ISSN 2185-9671

FIRST/NII-GRC on Quantum Information Processing Newsletter

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

2012 December No.10

量子ニュース

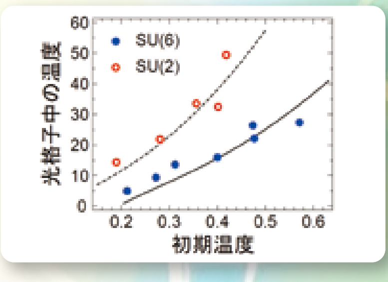
CONTENTS

量子科学最前線

量子計算機の集積回路を作るには

最近の研究成果

SU (6) スピン対称性を持った モット絶縁体状態の生成に成功



海外研究動向

量子ドットスピンを基にした量子ビット研究

国際会議報告

The 6th International Conference on Spontaneous Coherence in Excitonic Systems

The Principles and Applications of Control in Quantum Systems (PRACQSYS2012)

●プロジェクト組織

中心研究者：山本 喜久（国立情報学研究所／スタンフォード大学）
共同提案者：樽茶 清悟（東京大学）、蔡　兆申（（独）理化学研究所／日本電気（株））
研究支援統括者：仙場 浩一（国立情報学研究所）

サブテーマ紹介　　○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）
河原林　健一（国立情報学研究所）

●超伝導量子コンピューター
○蔡　兆申（（独）理化学研究所／日本電気（株））　中村　泰信（東京大学）　齊藤　志郎（NTT物性科学基礎研究所）
高柳　英明（東京理科大学）　前澤　正明（（独）産業技術総合研究所）　日高　睦夫（（公財）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）

●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）

●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）

●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）

●理論
○都倉　康弘（筑波大学）　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）

アドバイザー

●光	末松　安晴（（公財）高柳記念財団）　覧具　博義（元東京農工大学）
●原子	清水　富士夫（電気通信大学）　藪崎　努（京都大学）
●半導体	小宮山　進（東京大学）　榊　裕之（豊田工業大学）
●超伝導	井口　家成（元東京工業大学）　前川　禎通（（独）日本原子力研究開発機構 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

●研究推進チーム
技術参事　堀切　智之（国立情報学研究所）
佐藤　由希子（国立情報学研究所/山本研究室）
青木　香穂里（国立情報学研究所）
大島　ルミ（国立情報学研究所）

●人材育成チーム
技術参事　宇都宮　聖子（国立情報学研究所）
塩田　容子（国立情報学研究所/山本研究室）
窪田　しおり（国立情報学研究所）

●社会連携推進室 最先端研究開発支援チーム
係　長　昨間　勲（国立情報学研究所）
田原　真理（国立情報学研究所）

プロジェクト事務局からのお知らせ

● INFORMATION

■The 11th US-Japan Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy
「第11回量子エレクトロニクスとレーザー分光に関する日米セミナー」開催のお知らせ

- The 11th US-Japan Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy
- 期間：2013年4月4日（木）～12日（金）　• 会場：奈良県新公会堂
- Invited Speakers (Tentative List)：(Eur Chi US) Eugene Polzik, Edward Hinds, Serge Haroche, Atac Imamoglu, Jian-Wei Pan, Martin Zwierlein, Mikhail Lukin, John Doyle, Dan Stamper-Kurn, Cheng Chin, Markus Greiner, Ana Maria Rey, Dave Wineland, Mark Saffman, Vladan Vuletic, Debbie Jin, Jun Ye, Alex Kuzmich, Benjamin Lev, Ian Spielman, Irfan Siddiqi, (Japan) Akira Furusawa, Takashi Yamamoto, Hidetoshi Katori, Shin Inouye, Yoshiro Takahashi, Makoto Gonokami, Yasunobu Nakamura, Kouichi Semba, Kouhei Ito, Seigo Tarucha, Yoshihisa Yamamoto, Masahito Ueda, Masato Koashi, Yasunori Yamazaki, Kenji Ohmori, Takahiro Sagawa, Makoto Negoro
- Organizers：Yoshiro Takahashi, Vladan Vuletic

● AWARD

2012年8月　TJMW2012 Young Researcher Best Presentation Award「Efficient Stripline Micro-probe for Ku-band Electron Paramagnetic Resonance」YAP Yung Szenさん（大阪大学）

2012年9月　応用物理学会優秀論文賞「Direct comparison of distant optical lattice clocks at the 10^{-16} level」山口敦史さん（情報通信研究機構）他9名

Young Researcher Best Presentation Award　受賞
YAP Yung Szenさん（大阪大学）

応用物理学会優秀論文賞　受賞
山口 敦史さん（情報通信研究機構）

量子ドットスピンを基にした量子ビット研究

筑波大学　教授　都倉　康弘

半導体量子ドット中の電子スピンは、半導体デバイスで期待される高い制御性、集積性と量子コヒーレンスを比較的長い時間保持できる期待があり活発に研究が行われています。本稿では、この研究分野の最近の動向を簡単にご紹介します。

スピンを用いて量子ビットを構成する方法として現在次の二つがあります。一つは単一スピンで一量子ビットを作るもので、構成が単純である点が優れています。しかし量子ビットを高速にコヒーレント制御する為の工夫が必要で、微小磁石による不均一磁場を用いる方法[Nature Physics 4, 776 (2008)]とInAsナノワイヤなどの強いスピン・軌道相互作用を持つ材料を用いる方法[Nature 468, 1084 (2010)]が検討されています。もう一つは複数のスピンから構成される論理基底の一部を量子ビットとするものです。(exchange only qubitとも呼ばれ、例えば2量子ドット中2電子[Science 309, 2180 (2005)]、3量子ドット中2電子[Phys. Rev. Lett. 108, 140503 (2012)]、3量子ドット中3電子[Nat. Phys. 8, 54 (2012)]等)構成が複雑となる課題はありますが、ゲート操作だけでコヒーレント制御が可能である点が優れています。それぞれの方法で現在2量子ビット操作まで実現しています。[Phys. Rev. Lett. 107, 146801 (2011), Phys. Rev. Lett. 107, 030506 (2011)]

従来高品質な量子ドットが実現できるガリウムヒ素(GaAs)を基にした系が研究されてきましたが、この材料はすべての原子核がスピン3/2を持つためスピン量子ビットのコヒーレンスが抑制されてしまう事が分かって来ました。その為核スピンの影響の少ない炭素系(カーボンナノチューブ、グラフェン)やシリコン系でも研究が進んでいます。特にシリコンとゲルマニウムのヘテロ系(Si/Ge)は高い品質が実現できるため、米国HRL研究所やWisconsin大等でGaAs系と比較しうる結果が得られつつあります。[Nature 481, 344 (2012), arXiv: 1208.0519]

多量子ビットの集積化にはまだ色々な課題がありますが、遠隔量子ビットの間で情報のやり取りが出来ると便利です。東大のグループとケンブリッジのグループは独立に遠隔2量子ドット間で表面弾性波を用いて単一電子をあたかもキャッチボールの様にやり取りする実験に成功しました。[Nature 477, 435 (2011), Nature 477, 439 (2011)]また超伝導量子ビットやダイヤモンド中窒素・空孔(NV)欠陥による量子ビットでは超伝導体を用いたマイクロ波共振器との結合(量子バス)が活発に研究されていますが、半導体量子ドット系を超伝導マイクロ波共振器と結合させる試みも進められています。ETHのグループ[Phys. Rev. Lett. 108, 046807 (2012)]と東大のグループ[arXiv: 1206.0674]は量子ドットによる電荷量子ビット、プリンストン大では[Nature 490, 380 (2012)]InAsナノワイヤをベースとしたスピン量子ビットと超伝導マイクロ波共振器の結合が実現されています。

この春のアメリカ物理学会で、デルフト工科大のL. KouwenhovenがInAsナノワイヤとニオブ・チタン・窒素(NbTiN)の超伝導電極からなる系でマヨラナ(Majorana)フェルミオンの微候を見いだした、という発表を行い大きな注目を集めました。[Science 336, 1003 (2012)]スピン・軌道相互作用の大きな半導体と超伝導体の界面に実現すると理論的に予言されてきたマヨラナフェルミオンは、占有率5/2の量子ホール状態で実現すると予想されている非アーベリアン統計に従う系とならび、「トポロジー」で保護された新しい量子ビットの候補として期待されています。

最近の研究成果 Research Achievement

1 超伝導量子ビットを用いた動的デカップリングの実装

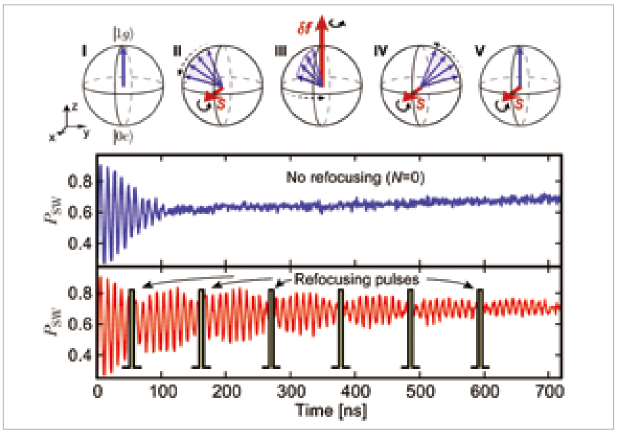
論文情報 S. Gustavsson, J. Bylander, F. Yan, P. Forn-Díaz, V. Bolkhovsky, D. Braje, G. Fitch, K. Harrabi, D. Lennon, J. Miloshi, P. Murphy, R. Slattery, S. Spector, B. Turek, T. Weir, P. B. Welander, F. Yoshihara, D. G. Cory, Y. Nakamura, T. P. Orlando, and W. D. Oliver, "Driven dynamics and rotary echo of a qubit tunably coupled to a harmonic oscillator", Phys. Rev. Lett. 108, 170503 (2012)
S. Gustavsson, F. Yan, J. Bylander, F. Yoshihara, Y. Nakamura, T. P. Orlando, and W. D. Oliver, "Dynamical decoupling and dephasing in interacting two-level systems", Phys. Rev. Lett. 109, 010502 (2012).

関連URL http://prl.aps.org/abstract/PRL/v108/i17/e170503 http://prl.aps.org/abstract/PRL/v109/i1/e010502

東京大学／理化学研究所
中村 泰信

動的デカップリング（dynamical decoupling）は、1950年に核磁気共鳴の研究においてErwin Hahnにより開発されたスピンエコー法に端を発する手法で、bang-bang controlと呼ばれることもある。注目している量子系のハミルトニアンを時間的に制御することで、デコヒーレンスの原因となる環境の自由度との制御不能な結合を、時間平均化により実効的に消去する。この方法は補助量子ビットのリソースを用いることなく個々の量子ビットのコヒーレンスを改善することを可能にするので、測定やフィードバックを必要とする本格的な量子エラー訂正・誤り耐性量子計算を導入する前段階として、ゲートや読み出しの忠実度を必要なレベルまで引き上げるための重要な技術であり、近年理論的にもその最適化などが盛んに研究されている。

動的デカップリングは超伝導量子回路においてもすでに実現され、量子ビットのデコヒーレンスの要因を調べるために用いられている［Nature Phys. 7, 565（2011）］。特に環境の揺らぎのスペクトルを幅広い周波数領域にわたって精査するのに有効である。今回の実験では、この概念を、「量子ビット＋超伝導共振器」あるいは「量子ビット＋欠陥に起因する量子２準位系」といった複合系に拡大適用し、コヒーレンスの改善を実証した。複合量子系においても、特定のパラメータの揺らぎに対応したデカップリングパルス列を構築し、１ビットゲートや２ビットゲートの忠実度の向上に寄与することが可能である。今後は量子計算アルゴリズムへの実装が期待される。



「超伝導量子ビット＋2準位欠陥」系副空間におけるリフォーカシングの
ブロッホ球表示（上段）とデカップリングパルス列による位相緩和の抑制（下段）

2 誤り耐性量子コンピューターのための階層アーキテクチャー

論文情報 N. Cody Jones, Rodney Van Meter, Austin G. Fowler, Peter L. McMahon, Jungsang Kim, Thaddeus Ladd, and Yoshihisa Yamamoto, "Layered Architecture for Quantum Computing", Phys. Rev. X 2, 031007 (27pp) (July 2012)

関連URL http://prx.aps.org/abstract/PRX/v2/i3/e031007

国立情報学研究所／スタンフォード大学
山本 喜久

量子誤り訂正コード（トポロジカル表面コード）を実装する量子コンピューターの階層アーキテクチャーを提案し、意味のある量子計算を行うために必要なリソースを見積もった。アーキテクチャーは量子ビットの初期化、操作、射影測定を行う物理層、系統的なエラーをオープンループのデカップリングパルスで除去するバーチャル層、ランダムなエラーをクローズループの制御系で除去する量子誤り訂正層、ユニバーサル量子計算を実行できる論理ビットを構築する論理層、量子アルゴリズムを実装し、計算の答えをユーザーへ報告する応用層の５層から構成される。光パルス制御の半導体量子ドットスピン（QuDOS）をハードウェアに選んだ場合のリソースを表1にまとめた。1ビットゲート、2ビットゲート、射影測定のエラーレートを0.1％に選んでいる。1024ビットの因数分解をShorアルゴリズムを使って解く場合、アラニン程度の大きさの分子のエネルギースペクトルを位相推定アルゴリズムで解く場合、いずれの場合も必要とされる量子ビット数は10^8～10^9、計算時間は１日～10日と見積もられた。将来に向けて重要と思われる点を以下に列挙する。

1. 上記リソース（量子ビット数）の大半は、いわゆるマジック状態（A状態）の生成と純粋化に消費される。この純粋化プロトコルの改善がリソースの減少の鍵を握る。
2. ハードウェア技術としては、量子操作、射影測定の高フィデリティー化、大規模集積化が重要である。
3. デコヒーレンス時間はある程度長ければ、それ以上長くても余りシステムアーキテクチャーにインパクトはない。

リソース	素因数分解（1024ビット）	分子エネルギー計算（アラニン）
論理ビット数	6144	6649
（追加）論理ビット数	66564	15860
ゲート誤り	0.1%	0.1%
量子ビット数	4.54×10^8	1.73×10^8
計算量（Toffoliゲート数）	1.68×10^8	1.27×10^8
計算時間	1.81日	13.7日

量子コンピューター実現への鍵
- 高フィデリティーでのゲート操作
- 量子ビットの大規模集積化

表1 誤り耐性量子コンピューターのリソースの見積り

SU(6)スピン対称性を持ったモット絶縁体状態の生成に成功

論文情報 S. Taie, R. Yamazaki, S. Sugawa, and Y. Takahashi, “An SU(6) Mott insulator of an atomic Fermi gas realized by large-spin Pomeranchuk cooling”, Nature Physics 8 (2012)
関連URL http://dx.doi.org/10.1038/nphys2430(2012)

京都大学
高橋　義朗

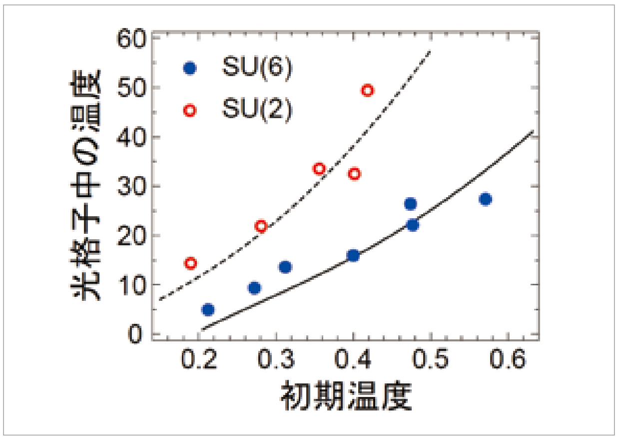
近年、強相関物質が低温で示す特異な性質を光格子中の原子気体を使ってシミュレートする研究“量子シミュレーション”が注目を集めています。京都大学では、よく用いられるアルカリ原子ではなく、様々なユニークな特徴をもつイッテルビウム（Yb）という原子に着目し、実験技術を開発してきました。今回、高いスピン対称性を持つYb原子を光格子中に導入して実験を実施し、世界に先駆けた研究が実現しました。

固体物質で主役を演じる電子のスピン1/2を、より大きなものを考えた場合、SU（N）と言われる高いスピン対称性を持った系が考えられ、これまで理論的には大変興味をもって研究されてきましたが、このSU（N）対称性をもった系を実現することは大変困難であり実験的研究は行われてきませんでした。

今回、Yb原子に含まれるフェルミ同位体のうち、核スピン5/2をもつ^{173}Ybを極低温にまで冷却して光格子の中に導入しました。その結果、6成分のフェルミオンが格子点上に1個ずつランダムに入り混じったSU（6）モット絶縁体が生成されていることを、今回の研究で確認しました。

さらに、この6成分のフェルミ原子系の場合、もともと超流動ヘリウム3を実現する超低温を得るために開発されたポメランチュク冷却という興味深い冷却機構が、非常に強力な冷却法となっていることを、スピン成分の数を変えた比較実験を行い、確認しました。

今回実現されたSU（6）モット絶縁体状態は、温度をさらに下げることで多様性に富んだ磁性の状態に移り変わっていくと考えられており、その解明は、物質系の磁性や超伝導などの研究に大きな進展をもたらすことが予想されます。

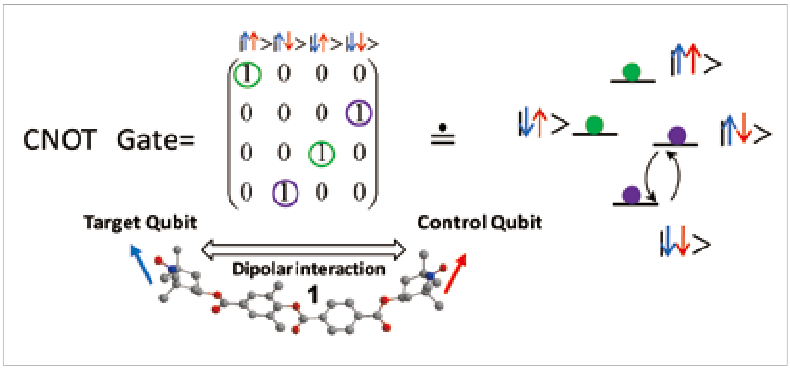


2電子量子ビット系分子スピンで初の制御NOTゲート

論文情報 Shigeaki Nakazawa,* Shinsuke Nishida, Tomoaki Ise, Tomohiro Yoshino, Nobuyuki Mori, Robabeh D. Rahimi, Kazunobu Sato,* Yasushi Morita,* Kazuo Toyota, Daisuke Shiomi, Masahiro Kitagawa, Hideyuki Hara, Patrick Carl, Peter Hoefer, and Takeji Takui* “A Synthetic Two-Spin Quantum Bit: *g*-Engineered Exchange-Coupled Biradical Designed for Controlled-NOT Gate Operations”, Angew. Chem. Int. Ed., 51, 9860 – 9864 (2012).
関連URL http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/anie.201204489/abstract　DOI: 10.1002/anie.201204489

大阪市立大学
工位　武治

アンサンブル系分子系スピン量子コンピュータの開拓には、分子内にgテンソルが異なる複数の電子スピン量子ビットをもち、かつ電子スピン間に働く交換相互作用を弱めた多電子スピン量子ビット系を新たに設計し（gテンソルエンジニヤリング）、合成しなければならない。弱交換相互作用の要請は、今日のパルスマイクロ波技術の制限による。このような分子スピン量子ビット系では、個々のビット操作には異なるパルスマイクロ波共鳴周波数を用いる。今回、大阪市大と大阪大の共同研究で、これらの条件を満足する2電子量子ビット系分子スピン（2電子量子ビットビラジカル）1（図参照）を設計・合成し、1を反磁性結晶格子中に任意の濃度で希釈した単結晶を作製することに成功し、分子スピン系で制御NOTゲート操作を初めて実行した。量子演算実験に先立ち、ビラジカル1の微細構造磁気テンソルは、Qーバンド（35 GHz）単結晶パルス電子ー電子二重共鳴法（ELDOR）によって精密に決定した。これは、単結晶ELDORの初めての実験例である。ビラジカル1では、個々の電子スピンがマイクロ波によって選択的に励起されるように、不対電子はNOサイトに局在化し異なるgテンソルを有するが、さらに選択励起が効果的に行えるように分子設計されている。分子スピン1は、その超微細・微細構造スペクトルの線幅を尖鋭化させるために、二つのNOサイトは^{15}N核で標識化されているだけでなく水素原子も重水素化された新規な分子である。図では、電子スピン副準位のみが示されているが、論文ではすべての核スピン副準位を含む複雑な磁気異方的なスピン副準位を完全解析し、制御NOTゲート操作が可能な静磁場方向を同定している。



量子計算機の集積回路を作るには

基本設計を提唱，工学との連携進める

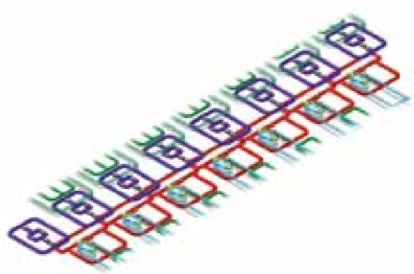
蔡 兆申
（ツァイ・ツァオシェン）理化学研究所グループディレクター
1952年台湾生まれ。83年ニューヨーク州立大学でPh.D.取得，NEC入社。主任研究員，主管研究員を経て2001年から主席研究員（現職）。2001年から理研の巨視的量子コヒーレンス研究チームリーダー（現職）を兼務し，12年から単量子操作研究グループディレクターを併任。

「量子コンピューターを作るのはどれくらい難しいか，今までは見えていなかった。それがわかってきて，克服する方法も見えてきた」。理化学研究所の単量子操作研究グループディレクター，蔡兆申博士は，こう言って柔らかい笑みを浮かべた。

1985年に量子コンピューターの理論が提唱された時，どうすれば実際に作ることができるのかは誰もわからなかった。実験が始まったのは10年後。今年ノーベル物理学賞を受賞したデイブ・ワインランド博士らが電場で閉じ込めたイオンを使って2量子ビットの演算を実行した。その後，空中を飛ぶ光子や液体中の分子など様々な物理系を使った量子コンピューターの基礎実験が行われたが，中でも蔡博士が99年，NECの中村泰信主任（現東京大学教授）らと作った基本素子は，研究者のみならず広く社会の注目を集めた。

それはアルミニウムで作った固体素子で，ある場所に超伝導を担う電子対が過剰に「ある」状態と「ない」状態とで「0」と「1」を同時に記録する。「量子ビット」と呼ばれる。人が「計算機の素子」と聞いた時にまさに思い浮かべる形をしており，いずれ集積化して実用規模の量子コンピューターが作れるのではないか，との期待を抱かせた。

あれから13年。いまだ量子コンピューターの実現は見えていないが，「こういう風にやればできる，という基本設計はできつつある」と蔡博士は言う。



量子ビットを集積化　超伝導磁束量子素子を並べ，量子ビットの集積回路を作る（イメージ図）。

1億個の量子ビット

蔡博士の言う「基本設計」とは，量子コンピューター実現への最大のハードルとなる「計算のエラー訂正」を実行しながら計算を実行できる，大規模化が可能なアーキテクチャーだ。現在作っている素子は超伝導のループを備え，中に生じる量子化された磁束の向きで「0」と「1」の情報を記録する。

どんなコンピューター素子も完璧な動作はせず，ある確率で計算にエラー

が生じる。普通なら結果を途中でチェックして修正すればよいが，量子コンピューターの場合，計算結果が外に漏れるとデータが変化し，計算が止まってしまう。当初，量子コンピューターは実現不可能との声もあったが，90年代半ばにこの問題を回避してエラーを訂正するプログラムが登場。実験研究に拍車がかかった。

蔡博士らが提案したアーキテクチャーは，最近登場した「表面符号型量子エラー訂正」という方式を用いる。確実・簡単な操作で実行でき，大規模化しても機能するなどの利点があるが，いくつか課題もある。

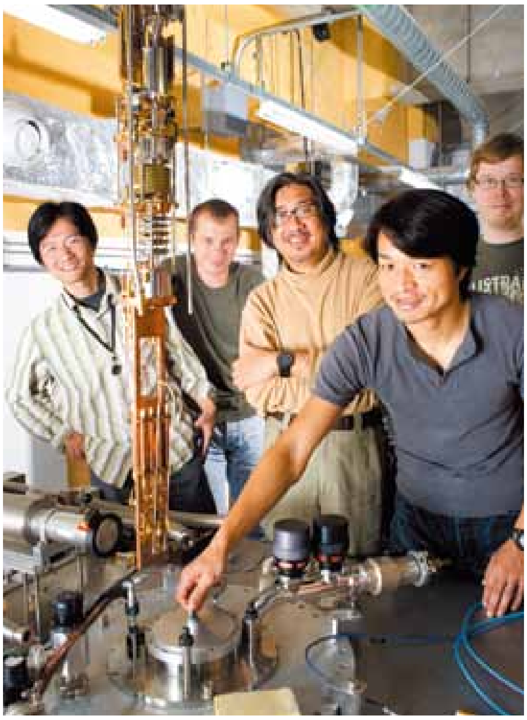
ひとつは膨大な数の量子ビットが必要なことだ。エラー訂正のためには，多数の量子ビットの情報を合わせて1つの正しい量子ビットの値を得る。表面符号型のエラー訂正では1つの実質的な量子ビットを得るのに，実に10^6個もの物理的な量子ビットが必要だ。

蔡博士は100量子ビットを集積した回路の実現を長期目標に据える。これができれば，量子計算によって未知の物質の性質を予測するなど，現在のコンピューターではできないことが可能になるかもしれないという。

だが実質100量子ビットを計算に使うには，物理的には10^8，つまり1億量子ビットを用意しなければならない。蔡博士はこれを10cm角の基板に集積したいと考えており，現在，産業技術総合研究所と超電導工学研究所のグループが，そのための新たな微細加工技術の開発に取り組んでいる。

もうひとつの課題は，基本となる演算操作で，高い精度を実現することだ。量子ビットを基板上に2次元的に配列した場合，99.9%，つまり1000回に1回以下しか間違えないという精度を実現できれば，エラーを訂正しながら量子計算を実行できることがわかっている。すでに目標精度での2ビット演算は実現したが，実はエラー訂正のためには，この演算を5回実行するごとに結果を読み出してフィードバックをかける必要がある。一連の操作を含めて99.9%を達成せねばならず，更なるブレイクスルーを目指す。

異色の企業研究者



蔡博士は台湾生まれ。日本で育ち，大学と大学院は米国で過ごした。研究テーマは超伝導回路で見られるジョセフソン効果だったが，ちょうどPh. D. を取得したのと前後して，この分野の雄だった米国のIBMやベル研究所が研究から撤退してしまった。

妻が日本人だったので日本での就職を考えたが，そのころ米国の大学院を出た研究者が日本で職を得る例はほとんどなかった。だが，当時ジョセフソン素子を使ったコンピューターの研究を進めていたNECが蔡博士を採用した。以来現在に至るまで，NECの研究所で物理学の根本にかかわる実験に取り組んでいる。

蔡博士が今でも保存している一通の書類がある。自ら書いた「ナノエレクトロニクス研究」の提案書だ。そこには「電子デバイスの高速化を図るためには，全てのレベルで微細化が必要。極限微細構造の物理，特に電気特性を解明する」と記されている。日付は1985年12月26日。「この言葉を言い出したのは，多分一番早かったと思います」と蔡博士は笑う。まだ「ナノテクノロジー」という言葉が人口に膾炙する前で，上司には「意味がわからない」と不評だった。

だがそれは現在の量子情報科学，量子エレクトロニクスへと続く，時代が求める研究だった。「ナノエレクトロニクス」は新たな研究分野として注目を集め，22年後の2007年，蔡博士が所属するNECの研究所は「ナノエレクトロニクス研究所」と名を変えた。

方法論が見えてきたといっても，量子コンピューター実現への道はまだ遠い。蔡博士は今後「数ビットを二次元的に配置して演算し，このアーキテクチャーが原理的に可能で大規模化が可能だと示したい。5～8年くらいでできるかな」と話す。

20年前には影も形もなかったことを思うと，「アーキテクチャー」や「集積化」という言葉が普通に語られるようになったこと自体，大きな変化だろう。「これからは物理屋だけではダメです。工学者との連携が必要な段階に来ています」と力をこめた。

この記事は『日経サイエンス』2013年1月号に掲載されたものです。

夏期研修会2012
―量子情報未来テーマ開拓研究会―
開催報告

1. 趣旨

量子情報処理の研究は、計算機科学、応用数学、原子物理、量子光学、半導体物理、超伝導回路に亘る非常に多岐な学問分野にまたがっており、1つの大学院で系統立てて教育する範囲を超えている。そこで、FIRST量子情報プロジェクトでは、中心研究者、分担研究者が講師を務める合宿型研修会を毎年開催している。研修会に参加する若手研究者は、広くプロジェクト内外から募り、講師を含めて参加者全員が約10日間寝食を共にし、講義、ポスターセッション、毎日深夜までのディスカッションを通じて、量子情報処理の基礎概念から最先端の実験までを習得できる機会を提供している。

2. 幹事団

（※敬称略・順不同）

オーガナイザー：樽茶 清悟（東京大学）
幹　事：小芦 雅斗（東京大学）、高橋 義朗（京都大学）、仙場 浩一（国立情報学研究所）

3. 開催内容

1. **日程**　2012年8月8日（水）～18日（土）
2. **人数**　44名
3. **場所**　沖縄県宮古島　ホテルブリーズベイマリーナ
4. **主催**　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　新学術領域「量子サイバネティクス」
   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

「夏期研修会」を終えて

オーガナイザー：東京大学　**樽茶 清悟**

8月、宮古島において夏期研修会が、大学院生、若手研究者40数名を集めて11日間に渡り開催された。昨年は京都で半分程度の日程で行われたが、今年は場所、日程ともに一昨年までの形式に戻った。講義プログラムには、量子情報の基礎としてより重要なものを精選し、光、半導体、原子、超伝導の物理系の量子情報応用の最先端、それにトポロジカル量子系、非平衡ダイナミクス、マックスウェルデーモンなどの新鮮な話題を加えた。研修生からは、量子情報だけでなく関連する分野の広がりも学ぶことができたという感想が聞かれ、全般に好評であったと思う。京都の時は、スケジュールが混んでいたせいか、講義の消化不良、交流の時間が少ないなどの声も聞かれたが、今回はそういうことはなかったようだ。

宮古島での開催については、当初「何故そんな遠くで」という意見もあったが、最終的には山本先生の「豊かな自然の中の隔離されたところでこそ得るものが多い」という信念が賛同を集めた。実際、宮古島は、シギラの青い海がまぶしく、さとうきび畑が一面に広がり、その分、会場のホテルは街からは遠く離れていた。一昨年までの沖縄本島（知念）にも増して本研修に適した立地であった。「非日常の空間に置かれることで、研修会への集中とリフレッシュが同時に楽しめた。」という感想を聞くにつけ、やはり良い選択であったと思う。

研修生の皆さんは、例年に違わず、講義はもちろんのこと、夜中過ぎまでポスターセッションの討論に熱心に参加しており、そのエネルギーには感心するばかりであった。また、最終日近くに、これから何をしたいか、というテーマで研修生から発表があった。実現性はともかく、発想とバラエティに富み、アピール精神も旺盛な発表が多く、私には頼もしく、また羨ましく思われた。自由に意見を交換し、互いに刺激し合う仲間としてネットワークが広がって欲しいと思う。

最後に、企画運営にご尽力していただいた幹事、スタッフの皆様、ご多忙中にも関わらず素晴らしい準備をしていただいた講師の方々、そして貴重なコメントをいただいたアドバイザーの皆様、この場を借りてお礼を申し上げます。

授業全般について

講師担当：東京大学　**小芦 雅斗**

このスクールの目標は、将来を期待される若い研究者、大学院生の方々に、量子情報分野の研究を進めていくために必要な基礎を固めてもらうとともに、最先端の研究成果にも触れていただくことである。今回は、これまで多く利用させていただいた沖縄本島の会場が使用できなくなったため、沖縄県宮古島での初めての開催となったが、関係した方々のご尽力で、スクールとしては理想的な11日間の会期を確保することができ、講義プログラムの企画担当としては大変感謝している。

講義・講演プログラムの構成は、2年前に導入し好評であった3つのタイプを組み合わせる手法を踏襲することにした。基礎

をしっかり学ぶために、シリーズで講義を行う基幹講義、基礎から始めて３時間で最新の研究内容につなげてもらうという先端講義、１時間で最新の研究内容を紹介するコロキウム講演である。今回、量子計算については、基幹講義で山本喜久先生とBill Munro先生、先端講義で山下茂先生にお願いすることで、様々な視点から量子計算を学べるような構成を試みた。また、量子情報の研究に大きなヒントになりそうな周辺分野についても、基幹講義で永長直人先生、コロキウム講演で佐野雅己先生、小林研介先生に大変有意義な授業を展開していただいた。そして、お忙しい中で時間を割いて効果的な講義・講演を準備していただいた全ての講師の方々にここで厚く御礼を申し上げたい。

このスクールの受講者としては、博士後期課程以上をメインとして想定しているのだが、今回は修士課程の方々もかなり受講され、刺激を受けて良かったという感想の一方で、やはり難しかった、という声も聞かれた。修士の受講生の方々の学ぶ意欲を強く感じたこともあり、今後は、こういったとりわけ若い受講生に対する効果的なプログラムについても模索していきたいと考えている。

講師一覧

基幹講義		
小芦 雅斗	東京大学	量子情報理論の基礎
都倉 康弘	筑波大学	半導体を用いた量子情報処理
山本 喜久	国立情報学研究所/スタンフォード大学	量子計算の原理～量子干渉と量子アルゴリズム～
Bill Munro	NTT物性科学基礎研究所	An introduction to performing quantum computation with gates, clusters…
永長 直人	東京大学	Topological aspects of electronic states in solids
先端講義		
山下　茂	立命館大学	計算機科学の視点からの量子アルゴリズムの応用例
仙場 浩一	国立情報学研究所	超伝導:巨視的量子状態と量子情報処理
井元 信之	大阪大学	光子を用いた一般化量子測定と量子情報処理
高橋 義朗	京都大学	冷却原子を用いた量子シミュレーション
コロキウム		
佐野 雅己	東京大学	マックスウェルの悪魔と情報·エネルギー変換
齊藤 志郎	NTT物性科学基礎研究所	超伝導·ダイヤモンド複合系における量子メモリー動作
樽茶 清悟	東京大学	量子ドットを用いた非局所スピン量子もつれの操作と検出
水落 憲和	大阪大学	ダイヤモンド中のNV中心を用いた量子情報処理
小林 研介	大阪大学	半導体人工量子系における電流ゆらぎ
宇都宮 聖子	国立情報学研究所	注入同期レーザーネットワークを用いたコヒーレントコンピューター
中村 泰信	東京大学	超伝導量子ビット研究の進展
香取 秀俊	東京大学	量子計測と光格子時計
平野 琢也	学習院大学	量子計測
R.Van Meter	慶應義塾大学	Towards Experimental Demonstration of the Surface Code
田中 歌子	大阪大学	量子インターフェイスとしてのイオントラップの展望

ポスター全般について

学生担当：京都大学　**高橋 義朗**

本年度は沖縄宮古島において、11日間の期間で夏期研修会が行われ、参加学生等によるポスターセッションも、例年通り、講義と同じ会場において連日開催され、非常に熱心な討論が繰り広げられた。

ポスター発表に先立って、初日に短く自己紹介をしてもらった。理論・実験、また大学・企業、に渡った幅広い層からの参加が今回もあり、量子情報分野の裾野の広さを改めて感じた。

翌日より、夕食後に、一日10件程度のポスター発表がされた。例年通り、夜遅くまで議論が続けられていた。講師の先生方も熱心にポスター発表に聞き入っていた。今回も、前後半２回のポスター発表をするというスタイルが踏襲され、様々な分野の参加者と議論する機会を存分に生かすことができていたのは大変良かった。分野が同じものとの専門性の高い議論と同時に、専門が異なるものへの丁寧な説明も行われており、非常に有意義なポスターセッションとなっていたと思われる。

また、今回は、ポスターとは別に、未来テーマ「私の夢」についての発表をしてもらった。現在取り組んでいるテーマからさらに進んだ「夢」について語った例も見受けられ、大変興味深いものであった。

参加者同士によるベストポスター賞、ベスト未来テーマ「私の夢」賞の投票があり、それをもとにした幹事による最終選考の結果、２件のベストポスター賞と１件の未来テーマ「私の夢」賞が選出され、最終日に表彰があり、山本先生より、賞状が手渡された。

最後に、窪田さん、昨間さん、田原さんを中心としたNIIスタッフの用意周到な準備により万事滞りなく進行することができた。あらためて、ここに感謝の意を表したい。

ポスター発表

参加者全員が自身の研究紹介を行うポスター発表を行いました。全員の発表ポスターの中から、参加者及び講師による投票を行い、今年度は最も興味深かったポスター発表者2名に「ベストポスター賞」が贈呈されました。

ベストポスター賞

東京大学大学院　永長・望月研究室　博士課程１年　中河西　翔

今回の夏期研修会では大変刺激的で有意義な11日間を過ごすことが出来ました。企画運営してくださった方々、講演してくださった先生方、そしてともに学び語り合った参加者の皆さんに感謝いたします。ポスター発表では「トポロジカル超伝導体におけるマヨラナ状態の出現とその応用」と題して、時間反転対称性をもつトポロジカル超伝導の理論設計について話しました。スピン軌道相互作用が効いた２層の２次元電子系において非従来型の超伝導が実現することを示したものです。トポロジカル超伝導体にはロバストなエッジあるいは束縛状態が現れ、それらが非可換性という特異な性質を有しているために量子計算への応用が期待されています。この点が私と量子情報を結んでいることをたよりに完全な初学者として研修会に参加させていただきました。論文や発表で枕詞のようにいわれる「量子計算への応用」を実感するために量子情報を学ぼうと思ったのがきっかけです。講義は基礎的な理論から始まり最先端の実験まで多岐にわたっていて量子情報の世界を一望できたように感じます。その様子はさながら量子情報という幹から様々な枝葉が伸びて複雑に絡み合いながら成長しているようであり、プロジェクトのHPの背景に天に向かって伸びる蔓が描かれていることに妙に納得がいきました。このようにかなり異分野からの参加となりましたが、永長先生による「Topological aspects of electronic states in solids」という講義が開講されていたこと、つい最近になって実験結果が発表されて騒がれていること、そして「トポロジー」という響きに誘われて多くの人が興味を持ってくれたことを嬉しく思います。ポスターセッションでも執拗な素人質問に皆さんが熱心に答えてくださり多くのことを学ばせていただきました。そんな人たちと勉学に娯楽に全力で取り組んだこの経験は今後大きな財産になると確信しています。

ベストポスター賞

東京大学大学院　前田研究室　博士課程３年　樋田　啓

先日の宮古島での夏期研修会では、噂に違わず熱心なポスターセッションが行われました。自分の分野に近い研究成果について、年齢が近いという気軽さも手伝って実験系の詳細等に至るまでの詳しい話を聞けたのはもちろんですが、物理系の学会ではなかなか触れることができない情報理論から見た量子計算についての話を聞けたことは大きな収穫だったように思います。

私は「半導体量子ドットによるCircuit QEDの研究」という題で発表を行いました。Circuit Quantum Electrodynamics（回路量子電磁力学）の実験は、単一の原子をミラーで作った光共振器の中に閉じ込めて行うCavity QEDを固体デバイスで行うものです。Cavity QEDの実験は2012年度ノーベル物理学賞の対象になるなど量子系の制御や量子情報処理への応用という観点から近年注目されています。Circuit QEDの実験は、これまでは主に超伝導qubitを使って行われてきました。今回の発表では、超伝導qubitのほかに固体デバイス中で実現できるqubitである半導体量子ドットへの拡張を報告しました。

半導体を使って量子光学のような実験を行うという、ある意味で２つの領域を混ぜ合わせたようなトピックですので、異分野の参加者に対して実験のおもしろさを直観的にどう伝えるかに苦労しました。今回ポスター賞をいただけたのはある程度おもしろさを伝えることに成功した証拠であると思いますのでとてもうれしく感じています。

ポスターセッションやレジャーの時間を含めた研修会全体を通して、研究を通じたつながりも生まれたのも大きな収穫でした。実験についてのメールのやりとりをするなど、研修会の後もそのつながりはしっかり続いています。長期間のサマースクールへの参加は今回が初めてでしたが、参加者の多くが科学者としてひとまわり大きくなって研究室へ戻っていったのではないかと思います。

私の夢

今年度の夏期研修会では、5年後または遠い将来に自分たちがやってみたいと思える研究テーマを、「私の夢」として参加者全員に1分間トークとして発表してもらいました。ここでは10人の私の夢を紹介します。

ベストプロポーザル賞！

田島 裕康（東京大学 羽田野研 D1）

Even though we face the difficulties of today and tomorrow, I still have a dream.

It is a dream deeply rooted in nature. I have a dream that one day people will rise up and prove the creed "the substance of information is entanglement." One day, there in diamonds, photons and superconductors, qubits will be able to join hands with other qubits as quantum computers. I have a dream today!

神岡 純（東京工業大学　小田・河野研　M1）

動物の「意識」というものは科学的にまだまだ解明が進んでいない概念ですが、そこに古典物理だけでは説明がつかないような量子的な不確かさがあれば面白いと思っています。量子脳理論はChallengingな研究分野であり、これからの発展に期待しています。

不破 麻里亜（東京大学 古澤研　M1）

私の夢は、光子間にエンタングルメントを生成する新手法を開発し、その生成の容易さと光子のデコヒーレンスのし難さを両立できるよう人工的に光の量子的性質を制御する「人工光子」を実現し、量子情報の新しい実用化の手法を発明することです。

小川 和久（京都大学　北野研　M2）

抽象的な概念が多い量子情報分野の中で、2状態系に関しては、ブロッホ球を用いれば手に取るように理解することができます。私は高次元系や多体系の量子状態についても、ブロッホ球のように「手に取るようにわかる」描像を探求したいと考えています。

高田 健太（東京大学　山本研　D1）

マイクロ波やレーザーといった散逸コヒーレント光は広く応用されていて、大抵の量子操作にも不可欠です。そこで将来は、フォノンやマグノン等、他のコヒーレント量子系の生成に携わり、特に室温超電導等の量子秩序相の発現に応用出来るか検討してみたいです。

渡邊 隆子（お茶の水女子大学　出口研　D1）

私の夢は、量子ウォークの数学的な基礎づくりです。量子ウォークは、量子コンピュータの発展に伴いここ10年余りで急成長してきた新しい分野です。また、その特異性ゆえに量子コンピュータや量子統計物理学等、他分野への応用が非常に期待されます。

石川 豊史（東京大学　中村研　PD）

50年単位の研究目標：思想（特に東洋思想）や哲学について科学的な見地からアプローチする。5年での量子情報分野における研究目標：超伝導ビットを用いたマイクロ波量子光学に関する研究および、オンチップマイクロ波光学素子の開発。

国橋 要司（NTT物性基礎科学研究所）

スピントロニクス分野の研究に携わった頃から、電子スピンを使ったデバイスを作りたいと思い続けてきました。そして今の私の夢は、電流を全く必要としない演算デバイス、スピンの自由度のみで駆動する新しい論理回路を構築することです。

作道 直幸（東京大学　上田研　PD）

冷却原子気体を用いた量子シミュレーションの成果の一つは、ユニタリー気体の熱力学関数の精密測定です。しかし、現在この測定結果を定量的に説明する理論がありません。私は、この未解決問題を解決し、ユニタリー気体の物理を明らかにしたいと考えています。

中島 秀太（京都大学　高橋研　PD）

光格子中の冷却Li-Yb混合原子気体を用いた“量子シミュレーション”により、銅酸化物高温超伝導体の物理（アンダー・ドープ領域における擬ギャップの起源etc.）と、より高い転移温度を実現する方法を明らかにし、常温超伝導実現への道筋を作りたい。

湯川 英美（国立情報学研究所　根本研　PD）

私の夢はspin squeezingの一般化による測定精度の向上です。スピン量子数が大きい場合は、スピン演算子だけでなくスピンの多重極モーメントの交換関係もspin squeezingに寄与します。これを利用しsqueezingの度合いを高めることが出来ないか、と考えています。ゆくゆくは、環境磁場の補正を行う装置“magnetobillon”（tourbillonにちなむ）を作ってみたいです。

FIRST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、研究成果を広く海外へ発信するため、2つの国際会議を開催致しました。量子シミュレーションの分野をカバーするThe 6th International Conference on Spontaneous Coherence in Excitonic Systems(主催:国立情報学研究所/スタンフォード大学 山本喜久)では、領域から小川哲生(大阪大学)、五神真(東京大学)、山本喜久(代理講演者:Na Young Kim(スタンフォード大学))の3名が招待講演を行いました。量子制御の分野をカバーするThe Principles and Applications of Control in Quantum Systems 2012(主催:東京大学 古澤明)では、領域から樽茶清悟(東京大学)、中村泰信(東京大学)、古澤明(東京大学)、山本喜久(代理講演者:宇都宮聖子(国立情報学研究所))の4名が招待講演を行いました。次の国際会議は領域全体をカバーする日米セミナー(主催:京都大学 高橋義朗)であり、2013年4月に奈良で開催される予定です。

The 6th International Conference on Spontaneous Coherence in Excitonic Systems

■日程:2012年8月27日(月)ー8月31日(金) ■会場:スタンフォード大学 ■参加者数:80名
■主催:スタンフォード大学 ■後援:最先端研究開発支援プログラム(FIRST-QIPP)
■報告者:山本 喜久(国立情報学研究所/スタンフォード大学)

The 6th International Conference on Spontaneous Coherence in Excitonic Systems(ICSCE-6)は、バルク半導体中の3次元励起子、プレーナ・マイクロキャビティー中の2次元励起子ポラリトンの量子凝縮などを議論する国際シンポジウムである。これまでのICSCEでは、励起子やポラリトンの量子凝縮実験とその周辺の物理が主な議題であったが、スタンフォード大学で開催された今回のICSCE-6会議では"光の量子流体"という新しい視点と冷却原子と励起子ポラリトンを用いた磁性及び強相関系の量子シミュレーションという新たな話題も取り上げられた。アルカリ原子のボーズ・アインシュタイン凝縮から10年ほど遅れて登場した励起子ポラリトンの凝縮体が今後どのような新しい物理を開拓していくのかを占う意味で、重要な節目の会議であった。会議で取り上げられた主なトピックスを以下に列挙する。

1. "高励起下で、キャビティ光子によるコヒーレント・ラビ振動で束縛対となる電子―ホール対がつくるポラリトンBCS状態の実験的証拠は何か"という議論が行われた。特に、この状態が反転分布を必要とする通常のレーザーや最近登場した光子のBEC状態とどう違うのかを明らかにすることが今後の重要な課題として残った。
2. ポラリトンの超流動を示唆する様々な実験データが報告された。例えば、線形な励起スペクトル、量子渦、量子渦対、音速伝搬などである。しかし決定的証拠としては、Hess-Fairbank効果(回転バケツ実験)による超流動密度の直接観測が重要であることが指摘された。
3. 2次元系に固有なBKT相転移を示唆する実験データ(量子渦対と相関関数のベキ乗減衰)が報告された。しかし、液体ヘリウム膜に確認されている熱平衡下の2次元系BKT相との差異を明らかにする実験データとはどのようなものかを明らかにすることが望まれる、との指摘があった。
4. 様々な格子構造における励起状態(p波、d波、f波)での凝縮相が報告された。そのような凝縮相のスピン特性(磁気オーダー)に参加者の興味が移行しつつある。
5. 2次元系に固有な量子統計性(アニオン)の振舞いを見るための新たなデバイス構造実験系の提案がいくつかあった。
6. 今回の会議での講演には直接現れなかったが、電流注入励起によるポラリトン凝縮、電子流とホール流の分離取り出しによる超伝導電流の観測、室温ポラリトン凝縮のデバイス応用の可能性がロビーでは盛んに議論されていた。

次回の主催者は五神 真先生(東京大学)、小川 哲生先生(大阪大学)で、2014年春に東京で開催される予定である。

The Principles and Applications of Control in Quantum Systems (PRACQSYS2012)

■日程：2012年9月10日（月）〜13日（木）　■会場：東京大学　本郷キャンパス　小柴ホール
■参加者人数：83名　■主催：PRACQSYS実行委員会　■後援：APSA、GCOE、FIRST
■報告者：古澤　明（東京大学）

21世紀になり、種々の分野で量子力学的取り扱いが必要になりつつあるのはご存じのとおりです。これもご存じのように、最も有名な例は、我々が追求している量子情報科学です。量子情報科学では、量子力学と情報科学を融合し、情報科学を量子力学的に取り扱っています。今回、我々が主催し、9月10–13日の日程で東京大学にて行った”The Principles and Applications of Control in Quantum Systems (PRACQSYS2012)”では、量子力学と制御理論を融合し、量子力学的対象のフィードバック制御を目指しています。ご存じのように、制御理論は物理系を制御するのに欠かせない学問分野ですが、これまでは古典物理系を古典力学的な操作で制御することのみを対象にしていました。それを量子系に拡張しようという試みです。この試みは1990年代にオーストラリアのMilburnとWisemanらによって始められました。この背景には、我々のリーダーである山本先生の半導体レーザーにおける光子数スクイーズの成功があったものと想像されます（ただし、これは後述するコヒーレントフィードバックの「はしり」と考えられます）。その後、2001年のKimbleらによる重力波干渉計におけるPonderomotive squeezingの提案により、光や電子だけでなくミラーのようなマクロな力学系も、量子力学的対象として考えることが広範囲で行われるようになりました。現在では、光子による膜の運動の量子力学的レベルでの制御なども行われています。

この量子制御には主に2つの「流派」が存在していると考えられます。1つは制御理論に載りやすい、測定器により物理量を測定し、その物理量を用いて量子系にフィードバック制御を行うものです。MilburnとWisemanらによって初めて提案されたのもこの種の制御です。このとき、測定による波束の収縮を積極的に使う場合もありますが、一般には、測定の反作用を避けた「上手い」物理量を測定することが多いようです。もう1つの流派は、コヒーレントフィードバックと呼ばれるもので、例えば光の量子状態を制御する場合、光のままで何らかの操作を行い、その操作後の光を元の系に戻してフィードバック制御を行うというものです。つまり、測定を介さないフィードバック制御です。測定を伴わないため測定の反作用が存在しません。コヒーレントフィードバックは2000年代の初めに柳澤らが提唱し始め、その後Mabuchiらが種々の応用を示し、研究者の数は増えてきています。

今回のPRACQSYS2012はこのシリーズの7回目で、日本では初めての開催となりました。量子フィードバック制御に関係のある分野の専門家が国内外から数多く集まりました。超伝導、量子ドット、量子光学、重力波干渉計、制御理論などの既存分野ばかりでなく、その中間にあるような、例えば重力波干渉計におけるミラー運動の量子力学的記述および制御等、それぞれの分野ではマイナーなことも、この会議では主要テーマとして議論されました。また、この会議の特徴は、発表30分、質疑応答15分と質疑応答に時間を掛けることですが、これは参加者のバックグラウンドが非常に多岐に亘るため、通常の国際会議のように質問時間が短いと講演の内容を理解するのが難しくなるからです。この配慮は参加者には好評で、参加者全員に大きな収穫があったと自負しております。このように、今回のPRACQSYS2012は成功裏のうちに幕を下ろしました。関係された方々にはこの場を借りてお礼を申し上げると共に、FIRSTからの支援にもお礼を申し上げます。

東京大学:土浦第一高等学校研究室訪問

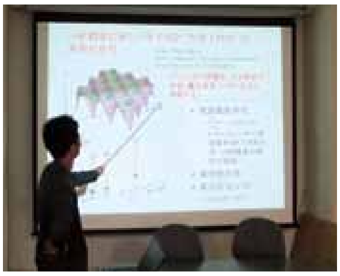
■実施日 2012年8月3日（金） **■対象** 土浦第一高等学校第二学年生徒・13名（引率の先生1名含む）
■講義名「レーザー冷却と光格子時計」 **■担当者** 高野 哲至（東京大学）

サブテーマリーダーの香取先生のご出身高校でもある茨城県立土浦第一高等学校から、高校2年生と引率の先生計13人の方が見学にいらっしゃいました。初めにスライドで私たちの研究を簡単に説明し、その後実験室を見学してもらいました。熱心な皆さんで非常に活発に質問をしていただき、当初は1時間の見学の予定でしたが、終わったのは、すでに2時間近い時間を経ていました。

前半のスライドでは、レーザー冷却を中心とした研究背景と実際に研究している光格子時計を紹介しました。まだ文系理系にも分かれる前の学生さんが対象だったので、ドップラー効果や原子軌道などといった高校物理の内容から始めて、出来る限り分かりやすい説明を心がけました。その後、日時計、クオーツ時計、原子時計と順番に説明し、どんな時計が求められていて、時計の発展で人間の生活がどう向上してきたのかを説明しました。

後半の実験室見学では、光格子時計の装置を見てもらいました。光学機器、冷却装置の役割から、素朴な疑問や（この装置いくらくらいですか? 作るのにどのくらいかかるのですか? など）、質問が相次ぎ、かなり興味を持ってもらえたのではないかと感じました。また、研究をする上での心がまえや研究室の生活などについても質問され、高校生の将来に対する情熱に、私自身もいい刺激を受けた一日でした。

一ヶ月後、参加した生徒の皆さんから、お礼状をいただきました。「レーザー冷却についての説明が分かりやすくてよかった」という内容がほとんどで、準備した甲斐があったと嬉しく思いました。時計研究の意義は少し難しかったようですが、それでも一部の方からは理解できたという意見もいただきました。また、多くの方々から「自分もこういう研究がしたい」「物理工学に進みたい」「高校での学習の基礎が、研究での知識に関連していると聞いて、日々の学習に対する意欲が強くなった」という言葉もあり、将来ある高校生に研究の一端を見せられてよかったのではないかと思っています。



長野県屋代高等学校・附属中学校での出張授業

■実施日 2012年7月20日（金） **■対象** 長野県屋代高等学校2年生38名及び附属中学校1年生78名
■授業名（高校）「秘密は“量子”で守る：量子計算と量子暗号通信」／（中学）「“量子”の世界を覗いてみよう」 **■担当者** 向井 哲哉（NTT物性科学基礎研究所）

梅雨が明け真夏の太陽が眩しい7月下旬、長野県屋代高等学校にて出張授業を行いました。屋代高校でのアウトリーチ活動は、工位先生（2010年）、山本先生・宇都宮先生（2011年）らの出張授業が好評を博したことから、今年も同校より授業の依頼を頂きました。今回は特に、4月に併設された附属中学1年生向けの「わかりやすい授業」と、高校理数科2年生向けの「昨年同様の授業」という要望を受け、少なからぬ不安と精神的重圧を感じつつ授業を引き受けることになりました。

まず、中学生向けの授業は、光の波動性・粒子性について1時間の授業を行いました。干渉・偏光を使った実験は、FIRSTのアウトリーチ活動としてお馴染みですが、はじめて話を聞く中学生からは、驚きに満ちた真剣な眼差しを集めることが出来ました。干渉計を通過した一粒一粒の光子が積算されると、次第に縞に見えてくる実験は、常識を覆す十分な説得力を持って生徒の心に焼き付いてくれたのでしょうか。授業の後に、生徒達が講師を囲んで握手攻めにする光景を、屋代高校の清水教諭は初めて目にされたそうです。

高校生向けの授業は、現代暗号・量子計算・量子暗号の流れで2時間の授業を行いました。現代暗号はRSA暗号の計算を小さな数で実演し、暗号化の容易さと解読の困難さを実感してもらいました。次に、その困難な問題を解く量子計算の重ね合わせ状態について直感的な説明を行い、最後に量子計算機でも解けない量子暗号について、偏光を使ったBB84プロトコルを実演しながら解説しました。後日受け取ったアンケートによると、余談で話した些細な事まで生徒の知的好奇心を刺激して、想像以上に授業を楽しんでもらえていたことがわかり、ほっと胸を撫で下ろした次第です。

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、小中学校をはじめ高等学校を対象とした、
量子力学・量子情報の出張授業を年間10校程度実施しています。

FIRST量子情報での研究活動の様子を、理工学系進学を目指す高校生に紹介しました

理工学系進学を目指す高校生のための進学セミナー「未来を切り拓く理工学のチカラ」

■日程 2012年9月23日(日) **■会場** 秋葉原UDX　ギャラリーネクスト
■対称 朝日新聞読者の高校生とその親を中心に約190名　**■主催** 朝日新聞社広告局　**■担当者** 宇都宮 聖子(国立情報学研究所)他

理工学系大学進学への人気の高まりを受け、理工学分野での学びが、日本のこれからの技術を支え、未来を創っていくチカラになる可能性を秘めている事を感じてもらい、高校生が将来の進路について、より前向きに考えてもらうきっかけになればと思い、同セミナーを立ち上げました。

第1部では、国立科学博物館の鈴木一義さんにご登壇いただきました。「モノづくりDNA～革新を生み未来を創る日本のチカラ～」と題して、古くから受けつがれてきた日本のモノづくりの技術の素晴らしさと、これからの担う若い世代に向けてのメッセージを伝えていただきました。

第2部の「理工学系OB・OGの仕事紹介」では、4人の先輩方に、現在の仕事紹介ややりがい等についてプレゼンテーションしていただきました。量子情報国際研究センターの宇都宮聖子さんにもご登壇いただき、スーパーコンピューターを越える情報処理の仕組みや、研究の苦労と面白さ、研究者同士の世界をまたぐ交流の話などをお話いただきました。

当日は土砂降りの天候にもかかわらず、200名近い来場者で会場は満席となり、4時間以上にも及ぶイベントでしたが、みなさん熱心に耳を傾けていらっしゃいました。参加者からは、「理工学あっての日本だと改めて感じた」、「思っていたよりも幅広い職業があり、社会に貢献できると思った」という声や、「大変そうだが、面白そうなので、チャレンジしたくなった」という声をいただき、理工学分野の魅力の一端を伝えられたのではないかと感じています。次回開催を待望する声もあり、今後もこうしたイベントを続けていきたいと考えています。

［朝日新聞社広告局広告第4部(学校・教育担当)金城 隆祐］

コラム　SSH天王寺高等学校 先輩による出張授業 ― 研究へのいざない ―

大阪府立天王寺高等学校　教頭　山口 智子

国立情報学研究所より出張授業をしていただき今年で3年目になる。応募書類を見てすぐ申込んだところ、本校卒業生(天高54期理数科)の中田芳史氏(東京大学大学院生)が講師として来て下さることとなり、本当に嬉しく、心強かったのを覚えている。本校は平成5年より理数科を設置し、また平成16年度より文部科学省からSSH校に指定され、本年度5年間の再々指定を受けて、更なる理数教育の充実・発展に向けて工夫努力の日々である。その一環として平日の放課後に様々な分野で活躍されている方からご講演を聞く企画を『天高アカデメイア』と称して行っている。「量子力学」ということもあり、最初の年は、2年間物理を学習している理数科2年生に講演参加を呼び掛けた。しかしご講演を聞き、もっと幅広く、いやむしろ低学年生徒にこそ聞いてもらったら良かったと実感した。不思議に満ちた原子や分子が主役の「小さな世界」。私たちの直感がまったく通用しないお化けのような不思議の世界に、生徒たちの好奇心が揺さぶられ、魂が吸い寄せられていく。難解な数式を使うことなく、班別で、レーザーポインタと遮光板を用いた二重スリットの干渉実験やクイズ形式での生徒参加型など仕掛け満載で、生徒からの質問も矢継ぎ早に飛びかい、講演の終了予定時間をはるかにオーバーした。講演後も多くの生徒が中田先輩を取り囲み、時間を忘れて質問を浴びせかけていた。生徒たちにとり、また一つ興味深い世界が広がったひと時だった。中田先輩の何とも楽しそうに「研究の醍醐味！」について語るその姿は、高校生に研究の面白さ・素晴らしさを教えてくれて下さる。今年の講演でも「“自由な発想を持つこと”と“失敗を恐れない勇気を持つこと”が君たちの人生を切り開く！」と熱いエールを送って下さった。「中田先生の講義を受けて、私の物理に対する考えが大きく変えられました。」「“Creative Error”という言葉から間違いを恐れない勇気を持つことの大切さを学びました。」と語る生徒たちから、次の研究者の卵が生まれることを心待ちにしている。本当に有難うございました。

サイエンスアウトリーチ活動一覧(平成24年度夏期)

FIRST 量子情報処理プロジェクトでは、高等学校や中学校などでの出張授業をはじめ、
公開講座やシンポジウムなど、さまざまなサイエンスアウトリーチ活動を行っています。

出張授業

実施日	授業名	実施場所	対象・参加人数	担当者
2012年7月 6日(金)	「物理ってこんなことも分かるの!?—物理が見たこの世界—」	大阪府立天王寺高等学校	高校1年生　79名	中田 芳史(東京大学)
2012年7月18日(水)	「光のふしぎと量子コンピュータ」	大阪府立三国丘高等学校	高校1・2年生 77名	竹内 繁樹、小野 貴史(北海道大学)
2012月9月29日(土)	「量子物理学入門」	学校法人麻布高等学校	高校1・2年生 19名	森本 和浩、高倉 樹(東京大学)

公開講座

開催日	講座名	実施場所	対象・参加人数	報告者
2012年6月14日(木)	山梨県立吉田高等学校　理化学研究所見学会	理化学研究所	10名	高本 将男(理化学研究所)
2012年7月7日(土)	軽井沢土曜懇話会「量子情報技術が開く未来社会」	軽井沢国際高等セミナーハウス	一般市民9名	山本 喜久(国立情報学研究所／スタンフォード大学)
2012年7月28日(土)	高校生のための研究公開講座「電子1個をあやつる」	東京工業大学	高校生約10名	藤澤 利正(東京工業大学)
2012年8月22日(水)－24日(金)	「モノづくり教室」「光のふしぎ」	大阪大学産業科学研究所	小学4年生〜中学3年生約50名	竹内研究室(大阪大学／北海道大学)
2012年8月27日(月)	夏休み研究室体験「LEDの色を見てみる、宇宙の温度を測ってみる」	学習院大学	中学生9名	平野 琢也，衞藤 雄二郎，関根 佐和子，戸川 翔太(学習院大学)
2012年9月4日(火)	理科体験　主に小学5年生を対象とした理科体験、液体窒素を使った実験等	学習院大学	小学生約70名	平野 琢也，衞藤 雄二郎，小塩 あかね他(学習院大学)

学術シンポジウム

開催期間	シンポジウム名	会　場	参加人数	報告者
2012年5月6日(日)－11日(金)	Quantum Engineering and Architectures (CLEO:2012 Laser Science to Photonic Applications)	San Jose Convention Center, San Jose, CA	150名	齊藤 志郎(NTT物性科学基礎研究所)、根本香絵(国立情報学研究所)
2012年8月6日(月)	DYCE公開フォーラム—光科学の新しい可能性に挑戦する—(文部科学省科学研究費補助金・新学術領域研究「動的相関光科学」総括班)	東京大学小柴ホール	52名	五神　真(東京大学)、小川 哲生(大阪大学)
2012年8月7日(火)－11日(土)	The DYCE International Workshop(文部科学省科学研究費補助金・新学術領域研究「動的相関光科学」総括班)	屈斜路プリンスホテル	48名	五神　真(東京大学)、小川 哲生(大阪大学)
2012年9月5日(水)－7日(金)	第2回 半導体量子効果と量子情報の夏期研修会	ホテルサンバレー那須	150名	樽茶 清悟(東京大学)

独立行政法人　情報通信研究機構　未来ICT研究所　量子ICT研究室

量子が拓く未来のネットワークに向かって

大学でもない企業でもない公的機関として量子情報通信の研究開発に取り組んでいます。人員は常勤職員５名、博士研究員２名、研修生4名、技術員３名、支援スタッフ３名からなります（写真a）。自ら研究を進める他、ファンディングも行っています。現在、「セキュアフォトニックネットワーク技術」と「量子もつれ中継技術」の２つの委託研究課題があり、全部で21の研究チームにご参加頂いています。

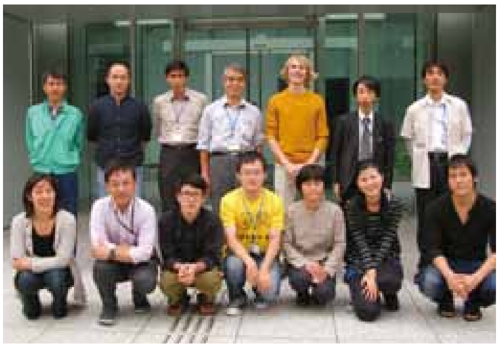
写真bが我々のいる３号館です。実験室は地下１階にあり居室は最上階にあります。居室からは武蔵野の雑木林が見下ろせて、晴れた夕暮にはきれいな富士山のシルエットを楽しめます。

地下実験室では、将来の通信や計測に必須となる量子受信機の研究を行っています。量子受信機は、数学的には信号の重ね合わせ状態への射影として書かれますが、物理的には受信信号への量子情報処理とそれに続く光子検出過程として実現されます。光の離散性と連続性を同時に制御するのが鍵です。そのために光波の重ね合わせ状態を用意して受信信号と干渉させながら光子数を識別して適切なフィードフォワード操作を施します。図cは光波の重ね合わせ状態“光波量子ビット”のブロッホ球表現です。現在は、超伝導光子数識別器を組み込む作業を進めています。回路は小規模でも着実に受信性能を向上できるので、実用的にも重要な方向だと思っています。また、量子情報処理を用いた新しい計測標準技術として、NICT内の時空標準研究室と連携しながらCa, Inイオンを用いた量子論理分光技術の開発にも取り組んでいます。

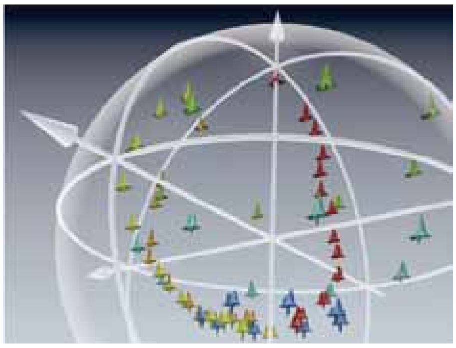
地下の実験室はJapan Gigabit Network-Extremeと呼ばれる光テストベッドと接続されており、その中のダークファイバで量子暗号ネットワーク“Tokyo QKD Network”が構築されています。現在、NECやNTTの最新鋭装置が接続され、長期信頼性試験や次世代技術の実証が進められています（写真d）。今後、東芝や三菱電機、学習院大学の装置も順次接続されます。また、NICT内のセキュリティ基盤研究室、ナノICT研究室、宇宙通信システム研究室と連携しながら、Tokyo QKD Networkの基本設計や新しいアプリケーションの創出、次世代光子検出器の開発も進めています。

国内外のトップ研究者が頻繁に出入りしており、さりげないおしゃべりからネットワークに革新をもたらしそうなアイデアが日々生まれています。研修生の方々も大歓迎ですので気軽にお問い合わせください。

（佐々木 雅英）



写真a　研究室のメンバー



図c　光波量子ビットのブロッホ球表現
（とんがり帽子型の分布関数はウィグナー関数）

写真b　３号館（最上階の研究室オフィスと地下実験室）

写真d　Tokyo QKD Networkの心臓部、小金井ノード

大阪大学 小川研究室

広い視野から新しい光を

私たちの研究室は、大阪府北摂地方の豊中市にキャンパスをもつ大阪大学大学院理学研究科物理学専攻にあり、小川哲生教授、浅野建一准教授、大橋琢磨助教のもと、博士研究員５名、大学院生５名、学部生３名の全16名それぞれが、物理の学問の前では対等な（むしろ下剋上の）関係で日々研究に励んでいます。研究の主な対象は、量子多体系の励起状態、特に半導体電子正孔系の物性理論で、現在では以下のようなテーマに取り組んでいます：

・励起子Mott転移・クロスオーバー理論
・光と物質の超強結合理論
・非平衡統計力学における総和則理論
・半導体レーザー・励起子ポラリトン凝縮のクロスオーバー理論
・超放射・超蛍光・増幅自然放出理論

これらをみると、まさに量子多体系の物性の核心に迫る問題から、量子光学や非平衡統計力学の基本的問題に至るまで、たいへん幅広いことが分かります。これらの研究は独立に進められているのではなく、活発な議論を毎日のように行いながら、全体として研究が前進しています。これらのテーマは緩く相関しあっているため、研究室内の異なるテーマに取り組んでいる人との議論によっても重要なことにしばしば気付きます。

このような幅広い研究が行える背景には、理論の研究室であることも一因として挙げられますが、やはり「自由」と「自主」を重んじる風通しの良い雰囲気が関係していると思います。その最たる例は、当研究室のホームページ（http://blackdog.phys.sci.osaka-u.ac.jp/~ogawa/cover.html）に現れています。このホームページでは、分かりやすそうな目を惹く図面などは一切なく、小川哲生教授が研究室の理念や運営方針などについて、ただひたすら切々と説いており、研究の基礎となる必須理論や心構えなどについてまとめています。主に大学院生向けに書かれているとはいえ、院生や研究員に期待する自由で熱い提言は、当研究室の雰囲気をつくる一端を担っていると思います。私自身（山口）は、2011年度よりFIRST研究員として小川研究室に配属されていますが、最終的に当研究室へ来る決心の決め手になったのは、このホームページをみて研究に邁進し切磋琢磨できる環境だと直感したことです。同様の動機で、年々、当研究室に所属して研究を行いたいという研究員や大学院生が増えているように思います（ご興味のある方は、ぜひホームページを覗いてみてください。遠慮なく見学にも来てください）。

このように研究を行う上では申し分ない環境のもと、FIRSTプログラムに関連する研究成果も上がりつつあります。最近では、半導体レーザーと励起子ポラリトン凝縮のクロスオーバー理論［New J.Phys. 14, 065001 (2012)］を報告しました［量子ニュースNo.9；最近の研究成果］。この理論は、定常状態において熱平衡・非平衡領域の両者を扱えるという特長をもつため、励起子ポラリトン凝縮（熱平衡現象）と半導体レーザー（非平衡現象）のつながりを調べることができます。その結果、低温においては従来とは異なるレーザーの発振原理が存在することを発見しました。このような新たな光発生方法を開拓することは、将来の量子情報においても役立っていくものと期待しています。ただし、この理論はまだ未完成であり、今後、光学応答や安定性だけでなく、超放射・超蛍光などとの関連にも精力的に取り組んでいきたいと研究室一同が考えています。共同研究や研究討論は大歓迎ですので、実験にたずさわっている方も、遠慮なくご連絡ください。

（山口 真）


小川 哲生教授


ゼミの風景（右端が筆者）

AQUA: Advancing Quantum Architecture（慶應義塾大学バンミーター研究室）

量子計算の実験の結果を利用し、大規模のシステムを多面的にデザイン

バンミーター研究室は、半導体より未来の先端計算機の技術を開発しています。その中で、現在焦点を当てているのは量子計算機のアーキテクチャなので、「Advancing Quantum Architecture」を略した「AQUA」をグループ名としています。小規模の量子コンピューターは実現していますが、大規模システムは小規模システムを単純に拡大したものではないので、古典的な大規模システムの概念を応用して再利用することが主な研究手法です。

当グループでは現在准教授が１名、博士学生１名、修士学生１名、学部生５名、元特任講師１名が在籍しており、過去に４名が卒業論文を執筆しました。また、過去に２名が修士論文を執筆し、うち一本は東京大学江崎研究室との共同研究でした。海外からのビジターが多く、Duke University, Stanford University, National Taiwan University, Ecole Polytechniqueとの共同研究も行なっています。

私たちの使命は、益する量子情報技術の展開を加速するために、理論的な量子アルゴリズムと実世界の実験の間のギャップを埋めることです。これを実現するために、私たちは分散量子計算システムを研究しています。

研究はいくつかの分野にわけられます。

(1) Stanford大学と共同に光学的に制御されているスピンを用いる量子ドット等デバイスをデザインしています。

(2) 技術に依存しないアーキテクチャの概念を開発しています。階層化アーキテクチャ、量子マルチコンピューター（分散型メモリのマルチプロセッサー）のシステム概念や、効率的な量子ソフトウエアをコンパイルするための概念。例えば、変数の効率的な移動をプラニングするために、グラフの埋め込みの使用する方法を開発しました。アルゴリズムと量子エラー訂正の回路の変換（リライト）が同じ演算を行なうかを確認するために、quantum picturalismを開発しました。量子ゲートは理論的に連続ですが、量子エラー訂正の上で実行可能なゲート は限られています。Solovay- Kitaev（S-K）の理論は離散的なゲートを使用して、近似ゲートを構造します。問題はS-Kの計算量が大きいことです。Geometric Near-neighbor Access Tree（GNAT）を使用して、計算量を減らして、精度が高い解決をできるようにしました。

(3) 以上の理論を実現するために、色々なソフトウェアツールを開発しています。

(4) 古典的なコンピューターをデザインするときには、まずどのように使われるかを調べます。我々は新しいアルゴリズムを開発しているのではなく、既存のアルゴリズムを実行するために、どんな計算資源が必要か探索しています。これは機械の「ワークロード」と呼ばれます。

(5) 一つの量子装置の能力は限られるので、量子ネットワークを開発しなければなりません。我々はネットワークのアーキテクチャ、通信プロトコル、ピュリフィケーションの手法を開発しています。

この分野の下に、量子エラー訂正があります。量子コンピューターを実現するために、一番重要な分野と言えます。我々は二つの重要な研究のテー マで探索し ています。実現可能性が大きな量子エラー訂正の方法としてsurface codeを拡張しています。一つ目は「lattice surgery」として、実現するための必要な資源を減らし、数十個のqubitでエラー訂正上の論理的なCNOTゲートを実行できるようにしました。デバイスを造ることは完璧じゃないので、欠陥があるデバイス を利用できるようになるために、surface codeを改善しています。

これらの広い分野での研究により、実用的な量子コンピューターを開発します。

（Rodney Van Meter、永山 翔太）

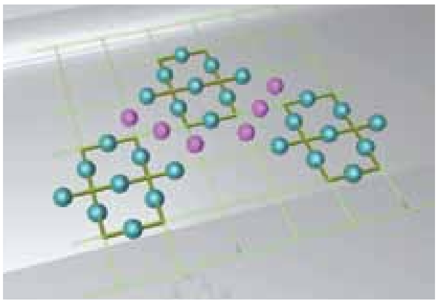


図1 lattice surgeryの制御NOT

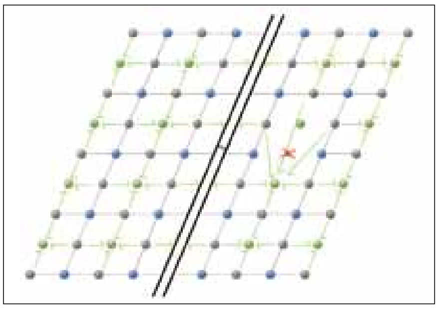


図2 surface codeの完璧格子（左）と欠陥格子（右）

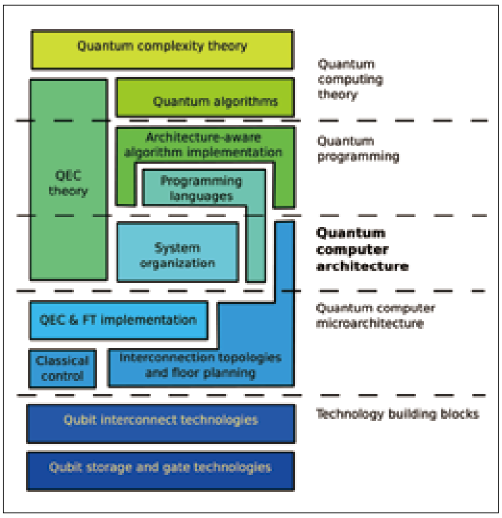


図3 量子計算機アーキテクチャのサブフィールド

エッセイ

Essay

物理／数学と化学における直感—個人的経験から

科学技術における直感の重要性というべきか、直感の不可欠性については、科学技術が、広義であるか狭義であるかを問わず、ヒトの知的活動・労働の所産である限り、これを否定する研究者・技術者は多分いないと思われる。演繹的な思考で研究していると主張する研究者も、研究や思考のどこかの過程で必ず直感が入り込んでいるはずである。むしろ、直観で仮説を導入して、そのあとは「科学的に」厳密に理論を展開する研究者も多い。天才的と言われる研究者にはこのタイプが多い。直感の下敷きは実は帰納的思考である。

話は少し飛ぶが、数学者の中でも整数論の数学者には、演繹法ではなく帰納法を得意とする研究者がもっぱら多い、さらに言うならば帰納法が正攻法的な考え方だと言う話を、高名な高木先生が書いた書物のなかで読んだ時、素人なりに学問の性質のようなものを考えて何となく腑に落ちた。ガウスはその典型だったようだ。彼が残した遺稿のかなりのものが今なお解けない理由も実はここにあるらしい。2012年のノーベル物理学賞は、米国のD. WinelandとフランスのS. Harocheの業績が「量子コンピュータへの一歩」として評価され受賞するというニュースを、10月9日の早朝に海外で聞いて「やはり」と思う一方、ノーベル財団の受賞理由を良く読む前に、即座にNII／スタンフォード大の山本喜久先生がなぜ漏れたのかと思い、二人の受賞を心底うれしく思うと同時に、素朴に少し複雑な気持ちになった。同行していた同僚の佐藤和信君（大阪市大・院・理・教授）が、NISTのonline解説記事を早速探してくれたので、ノーベル財団発表の受賞理由とともに読んで納得した。量子情報処理／量子コンピュータに関する研究・その計り知れない潜在力をエンジンに喩えるなら、エンジンを点火させたのはP. Shorその人だったと言う言い方は、一面的でかつ少し皮相すぎるかもしれないが、practicalな量子コンピュータの開拓の課題では同賞の栄誉に与る科学者がまた別の機会に巡り合うのだと思った。ここでP. Shorを持ち出したのは、例の巨大な素数の積から出来上がった整数の素因数分解が実際的な有限時間内に解くことが出来るのは量子コンピュータの技術であることを、P. Shorが初めて数学的に示したことに関連している。P. Shorがとった攻略法は、高木先生がいみじくも指摘した方法論のようだ。帰納法的思考と直感は、実はヒトの思考の内部で深く関連している。脳科学・神経美学／心理学においてfunctional-MRIを駆使され始めて日は浅いが、思考と直感が物質対象を研究するかのように研究される日も近い。

阪大の大学院学生だった頃、東大から豊沢豊教授が丸2日間の集中講義に来られ、100人は収容できる部屋が受講者であふれる中で、豊沢先生が黒板の端から端まで使ってちょっとした素励起の理論計算を見せてくれた時、「むしろ直感では最後の結果はかくあるべき」と言って結果をその場で修正されたのには驚いた。無論、いわゆる直感が何時でも正しいわけではない。科学の世界でも、従来の理論に固執する、専門家の直感が新しい発見を退けることも意外と多い。d電子のみが（強）磁性発現の起源であると書いたHeisenbergが正しいならば、p（π）電子が強磁性の起源である「有機強磁性体」が門外漢の化学者のトポロジー的な対称性の考察から生まれるはずがないわけである。物性物理の世界で初めて提唱されたと言われる、「flat band」も化学者は1970年以前にhydocarbon-based ferromagnetismの定式化の中で発見していたが、ずっと看過されてきたことは記憶に新しい。逆に、計算機の発達のおかげで、日々化学者になくてはならない分子軌道法的アプローチの爆発的な普及のために、原子価結合理論的磁性理論の本質を化学者が見失ってきた経緯もある。独り歩きを始めた直感は、偏見と隣合わせである。

工位 武治（大阪市立大学大学院理学研究科）

No.10 December 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 大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立情報学研究所 http://www.nii.ac.jp/

発行：大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立情報学研究所 量子情報国際研究センター http://www.first-quantum.net/
〒101-8430 東京都千代田区一ツ橋2丁目1番2号 学術総合センター
本誌についてのお問い合わせ：
量子情報国際研究センター TEL:03-4212-2506 FAX:03-4212-2641 e-mail:first_jimu@nii.ac.jp

R100 古紙配合率100%再生紙を使用しています