戦略的創造研究推進事業　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」
研究課題
「中性原子を使った量子演算システムの開発」

研究終了報告書

研究期間　平成15年10月～平成21年3月

研究代表者：清水　富士夫
（日本電信電話（株）物性科学基礎研究所　客員教授
電気通信大学レーザー新世代研究センター　共同研究員）

§1 研究実施の概要

将来実用になるかもしれない量子計算機のエレメント qubit の候補として実に様々なものが考案され、量子計算のデモンストレーションに向けた研究が行われている。 Qubit として要求される基本的な性能は、1．多数の完全に同一で緩和過程から隔離された量子状態を持つ素子であること、2．2個の qubit 間で十分に大きな相互作用を持たせることができること、の二点である。自然界に存在する原子はこれらの条件を満たしており、実際、現在までに最も複雑な量子計算を実現しているのは基本的に原子の内部状態（電子準位、超微細構造状態、核スピン状態など）である。しかし、原子を用いるにしても、荷電原子（イオン）か中性原子か、自由空間にいる原子を用いるか凝縮体中にある原子を用いるかなど様々な選択肢がある。自由な原子を利用する場合には、まず、原子を捕捉して並進運動状態が全て同じになるようにしなければならない。一方、凝縮体中に捕らえられた原子は並進運動を制御する必要ないが、媒質との相互作用が大きく、 qubit としての同一性確保、緩和過程の抑制などに多大の努力が必要である。自由空間の原子を使う場合でも、イオンか中性を選択するかの差は大きい。イオンはクーロン力のおかげで並進運動制御は易しいし、内部状態は並進運動からほぼ完全に隔離されている。しかし、同じクーロン力のために多数の qubit を小さなスペースに集めることは不可能である。汎用性のある量子計算機では極めて多数の qubit が必要になることは確実であり、これが可能で、かつ上記1の条件を満足するシステムを知られている物理系から作ろうとすると、一番実現性が高いものは自由な中性原子の系ということになる。

中性原子を対象に選ぶことにより、粒子の内部状態以外の量子状態を qubit の状態として選ぶ可能性も出てくる。例をあげれば、空間的に離れたにある場所にある原子波束を使う方法、あるいは原子気体全体を集合的は量子系として扱う方法など豊富なバリエーションがある。しかしながら、量子情報処理の研究は工学的にはいまだ最良の方向が定まっているわけではない。また、目標とする利用方向も多方面にわたる。このプロジェクトの目的は、本邦におけるレーザー原子分光研究を主導している研究者でグループを作り、自由で自主性を重んじた環境のなかで互いに協力しながら多彩な研究を進め、量子計算に関する科学的な理解、工学的開発を目指すことにあった。以下、研究が必要とされる主題別に、我々のグループがどのような研究を行い、成果をあげたかについて述べる。

冷却原子、BEC の生成　常温気体原子は数百 m/s の速度で飛び回っているため、光領域での共鳴振動数はドップラー効果によって GHz のオーダーに広がっている。したがって、常温原子を光で制御した場合、ns の時間しかコヒーレンスを保てない。また、中性原子をトラップするためのポテンシャルはせいぜい数百 mK にしかならない。したがって、原子を極低温に冷却するレーザー冷却技術は必須の技術である。さらに、原子集団を使う量子操作では、全ての原子が同一外部状態になるボーズ凝縮体(BEC)を生成するのが好ましい。また、後で述べる原子の qubit 位置への装填にも BEC は有力な資源である。我々のグループ全員がレーザー冷却では長年の経験がある。BEC の生成については、電通大（中川研、3．3参照）では原子チップ BEC を生成する方法で世界一繰り返しの早いシステムを開発した。また、東大（3．4参照）では qubit をガイド上で定常的に動かし、光共振器中の光子との相互作用で量子演算を行う目的で、定常的に流れる BEC の生成を目指した研究を行ってきた。まだ、BEC までは至っていないが、強度の強い冷却原子線の生成に成功している。

原子トラップ、ガイド　トラップやガイドは研究目標によって最良となる形態は非常に多様なものとなる。このため、我々のチームの研究も非常に多彩なものとなっている。NTT チーム（3．1参照）では原子チップ上の磁気トラップ・ガイドで長時間のコヒーレント操作することを目標として超伝導体を導体とした電流回路を作り、世界で初めて原子のトラップに成功した。さらに、超伝導永久電流の作る磁気トラップへの原子捕獲、レーザーサーマルスイッチによる磁場制御などの実証を行った。電通大（中川研、3．3参照）が原子チップ上に原子を捕獲し、BEC を生成したことはすでに述べた。原子間の相互作用を使った 2 qubit 操作の性能研究のためには個々の原子を独立したトラップに捕獲し、位置制御する必要がある。彼らは、個々の原子をレーザー光を強く集光して作った

マイクロ光双極子トラップに捕獲し、観測することに成功している。3次元的 qubit 列を作る試みでは電通大（清水研、3．2参照）にて独立した2組の3次元光格子を5組の8の字型光共振器を使って組み、原子をトラップすることに成功している。

1 qubit 操作と単原子検出　　原子の内部状態を qubit 状態に利用する場合には、1 qubit 操作は自明のようにも考えられるが、日常的に使われていない状態を使った場合にはその動作状況を確認する必要がある。電通大（中川研）では、大きな磁気、電気双極子モーメントを持っているために大きな2原子間相互作用が望めるリドベルグ状態のアルカリ原子をマイクロ光双極子トラップに捕獲した。そして、個々の原子の観測に成功するとともに、1 qubit 操作の基本であるラビ振動の観測に成功している。また、東大では小型の高Q共振器、光ファイバー端面を凹面鏡にしたマイクロ光共振器、あるいはフォトニック結晶に作られた光共振器など体積が小さくQ値が高い共振器中に原子をトラップして単一原子の観測を行う研究を進めている。以上は原子の内部状態を qubit 状態とする系に関する研究であるが、外部状態を利用した系の代表例に原子干渉計がある。本来、干渉は1原子で行わなければならないが、原子集団で行っても物理的には差はない。電通大（中川研）では原子チップに構成した磁気ガイドと光定在波を使ってコヒーレンス時間の長いBEC 原子集団の干渉に成功した。

2 qubit 操作　　我々のプロジェクトの目標の一つは2 qubit のデモンストレーションであった。完全な形でこれを実現することはできなかったが、一部の研究はこの方向に向かって順調に進んでいると言ってよい。まず、直接原子同士を相互作用させる方法では電通大（中川研）の原子のリドベルグ状態への励起実験で、2個の原子が同じトラップ中で同時にリドベルグ状態に励起される確率が減少するブロッケイドの観測に成功している。2 qubit 操作のもう一つの方法に光子を仲介させる方法がある。中性原子と単一モード光との相性は非常によく、単一光子との相互作用でも十分な大きさがあり、数十ナノ秒のオーダーで必要とされる操作（例えばπパルス）を完了できる。さらに、光は高速で伝搬するので離れた場所にある qubit 同士の操作も高速で処理できる。（現在、実用になっているエレクトロニクス機器のほとんどで信号伝送は光速度で伝搬する電磁“波”が使われていることをみても光の有利さが判るだろう。）ここで必要となるのは、光―原子の操作を完了させるのに必要な時間、光子を原子の下に止めておけるQ値の高い光共振器である。すでに前項で述べた単一原子検出用に開発している東大の光ファイバー端面を用いた光共振器、フォトニック結晶中の光共振器はこれにカップルした光伝送路の他端に同じ光共振器と単原子を置くことで2 qubit 操作のデバイスとすることができるはずである。

原子集団と量子光の相互作用、量子メモリー　　物理的には前2項で述べた原子―光子相互作用に関わる研究と同じであるが、量子状態の利用の仕方、研究の進め方が質的に異なるので独立して説明する。同一量子状態を持った非常に多数の原子からなる媒質に小数の光子からなる共鳴光を照射したとすると、媒質は部分的に励起されるが、そのレスポンスは線形である。光子系は基本的に線形系であるから、このような相互作用系では光子の任意の状態を原子系に転写できると考えてよい。原理的に qubit の量子操作から得られた任意の量子状態を光子状態に移すことができるから、この原子集団は量子メモリーやその他の量子操作を行うデバイスとして用いることができる。この際、原子一個一個を定まった位置に固定する必要はなく、個々の原子状態も外部状態まで含めて完全に同一である必要もない。（メモリーの保存時間、入射光の空間モードに対する制限にはなる。）熊本大（光永研、3．5参照）はこの種のテーマをにした研究を行ってきた。残念ながら量子光との相互作用を調べる実験までは到達しなかったが、3準位の関連した4光子光学過程を通じて、ナトリウム原子基底状態のコヒーレンスの研究、誘導ラマン光の相関などで研究成果を上げた。また、東大（久我研）では BEC 状態のルビジウム原子を媒質として、空間モードが異なった複数種類の光子状態を記憶させることに成功した。

量子情報操作研究から派生した成果　　まず、電通大（中川研）や東大（久我研）で成果を出している単一原子検出は量子情報操作の最終段階で必ず行われる操作であるが、超高感度の中性

原子検出法として広い科学分野の研究に役立つはずである。また、原子干渉は1 qubit 操作そのものであるが、原子チップ上で行われた電通大(中川研)の研究は超高感度でコンパクトな加速度、重力、角速度などの計測手段として応用できるはずである。
多粒子間の量子相関の研究は直接量子操作とは関係ないが、物理として密接な関連がある。東大(久我研)ではレーザー冷却した原子気体から共鳴散乱される光子の相関から冷却原子のコヒーレンス時間を測定することに成功した。熊本大では4光子光学過程において、変化率が大きくなる領域で起こるレーザー発振現象の研究を行った。また、電通大(中川研)では BEC を利用したフーリエ変換を使ってガウス和を計算し、素因数分解ができることを実証した。原子気体は通常形式の量子情報処理を行う媒体に向いているわけではないが、種々の量子操作に関連した現象の研究ができ、物理的には興味ある対象である。

§2 研究構想及び実施体制

(1) 研究構想

前節で述べたように量子情報処理の研究は工学的にはいまだ最良の方向が定まっているわけではない。また、目標とする研究方向も多方面にわたる。このプロジェクトの目的は、本邦におけるレーザー原子分光研究を主導している研究者でグループを作り、自由で自主性を重んじた環境のなかで互いに協力しながら多彩な研究を進め、量子計算に関する科学的な理解、工学的開発を目指すことにあった。

(2)実施体制

研究開始当時のチームは形式上4チームであったが、実質的には下記の5チームで構成され、それぞれの研究を担当していた。
1. NTT 物性基礎研(超伝導グループ)　アルカリ金属を使った量子演算システムの開発。研究内容としては超伝導原子チップとルビジウムを使った、量子情報操作の研究に特化。
2. 電通大レーザー(清水研)　アルカリ金属および希ガス原子を使った量子演算システムの開発。研究内容としては、二重光格子を使った量子計算機に目標を置いた研究に特化。
3. 電通大レーザー(中川研)　アルカリ金属を使った量子演算方法の開発。ルビジウム原子、およびその BEC を使った、種々の量子処理技術に関する研究。
4. 東大駒場(久我研)　原子ボーズ凝縮体と光双極子ポテンシャルを使った原子量子回路の開発。ルビジウム原子、およびその BEC を使った、種々の量子処理技術に関する研究。
5. 熊本大(光永研)　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ーの研究。究極の目標を量子メモリーに置いた、ナトリウム原子気体のコヒーレント非線形光効果の研究。

各チームの研究の詳細は以下の通りである。

グループ名	研究代表者又は 主たる共同研究者氏名	所属機関・部署・役職名	研究題目
NTT グループ	清水　富士夫	NTT 物性科学基礎研究所・量子電子物性研究部・超伝導量子物理研究グループ・リサーチプロフェッサー	アルカリ金属を使った量子演算システムの開発
電気通信大学 清水グループ	清水　富士夫	電気通信大学・レーザー新世代研究センター・共同研	アルカリ金属および希ガス原子を使った

		究員	量子演算システムの開発
電気通信大学 中川グループ	中川　賢一	電気通信大学・レーザー新世代研究センター・准教授	アルカリ金属を使った量子演算方法の開発
東京大学 久我グループ	久我　隆弘	東京大学大学院・総合文化研究科・教授	原子ボーズ凝縮体と光双極子ポテンシャルを使った原子量子回路の開発
熊本大学 光永グループ	光永　正治	熊本大学大学院・自然科学研究科・教授	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ーの研究

§3 研究実施内容及び成果

3．1 アルカリ金属を使った量子演算システムの開発(NTT 物性科学基礎研究所　清水グループ)

(1)研究実施内容及び成果

NTT グループおよび、電通大清水グループは基本的には同一の大きな目標、実用性のある多数の qubit を装填することができる量子情報操作システムの開発、を目指した研究を行ってきた。NTT 側では原子チップ上に2次元的に多数の 中性原子からなる qubit を展開して目標達成を目指す方向で研究を進めてきた。これと同時に、チップ上では原子を自由にガイドできることを利用して、量子計算機の元々のアイディア、適当な初期条件を設定した孤立量子系に外部から作用を加えることなく放置しておいただけで任意の計算ができる、のモデル実験を行う準備も進めてきた。後者には実用的な意味はないが、本当に量子計算機的なプロセスを見せることができる可能性のある数少ない例として物理的な興味は大きいと考えられる。

まず、チップ上に中性原子を捕捉し、 qubit として働かせるためには、捕捉ポテンシャルを十分に急峻にして、原子の外部運動の量子状態が単一状態に留まるようにしなければならない。チップ上で捕捉ポテンシャルを構成する磁場を作る回路に流せる実現可能な電流から逆算すると、回路の幅や原子を捕捉する高さはいずれもミクロンメーター程度以下に抑えなければならないことが判る。ところが、室温状態の金属線で電流を供給した場合、電流の熱揺らぎによって原子のスピン状態遷移が引き起こされ、原子を表面近くに長時間捕捉しておくことができないことが判ってきた。このため、原子チップが初めて開発された頃はいろいろなデバイスのデモンストレーションが行われたが、その後あまり進展は見られない。我々はこの損失の問題を解決するため、室温導体ではなく、超伝導体を用いた原子チップの開発に着手した。そして、世界で初めて、超伝導チップへの原子のトラップ(Kasper 他、in Proceedings of the Bose-Einstein Condensation: EuroConference on Ultracold Gases and Their Applications, San Feliu de Guixols, Spain, 2005, edited by G. Shlyapnikov)、外部からの電流供給を必要としない、したがって雑音遮断がより完全な、超伝導閉回路への原子のトラップ(Mukai 他、Phys. Rev. Lett. 98, 260407 (2007), 特許出願:特願 2007-011432)にも成功した。さらに超伝導閉回路の電流を短時間で制御するために、レーザー光を用いた熱スイッチの開発も行った(文献上記)。我々はこの超伝導原子チップを用いてトラップ寿命

測定の研究を行っており、数十ミクロ程度の距離でも常伝導チップより一桁以上寿命が長いことを確かめている(論文準備中)。
上記の研究で超伝導チップを使えば原子を長時間捕捉できることを確認できたのでチップ上に外部から一切磁場を加えない微少トラップを作る研究に進んだ。一つは、既知のzトラップに平行磁場を作る超伝導回路を組み込む方法がある(向井他、日本物理学会講演会:日本物理学会 2006 年秋季大会 24pWD-1、特許出願:(同上記:特願 2007-011432))。図はこのトラップの SEM 写真である。

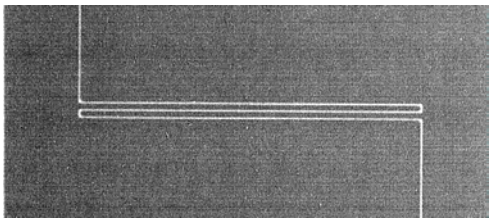
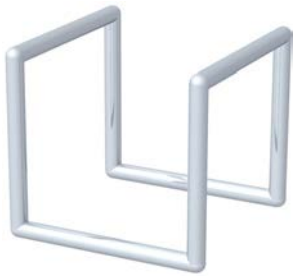
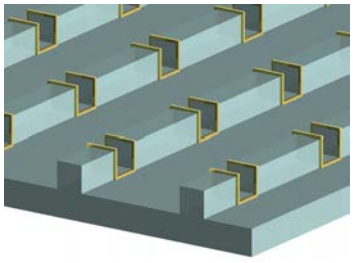


図:平面バイアスフリー型トラップの SEM 写真

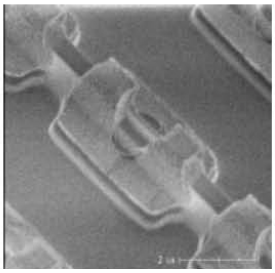
もう一つの方法は、微少トラップのサイズがミクロンメーターのオーダーである以上、チップ表面を平面に限定する必要がない、すなわち立体的なトラップを設計できることを利用する。既知の磁場トラップで最も効率がよいのは直方体の6辺を一つの閉回路で結んだいわゆる baseball lace トラップである。我々はまず baseball lace トラップの数値的解析を行い、大きさが数ミクロン程度以下であれば単一量子磁束で原子をトラップできること、トラップポテンシャルの底の磁場の値をアルカリ原子超微細構造遷移のゼーマンシフトの停留点に持って来ることが可能なことを確認した。これらの性質は完全に同一な qubit を多数作る上で極めて有用な特性である。次に NTT-AT(株)が持つ微細加工技術を駆使して一辺約1ミクロンメーターのニオブ超伝導体の baseball lace トラップが500x500並んだチップを作ることに成功した。この回路が超伝導性を持つことはすでに確認済みで、目下、原子トラップに向けた実験を準備中である(向井他、日本物理学会講演会:日本物理学会第 63 回年次大会 27aQD-2、特許出願:特願 2007-310134)。図はこのトラップの模式図と、作製したトラップ一個の SEM 写真である。



図(a):立体型トラップ電線の模式図

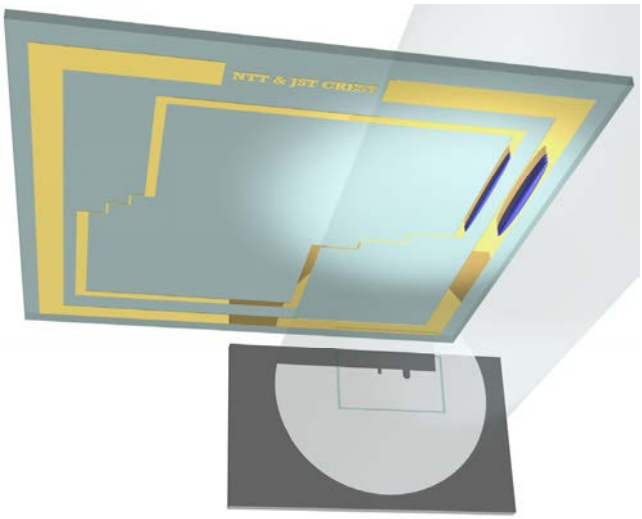


図(b):チップ上の立体型トラップの模式図(黄色の部分が超伝導電線)

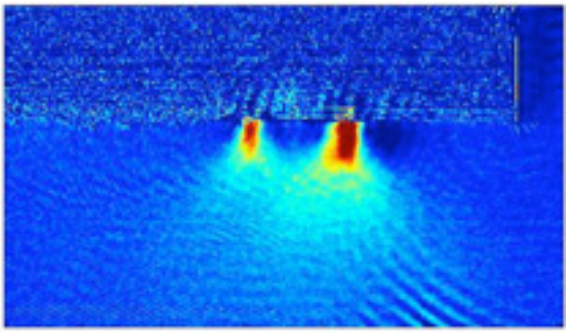


図(c):作製した立体型トラップ1個の SEM 写真

我々は外部操作なしで演算を行う系に関する研究も遂行してきた。これは量子光学で研究されている量子情報操作とほぼ同じであるが、光子が原子と決定的に異なる点は前者では2光子を相互作用させることがほとんど不可能なのに対し、中性原子では弱いながらも可能なことである。このため、原子では確率的過程に頼ることなく2 qubit の量子操作が可能になる。この系では qubit の量子状態は原子の内部状態ではなく、2本のガイド上の原子の波束である。質量がある粒子波を qubit として使われたことはないので、まず、1 qubit 演算のデモンストレーションから始めなければならないが、その基本は(マイケルソン型)干渉計である。現時点ではチップ上で波束の運動だけによる干渉計は成功例がないが、原因は、原子をチップに十分近づけられなかったために単一モードのガイドができなかったこと、および、磁気トラップのベクトル性のため、ガイドの角度の変化、交差などに際してポテンシャルをスムーズに変化させる回路構成が困難であることによる。超伝導ガイドを使えば、少なくとも前者の問題はなくなる。目下、チップの設計中である。
我々は超伝導チップを使った原子トラップ／ガイドの研究過程で、新しい、ガイド設計が極めて融通の利くトラップ／ガイドを発見した。これは電流を印加しない超伝導パターンとチップに垂直な一様磁場だけで構成されている。超伝導体の近くでは、超伝導体を貫く磁力線は周囲にはじき出されるので、超伝導パターンの中心近くで磁場の小さい領域、すなわちトラップポテンシャルが構成される。このトラップはポテンシャルの一面が固体表面なので、衝突によって原子はトラップからはじきだされるはずである。しかし、我々は、表面がニオブ超伝導体である場合、ルビジウム原子は10回程度の衝突に耐えてトラップ中に残ることを見つけた。トラップ寿命は他の方式のトラップと比べると短いが、構成の対称性の高さゆえに、非常に自由なガイド設計ができ、応用性が高いと考えられる。図は100ミクロンと200ミクロン、2本の平行な紐状超伝導体の上方にトラップされた原子計測の模式図と吸収像である。
(投稿準備中)



図(a):吸収画像計測の模式図。図の右上方より共鳴光を入射し，原子の吸収画像を撮影



図(b):トラップされた原子の吸収像

(2)研究成果の今後期待される効果

原子チップを量子情報処理の手段として見た場合、今まで成功してきたとは言い難い。これは、原子をチップ表面のごく近くに近づけられなかったこと、磁気トラップは比較的複雑な構成が必要であったことによる。我々が研究してきた超伝導チップは前者に対する解決策を与え、マイクロベースボールレーストラップのような非常に均一性の高い qubit を作ることができることを示している。量子情報操作には 2 qubit の操作も必要となるが、これは未だ解決されていない後者の困難さのゆえに、今後の課題として残されている。我々の予測では 2 qubit 操作は2原子を動かして直接相互作用させるよりも、量子光を介して操作する方がずっと実用性の高いシステムが作れると考える。前節で述べたベースボールトラップの基板は光学特性の良質な石英であり、石英中にQ値の高い共振器を組むことでコヒーレントなカップリングができる。すなわち、トラップと量子光とのカップリングは原理的にはすでに可能になっている。

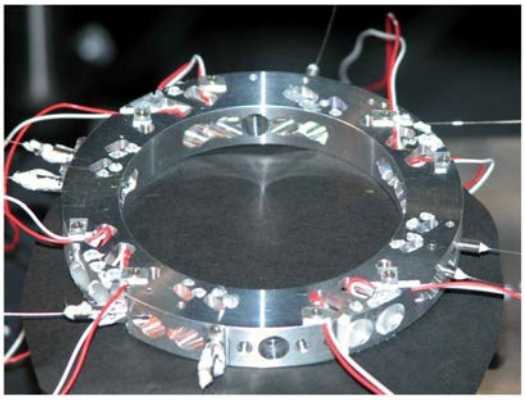
原子チップは本研究の課題である量子情報処理だけでなく、工学的には高感度の原子干渉計として、あるいは科学的には原子と固体表面の相互作用研究の手段として応用される可能性も持っている。

3．2 アルカリ金属および希ガス原子を使った量子演算システムの開発(電気通信大学 清水グループ)

(1)研究実施内容及び成果

NTT グループおよび、電通大清水グループは基本的には同一の大きな目標、実用性のある多数の qubit を装填することができる量子情報操作システムの開発、を目指した研究を行ってきた。電通大では3次元光格子の各格子点に原子を一個ずつ置いた系について研究を行ってきた。このような系は数百ナノメートル立方ごとに3次元的に qubit を並べることができるので、大きな系への拡張可能性が非常に高い。しかし、個々の qubit へアクセスすることが非常に困難であること、任意の位置にある二つの qubit 間で相互作用させることはさらに困難なため、3次元的に qubit が並んだ系で個々の qubit を制御する研究の発表はない。我々はこれらの問題を解決する方法として、 qubit 原子とは異なる原子を用意して二つの qubit 間の相互作用を仲介させる方法を、具体的に定量的な例を示して提案した(Shimizu, Jpn. J. Appl. Phys. 43 8376, 特許出願 2004-242858)。 この系は、原理的には、一つの光格子の各格子点に一個の原子をトラップした qubit 系と、これとは別種の一個の原子を数ナノメーター程度の精度で位置制御できれば完成する。しかし、任意の原子を任意の格子点に装填するのは現時点では不可能である。トラップ装填技術の欠陥を克服しながら量子オペレーションの可能性を追求するために、もう少し込み入ったシステムを構成する必要があった。

我々が作成したシステムは2種の原子(Na と Ne)を格子定数は同一であるが互いに独立な2つの光格子に装填し、光格子を作る定在波レーザー光の位相を変化させることで2種原子間の相互位置を制御して原子間相互作用の研究、すなわち qubit オペレーションの研究を行うものである。この際、一方の原子(Na)はごく少数にとどめ、他の原子はできる限り密に装填する。格子定数が同一であるため、オペレーションに際してすべての Na 原子は同様に振る舞い、また Ne 格子に欠陥があった場合は振る舞いの差のために実験データから除去できる。
写真はx－y面内2次元の光格子を構成する定在波光を作るための4組の共振器を示す。格子定数を一致させるため、各共振器4個の反射鏡が正確な角度で固定され、また、位相制御ならびに共振周波数安定化のためにピエゾ素子がつけられている。(z方向の共振器は図には含まれていない。)



(2)研究成果の今後期待される効果
このシステムは大容量量子計算システムのテストモデルとして作成されたものであり、実用的な量子計算機にいたるまでの評価のために必要な研究手段として役に立つはずである。また、基本的物理プロセスは個々の原子の外部状態を規定した原子間相互作用の研究であり、原子衝突の分野において新しい研究方法を提供するものである。

3．3 アルカリ金属を使った量子演算方法の開発(電気通信大学 中川グループ)
(1)研究実施内容及び成果
量子情報処理の実現に必要な量子ビットに中性原子を用いることにはいくつかの利点がある。その一つは原子の内部状態を量子ビットとして用いることにより長いコヒーレンス時間が期待できる点である。もう一つは原子は多くの内部エネルギー準位と外部の運動状態など多くの自由度を持ち、またこれらの量子状態を電場、磁場または光を用いた自在に操作が可能であるため、複数の量子ビット間のゲート操作が比較的容易に実現可能であると期待される点である。これらの中性原子の利点を活かしてこれを量子情報処理に応用するためには原子の内部および外部状態を自在に操作する技術を開発する方法がある。そこで本研究では以下に示す項目のもとでアルカリ原子を用いた量子情報処理実現のための研究に取り組んできた。

1 アトムチップを用いた高速ボース凝縮原子生成装置の開発
アトムチップはリソグラフィー技術を用いて基板上に微細な電線パターンを作成し、この電

線に電流を流して基板上に微細な磁場ポテンシャルを作って極低温原子をガイドする原子導波路を実現するものである(図 1)。このアトムチップの技術を用いることにより多数の原子を 1 個ずつトラップし、また個々の原子を独立に操作することが可能になると期待されている。またこのアトムチップの技術はボース凝縮原子などの極低温原子の生成にも非常に有用で、高速かつ高効率なボース凝縮原子の生成が可能となり、ボース凝縮を用いた多くの応用にも有用である。そこで本研究ではまずこのアトムチップを用いて高速にボース凝縮を生成する装置を開発した(Horikoshi et al, Appl. Phys. B, **82**, 363 (2006)。

本研究で作成したアトムチップを下図に示す。シリコン基板上にリソグラフィー技術を用いて幅 50～100μm、厚さ 10μm の金電極パターンを作成した。このアトムチップを用いて ^{87}Rb 原子のボース凝縮の生成を行ったところ最短で 0.7 秒間の蒸発冷却で数千個の凝縮原子の生成が実現された。これは従来の大型の磁場トラップを用いた方法に比べて一桁以上短いものである。またこの方法は初期のレーザー冷却原子数にあまり依存せず非常に再現性良くボース凝縮原子を生成することができるため、この凝縮原子を用いた様々な応用実験を短時間に効率良く行うことが可能となる。

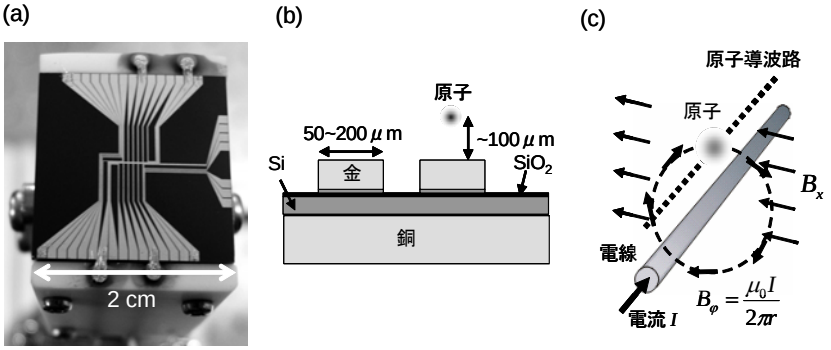


図 1 アトムチップ

2 アトムチップ上のボース凝縮原子を用いた原子干渉計

光の代わりに極低温原子を物質波として用いた原子干渉計は様々な物理量の高感度・高精度な計測法を与えるものとして重要である。この原子干渉計の原子源としてコヒーレント物質波であるボース凝縮原子を用いることによりコントラストの干渉信号が得られるためより高い検出感度が期待できる。また原子源として原子数スクィーズド状態のように原子間に量子相関があるエンタングルド状態の原子を用いることにより標準量子雑音限界を超える高い検出感度が期待できる。

本研究ではアトムチップ上の ^{87}Rb 原子のボース凝縮体(BEC)を用いた原子干渉計を実現してコヒーレンス時間および原子間相互作用が与える様々な影響を調べた。最初にアトムチップ上の磁場ポテンシャル中の BEC にπ/2−π−π/2 の 3 つの光パルスを入射してマッハツェンダー型原子干渉計を構成して干渉信号を測定した。この結果、磁場ポテンシャルおよび原子間相互作用によるディフェージングの影響により相互作用時間が 1ms 以上になると急激な干渉信号のフリンジコントラストの低下が見られた。そこで磁場トラップ中の原子の自由振動に合わせて 2 つの光パルスを入射することによりこれらのディフェージングの影響を低減するトラップ BEC 干渉計を考案した。この新しい干渉計においては相互作用時間約 50ms においても 30%以上のフリンジコントラストの干渉信号が観測された(図 2)。相互作用時間が 100ms においては外部の振動の影響を受けて干渉信号が変調されるのが観測された。これはこの干渉計が高感度な加速度計として働いていることによるものである。このためさらに相互作用時間を長くすることにより従来の原子泉型の原子干渉計と同様の高い感度の加速度計が実現可能となる(Horikoshi et al, Phys. Rev. Lett, **99**, 180401(2007), Phys. Rev. A, **73**, 013807 (2006))。

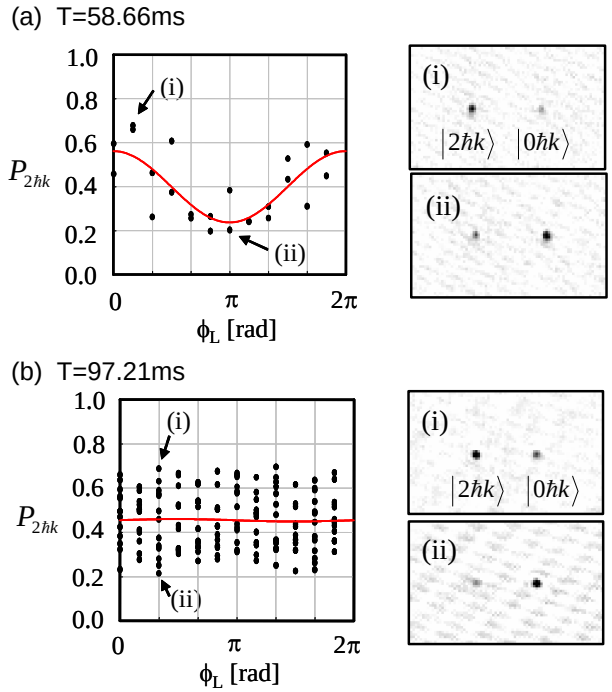


図 2 トラップ BEC 干渉計の干渉フリンジ信号

3 光定在波パルス中の BEC 原子を用いた量子ラチェット

極低温原子にある一定の周期で光定在波パルスを照射した系は量子キック回転子と呼ばれ、この系が量子カオスの性質を示すことから多くの興味が持たれている。この量子キック回転子系においては周期的なキックによる運動エネルギーの増加がキックの回数の増加につれて減少することが分かっており、これはダイナミカルローカリゼーションと呼ばれて、固体物理における電子のアンダーソン局在と同様の現象であることが指摘されている。

我々は ^{87}Rb 原子の BEC 原子を用いたこの量子キック回転子の系において量子ラチェット効果と呼ばれる現象が現れることを予想し、これを実際の実験で示した。量子ラチェット効果は非対称な周期ポテンシャル中の粒子の運動において粒子に一方向の流れが生じるというものである。ここでは光定在波ポテンシャルは左右対称であるのに対し、原子を二つの運動量 p=0 と p=hk の重ね合わせ状態にすることにより、原子の空間分布がポテンシャルに対して非対称にすることにより特定の方向の原子の加速を実現した(図 3)。この現象は物質波の多重干渉効果によるもので、一種のマルチパスの原子干渉計とみなすことができる (Sadgrove et al, Phys. Rev. Lett. **99**, 043002 (2007), Eur. Phys. J. D, **45**, 229 (2007))。

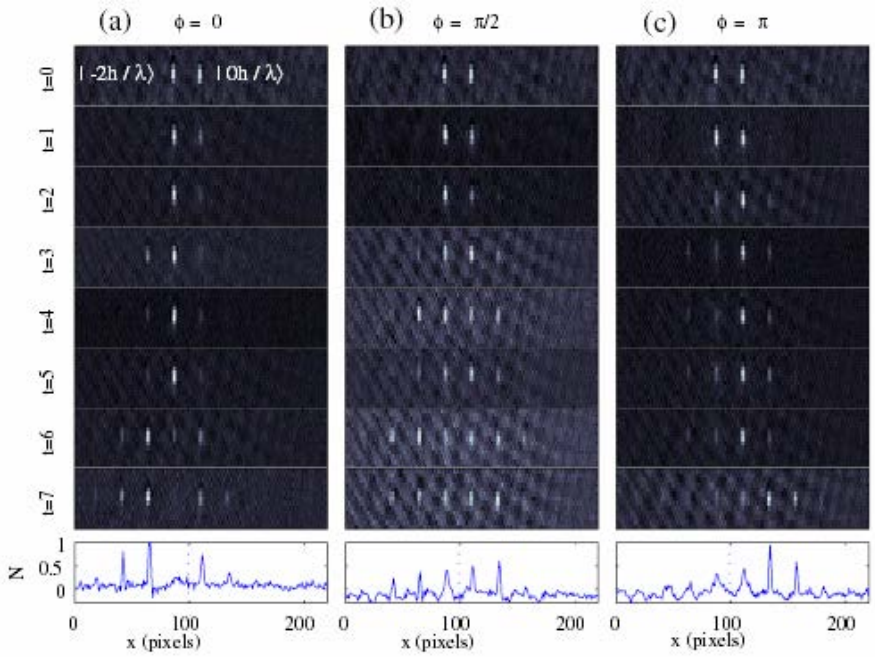


図 3　t 回キック後の BEC 原子の運動量分布

4 BEC 原子を用いたガウス和の計算による因数分解

近年、物理系の干渉効果を利用してガウス和を求めて整数の因数分解を行う方法が提案され、実際に原子、分子および光を用いた系においてこれが実演されている。この方法は 1 粒子のマルチパスの干渉効果を用いているだけでいわゆる多粒子間の量子エンタングルメントを利用しているわけではないので量子情報処理が目指している高速計算は今のところ期待できない。しかし将来、量子エンタングルメントを用いてこのガウス和の計算を速くするアルゴリズムが見出されれば高速な因数分解に応用できる可能性がある。

我々はこのガウス和による因数分解を光定在波パルス中の ^{87}Rb 原子の BEC を用いた系において実演した。実験はアトムチップによって生成された ^{87}Rb 原子の BEC に光定在波パルスを照射し、その後の原子の運動量状態を CCD で観測して原子の運動エネルギーを求めてガウス和を求める。このとき定在波の対向する光の間の位相差を変化させてガウス和を求めることにより与えられた整数Nの因数を求めることができた(図 4)。これはBEC原子を用いた初めてのガウス和による因数分解の実演である。BEC 原子を用いた利点は、光格子などの実験において既に原子スクィーズド状態などのエンタングルド状態が実現されているため、将来エンタングルド状態を利用した高速な計算アルゴリズムが見出された場合、比較的容易にこれに応用することが可能となることにある(Sadgrove et al, Phys. Rev. Lett. **101,** 180502(2008))。

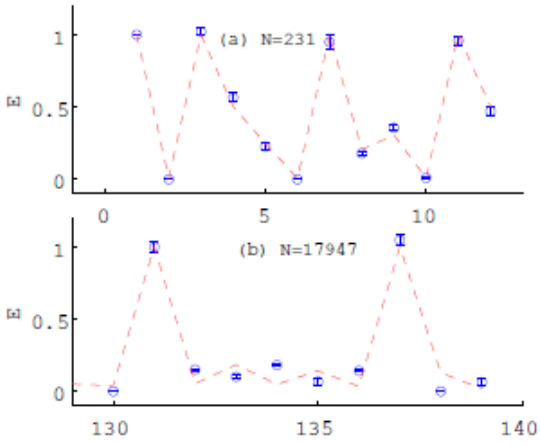


図 4　ガウス和による整数Nの因数分解の実験結果

5　光双極子トラップ中の単一 Rb 原子を用いた量子情報

原子を 1 個ずつトラップしてこれを量子ビットとして内部状態および外部状態を操作して量子情報に必要な基本的な量子ゲート操作を行うことを目指して単一原子トラップを開発した。高磁場勾配の磁気光学トラップによって 1 個から数個のレーザー冷却 ^{87}Rb 原子をトラップし(下図5)、これはさらに光双極子トラップに移行し数秒以上にわたって安定にトラップすることができた。そこでこの単一原子トラップを用いて原子の Rydberg 状態を用いた 2 量子ビットゲート操作の実現を目指してその予備実験を行った。トラップ中の少数個(～5個)Rb 原子に 780nm と 480nm の 2 波長の光パルスを入射して主量子数 n=58 の Rydberg 状態に励起し、コヒーレントなラビ振動を観測することができた(下図6)。このため今後さらに実験を進めることにより Rydberg 状態の原子間の大きな双極子－双極子相互作用を用いてRydberg状態への励起が抑圧される双極子ブロッケード効果の実現が可能になると考えられる。

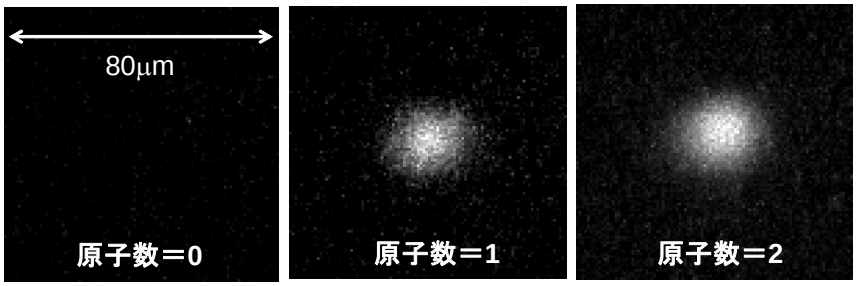


図 5　磁気光学トラップ中の単原子の蛍光像

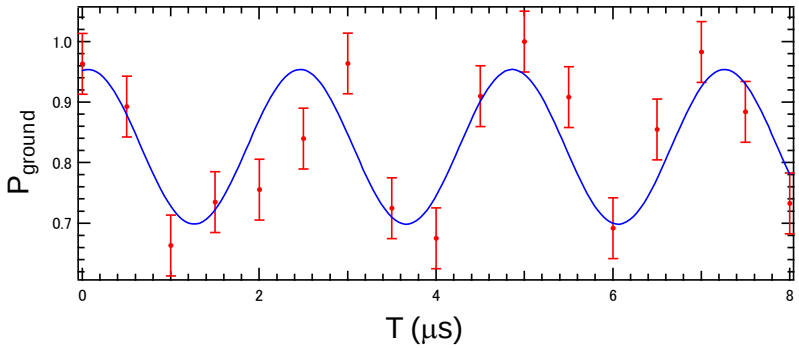


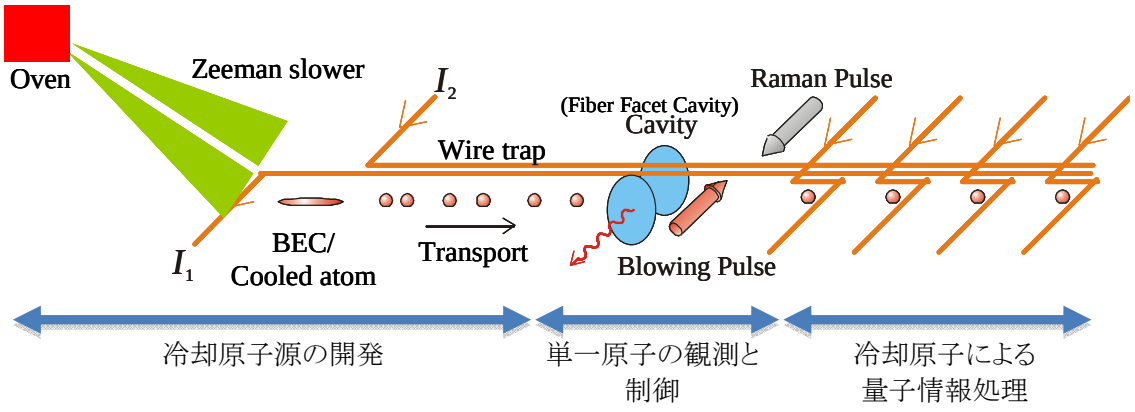
図 6　Rb 原子の Rydberg 状態への励起によるラビ振動の観測

(2)研究成果の今後期待される効果
本研究は中性原子を用いた量子情報処理の実現に向けて行ってきたが本来の目的およびそれ以外の波及効果も含めて下記の点で今後の発展が期待される。
1 アトムチップを用いた BEC 原子による集積化原子回路
アトムチップを用いた極低温原子および BEC 原子の操作技術は今後さらに改良を進めることにより量子情報処理に必要な微小なトラップおよび原子 1 個レベルの操作および観測が可能になると考えられる。また量子情報処理以外にも量子計測をもとにした原子時計、センサーなどの応用が考えられる。

2 トラップ BEC 干渉計による高感度慣性センサー
本研究において実現されたトラップ中の BEC 原子の自由振動を用いた原子干渉計は今後さらに研究を進めて長い相互作用時間を得ることができれば、高感度な加速度計やジャイロスコープを実現可能である。1秒以上の相互作用時間が得られれば従来の原子泉を用いた原子干渉計を超える検出感度が得られる可能性がある。このような原子干渉計は資源探査、万有引力の精密測定やナビゲーションなどに応用することが可能である。

3 単一原子トラップおよび Rydberg ブロッケード効果を用いた量子ゲート操作の実現
本研究において中性原子を一個単位で安定に長時間トラップする技術およびこの原子を高い励起状態の Rydberg 状態へコヒーレントに励起する方法が実現された。このため既に提案されている 2 つの Rydberg 原子間の双極子－双極子相互作用を用いた 2 量子ビットゲート操作の一つである位相ゲートを実現することが十分可能となった。これが実現できればイオントラップと同様に中性原子を用いて本格的な複数の量子ビットを用いた量子ゲート操作が実現できると考えられ、中性原子を用いた量子情報処理の研究が大きく進展するものと考えられる。

3．4 原子ボーズ凝縮体と光双極子ポテンシャルを使った原子量子回路の開発（東京大学 久我グループ）
(1)研究実施内容及び成果
当グループの研究課題「原子ボーズ凝縮体と光双極子ポテンシャルを使った原子量子回路の開発」を達成するために、以下の戦略で研究を行った(下図参照)。
A) 冷却原子源の開発
B) 単一原子の観測と制御
C) 冷却原子による量子情報処理



以下に成果などをまとめる。

A) 量子操作のための冷却原子源の開発

原子を量子操作に用いる場合、個々の原子をポテンシャルトラップに固定して操作する方法以外に、原子フローを作り、その途中に光共振器などの操作素子を置いて流れてゆく原子、原子間の量子操作を行う方法も考えられる。本研究ではゼーマン減速と2次元磁気光学トラップ(MOT)を用いて高輝度の原子源を製作し、ルビジウム原子のボース・アインシュタイン(BE)凝縮を目指した。

BE 凝縮させるために必要な原子の MOT へのローディングは、トラップ領域への磁場の影響の少ないスピンフリップ型ゼーマン減速器を採用し、通常の磁場増加型ゼーマン減速器と同様の性能(最終速度 20 m/s で 10^{11} atoms/s)を得た。BE 凝縮させるためには十分な流量である。

BE 凝縮のためには、この後、磁気トラップに移行し、蒸発冷却をする必要があるが、四重極磁場コイルなどの設置が遅れているため、残念ながら現時点(2008 年 10 月)で BE 凝縮体は得られていない。

BE 凝縮体生成の努力と並行して、生成された BE 凝縮体を光双極子ポテンシャルを用いて輸送し、アトムチップや光格子にロードするための真空装置および光源を製作した。真空チャンバーは BE 凝縮体を生成するメインチャンバーと BE 凝縮体を使った応用実験を行うサイエンスチャンバーに分れており、この間を光双極子ポテンシャルを用いて凝縮体を輸送する。

メインチャンバーの真空度としては 10^{-11} Torr 以下が実現されている。また、波長 1.06 μm の半導体励起固体レーザーの出力(200 mW)をファイバー増幅器で 10 W まで増幅した後、シリンドリカルレンズを用いて容積の大きい光双極子ポテンシャルをメインチョンバー内に形成した。そしてここに磁気光学トラップされた原子を 10^6 個光トラップすることに成功した。今後は、光トラップしたままサイエンスチャンバーに輸送する作業を行う予定である。

以上のように「冷却原子源の開発」は、研究実施期間内に実現することはできなかった。同様な超低温コヒーレント原子源の研究としてはフランスの LKB/CNRS のグループが先行しているが、ルビジウム原子線を蒸発冷却させた報告はあるが、現時点で量子縮退させてコヒーレントビームが実現したとの報告は聞いていない。また、BE 凝縮原子の輸送に関する類似研究としては米国のマサチューセッツ工科大学など、ドイツのマックスプランク研究所などで行われており、実際に稼働状態となっている。当グループとしても、今後さらに力を入れて実現を目指したい。

B) 単一原子の観測と制御

単一原子の観測と制御を行うには、パーセルファクターと呼ばれる因子を 1 より大きくする必要がある。そのためには、光電場が局所的に大きくなっていることが重要であり、当グループでは、光微小共振器、フォトニック結晶共振器、リング型ナノファイバー共振器などを使い、単一原子観測を目指した。

B-1) 光微小共振器による単一原子の検出

高 Q 値の光微小共振器は、単一原子と単一光モードとを強く相互作用させることが可能であり、1990 年代から単一原子観測の主流として幅広く研究されてきた。当グループでも 1999 年には通常型の共振器を使って単一原子の検出に成功している。

今回は、2006 年に多モードファイバーの端面を凹面研磨、多層膜蒸着してフィネス約 1200 の高Q光共振器を作ることに成功した。しかし、共振器開発途上でいくつかの問題点が明らかになり、その後は、高反射率鏡で微小共振器を構成するオーソドックスな手法とファイバー端面を使った手法の両方で研究を進めた。特に、後者に対する工夫として、シングルモードファイバーの先に 1mm 程度のグレーデッドインデックス多モードファイバーを融着し、その端面の凹面加工を化学エッチングで行う方法を取り入れた。これにより共振器の

更なる小型化を目指している。
類似研究としては、米国のカリフォルニア工科大学やドイツのマックスプランク研究所などで進められており、既に様々な成果があがっている。彼らの後塵を拝していることになるが、当グループとしては、彼らの道具立てとは異なり、より高集積化が可能なファイバー端面を利用した光微小共振器の開発に今後力を入れていく予定である。

B-2) フォトニック結晶による単一原子観測
中性原子と光子を用いた量子情報処理システムを開発する上で、各種デバイスの集積化は大きな課題となっている。これまで原子に関してはアトムチップと呼ばれる基板デバイスによって集積化が図られている。いっぽう光に関してはフォトニック結晶(PhC)とよばれる光回路チップの研究が、近年おもに産業分野で注目を集めている。我々はアトムチップとPhC を統合することで、全デバイスの集積化が可能であると考えている。本研究の目的は、中性原子との光結合に適した PhC 共振器を開発し、量子操作の予備段階として単一原子観測を行うことである。
現在のところ高 Q 値 PhC 共振器の共鳴波長は通信帯領域に限られている。そこで我々はまず、ルビジウム原子の通信帯波長遷移とPhC 共振器を用いた単一原子観測が実現可能であることを理論的に示した。通信帯波長を用いることは量子情報の伝送という観点で非常に有利である。また従来の高 Q 値 PhC 共振器は、基板内部に光を蓄えているため、相互作用は減衰したエバネッセント光を介さなくてはならず、原子と光子の強結合を阻んでいた。我々は、従来型共振器の中心に線形のエアスロットを導入することにより、高い Q 値を維持しつつ相互作用領域の電場強度を著しく高めることに成功した(Yamamoto et al, Optics Express, **16**, 13809 (2008))。このエアスロット共振器は原子-光子結合に適しているばかりでなく、微小センサや低閾値レーザー等の産業デバイスへの応用も可能であり、今のところ他に類似研究はみあたらない。

B-3) 単一原子観測に向けたナノファイバーリング共振器の作製
近年、ナノファイバー中の伝播モードと中性原子の相互作用に関する研究が盛んに行われている。ナノファイバーを用いると、ファイバーからのエバネッセント光のしみだしが原子の吸収断面積とほぼ等しいため、一原子と一光子を強く結合させることができる。このナノファイバーを用いた共振器を作製すれば、たとえ Q 値が低くても共振器量子電気力学実験が実現できる。特にナノファイバー共振器は、構造上、光ファイバー、光結合器、共振器が一体となっており、原子を用いた量子状態の生成、操作、伝送といった、量子情報通信への応用に適したデバイスであると考えられる。
今回、このナノファイバー共振器の作製を行った。ナノファイバーは、通常の光ファイバーをセラミックヒーターに入れ加熱し両端を引っ張ることで作製する。ナノファイバー共振器は、ナノファイバーをリング状に丸め、ファイバー同士を接触させることで作製する。片方のファイバーからもう片方のファイバーへとモードが結合するようになると、リング部分を共振器として用いることができる。今回はナノファイバーの径が 400nm 程度、透過率は 80%のものを作製した。半導体レーザー波長を掃引するスペクトル測定により、ナノファイバーリング共振器の Q 値は 40000 と見積もられた。
ナノファイバーを使った類似研究は、主にフォトニック結晶(導波路)や半導体マイクロキャビティへの光結合などに広く使われているが、単一原子観測を目指したナノファイバーリング型共振器という視点で研究しているグループはあまり聞いたことはない。

C) 冷却原子による量子情報処理

C-1) ボース凝縮体を用いたコヒーレンスのホログラフィク多重保存
近年、ライトストレージや DLCZ 法に基づく量子状態生成など、原子の基底状態コヒーレ

ンスと光子を高効率で変換する技術の研究が盛んに行われている。しかし、これまでの実験では 1 つの原子集団に 1 モードのコヒーレンスしか記録することができなかった。本研究では、古典情報記録に用いられるホログラフィックメモリの原理を応用し、1 原子集団に多モードのコヒーレンスを同時に保存できる実験スキームを提案した。また、ボース凝縮体と超放射ラマン散乱を用いてこの原理を古典領域（光子数～10^4 程度）で実験的に検証した。結果、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した。変換効率は 70%以上、コヒーレンス時間は 120 マイクロ秒であった (Yoshikawa et al, Phys. Rev. Lett, **99**, 220407 (2007))。

光の持つ量子情報を原子に転写し読み出す研究は、米国のハーバード大学をはじめとして日本でも東工大などで精力的に進められている。しかし、BE 凝縮体に量子情報を多重保存するという研究は、当グループだけしか行っていないと思われる。

C-2) 光双極子トラップ中ボース凝縮体の集団コヒーレンス

当グループでは、ボースーアインシュタイン凝縮体(BEC)における集団励起状態を用いた量子情報処理の研究を行っている。原子集団中に生成した集団コヒーレンスの長寿命化は、量子ゲート操作、量子中継などを行うための重要な課題である。現在熱原子気体で報告されているコヒーレンス時間は 10 μs 程度であり、自由空間中の BEC でも 140 μs 程度である。我々は光双極子トラップに捕獲した BEC を用いることにより、超放射領域での原子の集団コヒーレンスの長寿命化に成功した。

集団励起状態を用いた応用実験では原子集団の空間的な形状が重要となる。そこで波長 974 nm の半導体レーザーを 2 本浅い角度で交差させ、葉巻型の交差型光双極子トラップを形成し実験に用いた。光双極子トラップに捕獲した BEC に対して共鳴線から十分離調を取った書き込み光を照射し、BEC に超放射領域での集団コヒーレンスを生成する。時間間隔を置いた読み出し光によって原子コヒーレンスを光に変換することにより集団コヒーレンスの緩和を観測する。本研究では原子気体を用いた実験の中でもっとも長い 500μs のコヒーレンス時間を得られた。

C-3)強度相関法による冷却原子の温度評価

1956 年にハンバリーｰブラウンとトゥイスが光の強度相関実験を行って以来、強度相関測定法は現代の量子光学実験では欠かせない手段となっている。最近では冷却原子におけるフェルミオンとボソンの統計的性質の違いも強度相関測定法を用いて観測された。当グループでは冷却原子と光子の間の強い相互作用を用いた量子情報ネットワークの研究を行っている。このために原子を十分冷却しておくことが必要であり、原子集団の温度の定量的な評価が重要になってくる。我々は、光ファイバーを用いた強度相関測定法により原子集団の簡便な温度評価の実験を行った。

十分光量を落とした冷却原子集団からの散乱光を光ファイバーにイメージングし、ビームスプリッターで分岐した後、二つの単一光子検出器を用いて同時計測実験を行う。この際同時計測の確率は冷却原子集団の量子統計性を反映しバンチング効果を示す。バンチング効果は原子の運動による拡散で緩和するため緩和時間を測定することにより、原子集団の温度評価を行うことができる。この手法で得られた温度は 56±1μK となり、広く用いられる時間飛行測定法で得られた測定結果 65±6μK と良い一致が得られた。

さらに得られた強度相関信号を注意深く解析したところ、ラビ周波数で振動している成分が含まれることが判明し、それを確認するための実験条件を最適化して測定したところ、$g^{(2)}(0)=2$という理論通りの結果が実験的にも得られただけでなく、冷却原子集団のドップラー広がりによって決まるコヒーレント散乱光成分による 3 マイクロ秒の緩和時間を示す信号の上に、原子の自然放出レート程度で速く緩和する減衰振動を観測した。これらのことから、観測した強度相関信号 $g^{(2)}(\tau)$ は、コヒーレントな散乱とインコヒーレントな散乱の成分を含み、これらの成分間の干渉効果で振動が現れると解釈することができる。

この研究は非常に古く、50 年以上も前から研究され尽くしている。しかし、当時の実験装置で得られる情報は限られており、実際に理論通りの結果($g^{(2)}(0)=2$)は得られたことはなかった。今回、最新の実験装置を細心の注意を払って使うことで、理論通りの結果を得ただけでなく、新たな知見も得ることができた。このようなスタンスで研究しているグループはあまり例を聞いたことがない。

(2)研究成果の今後期待される効果

当グループは、冷却されたルビジウム原子気体、およびそのボース凝縮体を用いて、主に量子情報処理に関する「原理検証」型の研究を進めてきた。結果としての研究成果は、当初の目標には届かず、かなり限られたものとなってしまったが、それでもボース凝縮体のコヒーレンスや原子と光との基礎的な相互作用に関する理解はより深まったものと思われる。これらの知見は、純粋な科学的興味という人間固有の本能としての知識欲を満足させるという点で、社会的には意義のあるものと考える。また、科学技術関係への波及効果としては、原理検証実験の困難さの評価から、実用に供するために克服しなければならない課題が明らかにされたものと考える。

今後は、当該研究で得られた成果のうち、より基礎的な方向に向かう研究、たとえば、極低温原子波ビーム(原子波レーザー)の開発や多重量子メモリーの研究などに力を入れていきたい。その一方で、今回の研究期間中に得られた結果をもとに、それらを現実的な応用に結びつける研究にも着手する予定である。具体的には、ファイバーを利用した微小共振器の集積化や共振器効果を使った単一光子源開発などである。そして後者に関しては、中性原子気体ではなく、より取り扱いの容易な固体中にドープされた発光体などを利用することになるだろう。

また、前項の C-3) の例にあるような古く研究し尽くされたかにも思われる研究対象でも、現代の技術を使えばそこからはまだまだ新しい興味深い知見が得られるという事実が、今回の研究プロジェクトの副産物として得られた。このような「故きを温ねて新しきを知る」というタイプの研究も、一つの研究ジャンルとなりうることを実証した点は、今後、科学技術にたずさわる人々の精神的な支えになるかもしれない。

3．5 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ーの研究(熊本大学 光永グループ)

(1)研究実施内容及び成果

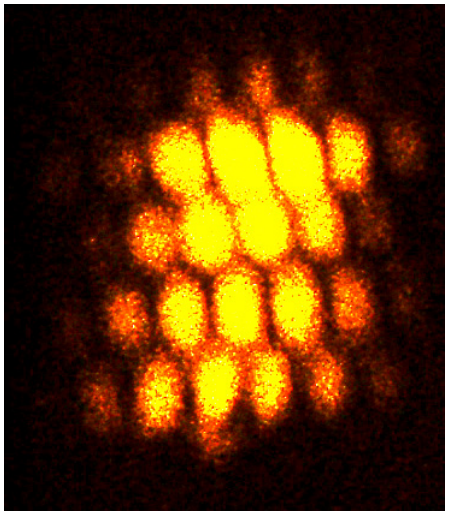
我々の研究の目的は、「ラムダ型3準位系のサブレベルコヒーレンスに基づく種々の非線形光学現象の基礎研究を実験、理論両面から統一的に行い、将来的な量子メモリー実現に役立てる」ということであった。この目的に基づき、我々は、原子系のサブレベルコヒーレンスをフルに活用した、量子情報処理技術への応用の可能性を、基礎物理の立場から模索してきた。

まず、初年度(H16 年度、2004 年度)は、その量子メモリー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。(Phys. Rev. A71, 043817 (2005))Na 原子に対向するポンプビームを入射すると、リング状のアンチストークス光が発生し(右図参照)、その鏡像位置にある 2 点の時間波形は強い相関を持つ。相関時間は 0.5μs と測定された(右図参照)。このような 2 光子が量子相関を持つか、あるいはスクイーズド光として利用できるかが今後の焦点となった。

また、量子干渉効果の効率的な測定法も開発した。Coherent Raman Beat (CRB)と呼ばれる手法で、試料に入射した probe、coupling 光の一方の周波数を突然シフトすることで、透過光からビート信号が観測される。この信号の減衰を測定することで、量子メモリーの記録時間に相当する、サブレベルコヒーレンス緩和時間を見積もることができる。(J. Opt. Soc. Am. B22, 1105 (2005))

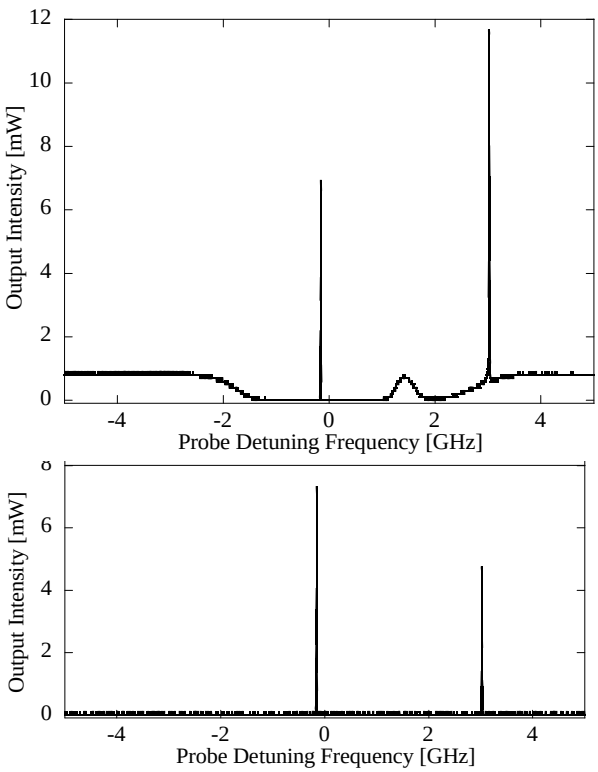
さらに、このような量子干渉効果を解析する際に、(今まで無視されてきた)誘導ラマン散乱が重要な役割を果たし、これにより、従来の電磁誘導透過(EIT)の解釈にも変更が余儀なくされることが明らかになってきた。

2005 年度 (H17 年度)はノンコーリニアな複数のレーザービームをラムダ型3準位系に照射して起こる、ハニーコム型の回折信号、電磁誘導回折の観測を行い、その解析をおこなった。(Opt. Lett. 30, 2004 (2005)) (右図参照) このような回折においても、サブレベルコヒーレンスは重要な役割を果たし、単に励起光と同じ周波数の光を回折するのみならず、誘導ラマン散乱(SRS)によるストークスとアンチストークス光の発生が重要になることを明らかにした。さらに、このような SRS と電磁誘導透過(EIT)が同時に存在するようなシステムにおいて、その競合関係がどうなっているかを理論的実験的に解析した。(Phys. Rev. A73, 013807 (2006))



2006年度 (H18年度)は、対向ポンピングの場合に起こる、4光波によるパラメトリック増幅と発振を理論的、実験的に解析し、時間相関を持った4光波の観測、4つ子の光子発生の可能性に関して検討した。対向ポンピングの場合、mirrorless cavity と呼ばれるフィードバック効果により、共振器なしでも強い発振に至る。特に、ナトリウム蒸気の系の場合は、オフアクシスに照射される4本のビーム(ストークス光、アンチストークス光)が同時に成長し、最終的には発振に至ることが実験的に示された。(JOSA B25, 40 (2008))

2007年度 (H19 年度)も、ラムダ型3準位系における量子干渉効果の発現メカニズムの解明を行った。ナトリウム原子蒸気を用いて、一方向ポンピングの場合と対向ポンピングの場合に、発生光の特性を調べた。このような4光波パラメトリック発振は、楕円ビームを用いる方法、あるいは、シード光を入射する方法の2点で発振が確認されている(Opt. Lett. Vol.32, 1111 (2007))。これら4本の出力光は、パラメトリックに強く結合しており、信号強度に強い相関が見られる。4本の時間波形の古典的相関は確認されているが、まだ、量子相関の確認には至っていない。また、電磁誘導透過(EIT)とパラメトリック増幅、発振の関連について、詳細な解析を行った。入射光である、カプリング光とプローブ光が2光子共鳴条件を満足する場合に、従来のEIT理論では説明できない、高いパラメトリック増幅が観測された。(図参照、上図はプローブ光の透過スペクトルで、2光子共鳴条件を満たす2つの周波数において、高い利得が観測されている。下図は、同時に発生するアイドラー光強度をプローブ周波数でプロットしたもので、プローブ光とアイドラー光は、同時に、しかも同程度のパワーで発生していることがわかる。)これは、原子密度が高く、かつカプリング光強度が強い場合にのみ観



測され、逆に、従来のEIT理論は、原子密度が低い場合の限定的な理論ということができる。理論的には、3モード3準位型の Liouville-Maxwell 連立方程式を解くことで、プローブ光、ストークス光に対する伝搬方程式を求め、その解析解から、実際にEIT媒質におけるパラメトリック増幅の挙動をある程度再現することができた（Phys. Rev. A78, 013809 (2008)）。

最終年度 2008 年度 （H20 年度）は、前年度得られた高いパラメトリック過程の高い増幅率を積極的に利用して、発生する信号光のための外部共振器を作り、この場合入力プローブ光がなくとも発振に到ることが確かめられた。ゲインが高いため、反射率90％のミラーを用いても発振を確かめることができた。もちろん、発振は共振器モードがポンプ光から発生するストークス光、あるいはアンチストークス光の周波数に一致するときのみ観測される。そのため、レーザー周波数を掃引する、あるいは、ピエゾ素子付きミラーを用いて外部共振器を掃引すると、共振器モードと発振周波数が一致するときのみに発振が観測された。ゲイン幅は数 MHz と非常に狭いため、共振器長のゆらぎにより、発振はかなり不安定になる。このため、出力パワーをピエゾ素子にフィードバックをかけることにより、アクティブな出力パワーの安定化を行い、所望の安定度で発振することを確かめた。これらの成果は、Opt. Lett. への論文投稿に向けて、現在執筆中である。

⑵研究成果の今後期待される効果

原子のラムダ型3準位系のサブレベルコヒーレンスを利用したさまざまな現象は、今後さらに発展し、応用も増えていくことが見込まれる。まず、超高分解であることを積極的に利用したコンパクト原子時計（原子腕時計）としての発展が期待される。これは、従来の原子時計がマイクロ波共振器を用いていたのに比べれば、はるかにコンパクトなサイズでのデバイス化が可能となるであろう。あるいは、高分解を利用した微小磁場の局所測定も期待できる。次に、パラメトリック発振を利用した高効率なサイドバンド光発生も考えられる。これは、従来の音響光学変調器等では、発生が難しかった高周波数（例えば Csを用いると9GHz）の高効率サイドバンド光発生が可能になり、この方面の応用も楽しみである。さらに、パラメトリック発振、増幅による光子対発生は、非古典光の発生からも興味が持たれる。従来、スクイーズド光発生や光子対発生、また、もつれ状態生成は、ほとんど固体結晶で行われるのが通常であったが、Na のような共鳴型の蒸気気体を用いることで、非常に効率の良い光子対発生が期待できる。また、これらのツインビームを用いた相対強度スクイージングにより、ショットノイズレベルを8dB 程下回るノイズの低減が報告されてきている。この分野の発展はまだしばらく続くと思われる。

3準位系の量子干渉効果、具体的には電磁誘導透明化（EIT）を用いた、スローライト（slow light）、さらには情報記録（古典光、非古典光）の分野も急速に発展している。我々の見出した EIT 媒質でのパラメトリック増幅によると、Na 蒸気により、市販のガラスセルを用いて、利得 100 を上回るような増幅が観測されている。クラマース・クローニッヒ関係式を用いれば、非常に鋭い屈折率勾配が期待され、従来の報告よりもさらに遅い群速度の光パルスが可能かもしれない。このような遅くなった（空間的には、セル長よりも十分短くなった）光パルスを、制御光を切ることにより、試料中に直接記録することは十分に可能であろう。この応用は、即、非古典光の情報記録、量子メモリーに直結していくはずである。さらに、前述のパラメトリック過程による非古典光発生と量子メモリーを結びつけることで、同じセル内において、非古典光発生と、その書き込み、読み出しが同時にできるようなシステムが期待できる。また、量子通信の分野では、原子蒸気のこのようなメモリー効果は、もつれ状態を延伸していくための量子中継器としての応用が期待されている。

§4 研究参加者

①NTT グループ（アルカリ金属を使った量子演算システムの開発）

	氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
○	清水富士夫	NTT 物性科学基礎研究所	リサーチプロフェッサー	超伝導アトムチップによる量子回路	H15.10～H21.3
	高柳英明	東京理科大学	教授	超伝導技術アドバイス	H15.10～H21.3
	向井哲哉	NTT 物性科学基礎研究所	主任研究員	超伝導アトムチップの設計	H15.10～H21.3
	目野誉喜	NTT AT	主任	アトムチップの製作加工	H15.10～H20.3
	Taro A. Eichler	NTT 物性科学基礎研究所	PD	超伝導アトムチップの実験	H15.10～H17.8
	Alexander Kasper	同上	PD	超伝導アトムチップの実験	H16.1～H18.7
	Christoph Hufnagel	ウイーン大学	大学院生	超伝導アトムチップの実験	H18.8～H21.3
	澤村英幸	NTT 物性科学基礎研究所	PD	超伝導アトムチップの実験	H20.4～H21.3
＊	山口美佐子	同上	チーム事務員	チーム内の事務処理	H15.11～H21.3

②電気通信大学　清水グループ
（アルカリ金属および希ガス原子を使った量子演算システムの開発）

	氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
○	清水富士夫	電気通信大学・レーザー新世代研究センター	共同研究員	アルカリ、希ガス原子による量子回路	H15.10～H21.3

	森永実	同上	助教	アルカリ、希ガス原子による量子回路	H15.10～H21.3
＊	佐藤 峰斗	東京工業大学 (JST)	大学院生 (研究補助員)	アルカリ原子による量子回路実験の補助	H17.8～H20.3
＊	藤田順一	電気通信大学 (JST)	学部生 (研究補助員)	実験室メンテナス業務	H18.7～H19.5
＊	奥平祥子	電気通信大学･レーザー新世代研究センター	研究補助員	研究データの収集、解析	H19.4～H21.3

③電気通信大学　中川グループ
（アルカリ金属を使った量子演算方法の開発）

	氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
○	中川　賢一	電気通信大学･レーザー新世代研究センター	准教授	アルカリ原子による原子回路	H15.10～H21.3
	堀越　宗一	同上	大学院生	アトムチップ上の BEC 干渉計	H15.10～H19.3
	鈴木　祐介	同上	大学院生	BEC 原子源の開発	H15.10～H17.3
	中川　悠輔	同上	大学院生	単一原子トラップを用いた量子情報処理	H16.4～H18.3
	小田　悠介	同上	大学院生	原子干渉計の開発	H16.4～H18.3
	江村　真史	同上	大学院生	アトムチップの開発	H17.4～H19.3
	後藤　亮彦	同上	大学院生	アトムチップの開発	H17.4～H19.3
	玉木嘉人	同上	大学院生	単一原子トラップを用いた量子情報処理	H18.4～H20.3
	豊永匡利	同上	大学院生	アトムチップ上の BEC を用いた量子情報処理	H18.4～H20.3
＊	Mark Sadgrove	同上	CREST 研究員	アトムチップ上の BEC を用いた量子情報処理	H18.7～H21.3
	関邨 哲雄	同上	大学院生	光双極子トラップを用いた原子操作	H19.4～H21.3
	福泉 美穂	同上	大学院生	Rydberg 原子を用いた量子情報処理	H19.4～H21.3

	杉江　宏太	同上	大学院生	アトムチップによる原子操作	H19.4～H21.3
	Sanjay Kumar	同上	大学院生	アトムチップによる原子操作	H19.10～H21.3
	Zhanzun Zuo	同上	PD	Rydberg 原子を用いた量子情報処理	H20.4～H21.3
	渡辺　智貴	同上	大学院生	Rydberg 原子を用いた量子情報処理	H20.4～H21.3
	加地　真英	同上	大学院生	光双極子トラップを用いた原子操作	H20.4～H21.3

④東京大学　久我グループ
（原子ボーズ凝縮体と光双極子ポテンシャルを使った原子量子回路の開発研究）

	氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
○	久我　隆弘	東京大学大学院・総合文化研究科	教授	光ポテンシャルを使った量子原子回路(総括)	H15.10～H21.3
	鳥井　寿夫	同上	准教授	量子操作のための冷却原子源の開発、ボース凝縮体のコヒーレンス、ホログラフィック量子メモリー	H15.10～H21.3
	吉川　豊	同上	助教	ボース凝縮体のコヒーレンス、フォトニック結晶による単一原子観測、ナノファイバーリング共振器の開発、ホログラフィック量子メモリー	H15.10～H21.3
	勝俣　啓	同上	大学院生	量子操作のための冷却原子源の開発	H15.10～H17.3
	芳士戸　和幸	同上	大学院生	量子操作のための冷却原子源の開発	H15.10～H17.3
	森田　充攻	同上	大学院生	原子を用いた量子メモリー	H15.10～H17.3
	村上　典靖	同上	大学院生	量子操作のための冷却原子源の開発	H16.4～H18.3
	室屋　海晴	同上	大学院生	マイクロ光共振器による単一原子の検出	H16.4～H21.3
	小木　詩織	同上	大学院生	量子操作のための冷却原子源の開発	H17.4～H20.3
	武者　敦史	同上	大学院生	量子操作のための冷却原子源の開発	H17.4～H19.3
	山本　高行	同上	大学院生	フォトニック結晶による単一原子観測	H17.4～H21.3
＊	中山　和之	同上	CREST 研究員	フォトニック結晶による単一原子観測、ボース凝縮	H18.4～H21.3

				体のコヒーレンス、ホログラフィック量子メモリー、強度相関法による冷却原子の温度評価	
	滝口　雅人	同上	大学院生	フォトニック結晶による単一原子観測、ナノファイバーリング共振器の開発	H18.4～H21.3
	田代　秀康	同上	大学院生	量子操作のための冷却原子源の開発	H18.4～H20.3
	多田　光洋	同上	大学院生	量子操作のための冷却原子源の開発	H18.4～H20.3
	松本　悠利	同上	大学院生	強度相関法による冷却原子の温度評価	H18.4～H20.3
	門田　雄介	同上	大学院生	量子操作のための冷却原子源の開発	H19.4～H21.3
	古西　一貴	同上	大学院生	量子操作のための冷却原子源の開発	H19.4～H21.3
	吉田　紅	同上	大学院生	量子操作のための冷却原子源の開発	H19.4～H19.9
	山陸　芳行	東京大学教養学部	学部生	ナノファイバーリング共振器の開発	H19.10～H20.3
	青木　貴稔	東京大学大学院・総合文化研究科	助教	量子操作のための冷却原子源の開発、ホログラフィック量子メモリー	H20.4～H21.3
	中村　裕之	同上	大学院生	量子操作のための冷却原子源の開発	H20.4～H21.3
	梅澤　孝太郎	東京大学大学院・理学系研究科	大学院生	量子操作のための冷却原子源の開発	H20.4～H21.3
	武村　尚友	同上	大学院生	量子操作のための冷却原子源の開発	H20.4～H21.3

⑤熊本大学　光永グループ
（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ーの研究）

	氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
○	光永正治	熊本大学大学院・自然科学研究科	教授	量子メモリーの研究	H15.10～H21.3
＊	本村　幸治	同上	CREST　研究員	量子干渉効果による高分解分光	H15.10～H18.5
＊	原田健一	同上	CREST　研究員	パラメトリック蛍光による相関光子発生	H15.10～H20.3
	田中知史	同上	大学院生	パラメトリック蛍光による相関光子発生	H15.10～H17.3

	塚本真由美	同上	同上	パラメトリック蛍光による相関光子発生	H15.10～H17.3
	上橋達也	同上	同上	量子干渉効果による高分解分光	H16.4～H18.3
	脇山彰	同上	同上	パラメトリック蛍光による相関光子発生	H16.4～H18.3
	緒方稔	同上	同上	冷却原子の光情報記録	H17.4～H19.3
	林暢仁	同上	同上	冷却原子の光情報記録	H18.4～H21.3
	森研二	同上	同上	パラメトリック蛍光による相関光子発生	H18.4～H20.3
	吉田啓之	同上	同上	量子干渉効果による高分解分光	H18.4～H20.3
	枝元　忠義	同上	同上	冷却原子の光情報記録	H19.4～H21.3
	奥間　惇治	同上	同上	パラメトリック蛍光による相関光子発生	H19.4～H21.3
	竹下　洋祐	同上	同上	量子干渉効果による高分解分光	H19.4～H21.3
	藤沢　晃彦	同上	同上	パラメトリック蛍光による相関光子発生	H20.4～H21.3

§5 招聘した研究者等

氏　名(所属、役職)	招聘の目的	滞在先	滞在期間
Mark Sadgrove (オークランド大学物理学科・研究助手)	研究打ち合わせ	電気通信大学 レーザー新世代研究センター・中川研究室	H18.2.20 ～　H18.2.25

§6 成果発表等

(1)原著論文発表　(国内(和文)誌　2 件、国際(欧文)誌　27 件)

1. Y. Yoshikawa, T. Sugiura, Y. Torii, and T. Kuga, “Observation of superradiant Raman scattering in a Bose-Einstein condensate”, Phys. Rev. A 69, 041603 (2004).
2. K. Motomura, T. Koshimizu, K. Harada, H. Ueno and M. Mitsunaga, “Subkilohertz linewidths measured by heterodyne-detected coherent population trapping in sodium vapor”, Opt. Lett. 29, 1141 (2004).
3. 中川賢一,「原子干渉計を用いた精密計測および量子情報処理」,レーザー研究,レーザー研究 Vol. 32, No.7, 457-462 (2004).
4. V. I. Balykin, K. Hakuta, Fam Le Kien, J. Q. Liang, and M. Morinaga, “Atom trapping and guiding with a subwavelength-diameter optical fiber”, Phys. Rev. A 70 011401 (2004).
5. M. Morinaga, “Focusing ground-state atoms with an electrostatic field”, Applied Physics B, Vol 79, 679 (2004).
6. Fujio Shimizu, “Scalable Quantum Computer with Optical Lattices”, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 43, No. 12, 2004, pp.8376-8382.

7. Hilmar Oberst, Dimitrii Kouznetsov, Kazuko Shimizu, Jun-ichi Fujita and Fujio Shimizu, “Fresnel diffraction mirror for an atomic wave”, Phys. Rev. Lett. 94, 013203 (2005).
8. Y. Yoshikawa, Y. Torii, and T. Kuga, “Superradiant Light Scattering from Thermal Atomic Vapors”, Phys. Rev. Lett. 94, 083602 (2005).
9. K. Harada, K. Motomura, T. Koshimizu, H. Ueno, and M. Mitsunaga, “Coherent Raman beats from dark states”, J. Opt. Soc. Am. B22, 1105 (2005).
10. Hilmar Oberst, Yoshihisa Tashiro, Kazuko Shimizu, and Fujio Shimizu, “Quantum reflection of He* on silicon”, Phys. Rev. A, 71, 052901 (2005).
11. K. Harada, S. Tanaka, T. Kanbashi, M. Mitsunaga, and K. Motomura, “Electromagnetically induced diffraction in sodium vapor”, Opt. Lett. 30, 2004 (2005).
12. K. Nakagawa, Y. Suzuki, M. Horikoshi, and J. B. Kim, “Simple and efficient magnetic transport of cold atoms using moving coils for the production of Bose-Einstein condensation”, Appl. Phys. B 81, 791-794 (2005).
13. K. Motomura, M. Tsukamoto, A. Wakiyama, K. Harada and M. Mitsunaga, “Observation of correlated anti-Stokes emissions by multiwave mixing in sodium vapor”, Phys. Rev. A71, 043817 (2005).
14. Munekazu Horikoshi, Ken’ichi Nakagawa, “Atom Chip based fast production of Bose-Einstein condensate”, Appl. Phys. B 82, 363-366 (2006).
15. K. Harada, T. Kanbashi, M. Mitsunaga, and K. Motomura, “Competition between electromagnetically induced transparency and stimulated Raman scattering”, Phys. Rev. A73, 013807 (2006).
16. Munekazu Horikoshi, Ken’ichi Nakagawa, “Dephasing due to atom-atom interaction in a waveguide interferometer using a Bose-Einstein condensate”, Phys. Rev. A 74, 031602(R) (2006).
17. K. P. Nayak, P. N. Melentiev, M. Morinaga, Fam Le Kien, V. I. Balykin, and K. Hakuta, “Optical nanofiber as an efficient tool for manipulating and probing atomic Fluorescence”, Optics Express, 15, 5431-5438, (2007).
18. K. Harada, M. Ogata, and M. Mitsunaga, “Four-wave parametric oscillation in sodium vapor by electromagnetically induced diffraction”, Opt. Lett. 32, 1111 (2007).
19. T. Mukai, C. Hufnagel, A. Kasper, T. Meno, A. Tsukada, K. Semba, and F. Shimizu, “Persistent Supercurrent Atom Chip”, Phys. Rev. Lett. 98, 260407 (2007).
20. Mark Sadgrove, Munekazu Horikoshi, Tetsuo Sekimura, and Ken’ichi Nakagawa, “Rectified momentum transport for a kicked Bose-Einstein condensate”, Phys. Rev. Lett. 99, 043002 (2007).
21. Mark Sadgrove, Munekazu Horikoshi, Tetsuo Sekimura and Ken’ichi Nakagawa, “Coherent control of ballistic energy growth for a kicked Bose-Einstein condensate”, Eur. Phys. J. D 45, 229-234 (2007).
22. Munekazu Horikoshi and Ken’ichi Nakagawa, “Suppression of dephasing due to a trapping potential and atom-atom interactions in a trapped-condensate interferometer”, Phys. Rev. Lett. 99, 180401 (2007).
23. Yutaka Yoshikawa, Kazuyuki Nakayama, Yoshio Torii, Takahiro Kuga, “Holographic storage of multiple coherence gratings in a Bose-Einstein condensate”, Phys. Rev. Lett., 99(22), 220407 (2007) .
24. K. Harada, H. Hayashi, K. Mori, and M. Mitsunaga, “Four-wave parametric oscillation: theory and observations”, J. Opt. Soc. Am. B25, 40 (2008).
25. 中川賢一、堀越宗一:アトムチップ－基板上で冷却原子を操作する－、光学、第 37 巻 第 7 号、391-396 (2008).
26. K. Harada, K. Mori, J. Okuma, N. Hayashi, and M. Mitsunaga, “Parametric amplification in an electromagnetically-induced-transparency medium”, Phys. Rev. A78, 013809 (2008).

27. T. Yamamoto, M. Notomi, H. Taniyama, E. Kuramochi, Y. Yoshikawa, Y. Torii, and T. Kuga, “Design of a high-Q air-slot cavity based on a width-modulated line-defect in a photonic crystal slab”, Optics Express 16, 13809 (2008).
28. M. Morinaga, “Circular Magneto-Optical Trap for Neutral Atoms”,J. Phys. Soc. Jpn. 77, 104402 (2008).
29. Mark Sadgrove, Sanjay Kumar, and Ken’ichi Nakagawa, “Enhanced factoring with a Bose-Einstein condensate”, Phys. Rev. Lett. 101, 180502(2008).

(2)学会発表(国際学会発表及び主要な国内学会発表)

① 招待講演　　(国内会議　5 件、国際会議　7 件)

1. Nakagawa, Munekazu Horikoshi , Yusuke Suzuki, Yusuke Oda, Yusuke Nakagawa, “ Coherent manipulation of cold atoms and its applications”, International Seminar on Atomic Processes, Hayama, 2005/1/21-23
2. 清水富士夫,「原子を用いた量子計算」,第 12 回量子情報技術研究会,NTT 厚木研究開発センタ,QIT2005-22,2005/5/13
3. 久我隆弘,「AMO と時間・周波数極限」, AMO 討論会,理研,2005/6/18
4. Tetsuya Mukai, “Quantum computation with atoms: practical schemes and problems”, Post-COE mini workshop on cold atoms: fermion and optical lattice, 2006/2/15
5. 中川賢一、「アトムチップによるボース凝縮原子の操作と応用」、AMO 討論会、東大駒場、2006/6/16
6. Fujio Shimizu, “Quantum computer with optical lattices”, Japan-US Seminar on Quantum Information Science, Mauii, Hawaii, 2006/10/16-19
7. Ken’ichi Nakagawa, Munekazu Horikoshi, “Atomic interferometer on an atom chip”, International Conference on Lasers and Nanomaterials (ICLAN), Kolkata, India, 2006/11/30-12/2
8. Fujio Shimizu, Tetsuya Mukai, Christoph Hufnagel, “Manipulation of cold atoms on a superconductive atom chip”, BOSE-EINSTEIN CONDENSATION 2007- Frontiers in Quantum Gases - Sant Feliu, Spain, 2007/9/15-20
9. Y. Torii, “The magic of Dicke superradiance in a Bose-Einstein condensate: from matter-wave amplification to single-photon storage”, Asian CORE Symposium on Advanced Laser Spectroscopy , Kobe University, 2007/9/26
10. 向井哲哉,「超伝導アトムチップ」,電気通信大学・東京農工大学　第4回合同シンポジウム「コヒーレント光科学とナノ未来材料」,東京農工大小金井キャンパス,2007/12/1
11. 向井哲哉,「アトムチップ」, 第四回量子情報未来テーマ開拓研究会, 沖縄県・ホテルサンライズ知念, 2008/9/10
12. Fujio Shimizu “Quantum reflection of atoms from surfaces”, IFRAF Symposium on Atom Waves and Statistics, Symposium en l’honneur du Fujio Shimizu, 2008/9/12

② 口頭発表　　(国内会議　83 件、国際会議　10 件)

1. 吉川豊, 鳥井寿夫, 久我隆弘,「非凝縮原子気体におけるラマン散乱型超放射」,日本物理学会 2004 年秋季大会,青森大学,12pTF-9,2004/9/12
2. 森田充功, 室屋海晴, 吉川豊, 鳥井寿夫, 久我隆弘,「ボース凝縮体における超微細準位間コヒーレンスの測定」,日本物理学会 2004 年秋季大会,青森大学,13aTF-1,2004/9/13
3. 堀越宗一,「アトムチップを用いたボーズ凝縮体生成 II」,日本物理学会 2004 年秋季大会,青森大学,13aTF-12,2004/9/13
4. 芳士戸和幸, 勝俣啓, 村上典靖, 吉川豊, 鳥井寿夫, 久我隆弘,「ガラス基板上での気体原子ボーズ凝縮体の生成」,日本物理学会 2004 年秋季大会,青森大

学,13aTF-13,2004/9/13
5. 中川賢一(堀越宗一),「原子干渉計を用いた重力加速度測定」,日本物理学会 2004 年秋季大会,青森大学,13aTF-2,2004/9/13
6. 清水　富士夫、向井　哲哉,「中性原子を使った二重光格子量子計算機」,日本物理学会 2004 年秋季大会,青森大学,13aTF-5,2004/9/13
7. 向井　哲哉、Alexander Kasper、Taro Eichler,「ボーズ凝縮から光格子への不均一パターン充填」,日本物理学会 2004 年秋季大会,青森大学,13aTF-6, 2004/9/13
8. Alexander Kasper、Taro Eichler、向井　哲哉、堀越　宗, “Magnetic microtraps”,日本物理学会 2004 年秋季大会,青森大学,13aTF-7,2004/9/13
9. Taro Eichler、Alexander Kasper、向井　哲哉、堀越　宗一、清水　富士夫, “Superconducting microtraps for neutral atoms in a cryogenic environment”,日本物理学会 2004 年秋季大会,青森大学,13aTF-8,2004/9/13
10. 勝俣啓, 村上典靖, 芳士戸和幸, 吉川豊, 鳥井寿夫, 久我隆弘,「二次元磁気光学トラップを用いた超低速原子線の生成」,日本物理学会 2004 年秋季大会,青森大学,13pTF-13,2004/9/13
11. 田中知史、原田健一、塚本真由美、上橋達也、脇山彰、本村幸治、光永正治,「EIG を用いた光パルス伝搬の制御」,日本物理学会 2004 年秋季大会,青森大学,14aTF-12,2004/9/14
12. 塚本真由美、原田健一、田中知史、脇山彰、上橋達也、本村幸治、光永正治,「量子干渉効果による量子メモリー」,日本物理学会 2004 年秋季大会,青森大学,14pTF-7,2004/9/14
13. 清水　富士夫,「二重光格子量子計算機」,量子情報合同ワークショップ,青森県、南部屋,2004/9/17
14. 清水　富士夫、向井　哲哉、Taro Eichler、Alexander Kasper,「冷却原子を用いた量子計算機」,第13回量子情報技術研究会,京都大学,2004/12/6
15. 清水　富士夫,「中性原子を用いた量子情報処理の研究」,量子情報処理シンポジウム,一橋記念講堂,2004/12/21
16. 向井　哲哉、清水　富士夫, “Quantum computation　with neutral atoms”, 日本-欧州先端科学セミナー,2005/3/12-18
17. 小田裕介,「原子干渉計を用いた重力加速度測定 II」,日本物理学会第 60 回年次大会(2005 年春),東京理科大学野田キャンパス,24aYE-4,2005/3/24
18. 澤木亮太, 森田充功, 吉井豊, 鳥井寿夫, 久我隆弘,「光トラップポテンシャルの断熱変形を用いたボース凝縮体の動的制御」,日本物理学会第 60 回年次大会(2005 年春),東京理科大学野田キャンパス,25pYE-12,2005/3/25
19. 森田充功, 吉川豊, 鳥井寿夫, 久我隆弘,「ボース凝縮体における 2 光子ラマン過程を使った光メモリー」,日本物理学会第 60 回年次大会(2005 年春),東京理科大学野田キャンパス,25pYE-13,2005/3/25
20. 堀越宗一,「アトムチップを用いたボーズ凝縮体生成 III」,日本物理学会第 60 回年次大会(2005 年春),東京理科大学野田キャンパス,25pYE-14,2005/3/25
21. 鈴木裕介,「光双極子トラップを用いたボーズ凝縮体の操作」,日本物理学会第 60 回年次大会(2005 年春),東京理科大学野田キャンパス,25pYE-15,2005/3/25
22. 室屋海晴, 吉川豊, 鳥井寿夫, 久我隆弘,「光ファイバー端面を用いた光微小共振器の開発」,日本物理学会第 60 回年次大会(2005 年春),東京理科大学野田キャンパス,26pYE-13,2005/3/26
23. 中川悠輔,「単一原子トラップ」,日本物理学会第 60 回年次大会(2005 年春),東京理科大学野田キャンパス,26pYE-14,2005/3/26
24. 脇山彰、塚本真由美、原田健一、田中知史、上橋達也、本村幸治、光永正治,「Na 蒸気における相関光子対の発生」,日本物理学会第 60 回年次大会(2005 年春),東京理科大学野田キャンパス,27pYE-8,2005/3/27

25. K. Nakagawa, M. Horikoshi, “Towards coherent atom optics in an atom waveguide”, 14th International Laser Physics Workshop, Kyoto, 6.1.4,2005/7/4- 8
26. M. Mitsunaga, K. Harada, T. Kanbashi, A. Wakiyama, and K. Motomura, “Electromagnetically induced transparency: Is it really true?”, 14th International laser physics workshop (LPHYS’05) at Kyoto, 5.6.4, 2005/7/5
27. M. Horikoshi, Y. Suzuki, K. Nakagawa, “Fast and Efficient Production of Bose-Einstein Condensate Atoms based on an Atom Chip”, International Quantum Electronics Conference 2005, Tokyo ,QFG1-1,2005/7/11-15
28. K. Harada, S. Tanaka, T. Kanbashi, A. Wakiyama, M. Mitsunaga, and K. Motomura, “Electromagnetically induced diffraction in Na vapor”, IQEC/CLEO-PR 2005, Tokyo ,QThL2-2 , 2005/7/14
29. 中川悠輔、中川賢一,「磁気光学トラップによる 単一原子トラップⅡ」,日本物理学会 2005 年秋季大会,同志社大学,19aWA-2,2005/9/19
30. 堀越宗一、江村真史、中川賢一,「磁場ガイド中のボース凝縮体の操作」,日本物理学会 2005 年秋季大会,同志社大学,19aWA-3,2005/9/19
31. A. Kasper、T. Eichler、T. Mukai、M.Horikoshi、F. Shimizu, “Superconducting wires for magnetic micro-traps”, 日本物理学会 2005 年秋季大会, 同志社大学,19aWA-4,2005/9/19
32. 村上典靖, 吉川豊, 鳥井寿夫, 久我隆弘,「ガラス基板上での気体原子ボース凝縮体の生成 II」,日本物理学会 2005 年秋季大会,同志社大学,19aWA-5,2005/9/19
33. 小田悠介、後藤亮彦、中川賢一,「原子干渉計を用いた重力加速度測定Ⅲ」,日本物理学会 2005 年秋季大会,同志社大学,20aWA-14 ,2005/9/20
34. 上橋達也、原田健一、脇山彰、緒方稔、本村幸治、光永正治,「ナトリウム蒸気における電磁誘導回折」,日本物理学会 2005 年秋季大会,同志社大学,20aWA-4,2005/9/20
35. 原田健一、上橋達也、脇山彰、緒方稔、本村幸治、光永正治,「EIT と誘導ラマン散乱の競合」,日本物理学会 2005 年秋季大会,同志社大学,20aWA-5,2005/9/20
36. 山本高行, 室屋海晴, 吉川豊, 鳥井寿夫, 久我隆弘,「フォトニック結晶微小共振器を用いた Cavity-QED 実験の提案」,日本物理学会 2005 年秋季大会,同志社大学,20pWA-10,2005/9/20
37. 緒方稔、上橋達也、脇山彰、原田健一、本村幸治、光永正治,「量子干渉効果を用いたサイドバンド光発生」,2005 年物理学会九州支部例会,Ba-2,2005/12/10
38. 向井哲哉、カスパアレクサンダー、清水富士夫,「光で制御する中性原子量子計算機」,日本物理学会第 61 回年次大会(2006 年春),松山大学,29pTA-10,2006/3/26
39. 後藤亮彦、豊永匡利、中川賢一,「フェルミ縮退に向けての ^{40}K と ^{87}Rb の同時トラップ」,日本物理学会第 61 回年次大会(2006 年春),松山大学,28aRE-11,2006/3/28
40. 中川悠輔、中川賢一,「単一 ^{87}Rb 原子の双極子トラップ」,日本物理学会第61回年次大会(2006 年春),松山大学,28aRE-12,2006/3/28
41. 鳥井寿夫,「コヒーレント原子波光学」,日本物理学会第 61 回年次大会(2006 年春),松山大学,28pSA-8,2006/3/28
42. 江村真史、堀越宗一、中川賢一,「電場を用いたアトムチップによるボーズ凝縮体の操作」,日本物理学会第 61 回年次大会(2006 年春),松山大学,29pTA-11,2006/3/29
43. 堀越宗一、中川賢一,「磁場ガイド BEC 干渉計における位相シフトとコントラスト低下」,日本物理学会第 61 回年次大会(2006 年春),松山大学,29pTA-12,2006/3/29
44. 緒方稔、上橋達也、脇山彰、原田健一、本村幸治、光永正治,「量子干渉効果を用いたサイドバンド光発生」,日本物理学会第 61 回年次大会(2006 年春),松山大学,30aSA-3,2006/3/30
45. 中山和之, 吉川豊, 鳥井寿夫, 久我隆弘,「光トラップポテンシャルの断熱変形を用いたボース凝縮体の動的制御 II」,日本物理学会 2006 年秋季大会,千葉大学,24aRB-4,2006/9/24

46. 向井哲哉、カスパアレクサンダー、清水富士夫,「超伝導永久電流によるチップ上の磁場トラップ」,日本物理学会 2006 年秋季大会,千葉大学,24pWD-1,2006/9/24
47. 岩井滋人、徳永英司、田中正規、光永正治、小林孝嘉,「希土類イオン Eu3+ドープ結晶の非線形吸収分光」,日本物理学会 2006 年秋季大会,千葉大学,25aPS-48,2006/9/25
48. 光永正治、本村幸治、原田健一、緒方稔、林暢仁、吉田啓之、森研二,「電磁誘導回折による 4 光波パラメトリック増幅I: 理論的考察」,日本物理学会 2006 年秋季大会,千葉大学,26aRB-5,2006/9/26
49. 森研二、本村幸治、原田健一、緒方稔、吉田啓之、林暢仁、光永正治,「電磁誘導回折による 4 光波パラメトリック増幅II: 実験と観測」,日本物理学会 2006 年秋季大会,千葉大学,26aRB-6,2006/9/26
50. 玉木嘉人、Mark Sadgrove、中川悠輔、中川賢一,「単一原子トラップを用いた単一光子源」,日本物理学会 2007 年春季大会,鹿児島大学,19aXK-10,2007/3/19
51. 森永実,「層状構造による Casimir-Polder 力の制御」,日本物理学会 2007 年春季大会,鹿児島大学,19pXK13,2007/3/19
52. 南聖子, 森永実, Hilmar Oberst, 清水和子,「固体表面における超低速準安定状態ヘリウム原子ビームの反射」,日本物理学会 2007 年春季大会,鹿児島大学,19pXK15,2007/3/19
53. 堀越宗一、中川賢一,「長いコヒーレンス時間を持った調和ポテンシャル中での BEC 干渉計」,日本物理学会 2007 年春季大会,鹿児島大学,20aXK-10,2007/3/20
54. Mark Sadgrove, 堀越宗一、関邨哲雄、中川賢一, “Shift in fundamental quantum resonance for atoms in a pulsed optical lattice”, 日本物理学会 2007 年春季大会,鹿児島大学,20aXK-11,2007/3/20
55. 武者敦史, 中山和之, 吉川豊, 鳥井寿夫, 久我隆弘,「ボース凝縮体を用いた単一光子発生」,日本物理学会 2007 年春季大会,鹿児島大学,20aXK-12,2007/3/20
56. フフナーゲルクリストフ、向井哲哉、清水富士夫, “Towards achieving a BEC with a persistent supercurrent atom chip”, 日本物理学会 2007 年春季大会,鹿児島大学,20aXK-8,2007/3/20
57. 中川賢一、江村真史,「電場を用いたアトムチップによるボーズ凝縮体の操作 II」,日本物理学会 2007 年春季大会,鹿児島大学,20aXK-9,2007/3/20
58. 山本高行, 納富雅也, 谷山秀昭, 倉持栄一, 吉川豊, 鳥井寿夫, 久我隆弘,「単一原子検出用フォトニック結晶共振器の設計」,日本物理学会 2007 年春季大会,鹿児島大学,20pXK-8,2007/3/20
59. 岩井滋人、徳永英司、田中正規、光永正治、小林孝嘉,「希土類イオン禁制遷移の非線形吸収分光」,日本物理学会 2007 年春季大会,鹿児島大学,20pZC-13,2007/3/20
60. 原田健一、緒方稔、林暢仁、森研二、吉田啓之、光永正治,「楕円ビームによる 4 光波パラメトリック発振」,日本物理学会 2007 年春季大会,鹿児島大学,21pXK-1,2007/3/21
61. 山本高行, 納富雅也, 谷山秀昭, 倉持栄一, 吉川 豊, 鳥井寿夫, 久我隆弘,「高Q値エアスロットフォトニック結晶共振器の設計」,応用物理学会 2007 年春季第 54 回学術講演会,青山学院大学,29a-ZB-5,2007/3/29
62. 向井哲哉、フフナーゲルクリストフ、清水富士夫,「量子情報処理に向けた超伝導永久電流アトムチップ」,第 16 回量子情報技術研究会,NTT 厚木研究開発センタ,QIT2007-02,2007/5/17- 18
63. Christoph Hufnagel, Tetsuya Mukai, and Fujio Shimizu, “Trapping Atoms with a Persistent Supercurrent Atom Chip”, Conference on Lasers and Electro-Optics : International Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-IQEC2007), Munich, Germany, Contributed talk : IB3-1-WED 16:30, 2007/6/17-22
64. Christoph Hufnagel, Tetsuya Mukai(speaker), and Fujio Shimizu, “Switching Persistent Supercurrent on an Atom Chip”, The 7th Pacific Rim Conference on Lasers and

Electro-Optics(CLEO/Pacific Rim), Seoul, Korea, Contributed talk : TuH3-3, 2007/8/26-31

65. Tetsuya Mukai, Christoph Hufnagel, and Fujio Shimizu, "Realization of a Persistent Supercurrent Atom Chip", Asian Conference on Quantum Information Science (AQIS'07 Kyoto), Kyoto, Japan, Contributed talk [Parallel session B] EXPERIMENT I, 2007/9/3-6
66. 福泉美穂、玉木嘉人、Mark Sadgrove、中川賢一,「^{87}Rb 原子の二光子遷移によるリュードベルグ状態の分光」,日本物理学会第 62 回年次大会,北海道大学,21pRH-13,2007/9/21
67. Mark Sadgrove, Munekazu Horikoshi, Tetsuo Sekimura, Ken'ichi Nakagawa, "Bose-Einstein Condensates in pulsed optical lattices",日本物理学会第 62 回年次大会,北海道大学,22pRG-1,2007/9/22
68. 吉田啓之、原田健一、林暢仁、森研二、野村博、石原直樹、光永正治,「ゼーマン EIT と超微細 EIT の比較」,日本物理学会第 62 回年次大会,北海道大学,22pRH-7,2007/9/22
69. 吉川豊, 中山和之, 鳥井寿夫, 久我隆弘,「ボース凝縮体を用いた光のホログラフィック多重保存」,日本物理学会第 62 回年次大会,北海道大学,24pRH-7,2007/9/24
70. 関邨哲雄、杉江宏太、中川賢一,「Rb 原子の 2 波長光双極子トラップ」,日本物理学会第 62 回年次大会,北海道大学,24pRH-8,2007/9/24
71. 向井哲哉,「永久電流アトムチップによる固体から光への量子状態変換スキーム」,日本物理学会第 62 回年次大会,北海道大学,24pRH-9,2007/9/24
72. Christoph Hufnagel, Tetsuya Mukai, and Fujio Shimizu, "Persistent Supercurrent as a Resource for Cold Atom Trapping", 20th International Symposium on Superconductivity, Tsukuba, Japan, Contributed talk, 2007/11/5-7
73. 向井哲哉,「超伝導アトムチップの進捗と展望」, 2007CREST 第三回量子情報処理ワークショップ,リゾーピア熱海,Tu-1-5,2007/12/11-14
74. 田代秀康, 小木詩織, 中山和之, 吉川豊, 鳥井寿夫, 久我隆弘,「ルビジウム原子気体の偏光分光信号を用いた分布帰還型レーザーの線幅狭窄化」,日本物理学会第 63 回年次大会(2008 年春),近畿大学,23aQD-10,2008/3/23
75. 福泉美穂、玉木嘉人、桂川眞幸、中川賢一,「^{87}Rb 原子の二光子遷移によるリュードベルグ状態の分光 II」,日本物理学会第 63 回年次大会(2008 年春),近畿大学,23aQD-8,2008/3/23
76. 光永正治、森研二、林暢仁、吉田啓之、奥間惇治、竹下洋祐、枝元忠義、原田健一,「EIT 媒質におけるパラメトリック増幅 I. 理論的考察」,日本物理学会第 63 回年次大会(2008 年春),近畿大学,23pQD-1,2008/3/23
77. 滝口雅人, 吉川豊, 山陸芳行, 鳥井寿夫, 久我隆弘,「単一原子観測のためのナノファイバーリング共振器の作製」,日本物理学会第 63 回年次大会(2008 年春),近畿大学,23pQD-12,2008/3/23
78. 奥間惇治、森研二、林暢仁、吉田啓之、枝元忠義、竹下洋祐、原田健一、光永正治,「EIT 媒質におけるパラメトリック増幅 II. 実験と観測」,日本物理学会第 63 回年次大会(2008 年春),近畿大学,23pQD-2,2008/3/23
79. 中山和之, 吉川豊, 鳥井寿夫, 久我隆弘,「光双極子トラップを用いたボース凝縮体の集団コヒーレンス時間の改善」,日本物理学会第 63 回年次大会(2008 年春),近畿大学,25pQD-6,2008/3/25
80. Mark Sadgrove, Ken'ichi Nakagawa, "Phase defects in an optical lattice: effect on coherent atomic dynamics", 日本物理学会第 63 回年次大会(2008 年春),近畿大学,25pQD-7,2008/3/25
81. 中川賢一, 玉木嘉人, 福泉美穂,「少数個レーザー冷却 Rb 原子における Rydberg 励起の双極子ブロッケード」,日本物理学会第 63 回年次大会(2008 年春),近畿大

学,26aQD-1,2008/3/26

82. 向井哲哉、フフナーゲル クリストフ、清水富士夫,「超伝導磁束量子アトムチップ」,日本物理学会第 63 回年次大会(2008 年春),近畿大学,26aQD-2,2008/3/26
83. フフナーゲル クリストフ、向井哲哉、清水富士夫, “Experimental Study of a Magnetic Trap in the Vicinity of a Supercurrent”, 日本物理学会第 63 回年次大会(2008 年春), 近畿大学,26aQD-3,2008/3/26
84. Tetsuya Mukai, Christoph Hufnagel, Hideyuki Sawamura, and Fujio Shimizu, “Evidence of decoherence suppression of micro-magnetic trap with persistent supercurrent”, Japan-Itary workshop “Quantum Information, Quantum Coherence, and Related topics”, Tokyo, Japan, Contributed talk, 2008/9/16-19
85. Sanjay Kumar, Mark Sadgrove, Ken'ichi Nakagawa, “Factoring with cold atoms”, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 岩手大学, 20aZA-1,2008/9/20
86. 関邨哲雄, 杉江宏太, 加地真英, 渡邊智貴, 中川賢一,「Rb 原子の 2 波長光双極子トラップ(2)」, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 岩手大学,20aZA-2,2008/9/20
87. 福泉美穂, Zhanchun Zuo, 渡邊智貴, 中川賢一,「^{87}Rb 原子の二光子遷移によるリュードベルグ状態の周波数測定」, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 岩手大学, 20pZA-1, 2008/9/20
88. Mark Sadgrove, Sanjay Kumar, Ken'ichi Nakagawa, “Features in a noise driven quantum-classical transition”, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 岩手大学, 20pZD-7, 2008/9/20
89. 中川賢一、Zhanchun Zuo、福泉美穂、渡邊智貴、「レーザー冷却 Rb 原子のトラップロス による Rydberg 状態の分光」,日本物理学会 2008 年秋季大会, 岩手大学, 21aZA-13, 2008/9/21
90. 向井哲哉, フフナーゲルクリストフ, 澤村英幸, 清水富士夫,「単一原子の捕捉に向けた超伝導永久電流アトムチップ」, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 岩手大学, 21aZA-11,2008/9/21
91. 吉川豊,「超放射ラマン散乱を用いたボース凝縮体のコヒーレント制御」、2008 年秋季大会、岩手大学, 21pQA-3, 2008/9/21
92. 中山和之, 吉川豊, 鳥井寿夫, 久我隆弘,「冷却原子集団からの蛍光の強度相関測定」, 2008 年秋季大会、岩手大学, 21aZA-12, 2008/9/21
93. 奥間惇治、林暢仁、枝元忠義、竹下洋祐、藤沢晃彦、光永正治,「外部共振器を用いたナトリウム原子のパラメトリック発振」,日本物理学会 2008 年秋季大会, 岩手大学, 22aZA-8,2008/9/21

③ ポスター発表　　(国内会議　19 件、国際会議　24 件)

1. Taro Eichler、Alexander Kasper、向井 哲哉、堀越 宗一、清水 富士夫, “Magnetic traps for atoms using superconducting micro-structures”, 第10回量子情報技術研究会,学習院大学,P 14,2004/5/24
2. 向井 哲哉、Taro Eichler、Alexander Kasper、堀越 宗一、清水 富士夫,「中性原子を用いた量子演算」,第10回量子情報技術研究会,学習院大学,P 5,2004/5/24
3. K. Harada, K. Motomura, T. Koshimizu, H. Ueno, and M. Mitsunaga, “Coherent Raman beats from dark states”, International Conference on Atomic Physics (ICAP) at Rio de Janeiro, I. I5,2004/7/25-30
4. Alexander Kasper、Taro Eichler、向井 哲哉、堀越 宗一、清水 富士夫, “Superconducting magnetic wire traps”,量子情報未来テーマ開拓研究会,沖縄、ホテルサンライズ知念,2004/8/1-12
5. Taro Eichler,「超伝導アトムチップ」,量子情報合同ワークショップ,青森県、南部

屋,2004/9/16- 17

6. Alexander Kasper、Taro Eichler、向井 哲哉、堀越 宗一、清水 富士夫, “Magnetic Microtraps and Supercondoctors”, 量子情報合同ワークショップ, 青森県、南部屋,2004/9/16- 17
7. 向井 哲哉,「光格子量子計算機」,量子情報合同ワークショップ, 青森県、南部屋, 2004/9/16- 17
8. 向井 哲哉、清水 富士夫,「光超格子を用いた量子演算」,第11回量子情報技術研究会,京都大学, P.14, 2004/12/6
9. Alexander Kasper、Taro Eichler、向井 哲哉、堀越 宗一、清水 富士夫, “Superconducting magnetic micro traps for ^{87}Rb”, 第12回量子情報技術研究会, 京都大学,P.19,2004/12/6
10. 向井 哲哉、Alexander Kasper、Taro Eichler、清水 富士夫,「中性原子を使った量子演算(超伝導アトムチップと光超格子)」,量子情報処理シンポジウム,一橋記念講堂,2004/12/20- 21
11. 向井 哲哉、清水 富士夫, “Quantum computation with neutral atoms trapped in an optical super-lattice”, Nanoelectronics, Nanostructures and Carrier Interactions, NTT 厚木研究開発センタ,2005/1/30 - 2/2
12. Alexander Kasper, Tetsuya Mukai, and Fujio Shimizu, “Coherent matter wave in the vicinity of an ultra-cold surface”, International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics 2006 (MS+S2006), Japan,2005/2/27-3/2
13. 室屋海晴, 吉川豊, 鳥井寿夫, 久我隆弘,「高 Q 値光微小共振器を用いた単一原子観測」,AMO 討論会,理研,2005/6/18
14. Taro Eichler, Tetsuya Mukai, Alexander Kasper, and Fujio Shimizu, “Dual optical Lattice for the study of controlled collisions and quantum computation”, 17 International Conference on Laser Spectroscopy (ICOLS), Scotland , 2005/6/19-24
15. Ken'ichi Nakagawa, Munekazu Horikoshi, Yusuke Koda, “Atomic interferometer with cold rubidium atoms for the precision measurements of gravirational acceleration”, 17th International Conference on Laser Spectroscopy, Scotland, 2005/6/19-24
16. Munekazu Horikoshi, Ken'ichi Nakagawa, “Atom-chip-based fast production of Bose-Einstein condensate atoms”, 17th International Conference on Laser Spectroscopy, Scotland, 2005/6/19-24
17. Tetsuya Mukai, “Optical super-lattice for the study of cold collisions and quantum computation”, Gordon Research Conference: : Atomic Physics, Tilton NH, 2005/6/26 - 7/1
18. 吉川豊, “Collective Raman scattering from an elongated atomic ensemble” ,Laser Physics 05 京都,2005/7/5
19. Taro Eichler, Tetsuya Mukai, Alexander Kasper, and Fujio Shimizu, “Dual optical Lattice for the study of controlled cold-atom collisions and quantum computation”, International Conference on Quantum Electronics 2005 and Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics 2005 (IQEC and CLEO-PR 2005), Tokyo Japan , 2005/7/11-15
20. Alexander Kasper, Taro Eichler, Tetsuya Mukai, Munekazu Horikoshi, and Fujio Shimizu, “Superconducting wires for magnetic micro-traps”, ESF meeting: Bose-Einstein Condensation, Spain, 2005/9/10 - 15
21. 中川悠輔、中川賢一,「単一原子トラップと量子情報処理への応用」,第 13 回量子情報技術研究会,東北大学,Poster 12,2005/11/24
22. 清水富士夫、向井哲哉,「共振器で制御する光格子量子計算機」,第 13 回量子情報技術研究会,東北大学,Poster 17,2005/11/25
23. カスパアレクサンダー、タローアイヒラー、向井哲哉、堀越宗一、プランシェットキャロ

ル、清水富士夫, “Magnetic traps for atoms using superconducting micro-structures”, 第 13 回量子情報技術研究会,東北大学,Poster 7,2005/11/25

24. Tetsuya Mukai、Alexander Kasper、and Fujio Shimizu, “Ultra cold atoms as a resource for quantum computation”,21世紀COEシンポジウム「光と物理学」,京都大学,2006/2/13- 14
25. M. Mitsunaga, N. Hayashi, H. Yoshida, K. Harada, and K. Motomura, “Theory of four-field parametric amplification”, International Conference on Atomic Physics (ICAP) at Innsbruck,C.115 ,2006/7/16 - 21
26. K. Harada, K. Motomura, M. Ogata, K. Mori, and M. Mitsunaga, “Observation of correlated emissions by electromagnetically induced diffraction”, International Conference on Atomic Physics (ICAP) at Innsbruck,C.99, 2006/7/16 - 21
27. Tetsuya Mukai, Alexander Kasper, and Fujio Shimizu, “Double Lattice and Lattice-in-Cavity Systems for Large Scale Quantum Computations”, 20th International Conference on Atomic Physics 2006 (ICAP 2006), Innsbruck, Austria , Poster B157, 2006/7/16 - 21
28. Alexander Kasper, Tetsuya Mukai, and Fujio Shimizu, “Trapping Atoms in the Vicinity of a Cold Surface with Superconducting Current”, 20th International Conference on Atomic Physics 2006 (ICAP 2006), Innsbruck, Austria , PosterC63, 2006/7/16 - 21
29. 向井哲哉、フフナーゲルクリストフ、仙場浩一、清水富士夫,「量子情報処理に向けたシングルモードアトムチップ回路への試み」,第 15 回量子情報技術研究会,キャンパスプラザ京都,QIT2006-88,2006/11/21-22
30. Tetsuya Mukai, Christoph Hufnagel, and Fujio Shimizu, “Persistent Supercurrent as a Resource for Atom Chip Potential”, 9th European Conference on Atoms Molecules and Photons, (ECAMP9), Crete, Greece, Poster We4-9, 2007/5/6-11
31. Ken’ichi Nakagawa, Munekazu Horikoshi, “Bose-Einstein-Condensate Interferometer on an Atom Chip with a Long Coherence Time”, 18th International Conference on Laser Spectroscopy (ICOLS), Telluride, Colorado, 2007/6/25-29
32. N. Hayashi, K. Harada, M. Ogata, K. Mori, H. Yoshida, and M. Mitsunaga, “Four-wave parametric oscillation in Na vapor”, Conference on Lasers and Electro-optics (CLEO/Pacific Rim) at Seoul, Korea, WP-087 (2007), 2007/8/26-31
33. Christoph Hufnagel, Tetsuya Mukai, Kouichi Semba, and Fujio Shimizu, “A Superconducting Atom Chip for Matter Wave Optics and Quantum Information Processing”, 第3回量子情報未来テーマ開拓研究会,沖縄・ホテルサンライズ知念,2007/8/28-9/7
34. Christoph Hufnagel, Tetsuya Mukai, and Fujio Shimizu(speaker) , “Manipulation of cold atoms on a superconductive atom chip”, BOSE-EINSTEIN CONDENSATION 2007- Frontiers in Quantum Gases - Sant Feliu, Spain, Poster 93, 2007/9/15-20
35. Fujio Shimizu, “Micro-baseball trap for cold atoms”, 2007CREST 第三回量子情報処理ワークショップ,リゾーピア熱海,12-1,2007/12/11-14
36. Christoph Hufnagel, Tetsuya Mukai, and Fujio Shimizu, “Trapping Lifetime in the vicinity of the Persistent Supercurrent Atom Chip”, 2007CREST 第三回量子情報処理ワークショップ, リゾーピア熱海, 12-2, 2007/12/11-14
37. J. Okuma, K. Harada, K. Mori, N. Hayashi, and M. Mitsunaga, “Parametric amplification in electromagnetically induced transparency”, Conference on Lasers and Electro-optics, Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO /QELS) at San Jose, USA, JWA128 (2008), 2008/5/4-9
38. Tetsuya Mukai, Christoph Hufnagel, and Fujio Shimizu, “Trapping Atoms in the Vicinity of a Persistent Supercurrent Atom Chip”, 21st International Conference on

Atomic Physics 2008, Storrs, Connecticut, USA, Poster TU96, 2008/7/27-8/1

39. K. Nakayama, Y. Yoshikawa, H. Matsumoto, Y. Torii, T. Kuga, “Precise measurement of intensity correlation function for resonance fluorescence an optical molasses”, ICAP2008, University of Connecticut, Poster TU88, 2008/7/27-8/1
40. K. Nakagawa, Z. Zuo, M. Fukusen, Y. Tamaki, T. Watanabe, “Study of the Rydberg state excitation of few cold Rb atoms in a dipole trap”, International Conference on Atomic Physics 2008, Connecticut, Poster TU50, 2008/7/27-8/1
41. Y. Yoshikawa, K. Nakayama, Y. Torii, and T. Kuga, “Holographic Storage of Multiple Coherence Gratings in a Bose-Einstein Condensate,’’ ICAP2008, University of Connecticut, Poster TH63, 7/27-8/1
42. 澤村英幸, フフナーゲルクリストフ, 向井哲哉, 清水富士夫,「狭線幅超伝導アトムチップ」,第四回量子情報未来テーマ開拓研究会, 沖縄・ホテルサンライズ知念, 2008/9/1-12
43. Masato Takiguchi, Yutaka Yoshikawa, Yoshiyuki Yamariku, Yoshio Torii, Takahiro Kuga, “Fabrication of Nano-fiber Resonators for Cavity-QED Experiments with Neutral Atoms”, 第四回量子情報未来テーマ開拓研究会, 沖縄・ホテルサンライズ知念, 2008/9/1-12

(3)特許出願

①国内出願 (7件)

1.
出願番号:特願 2004-242858
出願人(機関名):日本電信電話株式会社
発明者:向井 哲哉、清水 富士夫
タイトル:量子コンピュータ
出願年月日:2004/8/23

2.
出願番号:特願 2005-013733
出願人(機関名):日本電信電話株式会社
発明者:向井 哲哉
タイトル:光超格子及びその製造方法
出願年月日:2005/1/21

3.
出願番号:特願 2006-054527
出願人(機関名):日本電信電話株式会社
発明者:向井 哲哉、清水 富士夫
タイトル:量子演算装置及び量子演算方法
出願年月日:2006/3/1

4.
出願番号:特願 2007-011432
出願人(機関名):日本電信電話株式会社
発明者:向井 哲哉、仙場 浩一、清水 富士夫
タイトル:原子捕捉素子及び原子捕捉方法
出願年月日:2007/1/22

5.
出願番号:特願 2007-310134
出願人(機関名):日本電信電話株式会社
発明者:向井　哲哉、清水　富士夫
タイトル:原子捕捉素子
出願年月日:2007/11/30

6.
出願番号:特願 2008-250439
出願人(機関名):日本電信電話株式会社
発明者:向井　哲哉
タイトル:原子干渉計および原子干渉測定方法
出願年月日:2008/9/29

7.
出願番号:特願 2009-15252
出願人(機関名):日本電信電話株式会社
発明者:向井　哲哉、清水　富士夫
タイトル:原子捕捉装置および原子捕捉方法
出願年月日:2009/1/27

(4)受賞等

①受賞　なし

②新聞報道

1. 「雑音のない素子で原子を安定に閉じ込めることに成功」
   ～電源不要の新型アトムチップ、量子コンピュータ開発に新たな道～
   (2007 年 6 月 29 日 NTT-JST 共同リリース、日本経済新聞 2007 年 6 月 30 日載、 他)

③その他

1. ″Persistent Supercurrent Atom Chip″
   T. Mukai, C. Hufnagel, A. Kasper, T. Meno, A. Tsukada, K. Semba,
   and F. Shimizu :Physical Review Letters, vol. 98, 260407 (2007)
   NTT 物性科学基礎研究所　所長表彰　論文賞

2. 「超伝導使う新素子、量子コンピュータに道」
   (2007 年 10 月 11 日　日経産業新聞　2007 年度　技術トレンド調査(第3回)
   「新規＋学術」評価の第3位

(5)その他特記事項

1. C. デイ 森永 実 訳,「高密度低温フェルミ原子気体で観測されたアンチバンチング」, パリティ,パリティ 2007/08/25 発売号 (9 月号) 丸善,2007/8/25
2. 向井哲哉,「原子でつくる量子コンピュータ」, NTT 技術ジャーナル(11 月号), vol.19, No.11, 24 (2007)
3. 向井哲哉,「原子を操る」, NTT 技術ジャーナル(11 月号), vol.19, No.11, 28 (2007)
4. 鳥井寿夫,「レーザー冷却とボース・アインシュタイン凝縮」月刊オプトロニクス 2008 年 1 月号、228-239
5. 向井哲哉, “Making a Quantum Computer Using Neutral Atoms”, Journal, NTT

Technical Journal, vol.6, No.1, sp7 (2008)
6. 向井哲哉, 特集:応用に向かうレーザー冷却技術／最近の技術から「超伝導永久電流アトムチップ」、光学(日本光学会　応用物理学会)発行, 第37巻, 第7号, 397頁(2008年7月)

§7 研究期間中の主な活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
H16.9.16-H16.9.17	量子情報合同ワークショップ	青森県青森市	約50人	JST量子情報関係者間の技術的検討、情報交換
H15.11.14	チームミーティング	NTT	約15名	チーム立ち上げに際しての全メンバーによる検討会
H16.1.16	東京地区チームミーティング	東大駒場	約20名	東京地区メンバーによる検討会
H16.12.24	同上	電通大	約20名	同上、山本総括のサイトビジットをかねる。
H18.3.8	同上	東大駒場	約15名	東京地区メンバーによる検討会
H18.6.8	同上	電通大	約15名	同上
H18.12.6	同上	NTT	約15名	同上
H19.10.19	同上	東大駒場	約15名	同上

§8 結び

量子情報処理の研究は物理学の観点からは量子力学の最も不可解な部分に関する興味ある研究であり、工学的には複雑な量子系を完全にコントロールすることを目的とした、一般的な物理(特に凝縮体物理)の研究とは逆の方向を向いた研究である。我々は中性原子の集合がこの研究を遂行する材料として最適なものであるという信念をもってプロジェクトを遂行してきた。そして個別的で要素的な研究についてはそれなりの成果を上げてきたと評価している。しかし、将来の実用化を視野に入れた研究としての方向を探るという点では全く刃が立たなかった。

基礎研究のためのプロジェクトとして他では得られない最良の研究環境を維持していただいたプロジェクト事務の方々に感謝したい。