

機関番号：15401

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008 ~ 2010

課題番号：20540357

研究課題名 (和文) 半整数量子渦対の動力学的研究

研究課題名 (英文) Dynamics of a pair of half-integer quantum vortices

研究代表者

西田 宗弘 (NISHIDA MUNEHIRO)

広島大学・大学院先端物質科学研究科・准教授

研究者番号：10329112

研究成果の概要 (和文)：超伝導系で起こる現象の多くは、量子化された渦電流である量子渦の運動に支配される。この量子渦が対を形成すれば、一種の移動可能な人工分子が実現する。本研究では、量子渦対が生じ得る系として、超伝導/強磁性/超伝導伝送線路と一次元超伝導干渉素子列を考案し、量子渦対の運動の詳細を明らかにした。これにより、強磁性層の磁区構造やラチェット効果を用いて量子渦対の運動制御が可能と分かり、新規量子機能デバイス実現への可能性が開かれた。

研究成果の概要 (英文)：The motion of quantum vortices, i.e. quantized eddy currents, governs most phenomena in superconducting systems. If the quantum vortices form a pair, a kind of artificial molecule will be realized. In this study, we proposed superconductor/ferromagnet/superconductor transmission lines and one-dimensional superconducting quantum interference devices as candidates to realize such quantum-vortex pairs, and elucidated details of the dynamics of quantum-vortex pairs. It is found that we can control the dynamics of quantum-vortex pairs using domain structures in the ferromagnetic layer and ratchet effects. These results would open a possibility of novel quantum devices.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：物性物理学

科研費の分科・細目：物理学・物性II

キーワード：超伝導材料・電荷密度波, 素子, 物性理論, 量子コンピュータ

1. 研究開始当初の背景

超伝導・電荷密度波(CDW)の様な巨視的量子状態においては、量子渦(量子位相欠陥)という集団励起が生じる。この量子渦は、磁束量子のような量子化された物理量を持ち、その安定性が系を記述する位相場のトポロジーによって保証されている。よって、量子

渦は低温領域で一種の「素粒子」として振る舞い、これらの系の物性において重要な役割を演じている。特に、超伝導系の量子渦を電子の代わりに用いることにより、新しい高性能なデバイスを構築する試みが盛んに行われている。

この量子渦は、その向きがトポロジカルな

安定性により固定されてしまうため、電子のスピンのように自由に変化できる内部自由度を持っていない。しかし、2つの量子渦が“対”を形成する事が出来れば、渦間距離という可変な内部自由度を導入する事が出来、「移動可能な人工分子」として物性検証やデバイスへ応用する可能性が開けると考えられる。

上記のアイデアは、2005-2007年度に受けた科学研究費補助金研究課題「電荷密度波を用いた量子コンピュータの研究」(若手研究(B))を通して得た着想“CDW中の位相欠陥による量子ビット”の中から生まれ、本研究課題のテーマへと発展した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、トポロジカルな安定性を持ちながら、可変な内部自由度を有する量子渦対を形成可能な物理系を提案すると共に、単一の量子渦では見られない、2つの量子渦が織りなす動力学を解明する事である。

- 本研究では以下の3つの系に注目する。
- a. 超伝導/強磁性/超伝導(SFS)伝送線路
- b. 一次元超伝導干渉素子(SQUID)列
- c. 整合電荷密度波(CDW)系

これらに対し物性理論の立場から詳細な研究を行うことにより、量子渦対を用いた「移動可能な人工分子」の実現と、次世代情報技術の一端を担う新規量子機能デバイスへの応用可能性を探る。

3. 研究の方法

上記 a, b, c の系は、いずれも位相場 ϕ で記述され、 ϕ は double sine-Gordon (DSG) 方程式に従う。DSG 方程式には、局所的に位相 ϕ が π 変化する π ソリトン(半整数量子渦)が二つ結合した π ソリトン対(半整数量子渦対)が、トポロジカルに安定な解として存在する事がわかっている。 π ソリトン対には、 π ソリトン間距離の振動に相当する非線形内部振動が生じ得る(図1参照)。

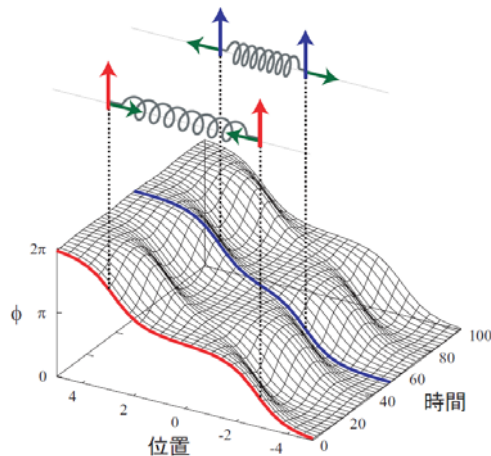


図1. 半整数量子渦対の内部振動

また、DSG 方程式は、ローレンツ変換対称性を有するため、その解である半整数量子渦対は特殊相対性理論に従うと考えられ、通常の物性物理学では現れない興味深い現象が発現すると期待される。

一方で、DSG 方程式は非可積分な方程式であるため、厳密な解析解を得ることが出来ないという困難さがある。そこで、近似的な解析手法と、厳密な数値シミュレーション手法の二つを駆使して、量子渦対の物理的な主要特性を明らかにすることを旨とした。

近似的な解析手法としては、集団座標の方法を用いた。ここで用いる集団座標の方法とは、半整数量子渦の重心座標を含む近似解を仮定し、それを DSG 方程式に代入する事によって、実効的な運動方程式を導く方法である。

数値シミュレーション手法においては、最新のワークステーションを導入し、系統的な数値計算を行える環境を整備すると共に、幾つかのアルゴリズムを比較検討して、正確で安定な計算手法を取るよう努めた。

上記の研究手法は、半整数量子渦対のみではなく、通常の量子渦(フラクソン)にも適用出来る方法である。そこで、科学研究費補助金研究課題「フラクソンの量子論」(基盤研究(C))の研究代表者である畠中憲之教授(広島大学大学院総合科学研究科)と連携して研究を進め、特に、半整数量子渦対と似通った性質を持つフラクソン・アンチフラクソン対(ブリーザー)の相互作用に関して、詳細な研究を行った。

以下に、本研究で注目した系 a, b に関して具体的な研究方法を記述する。なお、系 c は本研究の発想の原点ではあったが、a, b の系に比べ実用度が低いと判断し、研究対象から外した。

(1) SFS 伝送線路

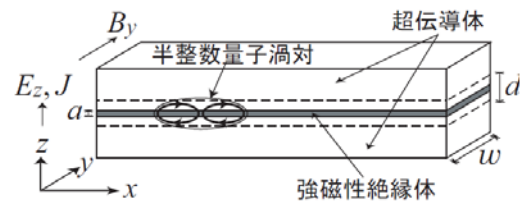


図2. SFS 伝送線路の概念図

図2のような一次元的な細長いSFS接合を考える。本研究では、強磁性層(F層)中の磁区構造に注目して、それが半整数量子渦対の運動に与える影響を明らかにした。まず、量子渦に伴う磁場とF層中の磁壁の相互作用を取り入れ、集団座標の方法を用いて、量子渦の重心座標に対するポテンシャルを求めた。さらに、磁区構造のダイナミクスを記述するLandau-Lifshitz-Gilbert(LLG)方程式と量子渦を記述するサインゴルドン(SG)方程式

に対して数値シミュレーションを行った。

(2) 一次元 SQUID 列

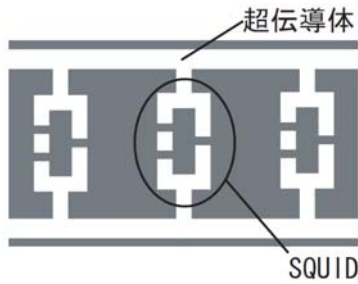


図 3: 一次元 SQUID 列

図 3 の様に、3 つのジョセフソン接合を含んだ SQUID の一次元列を考える。この系は離散的な DSG 方程式で記述可能と考えられる。これまで離散的な DSG 方程式はほとんど調べられておらず、その古典的な動力学自体が重要な研究課題である。そこで、本研究では、系の離散性による量子渦対の古典的な内部振動への影響を調べた。まず、この系が実際に離散的な DSG 方程式で記述され得ることを示し、その上で、離散的な DSG 方程式に対する数値シミュレーションと集団座標の方法の両面から量子渦対の動力学的な特性を探った。

4. 研究成果

まず、本研究で提案する二つの系それぞれについて、得られた成果を述べる。

(1) SFS 伝送線路

① 量子渦と磁壁の相互作用

量子渦と F 層中の磁壁の相互作用ポテンシャルを求めた結果、磁化の方向によってポテンシャルの強さが大きく変化し、通常期待される磁壁の構造では、非常に弱いポテンシャルとなり、量子渦の運動を阻害しない事が分かった。また、磁区内磁化の向きが量子渦の向きと平行な場合には、強いポテンシャルが形成され、量子渦をポテンシャルの井戸に強く閉じ込められる事がわかった。通常配置でポテンシャルが弱くなったのは、量子渦の大きさに比べて磁壁の幅が非常に小さく、量子渦に伴う磁場と磁化の積の空間積分が小さくなってしまふことに由来する。一方で、磁区内磁化の向きが量子渦の向きと平行な状況では、相互作用の積分値が十分大きくなり得るので、ポテンシャルが強くなる事が分かった。

② SG-LLG 方程式のシミュレーション

上記のポテンシャルが量子渦の運動に及ぼす影響を実際に確かめる為に、LLG 方程式と SG 方程式を連立させて、数値シミュレーションを行った。結果として、通常物質を

用いる限り磁壁はフラクソンに対して不動の障壁となり、磁区内磁化の方向が量子渦の方向と一致している場合、障壁を乗り越える臨界速度は、伝送線路内の光速の 9 割程度になることが分かった。

以上の①, ②の結果から、磁区構造を人為的に変化させる事により、量子渦がほとんど自由に運動する領域と侵入できない領域を自在に配置することが可能となる。磁化の方向は斜め蒸着の手法で実験的にコントロール出来ることが知られているので、再配置可能な閉じ込めポテンシャルを量子渦に対して導入可能と予想される。

現状では、良質な SFS 接合の作成プロセスが確立されておらず、伝送線路の研究はほとんどなされていないが、これが確立されれば、新規デバイス応用が十分期待出来る。

(2) 一次元 SQUID 列

① 相対論的な時間遅れ(雑誌論文 1)

SQUID 間の間隔を小さくする事により、系の振る舞いは連続的な DSG 系の振る舞いに近づくので、ローレンツ変換対称性が近似的に成り立ち、量子渦対の内部振動に相対論的な時間遅れの振る舞いが表れると考えられる。実際の実験状況に合わせた条件で数値シミュレーションを行い、実験での観測可能性を検証した。

一次元 SQUID 列中を移動する量子渦対の内部固有振動周期が、移動速度と共にどう変化するか調べる為には、交流電流を印加し、交流の振動周期を変えた時の内部振動の振幅変化を調べれば良い。これは、交流の振動周期が内部振動の固有周期と一致するとき、共鳴的に振幅が増大するからである。量子渦対の重心速度を変えるには、直流電流も同時に印加し、その強さを変えれば良い。実際にこの条件で DSG 方程式のシミュレーションを行った結果が図 4 である。図 4 の白点線が相対論から予想される振動周期であるが、確かに予想通りに共鳴ピークの位置が速度と共に増大して行く事が明らかとなった。

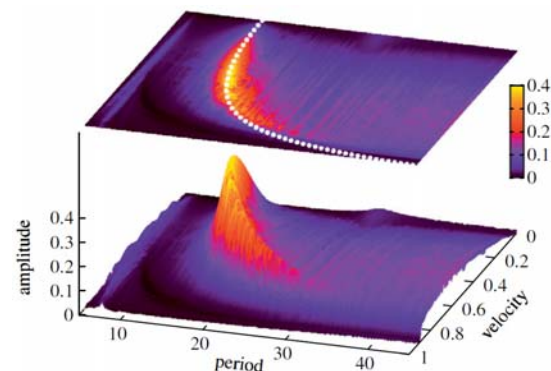


図 4: 内部振動振幅における共鳴ピークの重心速度依存性

② 純粋な交流電流の印加による並進運動の誘起とラチェット効果(雑誌論文 1, 学会発表 1, 2, 3)

系の離散性は量子渦対の重心座標に対する周期ポテンシャル(Peierls-Nabarro(PN)ポテンシャル)として現れると考えられる。交流駆動周期ポテンシャル中の粒子は、時間平均ゼロの振動外場を加えるだけで一方向に並進運動する可能性がある。SQUID 列中の量子渦対が実際に交流電流によって並進運動する事を数値計算によって見出し、並進運動が起こる条件を明らかにした。

上記の並進運動の方向は、渦対の内部振動と交流との相対位相により変化し、正味の平均速度はゼロとなる。ノイズのある実際の実験状況では、これを用いた量子渦の運動制御は困難である。しかし、外部磁場を印加することで PN ポテンシャルに異方性を現れると考えられ、運動制御が可能となると予測される。

そこで、外部磁場印加時の PN ポテンシャルを求めたところ、空間反転非対称なポテンシャルが実際に生ずる事が明らかとなった(図 5)。

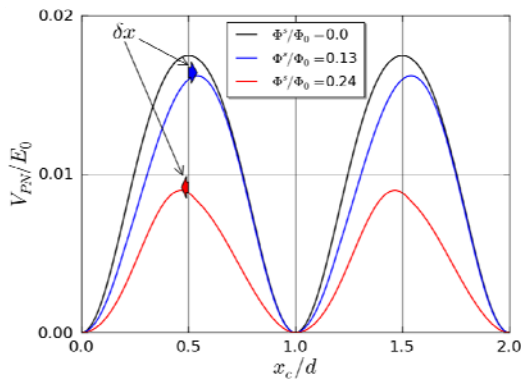


図 5: SQUID 1 個当たりの外部磁束 (Φ_s) を変化させた場合の PN ポテンシャルの変化。黒: $\Phi_s = \Phi_0$, 青: $\Phi_s = 0.13 \Phi_0$, 赤: $\Phi_s = 0.13 \Phi_0$, Φ_0 : 磁束量子。

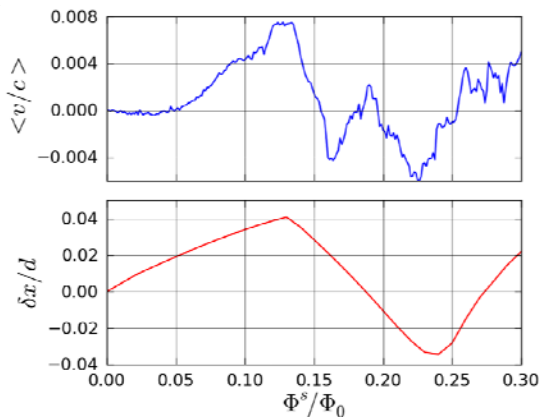


図 6: 外部磁場の変化による平均速度の変化(上)と PN ポテンシャルの変位(下)

さらに、このポテンシャルがラチェット効果を生み、純粋な交流駆動による量子渦対の並進運動方向に偏りが生じる事が明らかになった(図 6)。これらの結果により、時間平均ゼロの交流電流を用いてフラクソン対の位置制御を行う可能性が開かれた。

③ 量子渦対の不安定性と新たな系の提案

ジョセフソン接合の特性が均一でない実際の実験状況下では、SQUID 内の位相差の余分な自由度が量子渦対の不安定性を引き起こし、有限の寿命を生む事が判明し、実験の自由度が一部損なわれる事が分かった。そこで、状況設定を一部変更し、より有望な系の提案とその特性の検証を行った。

SQUID 一個当たり磁束量子の半分の外部磁場を印加した SQUID 列では、SQUID の内部自由度を考慮した場合でも不安定化を起こさない条件で、ソリトンの励起を作る事が可能であることを明らかにした。このソリトン励起は非常に質量の軽い相対論的な粒子として振る舞う事を示し、相対論的な量子力学を検証する系として有望である事を示した。

この研究成果は 2011 年 8 月に北京で開かれる 26th International Conference on Low Temperature Physics で招待ポスター講演として発表する事が決定している。

(3) その他の研究成果

① ブリーザー間相互作用(雑誌論文 2, 学会発表 6)

フラクソンとアンチフラクソンの対であるブリーザーに関して、二つのブリーザー間に働く相互作用の距離依存性の解析的な表式を導くと共に、これを用いる事により、厳密な数値計算結果を正確に予言出来る事を示した(図 7)。ここで開発した導出方法は、一般のフラクソン対間相互作用の解析に適用でき、有用である。

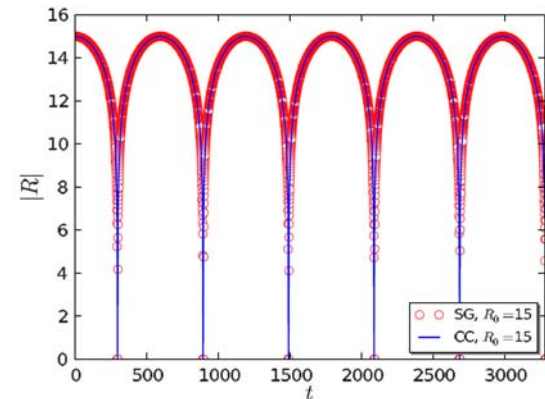


図 7: ブリーザー間距離の時間変化。赤丸: 数値計算結果、青線: 集団座標の方法を用いた結果。

② 時間領域の Greenberger-Horne-Zeilinger (GHZ) 試験の提案 (学会発表 4, 5)

「巨視的な物体は観測の有無に依らず決まった状態を取る」という巨視的実在論がどの程度のスケールまで適用可能かを調べる新しい方法を考案した。この方法は、これまでに提案されている Leggett-Garg 不等式を検証する方法より少数回の観測で判定できるという利点を持つ。量子渦対は多数の電子によって形成される巨視的な実体であるため、この系で巨視的実在論が成立するか否かは重要な問題であり、その簡易な判定法を考案した事は意義深い。

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 2 件)

1. M. Nishida, T. Kanayama, T. Nakajo, T. Fujii, N. Hatakenaka, Bound fluxon pair in one-dimensional SQUID array, Physica C, 470 巻, 査読有, 2010, pp832-834

2. M. Nishida, Y. Furukawa, T. Fujii, N. Hatakenaka, Breather-breather interactions in sine-Gordon systems using collective coordinate approach, Phys. Rev. E. 80 巻, 査読有, 2009, 036603.

[学会発表] (計 6 件)

1. 西田宗弘, 山田親寛, 中城貴哉, 一次元 SQUID 列中のフラクソン対におけるラチェット効果, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 2010 年 9 月 23 日, 大阪府立大学(堺市)

2. 中城貴哉, 藤井敏之, 西田宗弘, 一次元 SQUID 列におけるフラクソン対の運動, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 20 日, 岡山大学(岡山市)

3. M. Nishida, T. Kanayama, T. Nakajo, T. Fujii, N. Hatakenaka, Bound fluxon pair in one-dimensional SQUID array, Sixth International Conference in School Format on Vortex Matter in Nanostructured Superconductors, 22 September 2009, Rhodes Greece

4. T. Fujii, M. Nishida, N. Hatakenaka, Proposal for testing macrorealism using the Greenberger-Horne-Zeilinger scheme in time domain inequality, International Symposium on Nanoscale Transport and Technology, 21 January 2009, Atsugi Japan

5. T. Fujii, M. Nishida, N. Hatakenaka,

Proposal for a temporal Greenberger-Horne-Zeilinger test, The Clock and the Quantum; Time in Quantum Foundations, 1 October 2008, Ontario Canada

6. 西田宗弘, 古川善己, 藤井敏之, 畠中憲之, ジョセフソン伝送線路におけるブリーザー間相互作用, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 1 日, 岩手大学(盛岡市)

[その他]

ホームページ等

<http://home.hiroshima-u.ac.jp/mnishida/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西田 宗弘 (NISHIDA MUNEHIRO)
広島大学・大学院先端物質科学研究科・
准教授
研究者番号：10329112

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

畠中 憲之 (HATAKENAKA NORIYUKI)
広島大学・大学院総合科学研究科・教授
研究者番号：70363009