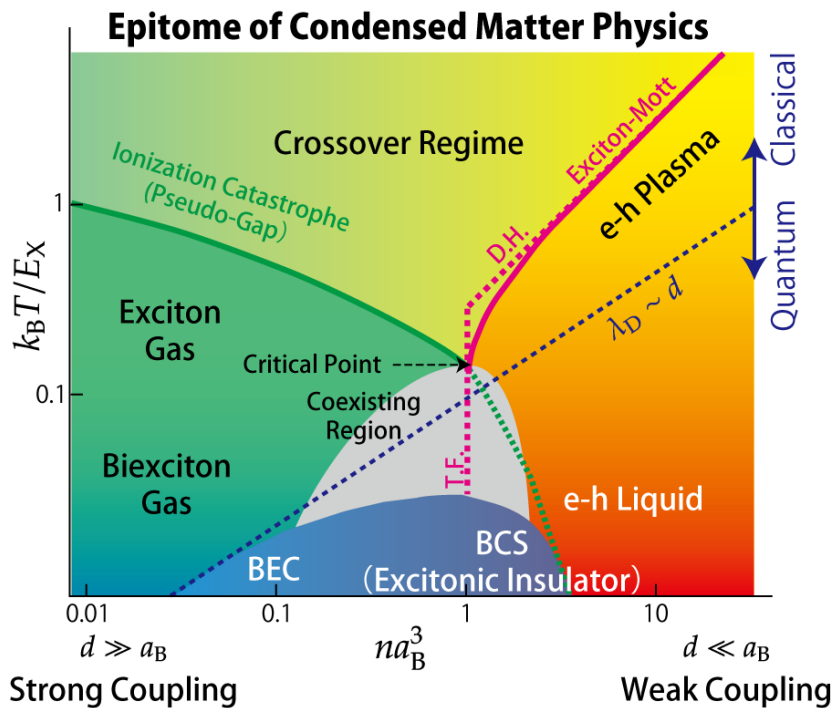


動的相関電子系における相転移・クロスオーバーと光学スペクトル

浅野 建一 (阪大理)

研究分担者：大橋 琢磨 (阪大理)

光で強励起されたノンドープ半導体やセミメタル系では、多数の電子と正孔が同数共存し、斥力と引力を及ぼし合った（擬似）熱平衡状態が実現される。六十年代以来、この系がモット転移、励起子 BEC、電子・正孔ペア BCS（励起子絶縁体）等、物性科学の縮図と言える程の物理を内包することが明らかにされてきた。この系の相図を、電子正孔密度と温度の平面上において理解することは、応用学見地からも重要である。例えば、レーザー作製の際には、電子-正孔プラズマ（フェルミ液体）相で反転分布が実現することを利用する（プラズマ機構）が、これが励起子モット転移の物理と関連するのは必然と言える。相図の全容は未だ完全には解明されていないが、その特徴は下図のようになると予想されている。これから分かるように、相図の理解の鍵となるのは、励起子ガスと電子正孔プラズマ間の絶縁体・金属転移（励起子モット転移）、および電子正孔複合ボゾン（励起子的または励起分子的な複合体）の量子凝縮である。



近年、良質な量子井戸（二次元系）や量子細線（一次元系）が作製され、低次元電子正孔系の実験的研究が飛躍的進歩を遂げた。このような低次元電子正孔系をレーザーへ応用する場合、バンド端状態密度の増強は有利な材料となるが、強い励起子相関は不利な材料となることが予想される。このように、これまでの理論ではあまり省みられることがなかった相関効果の解明が急務となっている。最近我々は、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 型量子井戸構造）において、電子と正孔の密度が異なる場合に現れる Fulde-Ferrel-Larkin-Ovchinnikov (FFLO) 相

を考察した。この相は重心運動量を持つ電子正孔対が低温で凝縮したものである。BCS型の波動関数を仮定し、変分的に基底状態を計算した結果、クーロン相互作用が異方的な成分を持つために異方的な電子正孔対が形成されることを見出した。この事実を反映し、相互作用が短距離型である場合に比べ、FFLO相が著しく安定化する[1]。一方、一次元電子正孔系（長距離クーロン相互作用する連続モデル）に対しては、高密度領域の基底状態が励起子分子格子への強い不安定と、励起子の凝縮相への弱い不安定性を併せ持つことを示している[2]。最近比較の意味で、電子正孔ハバード系（短距離相互作用する格子モデル）の絶対零度における状態密度を、クラスター摂動法により求めた。その結果、斥力が強い時には励起子的、引力が強い時には励起子分子的な機構によって、常に絶縁的な基底状態が実現していることを明らかにした[3]。

高次元系については電子正孔ハバード系（格子モデル）についての先行研究があり、動的平均場近似[4]やスレーブ・ボゾン平均場法[5]によって、励起子ガス（絶縁）相と電子正孔プラズマ（金属）相が同一の枠組みによって統一的に解析されている。しかし、実際の半導体電子正孔系を記述している連続体モデルと、格子モデルとのつながりが明らかになっていない点が大きな問題となっている。我々は、格子定数をゼロにする外挿操作を開発し、動的平均場法で得られる格子モデルの結果から、連続体モデルの情報を引き出すことに取り組んでいる[6]。

電子正孔系の研究の歴史を遡ると、Mottによって提案されたバンドギャップ制御というアイデアにたどり着く。この観点に立つと、半導体とセミメタル（電子正孔）系の狭間に位置するゼロギャップ系において相関効果を考察することにも大きな意義がある。ゼロギャップ系の代表例としてグラフェン（単層グラファイト）系に注目し、この系のサイクロトロン共鳴を考察した。通常の放物型のバンドを持つ二次元電子系ではサイクロトロン共鳴に多体効果が現れない（Kohnの定理）ことが知られているが、非放物線性が強い極限に位置するためにグラフェンでは多体効果が現れる。その様子を厳密対角化の手法により調べ、隣接ランダウ準位間の遷移に対応する共鳴には弱い相互作用効果しか現れないが、電子正孔対励起に対応する共鳴には大きな相互作用効果が現れることを明らかにした。また、グラフェンを丸めた系であるカーボンナノチューブ上の励起子分子の問題にも取り組み、厳密対角化法で励起子分子の波動関数を正確に求める手法を確立した[7]。

参考文献

- [1] K. Yamashita, K. Asano, T. Ohashi, cond-mat/0908.2492v1.
- [2] K. Asano and T. Ogawa, J. Lumin. **112** (2005) 200.
- [3] K. Asano, T. Nishida, and T. Ogawa, Phys. Stat. Sol. (b) **245**(2008) 2729.
- [4] T. Ogawa, Y. Tomio, and K. Asano, J. Phys.: Cond. Matt., **19** (2007) 295205.
- [5] K. Asano and T. Ogawa, Physica E. **40** (2008) 1249.
- [6] T. Ueda, T. Ohashi, K. Asano, and T. Ogawa, J. Phys.: Conf. Ser., **148** (2009) 012052.
- [7] K. Watanabe, K. Asano, and T. Ogawa, J. Phys.: Conf. Ser., **148** (2009) 012053.