

五神協同励起プロジェクト



総括責任者 五神 真

(東京大学 大学院工学系研究科 教授)

研究期間 1997年10月～2002年9月

レーザー光と物質の相互作用を巧みに利用すると、物質系のランダムな熱運動を取り去り、極低温の世界のように集団の量子現象が顕在化する状態が出現します。本プロジェクトでは、最新のレーザー技術を駆使して、光励起を経由してこのような物質相を創り出す方法を開拓すると共に、新しい物質相の物性と機能を探求しました。原子気体から半導体、有機化合物、遷移金属酸化物に至る広い物質系を対象とし理論実験両面から研究を進めました。アルカリ土類原子のスピン禁制遷移を利用したレーザー冷却法を開拓し、常温からわずか100ミリ秒で数百ナノケルビンの極低温の原子気体を得る技術確立しました。また、半導体における電子正孔系の多体量子相関による光制御機能の解明、電子正孔凝縮相の実現、モット絶縁体である一次元銅酸化物系の巨大非線形光学効果の発見などの成果が得られました。これらは多体系の量子物理学と次世代の光技術の両面にとってブレークスルーにつながるものと期待されます。

成果

全光学的手法による縮退原子ガスの生成法の開拓

今までに実現された縮退原子ガスを生成する方法と違い、冷却過程を全て光学的手法とすることで桁違いに急速に高密度極低温原子ガスを得る方法を開拓している。ストロンチウム原子を対象にして、現在までに(1)スピン禁制遷移を第2段階冷却として採用して数百ナノケルビンの温度領域まで冷却できたこと、(2)光双極子トラップを採用し位相空間密度として0.2まで高密度化できたこと、など我々独自の高速冷却高密度化手法の開拓に成功している。ストロンチウム原子にはボース粒子の他にフェルミ粒子の同位体があり、これをトラップして1マイクロケルビンまで冷却することにも成功している。

ペロブスカイト型銅酸化物における超高速非線形光学応答

強相関電子材料と呼ばれる物質群の中で絶縁体となる物質系の非線形光学応答に注目している。これらの物質はバンドは充満していないが、電子正孔系が電子間相互作用により金属状態をとらずに絶縁体となっているものであり、「協同励起」が基底状態で実現しているものと見なすことができる。これまでの研究で、高温超伝導を示す銅酸化物の関連物質である、擬一次元一重鎖系 Sr_2CuO_3 が非線形光学材料としても有望であることが明らかとなってきた。即ちこの材料を全光スイッチに応用すると、室温・光通信波長帯域で 10 テラビット/秒の速度を達成できる可能性があることが見出された。また、擬一次元二重鎖系 SrCuO_2 、擬二次元系 $\text{Sr}_2\text{CuO}_2\text{Cl}_2$ を調べ、次元性の違いが光学応答に決定的な影響を与えていることを明らかにした。

コヒーレントな励起子分子による光の増幅

フェムト秒パルスによる 2 光子遷移過程でのエネルギーと運動量の保存則を通じて、励起パルスのポアソン縮重度を増倍して非常に縮重度の高い励起子分子を作ることができることを提案した。この励起子分子波は非常にコヒーレンスのよい波として振る舞い、2 つの波の干渉実験が実証された。また縮重度の高い励起子分子波は光との相互作用において高効率なパラメトリック増幅効果を示すことも示され、強いスキューズド光の発生に応用できることを提案した。

ラムディック領域にある中性原子のリコイルフリー分光

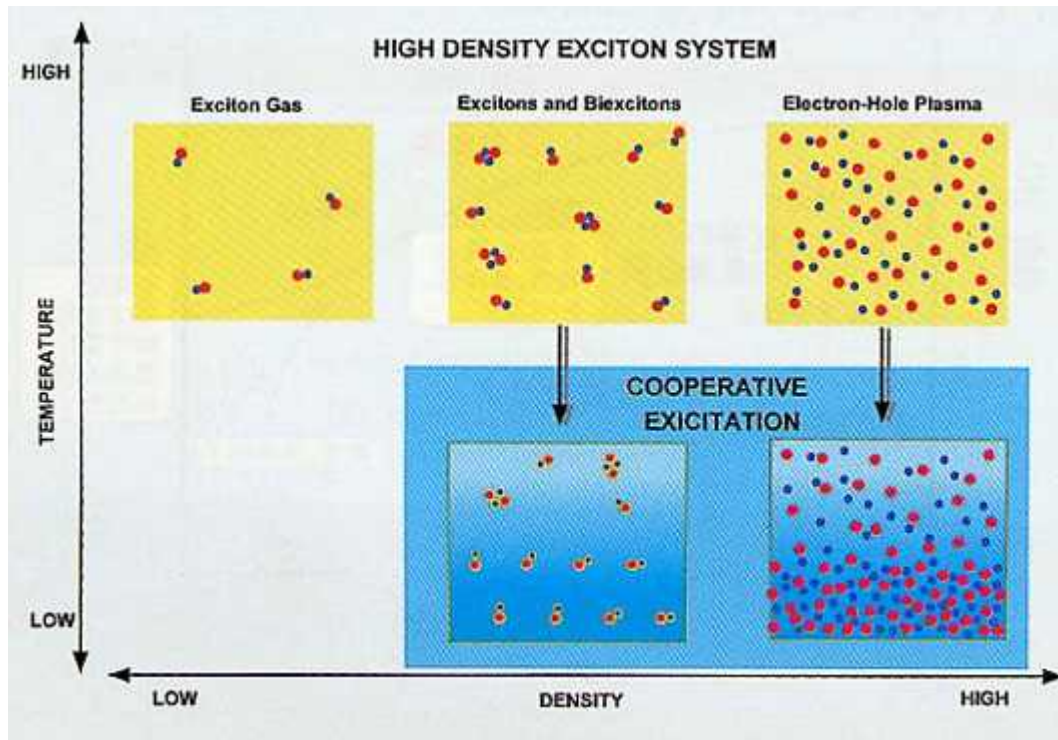
光シュタルクシフトフリーな光双極子ポテンシャルを用いて原子を光学遷移の波長以下の狭い領域にトラップし並進運動の自由度を凍結し、ドップラーシフトのない分光を行うことに成功し、kHz スケールの精密周波数計測を実証した。これはストロンチウムを用いた新しい周波数標準の可能性を示す成果である。

励起子非線形性の微視的理論

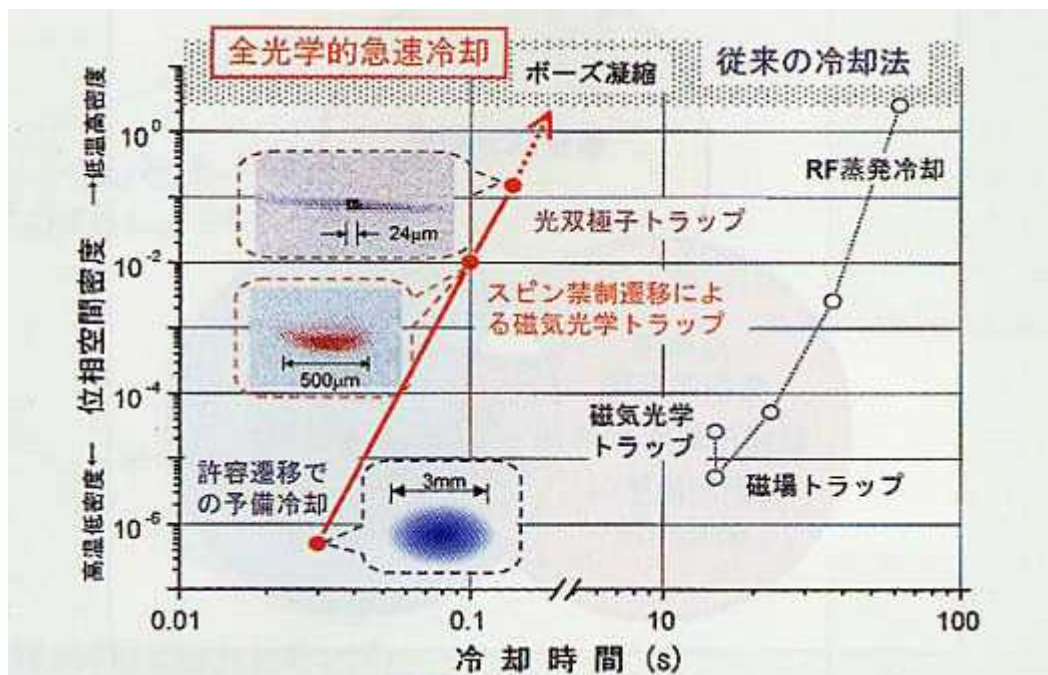
電子正孔状態を出発点とする微視的モデルに基づく第一原理的計算の方法を開拓し、励起子共鳴での非線形光学応答を励起子散乱として記述した。実験との比較において、2 次元系のクーロン散乱問題の特徴である発散の問題を指摘し、第 2 ボルン近似の破綻を示し、散乱行列を数値対角化することで解決した。

励起子モット転移による直接遷移型半導体における電子正孔液滴の観測

励起子をモット転移密度以上に高密度励起すると、高密度でかつ低温の電子正孔が生成できることを提案し、フェムト秒パルス励起の実験を行った。中赤外光のプローブを用いて電子正孔集団の挙動を時間分解分光する方法を提案し、電子正孔系が凝縮して液滴を形成することを発見した。これは従来の準熱平衡過程では実現不可能とされていた、直接遷移型半導体の電子正孔液滴を光で形成させたものである。



▲上図は励起子の密度増加に伴う系の状態変化を示す。低密度では孤立の励起子系で、非常に高密度ではプラズマが液滴になる。適当な密度かつ低温で協同励起状態が現れる事を示す。



▲上図は本プロジェクトにおいて開発された全光学的操作による冷却法を従来の磁場トラップ中での蒸発冷却と冷却時間で比べており、前者は2桁以上の冷却時間の改善がみられ急速冷却であることがわかる。点線で囲まれた図は、それぞれの段階での原子集団の様子の変化を模式的にあらわしている。

研究成果

- [研究成果ビデオ](#)
<https://www.jst.go.jp/erato/research/old.html>
- [研究成果集](#)
https://www.jst.go.jp/erato/research_area/completed/gkr_pj/results_1997-2002_gonokami.pdf
- [論文リスト](#)
https://www.jst.go.jp/erato/research_area/completed/gkr_pj/publications_1997-2002_gonokami.pdf