

学 位 論 文 題 名

P-and T-Violating Superconductors and
Induced Chern-Simons Terms

(空間及び時間反転対称性を破る超伝導とチャーンサイモン項)

学位論文内容の要旨

最近、parity (P) と time reversal symmetry (T) が破れているような超伝導相の存在が、銅酸化物高温超伝導体や Sr_2RuO_4 等 unconventional な超伝導（ゲージ対称性以外の対称性も自発的に破れている超伝導）の系において議論されている。これらの系において、磁場中の 2 次元電子系や 2 + 1 次元 Dirac QED のような P と T を破る系と同様、Chern-Simons term が fermion を積分することにより induce されることを示す。

Induce される Chern-Simons term は通常、トポロジカルに安定な性質を持つ。というのも、この項の係数は運動量空間における電子の伝播関数の巻き付き数に比例し、それゆえ量子化された値のみ持つことが許される。この事実より、磁場中の 2 次元電子系において量子ホール効果が起こることが説明される。なぜなら、Chern-Simons term から電場に対して垂直に流れるホール電流が自然に導出され、またその伝導度（ホール伝導度）が、量子化されている Chern-Simons term の係数に一致するからである。ところで、上に述べた性質は量子ホール系や 2 + 1 次元 Dirac QED のようにゲージ対称性が明白に存在する場合においてのみ示されている。ゲージ対称性の自発的破れが生じた場合、induce される Chern-Simons term がどのような性質を持つかは非自明な問題である。

この問題を議論する上で最適な、かつ現存する系として我々は P や T を破る超伝導の系をとりあげた。この系では、同じオーダーパラメーター（ギャップ関数）がゲージ対称性と P, T を同時に破っている。ゲージ対称性の破れから Goldstone mode が存在する。南部（1960）により得られた超伝導体に対するワード-高橋恒等式を用いると、induce される Chern-Simons term の係数はトポロジカル不変な部分に対して Goldstone mode による補正を受けることを示す。

Unconventional な超伝導の系で生ずる現象を議論する際、これまでは対称性の考察から求めた Ginzburg-Landau 理論（超伝導の系における低エネルギー有効理論）を用いた議論がなされてきたが、その中に Chern-Simons term は含まれていなかった。ところで、Chern-Simons term は、ゲージ不変性を持つ項の中でも最も次元の低い項として知られている。そのため、低エネルギー領域の物理に重要な寄与をおよぼす。よって、我々の議論から P や T を破る系においては Chern-Simons term は Ginzburg-Landau 理論に含まれるべきであり、実際この項が測定にかかり得る効

果を与えることを主張する。

その例として、 P,T を破る超伝導体を試料の端に対して垂直な一様静電場中においた場合を考える。この時、試料の端から磁場の侵入長程度の領域で電場に垂直な電流が生じることが示される。これは Chern-Simons term により導かれるホール電流である。この電流から得られる磁場の大きさは SQUID で測定し得る order であることを示す。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	石 川 健 三
副 査	教 授	河 本 昇
副 査	助教授	北 孝 文
副 査	助教授	中 山 隆 一
副 査	助教授	鈴 木 久 男

学 位 論 文 題 名

P-and T-Violating Superconductors and Induced Chern-Simons Terms

(空間及び時間反転対称性を破る超伝導とチャーンサイモン項)

空間反転 (P) や時間反転 (T) に対する不変性を持たない弱い相互作用の存在のため、ミクロな世界ではPやTは破れている。しかしながら、電磁相互作用ではこの対称性が成立している。電磁相互作用を力の起源とするマクロな世界は、よって空間反転や時間反転に対して不変なはずである。ところが、これらの対称性がマクロな世界でも破れていることが、生物系や化学系で分かっていた。さらに最近これらの対称性を低温で破る超伝導や超流動等の凝縮系が存在することが分かってきた。これらの凝縮系の流体的または電磁氣的性質は重要な興味深い問題でありその解明が待たれていた。これを理論的に明らかにすることが本論文の目的であり、著者はこれらの対称性の破れを反映するChern-Simons項が物理系の性質を決める有効作用のなかに誘起されることを示すことに成功すると共に、Chern-Simons項の性質の解明、これによって生ずる現象の解析、並びに新現象の予言を行った。

マクロの世界での相互作用の起源はPやTにたいして不変な電磁相互作用であるが無限の自由度からなる量子多体系では、基底状態がこれらの対称性を破ることがある。このとき、対称性の自発的な破れが起きる。本論文では、PやTの対称性とU(1)変換に対する対称性が、同時にある量の凝縮により自発的に破れる際起きる超伝導と超流動現象を解明した。超伝導の標準的BCS機構ではs-波対の凝縮でU(1)対称性が自発的に破れるがPやTは破れない。電子間相互作用の形によってはBCS機構とは異なるp-波対やd-波対の凝縮がおきる。実際ヘリウム3のA相や、ストロンチウム系の超伝導でp-波対の凝縮が起き、高温超伝導系でd-波の凝縮が起きていると思われる。これらの凝縮相で、PやTが同時に破れている時なにが起きるのか、その解明には、電磁気ポテンシャルに対するLandau-Ginzburg有効作用を求めることが最も単純明解な方法である。しかしながら、今まで超伝導に対してこの研究は今までなされてない。これらの対称性を外部磁場の影響で破っている物理系である量子ホール系ではChern-Simons項の計算がなされ、ゲージ不変性のためにChern-Simons項の係数が運動量空間での2点グリーン関数から定義されるトポロジカル不変量であること、さらにそのため厳密に量子化された値をとる極めて特異な物理量であること等の性質も解明されていた。ところが本研究対象の凝縮系ではU(1)対称性が自発的に破れ事情が大きく異なっている。この際Chern-Simons項の係数がいかなる性質を持つのか興味深いかつ重要な問題である。

御領潤氏はこの問題に対して、経路積分の方法に基づく量子化法に則り補助場の方法を使い、U(1)対称性が時間反転や空間反転対称性と共に自発的に破れた際のゲージ不変な有効作用を求める計算法を明らかにした。次にそれに基づきChern-Simons項の係数を解析しその一般的表式を求めると共に、これがトポロジカル不変量だけでなくトポロジカル不変でない他の部分から成っていることを示した。トポロジカル不変でない項はU(1

）対称性が自発的に破れたことによる生ずるNambu-Goldstone励起モードの効果によるものである。Nambu-Goldstone励起モードは通常の超伝導ではゲージ場に吸収されゲージ場に質量を与えその自由度を失う。今の場合、Chern-Simons項が特異であるため、その効果が残る。その結果係数は量子化された値からずれることになる。Chern-Simons項の係数の大きさはしかしながら、 P 、 T を破るオーダーの値が小さい場合もほとんど同じ大きさとなる。次に誘起されたChern-Simons項により引き起こされる新現象を解析した。 P や T を自発的に破るオーダーは、量子ホール系での外部磁場の役割をする。そのため、外部磁場なしに電流と電圧が直行するホール効果や、また偏向した光の偏向面が回転するファラデー効果が起こることを予言した。これらの新しい現象や、その大きさの計算を行った。現在これらの現象のテストがなされようとしている。

これを要するに、著者は空間反転や時間反転を破る超伝導や超流動に於けるChern-Simons項についての性質解明とChern-Simons項による生ずる物理解明を行ったものである。その成果の一部はすでに公表され、おおきな関心を持たれている。これは場の理論並びに凝縮系の物理の理解に対して貢献するところ大なるものがある。

よって著者が北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。