

論文審査の結果の要旨

氏名 江澤 雅彦

過去半世紀以上に亘って、炭素物質は基礎物理の観点からも工学的応用の観点からも常に注目を浴びている対象である。特に近年、2次元グラファイト(グラフェン)における「ディラック電子」の物性研究が盛んになっており、これに関連して、本論文では新規グラフェン派生物質としてのグラフェン・ナノディスクの提案、その物性予測、及び、そのスピントロニクス回路素子としての応用可能性が論じられた。

さて、英文で本文9章と補遺2つから成る本論文の第1章では、炭素物質研究の歴史を簡単に追いながら、本論文の中心課題であるジグザグ三角グラフェン・ナノディスク(N^2+6N+6 個の炭素原子から作られる平面三角形の有限サイズ系)の導入に至る経緯が記された。そして、この系に関して得られた幾つかの研究成果がその位置づけと共に要約された。また、本論文の構成に沿って各成果がより具体的に解説された。

次の第2章では、炭素物質群、特に、カーボンナノチューブやナノリボン、ナノディスクが、それらの合成法や端の形状が果たす重要性にも触れつつ、より詳細に議論された。そして、第3章では、閉じた境界を持つ強束縛一電子近似模型に基づいてナノディスクの電子物性が解析され、その結果、ジグザグ状の端がある三角ナノディスクではフェルミ準位に位置する一電子状態(零エネルギー状態)が N 重に縮重して存在するという特異性が明らかにされた。また、この特異な縮退電子状態が出現する数学的な理由の詳述と共に、この零エネルギー状態の縮退を解く一体的摂動の大きさが吟味された。

本論文の中心的な成果を報告している第4章では、前章で数値的に得られた結果が $k \cdot p$ 理論に基づいて再検討された。特に、零エネルギー状態を表す波動関数の解析表現が得られたことは重要で、これによりナノディスクの物性をグラフェンのディラック電子の立場から簡明に捉えられるようになった。そして、その波動関数の節点が2次の零点(渦度が2)になりうるという興味深い発見があった。今のところ、この事実が具体的にどのような物理的帰結を導くかは必ずしも明確ではないものの、位相幾何学的な観点からは大変面白いものといえる。

零エネルギー状態の N 重縮退は電子間クーロン斥力によっても解ける。第5章ではこの問題が取り扱われた。ここではクーロン斥力の行列要素は定量計算されたが、 N 個

の零エネルギー状態だけから成る（スピン自由度は考慮された）ヒルベルト空間に限定されたもので、しかも、実際には無限距離結合のハイゼンベルグ模型という可解模型に還元されたので限定的な議論といえるが、この簡単化の下で基底状態は $N/2$ のスピン偏極を持つ強磁性状態であることが結論された。これはハバード模型でのリーブの定理や原子分子系でのフント則、バルクの平坦バンド系での強磁性出現などにおける結論と整合的であり、正しいものと期待される。ただ、この結論や有限温度での各種物性の計算結果は可解模型に立脚するものであり、その模型の正当性も含めて今後の実験的検証が待たれる。

その検証の舞台としてナノディスク・リード系が考えられる。この系は第6、7章で解析された。その結果、 N 重縮退に由来する内部自由度を持つ量子ドットがリード線につながれたものという描像が得られた。特に、通常の量子ドット・リード系に比べて、その内部自由度の存在によって特徴的なクーロン障壁効果や近藤効果が導かれた。

第8章では、ナノディスクのスピン偏極した基底状態の性質、とりわけ、その長いスピン緩和時間という特徴を利用して、そのスピントロニクス素子としての可能性が調べられた。最後に第9章では、本研究で得られた新しい研究成果が要約されると同時に、将来のスピントロニクス素子としての具体的な機能、例えば、スピン記憶素子、スピン増幅素子、スピン弁、スピンドायオード、スピン論理回路などが議論された。なお、本論文の末尾には第5章の議論に関連した補遺2つがつけ加えられた。

以上、各章の紹介とともに本論文で得られた物理学上の知見を解説した。グラフェン・ナノディスクをその特徴的な電子物性の解析も含めて世界に先駆けて提案したことは非常に高く評価される。これは基礎物理学だけでなく、スピントロニクスなどの応用研究にも十分な貢献が認められるものである。したがって、審査員全員が学位論文として十分な水準にあり、博士（理学）の学位を授与できると認める。なお、本論文の内容の殆ど全ては申請者の単著論文として、Physical Review B 誌や Physica E 誌、European Physical Journal B 誌、New Journal of Physics 誌、Physica Status Solidi (c) 誌、Journal of the Physical Society of Japan 誌、Physics Letters A 誌などに既載されている。