

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 7 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540370

研究課題名(和文)有機導体におけるディラック電子の輸送現象の理論

研究課題名(英文) Theory of transport phenomena in organic conductor with Dirac fermion energy spectrum

研究代表者

森成 隆夫 (Morinari, Takao)

京都大学・人間・環境学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70314284

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：通常、固体中の電子は光速よりもはるかに小さな速さで動き回っている。しかしながら、有機導体 α -(BEDT-TTF)₂I₃では高圧下で相対論的な電子の運動方程式による記述が不可欠になる。このディラック電子とよばれる相対論的な電子は、磁場下での輸送現象にその特徴を表す。本研究では、この有機導体におけるディラック電子の磁場下での輸送現象について、主に相互作用効果を解析して、実験結果と良く一致する結果を得た。

研究成果の概要(英文)：Normally electrons in solids travel with a speed which is much less than the velocity of light. However, we need a relativistic equation of motion for the description of the electrons in an organic conductor α -(BEDT-TTF)₂I₃ under high pressure. The characteristic effect of the so-called Dirac fermions is observed in the transport phenomena under magnetic field. In this study we studied the transport phenomena under magnetic field in the organic conductor α -(BEDT-TTF)₂I₃ theoretically by including the interaction effect and obtained the results that are in good agreement with the experiments.

研究分野：物性理論

キーワード：ディラック電子 磁気抵抗

1. 研究開始当初の背景

光速に近い速度で運動する電子は、ディラック方程式に従う。しかし、固体中の電子のフェルミ速度は、光速に比べてずっと小さい。そのため、ディラック方程式は通常は用いない。ところが、電子のエネルギー分散が線形になるような系では、電子の運動はディラック方程式で記述される。その場合のディラック方程式は、光速を電子のフェルミ速度で置き換えたものになる。このような固体中のディラック電子が注目を集めるようになったのは、2004年にグラフェンが初めて合成され、さらに2005年にディラック電子特有の半整数量子ホール効果が観測されたのがきっかけである。この半整数量子ホール効果の観測は、ディラック電子が固体中で実現していることを劇的に示すものであった。実際、この実験以降、ディラック電子の研究が国内・国外を問わず爆発的な勢いで進められ、固体物性におけるホットトピックになっている。ディラック電子は、通常の電子と比べて移動度が極めて高いといった著しい特徴がある。そのため応用の観点からも非常に高い関心を集めている。このようなディラック電子の基礎物性を明らかにしていくことは固体物性における最重要課題のひとつに位置づけられる。しかしながら、ディラック電子の研究はグラフェンに関するものがほとんどであり、有機導体 $-(\text{BEDT-TTF})_2\text{I}_3$ で実現しているディラック電子の研究は、グラフェンと比較すると圧倒的に少ない状況であった。

2. 研究の目的

ディラック電子系として盛んに研究されているグラフェンは、単層のグラファイトであり、純粋な2次元系である。しかし、有機導体のディラック電子は2次元のディラック電子の層が積層したバルク物質である。そのため、グラフェンでは適用できないバルクの測定手段が使える。さらに、ディラック電子系が電荷密度波状態の近傍で現れており、ディラック電子が出現する状況でも電荷密度波の相関効果が残っている。このように電子相関とディラック電子が密接に関連しているという特長はグラフェンにはなく、ディラック電子の出現に電子相関は全く関わっていない。このように、バルクの系であること、電子相関が強い系であること、など有機系のディラック電子系の特徴に関連する基礎物性を、輸送現象の観点から理論的に明らかにすることを研究目的とした。

3. 研究の方法

研究目的を達成するために、電子相関効果について平均場理論を適用し、スピン相関効果の解析を行った。輸送現象の理論的計算には、標準的な手法である久保公式を用いた。また、周辺物質の解析において、交換相互作用効果を調べ、電子のホッピングへのくりこみ効果

を解析した。また、数値計算手法を十二分に活用した。

4. 研究成果

(1) 層間のクーロン相互作用に着目して、層間ホッピングにおけるスピン反転効果を調べた。 $-(\text{BEDT-TTF})_2\text{I}_3$ のフェルミ準位は、ディラック点近傍に存在していると考えられている。そのため、系は少数キャリア系であり、クーロン相互作用はほとんど遮蔽されない。この点に着目して、層間クーロン相互作用の平均場理論による解析を行った。スピンの反転する平均場が存在し得ることを示し、そのような平均場が存在する場合、層間磁気抵抗にスピン反転効果が現れることを見出した。特に、磁場と温度依存性をしらべ、図1に示したように実験結果と定量的によく一致する結果を得た。層間磁気抵抗の温度依存性を調べた実験によると、層間磁気抵抗は、ある温度でピークをもつ。このピーク温度 T_{max} は磁場に依存する。この磁場依存性を図示したのが図1である。データ点と理論曲線の両方が示してある。スピン反転が存在する場合には、ゼーマン分裂のエネルギーが存在する。このゼーマン分裂を取り入れた結果と、ゼーマン分裂を無視した結果の2つの場合が示してある。ゼーマン分裂を取り入れた結果は、実際の実験と対応しており、定量的によく一致する結果である。

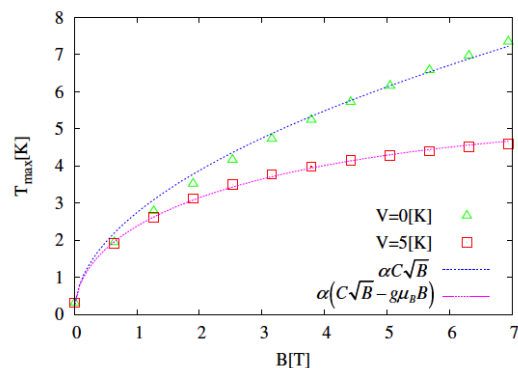


図 1

(2) $-(\text{BEDT-TTF})_2\text{I}_3$ は強相関電子系であり、同一サイトで強いクーロン斥力が働く。そのため、層間では反強磁性的なスピン間の相互作用が存在する。この相互作用を考慮して、磁場下での系全体におけるスピン秩序状態を解析し、フェリ磁性が存在するパラメータ領域の存在を示した。図2に示した結果は、横軸磁場、縦軸温度の相図である。低磁場かつ低温でフェリ磁性状態が実現する。面内では強磁性的にスピンがそろっているが、面間では、層間の反強磁性的相互作用によって、スピンが反平行となる。しかし、面内の強磁性的相互作用によって、フェリ磁性的となる。このほか、g 因子の温度依存性をしらべ、図3に示すように、低温でg 因子が減少することを見出した。この結果は定性的に実験と一

致する結果である。

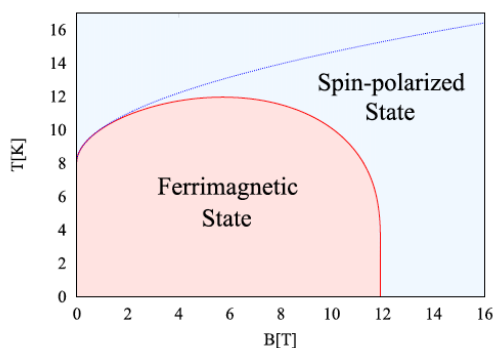


図 2

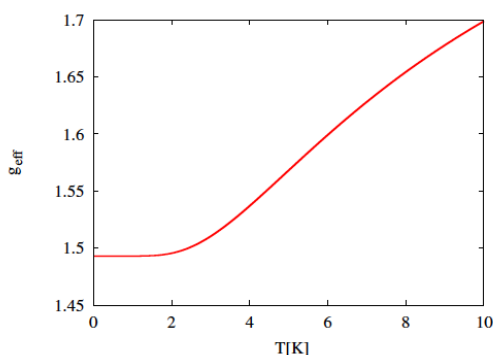


図 3

(3) $-(\text{BEDT-TTF})_2\text{I}_3$ においてディラック電子が安定化する機構は未だ明らかになっていない。この問題について、隣接サイト間のクーロン相互作用を平均場近似で解析し、電子のホッピングパラメータのくりこみ効果によってディラック電子系が安定化する機構を示した。

(4) $-(\text{BEDT-TTF})_2\text{I}_3$ の関連物質である $-(\text{BEDT-TSF})_2\text{I}_3$ においてディラック電子が実現する可能性を、隣接サイト間で作用するクーロン相互作用から生じる交換相互作用効果の解析を行うことで調べた。平均場理論を適用した結果、電子のホッピングパラメータのくりこみ効果が存在し、高圧下でディラック電子系が実現し得ることを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

T. Morinari and Y. Suzumura, On the Possible Zero-Gap State in Organic Conductor $-(\text{BEDT-TSF})_2\text{I}_3$ under Pressure, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, 83, 094701-1-094701-5 (2014). DOI: <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.094701>.

K. Kubo and T. Morinari, Effect of Interlayer Spin-Flip Tunneling for Interlayer Magnetoresistance in Multilayer Massless Dirac Fermion Systems J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, 83, 083701-1-4 (2014). DOI: <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.083701>.

K. Kubo and T. Morinari, Spin Ordered States in Multilayer Massless Dirac Fermion Systems, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, 83, 033702-1-033702-4 (2014). DOI: <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.033702>.

K. Sasaki and T. Morinari, Dirac Fermion State with Real Space π -Flux on Anisotropic Square Lattice and Triangular Lattice, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, 83, 034712 (1-4) (2014). DOI: <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.034712>.

〔学会発表〕(計 4 件)

久保健治, 森成隆夫
日本物理学会, 中部大学 2014, 9.7-10 (秋季大会) “多層 Dirac 電子系における層間磁気抵抗へのスピン反転トンネリングの効果”

K. Kubo and T. Morinari, International Workshop "Novel Quantum States in Condensed Matter 2014 (NQS2014)" (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Japan, November 18, 2014). “Effect of Interlayer Spin-flip Tunneling for Interlayer Magnetoresistance in Multilayer Dirac Fermion Systems”

K. Kubo and T. Morinari, 国際ワークショップ "Dirac Electrons in Solids" (東京大学理学部 小柴ホール, January 14-15, 2015). “Effect of Interlayer Spin-flip Tunneling for Interlayer Magnetoresistance in Multilayer Dirac Fermion Systems”

森成隆夫, 鈴村順三, 日本物理学会, 広島大学 2013, 3.26-29 (第 68 回年次大会) 分子性導体 $-(\text{BEDT-TTF})_2\text{I}_3$ のディラック電子状態における代数的構造。

〔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://cmt.phys.h.kyoto-u.ac.jp/>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

森成 隆夫 (MORINARI, Takao)

京都大学・大学院人間・環境学研究科・准
教授

研究者番号：70314284