

戦略的創造研究推進事業
チーム型研究(CREST)
追跡評価用資料

研究領域
「量子情報処理システムの実現を目指した新
技術の創出」
(2003 年度～2010 年度)

研究総括: 山本 喜久

2017 年 3 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 研究領域概要	2
1.1.3 研究総括	2
1.1.4 領域アドバイザー	2
1.1.5 研究課題及び研究代表者	3
1.2 研究領域終了後の発展と波及効果	4
1.2.1 研究成果の発展状況や活用状況	4
1.2.2 研究成果から生み出された科学技術や社会・経済への波及効果	5
1.3 研究領域の展開状況(系譜図)	7
第2章 追跡調査(研究領域全体動向)	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 調査方法	8
2.2 研究成果概要	10
2.2.1 研究助成金	10
2.2.2 論文	13
2.2.3 特許	14
2.3 科学技術や社会・経済への波及効果	15
2.3.1 科学技術への波及効果	15
2.3.2 社会・経済への波及効果	17
第3章 各研究課題の主な研究成果及び波及効果	19
3.1 2003年度採択研究課題	19
3.1.1 光子を用いた量子演算処理新機能の開拓(井元信之)	19
3.1.2 超伝導量子ビットシステムの研究開発(蔡兆申)	22
3.1.3 中性原子を使った量子演算システムの開発(清水富士夫)	26
3.1.4 原子アンサンブルを用いた量子情報処理の基盤技術開発(高橋義朗)	28
3.1.5 量子ネットワークへ向けた量子エンタングルメント制御(古澤明)	31
3.2 2004年度採択研究課題	35
3.2.1 単一光子から単一電子スピンへの量子メディア変換(小坂英男)	35
3.2.2 冷却イオンを用いた量子情報処理基礎技術(占部伸二)	38
3.2.3 分子の電子・振動・回転状態を用いた量子演算基盤技術の開発(百瀬孝昌)	40
3.3 2005年度採択研究課題	43
3.3.1 通信波長帯量子もつれ光子とその応用システム(井上恭)	43

3.3.2	極低温原子を用いる量子計測法の開拓(香取秀俊)	46
3.3.3	分子スピン量子コンピュータ(北川勝浩)	49
3.3.4	量子多体協力現象の解明と制御(宮下精二)	53
第4章	科学技術イノベーションの創出に資する研究成果	56
4.1	超伝導量子ビットシステムの研究開発(蔡兆申)	56
4.1.1	研究の概要	56
4.1.2	研究成果の波及と展望	57
4.2	原子アンサンブルを用いた量子情報処理の基盤技術開発(高橋義朗)	60
4.2.1	研究の概要	60
4.2.2	研究成果の波及と展望	61
4.3	量子ネットワークへ向けた量子エンタングルメント制御(古澤明)	65
4.3.1	研究の概要	65
4.3.2	研究成果の波及と展望	66
4.4	極低温原子を用いる量子計測法の開拓(香取秀俊)	69
4.4.1	研究の概要	69
4.4.2	研究成果の波及と展望	71

要旨

本資料は、戦略的創造研究推進事業のチーム型研究 CREST の研究領域「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」(2003 年度～2010 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等を明らかにし、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等に資するために、追跡調査を実施した結果をまとめたものである。

第1章は、研究領域の追跡調査の概要について概説した。まず1.1項では本研究領域全体の戦略目標と研究の概要を示した。次いで研究総括及び領域アドバイザー、また、研究課題の各採択年度、研究課題名、研究代表者とその所属について記載した。1.2項では各研究課題について、本研究領域終了後、研究代表者を中心にどのように研究が進展したかについて調査した結果を示した。またこれらの研究からどのような新たな科学技術上の成果が生み出されたか、あるいは得られた成果が社会や経済に及ぼした影響についてまとめた。

第2章は、本研究領域全体の研究概要について、研究期間中及び終了後の成果、成果物について調査の結果をまとめた。2.1項では本追跡調査の目的と方法について記載した。2.2項ではそれぞれの研究代表者が本研究開始後に獲得した研究助成金の種類と金額、期間中及び終了後に発表した原著論文の数、出願あるいは登録した特許数を表にまとめた。2.3項では科学技術への波及効果として各研究代表者の受賞、学会・研究会等への貢献、また注目に値する進展状況(量子コンピュータ、ボース・アインシュタイン凝縮体の実現、量子テレポーテーション、光格子時計など)について調査した結果を記載した。

第3章は、本研究領域の各研究課題について、まず、本研究領域期間中の研究成果と関連論文をまとめ、次に研究終了後の発展状況を記載した。研究終了後の調査については、研究代表者の研究の全体像を記述した後に、科学技術の発展に寄与した代表的成果を取り上げ、さらに社会的、経済的な波及効果の展望についてまとめた。

第4章では本研究終了後、科学技術イノベーションの観点から進展のあった研究代表者のうち、4名の研究代表者にインタビューを行い、それぞれの研究成果(超伝導量子ビットシステム、原子アンサンブルを用いた量子情報処理、量子ネットワークへ向けた量子エンタングルメント、極低温原子を用いる量子計測法)をまとめた。ここでは特に本領域研究終了後、「量子情報処理システムに関する新技術の創出」という観点から、各研究代表者が世界の量子情報処理システム研究の発展の中でどのような展開を図り、成果を上げたかについて聴取し、事前調査の結果と合わせ、科学技術上の発展及び社会的波及効果の観点から調査結果をまとめた。

第1章 追跡調査概要

1.1 研究領域概要

1.1.1 戦略目標

情報通信技術に革新をもたらす「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」(2003年度発足時)

1.1.2 研究領域概要

本研究領域は、ミクロの世界で観測される量子力学的現象を制御し、記憶、演算などの情報処理を行うシステムへ展開していくための基盤となる新しい技術の創出を目指す研究を対象とした。

この領域では量子情報処理のハードウェアの構成方法に関する実験的、理論的研究が切望されている。

本領域で目指すものは光・電子・原子・原子核など様々な系の量子効果に基づく基本的なデバイスや多量子ビット化の技術、量子情報処理の伝送技術や中継技術であり、さらにそれらの基盤となる要素研究、例えば量子もつれ現象の制御・観測に関する研究等に関するシミュレーションを含めた研究である。

具体的には、イオントラップ、冷却原子、半導体中の電子スピン若しくは原子核スピン、ジョセフソン接合素子、NMR、線形光学系などを用いた量子コンピュータ技術、また、原子集団や量子テレポーテーション技術を用いた量子中継技術、単一光子やエンタングル光子対を用いた量子暗号技術などを目指した。

1.1.3 研究総括

山本喜久(採択時:国立情報学研究所教授/スタンフォード大学教授、現:科学技術振興機構革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)プログラムマネージャー)

1.1.4 領域アドバイザー

本研究領域の研究課題に理論的・実践的基盤を与えているのは、量子論、統計力学、固体物性論、原子・光物理、固体電子物性、固体光物性、オプトエレクトロニクス技術の諸分野である。各分野で日本を代表する研究者の方6人を領域アドバイザーに定め、研究代表者の指導に当たった。表1-1に領域アドバイザーを示す。

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
五神 真	東京大学	教授	2003年10月～2011年3月
樽茶 清悟	東京大学	教授	2003年10月～2011年3月
細谷 暁夫	東京工業大学	教授	2003年10月～2011年3月
藪崎 努	京都大学	名誉教授	2003年10月～2011年3月
覧具 博義	東京農工大学	名誉教授	2003年10月～2011年3月
和達 三樹	東京理科大学/東京大学	教授/名誉教授	2003年10月～2011年3月

(註)所属と役職はCREST終了時点を記載

1.1.5 研究課題及び研究代表者

研究課題の公募は2003年度から3年間にわたり、計12件の研究課題が採択された。表1-2に各採択年度の研究課題、研究代表者、採択時の所属と役職、終了時の所属・役職及び追跡調査時の所属・役職を示した。

表 1-2 研究課題と研究代表者(第1期、第2期、第3期)

期 (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
第1期 (2003)	光子を用いた量子演算処理 新機能の開拓	井元 信之	大阪大学大学院 基礎工学研究科 教授	大阪大学大学院 基礎工学研究科 教授	大阪大学大学院 基礎工学研究科 教授
第1期 (2003)	超伝導量子ビットシステムの 研究開発	蔡 兆申	日本電気ナノエ レクトロニクス 研究所 主席研 究員／理化学研 究所フロンティ ア研究システム 非常勤チームリ ーダー	日本電気ナノエ レクトロニクス 研究所 主席研 究員／理化学研 究所巨視的量子 コヒーレンス研 究チーム チー ムリーダー	東京理科大学理 学部第一部物理 学科 教授／理 化学研究所創発 物性科学研究セ ンター量子情報 エレクトロニク ス部門超伝導量 子シミュレーシ ョン研究チーム チームリーダー
第1期 (2003)	中性原子を使った量子演算 システムの開発	清水 富士夫	日本電信電話物 性科学基礎研究 所 客員教授／ 電気通信大学新 世代レーザーセ ンター 共同研 究員	日本電信電話物 性科学基礎研究 所 客員教授／ 電気通信大学新 世代レーザーセ ンター 共同研 究員	-
第1期 (2003)	原子アンサンブルを用いた 量子情報処理の基盤技術開 発	高橋 義朗	京都大学大学院 理学研究科 助 教授	京都大学大学院 理学研究科 教 授	京都大学大学院 理学研究科 教 授
第1期 (2003)	量子ネットワークへ向けた 量子エンタングルメント制 御	古澤 明	東京大学大学院 工学系研究科 助教授	東京大学大学院 工学系研究科 教授	東京大学大学院 工学系研究科 教授
第2期 (2004)	単一光子から単一電子スピ ンへの量子メディア変換	小坂 英男	東北大学電気通 信研究所 助教 授	東北大学電気通 信研究所 准教 授	横浜国立大学工 学研究院物理情 報工学専攻 教 授
第2期 (2004)	冷却イオンを用いた量子情 報処理基礎技術	占部 伸二	大阪大学大学院 基礎工学研究科 教授	大阪大学大学院 基礎工学研究科 教授	大阪大学 名誉 教授／情報通信 研究機構 客員 研究員
第2期 (2004)	分子の電子・振動・回転状 態を用いた量子演算基盤技 術の開発	百瀬 孝昌	情報通信研究機 構 客員研究員 ／ブリティッシ ュコロンビア大 学 教授	情報通信総合研 究機構 客員研 究員／ブリティ ッシュコロンビ ア大学 教授	ブリティッシュ コロンビア大学 教授
第3期 (2005)	通信波長帯量子もつれ光子 とその応用システム	井上 恭	大阪大学大学院 工学研究科 教 授	大阪大学大学院 工学研究科 教 授	大阪大学大学院 工学研究科 教 授

期 (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
第3期 (2005)	極低温原子を用いる量子計測法の開拓	香取 秀俊	東京大学大学院 工学研究科 助 教授	東京大学大学院 工学研究科 教 授／理化学研究 所・基幹研究 所・香取量子計 測研究室 招聘 主任研究員	東京大学大学院 工学研究科 教 授／理化学研究 所・香取量子計 測研究室 招聘 主任研究員・光 量子工学研究領 域エクストリー ムフォトンクス 研究グループ時 空間エンジニア リング研究チー ム チームリー ダー／チュービ ン ゲン 大 学 Distinguished Guest Professor
第3期 (2005)	分子スピン量子コンピュ ータ	北川 勝浩	大阪大学大学院 基礎工学研究科 教授	大阪大学大学院 基礎工学研究科 教授	大阪大学大学院 基礎工学研究科 教授
第3期 (2005)	量子多体協力現象の解明と 制御	宮下 精二	東京大学大学院 理学系研究科 教授	東京大学大学院 理学系研究科 教授	東京大学大学院 理学系研究科 教授

1.2 研究領域終了後の発展と波及効果

1.2.1 研究成果の発展状況や活用状況

本研究領域では、2003年度に第1期の5件、2004年度に第2期の3件、2005年度に第3期の4件と合計12件の研究課題を採択し、量子情報処理システム関連技術の全体にわたり量子コンピュータの実現に向けた研究開発を行った。さらに、2009年度からスタートした山本喜久を中心研究者とするFIRST「量子情報処理プロジェクト」に発展し研究開発が進められた。

また、2009年から蔡兆申を領域代表とする科学研究費新学術領域研究(研究領域提案型)「量子サイバネティクス」が、固体素子系(蔡兆申)、分子スピン量子(北川勝浩)、原子系(高橋義朗)、イオン系(占部伸二)等の研究項目に展開されて実施された。

香取秀俊が発明した光格子時計に関しては、2010年度からERATO「香取創造時空間プロジェクト」において、基礎科学を支える量子計測と原子時計の研究である光格子時計による高精度時間の実時間測定を実現することを目指し、研究開発が展開された。

量子コンピュータの実現に向けて、2014年度に山本喜久をプログラムマネージャーとして内閣府のImPACT「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」がスタートした。量子人工脳、量子セキュリティネットワーク及び量子シミュレーションの研究開発を進める計画が進んでいる。

1.2.2 研究成果から生み出された科学技術や社会・経済への波及効果

(1) 研究成果の科学技術の進歩への貢献

蔡兆申は、2009 年度からスタートした科学研究費新学術領域研究(研究領域提案型)「量子サイバネティクス」において、超伝導量子ビットを人工原子として用いた量子光学の研究を飛躍的に進展させた。超伝導コヒーレントデバイスは人工原子であり、自然原子に比べて設計性、集積性、光との強い結合などの多くの利点を持っており、超伝導人工原子(量子ビット)と光子を強く結合させた系で、従来の自然原子を使った量子光学の重要な効果を再現した。また、長年探求されてきた「量子位相すべり(CQPS: Coherent Quantum Phase Slip)」効果を、分光法により量子コヒーレントの存在を示すことにより初めて実現した。これは超伝導細線を磁束がトンネルする現象で、ジョセフソン効果に対して量子力学的共役な関係にある効果で、超伝導状態の基本的な輸送現象である。

高橋義朗は、世界に先駆けてイッテルビウム(Yb)原子に着目して、全光学的に冷却・閉じ込めを実現する技術を開発して、2003 年に Yb 原子では初めてボース・アインシュタイン凝縮を実現した。その後、様々なボース・フェルミ混合量子気体を光格子に導入して、その強相関係のユニークな性質を次々に明らかにした。このような研究成果は、世界中の実験・理論研究者の注目を集め、Yb 原子や他の 2 電子原子を用いたボース・アインシュタイン凝縮やフェルミ縮退の研究が世界中で行われるようになった。

古澤明の研究グループと、ブリストル大学、サウサンプトン大学、NTT 先端集積デバイス研究所は、量子テレポーテーション装置の心臓部である量子エンタングルメント生成・検出部分の光チップ化に成功した。従来、約 1 m²の光学定盤上に非常に多くの光学素子を配置して構成していた量子エンタングルメント生成・検出部分を、26mm×4mm のシリコン基板上に形成した微細な光回路により実現したものである。量子コンピュータの実用化に向けて、拡張性の問題を解決する糸口となる成果と考えられる。

ERATO「香取創造時空間プロジェクト」で、二つの Sr 光格子時計の周波数において 10⁻¹⁸ のレベルでの一致が確認され、冷却型光格子時計による 18 乗台の時間精度が達成された。この成果は原子時計の研究全体に大きなインパクトを与えるもので、秒の再定義への寄与も期待されている。また物理定数の恒常性の検証などの基礎物理に関わる実験系としても重要である。

(2) 研究成果の応用に向けた発展状況

量子計算・量子情報処理の観点から、量子力学のコヒーレントな状態が巨視的な物理系で発現することは、長年追求されてきた興味深い現象である。その中でも、1999 年に当時日本電気(NEC)の研究所に所属していた蔡兆申と中村泰信が世界で初めて実現した超伝導量子ビットは、超伝導回路の設計自由度の高さから、世界中で精力的に研究が進められてきた。現在、北米の企業(米国インテル、IBM、グーグル、カナダ D-Wave Systems)等を中心に進められている量子コンピュータの研究・製品開発も、超伝導量子系がほとんどである。東京工業大学の西森秀稔が基礎理論を構築した量子アニーリングは、組合せ最適化を量子力学の原理を応用して解く汎用アルゴリズムである。カナダ D-Wave Systems は、量子アニーリングの原理に従ってハードウェア的に動作する装

置を開発し、「世界初の量子コンピュータ」として販売している。

古澤明の研究グループは、光の粒子性と波動像を統合した実験手法を着想し、ハイブリッド量子テレポーテーションを実現した。光を用いる場合、基本素子は波長程度より小さくできないという問題があるが、時間領域多重の手法によってそれが解決できることを明らかにした。時間領域多重とは、出力を元に戻すことで、同じ素子を何度も使うことであり、10万回使えば10万分の一に素子を縮小したことと同等である。残る課題は、誤り訂正である。

香取秀俊が研究開発した光格子時計という全く新しい概念と、その後の継続的な研究開発の成果により、周波数標準のロードマップが塗り替えられつつある。さらに特筆すべき点として、世界中の周波数標準機関が光格子時計の重要性を認識し、その研究開発競争を展開する状況を香取秀俊が作り上げたことが挙げられる。「光格子時計ネットワークによる相対論的時空間情報インフラ」は、地球上のあらゆる地点における相対論的な時空間情報をユーザーが自由に利用できる状況を実現することから、現在予想もされていないような新たなサービス、アプリケーションにつながる可能性を持っており、その意味で更に大きな社会、経済への貢献のポテンシャルを秘めている。そのためには、小型化と連続運転をできるようにすることが今後の課題である。

1.3 研究領域の展開状況(系譜図)

本研究領域では、2003 年度から 2005 年度に掛けて合計 12 件の研究課題を採択し、量子情報処理システム関連技術の全体にわたり量子コンピュータの実現に向けた研究開発を行った。図 1-1 に示すように、本研究領域で得られた成果は、後続の FIRST、新学術領域研究、ERATO 及び ImPACT（内閣府）等のプロジェクトに引き継がれている。

継続的に展開された FIRST「量子情報処理プロジェクト」では研究テーマの絞込みが行われてきた。本技術領域における最近 5 年程度の間の世界的研究により、量子コンピュータの実用化は当初の想定を超えた難しい技術領域であることが明らかになってきた。また、量子暗号技術では技術的課題はクリアできそうだが速度・コスト等の実用化に向けた課題が大きいことも明らかになってきた。このような状況の中で、本研究領域から実用化に向けたテーマとして、ERATO より光格子時計が、FIRST 及び新学術領域研究量子サイバネティクス等を経て人工脳の研究開発等が継続的に進められている。

2014 年度にスタートした内閣府の ImPACT「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」では、脳型情報処理を量子コンピュータに取り込んだ量子人工脳を開発し、これを絶対に盗聴を許さない量子セキュアネットワークで結んだ高度知識社会の基盤を確立する計画を進めている。このプロジェクトには、今後 5 年程度を目途にして、実用化に向けた研究開発の成果を得ることが期待されている。

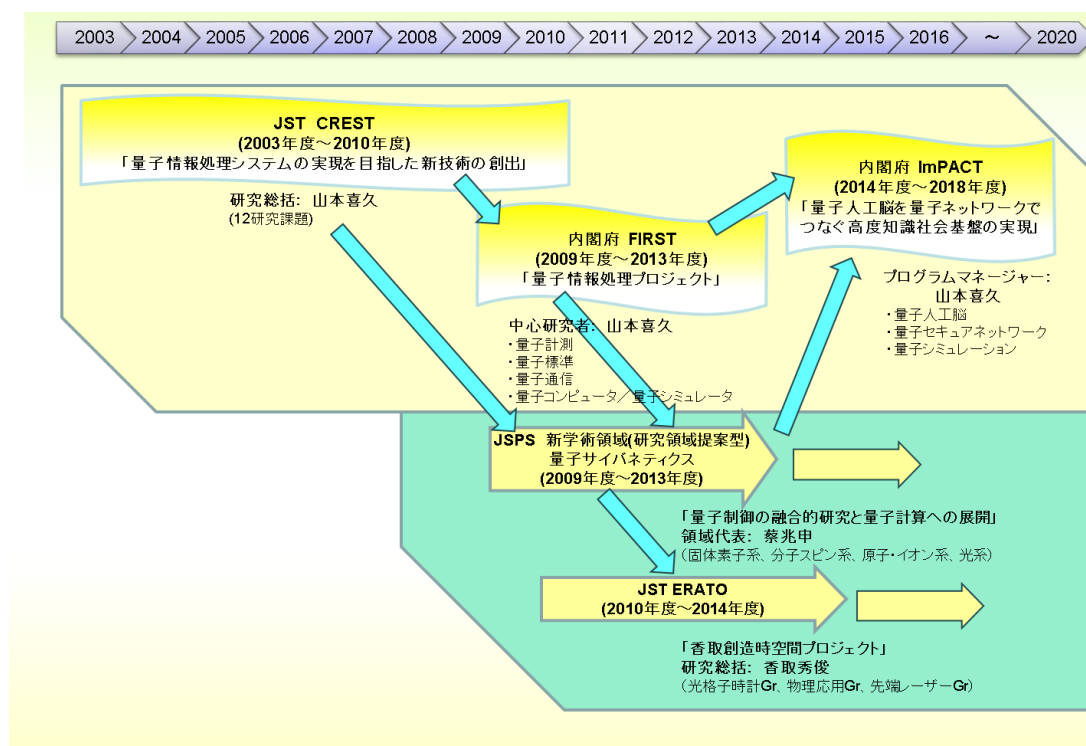


図 1-1 研究領域(CREST)の系譜図

第2章 追跡調査(研究領域全体動向)

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、JST(科学技術振興機構)の事業及び事業運営の改善に資するために行うもので、研究領域終了後の研究代表者の研究課題の発展状況等を調査した。

2.1.2 調査の対象

本追跡調査は CREST 研究領域「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」(2003 年度～2010 年度)の研究代表者全員を対象とする。表 2-1 に調査対象と調査対象期間を示す。

表 2-1 調査対象と調査対象期間

	CREST 期間	CREST 終了後調査対象期間	研究課題数
第1期	2003 年 10 月～2009 年 4 月	2009 年 4 月～2015 年 9 月	5
第2期	2004 年 10 月～2010 年 4 月	2010 年 4 月～2015 年 9 月	3
第3期	2005 年 10 月～2011 年 4 月	2011 年 4 月～2015 年 9 月	4

2.1.3 調査方法

(1) 研究助成金

本研究領域の研究代表者が研究代表者となっているプロジェクトを中心に調査した。その中から、助成金総額が1千万円／件以上のものを表 2-3 に示した。研究助成金の獲得状況の調査については、主に下記のウェブサイトを利用した。

- ・研究代表者の研究室、若しくは所属している研究室のウェブサイト
- ・競争的研究資金の担当機関のウェブサイト
- ・競争的研究資金の担当機関データベース検索(科学研究費助成事業データベース、NEDO ライブラリ成果報告書データベースなど)

(2) 論文

論文の抽出は、文献データベース Scopus(エルゼビア社)を用い、研究代表者の著者名検索により論文リストを出力し、article と review に絞り込み、さらに本研究課題に直接関係しないと思われる論文を除いて行った。得られた論文の発行年で分類し、研究期間中及び研究領域終了後の論文の数を求めた。研究領域終了後については、責任著者(筆頭著者若しくは最終著者)の論文数を求めた。

本領域研究期間中及び研究終了後の期間の定義は以下表 2-2 のとおりである。

表 2-2 実際の研究期間と調査対象期間

採択年度	実際の研究期間	調査対象期間(発行日)	
		研究期間中	研究終了後
2003 年度	2003 年 10 月～2009 年 3 月	2003 年 1 月～2008 年 12 月	2009 年 1 月～2015 年 9 月
2004 年度	2004 年 10 月～2010 年 3 月	2004 年 1 月～2009 年 12 月	2010 年 1 月～2015 年 9 月
2005 年度	2005 年 10 月～2011 年 3 月	2005 年 1 月～2010 年 12 月	2011 年 1 月～2015 年 9 月

(3) 特許

特許出願及び登録状況は、特許データベース Shareresearch(株式会社日立製作所)を用い、本研究代表者が発明者となっているもので、その発明の名称からそれぞれの研究課題と関連していないと思われるものを上記と同様にして除いた。

2.2 研究成果概要

2.2.1 研究助成金

本研究領域の研究代表者が研究代表者となっているプロジェクトを中心に調査した。その中から、助成金総額が1千万円／件以上で代表者のもののみを表2-3に示した。各代表者とも更に多くの課題での研究を行っている。研究助成金の獲得状況の調査については、主に下記のウェブサイトを利用した。

- ・研究代表者の研究室、若しくは所属している研究室のウェブサイト
- ・競争的研究資金の担当機関のウェブサイト
- ・競争的研究資金の担当機関データベース検索(科学研究費助成事業データベース、NEDO ライブラリ成果報告書データベースなど)

表 2-3 研究代表者の研究助成金獲得状況

科研費 ■ JST ■ 総務省 ■ 総務省情報通信研究機構 ■

本研究領域開始以降に開始されたプロジェクトで助成金総額が1千万円／件以上のもののみを抽出した。

代表者	研究期間(年度)	研究種目	研究課題	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
井元信之	2003～2004	科研費 基盤研究(B)	強い非線形光学効果を用いない量子情報処理の研究													
	2003～2008	CREST	光子を用いた量子演算処理新機能の開拓													
	2008～2012	科研費 新学術領域研究 (研究領域提案型)	半導体発光素子による光子数量子状態発生と量子光学													
	2013～2015	科研費 基盤研究(A)	異種多体系量子操作の基盤技術の開拓													
蔡兆申	2003～2008	CREST	超伝導量子ビットシステムの研究開発													
	2009～2013	科研費 新学術領域研究 (研究領域提案型)	超伝導量子サイバネティクスの研究													
	2009～2014	科研費 新学術領域研究 (研究領域提案型)	量子サイバネティクス総括班													
清水富士夫	2003～2008	CREST	中性原子を使った量子演算システムの開発													
高橋義朗	2003～2005	科研費 基盤研究(B)	希土類原子 Yb を用いた新しい量子縮退系の実現とその新展開													
	2003～2007	総務省 SCOPE	量子縮退原子スピンを用いた全く新しい光の量子もつれ合い状態の生成と制御に関する研究													
	2003～2008	CREST	原子アンサンブルを用いた量子情報処理の基盤技術開発													
	2006～2009	科研費 基盤研究(A)	量子縮退イッテルビウム原子気体の物理・多様性の新展開													
	2008～2013	CREST	超狭線幅光源を駆使した量子操作・計測技術の開発													
	2009～2013	科研費 新学術領域研究 (研究領域提案型)	冷却原子を用いた量子制御													

代 表 者	研 究 期 間 (年 度)	研 究 種 目	研 究 課 題	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
	2010～ 2012	科研費 基盤研究(A)	光格子中超低温イッテルビウム 原子気体を用いた量子凝縮相 の研究													
	2013～ 2017	科研費 基盤研究(S)	光格子中イッテルビウム量子気 体の究極的操作・観測が拓く 新奇量子凝縮相研究の新展 開													
古 澤 明	2003～ 2008	CREST	量子ネットワークへ向けた量子 エンタングルメント制御													
	2006～ 2007	科研費 基盤研究(B)	測定フィードフォワードを用いた 量子非破壊測定の研究													
	2008～ 2011	科研費 基盤研究(A)	広帯域ユニバーサルスクワイザ ーの研究													
	2011～ 2013	科研費 基盤研究(A)	アダプティブホモダイン測定の研 究													
	2014～ 2016	科研費 基盤研究(A)	量子テレポーテーションを基礎に した時間領域多重量子情報 処理の研究													
小 坂 英 男	2004～ 2009	CREST	単一光子から単一電子スピン への量子メディア変換													
	2004～ 2008	総務省 SCOPE	量子中継のための光子-電子 スピン量子メディア変換技術に 関する研究													
	2009～ 2010	科研費 新学術領域研究 (研究領域提案型)	光子と電子の動的スピン量子 相関													
	2009～ 2011	科研費 基盤研究(A)	半導体量子ドットにおける単一 電子スピン状態のトモグラフィ測 定と任意光制御													
	2009～ 2011	総務省 SCOPE	室温固体素子を用いた量子中 継器実現へ向けた研究開発													
	2011～ 2015	情報通信研究機構 量子もつれ中継技術 の研究開発	課題イ: 遠隔ノード間での量 子もつれ純粋化技術													
	2011～ 2015	情報通信研究機構 量子もつれ中継技術 の研究開発	課題ウ: 超伝導技術に基づく 多ビット量子もつれ制御と光													
占 部 伸 二	2012～ 2014	科研費 基盤研究(A)	量子ドットにおける単一光子か ら単一電子スピンへの量子状 態転写													
	2004～ 2006	科研費 基盤研究(B)	レーザー冷却イオンの量子状態 の計測・制御に関する研究													
	2004～ 2009	CREST	冷却イオンを用いた量子情報 処理基礎技術													
	2009～ 2013	科研費 新学術領域研究 (研究領域提案型)	開放型イオントラップ系による量 子情報処理													
百 瀬 孝 昌	2004～ 2009	CREST	分子の電子・振動・回転状態 を用いた量子演算基盤技術の 開発													
	2005～ 2007	科研費 基盤研究(B)	量子凝縮相中の分子の量子 状態と化学反応性:低温化学 反応の新展開													
井 上 恭	2005～ 2010	CREST	通信波長帯量子もつれ光子と その応用システム													
香 取 秀 俊	2005～ 2010	CREST	極低温原子を用いる量子計測 法の開拓													
	2010～ 2014	ERATO	香取創造時空間プロジェクト													
北 川 勝 浩	2005～ 2010	CREST	分子スピン量子コンピュータ													
	2009～ 2013	科研費 新学術領域研究 (研究領域提案型)	分子スピン量子制御													

代表者	研究 期間 (年度)	研究種目	研究課題	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
宮下 精二	2005～ 2010	CREST	量子多体協力現象の解明と制御													

2015 年 10 月 1 日調査

2.2.2 論文

本研究領域の研究代表者が研究期間中及び研究終了後に発表した本研究領域に関連する原著論文の数を表 2-4 にまとめた。また、その中で研究終了後については責任著者となった論文数も示している。ほとんどの研究代表者が本研究領域終了後も期間中と同等、あるいはそれ以上の多数の論文を発表している。多くは現在も本研究領域と関連した研究を行っている。

表 2-4 研究代表者の論文(原著論文)数

期(採択年度)	研究課題	研究代表者	①研究期間中の論文数	②研究終了後の論文数	③研究終了後の責任著者論文数
第 1 期(2003)	光子を用いた量子演算処理新機能の開拓	井元 信之	31	28	24
第 1 期(2003)	超伝導量子ビットシステムの研究開発	蔡 兆申	31	36	23
第 1 期(2003)	中性原子を使った量子演算システムの開発	清水 富士夫	7	2(+7)	2(+7)
第 1 期(2003)	原子アンサンブルを用いた量子情報処理の基盤技術開発	高橋 義朗	32	33	30
第 1 期(2003)	量子ネットワークへ向けた量子エンタングルメント制御	古澤 明	26	37	33
第 2 期(2004)	単一光子から単一電子スピンへの量子メディア変換	小坂 英男	11	20	6
第 2 期(2004)	冷却イオンを用いた量子情報処理基盤技術	占部 伸二	17	15	15
第 2 期(2004)	分子の電子・振動・回転状態を用いた量子演算基盤技術の開発	百瀬 孝昌	25	15	8
第 3 期(2005)	通信波長帯量子もつれ光子とその応用システム	井上 恭	23	16	15
第 3 期(2005)	極低温原子を用いる量子計測法の開拓	香取 秀俊	18	11	11
第 3 期(2005)	分子スピン量子コンピュータ	北川 勝浩	22	13	6
第 3 期(2005)	量子多体協力現象の解明と制御	宮下 精二	52	26	14

2015 年 8 月 18 日調査

(註) 2003 年度採択の研究代表者・清水富士夫の研究課題は、清水の電気通信大学の退官後、研究課題のメンバーであった中川賢一(採択時：電気通信大学准教授、現：電気通信大学教授)に引き継がれ展開されている。研究終了後の論文数()内は中川賢一の論文数である。

2.2.3 特許

特許出願及び登録は、研究目的と段階によりその数は異なるが、当該研究が最終的に一定の成果を収め、実用化による社会貢献につながる段階に達したことを示す重要な指標でもある。

本研究領域の研究代表者による特許出願件数及び登録件数の調査結果を表 2-5 に示す。

表 2-5 研究領域期間中・終了後の特許の出願と成立状況

採択年度	研究代表者	研究領域期間中				研究領域終了後			
		出願件数		登録件数		出願件数		登録件数	
		国内	海外 (国際)	国内	海外 (国際)	国内	海外 (国際)	国内	海外 (国際)
2003 年度	井元 信之	0	0	0	0	2	0	2	0
	蔡 兆申	2	2	2	2	1	0	0	0
	清水 富士夫	4	0	2	0	1	0	1	0
	古澤 明	1	0	1	0	2	0	0	0
2004 年度	該当無し	-	-	-	-	-	-	-	-
2005 年度	井上 恭	24	1	16	1	6	0	4	0
	香取 秀俊	0	0	0	0	1	2	0	0
	北川 勝浩	0	0	0	0	1	0	1	0
領域全体		31	3	21	3	14	2	8	0

2015 年 8 月 19 日調査

研究領域期間中あるいは終了後における PCT 出願された特許は、出願件数は PCT 出願の 1 件のみを計上し、各国展開分は含めない。登録件数は各国展開された後の国ごとの登録件数を計上する。

2.3 科学技術や社会・経済への波及効果

2.3.1 科学技術への波及効果

受賞、共同研究について、調査結果をそれぞれまとめて記述する。

(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。表 2-6 に、本研究領域期間中及び終了後の研究代表者の受賞を示す。本研究領域における研究代表者は、国内的にも国際的にも高く評価されていることが分かる。

蔡兆申は 2004 年「ジョセフソン接合素子を用いた 2 個の量子ビット間の量子もつれ状態の実現」により仁科記念賞、2008 年「世界で初めて巨視的な物理系である超伝導固体素子上で量子コヒーレント状態を実現」によりサイモン記念賞を、2014 年には江崎玲於奈賞を受賞している。

高橋義朗は 2008 年「超冷却イッテルビウム原子気体の実現」により物理会 45 歳未満の若手向けの久保亮五記念賞、さらに 2013 年「イッテルビウム超低温量子系の創出」により仁科記念賞を受賞している。

古澤明は 2005 年「量子エンタングルメントに関する実験的研究」により久保亮五記念賞、2007 年「量子テレポーテーションネットワークの基礎研究」により日本学士院学術奨励賞及び日本学術振興会賞を受賞している。

香取秀俊は 2008 年「光格子時計の発明」で IEEE の Rabi Award、2011 年に文部科学大臣表彰・科学技術省、2013 年に仁科記念賞、そして、2015 年「光格子時計の発明とその開発」で学士院賞など多数受賞している。また、2014 年「量子エレクトロニクス研究功績」で紫綬褒章を受章しており、継続展開した研究が国内外で非常に高く評価されていることを示している。

表 2-6 受賞リスト

No.	受賞者	賞名	授賞機関	受賞年	受賞理由
1.	蔡 兆申	NEC 社長賞	-	2004	-
2.	蔡 兆申	仁科記念賞	仁科記念財団	2004	ジョセフソン接合素子を用いた 2 個の量子ビット間の量子もつれ状態の実現
3.	蔡 兆申	サイモン記念賞	Institute of Physics	2008	世界で初めて巨視的な物理系である超伝導固体素子上で量子コヒーレント状態を実現し、固体素子を用いた量子コンピュータ実現の可能性を示したこと、及び量子コヒーレント物理の研究成果
4.	蔡 兆申	超伝導分科会論文賞	応用物理学会超伝導分科会	2014	Coherent quantum phase slip, Nature 484 355 (2012)
5.	蔡 兆申	超伝導科学技術賞特別賞	未踏科学技術協会	2014	超伝導量子コヒーレント物理の実証とデバイス開拓
6.	蔡 兆申	応用物理学会解説論文賞	応用物理学会	2014	固体素子と量子力学の厳密テスト
7.	蔡 兆申	江崎玲於奈賞	茨城県科学技術振興財団	2014	超伝導量子ビットシステムの研究
8.	高橋 義朗	光・量子エレクトロニクス業績賞	応用物理学会	2006	イットリビウム原子ボーズ凝縮体の生成
9.	高橋 義朗	久保亮五記念賞	井上科学振興財団	2008	超冷却イッテルビウム原子気体の実現
10.	高橋 義朗	松尾財団宅間宏記念学術賞	松尾学術振興財団	2012	光格子にトラップされた冷却原子を用いた量子多体系のシミュレーション

No.	受賞者	賞名	授賞機関	受賞年	受賞理由
11.	高橋 義朗	仁科記念賞	仁科記念財団	2013	イッテルビウム超低温量子系の創出
12.	古澤 明	「東京テクノ・フォーラム21」ゴールド・メダル賞	東京テクノ・フォーラム21	2005	量子コンピューターに道を拓く量子テレポーテーションネットワークの創成
13.	古澤 明	久保亮五記念賞	井上科学振興財団	2005	量子エンタングルメントに関する実験的研究
14.	古澤 明	日本学士院学術奨励賞	日本学士院	2007	量子テレポーテーションネットワークの基礎研究
15.	古澤 明	日本学術振興会賞	日本学士院	2007	量子テレポーテーションネットワークの基礎研究
16.	古澤 明	International Quantum Communication Award	玉川大学(量子通信国際会議)	2008	Experiments on quantum teleportation and macroscopic superposition states.
17.	古澤 明	第55回東レ科学技術賞	東レ	2015	決定論的量子テレポーテーションの実現と超大規模量子もつれ生成法の開拓
18.	小坂 英男	石田實記念財団研究奨励賞	石田實記念財団	2011	ハイブリッド量子通信システムの構築へ向けた光子-電子スピン量子メディア変換の研究
19.	香取 秀俊	Julius Springer Prize for Applied Physics	Springer	2005	超精密光時計開発における先駆的な貢献
20.	香取 秀俊	丸文学術特別賞	丸文財団	2006	『光格子時計』手法による超高精度原子時計の実現
21.	香取 秀俊	JPSJ 注目論文賞	日本物理学会	2006	Improved Frequency Measurement of a One-Dimensional Optical Lattice Clock with a Spin-Polarized Fermionic ⁸⁷ Sr Isotope
22.	香取 秀俊	第20回日本IBM科学賞	日本IBM	2006	超高精度原子時計を実現する『光格子時計』の開発
23.	香取 秀俊	Rabi Award	IEEE International Frequency Control Symposium	2008	For outstanding contributions to the invention and development of an optical lattice clock
24.	香取 秀俊	第42回市村学術賞・特別賞	新技術開発財団	2010	光格子時計の提案・実証による新たな原子時計手法の確立
25.	香取 秀俊	第12回光・量子エレクトロニクス業績賞(宅間宏賞)	応用物理学会	2011	光格子時計の開拓
26.	香取 秀俊	平成23年度文部科学大臣表彰・科学技術賞	文部科学省	2011	光格子時計の研究
27.	香取 秀俊	(社)レーザー学会論文賞(解説部門)	レーザー学会	2011	光格子時計の発明-そのインパクトと展望 レーザー研究-38-7-479
28.	香取 秀俊	朝日賞	朝日新聞社	2012	光格子時計に関する研究
29.	香取 秀俊	第34回応用物理学会論文賞	応用物理学会	2012	Direct Comparison of Distant Optical Lattice Clocks at the 10 ⁻¹⁶ Uncertainty
30.	香取 秀俊	東レ科学技術賞	東レ	2013	光格子時計の発明と原子時計の超高精度化
31.	香取 秀俊	第18回論文賞	日本物理学会	2013	Improved Frequency Measurement of a One-Dimensional Optical Lattice Clock with a Spin-Polarized Fermionic ⁸⁷ Sr Isotope
32.	香取 秀俊	第54回藤原賞	藤原科学財団	2013	光格子時計の発明と実現による高精度原子時計技術の開発
33.	香取 秀俊	仁科記念賞	仁科記念財団	2013	光格子時計の発明
34.	香取 秀俊	秋の紫綬褒章	内閣府	2014	量子エレクトロニクス研究功績
35.	香取 秀俊	日本学士院賞	日本学士院	2015	光格子時計の発明とその開発

2015年10月15日調査

(2) 共同研究

研究代表者は、世界的研究者と主に研究者レベルで連携し、共同研究を行っている。

蔡兆申は、同じ日本電気(NEC)基礎研究所の出身で、現在ランカスター大学の Yuri Pashkin、同じくロンドン大学の Oleg Astafiev らと共同研究を現在も続けており、多くの共著論文を出している。また、フィンランドのアールト大学(旧ヘルシンキ工科大学)超伝導量子グループ、米国マサチューセッツ工科大学リンカーン研究所と共同研究を行っている。

高橋義朗は、チューリッヒ工科大学の Lei Wang、Matthias Troyer と研究者レベルで、Yb の量子縮退系を用いた基礎科学の共同研究を行っている。

古澤明は、連続量における量子エラー訂正などのテーマにおいて、ヨーク大学、マックスプランク研究所などと、共同研究を行った。また、広帯域量子テレポーテーションの開発において、ニューサウスウェールズ大学と、ハイブリッドテレポーテーションに関してグーテンベルグ大学と、量子光学・量子情報科学の分野でパラッキー大学(Palacký University)と共同研究を行った。さらに、量子テレポーテーション心臓部のチップ化に関して、ブリストル大学及びサウサンプトン大学と、量子の非局所性検証に関してワルシャワ大学及びグリフィス大学と共同研究を行った。

香取秀俊は、ロシアの標準研究所(Institute of Metrology for Time and Space (IMVP), NPO "VNIIFTRI" Mendeleevo)の V. G. Palchikov と、研究者レベルで 15 年来の共同研究を行っている。米国ネバダ大学の Andrei Derevianko と、原子時計に関して継続的に共同研究を行っている。

2.3.2 社会・経済への波及効果

本研究領域期間中及び終了後の研究成果に関する報道について調査を行った。その成果は、日本経済新聞、朝日新聞、読売新聞など主要全国紙や、日刊工業新聞、日経産業新聞、日経コンピュータなどの主要な業界紙及び雑誌に数多く報道されている。

蔡兆申(理化学研究所、東京理科大)は、超伝導量子ビットを人工原子として用いた量子光学の研究を飛躍的に進展させている。2003 年 10 月の朝日新聞、日刊工業新聞等が、集積可能な固体素子で量子演算回路の原型を NEC と理研が開発したと報じ、2012 年 4 月日本経済新聞及び日刊工業新聞は「理研と NEC が超電導の新現象発見」として量子位相すべり効果を初めて実現した成果を報じている。高橋義朗は「2 電子原子を用いた量子系の研究」という新しい研究分野を切り開いてきており、日経サイエンス 2005 年 5 月号でチップ上にボース・アインシュタイン凝縮体を実現したと報じられた。古澤明が構想した量子情報処理は、ハイブリッド量子テレポーテーションとしてその基礎が確立し、2015 年 3 月 25 日日本経済新聞や日刊工業新聞は、アインシュタインが 100 年前に提唱した「格子の非局所性」現象を初めて実験で確認したと報じた。さらに、2015 年 3 月 31 日日本経済新聞等は、古澤と NTT は量子テレポーテーションの心臓部を 1 枚のチップ上を実現する技術を開発したと報じている。香取秀俊は、光格子時計と呼ばれる極めて高精度の時計を発明し、継続して研究開発で世界をリードしており、その成果は朝日新聞 2015 年 2 月 10 日「138 億年過ぎても誤差ゼロ秒」の原子時計を開発などと、主要全国紙で数多く報じられている。

量子コンピュータの研究・製品開発に関して、北米企業の活発な活動が報じられている。

日経コンピュータ 2014 年 4 月 17 日及び 2015 年 8 月 17 日、日経ビジネス ONLINE 2015 年 9 月 17 日等によると、2011 年カナダ D-Wave Systems が世界で初めて発売したと発表した量子コンピ

ュータが世界的に注目を集めた。このコンピュータを導入した企業や組織は、最適化問題を解く研究への適用を検討している。NASA の「惑星探査時の遠隔操作ロボットの最適な経路」、グーグルの「画像を解析する最適な機械学習アルゴリズム」、ロッキードマーチンの「航空機向け組込みソフトのバグ検出向けの最適アルゴリズム」などである。カナダ D-Wave Systems の量子コンピュータは、西森秀稔(東工大)の量子アニーリング理論に基づき、蔡兆申や中村泰信(東大、理化学研究所)らが世界で初めて実現した(当時 NEC 基礎研究所)超伝導回路による量子ビットを基礎技術としている。

我が国では、日経コンピュータ 2014 年 3 月 20 日などで、内閣府の革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)の一つとして、山本喜久をプログラマネージャーとする「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」が、レーザーネットワーク方式の量子コンピュータとして 2014 年 10 月から 2019 年の完成に向け大きく前進したと報じられている。組合せ最適化計算を、現在のコンピュータに比べて桁違いに高速化できる可能性があるとしている。

また、任意のアルゴリズムを処理できる量子コンピュータの研究でも活発な動きが報じられている。日経コンピュータ 2014 年 9 月 2 日によると、グーグルは 2013 年設立の QuAIL (Quantum Artificial Intelligence Lab. 量子人工知能研究所)にカリフォルニア大学サンタバーバラ校の John Martinis のチームを招き、量子コンピュータの独自開発に乗り出した。ウォールストリートジャーナル 2015 年 9 月 4 日では、インテルが 5,000 万ドルを投資し、オランダの研究機関 (QuTech) と今後 10 年間提携して量子コンピュータ研究を進めると報じられている。

第3章 各研究課題の主な研究成果及び波及効果

3.1 2003 年度採択研究課題

3.1.1 光子を用いた量子演算処理新機能の開拓(井元信之)

(1) 研究の狙いと研究期間中の達成状況

①研究の狙い

本研究は、4光子の範囲でできる光子間ゲート操作、それ以上の光子数がからむ処理、連続量の情報処理、これらの基礎となるトモグラフィ技術、これらを総合した multiparty quantum computing を対象とした。これらの量子演算処理について、理論と実験の両面から追究し、基礎的デモンストレーションを行うとともに、より高度な実現に向けての課題と方向性について知見を得ることが、本研究の狙いである。

②期間中の研究成果

光子量子ビットについて、4光子に関する研究を大阪大学が担当し、4光子以上の多光子に関する研究を北海道大学のグループが担当した。連続量ホモダイン検波量子情報処理についての研究は学習院大学が担当した。各グループの期間中の主な研究成果は次のとおりである。

大阪大学のグループは、「雑音のある量子チャネルの雑音影響除去」が可能なことを理論的に示し、単独(他とエンタングルしていない)光子とエンタングルした光子の光ファイバー伝送実験を行ってそれを実証した。また、「クラスター状態を用いた一方向量子計算」を実現した。このような理論提案に対応した実験研究の成果とともに、量子暗号の無条件安全性証明に関する新規な一般理論の構築、及び大幅な性能向上の可能性を持つ量子暗号の提案などの理論研究における成果を上げた。

北海道大学のグループは、多光子による量子演算において、光路干渉計を必要としないコンパクトで安定なゲートを開発し、その後、入力された二つの光子が特定の偏光相関を持つ場合だけ抜き出す「もつれあいフィルター」を実現した。また、伝令付単一光源の実現、無条件安全性を満たした 40km の鍵配布などの成果を上げた。

光子量子ビットの代わりに光の連続量を用いる研究に取り組んだ学習院大学は、ホモダイン検出の後に、ポストセレクションを行う量子暗号を提案し、理論と実験の両面から研究を行った。主要な成果は、過剰雑音の有無と暗号の安全性との関係や、ポストセレクションが有効でなくなる盗聴方法の存在などを明らかにしたことである。

グループ間の共同研究については、光子量子ビット系と連続量量子情報のハイブリッドの研究において、大阪大学のグループと学習院大学のグループは共著論文を二編発表した。この内容は今後の研究方向を示唆するものと考えられ、グループ間共同研究の成果である。

③研究成果に関連した主な成果論文リスト

- [1] Adachi Y., Yamamoto T., Koashi M., Imoto N. Simple and efficient quantum key distribution with parametric down-conversion (2007) Physical Review Letters, 99(18), art.no.180503.
- [2] Tamaki K., Koashi M., Imoto N. Unconditionally secure key distribution based on two nonorthogonal states (2003) Physical Review Letters, 90(16), pp.167904/1-167904/4.
- [3] Tokunaga Y., Kuwashiro S., Yamamoto T., Koashi M., Imoto N. Generation of High-Fidelity Four-Photon Cluster State and Quantum-Domain Demonstration of One-Way Quantum Computing (2008) Physical Review Letters, 100(21), art.no.210501.

(2) 研究領域終了後の継続と発展状況

科学研究費新学術領域研究(研究領域提案型)「半導体発光素子による光子数量子状態発生と量子光学」(2008年度～2012年度)において、量子もつれ発生及び配布、微小共振器を利用した光 Kerr 効果増強の可能性追求、理想量子もつれからどれだけ不完全でも良いか、というテーマで研究を進めた。

2013年度から2015年度(予定)にかけて、科学研究費基盤研究(A)「異種多体系量子操作の基盤技術の開拓」に取り組み、光子を含む異種物理系で構成される複合量子系にまたがる自由な量子操作を実現するための基盤技術の開拓を行っている。

また、2011年度から2013年度にかけて、科学研究費若手研究(A)「波長変換を利用した量子情報技術の開拓」における連携研究者として、光の量子状態を保持したまま波長変換を行う量子波長変換の研究を行った。

さらに、内閣府(CAO)革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」(2014年度～2018年度)のプロジェクトメンバーとして、ファイバリング発振器に同時発生される光パルスをニューロンと見立てた、人工脳の研究を進めている。

①科学技術の進歩への貢献

本研究領域終了後も、光子量子ビットを用いた量子演算処理機能開拓の研究を継続し、量子中継器の構成法の理論的研究と波長変換の実験を行った。図 3-1 に波長変換の実験装置の構成を示す¹。

¹ 科学研究費助成事業 研究成果報告書 課題番号：23684035「波長変換を利用した量子情報技術の開拓」

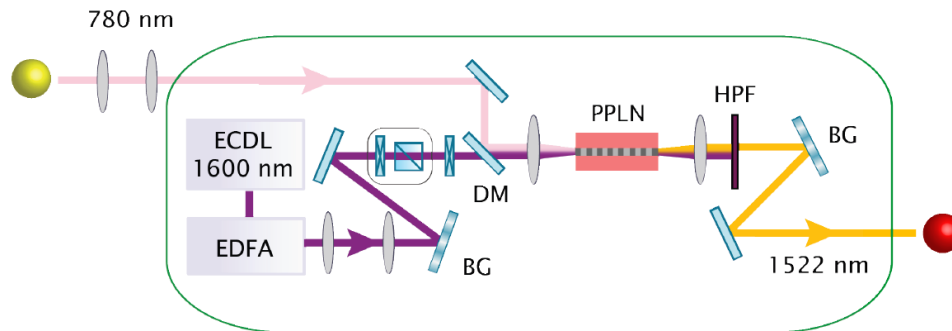


図 3-1 量子波長変換実験装置

その結果、可視光領域に近い、もつれ状態の光子を波長変換し、変換された長距離通信が可能な波長の光子において、もつれ状態が保存されていることを実験的に確認した。また、光 Kerr 効果を使った量子非破壊測定をどこまで改良できるかを明らかにした。また、Kerr 効果を通して位相にプリントされた光子数の情報を読み取るという、独自の量子非破壊測定法の継続的な研究と並行して、弱い量子測定(弱値の測定)に関する研究を進め、ハーディーのパラドックスの実験的確認に成功した。これは、量子情報処理の基礎となる量子力学に対して、基本的に重要な知見をもたらす実験結果である。

現在、光子を含む異種物理系で構成される複合量子系にまたがる自由な量子操作を実現することを目的として、雑音耐性のある効率的な量子通信の提案と、Dicke 状態(原子の集団的素励起状態)の拡張法の提案という理論的な研究に取り組み、異種多体系の量子情報処理の実現を目指している。

②社会・経済への波及効果

物質系の量子ビットに対して、光子量子ビットは通信に適合性が高いが、光情報処理のデバイス系では、使用される光が可視光領域中心であり、長距離通信にそのまま応用することは困難である。波長変換技術の実証により、物質系の量子状態の長距離転送に対する見通しが得られた。波長変換は量子情報処理ネットワーク実現の要素技術の一つであり、この成果は、量子メモリと量子通信技術を組み合わせた様々な量子情報プロトコル(量子中継など)の実証実験の活発化につながるものと考えられる。光通信波長帯の光においては、光ファイバー光学部品やシリコンフォトニクスを用いた光操作が可能となるため、波長自由度を利用する新たな量子情報処理の展開も期待される。

応用の観点において、2011 年に「量子状態生成方法、量子状態生成装置、及びプログラム」²と「量子符号化装置、量子検査装置、及びそれらの方法」³という 2 件の特許を出願し、2 件とも 2014 年に登録されている。もつれ状態にある複数の量子ビットの生成方法、ビット反転誤りと位相反転誤りの検出方法に関する出願で、いずれも量子情報処理の実現に向けて必須となる技術に関する

² 特開 2013-44901「量子状態生成方法、量子状態生成装置、及びプログラム」

³ 特開 2013-121161「量子符号化装置、量子検査装置、及びそれらの方法」

るものと考えられる。出願人は、両特許とも、日本電信電話及び大阪大学である。

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

- [1] Yokota K., Yamamoto T., Koashi M., Imoto N. Direct observation of Hardy's paradox by joint weak measurement with an entangled photon pair (2009) New Journal of Physics, 11(-)
- [2] Ikuta R., Kusaka Y., Kitano T., Kato H., Yamamoto T., Koashi M., Imoto N. Wide-band quantum interface for visible-to-telecommunication wavelength conversion (2011) Nature Communications, 2(1)
- [3] Tashima T., Wakatsuki T., Ozdemir S.A.K., Yamamoto T., Koashi M., Imoto N. Local transformation of two einstein-podolsky-rosen photon Pairs into a three-photon W state (2009) Physical Review Letters, 102(13)
- [4] Tashima T., Ozdemir S.K., Yamamoto T., Koashi M., Imoto N. Local expansion of photonic W state using a polarization-dependent beamsplitter (2009) New Journal of Physics, 11(-)

3.1.2 超伝導量子ビットシステムの研究開発(蔡兆申)

(1) 研究の狙いと研究期間中の達成状況

①研究の狙い

ビット数のスケールアップの可能性において有利と考えられる、ジョセフソン接合量子ビットにおいて、長いデコヒーレンス時間と、高速駆動を目指す研究を行った。通常量子ビットの駆動は、室温の電子回路で行っていたが、この駆動用電子回路を量子ビットと同様に極低温環境の超伝導回路で構成し、高速、高精度の読み出しとデコヒーレンスの抑制を実現するのが、本研究の狙いである。

②期間中の研究成果

超伝導量子ビットシステムの研究は、NEC を中心として ISTE⁴、横浜国立大学、名古屋大学、ニューヨーク州立大学、東京大学、理化学研究所(理研)からなる国際的な体制を採って実施された。各グループの期間中の主な研究成果は次のとおりである。

NEC のグループは、電荷量子ビットと磁束量子ビットのデコヒーレンスの要因について研究を進め、量子ゆらぎ、電荷 $1/f$ ノイズ、磁束 $1/f$ とデコヒーレンスの関係を明らかにした。また、二つの磁束量子ビット間に、特性エネルギーの十分大きい量子ビットを設けることにより、量子ビット間の相互作用をオンオフできる可変結合方式を提案し実証した。また電荷量子ビットを超伝導コプレーナ型共振器中に配置した、単一人工原子メーザーを提案し、実証した。このメーザ

⁴ ISTE⁴ (International Superconductivity Technology Center、国際超伝導産業技術研究センター)

一の提案は、量子情報処理を実現する有力な手法の一つとして注目されている、Circuit QED の応用例である。

ISTEC は、超伝導量子ビットに対する入出力及び制御を超伝導回路で行うシステムを構築するため、1K 以下の極低温で動作するニオブ回路の製造プロセス、量子ビットと超伝導回路を、超伝導配線を施した基板上に配置する超伝導 MCM、極低温で動作する SFQ 回路セル、低ノイズ・低消費電力の SQUID アンプを開発した。超伝導量子ビットシステム実現のベースとなる、ハードウェア技術の進歩を示す成果である。

横浜国立大学のグループは、極低温で動作可能な高速マイクロ波チョッパを、SFQ 回路を用いて実現し、その動作を検証した。また、モジュール化によりマイクロ波チョッパを超伝導量子ビットと接続可能にし、同チョッパによる量子ビットの状態制御への道を拓いた。

名古屋大学のグループは、磁束量子ビットを SFQ 回路により読み出す研究を行い、4K において 800nA (計算上 1K において 15nA) の電流感度を実現した。

ニューヨーク州立大学のグループは、nSQUID と呼ばれる回路を提案し、古典的可逆計算の動作を確認した。この回路は磁束量子ビットとしても動作可能であり、超伝導量子計算機の構成に結び付く成果である。

東京大学グループは、NEC グループと密に討議を行い、実験で生じた課題について理論的に考察した。また、磁束量子ビットに π 接合を付加したシンプルな超伝導回路を想定し、デコヒーレンス時間を理論的に評価した。

遅れて参加した理研グループは 2 年半にわたって、実験と対応の取れる超伝導量子ビットの理論的研究を進め、制御可能な超伝導量子ビットの結合方式を中心に多くの成果を上げた。

③研究成果に関連した主な成果論文リスト

- [1] Niskanen A.O., Harrabi K., Yoshihara F., Nakamura Y., Lloyd S., Tsai J.S. Quantum coherent tunable coupling of superconducting qubits (2007) Science, 316(5825), pp. 723-726.
- [2] Astafiev O., Pashkin Yu.A., Nakamura Y., Yamamoto T., Tsai J.S. Quantum noise in the josephson charge qubit (2004) Physical Review Letters, 93(26 I).
- [3] Yoshihara F., Harrabi K., Niskanen A.O., Nakamura Y., Tsai J.S. Decoherence of flux qubits due to $1/f$ flux noise (2006) Physical Review Letters, 97(16).

(2) 研究領域終了後の継続と発展状況

科学研究費特別研究員奨励費「超伝導量子ビットの研究」(2008 年度～2009 年度)において、多数集積した超伝導量子ビットの操作と、超伝導マイクロ波共振器を介した量子ビットの結合方法の研究を行った。

2009 年度から 2013 年度にかけて、科学研究費新学術領域研究(研究領域提案型)「超伝導量子サイバネティクスの研究」において、超伝導量子回路を使った、高度で複雑な量子操作科学技術の発展を目指し、混合量子系や巨視的量子系での量子操作実現に取り組んだ。

2009 年度から 2014 年度にかけて、科学研究費新学術領域研究(研究領域提案型)「量子サイバ

ネティクス総括班」において、量子サイバネティクス領域全体の研究方針・目標の策定、公募研究も含めた領域内に設定する研究計画の調整、領域全体の連絡網の確立を行った。

内閣府(CAO)最先端研究開発支援最先端研究開発支援プログラム(FIRST)「量子情報処理プロジェクト」(2009年度～2013年度)のメンバーとして、量子情報処理技術の新しい潮流を形成することを目標に研究に取り組んだ。現在は、内閣府(CAO)革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)「量子人工頭脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」(2014年度～2018年度)に参画し、ファイバリング発振器に同時発生される光パルスニューロンと見立てた、人工脳の研究を進めている。

①科学技術の進歩への貢献

本研究期間中の成果をベースに、隣接する量子ビットの結合と、超伝導マイクロ波共振器を介した、離れた量子ビットの結合の方法を改良・発展させ、超伝導量子ビットの集積化の実現に向けた研究を進展させた。その後、半導体素子と同様に多素子化の可能性を持つ超伝導量子ビットを基本としながら、サイバネティクスという、より広い視野を持つ領域の研究に取り組んだ。具体的には、「超伝導量子サイバネティクスの研究」のテーマにおいて、超伝導人工原子と電子スピンなどの微視的量子系の混合量子系の実現及び量子ビットの結合と操作に関して研究を進展させた。さらに同テーマの研究における新たな発展として、コヒーレント量子位相すべり効果を初めて実証するという成果を上げた^[3]。図 3-2 に量子位相すべり細線デバイスを示す⁵。

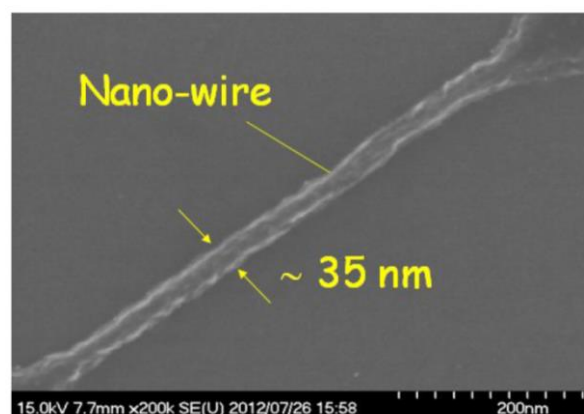


図 3-2 量子位相すべり細線デバイス

「超伝導量子サイバネティクスの研究」における、コヒーレント量子位相すべり効果の実証は、長年にわたり理論上予言されていた現象を初めて実験で確認した点で大きな意味がある。超伝導の領域で広く研究されているジョセフソン効果は、超伝導量子干渉計(SQUID)に応用されており、量子電圧標準の構築にも寄与した。コヒーレント量子位相すべり効果は、ジョセフソン効果と量子力学的に双対な現象であり、超伝導を利用した新たなデバイスの実現が期待されるだけでなく、ジョセフソン素子の量子電圧標準に対して、量子電流標準の確立に結び付く現象であると、期待されている。このように、超伝導量子ビットの研究において、量子力学の基礎的な領域にも及ぶ

⁵ 科学研究費助成事業 研究成果報告書 課題番号：21102002「超伝導量子サイバネティクスの研究」

重要な成果を上げた。

これと平行して「量子サイバネティクス総括班」の研究代表者として、量子サイバネティクス領域全体の研究計画の調整を行った。

②社会・経済への波及効果

電子スピンなどの微視的量子系ではなく、超伝導回路という巨視的な系において量子ビットの結合や操作を行う技術の実証は、量子コンピュータ実現への大きな可能性を示す成果と評価され、2014年に米踏科学技術協会から、「超伝導量子コヒーレント物理の実証とデバイス開拓」により超伝導科学技術賞特別賞が授与された。また、同じく2014年に茨城県科学技術振興財団から、「超伝導ビットシステムの研究」により江崎玲於奈賞が授与された。

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

- [1] Astafiev O., Zagoskin A.M., Abdumalikov Jr. A.A., Pashkin Yu.A., Yamamoto T., Inomata K., Nakamura Y., Tsai J.S. Resonance fluorescence of a single artificial atom (2010) Science, 327(5967), pp.840-843.
- [2] Abdumalikov A.A., Astafiev O., Zagoskin A.M., Pashkin Y.A., Nakamura Y., Tsai J.S. Electromagnetically induced transparency on a single artificial atom (2010) Physical Review Letters, 104(19).
- [3] Astafiev O.V., Ioffe L.B., Kafanov S., Pashkin Y.A., Arutyunov K.Y., Shahar D., Cohen O., Tsai J.S. Coherent quantum phase slip (2012) Nature, 484(7394), pp.355-358.
- [4] Pekola J.P., Maisi V.F., Kafanov S., Chekurov N., Kemppinen A., Pashkin Y.A., Saira O.-P., Mottonen M., Tsai J.S. Environment-assisted tunneling as an origin of the dynes density of states (2010) Physical Review Letters, 105(2).

3.1.3 中性原子を使った量子演算システムの開発(清水富士夫)

(1) 研究の狙いと研究期間中の達成状況

①研究の狙い

多数の量子ビットを用いた汎用性のある量子計算機を実現するために、自由な中性原子の系を研究対象とした。日本におけるレーザー原子分光研究を主導している研究者をメンバーとして多彩な研究を進め、量子計算に関する科学的理解、工学的開発を目指すことが、本研究の目的である。

②期間中の研究成果

中性原子を使った量子演算システムの開発は、NTT、電気通信大学、東京大学、熊本大学から成るチームによって推進された。主な研究開発成果は次のとおりである。

NTT グループは、超伝導体を用いた原子チップの開発に着手し、超伝導チップへの原子トラップ及び超伝導閉回路への原子トラップに成功した。NTT グループと同じく多数量子ビットを装填した量子情報操作システムの開発を目標とした、電気通信大学清水グループは、3次元光格子の各点に原子をトラップした量子ビット系と、これとは別な原子との相互作用により量子ビットを制御する研究を行い、原子間相互作用における新規な研究方法を提供する成果を上げた。

電気通信大学中川グループは、シリコン基板上にリソグラフィ技術を用いて原子チップを作成し、87Rb 原子のボース凝縮体(BEC)を用いた原子干渉計を実現した。また、この BEC 原子を用いてガウス和による因数分解の実演に成功した。

東京大学久我グループは、原子ボース凝縮体と光双極子ポテンシャルを使った量子回路の開発を目指して、冷却原子源の開発、単一原子の観測と制御、冷却原子による量子情報処理の研究を進めた。従来一つの原子集団に1モードのコヒーレンスしか記録できなかったが、2モードのコヒーレンスをボース凝縮体中に生成・保存し、それらを独立に光に変換することに成功するなどの成果を上げた。

熊本大学光永グループは、ナトリウム原子を用いた量子干渉効果に基づく量子メモリの研究を行った。その量子メモリ用の非古典光源の候補となる相関光子対の発生に成功した。また、量子干渉効果の効率的な測定方法として、Coherent Raman Beat (CRB) と呼ばれる手法を開発した。

③研究成果に関連した主な成果論文リスト

- [1] Mukai T., Hufnagel C., Kasper A., Meno T., Tsukada A., Semba K., Shimizu F. Persistent supercurrent atom chip (2007) Physical Review Letters, 98(26)
- [2] Oberst H., Tashiro Y., Shimizu K., Shimizu F. Quantum reflection of He* on silicon (2005) Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics, 71(5)
- [3] Oberst H., Kouznetsov D., Shimizu K., Fujita J.-I., Shimizu F. Fresnel diffraction mirror for an atomic wave (2005) Physical Review Letters, 94(1)

(2) 研究領域終了後の継続と発展状況

2010 年度から 2012 年度にかけて、科学研究費基盤研究(C)「緩和のない原子運動制御法の開発と原子波動光学への応用」に取り組み、精度良くコントロールされた原子波の開発と、その原子波動光学への応用について研究を進めた。

科学研究費基盤研究(B)「超伝導アトムチップによる中性原子の量子状態制御」(2009 年度～2011 年度)における研究分担者として、原子気体を用いた量子デバイスの開発と、中性原子を確実に捕捉できる超伝導アトムチップを応用した原子制御技術の開発に取り組んだ。

後任の中川賢一⁶は、2009 年度から 2012 年度にかけて科学研究費基礎研究(A)「量子縮退原子を用いた原子干渉計による量子精密計測」において、2012 年度から 2014 年度にかけては科学研究費基礎研究(B)「光格子中のリドベルグ原子を用いた量子情報処理」において、本研究領域の後継となる研究を進めた。

① 科学技術の進歩への貢献

本研究領域終了後も、中性原子を使った量子演算システムの研究を継続し、超伝導永久電流原子チップの製作とそれを用いた原子ビームの改善を行った。その結果、従来の 10 倍以上のネオン原子ビーム輝度を実現した⁷。図 3-3 は、得られたネオン原子ビームの回折像で、大きさ $3\text{mm} \times 0.2\text{mm}$ 、ピッチ $2\mu\text{m}$ の回折格子を用い、 $1/30$ 秒で撮影した画像である。

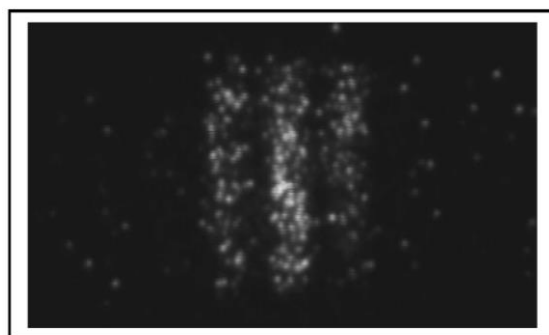


図 3-3 ネオン原子ビームの回折像

また、超伝導永久電流原子チップに捕捉したルビジウム原子においても、ボース・アインシュタイン凝縮(BEC)を達成した⁸。また、平板なディスク形状の超伝導体を用いて原子を捕捉する新しい磁場トラップを開発し、その安定動作条件を見いだした^[1]。

後継の中川賢一は、量子縮退原子を用いた原子干渉計の研究において、光双極子トラップを用いた全光学的手法により、高速にルビジウム(Rb)原子のボース・アインシュタイン凝縮を生成する方法を開発した^[2]。検出感度の高い量子干渉計の実現につながる成果である。また、磁気光学トラップに捕捉された単一 Rb 原子を $n=43$ のリドベルグ状態に励起して、明確なラビ振動を観測した^[3]。次に原子数を 2 にして、リドベルグブロッケード効果を観測することに成功した。さら

⁶ 本研究領域期間中の研究参加者。当時、電気通信大学・レーザー新世代研究センター准教授、現在、同教授。

⁷ 科学研究費助成事業 研究成果報告書 課題番号: 22540408「緩和のない原子運動制御法の開発と原子波動光学への応用」

⁸ 科学研究費補助金 研究成果報告書 課題番号: 21310084「超伝導アトムチップによる中性原子の量子状態制御」

に、同研究の過程で、新規な原子干渉計の実現につながる可能性のある量子干渉効果を観測した。

②社会・経済への波及効果

量子演算システムの実現を目指した超伝導永久電流原子チップの研究は、その後大学だけでなく、NTT 物性基礎科学研究所でも継続、発展し、超伝導永久電流原子チップを用いて約 10 万個の原子を全て BEC 状態に相転移させることに成功した⁹。10 万個の量子ビットを初期化したとみなせる結果であり、今後、この原子集団を複数の原子集団に分割する仕組みを開発することにより、量子デバイスの実現につながると期待される。

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

- [1] Shimizu F., Hufnagel C., Mukai T. Stable neutral atom trap with a thin superconducting disc (2009) Physical Review Letters, 103 (25)
- [2] Kumar, S., Hirai, S., Suzuki, Y., Kachi, M., Sadgrove, M., Nakagawa, K., Simple and fast production of bose-einstein condensate in a 1 μ m cross-beam dipole trap, (2012) Journal of the Physical Society of Japan, 81 (8)
- [3] Zuo, Z., Fukusen, M., Tamaki, Y., Watanabe, T., Nakagawa, Y., Nakagawa, K., Single atom Rydberg excitation in a small dipole trap, (2009) Optics Express, 17 (25)

3.1.4 原子アンサンブルを用いた量子情報処理の基盤技術開発(高橋義朗)

(1)研究の狙いと研究期間中の達成状況

①研究の狙い

原子アンサンブルを用いた量子情報処理の実現を目標として、量子縮退原子集団を用いたハバードモデルの量子シミュレーションのための基盤技術の開発、希薄な原子集団を用いた光の量子状態の保存・再生技術の開発、時間相関光子対の効率的発生と 2 光子遷移に関する研究という三つの取組を推進することが、本研究の狙いである。

②期間中の研究成果

量子アンサンブルを用いた量子情報処理の基盤技術開発は、京都大学高橋グループ、東京工業大学上妻グループ、京都大学北野グループという三つの研究グループにより推進された。

京都大学高橋グループは、イッテルビウム(Yb)に注目して研究を行い、光トラップを採用して、レーザー冷却と蒸発冷却により量子縮退領域までの冷却に成功した。また、Yb の全ての同位体に対して散乱長を高精度に決定するなど、Yb 原子を用いたハバードモデルの量子シミュレーション技術開発において様々な成果を上げた。さらに、理論と実験の両面で、光と原子スピン集団の量

⁹ 向井哲哉、今井弘光「永久電流アトムチップによるボース・アインシュタイン凝縮」NTT 技術ジャーナル 2014

子インターフェイス構築につながる成果を上げた。

東京工業大学上妻グループは、レーザー冷却された ^{87}Rb 原子集団を保存媒体として、真空スクイズド状態の保存・再生実験を行い、保存・再生が実現していることを確認した。また、多次元のエンタングルメントを原子集団と単一光子間に生成することに成功した。

京都大学北野グループは、光子対の生成と 2 光子吸収の量子光学的応用などについて研究を行い、理論と実験の両面で同分野の知見を深めた。具体的な実験的な成果としては、高い明瞭度の 2 光子干渉縞を得たこと、2 光子吸収を用いた光子対検出の試みにおいて、2 光子吸収に起因すると見られる光電流パルスの観測に成功したことなどが挙げられる。

③研究成果に関連した主な成果論文リスト

- [1] Fukuhara T., Takasu Y., Kumakura M., Takahashi Y. Degenerate fermi gases of ytterbium (2007) Physical Review Letters, 98(3)
- [2] Kitagawa M., Enomoto K., Kasa K., Takahashi Y., Ciurylo R., Naidon P., Julienne P.S. Two-color photoassociation spectroscopy of ytterbium atoms and the precise determinations of s-wave scattering lengths (2008) Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics, 77(1)
- [3] Enomoto K., Kasa K., Kitagawa M., Takahashi Y. Optical feshbach resonance using the intercombination transition (2008) Physical Review Letters, 101(20)

(2) 研究領域終了後の継続と発展状況

科学研究費基盤研究(A)「量子縮退イッテルビウム原子気体の物理:多様性の新展開」(2006 年度~2009 年度)において、Yb 原子のユニークな特徴を最大限にいかした全く新しい量子縮退系の実現と、その新たな可能性を探る研究を行った。

科学技術振興機構(JST)戦略的創造研究推進事業チーム型研究「超狭線幅光源を駆使した量子操作・計測技術の開発」(2008 年度~2012 年度)において、数ヘルツという極めて線幅の狭い超高安定な光源の開発と、これを光格子中の原子に適用して新たな量子計測技術を開発する研究を進めた。

科学研究費新学術領域研究(研究領域提案型)「冷却原子を用いた量子制御」(2009 年度~2013 年度)において、冷却中性原子をベースに、光格子、アトムチップ、スピン制御という三つのアプローチによる量子コヒーレント制御の研究を進めた。

内閣府(CAO)最先端研究開発支援最先端研究開発支援プログラム(FIRST)「量子情報処理プロジェクト」(2009 年度~2013 年度)のメンバーとして、量子情報処理技術の新しい潮流を形成することを目標に研究に取り組んだ。

現在は、本研究領域終了後に開始したテーマ、科学研究費基盤研究(S)「光格子中イッテルビウム量子気体の究極的操作・観測が拓く新奇量子凝縮相研究の新展開」(2013 年度~2017 年度)の研究代表者として、光格子に導入した超低温 2 電子系原子の系を用いた量子凝縮相に関する物性研究に取り組んでいる。現在はさらに、内閣府(CAO)革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)「量子人工頭脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」(2014 年度~2018 年度)に参画し、

量子シミュレーションの研究を進めている。

①科学技術の進歩への貢献

1995 年にアルカリ金属原子のボース・アインシュタイン凝縮(BEC)が実現されて以来、量子縮退した原子集団は、制御性に優れた量子体系として、量子情報処理への応用が有望視されてきた。高橋義朗は、1 電子系のアルカリ金属ではなく、2 電子系である希土類金属のイッテルビウム(Yb)に注目して、本研究領域終了後も量子操作や量子計測技術の研究を続けている。

科学研究費助成事業の「量子縮退イッテルビウム原子気体の物理：多様性の新展開」においては、多様な Yb 原子の量子縮退気体の生成に成功し^[1]、それらの物性を研究するとともに量子情報処理への応用を視野に、非破壊量子測定の実験を行った^[2]。科学技術振興機構(JST)戦略的創造研究推進事業の「超狭線幅光源を駆使した量子操作・計測技術の開発」では、線幅 100Hz 程度の光源を開発して、光格子を導入した際の、光格子点における個別量子操作・検出を可能とし、また、超高分解能分光実験の結果を定量的に解析する計算方法を開発した。科学研究費助成事業の「冷却原子を用いた量子制御」及び「光格子中超低温イッテルビウム原子気体を用いた量子凝縮相の研究」においては、大量の原子数の量子縮退した Yb 原子気体を、安定に光格子中に生成する技術を確認し、様々な量子凝縮相の生成に成功した。その例として、図 3-4 にフェルミ系 $SU(2) \times SU(6)$ における TOF 画像を示す^[3]。さらに、生成した凝縮体に対して、光による原子間相互作用の制御に成功した^[4]。

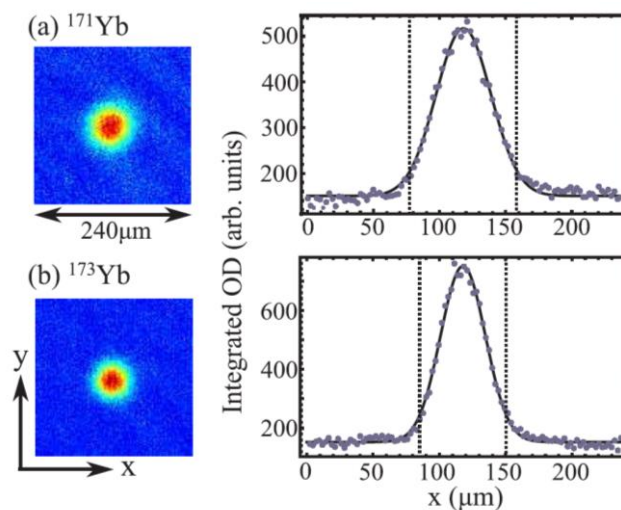


図 3-4 スピン自由度を持ったフェルミ・フェルミ混合系量子縮退の TOF(Time-of-flight)画像

「光格子中イッテルビウム量子気体の究極的操作・観測が拓く新奇量子凝縮相研究の新展開」においては、冷却原子数の増大、フェルミ原子に対するフェッシュバッハ共鳴の観測、光リープ格子の実装、YbLi 原子の光格子への実装などを実現した。

②社会・経済への波及効果

レーザー冷却による超低温の量子気体に光格子と呼ばれる周期的なポテンシャルを導入した系

が、量子多体系の新たな方向の一つとして進展しており、従来、それらはアルカリ金属原子を対象に欧米の研究者によって行われていた。高橋義朗は、イッテルビウム (Yb) という、豊富な同位体が存在し、軌道角運動量を持つ準安定状態が存在する、希土類金属の原子に世界に先駆けて注目し、量子多体系の研究を進めている。Yb は 2 電子系であり、1 電子系のアルカリ金属原子とは異なり、通常の磁気トラップを使うことができないが、高橋義朗は磁気を使わず、全光学的に冷却・閉じ込めを実現する技術を開発することにより、Yb を用いた量子多体系の研究の道を拓いた。

本研究期間中に、Yb のボソン原子でボース・アインシュタイン凝縮を、Yb のフェルミ原子でフェルミ縮退を実現し、3 次元光格子中でのモット絶縁体の量子転位の観測に成功するなどの成果を上げたが、その後も、多様な Yb 原子の量子縮退気体の生成、これらを用いた光格子による量子シミュレーションの実現、YbLi 原子混合系への発展などの成果を積み上げ、Yb 原子を用いた量子多体系の研究を進展させている。

Yb 原子を用いた量子系の研究は、世界中の実験及び理論の研究者の注目を集め、Yb 原子や他の 2 電子系原子を用いたボース・アインシュタイン凝縮、フェルミ縮退、光格子などの研究が世界中で行われるようになった。

「2 電子原子を用いた量子系の研究」という新しい研究分野を切り開いたことにより、高橋義朗は、仁科記念財団より 2013 年度仁科記念賞を授与された。

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

- [1] Fukuhara T., Sugawa S., Takasu Y., Takahashi Y. All-optical formation of quantum degenerate mixtures (2009) Physical Review A – Atomic, Molecular, and Optical Physics, 79(2)
- [2] Takano T., Fuyama M., Namiki R., Takahashi Y. Spin squeezing of a cold atomic ensemble with the nuclear spin of one-half (2009) Physical Review Letters, 102(3)
- [3] Taie S., Takasu Y., Sugawa S., Yamazaki R., Tsujimoto T., Murakami R., Takahashi Y. Realization of a $SU(2) \times SU(6)$ system of fermions in a cold atomic gas (2010) Physical Review Letters, 105(19)
- [4] Yamazaki R., Taie S., Sugawa S., Takahashi Y. Submicron spatial modulation of an interatomic interaction in a bose-einstein condensate (2010) Physical Review Letters, 105(5)

3.1.5 量子ネットワークへ向けた量子エンタングルメント制御(古澤明)

(1) 研究の狙いと研究期間中の達成状況

①研究の狙い

量子情報処理において、高効率な実験が可能な連続量に着目し、量子テレポーテーションの高フィデリティ化、多者間の量子エンタングルメント、量子テレポーテーションネットワーク、量子エンタングルメントスワッピング、量子エラーコレクション、非ガウス型量子エンタングルメ

ント制御への拡張という六つの課題に取り組むことが、本研究の狙いである。

②期間中の研究成果

量子ネットワークに向けた、量子エンタングルメント制御に関する研究は、東京大学グループ、情報通信研究機構(NICT)グループ、お茶の水大学グループによって、推進された。主な研究成果は次のとおりである。

東京大学グループは、新しい非線形光学結晶を探索し、疑似位相整合非線形光学結晶であるPPKTP(Periodically poled potassium titanyl phosphate)を見いだした。これを用いてスクイーミング高レベル化、高フィデリティ化で大きな成果を上げ、この成果をベースに、多者間の量子エンタングルメント、量子テレポーテーションネットワーク、量子エンタングルメントスワッピング、連続量の量子エラーコレクションという他のテーマにおいても次々に実験を成功させた。東京大学グループは、直交振幅のスクイーズ状態とホモダイン測定を基に実験を進めたが、これらの実験から得られる状態は常にガウス型である。

これに対し、NICTグループは非ガウス型量子制御法の確立に取り組んだ。幾つかの重要な量子プロトコルは、本質的に非ガウス型の量子状態や量子制御を必要とすることが知られている。同グループは、典型的な非ガウス型測定過程である光子検出により、シュレディンガーの猫状態の生成に成功した。また、Si APDを用いて光子数識別器の開発に取り組み、高い性能を確認した。

お茶の水大学グループは全体に跨る理論的研究を行った。具体的には、非平衡量子統計力学的な手法を用いたデコヒーレンス解析、量子情報のデコヒーレンスのパルス制御に関する理論などであり、これらの結果は、様々な量子情報処理システムの構築に向けて有益な指針や基本ツールを提供するものと期待される。

③研究成果に関連した主な成果論文リスト

- [1] Van Loock P., Furusawa A. Detecting genuine multipartite continuous-variable entanglement (2003) Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics, 67(5), pp. 523151-5231513.
- [2] Aoki T., Takei N., Yonezawa H., Wakui K., Hiraoka T., Furusawa A., Van Loock P. Experimental Creation of a Fully Inseparable Tripartite Continuous-Variable State (2003) Physical Review Letters, 91(8), pp. 804041-804044.
- [3] Yonezawa H., Aoki T., Furusawa A. Demonstration of a quantum teleportation network for continuous variables (2004) Nature, 431(7007), pp. 430-433.

(2) 研究領域終了後の継続と発展状況

科学研究費基盤研究(A)「広帯域ユニバーサルスクイザーの研究」(2008年度～2011年度)において、連続量量子情報処理と量子ビット量子情報処理の統合を視野に、単一光子状態にスクイーズ操作を行う研究を行った。

2011年度から2013年度にかけて、科学研究費基盤研究(A)「アダプティブホモダイン測定の研究」において、量子コヒーレント通信の実現に寄与させるべく、超精密位相測定(アダプティブホ

モダイン測定)の研究を進めた。

現在は、科学研究費基盤研究(A)「量子テレポーテーションを基礎にした時間領域多重量子情報処理の研究」に取り組んでいる。

①科学技術の進歩への貢献

科学研究費助成事業の「広帯域ユニバーサルスクイザーの研究」においては、量子テレポーテーション装置を一部改造して測定誘起型量子状態操作を用いたユニバーサルスクイザーを開発し、これに単一光子状態を入力することによりシュレディンガーの猫状態の作成に成功した(図3-5)^[1]。

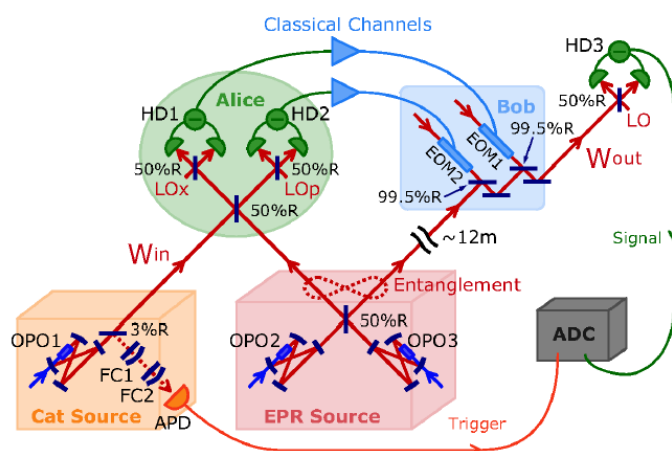


図 3-5 シュレディンガー猫状態の量子テレポーテーションに用いた実験系

さらに、シュレディンガーの猫状態にある光パルスを、その重ね合わせ状態を保ったまま伝送すること(量子テレポーテーション)に成功した(図3-5)^[1]。ここで、シュレディンガーの猫状態の生成は条件付きであるものの、量子テレポーテーションそのものは、意図したとおりに(決定論的)に行える点が、インスブルック大学などが、最初に実現したとされる量子テレポーテーションになかった特徴である。同じく「広帯域ユニバーサルスクイザーの研究」を進める中で、もつれあった四つの光モードのクラスター状態を用いた、連続変数に対する1方向量子計算の実験にも取り組み、成功させた^[2]。

科学研究費助成事業の「アダプティブホモダイン測定の研究」においては、極小リング共振器及び超広帯域ホモダイン測定器の開発に成功し、高レベル・広帯域のスクイズド光生成とその測定を実現した。位相スクイズド状態を用いたアダプティブホモダイン測定を用いた位相追跡の実験では、標準量子限界を破る測定を実証した^[3]。これは量子コヒーレント通信の実現につながる成果である。さらに、量子エンタングルメントの生成を時間領域で多重化する手法を用いて、超大規模量子エンタングルメント生成の実験装置を開発し^[4]、従来比1,000倍以上の16,000量子波束がもつれあった超大規模量子エンタングルメントの生成に成功した。従来の手法では9量子波束間のエンタングルメント生成が装置の大きさの点から限界であったが、この限界を根本的に解消する可能性が示され、量子コンピュータ実用化に向けた規模拡張の課題にめどをつけた。

また、東京大学は2015年に、古澤明らが、アインシュタインが提唱した「量子(光子)」の非局所性」を世界で初めて厳密に検証することに成功したと発表した。光子を粒子として検出する方法では、光子の有無しか観測できないが、光子の電磁波としての側面に着目し、電磁波の振幅と位相を高効率に測定するホモダイン測定を用いて、光子の非局所性を高精度かつ厳密に検証した。基礎科学の重要な成果である。

②社会・経済への波及効果

東京大学は2011年に、「シュレディンガー猫状態パルス量子テレポーテーションに成功した」と発表した。また2013年、同大学は、ドイツのヨハネス・グーテンベルグ大学との共同研究の成果として、「世界で初めて完全な光量子ビットの量子テレポーテーションに成功した」と発表した。これらは、古澤明が注力した、連続量量子情報処理と量子ビット量子情報処理の統合という構想が実を結んだ成果であり、高効率・無条件という光の波動としてのテレポーテーションの利点と、雑音に強い量子ビットの特長とを両立させた点が注目される。これらの実績は、量子力学の基礎に関わる知見を深めただけでなく、量子コヒーレント通信や量子コンピュータの実現に寄与するものである。

古澤明は2013年に「量子テレポーテーション回路」という特許を出願している。従来フリースペースに作られていた量子テレポーテーション光回路を、平面光回路上に形成することにより、安定的動作、コンパクト性、可搬性を実現することを特徴とするもので、出願人は日本電信電話株式会社と東京大学である。2015年に東京大学は、イギリスのブリストル大学、サウサンプトン大学、NTT先端集積デバイス研究所と共同で、量子テレポーテーション装置の心臓部に当たる回路のチップ化に成功したことを発表した。従来約1 m²の光学定盤上に非常に多くの光学素子を配置して構成していた量子もつれ生成・検査部分を、26mm×4mmのシリコン基板に形成した光回路により実現したものである。この集積チップは前記の特許出願「量子テレポーテーション回路」を具体化したものと考えられ、量子コヒーレント通信や量子コンピュータの実用化に向けたブレークスルーといえる成果である。

古澤明は、量子コンピュータに関係する分野の研究によって、本研究領域期間中から日本学士院学術奨励賞を始めとして多数の賞を受賞しており、本研究領域終了後の2011年にも、量子光学・量子情報科学の分野での共同研究を通じて大学の発展に貢献したことから、チェコのPalacký大学から表彰状とメダルを授与された。また2015年に、東レから、「決定論的量子テレポーテーションの実現と超大規模量子もつれ生成法の開拓」により、東レ科学技術賞が授与された。

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

- [1] Lee N., Benichi H., Takeno Y., Takeda S., Webb J., Huntington E., Furusawa A. Teleportation of nonclassical wave packets of light (2011) Science, 332(6027), pp. 330-333.
- [2] Ukai R., Iwata N., Shimokawa Y., Armstrong S.C., Politi A., Yoshikawa J.-I., Van Loock P., Furusawa A. Demonstration of unconditional one-way quantum computations for continuous variables (2011) Physical Review Letters, 106(24)

- [3] Yonezawa H., Nakane D., Wheatley T. A., Iwasawa K., Takeda S., Arao H., Ohki K., Tsumura K., Berry D. W., Ralph T. C., Wiseman H. M., Huntington E. H., Furusawa A. Quantum-Enhanced Optical-Phase Tracking (2012) Science, 337(6101), pp.1514-1517.
- [4] Yokoyama S., Ukai R., Armstrong S. C., Sornphiphatphong C., Kaji T., Suzuki S., Yoshikawa J.-I., Yonezawa H., Menicucci N. C., Furusawa A. Ultra-large-scale continuous-variable cluster states multiplexed in the time domain (2013) Nature Photonics, 7(12), pp. 982-986.

3.2 2004 年度採択研究課題

3.2.1 単一光子から単一電子スピンへの量子メディア変換(小坂英男)

(1) 研究の狙いと研究期間中の達成状況

①研究の狙い

本研究は、半導体ナノテクノロジー、スピントロニクス、量子光学を基礎として、「ナノスピンフォトニクス量子情報」という新分野の開拓を目指した。具体的には、量子通信に適した光子量子ビットから量子演算に適した電子スピン量子ビットへの量子メディア変換を実現することが、本研究の狙いである。

②期間中の研究成果

単一光子から単一電子スピンへの量子メディア変換は、東北大学グループ、理化学研究所グループ、産業技術総合研究所／仙台高等専門学校グループ、京都工芸繊維大学グループによって推進された。主な研究成果は次のとおりである。

東北大学グループは、光子から電子スピンへの状態転写の検討からスタートして、単一光子により生成された単一電子の検出、電子スピンの量子相関検出、さらには、単一電子スピンのコヒーレント操作という4段階にわたって実証研究を進め、各段階で当初の予想に対応する成果を残した。また、第1段階の光子から電子スピンへの状態転写の研究において、電子スピンの重ね合わせ状態を、光子によるトモグラフィ測定で評価できることを示した。これは、当初想定していなかった成果である。

理化学研究所グループは、単一光子から単一電子スピンへの量子メディア変換のための素子の開発と評価を行った。主な成果として、GaAs/GaAlAs 系縦型2重ドットを用いて、単一光子を電氣的に測定することに成功したこと、また、InAs 自己形成量子ドット又はドットとGaAsとの界面に存在する単一サイトに、光生成された正孔が捕獲されていることを示唆する実験に成功したことなどがある。

産業技術総合研究所／仙台高等専門学校グループは、光子から電子スピンへのメディア変換の原理実証実験を理論的に支援することを目的として研究を行った。具体的な成果として、通信に強い光子量子ビットから情報処理機能を担う電子スピン量子ビットへのメディア変換インターフェイス部となる固体素子の設計を行ったこと、電子スピントモグラフィ測定における理論的なサ

ポートを行ったことなどがある。

京都工芸繊維大学グループは、量子中継器の実現を目指し、光子から電子スピンへのメディア変換、量子転写を受けた電子間の相関測定、核スピンメモリに関して、理論的な考察を行った。その結果として、電子スピンの初期化、回転、状態測定を全て光学的に実行するための基礎理論を構築することができた。また、量子中継の実用化に不可欠な長時間メモリに関連して、核スピン量子メモリに注目し有用な知見を得た。

③研究成果に関連した主な成果論文リスト

- [1] Kosaka H., Shigyou H., Mitsumori Y., Rikitake Y., Imamura H., Kutsuwa T., Arai K., Edamatsu K. Coherent transfer of light polarization to electron spins in a semiconductor (2008) Physical Review Letters, 100(9)
- [2] Kosaka H., Inagaki T., Rikitake Y., Imamura H., Mitsumori Y., Edamatsu K. Spin state tomography of optically injected electrons in a semiconductor (2009) Nature, 457(7230), pp. 702-705.
- [3] Matsuda N., Shimizu R., Mitsumori Y., Kosaka H., Edamatsu K. Observation of optical-fibre Kerr nonlinearity at the single-photon level (2009) Nature Photonics, 3(2), pp. 95-98.

(2) 研究領域終了後の継続と発展状況

科学研究費基盤研究(A)「半導体量子ドットにおける単一電子スピン状態のトモグラフィ測定と任意光制御」(2009年度～2011年度)において、光子による電子スピンの書込み・操作・読出しという基本三要素の実現を目指し、半導体量子ドットにおける単一電子スピンのトモグラフィ測定と任意光制御の研究を行った。

2009年度から2010年度にかけて、科学研究費新学術領域研究(研究領域提案型)「光子と電子の動的スピン量子相関」において、光子と電子という異なった量子間の動的量子相関を明らかにするため、電子と光子間のスピントルクと、電子と光子間の交換相互作用に関する研究を行った。

2012年度から2014年度に、科学研究費基盤研究(A)「量子ドットにおける単一光子から単一電子スピンへの量子状態転写」のテーマで、InGaAs系歪形成量子ドットを用いた、単一光子から単一電子スピンへのタイムビン転写の実証研究に取り組んだ。

①科学技術の進歩への貢献

科学研究費助成事業「光子と電子の動的スピン量子相関」の研究を推進し、半導体中の電子スピンを量子ビットとすることが、実装整合性の点で好ましいという観点から、GaAs/AlGaAs単一量子ドットにおいて、電子スピンの光による操作に不可欠なV型3準位構造が実現できることを明らかにした。また、このテーマの研究過程において、スピニコヒーレンスの新規な測定手法を開発し、コヒーレント・カー効果の一般的概念を構築することに成功した。

電子を生成するポンプ光、電子スピンを観測するプローブ光に、制御光を追加した系を用いた実験及び理論により、電子のスピン状態を任意に制御できることを明らかにした。このことは、

光スピンと電子スピンは互いにトルク作用を及ぼすことを示す結果である。

科学研究費助成事業「量子ドットにおける単一光子から単一電子スピンへの量子状態転写」では、InGaAs 系量子ドットと並行して検討したダイヤモンド中の単一窒素欠陥中心 (NV 中心) を量子ドットとして用いた実験において、単一電子スピンの g 因子、ラビ振動、ラムゼー干渉などの情報を取得し、単一光子から単一電子スピンへの量子転写にめどをつけた。

②社会・経済への波及効果

半導体の量子ドットに滞在する電子のスピンを量子ビットとする構想は、量子情報処理の実用化に対して、汎用性・集積性の観点から自然な流れと考えられ、本研究領域期間中に行われた量子ドットを用いた一連の実験は、本研究領域期間終了後に、より具体的な、量子状態の測定事例に発展した¹⁰。

また、本研究領域終了後の科学研究費助成事業「量子ドットにおける単一光子から単一電子スピンへの量子状態転写」の研究は、特別な量子操作の必要もなく量子テレポーテーションによる量子中継が行えることを実証するという成果をもたらした。具体的には、ダイヤモンド中の単一窒素欠陥中心の電子に内在する量子もつれを利用し、発光と吸収という自然現象だけで光子と電子の量子もつれを検出した(図 3-6)¹¹。

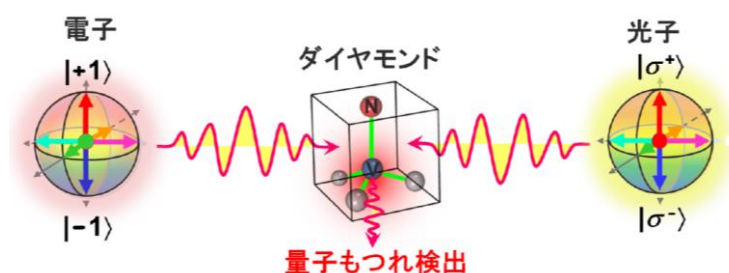


図 3-6 ダイヤモンド中の欠陥を用いた量子テレポーテーションの原理

この結果は、量子中継の基本原則である量子テレポーテーションを極めて単純な原理で実現し、物理法則によって安全性の保証された量子通信網の長距離化、高速化につながる成果と期待されている。

2011 年 12 月 9 日、小坂英男は、石田實記念財団から「ハイブリッド量子通信システムの構築へ向けた光子－電子スピン量子メディア変換の研究」により、2011 年度研究奨励賞を授与された。

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

- [1] Kuwahara M., Kutsuwa T., Ono K., Kosaka H. Single charge detection of an electron created by a photon in a g -factor engineered quantum dot (2010) Applied Physics Letters, 96(16)

¹⁰ 産業技術総合研究所プレス発表 2009 年 7 月 21 日「半導体人工分子の量子状態を電気的に測定する方法を開発」

¹¹ 横浜国立大学プレス発表 2015 年 2 月 4 日「光子の発光と吸収だけで量子通信や量子計算に用いられるテレポーテーションを可能にする新原理を実証」

- [2] Yokoshi N., Imamura H., Kosaka H. Proposal of a full Bell state analyzer for spin qubits in a double quantum dot (2010) *Physical Review B – Condensed Matter and Materials Physics*, 81(16)
- [3] Kutsuwa T., Kuwahara M., Ono K., Kosaka H. Single-electron spin resonance in a g-factor-controlled semiconductor quantum dot (2010) *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 42(4), pp.821-824.
- [4] Kosaka H., Niikura N. Entangled absorption of a single photon with a single spin in diamond (2015) *Physical Review Letters*, 114(5)

3.2.2 冷却イオンを用いた量子情報処理基礎技術(占部伸二)

(1) 研究の狙いと研究期間中の達成状況

①研究の狙い

冷却イオンを用いた量子情報処理の基礎技術を確立するために、イオンの振動基底状態までの冷却、イオンの空間操作、新たな量子ビットの開発、動作中の量子ビットの冷却を可能とする協同冷却、光とイオンの相互作用、イオントラップ量子演算システムの理論研究という六つの項目を中心に研究開発を進めることが、本テーマの狙いである。

②期間中の研究成果

冷却イオンを用いた量子情報処理基礎技術は、大阪大学グループ、京都大学グループ、情報通信研究機構グループ、マサチューセッツ工科大学(MIT)グループによって推進された。

大阪大学グループは、 Ca^+ イオンの振動基底状態までの冷却と量子ゲート基礎実験を実施し、ラビ振動の観測により、量子ゲートの初期化に十分な冷却が達成されていることを確認した。高度な量子状態の制御を行うベースを確立した成果である。また、テラヘルツ量子ビットの開発、高速断熱通過(RAP)による重ね合わせ状態の生成、 Ca^+ イオンの極微量同位体の選別捕獲、ブレナーイオントラップの設計・開発などのテーマについて研究を進めた。各テーマで得られた成果は、集積化や高度なゲート操作を含めた、冷却イオンによる情報処理技術の進展につながるものと考えられる。

京都大学グループは、 Yb^+ イオンと Ba^+ イオンの時計遷移を利用した、コヒーレンス時間の長い量子ゲートの実現を目指して研究を行った。その結果光イオン化によるイオントラップ、レーザー冷却、マイクロ運動の除去という各課題を解決し、波長サイズ以下の領域に閉じ込め可能な 1mm サイズのイオントラップを実現した。また、 Yb^+ イオンと Ba^+ イオンの奇数同位体を用いた光時計の研究を進め、平行して時計遷移分光用レーザーを開発した。これらは、有効な量子ゲートだけでなく、高精度の光時計の構築に向けた成果である。

情報通信研究機構グループは、協同冷却及び光子-イオン相互作用に関する研究を行い、 Ca^+ イオン列を生成する技術、 Ca^+ イオン列を保ったまま指定場所に In^+ イオン(冷媒イオン)を埋め込む技術などの開発に成功した。また、 Ca^+ イオンから成る系の特定の遷移に共鳴する光共振器の開

発を行い、複数イオンと光共振器の結合実験実現の見通しを得た。

MIT グループは大規模量子コンピューティングに向けた要素技術開発と実現性評価に取り組んだ。その結果、大規模化に向けて開発したプレーナー微細加工イオントラップを用い、イオンのアドレッシング技術の開発、量子非破壊でイオンを冷却するキャビティ冷却法の実証などに成功した。

③研究成果に関連した主な成果論文リスト

- [1] Tanaka U., Matsunishi H., Morita I., Urabe S. Isotope-selective trapping of rare calcium ions using high-power incoherent light sources for the second step of photo-ionization (2005) Applied Physics B: Lasers and Optics, 81(6), pp.795-799.
- [2] Tanaka U., Morita I., Urabe S. Selective loading and laser cooling of rare calcium isotope $^{43}\text{Ca}^+$ (2007) Applied Physics B: Lasers and Optics, 89(2-3), pp.195-200.
- [3] Yamazaki R., Iwai T., Toyoda K., Urabe S. Phase-locked laser system for a metastable states qubit in $^{40}\text{Ca}^+$ (2007) Optics Letters, 32(15), pp.2085-2087.

(2) 研究領域終了後の継続と発展状況

科学研究費新学術領域研究(研究領域提案型)「開放型イオントラップ系による量子情報処理」(2009 年度～2013 年度)において、大規模化及び他の量子系との結合が容易なトラップの開発と、断熱過程に基づく量子ゲートの開発を進めた。また、最先端研究開発支援プログラム(FIRST)「量子情報処理プロジェクト」の量子シミュレーショングループにおいてイオントラップを用いた量子シミュレーションの研究を進めた。

①科学技術の進歩への貢献

科学研究費新学術領域研究(研究領域提案型)「超伝導量子サイバネティクスの研究」において、「開放型イオントラップ系による量子情報処理」に取り組み、プレーナートラップを開発して、印可電圧制御による、異なる領域間のイオン輸送の手法を確立した(図 3-7)¹²。

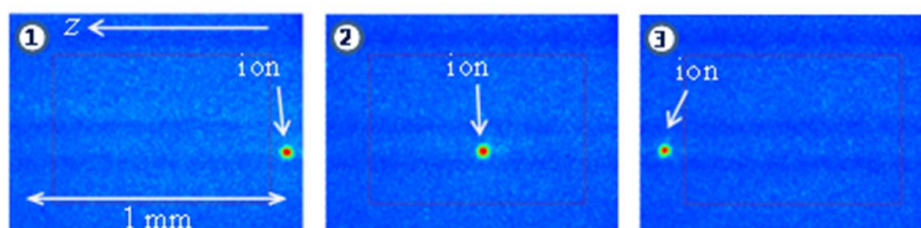


図 3-7 カルシウムイオンの移動する様子を示す画像

また同テーマの研究において、断熱的手法と幾何学的位相を用いた手法による量子ゲートの構成と量子状態の生成、RF 遷移へのエンタングル状態の生成^[1]などに成功した。幾何学的位相のみ

¹² 科学研究費助成事業 研究成果報告書 課題番号：21102006 「開放型イオントラップ系による量子情報処理」

による単一量子ビットゲートを断熱的手法で初めて実現した成果は、幾何学的位相のみによる量子計算(ホロミック量子計算)の基礎となるものである。量子シミュレーションの研究においては、固体物理の強相関モデルとして有望な JCH(ジェイズ・カミングス・ハバード)モデルについてイオン鎖中のフォノンを用いて初めて実験的に実証した^[2]。また、イオントラップ中の2フォノンの量子干渉の観測にも成功している^[3]。

②社会・経済への波及効果

大学共同利用機関法人自然科学研究機構分子科学研究所協奏分子システム研究所と共同で、イオントラップ中に極低温状態の3個のカルシウムイオンを三角形に配列させて、ミクロンサイズの量子回転子を作り、これを使ってトンネル粒子によるアハラノフ・ボーム効果を実証することに成功した^[4]。基礎物理の分野に新たな知見をもたらすとともに、古典計算機では解くことが困難とされる問題を自然にそのまま解かせてしまう量子シミュレーションの研究などにおける新しい実験手法を提供するものとして期待される¹³。

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

- [1] Noguchi A., Haze S., Toyoda K., Urabe S. Generation of a decoherence-free entangled state using a radio-frequency dressed state (2012) Physical Review Letters, 108(6)
- [2] Toyoda K., Matsuno Y., Noguchi A., Haze S., Urabe S. Experimental realization of a quantum phase transition of polaritonic excitations (2013) Physical Review Letters, 111(16)
- [3] Kenji Toyoda, Ryoto Hiji, Atsushi Noguchi, Shinji Urabe, Hong-Oh-Mandel Interference of two phonons in trapped ions, Nature, Vol.527, 74-77, 2015.
- [4] Noguchi A., Shikano Y., KToyoda K., Urabe S. Aharonov-Bohm effect in the tunneling of a quantum rotor in a linear trap (2014) Nature Communications, vol. 5, 3868

3.2.3 分子の電子・振動・回転状態を用いた量子演算基盤技術の開発(百瀬孝昌)

(1) 研究の狙いと研究期間中の達成状況

①研究の狙い

分子固有の電子及び振動回転の内部自由度を活用した新しい量子情報処理の基盤技術開発を目的として、分子の電子振動回転状態のエンタングルメント、演算要素としてのコヒーレントパルス、分子をベースとした基本量子ゲートなどについて、実験と理論的検討を行うとともに、分子の内部状態をいかした量子演算のアルゴリズム開発を行い、高速演算と多ビット化の方向性を探ることが、本研究の狙いである。

¹³ 分子科学研究所プレス発表 2014年5月14日「イオントラップを用いて量子回転子を実現し、トンネル効果中の量子位相を初めて観測」

②期間中の研究成果

分子の電子・振動・回転状態を用いた量子演算基盤技術の開発は、京都大学・東京工業大学・情報通信研究機構・ブリティッシュコロンビア大学のチームから成るグループ、東京工業大学のグループ、分子科学研究所グループ、東京大学グループ、東北大学グループにより推進された。主な成果は次のとおりである。

京都大学・東京工業大学・情報通信研究機構・ブリティッシュコロンビア大学のチームから成るグループは、固体パラ水素に補足された分子を用いた量子ゲートを実証するために、基礎実験技術開発及び理論解析に取り組んだ。固体水素試料作成用の光学クライオスタットを設計・製作し他の実験チームに供給したこと、ゲート演算を行うための赤外超短パルスレーザーの波形制御が可能であることを示したことなどの、注目すべき成果を上げた。

東京工業大学のグループは、固体パラ水素に内包された分子の振動・回転量子ビットでのコヒーレンス過程の解明と、同量子ビットの量子演算操作のための位相同期光源の開発及び量子演算の実証に取り組んだ。マイクロ波領域と光領域の位相同期光源群を構築し、また、この光源を用いて気相原子と気相分子の量子演算操作の実験を行い、分子の回転準位量子ビットの原子に対する優位性を実証した。一方、パラ水素結晶内の分子については、回転状態と格子の相互作用が大きく、数ナノ秒の寿命しか持ち得ないことを実験的に示した。

分子科学研究所グループは、アト秒位相変調器を用いて、分子内の二つの振動波束の干渉制御やコヒーレンスの検証に取り組んだ。また、空間的に捕捉された分子の生成を目指して、Rb 原子の光会合に関する研究を行った。その結果、分子の振動固有状態を用いた分子メモリを開発し、それを用いて論理ゲートを構成できる可能性を明らかにするなどの成果を上げた。

東京大学のグループは、分子の内部状態を用いた量子演算のシミュレーションを行い、実験グループに理論的提案を行うことを目的として研究を行った。原子や分子の振動・回転を用いたエンタングルメントの生成などに関して、様々な視点から理論的検討を行い、その過程で、エンタングルメントダイナミクスにおける、終端時刻拘束無しの最適制御理論を構築することができた。

東北大学グループは、分子内自由度と超短レーザーパルスとの相互作用を利用した量子演算のシミュレーション、具体的にはゲート操作精度及びデコヒーレンス機構・抑制法の数値解析を行った。この研究の過程において、量子最適制御シミュレーション法を大幅に拡張することに成功した。

③研究成果に関連した主な成果論文リスト

- [1] Tsubouchi M., Momose T. Rovibrational wave-packet manipulation using shaped midinfrared femtosecond pulses toward quantum computation: Optimization of pulse shape by a genetic algorithm (2008) Physical Review A – Atomic, Molecular, and Optical Physics, 77(5)
- [2] Fajardo M.E., Lindsay C.M., Momose T. Crystal field theory analysis of rovibrational spectra of carbon monoxide monomers isolated in solid parahydrogen (2009) Journal of Chemical Physics, 130(24)

- [3] Kuma S., Slipchenko M.N., Kuyanov K.E., Momose T., Vilesov A.F. Infrared spectra and intensities of the H₂O and N₂ complexes in the range of the ν_1 - and ν_3 -bands of water (2006) Journal of Physical Chemistry A, 110(33), pp.10046-10052.

(2) 研究領域終了後の継続と発展状況

本研究期間中の主たる共同研究者であった大森賢治は、2009 年度から 2011 年度にかけて、科学研究費基盤研究(A)「アト秒ピコメートル精度の時空間コヒーレント制御法を用いた量子／古典境界の探索」に取り組み、アト秒精度のコヒーレント制御法を固体に応用するとともに、気相孤立分子中の波束を高強度近赤外レーザーパルスで変調するデコヒーレンス模擬実験を行った。

また科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業(CREST)の「先端光源を駆使した光科学・光技術の融合展開」研究領域において「アト秒精度の凝縮系コヒーレント制御」(2010 年度～2014 年度)の研究代表者として、量子シミュレータ及びフォノンの巨視的量子状態制御の研究を行った。

① 科学技術の進歩への貢献

大森賢治は「アト秒ピコメートル精度の時空間コヒーレント制御法を用いた量子／古典境界の探索」の研究において、新物理現象「強レーザー誘起量子干渉」の観測、YBa₂Cu₃O_{7- δ} の超伝導性と結合するフォノンモードの制御などの成果を上げ、量子／古典境界を探索するための実験ツールを開発することに成功した¹⁴。図 3-8 に強レーザー誘起量子干渉の概要を示す。

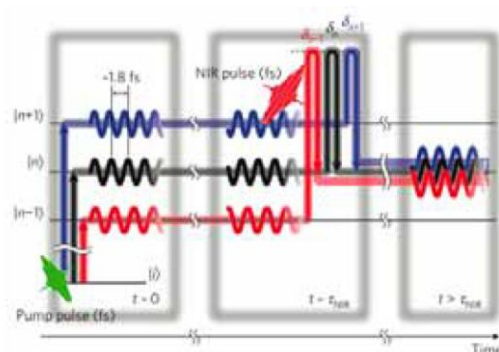


図 3-8 強レーザー誘起量子干渉の概要

(始状態 i から赤外高強度近レーザーパルスによる照射を経て終状態 n に至る複数の経路が量子力学的に干渉する)

② 社会・経済への波及効果

アト秒時空量子エンジニアリングの先駆的開発が評価され、2012 年に大森賢治は、フンボルト賞を受賞した。フンボルト賞は、ドイツ政府が全額出資するアレキサンダー・フォン・フンボルト財団によって創設され、基本的な発見若しくは新しい理論によって後世に残る重要な業績を上げ、今後も学問の最先端で活躍すると期待される研究者に対して授与されるものである。アト秒

¹⁴ 科学研究費助成事業研究成果報告書 課題番号 21245007 「アト秒ピコメートル精度の時空間コヒーレント制御法を用いた量子／古典境界の探索」

時空量子エンジニアリングは、アト秒(10^{-18}) レベルで制御されたレーザー光の時間振動の情報を分子1個の中の電子や原子の波に転写することによって、それらが描く量子力学的な時空間模様をピコメートル(10^{-12})・フェムト秒(10^{-15}) レベルの分解能で制御し加工する技術である。分子1個で、スーパーコンピュータを凌駕する性能を持つ分子コンピュータの開発につながる技術として期待されている。

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

- [1] Momose T., Liu Y., Zhou S., Djuricanin P., Carty D. Manipulation of translational motion of methyl radicals by pulsed magnetic fields (2013) *Physical Chemistry Chemical Physics*, 15(6), pp.1772-1777.
- [2] Hoshina H., Fushitani M., Momose T. Infrared spectroscopy of rovibrational transitions of methyl radicals (CH_3 , CD_3) in solid parahydrogen (2011) *Journal of Molecular Spectroscopy*, 268(1-2), pp.164-172.
- [3] Enomoto K., Djuricanin P., Gerhardt I., Nourbakhsh O., Moriwaki Y., Hardy W., Momose T. Superconducting microwave cavity towards controlling the motion of polar molecules (2012) *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 109(1), pp.149-157.
- [4] Miyamoto Y., Tsubouchi M., Momose T. Infrared spectroscopy of chloromethyl radical in solid parahydrogen and its nuclear spin conversion (2013) *Journal of Physical Chemistry A*, 117(39), pp.9510-9517.

3.3 2005 年度採択研究課題

3.3.1 通信波長帯量子もつれ光子とその応用システム(井上恭)

(1) 研究の狙いと研究期間中の達成状況

①研究の狙い

本研究課題は、本 CREST 研究の中では異色の電子回路系研究を行う。ファイバー伝送系への展開を念頭に、通信波長帯の量子情報通信技術の確立を目指して研究を推進した。具体的には、ポイント-to-ポイント(P2P)量子鍵配送(QKD)に関する研究、量子もつれ光子発生技術及びそのシステム応用技術、単一光子検出を始めとする周辺技術などである。

②期間中の研究成果

大阪大学(井上)グループは、プロジェクト全体を取りまとめるとともに、量子鍵配送(QKD)の方式提案、特に研究代表者発案の差動位相シフト(DPS)QKD プロトコルを軸とした新方式・改良方式の提案及びそのシステム性能評価を行った。ポイント-to-ポイントの量子暗号については、実用システムが視野に入る技術レベルまでになってきた。

日本電信電話(NTT)(武居)グループは、主に時間位置もつれ光子に関する実験的研究を行った。

また、ポイント-to-ポイント量子鍵配送(QKD)実験や安全性解析も行った。NTT グループが行った DPS-QKD 実験及び安全性解析により、QKD のシステム性能(鍵配送距離、鍵生成速度、安全性)が飛躍的に向上した。QKD をベースとしたセキュア通信システム(量子チャンネル伝送以外の各種技術)の開発も並行して行っており、実用的な量子暗号システムを実現するための基本技術が確立できた。プロトコルを実装し、長距離かつ高速な量子鍵配送実験を行った。最も重要な成果は、超伝導単一光子検出器(SSPD)を用いて、200km の光ファイバー上での量子暗号鍵配送に成功したことである。

産業技術総合研究所(吉澤)グループは、偏波に基づく多光子間量子もつれ合いを対象として、通信波長帯での量子もつれによる多者間量子情報処理技術の開発及び実験的検証を行った。偏波に基づく多光子間量子もつれ合い技術の開発を研究課題とし、量子暗号ネットワーク／量子中継システムに関する基盤要素技術を開発し、最終的には四光子レベルでの量子干渉及び量子もつれ交換実験を通信波長帯で実施した。

特筆すべき成果は 200km ファイバーQKD 実験である。井上らの提案による DPS-QKD オリジナルプロトコルである差動位相シフト(DPS)QKD の実験系に低雑音・高速動作特性を有する超伝導単一光子検出器を適用することにより、世界最長距離を達成した 2007 年の実験である¹⁵。本実験では、それまでの秘密鍵生成速度に関しても、それ以前の記録を大幅に更新した(2 桁以上@100km)。長距離 QKD のベンチマーク的実験となっている。

③研究成果に関連した主な成果論文リスト

- [1] Honjo T., Takesue H., Kamada H., Nishida Y., Tadanaga O., Asobe M., Inoue K. Long-distance distribution of time-bin entangled photon pairs over 100km using frequency up-conversion detectors (2007) Optics Express, 15(21), pp.13957-13964.
- [2] Honjo T., Nam S.W., Takesue H., Zhang Q., Kamada H., Nishida Y., OTadanaga, Asobe M., Baek B., Hadfield R., Miki S., Fujiwara M., Sasaki M., Wang Z., Inoue K., Yamamoto Y. Long-distance entanglement-based quantum key distribution over optical fiber (2008) Optics Express, 16(23), pp.19118-19126.
- [3] Inoue K. Quantum key distribution technologies (2006) IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, 12(4), art.no.1668133, pp.888-896.

(2) 研究領域終了後の継続と発展状況

2011 年度～2013 年度に科研費・基礎研究(B)「長距離光ファイバー伝送における光・電気ハイブリッド信号処理の研究」の共同研究者として、また、2012 年度～2014 年度に科研費・基礎研究(C)「差動位相シフト量子鍵配送システムの高性能化に関する研究」の研究代表者として、継続して発展的に研究を進めた。さらに、2014 年度スタートの ImPACT「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」(山本 PM)において、量子人工脳を実現する量子フィードバック

¹⁵ H. Takesue, S. W. Nam, Q. Zhang, R. H. Hadfield, T. Honjo, K. Tamaki, Y. Yamamoto, “Quantum key distribution over 40 dB channel loss using superconducting single-photon detectors,” Nature Photonics 1, 343 (Jun. 2007).

ク回路開発の研究を進めている。

①科学技術の進歩への貢献

「長距離光ファイバー伝送における光・電気ハイブリッド信号処理の研究」の共同研究では、光・電気ハイブリッド型フィードフォワード構成による信号再生器に関する研究を進めた。入力信号光に負のフィードフォワードをかけ、強度揺らぎを抑圧する信号発生器を考案し、その有効性を実験及びシミュレーションにより示した。本回路は、強度変調信号光だけでなく、DPSK 信号光やBPSK 信号光に対しても有効であることを示した。図 3-9 に強度変調信号光の再生前後の波形の例を示す^{[1], [2]}。

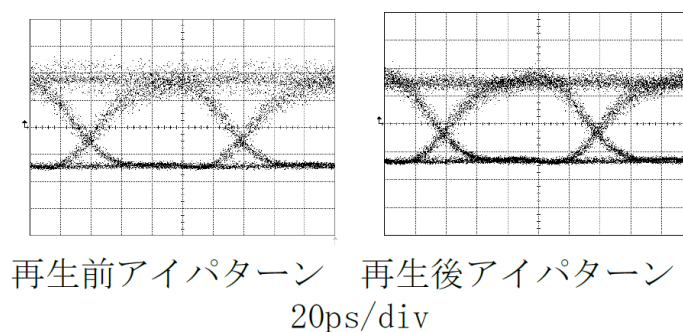


図 3-9 フィードフォワード型強度揺らぎ抑圧回路の入出力のアイパターン

「差動位相シフト量子鍵配送システムの高性能化に関する研究」では、自らの考案による差動位相シフト (DPS) 量子鍵配送 (QKD) に関する研究を中心的に進めている。

2014 年度スタートの ImPACT プログラム「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」では、図 3-10 に示すように量子人工脳ハードウェアを実現するために FPGA 制御回路を多重パルス・ファイバーパラメトリック発振器 (OP0) に接続する構成を採っている。デジタルコヒーレント光通信において優れた技術を持つ井上グループ (大阪大学) は、FPGA 回路を用いて位相雑音や帯域制限による信号歪を除去する技術を有し、ファイバーパラメトリック発振器の動作と量子光学基礎に精通しており、FPGA による量子フィードバック回路開発 (プロジェクト D) を担当している。また、NTT (武居) グループが光ファイバー OP0 開発 (プロジェクト C) を担当している。

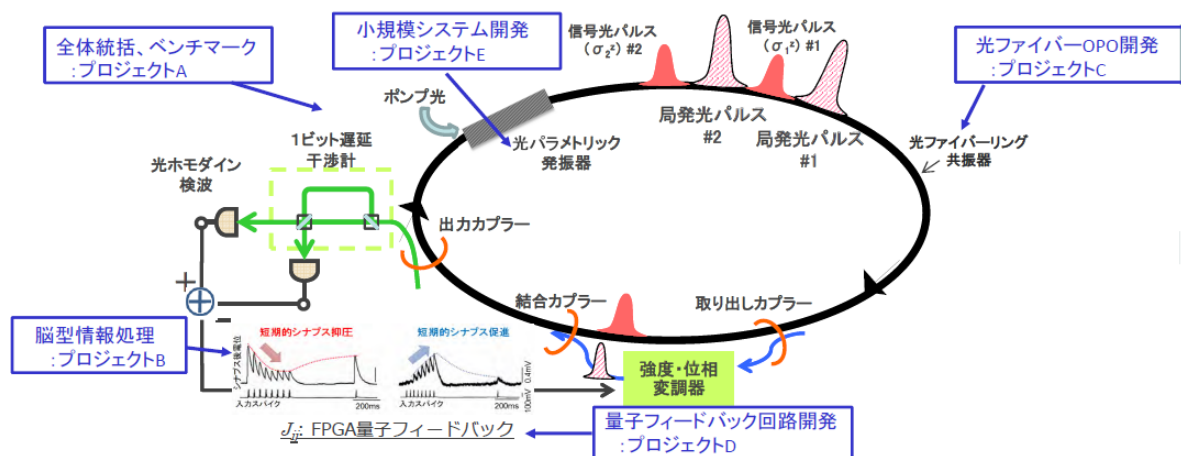


図 3-10 ImPACT プログラム「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」における量子人工脳・コヒーレントイジングマシーンの実装技術開発

②社会・経済への波及効果

応用の観点では、論文発表とともに多くの特許出願を行っている。2010 年に 6 件の特許出願があり、そのうち 4 件が登録されている。このうち「量子暗号通信システム」は、送信機から受信機へ量子暗号鍵を配送する量子暗号通信システムに関するもので、差動位相シフト量子鍵配送方式における、なりすまし盗聴等の有無を判別することができ、連続クリック攻撃を発見できる量子暗号通信システムを提供することができる。いずれの特許も、出願人は日本電信電話 (NTT) である。

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

- [1] Kunigita N., Takamiya H., Fukutoku M., Inoue K. Amplitude regeneration of NRZ-DPSK signal with a feed-forward control circuit (2013) Optical Fiber Technology, 19(1), pp. 52-54.
- [2] Kunigita N., Kawahara H., Inoue K. Improvement of intensity-modulated signal with feed-forward control (2012) Journal of Lightwave Technology, 30(17), art. no. 6227319, pp. 2839-2845.
- [3] Inoue K. Quantum mechanical treatment of optical amplifiers based on population inversion (2014) IEEE Journal of Quantum Electronics, 50(7), art. no. 6819768, pp. 563-567.

3.3.2 極低温原子を用いる量子計測法の開拓(香取秀俊)

(1) 研究の狙いと研究期間中の達成状況

①研究の狙い

極低温原子を用いた新たな量子計測・量子情報処理のツール「光格子時計」の手法を確立し、その工学的・理学的応用を目指した。ストロンチウム (Sr)、イッテルビウム (Yb)、水銀 (Hg) の原

子のうち、2 種以上の原子で 16 桁を上回る相対精度でスペクトルの相互比較を行い、次世代の時間標準としてのフィジビリティを評価するとともに、微細構造定数の恒常性／揺らぎの検証に挑戦することを目標として研究を開始した。

②期間中の研究成果

本研究は、Sr、Hg、Yb 光格子時計の構築と精度評価等を東京大学(香取)グループが担当し、Yb 光格子時計の構築と精度評価を産業技術総合研究所(洪)グループが担当し、高精度周波数計測ネットワークの研究を両グループが共同で担当した。

「光格子時計」手法は、香取が 2001 年に提案した新たな原子時計手法であり、「魔法波長」と名付けた原子に特有なレーザー波長で光トラップを構成すると、原子の 2 準位のエネルギーシフトが等しくなることを利用する。次世代原子時計として最も有望視されていた「単一イオン光時計」に比べて、原理的には数十倍から千倍の安定度の向上が可能になる。2006 年になると、米国、仏国グループでも光格子時計を実現し、その研究開発は世界で 20 を超えるグループが参入する世界的な潮流となった。この研究の世界情勢の中で、東京大学グループは、Sr 光格子時計の研究に注力し、その原理検証、量子力学的設計の最適化^[3]、適用する原子固有の問題提起とその解明を行い、この原子時計手法の 18 桁精度原子時計としてのフィジビリティを検証した。とりわけ、同期比較法による光格子時計における「量子射影雑音限界」の到達実証では、およそ 10 分の積分時間で 1.6×10^{-17} の安定度に達し、光格子時計が、従来手法「単一イオン光時計」と比肩する性能を持つとともに、原子数の優位性を初めて実証した。

一方で、東京大学—産業技術総合研究所(産総研)グループの共同による光格子時計の国際原子時の高精度リンクは、光格子時計の国際比較を可能にした^[1]。この結果、Sr 光格子時計は 2006 年に秒の再定義の有力候補である「秒の二次表現」に採択された。また産総研グループは、¹⁷¹Yb による光格子時計を開発し、競合する米国 NIST(National Institute of Standards and Technology、国立標準技術研究所)グループに先駆けて論文発表を行った。

また、光格子時計を国際比較し合う米国 JILA(Joint Institute for Laboratory Astrophysics、米国国立標準技術研究所とコロラド大学の共同研究所)、仏国 SYRTE(Systèmes de Référence Temps Espace、時空標準機構)と Sr/Cs 原子時計の周波数比を 3 年間にわたって計測し、微細構造定数の恒常性、物理定数の重力との結合がないことを計測不確かさの範囲で示し、基礎物理学の見地からのデモンストレーションも行った^[2]。

③研究成果に関連した主な成果論文リスト

- [1] Takamoto M., Hong F.-L., Higashi R., Fujii Y., Imae M., Katori H. Improved frequency measurement of a one-dimensional optical lattice clock with a spin-polarized fermionic ⁸⁷Sr isotope (2006) Journal of the Physical Society of Japan, 75(10), art.no. 104302.
- [2] Blatt S., Ludlow A.D., Campbell G.K., Thomsen J.W., Zelevinsky T., Boyd M.M., Ye J., Baillard X., Fouche M., Le Targat R., Brusch A., Lemonde P., Takamoto M., Hong F.-L., Katori H., Flambaum V.V. New limits on coupling of fundamental constants to gravity using ⁸⁷Sr optical lattice clocks (2008) Physical Review Letters, 100(14), art.no. 140801.

- [3] Akatsuka, T., Takamoto, M. & Katori, H. Optical lattice clocks with non-interacting bosons and fermions (2008) Nature Phys. 4, 954-959.

(2) 研究領域終了後の継続と発展状況

本研究領域の終了後、研究代表者の香取は 2009 年度～2013 年度 FIRST「量子情報処理プロジェクト」において量子標準サブテーマリーダーとして、 10^{-17} の不確かさの光格子時計ネットワークの実現研究に取り組んだ。さらに 2010 年度～2014 年度 ERATO「香取創造時空間プロジェクト」研究総括として、セシウム原子時計をはるかに凌駕する精度を持つ「光格子時計」の実現を目指している。

① 科学技術の進歩への貢献

FIRST 量子標準では、黒体輻射シフトを大幅に低減する低温環境で動く 2 台の低温動作 Sr 光格子時計の開発を行い、18 桁精度での動作を実証した。図 3-11 に 2 台の低温動作光格子時計の周波数比較の結果を示す。2 台の時計の同期運転手法を用いることで、2 台の時計の安定度は僅か 2 時間の積算時間で 2×10^{-18} に達した^{16, [3]}。

理化学研究所と東大で開発した 2 台の光格子時計をつなぐファイバーリンクを構築し、その周波数比較を開始した。積算時間 1,600 秒で 1×10^{-17} の安定度を達成した。従来のトラップ・イオン光時計に必要な積算時間を 1/50 に短縮することに成功した。最終的には、時計運転シーケンスと原子数の最適化により 100 秒積算で 1×10^{-18} の比較を見込んでいる。これは、遠隔地間で 1cm に対応する重力ポテンシャル差の判別手段を与え、「相対論的測地」というべき新たな計測手段の誕生につながる。

2010 年度にスタートした ERATO「香取創造時空間プロジェクト」では、開始後 4 年の間に、二つの Sr 光格子時計の周波数において 10^{-18} のレベルでの一致が確認され、低温動作・光格子時計による 18 乗台の時間精度が達成された。プロジェクトの主要な目的が達成されたといえる^{17, 18}。

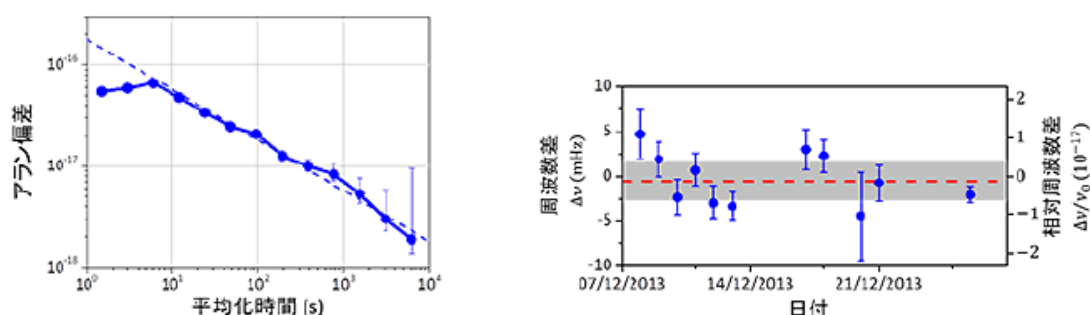


図 3-11 2 台の時計の周波数差の測定

¹⁶ 量子ニュース 2014 March, No. 15, 最先端研究開発支援プログラム「量子情報処理プロジェクト」・国立情報学研究所量子情報国際研究センター ニュースレター

¹⁷ ERATO 香取創造時空間プロジェクト事後評価(予備評価)報告書 (評価会実施日 2014 年 12 月 24 日)

¹⁸ Ushijima, I., Takamoto, M., Das, M., Ohkubo, T. & Katori, H. Cryogenic optical lattice clocks (2015) Nature Photon. 9, 185-189.

②社会・経済への波及効果

光格子時計によって、現在の原子時計による時間標準よりも千倍高い精度が実現しつつあり、次世代の時間標準への採用が議論されている。時間は重要な基礎物理量の一つであり、その標準の精度を高める技術はそれ自体人類の知の礎としての基礎科学に対する大きな貢献を意味する。時間標準は現在の情報化社会において、GPS やグローバルなネットワーク管理、証券取引など様々な産業で重要な役割をしており、基礎科学にとどまらず社会、経済に対する貢献が十分期待される¹⁷。

応用の観点では、2013 年に「光格子時計、時計装置、およびレーザー光源」という特許を国際 (PCT) 出願 (優先権主張 2012 年) している。光格子時計において、時間遷移に関連する原子が容器等の壁とほとんど相互作用しないという利点をいかしつつ原子数を増大することができる具体的構成を提供することにより、光格子時計の原理を利用する高精度な光格子時計、時計装置、レーザー光源の実現に貢献するものである。出願人は理化学研究所である¹⁹。

光格子時計に関する研究で、2015 年日本学士院賞、2014 年秋の紫綬褒章、2013 年仁科記念賞始め、数多くの学術賞を受賞している。

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

- [1] Katori H. Optical lattice clocks and quantum metrology (2011) *Nature Photonics*, 5(4), pp. 203-210.
- [2] Derevianko A., Katori H. Colloquium: Physics of optical lattice clocks (2011) *Reviews of Modern Physics*, 83(2), pp. 331-347.
- [3] Takamoto M., Takano T., Katori H. Frequency comparison of optical lattice clocks beyond the Dick limit (2011) *Nature Photonics*, 5(5), pp. 288-292.
- [4] Yamaguchi A., Fujieda M., Kumagai M., Hachisu H., Nagano S., Li Y., Ido T., Takano T., Takamoto M., Katori H. Direct comparison of distant optical lattice clocks at the 10-16 uncertainty (2011) *Applied Physics Express*, 4(8), art. no. 082203,

3.3.3 分子スピン量子コンピュータ (北川勝浩)

(1) 研究の狙いと研究期間中の達成状況

①研究の狙い

分子の核スピンを量子ビットとして、分子の数や計算ステップ数などが指数爆発を起こさない真の量子計算の実現を目指して、初期化、量子演算、及び、それらを連続して行う研究を行った。

②期間中の研究成果

¹⁹ 特開 W02014/027637 「光格子時計、時計装置、およびレーザー光源」

量子計算の研究は大阪大学(北川)グループ、分子電子スピンの研究は大阪大学(工位)グループ、フォールトトレラント量子計算理論の研究は東北大学・名古屋大学(小澤)グループ、そして超伝導量子回路の研究は理化学研究所(中村)グループが、それぞれ中心的に担当して実施した。

原子核スピン量子計算、電子スピン量子計算では、初期化、多ビット化などに関して、当初目標が必ずしも達成されていないが、これは挑戦的な基礎研究テーマのためである。当初目標に代わる成果として、大阪大学(北川)グループは、高速の核スピン偏極、高利得の核スピン増幅に関して、大阪大学(工位)グループは、3重螺旋構造による(ABC)_n型電子スピン量子ビットを可能とする希釈結晶の作成、電子スピンの CNOT ゲートに関して、成果が得られている。途中から参加した超伝導量子回路グループは、進行波系での双極子誘導反射、電磁誘導透過、Mollow トリプレットなど量子光学の基礎実験に成功するとともに、99.4%というゲートフィデリティと 20 μ sec の T2 時間という成果を得た。

③研究成果に関連した主な成果論文リスト

- [1] Sato K., Nakazawa S., Rahimi R., Ise T., Nishida S., Yoshino T., Mori N., Toyota K., Shiomi D., Yakiyama Y., Morita Y., Kitagawa M., Nakasuji K., Nakahara M., Hara H., Carl P., Hofer P., Takui T. Molecular electron-spin quantum computers and quantum information processing: Pulse-based electron magnetic resonance spin technology applied to matter spin-qubits (2009) Journal of Materials Chemistry, 19(22), pp. 3739-3754.
- [2] Morita Y., Yakiyama Y., Nakazawa S., Murata T., Ise T., Hashizume D., Shiomi D., Sato K., Kitagawa M., Nakasuji K., Takui T. Triple-stranded metallo-helicates addressable as Lloyds electron spin qubits (2010) Journal of the American Chemical Society, 132(20), pp. 6944-6946.
- [3] Sugisaki K., Toyota K., Sato K., Shiomi D., Kitagawa M., Takui T. Spin-orbit contributions in high-spin nitrenes/carbenes: A hybrid CASSCF/MRMP2 study of zero-field splitting tensors (2010) ChemPhysChem, 11(14), pp. 3146-3151.

(2) 研究領域終了後の継続と発展状況

2009 年度～2013 年度 FIRST「量子情報処理プロジェクト」のスピン量子コンピュータ(樽茶サブテーマリーダー)において分子スピン超精密量子演算制御装置の開発に取り組んだ。また、2009 年度～2013 年度、科学研究費新学術領域研究(研究領域提案型)「超伝導量子サイバネティクスの研究」分子スピン量子制御において、分子スピンによる高忠実度な量子回路の実現を目指した。

①科学技術の進歩への貢献

「量子サイバネティクスー分子スピン量子制御」において、数値計算による操作パルスの最適化、パルス補償による過渡現象の抑制を行い、忠実度の高いスピン制御を実現した。具体的には、共振器中の過渡現象を事前に補償し、サンプルに所望のパルスを照射する手法を開発し、1 量子ビット回転であるラビ振動の位相過渡歪を抑制できることを実験的に示した。

また、位置選択的に同位体置換した分子を合成し、室温での核スピンの超偏極化やスピン増幅

を実現した。結晶中の少数の核スピンの情報をスピン拡散により多数の核スピンの移動して蓄積することによって広義のスピン増幅を実現し、140 倍のゲインを得た。この研究は世界で初めて高利得でスケーラブルなスピン増幅を実装したものである（図 3-12）^[1]。

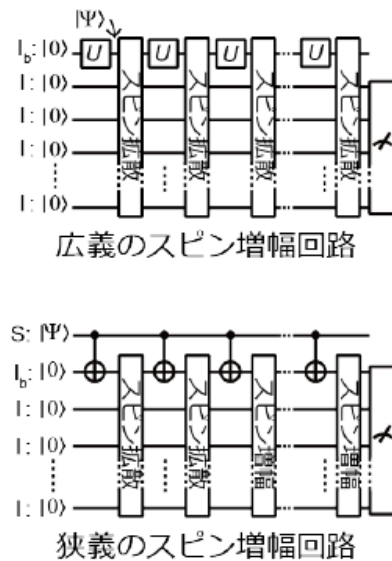


図 3-12 スピン増幅の量子回路

また、任意波形発生器を用いた Ku 帯パルス ESR 分光器を用いて、これまでパルス ESR 実験では用いるのが困難であったコンポジットパルスを実現し、電子スピンのほぼ初期化された 150mK 下で 99%という高い忠実度の 1 量子ビットゲートを実装した。さらに、1W 入力に対して 210MHz という非常に強いマイクロ波照射が可能な U 字型微小マイクロストリップライン共振器を開発した（図 3-13）。

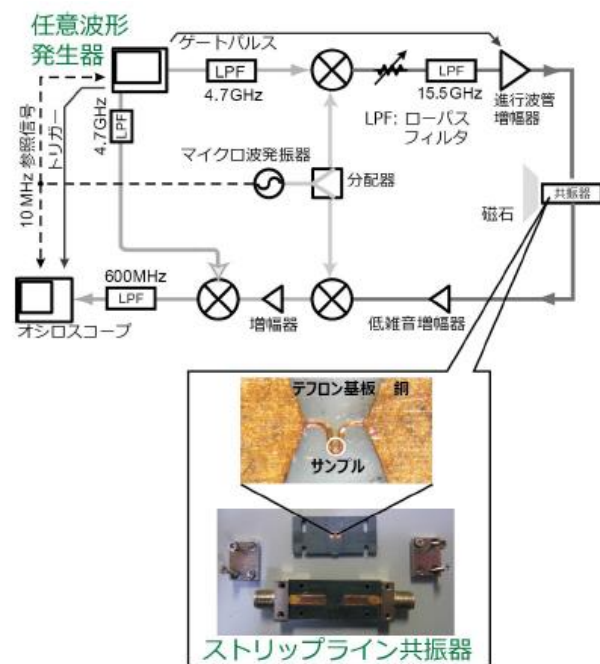


図 3-13 Ku 帯任意波形 ESR 分光計

②社会・経済への波及効果

光励起三重項電子スピンを用いた動的核偏極に適した位置選択的に重水素化した *p*-terphenyl を合成し、その分子に重水素化した pentacene をドープした試料では、スピン格子緩和が抑制され、室温での世界記録である 34% の核スピン偏極を得た。光励起電子スピンを用いた動的核偏極がガラス又は薄膜物質中でも可能であることを示し、NMR 分光へも応用への道を拓いた。

応用の観点では特許出願も行っており、FIRST「量子情報処理プロジェクト」スピン量子コンピュータの分子スピン超精密量子演算制御装置の開発において、2013 年に出願した「量子誤り訂正方法、量子誤り訂正装置、および、量子情報格納装置」の特許が登録されている。システムサイズに依存しない量子誤り訂正方法を提供するものである。出願人は大阪大学である。

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

- [1] Negoro M., Tateishi K., Kagawa A., Kitagawa M. Scalable spin amplification with a gain over a hundred (2011) Physical Review Letters, 107(5)
- [2] Tateishi K., Negoro M., Kagawa A., Kitagawa M. Dynamic nuclear polarization with photoexcited triplet electrons in a glassy matrix (2013) Angewandte Chemie - International Edition, 52(50), pp.13307-13310.
- [3] Tateishi K., Negoro M., Nishida S., Kagawa A., Morita Y., Kitagawa M. Room temperature hyperpolarization of nuclear spins in bulk (2014) Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 111(21), pp.7527-7530.

3.3.4 量子多体協力現象の解明と制御(宮下精二)

(1) 研究の狙いと研究期間中の達成状況

①研究の狙い

本研究領域における唯一の理論グループで、量子統計力学理論のエキスパートが量子情報処理という工学的応用分野の基礎を支える理論の構築に取り組んだ。

量子情報処理の基礎となる量子運動、そこでの散逸機構の理論的定式化や新しい方式の提案を行うため、量子状態の能動的な制御を目指し、特徴ある量子多体状態の性質の発見、解明、それらの外部パラメータに対する応答に関する理論的研究を進めた。

②期間中の研究成果

東京大学(宮下)グループは量子相互作用による動的現象の理論的研究(量子シミュレーションのテーマ開発、量子運動及び量子応答の基礎理論整理)を担当した。物質・材料研究機構(西野)グループは巨視的に広がった格子において量子的なユニットとして働く局面的な構造の探索を担当した。東京大学(藤堂)グループは量子現象に関する計算物理学的手法の開発を担当した。また、東京工業大学(西森)グループは量子アニーリングの理論的研究を担当した。期間中の主な成果は以下のとおりである。

多体量子現象の実現を目指す量子シミュレーションのテーマ開発に取り組み、その対象として、超固体現象、遍歴電子系での強磁性現象、ポテンシャルトラップによる量子粒子移送の問題などを提案した。また、そこで期待される特異な量子現象について研究を進めた。多様な量子現象が協力的に働いている光誘起現象の相転移の問題についても研究を進めた。量子運動における散逸効果も含めた応答現象の解析、量子非破壊現象の機構解明や量子観測による状態制御などについても研究を行った。

従来の量子コンピュータとは異なる量子情報処理として、量子アニーリングの方法を取り上げ、その理論的基礎付けや具体的な応用について研究を進め、量子アニーリングの基礎理論を構築した。量子アニーリングは、一種の最適化問題でトンネル効果を利用して状態探索を行い、次第に量子ゆらぎを小さくして最終的に目的とする最適解に到達することを目指す方法である。

また、外部からの入出力に関して、開放系の量子力学が示す非エルミートの振る舞いと量子応答の関係に着目し、相互作用のある量子ドット系の電流電圧特性を厳密に計算する方法論を開発した。まず、量子ドット系の量子散乱状態を厳密に構成した。それを基に、有限電位差が存在する状況での電流の統計力学的期待値を得た。ここで用いた方法論は、実験結果を再現する理論の構築に向けた成果である。

③研究成果に関連した主な成果論文リスト

- [1] Nishino M., Boukheddaden K., Konishi Y., Miyashita S. Simple two-dimensional model for the elastic origin of cooperativity among spin states of spin-crossover complexes (2007) Physical Review Letters, 98(24)

- [2] Miyashita S., Konishi Y., Nishino M., Tokoro H., Rikvold P.A. Realization of the mean-field universality class in spin-crossover materials (2008) Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics, 77(1)
- [3] Konishi Y., Tokoro H., Nishino M., Miyashita S. Monte Carlo simulation of pressure-induced phase transitions in spin-crossover materials (2008) Physical Review Letters, 100(6)

(2) 研究領域終了後の継続と発展状況

統計力学・物性基礎論を、特に相移転・協力現象、量子応答などについて理論的に研究を進めている。2011 年度～2013 年度の科研費基礎研究(C)「弾性的長距離相互作用がある系での新奇光誘起相転移ダイナミクス」において、スピנקロスオーバー系の弾性相互作用を、2013 年度～2015 年度の科研費基礎研究(C)「格子自由度による実効的長距離力による新奇秩序形態の研究」において、長距離力と短距離力の共存状態での相転移、秩序形態の研究を行っている。

量子アニーリングの理論的研究を実施した東京工業大学の西森秀稔は、2011 年度～2013 年度の科研費基礎研究(C)「スピングラスにおけるミクロカノニカル分布とカノニカル分布の等価性・非等価性」、2014 年度～2018 年度の科研費基礎研究(B)「量子アニーリングにおける非断熱効果と誤り訂正」の研究を行っている。

① 科学技術の進歩への貢献

光、磁場、温度、圧力等の外部刺激により誘起される双安定な状態間をスイッチする相転移現象は、スピנקロスオーバー系などで見られる。状態変化とともに格子歪が生じ、歪により生じる弾性相互作用が重要であるとされてきた。「弾性的長距離相互作用がある系での新奇光誘起相転移ダイナミクス」研究において、理論解析及びシミュレーションにより、格子歪により生じる弾性相互作用は実効的長距離性を持つため、核生成が「巨視的核生成機構」で起こり得ることを実証した^{[1],[3]}。

量子系では、強磁性体のモデルである長岡強磁性の機構に関して化学ポテンシャルの制御による転移機構を発見し、新しい分子磁性モデルを提案している。また、物質のエネルギー順位と共振器(cavity)の結合に関し、量子マスター方程式を用いて、多数のスピン(原子)を含む系が外部からの駆動の強さに対する応答を調べ、弱い外場での真空ラビ分離(強結合量子状態)から、強い外場での古典的なラビ振動状態への移行機構について明らかにした。図 3-14 に、共振器内の光子数の変動の様子を示す^{20,[2]}。

²⁰ 東京大学大学院 理学系研究科・理学部 物理学教室 2011 年度 年次研究報告書

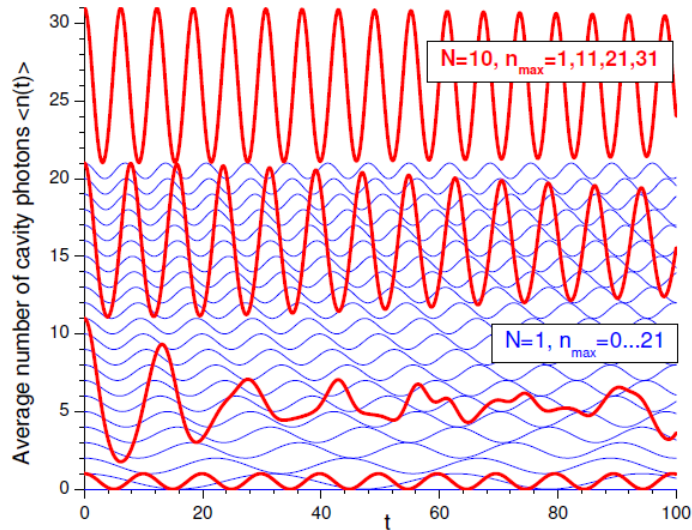


図 3-14 共振器内の光子数の変動の様子：
下から上へ、真空ラビ分離領域、以降領域、古典的なラビ振動領域

②社会・経済への波及効果

東京工業大学の西森が基礎理論を構築した量子アニーリングは、組合せ最適化を量子力学の原理を応用して解く汎用アルゴリズムである。カナダ D-Wave Systems) は、量子アニーリングの原理に従ってハードウェア的に動作する装置を開発し、「世界初の量子コンピュータ」として販売している²¹。

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

- [1] Slimani A., Boukheddaden K., Varret F., Oubouchou H., Nishino M., Miyashita S. Microscopic spin-distortion model for switchable molecular solids: Spatiotemporal study of the deformation field and local stress at the thermal spin transition (2013) Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics, 87(1)
- [2] Miyashita S., Shirai T., Mori T., De Raedt H., Bertaina S., Chiorescu I. Photon and spin dependence of the resonance line shape in the strong coupling regime (2012) Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics 45(12)
- [3] Nishino M., Miyashita S. Effect of the short-range interaction on critical phenomena in elastic interaction systems (2013) Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics, 88(1)
- [4] Shirai T., Mori T., Miyashita S. Condition for emergence of the Floquet-Gibbs state in periodically driven open systems (2015) Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 91(3)

²¹ 日経ビジネスオンライン 2015 年 9 月 17 日 「世界初「量子コンピュータ」生みの親、「訂正」に挑む」

第4章 科学技術イノベーションの創出に資する研究成果

4.1 超伝導量子ビットシステムの研究開発(蔡兆申)

4.1.1 研究の概要

(1) 研究テーマの状況(国内)

蔡兆申は、本研究領域の開始時の2003年には、量子ビットを二つ結合させ、巨視的系でのエンタングル状態²²の生成、初めての量子固体素子論理ゲートの実現²³を達成し、さらに2007年には量子プロトコルの実現²⁴などの成果を上げてきた。

さらに、2009年度から開始された、科学研究費新学術領域研究(研究領域提案型)「超伝導量子サイバネティクスの研究」及びFIRST「量子情報処理プロジェクト」等において本分野の研究を進展させ、1)異種量子がハイブリッドにコヒーレント結合した「混合量子系」に関して、超伝導人工原子量子光学では固体素子での共鳴蛍光などの成果を上げ、2)「超伝導量子ビット制御・観測・結合・雑音」分野では、量子状態の量子非破壊読み出しの達成、高精度な状態制御、新結合方式の創出などの成果を上げた。また、3)「新たな発見」として、微細な超伝導細線と超伝導ループを組み合わせた新しい構造の超伝導磁束量子ビットを作成し、コヒーレント量子位相スリップ(CQPS)効果により磁束が完全反磁性に反して量子的に超伝導材料をトンネルする現象を世界で初めて実験で証明する²⁵成果を上げた。研究拠点を理化学研究所に移した蔡兆申らの研究室は、超伝導量子系研究のパイオニア的存在である。

一方、米国カリフォルニア大学サンタバーバラ校のJohn Martinisのチームは、超伝導回路による量子ビットの集積化に関して、2014年に世界で最も進んだ成果を上げている²⁶。米国グーグルは、Martinisのチームと連携し、量子コンピュータのハードウェア独自開発を始めると発表している²⁷。製品化を視野にした開発的なフェーズに入ってきており、開発資金的にも大きな投資が必要となってきた。近年、海外企業の積極的な取組姿勢が注目される。

(2) 海外での共同研究の状況

蔡兆申と同じ日本電気(NEC)基礎研究所の出身で、現在ランカスター大学のYuri Pashkin、同じくロンドン大学のOleg Astafievらと研究者レベルの共同研究を現在も続けており、多くの共

²² Pashkin Yu. A., Yamamoto T., Astafiev O., Nakamura Y., Averin D. V., Tsai J. S. Quantum oscillations in two coupled charge qubits (2003) Nature, 421 (6925), pp.823-826

²³ Yamamoto T., Pashkin Yu. A., Astafiev O., Nakamura Y., Tsai J. S. Demonstration of conditional gate operation using superconducting charge qubits (2003) Nature, 425 (6961), pp.941-944

²⁴ Niskanen A. O., Harrabi K., Yoshihara F., Nakamura Y., Lloyd S., Tsai J. S. Quantum coherent tunable coupling of superconducting qubits (2007) Science, 316 (5825), pp.723-726.

²⁵ Astafiev O. V., Ioffe L. B., Kafanov S., Pashkin Y. A., Arutyunov K. Y., Shahar D., Cohen O., Tsai J. S. Coherent quantum phase slip (2012) Nature, 484(7394), pp.355-358

²⁶ John M. Martinis et. al. Superconducting quantum circuits at the surface code threshold for fault tolerance. Nature 508, 500-503 (2014)

²⁷ 日経コンピュータ ニュース 2014年9月3日 「米グーグル、量子コンピュータの独自開発に乗り出す」

著論文を出している。また、フィンランドのアールト大学(旧ヘルシンキ工科大学)超伝導量子グループ、米国マサチューセッツ工科大学リンカーン研究所と共同研究を行っている。

4.1.2 研究成果の波及と展望

(1) 科学技術への波及と展望

蔡兆申は、2009 年度からスタートした科学研究費新学術領域研究(研究領域提案型)「量子サイバネティクス」において、領域代表として研究を統括し、さらに「超伝導量子サイバネティクスの研究」研究代表として、次のような多くの研究成果を上げた。

超伝導量子ビットを人工原子として用いた量子光学の研究を飛躍的に進展させた。超伝導コヒーレントデバイスは人工原子であり、自然原子に比べて設計性、集積性、光との強い結合などの多くの利点を持っており、超伝導人工原子(量子ビット)と光子を強く結合させた系で、従来の自然原子を使った量子光学の重要な効果を再現した。人工原子として一つの磁束量子ビットを使い、これを一次元伝送線の中に配置した実験では、共鳴蛍光と呼ばれる量子光学の基本原則を観測し、共鳴条件で入射電磁波がほぼ完全に反射されることを観測した。強い入射光の非弾性散乱領域では Mollow トリプレットが明確に観測された²⁸。同様な開放量子系で、単原子量子増幅器を実現した^[1]。

また、長年探求されてきた「量子位相すべり(CQPS: Coherent Quantum Phase Slip)」効果を、分光法により量子コヒーレントの存在を示すことにより初めて実現した²⁹。CQPS 効果を明確に観測するために、酸化インジウム(InO_x)薄膜を用いて幅 40nm の細線を含んだ、 $4 \times 8 \mu\text{m}$ の大きさの超伝導ループを電子リソグラフィで作成した。外部から非常に小さな磁場を変化させながら印加し、接続したマイクロ波共振器から、GHz レベルのマイクロ波を照射してエネルギー分光測定を実施することで、エネルギーバンドに約 5GHz のギャップが存在することを確認し、磁束が量子的にトンネルしていることを証明した(図 4-1)³⁰。これは超伝導細線を磁束がトンネルする現象で、ジョセフソン効果に対して量子力学的共役な関係にある効果で、超伝導状態の基本的な輸送現象である。トンネル効果のトンネル確立の指数関数的な細線幅依存性も検証し、このデバイス(図 4-2)でラビ振動や直流電気特性も観測している^[2]。

²⁸ Astafiev O., Zagoskin A.M., Abdumalikov Jr. A.A., Pashkin Yu.A., Yamamoto T., Inomata K., Nakamura Y., Tsai J.S. Resonance fluorescence of a single artificial atom (2010) Science, 327(5967), pp.840-843

²⁹ Astafiev O.V., Ioffe L.B., Kafanov S., Pashkin Y.A., Arutyunov K.Y., Shahar D., Cohen O., Tsai J.S. Coherent quantum phase slip (2012) Nature, 484(7394), pp.355-358

³⁰ 理化学研究所、日本電気リリース 2012 年 4 月 19 日「磁束が超伝導の細線を量子的にトンネルする現象を確認」

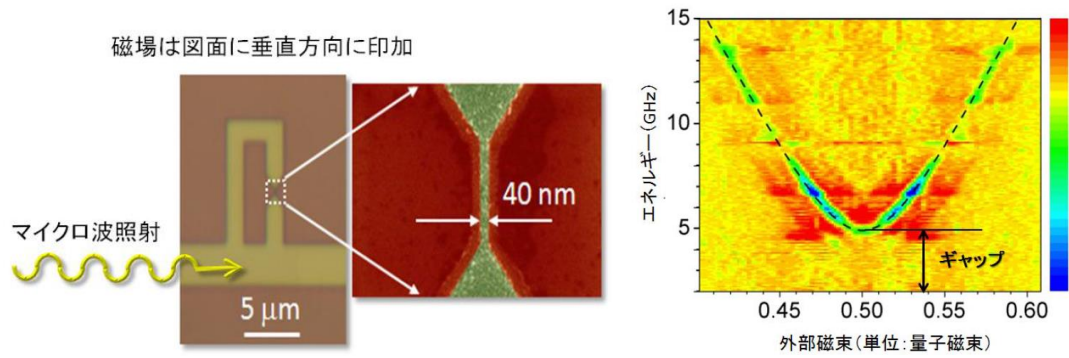


図 4-1 超伝導細線を含んだ超伝導ループ(左)、分光測定法で計測したエネルギーバンド図(右)

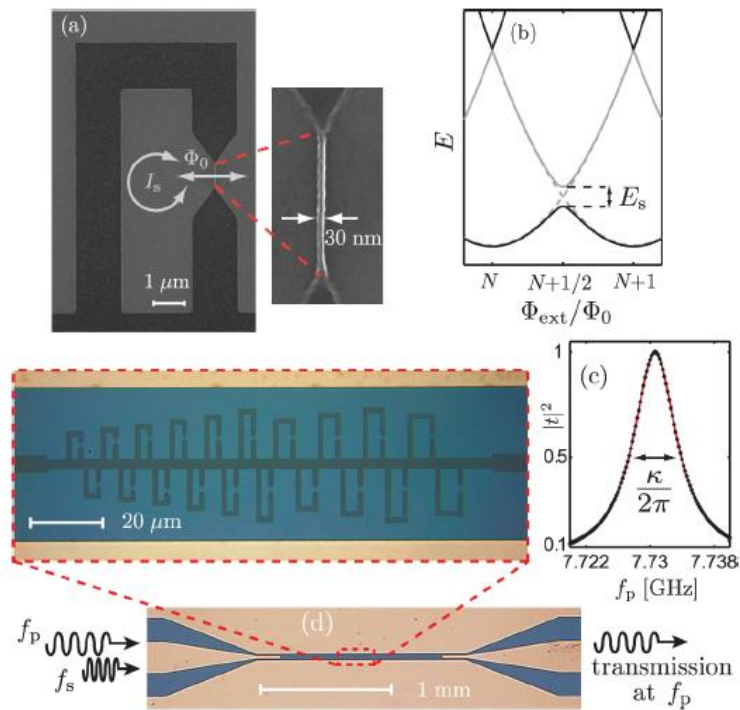


図 4-2 N_bN による位相滑り磁束量子ビットデバイス

量子状態をいかに正確に観測できるかは重要な問題である。超伝導量子ビットを高速かつ非破壊で読み出す方法として、共振器を用いた分散読み出しが広く用いられている。量子ビットと分散的に結合した共振器の共振周波数が、量子ビットの状態に依存することを利用するものである。分散読み出しにおいては、量子ビットへの読み出し反作用を抑えるため、単一光子レベルの微弱な信号を、量子ビットの緩和時間($\sim 1\mu\text{s}$)より十分高速に読み出すことが要求される。このような背景から、低雑音な磁束駆動型ジョセフソンパラメトリックアンプ(JPA)を研究開発した。JPAは、バンド中心周波数が外部磁化によって調節可能であり、ポンプの周波数がシグナル周波数の2倍で、両者の分離が容易というメリットがある。開発したJPAにより、分散読み出し法の変調信号を増幅し、単事象かつ量子非破壊観測を達成した。また、連続した観測下で量子ビットの量子状態の変化(量子ジャンプ)を観測した^[4]。

新たな試みとして、磁束量子ビットと共振器をキャパシタンスで結合させる回路を開発し(図4-3)、従来のインダクタンス結合回路に比べて大幅な周波数変調を達成した^[5]。

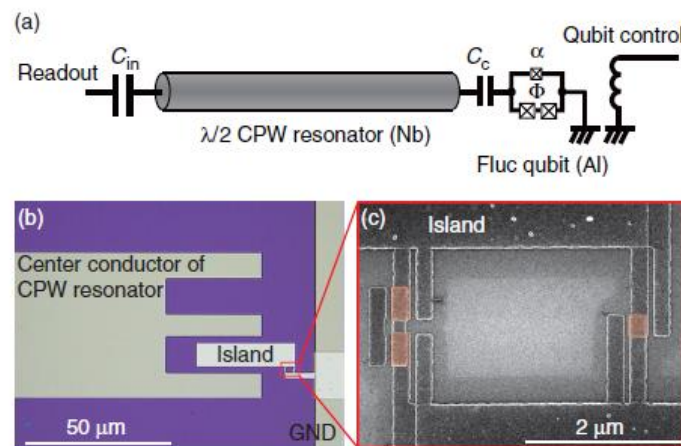


図 4-3 CPW(coplanar waveguide)共振器と磁束量子ビットのキャパシタンス結合
(a)デバイス回路図、(b)デバイスのイメージ図、(c)磁束量子ビットのSEM

内閣府(CAO)革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)「量子人工頭脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」(2014年度～2018年度)においては、アナログ量子シミュレータの研究を進める計画である。

(2) 社会・経済への波及と展望

量子計算・量子情報処理の観点から、量子力学のコヒーレントな状態が巨視的な物理系で発現することは、長年追究されてきた興味深い現象である。その中でも、1999年に当時NECの研究所に所属していた蔡兆申と中村泰信が世界で初めて実現した超伝導量子ビット³¹は、超伝導回路の設計自由度の高さから、世界中で精力的に研究が進められてきた。現在、北米の企業(米国インテル、IBM、グーグル、カナダD-Wave Systems)等を中心に進められている量子コンピュータの研究・製品開発も、超伝導量子系がほとんどである³²。

CQPS効果は、ジョセフソン効果と量子力学的に完全に双対であることから、ジョセフソン効果と双対のデバイスの実現が可能になると考えられている。最も期待される応用は、既存のジョセフソン効果がもたらした量子電圧標準と双対関係にあるCQPS効果による量子電流標準の実現である。既に量子電圧標準と量子抵抗標準は現存しているため、量子電流標準の実現が達成できれば、自己完結した量子電気標準が実現することになる。また、現在の基礎物理常数は、主に真空中で孤立した量子(原子や電子など)を使った実験で導き出しているが、固体素子系では、その基礎物理常数の値が異なる可能性が指摘されている。このような問題に対しても解決の糸口の発見が期待される³⁰。

³¹ Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin & J. S. Tsai, Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box, (1999) Nature, 398, 786

³² 日経コンピュータ 2014年4月17日号、pp38-39「基礎技術は日本で生まれた」

(3) その他特筆すべき事項

蔡兆申は、本研究領域の研究代表者としてメンバーの中村泰信らとともに、日本電気基礎研究所及び理化学研究所を拠点として、超伝導、量子ビット、量子シミュレーション、量子情報処理の研究をリードしてきた。現在、蔡兆申は理化学研究所・超伝導量子シミュレーション研究チームに研究拠点を集約し、2015 年からは東京理科大学で超伝導系の人材教育も開始している。長年にわたり共同研究を進めてきた中村泰信も、2012 年東京大学で研究及び人材教育を開始するとともに、2014 年からは理化学研究所・超伝導量子エレクトロニクス研究チームリーダーとして引き続き連携して研究を進めている。蔡兆申がリードしてきた研究は、海外の共同研究者も含めこれら広範囲な研究者のネットワーク構築に貢献してきたといえる。

引用文献

- [1] Astafiev O.V., Abdumalikov A.A., Zagoskin A.M., Pashkin Y.A., Nakamura Y., Tsai J.S., Ultimate on-chip quantum amplifier, *Physical Review Letters*, 104(18), (2010)
- [2] Peltonen J.T., Astafiev O.V., Korneeva Yu.P., Voronov B.M., Korneev A.A., Charaev I.M., Semenov A.V., Golt'sman G.N., Ioffe L.B., Klapwijk T.M., Tsai J.S., Coherent flux tunneling through NbN nanowires, *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 88 (2013)
- [3] Inomata K., Yamamoto T., Billangeon P.-M., Nakamura Y., Tsai J.S., Large dispersive shift of cavity resonance induced by a superconducting flux qubit in the straddling regime, *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 86 (2012)
- [4] Lin Z.R., Inomata K., Oliver W.D., Koshino K., Nakamura Y., Tsai J.S., Yamamoto T., Single-shot readout of a superconducting flux qubit with a flux-driven Josephson parametric amplifier, *Applied Physics Letters*, 103 (2013)
- [5] Yamamoto T., Inomata K., Koshino K., Billangeon P.-M., Nakamura Y., Tsai J.S., Superconducting flux qubit capacitively coupled to an LC resonator, *New Journal of Physics*, 16 (2014)

4.2 原子アンサンブルを用いた量子情報処理の基盤技術開発(高橋義朗)

4.2.1 研究の概要

(1) 研究テーマの状況(国内)

1995 年にアルカリ金属原子のボース・アインシュタイン凝縮(BEC)が実現されて以来、希薄原子気体の量子縮退の研究が大きく進展した。高橋義朗は、アルカリ金属原子にはないユニークな特徴を持つ原子系が重要な研究対象になるとの認識の下、2 電子系希土類金属のイッテルビウム原子(Yb)を用いた量子縮退の研究を着想した。Yb には、豊富な同位体があり、軌道角運動量を持った準安定状態が存在することがその背景であった。

本研究領域の開始時の 2003 年には、高橋義朗の研究グループは Yb の七つの同位体を用いた光格子トラップの基礎実験で世界をリードする立場にあった。本研究領域では、研究課題「原子ア

ンサンプルを用いた量子情報処理の基盤技術開発」の研究代表者として、本人が属する京都大学グループに加え、同じく京都大学の北野正雄のグループと東京工業大学の上妻幹旺のグループとも連携した体制で研究を進めた。その中で高橋義朗のグループは、Yb を用いた光格子技術を発展させることにより、強相関物質の機構を解明する量子シミュレータの開発を目指した。その結果、Yb を用いたハバードモデルの量子シミュレーションのための基盤技術の開発に成功した。開発した基盤技術の代表的なものは、多様な Yb 原子(ボース同位体及びフェルミ同位体)の量子縮退領域までの冷却、スピン禁制遷移を用いて光により散乱長を変化させる光フェッシュバハ法の開発、3 次元光格子中での超流動・モット絶縁体転位の観測などである。

本研究領域期間中に開発された基盤技術により、その後、Yb 系の原子を用いた量子シミュレーションの研究は大きく進展した。多成分混合多様量子縮退系の実現に関しては、本研究領域中にも ^{176}Yb BEC と ^{174}Yb BEC の混合系の生成に成功していたが、その後、斥力相互作用する ^{173}Yb 原子のフェルミ縮退と ^{174}Yb 原子のボース・アインシュタイン凝縮の混合や、スピン自由度を持った ^{173}Yb 原子と ^{171}Yb 原子のフェルミ縮退混合を実現し、さらに ^{173}Yb による SU(6)系モット絶縁体、ボース・フェルミ混合体における混合モット絶縁体など、様々な量子凝縮体の生成に成功した。それらの実験に不可欠な、光格子の実験系や、Yb 原子励起用の超狭線幅の安定光源の開発に関する研究についても、情報通信研究機構(NICT)、日本航空電子工業株式会社、NTT 物性科学基礎研究所とともに進め、光格子点の個別量子操作・検出のための基盤技術を整備した。

現在も、科学研究費基盤研究(S)「光格子中イッテルビウム量子気体の究極的操作・観測が拓く新奇量子凝縮相研究の新展開」(2013 年度～2017 年度)の研究代表者として、また、内閣府(CAO)革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)「量子人工頭脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」(2014 年度～2018 年度)に参画し、研究を継続している。

(2) 海外での共同研究の状況

チューリッヒ工科大学の Lei Wang、Matthias Troyer と研究者レベルで、Yb の量子縮退系を用いた基礎科学の共同研究を行っている。

4.2.2 研究成果の波及と展望

(1) 科学技術への波及と展望

高橋義朗は、世界に先駆けてイッテルビウム(Yb)原子に着目して、強相関の量子多体系の研究を開始した。それまで研究されていたアルカリ金属原子とは異なり、2 電子原子の Yb は通常の磁気トラップを使うことはできないが、全光学的に冷却・閉じ込めを実現する技術を開発し、2003 年に Yb 原子では初めてボース・アインシュタイン凝縮を実現した(図 4-4)³³。

³³ Phys. Rev. Lett. 91, 040404

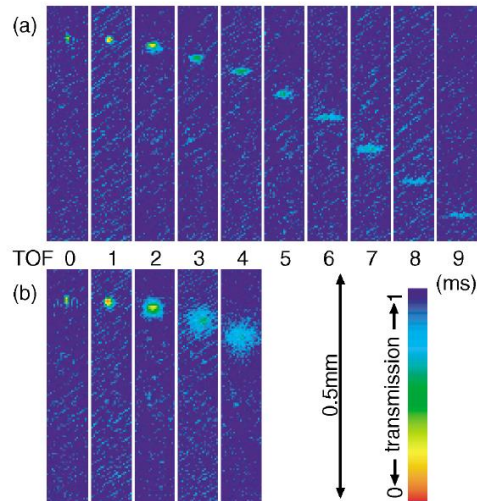


図 4-4 ボース・アインシュタイン凝縮に閉じ込められた ^{174}Yb 原子が開放されたときの広がり時間変化 ((a) $2.2\ \mu\text{K}$ (b) $6.7\ \mu\text{K}$)

超低温の中性原子間の相互作用は、散乱長という量で記述されるが、Yb 原子に対しては理論的にも実験的にもその情報がなく、本研究領域期間中に、Yb 原子の全ての同位体及び異種同位体間の散乱長を高精度に決定した。その後、様々なボース・フェルミ混合量子気体を光格子に導入して、その強相関係のユニークな性質を次々に明らかにした。このような研究成果は、世界中の実験・理論研究者の注目を集め、Yb 原子や他の 2 電子原子を用いたボース・アインシュタイン凝縮やフェルミ縮退の研究が世界中で行われるようになった。このように、高橋義朗は、「2 電子原子を用いた量子系の研究」という新しい研究分野を切り開いた。

また、高橋義朗は、測定が測定の対象を変化させてしまうという、量子測定の根本的な障害を克服する研究にも取り組んだ。測定される量の共役量にその測定の影響を集約する量子非破壊測定の結果を利用して系の状態を操作し、量子揺らぎを小さくするという着想を、ファラデー回転でスピンの量子揺らぎを観測・制御するという形で具体化し、世界で初めてそれを実証した^[1] (図 4-5)。従来の枠組みを超える新規な量子制御法の開拓につながる成果と期待されている。

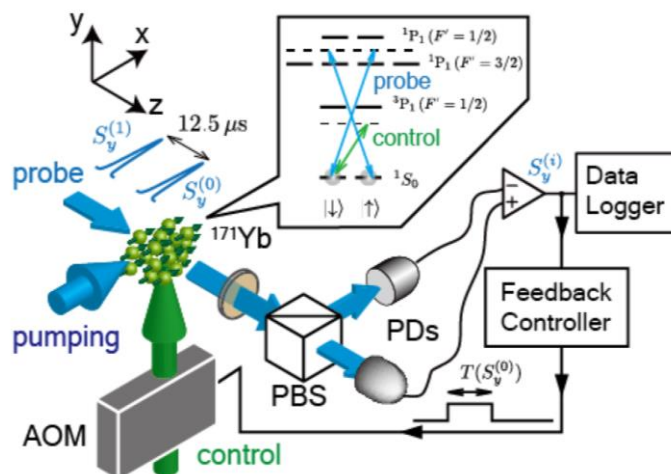


図 4-5 量子フィードバック制御の実験系と ^{171}Yb のエネルギー準位構造

さらに、光格子中の Yb 原子の量子気体を単一格子点の分解能で観測するという、いわゆる量子気体顕微鏡の開発を行った。これは、凝縮系における走査型プローブ顕微鏡に対応しているともいえる手法であり、例えばボース・アインシュタイン凝縮(BEC)のような超流動状態から、モット絶縁体(MI)相への転移に関して、これまで間接的に推測されていたことを目に見えるように確認することができる新しいタイプの研究を可能とする成果である。図 4-6 に量子気体顕微鏡の実験系と得られた原子分布像を示す^[2]。

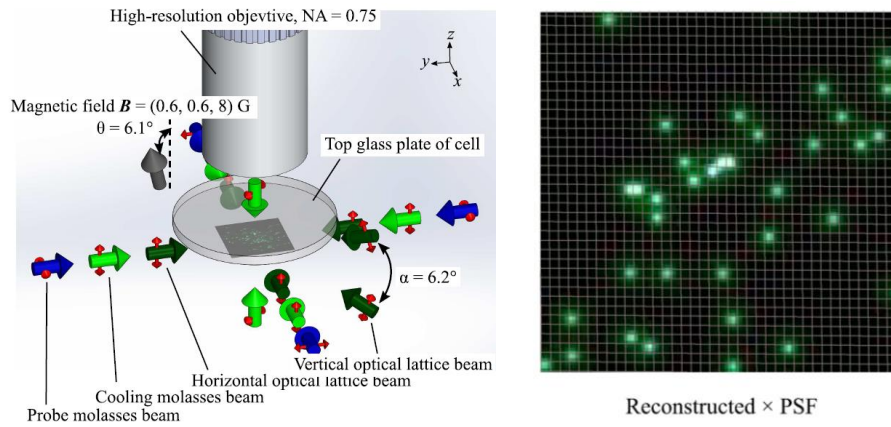


図 4-6 イッテルビウム量子気体顕微鏡の実験系と得られた原子分布像

量子力学の基礎的な領域においても、Yb 原子のフェルミ縮退系を用いた実験で、新たな現象を見いだした。1次元周期ポテンシャル中の電子ガスを、バイアス電圧を印加することなく、ポテンシャルを時間に対して周期的にゆっくり変化させることで、移動させることができることを実験で示し、30年前に提唱された Thouless Pumping を初めて実証した(図 4-7)^[3]。

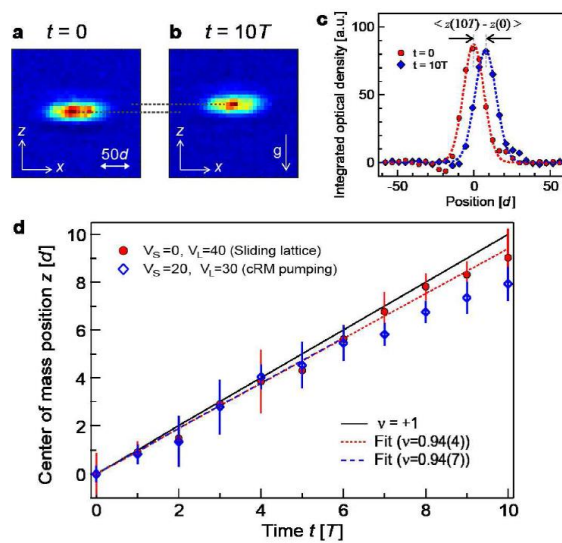


図 4-7 Continuous Rice-Mele pumping の観察

(2) 社会・経済への波及と展望

多数の粒子の量子力学的振る舞いを理解するのは「量子多体問題」といわれる非常に難しい問題である。現実の物質の特徴を量子多体問題として抽出したモデルを、実験的にパラメータの制御が可能な別の系にマッピングして、実験的に問題を解明することを量子シミュレーションという。本研究領域において基盤技術が確立され、その後も研究が進展を続ける、光格子にトラップされたイッテルビウム(Yb)原子の縮退系は、量子シミュレーションの実現に向けて大きな可能性を持つと期待されている。例えば、高温超電導の発現機構が、その発見(1986年)からおおよそ30年を経た今日においても解明されず、また、超伝導の転移温度がこの10年間全く改善されていない原因の一つに、このような複雑な量子多体系の問題を現在のデジタル計算機では十分効率良くシミュレーションすることができないという問題が考えられる。高橋義朗は、高温超電導の発現機構を解明するために銅酸化物の超伝導物質のモデルを、光格子を用いたYbの縮退系に実装する研究に取り組んでいる。図4-8にそのモデルを示す³⁴。

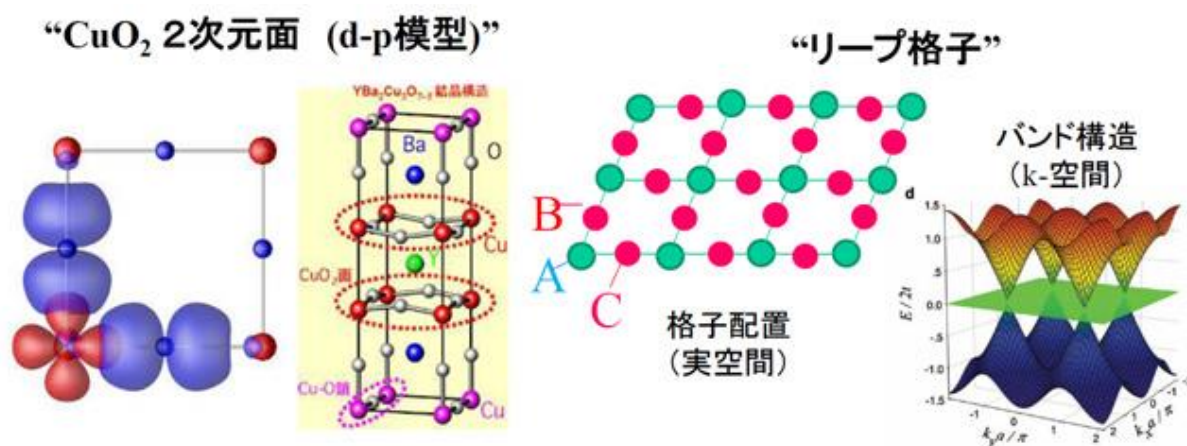


図 4-8 銅酸化物の高温超電導物質を再現した d-p 模型 (=Lieb 格子)

量子シミュレーションにより、高温超伝導の発現機構が解明され、転移温度が改善されれば、直流超伝導送電や、リニアモーターカーの経済性が改善されることにつながり、社会基盤に大きな影響を与えようと考えられる。

また、光格子中の Yb などの原子気体は、光格子のレーザー光の強度を変化させることで、モット絶縁体と呼ばれる状態を生成することができ、原子 1 個を量子ビットとするスケーラビリティに優れた量子コンピュータを構成することができると考えられる。量子コンピュータは、古典的デジタルコンピュータでは解けない、様々な問題への応用が想定されるとともに、超低消費電力で稼働させることができると期待され、その実現は科学技術の領域のみならず、社会全体に大きな変革をもたらすと予想される。

³⁴ 現代物理学講義 「レーザー冷却原子実験の最前線」 高橋義朗 2014

引用文献

- [1] Inoue, R., Tanaka, S.-I.-R., Namiki, R., Sagawa, T., Takahashi, Y. Unconditional quantum-noise suppression via measurement-based quantum feedback (2013) *Physical Review Letters*, 110 (16), art. no. 163602
- [2] Ryuta Yamamoto, Jun Kobayashi, Takuma Kuno, Kohei Kato, Yoshiro Takahashi An ytterbium quantum gas microscope with narrow-line laser cooling, arXiv:1509.03233
- [3] S. Nakajima, T. Tomita, S. Taie, T. Ichinose, H Ozawa, L Wang, M Troyer, Y Takahashi Topological Thouless Pumping of Ultracold Fermions arXiv:1507.02223

4.3 量子ネットワークへ向けた量子エンタングルメント制御(古澤明)

4.3.1 研究の概要

(1) 研究テーマの状況(国内)

古澤明は、カリフォルニア工科大学に滞在中、スクイーズド状態を用いた連続量のエンタングルメントの発生とそのテレポーテーションへの応用に着目し、1998年に世界で初めてその実証実験に成功した³⁵、そのテーマを日本に持ち帰り、2000年より東京大学で研究を継続している。

本研究領域では、研究課題「量子ネットワークへ向けた量子エンタングルメント制御」の研究代表者として、本人が属する東京大学に加え、情報通信研究機構(NICT)の佐々木雅英、お茶の水女子大学の番雅司とも連携した体制で研究を進めた。その結果、量子テレポーテーションにおける目標フィデリティ 0.67 を上回るフィデリティ 0.83 の達成、マルチパーティットエンタングルメントにおける9者間の量子エンタングルメント生成、量子テレポーテーションネットワークと量子テレクロニングの実験成功、連続量による量子エンタングルメント伝送、Shorの9ビットエラー訂正コードの連続量版の実験成功、光子検出による非ガウス型量子状態の生成などの成果を上げた。古澤明はこれらの成果を踏まえ、光子ビットのテレポーテーションを連続量の手法を用いた方法で行うことにより、万能型量子情報処理を目指すという構想を得た。

連続量テレポーテーションは光波の振幅や位相の情報をテレポートするために用いられたが、当初光量子ビットへの適用は困難であった。パルス波ベースで生成される一般的な光量子ビットは広い周波数帯域を持っており、連続量テレポーテーションに用いられていた帯域の狭い連続波用の装置では、うまく転送できないためである。古澤明の研究グループは、広帯域の連続量量子テレポーテーション装置³⁶と、そのテレポーテーション装置に最適な狭帯域の量子ビット³⁷を開発し、光子ビットのテレポーテーションを連続量の手法を用いた方法で行う手法を確立した。この手法により、世界で初めて光量子ビットの決定論的な量子テレポーテーションを実証することに成功した^[1]。図4-9にその実験系を示す。この成果は、ハイブリッド量子テレポーテーションと呼ばれ、その後も研究が進められている。

³⁵ A. Furusawa *et al.*, *Science* 282, 706 (1998)

³⁶ N. Lee *et al.*, *Science* 332, 330 (2011).

³⁷ S. Takeda *et al.*, *Physical Review A* 87, 043803 (2013).

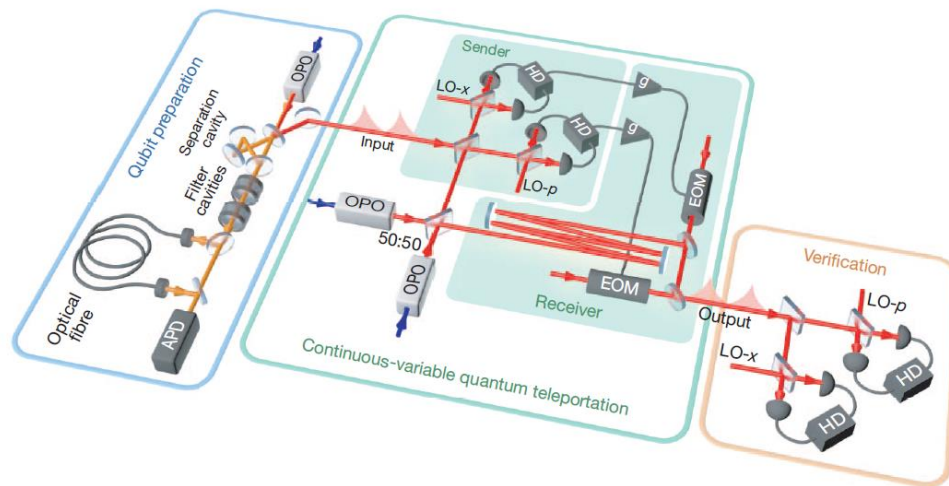


図 4-9 ハイブリッド量子テレポーテーションの実験系

量子コンピュータの実現には、情報処理の高フィデリティ化と高速性が不可欠であり、ハイブリッド量子テレポーテーションの手法はこの点に関するブレークスルーと考えられる。光を用いた量子コンピュータでは、基本素子の微細化は波長程度が限界という問題があるが、時間領域多重の手法によってそれが解決できることを既に明らかにしている。量子コンピュータの実現には、さらに量子エラー訂正の技術の進展が不可欠であり、古澤明の研究グループは、量子エラー訂正の研究にも本研究領域以前から取り組んでいる。現在も、量子コンピュータの実現に向けて、量子エラー訂正技術を始め、ユニバーサルな量子演算に向けた量子ゲート構築³⁸などの研究を進めている。

(2) 海外での共同研究の状況

連続量における量子エラー訂正などのテーマにおいて、ヨーク大学、マックスプランク研究所などと、共同研究を行った。また、広帯域量子テレポーテーションの開発において、ニューサウスウェールズ大学と、ハイブリッドテレポーテーションに関してグーテンベルグ大学と、量子光学・量子情報科学の分野でパラッキー大学(Palacký University)と共同研究を行った。さらに、量子テレポーテーション心臓部のチップ化に関して、ブリストル大学及びサウサンプトン大学と、量子の非局所性検証に関してワルシャワ大学及びグリフィス大学と共同研究を行った。

4.3.2 研究成果の波及と展望

(1) 科学技術への波及と展望

古澤明が構想した万能型量子情報処理は、ハイブリッド量子テレポーテーションとしてその基礎が確立され、量子力学の黎明期に思考実験として提案されたシュレディンガーの猫というパラドックスを、現実の実験系で実証するという基礎科学の進展に結び付いた。シュレディンガーの

³⁸ M. Yukawa et al., Opt. Express 21, 5529 (2013)

猫とは、生きた猫と死んだ猫の重ね合わせの状態であり、観測すると生きた猫か死んだ猫のどちらかになる。実験では、量子もつれ状態にある二つの光ビームを生成し、重ね合わせ状態を保ったまま転送することに成功した(2011年)。量子テレポーテーションでは、送信者側の測定が間接測定になるため、重ね合わせ状態を失わずに転送できる。量子テレポーテーションは、測定により壊れてしまう重ね合わせ状態を転送できる方法であることが、実験的に確かめられた³⁹。

また、2015年に古澤明の研究グループは、約100年前にアインシュタインが提唱した「量子(光子)の非局所性」を初めて厳密に検証した(図4-10)^[2]。量子(光子)の非局所性とは、「ピンホールで回折した光子一つは空間的に広がるが、異なる2点で同時に観測されない」という現象である。アインシュタインは、このようなことが起こるためには、ある場所で観測された影響が他の離れた場所に及ぶ遠隔相互作用が存在しなければならないが、そんなものは存在しないと考えた。過去に試みられた検証では、光子の有無しか観測できず、観測された影響が、他の離れた場所に及ぶ作用の有無を厳密に検証することはできなかった。今回は、ハワード・ワイズマンらが提唱した、観測位相を変えながら振幅を得るホモダイン測定による手法を用いて、検証を行った。古澤明の研究グループは、ピンホールで回折させる代わりに、部分反射ミラーで二つの光路に分けることで経路を無限から二つへと減らす手法を採用した。その結果、片方の光路での観測が他の光路での観測に影響することを確認した(ある意味、アインシュタインの考えが間違っていたことが検証された)。光の粒子的側面と、波動的側面の両方に着目したハイブリッドの構想がいかされた成果である。

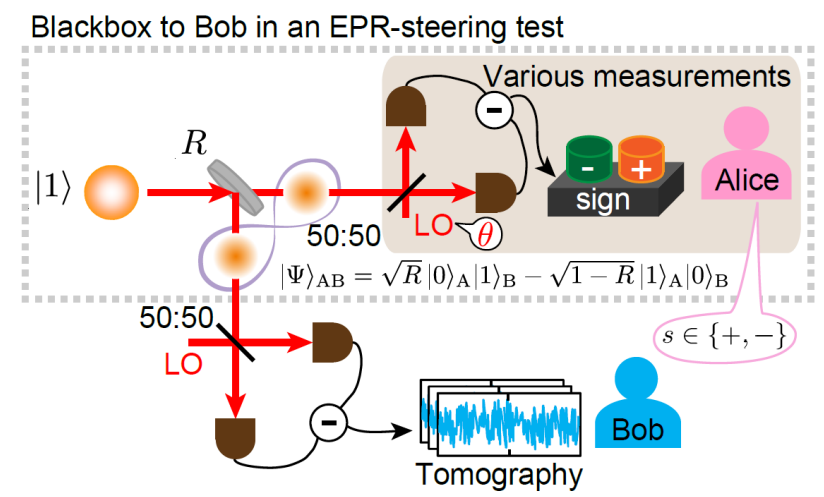


図 4-10 量子(光子)の非局所性の検証方法

以上のような、シュレディンガーの猫状態の量子テレポーテーションや、量子(光子)の非局所性の検証に用いた手法は、基礎科学の進展に寄与するだけでなく、量子コンピュータ実現に道を拓くものと期待される。

³⁹ N. Lee et al., Science 332(6027), 330-333(2011)

(2) 社会・経済への波及と展望

古澤明の研究グループと、ブリストル大学、サウサンプトン大学、NTT 先端集積デバイス研究所は、量子テレポーテーション装置の心臓部である量子エンタングルメント生成・検出部分の光チップ化に成功した^{[3], 40}。従来、約 1 m²の光学定盤上に非常に多くの光学素子を配置して構成していた量子エンタングルメント生成・検出部分を、26mm×4mm のシリコン基板上に形成した微細な光回路により実現したものである。量子コンピュータの実用化に向けて、拡張性の問題を解決する糸口となる成果と考えられる。図 4-11 の左下に開発したチップの写真を示す。チップには図 4-11 の上に示す光回路が集積されている。従来この回路は図 4-11 の右下の写真のように、数百個の光学素子を並べて作られていた。

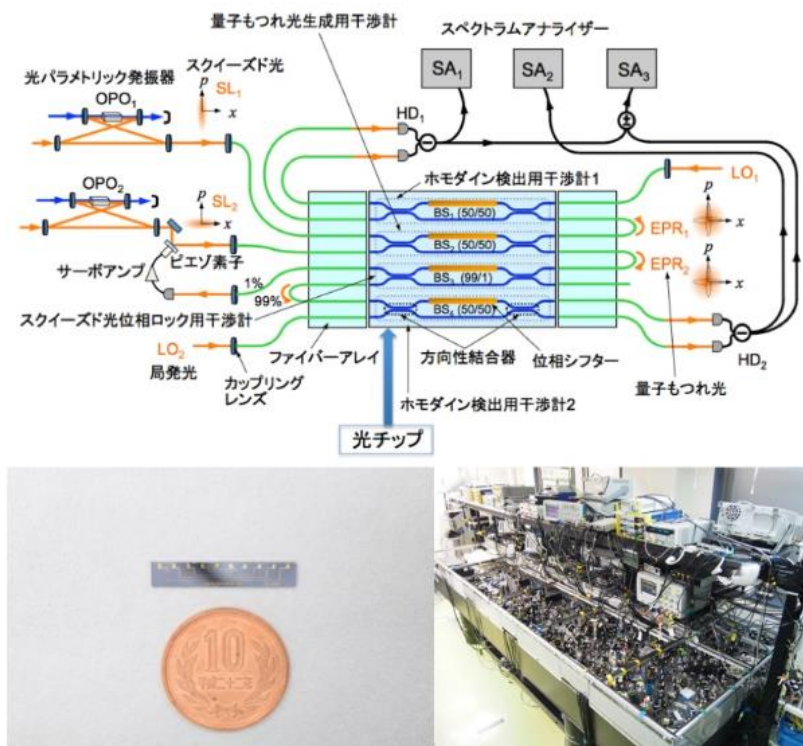


図 4-11 量子テレポーテーション心臓部の光回路、チップ、従来の実験系

古典的なコンピュータは、半導体素子の微細加工の面でも、消費電力の面でもこれまでのような急速な発展は期待できない状況となっている。現在研究開発されている量子コンピュータは原理的に、規模が拡大しても消費電力の点で破綻しない構成とすることが可能と考えられ、社会から実用化が期待されている。

本項及び 4. 3. 1 項で述べた研究成果は、量子コンピュータの実現という側面から次のように整理・要約することができる。

古澤明の研究グループは、光の粒子性と波動像を統合した実験手法を着想し、ハイブリッド量子テレポーテーションを実現した。量子コンピュータには、高フィデリティと高速性が求められ

⁴⁰ 東京大学工学部ホームページ <https://www.t.u-tokyo.ac.jp/epage/release/2015/20150331006.html>

るが、ハイブリッド量子テレポーテーションによって、効率とフィデリティについてはめどが立った。光を用いる場合、基本素子は波長程度より小さくできないという問題があるが、時間領域多重の手法によってそれが解決できることを明らかにした。時間領域多重とは、出力を元に戻すことで、同じ素子を何度も使うことであり、10 万回使えば10 万分の一に素子を縮小したことと同等である。実際、10,000 ビットの規模が達成でき、規模の問題についてもめどが立ったといえる。

残る課題は、誤り訂正である。フリースペースに構成した誤り訂正システムは、非常に多数の要素から成る複雑な光学系で構成され、量子コンピュータの実用化に対して大きな課題となるが、量子テレポーテーション装置の心臓部のチップ化と同等の手法で、対応することが可能と予想される。

以上のように、古澤明の本研究領域の成果はその後の研究に引き継がれ、その研究は社会に求められている量子コンピュータの実現に向けて着実に進展を続けている。

引用文献

- [1] Takeda, S., Mizuta, T., Fuwa, M., Van Loock, P., Furusawa, A. Deterministic quantum teleportation of photonic quantum bits by a hybrid technique (2013) Nature, 500 (7462), pp. 315-318.
- [2] Fuwa, M., Takeda, S., Zwiernik, M., Wiseman, H.M., Furusawa, A. Experimental proof of nonlocal wavefunction collapse for a single particle using homodyne measurements (2015) Nature Communications, 6, art. no. 6665
- [3] Masada, G., Miyata, K., Politi, A., Hashimoto, T., O'Brien, J.L., Furusawa, A. Continuous-variable entanglement on a chip (2015) Nature Photonics, 9 (5), pp. 316-319.

4.4 極低温原子を用いる量子計測法の開拓(香取秀俊)

4.4.1 研究の概要

(1) 研究テーマの状況(国内)

現在の国際単位系(SI)の「秒」は、1967年にセシウム(Ce)原子固有のマイクロ波遷移周波数(およそ 9.2GHz)を基に定義され、セシウム原子時計を用いた国際原子時はおよそ 1×10^{-15} の精度である。しかし、量子力学や素粒子論などミクロの世界を表現する物理学では、更に高精度の原子時計が望まれ、光の周波数を用いる「光時計」の研究が近年盛んに行われている。

香取秀俊は、2001年に「光格子時計」を提案し、到達目標として 1×10^{-18} (宇宙年齢 138 億年で 0.4 秒しか狂わない)精度の実現を掲げていた^[1]。本研究領域期間中には、ストロンチウム(Sr)原子を用いた光格子時計の研究開発を行い、2003年にSr原子を用いた基礎実験に世界で初めて成功した^[2]。さらに、2006年には国際度量衡委員会において「秒の二次表現」、新しい秒の定義の候補の一つに採択された。その後、世界各国で光格子時計の開発が始まり、競争が激化している。

中性原子を光の定在波(光格子)でトラップすると、一般的には光の電場によって原子の電子状態のエネルギーが変化(シュタルクシフト)するが、ある特定の波長(魔法波長)では、基底状態と

励起状態のシュタルクシフトが一致して、光の摂動を受けない原子と同じ時計遷移周波数が測定できることを実証した。図 4-12 に示すように、原子(緑色)がレーザー光の干渉で作られた光格子(茶色)の中に捕獲されている。光格子は「魔法波長」と名付けられた特定の波長で、原子のエネルギーシフトは相殺されている⁴¹。

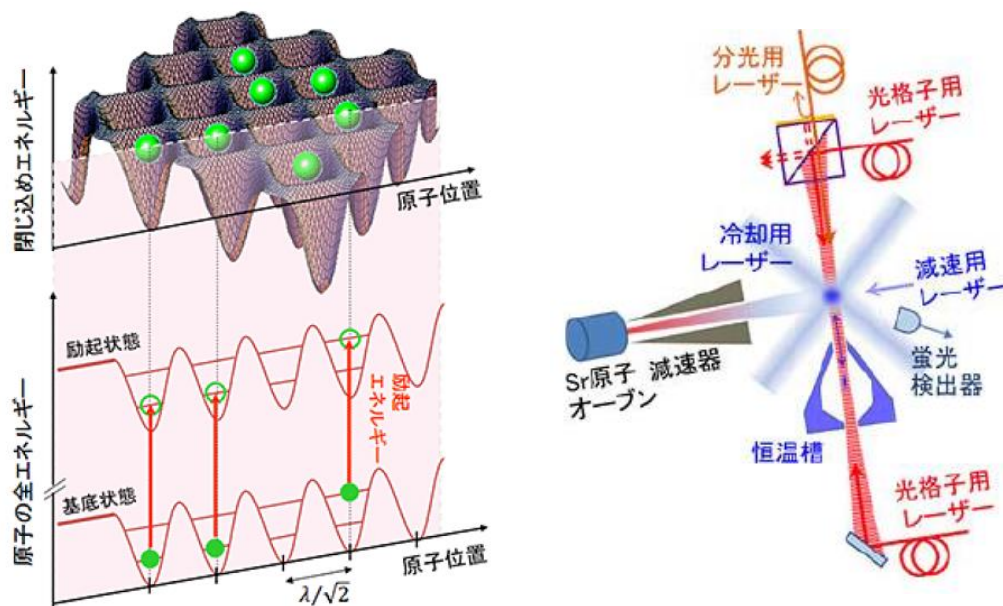


図 4-12 光格子の模式図(左)、実験装置の概要(右)

本研究領域の終了後、香取秀俊は、2009 年度～2013 年度 FIRST「量子情報処理プロジェクト」の量子標準サブテーマ(量子標準グループ)リーダーとして、さらに 2010 年度～2015 年度 ERATO「香取創造時空間プロジェクト」研究総括として光格子時計の研究開発に取り組んだ。

FIRST 研究では、1) 黒体輻射シフトを大幅に低減する低温動作・光格子時計の開発と、2) 東京大学(東大)、理化学研究所(理研)で構築した低温動作光格子時計をつなぐ光ファイバーリンク実験に着手した(図 4-13)。

⁴¹ 科学技術振興機構(JST)プレス発表 2015 年 2 月 10 日「次世代時間標準「光格子時計」の高精度化に成功」

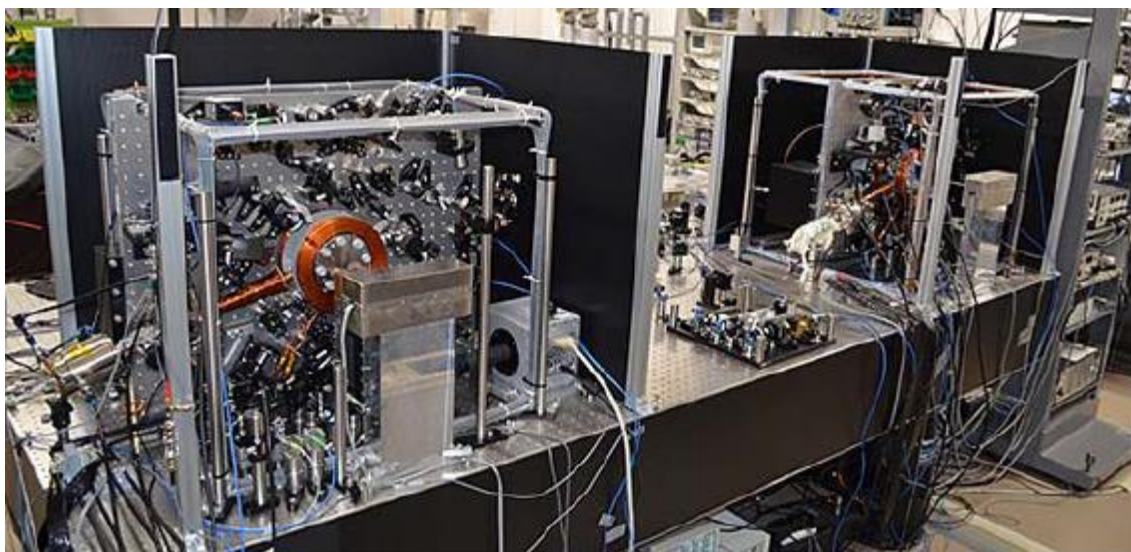


図 4-13 開発した 2 台の低温動作・光格子時計の装置

ERATO 研究では、1) 2 台の低温動作・光格子時計の比較により 18 桁の再現性を実証するとともに^[5]、2) それら 2 台の光格子時計を東大・理研間で比較することで、時計の高低差を 6cm の不確かさで測定することに成功した。さらに 3) ストロンチウム (Sr)、イッテルビウム (Yb)、水銀 (Hg) 原子を利用した光格子時計の研究開発に発展させ、異種の原子を用いた光格子時計同士の周波数を直接比較した^[4]。

(2) 海外での共同研究の状況

ロシアの標準研究所 (Institute of Metrology for Time and Space (IMVP), NPO "VNIIFTRI" Mendeleev) の V. G. Palchikov と、研究者レベルで 15 年来の共同研究を行っている。米国ネバダ大学の Andrei Derevianko と、原子時計に関して継続的に共同研究を行っている。

4.4.2 研究成果の波及と展望

(1) 科学技術への波及と展望

2010 年度にスタートした ERATO 「香取創造時空間プロジェクト」では、開始後 4 年の間に、二つの Sr 光格子時計の周波数において 10^{-18} のレベルでの一致が確認され、クライオ光格子時計による 18 乗台の時間精度が達成された^[5]。この成果は原子時計の研究全体に大きなインパクトを与えるもので、秒の再定義への寄与も期待されている。また物理定数の恒常性の検証などの基礎物理に関わる実験系としても重要である。

研究グループは、これまで光格子時計に用いられてきた Sr や Yb 原子に比べて、黒体輻射の影響を受けにくい Hg 原子を用いた光格子時計を開発してきた。2015 年 5 月、Hg・Sr 光格子時計の高精度直接比較に成功し、次世代時間標準に向けて「光格子時計」の優位性を示したと発表した。紫外レーザーの長期安定動作技術を確立したことにより、Cs 原子時計の精度を上回る水銀光格子

時計を初めて実現した^{[6], 42}。

この一方で、到達目標の壁であった原子を囲む室温の壁から放射される電磁波(黒体輻射)の影響を大幅に抑える(室温の約 1/100)低温動作・光格子時計システムを構築し、2 台の低温動作・光格子時計の比較観測で、Sr 原子の黒体輻射シフトを世界で初めて実測した^{[5], 41} (図 4-14)。

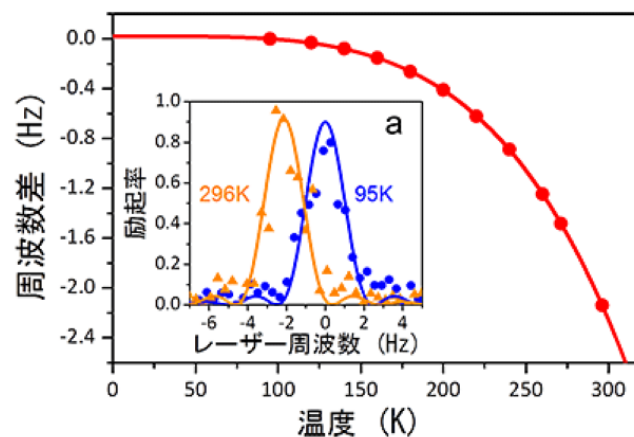


図 4-14 黒体輻射による時計の周波数シフトの直接測定

また、時計遷移を観測するレーザーの周波数ノイズに由来するディック効果を排除する 2 台の時計の同期運転手法を用いることで、2 台の時計の安定度は、僅か 2 時間の積算時間で 2×10^{-18} に達した。このように 18 桁の時間領域に短時間で迫れるようになったのは、量子射影ノイズを大幅に低減した光格子時計の功績である。光格子時計のライバルである単一イオン光時計では、同様の測定に実に 10 日の積算時間を要する。

ERATO では、ストロンチウム(Sr)、イッテルビウム(Yb)、水銀(Hg)原子を利用した光格子時計の研究開発に発展させ、異種の原子を用いた光格子時計同士の周波数を直接比較した(図 4-15)。これは、現行のセシウム原子時計を使った「秒」の定義では表現できない物理量を、高精度な光格子時計同士の直接比較によって示した重要な成果である^[4]。多数個(N)の原子の同時測定を可能にした光格子スキームと、プローブに使うレーザーの周波数ノイズの同相除去により、Sr 光格子時計同士の比較ならおよそ 3 時間(10,800 秒)で 18 桁の安定度に達する。これは $N=10^3$ 原子の測定の量子限界に迫る。遷移周波数が異なる異種原子間では、レーザーノイズの同相除去が限定的で安定度はやや劣化するが、Yb に対しても Sr 低温動作・光格子時計と同様な方法にて冷却型光格子時計が開発され、光周波数コムを用いて低温動作 Yb 光格子時計と低温動作 Sr 光格子時計の周波数を比較し、約 2 時間で 17 桁に達する測定に成功した。一方、黒体輻射シフトの小さい常温動作 Hg 光格子時計を開発し、Sr 光格子時計と周波数比較を行い 17 桁の精度という SI 秒の実現精度を超える周波数測定をデモンストレートした^[6](図 4-16)。レーザー光源が改良されれば 18 桁の測定が期待される。

⁴² 科学技術振興機構(JST)プレス発表 2015 年 5 月 27 日「水銀・ストロンチウム光格子時計の高精度直接比較に成功」

18 桁の光格子時計では、光格子による原子遷移の周波数シフトが主要な不確かさ要因になる。この限界を破るべく、香取らは、光格子時計の到達精度を 19 桁に引き上げる、光格子の魔法周波数の決定に関する研究戦略を提案した^[7]。

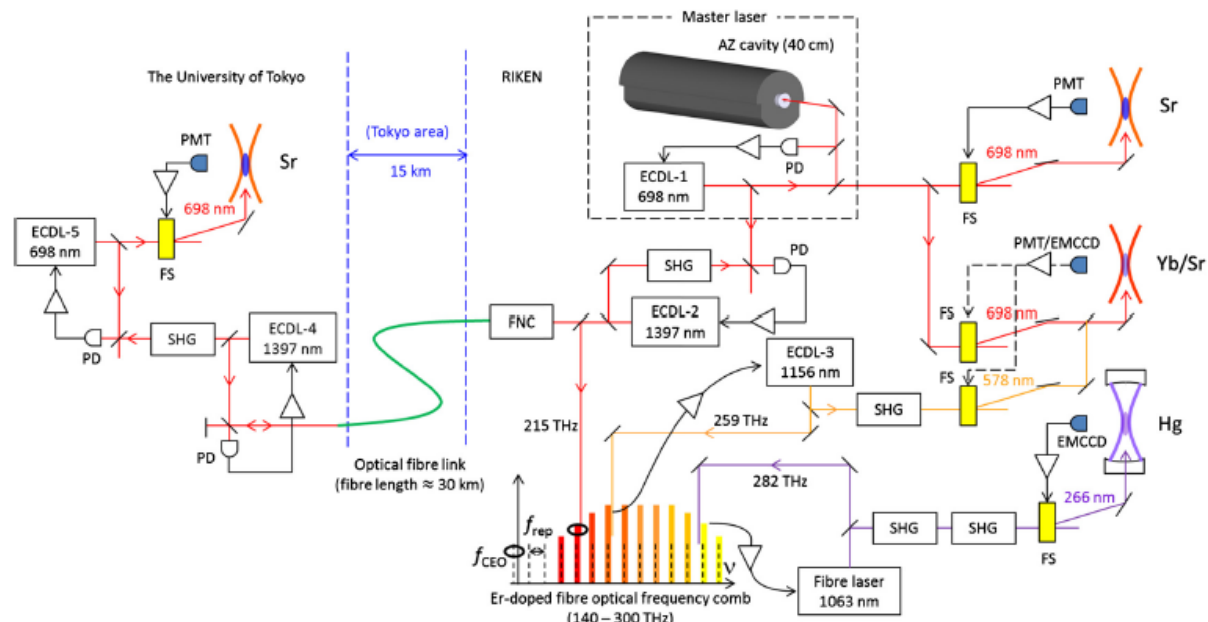


図 4-15 Sr、Yb、Hg 光格子時計群のネットワーク

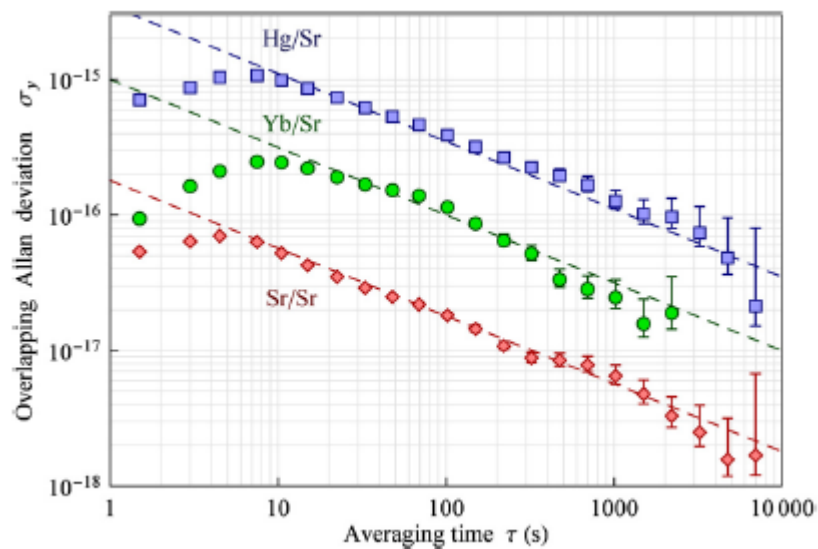


図 4-16 Sr、Yb、Hg 光格子時計の周波数比の測定

(2) 社会・経済への波及と展望

標準技術に関する研究は、その後の巨大なインフラも含めて国の利潤がぶつかり合うため、基礎研究の場においても熾烈な競争がなされることが多い。香取秀俊が研究開発した光格子時計という全く新しい概念と、その後の継続的な研究開発の成果により、周波数標準のロードマップが

塗り替えられつつある。さらに特筆すべき点として、世界中の周波数標準機関が光格子時計の重要性を認識し、その研究開発競争を展開する状況を香取秀俊が作り挙げたことが挙げられる。

香取が提唱している「光格子時計ネットワークによる相対論的時空間情報インフラ」は、地球上のあらゆる地点における相対論的な時空間情報をユーザーが自由に利用できる状況を実現することから、現在予想もされていないような新たなサービス、アプリケーションにつながる可能性を持っており、その意味で更に大きな社会、経済への貢献のポテンシャルを秘めている。そのためには、小型化と連続運転をできるようにすることが今後の課題である。

このような光格子時計を車載器にできれば、相対論的カーナビ、それを使った資源探査の可能性などが期待される。光格子時計は、微妙な重力の変化も捉えることができる。地下のマグマだまりや空洞、金属資源などは地表の重力を変化させるので、地下の状態の変化が時間のずれとして観測される。このことから地殻変動の観測や火山の研究、地下資源の探査にも活用できる可能性がある。図 4-17 に光格子時計による未来社会の予想図を示す⁴³。

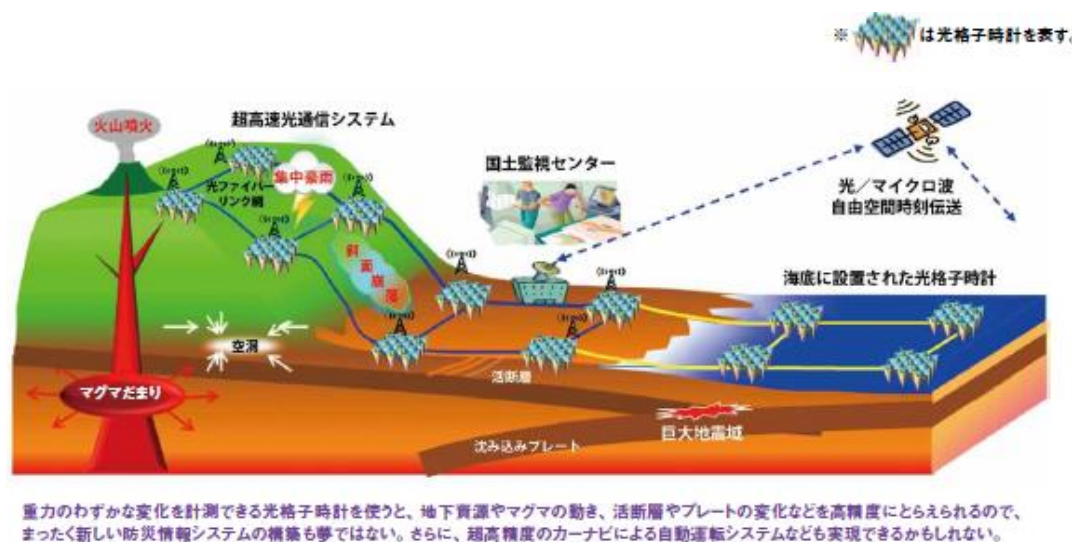


図 4-17 光格子時計による未来社会の予想図

引用文献

- [1] Katori H., Proc. of the 6th Symposium Frequency Standards and Metrology, edited by P. Gill (World Scientific, Singapore, (2002) p. 323.
- [2] Takamoto, M., Katori, H. Spectroscopy of the $1S_0-3P_0$ clock transition of ^{87}Sr in an optical lattice (2003) Physical Review Letters, 91 (22), pp. 223001/1-223001/4.
- [3] Takamoto, M., Hong, F.-L., Higashi, R., Katori, H. An optical lattice clock (2005) Nature, 435 (7040), pp. 321-324.
- [4] Takamoto, M., Ushijima, I., Das, M., Nemitz, N., Ohkubo, T., Yamanaka, K., Ohmae, N., Takano, T., Akatsuka, T., Yamaguchi, A., Katori, H. Frequency ratios of Sr, Yb, and

⁴³ JST news June 2015 「160 億年に 1 秒しか狂わない「光格子時計」を実現」

- Hg based optical lattice clocks and their applications (2015) *Comptes Rendus Physique*, 16 (5), pp. 489–498.
- [5] Ushijima, I., Takamoto, M., Das, M., Ohkubo, T., Katori, H. Cryogenic optical lattice clocks (2015) *Nature Photonics*, 9 (3), pp. 185–189.
- [6] Yamanaka, K., Ohmae, N., Ushijima, I., Takamoto, M., Katori, H. Frequency ratio of ^{199}Hg and ^{87}Sr optical lattice clocks beyond the SI limit (2015) *Physical Review Letters*, 114 (23), art. no. 230801.
- [7] Katori, H., Ovsiannikov, V.D., Marmo, S.I., Palchikov, V.G. Strategies for reducing the light shift in atomic clocks (2015) *Physical Review A – Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 91 (5), art. no. 052503.