

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2015～2016

課題番号：15H06131

研究課題名(和文) 励起子系ボース凝縮体の直接検出とダイナミクスの研究

研究課題名(英文) Direct detection of exciton Bose-Einstein Condensation and research on spatio-temporal dynamics

研究代表者

森田 悠介 (Morita, Yusuke)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教

研究者番号：60755693

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：光物性物理における数十年の懸案であった励起子ボースアインシュタイン凝縮について、実現、その性質についての解明を目指す実験を進めた。希釈冷凍機を用いた極低温実験において、励起子の1s-2p遷移を用いた誘導吸収測定(Lyman分光)を従来の発光測定と両立する系を実現した。両立した測定により、強励起時の励起子の空間分布の変化を取得すると共に強励起時の発光の特異な振る舞いを解析し、さらに従来凝縮体生成の障害になってきた非弾性散乱の散乱係数を測定した。また、吸収イメージングを用いた時間分解測定をすることに成功し、強励起時の励起子の空間ダイナミクスを得ることができるようになった。

研究成果の概要(英文)：We proceeded research on exciton Bose-Einstein condensation. Inelastic collisions between excitons are obstacle for the realization of exciton BEC. To create a stable condensate, we need to decrease the critical density. For this reason, we have been using a dilution refrigerator. We have developed excitonic Lyman spectroscopy for direct detection. The Lyman spectroscopy is based on detecting 1s-2p induced absorption of mid-infrared light. We have carefully constructed our setup that allows for introducing the mid-infrared probe light into the dilution refrigerator with minimal amount of excess heat. As a result, we have succeeded in conducting the Lyman absorption imaging and luminescence spectroscopy at the 100-mK temperature region. From absorption imaging, we deduced how density distribution of paraexcitons changes at the high density region. Furthermore, we conducted time-resolved Lyman absorption imaging to know dynamics of paraexcitons clouds.

研究分野：光物性物理

キーワード：光物性 励起子

## 1. 研究開始当初の背景

本研究テーマである Bose-Einstein condensate (BEC) については冷却原子系により実現されて以来現在に至るまで BEC-BCS クロスオーバーの発見等様々な広がりを見せ研究が盛んに行われている。さらなる BEC 研究のため、励起子系での研究が期待される。励起子系は 1960 年頃から BEC 転移の実現可能性が指摘されてきている。励起子系 BEC については冷却原子同様の超流動性を示すかどうかという議論などがあり、新規現象発見の可能性もある。冷却原子の凝縮体は基底状態のコヒーレンスを見ているのに対し、励起子系は本質的に固体の多体電子系における励起状態であり、励起状態のコヒーレンスを見ているという点で全く異なるからである。ところが実験としては様々な課題が存在し、先行研究で初めてボース凝縮体の傍証を得るまでは BEC 転移は実現されなかった。主な要因は励起子間の非弾性衝突であるとされている。非弾性衝突は高密度領域で系の温度を上昇させ、励起子の寿命を実効的に縮めてしまう。以前の実験では 2 K で密度  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  での転移を目指していたが、この領域では非弾性散乱による励起子の消滅レートが高いことが分かってきた。その解決策として、先行研究では 3He 冷凍機を用いて更に亜酸化銅励起子系を 800 mK まで冷やすことで、「緩和爆発」を観測し BEC 領域への到達を確認した。緩和爆発とは、歪誘起トラップ内の励起子数を増やしていく中で BEC 転移点を超えた際に高エネルギーの励起子の数が閾值的に増える現象を指す。BEC 転移点に到達すると基底状態の励起子密度が急速に上がり非弾性散乱のレートが上がるため、基底状態の外へ弾き出された高エネルギー成分の増加が観測されていると考えられている。この現象のため全体に占める凝縮体の割合は減少する。励起子系 BEC のオーダーパラメータに対する理解を深めるためには、生成された凝縮体を安定化させる必要がある。緩和爆発を回避するため、より温度を下げて転移密度を下げた状態で転移を迎えることを目標とし、希釈冷凍機を用いる実験が行われることとなった。この希釈冷凍機温度での励起子 BEC 実現に向けた実験は、現在申請者の研究室とドイツの研究室で行われている。無冷媒希釈冷凍機を用いた実験で、歪トラップ中の励起子は TA フォノンとの相互作用の活性化を受け、励起子温度が世界制定温度であるサブ 100 mK に到達するまで冷却されることが明らかになっている。トラップ深さ、トラップ周波数の最適化を進めるとともに空間分解発光スペクトルを精細かつ系統的に観測してきた。その結果、低温高密度励起子生成時に、発光強度の励起強度依存性が特異な振る舞いを示すことが明らかになっている。また極低温における発光プロセスについて理論的に考察し、輻射再

結合時に盲目的に無視されることの多い光子の運動量が、極低温領域では重要な寄与を持つことを指摘した。(図 1) 現在安定な BEC が形成されうる温度や励起子密度を実現できているものの、直接発光による励起子 BEC の観測が不可能であることを意味し、重要な結果である。

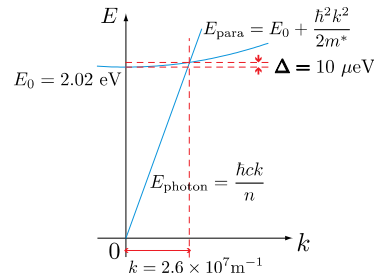


図 1. 励起子と光子の分散関係

## 2. 研究の目的

希釈冷凍機を用いて実現された前人未等の低温領域での励起子系において、長年の懸案であった励起子系ボースアインシュタイン凝縮の予測について実験的解決を目指す。そのためには凝縮体の直接検出が求められるため、従来の発光解析だけではなく、希釈冷凍機温度で励起子 1s-2p 遷移を用いた定量観測法である励起子 Lyman 分光法を完成させる。更に検出された凝縮体のコヒーレンスや動的性質、集団励起モードなどを知るために、発光の時間分解だけでなく Lyman 分光法も時間分解を試み、外場によって摂動を与える試みと組み合わせて実験を行っていく。固体の多体電子系に形成される有限寿命の光励起状態という固有の特性に起因して、励起子ボース凝縮体のオーダーパラメータの振る舞いは BEC 研究に新たな知見を与える可能性があると考えられる。そのため、冷却原子系などとの精密な比較を行い、この系独自の特徴を抽出することを目指す。

## 3. 研究の方法

希釈冷凍機温度での励起子 1s-2p 遷移に伴う誘導吸収分光(Lyman 分光)を実現する。Lyman 分光によって得られる励起子密度の空間分布から BEC の直接的検出が行える実験系を整える。その際に従来の想定による基礎的パラメータとの比較のもと実験を進めるために、発光測定と Lyman 分光測定を同時測定できる光学系を希釈冷凍機内に構築する。以前より蓄積されている時間積分発光解析のデータと Lyman 分光によって得られる性格な密度解析の比較から、高密度励起子生成時に重要な励起子間散乱断面積を求める。そして、励起子を高密度生成した際に現れた発光強度の特異な励起強度依存性についても解決する。さらに、Lyman 分光の時間分解発光を実現し、発光の時間分解測定との比較を進

める。

#### 4. 研究成果

Lyman 分光法の最適化・完成を実現し、凝縮体直接検出に必要なイメージングについても安定的にできることを示した。

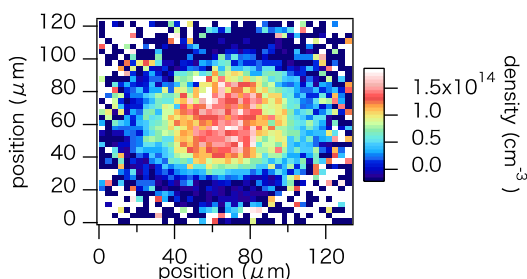


図 2: Lyman 分光によって得られた励起子空間分布

この際、発光測定の同時観測を可能としたことで、吸収分光を行っている際の励起子の寿命、また励起子の温度を測定できるようになった。

この結果、励起子温度として世界最低温である 100 mK 台を維持しつつ、Lyman 分光を実現できることを明らかにした。

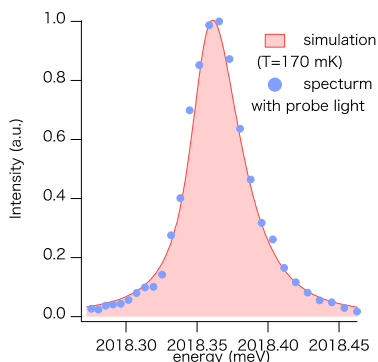


図 3: Lyman 分光に用いる中赤外光を入れた状態での励起子発光スペクトル

本分光法で測定に用いる probe 光の波長は中赤外領域に相当し、そのような波長を導入しての極低温実験を実現したことは、希釈冷凍機を用いた極低温実験の手法の可能性を広げたという意味でも大変重要な結果である。この同時測定に伴い、励起子の発光の特異な振る舞いの考察や非弾性散乱の散乱断面積の導出を進めることにも成功した。

また、予期せぬ形で寿命の短い場合の励起子温度の測定にも成功し、その到達温度が従来の温度より高く、励起子寿命と到達温度の関係を確認することができた。

さらには既の実験結果が蓄積された、発光の時間分解測定に関する解析を進め、空間的な緩和に関する基礎的なパラメータを抽出した。このパラメータをもとに、Lyman 分光に

よって得られる空間密度分布の結果についての妥当性を評価した。

妥当性の評価をもとに、BEC 転移が起こりうる高密度領域での励起子の空間分布変化を Lyman 分光により取得、解析を進めた。

最後に本研究で目標としていた、Lyman 分光を用いた時間分解測定を実現し、極低温高密度励起子下での励起子の空間的な緩和を測定することに成功した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 0 件)

[学会発表](計 5 件)

1. Y. Morita, K. Yoshioka, H. Suzuki, E. Chae and M. Kuwata-Gonokami: Lyman absorption imaging of quantum degenerate excitons in Cu<sub>2</sub>O, Fundamental optical processes in semiconductors 2017, Skamania Lodge, WA, USA (2017/08/31)

2. 森田悠介, 吉岡孝高, 五神真: 亜酸化銅中におけるサブセルピン 1s パラ励起子の中赤外誘導吸収イメージング, 日本物理学会第 72 回年次大会, 大阪大学 (2017/3/20)

3. Yusuke Morita, Hirosuke Suzuki, Kosuke Yoshioka, and Makoto Kuwata-Gonokami: Lyman induced absorption imaging of very cold excitons in cuprous oxide using a dilution refrigerator, ICSCE8 (8th International Conference on Spontaneous Coherence in Excitonic Systems), Edinburgh (2016/4/25)

4. Y. Morita, Lyman absorption imaging of quantum degenerate excitons in Cu<sub>2</sub>O, 12th US-Japan Seminar, "Many body quantum systems from quantum gases to metrology and information processing", Madison, Wisconsin, US (21, September, 2015) (poster).

5. Y. Morita, H. Suzuki, K. Yoshioka, M. Kuwata-Gonokami: Lyman spectroscopy of quantum degenerate excitons in Cu<sub>2</sub>O, Fundamental optical processes in semiconductors (FOPS2015), Double Tree Hotel, Breckenridge, USA (5, August, 2015) (poster).

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

森田 悠介 (Morita, Yusuke)  
東京大学・大学院理学系研究科・助教  
研究者番号：60755693

##### (2) 研究分担者

なし  
( )

研究者番号：

##### (3) 連携研究者

なし  
( )

研究者番号：

##### (4) 研究協力者

なし  
( )