



Title	Theory of Electromagnetism in Dipole Superfluids
Author(s)	山本, 和輝
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/105639
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (山 本 和 輝)	
論文題名	Theory of Electromagnetism in Dipole Superfluids (双極子超流動体の電磁気学的性質に関する理論)
論文内容の要旨 本博士論文では、磁気または電気双極子をもった超流動体の電磁気学的性質を理論的に調べた。 電子系における超伝導のマイスナー効果は物理学において最も興味深い現象の一つであり、電荷が磁場中で感じる幾何学的位相であるアハロノフ・ボーム位相が重要な役割を果たす。一方で超伝導体の自然な拡張として、電荷をもたない磁気双極子をもつ粒子（例：マグノン）が凝縮した超流動体も存在し、マグノンボーズ・アインシュタイン凝縮（BEC）の実験的観測を契機に近年注目を集めている。マグノンは電場に対してアハロノフ・キャッシャー位相を獲得し、空間的に変化する電場は「擬似磁場」として作用する。実際にこの擬似的な磁場の効果によりホール効果やランダウ準位など磁場中の電子系と類似の物性が生じることが知られている。 そこで我々は、マグノンBECがこの擬似磁場にどのように応答するかを調べ、現象論的なギンツブルグ・ランダウ理論を定式化することにより、その応答が電子系の超伝導とは大きく異なることを示した。具体的には、擬似磁場下でマグノンBECは渦糸の三角格子を自発的に形成するが、その振る舞いは通常の第二種超伝導体とは質的に異なり、渦糸と渦糸の間にハニカム格子の特異面（擬似磁場・分極電荷密度の発散、電気分極の不連続的な変化）が生じる。この特異構造はマグノンと電場の結合強度が臨界値を超えると急激に形成される。 また、電気双極子をもつ中性粒子（例：エキシトン）からなる超流動体も扱い、磁場に対してヒー・マッケラー・ウィルケンス位相を通じて同様の議論ができることを示した。ただし電気双極子の場合は超伝導に似た渦格子構造が現れ、磁気双極子の場合と対照的な振る舞いを示す。 そして、このようなマグノン系と電子系における対照的な振る舞いは、軌道運動によって生成される電磁場のフィードバックが両者で符号反転することに起因することを明らかにした。一般に電子系の軌道反磁性では、外部磁場によって駆動される電子の軌道運動が外部磁場を打ち消す向きの磁化を誘起し、負のフィードバックを示す。一方、マグノン系では、外部電場によって駆動されるマグノンの軌道運動が外部電場を強める向きの電気分極を誘起し、正のフィードバックを示す。すなわち、電気と磁気に対して軌道磁化と軌道分極の応答が互いに逆になる。興味深いことに、このような関係は特異な現象ではなく、実は通常の常磁性と常誘電においても同様に現れる。実際、常磁性体では外部磁場を強める方向に磁化が生じるのに対し、常誘電体では外部電場を弱める方向に分極が生じる。したがって、電場と磁場に対する電磁場フィードバックの符号が逆になることは、電磁気学の基本法則に根ざした一般的な性質である。 このような正のフィードバック効果は、外部電場なしに電気分極が生じる、すなわち強誘電転移の可能性を示唆する。我々は、上記の現象論的理論を発展させ、平均場近似に基づく微視的理論を構築することで、結合強度が臨界値を超えた時に自発的な超流動マグノン流が生じ、強誘電転移を起こすことを発見した。また、この強誘電相では空間反転対称性の破れに起因して、準粒子スペクトルの非相反性が生じる。さらに転移点では、例外点で特徴付けられた平坦バンドがゼロエネルギーに出現し、その状態はマヨラナボソンとして解釈できる。 本研究は、双極子超流動体を調べる理論的枠組みを提供し、その基本的な電磁気学的性質を明らかにするものであり、長年活発に研究されている超伝導・超流動の分野に「モノポールからダイポールへ」という新たな切り口を見出すものである。	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (山 本 和 輝)		
	(職)	氏 名
論文審査担当者	主 査 教 授	越野 幹人
	副 査 教 授	大野木 哲也
	副 査 教 授	吉野 元
	副 査 准教授	越智 正之
	副 査 助 教	川上 拓人

論文審査の結果の要旨

近年、マグノン・ボース凝縮体やスピン三重項励起子絶縁体など、磁気双極子をもつ中性粒子の凝縮系が注目を集めており、これらにおける電磁応答の理解は重要な課題となっている。磁気双極子は、電場中でアハラノフ-キャッシャー (Aharonov-Casher: AC) 位相と呼ばれる幾何学的位相を受けることが知られており、これは電荷粒子が磁場中で受けるアハラノフ-ボーム位相に対応する現象である。AC 効果においては、電場が有効なベクトルポテンシャルとして働き、空間的に変化する電場は擬似磁場を生成する。山本和輝氏の博士論文は、このような擬似磁場に対して磁気双極子が凝縮した超流動体がどのように応答するのか、という根本的な問いに対し、統一のかつ深い理論的理解を与えた。

第一に、外部電場中における磁気双極子の超流動体を記述するためのギンツブルグ-ランダウ型現象論的理論を構築し、その電磁応答が従来の超伝導体とは著しく異なることを明らかにした。具体的には、空間的に変調した電場によって誘起される擬似磁場の下で、磁気双極子超流動体がタイプ II 超伝導体に類似した渦糸格子を自発的に形成する。しかしその渦構造は通常の超伝導体とは本質的に異なり、超電流が渦芯近傍に局在するのではなく、六角形状の渦境界に沿って広がり、そこで超流動の向きが不連続に変化するという特異な構造を持つことを示した。これらの境界は、電気分極、秩序変数の勾配が不連続となる特異面でもあり、分極電荷密度が発散的に集中するという、従来の物理系は見られない特異な性質を示す。さらに山本氏は、電気双極子系の超流動体に対しても同様の解析を行い、磁気双極子とは正反対の電磁応答を示すことを示した。すなわち、磁気双極子系では電場によって誘起された軌道運動が電気分極を通じて外部電場を強める正のフィードバックを生むのに対し、電気双極子系では軌道運動が外部磁場を弱める負のフィードバックが生じることを明らかにした。この対照的な関係は、通常の常磁性体と常誘電体の対比とも対応しており、電磁気学の基本原理に根ざした普遍的な性質であることが示された。

第二に、この磁気双極子系の正のフィードバックに着目し、山本氏は磁気双極子超流動体における自発的強誘電転移の可能性を理論的に提案した。ボソンに対する Bogoliubov-de Gennes 平均場理論を用いて、電場の正のフィードバック機構により自発的電気分極を引き起こすこと、さらにそれに伴って永続的な磁気双極子流が流れることを示した。さらに、強誘電相において準粒子励起が非相反的な分散関係を示すこと、特に転移点では分散関係全体に例外点が出現し、粒子正孔双対性をもつ特異な状態が形成されることを明らかにした。この状態はボソン系におけるマヨラナ粒子の類似体として解釈可能であり、概念的にも極めて興味深い成果である。

以上のように、本論文は、磁気双極子および電気双極子からなる超流動体の電磁応答を統一的に理解する理論的枠組みを提示し、従来の超伝導・超流動理論とは本質的に異なる新たな物理像を明らかにしたものである。その成果は、マグノン凝縮体や励起子凝縮体のみならず、超流動現象の研究に新たな視点を与えるものであり、学術的価値は極めて高い。以上の理由から、本論文は博士（理学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。