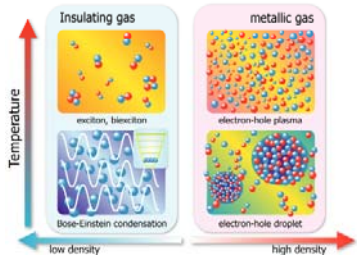


# 電子正孔・励起子量子凝縮相の光操作と制御

東京大学大学院工学系研究科 五神 真 吉岡 孝高  
 京都大学大学院理学研究科 中 暢子

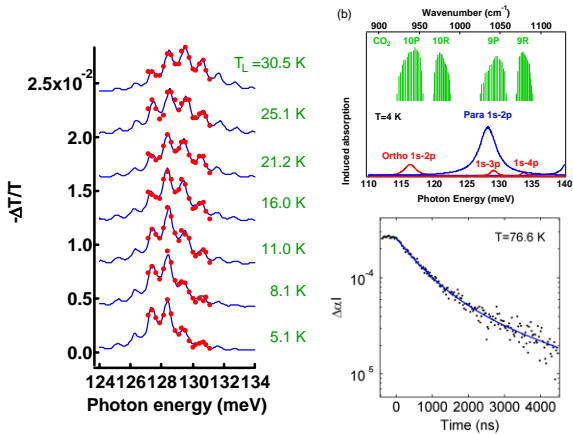


本研究では、亜酸化銅パラ励起子系のボース・アインシュタイン凝縮(BEC)相やダイヤモンド結晶中の電子正孔高密度相、励起子-光子結合(ポラリトン)系の量子凝縮、第一塩化銅の励起子ポラリトン系などを対象とし、励起子BEC相の解明という懸案解決をはかると共に、電子正孔系の量子多体系の多彩な物質相を精密に観測することを目的としている。

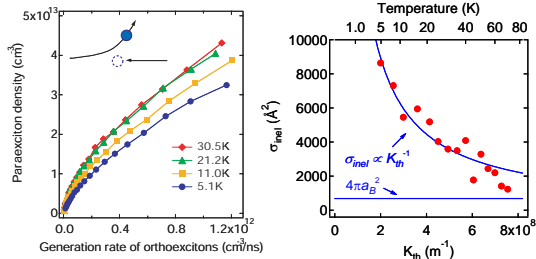
低温高密度電子正孔系の生成法と精密観測法を駆使した一連の研究のうち本講演では、中心課題である量子縮退パラ励起子系の探索およびダイヤモンド低温電子正孔系の生成について紹介する。

## 亜酸化銅パラ励起子系の精密分光とBEC相の探索

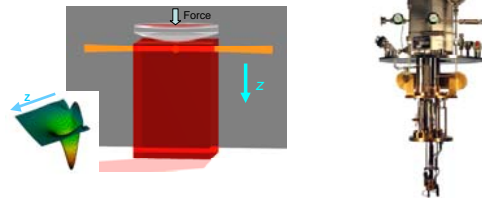
■  $\text{Cu}_2\text{O}$ における1sパラ励起子は純スピン三重項状態であり、輻射場と結合せず寿命が極めて長い。このため励起子ボース・アインシュタイン凝縮(BEC)実現の最有力候補として研究が続いているが、未だ確固たる証拠が得られていない。その原因の一つに、パラ励起子の寿命の長さの代償として、発光による定量的な観測が極めて難しいという点が挙げられる。そこで、これまでcwレーザーを用いて準定常状態に対する励起子ライマン分光法を確立し、パラ励起子の高感度な定量的測定を進めてきた。この手法により発光測定では従来測定できなかった低密度極限における寿命や有効質量を決定することに成功した。(K. Yoshioka et al., Phys. Rev. E **76**, 033204 (2007).)



■ 5桁のダイナミックレンジを有するこの分光法を用いて、パラ励起子密度の励起強度依存性を低密度極限から測定した。その結果、 $10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 以下と比較的低密度領域であっても、パラ励起子間の2体非弾性散乱ロスにより密度が飽和傾向にあることが分かった。飽和の遅い温度依存性から非弾性散乱断面積を抽出すると、極低温において発散型となる量子力学的散乱の傾向を示していることを初めて見出した。(K. Yoshioka et al., submitted.) 現在、伝導測定を組み合わせた実験により、この非弾性散乱の機構解明を進めている。



■ 得られた非弾性散乱断面積は巨大であり、従来BECの超流動ヘリウム温度2 Kにおける臨界密度と設定されてきた $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の密度では寿命が100 ps程しか確保できない。そこで、衝突の効果緩和される、より低密度領域において準定常状態のBECを実現するため、ヘリウム3冷凍機を用いて結晶をサブケルビン温度領域まで冷却した。その上で歪誘起トラップにより励起子ガスを3次元的に閉じ込め、パラ励起子の長い寿命を生かして蓄積することで高密度状態を実現した結果、臨界粒子数を超えた場合に理想ボース粒子から逸脱した異常な空間分解光スペクトルを初めて観測した。

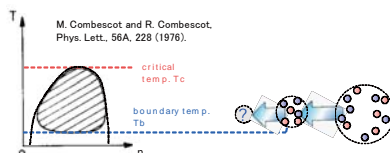
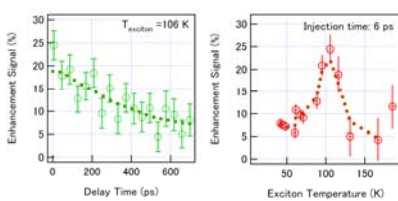
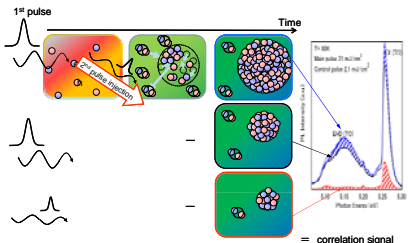


## ダイヤモンドにおける電子正孔系の低温相の探索

■ 間接型半導体の電子正孔系は低温では気相と液相に相分離液滴を形成することが良く知られている。しかし、相分離の臨界温度よりも十分低い温度になると有限寿命の効果により電子正孔液滴は不安定化することが1970年代に理論的に予測された。当時の研究対象であったシリコンやゲルマニウムでは臨界温度そのものが非常に低く、さらに低温の電子正孔系を実現することが困難であった。我々は、ダイヤモンドの臨界密度が165 Kと高いことから低温相の調査に最も適していると考え、低温領域での電子正孔液滴の安定性について調べた。

代表的な間接型半導体のパラメータ  
 Shimano et al., Phys. Rev. Lett. **88**, 057404 (2002)

	エネルギー・eV ギャップ, eV	EHDの束縛エネルギー, meV	臨界温度, K
ゲルマニウム	0.74	2	6.5
シリコン	1.16	8	25
ダイヤモンド	5.49	50	165



■ 多数の電子正孔液滴を生成するポンプ光の照射からピコ秒オーダーの遅延時間後にインジェクション光により少数の電子正孔を追加したときの液滴発光の増強を調べた。液滴形成が核形成過程によるものとするれば、この増強信号が強いほど液滴形成は安定である。増強信号の温度変化から、臨界温度以下の中低温領域で液滴は最も安定であり、低温になると不安定化することが明らかになった(J. Omachi et al., Journal of Physics C: Conference Series **148**, 012051 (2009).)

■ ダイヤモンドは大きなバンドギャップを持つため、電子正孔系を生成するために深紫外光または電子線照射による励起が行われてきた。この方法では励起光源からの熱流入により電子正孔が40 K程度に上昇してしまうことが報告されている。我々はダイヤモンドのバンド間二光子遷移過程を利用して格子温度とほぼ同じ有効温度を持つ低温の電子正孔系を作り出すことに成功した(N. Naka et al., physica status solidi (b) **245**, 2878 (2008).)。この方法で低密度の電子正孔系を励起すると、液滴発光と励起子発光の間のスペクトル領域に多数の鋭い発光線が観測された。これらの発光線はシリコンにおける多励起子状態からの発光に類似しており、ダイヤモンドにおいても多励起子状態が存在する可能性を示唆している。(鈴木理仁他、日本物理学会2009年秋季大会)

