

研究終了報告書

「量子状態の制御と保護を両立させる相転移環境」

研究期間：2017年10月～2021年3月

研究者：馬場 基彰

1. 研究のねらい

本さがけ研究領域「量子の状態制御と機能化」および戦略目標「量子状態の高度制御による新たな物性・情報科学フロンティアの開拓」は、数十年にわたって世界中で研究が続けられてきている、量子科学技術を基盤としたものである。この数年で、量子科学技術が世界的に改めて注目されるようになったことで、これらの戦略目標や研究領域が立ち上がった。

量子科学技術の大半は、物質や電磁波の量子論的な状態(量子状態)のコヒーレント(位相の揃った)なダイナミクスという物理(現象)に基づいてこれまで構築され、発展してきた。これらの量子状態(の位相)を乱さずに制御することが、量子状態を活用した機能(量子機能)の発現のために肝心である。しかしながら、意図しないノイズなど(デコヒーレンス)によって量子状態は容易に壊れてしまう。量子状態を保護しようとするればその制御性が低下し、制御性を高めれば量子状態が容易に壊れてしまうというトレードオフが原理的に存在する。これが量子科学技術の社会・経済的な波及を阻む原因の1つである。

本研究のねらいは、これまでコヒーレントなダイナミクス(非平衡状態)に基づいて発展してきた量子科学技術に対して、これまでほとんど考慮されてこなかった「相転移」という熱平衡下の物理現象を積極的に導入することで、量子状態の制御と保護を両立させ、量子科学技術における革新を産み出そうというものである。

量子状態を制御する代表的な対象として、光子(電磁波の量子)がある。1973年に、光子が熱平衡下で相転移することが理論的に提唱された。これは超放射相転移と呼ばれている。しかしながら、本研究開始(2017年)当初においても、超放射相転移が観測された例がなかった。一方で、本さがけ研究者は2016年に、超伝導回路において超放射相転移が起きることを理論的に見いだすことに成功した。超伝導回路は、近年の量子計算機開発における代表的な物理系である。研究者が見いだした超放射相転移を実験的に確認し、量子計算機開発やその他の量子技術に活用する、もしくは、まったく新しい機能を発現させる。これが、より具体的な本研究のねらいである。

2. 研究成果

(1)概要

1973年の理論提案以来、観測された例のなかった超放射相転移について、磁性体 ErFeO_3 において、それが温度約4Kにて起きることを実験的・理論的に世界で初めて確認した。これにより、本研究のねらいを、机上の空論ではなく、実際に実現可能なものとした。

また、類似の磁性体 YFeO_3 に対して外部磁場を印加することで、 YFeO_3 中のマグノン(スピン波)モード間の結合が制御できることを実験的にデモンストレーションした。これにより、超放射相転移を活用した量子機能を発現させるにあたり、様々なプロトコルを実際に実施可能であることを明確に示した。

さらに、超放射相転移の相転移点において、非常に強い量子スクイーディングが得られることを理論的に見いだした。量子スクイーディングとは、光子などの(電場や磁場の)量子ゆらぎが抑制された状態であり、通常は上記のコヒーレントダイナミクスによって生成される。しかしながら、レーザー光や非線形光学結晶、その他の光学素子などにおけるデコヒーレンスによって、実際に得られる量子スクイーディングが実用化レベルになかなか達しないことが常に問題となる。一方、本研究で見いだした量子スクイーディングは、熱平衡下で安定に得られるものであり、あらゆるデコヒーレンスに対して量子スクイーズド状態への復元力を有している。そのため、従来よりも高レベルな量子スクイーディングを安定して取得できる可能性がある。

上記のモード間結合を十分にゆっくりと実施すれば、熱平衡下の量子スクイーズド状態を保護したまま制御できることはほぼ自明である。すなわち、本研究のねらいであった、超放射相転移による量子状態の制御と保護の両立を理論的・実験的に示した。

量子スクイーディングの典型的な機能性として、様々なセンサー(電場や磁場などの検出)が挙げられる。超放射相転移は現時点において、本研究によって、磁性体 ErFeO_3 でのみ世界的に確認されている。ここで得られるのはマグノンの量子スクイーディングである。すなわち、磁性体中のマグノンの量子ゆらぎを測定することによって、電場や磁場、磁化(スピン)ダイナミクス、また暗黒物質の候補であるアクシオンなどの検出において、古典的な精度を超えた検出が可能となる。従来よりも高レベルかつ安定な量子スクイーディングによって、従来のセンサーよりも高精度な検出が可能になり得ることを、本研究の成果は意味する。

(2) 詳細

研究テーマA「相転移点での完全な量子スクイーディングの発見」

本さがけ研究で注目する超放射相転移を詳しく解析することで、相転移点において、完全な量子スクイーディングが系の基底状態にて得られること(量子ゆらぎが完全に抑えられること)を理論的に明らかにした。この量子スクイーディングは熱平衡下でも安定に得られることから、従来の量子スクイーディングよりも高レベルなものが得られると期待される。研究テーマDと量子ゆらぎ測定を組み合わせることで、電場や磁場、磁化ダイナミクスなどの高精度検出が可能となることを意味している。

具体的には、超放射相転移が起こる典型的なモデルであるDickeモデル(光子場と原子集団が結合したモデル)を解析し、その基底状態が理想的な量子スクイーズド状態となること(量子ゆらぎがHeisenbergの不確定性の等式を満たすこと)を解析計算によって明らかにした。さらに、光子場と原子との結合の強さを変えた際に現れる量子相転移点において、ある基底での量子ゆらぎがゼロになる(それに共役な量子ゆらぎは発散する)ことも解析的に示した。つまり、超放射相転移の量子相転移点において、完全に理想的な量子スクイーディングが得られることを示した。本研究成果は[1]にて報告した。

[1] K. Hayashida, T. Makihara, N. M. Peraca, D. F. Padilla, H. Pu, J. Kono, and M. Bamba, arXiv:2009.02630 [quant-ph].

研究テーマB「超放射相転移の確認」

1973年に理論的に提唱されたものの観測例のなかった超放射相転移を、磁性体 ErFeO_3 にて実験的・理論的に世界で初めて確認した。これにより、研究テーマAの量子スクイージン

グが実際に得られる物理系を具体的に示した。さらに、 ErFeO_3 におけるマグノンの量子ゆらぎを測定することで、電場や磁場、磁化ダイナミクスを高精度に検出できる可能性を示した。

具体的には、 ErFeO_3 において、Er スピン集団と Fe マグノンモードとの結合の強さが Er 密度の平方根に比例することを、静磁場下のテラヘルツ振動数帯での吸収スペクトル測定によって実験的に確認した[2]。結合の強さ(共鳴振動数の反発の大きさ)が Er 密度の平方根に比例すること(Er スピン集団と Fe マグノンの協同効果)は、超放射相転移が起こるための必要条件であり、それを実験的に確認した。

さらに、そこで得られた共鳴振動数の磁場依存性の実験結果などを用い、 ErFeO_3 のスピンモデルを具体的に考え、理論的に解析した結果、 ErFeO_3 にて約 4 K で起こることが知られている相転移が、超放射相転移であることを定量的に理論的に証明した。具体的には、相転移を引き起こす寄与として、Er 集団と Fe マグノンとの結合の他に、Er 間の交換相互作用の寄与もあるところ、後者がたとえゼロであっても、前者だけで相転移が起こることを確認した。

[2] X. Li, M. Bamba, N. Yuan, Q. Zhang, Y. Zhao, M. Xiang, K. Xu, Z. Jin, W. Ren, G. Ma, S. Cao, D. Turchinovich, and J. Kono, *Science* **361**, 794 (2018). 代表的な論文2

[3] M. Bamba, X. Li, N. M. Peraca, and J. Kono, arXiv:2007.13263 [quant-ph].

研究テーマC「量子スクイーピングの兆候の実験観測」

光子場と物質との結合によって、系の基底状態にて量子スクイーピングが起こっている兆候を世界で初めて実験的に確認した。超放射相転移していない通常相でも、不完全ながら量子スクイーピングが得られることは、1980年代から指摘されているが、量子スクイーピングが起こっている実験的な証拠は未だ確認されていなかった。本研究成果は、研究テーマAの兆候を示したというだけでなく、上述の高精度検出が実際に実施可能であることを意味している。

具体的には、静磁場下の二次元電子系で得られるサイクロトロン共鳴とテラヘルツ波とが結合する系において、量子スクイーピングの起源となる反回転型の結合の寄与(真空 Bloch-Siegert シフト)を明確に実験的に確認した[4]。

[4] X. Li, M. Bamba, Q. Zhang, S. Fallahi, G. C. Gardner, W. Gao, M. Lou, K. Yoshioka, M. J. Manfra, and J. Kono, *Nature Photonics* **12**, 324 (2018).

研究テーマD「様々な結合の制御実験」

熱平衡下の量子スクイーピングを示す系と別の自由度(電磁波やマグノンモード)との結合が制御できることを実験的にデモンストレーションした。このような結合の制御が可能となることで、熱平衡下の量子スクイーピングを活用した、様々な量子機能プロトコル(例えば高精度検出)が可能となる。

具体的には、整列させたカーボンナノチューブと赤外波長の光子場との結合の制御[5]、および磁性体 YFeO_3 における2つのマグノンモード間の結合の制御[6]をデモンストレーションした。

[5] W. Gao, X. Li, M. Bamba, and J. Kono, *Nature Photonics* **12**, 362 (2018);

[6] T. Makihara, K. Hayashida, G. T. Noe, X. Li, N. M. Peraca, X. Ma, Z. Jin, W. Ren, G. Ma, I.

Katayama, J. Takeda, H. Nojiri, D. Turchinovich, S. Cao, M. Bamba, and J. Kono, Nature Communications 12, 3115 (2021). 代表的な論文3

研究テーマE「超伝導回路での超放射相転移」

2016年に報告した超放射相転移を示す回路図の他に、どのような超伝導回路であれば超放射相転移を示しうるのかを、比較的広い範囲で理論的に示した[7]。本研究成果に基づいて、超放射相転移を示す回路を他に複数発見した。超伝導回路での超放射相転移点では、超伝導電流や電荷の量子ゆらぎが熱平衡下で抑制される。それを利用した高精度検出などに繋がる成果である。

[7] M. Bamba and N. Imoto, Physical Review A 96, 053857 (2017). 代表的な論文1

3. 今後の展開

本研究によって見いだされた熱平衡下で安定に得られる量子スクイーミングを、連続量子情報処理や、電場や磁場、磁化ダイナミクス、暗黒物質などの様々な高精度検出に応用していく。さらには、まったく新しい機能性についても探索していく。

このような機能性を得るためには、熱平衡下の量子スクイーミングを実験的に観測する必要がある。それが次に行うべき研究である。熱平衡下の量子ゆらぎの測定実験は、2015年にドイツのグループが、2019年にスイスのグループが報告している。それぞれ、バルク物質中、共振器中での電磁場の量子ゆらぎが測定された。これらの測定法を参考に、実際に量子スクイーミングが得られる物理系にて、量子ゆらぎを測定する。

平行して、上記の機能性において、有意な精度や忠実度を達成するために必要な制御精度や測定精度などを理論的にも積もっていく。また、レーザー発振と超放射相転移との移り変わりなどを理論的に解析することで、まったく新しい機能性を探索していく。

4. 自己評価

研究目的の達成状況

本研究の目的である、超放射相転移による量子状態の制御と保護の原理検証はほぼ達成された。すなわち、超放射相転移の相転移点において、量子スクイーズド状態が系の最も安定な状態(基底状態)として安定に存在すること(いかなるデコヒーレンスに対しても量子スクイーズド状態への復元力が働いて保護されること)を理論的に証明した。制御性については、実際の物質系で様々な結合を制御できることを実験的にデモンストレーションした。十分にゆっくりと結合を制御すれば、量子スクイーズド状態を保護したまま制御できることはほぼ自明であり、本研究目的はほぼ達成されたと言える。

研究の進め方

国内外の様々な研究グループと協力して研究を行い、唯一の理論研究者として、共同研究において主導的な役割を果たした。研究費については、近年発達してきたクラウドコンピューティングサービスの利用によって、当初の計画よりも数値計算のコストを抑えることができた。その代わりに、研究補助者の雇用や計算作業の外注によって、研究を加速させることができた。通常のさきかけ研究費の数分の1である1000万円という予算で上記の研究成果が

得られたという意味でも、効率的に研究費を執行できたと考えている。研究成果の発信については、後半で得られた研究成果が、さきがけ研究期間中に学術誌掲載にまでは至っていないものの、近日中に掲載させる予定である。前半で得られた研究成果については、学術誌掲載と同時にプレスリリースを出したほか、academist Journal や日本物理学会誌にも記事を執筆するなど、効果的な情報発信を行った。

研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果

数十年にわたって世界中で研究が続けられてきた量子科学技術の分野において、物質や電磁波の量子状態のコヒーレントダイナミクスという従来の発想に基づいた研究開発が、世界中で継続して研究されている中、熱平衡下の量子状態の制御を示した本研究成果は、戦略目標やさきがけの事業趣旨に合致したものである。すなわち、「未知の物理現象や物質機能・物性の探索、新たな概念に基づく情報科学の開拓及び新技術シーズ創出を図ることを目的」とする戦略目標および、「独創的・挑戦的かつ国際的に高水準の発展が見込まれる先駆的な目的基礎研究を推進し、「科学技術イノベーションの源泉となる成果を世界に先駆けて創出することを目的」とする、さきがけの事業趣旨に合致している。本研究の前半で得られた研究成果は Science 誌や Nature Photonics 誌などの有名な学術誌に掲載されており、少なくとも科学への波及効果は十分にある。実際、本研究の後半にて、熱平衡下の完全な量子スクイーミングという、量子機能に繋がる革新的な成果に波及した。

今後、この熱平衡下の量子スクイーミングによって、従来よりも遙かに高精度な検出や、実用性のある連続量量子情報処理という技術的な波及効果が見込まれる。また、熱平衡下の量子状態の制御という、従来とは異なる概念・発想により、まったく新しい機能が得られる可能性もある。数十年にわたって研究が続く量子科学技術分野から、社会・経済への波及効果が得られるためには、従来の概念・発想の延長線上にはない、未知の物理現象や革新的な科学技術の成果が必要である。本研究の成果は、まさにそのようなものであり、社会・経済への波及効果の可能性を秘めた成果である。

将来的な成果に繋がるために必要な展開(シナリオ)とタイムスパン(領域独自の評価項目)

本研究成果が社会・経済に波及するには、今後、量子ゆらぎの実験的な測定、研究室レベルでの機能性(高精度検出や連続量量子情報処理)の実証実験や有意な精度・忠実度の達成、研究機関や民間企業での研究開発が必要となる。そのためには、これから数十年の時間が必要と思われる。これまでの数十年にわたる量子科学技術研究の歴史の中で、近視眼的な研究成果ではなく、長期的な社会・経済への波及効果を目指した本研究成果と今後のタイムスパンは、さきがけ事業や研究領域の趣旨に合致したものである。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 10件

1. M. Bamba and N. Imoto, "Circuit configurations which may or may not show superradiant phase transitions", Physical Review A, 2017, Vol. 96, Issue 5, 053857 (11 pages)

2016年に報告した超放射相転移を示す回路図の他に、どのような超伝導回路であれば超放射相転移を示しうるのか、比較的広い範囲で理論的に示した。本研究成果に基づいて、超放射相転移を示す回路を他に複数発見した。超伝導回路での超放射相転移点では、超伝導電流や電荷の量子ゆらぎが熱平衡下で抑制される。それを利用した高精度測定などに繋がる成果である。

2. X. Li, M. Bamba, N. Yuan, Q. Zhang, Y. Zhao, M. Xiang, K. Xu, Z. Jin, W. Ren, G. Ma, S. Cao, D. Turchinovich, and J. Kono, "Observation of Dicke cooperativity in magnetic interactions", Science, 2018, Vol. 361, Issue 6404, 794-797

磁性体 ErFeO_3 において、Er スピン集団と Fe マグノンモードとの結合の強さが Er 密度の平方根に比例することを、静磁場下のテラヘルツ振動数帯での吸収スペクトル測定によって実験的に確認した。結合の強さ(共鳴振動数の反発の大きさ)が Er 密度の平方根に比例すること (Er スピン集団と Fe マグノンの協同効果)は、超放射相転移が起こるための必要条件であり、それを実験的に確認した。

3. T. Makihara, K. Hayashida, G. T. Noe, X. Li, N. M. Peraca, X. Ma, Z. Jin, W. Ren, G. Ma, I. Katayama, J. Takeda, H. Nojiri, D. Turchinovich, S. Cao, M. Bamba, and J. Kono, "Ultrastrong magnon - magnon coupling dominated by antiresonant interactions", Nature Communications 12, 3115 (2021).

磁性体 YFeO_3 に掛ける静磁場の方向を変化させることで、 YFeO_3 中の2つのマグノンモード間の結合が制御できることを実験的に確認した。具体的には、テラヘルツ振動数帯の吸収スペクトルから、共鳴振動数の反発が磁場を掛ける方向によって制御できることを観測した。また、量子スキューミングについても理論的に見積もり、熱平衡下の YFeO_3 において、十分に低温であれば、有意な量子スキューミングが得られることを示した。

(2) 特許出願

研究期間累積件数:0 件(特許公開前のものも含む)

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

招待講演

1. M. Bamba, X. Li and J. Kono,
"Vacuum Bloch-Siegert Shift in Cyclotron Resonance",
IRMMW-THz2018, International Conference on Submillimeter Waves and their Applications, today's International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan), Th-A2-1a-1, 9-14 Sep 2018
2. 馬場基彰,
「物質との超強結合で横電磁場は相転移するか？」

KEK 連携コロキウム・研究会エディション「量子多体系の素核・物性クロスオーバー」(高エネルギー加速器研究機構(KEK)つくばキャンパス), 2019年1月14-16日

3. 馬場基彰,

「強は異なり: 電磁場と物質の超強結合による超放射相転移に向けて」

第30回 光物性研究会 (京都大学 宇治キャンパス), 2019年12月13-14日

受賞

4. 馬場基彰, 「超放射相転移を示す物理系の探索」,

平成29年度 研究表彰: 光科学・光科学技術の向上に役立つ独創的な研究

光科学技術研究振興財団(2018年2月)

著書

5. N. M. Peraca, A. Baydin, W. Gao, M. Bamba, and J. Kono

“Ultrastrong Light-Matter Coupling in Semiconductors”

Semiconductor Quantum Science and Technology, pp. 89-151, Volume 105 of Semiconductors and Semimetals (Elsevier, 2020).