

量子ニュース

CONTENTS

量子科学最前線

物性、丈夫な量子系の時代
高温超伝導30年、永長直人さんに聞く



● 最近の研究成果

量子暗号システム (日本電気株式会社)



● アドバイザーからのコメント

- 甘利俊一 (理化学研究所)
- 江村克己 (日本電気株式会社)
- 川上則雄 (京都大学)
- 斉藤史郎 (株式会社東芝)

● シンポジウム等報告

- ImPACT 未来開拓研究会 2015
- UQCC2015, Qcrypt2015
- US-Japan Workshop on New-Generation Computers:
Quantum Annealing and Coherent Computing



プログラム事務局からのお知らせ

AWARD

- 第19回超伝導科学技術賞、青木秀夫(東京大学)、2015年4月17日
- 2015年度計測自動制御学会 論文賞、井上正樹(慶應義塾大学)、合原一幸(東京大学)他、2015年10月27日
- 文芸春秋2016年2月号(2016年1月8日発売)特集「日本を元気にする逸材125人」の一人に選出、西森秀稔(東京工業大学)

INFORMATION

- 内閣府ImPACTのプログラムを広く国民の皆様にご覧いただく為に、年に2回ニュースレター「量子ニュース」を発行しております。今後ともご理解とご支援をいただけますようお願いいたします。
- ホームページも開設いたしました。あわせてご覧いただけますと幸いです。
http://www.jst.go.jp/impact/hp_yamamoto/index.html
- 平成27年度は全国7校にて出張授業を行いました。次年度も科学や研究・技術に対する学生の皆さんのご興味・ご関心を高めるための一助となれるよう継続して活動していきます。
 - 長野県立屋代高等学校(H27.7.13) 高校2年生39名
 - 青森県立八戸高等学校(H27.8.25) 高校1~3年生28名
 - 大阪府立天王寺高等学校(H27.9.15) 高校1年生85名
 - 東京都立戸山高等学校(H27.10.24) 高校1、2年生16名
 - 青森県立三本木高等学校・附属中学校(H27.11.18) 中学3年生80名
 - 青山学院高等学校・附属中学校(H28.2.25) 中学3年生約25名
 - 名古屋市立向陽高等学校(H28.3.16) 高校1、2年生約30名

サイエンス アウトリーチ

東京都立戸山高等学校での出張授業

■実施日 2015年10月24日(土) ■対象・参加者人数 高校1、2年生 16名
■授業名「量子の世界ようこそ」 ■担当者 福原 武(理化学研究所)

10月24日の土曜日に都立戸山高校において出張授業を行いました。戸山高校は山本PMの出身校であり、興味を持ってくれる生徒も結構いるという話を伺っていたため、楽しみにしながら赴きました。

この出張授業は、1、2年生の中から物理に興味ある生徒のみを対象としたものでした。参加者のうち高校1年生は、まだ物理学を履修する前という情報を受けていたため、まずは物理がどのようなものであるのかということから始めることにしました。生徒の皆さんに、身の回りの物理に関すると思われるものは何かなどの質問を投げかけてみました。これに多くの生徒が積極的に答えてくれ、参加生徒のやる気を感じました。それぞれの意見に対してどのような物理が対応しているか、その物理はどういうものであるかをコメントすることで、身の回りにいろいろな物理が潜んでいることを伝えていこうと努力しました。この工夫のかいがあり、アンケートには「生徒からの意見についても詳しく教えてもらっておもしろく勉強になった」「初めから量子の話でなく様々な導入があったのでわりとスムーズに頭に入ってきた」などのコメントがありました。その後も、こちらの問いかけには積極

的に答え、また話の間にも頻繁に質問をしてくれて、熱心なのが伝わり、話す側としてもとても楽しめる授業となりました。

話は、物理一般から、光とは何かに移り、そして量子とは何かということにつなげました。そして、自身の研究の紹介をし、最後にImPACT全体で取り組んでいる研究について話しました。アンケートでは、「数式をほとんど使わずイメージで伝えていたのがよかった」というコメントがありましたが、「最後の量子の部分はもう少しわかりやすいとよかった」「分野上仕方ないと思いますが、世界が小さすぎてよくわからないところがあった」という指摘もいただき、見えないものを「見える」ように工夫をすることが課題として残りました。

量子・物理の話以外にも、研究者になる動機や、海外での研究生生活の実体験など、研究者がどのようなものであるかといった話もしました。アンケート結果を見ると、研究者としての楽しさや研究の喜びを伝えることができたように思います。

出張授業ではありましたが、私としても一物理屋として物理について楽しく話せる良い機会となりました。

量子暗号システムの実用化に向けた評価実験をサイバーセキュリティ・ファクトリーで開始

論文情報 NECプレスリリース、「NEC、量子暗号システムの実用化に向けた評価実験をサイバーセキュリティ・ファクトリーで開始」、2015年9月28日

関連URL http://jpn.nec.com/press/201509/20150928_03.html

日本電気株式会社
中村 祐一

NECは量子鍵配送装置の評価実験を、サイバーセキュリティ対策の要となる施設「サイバーセキュリティ・ファクトリー（注1）」において開始した。サイバー脅威情報等を暗号化して通信するために必要な暗号鍵の供給を、量子鍵配送により安全に行う。

量子鍵配送技術は、量子力学に基づき光子を使って拠点間で暗号鍵を共有するための仕組みであり、理論上安全とされている。NECはこれまでNICTと共同で、量子鍵配送装置の長期運用試験をNICT内の実験室環境で進めてきた。しかし、装置が具体的に理論通りの安全性を実装できているかの評価は、評価手法の検討を含め着手できていなかった。

今回の評価実験では、同一フロアの異なる部屋間での鍵供給実験を行い、安全性評価および安全性評価手法の確立を推進する。装置が理論通り実現できているかの検証に加えて、利用者に近い環境での長期評価を行い、量子鍵配送技術の実用化に必要な課題抽出と解決を目指す。

さらに、現在実際に利用されている暗号と量子鍵配送の統合による高速かつ高度に安全な暗号技術として、量子鍵配送装置からの暗号鍵をたね鍵として使用する高速回線暗号装置の評価も実施する。高速回線暗号装置には、NEC製のCOMCIPHERを改造して使用する。この実験により、量子暗号技術と現代の暗号技術の親和性を高め、利用者が必要とするセキュリティレベルに合わせた装置

提供を可能とし、利用者の拡大に寄与することが期待できる。

今後はこの評価をもとに、ImPACT「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」プロジェクトにより利便性・安全性の高い量子暗号システムの開発を進める。

本成果の一部はNICT委託研究「セキュアフォニックネットワーク技術の研究開発」の一環として進めてきたものである。

（注1）2014年6月16日発表。「NEC、「サイバーセキュリティ・ファクトリー」が本格稼働」http://jpn.nec.com/press/201406/20140616_01.html



サイバーセキュリティ・ファクトリーに設置された量子鍵配送装置（左：送信機、右：受信機）

超伝導量子パラメトリック発振器のダイナミクス

論文情報 Z. R. Lin, Y. Nakamura, and M. I. Dykman, "Critical fluctuations and the rates of interstate switching near the excitation threshold of a quantum parametric oscillator", *Physical Review E* 92(2), 022105-1-8 (2015).

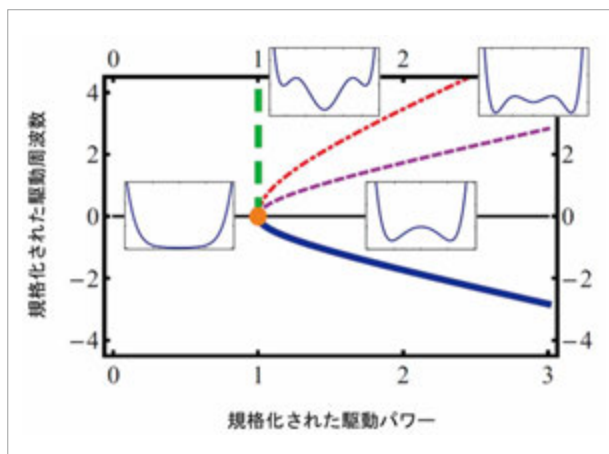
関連URL <http://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.92.022105>

理化学研究所創発物性科学研究センター
中村 泰信

超伝導回路を用いた量子情報処理技術で一番の鍵となる要素がジョセフソン接合である。超伝導電極間のトンネル接合であるジョセフソン接合は、クーバー対のトンネリングを可能にし、抵抗のない非線形インダクタとして働く。この非線形性は、超伝導量子ビットの実現を可能にすると同時に、他の非線形回路でも重要な役割を果たす。マイクロ波帯域におけるパラメトリック増幅回路はその一例であり、最近では、量子雑音限界を打ち破る位相敏感増幅やスクイズド状態の生成に幅広く利用されている。

一方、同じ回路をより大きなパワーで駆動すると、自発的な発振が起き、パラメトリック増幅領域からパラメトリック発振領域への転移が観測される。この動作は、かつてパラメトロンとして初期のコンピューターに用いられた非線形フェライト素子回路や、現在ImPACTプロジェクトで研究が進められている非線形光学素子を用いた光パラメトリック発振器と同様の物理的モデルによって記述される。このような系のダイナミクスを明らかにすることは、パラメトリック発振を利用して最適化問題を扱う装置の理解を深めるのに役立つとともに、①非平衡状態下で、②非線形すなわち光子間の相互作用が強く働く系で、③マイクロ波導波路と結合し光子の有限の損失を伴う開放系の、相転移における量子揺らぎの役割を明らかにすることにもつながると期待される。

本研究では、基本共振周波数の2倍付近の周波数を持つマイクロ波で駆動されたジョセフソン接合非線形共振回路の非平衡定常状態が、駆動周波数やパワーの値によって異なる状態（相）を取る条件を明らかにし（図参照）、その相転移境界における揺らぎの振る舞い、異なる散逸環境の影響などを理論的に調べた（文献参照）。並行して実験も進めている。



3 OPO-Based Ising Machines; Progress and Outlook OPOに基づくイジングマシン: 発展と展望

Stanford University Alireza Marandi (アリレザ マランディ)

翻訳者: 玉手 修平 (国立情報学研究所)

Research on OPO-based Ising machines has been actively making progress since its conception in 2013 both on the theory and experiments, and yet there are several unknowns. The very first theoretical and numerical studies were based on a semi-classical model of OPOs, which resulted in promising predictions of the operation of the machine. Later on, we discovered that by using a more advanced model, one can expect possibility of quantum entanglement in the OPO network. Such nonlocal interactions between the OPOs are very interesting and leave an open question of whether they can lead to any benefit for computation or not. More recently, we have been exploring the importance of higher-order modes in operation of the OPOs. These higher-order spectral/temporal modes exist in the experiment and add an interesting level of complexity to the behavior of the OPO-based Ising machines both on the quantum and classical sides, and can potentially affect the computation.

On the experiment side, we have realized free-space OPO networks of size $N=4$ and $N=16$ resulting in 100% success rate for two instances of NP-hard MAX-CUT problems. Our recent efforts have been focused on realization of guided-wave OPOs that can enable implementation of $N>10,000$. At Stanford, we have achieved stable operation of an $N=160$ -OPO system, and recently at NTT a similar design is used to achieve $N>1000$. Currently, our experimental focus at Stanford has been realization of a measurement-feedback-based Ising machine of $N>100$. Most parts of the experiment are set up and we should be able to perform initial tests in the near future. These experiments will pave the way to achieve large-scale OPO-based Ising machines.

(訳)

OPOに基づくイジングマシンの研究は、2013年にその概念の提案がなされ、未だいくつかの未知の側面は残されているものの、理論・実験の両面において活発に研究が行われ、順調に進展してきている。OPOイジングマシンの最初の理論および数値計算による研究はOPOの半古典モデルに基づいた解析であり、この解析によりイジングマシンの計算機としての有望性が示された。その後、我々はより精緻なモデルを用いることで、OPOネットワークの内部に量子エンタングルメントが存在する可能性を見出した。このようなOPO間の非局所的な相互作用は非常に興味深く、量子エンタングルメントがイジングマシンの計算において有益な効果を生み出すのかどうかについては未だ未解決問題として残されている。より最近の研究としては、我々はOPOの動作における高次モードの重要性についての検討を進めている。周波数・時間的な高次モードは実際の実験においても存在しており、これらを取り入れることでOPOイジングマシンの動作に量子・古典のどちらのモデルにおいても興味深い複雑さが加わることになる。この高次モードの存在はイジングマシンの計算機としての性能に影響を及ぼす可能性がある。

実験側の進展としては、我々はこれまでにサイト数 $N=4$ および $N=16$ の自由空間OPOネットワークを実現し、NP-hardに属するMAXCUT問題の2つのインスタンスに対して100%の成功確率を得ている。最近では、サイズ $N>10000$ のOPOネットワークの実装を可能とする導波モードOPOの実現に精力的に取り組んでいる。スタンフォード大学においては、 $N=160$ のOPOシステムの安定な動作を実現しており、最近NTTにおいても同様の実験系を用いて $N>1000$ のOPO発振を実現している。大部分の実験系の準備は整ってきており、近々導波モードOPOを用いたイジングマシンの最初のテストを実施できるようになると考えている。この実験は大規模OPOイジングマシンの実現への道を大きく開く実験になると期待している。

4

Combinatorial Optimization in Driven-Dissipative Systems 駆動散逸系による組合せ最適化

東京大学 生産技術研究所 Timothée Leleu (ティモシー ルル)

翻訳者：針原 佳貴 (東京大学/国立情報学研究所)

Many combinatorial optimization problems are equivalent to finding the configuration of Ising spins σ_i that minimizes the Ising Hamiltonian $H = \sum_{i,j} \omega_{ij} \sigma_i \sigma_j$. The Coherent Ising Machine (CIM) based on Degenerate Optical Parametric Oscillators (DOPO) is a recently implemented [1] optical system that can solve the Ising model by using pulses of light which phases represent the direction of the Ising spins [2]. This system is dissipative and its computational principle relies on the approximate mapping of the Ising Hamiltonian by the configuration-dependent loss landscape. By setting the parameters at proximity of the “static” phase transition for which only the spin configuration that has maximum loss is stable, the CIM can find the solution of the Ising model [2].



Timothée Leleu (ティモシー ルル)

We have generalized the framework of the CIM by considering the effect of driving signals with characteristic frequency f and introduced a novel computation scheme for solving combinatorial optimization problems using driven-dissipative systems [3]. Such systems exhibit a non-equilibrium phase transition between the phases called symmetry-restoring and symmetry-breaking oscillations for which the DC component -- or time-average -- of the system state is zero and non-zero, respectively. The transition between these two phases is called a dynamic phase transition and occurs at a critical frequency f_c of the driving signal (see Fig. 1 (A)).

When driving the CIM using phase-shift keying modulated signals, the effective loss landscape of the DC components maps more accurately the Ising Hamiltonian than in the non-driven case because the driving signal forces the system states to saturation. Consequently, the driven CIM tuned at proximity of the dynamic phase transition can find configurations of lower Ising Hamiltonian, i.e., with a better fitness value (see Fig. 1 (B)).

(訳)

多くの組合せ最適化問題はイジングハミルトニアン基底状態を最小化するイジングスピン配位を見つける問題 (イジング問題) と等価である。縮退光パラメトリック発振器 (DOPO) を用いたコヒーレント・イジングマシン (CIM) は最近実装された光学系で [1]、位相がイジングスピンの向きに対応する光パルスを用いてイジング問

題を解くことができる [2]。この系は散逸系であり、その計算原理はスピン配位の関数として定まるロスランドスケープによる近似的なイジングハミルトニアンマッピングに基づいている。パラメータを、最小損失をもつスピン配位のみが安定化される「静的な」相転移点付近に設定すると、CIMはイジングモデルの基底状態を見つけることができる [2]。

我々はCIMの計算過程を一般化し、特徴的な周波数をもつ駆動信号をゼーマン項として入力することで、駆動散逸系を用いて組合せ最適化問題を解く新たな計算の枠組みを提案した [3]。このような系の発振状態は、系のDC成分 (時間平均) がゼロと非ゼロになる2つの相、すなわち対称性をもつ (symmetry-restoring) 相と対称性の破れた (symmetry-breaking) 相の境界で非平衡相転移が起こる。この相転移は動的相転移と呼ばれ駆動信号の臨界周波数において観察される (Fig.1(A))。

位相シフト変調をかけたゼーマン項でCIMを駆動すると、DC成分の実効損失 (スピン配位の関数) がイジングハミルトニアンを非駆動な場合よりも正確にマップする。これは駆動信号が系を飽和状態に近づけるためであると解釈される。結果として、動的相転移点付近で駆動されたCIMはより低いエネルギー、すなわちより最適値に近いスピン配位を見つけることが可能となる (Fig.1(B))。

[1] A. Marandi, Z. Wang, K. Takata, R. Byer, and Y. Yamamoto. Nature Photonics, 2014.
[2] Z. Wang, A. Marandi, K. Wen, R. L. Byer, and Y. Yamamoto. Physical Review A, 88(6):063853, 2013.
[3] T. Leleu, Y. Yamamoto, S. Utsunomiya, and K. Aihara. Submitted, 2016.

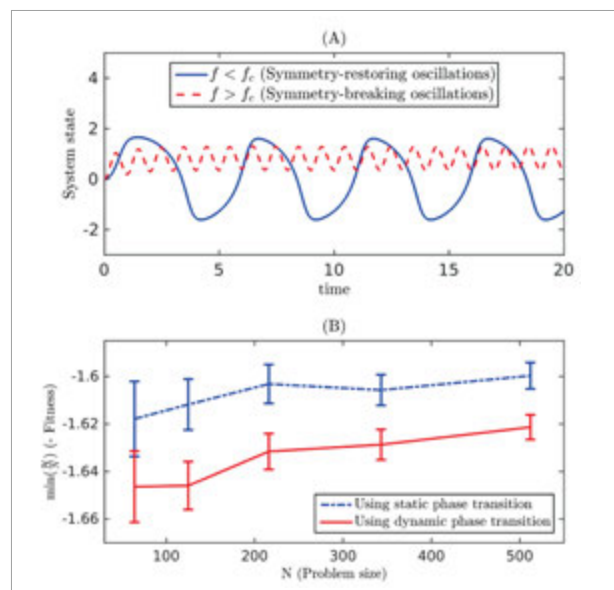


Figure 1: (A) Dynamic phase transition in driven-dissipative systems. (B) Comparison of the performance using static and dynamic phase transition for solving 3D Edwards-Anderson models.

Figure 1: (A) 駆動散逸系の動的相転移 (B) 静的相転移・動的相転移で3次元Edwards-Anderson模型のイジング問題を解いた時の性能比較



量子力学と私

理化学研究所
甘利 俊一

私は学生時代、そしてその後も、量子力学を教科書で勉強した。とても面白いが不可解である。式は分かっても、血肉のものとして心の底から納得できるというわけにはいかない。最近読んだ佐藤文隆「量子力学ノート」は極めて面白いが、この思いは変わらない。こんな劣等生が「量子人工脳」のアドバイザーを引き受けたのは、一つは怖いもの見たさであり、もう一つはひょっとしたら量子力学がわかるかもしれないという、はかない希望からである。

情報と結びついて、観測問題やエンタングルメントが、理論の世界だけではなくて現実の問題として浮上してきた。これが技術として発展する驚くべき時代になった。

物理学者は大風呂敷を広げるのが昔から好きである。彼らは脳についても発言してきた。素粒子論の故梅沢博臣が昔、素粒子論で脳の理論が作れると論じた。故田中昭二が、脳の中では超電動が起こっているのではないかと冗談半分にほらを吹いていたのを思い出す。Penroseの力作には感心した。大変面白いが、肝心の量子重力理論と意識の関係については納得がいかない。Fisherの議論に至ってはまったく論外である。

私は数理脳科学を標榜している。これは、脳の本質を

理解するためにはその詳細にはこだわらず、ニューロンのような素子を用いて実現できる情報処理の可能性を原理として解明することを考える。現実の脳は進化の過程でこの原理を獲得し、実現した。それには使える生体材料と、過去の進化の歴史を背負うという二つの大変な制約があり、実現した脳はきわめて複雑にならざるを得なかった。単純な脳のモデルを用いて数理の力でこの原理を理解し、脳とは別の仕方でも技術化しても良いはずである。これは量子脳に関係するかもしれない。

量子計算、量子情報の発展は驚くほど速い。これとともに量子力学がますます面白くなっていく。山本ImPACTは、この問題に正面から取り組んでいる。しかも周到な準備と気配りがあり、課題をうまく分散して設定している。その中には脳の原理と絡む部分もある。もっとも、量子情報の産業技術としての実現という壮大な目標に比べれば、予算の規模は少なく、年月も短い。競争相手も多い。しかし、このプロジェクトが産業化の可能性を実証すれば、話はそこから加速度的に進むと思う。

量子力学の劣等生である私にも、心から納得できる技術が実現出来たら素晴らしい。



量子が創る未来

日本電気株式会社
江村 克己

1965年にゴードン・ムーアが集積回路の将来展開の予想、いわゆるムーアの法則を発表してから半世紀が過ぎました。このムーアの法則は、半導体研究開発が向かうべき方向を示す大きな道標となってきました。単純な微細化による性能向上の限界が言われ始めて久しいですが、材料・プロセス上の工夫、マルチコア化、実装の高度化などにより性能向上が相変わらず続いています。とてつもなく凄いことだと思えます。アメリカのフューチャリストのレイ・カーツワイルは、新しいイノベーションが起こることでこの性能向上のトレンドが続き、2045年にはシンギュラリティ(技術的特異点:人工知能が人類の全知能を合わせたものを上回る点)が訪れるとの予測を出して議論を呼んでいます。

私たちはとすると、世の中の進展がリニアと思いがちですが、ムーアの法則は技術が指数関数的に進展することを示してもいます。10年で4桁の性能向上が起こるのです。私が学生時代の大型計算機センターの計算能力をはるかに上回る性能のプロセッサが今のスマートフォンには搭載されています。技術トレンドを理解すれば、

どのタイミングでどんな性能を実現しておくべきかを理解することができます。

研究者はどうしても技術起点でものごとを考えがちですし、科学の美しさに目を奪われてしまいがちです。これらは決して悪いことではありませんが、研究成果が何に活かせるかを常に考えるようにすることも大切です。社会の課題やニーズに真に対応する技術がタイミング良く提供されることがイノベーションの第一歩となります。社会課題を解く手法は通常いくつもありますので、提供するものがタイミングと提供価値の大きさで他を大きく上回っていることが必要になります。量子の技術は、人工脳にもネットワークにも大きなパラダイムのシフトをもたらすと大いに期待されています。時機を逸することなく社会の大きな変革に参与するためにも、量子が創る新しい世界を、その実現時期とあわせビビッドに描いて挑戦し続けることがとても重要と考えます。



強相関係の量子シミュレーション

京都大学
川上 則雄

新たな量子現象の予言・解明に、いまや量子シミュレーションは必須のアイテムとなっています。今から35年ほど前、私が大学院に入学した頃に量子シミュレーションがその威力を一気に発揮し始めました。学部学生時には、紙のカードに計算機の命令をパンチした記憶がありますが、修士課程に入るところにはコンピュータの性能が格段に上がり始め、これと並行して量子多体系を扱うアルゴリズムが次々に開発されてきました。

量子シミュレーションにおいては、物質に機能性と多様性をもたらす粒子間相互作用の効果、すなわち強相関効果を扱うことが重要となります。これには量子多体問題としての面白さ、難しさが凝縮しています。強相関係の取り扱いを困難にしているのは、エネルギーに依存して相互作用がまったく異なる現れ方をすることです。ある粒子に注目したとき、高エネルギーでこの粒子は相互作用を平均的なポテンシャルとして感じる一方で、低エネルギーでは他の粒子の揺らぎをめいっぱい感じてしまいます。このような「2面性」に強相関物理の面白さ・難しさの本質を見ることができそうです。

強相関係の量子シミュレーションは、今や物質開発の中心的手法となってきました。しかしながら、コンピュータ

の発展に頼るだけでは取り扱えない重要な量子現象が未だ多く存在し、ここに「何らかのブレイクスルー」が必要となります。この例として挙げたいのが「動的平均場理論」と呼ばれる方法であり、上記の高エネルギーと低エネルギーの2面性をうまく取り扱えるシミュレーションの枠組みを提供しています。これは、計算の正確さを少しばかり犠牲にして、限られた計算機リソースで現象の本質を理解しようというアプローチです。これにより強相関物理の理解は大きく進展しました。

このように、量子シミュレーションの発展には、コンピュータの性能アップに頼るだけでなく、これを補うアプローチが必須です。動的平均場理論のようなアルゴリズムの工夫も一つの方向性だと思いますが、既存のコンピュータから脱却した新奇なアプローチが期待されます。冷却原子、超伝導サーキット、量子ドットなどのそれぞれの量子系の特長を生かしたシミュレーション技術の開発は、たいへん頼もしいアプローチであると思います。本プロジェクトには、これらの分野を代表する精鋭の人材がそろっていますので、一研究者としても本プロジェクトの研究の進展を楽しみにしています。



ソフトも組み合わせ、システム提案を期待

株式会社東芝
齊藤 史郎

量子力学に魅せられた研究者は、古典力学とは異なる日常経験を越えた非常識ともいえる現象や可能性を追求するところに夢を感じるものと思います。筆者のように電気電子工学を専攻し、企業で現実のセンサ関連の研究開発に携わってきた身としては、うらやましく感じます。その一方で、ImPACTプログラムに取り上げられたからには、その夢を現実のものとして実現させてほしいとの期待が込められています。

そこで改めて考えていただきたいのは、日本人が比較的苦手とされているシステムとしての検討・実現を目指してほしいということです。コンピュータはハードウェアだけではただの機械です。これにOSやアプリケーションソフトが組み合わせられて初めて意味のあるものとなります。ここまですべてを構成してシステムといえるものとなり、このImPACTプログラムでは、従来のノイマン型コンピュータでは実現できない、不連続な可能性を形にすることが期待されていますので、OSやアプリケーション

ソフトまで踏み込んでやっていただければと思います。

企業の研究開発では、競合技術や競合他社とのベンチマークが求められることが多く、加えて昨今は自前技術にこだわらない他技術の取入れや融合によるシステム化といったことも忘れてはならない視点です。今ブームになっているDeep Learningに代表される人工知能の研究の進展は、目を見張るものがあり、今後は国レベルで大規模な予算が投入されるとも聞いています。研究のための研究でなく、何に使われるか、どういう課題を解決できるのかをメンバーで共有し、Deep Learningなども含めて色々な技術を取り入れる柔軟性も持って、研究を進めてほしいと思います。

量子 科学 最前線



永長 直人

Nagaosa Naoto

1958年生まれ。東京大学工学部物理工学科卒、米マサチューセッツ工科大学博士研究員などを経て、1998年から東京大学大学院工学系研究科教授。2013年から理化学研究所創発物性科学研究センター副センター長

物性、丈夫な量子系の時代 高温超伝導30年、永長直人さんに聞く

「量子」の科学技術というと、すぐさま量子コンピューターや量子暗号といった言葉が思い浮かぶ。究極の並行計算、鉄壁の情報保全というように、どこかSF的な風景がのぞき見え、いかにも未来を感じさせるからだ。だが「量子」は、決してそれだけではない。

よく考えてみれば、20世紀半ば以来のエレクトロニクスそのものが「量子」とともにある。固体中の電子の振る舞いを、量子力学に根ざすバンド(帯)理論で解き明かして、それを制御するものだからだ。半導体では電子のエネルギー状態が「伝導帯」に引きあげられたときに電流が流れる、といった理論である。

ところが今、量子力学という物質世界に備わるしるしを、もっと大胆に巧妙に取り込んで、新しい時代の回路

技術に生かそうという挑戦が熱を帯びてきた。

強相関エレクトロニクスやスピントロニクスなどの研究である。

この流れをさかのぼると、もっとも大きな出来事として記憶されるのが、1986年から翌87年にかけて世界中に巻き起こった高温超伝導フィーバーだ。銅酸化物のなかに、常温より低いとはいえ、従来よりもずっと高い温度で抵抗がゼロになる物質が見つかったのである。

奇しくも、今年はその発見から満30年。強相関などの理論研究者、理化学研究所創発物性科学研究センター副センター長の永長直人さんに物性探究の「次」を聞いた。

——センター名に「創発」とありますが、どんな意味ですか？

物質界には、粒子一つひとつをみても理解できないが、それらが集まったことで現れる現象がある。創発物性と呼んでいます。たとえば、それは電子同士の相互作用によって発現する。それぞれがもつ負の電荷で反発しあう(クーロン相互作用)といったことです。これがいわゆる「強相関」。高温超伝導もその一つです。

——「量子シミュレーション」というお仕事に取り組んでいらっしゃるそうですね。これも創発物性を探るためですか？

そうです。数多くの粒子を量子力学で考える多体問題は手計算では歯が立たない。n個の粒子を扱うと、その自由度はn乗でふえていき、計算は「爆発」してしまう。

これまでの半導体物理では、電子の動きをバンド理論というもので計算していた。それは電子1個に着目して、

周りの影響は平均値でとらえていたんです。ところが、強相関係では、その手法が破れてしまう。一つの電子がほかの電子の顔を見ている。相手の個性を見ながら振る舞うんです。だから、多体になる。そこでコンピューターを使うようになった。

—具体的には、どんな方法で？

モデルをデザインする。いろんなタイプの相互作用のなかからエッセンシャルなものだけを抽出して、そのモデルで量子系の運動を計算してもらうんです。強相関係では、クーロン相互作用、電子-格子相互作用、電子の移動という三つが大事です。これらをいったん分解して個別に調べ——これがシミュレーションに相当します——最後にそれらを総合する。

ちなみに旧来のバンド理論は、三つの相互作用のうち、実効的に最後の「電子の移動」だけを考えていた。だから、強相関係には対応できなかったわけです。

—それで、いまは何個くらいの粒子を扱えるように？

場合によっては、100万(10の6乗)個くらいまではいく。縦横高さで $100 \times 100 \times 100$ ですね。アボガドロ定数を考えると10の23乗くらいまでいかなければダメかと思いがちですが、実際には6乗でも十分OK。ほとんど無限大と考えてよい。

—量子シミュレーションの成果をもとに、どんなことをめざしていच्छるのですか？

電子は量子力学的な粒子ですが、その特質はふつう低温でしか現れない。きれいな波としての顔が熱の擾乱によって隠されてしまうんですね。それが常温でも生き残るような丈夫(robust)な量子力学系をつくりたい。1個1個の電子は脆いが、たくさん集まれば創発効果が出て丈夫になるからです。高温超伝導は常温には届い

ていないが、その可能性を示しています。

そして人類は、常温の量子現象を知らないできたわけではない。それは磁石です。電子の磁氣的性質であるスピンの方向に揃っているというのは、量子力学の巨視現象です。

—半導体エレクトロニクスの次にくるものとしてスピントロニクスが期待されていますか？



創発物性の一つとして、スピンの集まって粒子のように振る舞うということがある。スキルミオンと呼んでいます。スピンは電気で制御しやすいので、これを電気によってつくったり、動かしたり、消したりすれば新しい素子になる。一方で、スピンには情報を失いやすい一面もあるので両刃の剣ですね。既存の半導体エレクトロニクスと融合させていくべきでしょう。

—ご専門は理論ですが、実験とのかわりは？

理論家として新しい現象を予言しようと考えています。一例を挙げると、私たちは2005年、スピンの回転してらせん構造をもつときに電気分極が発生すること予想した。これは、実験で確かめられました。

—創発物性は、エレクトロニクス発展史のなかでどう位置づけられますか？

エレクトロニクスは、これまでオーム流を扱ってきた。オームの法則が成り立つ電流です。その後、超伝導流が見つかった。そして今、注目しているのは、3つめの種類となるトポロジカル電流です。丈夫な量子力学系をつくと、電流は波動関数(ψ)が変形することで流れていく。量子位相干渉による電

流と言ってもよいでしょう。

おもしろいのは、そこでは電子の状態がヒルベルト空間と呼ばれる高次元空間のベクトルで表され、数学のトポロジーがかかわってくることです。太陽電池もトポロジカル版をつくれれば効率を高められると思っています。

量子の科学技術という、量子情報科学の量子もつれが頭に浮かぶかもしれませんが、そこまで極限の状態をつくりださなくても、豊かな可能性はあるんです。

科学ジャーナリスト・尾関章

元朝日新聞記者。科学医療部長、論説副主幹を務めた。単著に『量子論の宿題は解けるか』(講談社ブルーバックス)、『科学をいまどう語るか——啓蒙から批評へ』(岩波現代全書)

ImPACT 未来開拓研究会 2015 開催報告

1. 趣旨

ImPACT 未来開拓研究会は、量子情報技術と計算機科学・脳科学、強相関・多体量子物理、現代暗号の境界分野の接点を、講義、ポスターセッションや、毎日深夜までのディスカッションなどを通じて、探索することを目的とした研究会です。研修会参加者は、広くプロジェクト内外から募り、若手研究者を中心とした勉強会として、講師を含む59人の参加で盛況のうちに無事終了いたしました。



支笏湖スクール集合写真

2. 幹事団 (※敬称略・順不同)

オーガナイザー：山本喜久 (科学技術振興機構)

幹事：宇都宮聖子 (国立情報学研究所)、福原武 (理化学研究所)、香取勇一 (はこだて未来大学)

3. 開催内容

日程 2015年10月13日(火)~10月18日(日)

場所 北海道千歳市 休暇村支笏湖 2階会議室

主催 国立研究開発法人科学技術振興機構 革新的研究開発推進室

プログラム

	10月13日(火)	10月14日(水)	10月15日(木)	10月16日(金)	10月17日(土)	10月18日(日)
9:00 - 10:30		岡田 真人① (東京大学) 量子人工脳に向けてのニューラルネットワークと情報統計力学入門	永長 直人① (理化学研究所) 電子系における強相関効果と幾何学	川島 直輝② (東京大学) テンソルネットワーク - 多体問題のための新しいことば -	河原林 健一① (国立情報学研究所) グラフ構造とアルゴリズム	今井 浩 (東京大学) 量子アルゴリズムの広がり
10:45 - 12:15	山本 喜久 (ImPACT) 挨拶: スクールの背景と狙い	川島 直輝① (東京大学) テンソルネットワーク - 多体問題のための新しいことば -	岡田 真人② (東京大学) 量子人工脳に向けてのニューラルネットワークと情報統計力学入門	永長 直人② (理化学研究所) 電子系における強相関効果と幾何学	河原林 健一② (国立情報学研究所) グラフ構造とアルゴリズム	岩田 寛 (東京大学) 離散最適化法の教理 - 劣モジュラ関数とマッチング
14:30 - 15:30	大関 真之 (京都大学) 量子アニーリングが拓く計算技術の新時代	鈴木 秀幸 (東京大学) 神経細胞・神経回路の非線形ダイナミクスと情報処理	岡田 康志 (理化学研究所) 神経細胞を支える細胞内物質輸送の自律的制御機構 ~ 局所相互作用と遠距離秩序	青木 秀夫 (東京大学) 高温超伝導への路 - 平衡・非平衡	松井 充 (三菱電機(株)) 暗号技術の光と影	香取 勇一 (公立はこだて未来大学) 神経ネットワーク・ダイナミクスとその応用
15:35 - 16:35	宇都宮 聖子 (国立情報学研究所) 光発振器ネットワークを用いたコヒーレント・イジングマシン	武居 弘樹 (NTT物性科学基礎研究所) 大規模コヒーレントイジングマシンの実現に向けて	北川 勝浩 (大阪大学) アナログ量子計算はデジタル古典計算に勝てるのか?	藤井 啓祐 (京都大学) アナログ・デジタル、古典と量子	小芦 雅斗 (東京大学) 新原理に基づく量子暗号	
16:40 - 17:40	Ferdinand Peper (情報通信研究機構) Nanocomputing and Neuromorphic Networking: Limits and Opportunities	中村 泰信 (理化学研究所) 超伝導回路を用いた量子シミュレーション	高橋 義朗 (京都大学) 冷却量子シミュレーション	中山 英樹 (東京大学) 一般画像認識の発展とディープラーニング	福原 武 (理化学研究所) 冷却原子で挑む量子多体ダイナミクス	
19:00 - 21:00	ポスター発表 Aグループ	日利 俊一 (理化学研究所) 数理論理学: 深層学習と情報統合を例として	ポスター発表 Bグループ	ポスター発表 Cグループ	山川 義徳 (ImPACT) 脳情報の可視化と制御による活力溢れる生活の実現	

: レクチャー
 : コロキウム (量子シミュレーション関連)
 : コロキウム (量子情報処理・量子暗号関連)
 : コロキウム (脳科学・計算機科学関連)
 : 特別講演

研究会スケジュールと参加者アンケートから

国立情報学研究所 宇都宮 聖子

量子情報分野を中心とした異分野融合型の未来テーマ開拓研究会として、ImPACT量子人工脳プロジェクトに関係の深い、量子情報・計算幾何学・脳科学といったテーマを中心に焦点があてられた。参加者は各領域の博士研究員、大学院生を中心とした若手研究者が多く、横断分野を基礎から学べるよう、講義には、情報統計力学(岡田(真)先生)、強相関効果と幾何学(永長先生)、テンソルネットワーク(川島先生)、グラフ構造とアルゴリズム(河原林先生)というテーマが選定された。また、量子シミュレーション、脳科学・計算機科学、量子情報・暗号といった分野の最先端で活躍されている先生方の研究紹介によるコロキウムが行われた。量子情報と計算機科学という、バックグラウンドもアプローチも全く異なる研究分野を巧く繋げられなければ、本当のブレイクスルーは起こらない。どのような連携が本質的に重要か。各分野の先端で活躍されている講師陣と参加者の間で、普段の研究の場を離れざっばらんに語り合い、今後の研究の方向性にフィードバックをかけることを目的とした。

参加者アンケートによると、もっと聞きたかった話は量子情報、脳科学分野、更に実装寄りのアルゴリズムの話、ビジネス視点で必要となる科学技術の視点、などが挙げられた。

三菱電機の松井先生がご講演の冒頭で、本研究会で驚いたことの一つに、「自由時間がない」ことを取り上げられていた。お昼休憩を除くと自由時間はほとんどなく、夜は毎日ポスター発表や討論会、寝る間を惜しんで異分野間での情報交換と非常に盛り上がっていた。普段学会も異なり顔を合わすことの少ない異分野の研究者同士、自由に議論を深める時間がもう少しあればよかったかもしれない。境界領域の本研究会を機に、プロジェクトの目標や現状などを今一度振り返り、今後も全体として進むべき方向を様々な視点から議論する機会を増やせるとよいと感じた。



甘利俊一先生の特別講演

異分野交流について

公立はこだて未来大学 香取 勇一

計算機科学、脳科学、強相関物性、現代暗号の各分野の講師を招き、異なる分野間の接点を探るところで新しい量子情報技術を開拓するImPACT未来開拓研究会が開催された。異なる分野の講師・受講生を集めた研究会ということで、初めはお互いの研究内容が理解出来るのだろうかという心配もあったが、講師の先生方は難しい内容もわかりやすく噛み砕いて解説して頂いた。特別講演では、甘利俊一先生、山川義徳先生に、脳の数理や脳科学の実社会での応用などをわかりやすく解説して頂き、脳科学になじみの無い参加者でも楽しめたと思う。様々な講義を聞いてうちに、異なる分野でも良く似た問題を考えていることがあることに気がつく。例えば脳科学で記憶想起のメカニズムの説明に用いられる連想記憶ネットワークのモデルは、物性物理のイジング系のモデルを基に記述される。またイジング系の最低エネルギー状態を求める問題は、情報科学の組み合わせ最適化問題と対応付けられる。このように参加者がそれぞれ自分の観点で、自分とは異なる研究分野との接点を探る良い機会になったと思う。

研究会2日目夜の講義終了後には、参加者が自分の意見

をなんでも自由に出し合うランプセッションの時間が設けられた。フォーマルな雰囲気の中とは異なり、砕けた雰囲気の中で本音に近い意見が飛び交う有意義な議論になった。量子情報処理の応用・出口戦略や、異なる分野間での連携についてざっばらんに意見が出され、活発な質疑・議論が展開された。大学院生が研究を進めるうえでの悩みを打ち明けながらも、研究に対する強い意気込みをみせる場面もあり、頼もしく感じられた。幅広い分野の連携・活発な議論・交流により新しい未来が開拓されると強く期待できる研究会だった。



ランプセッションの様子

ポスター発表と特別講演

理化学研究所 福原 武

日中の講義・コロキウムののち夕食後に、3日間はポスターセッション、そして残りの2日間は特別講義が行われた。ポスターセッションの日数が限られているため、それぞれの参加者の発表は1回であった。同じ日の別の発表を聞く時間が限られるため、今回は比較的近い分野の人たちは同じ日に振り分け、日ごろ接点がない離れた分野の話聞ける工夫をした。これに

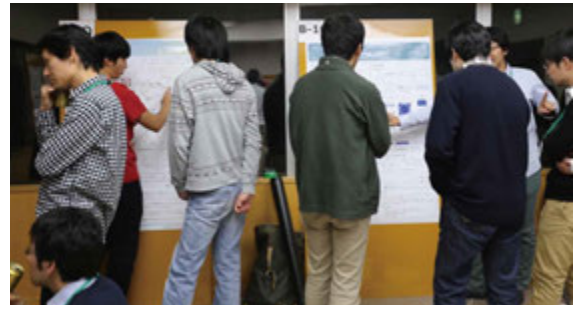
より異分野間のディスカッションも進んだと思われる。

ポスター賞の選定に際し、分野が多岐にわたるため、審査員のバックグラウンドによって評価が大きく異なることが予想された。良い成果・発表をなるべく逃さず公平に審査するために、全ポスターの日程に参加することのできるそれぞれの分野の講師の先生方にも評価を依頼し、それを集計し山本PMと幹事

三人のなかで協議することで決定した。予想の通り、講師の先生方の評価は非常にばらけたものであり、異分野をつなぐ研究会ならではの結果となった。今年は、ImPACTが始まって約1年ということもあってか、ポスター賞に選出されたのはすべて理論の研究であった。閉会の辞で山本PMが述べられていたが、今後はImPACTのプロジェクトと連動して目を見張るような実験結果の発表を期待したい。

特別講義のなかで面白い企画であったのは、「脳情報の可視化と制御による活力溢れる生活の実現」という他のImPACTプロジェクトを率いる山川PMにお話しいただいたことであった。他のプロジェクトがどのように進行しているのかを知る機会であり、また、そのお話は研究の出口を強く意識したものであった。「(研究としては面白いけれど)これではお金のに

おいがしない」というコメントは良い意味で応用を見据えたものであり、これは私をはじめ、多くの参加者にとって新鮮な視点だったのではないだろうか。



ポスターセッションの様子

ポスター発表

ポスタータイトル

日時	氏名	所属	タイトル
10月13日 (火) Aグループ	後藤 隼人	東芝 研究開発センター	接続量子誤り訂正符号を用いたフォールトトレラント量子計算の改善
	生田 拓也	大阪大学	4次元Time-bin 量子もつれによるベル不等式の破れの観測
	新保 厚	東京大学	既知の2体量子状態に対する最適化された局所的ランダム化コスト
	竹本 一矢	富士通研究所	長距離量子鍵配布に向けた1.5 μ m波長帯単一量子発生素子
	佐々木 寿彦	東京大学	Passive round-robin differential phase shift 量子鍵配送方式における検出側の光子数によらない安全性証明
	中村 敏幸	北海道大学	ラウンドロビンDPS-QKDの実験
	福井 浩介	北海道大学	連続量を用いた量子誤り訂正に関する研究
	松岡 史晃	北海道大学	条件付変位操作による近似的な位相スウィーズド状態の生成
	角田 貴大	東京大学	超伝導量子ビットを用いた高忠実度ゲートの実現とその評価
	川上 駿	東京大学	Time bin を用いたPrepare and Measure型高次元量子鍵配送の安全性証明
濃村 一航	京都大学	量子測定における状態識別能力と擾乱の関係	
10月15日 (木) Bグループ	奥山 拓哉	日立製作所	CMOS annealingによるイジングモデルの基底状態探索
	安田 裕之	東京理科大学	Coherent Ising Machine上でHopfield-Tank neural networkを動作させる組合せ最適化手法
	徳田 悟	東京大学	ベイズ統計における相転移理論の確立とその展開
	竹中 光	東京大学	ベイズ推論による2次元量子スピン系からの古典的有効モデルの自動抽出
	坂本 浩隆	東京大学	マルコフ確率場モデルのハイパーパラメーター推定における時間的ダウンサンプリングの影響
	森 竜太	東京大学	時系列処理における動的シナプスの機能的役割
	塚本 三六	富士通研究所	CMOSアニーリングのためのアナログ回路技術
	鈴木 泰成	東京大学	落とし戸付き一方方向性開数を用いた量子人工脳の性能評価に向けた研究
	針原 佳貴	東京大学	量子測定フィードバックを用いたコヒーレント・イジングマシンのMAX-CUTに対するベンチマーク
	玉手 修平	国立情報学研究所	相互注入レーザーネットワークを用いた古典XYモデルシミュレータ
10月16日 (金) Cグループ	坂口 潤将	東京大学、国立情報学研究所	レーザーネットワークを用いたコミュニティ検出
	岡田 涼太郎	学習院大学	多成分ボース・アインシュタイン凝縮体の非平衡ダイナミクス
	Sozinho Amorim Cassio	名古屋大学	Majorana fermions braiding dynamics in 1D systems
	田淵 豊	東京大学	超伝導量子ビットを中心とした量子中継器の開発
	河野 信吾	東京大学	超伝導量子ビットを用いた伝搬マイクロ波単一光子の非破壊検出
	中島 千尋	東北大学	素因数分解のモデルと量子アニーリング
	稲垣 卓弘	NTT 物性科学基礎研究所	位相感応増幅を用いた大規模時分割多重光パラメトリック発振器
	各務 惣太	日本電気	量子ドット赤外線検出器の研究開発
	東川 翔	東京大学	SU(N) 対象なフェルミオン系の超流動状態のNの偶奇性による違い
	富田 隆文	京都大学	量子アニーリングを用いた光格子中での磁気秩序状態の実現に向けて
山口 真	理化学研究所	環境系との結合を積極的に利用した量子アニーリングの考察	

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。発表ポスターの中から、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3名に「ベストポスター賞」が贈呈されました。



賞状を手にするベストポスター賞受賞者、左から佐々木、徳田、坂口

ベストポスター賞

Round-robin differential phase-shift quantum key distribution protocol with threshold detectors

東京大学大学院工学系研究科付属量子科学研究センター 佐々木 寿彦

今回の支笏湖での滞在型研究会ではポスター発表日が3日ありましたが、多くの方が連日深夜まで残って議論する大変活発なものでした。私のポスター発表では、通信路を通して2者間で安全な乱数(鍵)を共有する量子鍵配送(QKD)という方法の一つである Round-robin differential phase-shift quantum key distribution protocol (RRDPS) に関する話をしました。これまでの全てのQKDでは盗聴者が通信を盗聴することは可能だが信号の擾乱を調べることでそれに気づけるというのが安全性を保証できる根拠でしたが、RRDPSでは盗聴者がどうやっても信号を盗聴しづらいたということが安全性の根拠になっています。しかし、実際の実験では単純に行くと実験装置の制約によりその性質が厳密には失

われてしまいます。今回の発表は工夫をすればそれを避けられるという話でした。ポスター賞を頂けたということで、多くの人に興味を持って頂けたことを嬉しく思います。

今回の研究会では多くのことを学びましたが、特に普段聞く機会のない脳科学に関する多くの知識を吸収できたことに加えて、企業研究者の方もかなりの数参加しているという異色の研究会を通して新たな人的つながりができたことが特に大きな収穫でした。思い起こせば学生のときに、このImPACTの前身であるFIRSTの滞在型合宿に参加しましたが、そのとき得られた知識や人的つながりは今でもかけがえないものとなっており、今回の経験も今後に生かしていけたらと思います。

ベストポスター賞

レーザーネットワークを用いたコミュニティ検出

東京大学、国立情報学研究所 坂口 潤将

今回の研究会は、今までサマースクール等に参加したことのない私にとって、様々なバックグラウンドを持っている研究者の方々とまとまった期間議論できた初めての機会であり、非常に濃密な6日間でした。特に毎夕食後に行なわれたポスターセッションやフリートークの場では、自分達の気のすむまで議論することができ、若干睡眠不足にはなりましたが、その分有意義な時間を過ごすことができました。

ポスターセッションでは、ImPACT プロジェクトの一つである量子人工脳、レーザー XY マシンの新しい応用として、コミュニティ検出について発表しました。コミュニティ検出は与えられたネットワークから繋がりが密なノードのグループを探し出す問題であり、脳機能ネットワークやソーシャルネットワークなど、様々な種類のネットワークにおいて重要な問題です。私は連続値の位相状態が許されるレー

ザーの性質を活かして複雑ネットワーク上のコミュニティを検出する新たな手法を提案し、数値シミュレーションを行なった結果を報告しました。セッションでは、普段自分が考えていたこととは全く異なる視点からアドバイスを頂いたり、議論することができました。その上、このような賞をもらったことを非常に嬉しく思っています。講義やコロキウムも、脳、量子、計算機科学をキーワードに、初めて聞く話題も多く、集中して勉強する良い機会となりました。そして私にとって一番の収穫は、同年代の様々な分野の学生と知り合えたことです。研究会全体を通して、それぞれ自身の夢と希望をもって研究に打ち込んでいる仲間と夜通し語り合うことができ本当に良い刺激になりました。最後になりましたが、このような研究会を企画及び運営して頂いた方々に感謝致します。

ベストポスター賞

ベイズ統計における相転移理論の確立とその展開

東京大学大学院新領域創成科学研究科複雑理工学専攻 徳田 悟

まず初めに本会のオーガナイザー・スタッフの皆さま、講師の先生方、そしてよなよな議論に付き合ってくれた参加者の皆さま、ありがとうございました。6日間を終えてみて、本当に充実した日々であったことを改めて実感しております。また、この度はこのような賞をいただくことができ誠に光栄です。量子シミュレーション、脳科学・計算機科学、量子情報処理・量子暗号といった広範なバックグラウンドを持つ参加者の中で、このような評価をいただけたことはとても励みになっております。ポスター発表では、私が昨年構想に挑んでいるベイズ統計の相転移理論についてお話させていただきました。ベイズ統計と統計物理との数理的対応を通じて、データの量やノイズレベルによって変化する推定の「状態」を説明する枠組みになります。分光計測で得られるスペクトルの

ピーク分離問題を例とすることで、自身の研究とImPACT量子情報技術との接点に関するプロポーザルについても踏み込みました。このプロポーザルというのは、本会への応募時に提出した提案書の内容に準じたものです。決して会の本流とは言えない自身の研究が、プロポーザルを含めて、多くの参加者に興味を持っていただき、分野外の方々にもご理解いただけたことは自身になりました。そして、本会を通じて得た多くの参加者との出会いが何よりの財産になったと感じております。各分野を先導する一流の講師陣、優秀な若手が一同に会するこのような場に参加できたこと自体が幸運であり、参加者同士が自由闊達に議論する気風が会を包んでいたことは本当に刺激的でした。今回得た貴重な経験、自信、そして出会いを糧に、更なる成長を期する所存です。

第4回量子暗号・量子通信国際会議 (UQCC 2015)

■日程：2015年9月28日 ■対象・参加者人数：334名
 ■会場：一橋講堂(東京竹橋) ■報告者：佐々木 雅英(情報通信研究機構)

第4回量子暗号・量子通信国際会議 (Updating Quantum Cryptography and Communications 2015 (UQCC 2015)) が9月28日午前、東京竹橋の一橋講堂において開催され、「量子セキュアネットワーク」プロジェクトの成果の一端が紹介されました。本会議は、内外の大学、研究機関、産業界および省庁から334名の参加がありました。

会議前半部では、日本電気株式会社 (NEC) や株式会社東芝 (東芝) から、実用化に向け最終試験に入った最新の量子鍵配送 (QKD) 装置が紹介されました。NECは、東京都港区内のサイバーセキュリティ・ファクトリーにて、H27年7月中旬からQKD装置の長期的安全性評価試験を行っており、良好な運用実績を報告するとともに、現代暗号とQKDを統合した最新技術も紹介しました。東芝は、仙台の東芝ライフサイエンス解析センターと東北大学・東北メディカル・メガバンク機構間 (7km) でH27年8月から長期運用を行っており、遺伝子データの伝送保護に向けた良好な運用実績を示し、会議当日は、同様のQKD装置を舞台上に持ち込み最新技術の紹介を行いました。

また、三菱電機と日本電気はスマートフォンのセキュリティ向上にQKDを活用する技術をそれぞれ紹介し、デモや展示を行いました。

NICTは、様々なQKD装置を接続しネットワーク化する鍵管理システム、及びQKDとスマートフォンを組み合わせた電子カルテシステムをステージ上に組み上げて、QKDの発明者であるベネット博士とブラサル教授とともに寸劇を交えて紹介しました。

これらの発表はImPACT山本プログラムが目指す、都市圏での量子セキュアネットワークを実現する上でキーとなるQKD技術とアプリケーションインターフェース技術が実サービスに近い環境での実証段階にあることを示しました。

会議後半部では、会場とウィーン及びマテラをそれぞれライブ中継で結び、ウィーン大学やパドバ大学、欧州宇宙機関が現地から最新の宇宙量子通信技術をライブで紹介しました。

またNICTは、光学衛星による光センシングと地上への光データ通信について最新成果を紹介しました。さらに、NICT-電気通信大学間8kmでの光空間暗号通信や、ドローンの制御通信の安全性向上にQKDネットワークを活用し広域飛行制御させる実証実験の成果もビデオ映像を交えて紹介しました。

最後は、リレートークとディスカッションのセッションを設け、地上ファイバから宇宙圏まで含むグローバルネットワーク化に向けた量子暗号・量子通信の展望をまとめ、会場との活発なQ&Aも行われ盛会のうちに終了しました。



NICTが開発した電子カルテシステムをデモするQKDの発明者、ベネット博士とブラサル教授



リレートークセッションにおける講演者と会場参加者によるQ&Aの様子

第5回量子暗号国際会議 (QCrypt 2015)

■日程：2015年9月28日～10月2日 ■対象・参加者人数：334名
 ■会場：一橋講堂 (東京竹橋) ■報告者：佐々木 雅英 (情報通信研究機構)

第5回量子暗号国際会議 (5th International Conference on Quantum Cryptography (QCrypt 2015)) が9月28日午後～10月2日 (5日間) に、東京竹橋の一橋講堂において開催されました。本会議は量子暗号に関する世界最大の会議で、毎年各国持ち回りで開催されます (2011年以降、チューリッヒ、シンガポール、ウォータールー、パリ、東京)。

今回の会議の大きな特徴は、量子暗号分野と現代暗号分野の分野連携に向けた検討が大きく前進したことにあります。GoogleやMicrosoft、Intelなど大手企業が量子計算技術の研究開発を本格化させた現状を受け、暗号分野では、量子計算技術が実現した時代でもセキュリティ耐性を持ち、かつ暗号化したままデータ処理が可能な耐量子性-暗号技術 (Post Quantum Cryptography) が主要テーマの一つとなっています。一方、量子暗号は、原理的にどんな将来技術でも破られないデータ伝送の安全性を保証します。この耐量子性-暗号技術と量子暗号技術をまとめて、量子セーフ暗号技術 (Quantum Safe Cryptography) と呼び、永続的安全性 (Everlasting security) に近づくための重要テーマと認識されるようになってきました。

今回の会議では、量子暗号分野と現代暗号分野から計4件のチュートリアル講演を選び、各日のセッション最初に組み込んで、基礎概念から最新状況まで網羅的に聴講できるよう工夫しました。このほかプログラムは、招待講演10件、寄稿講演26件、ポスター発表113件、ホットピック3件、パブリックレクチャー2件、及びデモ展示10件から構成さ

れ、量子鍵配送装置の実装安全性に関する実践的課題、サイドチャネル攻撃耐性を高める次世代の量子鍵配送方式、量子中継技術、量子フォトニクスによる超小型化技術、量子計算アルゴリズムと暗号解読脅威の定量分析などが発表、議論されました。

ジュネーブ大学のジザン教授による基調講演では量子暗号技術の現状と今後の展望が紹介されました。ダルムシュタット大学のブッフマン教授によるチュートリアル講演では耐量子性-暗号技術の概要が紹介されるとともに、ゲノムデータ等を世紀単位で長期間保管するためには未だ満足できる解決策がないという問題が指摘されました。これを受けて、永続的安全性の確保に向け、耐量子性-暗号技術や秘密分散技術を組み込んだサーバとこれらを量子暗号回線でつなぐストレージネットワークシステムが分野連携の一つのケーススタディとして活発に議論されました。来年以降の会議でも戦略テーマになってゆくと予想されます。

また、第3日目の午後にNICTへのラボツアーを行い、研究者や科学ジャーナリストなど100名の方々がTokyo QKD Networkや量子ICT実験設備、光地上局などに加えて、日本の主要企業・大学などが開発した量子暗号装置の展示やデモを見学しました。海外の研究者・技術者に対して日本全体の量子暗号技術開発の最新成果を発信し好評を得ました。

会議の最終セッションではQKDの発明者であるベネット博士とブラサール教授の講演により、分野を横断する有意義な議論が総括され、盛会のうちに終了しました。



基調講演を行うジュネーブ大学ジザン教授



活発な議論が交わされたポスターセッションの様子

US-Japan Workshop

■日程：2015年12月10日(木)、12月11日(金) ■会場：CIS-X Auditorium, Stanford University

米国側発表について

- 報告者：Peter McMahon (Stanford University)
- 翻訳者：坂口 潤将 (東京大学、国立情報学研究所)

In the recent US-Japan Workshop on New-Generation Computers, held at Stanford University in December 2015, researchers from two related communities spent two days together to discuss progress in their respective fields, and to identify common challenges and approaches. The adiabatic quantum computing / quantum annealing (AQC/QA) community had representatives from MIT, NASA, Google, and ETHZ, amongst others, and the coherent computing community was represented primarily by researchers from NTT, NII and Stanford.

There are two main thrusts of research in the AQC/QA community at present: the first is the development of qubits with long coherence times, and the study of plausible physical designs that can integrate multiple such long-coherence-time qubits. The second thrust is the study of a series of large-scale (512- and 1024-qubit) machines built by a Canadian company, D-Wave. The D-Wave machines are constructed using poor quality qubits, in the sense that their qubits have coherence times much shorter than the time it takes to execute a single computation. Therefore their qubits do not retain their quantumness for a large fraction of a computation. However, the theoretical understanding of how much quantumness is necessary in order to obtain a quantum speedup (an improvement in a computation's runtime, relative to a classical computer's attempt at the same computation) is lacking, and the current approach is a rather heuristic one: instead of trying to prove theoretically what is necessary to obtain a quantum speedup, researchers are running benchmarks on the D-Wave machines and hoping to find certain problems that exhibit a quantum speedup. This effort has been underway for

three or four years now, and some of the latest benchmark results were reported at the US-Japan workshop. The groups working on developing high-quality qubits presented their progress, and they are aiming to produce prototype machines with up to 100 qubits in the next 5 years. These prototypes may help to clarify the importance (or lack thereof) of the coherence times of the qubits, and of the connectivity of the qubits.

The coherent computing community presented several theoretical and experimental results. Currently the largest computation of a hard (NP-hard) problem that has been solved in this class of machine is one with only 16 bits. The focus of the efforts in this community at present is on scaling to much larger numbers of bits. The benchmarking studies performed on D-Wave machines are of great interest, since they have already helped to formulate a good approach to comparing the performance between an annealing machine and a classical computer, and have tried to find hard instances for classical computers.

Overall the workshop was a good opportunity for the coherent computing community to showcase their work to their counterparts in the AQC/QA community, and to see some of the state-of-the-art work being done by the QA community in benchmarking non-classical annealers.

(訳)

今回スタンフォード大学で開催された次世代型コンピュータについてのUS-Japanワークショップでは、二つのコミュニティからの研究者が2日間、自身の分野の進展や共通の課題について議論を交わした。断熱量子計算/量子アニーリング(AQC/QA)のコミュニティからはMIT、NASA、Google、ETHZ(スイス連邦工科大学チューリッヒ校)の研究者が、コヒーレントコンピューティングのコミュニティからは主にNTT、NII、スタンフォード大学の研究者がそれぞれ出席した。

AQC/QAコミュニティの現在の主なテーマは二つある。一つは長いコヒーレンス時間を持つキュービットの開発、及びそのような複数の長時間コヒーレンスキュービッ

トの結合のための現実的な物理設計である。二つ目はカナダのD-Wave社によって開発された、512及び1024キュービットを持つ大規模マシンの評価である。D-Waveマシンはコヒーレンス時間が一つの計算を終える時間よりも短い、性能の悪いキュービットを実装している。それゆえ彼らのキュービットは計算の大部分において量子性を維持できていない。しかし、量子的な計算速度向上(同じ計算について古典コンピュータと比較したときの計算時間の向上)のためにどれほどの量子性が必要であるかは理論的には不明確であり、現在のアプローチはいささか近似的なものである。それは、理論的に量子的な速度向上に何が必要であるかを証明する代わりに、D-Wave上で様々なベンチマークを走らせ、ある特殊な問題において量子的に計算速度が向上することを確かめるというものである。このベンチマークは3~4年に渡り現在も引き続き行なわれており、今回のワークショップでは最新の結果が報告された。また高性能キュービットの開発を行なっているグループからはその進展について報告があり、次の5年で100キュービットをもつプロトタイプマシンを開発することに焦点を当てるということであった。このようなプロトタイプは、キュービットのコヒーレンス時間の重要性や結合の重要性を明らかにするために有用だろう。

一方コヒーレントコンピュータのコミュニティはいくつかの理論及び実験結果についての発表を行なった。現在コヒーレントコンピュータで解かれた最もサイズの大きいNP困難問題は16ビットによる計算である。現在このコミュニティは大規模なビット数を搭載することに焦点を当てている。またD-Waveマシンのベンチマークはこのコミュニティにとっても非常に興味深い。彼らは既にアニーリングマシンと古典コンピュータを比較する優れた方法をまとめており、さらに古典コンピュータにとって難しい問題を探そうとしている。

コヒーレントコンピュータのコミュニティにとって今回のワークショップ全体を通して、同じ目的を共有するAQC/QAコミュニティへの研究成果の披露、及び非古典アニーリングマシンについての彼らの最先端の成果を知る非常に良い機会となった。

日本側発表について

■報告者：武居 弘樹 (NTT 物性科学基礎研究所)

物理システムに基づく新たな計算機に関し、特に量子アニーリングとコヒーレントコンピュータについて広く議論する場としてNew-generation computers: quantum annealing and coherent computingと題した日米の合同ワークショップが2015年12月10日、11日の2日間にわたりスタンフォード大学にて開催されました。招待講演者による17件の口頭講演とポスター発表があり、活発な議論が行われました。

量子アニーリング分野では、本ワークショップの主催者の一人であるMITのW. Oliver教授より、高品質超伝導量子ビットの実現に向けた取り組みが述べられ、5年以内に100 bitの高品質量子ビットを集積化するという目標が掲げられました。また、D. Lidar教授(USC)より、D-Waveマシンにエラー訂正を適用することにより、1次元イジングモデルの模擬における正答率向上が可能であることが示されました。また、NASAからは量子アニーリングの現実的な応用に関する取り組みが報告されました。全体として、D-Waveを中心とした量子アニーリングに基づく計算機に関し、多方面からの研究が活発化していることを感じました。

コヒーレントコンピュータに関しては、山本喜久PMによる概要の講演の後、スタンフォード大、NII、NTTによりOPOやレーザを用いたコヒーレントコンピュータの理論および原理確認実験、大規模システム化等に関して最新の成果が発表されました。近年の本分野の飛躍的進展を聴衆に印象付けることができたのではと思います。

他にも、日立によるCMOSアニーリングや、St. Andrews大による冷却原子を用いたXYマシンについての報告がなされるなど、物理系の違いを超えた広いスペクトラムの研究者が集まり新たな計算機について議論するという非常にユニークなワークショップでありました。個人的には、このような新しく立ち上がりつつある分野の研究者の交流の場として今後もぜひ継続すべき会議と考えます。



講演を行う山本喜久教授



講演を行うW.Oliver教授

第6回 量子人工脳 理論ミーティング

■日程：2015年11月20日

■会場：JST東京本部別館 9階会議室A

■参加者人数：約20名

■報告者：針原佳貴 (東京大学 合原研究室 / 国立情報学研究所 宇都宮研究室)

ImPACT量子人工脳プロジェクトの中心的な話題や関連研究について議論する理論ミーティングの第6回が開催されましたので、その概要について報告させていただきます。発表は東芝研究開発センターフロンティアリサーチラボラトリーの後藤隼人氏による「非線形振動子ネットワークを用いた断熱量子計算」[1]、国立情報学研究所/東京大学の丸尾大貴氏による「縮退光パラメトリック発振器ネットワークのTruncated Wigner関数法による解析」の2つです。

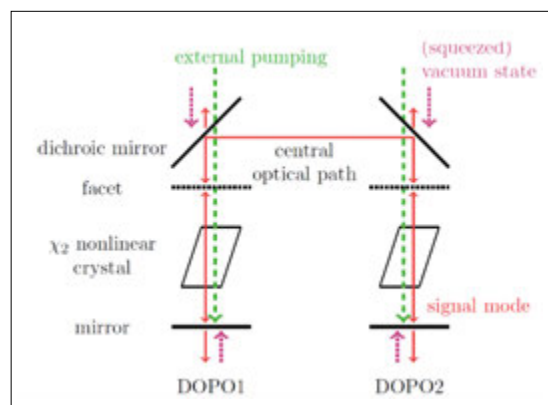
後藤氏の発表は、カー効果を用いたパラメトリック発振器 (KPO) の分岐現象に基づくイジングモデルの実装という新しいアイデアで、今回は基本原理と数値計算結果について紹介して頂きました。非線形振動子であるKPOはパラメータを変化させることで単一の安定点が双安定状態へ分岐現象を起こします。発表ではまず、散逸がある系でも断熱的に変化させると、分岐点付近で量子力学的重ね合わせ (シュレディンガーの猫) 状態が生成されることを説明されました。このように量子性を発現する非線形振動子の双安定な位相によりイジングスピンを表現し、それらを線形結合させたネットワークを張ることで、イジングモデルを実装できます。そして非線形項を十分ゆっくり強めると、量子断熱発展によりKPOネットワークはイジング問題の基底状態を見つけることができるというのが本発表の要旨です。KPOの量子性や計算過程の量子断熱定理による説明、系の損失が増えた場合の振る舞いなど多くの質問がありました。このような新しい方式の提案により、イジングマシンに関する研究の更なる盛り上がりを感じます。もともと後藤氏は人工知能と量子コンピュータの接点について興味があったとのことなので、今後の方向性も気になるところです。

丸尾氏の発表はコヒーレント・イジングマシン (DOPOネットワーク) のTruncated Wigner関

数法による量子論的解析です。図のようなDOPOネットワークのハミルトニアンからマスター方程式を経由してTruncated Wigner関数法により得られた確率微分方程式は、DOPOの複素電場のダイナミクスとして解釈できると説明がありました。そして、正P表示を用いた先行研究[2]との比較を数値計算により行い、そこで生じる誤差はモデルの違いによるものではなく、サンプル数が有限であることに起因するという結果が示されました。さらに、2DOPO系がとりうる4つの状態から1つの答えを出すまでの過程は、1. DOPOの線形重ね合わせ状態により解空間を探索する段階、2. 基底状態の確率振幅を高める段階、3. 縮退した2つの基底状態のうち片方を選ぶ段階、4. それを古典のイジングスピン値として読み出す段階の4段階で計算が進むことが説明されました。また、光結合路の真空場揺らぎをスクイズすることにより、先行研究では報告されていなかった量子相関を実現することができ、それに付随して量子エンタングルメントが増強されたことも報告されました。これらの研究はコヒーレント・イジングマシンの計算過程を理解する上で大事な観点だと思うので今後の発展が期待されます。

[1] H. Goto, arXiv:1510.02566 [quant-ph] (2015).

[2] K. Takata, A. Marandi and Y. Yamamoto, Phys. Rev. A 92, 043821 (2015).



図：2つのDOPOをダイクロイックミラーで結合させたネットワーク。それぞれのDOPOは2値の位相をとるためネットワーク全体では4状態をとりうる。(丸尾氏のスライドより引用)

第10回量子シミュレーション研究会に参加して

■日程：2015年10月30日 ■会場：京都大学 ■参加者人数：25名程度
■報告者：村上雄太（東京大学理学系研究科物理学専攻青木研究室）

私はImPACT「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」の三つのプロジェクトのうち量子シミュレーションに関連した研究をしています。この研究会では、室温超伝導実現に向けた研究の一環として我々が開発した新しい計算手法の説明と超伝導体における非平衡ダイナミクスへのその応用に関して発表しました。

室温超伝導が実現されれば、エネルギー消費のセーブや量子シミュレーターの汎用性の向上といった様々な波及効果が期待され、必ずや次世代の技術革新に繋がります。ところが、これまで様々な超伝導体が発見されてきた一方で、室温超伝導体は未だ実現されていません。しかし、この数年間で室温超伝導実現に向けたいくつかの重要な動き（実験）があったと考えています。一つ目は一昨年報告され始めた超高压下の水素化合物です。この系はそれまで銅酸化物超伝導体が持っていた転移温度の記録を大幅に塗り替え200K以上で超伝導に転移するという報告がなされています。今後様々な化合物による系統的な研究を通してより高い転移温度が実現されるかも知れません。

二つ目の可能性は我々が注目している光による超伝導の操作です。このような実験は近年のTHz帯の高強度レーザーの実現に伴い可能になってきました。例えば、島野グループ（東大）の強結合従来型超伝導体における光による超伝導秩序パラメータのコヒーレント振動の誘起や、Cavalleriグループ（Max Planck 研究所）の特定の格子振動の共鳴励起を介した光による超伝導的な光学応答の誘起などです。特に後者の研究では銅酸化物やフラーレン超伝導体において室温でも超伝導的な光学応答が誘起されるという報告がなされています。

では実際に室温で超伝導状態がレーザーで誘起されているのでしょうか？この問題は今現在盛んに議論されています。これを解くためには、我々は（過渡的な）非平衡超伝導状態の性質をより深く理解する必要があります。これまでの理論的な研究においても超伝導の非平衡ダイナミクスの性質を理解するために様々な研究がなされてきまし

た。しかし、それらは平均場（BCS理論）をベースにおいた研究が主であり、電子格子結合が重要な働きをすると期待される上記の実験のためには、格子のダイナミクスの効果も自己無撞着に取り入れられる新しい手法が必要であると考えられます。

研究会では、このような背景を踏まえ我々が開発してきた電子・格子系の実時間ダイナミクスを記述する新しい手法とそれを用いた非平衡超伝導の振る舞いに関する研究成果を報告しました。具体的には平衡状態の強結合電子・格子系で幅広く使われてきたMigdal-Eliashberg理論を動的平均場理論の枠組みと組み合わせ非平衡問題に拡張した方法です。この方法を用いて強結合従来型超伝導体における（1）集団励起モードの性質と（2）強励起後の緩和を研究しました。（1）に関しては、集団励起モードの種類、それらのエネルギースケール、および格子振動と超伝導秩序パラメータのダイナミクスの絡み合いを明らかにしました。（2）では、強結合超伝導体の非平衡緩和過程において、非熱的臨界点と呼ばれる特殊な点が存在し、それを境に緩和の様子が定性的に変化する事が分かりました。今後はより実験に近い設定を考察する事で光による室温超伝導の誘起の可能性を探索して行く事が我々の課題であると考えています。

また、私とともにこの研究会で発表された理研CEMSのLinさんは、Josephsonパラメトリック発振と量子情報へのその応用に関する発表を行っていました。異なる分野であるため難しいところもありましたが、超伝導を用いたデバイスがどのように応用されて行くのかを知ることが出来、勉強になりました。

研究会において参加者の方々からさまざまな質問やコメントをいただき実りの多い研究会であったと感じております。ImPACTプログラムは幅広い分野の研究者が集まっています。このような機会を十二分に生かすためには、積極的な意見交換やそれに基づいた分野を横断した広い視点を通して研究を進めて行く事が今後いっそう重要になると感じました。

エッセイ

Essay

我々は古典的な世界の存在であり、ある対象がどういう状態にあるのかということとその対象に対する観測結果がどうなるのか、の間には1対1の対応が付けられることを当たり前のことだと思っている。これを物理的実在という。その猫は生きていたり、その電車は止まっていたり、という客観的な事実がこの世界を支配していると考えがちである。しかし、量子力学を学んだ者は、この世界を支配する根本的な法則によれば、そのような物理的実在あるいは古典の世界というのは、量子力学的基盤の中から例外的に現われる特殊な状態であることを知っている。量子の世界では、対象は相反する状態に同時にまたがって存在し、それぞれの状態に存在する確率振幅という1種の情報がすべてを支配する。その抽象的な情報を表す波動関数がいつどのようにして物理的実在（観測結果）に姿を変えるのか、という問題は量子—古典クロスオーバーと呼ばれ、長年にわたり研究者を魅了してきたテーマである。

量子—古典クロスオーバーは我々にとって身近な問題である。医療の現場や脳科学の実験室で大活躍のMRIは、水の分子を構成するプロトンの原子核スピンの位相緩和 (T_2^*) 時間から生体内の情報を得ている。生体は古典的な世界に属する物理的実在であると我々は考えがちである。確かに、それぞれの原子核スピンは上向きの状態か下向きの状態のいずれかに定まっている。しかし、 $\pi/2$ パルスと呼ばれる電磁波を照射すると、瞬間的にはあるが、それぞれの原子核スピンは上向きの状態と下向きの状態に同時にまたがって存在する量子力学的重ね合わせ状態となり、振動磁場を発生するようになる。この振動磁場は位相緩和 (T_2^*) 時間の間だけ観測され、その後消えてしまう。プロトン原子核スピンは周りの環境からのじょう乱により量子性（重ね合わせ状態）を失って古典性（上向きスピンのみか下向きスピンのみ）を獲得するためである。この量子—古典クロスオーバーにかかる T_2^* 時間こそが生体系の局所情報を我々に教えてくれているのである。

21世紀は光の世紀であると言われるが、それを根底で支えているのはもちろんレーザーである。現代社会では、レーザーがなければ、国際インターネットはつながらないし、飛行機は飛ばないし、車も走らない。電気もガスも水も止まってしまう。レーザーも古典的な世界

に属する物理的実在である。外部からの励起がなければレーザー媒質を構成する2準位原子は全て基底状態に存在している。しかし、外部からエネルギーを供給し2準位原子を励起状態へポンピングすると、電磁場の真空ゆらぎと結合を起し、励起状態と基底状態の重ね合わせ状態が出現する。これが量子的振動双極子の正体であり、誘導放出による原子の基底状態への回帰、コヒーレント光の発生へと至る。量子—古典クロスオーバーはコヒーレント光が発生するその一瞬の間だけレーザー媒質に実現されているのである。

さて、我々は量子—古典クロスオーバーを用いて新しいコンピュータを作ろうとしている。縮退型パラメトリック発振器 (DOPO) ネットワークにより組み合わせ最適化問題を高速に解く専用マシンを開発しようとしている。DOPOは発振しきい値以下のポンプレートでは、線形増幅器として機能する。普通のレーザー増幅器と異なる点は、光子が一つも存在しない真空場 $10>$ という純粋状態を入力すると、真空場 $10>$ と偶数光子数状態 (2 光子状態 $12>$ 、 4 光子状態 $14>$ 、など) の線形重ね合わせ状態を出力することである。この純粋状態は、真空スクイズ状態と呼ばれ、光の位相が 0 か π のいずれかの状態の重ね合わせとみなすことができる。位相が 0 を上向きスピン、位相が π を下向きスピンのみとみれば、 N 個のDOPOからなるネットワークでは 2^N 通りの異なったスピン配列が同時にネットワークに出現したことになる。その 2^N 個の状態に対する各々の確率振幅はネットワーク中での相互結合により干渉を起し、イジングモデルの基底状態に対しては増幅され、励起状態に対しては減衰される。増幅された基底状態の確率振幅は、発振しきい値で誘導放出をいち早くトリガーし、単一モード発振を実現して古典的な実在（計算結果）へと至る。この場合の量子—古典クロスオーバーは南部理論でいうところの2次相転移における自発的な対称性の破れ、そのものである。

MRIやレーザーと比べて、格段に複雑な量子—古典クロスオーバーに基づくこのコヒーレントイジングマシンが実用デバイスとして人類の役に立つものとなるのかどうか、はまだ分らない。

山本 喜久 (革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) (内閣府プログラム))

No.17 March 2016

革新的研究開発推進プログラム (ImPACT)

「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」 ニュースレター

量子ニュース

発行：革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) 「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」

〒102-0076 東京都千代田区五番町7番地 K's五番町 JST東京本部別館

本誌についてのお問い合わせ：

国立研究開発法人科学技術振興機構 革新的研究開発推進室

TEL:03-6272-3658 FAX:03-6380-8263 e-mail: impact-yymm@jst.go.jp