

論文審査の結果の要旨

氏名 吉岡 孝高

本論文は、「スピン禁制励起子のボース・アインシュタイン凝縮転移 (Bose-Einstein condensation transition of spin-forbidden excitons)」と題した実験研究を 8 章からなる和文で記述したものである。第 1 章で序論として背景と本論文の目的・構成を述べ、第 2 章および 3 章で亜酸化銅励起子と励起子ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) についてレビューを行った。第 4 章で時間分解励起子 Lyman 分光法、第 5 章で連続波発振レーザーを用いた励起子 Lyman 分光法による基礎パラメータ評価実験、第 6 章でパラ励起子の衝突誘起緩和評価、第 7 章でサブケルビン領域における励起子 BEC 転移の観測実験について報告し、第 8 章でまとめと展望を述べた。

本研究では、まず、サブピコ秒時間分解励起子 Lyman 分光法を用いて、直接遷移型半導体亜酸化銅のオルソ励起子の $1s \cdot np$ 誘導吸収スペクトルを測定した。励起子 Lyman 分光法は、可視ポンプ光により生成された励起子の $1s$ 状態から np 状態への光学遷移を赤外プローブ光の誘導吸収として計測する分光法であり、 $1s$ 励起子が高次系列と比較して重い並進有効質量を持つことを利用し、 $1s$ 励起子の密度と熱分布を評価できる。異なる主量子数への吸収スペクトル間の相対スペクトル面積比から、 $1s$ 励起子の Bohr 半径 $a_B = 7.3 \pm 0.3 \text{ \AA}$ と $1s \cdot 2p$ 誘導双極子モーメント $|\mu_{1s-2p}| = 3.5 \pm 0.3 e \text{ \AA}$ を抽出した。(第 4 章)。

次に、連続波発振炭酸ガスレーザーをプローブ光源とする励起子 Lyman 分光法の構築を行い、希薄で熱平衡状態にあるパラ励起子の誘導吸収スペクトルを取得した。スペクトル形状の励起子温度依存性からパラ励起子の有効質量として $m_{1s\text{-para}} = (2.4 \pm 0.34)m_0$ 、(ただし m_0 は電子の静止質量) を決定した。さらに、希薄極限にあるパラ励起子のマイクロ秒に及ぶ寿命とその温度依存性を観測した。連続的なスペクトルを取得するためパルス発振量子カスケードレーザーによる励起子 Lyman 分光法の構築を行った (第 5 章)。

$1s$ オルソ励起子については、絶対発光量計測の結果から、励起子 Auger 過程と呼ばれる非常に大きな二体オルソ励起子間の衝突誘起励起子消失が観測されている。 $1s$ パラ励起子間の非弾性散乱の励起強度依存性を、散乱の効果が無視できる十分に希薄な励起子密度領域から系統的に取得した。3 次元拡散方程式を含む数値シミュレーションと比較し、オルソ励起子について報告されてきた値と同程度の非弾性散乱係数 $A = 3.7 \times 10^{-16} \text{ cm}^3/\text{ns}$ を見出し、誤差を $3 \times 10^{-16} \text{ cm}^3/\text{ns}$ と評価した。また、非弾性散乱係数が温度に依存せず、非弾性散乱断面積が発散することを確認し、s 波非弾性散乱の特徴に一致することを明らかにした。励起子の選択的生成の下で光伝導測定を行い、結晶内の欠陥準位がこれらの過程に重要な寄与を持つ可能性を明らかにした (第 6 章)。

前章の結果、超流動ヘリウム温度における BEC の達成は不可能であると判断し、無冷媒ヘリウム 3 冷凍機を用いてサブケルビン領域への亜酸化銅結晶の冷却と、不均一歪場によるパラ励起子の捕獲を行い、歪下で僅かに許容となるパラ励起子の空間分解発光ス

ペクトルの精密な測定及び解析を行った。パラ励起子の温度が0.8Kに到達し、トラップ形状から要求される BEC 臨界励起子数に到達したとき、高温パラ励起子成分の閾値的な出現を観測した。これは水素原子の BEC 転移においても議論された「緩和爆発」である可能性がある。励起子フォノン相互作用や寿命、トラップポテンシャル等、寄与するパラメータをすべて取り入れたモンテカルロシミュレーションを行い、全体の1%の励起子が凝縮体になっていると仮定すると、緩和爆発による熱的成分の急激な増加をうまく再現できることが分かった。(第7章)。

以上、本論文の内容は、直接遷移型半導体亜酸化銅のバルク結晶内に形成されるスピン禁制 1s パラ励起子の励起子 Lyman 分光法による基礎パラメータの評価を行い、その知見に基づいてサブケルビン領域において励起子ボース・アインシュタイン転移条件を達成し、凝縮体の発現により生じる緩和爆発と解釈可能な現象を初めてとらえたものであり、博士論文として十分評価に値すると判断される。

なお、本論文の研究内容は共同研究者らとの共同研究として行われたものであるが、測定系の開発、実験の計画と遂行、結果の解析など、研究の大部分は論文提出者が主体となって行ったものと判断される。

よって、論文審査委員会は全員一致で博士(理学)の学位を授与できると認めた。