

論文の内容の要旨

論文題目 : Entangled Spin-Pseudospin Phenomena in the
Bilayer Quantum Hall Systems

(二層量子ホール系におけるエンタングルド
スピン・擬スピン現象)

氏名 : 濱 祐介

二層量子ホール系において、電子はスピンと層（擬スピン）の、合わせて4自由度を持つ。面内及び面間クーロン相互作用やゼーマン及びトンネル相互作用の競合によって、豊富な相と各相特有の物理現象が実現される。

とりわけ最も興味深い研究対象の1つとして、スピンと擬スピンの結合した形で生じるエンタングルドスピン・擬スピン現象が挙げられる。これはランダウ占有率 $\nu=2$ 二層量子ホール系の傾角反強磁性相（以下CAF相と称す）において生じると期待される。

本研究では、 $\nu=2$ 二層量子ホール系において生じる南部・ゴールドストーン（以下NGと称す）モードによって引き起こされるエンタングルドスピン・擬スピン現象の研究を行う。具体的にはNGモードの有効理論、NGモードによって誘起される層間位相コヒーレンス、位相場としてのNGモードをキャリアとした超電流（以下ジョセフソン超電流と称す）及びそれが付随した量子ホール効果についての解析を行う。

本研究の動機は以下のものである。

- (i) 量子ホール系においてはNGモードに起因する豊富で且つ美しい現象が生じる。これは理論的研究対象として価値があるばかりでなく、実験的にも検証可能である。
- (ii) 量子ホール効果に関連した研究は近年においても活発に研究がなされている。例としてグラフェンにおける量子ホール効果や量子スピンホール効果等が挙げられる。
- (iii) スピンと擬スピンとしての層の競合によって豊富な物理現象を示す強相関量子多体系は二層量子ホール系以外にも数多く存在する。例として二層グラフェン、二層冷却原子系、中性子星における多層中性子スピン系等が挙げられる。

本研究は以下の点について留意する。

- (1) 本研究は二層または単層の整数量子ホール系のみを研究対象とする。
- (2) 本研究の目的は整数量子ホール系において生じる、スピンと擬スピン自由度を持つ集団励起によってもたらされる物理現象の解明であり、簡単のために本研究では不純物効果は考慮しない。しかしながら、本研究で解析された物理現象はたとえ不純物効果を考慮したとしても、それが生じることが十分期待される。実際、二層量子ホール系に特有である様々な層間コヒーレント現象は不純物のある系においても生じることがこれまでの実験的研究から確認されている。
- (3) 本研究のオリジナル部分は 4.2 節から 4.6 節の $\nu=2$ 二層量子ホール系における NG モードの有効理論、第 5 章の CAF 相において生じるエンタングルドスピン・擬スピンのコヒーレンス、ジョセフソン超電流とそれに伴う量子ホール効果、スピンジョセフソン超電流、Appendix C の非線形表現に基づく $\nu=2$ 二層量子ホール系における NG モードの計算結果である。

本論文は以下のように構成される：

第 1 章では、本研究の背景と目的について述べる。

第 2 章では、単層及び二層系における量子ホール効果のレビューを行う。また最低ランダウ準位射影形式及び量子ホール系における NG モードの有効ハミルトニアン の導出について述べる。

第 3 章では、 $\nu=1$ 二層量子ホール系の NG モードの有効理論、層間位相コヒーレンス、ジョセフソン超電流とそれに伴う量子ホール効果の理論的研究と層間位相コヒーレンスの伴う $\nu=1$ 二層量子ホール系の実験的研究のレビューを行う。

第 4 章では、まず $\nu=2$ 二層量子ホール系の基底状態の構造についてのレビューを行う。具体的にはゼーマンギャップ-トンネルギャップ平面としての相図について述べる。また基底状態における SU(4) アイソスピンの配位 (SU(4) アイソスピンの期待値) について述べる。 $\nu=2$ 二層量子ホール系の基底状態はスピン相、擬スピン相、そして CAF 相の 3 相から成ることが知られている。次にこれらの結果を踏まえて、NG モードの有効ハミルトニアン、分散関係及びコヒーレンス長の解析について述べる。結果として、ゼロトンネルギャップ極限下の CAF 相において、1 つの線形分散を持つモードが生じることがわかった。

第 5 章では、CAF 相において生じる層間位相コヒーレンス、ジョセフソン超電流とそれに伴う量子ホール効果の理論的研究について述べる。結果として、CAF 相においてエンタングルドスピン・擬スピンコヒーレンスが生じることがわかった。更にカウンターフロー配置においては非散逸にスピンのみを運ぶスピンジョセフソン超電流が生じることがわかった。

第 6 章では、本研究のまとめ・結論と今後の研究について述べる。

Appendix A では、量子ホール系における基本的物理量とそれらの数値、対称ゲージにおける電子の波動関数の議論、更に $SU(4)$ 群の性質について述べる。

Appendix B では、非可換幾何学に基づく量子論のレビューについて述べる。

Appendix C では、非線形表現に基づく二層量子ホール系における NG モードの計算結果について述べる。

結果として、二層量子ホール系においてエンタングルドスピン・擬スピン現象は CAF 相において生じることがわかった。 それをもっとも端的に表した現象はスピンジョセフソン超電流である。