

論文審査の結果の要旨

氏名 荒木 康史

本学位論文は6章からなり、1章はグラフェンおよび、この系における多体効果についての序論および本論文の概要、2章は蜂の巣格子に関する有効理論の解説、3章は主たる部分であり、格子ゲージ理論における強結合展開と、蜂の巣格子への適用、4章はスピンのSU(2)対称性を保った平均場近似、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。

グラフェン(炭素原子一層が蜂の巣格子をなす物質)は、そのバンド構造がディラック電子と見なせる部分を含むために、20世紀中頃から理論的に興味をもたれてきた。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年にグラフェンのテーマ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が創成されている。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ものであるが、一般には質量をもった相対論的粒子である。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た。このディラック電子とのアナロジーからは、この問題を、素粒子・原子核物理学的な観点、特にハドロン物理学の観点から扱うと、どのような物理が構築できるか、という興味深い点が生じる。グラフェンは、この観点からも多くの素粒子・原子核理論物理学者の興味を惹き、精力的な研究が行われている。

本学位論文の主眼は、グラフェンの蜂の巣格子に関する物理に啓発され、ハドロン物理学でスタンダードとなっている格子ゲージ理論を蜂の巣格子上で行うとどうなるかを調べた点である。興味の焦点は二点あり、(a) グラフェンそのものは、炭素という軽元素系であるために、電子間相互作用(電子相関の強さ)は小さいが、理論的な問題として、相互作用が強いとしたときに、蜂の巣格子上の荷電フェルミオン系がどのような多体状態をとるか、という問題がある。これは、物性物理学においては、Hubbard 模型のような格子フェルミオン模型を用いて精力的に調べられている。この問題を、蜂の巣格子を用いた格子ゲージ理論で扱ったのが本論文の第一の眼目である。現実のグラフェンにおいては、炭素の p_π 軌道が蜂の巣格子状に並んだ強束縛模型上で多体効果を考えるのが良い模型となるが、蜂の巣格子ゲージ理論では、電子が原子軌道に束縛されていることや、 p_π 軌道以外の軌道により電子間クーロン相互作用が遮蔽される効果を無視して、 $1/r$ 相互作用する荷電フェルミオン系に対する作用において((3+1)次元の)電磁場のベクトル・ポテンシャルに関する部分を消去することにより、電子の有効ラグランジアンを求めることになる。

(b) 蜂の巣格子のバンド構造においては、Brillouin 帯のK点、K'点と呼ばれる二点の近傍においてディラック電子的になるために、グラフェンを場の理論の観点から扱う際にはディラック場を導入して調べることが多いが、本論文ではそうではなく、格子ゲージ理論における格子を蜂の巣格子にとることを考える。このために、電子間相互作用の行列要素は、K点、K'点を結ぶものが考慮されるために、その効果に興味もたれる。

学位申請者は、上記の二点を眼目として、蜂の巣格子ゲージ理論を調べ、以下の結果を得た。(1) 多体状態として現れ得ると思われる、電荷秩序相 (CDW)、反強磁性状態 (SDW)、2 原子を結ぶ bond が、ケクレ・パターン状に強弱をとる構造 (KD1, KD2)、一種の flux phase として Haldane がゼロ磁場中での量子ホール効果のトポロジカル相として考えた構造 (flux) を考えた。上記の蜂の巣格子ゲージ理論において、荷電フェルミオンと電磁場との結合が強いとする強結合展開を行い、この初項と次項まで取り入れたモデルで考察した。この結果、この2項の強さに対する相図として、SDW, KD1, KD2 が現れるものが得られた。また、flux を外場としてかけた場合の相図も得られ、この中には、反強磁性相とトポロジカル相の間に、傾いた反強磁性相 (量子色力学 (QCD) の青木相に対応) も存在することが示された。

以上のように、本学位論文では、通常は単純な正方格子、立方格子などで行われる格子ゲージ理論を、蜂の巣格子という特徴的な格子に対して実行した初めての例であり、興味深い結果が得られ、荷電フェルミオン多体系の物理の発展に資することが期待される。現実のグラフェンの物性との対応を見るには、グラフェンを記述する強束縛多体モデルに現れる物理量と、本研究での格子ゲージ理論に現れるパラメータとの関連付けをする必要があるが、これは将来の課題であろう。なお、本論文の一部は初田哲男教授、木村太郎氏、Gordon W. Semenoff 氏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。