

令和 4 年 6 月 29 日現在

機関番号：62615

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2015～2019

課題番号：15H05870

研究課題名（和文）ハイブリッド量子科学の理論的研究

研究課題名（英文）Theoretical Research for Hybrid Quantum Systems

研究代表者

根本 香絵（Nemoto, Kae）

国立情報学研究所・情報学プリンシプル研究系・教授

研究者番号：80370104

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 113,700,000円

研究成果の概要（和文）：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が持つ、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。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでさまざまな量子物理系は、それぞれの分野で個別に議論されることが通常であった。本研究では、これら物理学の各分野にまたがり多様な特徴をもつ量子物理系を戦略的に組み合わせ、融合することで、優れた量子性や新奇現象を見出し、またそれを高機能デバイスや新量子機能をもつデバイスの設計へ活かすことを目的として、その基礎となるハイブリッド量子系を系統的に議論し、応用するための理論体系の基礎を築いた。特に応用においては、現実的なノイズ下でも量子優位性を発揮するための各物理系の性質に基づいた個別の理論と、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した。

研究成果の概要（英文）：This research project investigated theoretical aspects of hybrid quantum systems and provided methods to realize Quantum enabled Technology. We explored various quantum physical systems including spins, photons and phonons spread over very different energy scales to design novel quantum devices which could display quantum phenomena which cannot be realized in each of the original systems. The advantages in these hybrid quantum systems were then demonstrated in designing novel quantum devices with unique quantum functions. We then proposed proof of principle experimental demonstrations and realized these novel quantum hybrid devices.

研究分野：理論物理、量子情報、量子デバイス、量子光学、量子統計物理

キーワード：量子情報 量子計測 半導体ナノワイヤ カーボンナノチューブ 量子輸送 量子ドット 量子エレクトロニクス テラヘルツ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

量子情報研究は、量子コンピュータの可能性から 1990 年代後半より急速に世界的に注目を集め、2000 年頃から量子制御技術、微細加工技術の向上を背景に、単一光子、結晶欠陥電子スピン、核スピンなど様々な制御可能な物理系が登場した。最近では D-Wave の 512 量子ビットの量子アニーリングマシンなどにみられるように、量子コヒーレンスの制御技術が 10 年前とは比較にならないほど格段に進歩したとすることができる。この技術的進歩を背景に、欧米では量子コヒーレンスによって初めて可能となる新しい量子科学や技術が急速に進展しつつあるが、このような科学技術の革新的なインパクトの全容はまだ見えてきていない。また、その基礎となる多様なハイブリッドな量子素子や量子デバイスの物理的な振る舞いなど未知な部分が多いのが現状である。ハイブリッド量子系の学理を明らかにし、数桁にまたがるエネルギー領域、さまざまな材料などを戦略的に用いた多様なハイブリッド量子素子の設計指針としての理論を構築することは、今後の量子技術の基礎として不可欠であり、新しい量子物理学の創成に貢献する。

2. 研究の目的

理論設計や理論解析により、ハイブリッド量子科学の理論的基礎の確立と領域全体の方向性を示すことを目的とする。歴史的に異なる理論背景をもつそれぞれの量子物理系の特徴を生かしたハイブリッド構造の設計方法の提案、その振る舞いの解明を理論的に行い、高感度量子計測等の応用技術のあり方を示す。各班の実験へ指針を示し、ハイブリッド量子科学の新しい理論的基礎を確立することを目指す。

3. 研究の方法

理論的な役割は主に 3 つあり、この 3 つの役割を本研究計画の 3 つの重要な柱として、融合的な研究を行う。1) 理論設計と解析：量子コヒーレンスによって従来の限界を超える量子技術の発現機構を理論的に明らかにし、素子の設計指針と評価を与える。2) 実験提案・解析：具体的な物理系に基づき、従来限界を超える量子機能を提案し、実験に指針を与える。また、そのハイブリッド量子物性を解析・理解し、新奇現象の予想とその特性を示す。3) 基盤研究：ハイブリッド量子系の設計支援を行うために、様々な材料を用いたモデルを解析可能なシミュレータを開発する。

本研究計画の特徴は、量子情報理論的に素子やデバイスの設計指針を与え、現実的なノイズ下での評価を行う。量子的な機能の発現メカニズムは複雑で、単にエンタングルメントなどのひとつの指標で整理できない。そこを理論指針の提示によって解決し、実験提案を行うことで実証実験に重要な指針を与えることができる。また、実験系で扱うハイブリッド量子系は複雑で、そこに量子性による高いゲインを生むためには、より適切な材料の選択、設計改良などが必須であり、これを可能にするシミュレータを開発する計画になっている。このように将来技術の中核となる理論、実験、基盤が融合的に計画されている例は他になく、極めて独自性の高い研究計画となっている。また、本研究計画は、Quantum Enable Technology の基礎として、効率的かつ、将来性の高い素子、デバイス技術の発展に寄与するだけでなく、量子情報理論の発展、ハイブリッド量子系がもたらす新物性を探索、量子領域の拡大による新奇物性の出現も期待され、学術的にも意義深い研究計画となっている。

4. 研究成果

ハイブリッド量子科学の理論的基礎の構築

核スピン系と電子スピン系の多体相関による協同現象の理論と実験提案を行った。二層量子ホール系の傾角反強磁性状態のように電子スピン系に線形な分散があり、それが偏極した核スピンと超微細相互作用する場合に超放射が生じる可能性を指摘した。また、A01 との共同研究及び国際共同研究により、超放射を様々なハイブリッド系で実証した。さらに、協同現象やマルチ緩和過程など、ハイブリッド量子系に共通に登場する系の対称性が引き起こす量子統計について系統的な理論を定式化した。また、この理論を元に 2 つ目の柱である実験提案と検証にも結びついた。量子協同現象のもつ特異なダイナミクスからは当初予想していなかった知見が得られ、今後さらに新しい量子デバイスへの応用が期待できる。



図 1. 協同現象のモデルと実験に用いた装置の模式図

ハイブリッド量子科学の理論的基礎の構築のために、物性理論研究を多角的に行った。電子・

フォノンのハイブリッド量子系の研究として、直列2重量子ドットの単電子輸送に伴う光学フォノンの単一生成機構を明らかにした。また、縦型2重量子ドットを用いた実験結果を定量的に説明した。カーボンナノチューブ上に作製される2重量子ドットでは、電子と振動モードの結合が非常に強い。その結果、フランク・コンドン効果が単電子輸送特性に反映されることを示した。カーボンナノチューブの電子状態、および端状態を調べ、トポロジカル絶縁体としての性質を明らかにした。すべての種類のカーボンナノチューブのトポロジをトポロジカル数によって分類し、また磁場によるトポロジカル相転移を予言した。カーボンナノチューブの基礎研究において、トポロジカル物性という新しい分野を開拓した。理論的に予言したトポロジカル相転移は、端状態の観測によって観測可能である。トポロジカル絶縁体の研究としても、新しい研究対象の創出になる。

複数の量子ビットとマイクロ波共振器の結合を提案し、実験的に検証した。量子センシング技術においては、量子ビットのアレー化により、古典限界を超えた高い磁場感度が得られることが期待されている。この実現に向けて、4300個の量子ビットを単一のマイクロ波共振器と結合させる実験にとり組み、シミュレーションとの比較により、実際に殆どの量子ビットが共振器と結合していることを示した。

高感度量子計測手法の提案と実証を行った。高感度量子計測について様々な角度から研究を行った。量子テレポーテーションを用いた量子プロトコルのハイブリッド化により、高感度な量子センサーを構成する手法を提案し、測定時間 (T) に対して、古典限界を上回る推定誤差 (1/T) で小さくなるプロトコルを開発した。また、A04、A02 との共同研究により超伝導量子回路と電子スピンの結合系を用いたエネルギー射影測定に関する理論提案や、NV ダイアモンドなどのスピン集団を用いた新しい量子センサーを提案した。

電子・フォノンのハイブリッド量子系の理論研究においては、量子ドットに THz 光を照射したときの光電流を考察し、単一量子ドットにおける光電流の表式を理論的に導くことで A02 の実験結果を説明した。複数の量子ドットの並列系における光電流を定式化し、量子ドット間のエンタングルメント生成による光電流の増大機構を提案した。テラヘルツ波における高感度の検出器の作製の観点から重要な成果で、素子の設計指針と具体的な実験提案を示した。

本研究では、このように多角的な視点からハイブリッド量子科学の学理とその応用としての Quantum Enabled Technology の方法論を系統的に構築した。



図2. ノイズがある環境下での磁場センサーの特徴的な振舞い

ハイブリッド量子系の設計支援環境の構築

ハイブリッド量子系の設計支援環境の構築を目的として、① ファンデルワールス (vdW) ヘテロ構造デバイスの量子輸送シミュレータ、② グラフェン・量子ドットハイブリッド系および乱層グラフェンのモンテカルロ (MC) シミュレータ、③ R 行列理論および非平衡グリーン関数 (NEGF) 法に基づくグラフェンの熱輸送シミュレーションプログラムを開発し、2次元物質からなるデバイスの設計支援を行う環境を構築した。

密度汎関数理論から面間電子輸送特性を予測する計算手法を確立し、それに基づく電子輸送シミュレータを開発した。これにより、実験的知見が不十分な新材料からなるデバイスの性能予測が可能になった。本シミュレータを用いて、MoS2, WS2, MoSe2, WSe2, MoTe2 および WTe2 からなるトンネルトランジスタの性能比較を行い、WSe2 伝導帯がバンド間トンネルに参与するデバイス構造が良好なオン特性を示すことを見出した。また、Q点を介したバンド間トンネルが大きな寄与を示すためであることを明らかにした。さらに、黒リン/InSe vdW ヘテロ接合電界効果トランジスタの特異な電流電圧特性を明らかにした。

乱層グラフェンの電子状態を自己無撞着的に定め、それを用いて MC 法により電子移動度・ドリフト速度をシミュレーションするプログラムを作成した。領域内の連携により共同研究を実施し、遮蔽効果が電子移動度・ドリフト速度に与える影響を定量的に評価した。

同位体不純物を含むグラフェンの熱コンダクタンスを計算し、領域内連携により実験での測定結果と矛盾しない結果を示した。

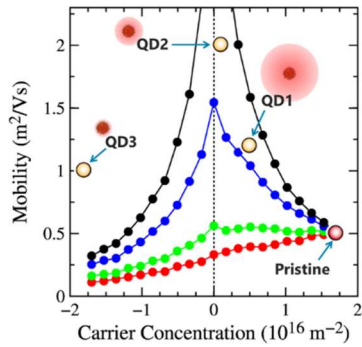


図3. グラフェン・量子ドットハイブリッド系における電子移動度のキャリア密度依存性 [2D Materials 4, 025026 (2017) ; 2D Materials 4, 031001 (2017)]. 黒、青、緑、赤丸は、モンテカルロシミュレーションの結果であり、それぞれ、相関長を5, 10, 20, 30 nmと仮定した場合。異なる量子ドットサイズの測定結果(QD1, QD2, QD3)および量子ドットが存在しない系(Pristine)の測定結果と比較した。

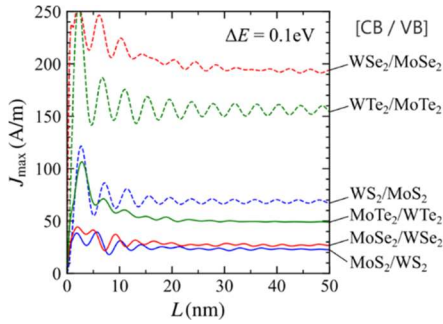


図4. 遷移金属ダイカルコゲナイド・ヘテロ接合トンネルトランジスタの最大電流 J_{\max} のチャンネル長依存性 [Journal of Physics D: Applied Physics, 53, 255107 (2020)]. チャンネル長が長くなると J_{\max} が一定の値に近づき、WSe₂ 伝導帯(CB)とMoSe₂ 価電子帯(VB)とのバンド間トンネルを利用したデバイスが良好なオン特性を示す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計88件（うち査読付論文 88件 / うち国際共著 23件 / うちオープンアクセス 29件）

1. 著者名 M. H. Fauzi, William J. Munro, Kae Nemoto, and Y. Hirayama	4. 巻 104
2. 論文標題 Double nuclear spin relaxation in hybrid quantum Hall systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 L121402(1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.L121402	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 N. Mori, A. Komada, and G. Mil'nikov	4. 巻 9
2. 論文標題 Comparison of linear and quadratic dispersion models for phonon transport in one-dimensional mass-disordered systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 APL Materials	6. 最初と最後の頁 08112 (1-7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0058493	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 R. Negishi, K. Yamamoto, H. Tanaka, S. A. Mojtahedzadeh, N. Mori, Y. Kobayashi	4. 巻 11
2. 論文標題 Crossover point of the field effect transistor and interconnect applications in turbostratic multilayer graphene nanoribbon channel	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 10206 (1-11)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-89709-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 A. Sakurai, V. M. Bastidas, W. J. Munro, Kae Nemoto	4. 巻 126
2. 論文標題 Chimera Time-Crystalline order in quantum spin networks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 120606 (1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.126.120606	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mikio Eto and Rui Sakano	4. 巻 102
2. 論文標題 Fano-Kondo resonance versus Kondo plateau in an Aharonov-Bohm ring with an embedded quantum dot	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. B	6. 最初と最後の頁 245402(1-16)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.245402	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 F. Hashimoto, H. Tanaka, and N. Mori	4. 巻 53
2. 論文標題 Material dependence of band-to-band tunneling in van der Waals heterojunctions of transition metal dichalcogenides	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 255107 (1-13)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/ab7ca6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Q. Lv, F. Yan, N. Mori, W. Zhu, C. Hu, Z. R. Kudrynskiy, Z. D. Kovalyuk, Amalia Patane, and K. Wang	4. 巻 30
2. 論文標題 Interlayer band-to-band tunneling and negative differential resistance in van der Waals BP/InSe field effect transistors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Functional Materials	6. 最初と最後の頁 1910713 (1-7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adfm.201910713	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. Kajiwara and N. Mori	4. 巻 58
2. 論文標題 Nonequilibrium Green function simulation of coupled electron-phonon transport in one-dimensional nanostructures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SDDE05 (1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab0df3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Hoshino and N. Mori	4. 巻 58
2. 論文標題 Electron mobility calculation for two-dimensional electron gas in InN/GaN digital alloy channel high electron mobility transistors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SCCD10 (1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab0409	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Toida Hiraku, Matsuzaki Yuichiro, Kakuyanagi Kosuke, Zhu Xiaobo, Munro William J., Yamaguchi Hiroshi, Saito Shiro	4. 巻 2
2. 論文標題 Electron paramagnetic resonance spectroscopy using a single artificial atom	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 33(1-7) (43553)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42005-019-0133-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Rin Okuyama, Wataru Izumida, and Mikio Eto	4. 巻 99
2. 論文標題 Topological classification of the single-wall carbon nanotube	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 115409(1-10)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.115409	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 V. M. Bastidas, B. Renoust, Kae Nemoto, and W. J. Munro	4. 巻 98
2. 論文標題 Ergodic-localized junctions in periodically driven systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 224307(1-10)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.224307	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yusuke Hama, Emi Yukawa, William J. Munro, and Kae Nemoto	4. 巻 98
2. 論文標題 Negative-temperature-state relaxation and reservoir-assisted quantum entanglement in double-spin-domain systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 052133(1-15)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.98.052133	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 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	4. 巻 18
2. 論文標題 Light Controlled Optical Aharonov-Bohm Oscillations in a Single Quantum Ring	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 NANO Letters	6. 最初と最後の頁 6188-6194
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.8b02131	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Andreas Angerer, Kirill Streltsov, Thomas Astner, Stefan Putz, Hitoshi Sumiya, Shinobu Onoda, Junichi Isoya, William J. Munro, Kae Nemoto, Joerg Schmiedmayer & Johannes Majer	4. 巻 14
2. 論文標題 Superradiant emission from colour centres in diamond	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature Physics	6. 最初と最後の頁 1168-1172
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41567-018-0269-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Chikako Uchiyama, William J. Munro, and Kae Nemoto	4. 巻 4
2. 論文標題 Environmental engineering for quantum energy transport	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 npj Quantum Information	6. 最初と最後の頁 33(1-7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41534-018-0079-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shane Dooley, Michael Hanks, Shojun Nakayama, William J. Munro, and Kae Nemoto	4. 巻 4
2. 論文標題 Robust quantum sensing with strongly interacting probe systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 npj Quantum Information	6. 最初と最後の頁 24(1-7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41534-018-0073-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 R. Okuyama, W. Izumida, and M. Eto	4. 巻 969
2. 論文標題 Topology in single-wall carbon nanotube of zigzag and armchair type	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conf. Series	6. 最初と最後の頁 012137(1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/969/1/012137	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yuichiro Matsuzaki, Simon Benjamin, Shojun Nakayama, Shiro Saito, and William J. Munro	4. 巻 120
2. 論文標題 Quantum Metrology beyond the Classical Limit under the Effect of Dephasing	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett.	6. 最初と最後の頁 140501(1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.120.140501	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yusuke Hama, William J. Munro, Kae Nemoto	4. 巻 120
2. 論文標題 Relaxation to Negative Temperatures in Double Domain Systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 060403(1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.120.060403	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Andreas Angerer, Stefan Putz, Dmitry O. Krimer, Thomas Astner, Matthias Zens, Ralph Glattauer, Kirill Streltsov, William J. Munro, Kae Nemoto, Stefan Rotter, Joerg Schmiedmayer and Johannes Majer	4. 巻 3
2. 論文標題 Ultralong relaxation times in bistable hybrid quantum systems	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 e1701626(1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.1701626	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 O. Makarovsky, L. Turyanska, N. Mori, M. Greenaway, L. Eaves, A. Patane, M. Fromhold, S. Lara-Avila, S. Kubatkin, and R. Yakimova	4. 巻 4
2. 論文標題 Enhancing optoelectronic properties of SiC-grown graphene by a surface layer of colloidal quantum dots	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 2D Materials	6. 最初と最後の頁 031001 (1-7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2053-1583/aa76bb	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 L. Turyanska, O. Makarovsky, L. Eaves, A. Patane, and N. Mori	4. 巻 4
2. 論文標題 Mobility enhancement of CVD graphene by spatially correlated charges	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 2D Materials	6. 最初と最後の頁 025026-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2053-1583/aa55b4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Rin Okuyama, Wataru Izumida, and Mikio Eto	4. 巻 86
2. 論文標題 Topological Phase Transition in Metallic Single-Wall Carbon Nanotube	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 013702(1-4)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.86.013702	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kosuke Kakuyanagi, Yuichiro Matsuzaki, Corentin Deprez, Hiraku Toida, Kouichi Semba, Hiroshi Yamaguchi, William J. Munro, and Shiro Saito	4. 巻 117
2. 論文標題 Observation of Collective Coupling between an Engineered Ensemble of Macroscopic Artificial Atoms and a Superconducting Resonator	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett.	6. 最初と最後の頁 210503(1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.117.210503	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 George C. Knee, Kosuke Kakuyanagi, Mao-Chuang Yeh, Yuichiro Matsuzaki, Hiraku Toida, Hiroshi Yamaguchi, Shiro Saito, Anthony J. Leggett, and William J. Munro	4. 巻 7
2. 論文標題 A strict experimental test of macroscopic realism in a superconducting flux qubit	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 13253(1-5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/ncomms13253	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Todd Tilma, Mark J. Everitt, John H. Samson, William J. Munro, and Kae Nemoto	4. 巻 117
2. 論文標題 Wigner Functions for Arbitrary Quantum Systems	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett.	6. 最初と最後の頁 180401(1-5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.117.180401	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 D. M. Di Paola, M. Kesaria, O. Makarovskiy, A. Velichko, L. Eaves, N. Mori, A. Krier, and A. Patane	4. 巻 6
2. 論文標題 Resonant Zener tunnelling via zero-dimensional states in a narrow gap diode	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 32039(1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/srep32039	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Shane Dooley, William J. Munro, and Kae Nemoto	4. 巻 94
2. 論文標題 Quantum metrology including state preparation and readout times	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Phys. Rev. A	6. 最初と最後の頁 052320(1-7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.94.052320	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Tanaka, P. Knott, Y. Matsuzaki, S. Dooley, H. Yamaguchi, W. J. Munro, and S. Saito	4. 巻 115
2. 論文標題 Proposed Robust Entanglement-Based Magnetic Field Sensor Beyond the Standard Quantum Limit	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 170801(1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.115.170801	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計284件 (うち招待講演 38件 / うち国際学会 179件)

1. 発表者名 V. M. Bastidas, Chen Zha, Ming Gong, Yulin Wu, Hao Rong, Rui Yang, Yangsen Ye, Shaowei Li, Qingling Zhu, Shiyu Wang, Youwei Zhao, Futian Liang, Jin Lin, Yu Xu, Cheng-Zhi Peng, Jorg Schmiedmayer, Kae Nemoto, Hui Deng, W. J. Munro, Xiaobo Zhu, Jian-Wei Pan
2. 発表標題 Quantum simulation with periodically-driven superconducting quantum processors
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kae Nemoto
2. 発表標題 The Internet of Quantum Things
3. 学会等名 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE20) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nemoto Kae, Michael Hanks, Nicolo Lo Piparo, William J. Munro
2. 発表標題 Distributed Quantum Computation - How Does it Scale?
3. 学会等名 IEEE Photonics Society IPC 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kae Nemoto
2. 発表標題 Universal Quantum Simulation with a One-dimensional Quantum Processor
3. 学会等名 OSA Quantum 2.0 Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kae Nemoto, Nicolo Lo Piparo, Michael Hanks, Claude Gravel, William J. Munro
2. 発表標題 Quantum network with error correction
3. 学会等名 OSA Advanced Photonics Congress, Signal Processing in Photonic (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 内山智香子, 根本香絵
2. 発表標題 Energy flow control via quantum structured network
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 N. Mori, G. Mil'nikov, J. Iwata, and A. Oshiyama
2. 発表標題 RSDFT-NEGF quantum transport simulation of ultra-small field-effect transistors
3. 学会等名 The 4th IEEE Electron Devices Technology and Manufacturing (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 N. Lo Piparo, M. Hanks, C. Gravel, W. J. Munro and K. Nemoto
2. 発表標題 Quantum multiplexing for error correction codes
3. 学会等名 Workshop on Quantum Networks and Quantum Information (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kae Nemoto
2. 発表標題 Quantum device design with noise
3. 学会等名 Quantum Information Processing in Non-Markovian Quantum Complex Systems (QIPQC2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 濱 祐介
2. 発表標題 磁性トポロジカル絶縁体表面におけるスピントロニック・マルチフェロイック機能
3. 学会等名 第3回 CSRN-Tokyo Workshop 2019—スピントロニクス新機能物質と巨大物性応答 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mikio Eto
2. 発表標題 Kondo effect and phase measurement in quantum dot embedded in mesoscopic ring
3. 学会等名 14th Asia Pacific Physics Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kae Nemoto
2. 発表標題 Quantum Complex Networks
3. 学会等名 Workshop on Selected Topics in Quantum Computation and Quantum Information (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mikio Eto
2. 発表標題 Detector of THz light using an array of quantum dots
3. 学会等名 応用物理学会 量子情報研究グループ研究会 (Frontiers in Hybrid Quantum Science) (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kae Nemoto
2. 発表標題 New approaches to quantum computation
3. 学会等名 Japan-Netherlands Quantum Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Michael Hanks
2. 発表標題 The Many Faces of Quantum Device Design
3. 学会等名 AQIS 2019 Satellite Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mikio Eto
2. 発表標題 Kondo effect in quantum dot interferometer in multiterminal geometry
3. 学会等名 5th EMN Meeting on Quantum (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kae Nemoto
2. 発表標題 DISTRIBUTED QUANTUM INFORMATION PROCESSING
3. 学会等名 SPIE. Optics + Photonics 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mikio Eto
2. 発表標題 Physics in double quantum dot in parallel
3. 学会等名 Canada-Japan Workshop on Hybrid Quantum Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kae Nemoto
2. 発表標題 Superradiance and thermalization in hybrid quantum systems
3. 学会等名 AIP Congress 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森 伸也
2. 発表標題 電子とフォノンのマルチフィジクスシミュレーション
3. 学会等名 第212回シリコンテクノロジー分科会研究集会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 濱 祐介、湯川 英美、ウィリアム マンロー、根本 香絵
2. 発表標題 [講演奨励賞受賞記念講演] 二つのドメインから成るスピン系における負温度スピン状態への緩和現象と量子エンタングルメント
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N. Mori, G. Mil'nikov, J. Iwata, and A. Oshiyama
2. 発表標題 Quantum transport device simulation based on real-space density functional theory and non-equilibrium Green's function method
3. 学会等名 International Union of Materials Research Societies - International Conference on Electronic Materials 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kae Nemoto, Michael Hanks, Nicolo Lo Piparo, and William J. Munro
2. 発表標題 Universal Optical Modules for Quantum Network
3. 学会等名 Summer Topicals Meeting Series 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 William J. Munro, Nicolo Lo Piparo, and Kae Nemoto
2. 発表標題 Quantum Multiplexing as a Resource Saver in Quantum Networks
3. 学会等名 Summer Topicals Meeting Series 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kae Nemoto
2. 発表標題 Scalability of quantum networks from a qubit to tomorrows quantum internet
3. 学会等名 The Quantum Internet; Charting the Critical Path (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 江藤幹雄
2. 発表標題 カーボンナノチューブにおけるトポジカル物性
3. 学会等名 物質科学シンポジウム：半導体物理、2次元物質科学の半世紀 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森 伸也, 美里劫 夏南, 鍾 菁廣, 牧平 真太郎, 鎌倉 良成, 岩田 潤一, 押山 淳
2. 発表標題 量子効果を考慮した半導体デバイスシミュレーション
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鍾菁廣、森伸也、廣木彰、小田紳二
2. 発表標題 量子ドリフト拡散モデルによる - 族FinFETの短チャネル効果解析
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Matsuzaki, S. Saijo, H. Morishita, T. Shimooka, T. Tashima, K. Kakuyanagi, K. Semba, W. J. Munro, H. Yamaguchi, S. Saito, K. Hayashi, I. Hanano, H. Watanabe, N. Mizuochi, and J. Ishi-Hayase,
2. 発表標題 Characterization and use of an ensemble of NV centers in diamond
3. 学会等名 日本学術振興会「先端ナノデバイス・材料テクノロジー」151委員会 平成29年度第5回研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森 伸也, 美里劫 夏南, 岩田 潤一, 押山 淳
2. 発表標題 極微細トランジスタの量子輸送シミュレーション
3. 学会等名 シリコン材料・デバイス研究会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名	Michael Hanks, Nicolo Lo Piparo, Michael Trupke, Jorg Schmiedmayer, William J. Munro, and Kae Nemoto
2. 発表標題	A universal quantum module for quantum communication, computation, and metrology
3. 学会等名	SPiE Quantum Photonic Devices Conference (OP17N) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年	2017年

1. 発表者名	Kae Nemoto
2. 発表標題	A Universal Quantum Module For Quantum Computation and Communication
3. 学会等名	CLEO-Pacific Rim (CLEO-PR 2017), 22nd OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2017) & the 5th Photonics Global Conference 2017 (PGC 2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年	2017年

1. 発表者名	森伸也
2. 発表標題	量子論に基づくデバイスシミュレータの開発
3. 学会等名	第30期CAMMフォーラム 本例会
4. 発表年	2017年

1. 発表者名	Yuichiro Matsuzaki, Kosuke Kakuyanagi, Corentin Deprez, Hiraku Toida, Kouichi Semba, Hiroshi Yamaguchi, William J. Munro, and Shiro Saito
2. 発表標題	Observation of Collective Coupling between an Engineered Ensemble of Macroscopic Artificial Atoms and a Superconducting Resonator
3. 学会等名	Interdisciplinary Workshop on Quantum Devices 2017 (IWQD 2017) (国際学会)
4. 発表年	2017年

1. 発表者名 N. Mori
2. 発表標題 Recent progress in NEGF simulation of electron and phonon transport in nano-devices
3. 学会等名 Short Course, 2016 International Conference on Solid State Devices and Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 H. Minari, G. Pourtois, and N. Mori
2. 発表標題 Applications of atomistic simulations to the development of advanced electronic devices
3. 学会等名 25th Annual Meeting of MRS-J (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2015年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<ul style="list-style-type: none"> ・ハイブリッド量子科学: http://quant-trans.org/lab/hybridqs.html ・NII Open House 2017「光をめぐるハイブリッド量子科学+量子の世界を可視化する」 ・NII Open House 2018「量子コンピュータへの挑戦+多様化するハイブリッド量子科学」 ・NII Open House 2019「量子情報技術を支える誤り訂正+電荷・スピンをめぐるハイブリッド量子科学」 ・NII Open House 2020「量子シミュレータで複雑な現象をつかむ-量子の世界に潜むスケールフリーネットワーク」 ・International Workshop for Young Researchers on the Future of Quantum Science and Technology(FQST2020) (2020年2月3日~6日) ・江藤幹雄: APS journals Outstanding Referees 受賞 (2017) ・松崎雄一郎: 日本物理学会若手奨励賞 受賞 (2017) ・濱祐介: 応用物理学会講演奨励賞 受賞(第65回応用物理学会春季学術講演会) (2018) ・根本香絵: 国家功労勲章オフィシエ "d'Officier de l'Ordre national du Merite" (仏国) 受章 (2022)

6. 研究組織			
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	江藤 幹雄 (Eto Mikio) (00221812)	慶應義塾大学・理工学部(矢上)・教授 (32612)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	松崎 雄一郎 (Matsuzaki Yuichiro) (10618911)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員 (82626)	
研究分担者	森 伸也 (Mori Nobuya) (70239614)	大阪大学・工学研究科 ・教授 (14401)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	林 正彦 (Hayashi Masahiko)	秋田大学・教育文化学部・教授 (11401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会 The JSAP Workshop on Quantum Information and Related Fields	開催年 2017年～2017年
---	--------------------

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
英国	Imperial College London	University of York	Univeristy of Nottingham	
スウェーデン	KTH Royal Institute of Technology			
シンガポール	MajuLab			
オーストラリア	The University of Queensland	University of Technology Sydney	Royal Melbourne Institute of Technology	他1機関
オーストリア	TU Wien(ウィーン工科大学)			
カナダ	University of Toronto			
ドイツ	University of Regensburg			