

主論文の要約

論文題目 Majorana fermion と parafermion が引き起こす fractional Josephson 効果についての理論的研究
(Theoretical analysis on fractional Josephson effect induced by Majorana fermion and parafermion)

氏名 戎 弘実

論文内容の要約

この論文では物性物理における Majorana fermion と Parafermion と呼ばれる新規な粒子が引き起こす新しい物理現象のひとつ fractional Josephson 効果について主にフォーカスを当てた、筆者が行った研究についてまとめたものである。本論分の構成は以下のとおりである:

第 1 章は博士論文全体の構成について簡単に紹介する。

第 2 章では Majorana fermion について説明をする。

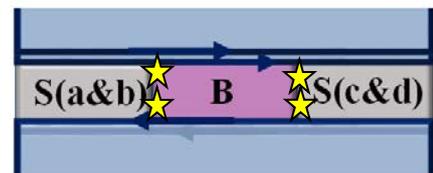
第 3 章では超伝導/磁性体/超伝導の接合系で磁化の秩序が超伝導にしみ込む、いわゆる inverse proximity effect が起こる場合の Majorana fermion の振る舞いや Josephson 効果に

ついてまとめる。磁化のしみ込み具合によって Majorana fermion が出る場合と、超伝導 Gap 内の束縛状態であるス波状態のクロスオーバーが起こることを明らかにした。このクロスオーバーによって Josephson 効果の振る舞いが劇的に変わることも明らかにした。[1]

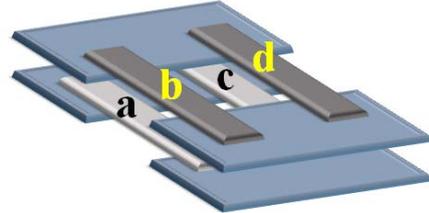
第 4 章は分数量子ホール効果[2]について紹介する。Parafermion[3-6]の導入もここで行う。

第 5 章について詳しく説明する。

$\nu=2/3$ などの neutral mode がある分数量子ホールの系 [7] で parafermion を作ることを考え、Josephson 電流



(I)



(II)

図 1 (I)2 組のレイヤー構造の分数量子ホール系と S-B-S 領域を上から見た図。☆は parafermion を表す。(II) (I) の図から B 領域を除き、斜めから見た図。a-d の 4 つの超伝導体がある。[8]より引用のうえ修正。

の周期性から **neutral mode 特有の情報を引き出すことを目的** に研究を行った。具体的に図 1 のような設定を考える。2 組のレイヤー構造の分数量子ホール系を用意する。こうすることで 1 組のレイヤーの分数量子ホール系からエッジ流のチャンネルが 2 つ現れることになる。合計 4 つのエッジ流を超伝導領域 (S-領域) と後方散乱領域 (B-領域) で相互作用させる。相互作用の領域は図 1 (I) に示すように、S-B-S というドメイン構造にする。さらに後の Josephson 電流の解析のためそれぞれの S-領域は 2 つの超伝導体からなると仮定する。図 1(II) のように超伝導体 a, b で 1 つの S-領域をなし、c, d でもう 1 つの S-領域を形成する。この細かい設定が後に重要になる。

この状況の下で **どのような parafermion が S 領域と B 領域の境界でできるか、またその結果として 2 つの S-領域での Josephson 電流と neutral mode にどのような関係があるか調べた。** より具体的には図 1(II) の a と b の超伝導の位相を同じにして固定し、c と d の超伝導の位相をそれぞれ独立に動かしてき、Josephson 電流を計算した。この研究の特色として、レイヤー構造の分数量子ホール系のようにエッジ流が複数ある場合の parafermion について本研究が最初に調べた点と、その parafermion の相互作用が Josephson 電流にどう影響するか、**特に neutral mode との関連について明らかにした点が新しい。**

<得られた結果> S-B-S 領域の境界において合計 4 つの parafermion が得られ、本研究で得られた parafermion は charged mode と neutral mode のそれぞれの自由度から独立に得られる従来の parafermion (これをそれぞれ γ_c と γ_n と呼ぶ) を掛け合わせたものになっていることが明らかになった。すなわち本研究で得られた parafermion を γ_g とおくと

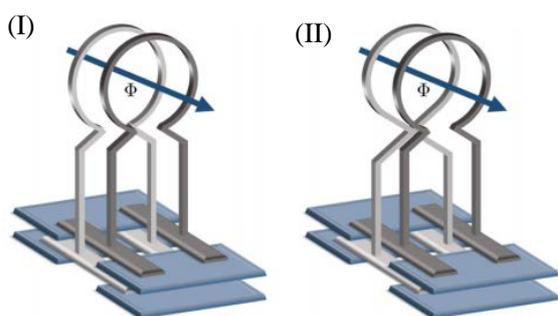


図 2 (I)/(II) charged/neutral mode 由来の parafermion の相互作用による Josephson 効果が起こすための系の模式図。B 領域は描いていない。[8]より引用。

$\gamma_g = \gamma_c \cdot \gamma_n$ のように分解できることが明らかになった。

Josephson 電流については図 2(I) のように c, d の超伝導を同じ位相を与えてやると、Josephson 電流は γ_c 同士の相互作用のみがおこり charged mode 由来の parafermion が引き起こす Josephson 電流が流れることが分かった。一方で図 2(II) のように c, d の超伝導の位相を互いにちょうど反対符号にしてやると(磁束が貫くリングが互いに逆周りになっている

ことに注意。) γ_n 同士のみが相互作用をし、neutral mode 由来の parafermion のみからく

る Josephson 電流が流れることが分かった。両者の Josephson 電流の周期は異なり、特に後者の neutral mode 由来の Josephson 電流の周期はこれまで計測が難しかった neutral mode の“痕跡(imprint)”として非常に重要である。 [8]。

第 6 章でこの博士論文全体をまとめる。

<参考文献>

- [1] H. Ebisu, *et al*, PRB **93**, 024509 (2015)
- [2] D. Tsui, *et al* PRL **48**, 1559 (1982)
- [3] M. Cheng, PRB **86**, 195126(2012)
- [4] N. H. Lindner, *et al*, PRX **2**, 041002(2012)
- [5] R. Mong, *et al*, PRX **4**, 031009(2014)
- [6] D. Clarke, *et al*, Nat. Commun. **4**, 1348(2013)
- [7] C. Kane, *et al*, PRL **72**, 4129 (1994)
- [8] H. Ebisu, *et al*, PRB **95**, 075111(2017)