

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24510146

研究課題名(和文) 微小ジョセフソン接合集団における量子同期の理論

研究課題名(英文) Theory of quantum synchronization in a small Josephson junction array

研究代表者

川畑 史郎 (KAWABATA, SHIRO)

独立行政法人産業技術総合研究所・電子光技術研究部門・主任研究員

研究者番号：30356852

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：超伝導体ジョセフソン接合アレイにおいて創発する同期現象及び巨視的量子現象に関して研究を行った。高温超伝導体固有接合から発生するテラヘルツ電磁波の計算を行った。その結果、人工的に局所加熱することによって、テラヘルツ波の強度が桁違いに増大することを明らかにした。また多バンド超伝導ジョセフソン接合における巨視的量子トンネル効果に関する理論構築を行った。その結果、Leggettモードの存在によって量子トンネル率は増大することが明らかとなった。さらに、超伝導量子メタマテリアルの電磁波応答現象についても理論的に検討を行った。

研究成果の概要(英文)：We have theoretically and numerically investigated the synchronization and macroscopic quantum phenomena in a Josephson junction array. By solving the phase, Maxwell, and heat diffusion equation simultaneously, we found that the THz radiation power from the high-Tc superconductor intrinsic Josephson junction can be drastically enhanced by the local heating. We have also investigated the macroscopic quantum phenomena in multi-band superconductor junctions as well as the nonlinear optical response in superconductor quantum metamaterial based on a superconductor qubit array.

研究分野：物性理論, 量子情報科学, 非線形物理

キーワード：巨視的量子現象 同期現象 テラヘルツ波 ジョセフソン接合 メタマテリアル 高温超伝導 非線形光学 量子コンピュータ

#### 1. 研究開始当初の背景

近年、超伝導体ジョセフソン接合アレイにおいて創発する同期現象及び巨視的量子現象に関して盛んに研究が行われるようになってきた。特に、高温超伝導体固有ジョセフソン接合においては、接合全体がコヒーレントに同期することによって極めて強力なテラヘルツ電磁波が放射されることが明らかとなっている。またジョセフソン接合アレイにおいては、接合間の電磁気学的結合効果によって巨視的量子トンネル率が大きく増大することも示されている。これにより従来より高温領域での量子子ピュータ動作が期待できる。このように微小なジョセフソン接合集団における同期現象及び巨視的量子現象の物理学は、基礎物理のみならず、産業応用上も非常に重要なテーマとなりうる。

#### 2. 研究の目的

本研究においては、超伝導体ジョセフソン接合において創発する同期現象及び巨視的量子現象に関して理論及び大規模数値シミュレーションを用いた研究を行う。そして、同期現象を適切に制御することによって、異常な電磁波放射、電磁波応答、協力的量子トンネル現象が発現することを示す。

#### 3. 研究の方法

ジョセフソン接合集団の位相ダイナミクスを記述する運動方程式、熱伝導方程式、マクスウェル方程式を連立させることによりジョセフソン接合アレイから発生するテラヘルツ電磁波の計算を行う。また虚時間経路積分の方法を用いて多バンドジョセフソン接合における巨視的量子トンネル率の計算を行う。さらに、超伝導量子ビット集団から構成される量子メタマテリアルに対する時間依存シュレディンガー方程式を数値的に解くことにより、量子メタマテリアルの非線形電磁波応答を解析する。

#### 4. 研究成果

高温超伝導体固有接合から発生するテラヘルツ電磁波の計算を行った。その結果、温度分布が非一様な場合、一様温度分布の場合に比べて桁違いに強いテラヘルツ電磁波が発生することを示した。また、人工的にレーザー等を用いて接合を局所加熱することによって、テラヘルツ波の強度が桁違いに増大することを明らかにした。この成果はAppl. Phys. Lett. 誌において発表し、同誌のFeatured Article及び表紙に採用された。この理論的予言は、最近国内外の3つの研究グループによりほぼ同時に再現され、大きな注目を集めるに至っている。また同様な局所加熱の方法を用いることによりテラヘルツ電磁波の偏光が制御可能になることも最近明らかにした。

また超伝導体ジョセフソン接合集団の協力的巨視的量子ダイナミクス理論を構築することを目指して多バンド超伝導ジョセフソン接合における巨視的量子トンネル効果に関する理論構築を行った。その結果、Leggettモードの存在によって協力的巨視的量子トンネル率は増大することが明らかとなった。以上の成果についてはPhys. Rev. B誌において発表を行った。

また超伝導量子ビット集団から構成される量子メタマテリアルの電磁波応答現象についても理論的に検討を行った。超伝導ジョセフソン接合の持つ非線形性によって極めて異常な電磁波応答が発現することが明らかとなった。具体的には、カオス的なレーザー発振、高調波発生、パラメトリック発振といった非線形光学現象が発現することを示した。これにより、超伝導量子メタマテリアルは、人工的な非線形光学媒質として振る舞うことが明らかとなった。以上の成果についてはPhys. Rev. B誌において発表を行った。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計6件)

H. Asai, S. Savel'ev, S. Kawabata, A. M. Zagoskin, Effects of lasing in a one-dimensional quantum metamaterial, Phys. Rev. B, 査読有, Vol. 91 (2015) 134513-1~7, DOI: 10.1103/PhysRevB.91.134513

H. Asai, S. Kawabata, Y. Ota, M. Machida, Two-dimensional macroscopic quantum tunneling in multi-gap superconductor Josephson junctions, P J. Phys. Conf. Ser., 査読有, Vol. 568 (2014) 022006-1 ~ 5, DOI: 10.1088/1742-6596/568/2/022006

H. Asai, Y. Ota, S. Kawabata, M. Machida, F. Nori, Theory of macroscopic quantum tunneling with Josephson-Leggett collective excitations in multiband superconducting Josephson junctions, Phys. Rev. B, 査読有, Vol. 89 (2014) 224507-1~7, DOI: 10.1103/PhysRevB.89.224507

H. Asai, S. Kawabata, Possibility to enhance terahertz emission from intrinsic Josephson junction by external local heating, J. Phys. Conf. Ser., 査読有, Vol. 507 (2014) 042002-1 ~ 4, DOI: 10.1088/1742-6596/507/4/042002

H. Asai, S. Kawabata, Intense terahertz emission from intrinsic Josephson junctions by external heat control", Appl. Phys. Lett., 査読有, Vol. 104 (2014) 112601-1 ~ 4, DOI: 10.1063/1.4868219

H. Asai, S. Kawabata, An Effect of Temperature Distribution on THz Phase Dynamics in Intrinsic Josephson Junctions, Physica C, 査読有, Vol. 494 (2013) 121 ~ 123, DOI: 10.1016/j.physc.2013.04.058

〔学会発表〕(計27件)

浅井栄大, Sergey Savel'ev, Alexandre Zagoskin, 川畑史郎, 回路 QED を用いた量子メタマテリアルにおける特異な渦糸状態, 2015 年日本物理学会第 68 回年次大会, 2015.3.21-24, 早稲田大学

H. Asai, S. Kawabata, Control of THz emission from intrinsic Josephson junction by local heating, Study of matter at extreme conditions (SMEC2015), 2015.3.8-3.15, Miami/USA

浅井栄大, 川畑史郎, S. Savel'ev, A. Zagoskin, 回路 QED を用いた量子メタマテリアルにおける特異な電磁場応答, 第 4 回 QUATUO 研究会, 2015.1.11-12, 高知工科大学

H. Asai, S. Kawabata, S. Savel'ev, A. Zagoskin, Peculiar Vortex states in Quantum Metamaterial with Superconducting Charge Qubits, The 9th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and THz Plasma Oscillations in High-Tc Superconductors (THz Plasma 2014), 2014.11.30-12.3, 京都

H. Asai, S. Kawabata, Polarization Control of Terahertz Wave from Intrinsic Josephson Junctions, 27th International Symposium on Superconductivity (ISS 2014), 2014.11.25-11.27, 東京

S. Kawabata, H. Asai, S. Savel'ev, A. Zagoskin, Theory of Quantum Metamaterial with Superconducting Qubits, 2nd International Workshop on Superconducting Sensors and Detectors (IWSSD2014), 2014.11.5-11.8, Shanghai/China

H. Asai, S. Kawabata, S. Savel'ev, A. Zagoskin, Unique Electromagnetic Response of Quantum Metamaterial with Superconducting Qubits, 2014 Energy, Materials and Nanotechnology Open Access Week, 2014.9.22-9.25, Chengdu/China

浅井栄大, 川畑史郎, Sergey Savel'ev, Alexandre Zagoskin, 回路 QED を用いた量子メタマテリアルにおける電磁波応答, 2014 年日本物理学会秋季大会, 2014.9.7-10, 中部大学

S. Kawabata, H. Asai, Intense THz emission from high-Tc intrinsic Josephson junctions by heat control, Physics and applications of superconducting hybrid nano-engineered devices (SHYNED2014), 2014.8.31-9.4, Santa Maria/Italy

H. Asai, Y. Ota, M. Machida, S. Kawabata, Two-dimensional macroscopic quantum tunneling in multi-gap superconductor Josephson junctions, The 27th International Conference on Low Temperature Physics (LT27), 2014.8.6-8.13, Buenos Aires/Argentina

H. Asai, S. Kawabata, S. Savel'ev, A. Zagoskin, Vortex magnetic response of quantum Metamaterial with superconducting qubits, Moscow International Symposium on Magnetism MISM-2014, 2014.6.29-7.3, Moscow/Russia

浅井栄大, 川畑史郎, 太田幸宏, 町田昌彦, Franco Nori, 巨視的量子トンネルにおけるバンド間位相差ゆらぎの増幅-散逸競合効果, 2014 年日本物理学会第 69 回年次大会, 2014.3.27-30, 東海大学

- 浅井栄大, 川畑史郎, S. Savel'ev, A. Zagoskin, 超伝導量子メタマテリアルにおける異常電磁場応答の理論, 量子情報の新展開 - 複雑性の極限における普遍的物理の探索 -, 2014.3.23-25, 京都大学
- H. Asai, S. Kawabata, Y. Ota, M. Machida, F. Nori, The effect of inter-band phase fluctuations on macroscopic quantum tunneling with multi-gap superconducting Josephson junctions, FIRST International Symposium on Topological Quantum Technology, 2014.1.27-1.30, 東京
- 浅井栄大, 川畑史郎, 太田幸宏, 町田昌彦, Franco Nori, 巨視的量子トンネルにおけるバンド間超伝導位相差ゆらぎの効果, 第 21 回渦糸物理国会会議, 2013.12.12-14, 東北大学
- H. Asai, S. Kawabata, Intense terahertz emission from intrinsic Josephson junctions induced by external local heating, The International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (ISNTT2013), 2013.11.26-11.29, 厚木
- H. Asai, Y. Ota, S. Kawabata, F. Nori, The effect of inter-band phase fluctuation on macroscopic quantum tunneling in Josephson junctions with two-gap superconductor, 26th International Symposium on Superconductivity (ISS 2013), 2013.11.26-11.29, 東京
- H. Asai, S. Kawabata, Strong enhancement of terahertz emission induced by a self-heating effect in intrinsic Josephson junctions, 11th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2013), 2013.9.15-9.19, Genova/Italy
- Y. Ota, F. Nori, H. Asai, S. Kawabata, Inter-band fluctuations in macroscopic quantum tunneling with two-band superconductors, (第 28 回量子情報技術研究会, 2013.5.27-28, 北海道大学
- 浅井栄大, 川畑史郎, 太田幸宏, Franco Nori, 巨視的量子トンネルにおけるバンド間超伝導位相差ゆらぎの効果, 2013 年日本物理学会第 68 回年次大会, 2013.3.26-3.29, 広島大学
- 21 H. Asai, S. Kawabata, The enhancement of THz emission from intrinsic Josephson junctions by heat control, Workshop on THz radiation from intrinsic Josephson junctions, 2013.3.10, 京都
- 22 H. Asai, S. Kawabata, Interplay between Heat and THz Phase Dynamics in Intrinsic Josephson Junctions, S2C Theory Forum: International Symposium on "Strongly Correlated Quantum Science", 2013.1.26-1.29, 東京
- 23 H. Asai, S. Kawabata, Interplay between Heat and THz Phase Dynamics in Intrinsic Josephson Junctions, 25th International Symposium on Superconductivity (ISS2012), 2012.12.3-12.5, 東京
- 24 H. Asai, S. Kawabata, M. Tachiki, K. Kadowaki, Theory of THz radiation from Intrinsic Josephson junction emitter, Low-dimensional nanoscale systems: Quantum effects, particle transport and advanced materials, 2012.11.6-11.7, Tashkent/Uzbekistan
- 25 浅井栄大, 川畑史郎, 立木昌, 門脇和男, 固有ジョセフソン接合アンテナからの THz 波放射, テラヘルツ分光法の最先端 VI ~ここまできたテラヘルツ時間領域分光~, 2012.10.25-26, 筑波大学
- 26 浅井栄大, 川畑史郎, 門脇和男, 立木昌, 固有ジョセフソン接合アンテナの THz 波放射特性, 2012 年日本物理学会秋季大会, 2012.9.18-9.21, 横浜国立大学
- 27 浅井栄大, 川畑史郎, 立木昌, 門脇和男, 固有 Josephson 接合アレイにおける同期現象と THz 波放射, 非平衡系の物理 - その普遍的理解を目指して -, 2012.8.1-4, 京都大学

〔その他〕

ホームページ

<https://staff.aist.go.jp/s-kawabata/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

川畑 史郎 (KAWABATA SHIRO)

産業技術総合研究所・電子光技術研究部門・主任研究員

研究者番号 : 30356852

### (2) 連携研究者

加藤 岳生 (KATO TAKEO)

東京大学・物性研究所・准教授

研究者番号 : 80332956

掛谷 一弘 (KAKEYA ITSUHIRO)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号 : 80302389

柏谷 裕美 (KASHIWAYA HIROMI)

産業技術総合研究所・計測フロンティア研究部門・主任研究員

研究者番号 : 60443181