OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Dissipationless spin current and nonreciprocal heat transport in a Kitaev chiral spin liquid
Author(s)	瀧川, 大地
Citation	大阪大学, 2023, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/92218
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　瀧川大地　）	
論文題名	Dissipationless spin current and nonreciprocal heat transport in a Kitaev chiral spin liquid（キタエフカイラルスピン液体における無散逸スピン流生成機構及び非相反熱輸送の実現）

論文内容の要旨

キタエフ候補物質$\alpha-RuCl_3$では熱ホール効果の半量子化が観測されており、トポロジカルな性質を持つことが示唆されている。実験結果が純粋なキタエフモデルでは説明できないため、キタエフ物質内で実現される非キタエフ相互作用に着目しカイラルスピン液体への影響をこれまでの研究で検討してきた。主に２つの重要な寄与を発見した。1つ目は非多角交換相互作用がマヨラナフェルミオンの質量ギャップを著しく増大させることがわかった。この結果は、上述の実験で観測された熱ホール伝導の頑健な量子化の説明となる可能性がある。2つ目はこの非対角交換相互作用が反強磁性キタエフ相互作用の場合にマヨラナバンド構造を劇的に変化させ、チェーン数±1の非可換トポロジカル相からチェーン数±2の可換トポロジカル相へと、Z_2渦が可換エニオンとして振る舞う相転移をもたらすことが明らかになった。

しかし、その後の実験研究によって、熱ホール効果はサンプル依存性が強いことがわかり、現状では、マヨラナ観測について研究者間での同意が得られていない。この問題を解決するため、まずキタエフモデルのエッジスピンゼーベック効果のDrude weightの普遍的なスケーリングに現れる、カイラルマヨラナエッジモードのより直接的な応答を提案し、マヨラナ観測の直接的な証拠となることを示した。
さらに、カイラルエッジモードでは後方散乱がないため、バルクの格子定数に近い極めて短いスピン相関長にもかかわらず、散逸のないスピン流が生成されることを明らかにした。
この結果は、実験的に観測可能であるばかりでなく、キタエフ物質のスピントロニクス応用への道を開くものである。
つぎにキタエフカイラルスピン液体におけるジャロシンスキー-守谷相互作用由来の非相反現象を提案した。
エッジにおけるジャロシンスキー-守谷相互作用と磁場の結合によって反転対称性が破れ非対称になることにより非相反熱伝導が可能になることを明らかにした。
この結果はキタエフ磁性体の非平衡定常状態に関する今後の実験研究に対して、非常に有益なものであると期待される。

様式７

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　瀧川大地　）		
	（職）	氏　名
論文審査担当者	主査　教授 副査　教授 副査　教授	藤本聡 井澤公一 鈴木義茂

論文審査の結果の要旨

本学位論文は、キタエフ・スピン液体におけるマヨラナ粒子由来の輸送現象の理論研究に関するものである。キタエフ磁性体では、磁場印加によってカイラル・スピン液体が実現し、バルク励起が全て有限のエネルギーギャップを持つのに対して、試料の表面にはギャップレスのカイラル・マヨラナ端状態が生ずる。このため、低温での輸送現象はマヨラナ端状態によって支配される。本学位論文はマヨラナ端状態に固有の輸送現象を明らかにすることによって、将来のキタエフ候補物質における実験探索の指針となる結果を得ることを目的としている。特に本学位論文では以下の２つの点が明らかにされた。

(1) カイラル・マヨラナ端状態に由来するスピンゼーベック効果を理論的に提唱し、その発現機構を明らかにした。キタエフ・スピン液体ではバルクのスピン相関長は格子定数ほどしかないが、それにもかかわらず、カイラルマヨラナ端状態はスピン流を運ぶことができ、後方散乱が無いため、スピン流が弾道的になることを明らかにした。また、スピンゼーベック伝導率のDrude重みが低温で温度の二乗に比例し、これがマヨラナ粒子系固有の普遍的な臨界指数に一致することを示した。この温度依存性は不純物等の影響を受けないため、マヨラナ粒子探索の指標となる。また、この結果はキタエフ物質を将来のスピントロニクスへ応用する可能性を開くものでもある。

(2) カイラル・マヨラナ端状態に由来する非相反熱伝導の機構を明らかにした。キタエフ候補物質の表面境界では空間反転対称性が破れるため、端状態に働くジャロシンスキー守谷（DM）相互作用が発現することが可能である。このことに着目し、DM相互作用と印加磁場の方向に依存して、マヨラナ端状態のエネルギースペクトルが非対称に変形することを示した。この結果は、マヨラナ端状態による熱流が一方向に流れやすくなる非相反熱伝導が実現することを意味するものである。この効果もマヨラナ端状態に固有の性質であり、将来のマヨラナ粒子探索の指標となる結果である。

さらにまた上記の結果に加えて、本学位論文ではキタエフ候補物質における非キタエフ相互作用がスピン液体状態に与える影響についても詳細に議論しており、マヨラナ励起ギャップの増強効果や、トポロジカル相転移の発現を理論的に予言している。これらの結果もキタエフ候補物質で実現するスピン液体の新規量子物性をはじめて明らかにしたものと評価される。

審査委員会では、上述の通り、本論文の学術的価値が非常に高いことが全員一致で認められた。

以上の理由により、博士(理学)の学位論文として価値のあるものと認める。