

マヨラナ粒子を操るナノ量子デバイスを設計 — トポロジカル量子計算の基礎技術に貢献 —

平成24年9月13日

独立行政法人 物質・材料研究機構

概要

1. 独立行政法人 物質・材料研究機構（理事長：潮田 資勝）国際ナノアーキテクトニクス研究拠点（WPI-MANA）（拠点長：青野 正和）の梁 奇峰（リャン チフォン）、王志（ワン チ）両 MANA リサーチアソシエートと古月 暁主任研究者らのグループは、電氣的に中性であるマヨラナ粒子¹⁾の理論解析を行い、その操作方法を考案した。特殊な超伝導状態のトポロジー²⁾特性を利用するように設計されたナノ量子デバイスを用いれば、局所的なゲート電圧³⁾のスイッチングだけでマヨラナ粒子を自在に搬送・交換することができる。
2. マヨラナ粒子は、1937年にイタリアの理論物理学者エットーレ・マヨラナが考案したものであるが、素粒子としては未だに発見されていない。近年、特殊な超伝導状態の準粒子励起⁴⁾がマヨラナ粒子として振る舞うことが明らかになってきた。マヨラナ粒子は、電氣的に中性なフェルミ粒子であり、安定である反面、外場による操作は困難である。
3. 研究グループは、設計された量子デバイスでのマヨラナ粒子の位置交換⁵⁾は、電子や光子等と異なり非アーベル統計⁵⁾に従い、量子計算に利用できることも確認した。これは、トポロジカル量子計算⁶⁾の基礎となる技術に繋がる研究成果である。
4. 本研究成果はヨーロッパ物理学会の論文誌 *Europhysics Letters* に Editor's choice として掲載された。

研究の背景

量子計算は、量子状態によって情報を記録し、量子状態を変換することによって情報を処理する。量子波動関数の重ね合わせを利用することで、大量の情報を並列に処理し、従来の計算方法を遥かに凌ぐ計算パワーを持つ。量子計算は、特に素因数分解等の問題解決に非常に大きな威力を持ち、最先端の暗号技術や量子シミュレーション⁷⁾などへの重要な応用が期待される。情報の最小単位となる量子ビットを実装する方式として、今までにも SQUID⁸⁾や量子ドット⁹⁾などが提案され、量子計算の成功例も報告されている。しかし、電磁場ノイズなどの環境からの影響で量子状態が壊れやすいこと（デコヒーレンス）が、大規模な量子計算のボトルネックになっている。

これらの問題点を克服できる新しいアプローチとして、近年マヨラナ粒子を用いたトポロジカル量子計算が急速に注目を集めている。この新しい方式は、非アーベル統計に従うマヨラナ粒子系の持つ縮退した基底状態¹⁰⁾を量子ビットとして利用し、マヨラナ粒子の位置交換が残す軌跡の編組みを利用して量子計算を行う。量子編組みはトポロジー特性を持ち、環境からの影響に強く、デコヒーレンスの問題が解消される。一方で、マヨラナ粒子は電氣的に中性であり、その操作は容易では

ない。正に諸刃の剣である。

成果の内容

今回、理論計算をおこなった系は、トポロジカル超伝導状態である。特徴的なことは、超伝導状態に奇数個の量子渦を導入する場合のみ超伝導ギャップ内にゼロエネルギー励起モードが現れる。偶数個の電子渦の場合には、ゼロエネルギー励起モードは現れない。そのモードは電子の半分とホール半分の線形結合であり、粒子が反粒子に等価という条件を満たし、マヨラナ粒子として振る舞う。一つの量子渦を持つ超伝導サンプル（図1）を Bogoliubov-de Gennes (BdG) 方程式¹⁾ によって解析した結果、量子渦の芯及びサンプルのエッジにそれぞれマヨラナ粒子が存在することが分かった（図2）。

二つのサンプルを繋げたシステムを詳細に解析すると、芯部分のマヨラナ粒子は見えるが、エッジ部分のマヨラナ粒子は消える（図3参照）。くびれを通じて、二つのサンプルのエッジが一つに繋がると、囲まれた部分に二つ（偶数）の量子渦が含まれ、個数が奇数という前提条件が崩れるため、エッジ部分のマヨラナ粒子が存在できなくなる。

サンプル間の繋がりはくびれ部分にゲート電圧の印加によって開閉できる。図3が示すように、左側のくびれにゲート電圧が掛かり、エッジマヨラナ粒子が左側のサンプルに局在する状況からスタートする。ゲート電圧を下げると、三つのサンプルが繋がり、エッジマヨラナ粒子は系全体を跨るエッジに拡散する。繋がったサンプルエッジが三つ（奇数）の量子渦を囲んでいるからである。次に右側のくびれにゲート電圧を掛け、右側のサンプルを連結した他の二つのサンプルから孤立させると、マヨラナ粒子の波動関数が完全にそこに収縮する。このようにトポロジカル特性を利用して、2ヶ所のゲート電圧のスイッチングによりマヨラナ粒子を左側のサンプルから右側に運搬できる。最後のマヨラナ波動関数の収縮は電子や光子では得られない特性である。

図1に示された四つのサンプルからなるナノデバイスを使うと、二つのエッジマヨラナ粒子（赤と緑）の位置を交換することができる。交換過程における二つのマヨラナ粒子の波動関数の時間発展を時間依存 BdG 方程式によって解析した結果、交換後では一つのマヨラナ粒子の波動関数がマイナス符号に代わり、残りの一つは変化しないことが分かった（図4）。このため、二つのマヨラナ粒子の交換が非アーベル統計を満たす。

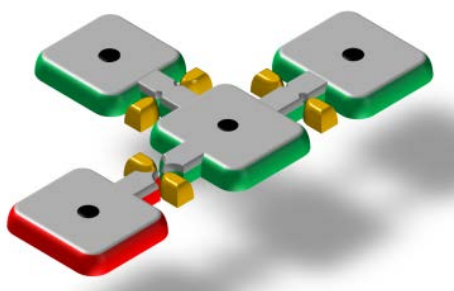


図1：四つのトポロジカル超伝導サンプルがくびれ部分を通じて繋がった量子デバイスの概念図。くびれ部分にゲート電圧を印加することで、サンプル間の電子の行き来を制御することができる。

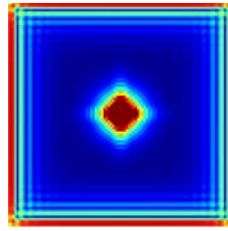


図2：量子渦の芯部分とサンプルエッジ部に現れるマヨラナ粒子の波動関数 (図中の赤い部分)。

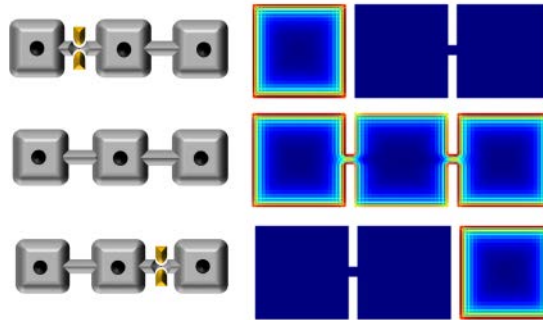


図3：くびれ部分でのゲート電圧のスイッチングによるマヨラナ粒子の運搬。但し、量子渦の芯に捕まったマヨラナ粒子は表示していない。

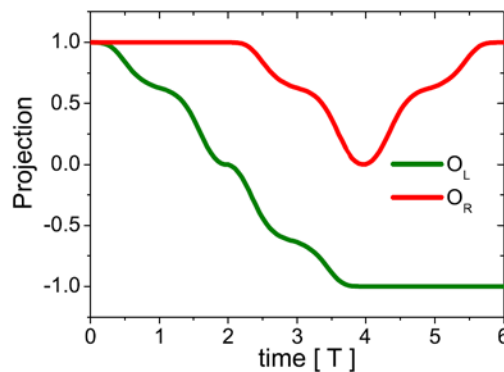


図4：図1に示されたデバイスを用いて二つのマヨラナ粒子を交換する際、それぞれの波動関数の時間発展を時間依存 BdG 方程式によって解析した結果。

波及効果と今後の展開

超伝導状態の準粒子励起としてのマヨラナ粒子を、トポロジカル特性を利用すれば局所的なゲート電圧のスイッチングで移動・交換できることが具体的に示されたのを受けて、今後マヨラナ粒子の観測と操作の実証研究が一層加速されると考えられる。スイッチング時間は10ナノ秒程度に短くできることが物質パラメータを用いた解析で判明したので、実用化できる技術である。また、図5に示すように、我々の量子デバイスは大規模なトポロジカル量子ビット操作に拡張できるので、今後の量子計算の実装に役立つ。

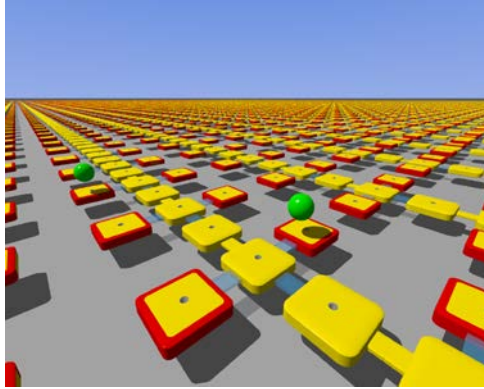


図5：大規模トポロジカル量子計算用デバイスの模式図

掲載論文

題目: Manipulation of Majorana Fermions by Point-Like Gate Voltage in Vortex state of Topological Superconductor

著者: Q. -F. Liang, Z. Wang and X. Hu

雑誌: Europhysics Letters (Editor's choice)

用語解説

1) マヨラナ粒子、反粒子

フェルミ粒子はディラック粒子とマヨラナ粒子に分かれる。電子は負の電荷を持ち、その反粒子は陽電子で正の電荷を持ち、ディラック粒子である。一方、マヨラナ粒子はその反粒子が自身と同じであり、電氣的に中性な「掴みとこがない粒子」である。素粒子としては未だに発見されていないが、ニュートリノがその候補である。数学的には粒子と反粒子は複素共役で結ばれている。

2) トポロジー

連続変形に関する物体の不変性を記述する特性のこと。例えば、取っ手の付いているカップとドーナツは、引っ張ったり縮めたりして連続的な変形によって互いに変わるので、トポロジー的には等価である。近年トポロジカル絶縁体やトポロジカル超伝導等が発見され、電子状態のトポロジーが物理や物質科学で重要な役割を果たすことが分かってきた。

3) ゲート電圧

電気回路に入っていない電極に電圧を掛け、それに近い回路部分の電界により電子の流れに閘門(ゲート)を設けることができる。

4) 準粒子

量子多体系の離散的な励起モードを表すものであり、複雑な現象を単純化して記述するために用いられる。例えば、格子系ではフォノン、磁性体ではマグノン、超伝導では電子とホール線の線形結合になっているボゴリユボソンが知られている。

5) 位置交換、非アーベル統計

古典力学では、同種の粒子であってもそれぞれが識別でき、標識して追跡できる。このため、二つの粒子の位置を交換すると、系が違う状態になる。量子力学では、同種粒子は識別できない。このため、同じ量子状態にある二つの同種粒子の位置交換に関しては、系の波動関数は不変でなければいけない。ボーズ・アインシュタイン統計に従う粒子系の波動関数は位置交換に関して対称であり、フェルミ・ディラック統計に従う粒子系の波動関数は位置交換に関して反対称である。これらのことから、フェルミ粒子に関するパウリの排他原理が導かれる。三次元空間で成り立つボーズ統計とフェルミ統計は共にアーベル統計として分類される。一方、二次元空間では、二つの粒子の位置を交換すると、系の波動関数が変わってしまうため、上記とは異なる非アーベル統計が成り立つ。

6) トポロジカル量子計算

非アーベル統計に従う二次元の粒子或いは準粒子が交換する際に残す軌跡の編組みを利用して量子計算を行う方式。量子編組みはトポロジー特性を持ち、環境からの影響に強く、それに基づく量子計算は他の量子状態を利用するものと比べて非常に安定である。

7) 量子シミュレーション

1982年にリチャード・ファイマンによって提案されたアイデアである。量子多体系の波動関数の張る空間は粒子数が増えるに従って指数的に大きくなるため、古典的計算アルゴリズムでは計算時間が指数的に長くなる。量子計算アルゴリズムを使えば、粒子数と同じ程度の量子ビット数で元の系を効率的に模擬計算ができる。

8) SQUID

超伝導量子トンネリング効果を利用した量子干渉素子で、微小な磁場の測定に用いられている。

9) 量子ドット

三次元全ての方向から移動方向が制限された電子の状態のことであり、電子の状態密度は離散化されることが特徴である。

10) 縮退した基底状態

量子系の最も低いエネルギーを持つ状態は基底状態と呼ばれ、二つ以上の異なる状態が同じエネルギーを持つ場合、状態の縮退と呼ばれる。ボソン系とディラックフェルミオン系の基底状態はユニークであるが、マヨラナ粒子系は複数の基底状態を持ち得る。

11) Bogoliubov-de Gennes (BdG) 方程式

超伝導状態の空間的に非一様な準粒子励起を量子力学的に記述する方程式。

本件に関するお問い合わせ先

(研究内容に関すること)

独立行政法人物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点(WPI-MANA)

主任研究者 古月 暁

E-mail: HU.Xiao@nims.go.jp

TEL: 029-860-4897

(報道担当)

独立行政法人物質・材料研究機構

企画部門 広報室

〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

TEL: 029-859-2026、FAX: 029-859-2017