

令和元年6月14日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26400260

研究課題名(和文) 対称性に保護されたトポロジカル荷電とソリトン励起

研究課題名(英文) Topological charges and soliton excitations protected by symmetries

研究代表者

江澤 潤一 (Ezawa, Zyun Francis)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・客員研究員

研究者番号：90133925

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：量子ホール系を抽象化して得られるトポロジカル絶縁体の発展として、「対称性に保護されたトポロジカル系」という概念がある。この系において、トポロジカル荷電とその保存則を定式化し、ゴールドストーン・モードやトポロジカル・ソリトン励起を解析した。次いで、対称性を破った時のトポロジカル・ソリトンの諸性質を解析した。また、従来からの研究を続行し、二層量子ホール系のゴールドストーン・モードと背景の核子との相互作用に伴う現象は量子光学で知られているディッケ模型で記述されることを示した。その結果、核子のスピン緩和過程において、量子光学に出現する超放射現象に類似の現象が実験的に観測される、という予言を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

トポロジカル絶縁体やエニオン量子計算機は量子ホール効果の研究から発生している。今回の研究成果はトポロジカル量子物理の研究に新たな知見として寄与する。これが学術的意義であり、長期的視野で見た時の社会的意義である。さて、研究代表者は学術出版で国際的に著名なWorld Scientific社から量子ホール効果の教科書「Quantum Hall Effects」を出版している。ベストセラーとして、2000年に初版を、2008年に改定2版を、2013年に改定3版を出版している。本科研費研究の成果は準備中の改定4版に取り入れ、社会に還元したい。

研究成果の概要(英文)：First, I investigated "symmetry protected topological systems". This concept was obtained from a development of topological insulators, while the latter concept was born from the study of quantum Hall systems. Indeed, the quantum Hall system is the first example of topological insulators. I explored the physics of Goldstone modes and topological solitons in these systems by formulating the associated topological charges and their conservation rules. I also studied how various properties of topological solitons change when the symmetry is broken. Next, I carried out my long-standing investigation of bilayer quantum Hall systems. In particular, analyzing the interaction between Goldstone modes and nuclear spins, I have derived the Dicke model familiar in quantum optics. I predicted that phenomena analogous to superradiance will be observed experimentally in the relaxation process of nuclear spins in the canted antiferromagnetic phase of the bilayer quantum Hall system.

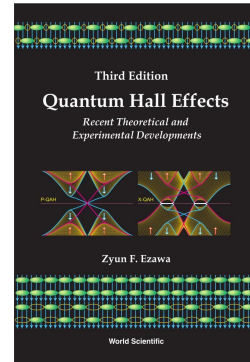
研究分野：素粒子理論、物性理論

キーワード：トポロジカル量子数 トポロジカル励起 場の量子論 対称性 量子ホール効果 ゴールドストーン粒子 スカームイオン

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

量子ホール効果の研究は長い歴史を持っている。現在、広く関心を集めているトポロジカル物理は量子ホール効果の研究から発生した。実際、トポロジカル絶縁体の最初の例が量子ホール系である。量子ホール効果に関しては最新の成果まで纏めて、研究代表者は約 1000 ページの教科書を執筆、出版している(右図参照)。従来、量子ホール効果はシリコン系やガリヒ素系で研究されていたが、研究開始当時、グラフェン等の新奇原子層物質で新たな発見が続いていた。2010年にガイム等がグラフェン関連の仕事でノーベル賞を受賞している。更に、トポロジカル物性の研究で、2016年にサウレス等がノーベル賞を受賞した。さて、量子ホール系を特徴づけるトポロジカル荷電はチャーン量子数である。研究開始当初、ここから派生した「対称性に保護されたトポロジカル荷電」という概念が提唱され、新たなトポロジカル物理の出現を予感させていた。



2. 研究の目的

量子ホール系を抽象化して得られるトポロジカル絶縁体の発展として「対称性に保護されたトポロジカル系」という概念が提唱されている。この系において、トポロジカル荷電とその保存則を定式化し、南部ゴールドストーン・モードやトポロジカル・ソリトン励起を解析する。具体的な例として、ミラー・チャーン数で保護されたトポロジカル結晶絶縁体を考察する。ミラー対称性を破った時に、ミラー・チャーン数への影響を解析する。この系の表面に存在するトポロジカル・ソリトンに関する研究を遂行する。また、これらの概念の基になった、量子ホール効果の研究も続行する。具体的には、量子ホール効果を起こす電子の背景に存在している核子からなる格子との相互作用を解析する。

3. 研究の方法

研究代表者は30年近く、場の量子論に立脚して、量子ホール系特有の量子コヒーレンスとトポロジカル・ソリトンの研究を行い、多くの業績を上げてきた。量子ホール系はトポロジカル系の顕著な例であり、トポロジカル荷電はチャーン量子数で与えられる。この知見を進展させ、対称性に保護されたトポロジカル荷電とソリトン励起の場の理論的研究を行う。

4. 研究成果

(1)

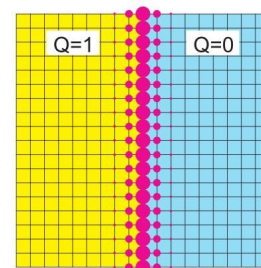
本研究開始当時、対称性に保護されたトポロジカル系という概念が提出され、着目を浴びていた。この系は、対称性があるときにはトポロジカル系であるが、対称性を破ると普通の系になってしまう。これらの状態は、トポロジカル・エッジ状態の存在の有無で判別できる。「対称性に保護されたトポロジカル荷電」の定義は量子ホール効果を記述するトポロジカル荷電であるチャーン数を拡張する事により可能であり、対称性に保護されたチャーン量子数である。具体例として、ミラー対称性によって保護されたトポロジカル荷電をもつ平面絶縁体がある。この系は、ミラー・チャーン数で特徴づけられる。ミラー対称性が存在する場合には、この量は量子化する。この系に磁場をかけると、ミラー対称性がなくなり、ミラー・チャーン数は磁場の関数として連続的に変化する。これらの現象を場の理論に立脚して解析した。

(2)

次の課題として、対称性に保護されたトポロジカル安定な基底状態中でのトポロジカル励起を考察した。具体的には、ミラー対称性によって保護されたトポロジカル荷電をもつ平面絶縁体中のソリトンを考える。この系に磁場をかけると、ミラー対称性がなくなるため、基底状態は相転移する。しかし、系の連続性は持続するので、ソリトンの特徴づけるトポロジカル量子数は定義され、ソリトン励起は存続可能であることが分かった。

(3)

対称性によって保護されたトポロジカル荷電をもつ平面絶縁体を考える。系のパラメータを調節して、この平面の右半分はトポロジカル荷電がゼロの相、左半分はトポロジカル荷電が非ゼロの相にとる。この時、境界に1次元ギャプレス状態(紐)が出現する(右図参照)。この紐は、トポロジカルに保護されているので、トポロジカル励起と見做せる。次に、右半平面に磁場をかけ、系の対称性を破る。磁場を連続的に変化させたときの、磁場が紐に及ぼす影響を解析した。



(4)

運動量空間でのソリトン励起も考察した。具体例として2次元ワイル半金属系を考えた。この系はミラー対称性によって保護された系である。半金属状態においてフェルミ面上に運動量空間渦励起が発生しているが、これはミラー対称性に保護されたトポロジカル・ソリトン励起の

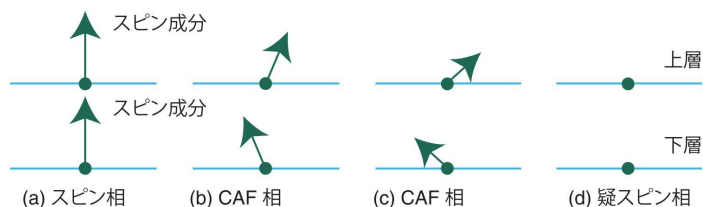
例とみなせる。ハミルトニアンは一次元のリング（空間 S_1 ）に値を持つ場で記述され、渦度はホモトピー群 $\pi_1(S_1)$ で与えられる。この系に磁場をかけると、ミラー対称性が破れる。ミラー対称性に保護された運動量空間渦励起の変化を解析した。磁場をかけると、ギャップが開くとハミルトニアンを記述する場は一次元リング（空間 S_1 ）から二次元球面（空間 S_2 ）へ変化する。これに伴い、系を特徴づけるホモトピー群は $\pi_2(S_2)$ に変換することが分かった。これに伴う諸々の現象を解析した。

(5)

上記の研究を発展させ、対称性に保護されたチャーン・サイモンズ・トポロジカル場の理論構築を試みた。これは対称性に保護されたトポロジカル場の理論において電子場を経路積分によって消去する事によって得られる。対称性が存在する場合には独立なチャーン・サイモンズ・トポロジカル場の理論の直和に分解されるが、対称性が破れている場合には非対角項の存在によって非自明な場の理論になる、との予想の基に研究を遂行した。また、場の理論に対称性が存在する場合に導かれるネーターの定理を拡張し、対称性に保護されたネーターの定理の導出を試みた。これらの研究は未だ途上で完成していない。

(6)

研究代表者は非可換空間上の物理現象の解析の応用として、二層量子ホール効果の研究を長年に渡って遂行してきている。一般的に、対称性の自発的破れはゴールドストーン・モードを生み出す。一般にゴールドストーン・モードの分散は放物型であるが、線形の時には超流動、超電導等の面白い物理現象を生み出される。さて、二層量子ホール系で占有率が2の時、二層の電子のスピンの傾斜して反強磁性結合する特別な相(CAF相)が実現する(下図参照)。このスピンの傾斜反強磁性(CAF)結合は回転の対称性を自発的に破るが、このとき出現するゴールドストーン・モードの分散は線形になる事を研究代表者は前年度までの科研費研究で導いている。線形分散をもつゴールドストーン・モードは、サンプル全体に渡ってコヒーレントな現象を実現する。このゴールドストーン・モードはスピン波に他ならないから、サンプルを構成する背景核子のスピンと結合する。本科研費研究では、このゴールドストーン・モードと二層に存在している核子のスピンとの相互作用に関して研究した。一般に核子と電子スピンの結合は極めて微小であるが、線形分散をもつゴールドストーン・モードが媒介する場合には、サンプル全体に渡ってコヒーレントな結合が実現し、核子スピンと電子スピンの結合効果は大きくなることを示した。更に、これに伴う現象は、量子光学で良く知られているディッケ模型で記述できることを論証した。



(7)

この核子スピン・電子スピン相互作用を実験的に検出する方法を考察した。通常、核スピンは電子スピンと近接超微細相互作用を行うが、線形分散をもつゴールドストーン・モードが媒介する場合、これとは質的にも量的にも異なる現象が起きる。特に、スピン偏極した電流を流し、核スピンを励起した系を考える。この励起した核子スピンの緩和するとき、量子光学に出現する超放射現象の類似現象が実験的に観測される、という予言を行った。続いて、この超放射スピン波の検出方法を考察した。核子スピンは内部磁場として量子ホール効果の起こる占有率に寄与するので、この変化の起こる時間の測定結果は超放射スピン波の発生の証拠とみなせる。

(8)

量子ホール系におけるトポロジカル励起はスカーミオンであり、これの電磁輸送は観測可能である。スカーミオン励起が上記の超放射に及ぼす研究も行った。さらに、これらの物理現象の背景にある対称性に関する研究も行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

1 Y. Hama, M. Fauzi, K. Nemoto, Y. Hirayama, Z.F. Ezawa, “Dicke Model for Quantum Hall Systems”, *New Journal of Physics*, 査読有, 18 巻, 2016 年, 02302-02312
DOI: 10.1088/1367-2630/18/2/023027

〔学会発表〕(計 1 件)

1 Y. Hama, M. Fauzi, K. Nemoto, Y. Hirayama, Z.F. Ezawa, “Nuclear Spin Relaxation Induced by Linear Dispersing Nambu-Goldstone Mode in Quantum Hall Systems, 21th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, 2015 年 07 月 27 日, 仙台国際センター(仙台市青葉区)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www2.riken.jp/lab-www/theory/people/ezawa/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。