

学位論文題名

Macroscopic Resonant Tunneling Phenomena
in Mesoscopic Josephson Junctions

(メソスコピックジョセフソン接合における巨視的共鳴トンネル現象)

学位論文内容の要旨

最近の科学技術の進歩、特に微細加工技術の進歩は、電子デバイスの小型化に大きな寄与をもたらすとともに、そのサイズをメソと呼ばれるマクロとミクロの境界領域へと導くに至った。そこでは、古典力学に従うマクロな系の特徴と量子力学に従うミクロな系の特徴が混在する科学的にも未知なる領域であり、工学的には新たな効果を示すデバイスの実現が期待される。また、従来思考実験としてしか考えられていなかった量子力学の観測問題に関わる実験が、現実の対象となってきている。

本研究は、このような状況下において、従来古典的にしか取り扱われていなかったジョセフソン接合の位相変数を量子力学的に取り扱うことによって、ジョセフソン接合の量子論を展開するとともに、「量子力学をマクロな系に外挿してよいか」という命題に対する検証方法について議論し、マクロな系では避けることのできない摩擦の起源について考察したものである。

具体的には、超伝導体の秩序パラメータの位相変数に対する共鳴トンネル現象を予言し、その検証方法について議論した。共鳴トンネル現象は、半導体超格子などで議論されているものと基本的には同じであるが、次の意味で本質的な違いを有する。それは、トンネルする実体が電子のようなミクロなものではなく、位相変数を座標とする空間内の仮想粒子であることによる。位相変数は膨大な数のクーパー対が十分な内部相関を持つことによって作り出されたマクロな変数であり、これによりシステムの状態が指定される。従って、仮想粒子がトンネル効果によって異なる位相変数の状態に遷移する時、膨大な数のクーパー対が一斉に状態を変えることになり、一電子のトンネル現象の素過程とは本質的に異なる。従って、我々は、一電子の場合と区別するためにこれを「巨視的共鳴トンネル現象」と名付け、いくつかの観測方法を提案した。(第2章)

1. ジョセフソン接合より放出されるマイクロ波の検出 (第3章)

巨視的共鳴トンネリングは、システムを励起状態へともたらず。システムはその後基底状態へと緩和するが、その際、エネルギー差に対応するマイクロ波が放出される。これを検出することによって巨視的共鳴トンネル現象の存在を確認することを考案した。この放出されたマイクロ波は、工学的に未開拓となっているマイクロ波領域の光源及び検出器としての可能性を有する。

2. 電圧スパイクの検出 (第4章)

巨視的共鳴トンネル現象は量子位相すべり現象とみなすことができる。位相すべりは、ジョセフソンの関係によって電圧発生と結び付いている。巨視的共鳴トンネル現象は、特定のバイアス電流のところで、トンネリングが許されることから、電流-電圧特性の超伝導電流ブランチに電圧スパイクが発生することを予言した。これは、一種の「電流量子化

現象」と捉えることができ、標準電流への適用や、新しいデバイスの実現可能性をもつ。

3. 最大ジョセフソン電流の異常な振舞い (第5章)

一般に、ジョセフソン電流は熱ゆらぎや量子ゆらぎのために Ambegaokar-Baratoff によって計算された臨界電流より小さくなる。そこで、巨視的共鳴トンネル現象に由来する最大電流の低下を考察した。これによって、ゆらぎの温度あるいは磁場依存性から巨視的共鳴トンネル効果を定量化することができることが分かった。

以上の提案は、最近、微小ジョセフソン接合を用いた実験において、そのいくつかの間接的に観測された。また、ジョセフソン接合と非常に近いシステムである超伝導細線や、高温超伝導体において当論文で考察した位相の共鳴トンネル現象が観測された。

論文の後半では、マクロな系において避けることが出来ないエネルギー散逸の問題を、ジョセフソン接合系において調べた。これまで、トンネル確率が摩擦の為に減小することは実験的にも観測されてきた。しかし、摩擦の起源がいかなるものであるかは依然不明であった。我々は、微小接合において電磁場環境が接合の挙動に大きく影響することを考慮して、摩擦の起源は光子が媒介とする超伝導準粒子のトンネリングであると結論した。これによって、実験的に見積もられた有効抵抗の大きさをはじめとして、実験的状況をよく説明できることがわかった。(第6章) 更に、このような電磁場と接合の相互作用を積極的に取り入れて非古典的光の発生方法を提案した。(第7章)

以上の議論は、ジョセフソン接合を中心になされたものであるが、そこに内在している物理は他の多くのシステムにおいても適応可能であり、今後他分野との有機的交流によって新たな進歩が期待される。

学位論文審査の要旨

主査 教授 田村 信一朗
副査 教授 中山 恒義
副査 教授 山谷 和彦
副査 教授 徳田 直樹

学位論文題名

Macroscopic Resonant Tunneling Phenomena in Mesoscopic Josephson Junctions

(メソスコピックジョセフソン接合における巨視的共鳴トンネル現象)

最近の微細加工技術の進歩は、デバイスサイズの小型化に大きな寄与をもたらすとともに、システムサイズをメソと呼ばれるマクロとミクロの境界領域へと導くに至った。この領域は、古典力学に従うマクロ系の特徴と量子力学に従うミクロ系の特徴が混在する科学的にも未知の領域であり、工学的にはデバイスがどのような挙動を示すかという点で非常に興味深い。

このような背景の下に、本論文はメソスコピックなスケールの超伝導体ジョセフソン接合における巨視的量子効果と、その検証方法について詳細な検討を行い、いくつかの新提案を行ったものである。更にマクロな系では避けることの出来ないエネルギー散逸の起源について考察し、多くの有益な知見を得ており、内容は8章からなる。

第1章は本論文の物理的背景と目的、意義ならびに章構成を述べている。

第2章ではジョセフソン接合におけるトンネル電流を記述する基本的方程式と、その古典的および量子論的取扱いについて述べ、後者はウオッシュ・ボードポテンシャル中を運動する仮想粒子のトンネル現象に対応することを明らかにしている。またこのトンネリングは位相空間内で生じるものであること、そして位相変数は膨大な数のクーバー対が内部相関を持つことによって作り出されたマクロな変数であり、トンネル効果によって位相変数の異なる状態間に遷移が生じるとき、巨視的な数のクーバー対が一斉に状態を変えることとなり、よく知られた一電子のトンネル現象とは本質的に異なることを議論している。

第3章ではジョセフソン接合より放出されるマイクロ波フォトンについて考察している。このマイクロ波フォトンには巨視的共鳴トンネリング(MRT)により系が基底状態に緩和する際に放出されるものであり、その検出がMRTの存在の確認に利用できることと結論している。更にこうして放出されたマイクロ波の工学的な応用に関して議論している。

第4章ではジョセフソン接合における電流-電圧特性について考察し、特にMRTが生じると超伝導電流ブランチに電圧スパイクが発生することを予言している。これはMRTが量子位相すべり現象であり、ジョセフソンの関係式により電圧発生と結びついていること、更に共鳴トンネリングが特定のバイアス電流のところでのみ生じることに基づいていることを説明している。特にこの効果は一種の電流量子化現象であり、標準電流への適用やそれを利用した新しいデバイスの可能性についても議論している。

第5章では、MRTを観測するための三番目の可能性について議論している。つまり励起状態よりの逐次トンネリングを考慮するとスイッチ電流分布に共鳴トンネリングに伴う付加的なピークがあらわれることを示し、その検出を提案している。

第6章では、巨視的な系では避けることの出来ない摩擦とそれに伴うエネルギー散逸について考察を展開している。特にこれまで不明であったその起源について、電磁場環境が微小接合の挙動に大きく影響することを考慮し、フォトンが媒介する超伝導準粒子のトンネリングであると結論している。更にこの結果に基づき、実験で得られている有効抵抗の大きさ等がよく説明されることを確認している。

第7章では6章で考察したジョセフソン接合と電磁場との相互作用を積極的に利用することにより、非古典的光の発生方法（光のスクイーミング）について新提案を行っている。

第8章では本論文の結論と、更に関連する分野との有機的交流により新たに期待される進展について述べている。

以上を要するに、著者はメソスコピックな超伝導ジョセフソン接合系において巨視的な量子効果である共鳴トンネル現象が生じることを理論的に予言し、またその観測方法に関して多くの有益な新知見を与えており、低温物理学、超伝導工学、ならびに応用物理学の進歩に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。