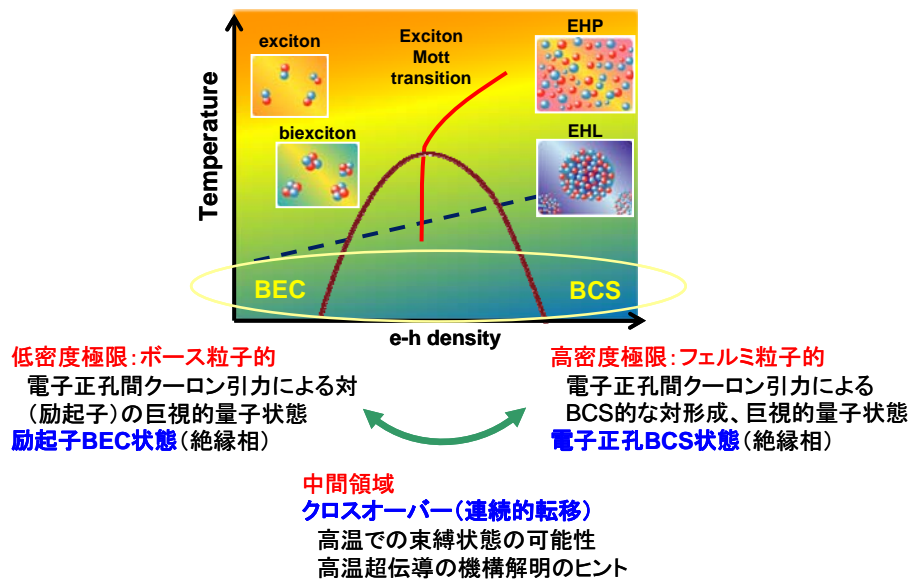


半導体における

励起子ボース・アインシュタイン凝縮相の探索

五神 真 (東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻・光量子科学研究センター)

半導体の電子正孔系は強いクーロン相互作用が働く量子多体系であり、多彩な物質相を形成する。電子正孔一対がクーロン力で束縛された準粒子“励起子”は複合ボース粒子であり、ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) 観測の有力候補として理論実験両面から長年研究が続けられてきた[1]。BEC の研究は近年、希薄原子系を用いた研究が活発に進められている。原子気体系ではフェッシュバック共鳴を用いて原子間相互作用を自在に調整することが可能であり、相互作用の強い領域での BEC 相の研究や、フェルミオン原子を用いた、準安定な分子状態の BEC と BCS のクロスオーバーの追跡など、量子多体系の物質相を俯瞰的に探索する舞台として大いに注目を集めている。励起子は正負の電荷をもつ粒子による複合粒子であり、高密度下では、絶縁体金属転移を伴う物質相の変化が生じる系であり原子系以上に多様な物質相を示す (図)。しかし、寿命の有限性や光照射による加熱、拡散効果などの効果により、物質相を系統的に探索することは容易ではなく、励起子 BEC 相の存在についても未だ明確な結論には至っていない。



図：半導体における電子正孔系の“物質相”

我々はこれまで、原子系と対比しうる寿命の長い励起子系に注目し、準熱平衡下での励起子系の挙動について分光学的な手法により調べてきた。亜酸化銅結晶の 1s パラ励起子はスピン三重項状態であり、発光や吸収といった直接の光学過程が禁制である。この光学的にはほとんど“見えない”励起子を定量的に検出する手法として、励起子の内部遷移 (励起子ライマン遷移) を利用する分光

法の開拓を進めてきた[2-9]。これまでに、フェムト秒パルス時間分解分光法による高速ダイナミクスの抽出[2, 3, 6]、パルス 2 光子共鳴励起による過冷却状態のオルソ励起子ガスの生成とそれを用いた内部遷移の精密分光[7, 8]、CW レーザーを利用したパラ励起子系の準定常状態下での挙動の観察[9]などの実験を進めてきた。これらの分光測定データをもとに、励起子 BEC 探索に必須となる基礎情報として (1) 励起子半径など波動関数の評価 (2) 励起子の並進運動有効質量の再評価 (3) パラ励起子の寿命の評価 (4) ライマン遷移強度を介した励起子系の密度の定量評価 (5) 励起子非弾性衝突係数の評価を行ってきた。これらにより、励起子 BEC 検出の条件がほぼ出そろった。また、位相制御パルス光を用いた 2 光子励起法による極低温励起子集団生成の実験を行い、波形制御パルスを用いることで、3 光子バンド間遷移に伴う高温励起子生成を抑え、高密度極低温の励起子ガスのみを選択的に生成できることを示した [10]。これらの準備研究をもとに、結晶をサブケルビン領域に冷却した状態で励起子ガスを不均一歪みによるトラップ[11, 12]中に蓄積し、量子縮退領域に到達させることを狙った実験を進めている。

本研究では、この他ダイヤモンドの電子正孔系、共振器ポラリトン系、バルクポラリトン系などを対象として、極低温高密度の電子正孔系の物質層を探索し、多体量子物理学の深化をはかりたい。また、量子論的な凝縮状態と輻射場との結合についても調べ、新しい光制御の原理探索に役立てたい。

参考文献

- [1] 例えば "Bose-Einstein Condensation" edited by A. Griffin, D.W. Snoke and S. Stringari, Cambridge University Press, 1995.
- [2] M. Kuwata-Gonokami et al., J. Phys. Soc. Jpn. 73, 1065 (2004).
- [3] M. Kuwata-Gonokami, Solid State Commun. 134, 127 (2005).
- [4] M. Jorger et al., J. Lumin. 112, 21 (2005).
- [5] K. Karpinska et al., J. Lumin. 112, 17 (2005); Phys. Rev. B 72, 155201 (2005).
- [6] M. Kubouchi et al., Phys. Rev. Lett. 94, 016403 (2005).
- [7] T. Tayagaki et al., J. Phys. Soc. Jpn. 74, 1423 (2005).
- [8] T. Tayagaki et al., Phys. Rev. B 74, 245127 (2006).
- [9] K. Yoshioka et al., Phys. Rev. B, 76, 033204 (2007).
- [10] T. Ideguchi et al., Phys. Rev. Lett., 100, 233001 (2008).
- [11] D.P. Trauernicht et al., Phys. Rev. B, 34, 2561 (1986).
- [12] N. Naka and N. Nagasawa, Phys. Rev. B 65, 075209 (2002).
- [13] 最近の一連の成果のまとめとして以下をあげておく。

"Optical Manipulation of Excitonic Particles into a quantum degenerate regime", Quantum Coherence in Solid State Systems, International School of Physics "Enrico Fermi", Course CLXXI, Vol.171, IOS press, Amsterdam (2009).