

機関番号：14401

研究種目：新学術領域研究

研究期間：2008～2012

課題番号：20104010

研究課題名（和文）

動的相関電子系における相転移・クロスオーバーと光学スペクトル

研究課題名（英文）

Phase Transition and Crossover in Dynamically Correlated Electron Systems

研究代表者

浅野 建一 (ASANO KENICHI)

大阪大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：10379274

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 I・物性 II

キーワード：電子正孔系，励起子，モット転移，BCS-BEC クロスオーバー，FFLO 相，ディラック電子系，量子ホール系

1. 研究計画の概要

電子と正孔が同数共存する系の熱平衡状態は、物性物理学の縮図と言える程の多様性を示すことが理論的に予言されている。実際、励起子気体相（低密度かつ低温）と電子正孔プラズマ相（高温または高密度）の間には励起子モット転移があり、極低温では量子凝縮が起き、励起子 BEC(励起子のボーズ凝縮)、電子正孔 BCS（電子正孔クーパ対の凝縮）相が現れる。この系は、相関効果や多体効果を考察する絶好の理論研究の舞台を与えるだけでなく、半導体レーザーをはじめとする応用面においても重要である。そこで、旧来の摂動論を越え、相関効果まで考慮した半定量的な理論の構築を目指す。

また、アンバランスな電子正孔二層系で起こる新奇な量子凝縮相、セミメタルと半導体の中間に位置している Dirac 電子系(グラフェンやカーボンナノチューブ系)の光学応答に対する相互作用効果、電子正孔系との関連が深い多軌道ハバードモデルといった新しいテーマの開拓にも取り組む。

2. 研究の進捗状況

(1) アンバランスな電子正孔二層系の量子凝縮相：電子と正孔が異なる二次元面に閉じ込められた系(タイプII量子井戸構造)で電子と正孔の密度が異なるときに極低温で現れる Fulde-Ferrel-Larkin-Ovchinnikov 相を BCS 型の変分波動関数を用いて考察し、これが長距離クーロン相互作用の異方的成分を反映して安定化することを示した。

(2) カーボンナノチューブ上の励起子分子：遮蔽効果、バンドの非放物線性、バンドの谷構造など、これまで無視されてきた効果をす

べて考慮した数値計算を行い、相互作用の構造因子と遮蔽効果のために、励起子分子の束縛エネルギーが、これまで予想されていたものよりずっと小さいことを示した。

(3) グラフェン上のサイクロトロン共鳴：単層グラフェンでは Kohn の定理が成り立たず、サイクロトロン共鳴に相互作用効果が現れる。これを線幅の観点から調べた。その結果、 $N=0$ から 1（あるいは $N=-1$ から 0）のランダウ準位間遷移の線幅が非常に小さく、それ以外の遷移の線幅は非常に大きいことが分かった。

(4) ディラックコーンの出現条件：最近、超伝導物質である鉄ヒ素系や二次元有機導体など、様々な二次元系でディラックコーン型分散が見つかった。我々は、ディラックコーン様のバンド分散(偶然縮退)が出現するための基本条件を明らかにし、物質設計の指針を提示した。

(5) 新しい摂動論的手法による電子正孔系の解析：系が電子正孔プラズマと励起子ガスの中間的な状態であることを表現できる自己無撞着な摂動理論の開発に成功した。現在、プログラムが完成し、様々な系に対して計算を進めていく段階にある。

(6) DMFT による二軌道ハバードモデルの解析：二軌道ハバードモデルは、電子正孔系との類似性が高く興味深い研究対象である。我々は、従来の動的平均場理論(DMFT)の拡張版(セル型 DMFT)を使って、この系のモットクロスオーバー近傍の物性を調べ、フロント結合により強磁性・反強軌道揺らぎが増大し、軌道秩序の前駆現象として絶縁体的状態が安定化することを示した。

3. 現在までの達成度

②おおむね順調に進展している。
今年度まで、我々は新しい研究の切り口となるテーマを開拓する観点を重視してきた。その結果、現在の中心的な研究テーマだけでも、2. で列挙したように多岐にわたっている。研究のもう一つの柱である、電子正孔系の準熱平衡状態に対する半定量的理論についても、2. (5) で示したように、計算の手法を確立する段階に達している。

4. 今後の研究の推進方策

本年度以降は、単に新しい研究テーマを増やしていくのではなく、現在の研究テーマを掘り下げていくフェーズに移る。特に2. (5) の研究が軌道に乗りつつあるので、今後は (5) を研究の軸に据え、シリコン、ゲルマニウム、ダイヤモンド (間接半導体) 上の電子正孔系の理解も視野に入れながら、他研究班との密な連携をとる。すでに理論の枠組みが確立できたので、これを間接半導体の議論へ拡張するのは容易であると考えられる。

5. 代表的な研究成果

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① K. Asano and C. Hotta: “Designing Dirac points in two-dimensional lattices”, to be published in Physical Review B (2011) (巻・頁未定, 査読有り).
- ② K. Watanabe and K. Asano: “Biexcitons in semiconducting single-walled carbon nanotubes”, Physical Review B, 83 (2011) 115406-1-5 (査読有り).
- ③ Y. Furukawa, T. Ohashi, Y. Koyama, and N. Kawakami: “Mott transition in the Hubbard model on the anisotropic kagome lattice”, Physical Review B, 82 (2010) 161101-1-4(R) (査読有り).
- ④ K. Yamashita, K. Asano, and T. Ohashi: “Quantum Condensation in electron-Hole Bilayers with Density Imbalance”, Journal of the Physics Society of Japan 79 (2010) 033001-1-4 (査読有り).
- ⑤ T. Kita, T. Ohashi, and S. Suga: “Cellular Dynamical Mean Field Study on Two-Orbital Hubbard Model with Different Bandwidths”, Journal of Physical Society of Japan 79 (2010) 014713-1-5 (査読有り).

[学会発表] (計 33 件)

- ① K. Asano and T. Ando: “Spectral

lineshapes of cyclotron resonance in monolayer and bilayer grapheme”, The 19th International Conference on the Application of High Magnetic Fields in Semiconductor Physics and Nanotechnology (HMF-19), 8/3 (2010), 福岡国際会議場 (福岡県).

- ② K. Watanabe and K. Asano: “Screening effect to biexciton in carbon nanotubes”, The 16th International Conference on Superlattices, Nanostructures and Nanodevices (ICSNN-2010), 7/20 (2010), 北京 (中国).
- ③ K. Yamashita, T. Ohashi and K. Asano: “Ground state of electron-hole bilayer with density imbalance”, The 9th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed and Nano Materials (EXCON' 10), 7/14(2010), Brisbane (Australia).
- ④ K. Asano and T. Ando: “Approximate validity of Kohn's theorem in cyclotron resonance in grapheme”, The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-18), 7/23 (2009), 神戸コンベンションセンター (兵庫県).
- ⑤ K. Yamashita, K. Asano, T. Ohashi and T. Ogawa: “Quantum Condensation in the electron-hole system with density imbalance”, The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-18), 7/21 (2009), 神戸コンベンションセンター (兵庫県).