生が多く出席して、同じホテルに宿泊していることもあり、ご多分に漏れず、深夜まで、“informal meeting”が繰り広げられていた。量子情報研究で著名なスキーン教授も参加して、大変盛りあがっていたもようである。この深夜の“informal meeting”は学生と先生の心理的な距離を縮める効果があり、実際ある学生が翌日質問をしてきた、とはスキーン教授の弁である。このように、ゴードン会議は、学生同士および学生と著名な先生との交流の場として、定着しているようである。

我々の「量子情報処理プロジェクト」においては、夏期研修会が同様の役割を果たしているのではないかと思う。科学技術振興機構CREST「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」で主に沖縄で開催されてきたものの発展版として、昨年8月、再び沖縄において、若手を対象に開催された。我が国においてこれほど定着しているサマースクールは珍しいのではないだろうか。深夜におよぶ“informal meeting”が繰り広げられているのも同様である。

今年の夏期研修会は京都で開催される。活発な議論が繰り広げられ、かつ、各層の参加者の交流の場となることを期待してやまない。

ゴードン会議と量子情報「夏期研修会」

高橋義朗

No.5 September 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
五紙版印刷の印刷用紙を使用しています