

研究種目：基盤研究（C）
研究期間：2006～2008
課題番号：18540352
研究課題名（和文） フラクソンの量子論
研究課題名（英文） Quantum Theory of Fluxon

研究代表者
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

研究成果の概要：

本研究は、長いジョセフソン接合中のトポロジカルな素励起であるフラクソン(磁束量子)の量子力学的特性の解明とその応用を目的とし、以下の結果を得た。(1)フラクソンの量子透過共鳴現象を通して、その量子性を明らかにした。また、(2)それを用いてフラクソン量子情報処理技術を構築した。さらに、(3)量子力学における根幹問題である「アインシュタインの月」のパラドックスに対して、統計処理を必要としない新しいスキームを提案した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,400,000	0	1,400,000
2007年度	800,000	240,000	1,040,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	480,000	3,480,000

研究分野：数物系科学
科研費の分科・細目：物理学・物性 II
キーワード：超低温・超伝導

1. 研究開始当初の背景

フラクソンは、1970年代新しい情報通信の担い手として期待され研究が精力的に遂行され、現在もSingle Flux Quantum (SFQ) 論理素子として発展し続けていた。また、高温超電導体の固有ジョセフソン接合におけるフラクソンの運動を用いたテラヘルツ発振の研究などが

進行中で、フラクソンの動力学的理解とその工学への応用が益々期待される場所であった。このように、フラクソンの古典的特性は十分調査されているが、フラクソン自身の量子性に着目した研究は、加藤らの理論研究があるものの十分行われていないというのが現状であった。本研究課題申請時、ドイツ・エ

アランゲン大学のグループによって初めてフラクソンの量子性が確認され、いよいよ古典から量子へとフラクソンの研究が推移するものと予測されていた。我々は、これに先駆けフラクソンの機動性に着目した量子情報処理技術の研究に着手しており、新しい段階のフラクソン物理学を展開したいと考えていた。

2. 研究の目的

フラクソン(磁束量子)は、長いジョセフソン接合中のトポロジカルな素励起である。これまで、もっぱらその古典的特性について研究されてきたが、量子力学的側面に着目した研究は十分でなかった。本研究の目的は、(1)フラクソンの量子論を展開し、(2)その量子情報処理技術への応用(フラクソン量子情報処理)に取り組むと共に、(3)量子力学における根幹問題(マクロ系での量子論)を検討することである。

3. 研究の方法

(1) フラクソンの量子論

フラクソン(磁束量子)の量子力学的性質を明らかにするため、経路積分法を用いて、フラクソンの量子透過共鳴現象を調べた。経路積分法は、システムの状態変化を遷移する経路(概ね古典経路)として捉える為、物理的直感がきき、なおかつ多自由度への拡張が容易である。このため、外部環境(多自由度)の下でのトンネル現象を定式化するうえで大変有効な方法である。また、集団座標の方法は、フラクソンと反フラクソンが結合したブリーザーの相対運動を記述するのに適しており、その量子崩壊現象を理解するのに有利である。

(2) フラクソン量子情報処理

フラクソン(磁束量子)の量子力学的特性を

基に量子情報科学への応用を検討するため、フラクソンを量子力学的粒子とみなし、量子情報処理における基本構成要素である量子ビットが形成できるかどうか、さらに量子論理ゲートを構成できるかどうか検討した。

(3) 量子力学における根本問題

フラクソンの量子力学的特性を用いて、量子力学的世界観と対立するマクロ実在論の正当性を検証するための新しいスキームを考案した。そこでは、すでに確立されている二つの手法、時間ベル不等式と三粒子量子相関を用いたスキームを結合することによって、新しい手法を提案する。

4. 研究成果

(1) フラクソンの量子論

①矩形ポテンシャルに入射するフラクソンに対する経路積分法を確立した。特筆すべき点は、経路分割を用いることによって、これまで困難であった境界での経路の接続問題を解決したことである。これによって、フラクソンが矩形ポテンシャルを透過する確率を計算し、これまで知られている計算結果との一致をみた。

②経路積分法による摩擦を伴う量子透過共鳴現象の定式化した。フラクソンは膨大な数の電子対による環状電流によって形成されていることから、マクロな物理実体である。マクロ系の特徴は、ミクロ系では考慮する必要のない多自由度に由来する摩擦現象である。この摩擦現象を考慮して、フラクソンの量子透過共鳴効果に対して外部環境の影響が如何に関わるのかを研究した。すでに巨視系における量子トンネル現象は、Caldeira-Leggettによって定式化され、準安定状態からのフラクソン・トンネリングは加藤らによってなされている。ここで主張しておきたいことは、我々が解析しようとするモ

デルでは、自由粒子の透過（トンネル）過程だけではなく、反射（量子反射）過程をも含み、それらを統一的に取り扱うことができるという点に新規性がある。これによって、これまであまり議論されてこなかった、量子反射過程における摩擦の効果も理解することができる。したがって、今回得た知見は、量子トンネル効果における摩擦の効果に加えて、矩形ポテンシャル直上での起こる共鳴的量子反射過程に対する摩擦の影響である。この量子共鳴は、境界で共鳴的な反射が起こることによって形成されることを、遷移経路を分析することによって解明するとともに、共鳴時間とトンネル時間との関係を解明した。共鳴経路ではトンネル障壁領域に滞在する時間が長くなるため、摩擦の影響を大きく受けることが分かった。

③フラクソンの相対論的量子論

フラクソン（反フラクソン）は、ローレンツ不変性を有するサイン・ゴルドン方程式に支配され、相対論的粒子として振舞う。そして、それらが結合したブリーザーもまた、内部振動しながら移動する安定な相対論的粒子と考えられる。しかし、電流バイアス下では、ブリーザーはフラクソンと反フラクソンへと崩壊する。今回、集団座標の方法を用いて、この量子力学的崩壊を調査し、ちょうど、素粒子の一つであるミューオンが崩壊するのと同様、量子崩壊に相対論的時間遅れが生じることを明らかにした。

(2) フラクソン量子情報処理

フラクソン（磁束量子）の量子力学的特性を基に量子情報科学への応用として内部自由度を有する新しいタイプの新規量子ビットを提案した。

①ブリーザー量子ビットの提案

量子ビットは、量子二準位系によって構成さ

れる。フラクソンをポテンシャルに束縛することによって、量子二準位系を作り出すことができるが、動く量子ビットを作るためには、内部自由度を持ったフラクソンが必要になる。そこで、フラクソンと反フラクソンが結合したブリーザーに着目して、その内部自由度を利用した可動な量子ビットを提案した。しかし、このブリーザー量子ビットは、外部摂動に脆弱であるため、より強靱な量子ビットを考案する必要があることがわかった。

②半整数フラクソン量子ビットの提案

通常ジョセフソン伝送線路と異なり、強磁性絶縁層を有する伝送路においては、フラクソンは半整数に量子化され、二つの半整数フラクソンが結合した新しい状態（半整数束縛フラクソン状態）を形成することを明らかにした。この状態では、フラクソンの相対運動による内部振動が生じる。今回、この新しい振動を量子化して出現する量子状態を用いることによって、移動可能な量子ビット（半整数フラクソン量子ビット）を提案した。この量子ビットは、先に我々が提案したブリーザー量子ビットと異なり、トポロジカルな安定性を有する。

③量子編み機の提案

古典フラクソンが、量子コンピュータの基本構成要素である量子ビットへ与える影響を調べた。結果、古典フラクソンを用いて量子ビットの結合を制御できることがわかった。そして、これを利用して制御 NOT 量子論理ゲートが構築できることがわかった。さらに、静電的に結合した位相量子ビット列では、それに並走するフラクソンによって制御することができ、NMR 類似の個別制御と組み合わせることによって、あたかも編み機のように情報を編みこみ、任意の量子計算が可能であることを明らかにした。さらに、このシステムには、量子誤り訂正が自然に導入できことも

わかった。したがって、量子誤り訂正付き量子計算機の構築が可能となることがわかった。

(3)量子力学における根本問題

フラクソンの量子性を用いて、量子論の根幹問題に挑戦した。量子力学は、ミクロ世界を記述するのに成功し、我々に新しい世界観をもたらした。しかし、その量子力学をマクロ世界に外挿してよいかどうかは、必ずしも自明なことではない。シュレディンガーは猫を例えに、重ね合わせの原理の非日常性を浮き彫りにし、量子力学の更なる理解を求めた。最近、ハイテクを用いて作り出された猫は、量子力学に軍配をあげようとしているが、決定的な証拠を得るにいたっていない。これに決着をつけるためには、マクロ実在論すなわち「アインシュタインの月」を否定し、量子力学の予言が正しいことを示す必要がある。この判定を与えるのが、1985年に提出された、Leggett-Garg 不等式である。しかし、これはベルの不等式を基盤に時間領域に拡張したものであることから、統計処理を必要とし、不等式の破れにどうしてもあいまいさが残る。そこで、今回、不等式を必要としない Greenberger-Horne-Zeilinger (GHZ) の方法を時間領域で展開し、たった一回の実験で、量子力学の是非を判定する方法、時間 GHZ 法を構築した。

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 12 件) 査読あり

1. T. Fujii, S. Matsuo and N. Hatakenaka, NMR imaging analogue of the individual qubit operations in superconducting flux-qubit chains, Journal of Physics: Conference Series, **150**

- (2009) 022011.
2. S. Matsuo, T. Fujii, N. Kosugi and N. Hatakenaka, Theory of damped Rabi oscillations at finite temperatures, Journal of Physics: Conference Series, **150** (2009) 022056
3. K. Takashima, S. Matsuo, T. Fujii, N. Hatakenaka, S. Kurihara and A. Zeilinger, Squeezing of quantum flux in a double SQUID system, Journal of Physics: Conference Series, **150** (2009) 052260
4. N. Kosugi, S. Matsuo, and N. Hatakenaka, Theory of damped coherent oscillations in superconducting phase qubits, Journal of Physics: Conference Series, **150** (2009) 022047
5. T. Fujii, M. Nishida, and N. Hatakenaka, Mobile qubits in quantum Josephson circuits, Physical Review B, **77** (2008) 024505
6. K. Takashima, N. Hatakenaka, S. Kurihara, and A. Zeilinger, Nonstationary boundary effect for a quantum flux in superconducting nanocircuits, Journal of Physics: Mathematical and Theoretical, **41** (2008) 164036
7. M. Nishida, T. Fujii, and N. Hatakenaka, Mobile fluxon qubits in a long superconductor-ferromagnet-superconductor Josephson junction, Journal of Physics: Conference Series **97** (2008) 012326
8. T. Fujii, T. Shibata, M. Nishida, and N. Hatakenaka, Flying superconducting qubits, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, **17** (2007) 97

9. K. Konno, M. Nishida, S. Tanda, and N. Hatakenaka, The effect of dissipation on quantum transmission resonance, *Physics Letters A*, 368 (2007) 442
10. S. Matsuo, S. Ashhab, T. Fujii, F. Nori, K. Nagai, and N. Hatakenaka, Generation of macroscopic entangled states in coupled superconducting phase qubits, *Journal of the Physical Society of Japan*, **76** (2007) 054802(1)-(6)
11. S. Matsuo, K. Furuta, T. Fujii, K. Nagai, and N. Hatakenaka, Fluxon-based gate controls of capacitively coupled flux-based-phase qubits, *Applied Physics Letters*, **91** (2007) 093103
12. M. Nishida, K. Murata, T. Fujii, and N. Hatakenaka, Time dilation of a bound half-fluxon pair in a long Josephson junction with a ferromagnetic insulator, *Physical Review Letters*, **99** (2007) 207004

[学会発表] (計 11 件)

1. ○高嶋耕司, 藤井敏之, 松尾繁政, 畠中憲之, 栗原進, A. Zeilinger
「超伝導人工原子における磁束量子のスケーリング」
『応用物理学会』 第 56 回学術講演会
筑波大学 2009 年 4 月 2 日.
2. ○藤井敏之, 松尾繁政, 畠中憲之,
「フラクソン制御による超伝導磁束量子コンピュータの理論」
『日本物理学会』 第 64 回年次大会 立
教大学 2009 年 3 月 27 日.
3. ○藤井敏之, 松尾繁政, 畠中憲之,
「NMR イメージング法による磁束量子ビ

ットの個別制御理論」

- 『日本物理学会』 2008 年秋季大会 岩
手大学 2008 年 9 月 22 日.
4. ○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 岩
手大学 2008 年 9 月 22 日.
 5. ○高嶋耕司, 畠中憲之, 栗原進 A.
Zeilinger
「超伝導量子回路における“動的カシミ
ール効果”」
『応用物理学会』 第 55 回学術講演会
日本大学 2008 年 3 月 27 日.
 6. ○西田宗弘, 藤井敏之, 畠中憲之
「超伝導/強磁性/超伝導接合中の π フ
ラクソン対における相対論的時間遅れ」
『日本物理学会』 第 63 回年次大会 近
畿大学 2008 年 3 月 24 日.
 7. ○藤井敏之, 松尾繁政, 畠中憲之
「磁束量子を用いた超伝導位相量子ビ
ットのエンタングルメント生成」
『日本物理学会』 第 63 回年次大会 近
畿大学 2008 年 3 月 23 日.
 8. ○松尾繁政, 古田佳野子, 藤井敏之, 永
井克彦, 畠中憲之
「磁束量子を用いた超伝導位相量子ビ
ット間の相互作用制御」
『日本物理学会』 第 63 回年次大会 近
畿大学 2008 年 3 月 23 日.
 9. ○藤井敏之, 西田宗弘, 畠中憲之
「相対論的ジョセフソン・ブリーザーの
量子崩壊」
『日本物理学会』 第 62 回年次大会 北
海道大学 2007 年 9 月 22 日.
 10. ○松尾繁政, S. Ashhab, 藤井敏之, F.
Nori, 畠中憲之

「超伝導位相量子ビットにおける量子絡み合い状態の生成」

『日本物理学会』 第62回年次大会 北海道大学 2007年9月22日.

11. ○藤井敏之, 西田宗弘, 梶中憲之

「ブリーザー量子ビット II」

『日本物理学会』 秋季大会 24aXJ-2
千葉大学 2006年9月24日.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1件)

1. 発明者: 高嶋耕司, 上松和夫, 梶中憲之

権利者: I H I

単一光子発生方法および装置、並びに単一光子検出方法及び装置

特願 2008-060586

2008年3月14日 国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

梶中 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

(2)研究分担者

(3)連携研究者