

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20540383

研究課題名(和文) ベリー位相で新規量子相転移をデザインする

研究課題名(英文) Quantum criticality via Berry Phase effects

研究代表者

田中 秋広 (TANAKA AKIHIRO)

独立行政法人物質・材料研究機構・環境・エネルギー材料萌芽ラボ・主幹研究員

研究者番号：10354143

研究成果の概要(和文)：

多体系の低エネルギーの振る舞いを記述する有効作用に「ベリー位相項」が存在すると、統計力学的な平均操作を行う際には配位間の量子位相干渉効果が生じて、新奇な挙動、特に新しい量子臨界現象に導く可能性がある。このシナリオが実現するケースとして、磁場中の反強磁性体の磁化プラトー間転移、トポロジカル絶縁体の量子相転移などについて詳しく調べた。

研究成果の概要(英文)：

When Berry phase terms enter the low energy effective theory of a many body system, the quantum interference that it induces can alter completely the various statistical mechanical properties. Of special interest is the change in the quantum critical behavior that such terms can bring about. We have made detailed analysis on the latter aspect for several systems, among which are antiferromagnets in an applied magnetic field, and topological insulators.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：物性理論

科研費の分科・細目：物理学 数理物理・物性基礎

キーワード：ベリー位相、量子相転移、量子位相干渉、量子スピン系、トポロジカル絶縁体

1. 研究開始当初の背景

量子臨界現象には、相転移理論のひな形と長く考えられてきた Ginzburg-Landau-Wilson 理論の枠組みに収まらない例が存在することが近年指摘されるようになった。特に deconfined quantum criticality (DQC) と呼ばれるシナリオが提出され数値計算でも検証が進められ大きな話題となっていた。上記の DQC について、研究代表者は 2005 年に、新規のベリー位相項を持つ有効理論を提出

して、従来の臨界現象からの逸脱はこのベリー位相項を起源とすることを示した。

2. 研究の目的

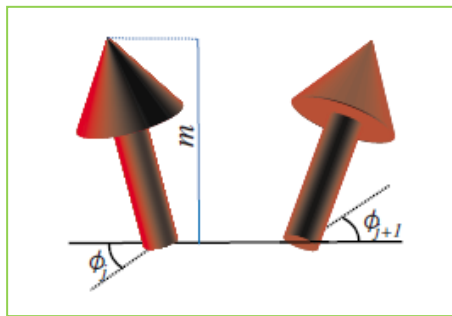
そこでより一般的に「ベリー位相項が付加されることによって、量子臨界現象が変化する顕著な系」を理論的に探索することは有益な新知見につながると考えられる。この探索が本研究の目的である。

3. 研究の方法

一般に有効理論に含まれるベリー位相項は本質的に非摂動論的な性質のものであり、また多くの場合は境界項の形をとるために通常の手続きでは見落とされやすく、理論の構築には特に注意が必要となる。これまでに蓄積した非摂動論的な手法を援用して、磁性体、バンド絶縁体（トポロジカル絶縁体やグラフェン関連物質）における低エネルギー理論を導出して、その中でベリー位相項の果たす役割を調べた。

4. 研究成果

(1) 反強磁性磁性体の磁化過程（磁化プラトー間量子相転移）へのベリー位相の影響の解明

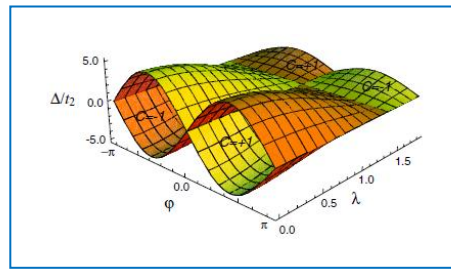


この問題にはこれまで多様な計算手法が適用可能な一次元系についてのみ研究が進んでいたが、ベリー位相を通してみると、任意次元での解析が可能となることを示した。ここでは磁場に水平なスピン成分が作る渦励起に伴うベリー位相同士の干渉が、系の低エネルギーの物性を支配することが分かった。(Phys. Rev. B 誌に論文発表。)

(2) グラフェン関連物質のトポロジカルな応答特性

この数年、トポロジカル絶縁体・トポロジカル超伝導体という新たなクラスの量子応答を示す物質群がと大きな注目を集め物質探索も進められている。この応答にはディラックフェルミオン系のベリー位相効果が中心的な役割をになう。本研究では、非トポロジカルな従来物質においても出入力の組み合わせを上手に選ぶと、上記と同様のベリー位相に起因する量子応答が得られることをグラフェン関連物質（ボロンナイトライド等）について示した。(国際会議 ICM2011 のプロシーディングに掲載決定ほか、論文を準備中。)

(3) トポロジカル絶縁体と従来型絶縁体との間の光誘起量子相転移スキームの提案



上記(2)と同様、従来型の物質に潜むトポロジカルな量子応答をひきだすためのスキームとして本研究を実施した。アイデアの要点は、適当なエネルギー帯の円偏光レーザーをバンド絶縁体に当てることにより、飛び移り積分の大きさが繰りこまれ、トポロジカル絶縁体に特徴的なベリー位相を獲得するパラメータ領域へと系を実行的に移すことが可能となるという点である。化学的な物質探索とは別の方策として有用となることを期待している。

(Phys. Rev. Lett 誌に論文発表。)

(4) 実効的重力場によるベリー位相効果

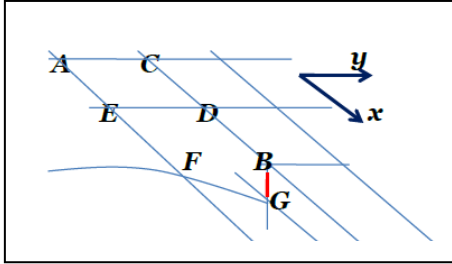
多体系の外場への線形応答には力学的応答と非力学的応答がある。電場応答など前者の特性は摂動ハミルトニアンを付加すれば求められるのに対して、温度勾配への応答(熱伝導特性など)は虚時間方向の境界条件自体が変更を受けるため通常同じ簡便な処方が適用できない。この困難を克服するには、熱揺動の効果を取捨的な「重力場」(時空の曲がり)とのカップリングにより記述する方法がある。このアプローチをグラフェンに関連した二次元絶縁体(ゼロ磁場で量子ホール効果を起こす Haldane 模型など)に適用して熱流の温度勾配への応答、またネルンスト効果など関連する交差効果を調べた。応答特性を表わす有効理論として、重力チャーンサイモンズ理論や重力 BF 理論などの所謂トポロジカル場の理論が得られた。これは系の輸送が試料表面の量子化されたチャンネルを介して行われるという、これらの系に特有の性質を反映する。同様に三次元トポロジカル絶縁体への拡張では重力的 θ 真空が得られることを初めて確認した。

(日本物理学会発表、IPMU 国際ワークショップ発表、および論文投稿中。)

(5) 振率のある時空とベリー位相効果

上記成果(4)の曲がった時空は通常の一般相対論で扱う Riemann 時空で、振れ(閉曲線を周回するときに元の時空点に戻らない性

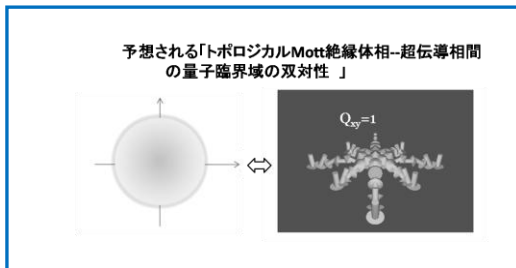
質)を持たない。一方、転位欠陥をもつ結晶中のブロッホ電子は Burgers ベクトルに相当する実効的な空間の振れを経験するため、その連続体理論は上記の Riemann 時空の枠組みを逸脱して、振率を備えた Riemann-Cartan 時空での記述を要する。この枠組み自体は以前から我が国を中心に研究が行われているが、これをグラフェン関連物質やトポロジカル絶縁体へと適用した。その結果、振率に



関係した新しいベリー位相項(量子重力理論の文脈では Nieh-Yan 不変量として知られる)が有効理論の中に生じることが分かった。これはトポロジカル絶縁体結晶に転位欠陥が入ったときに起きる新規の量子効果を表すものと予想される。この系では、欠陥に沿った一次元的な完全伝導チャンネルの出現が指摘されて高い性能指数を示す熱電物質としても最近注目されている。このチャンネルに新たなベリー位相項が及ぼす影響は興味深く、今後の重要な課題である。(日本物理学会にて発表。)

(6) 量子臨界現象における競合秩序の間の双対性の解明

前記のように、数年前に研究代表者は複数の秩序が競合する状況で起きる量子臨界現象(deconfined quantum criticality(DQC))を記述する、新しいベリー位相項を持つ有効理論を見つけた。そのベリー位相項の物理的な帰結は未解明な点が多かったため、本研究



ではその詳しい解析を場の理論的な手法を用いて行った。その結果、ベリー位相項の存在により、DQCの固定点付近では、「競合する一方の秩序に関する対称性の破れが量子揺らぎにより乱れて対称性が回復すると、他方

の秩序変数のトポロジカル電荷が保存する」という特殊な双対関係が成立することが見出された。

ここで得られた双対関係は、量子スピン系の数値計算により実際に観測されている結果に符合する他、電子相関の強いトポロジカル絶縁体と超伝導状態との秩序間競合(上図)にも有益な情報を与える。(日本物理学会にて発表、ICFM2011にて発表、J. Physics: Conference Proceedings 2011印刷中。)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計8件)

- ① A. Tanaka, "Duality among competing orders in antiferromagnets and topological insulators: nonlinear sigma model approach", accepted for publication in J. Phys.: Conference Proceeding, 2011. (査読有)
- ② J. Inoue and A. Tanaka, "Photoinduced transition between topological and conventional insulators in two-dimensional electronic systems" Phys. Rev. Lett. **105** (2010) 017401-1-017401-4 (査読有)
- ③ A. Tanaka, K. Totsuka and X. Hu, "Geometric phases and the magnetization process in quantum antiferromagnet" Phys. Rev. B **79** (2009) 064412-1-064412-16. (査読有)
- ④ M. Kohno, "Dynamically dominant excitations of string solutions in the spin-1/2 AF Heisenberg chain in a magnetic field", Phys. Rev. Lett. **102** (2009) 037203-1 - 037203-4. (査読有)
- ⑤ 田中秋広, 「量子多体系-Emergent な物質世界散策のための文献案内」日本物理学会誌 **63** (2008) 882-883. (査読有)

[学会発表](計26件)

- ① 田中秋広 「Polyakov スピン因子の量子スピン系・トポロジカル絶縁体への応用」日本物理学会第66回年次大会、2011年3月27日、新潟大学五十嵐キャンパス(新潟市)
- ② A. Tanaka "An approach to studying the duality among competing orders in antiferromagnets and topological insulators" International Conference on Frustration in Magnets (ICFM2011)、2011年1月12日、仙台国際センター(宮城県)
- ③ 田中秋広 「トポロジカル場の理論が予測するトポロジカル量子現象」、新学術領域「ト

ポロジカル量子」第一回領域研究会、2010年12月19日、京都大学100周年時計台記念館（京都府）

④ 田中秋広「振率を含むトポロジカル場の理論とトポロジカル絶縁体」日本物理学会2010年秋季大会、2010年9月23日、大阪府立大学中百舌鳥キャンパス(大阪府)

⑤ 田中秋広「フラストレート磁性体のトポロジカル応答と重力量子異常」日本物理学会第65回年次大会、2010年3月21日、岡山大学津島キャンパス（岡山県）

⑥ A. Tanaka, “Gauge and gravitational anomalies in graphene-related system”, IPMU Focus Week: Condensed Matter meets High Energy Physics, 2010年2月12日、数物連携宇宙研究機構（千葉県）

⑦ 田中秋広、「フラストレート磁性体のトポロジカル応答と重力量子異常」特定領域研究「フラストレーションが創る新しい物性」平成21年度成果報告会、2010年1月7日、京大基礎物理学研究所（京都府） ¥

⑧ A. Tanaka, “Manifestation of gauge/gravitational anomalies in graphene-derived insulators”, RIKEN Workshop on Emergent Phenomena of Correlated Materials, 2009年12月2日、理化学研究所（埼玉県）

⑨ 田中秋広、「グラフェン様絶縁体におけるトポロジカルな電荷・スピン・熱応答」、茨城大学物理学科コロキウム、2009年11月20日、茨城大学理学部（茨城県）

⑩ 田中秋広、「グラフェン様絶縁体におけるトポロジカルな電荷・スピン・熱応答」、物性研短期研究会-ディラック電子系の物性、2009年10月22日、東大物性研究所(千葉県)

⑪ 田中秋広、「グラフェン様絶縁体における重力アノマリー」、日本物理学会2009年秋季大会、2009年9月25日、熊本大学黒髪キャンパス（熊本県）

⑫ 田中秋広、「曲ったグラフェン関連物質における交差パリティ異常」、日本物理学会第64回年次大会、2009年3月27日、立教大学池袋キャンパス（東京都）

⑬ A. Tanaka, “Chiral structure and mixed parity anomaly in graphene-related systems”, 2009 March Meeting of the American Physical Society, 2009年3月20日、Lawrence Convention Center, Pittsburgh, U. S. A

⑭ 戸塚圭介（他一名）、「強磁場下スピン系におけるZ₂ゲージ理論とfractionalization」、日本物理学会2008年秋季大会、2008年9月20日、岩手大学（岩手県）

⑮ 田中秋広、「グラフェンにおけるCallan-Harvey効果」、日本物理学会2008年秋季大会、2008年9月20日、岩手大学（岩手県）

⑯ A. Tanaka, “Magnetization of quantum antiferromagnets- role of geometric phases” Ninth Taiwan international symposium on Statistical Physics, 2008年7月8日、Academia Sinica, Taipei（台湾）

⑰ A. Tanaka（他一名）, “Vortex Berry phase theory of antiferromagnets in a magnetic field”, Topological aspects of solid state Physics, 2008年6月23日、京都大学基礎物理学研究所、京都市

〔図書〕（計3件）

① 新井正男（ほか5名共訳）、吉岡書店、縮系物理における場の理論（下）、2010、275ページ（1-274）

② 新井正男（ほか5名共訳）、吉岡書店、縮系物理における場の理論（下）、2010、289ページ（1-289）

③ 新井正男（ほか5名共訳）、吉岡書店、縮系物理における場の理論（下）、2010、260ページ（1-260）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 秋広 (TANAKA AKIHIRO)

独立行政法人物質・材料研究機構・環境・エネルギー材料萌芽ラボ・主幹研究員
研究者番号：10354143

(2) 研究分担者

河野 昌仙 (KOHNO MASANORI)

独立行政法人物質・材料研究機構・ナノアーキテクトニクス研究拠点・MANA 研究者
研究者番号：40370308

(3) 連携研究者

なし