

論文審査結果の要旨

氏名 中暢子

本論文は、結晶内部に作られた歪みトラップ中に 2 光子励起によって生成された励起子を閉じ込め、励起子系のボース凝縮相の観測に向けて分光学的な研究を行なったものである。

近年、磁気光学トラップ中の中性アルカリ原子におけるボース・アインシュタイン凝縮体 (BEC) の生成が実現し、超伝導や液体 He の超流動とならぶマクロな量子現象として基礎物理学的な観点から多大な関心を集めている。これに対して、固体における励起子もボース粒子であることから、以前から励起子系のボース凝縮相の可能性が議論されてきた。亜酸化銅 (Cu_2O) や GaAs 量子井戸中の励起子系などについて様々の試みと、その兆候を示す実験結果が報告されているが、いずれも決定的な説得力には欠けているという問題があった。本論文では、BEC を示すとされる実験が報告されて以来、その解釈を巡って議論が続いてきた亜酸化銅の励起子系をとりあげ、その決着に向けて歪みトラップ中の励起子系の特性を分光学的に詳細に調べ、その有効性を議論している。

本論文は 7 章からなる。第 1 章では、序論として亜酸化銅におけるボース凝縮相の観測に向けた過去の研究について解説している。第 2 章では基礎的な光学特性として、1 光子および 2 光子励起による励起子の「黄色発光」を高分解能発光分光によって調べ、試料の品質評価を行なった。第 3 章では 2 光子励起発光のスペクトルと励起スペクトル詳細に調べ、振動子強度の量量子数依存性を明らかにした。また超高分解能分光により発光過程と散乱過程 (2 倍高調波の発生) を分離観測することができた。以上の詳細な調査に基づき、周到な計画のもとに歪みトラップを利用した研究へと進んだ。

第 4 章では、結晶表面の外部からストレッサーを圧着して歪を発生することにより、固体中に励起子のトラップを作りだし、そこにおける励起子系の振舞いを調べた。2 光子共鳴励起によるオルソ励起子 (スピン一重項) の発光の空間分布を CCD 上に結像して可視化するという画期的な方法を提案し、極めて明快にトラップの形状 (等エネルギー面) を観測することに成功した。励起レーザーのビームを平面上で振ることにより任意の 2 次元面を切り出す手法を組み合わせ、3 次元的な診断が可能となった。結晶方位とストレッサーの形状 (球面または円筒面) を変える事により、単一トラップ、二重トラップなどができることを示した。更に弾性体における歪みと、歪による電子バンド構造の変化の詳細な数値計算を行ない、実験結果をほぼ完璧に定量的に再現した。これによりトラップ形状やポテンシャルのエネルギーを正確に見積る事が可能になった。これは励起子密度の議論に決定的になる分布体積の評価を高い精度で行う事を可能にした点で重要な成果である。

第 5 章では、このよく制御されたトラップを用いて、弱励起下における励起子の時間的空間的ダイナミクスを系統的に調べた。その結果、オルソ励起子の 2 光子励起下ではこれまで検出されなかったパラ励起子 (スピン三重項) からの発光が検出され、波数ゼロ付近のオルソ励起子からもパラ励起子が生成されることがわかった。さらにパラ励起子の寿命と拡散定数は、トラップへの捕獲に十分な大きさであることが分かった。トラップの縁に作られたオルソ励起子がトラップ底へ向かってドリフトする様子が実空間とスペクトル空間の双方において初めて観測された。

第 6 章では、強励起下で励起子の位相空間密度を上げてそのダイナミクスを調べた。2 光子励起発光スペクトル形状の解析からパラ励起子系の温度を見積ったところ、励起強度の増加に伴って 3K から 5K まで変化しており、密度に依存した熱化過程の存在が示された。パラ励起子に強い飽和が見られることから、パラ励起子の衝突が飽和の原因と考えられるが、これまで考えられていたオージェ・イオン化とは考えにくい証拠があり、衝突によってエネルギーを受取った励起子がトラップから逃げ去る過程が存在すると推定された。これは中性原子トラップにおける「蒸発冷却」に類似の過程と考えられ、冷却手法の一つとして重要な可能性を示すものである。

より深いトラップでは、パラ励起子のスペクトル幅が強励起下でも 3K 相当の低温に留まるとい興味深い現象が発見された。空間分布は密度が高いときほど狭くなるという結果が得られ、ボース統計性の現れと結論された。トラップの体積を考慮して推定された励起子密度と合わせると、位相空間密度は 0.1 以上と評価され、ボース凝縮相の出現に極めて近いレベルに至っていることが明確に示された。第 7 章はまとめである。

以上のように、この研究は Cu_2O の励起子系の特性を巧みに利用して、歪トラップと 2 光子励起を組み合わせる事によって高密度低温励起子系を生成する新しい手法と、これを空間的、エネルギー的に分解して評価する強力な手法も合わせて開発し、臨界条件に近い励起子系を実現することに成功したものであり、励起子系におけるボース凝縮相の探索と言う固体物理学上の重要問題について画期的な進展をもたらしたという点で、非常に高く評価される。また論文の構成は緻密で完成度も極めて高い。なお、論文提出後に、励起子がトラップ中心に凝縮したと思われる極めて興味深い実験結果を得たが、これは付録として収録されている。また本論文は、長澤信方教授（指導教官）および、河野俊介氏、蓮尾昌裕氏との共著論文の内容を含むが、ほとんど本人が独力で遂行したものと認められる。よって審査委員全員の一致により、提出された論文は「論文博士」の博士論文として十分であると認め、博士（理学）の学位を授与できると判断した。