

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	
<p>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。</p> <p>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、電荷をもたないが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。</p> <p>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。</p> <p>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事を示した。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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p>	