

五神協同励起プロジェクト中間評価報告書

総括責任者：五神 真(東京大学大学院工学系研究科 教授)

研究体制： 協同励起基礎グループ 研究員 香取秀俊 他 2 名
協同励起応用グループ 研究員 大川和宏 他 4 名
理論設計グループ 研究員 Peyghambarian Nasser 他 4 名

評価委員： 井筒雅之 総務省通信総合研究所 室長
小林功郎 日本電気(株)ラボラトリーズ 支配人
覧具博義 東京農工大学工学部 教授
矢島達夫 東京大学 名誉教授

1. 研究の進捗状況と今後の見込み

1.1. 研究構想とその具体化状況

このプロジェクトは次のような基本構想に基づいて計画された。最新のレーザー技術を駆使し、光励起過程を通じて自然には存在しない物質の新しい状態、即ち原子・電子等が協同的に強く相互作用して集団として特異な性質、特に量子現象を示す状態をつくり出す。このような状態の生成・操作の方法と物理的性質を気体から固体に渡る広い物質群について研究し、更にこれによって新しい機能を発現させ、光エレクトロニクスなどの技術的応用の新展開を図ろうとするものである。

具体的な主要研究課題として、(1)高密度極低温の原子集団を生成し、集団としての量子現象である量子縮退を実現し、更にその技術的応用を図ること、(2)固体の励起子系や高密度電子正孔系の協同励起現象の探索、(3)高効率の非線形光学材料の探索とその工学的応用、(4)協同励起材料としての高品質 GaN 系結晶の作成、(5)非平衡でかつ強く相互作用する多数粒子系の物性の理論的解明と、それに基づく機能の設計理論の開発、などが上げられている。これらは相互の連携のもとに系統的に新しい科学技術の展開を目指したもので、魅力ある計画といえる。

この構想の具体化のための()協同励起基礎グループ、()協同励起応用グループ、()理論設計グループの3つのグループ分けも適切で、それらは更に幾つかのチームに分かれて研究が実行されている。研究場所は、(a)神奈川サイエンスパーク(KSP)、(b)東京理科大学、(c)東京大学本郷地区、(d)米国アリゾナ大学光科学センターの4箇所に分散されているが、研究テーマと人材の多様性を考えると妥当なところであろう。()グループは(a)、(c)、()グループは(a)、(b)、(c)、()グループは(d)を拠点とし

て活発な研究を行っている。

このプロジェクトで手がける課題は、物質・手法その他いろいろの面で極めて多彩であり、一般的にはもっと対象を絞ってはどうかという意見が出るころであろう。また、実際の研究の展開は必ずしも当初の計画通りの内容とバランスにはなっていないようにも見える。しかし、独創的な科学技術の展開を目的とする ERATO 事業の趣旨からいえば、これらのことは抑制されるべきではなく、プロジェクトの中核となるキーワード「協同励起」をめぐって様々な観点から自由に研究を展開し、予想を超える発展がなされることを期待したいところである。

1.2. 未踏の課題への挑戦状況

それぞれの研究テーマがある意味ではすべて未踏の課題といえるが、特に以下の点が注目される。

原子のレーザー冷却研究は、ボース・アインシュタイン凝縮や原子レーザーの実現によって現在世界的な関心が集まっている。しかし、本プロジェクトでは他の研究グループとは違った手法と狙いをもって全光学的手法による量子縮退を目指している。これはまだどこでも実現していないが、成功すれば生成の速さ、適用原子範囲の広さ、強力な原子波ビームが得られるなどの点で画期的であり、物理的にも応用上も極めて意義深いものである。

また、協同効果あるいは協同励起を基盤にした新しい固体の光学材料の開発が理論・実験の両面から多岐に渡って繰り広げられているが、これも新しい世界を開くものといえる。従来の光学材料ではある法則に沿った性能しか期待できず、その限界を破ることができないからである。

1.3. 研究者の参集状況

実験グループには、非常に優れたグループリーダーが当初から起用され、その下に研究の実行に必要な研究員と技術員がバランスよく配置され、大学院生の協力もあって、効率的な研究が進行中と判断される。非常勤の工作要員や装置メンテナンス要員なども配置され、研究支援態勢が充実しているのもこのプロジェクトの特色である。また、後継研究者や学生の教育にも適切な配慮がなされていると思われる。ただし、取り上げる研究課題の範囲や規模から見て、マンパワーの不足も感じられる。これは、日本におけるプロジェクト研究一般に見られる傾向でもあるが、一考を要するところであろう。

理論グループの主体は外国にあるが、数名の適切なシニアアドバイザーの指導の下にポスドク研究員（主として外国人）が活動している。そして日本の実験グループと密接な協同的連携が行われ、このプロジェクトの活動を国際レベルに保ち、国際的な情報収集や成果の波及効果のためにも有効な役割を果たしていると思われる。

1.4. 施設・設備の整備状況

基礎グループの中心拠点である KSP 研究室では、気体のレーザー冷却関係の主要な設備が早くから整えられ、活発な研究が展開されている。レーザーから計測に至るまで独自の設計による開発的装置が多く目に付く。このことを可能にしているのは、実験室に隣接した機械工作および電子回路工作設備が充実し、これが有効に機能しているためである。これは市販装置の組合せや外注品では困難な独創的実験研究の遂行のために重要なことである。これも研究支援態勢が整っていることの一つの現れといえよう。

応用グループの主要設備である多機能で高性能の窒化ガリウム系結晶作成装置も東京理科大にて設置され、その整備が終了して活動が開始されている。

1.5. 今後の見込み

基本態勢が整って研究が順調に進行していると思われ、今後は個々の研究を更に強力に推進すると共に、各チーム、各グループ間の更に進んだ有機的な連携による相乗効果によって実りある成果が期待される。

2. 研究成果の現状と今後の見込み

2.1. 協同励起基礎グループ

原子のレーザー冷却研究では、ストロンチウムを用いる新しいタイプの実験がその困難さにも関わらず早くから立ち上がって目覚ましい成果が得られている。スピン禁制遷移の利用、2段階レーザー冷却・トラップの使用、光双極子トラップとドップラー冷却との併用などによって、既に 400 nK の低温、 10^{12} cm^{-3} の高密度が得られ、位相空間密度は約 0.2 に達している。これは全光学的手法による従来の結果より 3 桁も進んだ成果で、ボース凝縮まであと一息というところに至っている。この実験に必要な半導体レーザーの高度なスペクトル制御法の開発も副次的とはいえ注目すべき成果である。以上のボース同位体の他に、フェルミ同位体についてもフェルミ縮退を目指した試みが進行中で、既に濃縮実験が行われた。これらが目指す量子縮退は近いうち実現するものと思われるが、これと平行して、数々の特徴を備えたこの新しい冷却原子の応用を推進することが期待される。

以上と相補的な課題として、固体の励起子系や電子正孔系の協同励起に関する研究にも成果が見られる。弱く相互作用する励起子系の非線形光学理論の構築、モット転移による電子正孔プラズマの生成実験、縮退励起子分子の生成と干渉実験などである。今後、原子系と固体系の協同励起現象のつながりを明らかにして、二つのアプローチを同時に進めることの有効性を示すことが重要な課題であろう。これに役立てる研究の一環として、励起子の相互作用エネルギーを定量的に評価する実験が既に行われている。

2.2. 協同励起応用グループ

窒化ガリウム系半導体は青色系光源材料として極めて注目されているが、その物性や結晶成長についてはまだ科学的に解明されていない面が多い。このプロジェクトで、これを

協同励起に適した材料として取り上げて研究を推進することは興味深い。先ずその高品質結晶の作成をめざして自由度の高いリアクターをもつ有機金属気相エピタキシ装置 (MOVPE) が導入され、その整備が終了して実験・シミュレーションの両面から最適化を行う試みが進行している。その結果、結晶成長速度を支配する種々のパラメータが明らかにされ、制御すべき成長パラメータの選択が重要との認識を得た。また、低温バッファ層なしの結晶成長を行って先ずよい表面を得るための最適化を行うというアプローチも評価できる。現在、日本にあるトップレベルの結晶に近いものが実現されているが、この目標にこだわるのはあまり好ましくなく、むしろ協同励起用の観点から必要な品質を設定し、これを目標とするのがよからう。今後は最適化の精密化と共に更に高品質化が進行し、この材料を用いた高密度低温電子正孔系などの協同励起の実験が行われて、新しい機能が見いだされることを期待したい。

次に、光学材料として新しい強相関電子系の非線形光学応答の実験研究がある。低次元モット絶縁体であるペロブスカイト型銅酸化物では 1 次元系と 2 次元系の違いが明らかにされ、1 次元系では通常の絶縁体より桁違いに強い 2 光子吸収や 1 ps の超高速緩和時間が見いだされた。これは今後超高速全光スイッチ用材料として大いに期待されるものである。また、強磁性体である鉄モリブデン酸化物では、光磁気カー効果の実験で超高速スピンドYNAMICKS が調べられ、非平衡スピン緩和現象が明らかにされた。これも高速光メモリーへの応用が期待されている。これらの強相関電子系の振る舞いは光誘起ではなく物質自体が備える協同現象を反映するものであるが、これは協同励起の主題を拡張した課題と考えられ、また、今後の光誘起協同効果への発展の布石になるものとも見なされる。

その他、非線形媒質の有効な応用を目指す微小共振器の研究や、協同効果の新しい対象として興味ある有機分子の電荷移動錯体に関する研究もこのグループで行われ、見るべき成果が上げられている。

2.3. 理論設計グループ

量子井戸半導体の非線形光学応答の微視的理論、線形鎖銅酸化物の巨大非線形性に関する理論、PPV 型共役高分子の非線形吸収の理論、遷移金属酸化物 (強誘電・反強磁性マンガ酸化物、ペロブスカイト銅酸化物) の線形・非線形光学応答の理論などの構築が行われた。これらは、いずれも協同効果の著しい新しい光学材料の物理的性質を理論面から解明しようとしたもので、実験結果の説明や実験グループへの指針として有効な働きをしている。

これらの成果はこれまでの 3 年間に 26 編の英文論文、42 件の国際会議報告として発表されており、その中に多くの一流国際学術誌の論文や招待講演を含んでいる。このことは研究の活発さと研究成果のレベルの高さを示すものといえよう。

3. 結語およびコメント

以上の状況から見ると、個々のテーマについては注目すべき成果や進行が多く見られ、中間時点としては十分に順調な発展をしていると評価できる。「主題を土台としても、それに捕らわれずに自由に展開する」という ERATO の趣旨が大いに生かされて、今後更に独創的な発展を遂げることを期待したい。一方、このプロジェクトが抱える課題の広さを考えると、成り行き次第では「協同励起」の枠組みを逸脱する可能性もないとはいえない。自由な展開と、主題の方向に連携し凝縮する作用とのバランスをうまくとることが、今後このプロジェクトを更に実りあるものにするために重要であろう。

なお、一般的なコメントとして以下のことを述べたい。5年間という限定された期間の中で、新たな施設、研究支援態勢の立ち上げと研究者の集結を行い、かつ国際的トップレベルの研究を実施するというのは、研究者にとって極めて負担が大きく、研究効率の点では疑問がある。恒常的な施設と研究支援態勢を何らかの方法で確保し、これを期限付きプロジェクトが入れ替わり活用するなど、研究体制の合理化を検討する余地があるように思われる。

以 上