

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05160

研究課題名(和文) 超伝導量子渦にかかる力の理論

研究課題名(英文) Theory of force on quantum vortices in superconductors

研究代表者

加藤 雄介 (KATO, Yusuke)

東京大学・大学院総合文化研究科・教授

研究者番号：20261547

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：磁場中の超伝導体のダイナミクスは、超伝導の弱いところ、位相欠陥の性質で決まっている。超伝導の場合、位相欠陥は量子化された磁力線であり、それは超伝導電流の渦巻く中心＝量子渦でもある。外部磁場の下に置かれた超伝導体の多くは内部に磁束量子を多数含む状態にある。そのとき外部電流を流したときに電気抵抗がゼロになるか有限になるかは磁束量子＝量子渦の運動によって決まる。流体中の渦にはマグナス力が働き、磁力線にはローレンツ力がかかる。超伝導の量子渦の場合には、1960年代から長らく論争が続いていた。本研究では両者の合力のみが超伝導の量子渦にかかる力として物理的意味を持つことを見出した。

研究成果の概要(英文)：Dynamics of superconductors in magnetic fields are governed by their "weak points", i.e. properties of topological defects. A topological defect in superconductors is quantized magnetic flux, which is also called quantum vortex because the quantized magnetic flux is the center of superconducting circular currents. The problem is "what is the force on quantum vortex in superconductors?". In classical fluids, vortex is subject to Magnus force while magnetic flux is often claimed to feel the Lorentz force due to the external current. In this project, we find that the constitutive force of Magnus and Lorentz forces is the only physically meaningful force. Our results are based on the time-dependent-Ginzburg-Landau theory.

研究分野：物性理論

キーワード：超伝導 量子渦 フラックフロー 磁束量子 マグナス力 ローレンツ力

1. 研究開始当初の背景

磁場中の超伝導体のダイナミクスは、超伝導の弱いところ、位相欠陥の性質で決まっている。超伝導の場合、位相欠陥は量子化された磁力線であり、それは超伝導電流の渦巻く中心 = 量子渦でもある。外部磁場の下に置かれた超伝導体の多くは内部に磁束量子を多数含む状態にある。そのとき外部電流を流したときに電気抵抗がゼロになるか有限になるかは磁束量子 = 量子渦の運動によって決まる。流体中の渦にはマグナス力が働き、磁力線にはローレンツ力がかかる。では超伝導の磁束量子 = 量子渦にはどんな力がかかるか？この問題に関する議論は1960年代に端を発し、1990年代に銅酸化物高温超伝導の研究の隆盛を背景に再燃して以来、現在に至るまで論争が続いている。

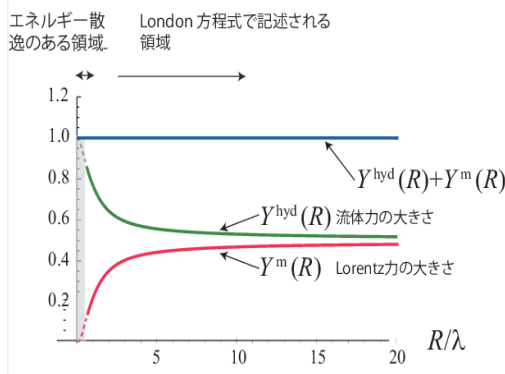
2. 研究の目的

上記の論争を理論的に解決することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

渦にかかる力を、物質場の運動方程式（時間に依存するギンツブルグ・ランダウ方程式）から運動量保存則を導き、渦を囲む領域に流れ込む運動量を求め、その領域にかかる力を求める。しかしただちにその力が渦にかかる力を同定できるわけではない。渦を含む領域の境界の採り方に力が依らないかどうかを流体力学的な力と電磁気学的な力についてそれぞれ見極める。

4. 研究成果



図はフラックスフロー状態において渦を囲む領域に単位時間あたりどれだけの運動量が流れ込むかを計算したものである。領域は円にとり、境界は半径 R の円周である。図を見ると、流体力の大きさも Lorentz 力の大きさも渦を囲む円周の半径に依存していることがわかり、それぞれは芯の部分（渦中心）にのみ力が加わっているわけではないことがわかる。一方両者の和は R に依らず一定値をとる。その値もこれまで期待されていたものと一致する。つまり渦にかかる力

としては流体力と Lorentz 力の合力だけが意味のある力として定義できることがわかる。

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15件)

[1] Y. Masaki, and Y. Kato: "Charged and uncharged vortices in quasiclassical theory"

Journal of Physics: Conference Series **969** 012054/1-6 (2018) [査読有]

<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/969/1/012054/meta>

[2] N. Kurosawa: "Is the Diagonal Part of the Self-Energy Negligible within an Isolated Vortex in Weak-Coupling Superconductors?" J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 024709/1-10 (2018) [査読有]

<https://doi.org/10.7566/JPSJ.87.024709>

[3] K. Fukui, and Y. Kato: "Mixing of odd- and even-frequency pairings in strongly correlated electron systems under magnetic field"

J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 014706/1-6 (2018)

[査読有]

<https://doi.org/10.7566/JPSJ.87.014706>

[4] Y. Tsutsumi and Y. Kato: "Coherence Effects of Caroli-de Gennes-Matricon Modes in a Nodal Topological Superconductor UPt3"

Journal of Physics: Conf. Series **807** 052005/1-6(2017)[査読有]

<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/807/5/052005/meta>

[5] K. Tsutsui, Y. Kato, T. Kita: "Are Quasiparticles and Phonons Identical in Bose-Einstein Condensates?"

J. Phys. Soc. Jpn. **85** 124004/1-8 (2016)

[査読有]

<https://doi.org/10.7566/JPSJ.85.124004>

[6] S. Koshida and Y. Kato: "Perturbative Approach to Superfluidity under Nonuniform Potential"

J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 124603/1-12 (2016)

[査読有]

<https://journals.jps.jp/doi/10.7566/JPSJ.85.124603>

[7] Y. Tsutsumi and Y. Kato: "Coherence Effects of Caroli-de Gennes-Matricon Modes in Nodal Topological Superconductors"

J. Phys. Soc. Jpn. **85** 053704/1-4 (2016)
[査読有]
<https://journals.jps.jp/doi/10.7566/JPSJ.85.053704>

[8] Y. Kato and C-K. Chung: "Nature of driving force on an isolated moving vortex in dirty superconductors"
J. Phys. Soc. Jpn. **85** 033703/1-5 (2016)
[査読有]
<https://doi.org/10.7566/JPSJ.85.033703>

[9] Y. Masaki and Y. Kato: "Impurity Effects on Caroli-de Gennes-Matricon Mode in Vortex Core in Superconductors"
J. Phys. Soc. Jpn. **85** 014705/1-7 (2016)
[査読有]
<https://doi.org/10.7566/JPSJ.85.014705>

[10] N. Kurosawa and Y. Kato:
"Emergence of Non-Axisymmetric Vortex in Strong-Coupling Chiral p-Wave Superconductor" J. Low Temp. Phys. (2016)
[査読有]
DOI 10.1007/s10909-016-1692-8

[11] S. Koshida and Y. Kato: "Perturbation Theory for Superfluid in Nonuniform Potential"
Journal of Low Temperature Physics, 183(3), 71-77(2016) [査読有]
DOI 10.1007/s10909-015-1394-7

[12] 加藤 雄介: 固体物理 vol.51 (2016 年 05 月号)pp. 275-286.
"超伝導量子渦のダイナミクス(その6)" [査読有]

[13] N. Kurosawa, N. Hayashi and Y. Kato:
"Effect of Weak and Strong Scatterers on the Spectrum of Vortex Andreev Bound States in Two-Dimensional Chiral p-Wave Superconductors"
J. Phys. Soc. Jpn. **84** 114710/1-12 (2015)
[査読有]
<https://journals.jps.jp/doi/10.7566/JPSJ.84.114710>

[14] Y. Masaki and Y. Kato: "Impurity Effects on Bound States in Vortex Core of Topological s-Wave Superconductor"
J. Phys. Soc. Jpn. **84** 094701/1-10 (2015)
[査読有]
<https://journals.jps.jp/doi/10.7566/JPSJ.84.094701>

[15] 加藤 雄介: "超伝導量子渦のダイナミクス(その5)" 固体物理 vol.50 (2015 年 10

月号)pp. 531-541. [査読有]

[学会発表](計 25 件)
[01] 正木祐輔、加藤雄介 "カイラルp波超伝導の渦電荷に対する準古典的方法, 日本物理学会年会, 2018年、東京理科大学、千葉県、野田市

[02] 福井毅勇、加藤雄介 "磁場下の強相関電子系における奇周波数超伝導に対する偶周波数成分の混合効果", 日本物理学会年会, 2018年、千葉県、野田市

[03] 寒川崇生, 正木祐輔, 加藤雄介
"ハニカム格子模型によるディラック電子系の電磁応答II" 日本物理学会年会, 2018年、千葉県、野田市

[04] 正木祐輔、加藤雄介
"準古典理論によるカイラルp波超伝導渦の帯電効果" 渦糸国内会議, 2017年, 沖縄先端大学、沖縄、恩納村

[05] 黒澤範行
"準古典理論によって得られる超流動ヘリウム3-B相", 渦糸国内会議, 2017年, 沖縄先端大学、沖縄、恩納村

[06] 加藤雄介、
"超伝導単一量子渦にかかる力 IV"
日本物理学会第 72 回年会、2017 年 03 月 17 日、大阪大学豊中キャンパス、豊中市、大阪府

[07] 黒澤範行、加藤雄介
カイラル p 波超伝導体の円筒対称性を破る渦における低エネルギー束縛状態 日本物理学会第 72 回年会、2017 年 03 月 17 日、大阪大学豊中キャンパス、豊中市、大阪府

[08] 須貝駿貴、加藤雄介
"高位ランダウ準位を取り入れた渦糸格子フロア解" 日本物理学会第 72 回年会、2017 年 03 月 17 日、大阪大学豊中キャンパス、豊中市、大阪府

[09] 福井毅勇, 加藤雄介
"擬 1 次元強相関電子系における奇周波数超伝導に対する磁場の効果" 日本物理学会第 72 回年会、2017 年 03 月 20 日、大阪大学豊中キャンパス、豊中市、大阪府

[10] N. Kurosawa and Y. Kato " Emergence of Non-Axisymmetric Vortex in Strong-Coupling Chiral p-Wave Superconductor " International conference

on quantum fluids and solids ,2016年08月16日, カレル大学、プラハ、チェコ

[11] 須貝駿貴, 加藤雄介
“保存則を満たす TDGL 方程式の渦系格子フロア解の構成” 日本物理学会秋季大会,
2016年09月14日, 金沢大学、金沢市、石川県

[12] 加藤雄介 “超伝導単一量子渦にかかる力 III” 2016年09月14日, 金沢大学、金沢市、石川県

[13] Y. Kato, “Nature of driving force on quantum vortex in superconductors”,
ICCP10 (招待講演), 2017年01月16日, Sands Cotai, Macau, China

[14] Y. Kato, “Nature of driving force on quantum vortex in superconductors”, 第3回豊田理研ワークショップ Dynamics of Electron vortex and spin vortex (招待講演), 2016年07月01日, 豊田産業技術記念館, 名古屋市、愛知県

[15] 加藤雄介, Chung Chun-Kit, “超伝導単一量子渦にかかる力II” 日本物理学会,
2016年03月22日, 東北学院大学 (宮城県、仙台市)

[16] 黒澤範行、加藤雄介 “強結合カイラルp波超伝導の渦の分裂”
日本物理学会, 2016年03月22日, 東北学院大学 (宮城県、仙台市)

[17] 星野晋太郎、加藤雄介, “拡張された準古典理論による孤立超伝導量子渦系の数値解析”, 日本物理学会, 2016年03月22日, 東北学院大学 (宮城県、仙台市)

[18] 堤 康雅、加藤雄介 “ギャップノードのあるトポロジカル超伝導体における量子渦束縛状態の不純物効果” 日本物理学会,
2016年03月22日, 東北学院大学 (宮城県、仙台市)

[19] 須貝駿貴, 加藤雄介 “フラックスフロア状態における渦系格子にかかる力, 日本物理学会, 2016年03月22日, 東北学院大学 (宮城県、仙台市)

[20] 加藤雄介, Chung Chun-Kit, “超伝導渦にかかる力II ”

第23回渦系国内会議, 2015年12月08日、休暇村志賀島 (福岡県、志賀島)

[21] 黒澤範行、加藤雄介
“カイラルp波超伝導の渦芯における強結合効果”,

第23回渦系国内会議, 2015年12月08日、休暇村志賀島 (福岡県、志賀島)

[22] 星野晋太郎、加藤雄介, “拡張された準古典理論による超伝導量子渦の数値解析”,
第23回渦系国内会議, 2015年12月08日、休暇村志賀島 (福岡県、志賀島)

[23] 堤 康雅、加藤雄介 “ギャップノードのあるトポロジカル超伝導体におけるマヨラナ粒子の不純物効果, 2015年12月08日、休暇村志賀島 (福岡県、志賀島)

[24] 加藤雄介, Chung Chun-Kit
“時間依存するギンツブルグ・ランダウ理論に基づく超伝導単一量子渦にかかる力の再考” 日本物理学会, 2015年9月19日

関西大学千里山キャンパス (大阪府吹田市)

[25] 星野晋太郎、加藤雄介 “準古典理論による超伝導量子渦の帯電と不純物効果の数値解析” 日本物理学会, 2015年9月19日
関西大学千里山キャンパス (大阪府吹田市)

〔図書〕(計1件)

[1] 加藤 雄介: "秩序がもつ固さ-超伝導の世界-" 高校生のための東大授業ライブ 学問からの挑戦 pp. 114-130
(東京大学出版会、東京、2015年12月17日出版).

〔産業財産権〕

出願状況 (計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

<http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/kato-yusuke-lab/index.cgi?FrontPage>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 雄介 (KATO, Yusuke)
東京大学・大学院総合文化研究科・教授
研究者番号：20261547

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

黒澤範行 (Kurosawa Noriyuki)
正木祐輔 (Masaki Yusuke)