

研究課題別中間評価結果

1. 研究課題名: 電子系の多体量子相関とその光制御機能

2. 研究代表者名: 五神 真 (東京大学 大学院工学系研究科 教授)

3. 研究概要:

ERATO 五神協同励起プロジェクトでは、「レーザー光を巧みにコントロールして光で物質系に集団の量子効果を発現させ、その物理学と応用の道筋を探る」という主題のもとで、原子系から半導体、有機化合物、遷移金属酸化物と非常に広い物質系に対して研究を進めた。本プログラムではその中で、凝縮系を対象とする研究を中心とし、光による固体中での多体量子現象の発現方法の探求と、それによる特異な光機能の研究をさらに進め、量子力学的多体相関効果の光科学・光技術分野への応用の道筋を明らかにすることを狙いとして進めている。尚、原子系による多体量子物理現象の研究が物質科学の基礎原理解明という視点から世界的に進展を見せていることを鑑み、これらの動向にも目を離さず検討を続けている。

本研究は、上記の狙いのもとに、量子縮退した電子正孔系の物理学と光制御機能、電子間相関及び協同励起現象を利用した光エレクトロニクス機能、中赤外領域から遠赤外領域にわたるパルス波による時間分解分光法と遠赤外パルスの制御法、磁氣的性質と光学応答の結合効果を利用した光制御機能の探求、ナノ空間における光波制御の研究を進め、ERATO の研究を発展させた。

では、レーザー光の性質を巧みに利用し、極低温で高密度の状態をパルス光による2光子励起法により瞬時に創り出す方法(位相空間圧縮法)を開拓し、ボース・アインシュタイン縮退した励起子分子の直接励起法として提案し、励起子分子波の量子干渉効果を実証すると共に、量子縮退した励起子分子波が高効率の量子相関光子対発生源として作用することを実証した。また、励起子ボース・アインシュタイン凝縮の可否を巡る議論が30年以上続いている亜酸化銅の励起子系に対して、励起子内部遷移を利用した励起子ライマン分光法を提案し実証した。位相空間密度の向上や励起子のコヒーレント制御の実験に成功している。では、光制御素子のための材料開拓を念頭に、有機光材料として有望な共役高分子系の光照射分子量制御とその微視的機構解明の実験を進めた。この基礎原理について、国内外の特許を申請した。また、通信波長帯のスイッチングデバイスの実現を念頭に Fe-O 系酸化物を対象とした研究を進めた。では、超伝導体のBCSギャップなどの多体量子相関に関係した様々な協同励起が存在すると考えられる、遠赤外から中赤外領域のパルス波を用いた定量的分光法の開拓を進めた。まず、中赤外領域のポンブプローブ分光の低温測定法を確立し、の励起子ライマン分光法に活用した。また、遠赤外領域の分光法として、電磁波の応答波形の直接計測における因果律を利用したトポグラフィー法を開拓した。

では、いわゆる強相関電子系におけるスピン自由度と電荷自由度の強い結合に着目し、光による磁化の高速制御に向けた研究を進めた。特に、スピントロニクス応用が注目される半導体系材料

を中心に、で開拓した中赤外ポンブプローブ分光法を活用し、磁性発現と磁気ポーラロンの相関を調べ、磁性発現の機構解明を進めた。また急峻な磁化変化に起因する電磁波発生を観測やテラヘルツ領域の電磁波制御機能の可能性について検討が進んでいる。は、本研究で進める物性研究を素子として応用するために必須となる、微小領域での光波操作の研究である。特に、直径数ミクロンのポリマー微小球のサイズをナノメートルの精度で揃え、その連結構造による光導波路を作成し、端点から入射した光が共鳴的に伝搬する様子を観測することに成功した。また単一光子光源への応用が期待される電荷移動錯体分子対を用いて、注意深くバックグラウンドの発光を除去することにより単一分子からの発光の検出に成功し、光子相関測定によるアンチバンチングの確認が進められている。

4. 中間評価結果

4 - 1. 研究の進捗状況と今後の見込み

ERATO における研究成果のなかから原子系のレーザー冷却を大胆に切り離し、固体系の光物性と量子光学に特化した戦略は、研究の深化と発展に結びつき、大いに成功していると考えられる。励起子系のボース・アインシュタイン凝縮、遠赤外領域の光制御機能、微小球による光波操作など多岐の研究を比較的小規模のグループで進め、それぞれ順調に研究が進展し、かなりの成果が得られている。特に、共鳴 2 光子吸収により亜酸化銅の低温励起子の高密度生成に成功したこと、その高効率パラメトリック増幅機能を実証したことなどは、長年にわたり固体光物性の大きな問題である励起子系のボース・アインシュタイン凝縮の実現に関して決着につながる成果として、極めて期待できる成果である。世界をリードするものとして高く評価する。また、微小球による光波操作においては微小球のサイズを極めて高精度に選別する独自の技術を開発し、8 連球の連結による共鳴モードの観測に成功したことは、将来の光通信システムの極限的な光子制御デバイスにつながる技術として期待できる。

その他、電子系の光制御機能として広範囲に展開している研究項目のそれぞれが収穫期を迎える段階にあり、今後の成果が見込める。多様な研究項目をどのような方向でまとめ、これをプロジェクト全体の成果にしていくかが重要である。

4 - 2. 研究成果の現状と今後の見込み

励起子ボース・アインシュタイン凝縮の研究において、共鳴吸収を用いた低温励起子の生成やそのコヒーレントな分極振動を利用したパラメトリック増幅、あるいは低温励起子のライマン系列スペクトルの観測や散乱過程の緻密な分析など、亜酸化銅の励起子の研究において画期的な成果を出し、励起子ボース・アインシュタイン凝縮の実現に向けて、あと一步の所に到達しており、着実な進展が認められる。今後の課題として、パラ励起子の長寿命化の成否が大きな鍵となると予想される。これは予定されている、無冷媒型クライオスタットの導入によるサブケルビン領域での実験等により大きな進展が期待できる。今後の2年間で、研究資源の重点投資によって実現して欲しい。

今後の発展が大きく見込まれるもう一つの成果は、微小球の大きさを非常に高い精度で選別す

る方法を開拓したことである。微小球は真球度が極めて高く、Q 値が格段に大きい。微小球の配列の工夫によって微小領域を自在に接続する光コネクタなど、将来の光通信システムに重要な光素子の開発につながる可能性がある。また、損失の極めて少ない光共振器中に束縛エネルギーの高い励起子を導入した共振器ポラリトンの利用によって、室温に近い温度でのコヒーレント現象の解明や応用が進展するのではないかと期待する。微小球を何個並べられるかは、大きさの選択の精度に依存するが、本プログラムで開発された方法を更に発展することによってこの問題が解決される見込みは十分にある。

4 - 3 . 総合的評価

励起子のボース・アインシュタイン凝縮の実証を中心とした光制御された励起状態の多電子相関の領域において、ERATO での蓄積を十分に生かした研究の進展が認められ、新しい現象の発見や理論の実証から応用技術に関する特許申請まで精力的に成果を出している。一方、やや総花的に見える成果を相互に関連づけ、全体として統一的な方向を明確にして行くことが重要である。基礎と応用面からの世界へのインパクトを、どのような形で成果として出すかも重要であろう。残りの研究期間を考えると、多くの研究課題を並列的に進めるのではなく、光と物質の相互作用に新領域を拓くという点で最も学術的価値の高い励起子系のボース・アインシュタイン凝縮と、今後の光通信システムへの応用の期待がもてる微小球の研究にウエイトを置くのが有効ではないかと判断する。

研究代表者は、本研究課題において、基礎から応用に亘って、深い造詣を有し、広い視野をもって研究を推進している。特に、励起子系のボース・アインシュタイン凝縮研究では世界のトップを走っている。この SORST プログラムにおいて、ERATO と比較して数分の一の研究体制で、強い指導力を発揮して高いプロダクティビティを達成していることを高く評価する。研究の絞込みと成果の統合化に関しては、今後のより強いリーダーシップに期待する。