

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006～2009

課題番号：18540246

研究課題名（和文） 非可換空間におけるトポロジカル・ソリトンのダイナミクス

研究課題名（英文） Dynamics of Topological Solitons in Noncommutative Space

研究代表者

江澤 潤一（Ezawa Zyun F.）

東北大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：90133925

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：非可換空間，非可換ソリトン，量子ホール効果，トポロジカル・ソリトン，スカーミオン，サインゴードン・ソリトン，量子位相，2層量子ホール系

1. 研究計画の概要

非可換空間が実現している唯一の観測可能な系は量子ホール系である。電子がランダウ準位に束縛されているため、その x 座標と y 座標は交換しない。すなわち、 $[x,y]=i\theta$ という非可換交換関係の成立する非可換平面が実現している。 θ は長さの自乗の次元を持つ非可換パラメータである。この様な系でのトポロジカル・ソリトンとそのダイナミクスを解析する。

(1) 量子ホール系の長波長有効理論に基づき、準粒子はトポロジカル励起（スカーミオン）であることが知られている。非可換平面上でのスカーミオン励起を解析し、その微視的理論を構築する。

(2) 2層量子ホール系における層間コヒーレンスとトポロジカル励起を非可換平面上での微視的理論に基づき解析する。

(3) 2層量子ホール系において、横磁場が層間に進入したときの相転移が層間コヒーレンスおよび非可換スカーミオンに及ぼす効果を解析する。

(4) 磁場は層間にサインゴードン・ソリトンとして進入するが、そのソリトンと非可換スカーミオンの散乱を解析する。

2. 研究の進捗状況

(1) 1層量子ホール系での非可換スカーミオンの微視的理論を構築した。この微視的状態は、電子（あるいは空孔）を連続 W_∞ 変換して得られる。この結果、非可換スカーミオンは電荷を持ち、さらに、その電荷密度はトポロジカル荷電密度に等しくなることを証

明した。従って、非可換空間では電子（あるいは空孔）も素粒子ではなく、トポロジカル励起と見なせる。これは、非可換空間では、電子の生成演算子は点電荷ではなく広がった電荷を生成するからである。本研究課題はほぼ完成している。

(2) 上記の解析を2層量子ホール系に拡張した。量子ホール系には運動エネルギーが存在せず、そのダイナミクスは空間の非可換性によって実現する。微視的ハイゼンベルグ運動方程式に基づき、層間コヒーレンスを解析した。さて、量子ホール効果はホール抵抗が量子化したゼロでない値をとるという性質で特徴づけられるが、特殊な場合には層間量子位相効果によりゼロになることを示した。

(3) 横磁場が層間に進入すると、非可換スカーミオンは、上層と下層で電荷分布が分離して、メロン対励起に変形することを微視的理論に基づき解析した。層間コヒーレンスと層間トンネル現象への影響に関しては、現在も解析が進行中である。

(4) 2層量子ホール系で、横磁場が進入するとサインゴードン・ソリトンができる。一方、電流は電荷励起であるスカーミオンが運ぶ。長波長有効理論でのスカーミオンとサインゴードン・ソリトンの散乱過程を考察した。具体的成果として、その衝突効果を縦抵抗の測定によって観測し得ることを示した。これは私の属する実験グループで最近観測した縦抵抗の異常な振る舞いを説明する。このような散乱過程の非可換平面上の微視的理論に基づく解析は現在も進行中である。

3. 現在までの達成度

②おおむね順調に進展している.

(理由) 量子ホール系に実現している非可換空間でのトポロジカル・ソリトン (スカーミオン) のダイナミカルな性質を解明してきた. 1層系に関してはほぼ完全な理論を構築した. 2層系に関しては, スカーミオンとサインゴードン・ソリトンの散乱の結果として, 最近の実験成果 (縦抵抗の異常な振る舞い) を説明できたことは大きな成果である. 但し, この散乱過程の微視的理論構築は今後の研究課題である.

4. 今後の研究の推進方策

横磁場が臨界値を超えると, サインゴードン・ソリトンの凝縮相が実現する. 最近, マックスプランク研究所の von Klitzing グループが, 私が 15 年前に予言した 2 層量子ホール系での DC ジョセフソン類似効果と思われる実験成果を報告している. これを確立するためには, サインゴードン・ソリトン凝縮相での層間量子位相現象を微視的理論に立脚して詳しく解析する必要があるので, この研究を最優先に行う. 次に, この様な凝縮相における非可換スカーミオン励起の微視的理論を構築する.

5. 代表的な研究成果

[雑誌論文] (計 10 件)

① A. Fukuda, D. Terasawa, M. Morino, K. Iwata, S. Kozumi, N. Kumada, Y. Hirayama, Z. F. Ezawa and A. Sawada, Pseudospin Soliton in the $\nu = 1$ Bilayer Quantum Hall State, Physical Review Letters, 100 (2008) 016801-016804 (査読有).

② K. Iwata, M. Morino, A. Fukuda, M. Suzuki, Z.F. Ezawa, A. Sawada, N. Kumada and Y. Hirayama, Effects of In-Plane Magnetic Field Direction on the Nuclear-Spin Relaxation in the $\nu = 2/3$ Quantum Hall State, Physica E 40 (2008) 1175-1177 (査読有).

③ Z.F. Ezawa, K. Ishii and G. Tsitsishvili, Interlayer Phase Coherence and Dissipative Soliton-Lattice Regime in Bilayer Quantum Hall Systems, Physica E 40 (2008) 1557-1559 (査読有).

④ Z.F. Ezawa, K. Ishii and G. Tsitsishvili, Anomalous Diagonal Resistivity and Soliton Lattice in Bilayer Quantum Hall Systems, Physica B 40 (2008) 1517-1519 (査読有).

⑤ Z.F. Ezawa, S. Suzuki and G. Tsitsishvili, Anomalous Quantum-Hall Resistance in Bilayer Counterflow Transport, Physica Status Solidi (c) 4 (2007) 485-488 (査読

有).

[学会発表] (計 18 件)

① A. Fukuda, Thermal Activation of the Soliton Lattice in the $\nu=1$ Bilayer Quantum Hall Effect, ICPS29: International Conference on the Physics of Semiconductors, July 27-Aug 1 (2008), Rio de Janeiro, Brazil.

② Z.F. Ezawa, Interlayer Phase Coherence and Dissipative Soliton-Lattice Regime in Bilayer Quantum Hall Systems, EP2DS17: International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, July 15-20 (2007), Genova, Italy.

③ Z.F. Ezawa, Anomalous Diagonal Resistivity and Soliton Lattice in Bilayer Quantum Hall Systems, The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems, May 13-18 (2007), Houston, USA.

④ Z.F. Ezawa, Anomalous Quantum-Hall Resistance in Bilayer Counterflow Transport, International Conference on Superlattices, Nano-Structure and Nano-Devices, July 30-August 4 (2006), Istanbul, Turkey.

⑤ Z.F. Ezawa, Anomalous Hall Resistance in Bilayer Electron Systems, ICPS28: International Conference on the Physics of Semiconductors, July 24-28 (2006), Vienna, Austria.

[図書] (計 1 件)

Z.F. Ezawa, World Scientific (Singapore), Quantum Hall Effects: Field Theoretical Approach and Related Topics, 2nd Edition (2008), 740 ページ