

報告番号	甲 第 12287 号
------	-------------

## 主論文の要旨

**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

## 論文内容の要旨

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：

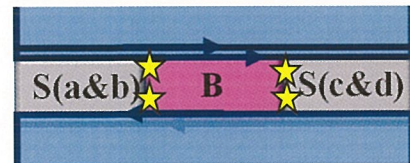
第 1 章は博士論文全体の構成について簡単に紹介する。

第 2 章では Majorana fermion について説明をする。

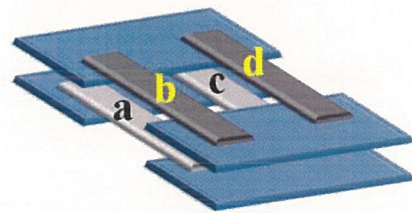
第 3 章では超伝導/磁性体/超伝導の接合系で磁化の秩序が超伝導にしみ込む、いわゆる inverse proximity effect が起こる場合の Majorana fermion の振る舞いや Josephson 効果に

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。



(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。

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系の系[7]で parafermion を作ることを考え、Josephson 電流の周期性から **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  $\gamma_c$  と  $\gamma_n$  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  $\gamma_g$  とおくと

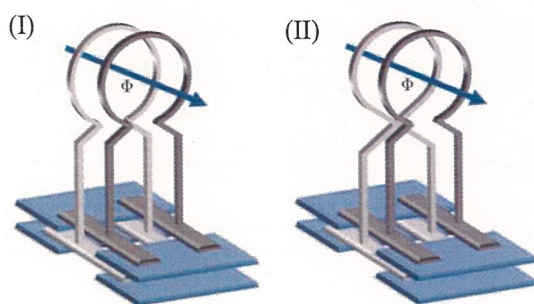


図2 (I)/(II) charged/neutral mode 由来の parafermion の相互作用による Josephson 効果が起こすための系の模式図。B 領域は描いていない。[8]より引用。

$\gamma_g = \gamma_c \cdot \gamma_n$  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  $\gamma_c$  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。)  $\gamma_n$  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)