

機関番号：1130188420

領域設定期間： 平成27年度～令和元年度

領域番号：2703

研究領域名（和文） ハイブリッド量子科学

研究領域名（英文） Science of Hybrid Quantum Systems

領域代表者

平山 祥郎 (HIRAYAMA, Yoshiro)

東北大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：20393754

交付決定額（領域設定期間全体）：（直接経費）767,300,000円

研究成果の概要

大規模な量子結合を実現し量子コンピュータを目指す方向とは異なり、様々な物理量の間でハイブリッド量子系を実現し、Quantum Enabled Technologyに役立てるためにその基礎を確立する「ハイブリッド量子科学」を提案した。電荷（クーバー対）、電子（核）スピン、フォトン、フォノンのそれぞれの制御技術の高度化をベースに、ハイブリッド化の実現と小規模な量子結合の確立を進めるために、計画研究、公募研究を超えて研究の融合を進めた。領域の成果を通して様々な物理系の量子トランスデューサ機能の研究が進展する一方、ハイブリッド量子が意味する幅も広がった。ハイブリッド系には古典100%から量子100%まで様々な段階があるが、それぞれの段階に魅力的なものがあることを示すことができ、様々な物理系を反映して、材料、特に新規材料を巻き込んだハイブリッド化も大いに進展させることができた。

得られた具体的な成果として、電子スピン、核スピン集団の量子的な制御をシリコンや化合物半導体ナノ構造など特徴ある系で確立するとともに、カーボンナノチューブでの励起子の量子制御を実現した。特徴のある材料系として積層薄膜磁性トポロジカル絶縁体やトポロジカル絶縁体と超伝導体のハイブリッド構造で量子技術の新たな担い手となる量子状態の足掛かりを得た。ダイヤモンド中のNV中心に関しては、室温で固体系電子スピンの世界最長T₂の実現、核スピンコヒーレンスの世界初の電氣的検出、単一NV中心での世界最高磁場感度の実現、新しい量子ビットや量子中継など大きな成果が挙げられた。ナノフォトニクス的高度化では、三次元カイラルフォトニック結晶やトポロジカルフォトニクスなどで計画時の想定を超える展開が開けた。ナノファイバー共振器QED系を光ファイバーで接続することで、多数の共振器QED系がフォトン、フォノンを介してコヒーレントに結合する量子ネットワークの基礎研究も進展した。さらに、THzアンテナとして機能する金属ナノギャップ電極を用いて、単一分子テラヘルツスペクトロスコーピを開拓するとともに、分子をベースに電荷、フォノン、THzフォトン量子結合する基礎を築いた。機械的共振を用いた新しい原理による高性能テラヘルツ検出器も実現した。フォノンをベースにした量子ハイブリッド系では、量子ドットを用いた超高感度振動センサの実現、核スピンとフォノンの量子トランスデューサに応用できる技術の確立など量子トランスデューサのマイルストーンとなる基盤技術を獲得した。その他にも、フォノンの量子性に着目したフォノン伝導制御を提案、実証した。理論研究はハイブリッド量子科学の系統的な理論体系の創出、Quantum Enabled Technologyの実現に向けた設計指針と提案、様々な物理系のハイブリッド量子系の理論的理解を目指し、ハイブリッド量子系での超放射現象のエネルギ領域で数桁にわたる拡張、ハイブリッド量子系で可能となるノイズ下でも量子優位性を発揮する量子計測手法の提示などにつなげた。量子トランスデューサをユニバーサルに捉えることで、ハイブリッド量子を牽引するインパクトのある成果も生み出した。

これらの成果は、異なる物理量の間での量子トランスデューサー、様々な系や異なる材料系のハイブリダイゼーションとして十分に革新的なものであり、目的は高いレベルで達成できている。領域の活動は多くの融合研究、国際共同研究を含む形で順調であり、今後、ハイブリッド量子科学分野の確立とこの分野での日本の優位性の獲得に継続的に貢献することが期待できる。

研究分野：理工系

キーワード：ナノマイクロ量子システム、新機能量子材料、量子効果、量子トランスデューサ、量子計測、Quantum Enabled Technology、固体物性、量子情報処理、電荷、スピン、核スピン、フォトン、フォノン

1. 研究開始当初の背景

量子ナノ構造において電荷、スピン、核スピンの量子コヒーレント操作を行う研究は、量子計算を目指して世界中で活発に研究され、様々な物理量の新しい量子操作として、学術的に大きなインパクトをもたらしていた。しかし、その一方で、大規模な量子計算の実現は不確実で、量子操作の別の観点からの発展が模索されており、通常の量子計算よりかなり簡単な方法で量子シミュレーションを行う D-Wave が脚光を浴びはじめていた。そのような中で量子技術のより身近な方向として量子高感度計測、量子プローブ、量子高機能デバイスなどを目標にする Quantum Enabled Technology (量子コヒーレンスの制御によって可能となる科学技術)が世界レベルで急速に進展しはじめていた。これらの試みは、エンタングルメントによる相関が古典的干渉に比べてより強い増強効果を持つことを利用して、小規模な量子結合であってもエンタングルメントによる大幅な測定感度の向上などが期待できることを利用するものである。計測は科学技術の進展のベースであり、理学、工学から医学に至るまでの広範な分野での応用が期待される。こういった背景を受けて推進された内外の研究活動で明らかになったことは、これらの新しい応用では、異なる物理系の間で量子エンタングルメントを受け渡す手法が本質的な役割を果たすという点である。すなわち、その実現には、様々な物理量の小規模な量子トランスデューサ機能が必須となり、その実現には様々な系の制御の高度化ならびにハイブリダイゼーションが不可欠になる点であった。特に、量子情報を異なる場所に運び測定系に載せるために光子、フォノンが重要になる。光子は以前から量子光源も含め広く研究されてきたが、フォノンを扱うフォニクス分野も急激に進展している状況を勘案して、電荷(クーパー対を含む)、電子スピン、核スピン、光子、フォノンでそれぞれに実績を上げている研究者が集まり、異なる物理量の間でハイブリッド量子系を実現し、Quantum Enabled Technology に役立てるためにその基礎を確立する「ハイブリッド量子科学」の新領域を提案した。

2. 研究の目的

これまでのナノテクノロジーや量子技術の枠組みを超えて、様々な物理量の小規模な量子トランスデューサ機能を目指しハイブリッド化を推進することが本領域の研究の目的である。これらを達成するためには、それぞれの系の制御、特に量子制御の高度化も必須であり、電荷、クーパー対、スピン、核スピン、光子、フォノンなど異なる物理量の高度な制御を実現するとともに、これらのハイブリッド化を実現し小規模な量子結合を確立する。それぞれの量子系で世界的に優位に立っている研究グループが集結して、さらに第一線の理論的研究と協力して、様々なハイブリッド化を内外に先駆け達成していくことで、国内外を牽引する革新的、創造的研究を生み出し、ハイブリッド量子の学術分野を確立することを目指す。ハイブリッド量子系実現に向けて重要になる様々なナノテク材料を組み込むことでナノテクの新しい方向性を提案すること、大規模な量子集積化を目指す研究と異なり、小規模なグループでも参加することができることから、特に日本の大学で少ない量子関連の若手研究者のすそ野を広げる機会を作ること本領域の目的である。

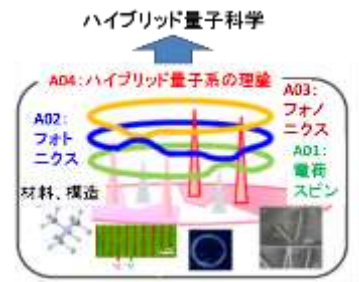


図1 本領域の簡略化した概念図

3. 研究の方法

ハイブリッド量子系の基礎を確立する領域の目的を達成するために、各計画研究がそれぞれの物理系の制御の高度化を進めるとともに、各計画研究間や公募研究間とのハイブリダイゼーションを積極的に推進した。具体的には、A01 計画研究では、電荷(クーパー対を含む)、スピン、核スピンの制御の高度化に加えて、これらと光子、フォノンの量子的な結合を目指し、A02 計画研究では THz 領域まで含めた光子の高度な制御技術の確立と光子と他の物理量の量子的な結合を目指した。A03 計画研究についてもフォノンの高度な制御技術の確立とフォノンと他の物理量の量子的な結合を目指した。A04 計画研究では量子的な結合を制御する実験の理論的支持、従来の限界を超える量子高感度計測など新しい量子的機能の提案を行い。さらに、量子トランスデューサの限界を明らかにして新しい設計指針を示した。理論は領域全体の方向性を決める重要なものであり、実験系の研究と強く連携しながら実験を包括的にリードする理論提案を目指した。また、様々な計測や量子トランスデューサには異なる仕組みが必要であることから、ナノ材料、ナノ構造の研究者を巻き込んだ研究体制を確立した。計画研究が 4 つと少なく、項目も設けていないが、これは本領域の戦略として、細分化を避けたためである。様々なハイブリッド化が最も重要な本領域では、細分化しないことで計画研究内、計画研究間の融合を推

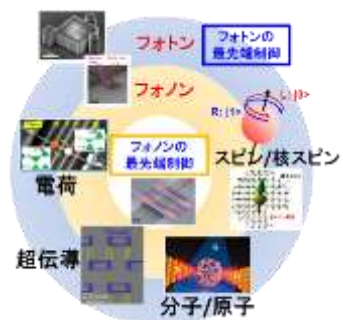


図2 計画研究のシナジー効果

進することを旨とした。さらに、公募研究についても各計画研究班を跨ぐ研究課題を積極的に採用し、公募研究が計画研究間の融合をさらに促進するように努めた。

4. 研究の成果

本領域の性格上、計画研究や公募研究をまたいだ成果が多く、特定の項目の成果とは言えないものが多いが、ここでは便宜的にある程度分類して主な成果を記述する。また、公募研究の成果も所属する計画研究の中で述べる。

電荷・スピン計画研究(A01)では、電子・クーパペア、電子・核スピンの単一及び集団的量子的な制御とその背景物理の解明あるいはフォトン、フォノンとの量子トランスデューサ機能を目指して研究した。量子媒体のハイブリッド化には材料のハイブリッド化が必要であることから、伝統的な化合物半導体ナノ構造に加え、カーボンナノ材料、トポロジカル絶縁体など新規材料系に研究を拡張した。具体例を図3に示すように、電子スピン、核スピン集団の量子的な制御をシリコン極微細トランジスタや化合物半導体ナノ構造など特徴ある系で確立するとともに、高感度核スピン計測を実現した。加えて、カーボンナノチューブ中での励起子の量子制御を実現した。異なる物理系のハイブリッド化に関して、スピン系とマイクロ波フォトンあるいはフォノンの相互作用メカニズムを明らかにするなど、量子情報処理や量子計測への発展が期待される成果が得られた。特徴のある材料系として積層薄膜化した磁性トポロジカル絶縁体やトポロジカル絶縁体と超伝導体のハイブリッド構造で量子技術の新たな担い手となる量子状態発現の足掛かりを得た。

フォトン計画研究(A02)では量子トランスデューサ機能とその実現に向けたフォトン制御の高度化を目標に研究を推進した(図4)。この目標に対して、ダイヤモンド中のNV中心を用いた超高感度・局所量子計測技術の開拓に取り組み、室温での固体系電子スピンT2の世界最長時間の実現、核スピンコヒーレンスの世界初の電気的検出、単一NV中心での世界最高磁場感度の実現、ダイヤモンドNVを用いた新しい量子ビットや量子中継など大きな成果が挙げられた。ナノフォトニクス的高度化では、三次元カイラルフォトニック結晶における量子ドット円偏光発光制御に成功し、さらに、光の軌道運動量制御やトポロジカルフォトニクスなど、計画時には想定していなかった革新的な展開が開けた。ナノファイバー共振器 QED 系を光ファイバーで融着接続し、共振器 QED 系をコヒーレントに結合する試みも大きな進展があった。THzアンテナとして機能する金属ナノギャップ電極を用いて、単一分子をトラップし、分子振動が電子伝導に与える影響を明らかにした。この成果をベースにテラヘルツスペクトロスコーピ分野を開拓するとともに、分子をベースに電荷、フォノン、THzフォトン量子結合する基礎を築いた。さらに、機械的共振を用いた新しい原理による高性能テラヘルツ検出器も実現した。

フォノン計画研究(A03)ではフォノンを中心にした量子トランスデューサ機能とその実現に向けたフォノン制御の高度化を目標に研究を推進した。この目標に対して、フォノン結晶の作製技術や、量子ドット・メカニカル共振器の量子ハイブリッド構造作製技術が大きく進展し、グラフェン成長の同位体制御など全く新しいナノ構造作製技術も確立された。量子性を活用した素子動作の実現については、図5に示すように、量子ドットを用いた超高感度振動センサの実現、核スピンとフォノンの量子トランスデューサに適用できる技術の確立、ボトル型光共振器と半導体電気機械共振器との融合による光電気機械ハイブリッドシステムの実証など量子トランスデューサのマイルストーンとなる基盤技術を獲得した。その他にも、フォノンの量子性に着目したフォノン伝導制御を提案・実証した。これらの成果は十分な学術的価値と独創的な新技術を生み出しており、目的は高いレベルで達成できた。

理論計画研究(A04)ではハイブリッド量子科学の系統的な理論体系の創出、Quantum Enabled Technology の実現へ向けた設計指針と提案、様々な物理系のハイブリッド量子系の理論的理解を目指して研究を進めた。この目標に対して、電荷、スピン、フォトン、フォノンと様々な物理系を持つ、量子光学、超伝導、半導体物性、ナノ構造物理などさまざまな分野での現象や概念を

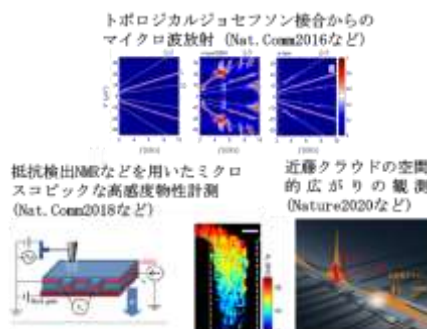


図3 電荷・スピンを中心にした成果例

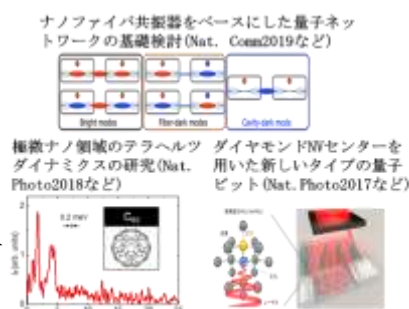


図4 フォトンを中心にした成果例

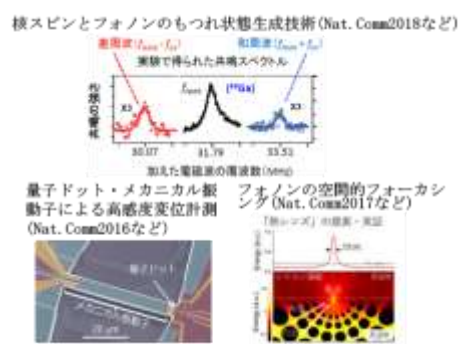


図5 フォノンを中心にした成果例

融合し、ハイブリッド化を通してユニバーサルな物理として捉えるための理論を構築した。具体例としては、図6に示すように、ハイブリッド量子系での多体相関による協同現象である超放射現象のエネルギー領域で数桁にわたる拡張などがある。さらに、ハイブリッド量子系で可能となる新しいリソースの活用や、量子テレポーテーションなどの量子プロトコルとのハイブリッド化などを通して現実的なノイズ下でも量子優位性を発揮する量子計測手法を示した。また、量子トランスデューサをユニバーサルに捉えることで、様々な組み合わせでの設計において共通に見られる特徴や問題点を設計上のノウハウとして明らかにするなど、ハイブリッド量子を牽引するインパクトのある成果を生み出した。

複数の量子ビットとマイクロ波共振器の結合 (PRL2016など)

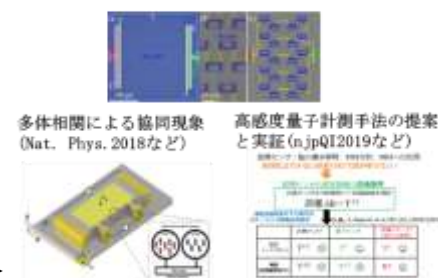


図6 理論を中心にした成果例

5. 主な発表論文等 (受賞等を含む)

主な発表論文

1. V. Borzenets, J. Shim, J. C. H. Chen, A. Ludwig, A. D. Wieck, S. Tarucha, H.-S. Sim, and M. Yamamoto, "Observation of the Kondo screening cloud", *Nature* 579, 210-213 (2020).
2. R. Wang, R. S. Deacon, J. Sun, J. Yao, C. M. Lieber, and K. Ishibashi, "Gate Tunable Hole Charge Qubit Formed in a Ge/Si Nanowire Double Quantum Dot Coupled to Microwave Photons", *Nano Lett.* 19, 1052-1060 (2019).
3. M. T. Quintino, Q. Dong, A. Shimbo, A. Soeda, and M. Mura, "Reversing Unknown Quantum Transformations: Universal Quantum Circuit for Inverting General Unitary Operations", *Phys. Rev. Lett.* 123, 210502-1-5 (2019).
4. M. Mogi, T. Nakajima, V. Ukleev, A. Tsukazaki, R. Yoshimi, M. Kawamura, K. S. Takahashi, T. Hanashima, K. Kakurai, T.-H. Arima, M. Kawasaki, and Y. Tokura, "Large Anomalous Hall Effect in Topological Insulators with Proximitized Ferromagnetic Insulators", *Phys. Rev. Lett.* 123, 16804-1-6 (2019).
5. E. D. Herbschleb, H. Kato, Y. Maruyama, T. Danjo, T. Makino, S. Yamasaki, I. Ohki, K. Hayashi, H. Morishita, M. Fujiwara, and N. Mizuochi, "Ultra-long coherence times amongst room-temperature solid-state spins", *Nat. Commun.* 10, 3766-1-6 (2019).
6. S. Kato, N. Német, K. Senga, S. Mizukami, X. Huang, S. Parkins, and T. Aoki, "Observation of dressed states of distant atoms with delocalized photons in coupled-cavities quantum electrodynamics", *Nat. Commun.* 10, 1160-1-6 (2019).
7. Y. Zhang, S. Hosono, N. Nagai, S.-H. Song, and K. Hirakawa, "Fast and sensitive bolometric terahertz detection at room temperature through thermomechanical transduction", *J. Appl. Phys.* 125, 151602-1-6 (2019).
8. H. Toida, Y. Matsuzaki, K. Kakuyanagi, X. Zhu, W. J. Munro, H. Yamaguchi, and S. Saito, "Electron paramagnetic resonance spectroscopy using a single artificial atom", *Commun. Phys.* 2, 33-1-7 (2019).
9. S. Dooley, M. Hanks, S. Nakayama, W. J. Munro, and K. Nemoto, "Robust quantum sensing with strongly interacting probe systems", *npj Quantum Information* 4, 24-1-7 (2019).
10. H. Kim, S. Park, R. Okuyama, K. Kyhm, M. Eto, R. A. Taylor, G. Nogues, L. S. Dang, M. Potemski, K. Je, J. Kim, J. Kyhm, and J. Song, "Light Controlled Optical Aharonov-Bohm Oscillations in a Single Quantum Ring", *Nano Lett.* 18, 6188-6194 (2018).
11. J. Sun, R. S. Deacon, R. Wang, J. Yao, C. Lieber, and K. Ishibashi, "Helical Hole State in Multiple Conduction Modes in Ge/Si Core/Shell Nanowire", *Nano Lett.* 18, 6144-6149 (2018).
12. T. Tsurugaya, K. Yoshida, F. Yajima, M. Shimizu, Y. Homma, and K. Hirakawa, "Terahertz spectroscopy of individual carbon nanotube quantum dots", *Nano Lett.* 19, 242-246 (2018).
13. Y. Okazaki, I. Mahboob, K. Onomitsu, S. Sasaki, S. Nakamura, N. Kaneko, and H. Yamaguchi, "Dynamical coupling between a nuclear spin ensemble and electromechanical phonons", *Nat. Commun.* 9, 2993-1-8 (2018).
14. K. Hashimoto, T. Tomimatsu, K. Sato, and Y. Hirayama, "Scanning nuclear resonance imaging of a hyperfine-coupled quantum Hall system", *Nat. Commun.* 9, 2215-1-7 (2018).
15. M. Kurosu, D. Hatanaka, K. Onomitsu, and H. Yamaguchi, "On-chip temporal focusing of elastic waves in a phononic crystal waveguide", *Nat. Commun.* 9, 1331-1-7 (2018).
16. S. Du, K. Yoshida, Y. Zhang, I. Hamada, and K. Hirakawa, "Terahertz dynamics of

- electron-vibron coupling in single molecules with tunable electrostatic potential” , Nat. Photonics 12, 608–612 (2018).
17. Y. Ota, R. Katsumi, K. Watanabe, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, “Topological photonic crystal nanocavity laser” , Commun. Phys. 1, 86–1–8 (2018).
 18. R. Ohta, H. Okamoto, T. Tawara, H. Gotoh, and H. Yamaguchi, “Dynamic control of the coupling between dark and bright excitons with vibrational strain” , Phys. Rev. Lett. 120, 267401–1–6 (2018).
 19. Y. Matsuzaki, S. Benjamin, S. Nakayama, S. Saito, and W. J. Munro, “Quantum Metrology beyond the Classical Limit under the Effect of Dephasing” , Phys. Rev. Lett. 120, 140501–1–6 (2018).
 20. Y. Hama, W. J. Munro, and K. Nemoto, “Relaxation to Negative Temperatures in Double Domain Systems” , Phys. Rev. Lett. 120, 060403–1–6 (2018).
 21. A. Angerer, K. Streltsov, T. Astner, S. Putz, H. Sumiya, S. Onoda, J. Isoya, W. J. Munro, K. Nemoto, J. Schmiedmayer, and J. Majer, “Superradiant emission from colour centres in diamond” , Nat. Phys. 14, 1168–1172 (2018).
 22. C. Uchiyama, W. J. Munro, and K. Nemoto, “Environmental engineering for quantum energy transport” , npj Quantum Information 4, 33–1–7 (2018).
 23. E. Bocquillon, R. S. Deacon, J. Wiedenmann, P. Leubner, T. M. Klapwijk, C. Brüne, K. Ishibashi, H. Buhmann, and L. W. Molenkamp, “Gapless Andreev bound states in the quantum spin Hall insulator HgTe” , Nat. Nanotech. 12, 137–143 (2017).
 24. A. Angerer, S. Putz, D. O. Krimer, T. Astner, M. Zens, R. Glattauer, K. Streltsov, W. J. Munro, K. Nemoto, S. Rotter, J. Schmiedmayer, and J. Majer, “Ultralong relaxation times in bistable hybrid quantum systems” , Sci. Adv. 3, e1701626–1–6 (2017).
 25. J. Maire, R. Anufriev, A. Ramiere, R. Yanagisawa, S. Volz, and M. Nomura, “Heat conduction tuning by wave nature of phonons” , Sci. Adv. 3, e1700027–1–6 (2017).
 26. Y. Sekiguchi, N. Niikura, R. Kuroiwa, H. Kano, and H. Kosaka, “Optical holonomic single quantum gates with a geometric spin under with a zero field” , Nature Photonics, 11, 309–314 (2017).
 27. R. Anufriev, A. Ramiere, J. Maire, and M. Nomura, “Heat guiding and focusing using ballistic phonon transport in phononic nanostructures” , Nat. Commun. 8, 15505–1–8 (2017).
 28. G. C. Knee, K. Kakuyanagi, M.-C. Yeh, Y. Matsuzaki, H. Toida, H. Yamaguchi, S. Saito, A. J. Leggett, and W. J. Munro, “A strict experimental test of macroscopic realism in a superconducting flux qubit” , Nat. Commun. 7, 13253–1–5 (2016).
 29. Y. Okazaki, I. Mahboob, K. Onomitsu, S. Sasaki, and H. Yamaguchi, “Gate-controlled electromechanical backaction induced by a quantum dot” , Nat. Commun. 7, 11132–1–6 (2016).
 30. J. Wiedenmann, E. Bocquillon, R. S. Deacon, S. Hartinger, O. Herrmann, T. M. Klapwijk, L. Maier, C. Ames, C. Brüne, C. Gould, A. Oiwa, K. Ishibashi, S. Tarucha, H. Buhmann, and L. W. Molenkamp, “ 4π -periodic Josephson supercurrent in HgTe-based topological Josephson junctions” , Nat. Commun. 7, 10303–1–7 (2016).
 31. K. Kakuyanagi, Y. Matsuzaki, C. Déprez, H. Toida, K. Semba, H. Yamaguchi, W. J. Munro, and S. Saito, “Observation of Collective Coupling between an Engineered Ensemble of Macroscopic Artificial Atoms and a Superconducting Resonator” , Phys. Rev. Lett. 117, 210503–1–6 (2016).
 32. T. Tilma, M. J. Everitt, J. H. Samson, W. J. Munro, and K. Nemoto, “Wigner Functions for Arbitrary Quantum Systems” , Phys. Rev. Lett. 117, 180401–5 (2016).

主な受賞

- 野村政宏 第16回日本学術振興会賞 (2020/2/18).
石橋幸治 応用物理学会フェロー表彰 (2019/7/1).
Russell S. Deacon 文部科学大臣表彰若手科学者賞 (2019/4/9).
平川一彦 江崎玲於奈賞 (2018/11/22).
山口浩司 ISCS- Quantum Device Award - (2018/5/29).
松崎雄一郎 日本物理学会若手奨励賞 (2017/11/18).
平川一彦 ISCS- Quantum Device Award - (2016/6/27).
大野雄高 永井科学技術財団学術賞 (2016/3/14).

ホームページ等

ハイブリッド量子科学 web ページ <http://hybridqs.org/>