

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：32661

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18739

研究課題名（和文）相対論的電子を有する有機導体を用いた量子エンタングルメント開拓

研究課題名（英文）Quantum entanglement phenomena in organic massless Dirac electron systems

研究代表者

田嶋 尚也（TAJIMA, Naoya）

東邦大学・理学部・教授

研究者番号：40316930

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：量子エンタングルメントは、量子コンピューターの発展において大変重要な役割を担っている。現在、量子エンタングルメントの生成・検出技術は量子光学研究が主であるが、固体中で生成・検出することが今後期待される。本研究では、有機ディラック電子系物質で実現するランダウ準位交差近傍で量子エンタングルメントエントロピーが最大になることを理論的に実証した。一方、量子（熱）輸送現象の実験では、量子エンタングルメント生成を決定つける結果は得られなかった。しかし、低温・静磁場下（ある磁場角度）で電流や電場を印加しなくても発生する巨大な起電力を検出した。カイラル対称性の破れに伴うアクシオン生成が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

固体中に量子エンタングルメントの生成・検出の成功例は、Si半導体を利用した研究のみである。ランダウ準位準位交差に着目した前例はなく、本研究の成果は、固体物理学、デバイス物理学、量子情報科学などへの波及効果は非常に大きい。一方、アクシオンを固体中に生成できれば、静磁場で静電場を、静電場で静磁場を誘起でき、基礎研究のみならず低消費電力デバイス開発が期待される。アクシオンが存在する物質探索・物質創成には大きな意義がある。

研究成果の概要（英文）：Entanglement plays an important role to the development of quantum computers. The technique has developed in the quantum optics field mainly. In this study, we tried the creation of the entanglement in the organic Dirac electron systems in the magnetic field at low temperature. The controls of the field strength, the field angle and the Fermi level causes the level crossing of Landau levels. The spin and the valley splitting energies of the Landau levels is nearly equal in this system. Thus, it was expected that the split Landau levels were entangled complicatedly at the vicinity of level crossing. In this study, we demonstrated theoretically that the entanglement entropy became highest at the vicinity of Landau level crossing. On the other hand, the characteristic feature could not be detected in the experiments of the quantum transport and the specific heat. However, we could find a new physical phenomenon. The broken chiral symmetry gave rise to axion electromagnetic responses.

研究分野：固体物性

キーワード：有機ディラック電子系 エンタングルメント ランダウ準位交差 アクシオン

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

量子エンタングルメントは、量子コンピューターの発展において大変重要な役割を担っている。現在、量子エンタングルメントの生成・検出技術は量子光学研究が主であるが、固体中で生成・検出することが今後期待される。例えば、スピン液体、量子ホール状態、VBS (Valance Bond Solid) 状態などの量子液体相で生じることが理論的に指摘されている。しかし、上記の量子液体状態で量子エンタングルメントを生成・検出した報告例は今のところ無い。

本研究では、高磁場下で固体中の電子のエネルギーがとりうるランダウ準位に着目する。研究代表者は、ゼーマン分裂およびバレー分裂したランダウ準位それぞれが準位交差を起こすときに、量子エンタングルメントが生成されると考える。

2. 研究の目的

本研究課題では、 α -(BEDT-TTF)₂I₃ にキャリアを注入し、低温・磁場下においてゼーマン分裂とバレー分裂したランダウ準位の準位交差近傍に量子エンタングルメントを生成し、電気的・熱的性質から検出することを目的とする。

これまで、GaAs などではランダウ準位交差は沢山調べられてきているが、量子エンタングルメント生成・検出の報告例は無い。理由は、ランダウ準位の準位交差近傍に量子エンタングルメントを生成するには、ゼーマン分裂とバレー分裂したランダウ準位が複雑に絡むことが大事で、そのためにはそれぞれの分裂のバランスが大変重要になる。 α -(BEDT-TTF)₂I₃ はこの研究に最も適した試験舞台を提供する。

3. 研究の方法

有機ディラック電子系 α -(BEDT-TTF)₂I₃ のフェルミ準位は常にディラック点 (伝導帯と価電子帯の接点) にあるために、ランダウ準位に起因した量子現象を観測するには、フェルミ準位をディラック点から移動させる必要がある。

本研究では、 α -(BEDT-TTF)₂I₃ にキャリアを注入し、低温・磁場下においてゼーマン分裂とバレー分裂したランダウ準位の準位交差近傍に量子エンタングルメントを生成・検出する。本研究課題は、良好なデバイス作製、高精度の測定・解析と信頼性のある理論評価により実現すると考える。そこで、デバイスの測定結果とその解析 (田嶋：研究代表者、西尾：研究分担者)、理論評価等 (森成：研究分担者) をフィードバックして、デバイス構造 (基板の種類) や基板電極等の選択、基板表面処理などの最適化 (須田：研究分担者) を行う研究体制で取り組んだ。

4. 研究成果

(1) 有機ディラック電子系 α -(BEDT-TTF)₂I₃ のクーロン相互作用効果

この系は、磁場を 2 次元伝導面垂直方向から平行方向へ傾けていくと、ゼーマン分裂したランダウ準位が準位交差を起こす。さらに、エンタングルメントが起きるためには、バレー分裂の効果も重要である。そこで、本研究では最初に、この系の層間磁気抵抗の磁場・角度依存性からクーロン相互作用効果を明らかにした。

結果、この系のクーロン相互作用はバレー分裂だけでなく、ゼーマン分裂に大きな効果をもたらすことを実験と理論の両面から明らかにした。低温・磁場下で異常な g -因子を示すことが明らかになった。この成果は、分裂したランダウ準位が交差する磁場強度・磁場角度を検討するのに重要である。

さらに、量子磁気抵抗振動と量子ホール効果を 24T の高磁場まで測定し (図 1)、バレー分裂の観測からこの系における磁場下のクーロンエネルギーを評価した。

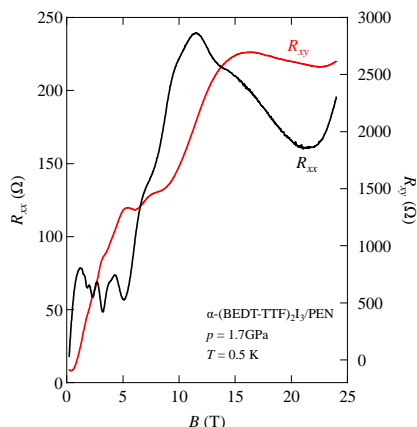


図 1 量子磁気抵抗振動と量子ホール効果

(2) ランダウ準位の準位交差とエンタングルメント

プラスチック PEN 基板を用いて接触帯電法で安定した正孔注入を行い、0.5K の低温で磁場を 2 次元面垂直方向から平行方向へ約 60 度傾けて ランダウ準位の準位交差を起こすことに成功

した。例えば、図2に磁気抵抗振動の振動成分が磁場角度約60度付近で準位交差を起こす様子を示す。

森成(研究分担者)は量子エンタングルメントエントロピーを実験で得たパラメーターを使って計算し、ゼーマン分裂とバレー分裂したランダウ準位がランダウ準位全体に渡って最大にエンタングルすることを理論的に実証した(図3)。準位交差近傍は、単純な(ランダウ準位の)状態密度分裂・交差では説明できず、それぞれの準位が複雑に絡み合っていることを示唆する結果を得た。

一方、実験では量子エンタングルメントが起きる特徴的な現象を見出すことができていない。

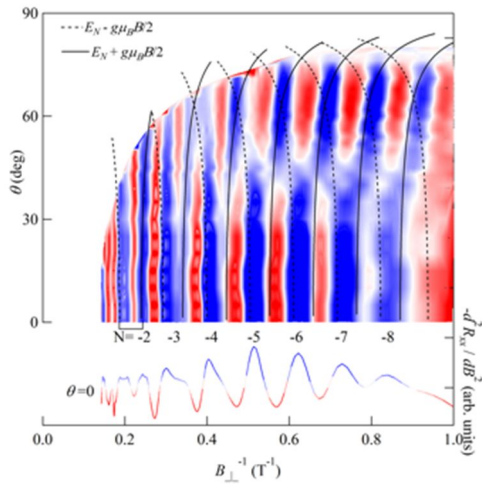


図2: 各磁場角度における磁気抵抗振動の振動成分のカラープロット。

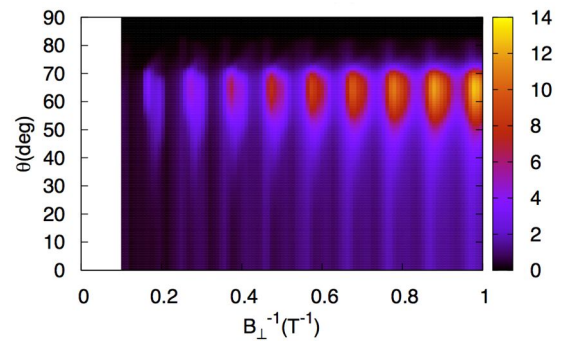


図3: 量子エンタングルメントエントロピーの理論計算。磁場を2次元面垂直方向から平行方向へ約60度傾けた角度でランダウ準位交差が起きるが、その近傍で量子エンタングルメントエントロピーは最大になる。

(3) カイラル量子異常の発見

量子エンタングルメント生成に伴う特徴を実験的に見出すことはできていないが、この研究を進める過程で、予想もしなかった発見をした。

1.7 GPaの圧力にある α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ の低温・静磁場下で電流および電場を印加なしで巨大な起電力を検出したのである(図4)。起電力発生は磁場強度と温度それぞれに閾値を持つ。カイラル対称性の破れに伴うアクシオンがこの系で実現することが強く示唆された。

森成(研究分担者)がスピン軌道結合と電子相関効果の協力・協奏により有機ディラック電子系のカイラル対称性が破れることがあることを理論的に実証した。

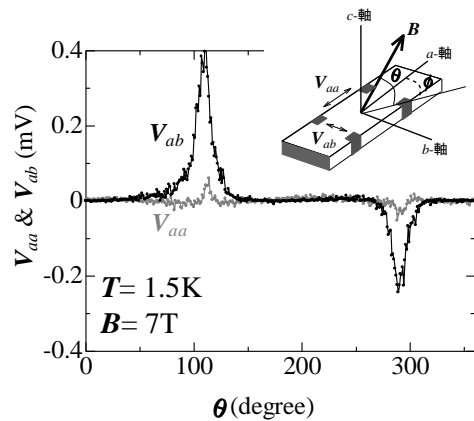


図4: α -(BEDT-TTF) $_2$ I $_3$ (1.7 GPa)における静磁場下で発生する巨大起電力の磁場角度依存性。起電力は磁場と温度に閾値を持つ。また、磁場方向と試料の測定方向に強く依存する。注意: 電流および電場印加なし。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 T. Tani, N. Tajima, and A. Kobayashi	4. 巻 9
2. 論文標題 Field-Angle Dependence of Interlayer Magnetoresistance in Organic Dirac Electron System - (BEDT-TTF) ₂ I ₃	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Crystals	6. 最初と最後の頁 212-1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） doi:10.3390/cryst9040212	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 N. Tajima
2. 発表標題 Transport Phenomena in Molecular Massless Dirac Electron Systems with Tilted Cones
3. 学会等名 The International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals 2018（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N. Tajima
2. 発表標題 Electron-Hole Symmetry in Massless Dirac Electron System a-(BEDT-TTF) ₂ I ₃ under High Pressure
3. 学会等名 The 43rd International Conference on Coordination Chemistry (ICCC2018)（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高須康弘, 杉山敦, 田嶋尚也, 梶田晃示, 西尾豊, 内藤俊雄, 加藤礼三
2. 発表標題 圧力下における -ET ₂ I ₃ の熱的性質IV
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田嶋尚也, 川相義高, 須田理行, 山本浩史, 加藤礼三, 西尾豊, 梶田晃示
2. 発表標題 有機ディラック電子系における層間磁気抵抗効果: スピン vs バレー分裂
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田嶋尚也, 加藤礼三, 西尾豊, 梶田晃示
2. 発表標題 有機ディラック電子系の低温電子状態
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鵜野澤佳成, 中居隼風, 田嶋尚也, 内藤俊雄, 加藤礼三, 西尾豊, 梶田晃示
2. 発表標題 有機ディラック電子系の中間圧力状態
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>東邦大学理学部物性物理学教室HP http://www2.ph.sci.toho-u.ac.jp/tajima/index.html</p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	西尾 豊 (NISHIO Yutaka) (20172629)	東邦大学・理学部・教授 (32661)	
研究分担者	森成 隆夫 (MORINARI Takao) (70314284)	京都大学・人間・環境学研究科・教授 (14301)	
研究分担者	須田 理行 (SUDA Masayuki) (80585159)	分子科学研究所・協奏分子システム研究センター・助教 (63903)	