

領域略称名：動的相関光科学  
領域番号：2003

平成25年度科学研究費補助金「新学術領域研究  
(研究領域提案型)」に係る事後評価報告書

「半導体における動的相関電子系の光科学」

(領域設定期間)

平成20年度～平成24年度

平成25年 6月

領域代表者 (東京大学・大学院理学系研究科・教授・五神真)

# 目 次

1. 研究領域の目的及び概要	3
2. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況	5
3. 研究領域の設定目的の達成度	7
4. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況	10
5. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況	11
6. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	12
7. 総括班評価者による評価	13
8. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	16
9. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	19
10. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度	24

## 1. 研究領域の目的及び概要（2 ページ程度）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、これまでの研究成果を進展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

### 研究領域の概要

レーザー技術の革新とナノテクノロジーや新物質開拓による物質科学の発展により、光と物質の科学技術は近年大きな展開を示しており、その一層の深化を図りその潜在力をさらに引き出す好機となっている。本研究領域では、先端レーザー分光技術、量子多体物理学の学理の進歩を背景として、未利用な物質の光効果・現象を探求し、その活用に向けた道筋を創ることを目的としている。このため、理論および実験物理・工学・材料化学など異なる学問分野において散在する最新の学術知識と研究者の融合連携を図り、その体系的整理と深化を進め、既存の技術の壁を破る原理を探求する。特に、半導体中の光励起状態として生じる多数の電子と正孔の相関効果である動的電子相関効果に主眼を置き、既存の半導体エレクトロニクスの基礎学理である一電子バンド理論の適用限界を明確にしつつ、この相関効果がもたらす特異な光効果・現象を引き出し、それを発現させるための物質科学—物質探索やナノ構造制御—の推進をはかる。動的相関電子系の学理を確立し、新規な光の科学と活用技術を創出し応用の道筋を探る。

### 研究目的及び全体構想

#### ① 研究の社会的・学術的背景

発光ダイオードや半導体レーザーなどの半導体を用いた光素子は、現代の我々の生活に深く浸透している。これら光素子の基礎である半導体エレクトロニクスは成熟期にある。これらの基礎原理は、前世紀半ばに完成したバンド理論によっている。バンド理論は本来複雑な多数の電子系の運動を一電子問題に帰着させ、少数の物質パラメータによるデバイス設計を可能にした。これは、エレクトロニクスを工学として発展させた立役者である。しかし一方で、ナノ構造素子や低次元人工構造などで、キャリア間の相関が直接顔をだすことも明らかになってきた。これらは、既存の光エレクトロニクスの限界を突破する革新技术創出の鍵を示唆している。革新技术としては、「Shockley-Queisser 限界を超える高効率太陽電池」「シリコンを光らせる」「摂動域を超える光非線形性」「高速かつ高効率の光スイッチング」「しきい値ゼロのレーザー」「ショットノイズレベル以下の低雑音光源」「単一光子源」「量子情報処理・通信」などがある。これらの実現には、バンド理論を越えた多電子系としての効果を捉え、引き出すことが必要である。このためには、半導体という極めて制御性のよい優れた材料をさらに深く使い込むことと新物質系の利用を広げ、多体相関電子系に特有の光効果・現象を発現させ、それを活用する道筋を探ることが必要となっている。このような光と物質の科学を深化させることは、人類社会が抱えるエネルギー枯渇や環境保全といった地球規模の課題の解決にとって重要な役割を果たすはずである。

#### ② 提案者の研究成果・背景と提案の経緯

本領域の提案メンバーは物質と光の相互作用について、基礎物理、工学、材料化学の分野において長年研究を積み上げて来た。例えば、励起子・励起子分子・荷電励起子などの電子励起状態の電子構造解明、あるいは、電子正孔プラズマやその凝縮状態としての電子正孔液滴、それらの相転移やクロスオーバー、さらには、励起子ボーズ・アインシュタイン凝縮 (BEC)・電子正孔 BCS 状態 (BCS 超伝導と同種の状態)、整数分数量子ホール系などのマクロな量子系についての基礎的な研究を、半導体材料を中心に進めてきた。これと並行して、これらの素励起が関わる超高速光非線形光学効果、低次元半導体レーザーの利得機構といった応用技術につながる現象についても実績を上げてきた。これらの研究において、光励起された電子—正孔系のキャリア間の動的電子相関効果の重要性を指摘してきた。近年注目を集めている「強相関電子系」も電子系の強い相関効果・多体効果が本質的であり本課題と関わりが深い。旧来の研究対象は主に基底状態近傍であり、超伝導のような輸送性質や磁性などの物理現象に対し、実験的および理論計算的な研究手法開発が中心課題であった。基底状態近傍の電子相関を詳細に調べることは、多体量子系の現象を正しく捉えそれを記述するという観点において王道であるが、一方で、そのような現象を発現させる物質系を支配しているエネルギースケールは eV 以上の大きなものであることも事実である。本領域参加メンバーはこれらの物質の光学応答に着目し、大きなエネルギースケールの現象に直接切り込み、その本質に直裁に迫る研究を開始している。近年注目を集めている「光誘起相転移」はその好例で、光による電子

励起がトリガーとなって物質全体の相が変化するものである。これは本領域に含まれるものであるが、従来は、格子系やスピン系などの自由度との結合を介した相転移が中心であり、多体電子系そのものが創り出す状態を動的に捉えるという観点での研究例は少ない。そこで、我々は、理工学工学の枠を超えて物理、工学、材料化学といった幅広い分野にまたがる連携によりこの課題にも組織的に取り組み、動的相関電子系の学理をより広い視点でとらえ、幅広い分野の人々にその重要性を伝えていきたいと考えた。

### ③ 研究期間内に何をどこまで明らかにしようとするのか。該当する新学術領域のポイントなど

本領域では、分光学・量子光学、半導体デバイス工学、ナノ材料化学の3の分野と、光と半導体の物理実験と理論を連携させた学際共同研究により、動的相関電子系における新規な光効果・現象を組織的に研究し、その学理を確立し、新しい光の科学と活用技術を創出することを目指す。

分光学・量子光学との連携 (A01)では、冷却原子系の量子凝縮や光周波数標準研究の分野で近年急速に発展した精緻なレーザー分光技術とその概念を、半導体の励起子系で展開する。これにより、励起子系の自発的量子凝縮を世界にさきがけて実現し、動的電子相関効果の本質を引き出す。また、量子光学研究との密接な連携をはかり、物質系のコヒーレンスと輻射場の相関の量子光学効果を探求し、ナンバーステートの発生など新たな光量子機能発現の道筋を探る。

半導体デバイス工学との連携 (A02)では、豊富な技術蓄積を背景として、クリーンな低次元ナノ構造成長と精緻なデバイスプロセスにより高度かつ高品質な半導体光デバイスを作製し、ゼロから金属的な高密度域に至るキャリア密度制御、量子閉じ込め、外場、温度依存性などに応じて、動的電子相関効果が光学応答や光機能にどう反映し活用可能かを系統的・定量的に調べ上げる。

ナノ材料化学との連携 (A03)では、様々な化学的手法によって得られる多彩多様な半導体ナノ材料および微粒子系に対して、時空間ダイナミクスを計測する分光手法を新たに開発適用することで、特異的あるいは普遍的な動的電子相関効果の発現と機能性を発見し解明する。

量子多体系理論と実験の連携 (A04)では、動的相関電子系をミクロに記述する新しい理論体系や計算手法の構築を行い、上記の様々な材料や手法の実験において得られる実験結果と比較検討する。系統的な理解・解釈を得て、全体として学理に纏め上げ、新現象・新機能の予測を行う。

これらに加えて、(A01-04)の物理・工学・材料化学の各分野で特に発展している研究手法、例えば、材料の開発・加工・評価手法、設計・数値計算法、冷却・外場印加、狭帯域精密分光・顕微分光・時間分解分光・中～遠赤外分光など、研究手段の面での連携も重視して進める。本計画では、異なる学問領域で異なる手法を武器に活躍する強力な中堅研究者を核として領域を形成し、そこに若手研究者・学生を有機的に連携させ、それぞれの視点や手法をぶつけ合いながら共同研究と人材育成ができるようにする。個々の研究成果と共に、それらを集約した半導体動的相関電子系の学理を創出し、新しい光科学や光技術の基礎とする。共通の学理・基礎を、物理、工学、材料化学の各分野に帰還・浸透させることにより、更なる発展・展開を期待する。

### ④ 本領域の発展がどのように学術水準の向上・強化につながるか

本研究の対象である光励起状態の動的電子相関効果は、物理・工学・材料化学などの分野において、断片的な議論は行われ始めている。しかし、同じ現象や効果が分野ごとに違う言葉で語られ、さらには電子相関が「多体効果」という名のブラックボックスにしまい込まれており、その本質の系統的理解は手つかずの状態である。本領域の研究の発展により、動的相関電子系の学理形成と異分野間交流が進めば、物質の光効果について、一電子バンド理論を越えたレベルでの共通した考え方、基礎、手法などが形成される。分野間を超えて統一的に理解され、共通の言葉で語れるようになり、先端学理と技術の共有化が分野を超えて進み、関連する分野全体の学術研究水準の向上・強化がはかれる。また、eV オーダーの大きなスケールでの議論は、基底状態近傍での物性物理学にも新たなインパクトを与える。さらには、全く新しい融合的学術や新しい産業が興る可能性もある。半導体の高い制御性のさらなる活用を進める一方でそれを補う物質の開拓にも寄与できる。これにより、未利用の光効果を利用可能なものとし、太陽光エネルギーの活用など地球持続に向けた人類社会の課題解決にも寄与できる。

## 2. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況（2 ページ程度）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、どのように研究組織間の連携や計画研究と公募研究の調和を図ってきたか、図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

本領域では図 1 よび図 2 示す様に、A01-04 の 4 研究項目（A01 分光学・量子光学、A02 半導体デバイス工学、A03 ナノ材料化学、A04 量子多体系理論）の学術融合による新学術領域の創成を目指した。その実現のため、表 1 に示す様に、各研究項目毎に 2 または 3 の計画研究を配置し、前後半合計 45 の公募研究を含んだ領域を組織した。中心的なコンセプトとして、動的相関電子系を表す **DYCE (Dynamically correlated electrons)** という標語と、領域ロゴマークを掲げ、組織的研究を推進した。

領域としての調和と連携を図るため、総括班が主導して、公開シンポジウム 7 回、国際ワークショップ 2 回、他領域との合同シンポジウム 1 回、一般向け公開フォーラム 1 回、学生・若手研究者の育成および基礎に立ち戻った検討を目的とした **DYCE 若手道場 3 回**、**DYCE 理論ワークショップ 1 回**をいずれも一般に公開で開催した。このほか、研究討論会・研究戦略会議を多数開催した。領域ホームページを開設し、特に「**DYCE の若手紹介**」のページを設け、成果公表・連携促進のための広報活動に役立てた。名簿を含むニュースレター・広報冊子を 19 回発行し、領域内部および関係者に配布した。領域メンバーを中心に約 40 名の各専門家に、重要テーマの直近の研究動向や問題点を含む解説論文を執筆依頼し、それらを **DYCE 解説論文集**として編集した。本領域の連携研究のテキストとして活用するとともに、学理形成実現を達成するための基礎とした。総括班メンバーが中心になって、日本物理学会および応用物理学会シンポジウムの企画を行い、領域活動や領域発の学理の、オールジャパンへの展開を図った。

総括班 X01 のリーダーシップにより、各研究項目にまたがる領域横断の連携研究の重点的に推進した。特に、動的相関電子系の物質相、量子情報、多電子過程と光機能、テラヘルツ分光、光デバイス、新学理の国際連携・普及をその柱として掲げ、以下に述べるとおりトップダウン的な連携研究を推進した。

### 1) 動的相関電子系の物質相解明に関する実験・理論連携

A01 計画班（五神）で励起子ボーズ・アインシュタイン凝縮 (BEC)の実験、A03 公募班（高須）で冷却原子系 BEC の実験を行い、A04 計画班（小川、浅野）・公募班（菅、金本、大橋）でそれらの理論的な解析を進めた。A02 計画班（秋山）で励起子・励起子分子・プラズマの各相のクロスオーバー（励起子モット転移）の実験、A02 計画班（野村）でトリオン・2次元電子ガス正孔系・分数量子ホール相のクロスオーバーの実験、A03 計画班（金光）では InGaN や SiC などの特徴ある物質に対して励起子モット転移の実験研究を推進した。A01 公募班（島野）および A03 計画班（芦田）では、テラヘルツ分光実験で励起子モット転移を調べた。A04 計画班（小川、浅野）が、各物質相の安定性・相図と光学応答・スペクトルなどを理論的に解析した。このように、動的相関電子系の量子凝縮・相転移・クロスオーバーについて、本領域の中心課題として領域全体で取り組んだ。さらに、A04 計画班（小川）らの理論研究により、共振器ポラリトン系において、レーザー発振・ポラリトン凝縮・ボース凝縮など多彩な物質-光結合相が形成される可能性が示され、関連の実験データの解釈も進んだ。また、熱平衡系の凝縮現象と、非平衡系の発振現象を、一つのモデルの 2 つの極限的状況として統一的に捉える新しい理論が生み出され、量子凝縮と光機能の関わりを解明する新たな道筋がつけられた。

図 1 分野を横断・融合した新学術領域の構成

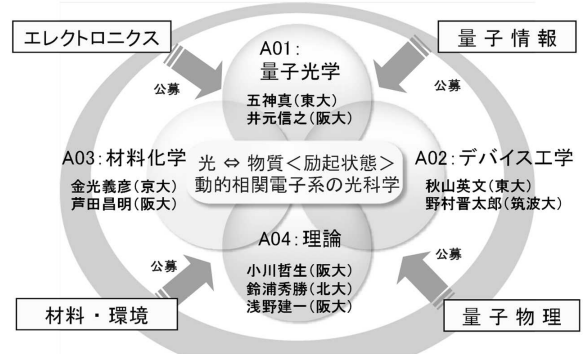


図 2

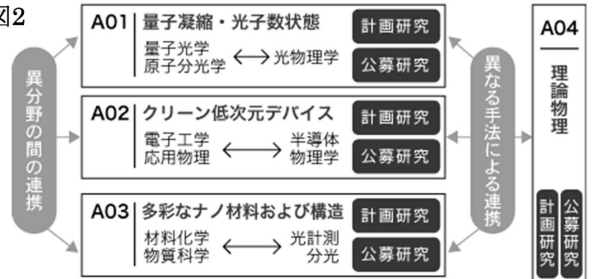


表 1

項目	計画 H20-24		公募 H21-22 H23-24	
	代表	分担	代表	代表
A01	2	1	5	5
A02	2	2	3	2
A03	2	4	7	9
A04	3	1	4	10

## 2) 量子情報・量子光学に関する連携

極限的な光操作を必要とする量子情報技術分野への展開は本領域の重要な狙いの一つである。特に、量子情報技術に実装可能な量子力学的光子状態の発生法を具体的ターゲットとして連携研究を進めた。A01 計画班（井元）公募班（小坂・青木）らが単一光子源の実験を行い、A04 公募班（越野）が理論的な新スキームの提案を行い、A03 計画班（金光）は材料開発と顕微分光実験により単一光子発生メカニズムを検討し、領域全体で単一光子源実現を目指す議論を行った。A01 計画班（井元）が、別角度から理論的検討を進め、2光子以上の光子統計分布を測定しサブポアソン性を確認すれば長距離量子暗号通信光子源として使えることを見出した。さらに、A01 計画班（五神）が、光子計数ストリークカメラを用いて、光子源の高次の光子相関計測を時間軸上で行う新手法を開拓した。これらによって、量子情報・量子通信実験で必須の単一光子源が満たすべき性能が極めて現実的なものにまで緩和され、その評価方法も得られた。

## 3) 多電子過程と光機能に関する連携

オージェ再結合過程は電子正孔系の動的相関効果に起因する非輻射緩和過程である。A03 計画班（金光）が、半導体微粒子やカーボンナノチューブなど様々な物質系についてオージェ過程を系統的に測定評価した。A01 計画班（五神）では励起子 BEC 形成阻害要因としてオージェ過程を精査し、A02 計画班（秋山）では半導体レーザーの効率低下要因として評価を行った。さらに A03 計画班（芦田）は高強度テラヘルツによるキャリア増幅の観測を行い、A03 公募班（玉井、石墨）がナノ粒子のオージェ再結合の研究で加わった。領域全体にわたる実験結果を手がかりに、A04 理論班（小川、浅野、鈴浦）が計算と理論的検討を進めた。動的相関電子系の普遍的な問題としてオージェ再結合過程について領域全体で議論した。その結果、多体クーロン相互作用がもたらすオージェ再結合過程は、光デバイスの性能低下要因としてばかりではなく、太陽電池の効率限界を引き上げる機能として有効利用の可能性があり、材料研究とデバイス研究を融合した取り組みの重要性とポイントが見出された。

## 4) テラヘルツ分光の光源・計測法の開発と物性研究に関する連携

A03 計画班（芦田、田中ら）によって開発された高強度テラヘルツ光源やテラヘルツ域を含む赤外全域をカバーする新規時間領域分光法が、半導体の電子正孔系の動的相関効果の研究ツールとして高いポテンシャルをもつことが明らかになった。A01 計画班（五神）によって反強磁性物質を用いたテラヘルツ波の偏光制御実験が達成された。A03 公募班（片山ら）によりシングルショット検出法が開発された。こうした技術革新を背景に、A03 計画班（金光）や A01・A03 公募班（稲垣、島野、片山、河野、鶴沼）も加えて、領域全体としてテラヘルツパルスによる量子凝縮・相転移・キャリア増幅・光機能の実験を、様々な物質系で試みた。基底状態で既に電子相関が強い新規絶縁体材料における光生成電子正孔多体系のダイナミクス、動的相関による秩序形成、光誘起相転移のダイナミクス解明の実験が進んだ。A02 計画班（秋山）が高品質試料の提供を行い、A04 理論班（小川、浅野、鈴浦）が理論・計算を行い、限界駆動領域における挑戦的・組織的な研究展開の戦略が議論された。

## 5) 光デバイスに関する分野横断・組織的連携

本領域の半導体レーザーや電界効果トランジスター (FET) 型素子などの光デバイス研究は、基礎と応用、理学と工学、作製と測定、実験と理論、国内と国外など、分野横断的かつ組織的連携の舞台となった。

A02 計画班（秋山）が米国プリンストン大のグループと共同でクリーン T 型量子細線および量子井戸レーザーの利得特性の実験を行い、A04 計画班（小川、浅野）が対応する理論研究や中国・上海応用物理研究所などを含めた共同研究を行った。さらに A02 計画班（秋山）と A03 計画班（金光）が共同で T 型量子細線中 1 次元励起子の高リドベルグ状態の磁場中分光実験を行った。A02 計画班（秋山）と A04 公募班（石川）が共同で、T 型量子細線中の 1 次元励起子の輻射寿命と吸収断面積の実験と理論の研究を行った。A02 計画班（秋山）と A04 計画班（鈴浦、小川）が共同で、量子井戸 2 次元連続状態を吸収計測標準に応用する研究を行った。また、半導体レーザーからの短パルス発生・利得スイッチングについても、基礎過程を研究する A02 計画班・秋山が、実用化応用研究を進める A02 計画班・分担者・横山、超高速分光法を専門とする A03 計画班・金光、レーザー理論研究を担当する A04 計画班・小川らと、組織的共同研究を行った。

A02 計画班・野村および分担者・山口らは、FET 型光デバイスにおける荷電励起子や分数量子ホール効果領域の極低温分光に関して常時共同研究を行い、理論を専門とする A04 計画班（浅野、小川）および A04 公募班・中島と共同研究を行った。

## 6) 新学理形成に関する国際連携・普及

日本発の動的電子相関 (DYCE) の新学理と意義や成果を、我が国は勿論であるが世界の舞台でも広く知ってもらい、世界的に DYCE をキーワードとした学術領域が発展するように、総括班と A04 計画班（小川）が中心となって、国際シンポジウムを開催し、国際共同研究・連携研究を積極的に推進した。



### 3. 研究領域の設定目的の達成度（3 ページ程度）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らしての達成度合いについて、具体的に記載してください。必要に応じ、公募研究を含めた研究項目毎の状況も記述してください。

本研究領域では、近年の先端レーザー分光技術、量子多体物理学の進歩を背景として、物質の未利用な光効果・現象を探求し、その活用に向けた道筋をつけることを目的とした。光と物質の関わりについて新たな視点で見直す上で、物質の励起状態に生じる多数の電子間の相互作用や量子力学的位相相関・動的相関電子系に着目し、DYCE (Dynamically correlated electrons) という中心的コンセプトを謳い、組織的研究を開始した。A01-04 の 4 研究項目 (A01 分光学・量子光学、A02 半導体デバイス工学、A03 ナノ材料化学、A04 量子多体系理論) の密接な連携により、動的電子相関によって生じる新規な光効果を探求し、その基礎学理を創り、応用への道筋を探ることに挑戦した。これにより光科学と物質科学が融合した新しい学術領域の創成を目指した。動的相関電子系の学理を異分野間で共有化して新しい学術領域を形成し、また各分野で特に発展している研究手法、研究手段の交流も目指した。

研究期間が終了した現在、動的相関電子系の物理学は、新学術領域として定着し、本課題に関心を持つ若手研究者の人工は明らかに増し、コミュニティも形成された。国内学会や国際会議を通じて、DYCE = 動的相関電子系という標語の知名度も向上し、理論的な研究は難しいとされていた本分野にも、多くの分野からの研究者が参入するようになった。領域全体として高い達成度が得られたと自負している。

各研究項目・研究課題ごとの達成度を、以下で述べる。

研究項目 A01 (分光学・量子光学) では、冷却原子系の量子凝縮や光周波数標準研究の分野で近年急速に発展した精緻なレーザー分光技術とその概念を、半導体の励起子系で展開し、これにより、励起子系の自発的量子凝縮を実現し、動的電子相関効果の本質を引き出すことが主たる目的であった。さらに、量子光学研究との密接な連携をはかり、物質系のコヒーレンスと輻射場の相関の量子光学効果を探求し、ナンバーステートの発生など新たな光量子機能発現の道筋を探ることを目指した。これらの目的は、十分に達成することができた。

実際、五神らは、亜酸化銅の励起子系において自発的量子凝縮の実証に世界にさきがけて成功した。また、その研究過程で、精緻なレーザー分光を固体系に適用し、励起子の内部遷移を利用して従来の発光観測に依存した実験では困難だった励起子の基礎パラメータを評価した。特に、励起子ボーズ・アインシュタイン凝縮条件の達成には不可欠な、励起子間の非弾性散乱断面積を定量的に評価し、これにより実験上要求される励起子の温度領域や密度領域、三次元閉じ込めの必要性を明らかにした。このアプローチは、ワイドギャップ半導体における電子正孔液滴の精密分光や多励起子束縛状態の発見、偏光選択則を巧みに利用した反強磁性共鳴の制御等にも活用された。

井元らは、量子情報処理を視野に入れた量子光学の研究を深め、光子数量子状態発生の定量的な判定基準の重要性に注目し、単一光子光源の新しい評価手法を提案した。この方法では光子数分布を測定により推定し、2光子以上の分布の裾がポアソン分布よりも急に落ちる傾向 (“サブポアソン傾向性”) を高次の光子数まで定量化することで、量子暗号通信の到達距離を伸ばすことを可能にする。この方法は、五神らにより開発されている光子計数ストリークカメラを用いた光子源の高次光子統計分布の測定法開発により、実現可能となった。デバイス・材料分野の研究者へ明確な目標を示すことができた意義は大きい。

以上の成果に加え、量子ドットと微小共振器が結合した系の量子光学を利用した長距離量子情報通信の新技术や、強磁性的相転移を有する新たな量子スピンモデルによる量子計算の新技术および量子ドット等で構成された量子光源の波長変換の実現など、多くの有用な知見が得られた。また、高次光子統計分布測定を典型的な微小共振器半導体レーザーに適用し、従来のレーザー理論では厳密に取り扱われない物質系のダイナミクスが光子相関に直接的に現れることを実測した。

研究項目 A02 (半導体デバイス工学) では、豊富な技術蓄積を背景として、クリーンな低次元ナノ構造成長と精緻なデバイスプロセスにより高度かつ高品質な半導体光デバイスを作製し、ゼロから金属的な高密度域に至るキャリア密度制御、量子閉じ込め、外場、温度依存性などに応じて、動的電子相関効果が光学応答や光機能にどう反映し活用可能かを系統的・定量的に調べ上げることを目的とした。具体的には、光励起や電流注入励起が可能な低次元レーザーや、ゲート電圧制御可能な電界効果トランジスタ(FET)型のクリーン光デバイス構造を工学的手法を駆使して形成し、構造の次元、電子や正孔のキャリア密度、電荷バランス、電場などを精密制御し、さらに温度や外部磁場を変えつつ、光学応答に現れる動的電子相関効果を系統的に調べることを計画した。その際、界面構造ラフネスや残留不純物散乱などが、注目する動的電子相関効果を擾乱してしまわないようにこれまで実績を積んできた MBE 成長技術を用い、世界最高

品質クリーンデバイスの作製を目指した。量子細線・井戸レーザーにおける動的電子相関効果による低しきい値利得発生や利得スイッチ・光非線形性に注目し、FET型デバイスでは分数量子ホール状態やトリオン・量子ホール状態発光クロスオーバーの観測を狙った。極低温実験ではA01班と、局所分光や時空間ダイナミクス、THz実験ではA03班、理論に関してA04班と連携して研究を進めることを目指した。

これらの目的は、この研究期間内のうちに十分に達成され、幾つかの想定以上の成果も生んだ。

秋山らは、1周期から100周期までの世界最高品質の量子細線レーザー試料を作製することに成功した。さらにその高品質・高制御性を保証する構造評価・光学評価・スクリーニングにより、バンド端での非線型光学利得特性を測定・解明する道が拓けた。物理計測の結果、フェルミ端近傍と共にバンド端においても著しい多体効果が現れ、光学利得の1次元状態密度による発散的増大が抑制されることを観測した。A04理論グループと連携してその機構解明を目指し、このバンド端利得抑制効果が、キャリア間相互作用のコヒーレント部分とインコヒーレント部分による振動子強度の再構成とブロードニングによって生じていることを解明した。

秋山は、分担者・横山と共同で、半導体レーザーの利得スイッチングによる短パルス発生と、そこに内在する高速光非線型性を明らかにする研究を本期間内に新規発足し、かつ一連の優れた成果を得た。特に、1.55  $\mu\text{m}$  通信波長帯用 InGaAsP系DFBレーザーダイオードの電気パルス強励起とスペクトル切り出しにより5ps以下の短パルス発生に成功し、さらに短パルス限界を決めるチャープ特性の測定を行い、レート方程式理論を用いた解釈を得た。

野村らは、不規則性による局在と分離して、遮蔽長が荷電励起子半径とほぼ一致する電子密度を境にして荷電励起子状態と二次元電子ガス正孔状態がクロスオーバーすることを示す定量的な手法を編み出し、当初計画で期待したとおりの成果を得た。

低電子密度において高い移動度をもつ試料を用いて、 $\nu=1/3$ 近傍の発光スペクトルをT=25 mKの極低温、高い波長分解能測定により系統的に調べ、明確に分離された4-5つの発光ピークを初めて観測し、それらが準電子励起の存在と関わることを示したことは、当初計画を上回る成果であった。

極低温、強磁場中近接場顕微鏡を用いた量子ホール端状態の空間マッピングに成功し、空間マップ像が光励起エネルギーに強く依存して質的に変化することを見いだした。光励起状態に生じる動的相関効果と関わるのがわかった。

研究項目 A03 (ナノ材料化学) では、様々な化学的手法によって得られる多彩多様な半導体ナノ材料および微粒子系に対して、時空間ダイナミクスを計測する分光手法を新たに開発適用することで、特異的あるいは普遍的な動的電子相関効果の発現と機能性を発見し解明することを目標に研究を進めてきた。限定された材料のみを調べるのでは、普遍的な学理を確立し、実用に活かせる光機能を得るためには、不十分である。そこでA03班では、参加するメンバーが実績をもつ化学的手法を用いて特色ある様々なナノ材料の試料を作製し、キャリア間の相互作用が本質的な役割をする光学現象の発見・解明を目指した。また、新しいテラヘルツ光源・分光法の開発により、様々な材料の電子相関効果の解明を目指した。低純度あるいは欠陥などを含むような材料の光学物性は、低密度領域では光学応答は外因的要素に影響されることが多いが、高密度領域では材料や構造に固有の性能が現れるので、多種多様な物質を研究対象にすることにより、動的光物性や動的電子相関効果の本質を明らかにできる可能性がある。

金光らは、顕微発光分光と時間分解ポンプ・プローブ分光を用いる時空間分解分光により、ナノ構造物質において少数の励起子・キャリアが関与した重要な基礎過程であるオージェ再結合過程およびマルチエキシトン生成・キャリア増幅過程の解明に取り組んだ。カーボンナノチューブのブライト準位とダーク準位間の励起子分布を決定し、正孔ドーピングによる荷電励起子を世界に先駆けて発見した。また、励起子-正孔間の量子化オージェ再結合寿命の決定やキャリアドーピングによるバンドギャップ収縮など電子相関が本質的な現象の解明に取り組んだ。さらに、ナノ粒子におけるキャリア3体衝突オージェ再結合過程速度の評価やナノロッドのオージェ再結合過程における表面効果の解明を行った。オージェ再結合過程およびマルチエキシトン生成過程における波数保存則の緩和を実験的に示した。以上のように、半導体ナノ構造とバルク結晶において、高密度領域にある電子正孔系のキャリア・励起子ダイナミクスの解明と新しい光学過程の発見を行った。当初の期待通りの成果を得ることに成功した。

芦田らは、動的電子相関効果の発現と機能性を発見・解明するため、テラヘルツ域を含む赤外全域をカバーする時間領域分光を開発した。媒質の吸収による欠落帯がなく広帯域化が容易な上、損傷閾値が高いため高強度化にも有利な空気プラズマによる赤外パルス発生法を用いて、サブテラヘルツから近赤外域の200THzに及ぶ周波数領域を完全に切れ目なくカバーすることに成功した。これはコヒーレント赤外光源としては世界最高帯域となっている。これを利用して、マルフェロイックス酸化物のエレクトロマグノンや高温超伝導体の超伝導ギャップの観測も行った。こうして、当初目論んだ通り、電子相関の動的応答を



観測することができた。一方、テラヘルツ波の高強度化にも成功し、 $\text{LiNbO}_3$  を発生源とした手法の最適化を行って、世界最高となる電場強度  $1\text{MV/cm}$  を超えるパルス発生に成功した。さらに、この光源を利用して多くの非線形現象を見いだした。バンドギャップよりも何桁もエネルギーが低いテラヘルツ波の高強度励起によって、バンド端からの発光を初めて観測した。こうした摂動的な理解ができない新奇現象を次々に発見した。新たに開発した広帯域測定と高強度励起の組み合わせで、動的電子相関の制御を行う端緒を得た。期待以上の成果が得られた。

公募研究では、レーザーを基本にした新しい分光法の開発とそれを利用した光学現象の制御や機構解明に多くの成果を得た。シングルショット高速分光法の開発と光誘起相転移、光で励起したスピン波の実空間・実時間観測、フェルミオンとボゾンの原子混合系およびフェルミ縮退混合系における相転移の観測、ナノ粒子のマルチエキシトン生成など、多くの成果を得ることができた。

研究項目 A04 (量子多体系理論) では、動的相関電子系をミクロに記述する新しい理論体系や計算手法の構築を行い、上記の様々な材料や手法の実験において得られる実験結果と比較検討し、系統的な理解・解釈を得て、全体として学理に纏め上げ、新現象・新機能の予測を行うことを目的とした。領域としての学理の確立に向けて、体系的な基礎理論を建設し、実験データの統一的普遍的理解を得ようを目指した。

その結果、特に研究期間の後半に、当初予想以上の進展や成果が得られ、高い目的達成度が実現できた。

A04 班では、領域全体としての学理を確立するために体系的な基礎理論を建設し、実験データの統一的普遍的理解を得られるようにすることが肝要であると、計画研究と公募研究のすべての研究者に周知徹底を図り、A04 班全体での意思統一と協力体制の構築を行った。動的相関電子系の基礎理論の構築は、量子多体問題、非平衡量子統計力学、量子光学など、高度な凝縮系物理学だけでなく、未開拓の非平衡物理学や、さらには光学・電磁気学の詳細な知識を同時に必要とする作業である。これは極めて難しい課題であるがために、研究者人口も増えず、手つかずのままに残されていた。そこで、本研究プログラムでは、この難作業に果敢にアタックすることを、A04 班研究者全体に周知徹底して志気を高めた。個々の研究者の意欲と能力が高い必要は言うまでもないが、A04 班を一つの「チーム」として研究を推進する必要もあり、理論研究者同士の協力体制を作ることに腐心した。

動的相関電子系の理論は、大きく分けると、「グローバル理論」と「詳細理論」がある。グローバル理論とは、系の示す状態や現象の全体像をつかむための理論で、詳細理論とは、ある条件下での系の示す状態や応答の詳細を理解するための理論で、車の両輪を成している。A04 班の研究の強みは、この両方がバランス良く配置されていたことであり、その結果、予想以上の高い達成度を得ることができた。

グローバル理論の第一は、小川らの計画研究による動的電子相関効果を取り入れた新しい半導体レーザー理論の構築である。この新学術領域研究が進行していた同時期に、半導体レーザーが共振器ポラリトンの協力現象と密接な関係があることが実験的に示唆され、共振器ポラリトン系との関連も考慮した理論構築を進めた。得られた理論的枠組みは、半導体レーザーの発振状態と共振器ポラリトンの凝縮状態とを同じ枠組みの中でシームレスにつなぐことのできるもので、将来の拡張は残っているものの、現段階では世界初の極めて重要なものと言える。この理論の完成により、物理学の長い間の基礎的問題であった、平衡状態と非平衡定常状態との移り変わりに関して、具体的で明確な結果を出すことができるようになった。

グローバル理論の第二は、浅野らの計画研究による電子正孔系のグローバル相図の決定である。動的相関電子系の基本となる高密度電子正孔系および電子系（正孔系）の準熱平衡状態の相図を決定した。励起子ガスの遮蔽効果と電子正孔ガスの遮蔽効果の両方を、自己無撞着に取り入れた点が斬新で、小川らの先行研究をさらに精密化・定量化することに成功した。量子ホール系・ディラック電子系など、動的相関電子系の新奇な舞台の励起状態の特徴も明らかにし、系の多様性と普遍性を明示した理論研究を進めた。

このようなグローバル理論を構築する際に、理論手法（近似手法）の開発にも大きな進展があった。グローバル相図がカバーすべき、何桁も大きく変わるキャリア濃度・温度・相互作用強度・有効質量（バンド幅）などのすべての領域に適用可能な近似理論は無かったため、従来は個別のパラメータ領域での近似理論をパッチワークのように接続するのみであった。しかし、これでは、未知の物理現象が潜んでいると期待されている中間領域や、状態間の移り変わりの様相を記述できない。この移り変わり（クロスオーバー）を正しく記述しうるメタ理論を、小川らは非平衡グリーン関数法と非平衡統計力学の併用によって、浅野らは非平衡遮蔽過程を自己無撞着に取り扱うことで、構築に成功した。

鈴浦らは、カーボンナノチューブ・グラフェンを中心とした有効質量ゼロのディラック電子を持つカーボンナノ構造における特異な光学応答の解明を目指し、実験研究での決着が付いていなかった明暗励起子分裂構造を理論的に曖昧さ無く決定したことが大きな成果である。多層カーボンナノチューブやカーボンナノチューブ内の不純物や格子欠陥による準位混成も定量的に明らかにし、実験結果の解釈に寄与した。

#### 4. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況（1 ページ程度）

研究推進時に問題が生じた場合には、その問題点とそれを解決するために講じた対応策等について具体的に記述してください。また、組織変更を行った場合は、変更による効果についても記述してください。

本領域採択時の科研費審査部会の審査結果の所見で、提案した研究の意義を高く評価して頂きつつ、「公募研究で理論的研究を拡充すること」が望ましいという指摘を受け、公募研究で多くの理論研究を組み入れようと考えていた。しかし、H21-22 年度の公募研究公募では、A04 理論分野の提案が期待ほどには集まらなかったことが問題であった。対策として、領域のシンポジウムや研究会・若手道場に、毎回領域外からの招待講演者を呼び、さらに学会のシンポジウムや国際会議に積極的な企画提案を行って領域内外の研究者が集まって議論する場を設け、特に若手の領域外研究者へ共同研究を持ちかけるなど、拡充ための努力を重ねてきた。H22 年度秋の 2 度目の公募研究募集では、理論の公募研究を充実させることができた。理工系委員会による審査および評価コメント伝達のシステムが上手く機能し、感謝申し上げる。シンポジウム等において実験グループと理論グループとの間あるいは理論グループ間での活発な議論が行われ、本領域の理論研究が大きく進展して活気を増し、共同研究の成果も生まれた。

H23 年 3 月 11 日の東日本大震災の被害は、東北および関東地域で甚大であった。また、原発事故、その後の輪番停電や電力不足の影響は、全国の各地域で大きな障害となった。また、原発事故ののち、放射能汚染に対する外国人研究者の懸念が極めて大きく、共同研究や会議開催に対して障害となった。

実際、H23 年度秋に予定していた DYCE アジアワークショップは、年度内開催が不可能となった。しかしながら、科研費の繰越制度を活用することにより、翌 H24 年 4 月に開催することが出来た。半年間ほど準備期間が長くなったことで、内容がより充実した側面もあり、非常に有意義な会議として成功裏に終わった。

H24 年度に生じた全世界規模の液体ヘリウムの入手困難の問題は、低温実験を行ういくつかの研究室にとって、特に、公募研究で参加した小規模研究室の場合は大きな障害となった。予算が限られた最終年度だったこともあり、領域として特に有効な対処を講じることは出来なかった。

## 5. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況（1ページ程度）

研究領域内での若手研究者育成の取組及び参画した若手研究者の研究終了後の動向等を記述してください。

若手研究者や学生を対象としたワークショップや若手道場などを開催し、広い年齢層や従来は他分野とされていた研究者も広く巻き込むことによって、動的相関電子系の物理学のプレゼンス向上を図り、当該学問分野だけでなく関連学問分野の若手研究者や大学院生の興味を引き出す努力を進めた。ホームページ上でも「DYCEの若手紹介」のページを設け、若手の研究を紹介した。その結果、動的相関電子系の光科学が、基礎応用融合かつ分野横断的な新しい研究領域として定着し、その活動に関心を持つ若手研究者人口が増した。A04理論班の公募研究の応募においても、半導体物理学だけでなく、量子光学、冷却原子系、第一原理数値計算、原子分子ダイナミクス、光メカニクス、物性基礎論などの多様な分野にも積極的に参画を呼びかけ、期間後半の公募研究のA04班への応募件数は飛躍的に増加した。理論的な研究は難しいとされていた本分野にも、多くの研究者が参入するようになった。日本学術振興会特別研究員などの研究者が、動的相関電子系の物理学の研究室を志望するようになった。

様々な若手支援プログラムのもとで30代の優秀な研究者が、独立したユニット(PI)として研究教育を行う機会が増え、本領域にも、そのような環境で研究教育を進めている若手の研究代表者・分担者が計画研究・公募研究共に多数含まれている。これら若手研究者の多くは、5年以内の任期付きで雇用されている。立ち上げの研究費もある程度は措置されているものの、十分とは言えない。また研究ユニットとして、最小限の規模を確保できていない。(研究グループを構成する、助教や大学院生がいないものも多い)本新学術領域研究の活動を通じて、このようなプログラムに参画する若手研究者の支援を行った。

## 6. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）（1 ページ程度）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について総括班研究課題の活動状況と併せて記述してください。

研究費の効果的な使用ならびに導入する装置および研究体制の有機的結合を図り、組織・共同的な研究を効率よく推進するために、次に述べる重点的な研究費投入を行った。本領域の中心となる研究拠点を計画研究の代表者の研究機関（東大・理：極低温精密分光、東大物性研：クリーンナノ試料開発、京大化研：時空間分解分光）に形成し、計画研究・公募研究に参加する研究者が、利用できるよう整備を進めた。

東大・理では、無冷媒希釈冷凍機へ研究費を重点投資した。この装置は順調に立ち上がり、主力装置として高い稼働率で運転を続けている。今後外部との共同研究にも積極的に供してゆく予定である。研究期間後半に生じた液体ヘリウムの入手困難などの状況下でも、極低温の非常に有力な光学実験が可能であり、本装置の導入は本研究の成功にとってきわめて効果的に働いたものと考えている。

阪大・基礎工では、通信波長帯における光子検出システムを整備し、それにより量子情報応用に向けた研究を推進することができた。特に単一光子の光周波数変換を実現でき、非常に有効な利用であった。本研究費による理論研究員として1名、研究課題を推進した。本研究課題終了後、高い競争率を乗り越え、京都大学白眉プロジェクトの特定助教として採用され、更に活躍の場を広げた。

東大物性研では、人件費を除く研究費は、MBE装置の改造立ち上げに重点投入した。すなわち、気液分離器設置および液体窒素断熱配管の設置と、本体の真空部品・装置の評価・調整・更新作業を行った。また、マグネトロンスパッタリング装置を開発導入し、試験製膜およびPC自動制御部分の開発を進め、さらにその開発技術を電子ビーム蒸着装置にも適用し、ファイバーや半導体レーザー端面へのSiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>誘電体多層膜HRコートなどデバイス作製が可能になった。これらをもちいて作製された試料の、領域内への供給が行われた。

筑波大学では、ピコ秒蛍光寿命測定装置、無冷媒低振動<sup>3</sup>He冷凍機システム、8 T超伝導マグネットを導入し、長時間安定して系統的かつ簡便に極低温中でのFET型デバイスの評価するためのシステムの整備を行った。

京大化研では、波長可変・高繰り返し・高出力フェムト秒パルスレーザーシステムを導入し光源の安定化を図り、精密レーザー分光に利用した。さらに白色過渡吸収分光装置と組みわせることにより、効率良く様々な物質の光学応答を研究した。さらに、自動波長可変オプティカルパラメトリックアンプや検出器を導入し、2波長可変でありレーザー光を系統的にかつ簡便に制御できる波長可変ポンプ・プローブ分光系を構築した。それらの光源・測定システムを利用し、多様多彩な物質の動的光物性・電子間相互作用を系統的に研究した。

阪大・基礎工では、バンド幅可変型一体型フェムト秒レーザーを超広帯域テラヘルツ波時間領域分光装置に導入した。これにより、従来とS/Nは同等でありながら桁程度速いデータ取得に成功した。さらに、LD励起グリーンレーザーの導入により再生増幅器系の安定化を図り、その光源を用いて空気プラズマによる赤外電場検出器を用いて、世界最高帯域を有する測定系の構築に成功した。京大iCeMSでは、再生増幅器の出力光の強度とモードの安定性を格段に高めることに成功し、それに基づいて世界最高出力となるテラヘルツ波発生に成功した。

これら特色ある可視波長、赤外波長、テラヘルツ波領域の幅広いスペクトル領域域をカバーする光源の開発・構築により、A02班およびA03班の計画研究・公募研究のメンバーとの連携研究に利活用した。

A04理論班では、3件の計画研究と14件の公募研究（前半4件、後半10件）で、本プログラムが推進された。3つの計画研究での研究経費の大半は、博士研究員雇用の人件費である。人件費以外では、研究の進展に応じて国際会議や国内会議での研究成果発表が増え、出張旅費が大きな使途となった。特に理論的研究では、研究者同士が直接会うことによる研究討論が極めて重要であるため、国内のみならず海外との多くの共同研究の推進にとっても、旅費は重要であった。ハードウェアとしては、特に浅野らが購入したクラスター計算機およびワークステーションが比較的高額で、浅野らの研究は、高速計算機を駆使したものであるため、彼らの成果はすべてこの計算機によって行われた。

本研究費による研究員を、実験の秋山、野村、金光、理論の小川、鈴浦、浅野、井元の各課題で各1名雇用した。いずれも、高い能力をもつ若手人材が確保でき、厳選された各1名の研究員が各課題の代表者と緊密に協力して研究課題を推進している。大学に既存の通常のポストでは雇用できなかったはずの貴重な若手研究者の成長・活躍の場が得られた意義も大きい。極めて有効な研究費利用と確信する。

## 7. 総括班評価者による評価（2 ページ程度）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

研究領域の活動と進捗について、客観的な立場から評価を行う為に、領域外の研究者4名を総括班に加え、総括班評価班を構成した。毎回の領域シンポジウム・全体会議に評価担当者を招待し、研究状況の確認と評価をお願いした。この評価担当者による領域の活動全体の評価コメントを以下に掲げる。これに加え、最終年度8月に、研究領域の活動を国際的視点で評価を行うことを目的として、4日間合宿の成果発表国際ワークショップを行った。その際に、海外の著名な研究者から評価コメントを頂いたので、合わせてここに記載しておく。

### 総括班評価担当者によるコメント

#### 榊裕之（豊田工業大学・学長）

我国には、光科学の分野において、本プロジェクトの開始以前から、国際的に卓越した成果を挙げている研究者が少なくなかったが、そうした先導的研究者が、相互啓発の仕組みを作り、自身でより優れた研究を進めるとともに、次世代の若手研究者の成長を促す努力を行ったことを、高く評価したい。特に、光科学の最先端の重要課題を、動的相関を持つ電子系と言うユニークな視点から包括的に捉え、それらの諸課題に、量子光学、光デバイス、ナノ構造材料と言う三つの角度から、実験家と理論家が連携して鋭く迫り、一連の極めて優れた成果を達成したことは、特筆に値する。本プロジェクトが、学術研究推進の一モデルとなり、他の領域にも刺激を与えること期待している。

#### 十倉好紀（理化学研究所創発物性科学研究センター・センター長、東京大学大学院工学系研究科・教授）

新学術領域研究「半導体における動的相関電子系の光科学」は、領域代表者の強力なリーダーシップのもと、実験と理論、また物質・デバイス構造と計測技術、との協調・連携により、所期の成果を挙げた。特に、動的相関電子系の典型としての励起子の量子凝縮相は、はじめてその存在が明確に捉えられ、今後の極低温域での考察によって量子凝縮相の動的物性（励起子超流動など）が明らかにされるものと期待される。これは光量子物理に今後大きなインパクトを与える成果となろう。また、計測技術においても、高強度テラヘルツ光源やテラヘルツ時間分解測光技術が開拓され、これを用いた低エネルギー強励起による相制御や強電場の動的物性制御が今後大きく発展することが期待されるようになった。これらの先端研究の成果に加えて、本領域運営の大きな特徴は、領域シンポジウムをはじめとして、国際会議、若手道場、理論ワークショップ、アジアワークショップなど多数の研究会・討論会を開催し、新学術領域創成にふさわしい熱気・機運とそれに必要な研究者間のコミュニケーションが醸成したことである。これは若手研究人材の育成の観点からも特筆に値する。

#### 湯本潤司（NEL America, Inc. President & COO）

物質の励起状態に生じる多数の電子間の相互作用や量子力学的位置相関は、物性、デバイスを考える上で、基本的かつ重要なテーマであるが、その複雑さの為に、必ずしも理解されているという状況ではない。その一方で、デバイスの進歩は、研究開発投資額に比べて遅くなっており、その技術的飛躍が求められている。本領域のテーマは、その期待に貢献できるもののひとつであり、研究開発投資として大きな意味を持つ。これまでに、学術的な取り組みをスタートに、それぞれの分野で確実に成果をだし、さらに、グループ内での有機的な連携が構成され、新しい研究分野も形成されている。さらに、他領域との合同シンポジウム、国際シンポジウムを積極的に行い、国際的研究ネットワークの構築、また、若手研究者の育成と言う点でも、大きな成果を出したと言える。今後、この取り組みが、産業界の研究開発組織も巻き込む活動へと発展し、日本の技術産業競争力の強化につながることを期待している。

#### 北川 宏（京都大学大学院理学研究科・教授）

新学術領域研究「半導体における動的相関電子系の光科学」は、領域代表の五神教授の強力なマネジメントの下、光物性、半導体物理、物質化学、理論物理、計測技術の分野の研究者の有機的な連携により、順調に研究が進捗した。計7回の領域シンポジウムをはじめとして、国際会議、若手道場、理論ワークショップ、アジアワークショップ、多数の研究討論会、研究戦略会議が開催されており、密な研究活動が行われている。また、関連する化学分野の新学術領域研究との合同シンポジウムも開催された。高強度THzパルスの開発と励起子吸収の観測、単一量子井戸によるオージェ再結合の抑制や量子細線レーザー素子の開発など、数多くの研究成果をあげた。また、若手を中心として活発な討論がされ、多くの若手研究者が育成された。終了後も、特に若手研究者に対するフォローアップなどを行い、今後益々の領域研究の発展に期待する。

**Peter Littlewood (Argonne National Laboratory and University of Chicago)**

DYCE is a very original program because it brings together optical methods of control to address both fundamental and applied programs of correlated electronic matter. One thrust of your program is to address one of the classic fundamental science problems of the metal insulator transition of electron-hole systems, and of quantum correlations in excitonic matter, including the possibility of Bose Condensation of excitons. On the applications side, these problems all play toward the design of novel laser structures, and for small systems the transition to practical quantum information technologies. You bring together world-leading groups in all these areas: on the BEC problem, it seems you are very close to a breakthrough on the  $\text{Cu}_2\text{O}$  problem which will be a major scientific discovery; the theory and experiment together on polariton condensates is very powerful and has produced a new understanding of strongly pumped polariton systems; the quantum wire laser research has also brought together theory and experiment to describe these systems transitioning through the Mott limit; and there are powerful collaborations also between quantum information technology and theory, driven by experiments on quantum nanostructures. I was also very pleased to see the great enthusiasm and performance of young faculty, students, and postdocs. There is every sign of the generation of a strong “school” or “family” of world-leading scientists. This was an exciting meeting, and I was very pleased to have been invited to participate in the work.

**Leonid V. Butov (University of California, San Diego)**

I had an honor to participate in a workshop of DYCE project. It is my great pleasure to express my strongest support of DYCE project. This project brings together the experts in the fields of optical sciences and correlated electrons and comprehensively addresses the most interesting problems in these diverse fields. The research directions within the project include ultrafast laser technology, new photon technology, and optical studies of correlated electronic states. In each of these directions, the DYCE participants conduct the highest quality experimental and theoretical research and continuously discover new phenomena. The results of the project are significant both for understanding the fundamental properties of light and matter and for the development of novel optoelectronic devices. I would like to emphasize the breadth and excellence of the research conducted within the project. This was clearly evidenced by the high quality of scientific presentations at the DYCE workshop. Another very strong characteristic of the project is that it optimally brings together experienced senior scientists –the leaders in the field – and young researches. Along with lectures given by senior scientists, the workshop included a number of presentations by young investigators. This indicates a very strong educational component of the project. It would be highly important for the progress of the fields of optical sciences and correlated electrons if the research activities conducted by DYCE project now can be continued in the future.

**Junichiro Kono (Rice University)**

I was truly a pleasure attending the DYCE meeting this week. You have assembled such an impressive group of collaborative and talented researchers in the field of optical science. I greatly enjoyed all my interactions with the DYCE team members. The meeting was extremely interesting and stimulating. The oral sessions allowed me to hear and appreciate some of the latest achievements of your team on a diverse array of important topics in optics and photonics. I was particularly interested in some of the talks on the condensation of excitons and polaritons. I got the impression that Japan has some of the world leaders in this area, covering both experimental and theoretical investigations. One of the strengths of the DYCE team is its highly collaborative nature. It is clear that you did an excellent job in encouraging your team members to strongly interact with each other. In particular, it was such a joy to see how experimentalists and theorists are working together. Lastly, some of the young researchers gave outstanding presentations. They looked very confident and sounded convincing in their presentations. I knew only a few of them, and it was fantastic to meet some of the future leaders in this field. You certainly have very impressive rising stars. Thank you again for inviting me to participate in this very stimulating and enjoyable meeting. I look forward to learning further progress of your team in the DYCE projects in the coming years.



**Mackillo Kira (Philipps-University Marburg)**

It has been a true pleasure and privilege to participate in this extremely interesting and successful DYCE Workshop. First of all, the scientific program has been magnificent. I think it has covered all the novel topics in many-body physics, optical sciences, and quantum optics -- research on these problems will be critically important in converting material science to tangible next-generation applications. More specifically, we have heard the latest experimental and theory developments on superluminescence, Bose-Einstein condensation, terahertz spectroscopy, quantum Hall effect, exciton Mott transition, lasing investigations, many-body problems, and several through investigations on quantum optics from the top experts in the world, including the members of the DYCE project. I am impressed by the state-of-the-art research results already generated by the DYCE project. This clearly shows that the DYCE project has indeed been focusing on the most relevant and topical research problems. Especially, the selection of DYCE projects seems clever: the DYCE members are able to successfully combine thorough basic-research aspects with application-driven research in order to produce significant progress. Therefore, I am more than confident that DYCE continues to succeed in the future as well. The DYCE project also gives young scientists a perfect opportunity to develop into research leaders. Their presentations showed great dedication and innovation in their starting research careers. This meeting also provided an excellent interface for the young researchers to create connections with international researchers. For example, I have been approached by many of DYCE's young scientists who have enthusiastically asked me questions and discussed their research problems very openly. Based on these discussions, I even decided to extend my visit and meet the young researchers at the university of Osaka to discuss the research details further. I think the DYCE concept is so successful that it is clearly worth to actively seek for ways to extend it. One possibility could be to create collaborative grants for couple leading international research groups and/or to join forces with other international research groups with similar interest. I also recommend to have DYCE workshop every/every second year to strengthen the international collaborations. I am sure that such collaborations would help DYCE to make a difference also on a global scale. In summary, I think the DYCE workshop as well as the project have been a great success.

**Andre Mysyrowicz (Laboratoire d'Optique Appliquée, école polytechnique)**

I have participated as an invited guest at the DYCE International meeting held in Kussharo, Hokkaido, between August 7 and August 10 of 2012. I would like to express my deep appreciation for the quality of the meeting. It is certainly one of the best in its kind that I attended during my career as a researcher spanning over 40 years. Several features of the meeting contribute to my enthusiastic appreciation. First, and most important, is the quality of the presentations which was exceptional. Obviously, the list of participants was severely selected from among the best Japanese scientists active in the domains discussed during the conference. Invited conferences were also given by prestigious scientists from abroad. Second, and also of prime importance is the scope of the topics which were discussed. They covered a wide range of subjects, yet they were related by an underlying concept, namely to connect the collective effects from correlated electrons in semiconductors with optical sciences and vice-versa. Thus, we heard talks ranging from quantum information through device engineering, macroscopic quantum physical effects, nanomaterials and environment studies, THz technology, etc. From the list alone, it is clear that these fields will have a strong impact on future technology in environment, material and communication sciences. I was also impressed by the right mixture between experienced scientists, and younger promising researchers. This helps provide a smooth transfer of knowledge between different generations of physicists. I would strongly recommend that the DYCE program be continued. In my opinion, it would be very beneficial for the technological development in Japan since this is a well-thought project, which aims at a better understanding of fundamental concepts which may have a strong impact on future technologies. I would also recommend that a future DYCE project be extended to foreign participants since contacts with the scientific community at large would certainly be mutually beneficial.

## 8. 主な研究成果（発明及び特許を含む）〔研究項目毎または計画研究毎に整理する〕

（3 ページ程度）

新学術領域研究（公募研究含む）の研究課題を元に発表した研究成果（発明及び特許を含む）について、図表などを用いて研究項目毎に計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。

A01 班・五神らは、固体物理学における 50 年来の懸案であった、バルク半導体スピン禁制励起子におけるボーズ・アインシュタイン凝縮への転移を、励起子温度 800 ミリケルビンにおいて三次元トラップ中の加熱された励起子が閾値的に増大することを通じて観測した。これは水素原子のように粒子間非弾性散乱断面積が比較的大きな系で議論されてきた、凝縮転移に伴い高密度な凝縮体が出現し、その密度の高さ故に非弾性散乱レートが増大する緩和爆発現象であることを突き止めた。励起子系をさらに冷却し、非弾性散乱の頻度が小さく安定な凝縮体を用意するために本研究で導入した無冷媒希釈冷凍機を用いた実験へと移行した。レーザー励起極低温空間分解分光実験を完成させ、歪誘起励起子トラップ中では横波音響フォノン-励起子相互作用が活性化し、これが効果的に働くことで寿命内に 100 ミリケルビンを下回る低温まで励起子温度が冷却されることを見いだした。これは過去観測された最も低い励起子温度であり、目論見通り極低温で量子縮退した励起子系を定常的に生成できることを実証した。

光子数量子状態発生の第一の目標は単一光子源を得ることである。一方で量子情報処理の視点から、どれだけ単一光子に近いかを目的に応じて定量化することの重要性が明らかになってきた。井元らは、理想的な単一光子を得るかわりに、光子源の 2 光子以上の光子統計分布がサブポアソンのかを予め測定により評価すれば、既存の量子暗号通信装置にわずかな変更を加えるだけで、量子暗号通信光子源として使えることを示した。また評価手法も明確であり、デバイス・材料分野の研究者にとって評価しやすいものとなった。

より高度な量子情報処理のためには微小共振器と結合した半導体量子ドット等を利用する必要がある。そのために、 $\Lambda$  型準位をもつ単一量子系との強い非線形相互作用を利用したエンタングル光発生の研究としてハイブリッド量子中継の最適方式を提案した。この方法では共振器結合した  $\Lambda$  型準位をもつ単一量子系とコヒーレント光との非線形相互作用を用いて物質系と光のエンタングルメントを生成し、コヒーレント光を介して離れた物質系にエンタングルメントを生成する。この系における最適な測定を提案し、その最適パフォーマンスを示すことができた。

A02 班の秋山らは、1 周期から 100 周期までの世界最高品質の量子細線レーザー試料を作製することに成功し、光学利得スペクトル中のバンド端に著しい多体効果が現れ、光学利得の 1 次元状態密度による発散的増大が抑制されることを観測した。A04 理論グループと連携してその機構解明を目指し、このバンド端利得抑制効果が、キャリア間相互作用のコヒーレント部分とインコヒーレント部分による振動子強度の再構成とブロードニングによって生じていることを解明した。低しきい値近傍では、ファノ共鳴利得、励起子-励起子分子分布反転利得、荷電励起子利得など多彩な動的相関効果が出現する可能性が理論ないし実験により示された。

高品質の低次元半導体レーザー試料得られたことで、その物理計測法にも大きな進展が産まれた。例えば、キャリア温度や密度に応じてキャリア間相互作用を含む光学吸収利得スペクトル・ピーク利得などの定量評価法、相互作用を含めた定量理論計算などが開発された。詳細平衡関係式との比較を行うことにより、試料内のキャリア密度、キャリア温度、あるいは非平衡キャリア分布を定量評価する方法が開発された。さらに、クリーン量子細線試料の作製達成により、A03 班や A04 班との多くの共同研究が実現し、1 次元励起子の固有輻射寿命、高リユードベリ励起子状態、励起子モット転移などに関する基礎物理実験が進み、カーボンナノチューブ 1 次元励起子や GaAs 量子井戸 2 次元励起子系との対比が可能になった。これらは、計画および公募研究の小川、浅野、鈴浦、金光、石川らのグループとの連携の成果である。

秋山は、分担者・横山と共同で、 $1.55\ \mu\text{m}$  通信波長帯用 InGaAsP 系 DFB レーザーダイオードの電気パルス強励起とスペクトル切り出しにより 5ps 以下の短パルス発生に成功し、さらに短パルス限界を決めるチャープ特性の測定を行い、レート方程式理論を用いた解釈を得た。また、 $1\ \mu\text{m}$  帯 InGaAs レーザー、 $0.8\ \mu\text{m}$  帯 GaAs レーザー、 $0.4\ \mu\text{m}$  帯 InGaN レーザーにおいても、半導体レーザーの利得スイッチングによる短パルス発生の実験を行い、極めて類似の現象を観測し、全てに共通する普遍的な特性を抽出することが出来た。これらは、計画研究の小川、金光らのグループとの連携の成果である。

野村らは、mK 領域での極低温、強磁場領域において近接場顕微鏡を用いた量子ホール端状態の空間マッピング測定を行った。それまで、量子ホール端状態は走査型単一電子トランジスタ等のさまざまな手法により密度分布は調べられてはいたが、エネルギー準位に準共鳴励起して端状態のポテンシャルの空間分布を調べた例はなかった。準共鳴光励起により、局所的に任意の余剰エネルギーの光生成キャリアを半導体へテ

ロ接合試料中二次元平面内に生成する手法を編み出した。この手法により、二次元電子系端状態の圧縮性／非圧縮性液体によるポテンシャル分布を反映したマップ図を得ることに成功した。

$\nu = 1/3$  近傍の分数量子ホール領域の分光学的研究は従来 10 T 以上の強磁場で行われ、基底状態は完全スピン偏極状態とされていた。野村らは、低電子密度において高い移動度をもつ試料を用いて、6 T 以下の比較的小さい磁場において円偏光分解して発光測定し、スピン状態を含めた研究を実施した。その結果、 $\nu = 1/3$  近傍の  $\sigma$ -円偏光発光に、明確に分離された 4-5 つの発光ピークを初めて観測した。その内の一つは準電子励起の存在する  $\nu \geq 1/3$  においてのみ観測され、 $\nu < 1/3$  には見られなかった。この発光ピークは  $T \geq 700$  mK の高温で消失した。この結果は、球面上のスピン自由度を含む電子と正孔の有限系での厳密対角化に基づく数値計算結果と比較され、良く説明された。

二次元電子系において、乱雑静電ポテンシャルが支配する低電子密度での局在状態が電子密度の増加に伴って二次元電子ガス状態へと変化することと、光励起下の二次元電子+正孔系において、低電子密度領域で存在する荷電励起子状態が電子密度増加に伴って二次元電子ガス正孔状態へとクロスオーバーすることの対応関係は、これまで不明瞭であった。野村らは、極低温において電子密度と電場をパラメータとした発光スペクトルを系統的に測定し、電子密度の増加に伴う二次元電子系の遮蔽長の減少と、荷電励起子中の電子-正孔間のクーロン引力の遮蔽に伴う荷電励起子半径増大との対応関係を明らかにした。遮蔽長が荷電励起子半径とほぼ一致する電子密度を境にして荷電励起子状態と二次元電子ガス正孔状態がクロスオーバーすることを見出した。

A02 班公募研究では、H21-22 および H23-24 を通して参加した上智大・江馬のランダムレーザー、大阪府大・高橋和のシリコンラマンレーザーが発振に成功し、大きなインパクトを与えた。

A03 班の金光グループでは、化学的手法によって得られる特色ある半導体ナノ構造物質の高密度励起状態を時空間分解分光により研究し、ナノ物質の動的物性および動的電子相関効果が重要な役割をする光学現象の解明を目指した。顕微発光分光と時間分解ポンプ・プローブ分光を用いる時空間分解分光により、ナノ構造物質において少数の励起子・キャリアが関与した重要な基礎過程であるオージェ再結合過程およびマルチエキシトン生成・キャリア増幅過程の解明に取り組んだ。その成果は以下のとおりである(1)カーボンナノチューブ：ブライト準位とダーク準位間の励起子分布の決定。正孔ドーピングによる荷電励起子の発見。励起子-正孔間の量子化オージェ再結合寿命の決定。キャリアドーピングによるバンドギャップ収縮の観測。(2) ナノ粒子・量子ドット：光励起キャリアの 3 体衝突オージェ再結合過程速度の評価。オージェ再結合速度を利用した不純物イオンへのエネルギー移動速度の評価。ナノロッドのオージェ再結合過程における表面効果の解明。オージェ再結合過程およびマルチエキシトン生成過程における波数保存則の緩和の観測。(3) 量子井戸・量子細線：井戸サイズや井戸間の結合によるオージェ再結合速度の制御。オージェ再結合によるホットキャリアの生成。一次元励起子の高リドベルグ状態の観測。(4)酸化物・窒化物半導体：非輻射オージェ再結合速度の決定。高密度光励起および電子ドープによるバンド間発光の発見。高密度励起状態でのオージェ再結合および励起子-励起子消滅過程の解明。以上のように、半導体ナノ構造とバルク結晶において、高密度領域にある電子正孔系のキャリア・励起子ダイナミクスと新しい光学過程の発見を行った。ナノ構造半導体におけるオージェ再結合・マルチエキシトン生成の全容を明らかにした。

芦田グループでは、電子相関の大きな酸化物など新規絶縁体の高密度励起に伴う物質相変化のダイナミクスを追跡するため、強誘電性や磁性、超伝導性などの物性が顕著に現れる赤外光領域における時間分解計測、すなわち電場の時間応答を直接測定する時間領域分光法の広帯域化を行った。その結果、サブテラヘルツの遠赤外領域から、世界最高となる近赤外領域までのコヒーレント光の発生・検出に成功し、従来は帯域の制限で測定できなかった量子常誘電体のソフトモード、マルチフェロイクスのエレクトロマグノン、及び高温超伝導体の超伝導ギャップなどを観測することができた。さらに、テラヘルツ波の高強度化も進め、よく用いられる  $\text{LiNbO}_3$  結晶によるテラヘルツ変換の世界最高水準の効率を実現し、一方では低周波域での高効率化が期待される放射光とレーザーの組み合わせによるコヒーレントシンクロトロン放射の電場形状測定に初めて成功するなど、新規技術を確立した。これらを踏まえ、高強度テラヘルツ波照射による量子常誘電体の強誘電転移への可能性を示唆するソフトモードの変調の観測や高温超伝導体のテラヘルツ領域での電場波形に依存した非線形光学応答の発見など、新規絶縁体の制御へとつながる成果を挙げた。

A03 班では、金光と芦田を中心に多くの連携・共同研究を推進してきた。その例として、A02 班の野村・高橋と共同で、ナノシリコンの電子正孔プラズマから液滴への凝集過程の解明を行った。また、A03 班公募研究の片山と芦田・田中グループの共同研究で、 $\text{SrTiO}_3$  薄膜試料を用いてテラヘルツ波によって誘電性が制御できることを初めて示した。

A04 理論グループでは、小川らの共振器ポラリトン凝縮と半導体レーザー発振の物理の解明が白眉である。一定励起密度のポラリトン多体系の基底状態を決定し、低密度極限ではボース粒子として振舞うが、有限密

度では励起子成分である電子と正孔のフェルミ粒子としての性質が現れることを定量的に示した。光が存在しない励起子だけの系では、電子・正孔対の結合は実効的に弱まり束縛エネルギーが減少することが知られているが、光を含む共振器ポラリトン系では密度が高くなるほど（高密度のBCS領域）、電子正孔間の結合が強固になる。この成果をベースに、励起子ポラリトン凝縮とレーザー発振状態を統一的に扱う理論形式を提案し、ポラリトン凝縮とレーザーがどのように移り変わるかを明らかにした。平衡状態と非平衡定常状態との移り変わりを、同じ理論的枠組みの中でシームレスにつなぐことのできる理論は、現段階では世界初であり、国内外から注目を集めて多くの招待講演等が依頼されている。この理論の完成により、動的相関電子系の物理学だけでなく、非平衡統計物理学分野にも刺激を与えた。

浅野らの計画研究の中心成果は、動的相関電子系の基本となる高密度電子正孔系および電子系（正孔系）の準熱平衡状態の相図を決定したことである。励起子ガスの遮蔽効果と電子正孔ガスの遮蔽効果の両方を、自己無撞着に取り入れた点が斬新で、小川らの先行研究をさらに精密化・定量化することに成功した。さらに、半導体的カーボンナノチューブでの励起子分子や荷電励起子の研究もインパクトが大きい。カーボンナノチューブでは、その一次元性を反映して励起子分子も安定であると予想されていたが、実験では観測されず謎となっていた。そこで、既存の理論が無視してきたバンドの非放物線性、構造因子、遮蔽効果、自己エネルギー補正を再考すると、構造因子と遮蔽効果による相互作用の補正が非常に重要で、励起子分子の束縛エネルギーはこれまで予想されていた値の半分以下であることが明らかになった。A03 班の金光グループが発見したカーボンナノチューブの荷電励起子についても考察し、遮蔽と構造因子の効果が束縛エネルギーを小さく抑えることがわかった。この抑制効果は荷電励起子よりも励起子分子に対して強く効くため、荷電励起子の方が励起子分子よりも大きな束縛エネルギーを持つことを示した。

鈴浦らの計画研究の大きな成果は、カーボンナノチューブに関して、実験研究での決着が付いていなかった明暗励起子分裂構造を理論的に曖昧さ無く決定したことである。強束縛モデルにより電子間相互作用を取り入れ、励起子状態を計算したところ、多くの場合に暗励起子が明励起子の低エネルギー側に位置しており、非輻射緩和により発光が抑制される。さらに、チューブ構造と背景誘電率に依存して明暗分裂エネルギーが変化し、高次サブバンド間の励起子では、明暗励起子の順序が逆転する可能性があり、場合によっては励起子の基底状態が光学活性な明励起子となり得ることを示した。また、A03 班の金光グループの実験結果と比較することにより、キャリアドープカーボンナノチューブのバンドギャップ収縮に関して定量的な議論を行い、その機構を解明した。さらに、半導体量子井戸におけるバンド間遷移による光学伝導度が物質パラメータに依存しない微細構造定数に比例した普遍的な値を取ることを示したことも重要である。バンドの有効質量、遷移双極子モーメント、電子・正孔間相互作用に起因する小さな補正項が存在するが、オーダーを変えるものではなく、吸収の絶対強度を与えることから、半導体量子構造に対する吸収の絶対標準となり得ることを提案した。カーボンによる平面構造であるグラフェンと化合物半導体による量子井戸構造におけるバンド間光学吸収遷移には共通した普遍性があることを示している。さらに、カーボンナノチューブと半導体量子細線の電子状態とその相互作用効果にも共通性が見出され、ナノチューブの励起子状態の多くの性質が、量子細線の励起子状態において相互作用を大きくした極限として理解できることが明らかになった。

公募研究では、動的相関電子系の物理学の伝統的母体である半導体物理学だけでなく、量子光学、冷却原子系、第一原理数値計算、原子分子ダイナミクス、光メカニクス、物性基礎論などの多様な分野からの研究者が参画し、動的相関電子系を多角的に考究するとともに、異分野との融合を促進した。公募研究での特に重要な研究成果としては、青木・岡らによる非平衡下での量子多体現象の探索的研究である。相関電子系の新奇な非平衡現象として、強い ac 電場を印可すると負の温度（反転分布）が生じ、電子間相互作用が斥力から引力に転換することを理論的に示した。これにより、フェルミオン間の相互作用の制御が可能となり得る。引力への転換が実現すれば、超伝導も期待できよう。さらに、円偏光レーザーを量子スピン系に照射すると、その磁場成分（回転磁場）が xy 面内のときに、z 方向に磁化が誘起されるという新しい現象を見出した。これらは、実験条件などの詳細をさらに詰めなければならないものの、非平衡下では、物質機能に未知の大きな広がりがあることを予感させ、テラヘルツ物理学などの期待にもつながる重要な理論的示唆である。

## 9. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5ページ程度）

新学術領域研究（公募研究含む）の研究課題を元に発表した研究成果（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。論文の場合、計画研究・公募研究毎に順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に\*印を付してください。また、一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。

### 【主な論文】

#### 研究項目 A01

五神 真（計画研究）

1. K. Yoshioka, T. Ideguchi, André Mysyrowicz, and \*M. Kuwata-Gonokami, "Quantum inelastic collisions between paraexcitons in Cu<sub>2</sub>O", *Phys. Rev. B* **82**, 041201(R) (2010).
2. T. Higuchi, N. Kanda, H. Tamaru, and \*M. Kuwata-Gonokami, "Selection rules for light-induced magnetization of a crystal with threefold symmetry": The case of antiferromagnetic NiO", *Phys. Rev. Lett.* **106** (4) 047401 (2011). Selected as an Editors' Suggestion.
3. K. Konishi, M. Nomura, N. Kumagai, S. Iwamoto, Y. Arakawa, and \*M. Kuwata-Gonokami, "Circularly Polarized Light Emission from Semiconductor Planar Chiral Nanostructures", *Phys. Rev. Lett.*, **106** (5) 057402 (2011). Highlighted in Physical Review Focus.
4. K. Yoshioka, E. Chae, and \*M. Kuwata-Gonokami, "Transition to a Bose-Einstein condensate and relaxation explosion of excitons at sub-Kelvin temperatures", *Nat. Commun.* **2** : 328 (2011).
5. N. Kanda, T. Higuchi, H. Shimizu, K. Konishi, K. Yoshioka, and \*M. Kuwata-Gonokami, "The vectorial control of magnetization by light", *Nat. Commun.* **2** : 362 (2011).
6. \*N. Naka, I. Akimoto, M. Shirai, and K. Kan'no, "Time-resolved cyclotron resonance in cuprous oxide", *Phys. Rev. B* **85**, 035209 (2012).
7. T. Higuchi, H. Tamaru, and \*M. Kuwata-Gonokami, "Selection rules for angular momentum transfer via impulsive stimulated Raman scattering", *Phys. Rev. A* **87**, 013808 (2013).

井元信之（計画研究）

8. T. Tashima, T. Wakatsuki, S. K. Ozdemir, T. Yamamoto, M. Koashi, and \*N. Imoto, "Local Transformation of Two Einstein-Podolsky-Rosen Photon Pairs into a Three-Photon W State", *Phys. Rev. Lett.* **102**, 130502 (2009).
9. T. Tashima, T. Kitano, S. K. Ozdemir, T. Yamamoto, M. Koashi, and \*N. Imoto, "Demonstration of Local Expansion Toward Large-Scale Entangled Webs", *Phys. Rev. Lett.* **105**, 210503 (2010).
10. R. Ikuta, Y. Ono, T. Tashima, T. Yamamoto, M. Koashi, and \*N. Imoto, "Efficient decoherence-free entanglement distribution over lossy quantum channels", *Phys. Rev. Lett.* **106**, 110503 (2011).
11. R. Ikuta, Y. Kusaka, T. Kitano, H. Kato, T. Yamamoto, M. Koashi, and \*N. Imoto, "Wide-band quantum interface for visible-to-telecommunication wavelength conversion", *Nat. Commun.* **2** :537 (2011).
12. K. Azuma, H. Takeda, M. Koashi, and \*N. Imoto, "Quantum repeaters and computation by a single module: Remote nondestructive parity measurement", *Phys. Rev. A* **85**, 062309 (2012).
13. R. Ikuta, H. Kato, Y. Kusaka, S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, M. Fujiwara, T. Yamamoto, M. Koashi, M. Sasaki, Z. Wang, and \*N. Imoto, "High-fidelity conversion of photonic quantum information to telecommunication wavelength with superconducting single-photon detectors", *Phys. Rev. A* **87**, 010301(R) (2013).

（公募研究）

14. S. Yasukochi, T. Murai, S. Moritsubo, T. Shimada, S. Chiashi, S. Maruyama, and \*Y. K. Kato, "Gate-induced blueshift and quenching of photoluminescence in suspended single-walled carbon nanotubes", *Phys. Rev. B* **84**, 121409(R) (2011).
15. T. Suzuki and \*R. Shimano, "Cooling dynamics of photoexcited carriers in Si studied using optical pump and terahertz probe spectroscopy", *Phys. Rev. B* **83**, 085207(2011).
16. T. Suzuki and \*R. Shimano, "Exciton Mott transition in Si revealed by terahertz spectroscopy", *Phys. Rev. Lett.* **109**, 046402 (2012).
17. \*H. Kosaka, T. Inagaki, R. Hitomi, F. Izawa, Y. Rikitake, H. Imamura, Y. Mitsumori and K. Edamatsu, "Coherent transfer of time-bin photons to electron spins in a semiconductor", *Phys. Rev. A*, **85**, 042304 (2012).

#### 研究項目 A02

秋山英文（計画研究）

18. \*T. Ihara, S. Maruyama, M. Yoshita, H. Akiyama, L. N. Pfeiffer, K. W. West, "Thermal-equilibrium relation between the optical emission and absorption spectra of a doped semiconductor quantum well", *Phys. Rev. B* **80**, 033307 (2009).
19. \*M. Okano, P. Huai, M. Yoshita, S. Inada, H. Akiyama, K. Kamide, K. Asano, and T. Ogawa, "Robust carrier-induced suppression of peak gain inherent to quantum-wire lasers", *J. Phys. Soc. Jpn.* **80**, 114716 (2011).
20. \*M. Yoshita, T. Okada, H. Akiyama, M. Okano, T. Ihara, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, "Quantitative absorption spectra of quantum wires measured by analysis of attenuated internal emissions", *Appl. Phys. Lett.* **100**, 112101 (2012).
21. \*M. Yoshita, K. Kamide, H. Suzuura, and H. Akiyama, "Applicability of continuum absorption in semiconductor quantum wells to absolute absorption-strength standards", *Appl. Phys. Lett.* **101**, 032108 (2012).
22. \*M. Okano, Y. Kanemitsu, S. Chen, T. Mochizuki, M. Yoshita, H. Akiyama, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, "Observation of high Rydberg states of one-dimensional excitons in GaAs quantum wires by

- magneto-photoluminescence excitation spectroscopy", *Phys. Rev. B* **86**, 085312 (2012).
23. \*S. Chen, M. Yoshita, A. Ishikawa, T. Mochizuki, S. Maruyama, H. Akiyama, Y. Hayamizu, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, "Intrinsic radiative lifetime derived via absorption cross section of one-dimensional excitons", *Scientific Reports* **3**, 1941 (2013).
  24. \*S. Chen, M. Yoshita, A. Sato, T. Ito, H. Akiyama, and H. Yokoyama, "Dynamics of short-pulse generation via spectral filtering from intensely excited gain-switched 1.55- $\mu\text{m}$  distributed-feedback laser diodes", *Optics Express* **21**, 10597 (2013).
- 野村晋太郎 (計画研究)
25. H. Ito, K. Furuya, Y. Shibata, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Tamura, Y. Ootuka, and \*S. Nomura, "Near-Field Optical Mapping of Quantum Hall Edge States", *Phys. Rev. Lett.* **107**, 256803 (2011).
  26. M. Yamaguchi, \*S. Nomura, H. Tamura, and T. Akazaki, "Measurement of photoluminescence spectral linewidth of a GaAs quantum well in perpendicular electric fields: Evidence of a crossover from trions to an electron-hole gas", *Phys. Rev. B* **87**, 081310 (2013).
  27. \*S. Nomura, H. Tamura, M. Yamaguchi, and T. Akazaki, and Y. Hirayama, "Exchange energy enhanced g-factors obtained from Landau fan diagrams at low magnetic fields", *Phys. Rev. B* **87**, 085318 (2013).
- (公募研究)
28. Y. Inose, M. Sakai, \*K. Ema, A. Kikuchi, K. Kishino, and T. Ohtsuki, "Light Localization Characteristics in a Random Configuration of Dielectric Cylindrical Columns", *Phys. Rev. B* **82**, 205328 (2010).
  29. \*Y. Takahashi, Y. Inui, M. Chihara, T. Asano, R. Terawaki, and S. Noda, "A micrometer-sized Raman silicon laser with microwatt threshold", *Nature* (2013) 印刷中.
- 研究項目 A03
- 金光義彦 (計画研究)
30. T. Tayagaki, S. Fukatsu, and \*Y. Kanemitsu, "Photoluminescence dynamics and reduced Auger recombination in  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  superlattices under high-density photoexcitation", *Phys. Rev. B* **79**, 041301(R) (2009). Selected to Editors' Suggestion.
  31. Y. Yamada, H. Yasuda, T. Tayagaki, and \*Y. Kanemitsu, "Temperature dependence of photoluminescence spectra of undoped and electron-doped  $\text{SrTiO}_3$ : Crossover from Auger recombination to single-carrier trapping", *Phys. Rev. Lett.* **102**, 247401 (2009).
  32. Y. Yamada and \*Y. Kanemitsu, "Band-to-band photoluminescence in  $\text{SrTiO}_3$ ", *Phys. Rev. B* **82**, 121103(R) (2010).
  33. R. Matsunaga, K. Matsuda, and \*Y. Kanemitsu, "Observation of charged excitons in hole-doped carbon nanotubes using photoluminescence and absorption spectroscopy", *Phys. Rev. Lett.* **106**, 037404 (2011). Selected to Editors' Suggestion, Selected for a *Viewpoint* in Physics.
  34. \*Y. Kanemitsu, "Excitons in semiconducting carbon nanotubes: Diameter-dependent photoluminescence spectra", *Phys. Chem. Chem. Phys.* **13**, 14879 (2011).
  35. T. Nishihara, Y. Yamada, and \*Y. Kanemitsu, "Dynamics of exciton-hole recombination in hole-doped single-walled carbon nanotubes", *Phys. Rev. B* **86**, 075449 (2012).
  36. K. Ueda, T. Tayagaki, M. Fukuda, M. Fujii, and \*Y. Kanemitsu, "Breakdown of the  $k$ -conservation rule in quantized Auger recombination in  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  nanocrystals", *Phys. Rev. B* **86**, 155316 (2012).
  37. Y. Kimoto, M. Okano, and \*Y. Kanemitsu, "Observation of excited-state excitons and band-gap renormalization in hole-doped carbon nanotubes using photoluminescence excitation spectroscopy", *Phys. Rev. B* **87**, 195416 (2013).
- 芦田昌明 (計画研究)
38. \*H. Watanabe, H. Hirori, G. Molnár, A. Bousseksou, and K. Tanaka, "Temporal decoupling of spin and crystallographic phase transitions in  $\text{Fe}(\text{PTZ})_6(\text{BF}_4)_2$ ", *Phys. Rev. B* **79**, 180405(R) (2009).
  39. H. Hirori, M. Nagai, and \*K. Tanaka, "Excitonic Interactions with Intense Terahertz Pulses in  $\text{ZnSe}/\text{ZnMgSSe}$  Multiple Quantum Wells", *Phys. Rev. B* **81**, 081305(R) (2010). Selected to Editor's suggestion.
  40. \*I. Katayama, R. Akai, M. Bito, H. Shimosato, K. Miyamoto, H. Ito, and M. Ashida, "Ultrabroadband terahertz generation using DAST single crystals", *Appl. Phys. Lett.* **97**, 021105 (2010).
  41. \*H. Hirori, K. Shinokita, M. Shirai, S. Tani, Y. Kadoya, and K. Tanaka, "Extraordinary carrier multiplication gated by a picosecond electric field pulse", *Nat. Commun.* **2**, 594 (2011).
  42. \*I. Katayama, H. Shimosato, M. Bito, K. Furusawa, M. Adachi, M. Shimada, H. Zen, S. Kimura, N. Yamamoto, M. Hosaka, M. Katoh, and M. Ashida, "Electric field detection of coherent synchrotron radiation in a storage ring generated using laser bunch slicing", *Appl. Phys. Lett.* **100**, 111112 (2012).
  43. \*S. Tani, F. Blanchard, and K. Tanaka, "Ultrafast Carrier Dynamics Under High Electric Field In Graphene", *Phys. Rev. Lett.* **109**, 166603 (2012).
- (公募研究)
44. \*S. Taie, Y. Takasu, S. Sugawa, R. Yamazaki, T. Tsujimoto, R. Murakami, and Y. Takahashi, "Realization of a  $\text{SU}(2)*\text{SU}(6)$  System of Fermions in a Cold Atomic Gas", *Phys. Rev. Lett.* **105**, 190401 (2010).
  45. \*H. Hara, Y. Takasu, Y. Yamaoka, J. M. Doyle, and Y. Takahashi, "Quantum Degenerate Mixtures of Alkali and Alkaline-Earth-Like Atoms", *Phys. Rev. Lett.* **106**, 205304 (2011).
  46. \*Y. Okimoto, M. Kurashima, K. Seko, T. Ishikawa, K. Onda, S. Koshihara, T. Kyomen, and M. Itoh, "Acceleration of domain wall movement by photoirradiation in perovskite-type cobaltite", *Phys. Rev. B* **83**, 161101(R) (2011).



47. \*Y. Takasu, Y. Saito, \*Y. Takahashi, M. Borkowski, R. Ciurylo, and P. Julienne, "Controlled Production of Subradiant States of a Diatomic Molecule in an Optical Lattice", *Phys. Rev. Lett.* **108**, 173002 (2012).
48. \*I. Katayama, H. Aoki, J. Takeda, H. Shimosato, M. Ashida, R. Kinjo, I. Kawayama, M. Tonouchi, M. Nagai and K. Tanaka, "Ferroelectric Soft Mode in a SrTiO<sub>3</sub> Thin-Film Impulsively Driven to the Anharmonic Regime Using Intense Picosecond Terahertz Pulses", *Phys. Rev. Lett.* **108**, 097401 (2012).
49. F. Liu, \*T. Makino, T. Yamasaki, K. Ueno, A. Tsukazaki, T. Fukumura, Y. F. Kong, and M. Kawasaki, "Ultrafast time-resolved Faraday rotation in EuO thin films", *Phys. Rev. Lett.* **108**, 257401 (2012).
50. \*T. Satoh, Y. Terui, R. Moriya, B. A. Ivanov, K. Ando, E. Saitoh, T. Shimura, and K. Kuroda, "Directional control of spin wave emission by spatially shaped light", *Nature Photon.* **6**, 662 (2012).
51. Y. Kobayashi, Y. Nonoguchi, L. Wang, T. Kawai, and \*N. Tamai, "Dual Transient Bleaching of Au/PbS Hybrid Core/Shell Nanoparticles", *J. Phys. Chem. Lett.* **3**, 1111 (2012).
52. \*Y. Ogawa, H. Tahara, and F. Minami, "Non-Markovian nature of exciton-exciton scattering in a GaAs single quantum well observed by phase-locked laser pulses", *Phys. Rev. B* **87**, 165305 (2013).

研究項目 A04

小川哲生 (計画研究)

53. \*K. Kamide and T. Ogawa, "What determines the wave function of electron-hole pairs in polariton condensates? ", *Phys. Rev. Lett.* **105**, 056401 (2010).
54. \*K. Kamide and T. Ogawa, "Ground state properties of microcavity polariton condensates for arbitrary excitation density", *Phys. Rev. B* **83**, 165319 (2011).
55. \*R. Maezono, P. L. Rios, R. J. Needs, and T. Ogawa, "Excitons and biexcitons in symmetric electron-hole bilayers", *Phys. Rev. Lett.* **110**, 216407 (2013).
56. \*K. Kamide, M. Yamaguchi, T. Kimura, and T. Ogawa, "First-order superfluid-Mott-insulator transition for quantum optical switching in cavity QED arrays with two cavity modes", *Phys. Rev. A* **87**, 053842 (2013).
57. \*M. Yamaguchi, K. Kamide, R. Nii, T. Ogawa, and Y. Yamamoto, "Second thresholds in BEC-BCS-laser crossover of exciton-polariton systems", *Phys. Rev. Lett.* 印刷中.

鈴浦秀勝 (計画研究)

58. \*Y. Tomio, H. Suzuura and T. Ando, "Cross-polarized excitons in double-wall carbon nanotubes", *Phys. Rev. B* **86**, 245428 (2012).
59. \*Y. Tomio, H. Suzuura and T. Ando, "Interwall screening and excitons in double-wall carbon nanotubes", *Phys. Rev. B* **85**, 085411 (2012).

浅野建一 (計画研究)

60. \*Y. Furukawa, T. Ohashi, Y. Koyama, and N. Kawakami, "Mott transition in the Hubbard model on the anisotropic kagome lattice", *Phys. Rev. B* **82**, 161101 (2010).
61. \*K. Watanabe and K. Asano, "Biexcitons in semiconducting single-walled carbon nanotubes", *Phys. Rev. B* **83**, 115406 (2011).
62. \*K. Asano and C. Hotta, "Designing Dirac points in two-dimensional lattices", *Phys. Rev. B* **83**, 245125 (2011).
63. T. Yoshioka and \*K. Asano, "Exciton-Mott Physics in a Quasi-One-Dimensional Electron-Hole System", *Phys. Rev. Lett.* **107**, 256403 (2011).
64. K. Watanabe and \*K. Asano, "Trions in semiconducting single-walled carbon nanotubes", *Phys. Rev. B* **85**, 035416 (2012).
65. T. Yoshioka and \*K. Asano, "Classical-quantum crossovers in quasi-one-dimensional electron-hole systems: Exciton-Mott physics and interband optical spectra", *Phys. Rev. B* **86**, 115314 (2012).

(公募研究)

66. \*K. Inaba and S. Suga, "Finite-Temperature Properties of Attractive Three-Component Fermionic Atoms in Optical Lattices", *Phys. Rev. A* **80**, 041602(R) (2009).
67. A. Kukuu, T. Amano, T. Karasawa, N. Maeshima, and \*K. Hino, "Instability of dynamic localization in the intense terahertz-driven semiconductor Wannier-Stark ladder due to the dynamic Fano resonance", *Phys. Rev. B* **82**, 115315 (2010).
68. S. Miyatake, K. Inaba and \*S. Suga, "Three-Component Fermionic Atoms with Repulsive Interaction in Optical Lattices ", *Phys. Rev. A* **81**, 021603(R) (2010).
69. \*K. Koshino, S. Ishizaka and Y. Nakamura, "Deterministic photon-photon (SWAP)<sup>1/2</sup> gate using a  $\Lambda$  system", *Phys. Rev. A* **82** 010301(R) (2010).
70. \*K. L. Ishikawa and K. Ueda, "Competition of resonant and nonresonant paths in resonance-enhanced two-photon single ionization of He by an ultrashort extreme-ultraviolet pulse", *Phys. Rev. Lett.* **108**, 033003 (2012).
71. K. T. Kim, D. H. Ko, J. Park, N. N. Choi, C. M. Kim, K. L. Ishikawa, J. Lee, and \*C. H. Nam, "Amplitude and phase reconstruction of electron wave packets for probing ultrafast photoionization dynamics", *Phys. Rev. Lett.* **108**, 093001 (2012).
72. \*K. Koshino and Y. Matsuzaki, "Entangling homogeneously broadened matter qubits in the weak-coupling cavity-QED regime", *Phys. Rev. A* **86** 020305(R) (2012).
73. S. Sugiura and \*A. Shimizu, "Thermal Pure Quantum States at Finite Temperature", *Phys. Rev. Lett.* **108**, 240401 (2012). Selected as Editors' suggestion.

74. Y. Kanamori, J. Ohara and \*S. Ishihara, "Photoinduced magnetic bound state in an itinerant correlated electron system with a spin-state degree of freedom", *Phys. Rev. B* **86**, 045137 (2012).
75. N. Tsuji, T. Oka, \*H. Aoki and P. Werner, "Repulsion-to-attraction transition in correlated electron systems triggered by a monocycle pulse", *Phys. Rev. B* **85**, 155124 (2012).
76. C.N.M. Ouma, M.Z. Mapelu, N.W. Makau, G.O. Amolo, and \*R. Maezono, "Quantum Monte Carlo (QMC) study of Pressure-induced B3-B1 phase transition in GaAs", *Phys. Rev. B* **86** 104115 (2012).
77. \*D. Inotani, R. Watanabe. M. Sigrist, and Y. Ohashi, "Pseudogap phenomenon in an ultracold Fermi gas with a  $p$ -wave pairing interaction", *Phys. Rev. A* **85**, 053628 (2012).
78. \*N. Maeshima and K. Hino, "Dynamical Fano resonance of an exciton in laser-driven semiconductor superlattices", *Phys. Rev. B* **85**, 205305 (2012).
79. \*K. Inaba and S. Suga, "Superfluid state of repulsively interacting three-component fermionic atoms in optical Lattices", *Phys. Rev. Lett.* **108**, 255301 (2012).

【書籍】 総括班のメンバーが中心となって、固体物理特集号「動的光物性の新展開」 2011年11月（五神、十倉、永長編集アグネ出版）を発行した。本メンバーの執筆記事は8件である。

【ホームページ】 <http://www.dyce-opt.org/>

#### 【主催シンポジウム等】

- ・第1回 DYCE シンポジウム 日時：2009年2月14日（土）～2009年2月15日（日）  
場所：東京大学理学部1号館小柴ホール
- ・第2回 DYCE シンポジウム 日時：2009年8月20日（木）～2009年8月21日（金）  
場所：京都大学吉田キャンパス ICEMS
- ・第3回 DYCE シンポジウム 日時：2010年1月6日（水）～2010年1月7日（木）  
場所：京都大学吉田キャンパス iCeMS
- ・第4回 DYCE シンポジウム 日時：2011年1月6日（木）～2011年1月7日（金）  
場所：京都大学吉田キャンパス iCeMS
- ・第5回 DYCE シンポジウム 日時：2011年06月13日（月）～2011年06月14日（火）  
場所：京都大学化学研究所（京都大学 宇治キャンパス）
- ・第6回 DYCE シンポジウム 日時：2012年1月5日（木）～2012年1月6日（金）  
場所：京都大学化学研究所（京都大学 宇治キャンパス）
- ・第7回 DYCE シンポジウム 日時：2012年12月25日（火）～2012年12月27日（木）  
場所：東京大学浅野キャンパス 武田先端知ビル 武田ホール
- ・2012 DYCE International Workshop 日時：2012年8月7日（火）～2012年8月11日（土）  
場所：屈斜路プリンスホテル
- ・2010 合同シンポジウム 日時：2010年5月27日（木）～2010年5月28日（金）  
場所：日本科学未来館未来 CAN ホール
- ・2012 DYCE-ASIA Workshop 日時：2012年4月23日（木）～2012年4月24日（火）  
場所：東京大学 本郷キャンパス 小柴ホール
- ・2012 DYCE 公開フォーラム：光科学の新しい可能性に挑戦する 日時：2012年8月6日（月）  
場所：東京大学 本郷キャンパス 小柴ホール
- ・第1回 DYCE 若手道場 日時：2009年9月14日（月）～2009年9月15日（火）  
場所：北海道大学 百年記念会館
- ・第2回 DYCE 若手道場 日時：2010年10月5日（火）～10月6日（水）  
場所：有馬温泉 メーブル有馬
- ・第3回 DYCE 若手道場 日時：2011年9月26日（月）～9月27日（火）  
場所：大阪大学 理学部H棟D501講義室
- ・第1回 DYCE 理論ワークショップ 日時：2010年8月9日（月）～2010年8月10日（火）  
場所：大阪大学理学部H棟7階 大セミナー室（H701）

#### 【広報誌】

- ・広報第1号（2009年6月発行）ニュースレター1
- ・広報第2号（2009年8月発行）第2回シンポジウム概要集
- ・広報第3号（2009年9月発行）第1回DYCE若手道場講演概要集
- ・広報第4号（2009年10月発行）研究者名簿
- ・広報第5号（2009年12月発行）研究紹介
- ・広報第6号（2010年1月発行）第3回シンポジウム概要集
- ・広報第7号（2010年8月発行）第1回DYCE理論ワークショップ概要集
- ・広報第8号（2010年10月発行）DYCE解説論文集
- ・広報第9号（2010年10月発行）第2回DYCE若手道場講演概要集
- ・広報第10号（2011年1月発行）第4回シンポジウム概要集

- ・ 広報第 11 号 (2011 年 3 月発行) DYCE 中間報告
- ・ 広報第 12 号 (2011 年 6 月発行) 研究者名簿
- ・ 広報第 13 号 (2011 年 6 月発行) 第 5 回シンポジウム概要集
- ・ 広報第 14 号 (2011 年 9 月発行) 領域合同若手道場講演概要集
- ・ 広報第 15 号 (2012 年 1 月発行) 第 6 回シンポジウム概要集
- ・ 広報第 16 号 (2012 年 4 月発行) DYCE-ASIA Workshop Abstracts
- ・ 広報第 17 号 (2012 年 8 月発行) 公開フォーラム-光科学の新しい可能性に挑戦する-
- ・ 広報第 18 号 (2012 年 8 月発行) DYCE International Workshop Abstracts
- ・ 広報第 19 号 (2012 年 12 月発行) 第 7 回シンポジウム概要集

**【一般向けアウトリーチ活動】**

- ・ 秋山英文ら、「夏休み子供科学教室」2009～2012 年・毎年、柏市・東葛テクノプラザ会場
- ・ 金光義彦ら、「京都大学アカデミックデイ：みんな対話する京都大学の日」2011 年度 (2012 年 3 月 10 日)、2012 年度 (2012 年 9 月 2 日)、京都大学百周年時計台記念館
- ・ 2012 DYCE 公開フォーラム「光科学の新しい可能性に挑戦する」2012 年 8 月 6 日 (月)、東京大学小柴ホール

## 10. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度（1ページ程度）

研究領域の研究成果が、当該学問分野や関連分野に与えたインパクトや波及効果などについて記述してください。

A01 五神らが行ったバルク半導体における量子縮退した励起子ボース・アインシュタイン凝縮 (BEC)、電子正孔系の研究は当該分野の長年の挑戦の集大成である。しかも、近年議論が活発化している共振器ポラリトン凝縮と比較して光との結合が弱い極限にあり、光励起状態が物質相としていかなる諸相を示すかという立場で数々の知見を基礎物理学分野に提供している。励起子系の散乱断面積や寿命、有効質量といった物質系としての重要なパラメータを定量的に把握した上で、量子縮退状態への道筋を論理的に論じ実験を展開してきた点がインパクトある成果である。

量子情報分野において、これまでは「とにかく  $g^{(2)}$  の小さな光源を」という光源開発側の努力と「小さな  $g^{(2)}$  であることが重要なのか？本当は何が本質か？」という理論側の努力の融合が考えられずに、独立に研究されて来た。井元らは、量子光学の基本から量子情報処理のあり方までを捉え、両者を結びつけた提案や評価手法の指針を提供した。これらは量子力学における究極の光制御に関する学理を総合的かつ本質的なところで強く推し進めることに寄与し、量子情報分野の発展に大きく寄与した。

A02 秋山らは、量子細線レーザーの光学利得スペクトル中のバンド端に著しい多体効果が現れ、光学利得の1次元状態密度による発散的増大が抑制されることを観測し、このバンド端利得抑制効果が、キャリア間相互作用のコヒーレント部分とインコヒーレント部分による振動子強度の再構成とブロードニングによって生じていることを解明した。これまでの考え（状態密度が先鋭化に伴うバンド端の光学利得の発散的増大）とは大きく異なり、励起状態でのキャリア間相互作用に起因する動的相関効果の重要性を明確にした重要な研究成果である。今後、非平衡物理学での一般論やレーザー光学への波及が期待される。野村らは、低電子密度領域で電気伝導より高感度な発光を利用して、二次元電子状態を動的相関を深く理解した。極低温、強磁場領域での量子ホール状態等の光学的測定手法は、トポロジカルな量子効果を示す物質系の研究の向上と強化につながると期待される。信頼性の高い高品質半導体は、電子系の多体相関効果の基礎物理の探求において不可欠な舞台となっており、さらに微細化が進む将来の FET、超高速光変調器等で起こり得る問題の解決に大きく寄与すると思われる。当該研究領域の進展は、理学・工学分野を含めた我が国の学術水準の向上・強化につながっている。

A03 班の主な成果として、ナノ構造半導体における高密度領域にある電子正孔系のキャリア・励起子ダイナミクスの解明とテラヘルツ領域を中心とする新しい光源・分光法の開発をあげることができる。特に、様々な材料におけるオージェ再結合過程の解明は、新しいフォトニクスデバイスの基礎となる。ナノ構造半導体におけるオージェ再結合・マルチエキシトン生成の深い理解は、太陽電池や波長可変素子など新しい応用研究への展開が期待されている。学術的にも、ナノ構造固有の離散的な緩和時間で記述できる量子化オージェ再結合の理解や3-4個の少数のキャリアや励起子が相互作用することにより多彩な光学現象が発現することを示したことは、新しい動的物性の分野の開拓を示すものである。

時間領域分光法の広帯域化は動的物性科学における重要課題であり、その最高記録としてサブテラヘルツから近赤外域の 200THz までの赤外全域をコヒーレント分光でカバーすることに成功したことは、この手法の新たな可能性を明示した。赤外域の超精密分光のみならず、テラヘルツ波通信と光通信をつなぐ新たな技術への展開も期待される。テラヘルツ波の世界最高強度達成は、テラヘルツ波による非線形分光という新たな学問分野を切り拓くものであった。これらの成果は、特色ある物質と新しい光源・分光法を組み合わせることで、新しい現象の発見や新しい物質相の発見を期待させるものであり、物質科学へのインパクトは計り知れない。

A04 班での他分野への波及効果の大きな成果は、小川らの共振器ポラリトン凝縮と半導体レーザー発振とのクロスオーバー理論が、非平衡統計力学での長年の懸案問題である「平衡-非平衡クロスオーバー問題」に、解明への重要なヒントを提供したことである。従来の統計力学は、熱平衡状態を念頭に構築されているため、レーザー発振のような非平衡状態を記述することができない。熱平衡から少しだけ離れた非平衡状態は、線形応答理論などによって記述されることが分かっているが、レーザーにはそれも適用できない。このような、熱平衡から遠く離れた非平衡状態において、熱力学類似の普遍理論を構築することは、物性基礎論研究者の長年の夢である。小川らの成果は、熱平衡状態と、熱平衡から遠く離れた非平衡定常状態の両方を、一つの理論で包含して記述している。すなわち、熱平衡と非平衡の類似点や相違点、それらの移り変わりが理論的に示すことができるだけでなく、「非平衡とは何か？」の定義の再検討にもつながるインパクトある成果である。