

論文審査の結果の要旨

氏名 金尾 太郎

本学位論文は5章からなり、1章は固体中におけるディラック電子系についての序論および本論文の概要、2章は欠陥をもつグラフェンにおける近藤効果の理論、3章は欠陥をもつ有機固体 α -(BEDT-TTF)₂I₃ における局在状態の理論、4章は α -(BEDT-TTF)₂I₃ におけるディラック電子への電荷揺らぎの効果の理論、5章は本論文で得られた結論および今後の展望を述べている。

ディラック電子系は、グラフェン（炭素原子一層からなる物質）において実現し、20世紀中頃にグラフェン中の電子がディラック電子と見なせることが示されたが、2000年代初頭からグラフェンが実際の試料として得られるようになり、その特異な物性が注目された。2010年にグラフェンがノーベル物理学賞を受賞した前後からは、物性物理学の大きな分野となっている。ディラック電子というのは、元来は場の理論において電子を相対論的に扱う際に生じる電子であるが、グラフェンで実現するのは、質量がゼロのディラック電子であり、それに伴う物性の特異性が興味の焦点となっている。また、ディラック電子は、グラフェン以外にも、擬2次元有機導体 α -(BEDT-TTF)₂I₃ などにおいて実現することも知られている。

しかし、このような系が質量ゼロのディラック電子系と見なせるという描像は、電子間の相互作用を無視した、一体問題の範囲内であり、したがって、電子間のクーロン斥力相互作用を考慮した場合に、ディラック電子がどのようなようになるか、特に物性にどのような効果をもたらすか、という興味深い問題が生じる。実際、最近の詳細な実験的研究により、上述の系は理想的なディラック電子系からのずれを示す場合もあることが明らかになりつつあり、その原因が議論されている。本学位論文は、この点を調べるために、主に、欠陥をもつグラフェンにおいて局所的な電子間相互作用が引き起こす近藤効果の理論、ならびに α -(BEDT-TTF)₂I₃ においてクーロン相互作用が引き起こすディラック電子への電荷揺らぎの効果の理論を通して、ディラック電子における多体効果の理論的解明と実験との比較を目指したものである。

先ず、欠陥のあるグラフェンに関しては、最近、イオン照射されたグラフェンにおいて近藤効果が観測されている。近藤効果は、通常は金属中の磁性不純物によって引き起こされる効果であるが、グラフェンの実験で問題となるのは、通常の金属と質的に異なるバンド分散（波数に線形）と状態密度（ディラック点でゼロとなる）をもつグラフェン中の点欠陥が近藤効果を引き起こすか否か、という点である。グラフェン中の点欠陥近傍での電子状態に対して、点欠陥が局在モーメントをもつことは知られていたが、グラフェンの特異なバンド構造の観点から、本論文では近藤効果のメカニズムが考察された。点欠陥近傍で原子位置がグラフェン面からはずれた構造をもつために、グラフェンの σ バンドをなす sp^2 電子と、ディラック電子を担う π 電子の間に混成が発生するので、欠陥に局在した状態における多体相互作用も含む、この系を記述する微視的モデルが提案された。このモデルは近藤模型と似ているが、グラフェンのディラック的バンド分散を

取り入れるために数値繰り込み群の方法を用いて、その低エネルギー状態が解析された。その結果、実験で得られているような、ディラック点で極小となる近藤温度のゲート電圧依存性が定性的には説明できることが示された。

次に、擬2次元有機導体 α -(BEDT-TTF)₂I₃ は、圧力下において、質量のない2次元ディラック電子的な振る舞い（そのバンド分散は、傾いたディラック円錐となる）のために、近年注目されている物質である。常圧においては電荷秩序をもち、加圧によりこれが消失するとともにディラック系となる、という転移を起こすことが知られている。しかし、この物質において、最近の実験から、ディラック系となる相においても理想的なディラック電子系からのずれが報告されている。すなわち、ディラック電子系では低温で温度に依存しないことが期待される電気抵抗が、低温に向い対数的に増大する実験が報告されている。また、NMR 測定から求められたスピン帯磁率が、相互作用のない場合に期待される値に比べて低温で抑制されることが示されている。

本学位論文の後半においては、このディラック電子相が、多体効果から発生すると考えられる電荷秩序相に隣接しており、両相間の相転移は殆ど連続転移であることから、特に絶対零度では量子臨界点が存在するとおもわれ、転移点の近傍では電荷ゆらぎが臨界的に発達するであろう、という考察から出発する。これに立脚して、ゆらぎの物理量への影響が、自己無撞着繰り込み (SCR) 理論により調べられた。SCR 理論では、異なるモードのゆらぎ間の相互作用 (モード結合) が取り込まれているために、より正しくゆらぎを記述することができると考えられている。具体的には、ディラック電子系と電荷秩序を記述する簡単化されたモデルから、ディラック電子相における電荷ゆらぎを記述するランダウ-ギンツブルグ-ウィルソン汎関数が求められた。その結果、電荷ゆらぎのスペクトルは、通常バンド分散をもつ系とは異なる波数依存性、振動数依存性をもつことが見出された。次に、電荷ゆらぎとの相互作用により発生する、電子の自己エネルギーが求められた。この量の虚数部分 (ダンピング) は、電気抵抗の目安になると考えられる。また、状態密度も見積もられた。その結果、量子臨界点近傍においてモード結合が大きい場合に、ダンピングは非単調な温度依存性を示すことがわかった。これは実験的に観測されている電気抵抗の低温での増大を説明する可能性がある。また状態密度は有限温度において抑制されることがわかった。これは NMR の実験結果と矛盾しない。

以上のように、本学位論文では、グラフェンおよび擬2次元有機導体 α -(BEDT-TTF)₂I₃ という、全く異なる物質でありながら、質量がゼロのディラック電子と見なせるという共通点をもつ系に対して、電子間の多体相互作用がどのようにディラック電子の示す物性に影響するか、という点を明らかにした。グラフェンにおいては特徴的な近藤効果の存在、有機導体に対しては電荷秩序相隣接領域における量子臨界的な電荷揺らぎが及ぼす効果等が理論的に明らかにされた。これらの効果が、どの程度ディラック電子系に普遍的であるのか、また、物質に即した実験結果をどの程度定量的に説明するのか、などの点は今後の研究をまつ必要があると思われるが、本学位論文で得られた成果は、ディラック電子系の理解に重要な貢献をするだけでなく、将来的にも、多彩なディラック電子系の物理の発展にも資することが期待される。

なお、本論文の一部は小形正男教授、松浦弘泰博士との共同研究であるが、論文提出者が主体となって研究したものであり、論文提出者の寄与が十分であると判断される。

したがって、審査員全員により、博士 (理学) を授与できると認める。