戦略的創造研究推進事業
個人型研究（さきがけ）
追跡評価用資料

研究領域
「量子と情報」

研究総括：細谷　曉夫

2014 年 5 月

目 次

要旨 1

第 1 章 追跡調査概要..... 2

1.1 研究領域概要 2

1.1.1 戦略目標 2

1.1.2 研究総括 2

1.1.3 領域アドバイザー..... 2

1.1.4 研究課題および研究代表者..... 3

1.2 研究領域終了後の進展と波及効果..... 6

1.2.1 研究成果の発展状況や活用状況..... 6

1.2.2 研究成果の科学技術的および社会・経済的な波及効果..... 6

1.3 本研究領域の展開状況（系譜図）..... 6

第 2 章 追跡調査 8

2.1 追跡調査について..... 8

2.1.1 調査の目的..... 8

2.1.2 調査の対象..... 8

2.1.3 調査の方法..... 8

2.2 アウトプット概要..... 9

2.2.1 研究助成金から見た研究の発展状況..... 9

2.2.2 論文 15

2.2.3 特許 16

2.3 アウトカム 21

2.3.1 科学技術的アウトカム..... 21

2.3.2 社会・経済的アウトカム..... 22

第 3 章 各研究課題の主な研究成果および波及効果..... 23

3.1 2003 年度採択課題 23

3.1.1 量子縺れ最適回復プロトコル導出を可能にする量子状態の判定・測定法（石坂智）..... 23

3.1.2 固有ジョセフソン接合と超伝導共振器を用いた量子状態制御の研究（北野　晴久）..... 25

3.1.3 単一量子ドットにおける多光子量子操作（黒田　隆）..... 28

3.1.4 多体量子系としての量子計算機の分析（清水　明）..... 30

3.1.5 量子鍵を用いた次世代量子暗号プロトコル（村尾　美緒）..... 32

3.2 2004 年度採択課題 34

3.2.1 量子ビット構築へ向けてのヘリウム液面電子量子ドットの研究（池上　弘樹）..... 34

3.2.2 超伝導クーパー対を使用した電子 EPR 対高密度ビームの開発（趙　福來）. 36

3.2.3 光学実験を手段とした量子情報処理のための量子力学的物理現象の研究(長谷川

祐司）..... 38
3.2.4 代数的量子情報処理技術の研究（濵田　充）..... 40
3.2.5 量子非局所性を用いた情報処理における不可逆性（森越　文明）..... 42
3.3 2005 年度採択課題..... 43
3.3.1 異種原子組み替えによる固体表面量子ビットの実現（阿部　真之）..... 43
3.3.2 測定過程を使った非古典的な原子集団スピン励起の生成と制御（宇佐見　康二）..... 45
3.3.3 量子通信路の可逆性と情報理論的・幾何学的保存量の評価（小川　朋宏）.. 46
3.3.4 単一分子分光による固体中の単一スピンの観測（松下　道雄）..... 48
3.3.5 新しい核磁気共鳴を用いた核スピンの量子状態制御（遊佐　剛）..... 50
第 4 章 科学技術イノベーションに資する研究成果の状況..... 52
4.1 異種原子組み替えによる固体表面量子ビットの実現（阿部　真之）..... 52
4.2 単一分子分光による固体中の単一スピンの観測（松下　道雄）..... 55
4.3 代数的量子情報処理技術の研究（濵田　充）..... 57
4.4 光学実験を手段とした量子情報処理のための量子力学的物理現象の研究(長谷川　祐司）..... 60

要旨

本資料は、戦略的創造研究推進事業のさきがけの研究領域「量子と情報」(2002～2007 年度）において、研究終了後一定期間を経過した後、副次的効果を含めて研究成果の発展状況や活用状況を明らかにし、(国立研究開発法人）科学技術振興機構（JST）事業及び事業運営の改善に資するために、追跡調査を実施した結果をまとめたものである。
第一章は、研究領域の戦略目標、領域概要、研究総括、領域アドバイザー、研究課題と研究代表者を記載し、研究領域終了後の進展と波及効果について概説した。
第二章は、追跡調査の目的、調査の対象、調査の方法（研究助成金、論文、特許）を記載し、各研究代表者のアウトプットの概要と、受賞歴や報道等から見た科学技術的および社会・経済的アウトカムの概要を記述した。
第三章は、研究領域終了後の各研究課題の研究の継続と発展状況について、科学技術の進歩の貢献および社会・経済的な波及効果の観点から詳述し、併せて研究成果に関連した主な成果論文を添付した。
第四章は、研究領域終了後に特に大きな成果を挙げている研究者にインタビューを行った結果を記述した。

この領域では、「情報通信技術に革新をもたらす量子情報処理の実現に向けた技術基盤の構築」、「新しい原理による高速大容量情報処理技術の構築」の２つが戦略目標として設定され、量子力学的現象を利用した情報処理技術を実現するために、量子力学と情報処理の間に横たわる諸問題の解決に資する様々な研究が行われた。
戦略目標は量子力学的もつれ効果を活用することにより超高速計算や大容量通信を行うことを可能とする量子情報処理の実現を目指すとともに、量子コンピュータ、分子コンピュータ、ニューロコンピュータ等を含む新しい原理に基づく計算機構の探索を行うことが重要であるとの認識による。
追跡調査の結果、本領域で得られた研究成果は終了後も発展、深化されているのみならず、量子力学の理論における新たな発見や原子レベルでの観測技術の高度化につながっていることがわかった。

特に注目すべき研究成果としては、中性子観測によるハイゼンベルクの不確定性原理の破れや中性子の粒子性、波動性の分離観測（長谷川祐司)、単一分子分光による固体中の単一スピンの観測(松下道雄)、異種原子組み替えによる固体表面量子ビットの実現(阿部真之)、パフォーマンスの高い量子誤り訂正符号の開発（濱田充）が挙げられ、これらの研究者にはインタビューを実施し、概要をまとめた。

第 1 章 追跡調査概要

1.1 研究領域概要

1.1.1 戦略目標

本研究領域は、以下に示す 2 項目の戦略目標の下で発足した。

① 「情報通信技術に革新をもたらす量子情報処理の実現に向けた技術基盤の構築」

量子力学的もつれ効果を活用することにより超高速計算や大容量通信を行うことを可能とする量子情報処理の実現を目指し、光子、電子スピン、核スピン等を用いた量子情報処理素子の研究開発を行うとともに、アルゴリズムや回路、システムも含めた包括的な研究開発を同時並行的に行い、競争的環境下において実施することにより、最も有効なアプローチを抽出し、量子情報処理技術の実現を支える技術基盤を構築すること。

・量子情報処理技術の実現に向けた量子デバイスの研究開発（高性能化・多量子ビット化、長寿命化・安定化）

・量子情報処理技術の実現に向けたアルゴリズム、システム等の研究開発

② 「新しい原理による高速大容量情報処理技術の構築」

現行のコンピュータをベースとした情報処理技術は、ハードウェア・ソフトウェア共に飛躍的な進歩を遂げ、20 世紀における情報革命として社会の変革に多大な役割を果たしてきた。しかしながら、デバイスの微細化やアルゴリズム上の限界によりこれまでのペースでの性能・容量の向上は望めなくなってきている。

一方、コミュニケーションの多様化に伴う通信・計算容量の増大や、立体映像データ処理や複雑系の解析を行うための高速演算の必要性等、高速大容量情報処理技術に対する社会的ニーズは依然として高く、これらのニーズに応じた技術の確立が喫緊の課題となっている。このため、戦略目標として「新しい原理による高速大容量情報処理技術の構築」を設定し、量子コンピュータ、分子コンピュータ、ニューロコンピュータ等を含む新しい原理に基づく計算機構の探索を行うとともに、ノイマン型コンピュータにおいても全く新しい技術を導入し、新デバイスや通信技術も含めた高速大容量情報処理環境を構築するための要素技術を探求・確立することを目指す。

③ 研究領域概要

本研究領域は、量子力学的現象を利用した情報処理を実現するために、量子力学と情報処理の間に横たわる諸問題の解決に資する研究を対象とするものである。

具体的には、量子もつれ効果の強さと情報処理能力の関係についての理論的・実証的な研究、新しいアルゴリズムの創出、量子状態の評価技術、記憶方法、量子情報の高密度伝送方式、通信における符号化・誤り訂正・情報セキュリティ等、安全かつ高速の情報処理を実現するための基盤を拡充する抜本的、革新的な研究を対象とした。

1.1.2 研究総括

細谷 曉夫（東京工業大学大学院 教授）

1.1.3 領域アドバイザー

人選にあたっては、数学、情報科学、物理学、電気工学、材料工学など幅広い分野から応募者があることが想定されたので、それらを広くカバーするようにした。

さらに、理論と実験のバランスを考え、物理実験の分野では量子光学とその他についてもカバーした。意見をはっきり述べる人柄の方々にお願いし、さらに詳しく言えば、激励型と辛口型のバランスも取った。

表 1-1　領域アドバイザー

領域アドバイザー	所属	役職	任期
今井 浩	東京大学 大学院情報理工学系研究科	教授	平成 15 年 7 月～平成 21 年 3 月
井元 信之	大阪大学 大学院基礎工学研究科	教授	平成 17 年 4 月～平成 21 年 3 月
枝松 圭一	東北大学 電気通信研究所	教授	平成 15 年 7 月～平成 21 年 3 月
小澤 正直	名古屋大学 大学院情報科学研究科	教授	平成 15 年 7 月～平成 21 年 3 月
北川 勝浩	大阪大学 大学院基礎工学研究科	教授	平成 15 年 7 月～平成 21 年 3 月
佐々木 雅英	情報通信研究機構 新世代ネットワーク研究センター	グループリーダー	平成 15 年 7 月～平成 21 年 3 月
高木 伸	富士常葉大学 環境防災学部	教授	平成 15 年 7 月～平成 21 年 3 月
竹内 繁樹	北海道大学 電子科学研究所	教授	平成 15 年 7 月～平成 21 年 3 月
蔡 兆申	日本電気(株) 中央研究所 ナノエレクトロニクス研究所	主席研究員	平成 15 年 7 月～平成 21 年 3 月
南 不二雄	東京工業大学 大学院理工学研究科	教授	平成 15 年 7 月～平成 21 年 3 月
山本 喜久	スタンフォード大学 応用物理・電気工学科	教授	平成 15 年 7 月～平成 21 年 3 月

（注）所属と役職はプロジェクト終了時点

1.1.4 研究課題および研究代表者

研究課題（研究者）の公募は 2003 年度から 3 年間、3 期にわたり、総計 15 件の研究課題を採択した。次ページ以降に各期の研究課題、研究代表者、採択当時の所属機関と役職、終了時の所属と役職並びに現在の所属と役職を示した。

表 1-2　研究課題と研究代表者

採択年度	研究課題	研究代表者	採択時の所属・役職	終了時の所属・役職	追跡調査時の所属・役職
H15年度	量子縺れ最適回復プロトコル導出を可能にする量子状態の判定・測定法	石坂 智	京都大学生態学研究センター生態学研究部門 教授	日本電気(株) 基礎・環境研究所 主任研究員	広島大学総　合科学研究科 教授
H15年度	固有ジョセフソン接合と超伝導共振器を用いた量子状態制御の研究	北野 晴久	東京大学大学院総合文化研究科 助手	東京大学大学院総合文化研究科 助手	青山学院大学理工学部 准教授
H15年度	単一量子ドットにおける多光子量子操作	黒田 隆	（独）物質・材料研究機構 主任研究員	（独）物質・材料研究機構量子ドットセンター 主任研究員	（独）物質・材料研究機構　先端的共通技術部門先端フォトニクス材料ユニットナノフォトニクスグループ 主幹研究員
H15年度	多体量子系としての量子計算機の分析	清水明	東京大学大学院総合文化研究科 助教授	東京大学大学院総合文化研究科 教授	東京大学大学院総合文化研究科 教授
H15年度	量子鍵を用いた次世代量子暗号プロトコル	村尾 美 緒	東京大学大学院理学系研究科 助教授	東京大学大学院理学系研究科 助教授	東京大学大学院理学系研究科 助教授
H16年度	量子ビット構築へ向けてのヘリウム液面電子量子ドットの研究	池上 弘 樹	（独）理化学研究所中央研究所河野低温物理研究室 研究員	（独）理化学研究所　中央研究所 専任研究員	（独）理化学研究所　中央研究所 専任研究員
H16年度	超伝導クーパー対を使用した電子 EPR　対高密度ビームの開発	趙 福 來	（独）科学技術振興機構さきがけ 研究者	（独）科学技術振興機構さきがけ 研究者	韓国標準科学研究院 責任研究員
H16年度	光学実験を手段とした量子情報処理のための量子力学的物理現象の研究	長谷川 祐 司	（独）科学技術振興機構さきがけ 研究者	（独）科学技術振興機構さきがけ 研究者	ウィーン工科大学 准教授
H16年度	代数的量子情報処理技術の研究	濵田 充	（独）科学技術振興機構さきがけ 研究者	玉川大学　学術研究所 准教授	量子情報科学研究所　量子情報科学研究センター 教授

H16 年度	量子非局所性を用いた情報処理における不可逆性	森越 文 明	日本電信電話（株）物性科学基礎研究所量子光物性研究部・量子光制御研究グループ 社員	日本電信電話（株） NTT 物性科学基礎研究所 研究主任	日本電信電話（株） NTT 物性科学基礎研究所 研究主任
H17 年度	異種原子組み替えによる固体表面量子ビットの実現	阿部 真 之	大阪大学大学院工学研究科 助教授	大阪大学大学院工学研究科 准教授	大阪大学 基礎工学研究科 付属極限科学センター 教授
H17 年度	測定過程を使った非古典的な原子集団スピン励起の生成と制御	宇佐見 康 二	（独）科学技術振興機構さきがけ 研究者	（独）科学技術振興機構さきがけ 研究者	東京大学 量子情報物理工学 准教授
H17 年度	量子通信路の可逆性と情報理論的・幾何学的保存量の評価	小川 朋 宏	（独）科学技術振興機構さきがけ 研究者	電気通信大学大学院情報システム学研究科 准教授	電気通信大学大学院 情報システム学研究科 准教授
H17 年度	単一分子分光による固体中の単一スピンの観測	松下 道 雄	東京工業大学大学院理工学研究科 助教授	東京工業大学大学院 理工学研究科 准教授	東京工業大学大学院・理工学研究科 准教授
H17 年度	新しい核磁気共鳴を用いた核スピンの量子状態制御	遊佐 剛	（独）科学技術振興機構さきがけ 研究者	東北大学大学院理学研究科 准教授	東北大学大学院理学研究科 准教授

1.2 研究領域終了後の進展と波及効果

1.2.1 研究成果の発展状況や活用状況

総計 15 課題の研究成果は国際的にもレベルが高く、特筆すべき成果としては、中性子観測によるハイゼンベルクの不確定性原理の破れや中性子の粒子性、波動性の分離観測（長谷川祐司）、単一分子分光による固体中の単一スピンの観測（松下道雄）、異種原子組み替えによる固体表面量子ビットの実現（阿部真之）、パフォーマンスの高い量子誤り訂正符号の開発（濱田充）が挙げられるが、それ以外にも世界レベルの研究成果が多数みられた。

理論研究については、石坂智はエンタングルメント度について確固とした研究、で国際的にも認められ成果を挙げた。

森越文明の新しい時間的なエンタングルメントという視点はこれからの基礎理論の方向を予感させるし、小川朋宏研究者の量子通信路容量に関する数理的研究は、さきがけ期間の相当部分を数学の勉強に充てるという冒険が報われて、極めて体系だったものへと成長している。

実験研究については、派生したことから面白い展開が見られたものに、北野晴久と超流動の池上弘樹の研究があり双方とも物性物理学として興味深い結果を得ている。

黒田隆の単一量子ドットにおける多光子量子操作と、阿部真之によるシリコン表面における原子配列の研究レベルも高い。前者は、励起子のデコヒーレンス時間の直接計測に成功し、後者は、原子配列自体はさきがけ研究前からのものではあるが、その原子識別を行った点が独自の新しい成果といえる。

1.2.2 研究成果の科学技術的および社会・経済的な波及効果

(1) 科学技術の進歩への貢献

基礎科学技術上の進歩に資する成果としては、中性子干渉を用いた長谷川祐司と宇佐見康二による光学的手段による量子力学の基本原理に関する実験的研究、森越文明研究者による時間的エンタングルメントに関する理論的研究が挙げられる。しかし、P.ショアも述べているように、ある意味で曲がり角にきている量子情報科学／技術の次のブレークスルーは、非局所性など量子力学の基本概念に立ち戻ることから得られるかもしれない。

特に長谷川祐司が行っている中性子干渉計と中性子ポラリメータでの実験は、シュレディンガー方程式に則った特徴を調べられるものであり、小澤の不等式の実験的確認等の革新的な成果を挙げつつある状況にある。

応用科学技術上の進歩に資する成果としては、濱田充による量子誤り訂正符号の系統的生成法が、情報科学として基礎的であると同時に、符号生成の実用としても有用であろう。黒田隆研究者の単一量子ドットにおける多光子量子操作は、このよく知られた系についての量子操作の可能性を切り拓いている。

(2) 社会・経済的波及効果

阿部真之によるシリコン表面における原子配列は、本研究により多くの人が使えるように汎用化されたため、量子計算機の素子作成のための基礎技術としてだけではなく、ナノテクノロジーとして広範囲かつ有用な技術として今後利用される可能性がある。

1.3 本研究領域の展開状況（系譜図）

本研究領域に関連している JST の戦略的創造研究推進事業（ERATO、ICORP、さきがけ、CREST）を約 30 年間の範囲で系譜図として作成した。1980 年代後半から量子関連のプロジェクトは連綿と継続しており、現在量子通信、光量子、量子ナノシステムといった方向性に展開している。

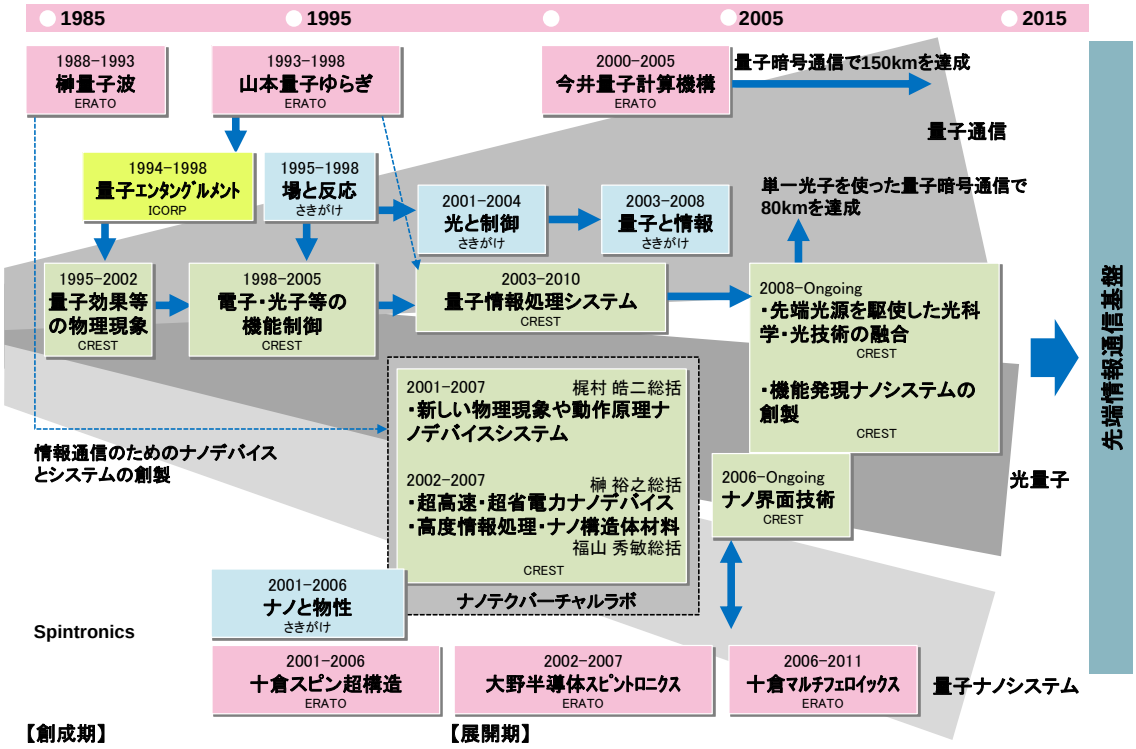


図 1-1　量子関連の JST「戦略的創造研究推進事業」展開状況

第 2 章 追跡調査

2.1 追跡調査について

2.1.1 調査の目的

追跡調査は、研究領域終了から一定期間を経過した後、副次的効果を含めて研究成果の発展状況や活用状況を明らかにし、JST の事業及び事業運営の改善に資するために行うもので、本研究領域終了後の研究代表者の研究課題に関する発展状況等を調査した。

2.1.2 調査の対象

本追跡調査は、さきがけ「量子と情報（2003 年～2005 年度）」の研究代表者全員を対象とした。採択研究者は、2003 年度採択 5 名、2004 年度採択 5 名、2005 年度採択 5 名であり、いずれも研究期間は 5 年間であった。

表 2-1　調査対象と調査対象期間

	さきがけ期間	さきがけ終了後調査対象期間	研究課題数
第 1 期	2003 年 12 月～2006 年 3 月	2006 年 4 月～2013 年 9 月	5
第 2 期	2004 年 12 月～2007 年 3 月	2007 年 4 月～2013 年 9 月	5
第 3 期	2005 年 12 月～2008 年 3 月	2008 年 4 月～2013 年 9 月	5

2.1.3 調査の方法

(1) 研究助成金

本研究領域終了以降に、研究代表者が代表で獲得した外部研究資金を調査した。対象とした外部研究資金と調査方法は以下の通りである。

① 科研費

KAKEN 科学研究費助成事業データベース[1]から、研究代表者が代表となっている研究課題を検索した。さらに、さきがけ研究の規模から継続・発展が図られているという観点から大型（1 千万円／件　以上）のものを抽出した。

② JST 事業

JST ホームページ[2]のサイト内検索で研究代表者の情報を検索し、プロジェクト終了後に研究代表者が代表となって採択された事業もしくはプロジェクトを抽出した。

③ NEDO プロジェクト

NEDO ホームページ[3]のサイト内検索、および成果報告書データベース[4]から、研究代表者の情報を検索し、本研究領域終了以降に代表者（プロジェクトリーダー）を務めているプロジェクトを抽出した。

④ 最先端・次世代研究開発支援プログラム

最先端研究開発支援プログラムホームページ[5]および、最先端・次世代研究開発支援プログラムホームページ[6]から、研究代表者の採択実績を確認した。

---

[1] http://kaken.nii.ac.jp/
[2] http://www.jst.go.jp/
[3] http://www.nedo.go.jp
[4] http://www.nedo.go.jp/library/database_index.html
[5] http://first-pg.jp/about-us/about-30.html
[6] http://www8.cao.go.jp/cstp/sentan/jisedai/saitakuichiran.pdf

⑤ 厚生労働科学研究費補助金

厚生労働科学研究費補助金のデータベース[7]から、研究代表者が代表となっている研究課題を検索した。さらに、さきがけ研究の規模から継続・発展が図られているという観点から大型（1 千万円／件　以上）のものを抽出した。

⑥ その他

公益財団法人助成財団センター採択課題データベース[8]から、研究代表者が代表となっている研究課題を検索した。
また、JST の研究者データベース「ReaD&Researchmap[9]」を活用して、研究者代表者の情報を検索し、上記①～⑤の調査で抜け漏れがあった場合、情報の追加を行った。

(2) 論文

本研究領域期間中およびプロジェクト終了後の研究代表者の発表論文について Web of Science で検索を行った。論文抽出は、は著者名＋所属機関（採択時点／プロジェクト終了時点／現時点）で検索を行った後、研究代表者の論文かどうかを論文題名を目視で確認することにより、絞り込みを行った。また、研究終了報告書に記載のある論文で、上記の検索方法で抽出されなかった論文については、リストに加えた。

次に、本研究領域期間中および本研究領域終了以降の論文数を求めた。対象は Article と Review に絞り込み、さらにプロジェクト終了以降の論文については、研究代表者が筆頭著者（First Author）もしくは責任著者（Last Author）となっている論文の数を求めた。各論文については、被引用数の調査も行った。

(3) 特許

本研究領域期間中出願特許の成立および海外出願の状況と、本研究領域終了以降の国内・海外出願特許について調査した。検索は特許データベース FOCUST（Wisdomain 社）[10]を用いて行った。当該データベースでは、研究者名で検索することにより、上記の必要な情報を一覧として得ることができる。

2.2 アウトプット概要

2.2.1 研究助成金から見た研究の発展状況

研究発展状況を把握するために、本研究領域終了後にどれだけ外部資金を獲得しているかを把握することは非常に重要である。当該領域の代表研究者の外部資金獲得状況を表 2-2 に示す。

若手研究者が多いことから、1 千万円を超える大型の研究資金を獲得できている研究者は多くない。その中でも、北野 晴久、黒田 隆、池上 弘樹、阿部 真之、松下 道雄、遊佐 剛は若手研究（A）や基盤研究（B）などの科研費を獲得することができている。特に、遊佐 剛は、基盤研究（A）を継続的に獲得するなど、研究活動を拡大させている。

[7] http://mhlw-grants.niph.go.jp/niph/search/NIST00.do
[8] http://www.jfc.or.jp/search/ap_search.php
[9] http://researchmap.jp/search/
[10] http://focustj.wisdomain.biz/Mitsubishi-Antlia/

表 2-2　研究代表者の本研究領域終了後の外部資金獲得状況

【H13 年度採択】

科研費　JST　NEDO　その他

研究代表者	研究費名称	研究テーマ名	開始年度	終了（予定）年度	実施期間													金額（百万円）
					2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	
					-	-	期間中			終了後								
石坂　智	該当なし																	
北野　晴久	科研費　新学術領域研究(研究課題提案型)	マイクロ波近接場の手法による量子もつれ合い状態の観測と量子相転移の研究	2009	2011														30.94
黒田　隆	科研費　基盤研究(B)	単一量子ドット分光による非平衡核スピン分布の可視化	2009	2011														19.11
清水　明	該当なし																	

【H14 年度採択】

科研費　JST　NEDO　その他

研究代表者	研究費名称	研究テーマ名	開始年度	終了（予定）年度	実施期間													金額（百万円）
					2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	
					-	-	-	期間中				終了後						
村尾　美緒	該当なし																	
池上　弘樹	科研費　若手研究(A)	超流動ヘリウム 3 自由表面で期待されるマヨラナ表面状態の観測	2011	2014														12.22
趙　福來	該当なし																	
長谷川　祐司	Single Project, Austrian Science Fund	“Double, triple and quadruple entanglement of neutrons	2009	2013														-
	WTZ-Programms Amadée, OeAD	Neutron optical test of non-ideal measurements and Bohmian Model	2012	2014														-

長谷川　祐司	European Japanese Exchange Project in Nuclear Disciplines	-	2012	2012														-
	Single Project, Austrian Science Fund	Weak values obtained in neutron optical experiments	2013	2016														-
濵田　充	該当なし																	
森越　文明	該当なし																	

【H15 年度採択】

科研費　JST　NEDO　その他

研究代表者	研究費名称	研究テーマ名	開始年度	終了（予定）年度	実施期間													金額（百万円）
					2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	
					-	-	-	-	期間中				終了後					
阿部　真之	科研費　基盤研究(B)→基盤研究(B)	ナノ分析顕微鏡を用いた光電変換現象の原子分解能観察	2012	2015														15.86
	科研費　基盤研究(B)	局所的フォーススペクトル法による単原子物性計測手法の確立	2007	2008														18.72
宇佐見　康二	該当なし																	
小川　朋宏	科研費若手研究(B)	量子力学系における通信路の可逆性と情報幾何	2009	2012														4.03
松下　道雄	科研費　特定領域研究	液体ヘリウム温度での単一分子分光による酵素の構造・機能相関の研究	2007	2011														35.00
遊佐　剛	科研費　基盤研究(A)	半導体ナノ構造における集団量子情報処理の実証	2012	2015														35.75

遊佐　剛	科研費　基盤研究(A)	半導体ナノ構造中の集団核スピンエンタングルメントを用いた集団量子情報処理	2009	2011														48.23
	若手研究(A)	固体における集団スピンのエンタングル状態の実現と集団量子計算の提案	2007	2008														25.61

2.2.2 論文

論文発表件数は研究者の研究活動を示す重要な指標であるため、研究代表者について本研究領域期間中の論文数と終了後の論文数とを調査した。研究期間終了後については、研究代表者が筆頭著者（First Author）もしくは責任著者（Last Author）となっている論文の数を求めた。検索はいずれも 2013 年 10 月に実施した。

本研究領域期間中の発表論文数は全体で 165 報、本研究領域終了後の発表論文数は 170 報であった。また、本研究領域終了後発表論文のうち、責任著者となっている論文は 86 報であった。

期間中の論文数を見ると、阿部 真之が 32 報と多くなっている。本研究領域終了後を見ると、黒田 隆が 48 報の論文を発表しており、研究活動を活発に行っている様子がわかる。

表 2-3　研究代表者の論文発表状況

採択年度	研究課題	研究代表者	期間中の論文数	終了後の論文数	終了後の責任著者数
H15 年度	量子縺れ最適回復プロトコル導出を可能にする量子状態の判定・測定法	石坂　智	7	8	4
	固有ジョセフソン接合と超伝導共振器を用いた量子状態制御の研究	北野　晴久	4	9	7
	単一量子ドットにおける多光子量子操作	黒田　隆	19	48	10
	多体量子系としての量子計算機の分析	清水　明	9	5	5
	量子鍵を用いた次世代量子暗号プロトコル	村尾　美緒	5	13	10
H16 年度	量子ビット構築へ向けてのヘリウム液面電子量子ドットの研究	池上　弘樹	20	10	6
	超伝導クーパー対を使用した電子 EPR 対高密度ビームの開発	趙　福來	13	8	4
	光学実験を手段とした量子情報処理のための量子力学的物理現象の研究	長谷川　祐司	25	30	26
	代数的量子情報処理技術の研究	濵田　充	10	4	4
	量子非局所性を用いた情報処理における不可逆性	森越　文明	2	2	2
H17 年度	異種原子組み替えによる固体表面量子ビットの実現	阿部　真之	32	20	0
	測定過程を使った非古典的な原子集団スピン励起の生成と制御	宇佐見　康二	2	3	1

H17年度	量子通信路の可逆性と情報理論的・幾何学的保存量の評価	小川　朋宏	4	1	1
	単一分子分光による固体中の単一スピンの観測	松下　道雄	4	5	2
	新しい核磁気共鳴を用いた核スピンの量子状態制御	遊佐　剛	9	4	4
合計			165	170	86

2.2.3 特許

特許出願件数･登録件数は研究開発が応用に向けて進展していることを表す一つの指標であると考えられるため、本研究領域期間中と終了後の状況について調査し、下表に示した。

本研究領域期間中の研究代表者の特許出願は国内 26 件、海外 6 件であった。成立件数（期間中に出願した特許のうち、現時点で特許登録されている件数）は、国内 9 件、海外 5 件であった。期間中では、阿部真之と遊佐剛が 5 件、黒田隆が 4 件の特許を出願している。阿部と遊佐は複数件の登録特許を有している。

本研究領域終了後の特許出願は、国内 9 件、海外 2 件であり、うち国内 1 件が特許として成立している。本研究領域終了後は石坂智が 4 件の国内出願を行っている。

表 2-4　研究代表者の特許出願・登録状況

		プロジェクト期間中				プロジェクト終了後			
採択年度	研究代表者	国内出願	海外出願	国内登録	海外登録	国内出願	海外出願	国内登録	海外登録
H15 年度	石坂　智	2	1	0	0	4	1	0	0
	北野　晴久	1	0	0	0	0	0	0	0
	黒田　隆	4	0	0	0	0	0	0	0
	清水　明	1	0	0	0	0	0	0	0
	村尾　美緒	1	1	1	1	0	0	0	0
H16 年度	池上　弘樹	1	0	0	0	0	0	0	0
	趙　福來	0	0	0	0	1	1	1	0
	長谷川　祐司	1	0	0	0	0	0	0	0
	濵田　充	1	1	1	1	1	0	0	0
	森越　文明	1	0	0	0	0	0	0	0
H17 年度	阿部　真之	5	2	3	2	1	0	0	0
	宇佐見　康二	1	0	0	0	0	0	0	0
	小川　朋宏	1	0	0	0	0	0	0	0
	松下　道雄	1	0	0	0	0	0	0	0
	遊佐　剛	5	1	4	1	2	0	0	0
合計		26	6	9	5	9	2	1	0

表 2-5　研究代表者の期間中・終了後の成立特許

【H15 年度採択】

□ 石坂　智

（該当なし）

□ 北野　晴久

（該当なし）

□ 黒田　隆

（該当なし）

□ 清水　明

（該当なし）

□ 村尾　美緒

出願番号	公開番号	特許番号	発明者／考案者	出願人／権利者	発明の名称	国際出願番号	国際公開番号	海外での成立
特願 2007-136984	特開 2008-294666	特許 5105408	村尾　美緒, 田中　雄	独立行政法人科学技術振興機構	量子プログラム秘匿化装置及び量子プログラム秘匿化方法	WO2008142816	AU2007353565, C672046, US2010070780	AU2007353565(B2), CA2672046(C), US8189779(B2)

【H16 年度採択】

□ 池上　弘樹

（該当なし）

□ 趙　福來

出願番号	公開番号	特許番号	発明者／考案者	出願人／権利者	発明の名称	国際出願番号	国際公開番号	海外での成立
特願 2010-022655	特開 2011-159602	特許 5063715	藤枝　正, 岡井　誠, 大嶋　卓, 趙　福來	株式会社日立ハイテクノロジーズ	電子源，電子銃、それを用いた電子顕微鏡装置及び電子線描画装置		US2011186735	

□長谷川　祐司
（該当なし）
□濵田　充

出願番号	公開番号	特許番号	発明者／考案者	出願人／権利者	発明の名称	国際出願番号	国際公開番号	海外での成立
特願2007-190498	特開2008-099243	特許4756489	濵田　充	学校法人玉川学園	誤り訂正符号化装置、誤り訂正符号化方法及びプログラム		US2008063188, US2012192040	US8176393(B2), US8365052(B2)
特願2011-107807	特開2011-172279	特許5062643	濵田　充	学校法人玉川学園	誤り訂正符号化装置、誤り訂正符号化方法及びプログラム		US2008063188, US2012192040	US8176393(B2), US8365052(B2)

□森越　文明
（該当なし）

【H17 年度採択】
□阿部　真之

出願番号	公開番号	特許番号	発明者／考案者	出願人／権利者	発明の名称	国際出願番号	国際公開番号	海外での成立
特願2008-554000	再公表08-087852	特許4834817	大田　昌弘, 大藪　範昭, 阿部　真之, オスカル　クスタンセ, 杉本　宜昭, 森田　清三	国立大学法人大阪大学；株式会社島津製作所	原子間力顕微鏡及び原子間力顕微鏡を用いた相互作用力測定方法	WO2008087852	CN101606051, US2010071099	CN101606051(B), US7975316(B2)

特願 2006-145881	特開 2007-315918	特許 4873460	阿部　真之, 大田　昌弘, 杉本　宜昭, 森田　健一, 大藪　範昭, 森田　清三, オスカル　クスタンセ	株式会社島津製作所；国立大学法人大阪大学	探針位置制御装置		CN101083151, KR20070114033, US2007272005	CN100578679(C), US7703314(B2)
特願 2005-112342	特開 2006-289542	特許 4872074	阿部　真之, 杉本　宜昭, 森田　清三, オスカル　クスタンセ, 大藪　範昭	国立大学法人大阪大学	原子位置固定装置、原子位置固定方法及び原子操作方法			

□宇佐見　康二

（該当なし）

□小川　朋宏

（該当なし）

□松下　道雄

（該当なし）

□遊佐　剛

出願番号	公開番号	特許番号	発明者／考案者	出願人／権利者	発明の名称	国際出願番号	国際公開番号	海外での成立
特願 2008-547046	再公表 08-066146	特許 5131667	遊佐　剛	独立行政法人科学技術振興機構	核磁気共鳴撮像素子、及びそれを用いた撮像システム、撮像方法	WO2008066146	EP2088447, US2010013480	US8093898(B2)
特願 2007-145488	特開 2008-298612	特許 5105410	遊佐　剛	独立行政法人科学技術振興機構	核磁気共鳴撮像システム及び撮像方法			

特願 2005-237536	特開 2007-053247	特許 4955961	熊田　倫雄, 遊佐　剛, 平山　祥郎	日本電信電話株式会社	原子核スピン間の相関強度制御方法			
特願 2004-321930	特開 2006-135054	特許 4913338	遊佐剛, 平山祥郎	日本電信電話株式会社	多量子ビット化装置、多量子ビット化方法、多量子ビット情報処理装置、多量子ビット情報処理方法。			

2.3 アウトカム

2.3.1 科学技術的アウトカム

(1) 受賞

科学技術の進歩への貢献や研究成果に関する評価を示す指標の一つとして、受賞歴が挙げられる。下表に、本研究領域終了後の研究代表者の受賞歴を示す。

阿部真之は、原子間力顕微鏡を用いて半導体表面の個々の原子を操作する技術を開発し、特にそれが室温環境下でも行えることを実証したことにより、アジアでは初となるファインマン賞を 2010 年に受賞した。遊佐 剛はエリクソン・アワードを、趙福來は榊奨励賞をそれぞれ 2004 年に受賞するなどしている。

表 2-6　研究代表者のプロジェクト終了以降の受賞リスト

研究代表者	賞の名称	授与機関	受賞理由・業績、対象論文等	受賞年
北野 晴久	ベストポスター賞	Nano-Virtual-Labs Joint Workshop	Switching Current Distribution of Bi-2212 intrinsic multi Josephson junctions	2005
清水　明	A Paper of Editors' Choice	Journal of the Physical Society of Japan	Nonequilibrium Molecular Dynamics Simulation of Electric Conduction	2005
	Editors' Suggestion	Phys. Rev. Lett.	Canonical Thermal Pure Quantum State	2012
池上　弘樹	第三回日本物理学会若手奨励賞	日本物理学会	Anisotropy of Superfluid 3He Near Free Surface Investigated by Surface State Electrons	2009
趙　福來	第十回榊奨励賞	学振マイクロビームアナリシス第 141 委員会	エミッターの冷却による電界放出電子ビームの可干渉性の向上の実証	2004
	榊奨励賞	学振マイクロビームアナリシス第 141 委員会	電子ビームの空間コヒーレント長向上実証	
阿部　真之	文部科学大臣表彰（科学技術賞研究部門）	文部科学省	室温原子間力顕微鏡による多元素系ナノ構造体操作組立の研究	2009
	2009 Feynman Prize	Foresight Institute	大阪大学森田研究室で原子間力顕微鏡（AFM）注 3 を用いて半導体表面の個々の原子を操作する技術を開発し、特にそれが室温環境下でも行えることを実証し、それが受賞の対象となった	2010

阿部　真之	計測自動制御学会賞（技術賞）	計測自動制御学会	ピコメートルオーダーでの高精度位置決め技術の開発と原子レベル物性計測への応用	2008
	ナノプローブ賞	日本学術振興会ナノプローブテクノロジー第１６７委員会	原子間力顕微鏡で原子識別や原子操作を行うための新技術	2008
小川　朋宏	貢献賞	電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ	「情報理論とその応用特集号（2011 年）」編集幹事としての貢献	2012
遊佐 剛	エリクソン・アワード 2004	日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所 量子電子物性研究部 リサーチアソシエイト	Trapping of photogenerated carriers by InAs quantum dots and persistent photoconductivity in novel GaAs/n-AlGaAs field-effect transistor	2004

(2) その他

趙福來は、超高真空中での電子銃の作製を進めるうちに、基礎技術の進歩がありそれに関する特許出願も行い、今後、日本の電子顕微鏡産業への貢献が期待される。

後継者育成という面では、大学に籍を置く村尾美緒、松下道雄、遊佐剛の各研究室では、博士課程進学者でこの分野を志す人が継続的に出てくるなど、成果が着実に現れている。

2.3.2 社会・経済的アウトカム

(1) 新聞報道等

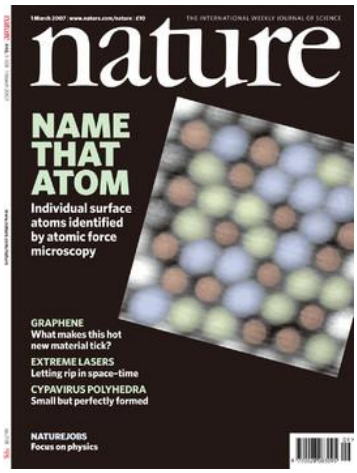
長谷川祐司は、ハイゼンベルクの不確定性原理を破る小澤の不等式を実証した際に、日経新聞ほか全国の主要新聞での報道がなされた。

阿部真之は、室温での原子操作に関してファインマン賞を受賞する前後で全国の主要新聞に掲載された。

遊佐剛は、マイナス 273.11℃で動作する顕微鏡を使って液体のように振る舞う電子の撮像に成功した 2012 年に主要新聞に掲載された。

(2) その他

阿部真之は、室温の原子操作で半導体表面上に原子文字を書いた映像で2007年のネーチャーの表紙を飾っている。



第 3 章 各研究課題の主な研究成果および波及効果

3.1 2003 年度採択課題

3.1.1 量子縺れ最適回復プロトコル導出を可能にする量子状態の判定・測定法（石坂　智）

(1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

① 研究のねらい

量子情報処理技術はデバイス技術などのハードウェア技術と、アルゴリズムやプロトコルなどのソフトウェア技術が両輪となってはじめて実用となる。本研究では、量子暗号通信の中継に必須となる量子縺れ（量子エンタングルメント）最適回復プロトコルの導出を将来目標に、その為の基盤技術の拡充を目指す。

具体的には、量子状態の幾何学的構造の解析を通して、量子縺れ回復効率の情報理論的限界値と縺れ回復可能性の最適判定方法の導出を行い、更に状態空間の幾何学的構造と量子情報処理の間の関係を解明する。

② 期間中の主な研究成果

(i) Schmidt 階数と束縛エンタングルメント[2]

遠く隔てられた 2 者が、ある単一コピーの純粋量子状態を局所操作と古典通信（LOCC）で別の純粋量子状態へ変換する際には、どの様にしても状態の重ね合わせの項数を増やすような変換はできないという強い制限を受ける。ところが、束縛エンタングルメントと呼ばれる弱いエンタングルメントは純粋状態の変換に対して非常に強力な威力を持ち、上記 LOCC における制限を完全に取り除いてしまう効果がある事を導いた。

(ii) 多体エンタングルメントの等価性[3]

3 者間のエンタングル状態である$|GHZ^{11}\rangle$と$|W\rangle$の相互変換が、LOCC の漸近領域で可能であるかどうかは、多体エンタングルメントの等価性に関する基本的で重要な問題である。本研究では幾つかの状態クラスに対し、漸近的エンタングルメント測度を計算する事に成功し、上記の相互変換が不可能であることを導いた。

(iii) 強い単調性とエンタングルメント回復

遠く隔てられた 2 者が所有している単一コピーの量子状態が階数の高い混合状態の場合には、束縛エンタングルメントを利用しても、その混合状態のエンタングルメントを LOCC で回復することは不可能であることを証明した。この結論は、LOCC による量子状態の変換において重ね合わせの項数の制限（Schmidt 数）とは異なる強い制限が存在している事を意味しており、幾何学的なアプローチにより、Schmidt 数と異なる強い制限を導出した。また、密度行列を部分転置した行列を σ^{Γ} とすると、2 量子ビットの任意の密度行列に対して、$|\sigma^{\Gamma}|^{\Gamma} \geq 0$ が成り立つことを証明し、エンタングルメント理論における未解決問題の一つである binegativity problem を解決した[1]。

③ 研究成果に関連した主な成果論文リスト 3 報以内

[1] S. Ishizaka, “Binegativity and geometry of entangled states in two qubits”, Phys. Rev. A 69, 020301-1 - 020301-4 (Rapid communication) (2004)

[2] S. Ishizaka, “Bound entanglement provides convertibility of pure entangled states”, Phys.

[1] GHZ（Greenberger-Horne-Zeilinger）状態とは、3 者間の量子もつれの典型的な例である。この状態では波動関数の重ね合わせが巧妙なため、量子力学の非古典性をより鋭く示す。

Rev. Lett. 93, 190501-1 – 190501-4 (2004)
[3] S. Ishizaka and M. B. Plenio, “Multiparticle entanglement manipulation under positive partial transpose preserving operations”, Phys. Rev. A 71, 052303-1 – 052303-13 (2005)

(2) 本研究領域終了後の継続と発展状況

① 科学技術の進歩への貢献

最終年度の後半では、現代暗号量子プロトコルの研究に着手し、次のステップへ進んだ。本プロジェクト終了後から現在に至るまで、量子エンタングルメント、量子暗号など量子情報に関する理論研究を展開させている[1],[2],[3],[4],[5]。

② 社会・経済的波及効果

量子情報技術を用いると、量子コンピュータ（桁違いに速い計算が行える計算機）、量子暗号（絶対に盗聴不可能な暗号）、量子通信（効率的な通信）などの実現が可能になると考えられており、情報処理に革新をもたらす最先端技術として注目されている。

現代暗号量子プロトコルは量子暗号通信の中継に必須であり、他の多くの量子情報処理アプリケーションの動作効率を上げるなどの広範な応用性を持つ。

③ 上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な成果論文リスト（4 報以内）

[1] S. Ishizaka,T. Hiroshima, “Quantum teleportation scheme by selecting one of multiple output ports”, Phys. Rev. A 79, 042306 (2009)
[2] A. Miranowicz, and S. Ishizaka, “Closed formula for the relative entropy of entanglement” Phys. Rev. A 78, 032310 (2008)
[3] A. Miranowicz, S. Ishizaka, B. Horst, and A. Grudka, “Comparison of the relative entropy of entanglement and negativity” Phys. Rev. A 78, 052308 (2008)
[4] S. Ishizaka and T. Hiroshima, ”Asymptotic teleportation scheme as a universal programmable quantum processor”, Phys. Rev. Lett. 101, 240501 (2008).
[5] S. Ishizaka, "Dilemma that cannot be resolved by biased quantum coin flipping", Phys. Rev. Lett. 100, 070501 (2008).

④ その他

2012 年に出版された「量子情報科学入門」の執筆者に名を連ねている。

3.1.2 固有ジョセフソン接合と超伝導共振器を用いた量子状態制御の研究（北野　晴久）

(1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

① 研究のねらい

近年、量子計算機に関する研究が盛んだが、数十ミリケルビンという極低温の実験は実用化に向けて障害となる。本研究では、高温超伝導体の固有ジョセフソン接合を用いた「量子ビット」の実現により温度への制限の緩和を目指すと共に、非常に高いQ値を持つ超伝導共振器内のフォトンと、固有ジョセフソン接合系の量子ビットを相互作用させて、量子計算に必要な「量子もつれ合い」状態の実現を目指す。高温超伝導体が量子計算機へ応用可能なことが示されれば、実用化がさらに加速されるものと期待できる。

② 期間中の研究成果

(i) メサ型 IJJ 素子のスイッチング電流分布測定[1],[2]

高温超伝導体に共通の固有ジョセフソン接合素子（IJJ 素子）を用いた位相量子ビットの構築に向けて，まず基本となる IJJ の位相ダイナミクスを把握するためにゼロ電圧状態から有限電圧状態へのスイッチング電流分布を測定した。その結果，IJJ 素子の振舞いは従来のジョセフソン接合（JJ）に比べてはるかに複雑なことが判明し，位相量子ビット構築への最初のステップとなる巨視的量子トンネル（MQT） 状態を従来よりも高温で実現させるには，IJJ の素子サイズや素子構造が非常に重要になることを明らかにした。

(ii) S 字型 IJJ 素子のスイッチング電流分布測定

S 字型構造の IJJ 素子を作製し実験を重ねた結果、高温超伝導体の IJJ を用いて位相量子ビットを構築する場合の第一ステップである MQT 状態を実現するには、少なくとも以下の条件が必要であることを示した。

(1) 接合サイズが 1 μm 四方程度であること
(2) 臨界電流密度が 1kA/cm^2 以上あること

(iii) 超伝導共振器内の電磁場分布解析 [3]

様々な共振器構造に対して 3 次元電磁界解析シミュレーターによる電磁場分布解析を行い、共振器内の共振電場を空間的に一点に集中させて強結合条件を実現させる手段を検討した。結果として、図 3-1 に示す超伝導共振器構造が、量子もつれ合い状態を生成するための空洞量子電磁力学（cavity-QED）実験に十分適用可能なことを示した。

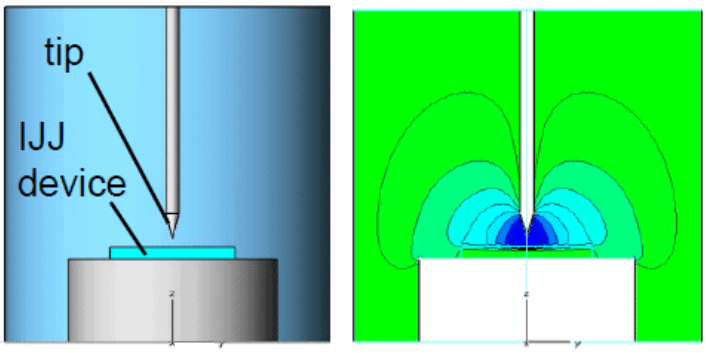


図 3-1 検討した超伝導共振器の模式図および電磁界解析から得られた共振電場の空間分布（出展：「量子と情報」第 1 回研究終了報告会 要旨集(2006.11.16)）

③ 研究成果に関連した主な成果論文リスト 3 報以内

[1] H. Kitano, K. Ota, A. Maeda, “Study of switching events from zero-voltage state of Bi2212 intrinsic Josephson junctions”, Supercond. Sci. Technol. 20, S68-S73 (2007)
[2] K. Ota, H. Kitano, A. Maeda, “Escape rate from the zero-voltage state in the intrinsic Josephson junctions of Bi2Sr2CaCu2Oy”, Physica C 445-448, 955-958 (2006)
[3] H. Kitano, K. Ota, A. Maeda, “Superconducting cavity resonator with a metallic tip for realizing strong coupling between superconducting qubits and microwave photons”, AIP(American Institute of Physics) Conference Proceedings 850, 943-944 (2006)

(2) 本研究領域終了後の継続と発展状況

本研究領域終了後、科研費基盤研究（C)「ナノスタック超伝導接合系における集団電荷励起の研究」(2007-2008 年度)、「超伝導多重接合系の接合間相互作用による新しい巨視的量子効果の研究」(2009-2011 年度)、「面間トンネルスペクトロスコピーによる高温超伝導銅酸化物の擬ギャップ相の研究」(2012 年度-)、科研費新学術領域研究(研究課題提案型)「マイクロ波近接場の手法による量子もつれ合い状態の観測と量子相転移の研究 」(2009-2011 年度）ほか多くの科研費につながっており、継続して研究を発展させている。

① 科学技術の進歩への貢献

「マイクロ波近接場の手法による量子もつれ合い状態の観測と量子相転移の研究 」では、金属探針を利用したマイクロ波近接場によってマイクロ波顕微鏡の空間分解能が向上すること、及び量子電磁力学的な結合強度の調整に金属探針の挿入が有効なことを見出した。

「超伝導多重接合系の接合間相互作用による新しい巨視的量子効果の研究」では、超伝導層と絶縁層が原子スケールで交互に積み重なった構造を持つ超伝導多重接合系で微小接合素子のマイクロ波照射実験から離散化量子準位形成の温度変化を初めて捉え、量子準位の形成温度が接合形状に強く依存する振舞いを発見した。さらに、接合間相互作用の効果解明につながる少数接合素子の作製に成功した。[1]

「ナノスタック超伝導接合系における集団電荷励起の研究」では、超伝導体と絶縁体がナノスケールで交互に積み重なった構造(ナノスタック超伝導接合)を持つ高温超伝導体の固有ジョセフソン接合における複雑な位相ダイナミクスを解明するために、Bi 系及び La 系高温超伝導体のナノスタック接合素子を作製する技術を開発した。この二つの物質系で大きく異なる接合間相互作用の違いがナノスタック接合素子の位相ダイナミクスに強く影響すること、および接合間相互作用効果の検証にスイッチング電流分布測定が有効なことを見出した。[2],[3],[4]

今後は、マイクロ波顕微鏡では、装置の低温動作化と測定感度向上に取り組み、有機伝導体の相分離現象の観測を、極低温下の量子エンタングルメント実験では、固有ジョセフソン量子ビット系の細かい制御技術開発を進めた後、再度、超伝導空洞共振器の開発に取り組み、量子エンタングルメント状態の生成実験を目指している。

② 社会・経済的波及効果

本研究で高温超伝導体が量子コンピュータへ応用可能なことが示されれば、実現可能な量子ビットに新しい有力候補が加わるだけでなく、超伝導量子ビットの動作温度に関するこれまでの制限が一気に緩和され、実用化に向けた研究がさらに加速されるものと期待される。また、発見から 20 年が過ぎた今でも未解明部分が残る高温超伝導体に共通の固有ジョセフソン接合系では、ジョセフソン接合の物理としても興味深い新たな未知現象が発見されるものと期待される。

③ 上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な成果論文リスト（4 報以内）

[1] H. Kitano, K. Ishikawa, S. Takekoshi, K. Ota, A. Maeda, “Effects of junction geometry in crossover temperature to macroscopic quantum tunneling regime of intrinsic Josephson junctions” , Physica C: Superconductivity, 471, 1210-1213 (2011)
[2] H. Kitano, K. Ota, K. Ishikawa, M. Itoi, Y. Imai, A. Maeda, “Switching-current distribution

in underdoped $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ intrinsic Josephson junctions", Phys. Rev. B 470, S838-S839 (2010)
[3] H. Kitano, K. Ota, K. Hamada, R. Takemura, M. Ohmaki, A. Maeda, and M. Suzuki, "Macroscopic quantum tunneling and thermal activation in a small mesa structured $Bi_2Sr_2CaCu_2O_y$ intrinsic Josephson junctions", J. Phys.: Conf. Ser. 150, 052110 (2009)
[4] K. Ota, K. Hamada, R. Takemura, M. Ohmaki, T. Machi, K. Tanabe, M. Suzuki, A. Maeda, and H. Kitano, "Comparative study of macroscopic quantum tunneling in $Bi_2Sr_2CaCu_2Oy$ intrinsic Josephson junctions with different device structures", Phys. Rev. B 79, 134505 (2009)

④ その他

該当なし

3.1.3 単一量子ドットにおける多光子量子操作（黒田　隆）

(1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

① 研究のねらい

高次の非線形操作を行う量子計算では、複数ステップの量子演算直後の過渡的な量子状態を検知する必要があり、量子状態の読み出しは、個々の量子ビット担体に対して行わなければならない。本研究では、単一の量子ドットにおけるコヒーレントな光応答の計測手法を開発することにより、従来は集団平均操作に埋もれていた微視的な量子効果の探索を可能とし、量子ドットを舞台とした多量子ビット演算の実現を目指す。

② 期間中の研究成果

(i) 励起子量子ビットの読み出し手法の開発[1]

入射ゲート光のもれ成分を丁寧に取り除くことで、単一の量子ドットからの自然放出光を観測することを試みた結果、単一量子ドットの自然放出に由来する減衰信号を、初めて観測することに成功した。

(ii) 励起子デコヒーレンス時間の評価[2]

量子ドット発光の自己相関を観測することにより、分光器を用いることなく高分解に線幅を決めることを試みた結果、代表的な量子ドットにおいて、デコヒーレンス時間は 40 ps、線幅にして 30 meV と決定することができた。

またデコヒーレンス時間は検出する量子ドットによって著しく異なっており、統計的には 6 割程度の分散を持つことがわかった。この結果は、量子ドットのデコヒーレンスが、局所的な環境に強く依存することを示している。

(iii) 量子ドット複合体の創生と光学評価[3]

液滴エピタキシー手法に特有な、自己形成的に作製できる複合的な量子ドット構造に着目し、これらの成長過程の観測および光学評価を進めることにより、面内に分割した量子ドット対を作製した。分割量子ドット対からは、比較的再現性よく、分子軌道的な結合状態、反結合状態からの発光と考えられる発光線の対を見出だした。また、スペクトル分裂の大きさは数値シミュレーションの結果ともよく合致した。

③ 研究成果に関連した主な成果論文リスト 3 報以内

[1] K. Kuroda, T. Kuroda, K. Watanabe, T. Mano, K. Sakoda, G. Kido, N. Koguchi, "Final-state read-out of exciton qubits by observing resonantly excited photoluminescence in quantum dots" Appl. Phys. Lett. 90, 051909 (2007)

[2] K. Kuroda, T. Kuroda, K. Sakoda, K. Watanabe, N. Koguchi, G. Kido, "Excitonic and biexcitonic decoherence in self-assembled GaAs quantum dots as observed by phase-locked interferography" Appl. Phys. Lett. 88, 124101 (2006)

[3] M. Yamagiwa, T. Mano, T. Kuroda, T. Tateno, K. Sakoda, G. Kido, N. Koguchi, F. Minami, "Self-assembly of laterally aligned GaAs quantum dot pairs" Appl. Phys. Lett. 89, 113115 (2006)

(2) 本研究領域終了後の継続と発展状況

本研究領域終了後、科研費基盤研究(C)「自己形成量子リングを用いた励起子アハロノフ・ボーム効果の検証」(2007-2008 年度)、基盤研究(B)「単一量子ドット分光による非平衡核スピン分布の可視化」(2009-2011 年度)、基盤研究(C)「揺らぎ分光法による量子ドット・スピン緩和機構の解明」(2012 年度-) などの科研費につながっており、継続した研究を発展させている[1],[2],[3]。

① 科学技術の進歩への貢献

「自己形成量子リングを用いた励起子アハロノフ・ボーム効果の検証」では、液滴エピタキシー成長手法を用いることで回転対称性のよいガリウム砒素量子リング構造を作製し、孤立した 1 個の量子リングに対し、10 テスラまでの磁気発光スペクトルを観測した。その結果、6 テスラ程度の磁場領域で、中性励起子状態のアハロノフ・ボーム効果に由来すると考えられる顕著な発光強度の減衰を見出だした。[1]

「単一量子ドット分光による非平衡核スピン分布の可視化」では、単一量子ドット発光における核磁場効果(オーバーハウザー効果)を観測することにより、母体結晶の核スピン空間分布の可視化を目指した。オーバーハウザー効果は高々10 マイクロ eV 程度のスペクトル変化であるため、極めて高いエネルギー分解能を持つ顕微発光測定系を構築した。その結果として、電子・正孔の長距離交換相互作用による微細構造分裂やサイズ依存性、および高指数面成長による微細分裂の抑制などの量子基礎物性の知見を得た。[2],[3]

2013 年には、北海道大学、仏ツルーズ大学との共同で、半導体量子ドットを独自手法で改良し、ドットの形を等方的にすることで、世界最高性能の量子もつれ光子源の開発に成功した。これまでの光源とは異なり、付加的な信号選別(ポストセレクション)を必要とせず、きわめて優れた量子もつれあいの特性を持つ。本研究成果により、従来不可能であった量子情報通信の遠距離化が可能となった。[4]

② 社会・経済的波及効果

今後は 2 ビットの量子ゲートの実証実験が期待され、そこでの効果が期待される。

「世界最高性能の量子ドットもつれ光子源の開発」の成果は日経産業新聞などに掲載されたほか、米国の学術誌 Physical Review B の Editor's Suggestion に選ばれた。

③ 上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な成果論文リスト（4 報以内）

[1] T. Kuroda, T. Belhadj, T. Mano, B. Urbaszek, T. Amand, X. Marie, S. Sanguinetti, K. Sakoda, and N. Koguchi, "Magneto photoluminescence in droplet epitaxial GaAs quantum rings" Physica Status Solidi B 246, 861-863 (2009)

[2] T. Belhadj, T. Kuroda, C.-M. Simon, T. Amand, T. Mano, K. Sakoda, N. Koguchi, X. Marie, and B. Urbaszek, "Optically monitored nuclear spin dynamics in individual GaAs quantum dots grown by droplet epitaxy" Phys. Rev. B 78, 205325/1-7 (2008)

[3] G. Sallen, S. Kunz, T. Amand, L. Bouet, T. Kuroda, T. Mano, D. Paget, O. Krebs, X. Marie, K. Sakoda and B. Urbaszek, "Nuclear magnetization in gallium arsenide quantum dots at zero magnetic field" Nat. Commun. 5:3268 doi:10.1038/ncomms4268 (2014)

[4] T. Kuroda, T. Mano, Neul Ha, H. Nakajima, H. Kumano, B. Urbaszek, M. Jo, M. Abbarchi, Y. Sakuma, K. Sakoda, I. Suemune, X. Marie, and T. Amand, "Symmetric quantum dots as efficient sources of highly entangled photons: Violation of Bell's inequality without spectral and temporal filtering" Phys. Rev. B 88, 041306(R) (2013)

④ その他

該当なし

3.1.4 多体量子系としての量子計算機の分析（清水　明）

(1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

① 研究のねらい

本研究では、「マクロな量子もつれ」を多体量子論から見て自然な形に定義し、それを用いて量子計算の各ステップに現れる量子状態を特徴付け、ノイズに対する安定性を調べる。さらに、各状態がデコヒアーした時の計算結果へのダメージを調べ、どの状態が量子計算に本質的であるかを特定することにより、多体量子系としての量子計算機の物理を解明することを目指した。

② 期間中の研究成果

(i) 一般の純粋状態における指標 p の計算方法の開発

一般の（実効的に並進対称な）純粋状態について指標 p を計算する方法を開発し、Variance-Covariance Method (VCM)と名付けた。また、これを強磁性体にマグノンがマクロに励起された状態や多体の量子カオス系、量子計算機のエネルギー固有状態 p の計算に適用することにより「マクロに異なる状態たちの重ね合わせ」に関する様々な条件を解明した[3]。

(ii) 「マクロにエンタングルした状態」の可視化する方法の開発

測定の解像度を落とせば非可換な物理量も同時確率分布を持つようになることに着目し、マクロにエンタングルした状態を可視化する方法を開発した[2]。

(iii) 量子ゼノ効果への現代的な測定理論への適用

量子ゼノ効果という測定理論の典型的な舞台に、現代的な測定理論を適用することにより、従来の安易な測定理論の結論とは全く異なる結論が得られることを示した。[1] これに関連する仕事は、Physics Reports 誌の招待総合報告に掲載された。

③ 研究成果に関連した主な成果論文リスト 3 報以内

[1] K. Koshino and A. Shimizu, “Quantum Zeno Effect by General Measurements”, Phys. Rep. 412 191-275 (invited review paper) (2005)

[2] T. Morimae and A. Shimizu, “Visualization of superposition of macroscopically distinct states”, Phys. Rev. A 74 052111 (2006)

[3] T. Morimae, A. Sugita and A. Shimizu, “Macroscopic entanglement of many-magnon states”, Phys. Rev. A 71 032317 (2005)

(2) 本研究領域終了後の継続と発展状況

本研究領域終了後、科研費基板研究 (C)「多自由度量子系の重ね合わせ状態の特徴付け・生成・操作・検出の理論」(2007-2009 年度)、「量子物理学と非平衡熱統計力学との相互適用」(2010 年度-)、新学術領域研究(研究領域提案型)「非平衡状態の非線形感受率」(2011 年度-) などの科研費につながっており、継続した研究を発展させている[3],[4]。

① 科学技術の進歩への貢献

多体量子系の統計力学的性質の新しい定式化では、等重率もボルツマン公式も不要な、まったく新しい量子統計力学の定式化に成功している。この定式化では、平衡状態をたった 1 個の特別な量子純粋状態 Themal Pure Quantm State(TPQ)であらわし、その 1 個の TPQ から圧力や磁化のような力学量のみならず、温度やエントロピーなどの純熱力学量まで求めることを可能にした。[1],[2]さらにこの定式化は、平衡状態にある多体量子系の性質が今までよりもずっと簡単に計算できるという実用性も備えている。これはランダムベクトルにハミルトニアンの 1 次式をかけ算してゆくだけで、TPQ が求まってしまうので、空間次

元や温度にも制限はないし、frustration がる系にも問題なく適用できるからである。

② 社会・経済的波及効果

現在も多岐にわたる領域のテーマに取り組んでおり、各種分野での貢献が今後期待される。

③ 上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な成果論文リスト（4 報以内）

[1] S. Sugiura and A. Shimizu, “Canonical Thermal Pure Quantum State”, Phys. Rev. Lett. 11 010401 (2013)

[2] S. Sugiura and A. Shimizu, “Thermal Pure Quantum States at Finite Temperature”, Phys. Rev. Lett. 108 240401 (2012)

[3] T. Yuge and A. Shimizu, “Long-time tail in an electric conduction system”, Prog. Theor. Phys. Supplement No. 178 [The 50th Anniversary of the Alder Transition - Recent Progress on Computational Statistical Physics -], pp. 64-71 (2009)

[4] A. Shimizu, “Generalized Phase Rules”, J. Phys. Soc. Jpn. 77 104001 (2008)

④ その他

該当なし

3.1.5 量子鍵を用いた次世代量子暗号プロトコル（村尾　美緒）

(1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

① 研究のねらい

従来の量子暗号のプロトコルは、量子状態を用いて古典的な暗号鍵を配布することにより、古典情報の安全な通信を可能とするものだったが、量子情報科学技術が進めば「量子情報のための暗号」が必要となる。本研究では、エンタングルメントを量子情報のための暗号鍵として用いる「量子鍵」の概念を提唱し、様々なタイプの量子鍵プロトコルを探索し、更に量子鍵のアイディアを量子認証・量子多者間プロトコル・量子署名等の量子暗号プロトコルへと応用することを目指す。

② 期間中の研究成果

(i) 基礎研究の成果[1],[2],[3]

基礎研究の成果としては、「遠隔操作量子情報抽出と遠隔操作量子情報破壊（量子情報の二者間での非対称な共有方法の発見と遠隔操作量子情報破壊が可能であるための必要十分条件の導出)」、「非対称遠隔量子もつれ操作（混合状態を用いた量子情報の共有を行うことによって、局所的操作の選択に応じた非対称な遠隔操作量子情報抽出と遠隔操作量子情報破壊を選ぶことができる方法の発見)」、「無限準位系に特有な量子もつれの性質の発見（有限・無限の次元性の違いによる量子物理の基盤的な量子もつれ構造（全順序・半順序構造の違い）に相違が生じることを示した)」、「LOCC（局所的量子操作と古典的通信）　状態識別と量子もつれ量の関係（LOCC 変換よりひとつ大きな量子操作の集合である Separable 変換に着目し、状態の量子もつれの量のみで定まる識別性の限界を求めた)」、「量子もつれ頑強性と低階数ノイズ（多者間量子もつれの一つの指標であるシュミット数から 1 を引いた階数を持つようなノイズは、量子状態の多者間量子もつれを完全には破壊することができないことを示した)」、「熱平衡状態における多者間量子もつれ（量子もつれの存在を保証する臨界温度の導出)」、「局所演算による量子状態への古典情報符号化」が挙げられる。

(ii) 応用研究の成果

応用研究の成果としては、「量子情報のための量子鍵プロトコル・遠隔量子情報スイッチプロトコルの提案」、「量子錠プロトコルの提案」、「計算量的秘匿量子演算の概念の提唱」などがあるほか、「計算量的秘匿量子演算を利用した量子公開鍵暗号システム」の構築が可能なことも示した。

③ 研究成果に関連した主な成果論文リスト 3 報以内

[1] M. Hayashi, D. Markham, M. Murao, M. Owari and S. Virmani, “Bounds on Multipartite Entangled Orthogonal State Discrimination Using Local Operationsand Classical Communication”, Phys. Rev. Lett. 96 040501 (2006)

[2] O. Masaki, K. Matsumoto and M. Murao, “Entanglement convertibility for infinite dimensional pure bipartite states”, Phys. Rev. A 70, 050301(2004)

[3] D. Markham, M. Murao, V. Vedral, Entanglement generation from thermal spin states via unitary beam splitters, Phys. Rev. A 70, 062312 (2004)

(2) 本研究領域終了後の継続と発展状況

本研究領域終了後、科研費基板研究（C)「多資源ネットワークを介した分散型量子情報処理」(2011 年度-) を獲得するなど継続して量子情報処理の研究につなげている。

① 科学技術の進歩への貢献

非対称な量子状態の共有に関する基礎的研究とその応用である量子鍵に関する仕事が、この分野で高く評価されている[1],[2],[3],[4]。量子状態自体を秘密鍵にして、量子計算機が

あっても安全な暗号システムは一分野をなすような系統的な研究への大きな橋頭堡を築いた。

② 社会・経済的波及効果

現在は、「有限スピン系から無限次元ボゾン系への移行」、「一方向量子計算とグラフ状態」、「分散型量子計算」などのテーマにも取り組んでおり、量子暗号プロトコルへの活用などが期待される。

また、「量子プログラム秘匿化装置及び量子プログラム秘匿化方法」に関する国内および国際特許を取得している。

③ 上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な成果論文リスト（4 報以内）

[1] A. Soeda, P. S. Turner, M. Murao, Entanglement cost of implementing controlled-unitary operations, Phys. Rev. Lett. 107, 180501 (2011)

[2] M. Aulbach, D. Markham and M. Murao, “The maximally entangled symmetric state in terms of the geometric measure”, arXiv:1003.5643(quant-ph), New J. Phys. 12, 073025 (2010)

[3] M. Hayashi, D. Markham, M. Murao, M. Owari and S. Virmani, “Entanglement of multiparty stabilizer, symmetric, and antisymmetric states”, Phys. Rev. A 77, 012104 (2008)

[4] D. Markham, J. Anders, V. Vedral, M. Murao and A. Miyake, Survival of entanglement in thermal states, Europhys. Lett. 81, 40006 p1-p6 (2008)

④ その他

該当なし

3.2 2004 年度採択課題

3.2.1 量子ビット構築へ向けてのヘリウム液面電子量子ドットの研究（池上　弘樹）

(1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

① 研究のねらい

液体ヘリウム上に浮かんだ電子は長い位相緩和時間と集積化可能なことから、量子計算の舞台として魅力的な系である。その実現にはヘリウム上の単一電子を 1μm^2 以下の狭い領域に閉じ込め（量子ドット）、その量子状態を制御し検出することが必要となる。本研究ではヘリウム薄膜下の微細電極を用いて量子ドットを実現する技術を確立し、その伝導特性により量子ドットの性質を解明するとともに、量子ビット実現に向けて新たな手法を提案することを目指す。

② 本研究領域期間中の研究成果

(i) ヘリウム表面上の電子をマイクロメーター領域に閉じ込める技術の開発[1]

厚さ 1μm 程度のヘリウム薄膜表面上の電子を、マイクロメーター領域に閉じ込めための電極を微細加工技術により開発した。室温と 1 ケルビン以下の低温の間の熱衝撃でも破壊されず、さらに電子を 1 か月以上の長期にわたり安定にトラップできる電極を開発した。

(ii) 幅 15 μm の 1 次元チャネルの伝導度[1]

抵抗の高温部分の温度依存性がバルクヘリウム上の電子に対する理論でよく再現できること、ウィグナー結晶転移温度がバルクヘリウム上の電子のものと一致することを確認することにより、1 次元チャネルの伝導度の信頼できる測定方法を確立した。

(iii) 幅 5 μm の 1 次元チャネルの伝導度

閉じ込めサイズが 5 μm とまだ少し大きいが、ヘリウム薄膜上の電子を確実に長時間安定にトラップすることができるようになった。また 5 μm チャネル中では閉じ込めの効果が現れ、その性質も定性的に理解できた。

③ 研究成果に関連した主な成果論文リスト 3 報以内

[1] H. Ikegami, H. Akimoto, and K. Kono, ”Wigner Solid Transition of Electrons Confined in Microchannel”, J. Low Temp. Phys. 150, 224-229 (2008).

(2) 本研究領域終了後の継続と発展状況

本研究領域終了後、 新学術領域研究(研究領域提案型)「イオンを用いた超流動ヘリウム 3 自由表面新奇現象の研究 」(2011 年度-)、若手研究(A)「超流動ヘリウム 3 自由表面で期待されるマヨラナ表面状態の観測」(2011 年度-)、挑戦的萌芽研究「超流動ヘリウム 3 表面束縛状態のマヨラナ粒子性検証のための新技術」(2012 年度-) などの科研費につながっており、さきがけ研究により開発された技術をベースにした研究へと発展させている。

① 科学技術の進歩への貢献

新学術領域「イオンを用いた超流動ヘリウム 3 自由表面新奇現象の研究」では、超流動ヘリウム 3-A 相で電子バブルの輸送現象の測定から、電子バブルの軌道が 1 ベクトルと垂直方向に曲がるという intrinsic Magnus 効果を初めて観測した[1]。この現象は超流動 A 相が時間反転対称性を破った状態である事を直接反映しており、本結果は、時間反転対称性の破れの初めて直接観測、1 ベクトルの向きを初めて決定したという点で大きな意味を持つ。さらなる詳細な研究により、超流動ヘリウム 3－A 相における「カイラル対称性の破れ」を直接観測した[1]。対称性の破れは、非常に一般的な物性物理学と素粒子物理学を包含する基礎概

念であり、今回のカイラル対称性の破れの観測は、対称性の破れの明快な観測例となると同時に、対称性の破れの結果として生じる位相欠陥などの詳細な理解につながる。

ヘリウム薄膜表面上の電子の１次元チャネル伝導度測定技術を発展させて、ヘリウム表面上の電子の伝導が示す非線形現象の観測[2]、電子のマイクロメーター領域への閉じ込めによる Wigner 結晶融解温度への影響の解明を行った[3]。さらに、幅間の電子が数個の場合の Wigner 結晶融解温度の振動現象の発見した[4]。これら一連の研究は、クーロン相互作用が強いメゾスコピック子電系の性質の解明につながると同時に、ヘリウム薄膜表面上における単一電子操作の基礎技術につながる。

② 社会・経済的波及効果

超流動ヘリウム３で「カイラル対称性の破れ」の直接観測に成功した際には、日経速報に掲載されるなどの報道がなされた。また、ヘリウム薄膜表面上の電子の１次元チャネル伝導度測定技術を応用することにより、単一電子操作と量子コンピューティングの可能性が期待される。

③ 上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な成果論文リスト（4 報以内）

[1] H. Ikegami, Y. Tsutsumi, K. Kono, “Chiral Symmetry Breaking in Superfluid 3He-A”, Science 341, 1236509-1-5 (2013)

[2] H. Ikegami, H. Akimoto, and K. Kono, “Melting of a quasi-one-dimensional Wigner crystal: Electrons on superfluid 4He in a narrow channel”, Phys. Rev. B 82, 201104(R) (1)-(4) (2010)

[3] H. Ikegami, H. Akimoto, and K. Kono, “Nonlinear Transport of the Wigner Solid on Superfluid 4He in a Channel Geometry”, Phys. Rev. Lett. 102, 046807(1)-(4) (2009)

[4] H. Ikegami, H. Akimoto, D. G. Rees, and K. Kono, “Evidence for Reentrant Melting in a Quasi-One-Dimensional Wigner Crystal”, Phys. Rev. Lett. 109, 236802(1)-(5) (2012)

④ その他

2009 年には、第三回日本物理学会若手奨励賞を受賞した

3.2.2 超伝導クーパー対を使用した電子 EPR 対高密度ビームの開発（趙　福來）

(1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

① 研究のねらい

2 個の相関している量子（EPR 対）は光子で実現され、量子情報処理へ向けた応用研究が盛んに行われている。一方、真空中の電子 EPR 対はその強い相互作用を生かした量子実験が期待できるが、必要不可欠な高密度 EPR 対電子ビームは実現されていない。本研究では、ナノチップ、ニオブ超伝導体チップ等の様々なナノ電子源に関して蓄積した技術を基礎に、電子源中での電子相関をそのまま電子ビームに反映させた高密度の EPR 対電子ビームを開発する。

② 期間中の研究成果

(i) 極高真空低温電界電子放出顕微鏡

ノイズ測定のため開発した極高真空低温電界電子放出顕微鏡の圧力は実験を行うシステムとしては記録的な 3x10-10Pa を達成し、不純物による電流の揺らぎも極めて少ない測定を可能にした。

(ii) 電界放出電流のショット雑音測定

装置に W(111)針を搭載して極高真空下で行ったショットノイズ測定は 10Hz 以下という低周波測定記録を達成した [3] 。

(iii) 放出電流の減少速度を利用した圧力測定

装置の極高真空環境を利用して電界電子放出現象を応用した極高真空領域の圧力測定法を開発した [1],[2] 。

③ 研究成果に関連した主な成果論文リスト 3 報以内

[1] B. Cho, T. Ichimura, R. Shimizu, and C. Oshima, “Quantitative Evaluation of Spatial Coherence of Electron Beam from Low temperature Field Emitters”, Phys. Rev. Lett., 92, 247601-1, 247601-4 (2004)

[2] E. Rokuta, T. Itagaki, T. Ishikawa, BL. Cho, HS. Kuo, TT. Tsong, C. Oshima, “Single-atom coherent field electron emitters for practical application to electron microscopy: Buildup controllability, self-repairing function and demountable characteristic”, Appl. Surf. Sci. 252, 3686-3691 (2006)

[3] T. Ishikawa, T. Urata, BL. Cho, E. Rokuta, C. Oshima, Y. Terui, H. Saito, A. Yonezawa and TT. Tsong, “Highly efficient electron gun with a single-atom electron source”, Appl. Phys. Lett. 90, 143120 (2007)

(2) 本研究領域終了後の継続と発展状況

本研究領域終了後、民間企業において継続した研究を発展させている。

① 科学技術の進歩への貢献

本研究領域終了後も継続的に論文を発表しており [1],[2],[3],[4]、次世代電子銃の開発に貢献していると思われる。

② 社会・経済的波及効果

「電子源、電子銃、それを用いた電子顕微鏡装置及び電子線描画装置」に関する国内特許を取得済みであり、米国でも公開されている。極低温電子銃の作製は電子顕微鏡の次世代電子銃開発につながる見込みであり、将来的には産業への応用が期待される。

③ 上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な成果論文リスト（4 報以内）

[1] T. Ishikawa, BL. Cho, E. Rokuta, and C. Oshima, “Direct confirmation of the high coherency of the electron beam from a nanotip”, Appl. Phys. Express 1 077001 (2008)

[2] K. Nomura, T. Nagao, BL. Cho, H. Katsuda, T. Matsumura, and C. Oshima, “Thermodynamically stable nanotips of Au-Mo alloy”, J. Vac. Sci. Technol. B: Microelectronics and Nanometer Structures, vol. 27, issue 6, p. 2432 (2009)

[3] Y. Akamine, K. Fujiwara, C. Oshima, BL. Cho, “Low fluctuation and drift of field emission currents emitted from Pd/W nanotips”, J. Vac. Sci. Technol. B: Microelectronics and Nanometer Structures.;29(4):[041808]. (2011)

[4] M. Nakajima, W. Ito, BL. Cho, C. Oshima, “Field electron emission from molybdenum platinum alloy tips”, Surf. Interface Anal.; 44(6):644-646 (2012)

④ その他

2004 年には第十回榊奨励賞を受賞した。

3.2.3 光学実験を手段とした量子情報処理のための量子力学的物理現象の研究（長谷川　祐司）

(1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

① 研究のねらい

量子ビームを用いた光学実験は、量子力学の基礎研究の研究手段として重要な役割を果たしてきた。本研究では、中性子及び光子を用いた干渉実験を中心に据え、単粒子のような単純な系から複合系までの未踏な量子物理現象を基礎的な観点から研究し、例えば量子技術を実現する上で必要不可欠である複合系の量子操作など、新技術の基盤となる基礎的な知的資産を形成することを目標とする。

② 本研究領域期間中の研究成果

(i) 中性子干渉計実験（２キュービット）

ベルの不等式の破れに使ったパスとスピンの自由度を２キュービットとした実験において、(1)約 63%の Kochen-Specker 的な矛盾、ならびに、(2)統計的な確率を考慮した不等式の破れ、(3)product observables を用いた不等式の破れを観測した。

(ii) 中性子干渉計実験（３キュービット）

パスとスピンの２キュービットに、エネルギー自由度を加えて３キュービットとした実験を通じて、さらなるキュービットである中性子のエネルギー準位のコヒーレントな操作を確立した。GHZ 状態の実験を通じて、古典的な予測の破れを観測した。[1],[2],[3]

(iii) 中性子ポラリメータ実験

入射スピンにノイズを加えたπ/2 スピン回転器でアップとダウンの重ね合わせの混合状態を生成しＳＵ（２）での発展後の位相を測定した。結果として、一般的な混合状態に関して全位相は純幾何学的位相と純動力学的位相の和で与えられないことを実験的に確認した。

③ 研究成果に関連した主な成果論文リスト 3 報以内

[1] RA. Bertlmann, K. Durstberger, Y. Hasegawa,BC. Hiesmayr, “Berry phase in entangled systems: A proposed experiment with single neutrons”, Phys. Rev.A. 69, 032112 (2004)

[2] Y. Hasegawa, R. Loidl, G. Badurek, M. Baron, and H. Rauch, “Quantum contextuality in a single-neutron optical experiment”, Phys. Rev. Lett. 97 230401 (2006)

[3] Y. Hasegawa, R. Loidl, G. Badurek, S. Filipp, J. Klepp and H. Rauch, “Evidence of entanglement and full tomographic analysis of Bell states in single-neutron system”, Phys. Rev.A. 76 052108 (2007)

(2) 本研究領域終了後の継続と発展状況

本研究領域終了後も、ウィーン工科大学において継続した研究を発展させている[1],[2].[3],[4]。

① 科学技術の進歩への貢献

ウィーン工科大学にある出力 250 キロワットの小さな原子炉から出る中性子を使い、前段の測定誤差と後段の測定の擾乱の積は、ハイゼンベルクが示した下限値より小さく、ハイゼンベルクの不等式が実際の計測に合わないことを示す一方、小澤の不等式が常に成り立つことを確認した[5]。

上記成果は、基礎物理学の世界に新しい原理を与え、基礎科学の新たな発展に寄与したといえる。アインシュタインが提唱したが不確定性原理の制約から検出できないともいわれている重力場の測定も可能になる可能性がある。

また、2013 年には、中性子干渉計で質量とスピンが幽体離脱する理論を実験で観測することにも成功している[6]。

上記成果は、中性子のスピンを使って実証したこの分野の研究の第一歩に過ぎず、電子の位置と運動量の関係やエネルギーと時間の関係については、これからさらなる研究成果が出てくることが期待される。

② 社会・経済的波及効果

小澤の不等式をポラリメータで実証した際には、日経各紙に掲載された。
中性子干渉計およびポラリメータでの新たな発見は、まったく新しい技術を生み出す可能性を秘めており、量子コンピューティングへの応用などを含め、今後の進展が大いに期待される。

③ 上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な成果論文リスト（4 報以内）

[1] S. Sponar, J. Klepp, G. Badurek, Y. Hasegawa, “Zero-field and Larmor spinor precessions in a neutron polarimeter experiment”, Phys. Lett. A , Volume 372 (18) (2008)

[2] S. Sponar, J. Klepp, R. Loidl, S. Filipp, G. Badurek, Y. Hasegawa, H. Rauch, “Coherent energy manipulation in single-neutron interferometry”, Phys. Rev. A 78, 061604(R) (2008)

[3] J. Klepp, S. Sponar, S. Filipp, M. Lettner, G. Badurek, and Y. Hasegawa, “Observation of Nonadditive Mixed-State Phases with Polarized Neutronsm”, Phys. Rev. Lett. 101, 150404 (2008)

[4] Y. Hasegawa, R. Loidl, G. Badurek, K. Durstberger, S. Sponar, and H. Rauch, “Engineering of triply entangled states in a single-neutron system”, Phys. Rev. A 81, 032121 (2010)

[5] J. Erhart, S Sponar, G Sulyok, G Badurek, M Ozawa and Y Hasegawa, "Experimental demonstration of a universally valid error–disturbance uncertainty relation in spin measurements", Nat. Phys. doi:10.1038/nphys2194 (2012）

[6] T. Denkmayr, H. Geppert, S. Sponar, H. Lemmel, A. Matzkin, J. Tollaksen, Y. Hasegawa, ”Observation of a quantum Cheshire Cat in a matter wave interferometer experiment”, arXiv:1312.3775 (2012).

④ その他

該当なし

3.2.4 代数的量子情報処理技術の研究（濵田　充）

(1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

① 研究のねらい

量子計算においてデコヒーレンス等の量子雑音に抗する技術として、また量子暗号の中心的情報処理機構として、高性能な代数的量子誤り訂正符号が求められている。本研究では、符号の持つシンプレクティック幾何の構造に注目し、これまでに理論的・定量的に存在を証明してきた高性能な符号をベースに、様々な場面に利用可能な量子符号や同様の構造を持つ量子情報処理方式(量子エンタングルメント蒸留など)を実際に設計することを目指す。

② 期間中の研究成果

(i) 代数的量子誤り訂正符号の一般的構成法[1]

有限体 GF(q) 上の比較的小さい共役符号対（内符号と呼ぶ）とその拡大体 GF(q^m) 上の符号対（外符号）が与えられたとき、それらを「連接（concatenate）」しより大きな共役符号対を得る方法を発見した。

(ii) 代数的量子誤り訂正符号の明示的構成と符号理論的評価基準を用いた評価[2]

内符号の集団を明示的に与えることで明示的な（多項式時間で構成可能な）連接共役符号対を得ることが出来た。

(iii) 代数的量子誤り訂正符号の情報セキュリティへの応用と解析[3]

代表的な盗聴通信路について評価したところ、本研究成果(ii)で得られた符号による達成可能レイトは理論的な限界に迫るものであることを確認した。

③ 研究成果に関連した主な成果論文リスト 3 報以内

[1] M. Hamada, “Quotient Codes and Their Reliability, “IPSJ Digital Courier, vol. 1, no. 0, pp. 450--460, Oct. [招待論文] (2005)

[2] M. Hamada, “Conjugate Codes and Applications to Cryptography,” Tamagawa University research review, no.12, pp. 19-25 (2006)

[3] M. Hamada, “Conjugate Codes for Secure and Reliable Information Transmission”, Proc. IEEE Information Theory Workshop (ITW), pp. 149-153, (2006)

(2) 本研究領域終了後の継続と発展状況

本プロジェクト終了後、 基板研究(A)「量子情報の数学的基礎研究」(2009 年度-）の研究メンバー、基板研究(C)「量子論に基づく符号理論の新展開と情報セキュリティへの応用」（2010 年度-）の研究代表として科研費につながっており、継続した研究を発展させている[1],[3]。特に、上記(iii)の研究成果は以下のように完成された。一般的な盗聴通信路について、本研究成果(ii)で得られた符号による達成可能レイトは理論的な限界に達していることを証明した[1]。

① 科学技術の進歩への貢献

「量子論に基づく符号理論の新展開と情報セキュリティへの応用」では、代数的誤り訂正符号の一般化と見なせる「剰余符号(quotient codes)」を研究し、これらの符号の設計規範の探求、構成、性能評価、理論的限界の解明などを主目的とした研究を行った。盗聴通信路の符号化器構成に関しては 2006 年に出願した基本的な符号化器の特許、および基本的符号化器を連接して構成する連接符号化器についても特許を取得している[1], [2],[3]。

特許取得の符号化器に関しては、より具体的な方式を与えているが、これは、情報理論における有名な盗聴下通信の問題（盗聴通信路、wiretap channels）に対する世界初の明示的最適解、すなわち漸近的に最適かつ多項式時間構成可能な符号化器（符号化器で明示

的なもの）である[1]。

現在も、引き続き符号の設計規範の探求、構成、性能評価、理論的限界の解明などに関する研究を継続している。

② 社会・経済的波及効果

これまでに発案した誤り訂正符号など、特に特許取得済みの符号化器は古典的な情報処理にも応用できるものであり、把握はできていないがすでに活用されている可能性はある。

③ 上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な成果論文リスト（4 報以内）

[1] M. Hamada, “Security of Concatenated Encoders for Wiretap Channels”, Proc. IEEE Int. Symposium on Information Theory (ISIT), pp.2558-2562 (2010)

[2] M. Hamada, “Concatenated Quantum Codes Constructible in Polynomial Time: Efficient Decoding and Error Correction”, IEEE Trans. Information Theory, vol.54, pp.5689--5704 (2008)

[3] M. Hamada, “Algebraic and Quantum Theoretical Approach to Coding on Wiretap Channels”, Proc. The 3rd International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP), In press (2008)

④ その他

該当なし

3.2.5 量子非局所性を用いた情報処理における不可逆性（森越　文明）

(1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

① 研究のねらい

量子情報理論の背後にある基本法則を明らかにする事により、量子論そのものへの深い理解が可能になると考えられる。本研究では、量子非局所性を用いた情報処理において生じる不可逆性を解明することにより、量子情報処理において、出来る事と出来ない事の境界線についての知見を増やすことを目指す。これにより、将来的には、操作に基づいた量子論の理解が進むと考える。

② 本研究領域期間中の研究成果

(i) 古典計算と量子計算の違いを明らかにする不等式の導出

Bell 型不等式の議論を情報処理の視点と融合させることにより、ある場合において、古典計算と量子計算の違いを露にする不等式を導いた。さらに、その不等式を「できること」と「できないこと」の「境界線」の一つと考えその理解を深めた。

(ii) 全体としての時間発展の質の違いを古典計算と量子計算で比較する手法の提案

単なるステップ数の比較にとどまらない新しい視点の一例として、全体としての時間発展の質の違いを古典計算と量子計算で比較する手法を見出だした。

具体的には、Leggett-Garg 不等式に端を発する「時間における Bell 不等式の概念」を，Braunstein と Caves によって提案された条件付きエントロピーに対する「情報理論的 Bell 不等式」の形で定式化し、量子計算における Grover のアルゴリズムに対して確かに破れていることを示した[1]。

③ 研究成果に関連した主な成果論文リスト 3 報以内

[1] F. Morikoshi, “Information-theoretic temporal Bell inequalities and quantum computation”, Phys. Rev. A 73, 052308 (2006)

[2] V. Vedral and F. Morikoshi, “Schrödinger’s cat meets Einstein’s twins: A superposition of different clock times,” Int. J. Theor. Phys 47, 2126 (2008)

(2) 本研究領域終了後の継続と発展状況

本研究領域終了後、科研費等の研究資金は獲得しておらず、民間企業内での研究に従事している。

① 科学技術の進歩への貢献

本研究領域終了後も継続的に論文として研究成果を発表しており、量子論の理解に貢献している[1],[2]。

② 社会・経済的波及効果

公開情報からは特になし。

③ 上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な成果論文リスト（4 報以内）

[1] F. Morikoshi, “Problem-solution symmetry in Grover's quantum search algorithm”, Int. J. Theor. Phys 50, 1858 (2011)

[2] F. Morikoshi, “Multipartite nonlocality in ontological models of quantum theory”, J. Phys. Soc. Jpn. 82, 055003 (2013) F. Morikoshi, “Multipartite Nonlocality in Ontological Models of Quantum Theory”, J. Phys. Soc. Jpn. 82 (2013)

④ その他

該当なし

3.3 2005 年度採択課題

3.3.1 異種原子組み替えによる固体表面量子ビットの実現（阿部　真之）

(1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

① 研究のねらい

異種原子組み替え技術を用いて個々の原子を動かし、固体量子コンピュータの素子の実現を目指す。具体的には、ピコメートルオーダーの空間分解能を持つ原子間力顕微鏡(FM-AFM)を用い、シリコン基板に埋め込まれた核スピン I=1/2 を持つリン原子を AFM 探針で動かしながら規則的かつ緻密に配列させる。このナノ構造(固体表面量子ビット)は、リン原子の核スピンと電子との相互作用を介して量子演算を行える素子として期待できる。

② 本研究領域期間中の研究成果

(i) ピコメートルオーダーでの探針位置決め技術の開発

熱ドリフトの影響を、フィードバックによる補正と熱ドリフト挙動を予測した位置補正により抑える技術を開発し、同じ場所での連続した画像測定を実現した。

(ii) 原子識別手法の確立

探針と試料原子の位置をピコメートルオーダーで制御できる手法を使うことにより、室温でのフォーススペクトロスコピーのノイズレベルを 5～10 倍向上させることができた。その結果として、探針に働く力の距離依存性の曲線が原子種により違うことを実験的に証明し、試料表面における個々の原子種の識別を行うことを可能にした。[1]

(iii) P/Si(100)表面における FM-AFM 高分解能測定

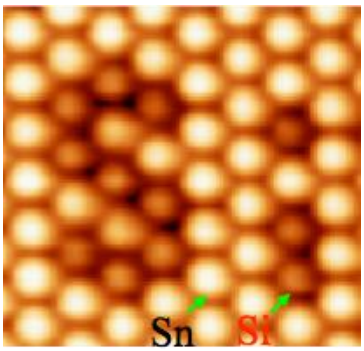
試料作成中の真空度や試料温度をモニターしながら試料を自動的に作成するシステムを構築し、さらに FM-AFM の観測条件を詳細に調べることで、安定して Si(100)-(2x1)表面を測定することを可能にした。また、InP 基板を使って P 原子を埋め込んだ Si(100)面の FM-AFM 測定を行うことを可能にした。

(iv) 室温における原子操作に必要な力の定量測定

室温において原子操作に必要となるポテンシャルを定量的に測定することにより、非常に小さいポテンシャルエネルギーで原子が動いていることを明らかにした。[3]

(v) 新しい原子操作モードの発見

探針先端にある原子をペン先のインクのように試料表面に落としていき、埋め込んでいく（原子ペン）方法で非常に効率よく原子操作ができることを見出した。



Sn 表面に書いた Si の文字の写真

図 3-2　異種原子組み替えで作成した原子埋め込み文字[2]

③ 研究成果に関連した主な成果論文リスト 3 報以内

[1] Y. Sugimoto, P. Pou, M. Abe, P. Jelinek, R. Pérez, S. Morita, O. Custance, “Chemical identification of individual surface atoms by atomic force microscopy”, Nature Vol. 446, pp. 64 - 67 (2007)

[2] Y. Sugimoto, P. Pou, O. Custance, P. Jelinek, M. Abe, R. Perez, S. Morita, “Complex Patterning by Vertical Interchange Atom Manipulation Using Atomic Force Microscopy”, Science vol,322, pp.413-417 (2008) Y. Sugimoto, P. Jelinek, P. Pou, M. Abe, S. Morita, R. Perez, and O. Custance, “ Mechanism for Room-Temperature Single-Atom Lateral Manipulations on Semiconductors using Dynamic Force Microscopy, Phys.Rev.Lett.,Vol.98, 106104 (2007)

(2) 本研究領域終了後の継続と発展状況

本研究領域終了後、挑戦的萌芽研究「レーザー冷却による非接触原子間力顕微鏡の熱揺らぎノイズの改善と超高感度化」（2009-2010 年度）、基盤研究(A)「原子操作による多元素ナノ構造体の機能制御」（2009-2011 年度）、挑戦的萌芽研究「原子操作を用いた新物質創世のための原子サイズ反応場の構築」（2012-2013 年度）、基盤研究(B)「ナノ分析顕微鏡を用いた光電変換現象の原子分解能観察」（2012-2013 年度）ほか多くの科研費プロジェクトにつながっており（いずれも研究代表者）、継続して研究を発展させている。

① 科学技術の進歩への貢献

2009 年には AFM を用いて半導体表面の個々の原子を操作する技術を開発し、特にそれが室温環境下でも行えることを実証したことを評価されファインマン賞を受賞した。

そのほかにも、酸化チタンの表面観測[3]や金属のクラスタの観測、AFM/STM 同時測定[2]により、探針と試料の間に働く力とトンネル電流の関係を実験的に明らかにする[1], [4]などの成果を出している。

② 社会・経済的波及効果

「原子間力顕微鏡および原子間力顕微鏡を用いた相互作用力測定方法」、「探針位置制御装置」、「原子位置固定装置、原子位置固定方法及び原子操作方法」については、国内特許を取得積みであり、さらに前者２つの特許は国際特許としても成立している。

酸化チタン表面の吸着原子やクラスタなどのナノ構造情報を定量的に抽出する研究を継続していくことにより、将来的には、クラスタもしくは原子レベルでの新材料の開発につながる可能性がある。

③ 上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な成果論文リスト（4 報以内）

[1] Y. Sugimoto, K. Ueda, M. Abe, and S. Morita, “Three dimensional scanning force/tunneling spectroscopy at room temperature”, J. Phys.: Condens. Matter Vol.24, pp.084008-1/-7 (2012)

[2] Y. Sugimoto, Y. Nakajima, D. Sawada, M. Abe, and S. Morita, “Simultaneous AFM and STM measurements on the Si(111)-(7x7) surface”, Phys. Rev. B Vol.81, pp.245322-1/-9 (2010)

[3] A. Yurtsever, Y. Sugimoto, M. Abe, and S. Morita, “NC-AFM imaging of the TiO2 (110)-(1x1) surface at low temperature”, Nanotechnology Vol.21, p.165702-1/-7 (2010)

[4] Y. Sugimoto, I. Yi, M. Abe, and S. Morita, “Simultaneous force and current mapping of the Si(111)-(7x7) surface by dynamic force microscopy”, Appl. Phys. Lett. Vol. 96 pp. 263114-1/-3 (2010)

④ その他

2009 年には、室温環境で半導体表面の個々の原子を操作する技術を開発したことを評価され、アジア初となるファインマン賞を受賞した。

3.3.2 測定過程を使った非古典的な原子集団スピン励起の生成と制御（宇佐見　康二）

(1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

① 研究のねらい

光と原子集団との相互作用において個々の原子の区別がつかない時、原子は集団的な振る舞いをする。この場合、原子集団のスピン状態は、光のようにボゾンとして量子的に取り扱うことができるようになる。本研究では、光と原子集団スピンのボゾンとしての類似性を探索することで、量子光学の実験手法を非古典的集団原子スピン状態の生成、推定、制御に適用し、量子集団スピントロニクスともいうべき新分野の開拓を目指す。

② 本研究領域期間中の研究成果

(i) 原子集団スピン系の量子状態トモグラフィーの提案

2 つのボゾンモードでの原子集団スピン系の考察を進めていくと、上記のホモダイン測定や量子状態トモグラフィーといった量子光学の手法を原子集団スピン系においても適用できることを理論的に明らかにした。

(ii) スピン量子数 m=0 状態のパリティに依存する量子位相の観測

非古典的な原子集団スピンの量子トモグラフィーの実証を目指し、レーザー冷却と光ポンピングによって用意した偏極された 87Rb 原子を舞台に研究を進めた結果、スピン量子数 m=0 状態のパリティに依存する量子位相を観測した。これは、教科書的にきれいな実験でトポロジカルな位相を見せる。

③ 研究成果に関連した主な成果論文リスト 3 報以内

[1] K. Usami, and M. Kozuma, “Observation of a Topological and Parity-Dependent Phase of m=0 Spin States”, Phys. Rev. Lett. 99, 140404 (2007)

[2] K. Usami, and M. Kozuma, “How to measure the quantum state of collective atomic spin excitation”, Phys. Rev. A 74, 043815 (2006)

(2) 本研究領域終了後の継続と発展状況

本プロジェクト終了後、 研究活動スタート支援「シリコンの微小球共振器で実現する固体のレーザー冷却」（2012 年度）などの科研費プロジェクトにつながっている。

① 科学技術の進歩への貢献

量子力学の原理に基づいた新しい情報処理・通信・高精度計測などを目指す量子情報科学の発展に物理と工学の側面から取り組んでいる [1],[2],[3] 。

② 社会・経済的波及効果

現在は、様々な量子の自由度を自在に制御することを新たな研究テーマとして取り組んでおり、今後の活躍が期待される。

③ 上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な成果論文リスト（4 報以内）

[1] K. Usami, A. Naesby, T. Bagci, B. Melholt Nielsen, J. Liu, S. Stobbe, P. Lodahl, and E. S. Polzik, “Optical cavity cooling of mechanical modes of a semiconductor nanomembrane”, Nature Phys. 8, 168 (2012)

[2] J. Liu, K. Usami, A. Naesby, T. Bagci, E. S. Polzik, P. Lodahl, and S. Stobbe, “Hi-Q optomechanical GaAs nanomembranes”, Appl. Phys. Lett. 99, 243102 (2011)

[3] A. Xuereb, K. Usami, A. Naesby, E. S. Polzik, and K. Hammerer, “Exciton-mediated photothermal cooling in GaAs membranes”, New J. Phys. 14, 085024 (2012)

④ その他

該当なし

3.3.3 量子通信路の可逆性と情報理論的・幾何学的保存量の評価（小川　朋宏）

(1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

① 研究のねらい

本研究では、量子通信路の可逆性、消失性を量子相互情報量の保存条件として考察することで、量子誤り訂正の性能評価や量子暗号プロトコルの安全性評価を統一的に扱うことを目指す。このとき、量子状態のコピーが不可能であることを示す no-cloning 定理と関係した二者間のトレードオフが重要になる。また、統計的に同等な量子状態族で不変な情報量についての研究を行い、量子情報幾何に新しい手法を提供することを目指す。

② 本研究領域期間中の研究成果

(i) 量子状態族の統計的同等性（相互遷移可能性）

本研究では統計的同等性に関して、量子 f-ダイバージェンスが完全不変量とはならないこと、与えられた量子状態族から作られる Connes コサイクルが生成する von Neumann 代数の同型性に帰着する必要十分条件、古典的指数分布族において Fisher 計量と α-接続が完全不変量であることを示した。

(ii) 量子および古典通信路の漸近的可逆性

漸近的可逆性について、古典的通信路の漸近的可逆性に関する特徴付け、古典的相互情報量および Holevo 相互情報量の漸近的不変性を示した。

(iii) 量子仮説検定と量子通信路符号化

古典－量子通信路符号化定理の証明において、受信量子状態からメッセージを識別するために、単純量子仮説検定を重ね合わせることで復号器を構成した。さらに「量子 Stein の補題」を大数の法則と同様に適用することで、復号器の誤り確率が漸近的にゼロになることを証明した [1],[2],[3] 。

(iv) 量子誤り訂正条件と作用素環論

量子通信路によるデコヒーレンスの影響を本質的に受けない部分代数（multiplicative domain）が量子通信路のシュレディンガー描像を介して、送信者側の符号部分空間 K 上の作用素代数 L(K) と同型な場合の時のみ、入力量子状態族は復号可能であることを証明した。さらに可換子の議論を用いることで、「量子誤り訂正可能なこと」と「盗聴者に何も情報を伝えないこと」が等価であることを作用素環論的に証明した。

③ 研究成果に関連した主な成果論文リスト 3 報以内

[1] T. Ogawa, and H. Nagaoka, “Making Good Codes for Classical-Quantum Channel Coding via Quantum Hypothesis Testing”, IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 53, no. 6, pp. 2261-2266 (2007)

[2] F. Hiai, M. Mosonyi, and T. Ogawa, “Large Deviations and Chernoff Bound for Certain Correlated States on the Spin Chain”, J. Math. Phys., vol. 48, 123301 (2007)

[3] F. Hiai, M. Mosonyi, and T. Ogawa, “Error Exponents in Hypothesis Testing for Correlated States on a Spin Chain”, J. Math. Phys., vol. 49, 032112, (2008)

(2) 本研究領域終了後の継続と発展状況

本研究領域終了後、若手研究(B)「量子力学系における通信路の可逆性と情報幾何」（2009-2012 年度）などの科研費の獲得につながっており、継続して研究を発展させている。

① 科学技術の進歩への貢献

「量子力学系における通信路の可逆性と情報幾何」では、以下の成果を実現した。

(i) 古典通信路を用いた漸近的なビットコミットメントプロトコルの計算機上での実装

古典通信路を用いた漸近的なビットコミットメントプロトコルを BCH 誤り訂正符号(パラメータ化された誤り訂正符号の一種) により計算機上で実装した。本研究で構成したビットコミットメントプロトコルは情報理論的安全性に基づいており、ノイズが利用できるという条件のもとで、参加者の能力を仮定しない無条件安全性が保証されており、復号アルゴリズムを必要としない。そのため、計算量が少なく、非力な計算機でも現実的なスピードで実行可能であり、古典-量子通信路で同様のプロトコルを構成することを可能にした。

(ii) 古典的な二つの通信路の順序を判定するアルゴリズムを計算機上で実装

古典的な二つの通信路 V、W は、「(*)V は W にさらにノイズを加えた通信路である」という条件から前順序が定まるが、(*)の条件からどれだけ離れているかを表すコスト関数を設定して、最急降下法により順序を判定するアルゴリズムを計算機上で実装した。このアルゴリズムは、盗聴通信路符号化やビットコミットメントプロトコルにおけるユニバーサルプロトコルの構成において有用なものである。

② 社会・経済的波及効果

量子誤り訂正の性能評価や量子暗号プロトコルの安全性評価方法を将来的に確立することができれば、量子コンピューティングの実現に向けての基盤技術として貢献することが期待される。

③ 上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な成果論文リスト（4 報以内）

[1] D. Kobayashi, H. Yamamoto, and H. Ogawa, “Secure Multiplex Coding Attaining Channel Capacity in Wiretap Channels”, IEEE Transactions on Information Theory, vol. 59, no. 12, pp. 8131–8143 (2013)

④ その他

2009 年から 2011 年にかけて全国の大学生・大学院生向けに合宿形式の講義「量子情報科学ウィンタースクール」を行っている。また、この講義を基に次の教科書を執筆している。

石坂智，小川朋宏，河内亮周，木村元，林正人，量子情報科学入門，共立出版，2012.

3.3.4 単一分子分光による固体中の単一スピンの観測（松下　道雄）

(1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

① 研究のねらい

核スピンは取り得る量子状態の数が数個に限られているので、量子情報の格好の担い手になる。ところが、その量子状態は多数のスピンが作り出す巨視的磁化の観測から求めており、スピンの集団の振る舞いしか分からない。個々のスピンの量子状態を知るために、単一分子分光の手法を用いて固体中の一個の発光性イオンを観測し、その核スピン状態を光遷移のゼーマン効果を利用して検出することを目指す。

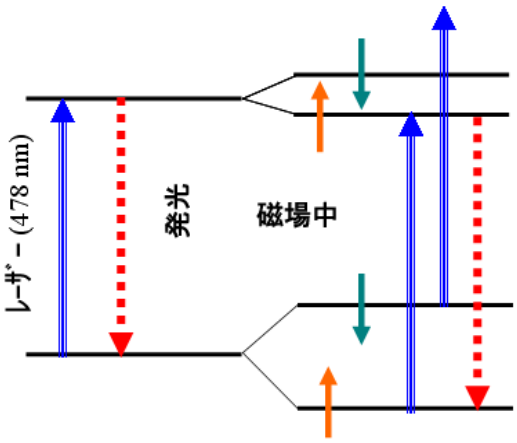


図 3-3　単一 Pr3+核スピンの光検出（出展：JST の Web サイト）

磁場をかけたとき、上準位と下準位でスピンによる分裂幅が異なり、イオンを発光させるレーザー波長が異なる（図 3-3）。二つの波長のどちらでイオンが発光するかでスピンの向きが分かる。

② 本研究領域期間中の研究成果

(i) 極低温で使用できるレンズの開発

色収差なく液体ヘリウム温度で使用できる対物レンズとして一体成型反射対物レンズ（f = 4 mm）を開発した[1]。

(ii) 単一タンパク質の近赤外スペクトルの温度変化の測定

単一タンパク質のスペクトルについて 5 K から 18 K までの温度変化の測定に成功した[2]。

(iii) 液体ヘリウム温度での単一タンパク質の可視蛍光分光

緑色の蛍光を発するタンパク質 GFP の液体ヘリウム温度における二光子蛍光スペクトルの測定に成功した[3]。

③ 研究成果に関連した主な成果論文リスト 3 報以内

[1] S. Fujiyoshi, M. Fujiwara, C. Kim, M. Matsushita, A. M. van Oijen, and J. Schmidt, “Single-component reflecting objective for low-temperature spectroscopy in the entire visible region”, Appl. Phys. Lett. 91 051125 (2007)

[2] H. Oikawa, S. Fujiyoshi, T. Dewa, M. Nango, and M. Matsushita, “How Deep Is the Potential Well Confining a Protein in a Specific Conformation? A Single-Molecule Study on Temperature Dependence of Conformational Change between 5 and 18 K”, J. Am. Chem. Soc., 130 4580 (2008)

[3] S. Fujiyoshi, M. Fujiwara, and M. Matsushita, “Visible Fluorescence Spectroscopy of Single Proteins at Liquid-Helium Temperature”, Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 168101

(2) 本研究領域終了後の継続と発展状況

本プロジェクト期間中から特定研究領域「液体ヘリウム温度での単一分子分光による酵素の構造・機能相関の研究」（2007-2011 年度）、本プロジェクト終了後には基板研究(B)「単一核スピンの量子状態の非破壊観測 」（2011 年度-）などの科研費の獲得につながっており、継続して研究を発展させている。

① 科学技術の進歩への貢献

低温の顕微分光用の対物レンズを開発[4]することにより、光学顕微鏡でタンパクの分子がより細かいレベルでみられるようになっただけでなく[1], [2], [3]、希土類イオンの単一核スピン観測を実現した。結果として、低温での顕微分光の適用範囲を一気に可視の全域と紫外域に拡げた。

② 社会・経済的波及効果

1 つのイオンを測定で光学的にみられるようになったことで、将来的には量子演算マシンの実用化につなげる要素として活用されることが期待される。

③ 上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な成果論文リスト（4 報以内）

[1] D. Uchiyama, H. Oikawa, K. Otomo, M. Nango, T. Dewa, S. Fujiyoshi, and M. Matsushita, “Reconstitution of bacterial photosynthetic unit in a lipid bilayer studied by single-molecule spectroscopy at 5 K”, Phys. Chem. Chem. Phys., 13, 11615-11619 (2011)

[2] S. Fujiyoshi, M. Hirano, M. Matsushita, M. Iseki, and M. Watanabe, “Structural Change of a Cofactor Binding Site of Flavoprotein Detected by Single-Protein Fluorescence Spectroscopy at 1.5 K”, Phys. Rev. Lett., 106, 078101 (2011)

[3] S. Fujiyoshi, Y. Furuya, M. Iseki, M. Watanabe, and M. Matsushita, “Vibrational Microspectroscopy of Single Proteins”, J. Phys. Chem. Lett., 1, 2541-2545 (2010)

[4] M. Fujiwara, S. Fujiyoshi, and M. Matsushita, “Single-component reflecting objective for ultraviolet imaging and spectroscopy at cryogenic temperature”, J. Opt. Soc. Am. B, 26, 1395-1399 (2009)

④ その他

該当なし

3.3.5 新しい核磁気共鳴を用いた核スピンの量子状態制御（遊佐　剛）

(1) 研究のねらいと研究期間中の達成状況

① 研究のねらい

分析技術として世の中で広く使われている核磁気共鳴(NMR)は、原子核の持つ核スピンの性質を用いている。NMR の手法を用いて、核スピンを素子とする量子コンピュータが注目されている。本研究では、従来と異なる新しい NMR 手法を用いてナノ領域の少数核スピンを操り、電子や光と融合させることで、核スピンを用いた量子情報処理装置や量子中継器などの量子機能デバイスの実現を目指す。

② 本研究領域期間中の研究成果

核スピンの縦磁化を検出し、ナノ領域の核スピンの量子状態を光学的に制御する技術の確立に向けて橋頭堡を築いた[1],[2],[3]。

(i) 抵抗検出 NMR による核磁気イメージングに関する研究

GaAs/AlGaAs 半導体で構成されるデバイスに、局所領域の核磁気イメージングを行うための磁場ゲートを配置させた試料に磁場と電流パルスを印可することにより、特定領域の核磁気共鳴を起こし観測した。

(ii) 光検出 NMR に関する研究

抵抗測定と光検出を組み合わせた同時測定を行うとともに、量子ホール状態の電子物性についての研究も行った。

③ 研究成果に関連した主な成果論文リスト 3 報以内

[1] T. Ota, G. Yusa, N. Kumada, S. Miyashita, and Y. Hirayama, “Decoherence of nuclear spins due to dipole-dipole interactions probed by resistively detected nuclear magnetic resonance”, Appl. Phys. Lett. 91 193101 (2007)

[2] G. Yusa, K. Muraki, K. Takashina, K. Hashimoto and Y. Hirayama, “Controlled multiple quantum coherneces of nuclear spins in a nanometre-scale device”, Nature 434, 1001 (2005)

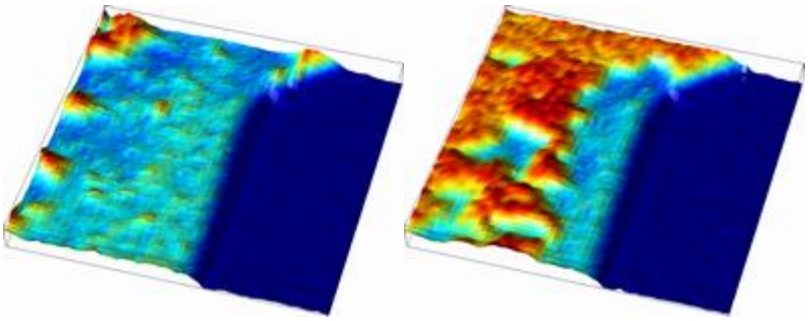
[3] Y. Hirayama, A. Miranowicz, T. Ota, G. Yusa, K. Muraki, S K. Ozdemir, and N. Imoto, “Nanometre-scale nuclear-spin device for quantum information processing”, J. Phys.: Condens. Matter 18 S885 (2006)

(2) 本研究領域終了後の継続と発展状況

本研究領域終了後、基盤研究(A)「半導体ナノ構造中の集団核スピンエンタングルメントを用いた集団量子情報処理 」（2009-2011 年度）、「半導体ナノ構造における集団量子情報処理の実証」（2012-2014 年度）などの科研費プロジェクトにつながっており、継続して研究を発展させている[4]。

① 科学技術の進歩への貢献

2012 年には、NTT の物性科学基礎研究所とともに、極低温、強磁場環境で動作する走査型偏光選択蛍光分光顕微鏡を開発し、分数量子ホール液体と呼ばれる電子の特殊な状態を撮像することに世界で初めて成功した（図 3-4)）。本成果は、電子間の相互作用によって生じる巨視的量子現象である分数量子ホール効果のミクロなスケールでの振舞いを世界で初めて明らかにした。



ほぼ全面が強磁性量子液体状態　　非磁性層領域が支配的

図 3-4　分数量子ホール液体のスピン相転移[2]

2014 年には、距離の制限がない量子エネルギーテレポーテーションの可能性を示した[1], [3]。離れた二人のユーザーから見た場合、量子エネルギーテレポーテーション(QET)は局所操作と古典通信によるエネルギー転送と見なすことができる。QET はブラックホール物理、マックスウェルデーモンの量子理論、固体物理での量子エンタングルメントなどのさまざまな基礎研究とつながりがある。従来の QET プロトコルで抽出できるエネルギーには距離の制限があり、距離に反比例してエネルギーの上限が減少してしまったが、二人のプロトコルユーザーの間の局所真空領域にスクイーズド状態を導入することで、現実的な距離間でエネルギーを転送できることを証明した。

② 社会・経済的波及効果

「核磁気共鳴撮像素子、及びそれを用いた撮像システム、撮像方法」、「核磁気共鳴撮像システム及び撮像方法」などで特許を取得しており、前者は米国での国際特許も取得している。2012 年に分数量子ホール液体と呼ばれる電子の特殊な状態を撮像することに世界で初めて成功した際には、日経新聞に掲載された。

極限環境下における物性物理現象の研究を今後も大きく進展させることにより、核磁気共鳴法と組み合わせた磁気イメージング法などへの応用展開が期待され、「核スピン状態の空間的な制御法および検出法」などで特許を取得している。

③ 上記、継続と発展状況を示す研究成果に関連した主な成果論文リスト（4 報以内）

[1] M. Hotta, J. Matsumoto, G. Yusa,” Quantum energy teleportation without a limit of distance”, Phys. Rev. A 89, 012311 (2014)

[2] J. Hayakawa, K. Muraki, and G. Yusa, “Real-space imaging of fractional quantum Hall liquids”, Nature Nano. 8, 31-35 (2013)

[3] G. Yusa, W. Izumida, and M. Hotta, “Quantum energy teleportation in a quantum Hall system”, Phys. Rev. A 84, 032336 (2011)

[4] T. Kawamura and G. Yusa, “Imaging of multinuclear spin system „I>1/2… in semiconductor microstructures using longitudinal-magnetization-detection nuclear magnetic resonance”, Appl. Phys. Lett. 97 112108 (2010)

④ その他

該当なし

第 4 章 科学技術イノベーションに資する研究成果の状況

追跡調査時点において、科学技術イノベーション創出に資する展開をしていると思われる4事例について研究代表者にインタビューを行い、基礎研究からの展開について本章でまとめた。

4.1 異種原子組み替えによる固体表面量子ビットの実現（阿部　真之）

(1) 研究テーマの状況

さきがけに採択される前の2003年頃から室温でのAFM装置の測定系の感度を上げる取り組みをすすめ、1年ぐらいで性能が向上してきたとき室温で原子を動かせるのではないかという現象を観測した。最初はノイズだと思ったが、探針と試料の距離を変えると原子が動いたり入れ替わったりすることが分かった[1],[2]。この現象を利用して、Sn をドーピングしたGe表面でSn原子の文字を書くことに成功した（図4-1)。

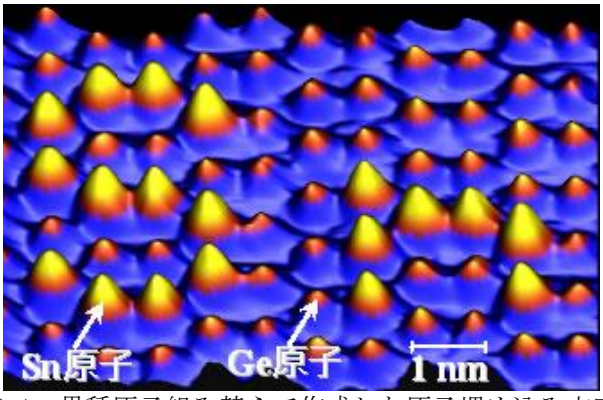
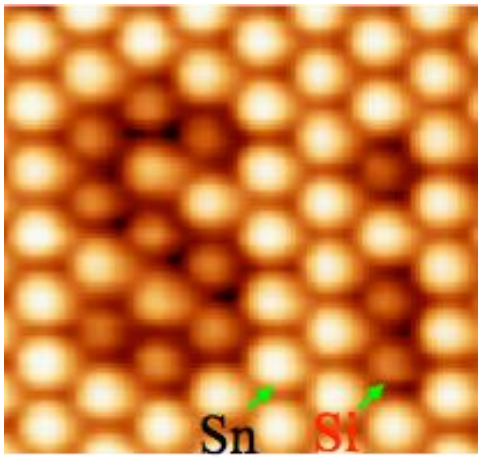


図 4-1　異種原子組み替えで作成した原子埋め込み文字[2]

さきがけには、AFMによる原子操作により原子を格子状に並べることにより、量子コンピュータの研究に活用できないかと考え採択された。

室温での観測の一番の問題は、熱ドリフトにより観測位置がずれていくことだが、その補正をきちんと制御するためにシステムを開発し、熱ドリフトを予想して観測をできるようになり、低温での観測の必要性がなくなった。その技術を使って、室温環境では世界で初めてSi基板の表面にSiの文字を書くことをできることを示した（図4-2）[4]。



Sn表面に書いたSiの文字の写真

図 4-2　NC-AFMによる室温での原子操作。Si原子による文字の作成を室温で実施[1]

その後も、酸化チタンの表面観測や、その上に金属のクラスタを作るなどの実験を重ねさ

まざまな成果を挙げてきた。

AFM/STM 同時測定でも非常に重要な成果を得た。先端に Si 原子がついている探針を用いて Si(111)-(7x7)表面のアドアトム上で力とトンネル電流の距離依存性を測定した時にトンネル電流が急落するが、この現象が起こるのは、探針に働く引力が最大になろうとするとき、つまり探針と試料の原子同士が共有結合をつくるときであることがわかった（図 4-2 参照)。また、力 F とトンネル電流 It の関係が実験的に $It \propto F^2$ であることを明らかにした。

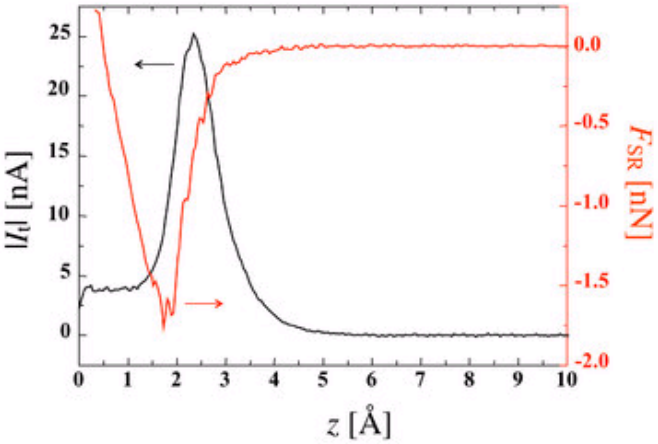


図 4-3　Si(111)-(7x7)表面における力の距離依存性（赤色、フォーススペクトロスコピー）とトンネル電流（It）の距離依存性（黒色)。引力が最大の位置（z=2Å）でトンネル電流が急落[3]

位置決めの技術は、2008 年から 2009 年頃にかけて世界一の技術を誇っていた。その後スイスのバーゼル大グループが技術力を向上させ様々な実験ができるようになってきたが、阿部の研究室でも世界レベルの研究を継続している。

(2) 科学技術への波及と展望

今後は、共有結合性から離れた素材として、機能性の材料の研究を進めていく。特に STM では見られない絶縁性のアルミナなどでの研究を進めているが、原子レベルの分解能にはまだ至っていない。

プロセス装置のパルスレーザー堆積法（PLD）を組み合わせることにより、導電性から離れた絶縁性のバルク材料での観察の可能性が広げられる。科研費の新学術領域の 5 年プロジェクトを活用して PLD を組み合わせた AFM を現在開発しており、その完成により新材料開発等の新たな成果が出るものと期待される。

実用触媒材料系では、触媒やデバイス基板として用いられるアルミナ（Al_2O_3）表面の原子分解の測定に成功しており、Al_2O_3 上の薄膜の初期成長過程や金属クラスタ形成過程についても今後の研究対象と考えている。

(3) 社会経済への波及と展望

酸化チタン表面の吸着原子やクラスタなどのナノ構造情報を定量的に抽出する研究は進んできた。材料工学への貢献として、絶縁体を原子レベルで見られるのは AFM だけであり、サンプル処理のところから PLD と組み合わせるなどして試行錯誤で努力を進めている段階にある。将来的にはクラスタもしくは原子レベルでの新材料の開発につなげられる可能性がある。

量子コンピュータに向けては、まだかなり飛躍が必要だが、薄膜形成により新たなデバイスの発見につながることが期待される。

(4) その他

室温において、試料表面に埋め込まれた状態、すなわち周辺の原子と強く結合している原

子を（結合を切りながら）AFM 探針を用いて動かすことに、世界で初めて成功した成果を評価され、平成 21 年度文部科学大臣表彰（科学技術賞研究部門）およびファインマン賞（アジア人初）を受賞している。

(5) まとめ

非接触原子間力顕微鏡（NC-AFM）の室温における高安定化と高精度位置制御技術を開発することにより、多くの試料表面での原子分解能観察が可能になり、表面原子の識別計測、NC-AFM と STM のハイブリッド計測、室温環境下における原子操作を実現した。

今後は、観測できる材料の領域をさらに広げ、環境やエネルギー分野で期待される先進材料の開発に貢献するとともに、量子コンピュータの開発に貢献することが期待される。

引用文献等

[1] Y. Sugimoto, P. Pou, O. Custance, P. Jelinek, M. Abe, R. Perez, S. Morita, “Complex Patterning by Vertical Interchange Atom Manipulation Using Atomic Force Microscopy”, Science 322, 413 (2008)

[2] Y. Sugimoto, M. Abe, S. Hirayama, N. Oyabu, Ó. Custance, and S. Morita, “Atom inlays performed at room temperature using atomic force microscopy”, Nature Materials 4, 156 (2005)

[3] D. Sawada, Y. Sugimoto, K. Morita, M. Abe, and S. Morita, “Simultaneous measurement of force and tunneling current at room temperature”, Appl. Phys. Lett. 94, 173117 (2009)

[4] 読売新聞（2008 年 10 月 17 日）

4.2 単一分子分光による固体中の単一スピンの観測（松下　道雄）

(1) 研究テーマの状況

さきがけ研究領域「単一分子分光による固体中の単一スピンの観測」での成果は一言で言えば、極低温で使える対物レンズを開発したことに尽きる。通常レンズにはいろんな部材が使われており、材料によって低温での縮み方が異なるため、既存の高性能レンズは低温では機能しない。

最初にレンズの作成を業者に依頼した際には、設計に問題があり観測に使えるレンズが作成できなかった。最終的に別の会社に依頼し、低温で観測可能なレンズ（焦点距離 4 ㎜、開口数 0.6）の作成に成功するまでには、多くの試行錯誤を繰り返した。

レンズ設計は、通過する光の性質ではなくガラスとしての構造で定めるもので、かつ設計会社に依頼すると、ときに1回1千万円近い費用がかかる。レンズの作成を依頼する際には、レンズの形状と寸法を決めたうえに、公差（必要な光学性能を満足させる設計値からの許容範囲）を設定しなければならないが、当初はどれだけの公差を許容できるかの知見がなかったために失敗を繰り返した。

試行錯誤の末、観測に要求される公差がわかり、新たなレンズを設計するノウハウが蓄積されてきて、プロジェクト期間中には２つのレンズをデザインすることができた。望遠鏡は屈折型のレンズが主力だが、反射型のほうが性能は高く将来性があったため、本プロジェクトでは低温の反射型顕微鏡を一度に実現することを目指した。

レンズの設計は同じだが、半分の大きさにするとレンズの性能は倍になるため、プロジェクト終了後の 2009 年に、当初設計したレンズと構造は同じだが半分の大きさ（100 円玉の半分程度；焦点距離 2 ㎜、開口数 0.6、発光全空間 37°）のレンズを完成させることにより、数Ｋで、可視で発光する１分子分光を成功させた。一方、そこでより高性能のレンズでなければ希土類イオンの単一核スピン観測はできないことがわかった。立体角 74°という倍の角度が研磨を考えると限界値であり、海外勢はいまだに実現できていない開口数 0.97、限界値まであと 3%のレンズを 2013 年になってようやく完成させた。このレンズを使って、Pr^{3+}結晶中の単一核スピンの観測を成功させている[2]。

(2) 科学技術への波及と展望

さきがけ期間でレンズをつくり、それと同じくらいの期間をかけてようやく単一核スピンを見られるようになった。また、それらの成果に派生して、光学顕微鏡でタンパク質一分子のより細かいレベルでの観測ができるようになってきた。

現在は、タンパク質分子など生体分子の集合体について集中して観測している。生体内の反応は一分子単独ではなく複数の集合体が関わることが多いからである。レーザーを複数当てることで複数の場所をおさえられるため、構造的な観察が可能となる[1]。

一方、希土類イオンでは相互作用を見たいと考えている。系を観察すると思ってもみなかったことが見えてくるのではないかという学問的なところを狙っている。今後は、既存の理論検証よりも、新しいものを見つけていきたい。

(3) 社会経済への波及と展望

1 個のイオンが見えるようになると核スピンの状態が見えるようになる。量子演算マシンを実用化するため、1つのイオンが測定で見えるようになったことに大きな意義がある。イノベーション的には、量子コンピューティングが不可能ではなくなった。

(4) その他

核スピンの観測ができるようになったのが 2013 年のことであり、今後の展開が大いに期待される。

(5) まとめ

単一分子分光は、通常のアンサンブル測定では平均化されてしまいわからない現象、た

とえばタンパク質のように複数の安定構造をとる分子やその集合体の構造、固体中や固体表面で分子が感じる局所環境の研究などに威力を発揮している。

松下らは、極低温で使える高性能レンズ（開口数 0.97）を開発することにより、たんぱく質の分子分光だけでなく、単一核スピンの光観測も可能にした。

引用文献等

[1] 「温度数 K のタンパク質 1 分子分光の 2013 年 7 月の状況：色素によるタンパク質の立体構造の 1 分子観測に向けて」（東京工業大学　藤芳　暁）

[2] 単一核スピンの光観測に向けた結晶中の Pr3+のイオン分光（東京工業大学　中村一平）

4.3 代数的量子情報処理技術の研究（濵田　充）

(1) 研究テーマの状況

ERATO からさきがけ研究領域「代数的量子情報処理技術の研究」に移行した。それ以前は、誤り訂正符号理論の分野の符号理論家として研究をしていた。この理論は、通信だとわかりやすく、ノイズがあってもデータをリカバリー可能にするデータ転送理論のことである。コンピュータの中でも使われており、データが壊れたら修復するというのは通信と同じ技術を利用している。

ショアは素因数分解を高速に解くことのできるアルゴリズムを量子計算機に使うことにより古典のコンピュータよりも早くできることを示した。ただし、量子コンピュータを使うとノイズの起こり方が強く、量子状態が壊れやすい。特にデコヒーレンスという量子特有のノイズが起こる。したがって量子的ノイズに何らかの訂正が必要になるため、ショアは量子版の誤り訂正符号を考えた。ショアの考えたエグザンプルは今やきれいな体系に発展しており、体系的枠組みは既にできていたが、まだやることはあると思い研究テーマを設定した。意外なことに誤り訂正符号は量子暗号につながっていた。量子鍵配送のプロトコル（ベネット、ブラザート）において、基本的な部分で必要だったのは量子誤り訂正符号（量子符号）の技術と一緒だった。一般の量子誤り訂正符号研究者には、このプロトコルの安全性証明を追うことは困難であると思え、そのため、この応用の重要性を認識している者は少ないように思えた。代数的な道具を使って符号を構成するノウハウは古典的な符号の研究を通して培っていたつもりなので、量子誤り訂正符号にも生かせると思い、この応用に重点を置いた量子符号の構成をテーマにしようと考えた。

さきがけのプロポーザルでは「量子符号を作ります」といって採択され、最終的にそれを成果として作ることができた。シンプレクティック符号は実質的に一番広い量子誤り訂正符号のクラスで、CSS 符号というのは量子暗号に直接使える少し狭いクラスの符号であり、インパクトが大きい。

これは以前に行った以下の研究の延長線上にある。ショア-プレスキルの鍵配送プロトコルが、従来よりも高いパフォーマンスの CSS 符号を用いてもセキュアであることを証明した。ショアのセキュリティプルーフは 4 頁の大まかなものであり、何を根拠、原理にしてセキュリティを示しているのかなど明確でない部分があったため、量子インストルメントという確立した理論に準拠し一貫した立場でセキュアであることを示した。[3]

なお、ショア-プレスキルの論文にも、従来よりも高いパフォーマンスの CSS 符号が利用できるであろうことを窺わせる短い曖昧な記述はあったがその詳細や証明は無かった。量子誤り訂正の場合、パフォーマンスはフィデリティ（忠実度）でみる。これは、量子情報＝量子状態を元の状態に保ちたいが、ノイズがのって崩れた後に元とどれだけ違うかということをみる指標で、シャノン流の漸近論では 1 に近づくのがベストな状況である。ベストな伝送レイトは量子キャパシティとして理論的に定義できる。理論値にどれだけ近づけられるのか、符号を具体的に作っていこうと考えた。なお、多くの符号理論家は最小距離というフィデリティとは異なる指標で符号を評価しているが、開発した符号は、この指標を用いても既知の符号の中で最高の性能を有していた。2009 年にはこれを改善した成果をシンポジウムで発表しており、いまだにベストレコードを保っている。（最小距離の評価基準は、古典とのアナロジーで考えるとわかりやすい。フィデリティに関しては、1 からフィデリティを引いたものが古典における符号の誤り確率に対応する。）その後、量子通信路用の符号としての評価を離れ、古典に立ち返って提案符号をワイヤータップチャネル(1 対 2 通信で盗聴者がいるモデル)のモデルに適用してみたところ、理論的限界である秘密容量（漸近的にベストなレイト）を達成していることが分かった。[4]

CSS 符号の変形を具体化し古典にも使えるようにした符号化方式については、特許を取得済みである。米国にも分割出願し特許を取得、日本でも最近取得した。古典に絞ると、盗聴者がいない前提で符号を作り、効率を少し犠牲にして何らかの仕組みを入れることで盗聴者が情報を取り出しにくくなる。冗長度をつけると盗聴者が取り出しにくくなるというのは 30 年前くらいから情報理論において考えられている話である。盗聴者を惑わすために正規

受信者には効いてこないランダムネス（スクランブル）を加えている。特許は直接には論文[4]で解析した符号化方式に該当しているが、この論文は、論文[1]、[2]で論じた符号（共役符号対≒CSS 符号）をワイヤータップチャンネルでモデル化されるような盗聴下通信に用いたときの漸近的最良性を（数年の回り道の末）示したものである。

このように古典の盗聴下通信における限界のレイト秘密容量を達成する（漸近的に最適な）符号がさきがけ研究で得られたわけであるが、量子誤り訂正符号に関しても同様の限界のレイト量子容量がある。量子容量に向けて符号を作っていくことはショアも意識したかもしれない。この問題はまだ解決にはほど遠い状況であり、公式もきれいではなく、リミティング（公式の中にリミットが入っている）があり、抽象的にもまだ解けてない問題がある。現在は、証明できてないことを示すことや、定量的に改善させることに取り組んでいる。

(2) 科学技術への波及と展望

量子計算においてデコヒーレンス等の量子雑音に抗する技術として、また情報を盗聴者から秘匿するための技術として高性能な代数的誤り訂正符号が求められている。濱田はこれらの符号の構成法の考案や基礎理論の構築を目指している。 量子誤り訂正および量子暗号に有用な誤り訂正符号の研究が盛んに進められているが、本質的にこれらの符号は通常の線形符号の一般化である剰余符号（quotient codes）とみなすことができる。濱田は符号理論の技術を駆使し、また量子情報理論の研究で得た知見をもとに、これまでに古典および量子盗聴通信路に有効な一般的な剰余符号の構成方法（従来から知られる連接法の一般化）を考案しているが、特に、最近、情報理論的に定式化された盗聴下通信の問題への適用において提案符号の漸近的最適性を示すことに成功した。これは明示的に構成された世界初の最適符号である。この成果を機軸に、基礎・応用を問わず多角的な発展を目指して研究を継続している。

(3) 社会経済への波及と展望

符号化、古典的な情報処理は簡単にできる。情報分野でホットトピックな分野なので既に使われている実績はあるかもしれない。

(4) その他

平成 24 年度からは総務省の戦略的情報通信研究開発推進制度（SCOPE）で「擾乱計測技術に基づく安全な量子通信の研究開発」に研究分担者として取り組んでいる。その概要は以下の通り。量子インストルメントの一般理論における小澤の不等式で定式化される新しい不確定性原理に基づき、盗聴通信路の擾乱に関する一般理論を確立するとともに、それらを現実の系に応用するために、弱測定の一般理論を展開して、弱測定によって通信路の擾乱を計測する基礎技術を開発する。また、盗聴下通信のための新しい符号化方式を考案し、量子インストルメントを用いた通信路モデルにおける符号性能の解析を行うことを目指している。

(5) まとめ

符号理論・情報理論・量子情報理論などの研究を経て，目下新しい符号理論の展開を推進中である。これは量子情報の研究の中で見出された新しい原理・概念をヒントにしている。具体的には，使い方次第で量子誤り訂正にも（量子）暗号にも使える多項式時間構成可能な符号を考案している。特に暗号目的では，Wyner の定式化した情報理論の盗聴通信路モデル（wiretap channel）において漸近的に最適であることを証明した。

引用文献等

[1] M. Hamada, “Conjugate Codes for Secure and Reliable Information Transmission”, Proc. IEEE Information Theory Workshop (ITW), pp. 149-153 (2006)

[2] M. Hamada, “Concatenated Quantum Codes Constructible in Polynomial Time: Efficient Decoding and Error Correction”, IEEE Trans. Information Theory, vol.54, pp.5689--5704 (2008)

[3] M. Hamada, “Reliability of Calderbank-Shor-Steane codes and security of quantum key

distribution",J. Phys. A: Math. Gen. 37 8303 doi:10.1088/0305- 4470/37/34/009(2004)
[4] M. Hamada, "Security of Concatenated Encoders for Wiretap Channels", Proc. IEEE Int. Symposium on Information Theory (ISIT), pp.2558-2562 (2010)

4.4 光学実験を手段とした量子情報処理のための量子力学的物理現象の研究（長谷川　祐司）

(1) 研究テーマの状況

中性子は状態（スピン、エネルギー）の操作を効率的にでき、かつデコヒーレンスが低いために量子力学の基礎実験に最適である。時間依存性のある磁場をかけることにより２体のみならず３体のエンタングルした状態を生成して、ベルの不等式やコッヘン・スッペカーの定理、GHZ 状態の特徴を調べることが可能になりプロジェクト期間中に様々な実験を進めた。実験装置は中性子干渉計と中性子ポラリメータの２つを使用している。

その後も、2012 年にポラリメータで小澤の不等式を実験的に実証し、その成果を Nature Physics に発表したり[1]、2013 年には干渉計でチシャ猫（Cheshir Cat）と呼ばれる質量とスピンが幽体分離する理論を実験的に観測する[2]ことに成功するなど、量子力学の基礎現象の研究に関して画期的な研究成果を近年次々に発表している。[3],[4],[5]

(2) 科学技術への波及と展望

小澤の不等式、およびチシャ猫の理論を実験で観測し、実験的の証明することにより、その先に新たな道があることを示したことは科学的に大きな意味があり、未踏の新現象やその応用を発見する突破口になりうる、基礎物理の実験的手法を用いた発見といえる。

(3) 社会経済への波及と展望

近年の成果は、研究の袋小路を突破し、パラダイムチェインジを成し遂げることにより、計り知れない応用を切り拓く可能性を秘めている。今まで測定不可能だったものが測れるようになり、不可能を可能にすることで研究の枠が大きくなってきている。新しい測定は新しい技術を生み出す可能性を秘めており、量子コンピューティングのみならず、新しい量子測定技術やその測定技術を用いた量子デバイスの実現に向けての一歩といえる。

(4) その他

特になし。

(5) まとめ

さきがけ研究期間終了後も、2012 年にポラリメータで小澤の不等式を実験的に実証したり、2013 年に干渉計でチェシャ猫（Cheshire Cat）という、質量とスピンが幽体分離する理論を実験で観測することに成功するなど物理の基盤研究分野で近年次々に革新的な成果を発表しており、これから応用も含めた研究発展が大いに期待される。

引用文献等

[1] J Erhart, S Sponar, G Sulyok, G Badurek, M Ozawa and Y Hasegawa, "Experimental demonstration of a universally valid error–disturbance uncertainty relation in spin measurements", Nature Physics doi:10.1038/ nphys2194 (2012）

[2] T. Denkmayr, H. Geppert, S. Sponar, H. Lemmel, A. Matzkin, J. Tollaksen, Y. Hasegawa, ”Observation of a quantum Cheshire Cat in a matter wave interferometer experiment”, arXiv:1312.3775 (2012).

[3] 不確定性原理の再出発（日経サイエンス 2012 年 4 月号）

[4] “一般化されたハイゼンベルグの不確定性関係の実験的検証” 長谷川 祐司、日本物理学会誌 67 (2012) 398-402.

[5] “不確定関係をめぐる攻防” 長谷川 祐司、パリティ 27 (2012) 44-48.