

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

「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」

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: 高橋 義朗

(京都大学大学院理学研究科 教授)

§ 1 研究実施の概要

本研究では、原子集団を用いた量子情報処理を実現することを目標とした。具体的に3つのアプローチを定め、それぞれについて3つの研究グループ（京大高橋グループ、東工大上妻グループ、京大北野グループ）が取り組み、その結果やアプローチについて適宜情報交換して協力しながら研究を進めた。

まず、第1のアプローチとして、全光学的手法により生成した原子気体のボース凝縮体やフェルミ縮退状態などの多様な量子縮退原子集団を対象とし、強相関量子多体系の量子シミュレーターを実現することを設定した。このような量子縮退した原子集団は、巨視的数の原子系であるにもかかわらず、高い操作性や長いデコヒーレンス時間が期待される。特に、2電子系原子イッテルビウム (Yb) には2種のフェルミ同位体 (^{171}Yb , ^{173}Yb) と5種のボーズ同位体 (^{168}Yb , ^{170}Yb , ^{172}Yb , ^{174}Yb , ^{176}Yb) という豊富な同位体が存在し、さらに準安定光励起状態も含め、多様な混合量子縮退系を生成することが可能である。これらの原子集団を光格子に導入した系は、格子間のホッピングと格子点での原子間相互作用の二つの項からなるハバードモデルで記述される。光格子および原子の様々なパラメータを変化させてこの系の振舞いを研究することは、ハバードモデルで記述される強相関量子多体系に対するシミュレーターとみなすことができる。特に、Yb 原子に特有な、1Hz以下の超狭線幅遷移を用いた超高分解能レーザー分光によりフェルミ面、超流動ギャップ、等の観測が可能であると考えている。また、磁場勾配と組み合わせることにより、光格子中の単一のサイトの選択的操作が可能になると考えている。自由に任意の場所に格子欠陥を導入することにより、例えば、長岡強磁性などの遍歴磁性の重要問題に応用できると期待している。

以上のような研究構想のもと、本研究では、1) Yb 原子の3つのボース同位体に対するボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)やフェルミ縮退の生成、およびその混合量子縮退気体の生成などの Yb 原子の量子縮退領域までの冷却、2) 光会合分光法による全 Yb 原子間の散乱長の高精度決定、3) 散乱長制御のための、Yb 原子に特有のスピン禁制遷移を用いた光フェッシュバツハ共鳴法の開発、4) BEC やフェルミ縮退などの量子縮退気体の超狭線幅遷移を用いた高分解能レーザー分光、5) 3次元光格子中での超流動・モット絶縁体転移の観測や第1ブリルアンゾーンの観測、6) 1次元光格子中での超流動・原子スクイーズド状態転移の観測とその高分解能レーザー分光による平均場相互作用の直接測定、といった成果を得ることができた。これらによって、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のための基本となる基盤技術の開発を行うことができたと考えている。

また、7) 光と原子スピン集団の量子非破壊測定相互作用による量子インターフェースの研究も併せて行った。コヒーレント光との相互作用によるスピンスクイジングの提案や、光と原子のスワッピングゲートの提案などの理論的な考察、および、 ^{171}Yb 原子を用いた核スピン 1/2 の系のスピンスクイジングの実現、などの成果を得ることができた。

次に、第2のアプローチとして、希薄な原子集団を利用した量子情報処理技術を確立することを目的に設定した。希薄な（量子縮退状態にない）原子集団は、qubit間の相互作用を誘起し、量子ゲートを実現するという観点からすると、優れた媒体とは言い難い。しかしながら、量子情報を保存する媒体としては大変適しているといえる。相互作用の少ない多数個の原子がまとまって存在する御陰で、光と原子系との結合を共振器等の力を借りることなく強くすることができる (collective enhancement)。また集団励起状態を利用することで、任意の光量子状態を表現することが可能となる。このような背景から、我々は光の量子状態を原子集団に保存し再生するという基本的なプロセスを、高いフィデリティを保った状態で実現するための基礎研究を行ってきた。さらに途中で派生した新しいとりくみとして、単に保存再生を行うだけでなく、量子情報処理を行う上で基本的なりソースとなるエンタングルメントを離れた2地点に安定に貯蔵する技術の確立も目指した。

CREST研究期間を通して、最終的に3つの成果を得ることができた。まず一つ目として、真空スクイーズド状態を冷却原子集団に保存し再生する実験に世界で初めて成功することができた。この成果は、**Science news**にとりあげられた。二つ目の成果として、量子光学において古くから活用されているパラメトリック蛍光を保存し再生することに世界初めて成功した。保存再生の前後で非古典性が保たれていることも確認した。さらに条件付操作を施すことで単一光子状態を生成し、これを保存し再生する実験を行った。再生光のアンチコリレーションパラメーターは1に比べて十分に小さくはならなかったが、1未満の値をとり、非古典性が保たれていることが明確に示された。最後に3つ目の成果として、相補的な系である単一光子-原子集団間に、軌道角運動量状態を利用した多次元エンタングルメントを生成することに同じく世界で初めて生成することができた。

また、光子対は量子相関の非局所性の検証、量子テレポーテーション、量子暗号などに利用される非常に重要な要素である。そこで、第3のアプローチとして、2光子吸収を中心とした2光子相互作用についての研究を設定した。最初に行った研究は、偏光選択性2光子吸収を用いた光子対生成に関する研究である。以前より、マスター方程式を用いた解析で、光子対生成に起因するバンチング現象と2次コヒーレンスの増大を理論的に明らかにしていたが、マスター方程式を用いた解析では、密度行列の時間発展を追うために、各パラメータの期待値は計算できるものの、実際どのようなプロセスで、具体的にどのような量子状態に発展していくかを知ることはできなかった。そこで、**Quantum Jump Approach**という手法を解析に用いることで、より簡便に量子状態を計算する方法を提案した。解析して分かったことは、偏光選択性2光子吸収が、ほぼ分散性の4光波過程と同一視できるということであった。実験的な検討も行ったが、非常に大きな2光子吸収が必要となるため困難であると判断した。しかし、4光波混合過程は短波長の光子対を生成する方法として有用と考え、光ファイバ中の4光波混合を利用した光子対生成の研究を開始することにした。

もう1点理論的な研究として、光子対のような光の非古典状態と物質の2光子相互作用に関する解析も行った。その中で、任意の2光子状態を記述できる2光子波動関数を用いて2光子吸収量を計算する方法を提案した。また、高い非線形性を実現するとき障害となる中間状態への1光子吸収についても計算し、2光子吸収量と比較する解析も行った。その結果、2光子吸収量は2光子波動関数の形状に大きく依存し、パラメータを選ぶことで1光子吸収を抑えながら2光子吸収を大きくすることが可能であることが分かった。

2光子吸収の量子光学的応用として、光電子増倍管の光電面での2光子吸収による光子対検出の実験を行った。光電子増倍管を利用することにしたのは、光電面の2光子吸収によって生じる光電子を光電流パルスとして直接検出することができるからである。2光子吸収は光子統計に依存し、コヒーレント光のような光子がランダムに分布する場合には入射強度の2乗に比例するが、光子対ビームでは光子が常に対で飛来するので入射強度の1乗に比例する。レーザ光（コヒーレント光）と導波路型PPLN結晶を用いて生成した光子対ビームの両方の実験を比較することでこの特性の違いを検出することができた。

光ファイバ中の4光波混合を用いた光子対生成法については、研究が始まった当時は通信用光ファイバを用いて通信波長帯(1.5 μm 帯)で研究されていた。我々は、通常の光ファイバより非線形性が高く、分散制御も可能なフォトニック結晶ファイバを用いることで、より短波長域の光子対をより高効率に生成できると考えて実験に採用した。我々は、ゼロ分散波長が760nmになるように設計されたフォトニック結晶ファイバについて、光子対スペクトルを計算したところ、760nmより長い波長にポンプ光を設定することで、非常に広い光子対スペクトルが得られることが分かった。広い光子対スペクトルは、実験の際にノイズの原因になるラマン散乱光を避けるために必要となってくる。実験においてもこのことを確認し、ポンプ光を760.4nmに設定することで、660nmのシグナル光子と900nmのアイドラ光子のペアを低ノイズで検出することに成功した。我々は、得られた光子対を非対称のマッハツェンダー干渉計に導入し2光子干渉実験を行った。実験の結果、期待され

たようにポンプ波長 760nm の半分の周期(380nm)の 2 光子干渉縞を測定することができた。そして、その明瞭度は古典限界 50%を越える 83%で、生成した光子対間に時間相関があることを実証した。

その他に、電子回路を用いた波動方程式のシミュレーションに取り組んだ。特に、低群速度伝搬現象および光凍結をシミュレートする回路は、上妻グループが研究している EIT を用いた同現象を回路上で再現するものといえる。回路を用いることで物理的イメージが明快になり、低群速度伝搬や光凍結に必要なスペクトル条件などを容易に理解することができる。また、シュレディンガー方程式をシミュレートする回路についても提案と計算機シミュレーションを行った。このモデルを用いることで、トンネル効果などの量子現象を簡単な回路で説明することができる。さらに、回路を工夫することにより、ベクトルポテンシャルの効果なども組み込むことができ、多様な量子効果も模擬できると考えている。

§ 2 研究構想及び実施体制

(1) 研究構想

前述したように、本研究は、

- 1) 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、
 - 2) 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、
 - 3) 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 3 つのアプローチを定め、それぞれについて 3 つの研究グループ（京大高橋グループ、東工大上妻グループ、京大北野グループ）が取り組み、その結果やアプローチについて適宜情報交換して協力しながら研究を進めた。特に、光源開発においては、3 グループにおいて共通するものが多く、有益な情報交換により研究を効率的に進めることができた。また、原子集団を用いた量子情報の基礎に関する率直な意見交換を、各研究グループ間で行うことにより、問題意識の共有を可能とした。

まず、1) 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、については、京大高橋グループが行なった。量子縮退した原子集団は、巨視的数の原子系であるにもかかわらず、高い操作性や長いデコヒーレンス時間が期待される。また光格子系では、不純物や格子欠陥がない理想的な系を準備することができ、特にハバードモデルにおける重要なパラメーターである、ホッピング項とオンサイト相互作用の項の大きさを、光格子に用いたレーザー光の強度を調整することにより極めて精度よく変えることができる。

本研究では特に、よく用いられるアルカリ原子ではなく、あえて、これまでに研究例がほとんどないイッテルビウム (Yb) 原子に注目して研究を行った。量子シミュレーションの結果の信憑性は、様々な異なる物理系によってチェックされ、そして同じ結果を得てはじめて確固たるものとなる。したがって、これまでにない系に対して量子シミュレーション技術を確立することは大変意義のあることであると考えたためである。我々が Yb 原子に着目したのは、2 種のフェルミ同位体と 5 種のボーズ同位体という豊富な同位体が存在すること、および、1Hz 以下の超狭線幅遷移を用いた超高分解能レーザー分光により、オンサイト相互作用やフェルミ面、超流動ギャップ、等の観測が可能であること、などの量子シミュレーションにとって有利な点があったからである。

そこで、まず、基底状態に電子スピンのない Yb 原子に対して、全光学的方法により量子縮退領域までの冷却に取り組んだ。さらに、これまでに原子間相互作用に関する情報

がほとんどなかった Yb 原子に対して、光会合分光法を適用することにより、実験的に全 Yb 原子間の散乱長を高精度に決定することに取り組んだ。また、原子間相互作用を連続的に変化させることは、量子シミュレーションにとって大変重要な技術であるが、Yb 原子には基底状態に超微細相互作用が存在しないため、通常の磁場によるフェッシュバッハ共鳴のテクニックが使えない。そこで、スピン禁制遷移を用いた光フェッシュバッハ共鳴法の開発に取り組み、全光学的に原子間相互作用を変化させる技術の開発を行った。また、Yb 原子に存在する超狭線幅遷移を用いた超高分解能レーザー分光を可能にするためには、狭線幅の高安定なレーザー光源を準備する必要があり、これに取り組んだ。また、量子縮退までに冷却された原子を 3 次元光格子に導入する必要があり、光格子専用の光学窓を備えた特殊な真空 chamber を設計して利用することによりこれに取り組んだ。さらに、光と原子スピン集団の量子インターフェースに対しても取り組み、核スピン気体である ^{171}Yb 原子集団を用いて、量子非破壊測定を行うことにより、実現を試みた。

また、2) 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、については、東工大上妻グループが行なった。初期の量子情報処理研究は「光」を基軸として発展してきた。そして、分野がある程度成熟してきた現段階においても、代表的なプロトコルの多くは光を使って実現されている。このように「光」が長期にわたってその座を維持しつづけているのには確固とした理由がある。一つは、光が環境と相互作用しにくいという際立った特徴をもっていること、もう一つは、光の状態を測定する方法が極めて発達していることがあげられる。通常的光子検出器は **threshold detector** でしかないが、これを利用した強度相関測定を行うだけで、対象となる光場が古典的状态にあるのか、はたまた量子的な状態にあるのかを明確に判断することができる。仮に原子に対して **threshold detector** に相当する検出器を構築しようとしたならば、真空装置内に高い Q 値をもつ微小共振器を挿入して **Cavity QED** を行う、あるいは対象となる原子を準安定状態にする、といった極めて複雑かつ高度な技術が要求される。さらに光の場合、強い局発光源を利用したホモダイン測定を行えば、先程は検出ができなかった真空をも含めた全状態を決定することが可能となる。

このような状況を鑑みると、光とは別の量子系で光を超える量子情報処理技術を新たに確立しようとするのではなく、光の足りない部分を他の量子系で上手に補填することを考えるのが効率的に思われてくる。ここでいう「希薄な原子集団を利用した量子情報処理技術」とは、まさに光が不得手とする部分を原子特有の性質を利用して補填することを目的としている。では、光が不得手とする部分、光を用いた量子情報処理において隔靴搔痒な部分とは何であろうか？

光を用いた量子情報処理研究は量子テレポーテーション技術を中心に発展してきた。量子テレポーテーションが単なる一つの量子プロトコルで終わらなかったのは、この技術の中に、全く新しい発想の転換が含まれていたためである。具体的には、「入力状態に直接非線形効果をもたらすのではなく、必要な非線形相互作用を別の場所で終了させておく」という発想である。実際量子テレポーテーション実験では、非線形結晶を用いたスクイーミング操作は別の場所で行われる。入力光は、真空スクイーズド状態から生成した EPR ビームの片方とビームスプリッターで混ぜ合わせられた後に測定される。そして測定結果を EPR ビームのもう一方にフィードフォワードする。この一連の動作によって、入力状態が元の状態に戻るという、ある意味最も基本的な操作が実現される。最近になって、真空スクイーズド状態をビームスプリッターで入力状態と混ぜ合わせた後で測定し、ビームスプリッターのもう一つの出力に対してフィードフォワードを行うことで、ユニバーサルスクイザーが実現されたが、これも同じ概念に基づいているといえる。「非線形効果を別の場所で行い、入力状態と混ぜて測定し、フィードフォワードする。」この新しい発想は、何がしかの形で非線形効果を起こすことが出来れば、バラエティーにとんだ量子情報処理を入

力状態に対して決定論的に施すことができることを約束する。このような背景にもとづき、最近になって、測定過程を利用することで高次の非線形効果を代行する手法が盛んに研究されるようになってきた。こうした測定誘起型相互作用の利点は大きな非線形効果を得ることができることだが、そのトレードオフとして確率的にしか目的の状態が得られないという欠点がある。しかし、目的の状態が得られるまで何度も試行し、状態が得られたらこれを何がしかの媒体に保存しておくことが出来れば、入力状態に対して決定論的な操作を行うことができ、欠点が克服される。このように考えていくと、原子を用いて光の量子状態を保存し再生する、いわゆる「量子メモリ」を実現することが、光量子情報処理技術の発展にもっとも貢献する仕事となることが理解される。当然その目的からして、ガウシアン状態からノンガウシアン状態まで、任意の光場を自由に保存できる必要がある。ここでは、これらを代表する非古典的光場である真空スクイーズド状態と単一光子状態とを保存のターゲットとした。また保存再生の具体的な機構としては、電磁誘起透明化現象 (EIT) を用いることにした。

また、2光子吸収は分光などの分野で古く研究されてきたが、用いる光はコヒーレント光であり、光の量子性にはあまり関心が持たれていなかった。しかし、2光子吸収は非線形光学過程のもっとも基本的なものであり、光子統計など光の量子性が顕著に現れる系でもある。京大北野グループでは、2光子吸収における光の量子性を研究することは未開拓の分野であると考え、これを中心テーマとして3) 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、を行った。特に研究の初期は、2光子吸収の理論的研究を中心に行った。2光子吸収を量子光学の立場で解析を行う必要があるために、光を含めた全量子的な解析が必要になる。このような複雑になりがちな全量子的解析を物理的な意味を明確にして進めるときには、量子状態をどのように表し、どのような手法で解析するかが重要になる。偏光選択性2光子吸収を利用した光子対生成の解析には、**Quantum Jump Approach** を用いることで、光子対生成のプロセスだけを対象とした純粋状態の時間発展を計算することに成功した。そして、光子対を対象とした2光子吸収確率の計算には、任意の2光子状態を表現することができる2光子波動関数を用いて定式化を行った。

これらの理論を背景として、実験に取り組んだ。当初は、アルカリ金属を用いて2光子吸収に関する実験を行う予定であったが、2光子吸収は非常に小さい効果であるので、非常に密度の濃い原子集団が必要になり実験は非常に困難と判断した。そこで、我々は、高い吸収確率が期待できるカスケード2光子吸収と呼ばれる実準位を介した2光子吸収を実験の対象とした。具体的には、光電子増倍管の光電面でのカスケード2光子吸収を研究の対象とした。光電子増倍管を用いることで、光電面の2光子吸収によって生成された光電子を直接電流パルスとして検出することができる。当研究において、光子対に起因すると見られる光電流パルスの検出に成功した。しかし、その信号雑音比は小さかった。今後は、この信号雑音比を高めるためには、光子対ビームのような弱い光ではなく、OPA 過程などを用いて生成した高い光強度の非古典光を用いた実験を考える必要がある。また、2光子干渉を2光子光電流検出で観測できれば、量子リソグラフィーの原理実験となると考えている。

また、光子対の生成に関する研究も行った。特に、2光子吸収の応用の一つである量子リソグラフィー技術への利用を想定し、高い周波数（短波長）の光子対を生成する方法について研究することにした。それには、従来3光波混合を利用した光子対生成より、4光波混合を利用した光子対生成法の方が有利であると考え、特に高い非線形性が期待できるフォトニック結晶ファイバに注目して研究を行った。得られた光子対を非対称のマッハツェンダー干渉計に導入し、光子対の2光子干渉の干渉縞を測定した。これにより、光子対の対としての波長であるバイフォトンの波長を測定することができる。実験の結果、理論通りポンプ光波長の半分の周期の2光子干渉縞を実現することができた。今後は、さらなる光子対の短波長化に向けた研究と、これを用いた2光子吸収への実験へとつなげて

ゆきたいと考えている。

(2)実施体制

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
高橋グループ	高橋 義朗	京都大学大学院理学研究科教授	量子縮退原子集団を用いた量子情報処理の基礎研究
上妻グループ	上妻 幹旺	東京工業大学大学院理工学研究科 准教授	希薄な原子集団を用いた量子情報処理
北野グループ	北野 正雄	京都大学大学院工学研究科教授	時間相関光子対による2光子遷移に関する研究

§ 3 研究実施内容及び成果

3.1 量子縮退原子集団を用いた量子情報処理の基礎研究(京都大学 高橋グループ) (1)研究実施内容及び成果

全光学的手法により生成した原子気体のボース凝縮体やフェルミ縮退状態などの多様な量子縮退原子集団を光格子に導入した系を用いて、ハバードモデルによって記述される強相関量子多体系の量子シミュレーターを実現しようというのが本研究のねらいである。量子縮退した原子集団は、巨視的数の原子系であるにもかかわらず、高い操作性や長いデコヒーレンス時間が期待される。また光格子系では、不純物や格子欠陥がない理想的な系を準備することができ、特にハバードモデルにおける重要なパラメーターである、ホッピング項とオンサイト相互作用の項の大きさを、光格子に用いたレーザー光の強度を調整することにより極めて精度よく変えることができる。

これまで、アルカリ原子のルビジウム ^{87}Rb 原子やカリウム ^{40}K 原子、およびその混合気体を光格子に導入した系が注目され、ボースハバードモデルおよびフェルミハバードモデルの量子シミュレーションに向けた研究が行われ、成果を挙げてきている。また、半導体中の励起子ポラリトンを用いたボースハバードモデルの量子シミュレーションの実験的研究や2次元電子系を用いたフェルミハバードモデルの研究などの非常にユニークな研究が成果を挙げています。

本研究では特に、よく用いられるアルカリ原子ではなく、イッテルビウム Yb 原子に注目して研究を行った。量子シミュレーションの結果の信憑性は、様々な異なる物理系によってチェックされ、そして同じ結果を得てはじめて確固たるものとなるため、これまでにない系に対して量子シミュレーション技術を確立することは大変意義のあることであると考えている。我々が量子シミュレーションの対象として Yb 原子に着目したのは次のようなユニークな特徴があるからである。まず、2電子系原子 Yb には2種のフェルミ同位体 (^{171}Yb , ^{173}Yb) と5種のボーズ同位体 (^{168}Yb , ^{170}Yb , ^{172}Yb , ^{174}Yb , ^{176}Yb) という豊富な同位体が存在し、それらの混合気体も含めて、多様な量子縮退系を生成することが可能である。また、 Yb 原子に特有な、1Hz以下の超狭線幅遷移を用いた超高分解能レーザー分光により、オンサイト相互作用やフェルミ面、超流動ギャップ、等の観測が可能である。また、磁場勾配と組み合わせることにより、光格子中の単一のサイトの選択的操作が可能になると考えている。自由に任意の場所に格子欠陥を導入することにより、例えば、長岡強磁性などの遍歴磁性の重要問題に応用できると期待している。

本研究では、 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のための基盤技術の開発として以下のような成果を得ることができた。

- ① Yb 原子の量子縮退領域までの冷却
- ② 全 Yb 原子間の散乱長の高精度決定
- ③ スピン禁制遷移を用いた光フェッシュバツハ共鳴法の開発
- ④ 量子縮退気体の超高分解能レーザー分光
- ⑤ 3次元光格子中での超流動・モット絶縁体転移の観測
- ⑥ 1次元光格子中での超流動・原子スクイーズド状態転移の高分解能レーザー分光

また、当グループでは、「原子アンサンブルを用いた量子情報処理実現」というチーム共通の目標に向けて、

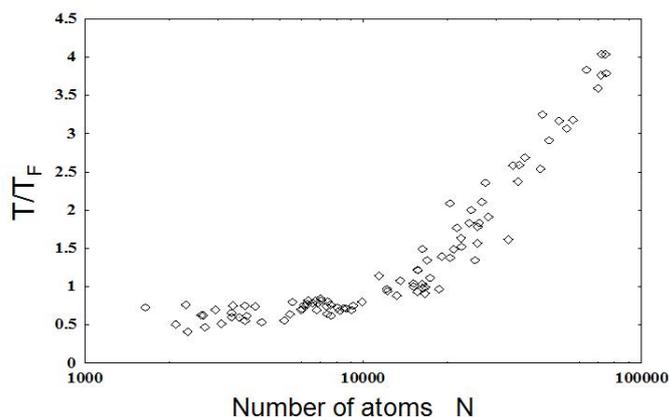
⑦ 光と原子スピン集団の量子非破壊測定相互作用による量子インターフェースの研究も併せて行った。コヒーレント光との相互作用によるスピンスクイージングの提案や、光と原子のスワッピングゲートの提案などの理論的な考察、および、 ^{171}Yb 原子を用いた核スピン $1/2$ の系のスピンスクイージングの実現、などの成果を得ることができた。

以下ではこれらの成果ごとに詳述する。

① Yb 原子の量子縮退領域までの冷却

本研究では、まず Yb 原子の量子縮退気体を生成することが重要である。オープンからの Yb 原子を、レーザー冷却の方法により、10 マイクロケルビンまで冷却し、その後保存力のトラップに導入して、高エネルギーの原子をトラップから逃がすことによりトラップ原子集団を冷却する、いわゆる蒸発冷却を行った。ただし、これには、弾性衝突が頻繁に起こる必要があるが、これは同位体によって異なる。大きな弾性衝突レートが望めない同位体には、大きな弾性衝突レートを有する同位体との衝突を通して、間接的に冷却するという、いわゆる共同冷却を行う必要がある。ただし、Yb 原子の基底状態には、電子スピンのないため、保存力のトラップとして、通常良く用いられる磁気トラップを採用することはできない。そのため、光トラップを行った。

これまでに、既存設備も含めた実験系の整備・最適化により、多様な Yb 原子の量子縮退気体を生成することに成功した。まず、フェルミ縮退については、通常行われる蒸発冷却法は、極低温のフェルミ粒子に対しては原子間衝突が抑制されるために有効でない。そこで、イッテルビウム原子のフェルミ同位体 ^{171}Yb に対しては、ボソン同位体 ^{174}Yb との光トラップ中で協同冷却により ^{171}Yb を冷却する実験を行い、フェルミ温度の 0.8 倍以下までの冷却に成功した。イッテルビウム原子の別のフェルミ同位体 ^{173}Yb については、6 成分のスピンの衝突を利用した蒸発冷却を行い、フェルミ温度の 0.4 倍以下までの冷却に成功し、さらにフェルミ圧力およびパウリブロッキングによる効果の観測に成功した。右図に 6 成分のスピンの持った ^{173}Yb 原子の蒸発冷却の結果を示す。フェルミ温度 T_F と原子温度 T の比を、原子数の関数としてプロットしている。原子数の減少に伴って、 T/T_F が減少し、最小 0.5 程度まで達し、フェルミ縮退領域に達していることがわかる。 $T/T_F \sim 0.5$ のあたりで、蒸発冷却の効率が落ちていることも見てとれる。これは、フェルミ圧力によるトラップ中心での原子密度の一定化やパウリブロッキングによる衝突 channel の減少など、量子統計性の発現によるものである。この ^{173}Yb 原子のフェルミ縮退は、6 つの成分が同時にフェルミ縮退していることが、2 成分しかないこれまでのアルカリ原子の系と大きく異なる。



後出の散乱長の表から分かるように、これら 2 つのフェルミ同位体のうち、 ^{171}Yb は原子間相互作用が非常に弱い、ほとんど相互作用をしないフェルミ系とみなせ、また、 ^{173}Yb は原子間相互作用が斥力で大きいフェルミ系とみなせる。したがって、同位体を変えることによって相互作用の大きさを実効的に変えることができる。

また、ボース同位体についてもいくつかの BEC を生成することに成功した。まず、これまで生成に成功していた ^{174}Yb 原子 BEC については、原子数を大幅に増大させることに成功し、約 10^5 個の原子数の ^{174}Yb 原子 BEC を安定に生成できるようになった。 ^{174}Yb 以外のボース同位体についても同様に蒸発冷却法を適用し、 ^{170}Yb 同位体については 10^4 程度の原子数の BEC を生成することに成功した。さらに、 ^{176}Yb 同位体については ^{174}Yb 同位体との共同冷却により ^{176}Yb BEC と ^{174}Yb BEC の混合系を生成することに成功した。特に、この BEC 混合系は、引力相互作用する BEC(^{176}Yb)と斥力相互作用する BEC(^{174}Yb)との混合気体、という新しい系である。さらに、フェルミ同位体 ^{173}Yb とボース同位体 ^{174}Yb の混合気体の生成にも成功した。この系では、 ^{173}Yb と ^{174}Yb の間の大きな斥力相互作用のために、 ^{173}Yb が殻状に中心の ^{174}Yb の BEC を取り囲む相分離の振舞いが理論的に予想されて

おり、大変興味深い系となっている。

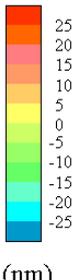
② 全 Yb 原子間の散乱長の高精度決定

Yb 原子の原子間相互作用、特に散乱長の情報、に関してはこれまでほとんど情報が得られていなかった。したがって、これらが確定しているアルカリ原子と違い、まず、原子間相互作用の決定も重要な研究項目となってくる。S 波散乱長は、光によって分子を生成する、いわゆる光会合分光法を行い、電子基底状態にある分子の結合エネルギーを測定することにより、高精度に決定することができる。特に、散乱長に関する質量スケーリング則を適用して、同種同位体間だけでなく、異種同位体間の散乱長も決定できる。

我々は、2 光子光会合分光法を、存在比が非常に小さい ^{168}Yb 以外の 6 つの同位体について網羅的に行い、これら 6 つの同位体の基底状態の束縛状態の結合エネルギーを決定し、この情報をもとに全ての同位体の散乱長、および異種同位体間の散乱長を高精度に決定することに成功した。その結果を右表に示す。これを見ると、非常に大きな負の値（引力相互作用）や、ほとんどゼロ、非常に大きな正の値（斥力相互作用）、を実際にとっており、本研究により Yb 原子の系は、多様な原子間相互作用を提供する系であるということを実証することができた。これは量子シミュレーションに用いる原子としては大変有利な特徴である。

Mass number	168	170	171	172	173	174	176
168	13						
170	6.2	3.4					
171	4.7	1.9	-0.1				
172	3.4	-0.1	-4.3	-30			
173	2.0	-4.2	-29	22	11		
174	0.2	-26	23	11	7.3	5.5	
176	-18	11	7.5	5.6	4.2	2.9	-1.2

Scattering Length

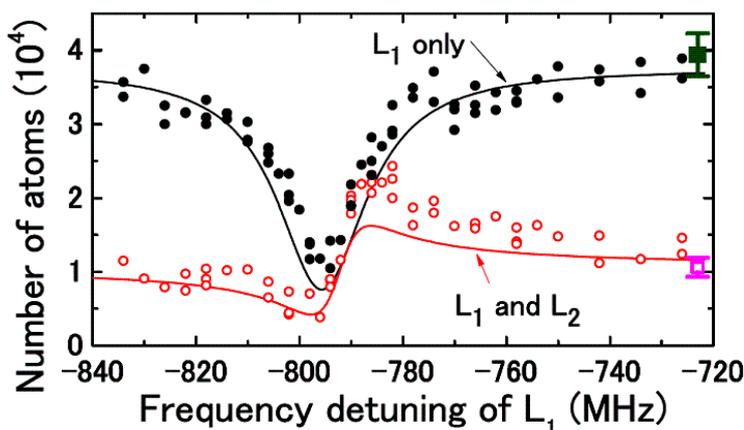


(nm)

③ スピン禁制遷移を用いた光フェッシュバッハ共鳴法の開発

散乱長の操作方法としてアルカリ原子に対して有効な磁場によるフェッシュバッハ共鳴の方法は、Yb 原子には超微細構造がないため利用できない。そこで、スピン禁制遷移を用いて、光により散乱長を変化させる、いわゆる光フェッシュバッハ共鳴法を新たに開発することを行った。特に、スピン禁制遷移を用いることにより、原子のロスの影響を抑えて、大きく散乱長を変えることが可能である。

本研究では、ボース同位体の ^{172}Yb および ^{176}Yb 原子を用いて、光フェッシュバッハ共鳴効果を観測することに成功した。前頁下の図は ^{172}Yb 原子の光フェッシュバッハ共鳴による散乱波動関数の変化を観測したもので、ある光会合の共鳴線に共鳴したレーザー光 (L_2) による光会合の効率をモニターしながら、散乱長を変化させるためのコントロール光 (L_1) を入射した。 L_1 , L_2 ともに入射しないときの原子数は約 4×10^4 個で、 L_1 のみ



入射した場合は、対称な光会合のよる原子ロススペクトルが得られるが、 L_1, L_2 ともに入射したときには、光フェッシュバツハ共鳴特有の非対称なスペクトルが観測された。この結果をゼロエネルギーの散乱にあてはめると、散乱長にして約 60 nm の変化が得られたことに相当している。この結果はアルカリ原子の光フェッシュバツハ共鳴にくらべてロスが約一桁程度少ないことも示している。

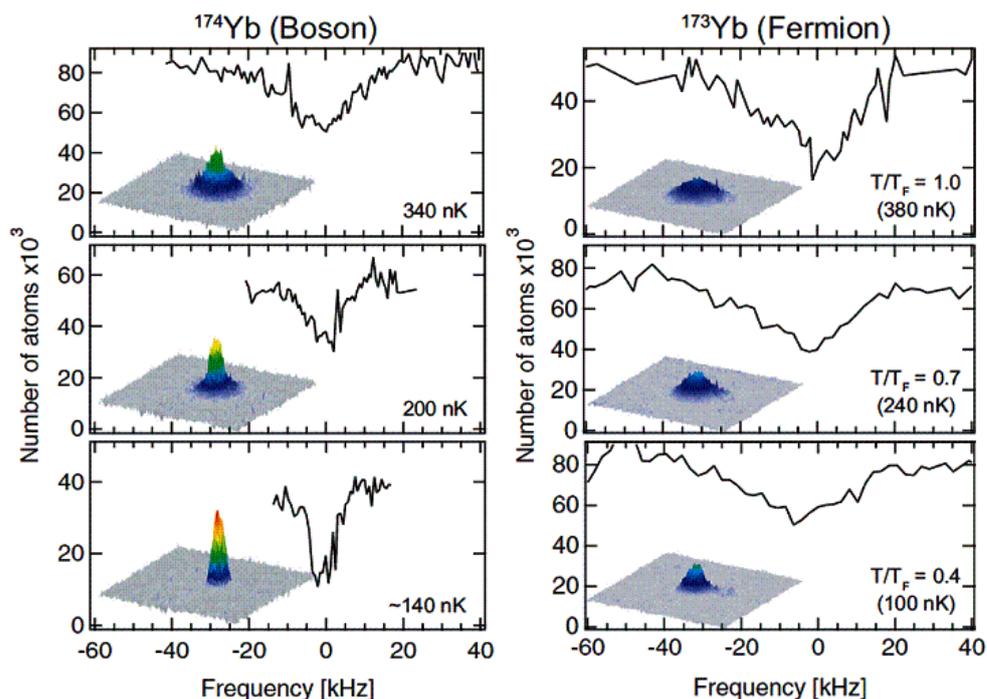
フェルミ同位体についても、 $1S_0+3P_1$ 原子状態に漸近する電子状態 $3\Sigma_u^+$ における Yb_2 分子への光会合分光を行い、特に他の系では見られない超微細相互作用に基づく、いわゆる **purely-long range** 分子の共鳴スペクトルの観測に成功した。これはフェルミオンの散乱長制御へ向けた重要なステップである。

また、本研究で新たに分かった知見として、散乱長が大きい負の値を持つものについては大きな光フェッシュバツハ共鳴効果が得られる、ということが挙げられる。これは特に、 -29 nm という散乱長をもつ ^{171}Yb - ^{173}Yb という異種フェルミ原子の混合系に応用してスピン自由度をもった BCS 状態などを生成する上で大変重要である。

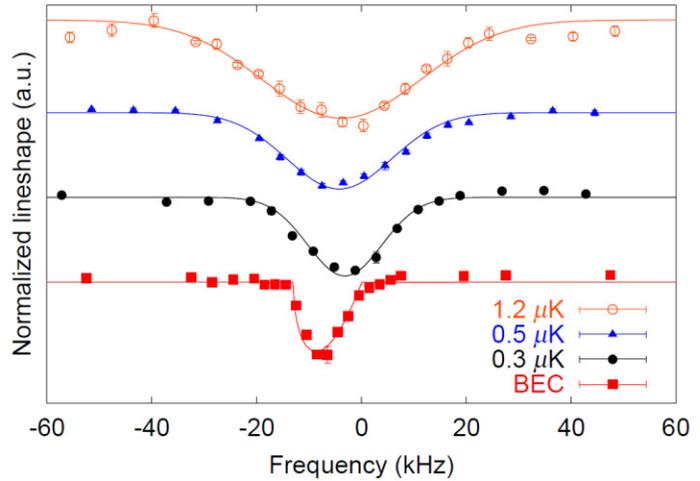
④ 量子縮退気体の超高分解能レーザー分光

Yb 原子に特有な、 1Hz 以下の超狭線幅遷移を用いて超高分解能レーザー分光を行なうことにより、光格子に導入された原子の局所的なプローブとなる。そこで我々は、そのための高安定光源の開発を行い、それを用いて、まず調和型のトラップに閉じ込められた量子縮退気体の超高分解能レーザー分光を行なった。

2つある超狭線幅遷移のうち、まず、 $1S_0-3P_0$ 遷移 (578nm) について実験を行った。 $1S_0-3P_0$ 遷移に相当する 578nm の光源に対しては、 1030 nm と 1319 nm の二つの超高安定なモノリシック型 YAG レーザーの和周波発生により数 mW 程度の出力を得て、これを防音および断熱の対策を施した、フィネス $300,000$ の低膨張ガラス光共振器により安定化することができた。線幅は約 1kHz 以下まで狭窄することに成功した。この光源を BEC とフェルミ縮退の両方の量子縮退気体に対して超高分解能レーザー分光を行なった結果が下図である。 300 nK 台の温度の熱原子のときにはボソンとフェルミオンでは両者のスペクトルにはほとんど変化はなく、ドップラー広がりによって決まっている。 200 nK 以下の温度では、BEC に対しては平均場相互作用によって決まるスペクトル広がり観測され、また、フェルミ原子のスペクトルでは、フェルミ統計のエネルギー分布を反映したスペクトルの広がりを観測し、両者の明瞭な違いを明らかにし、その起源が量子統計性に基づくものであることを明らかにした。



また、 $1S_0 \rightarrow 3P_2$ 遷移 (507nm) に対しては、BEC について特に詳しくスペクトルを測定した。まず、507nm の光源は、1014nm の半導体レーザー光の第二高調波発生により約 50 mW の出力を得ることに成功し、やはり線幅は 1kHz 以下にまで狭窄化した。この光源を用いて、BEC の励起に成功し、その平均場相互作用を明らかにすることができた。右図はその結果である。やはり、300 nK 以上の温度の熱原子に対してはドップラー広がりによって決まったスペクトルが得られ、BEC 転移温度以下では、スペクトルは大きくシフトし、さらに歪んだ形状をするようになった。これは平均場相互作用する BEC のスペクトルの典型的なスペクトルの振舞いであり、これから、励起状態 $3P_2$ と基底状態 $1S_0$ の間の散乱長を -33 nm と決定することができた。この情報は、後述する、光格子中の原子のスペクトルを議論するときに必要なものである。

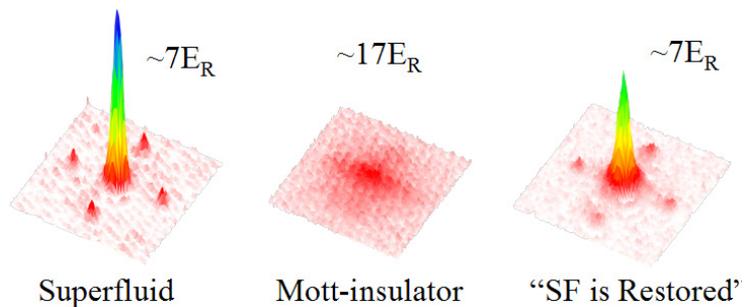


⑤ 3次元光格子中での超流動・モット絶縁体転移の観測

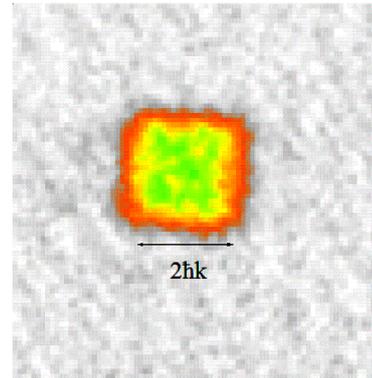
量子シミュレーションを行うためには、量子縮退領域にまで冷却した Yb 原子集団を、光格子に導入する必要がある。断熱的に光格子を立ち上げることにより、加熱を最小限に抑えて導入する必要がある。

これまでに量子縮退領域への冷却に成功したいくつかの Yb 量子気体を 3次元光格子に導入することに成功した。光格子に用いた光源は、波長 532 nm のもので、Yb 原子の最も強い吸収線に対しては赤方離調に相当する。比較的短い波長を用いたため、比較的重い Yb 原子に対しても、十分頻繁にホッピングを引き起こすことが可能になっている。この光格子の強度は強度安定化を施しており、再現性の高い実験結果が期待できる。

まず、 ^{174}Yb 原子を 3次元光格子に導入して、光強度を調節することにより、超流動・モット絶縁体転移を観測することに成功した。右下図にその様子を示す。比較的光格子ポテンシャルが低いとき ($\sim 7E_R$, E_R は反跳エネルギー) は、ホッピングが頻繁に起こり、系全体で位相コヒーレンスが存在するため、time-of-flight の画像には、明瞭な干渉パターンが観測される。さらに光格子ポテンシャルを高くしていくと ($\sim 17E_R$)、斥力相互作用によるホッピングの抑制のために系全体での位相コヒーレンスが消失し、干渉パターンも消失する。ただし、この干渉パターンも消失は、単なる熱的なデコヒーレンス等によるものではないため、再び光格子ポテンシャルを低くすると ($\sim 7E_R$)、系全体として再び位相コヒーレンスが速やかに復活して、再び干渉パターンが観測されるようになる。



また、フェルミオンの3次元光格子への導入についても ^{173}Yb 原子を用いて行い、光格子中の第一ブリルアンゾーンにおける擬運動量を断熱的に原子の運動量に変換することにより、右図のような、time-of-flight 画像を得ることに成功した。正方形の運動量分布の一辺の大きさはほぼ $2\hbar k$ に対応しており、第一ブリルアンゾーンの大きさと一致している。



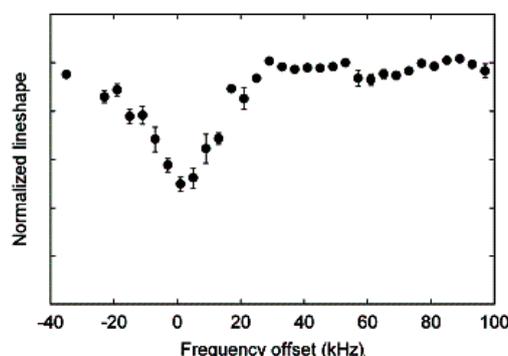
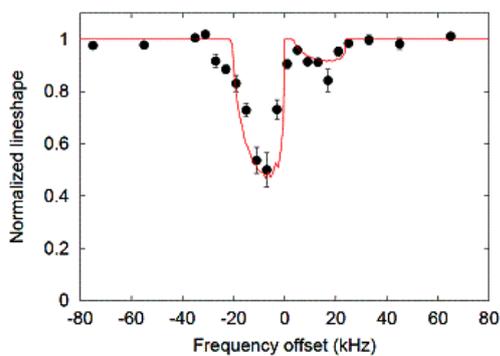
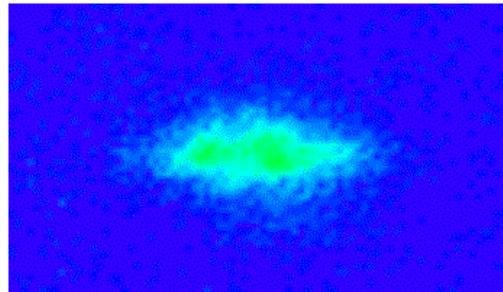
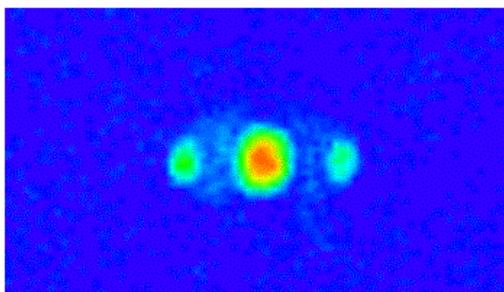
また、フェルミ同位体 ^{173}Yb とボース同位体 ^{174}Yb の混合気体も3次元光格子に導入することに成功した。

⑥ 1次元光格子中での超流動・原子スクイズド状態転移の高分解能レーザー分光

我々は、1次元光格子に導入された BEC において超流動・原子スクイズド状態転移を観測し、その転移の様子を、超狭線幅遷移を用いた高分解能レーザー分光によって、格子点中の原子の平均場相互作用をプローブすることに成功した。下図に、超流動・原子スクイズド状態転移の様子を、time-of-flight 法による位相コヒーレンスの測定と高分解能レーザー分光による平均場相互作用の測定の両方について行ったときの信号を示す。比較的光格子ポテンシャルが低い ($\sim 9E_R$) ときには (図左) 干渉パターンが観測され、スペクトルも比較的狭い幅のものが観測されるが、光格子ポテンシャルを高く ($\sim 42E_R$) したときには (図右) 干渉パターンが消失し、スペクトルもより幅の広いものが観測される。これは、オンサイト相互作用が原子数スクイズド状態では大きくなり、より重要な役割を果たしていることを明瞭に示す実験例となっている。この結果は、超狭線幅遷移を用いた高分解能レーザー分光が、光格子中でのオンサイト相互作用のプローブとして十分利用できることを実証できたと考えている。

Superfluid state

Number-squeezed state



また、レーザー冷却された Yb 原子を用いて、光と原子スピンの量子インターフェースの研究においても成果を挙げることができた。

⑦ 光と原子スピン集団の量子非破壊測定相互作用による量子インターフェース

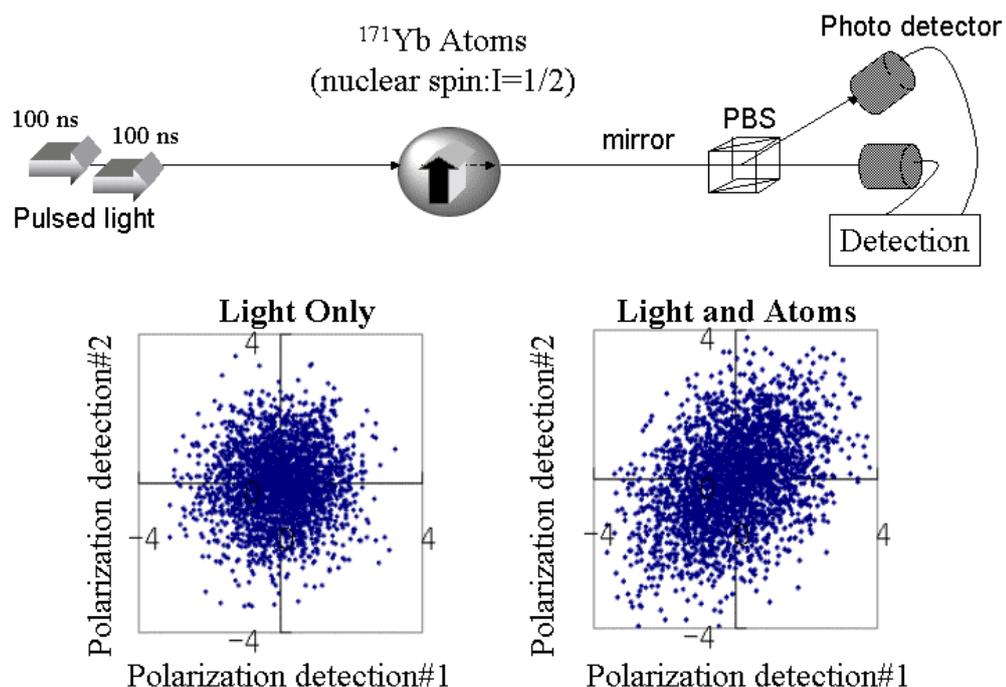
原子スピン集団の持つ量子性を活用して、量子性に優れた光との間での量子情報のインターフェースを構築することは、量子情報通信にとって重要である。我々は、光と原子のスワッピングゲートの提案を行い、特に、その操作が「量子」の領域にあるための実験パラメーターの制限についても理論的に考察し、実験的に十分実現可能であることを明らかにした。また、スピンの揺らぎが一方向に圧搾されたいわゆるスピンスクイズド状態は、量子情報にとって、重要なリソースになるが、これについても我々は、コヒーレント光と原子スピン集団の相互作用を詳しく考察し、測定を用いずにスピンスクイズド状態を生成する方法を新たに見出した。

以上は理論的な成果であるが、実験においても ^{171}Yb 原子を用いた核スピン $1/2$ の系について、量子非破壊測定によりスピンスクイズングを実現することに成功した。下図にその実験系と信号を示す。レーザー冷却された ^{171}Yb 原子に、 100 ns のパルス幅を持った直線偏光の光パルスを入射してそのファラデー回転による偏光回転を検出することによりスピンをスクイズする。スクイズングの確認は、続けて入射する光パルスの偏光回転を検出して、1 発目のパルスの結果との相関を測定することによって行った。光だけの時には、1 発目と2 発目の間には相関は無いが、原子があるときには、スピンによるノイズがのると同時にその加わったスピンノイズに相関が生じていることが分かる。これから、 1.8 dB のスピンスクイズングが達成されていることがわかった。

以上は、Yb 原子を用いた研究成果であるが、我々は Rb 原子の BEC についても研究を行い、

光散乱の無視できるコヒーレントスピン操作法の開発

という研究成果を挙げることができた。純光学的に生成した、Rb 原子のスピノール BEC を用いて、準静的な電場である CO_2 レーザーによるコヒーレントなスピン操作法の開発に成功した。これは、通常の近共鳴な光源を用いた誘導ラマン遷移によるスピン操作法に比べて、光散乱が無視できるという重要な特徴をもつ。現在、イオントラップを用いた量子



計算において、近共鳴な光源を用いた誘導ラマン遷移によるゲート操作時の光散乱エラーが重大な問題になっていることを考えると、今後の量子情報処理への応用が期待される。

(2)研究成果の今後期待される効果

これまでの研究により **Yb** 原子を用いた量子シミュレーターの基盤技術を開発することに成功したと考えている。今後は、反強磁性状態や d 波超伝導転移に相当する現象の観測への展開できると見込んでいる。これらにより、将来、新物質創生などに寄与できるのではないかと考えている。また、光フェッシュバツハ共鳴法を、量子縮退した **Yb** 原子系に適用することにより新たなフェルミオンの超流動状態の生成へと展開できると見込んでいる。さらに、 1S_0 - 3P_2 遷移を用いた単一サイト操作についても、大きな磁場勾配と光格子を組み合わせる装置が必要になるが、これを開発することにより、実現可能であると考えている。これにより、将来的には、光格子の **Yb** 原子を用いた量子計算機への応用展開が見込めると考えている。さらに、スピンスクイジングの技術を光格子中の **Yb** 原子に適用することにより、標準量子限界を超えた精度の光格子時計が実現でき、量子計測技術の発展に寄与できるのではないかと考えている。

3.2 希薄な原子集団を用いた量子情報処理（東京工業大学 上妻グループ） (1)研究実施内容及び成果

まず、真空スクイズド状態の保存・再生実験についてその詳細を説明することにする。保存媒体としては、レーザー冷却された ^{87}Rb 原子集団を用いた（図1）。

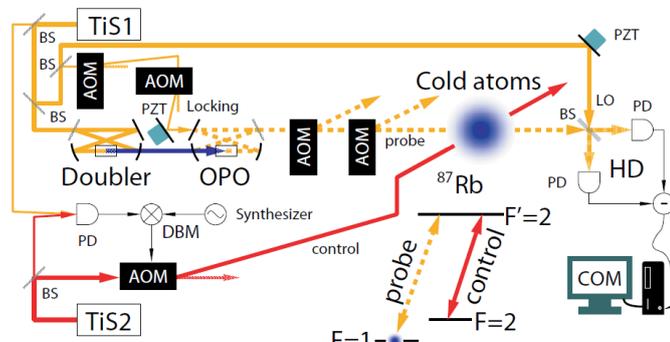


図1

まずレーザー冷却後、磁場、冷却用レーザーを遮断し、適当な光を照射することで、全ての原子を $5^2S_{1/2}, F=1$ 状態に準備した。状態の準備は9msの間に行い、次の1msの間に真空スクイズド状態と冷却原子集団との間の相互作用を観察した。実際には、この一連のプロセスを複数回繰り返すことで統計処理を行った。プローブ光とコントロール光の遷移は、それぞれ D_1 線 $F=1 \leftrightarrow F'=2$ 、 $F=2 \leftrightarrow F'=2$ である。レーザー冷却された原子集団のサイズは1mm、プローブ光遷移に対応する原子集団の光学密度はおよそ5であった。

プローブ光として用いる真空スクイズド状態は、パラメトリック過程を通して発生させた。まずチタンサファイアレーザー（TiS1）からの出力光（795nm）をボウタイ型ダブラー（Doubler）に通すことで倍波（397.5nm）を発生させた。次にこの光で光パラメトリック共振器（OPO）を駆動することで真空スクイズド状態を発生させた。Doubler、OPOの両方とも、周期反転 KTiOPO_4 結晶を利用している。プローブ光の直交位相振幅は、平衡型モダイン検出器（HD）によって測定した。ビームスプリッターによってプローブ光とコヒーレント状態にある強い局発光（LO）とを混ぜ合わせ、ビームスプリッターの2つの出力ポートの光強度差をフォトディテクター（PD）を用いて測定した。実時間信号を高速デジタルオシロスコープでとりこみ、コンピューターを用いてフーリエ変換することで、直交位相振幅に関する雑音強度スペクトルを得た。以降、雑音強度を $S(\theta)$ と表現することにする。 θ は、真空スクイズド状態と局発光との間の相対位相である。また $S(\theta)$ は $\theta = \pi/2$ で最大（アンチスクイズ）、 $\theta = 0$ で最小（スクイズ）と定義しておく。実際の実験では、 θ が一定の値をとるように光路長に適切なフィードバックを施す必要がある。この目的のために、TiS1から微弱なコヒーレント状態の光（ロック光）をとりだし、この光をまずOPOに入力し、古典的なパラメトリックゲインをもとに、OPO前のPZTにフィードバックをかけることで、励起用倍波とロック光の相対位相を安定化した。さらにOPOを通過したロック光をホモダイン検出器（HD）に入射させることで、ロック光と局発光の相対位相をモニターし、HD前のPZTにフィードバックをかけることで両者の相対位相を安定化した。以上の操作により、真空スクイズド状態と局発光の相対位相を所望する θ に安定化することが可能となった。なお、上記のフィードバック操作は原子をレーザー冷却している9msの間だけ行い、スクイズド状態と原子集団との相互作用を測定する1msの間は、ロック用の光を遮断し、さらにPZTに加える電圧レベルを保持した。測定時間は十分短いので、このサンプル&ホールド法により θ を目的の値に安定化したまま実験を

行うことができる。なお、レーザー冷却中、原子は $F = 2$ 状態にいたので、 $F = 1 \leftrightarrow F' = 2$ 遷移と共鳴するロック光が、原子集団によって吸収されてしまうことはない。

プローブ光（真空スクイズド状態）とコントロール光（コヒーレント状態）とは、 2.5° の角度で交差させた。これはプローブ光の空間モードにコントロール光が混入し、ホモダイン測定の精度を下げてしまう可能性を避けるためである。先ほどは、保存再生の原理を1次元的に取り扱ったが、プローブ光とコントロール光との間に角度がついている場合は、両者の空間ビートが原子集団に刻まれることになる。コントロール光を再度照射すると、一種のホログラム効果によって、コントロール光ではなくプローブ光の空間モードに光が再生されるというわけである。なお、プローブ光とコントロール光は、冷却原子集団の中心においてウェストを結んでおり、そのサイズは、それぞれ $150\mu\text{m}$, $550\mu\text{m}$ であった。

図2は、真空スクイズド状態の雑音強度スペクトルである。

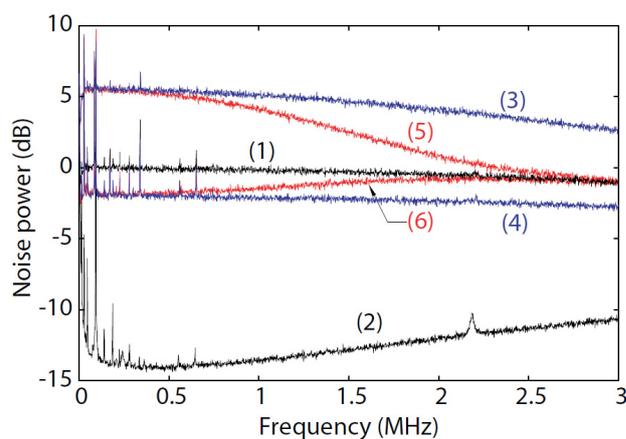


図2

1msの測定時間中に、実時間ホモダイン信号をサンプリングレート $5 \times 10^7 \text{ samples/s}$ で取り込んだ。また1回のフーリエ変換によって得られる雑音強度を1000回の測定に関して平均化した。曲線(1)はショットノイズを、また曲線(2)は平衡型ホモダイン検出器自体がもつ雑音レベルを表している。熱雑音が支配的ではあるが、700kHz以下の周波数領域で発生しているスパイクノイズは、周囲から混入した電気ノイズである。曲線(3)と(4)は原子集団が無い場合の真空スクイズド状態に対する $S(\pi/2)$ と $S(0)$ である。約6 dBのアンチスクイズ、-2dBのスクイズが得られていることがわかる。曲線(5)と(6)は冷却された原子集団にコントロール光(0.3mW)を照射することで電磁誘起透明化をおこなっているときの $S(\pi/2)$ と $S(0)$ である。それぞれアンチスクイズとスクイズとが、ある限られた周波数バンド幅内において観察されていることがわかる。これは、真空スクイズド状態に対して電磁誘起透明化を観察した確かな証拠である。

次に、我々はコントロール光強度を時間的に変化させることで、パルス状の真空スクイズド状態を保存し再生する実験を行った。まず、音響光学変調器(AOM)を用いることで、連続的に発生している真空スクイズド状態から、930 nsの時間幅をもつパルスを切り出した。AOMによる回折効率は、たかだか8割程度でしかない。真空スクイズド状態は光学ロスに対して極めて脆弱であるので、不要な光を1次回折光として除去し、0次の非回折光を使用するという、通常とは異なる使用方法を選択した。よって、パルスの裾野には、常に数%の光が残留することになる。出来上がったパルス状の真空スクイズド状態を冷却原子集団に入射し、パルスが超低速度伝播を通して空間的に圧縮されたところでコントロール光を遮断し、光の量子状態を原子集団に転写した。3μs保存を行った後、コントロール光を再度照射することで元のパルスの情報をもった光を再生した。1回の保存

再生過程は $11\mu\text{s}$ で行われ、これを 1ms の測定時間内に90回繰り返した。さらにこの一連の動作を 10^4 回繰り返すことで統計処理を行った。実時間ホモダイン信号のサンプリングレートは $2 \times 10^8 \text{ samples/s}$ である。ここで一つ重要なことがある。再生された光と局発光との間の相対位相は、基底状態のハイパーファイン間隔 (6.8GHz) で回転する系にのったときのコントロール光と局発光の相対位相によって決定される。つまり2台のチタンサファイアレーザーの周波数をそれぞれ別個に原子の共鳴遷移に安定化するだけでは不十分である。そこで、2台のレーザーのビート信号をシンセサイザ出力とミキシングし、ビート周波数を引き下げた上でコントロール光の強度を調整しているAOMを駆動した。こうすると、TiS1の周波数とコントロール光の差周波数がハイパーファイン基底状態間の差周波数と完全に一致することとなる。

直交位相振幅の雑音強度が時間的にどのように変化するかを評価する上で、我々は二つの手法を用いた。第一の方法では(手法I) 640ns の時間窓内で、中心周波数 1.5MHz 、バンド幅にして 1MHz の領域の雑音を評価した。つまり、 640ns を解析の時間分解能とした。第二の方法では(手法II)、まず微弱なコヒーレント状態のプロープ光を用いて事前に保存再生実験を行い、再生された光パルスの形状から時間関数を割り出すことを行った。今の場合、それは $f(t-t_0) = \exp[-(t-t_0)/\tau]$ であった。ここで $\tau = 250\text{ns}$ である。次に、真空スクイズド状態をプロープ光として用いた場合の実時間ホモダイン信号に、 $f(t-t_0)$ をかけた上で t_0 から $t_0 + 750\text{ns}$ の間積分を行い、これを上記時間関数でモードが定義された直交位相振幅とみなした。手法Iのメリットは、高周波数領域だけが評価の対象となるので、環境ノイズの影響を回避できるところにある。欠点は、電磁誘起透明化によって得られる透明窓の広さが有限なので、高周波数成分が光学的なロスを受け、スクイーミングが劣化するという点である。これに対して手法IIは、時間関数を再生光の時間波形にマッチングさせているので、抽出できるスクイズを最大化することができるという利点をもつ。ただし、上記時間関数 $f(t-t_0)$ のフーリエ変換は、バンド幅 640kHz のローレンツ関数であるので、低周波領域も解析に寄与することになる。幸い、我々は図2に示される周波数スペクトルを持ち合わせているので、環境ノイズが現れる特定の周波数については、評価の対象から外すことを行った。時間領域でホモダイン測定を行う際、実験上ある程度低周波の成分についてはローパスフィルターをいれて信号をカットする必要があるが、上記はこれを全ての信号を取得した上で後から行ったことに対応する。

図3は、 $S(\pi/2)$ および $S(0)$ の時間変化を、手法Iで評価したものである。挿入図は、手法IIによる評価結果である。

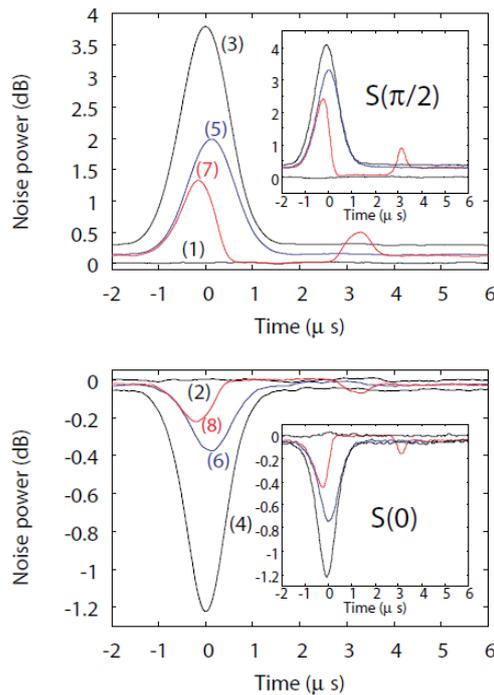


図 3

曲線 (1) と (2)はショットノイズを、曲線 (3)と (4)は冷却原子集団がないときの入力プローブパルスの $S(\pi/2)$ と $S(0)$ を表している。曲線 (5) と (6)は 電磁誘起透明化によって遅延した $S(\pi/2)$ と $S(0)$ 、曲線 (7) と (8)は保存再生を行った場合に対応する。コントロール光を遮断している間、雑音レベルはショットノイズと一致する。コントロール光を再度照射すると、雑音レベルが突如変化し、 0.489 ± 0.007 dB (+11.9%) のアンチスキューズと -0.070 ± 0.006 dB (-1.6%) のスキューズが得られた。手法IIでは、 0.90 ± 0.01 dB (+23%) と -0.16 ± 0.01 dB (-3.6%) が得られた。これらの値は非常に小さくはあるが、遅延したパルスだけでなく、元のパルスの裾野が示すスキューズレベルすらも陵駕しており、保存再生が成功したことを明確に示している。

続いて単一光子状態の保存再生実験について述べる。単一光子状態は、通常、非線形結晶を用いたパラメトリック下方変換過程を利用して発生させる (パラメトリック蛍光)。励起を十分弱くした極限では、パラメトリック蛍光は真空状態と 2 光子状態の重ね合わせで近似される。2 光子のうち、一方の光子を検出することができれば、真空の可能性は排除され、単一光子を残すことができる。これを「条件付き単一光子状態」とよぶ。ただし、パラメトリック蛍光の周波数幅が THz のオーダーであるのに対し、原子系の dipolar allowed な遷移はたかだか 10MHz 程度の自然幅しかもっていないため、単一光子の周波数帯域と、量子メモリの応答帯域とが全くかみ合わないという問題が発生してしまう。光源の帯域が広いことは、プロトコルの処理速度が速くなることを意味しているため、最終的には光源の帯域を保ったまま量子メモリの応答帯域を飛躍的に上昇させたい。が、ここでは研究の第一歩として、パラメトリック蛍光に対して周波数フィルタリングを施すことで周波数幅を狭窄化する方向で研究をすすめた。周波数フィルタリングされた蛍光に対して条件付けを施すことで単一光子状態を発生させ、それを原子系に保存し再生することを目的とした。

保存の媒体としては先の実験と同様レーザーによって冷却された ^{87}Rb 原子集団を利用した。我々は周期反転擬位相整合型導波路素子 (PPLN) を用いてチタンサファイアレ

レーザー (795nm) の 2 次高調波 (397.5nm) を発生させ、これを再度別の PPLN に入力することで、約 10THz の周波数幅をもつパラメトリック蛍光対を発生させた。このままでは原子媒体とのマッチングがとれないため、グレーティング、エタロン、ボウタイ型共振器を用いて、9MHz まで周波数幅を狭窄化した (図 4)。

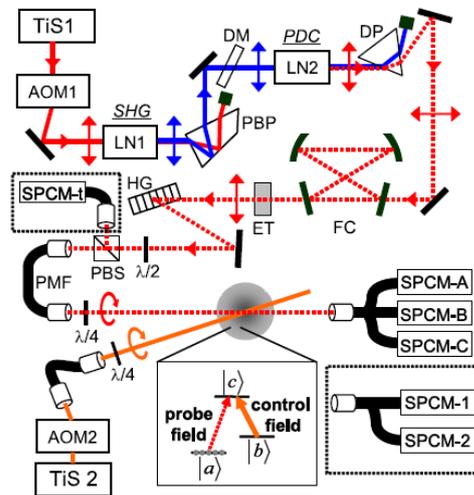


図 4

原子集団にコヒーレント状態の微弱なプローブ光と強いコントロール光とを同時に照射することで電磁誘起透明化信号を観察したところ、ほぼ 100%の透明化が得られ、かつ透明化窓として 12.6MHz が得られた (図 5 a)。

図 5 b は、50ns の幅をもつパラメトリック蛍光パルスを原子集団に入射し、出力光をフォトンカウントした結果である。図は複数回の実験について積算をしたものである。(A)は参照パルス、(B)は EIT によって遅延したパルス、そして(C)は保存再生をした結果である。パラメトリック蛍光のフラックスが原子集団に保存され、再生されていることがわかる。この際、パラメトリック蛍光がもつ非古典性が保存再生の前後で保存されているか否かを確認するため、入射光と出力光に対して、シングルカウント、ダブルカウント、トリプルカウント測定を行った。光場が古典的な場合、つまり P 関数が負値をとらない場合、

$$w \equiv \frac{\langle a^+ a \rangle \langle a^+ a^+ a^+ a a a \rangle}{\langle a^+ a^+ a a \rangle^2} \geq 1$$

が成立する。入射光、再生光のそれぞれについて、 0.77 ± 0.09 、 0.52 ± 0.26 が得られ、保存再生の前後で非古典性が保たれていることが確認された。

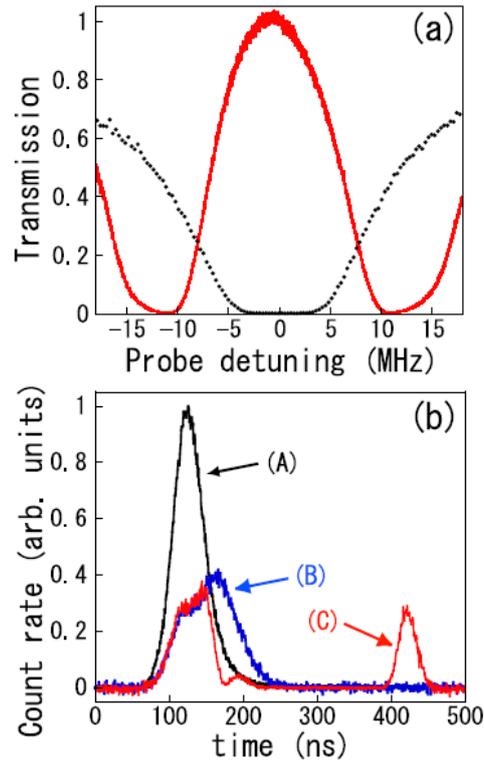


図 5

我々の最終目的は、単一光子の保存再生である。この目的を達成するため、パラメトリック蛍光の一部をトリガー光としてフotonカウントすることで条件付けを行った。原子集団に入射する光をシグナル光とすると、単一光子状態の保存再生は、アンチコヒーレンスパラメーター

$$\alpha = \frac{\langle a_t^+ a_t \rangle \langle a_s^+ a_t a_s^+ a_s a_s \rangle}{\langle a_t^+ a_t a_s^+ a_s \rangle^2}$$

が 1 を十分下回るか否かで判定できる。図 6 はトリガー光とシグナル光との相互相関関数を横軸としたときの α の値を入射光、再生光に対して測定したものである。 $\alpha < 1$ が入射と再生の双方について達成されていることが理解される。再生光については、 α が十分 1 を下回ることにはなかつたため、単一光子状態の保存再生が達成されたとは言いがたいが、少なくとも、非古典性が維持されていることは明確に示された。

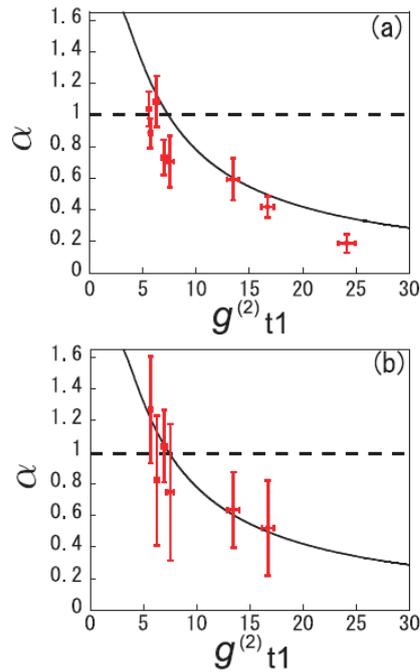


図 6

<研究の途上で新しく派生した研究>

原子集団自体を用いて非古典的な光を生成する研究に着手した。原子を用いて非古典光を発生させた場合、生成される光の周波数帯域がパラメトリック過程を利用した場合に比べて極端に制限されるため、高速の通信を行う上でデメリットとなる。しかし、この方法を用いると、発生した光子と原子集団とが自動的にエンタングルすることになり、これに続く様々な量子情報処理が飛躍的に容易になるという長所がある。世界的には原子集団の集団対称励起状態をターゲットとして研究が行われているが、原子集団の非対称励起状態に着目することで、エンタングルの次元を増大できる可能性を我々は理論的にみつけだした。そこで、この実験を開始し、研究期間中に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世界で初めて成功した。原子集団については集団励起に関する角運動量状態を、単一光子については軌道角運動量状態を利用することで、多次元性をもたせることに成功した。図7は原子集団と単一光子の全系について、空間位相変調器を用いた量子トモグラフィによって、その密度行列を再構成したものである。

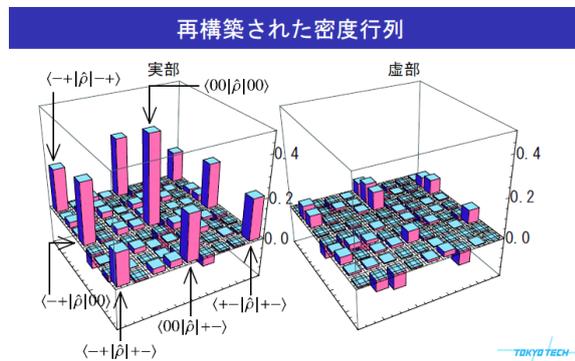


図 7

密度行列から系のシュミットナンバーを求めたところ、その値は3となった。すなわち通常の 2×2 次元のエンタングルメントに対して、 3×3 次元のエンタングルメントが発生して

いることが実験的に確かめられた。

(2)研究成果の今後期待される効果

光の保存再生実験の今後の応用性については最初に述べたとおりであるが、これ以外にも様々な発展性が考えられる。特に真空スクイーズド状態を保存した原子集団はスピンのスクイーズした状態になることを考えると、これを用いた永久ダイポールモーメントの測定への応用が考えられる。またスクイーズした原子集団の情報を部分的に再生し、フォトンカウントすれば、一種のシュレディンガー猫状態を生成することが可能となるであろう。また、この状態は原子系に保存されているので、いつでも好きなときに光のシュレディンガー猫状態を生成できることにもなる。

一方、単一光子と原子集団との間の多次元エンタングルメント生成技術については、これを利用した原子状態の制御が考えられる。たとえば、光子側の軌道角運動量の射影測定により、原子集団を好きな角運動量状態に転写できる。特に、原子集団を凝縮体にした場合、イラスト状態を生成することさえも可能となるであろう。

3. 3 量子相関光子対の生成および2光子遷移に関する研究(京都大学 北野グループ)
 (1)研究実施内容及び成果

北野グループでは、光子対の生成法および2光子吸収の量子光学的応用などを中心に研究を行った。行った主な研究は次のようなものである。

- (a) 偏光選択性のある2光子吸収を用いた光子対生成
- (b) 光子対と2光子吸収体との高非線形相互作用
- (c) 光電子増倍管での2光子吸収を用いた光子対検出
- (d) フォトニック結晶ファイバを用いた光子対生成と2光子干渉
- (e) 電子回路による波動伝搬のシミュレーション

以下に研究内容及び成果を報告する。

(a) 偏光選択性のある2光子吸収を用いた光子対生成

光子対生成には主として非線形光学結晶の自発パラメトリック下方変換が利用されている。それに対して、我々は偏光選択性のある二光子吸収を利用して光子対を生成する方法を考案した[T. Nakanishi, *et al.* PRA, **67**, pp.043809 (2003)]。吸収を用いて光子対を生成するという逆説的な現象であるが、この現象は観測による量子状態の射影を利用している。

2光子吸収には1光子の吸収の選択則より多様な選択則が存在するが、その中でも、右回りの円偏光の光子と左回りの円偏光の光子を一つずつ吸収するという選択則をもつ遷移が存在する。原子の S-S 間遷移などがこのような偏光選択性をもつが、これは原子系と光子の角運動量保存則に由来する。この選択則にしたがって吸収される光子の状態を、Rを右円偏光、Lを左円偏光とする円偏光基底で表現するとR,Lのように表現されるが、これを、Hを水平偏光、Vを垂直偏光という直線偏光基底で表現すると、 $|A\rangle = |HH\rangle + |VV\rangle$ (以下規格化因子は省略する)のように重ね合わせ状態で表現される。このような2光子吸収体に水平偏光の2光子 $|HH\rangle$ が相互作用すると光子の状態はどのように変化するかを、図1を用いて説明する。相互作用時間が十分長いとすると、 $|A\rangle$ に水平な成分は完全に

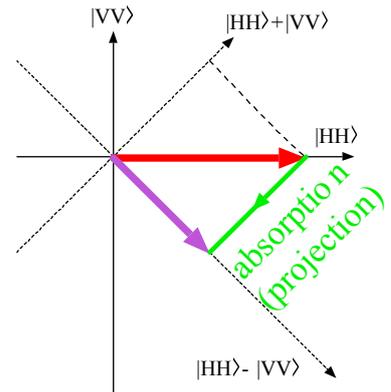


図1 吸収による状態射影

なくなるので、その直交状態に光の量子状態は射影を受け、 $|HH\rangle - |VV\rangle$ のような量子状態に変化する。このようにして、元々存在しなかった垂直偏光の2光子状態が出現することが分かる。

次に、入力(初期状態)が直線偏光のコヒーレント状態であった場合を、図2を用いて定性的に説明する。コヒーレント光の光子統計はポアソン分布であり、光子は図2のようにランダム

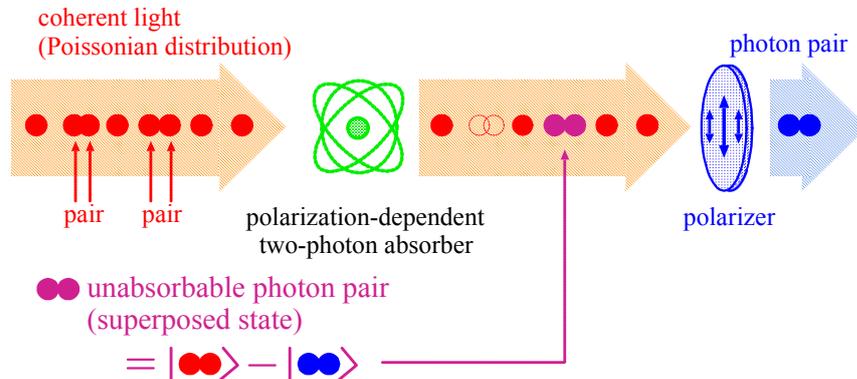


図2 偏光選択性2光子吸収を用いた光子対生成の原理

に分布している。2光子吸収は2つの光子の間隔が短い方が遷移速度は大きく、逆に離れた2光子は2光子吸収にほとんど関与しない。そして、偶然非常に近くに位置している2光子のみが、偏光選択2光子吸収による状態変化を受けて $|HH\rangle$ や $|VV\rangle$ のような重ね合わせ状態になると考えられる。そして、偏光板などで垂直偏光の2光子のみを取り出せば光子対が得られる。

この現象の解析には当初マスター方程式を用いていたが、計算はできるものの物理的な意味がはっきりしなかった。そこで我々は、吸収などの散逸的な相互作用を上手く表現できる Quantum Jump Approach という方法に着目した。条件付きで量子状態を追跡する Quantum Jump Approach という方法を用いることで、非エルミート演算子をハミルトニアンとして量子状態の運動を記述することができる。また、扱う状態も純粋状態であるので、どのような状態に系が発展するかを直感的に表現することができる。偏光選択2光子吸収にこの Quantum Jump Approach を適用すると、系の運動を支配するハミルトニアンが非エルミートである点を除けば4光波混合の形をしていることが分かった。すなわち、2光子吸収という散逸的な相互作用が、4光波混合と同一視できるということになる。2次の非線形光学結晶の自発パラメトリック下方変換を用いた方法では、光子対の周波数は元のレーザーの周波数の半分になるのに対して、偏光選択性のある2光子吸収を通して生成される光子対の波長は、元のコヒーレント光と同じ波長になるが、この性質は、光ファイバなどに代表される4光波混合を用いた光子対生成の特性と共通である。

このような現象の実験的実現には2光子吸収の吸収断面積が十分大きい物質が不可欠である。現状では、実験的実現は難しい点もあるが、CuCl 中の励起子分子や特殊な高分子を用いることで非常に大きな2光子吸収が得られることが分かっている。また、最近になって2光子吸収を用いて光子に対するホール(photon hole)を形成できることが予測されているが[Franson: PRL, **96**, 90402 (2006)]、この光子ホールとの関係を調べることも興味深いと考えている。

(b) 光子対と2光子吸収体との高非線形相互作用

光子間に相互作用を持たせるには、原子などを媒介にする方法がよくとられる。しかし、その相互作用は小さく、高Q共振器などを用いる必要が出てくる。2光子遷移を用いる方法も考えられるが、Schmidt 等はそれではやはり相互作用は小さく使い物にならないので、EIT を用いると大きな非線形相互作用が期待できると主張している[Schmidt et al. Opt.Lett. **21**, 1936 (1996)]。彼らは、対象とする光を量子的な相関のないコヒーレント光に限定している。

2光子遷移には、当然光子が最低2個必要となるが、その2つの光子が同時に相互作用する方が2光子遷移確率は大きくなる。超短パルスレーザーを使うことで、光子の同時性は担保されるが、線幅が広がってしまうために、共鳴的な2光子相互作用の効果は小さくなってしまふ。つまり、2光子遷移を効率よく行うには、2光子間の高い同時性と、2光子の周波数の和に対して十分小さい線幅が要求される。時間相関のある光子対はこの2つの性質を満たすもので、大きな非線形相互作用が期待される。北野グループでは、時間相関のある光子対の2光子遷移について理論的解析を行った。コヒーレント光を用いた2光子吸収は、光を古典的に扱う半古典論の枠組みで記述できる。しかし、古典的電磁気学で取り扱うことのできない量子的な光(非古典光)に対する2光子遷移を計算するには、図3のような3準位原子と光子場との相互作用に関する全量子的解析が不可欠である。我々は、任意の2光子状態を表現することができる2光子波動関数 $\Psi(t_1, t_2)$ を用いて2光子過程を計算した。2光子波動関数を用いることで、計算が容易になるだけでなく、物理的意味も明解になる。この2光子波動関数の形状は2光子過程の

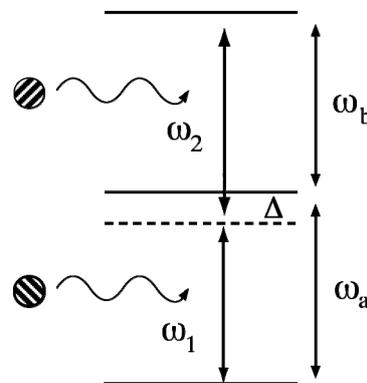


図3 3準位系における2光子遷移

大きさに敏感に影響する。古典光(コヒーレント光)を用いている限り、実現しうる2光子波動関数の形状は非常に限られているが、光子対のような非古典光を用いることで2光子波動関数の形状はかなり自由に操作することができる。2光子波動関数の形状を制御することで2光子吸収を大きくすることができるが、ここで問題になるのが、中間状態への1光子吸

$$P_2 \propto \left| \iint dt_1 dt_2 \Psi(t_1, t_2) e^{i\omega_b t_2} e^{i\omega_a t_1} \Theta(t_2 - t_1) \right|^2$$

収の影響である。2光子吸収が大きくなっても、中間状態への1光子吸収も大きくなってしまえば、真の意味で非線形性を高めたとはいえない。そこで我々は、2光子遷移確率と共に、中間状態への1光子遷移確率の計算に関しても、2光子波動関数を用いて定式化した。2光子吸収量については、以下の式で表される。

ただし、 Θ は階段関数である。一方、中間状態への1光子吸収は、 $P_1 \propto \int dt_2 \left| \int dt_1 \Psi(t_1, t_2) e^{i\omega_a t_1} \right|^2$ で表される。これにより任意の2光子状態に関する、2光子吸収確率と1光子吸収確率を計算することができる。

$$P_1 \propto \int dt_2 \left| \int dt_1 \Psi(t_1, t_2) e^{i\omega_a t_1} \right|^2$$

具体例として、代表的な2光子波動関数である、ガウス型の波動関数と矩形型の波動関数について計算した。前者は、光子対をそのスペクトルより十分狭いガウス型の帯域フィルタを用いて整形した場合に対応し、後者はタイプ2など結晶中の群速度が異なる過程で発生した光子対に対応する。両者共に時間相関光子対の同時性に関係する相関時間 τ が重要なパラメータとなる。図4にそれぞれの場合に対して計算した結果を相関時間 τ の関数として示す。黒線が中間状態への1光子吸収に対応し、赤線が2光子吸収に対応する。ただし、中間状態からの離調 Δ の逆数で相関時間 τ を規格化しており、1光子吸収と2光子吸収の最大値はそれぞれが1になるように規格化している。(i)のガウス型2光子波動関数に対する結果より、1光子吸収は相関時間に対してガウス関数で急速に減少するのに対して、2光子吸収は相関時間の2乗に反比例してゆっくり減少することが分かった。すなわち、ある程度大きい相関時間を設定することで、2光子吸収を1光子吸収より大きくすることができる。(ii)の矩形型2光子波動関数の場合はより特徴的で、2光子吸収のグラフが1光子吸収のグラフを相関時間に対して1/2に圧縮した形になっている。このことにより、1光子吸収が完全になくなる点においても、2光子吸収を比較的大きい有限の値に保つことができる。また、2光子吸収が0になる点はエンタングル誘起2光子透明化として研究されており[Fei: PRL, 78, 1679 (1997)], 我々の計算においてもその現象を確認することができる。

以上のように、我々は、任意の2光子状態を表現できる2光子波動関数を用いて、励起状

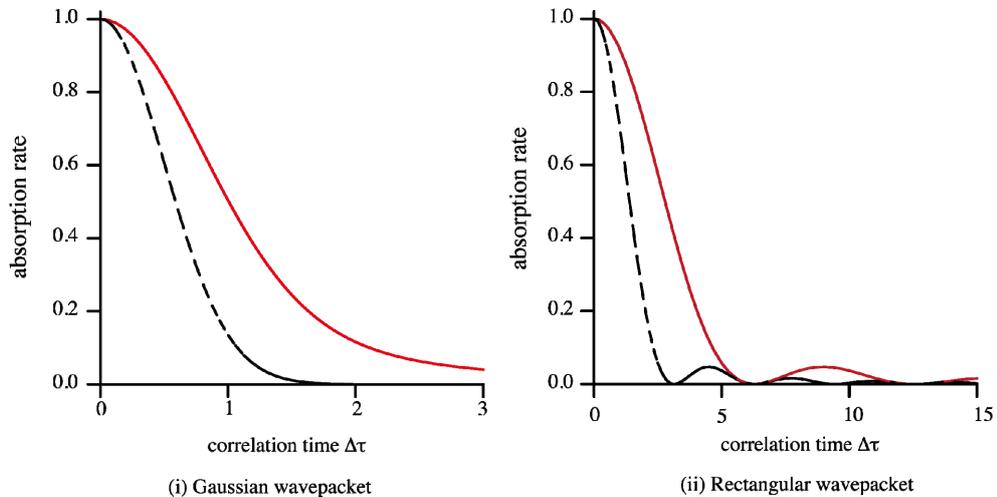


図4 1光子吸収(黒線)と2光子吸収(赤線)の比較。(i)ガウス型2光子波動関数の場合。(ii)矩形型2光子波動関数の場合。両者共に最大値が1になるように規格化している。

態への2光子吸収と、中間状態への1光子吸収を計算する方法を提案した。2光子波動関数の形に2光子吸収は大きく依存し、その形を制御することで、1光子吸収を抑制しつつ2光子吸収という非線形相互作用を大きくすることができることが分かった。

(c) 光電子増倍管での2光子吸収を用いた光子対検出

2光子吸収の量子光学的応用として、2光子遷移を光子対検出に利用する研究を行った。特に、2光子吸収を電流パルスとして直接検出する、光電子増倍管を用いた光子対検出に取り組んだ。光子対を検出するためには、その同時に発生するという特性を利用し、対となる光子の同時性を計測するが、一般的には、対となる光子を別々の光子検出器に入射し、その出力をAND回路に通すことで同時性計測を行なう。一方、本研究では単一の検出器に光子対を入射し、光電面における2光子吸収を利用して光子対を検出する。同時性は、2光子吸収過程における中間準位の寿命によって、数百fsのオーダーで保証することができる。2光子吸収は非線形相互作用のため、その遷移確率は光子統計に大きく依存する。光子がランダムに分布するコヒーレント光の場合は、偶然接近した2光子が対となって2光子遷移を誘起する。この場合の2光子吸収確率は、1つ目の光子が到達する確率と2つ目の光子が到達する確率の積なので、入射光強度の2乗に比例する。一方、光子対ビームでは光子が必ず対で発生するために、それによる2光子遷移確率は、光子対の数すなわち光強度に比例する。このような、光強度依存性から光子対検出を確認することができる。

光子対検出の効率を高くするには、2光子吸収を効率よく誘起し、1光子吸収を抑制する必要がある。そこで光電面の材質としてバイアルカリ半導体を用い、導電帯を2光子吸収の中間状態とするカスケード2光子吸収を利用する。これにより2光子吸収確率を大きくすることができる。図5にそのエネルギー図を示す。光子対を検出するためには、1光子吸収では導電帯には電子は励起されるものの電子親和力のために光電子が生成されない条件 $E_g < h\nu < E_g + \chi$ と、2光子で光電子が生成される条件 $E_g + \chi < 2h\nu$ が必要になる。このような関係式を満たす波長を持つ光子であれば、1光子吸収では電子は導電帯までしか励起されないため、その寿命である100fs程度で価電子帯へと緩和してしまう。しかし、導電帯に励起された後、その寿命以内にもう一つ光子を吸収すれば2光子吸収が完了し、1つの電子が光電子として放出される。この電子が後段の増幅器によって増幅され、パルスとして検出される。このような光電面の2光子吸収に起因する光電流(以下2光子光電流)は、パルス高の自己相関検出などに利用されているが、光子対の検出のような量子光学的応用はあまり研究されていない。

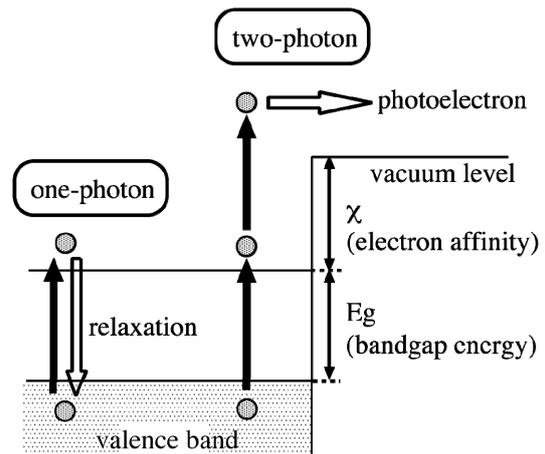


図5 光電面のエネルギー図

コヒーレント光による2光子光電流密度 J_{opt} は入射光強度 I を用いて $J_{opt} = \beta I^2$ と書ける。 β は入射光の波長や光電面の材質などにより決まる定数で、単位は Am^2/W^2 である。それに対して、光子対ビームに対する2光子光電流密度は $J_{opt} = \alpha_e I_e + \beta I^2$ と表される。第2項は偶発的に接近した光子による2光子吸収の寄与を表す。第1項が重要となる時間相関光子対による2光子吸収の寄与を表す項である。実験では、この第1項と第2項が等しくなる光強度 $I^{\circ}_{cross} = \beta / \alpha_e$ が光の量子性が現れる境目になる重要な光強度となる。

以上を実験で検証するために、光電子増倍管としてPerkin Elmer社製のチャンネル型光電子増倍管MP942を用いた。MP942の光電面はバイアルカリ半導体で、通常の1光子に対する応答波長域は300nm～650nmである。そこで、検出する光子対の波長を1064 nmに設定した。チャンネル型光電子増倍管を用いることで通常の光電子増倍管より低いダークカ

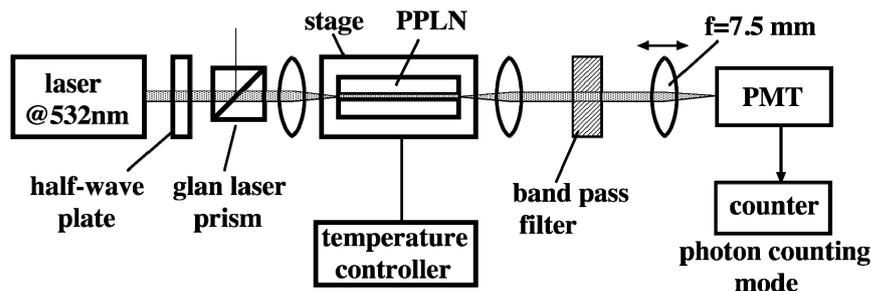


図6 時間相関光子対検出の実験系

ウントが期待できる。光子対の発生には、導波路型PPLN結晶を利用した。PPLNは擬似位相整合という方法によって位相整合を達成している。擬似位相整合は結晶の非線形光学定数の最大成分を利用できるため、従来の複屈折性を利用した位相整合よりも高効率な波長変換が可能である。また、導波路構造によって、生成された光子対が単一横モードに発生するという利点があり、光子対の集光の際には有利になる。図6に実験系を示す。532 nmのポンプ光から、タイプIのパラメトリック下方変換により中心波長1064 nmの時間相関光子対を生成した。生成した光子対はバンドパスフィルタを通してポンプ光をカットし、レンズで絞って光電子増倍管に入射した。レンズを前後に移動させることで、光電面におけるビーム断面積を制御できる。ポンプ光パワーを半波長板とグラインレーザプリズムで調節することで、入射する光子対の光強度を変えながら、フォトンカウンティングモードで出力を観測した。

時間相関光子対による光電流の特性をコヒーレント光の特性と比較したものを図7に示す。コヒーレント光による光電流の特性から、 100 W/m^2 以下の光強度においても線形特性が現れていないので、1光子吸収はほとんど起こっていないと考えられる。この図から、 I^e_{cross} 以下の光強度において、コヒーレント光では2乗特性、時間相関光子対では線形特性という特性差が得られている。また、検出効率を表す時間相関光子対の2光子吸収係数 α_e を1光子吸収係数が無視できるとして計算すると、 $7.1 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2$ であった。ただし、この値は光子対のロスを考慮していないために、実際の検出効率はより大きいと考えられる。

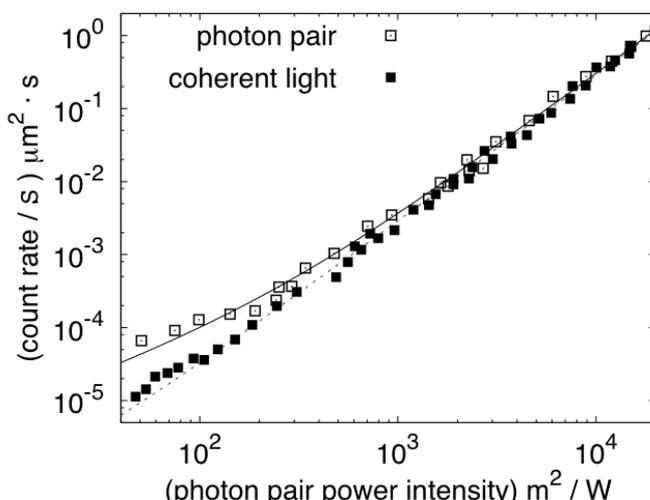


図7 単位時間単位断面積当りのカウント数の光子対光強度依存性(S:入射ビーム断面積)

(d) フォトニック結晶ファイバを用いた光子対生成と2光子干渉

光子対の生成に関しては、3光波混合を利用したものが長年研究されているが、4光波混合を利用して光子対を生成する方法が新たに注目されるようになった。3光波混合では作りたい光子対の波長の半分の波長をもつポンプ光が必要となるが、4光波混合ではポンプ光とほぼ同じ波長の光子対を生成することができるので、短波長の光子対を生成するのに適している。中でも、単一横モードの光子対が得られる、光ファイバにおける4光波混合を用いた光子対生成が注目されており、偏光相

関実験なども報告されている[X. Li et al.: PRL **94**, 53601(2005)]。4 光波混合を用いた光子対生成の生成効率は相互作用断面積の 2 乗に反比例している。したがって、通常の光ファイバよりも光閉じこめ領域の小さいフォトニック結晶ファイバを用いることで、より高い変換効率での光子対生成が期待できる。フォトニック結晶ファイバを用いた光子対生成や偏光相関実験は他に報告されているが[Rarity et al.: Opt. Exp. **13**, 534(2005), Fulconis et al.: PRL **99**, 120501(2007)]、北野グループではフォトニック結晶ファイバを用いて生成された光子対による 2 光子干渉実験について研究を行った。

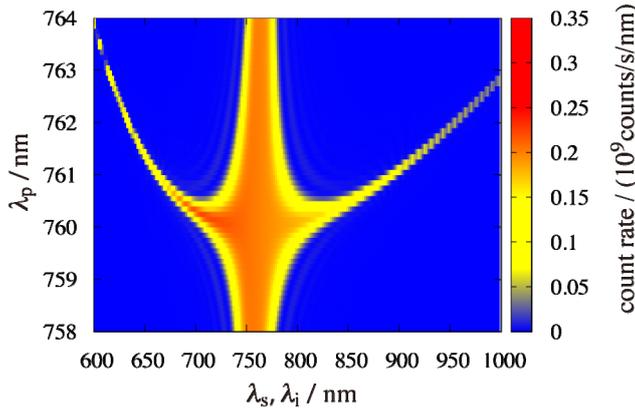


図 8 生成される光子対のスペクトル

我々は、長さが1.93m、非線形定数が102/W/km、ゼロ分散波長が760nmのフォトニック結晶ファイバ(Crystal fiber社製)を利用した。生成される光子対のスペクトルは、エネルギー保存則と運動量保存則に対応する位相整合条件より計算できる。位相整合条件を計算するには、ファイバの分散関係が必要になるが、データシートに記載されている群速度分散からそれを計算することができる。図8に理論計算から求まる光子対スペクトルを

示す。横軸が生成される光子対(シグナル光、アイドラ光)の波長を表し、縦軸が設定するポンプ光の波長を表している。ただし、ポンプ光パワー P は100mWとして計算している。ポンプ光波長を中心とした幹のようなスペクトルと、その外側に枝のようなスペクトルがみられる。光子対の生成の際に問題になるのが、ラマン散乱光である。このラマン散乱光はポンプ波長から主に長波長側に広く分布する。ラマン散乱光は、光子対の実験においてノイズの原因となる。位相整合条件が成立している光子対は P^2 に比例して生成されるのに対して、ラマン散乱光は P に比例して生成される。ポンプ光パワー P を大きくすることで、光子対の割合を大きくすることができるが、光子対のスペクトルとラマン散乱光のスペクトルを分離する方が純粋な光子対を得るのに望ましい。そのためには、図8の光子対スペクトルにおける外側のスペクトル(枝の部分)を利用するとよい。このスペクトルはポンプ波長をゼロ分散波長より少し大きくとることで広く広がり、ポンプ光やラマン散乱光から分離しやすくなる。

実験では、ポンプ光はCWチタンサファイアレーザを用いて発生させ、パワーを調整した後、フォトニック結晶ファイバに結合した。そして、ファイバ通過後の光を、設計波長760nm、光学濃度6のノッチフィルタに2度通し、ポンプ光の減衰を行った後、分光器に導入しスペクトルの測定を行った。ポンプ波長をファイバのゼロ分散波長より少し大きい波長の760.4nmに設定した結果が図9である。ファイバからの出力光には、光子対以外にも、ラマン散乱光が含まれる。しかし、ポンプ光依存性を

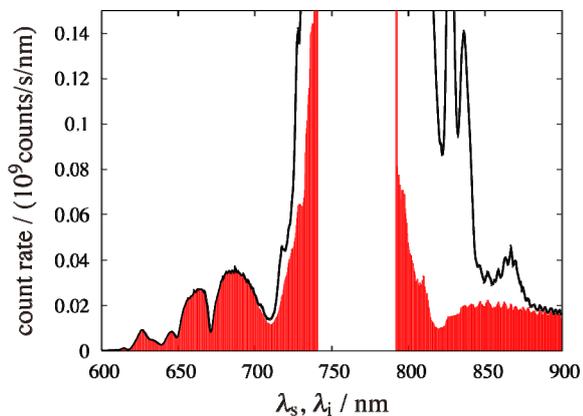


図 9 $\lambda_p = 760.4 \text{ nm}$, $P = 100 \text{ mW}$ における分光スペクトル。赤色部分が予測される光子対スペクトル。

調べて、 P^2 に比例する光子対成分と、 P に比例するラマン散乱光成分に分離することが可能である。図9の赤色部分が光子対に起因する光のスペクトルで、それ以外がラマン散乱光と考えられる。ポンプ光を中心にして、特に長波長側にラマン散乱光成分が強く表れていることがわかる。しかし、720nm以下もしくは880nm以上のスペクトルに注目すると、ラマン散乱光は非常に少なくなり、光子対スペクトルが大部分を占めていることがわかる。2光子干渉の実験は、ポンプ光波長としてこの760.4nmを用い、生成される光子対のうち、660nmをシグナル光子として、900nmをアイドラ光子として用いた。

2光子干渉には、図10の点線で囲んだ非対称マッハツェンダー型干渉計を利用した。この干渉計はフランソワ干渉計の変形版といえるものである。時間相関のある光子対が、2つとも短い経路を通るか、2つとも長い経路を通った場合のみを条件付きで同時計数することにより、明瞭度(Visibility) が100%の2光子干渉を得ることができる。この2光子干渉の明瞭度が50%を越えるときの光の状態は古典電磁気では説明がつかず、光の量子性が現れている。光子対が別々の経路を通った場合は干渉しないが、その場合光子対の検出時間に差が生じるのでその差を検出することで除外することができる。この干渉の実験において大事になってくるのは、コヒーレント長である。光子対のスペクトルは非常に広いので、1光子としてのコヒーレント長は非常に短い。それに対して、光子対をセットで見た場合のコヒーレント長(2光子コヒーレント長)はポンプ光のコヒーレント長で決定されるので非常に長い。実験では、干渉計の光路差 ΔL を1光子コヒーレント長よりも長く、2光子コヒーレント長よりも短くなるように、60cmに設定した。

2光子干渉実験の実験系について図10を用いて説明する。チタンサファイアレーザによって波長が760.4 nmのポンプ光を生成し、パワーを調整した後に、半波長板によって偏光方向を偏波保持フォトニック結晶ファイバの偏波面に一致するようにして結合させている。ファイバからの出力光のコリメートには対物レンズ(Newport 社、L-40X) を用いている。その後コリメート光は、点線で囲まれたマッハツェンダー型干渉計に入力される。干渉計の出力ポートは2つあるが、1つの出力はフォトダイオード(PD)を用いてポンプ光の1光子干渉をモニターしている。この干渉信号は、干渉計の光路長を変えるために設けられたピエゾ素子の印加電圧と実際に変化する光路長 Δx との関係を導き出すために利用している。そして、干渉計のもう一つのポートからの光は、設計波長が760 nmのノッチフィルタを2段通すことによってポンプ光成分を十分減衰させた後に、ダイクロイックミラーによって、短波長成分(シグナル光) と長波長成分(アイドラ光) に分けられる。2つに分けられた光は、バンドパスフィルタを用いて、660nmの成分と900nm の成分が単一光子検出器(PCM1, PCM2)に入力される。光子検出器には、660nmの光子(シグナル光子) に対してはMicro Photon Devices 社のNPD5CTCを、900nmの光子(アイドラ光子) に対してはPerkinElmer 社 SPCM-AQR-14を用いており、量子効率はそのそれぞれ33%と32%である。それぞれの検出器からの光子検出パルスは、時間差波高変換器(Time to Amplitude Converter, TAC) によって、

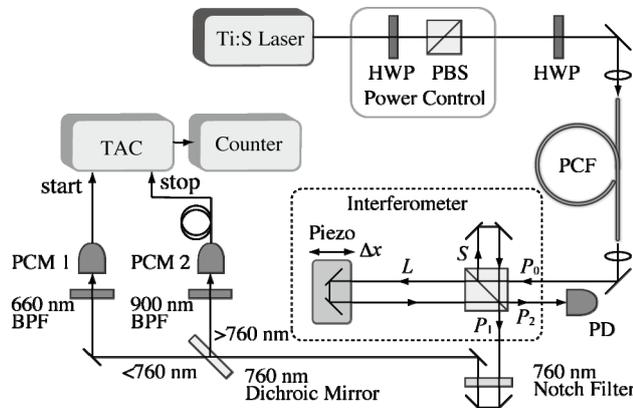


図 10 2光子干渉の実験系

光子検出の時間差に比例した振幅の電気パルスに変換される。ただし、660nmの光パルスをスタートの信号、900nmの光パルスをストップの信号にするために、ケーブルの長さを調整している。最後に、その電気パルスを、ディスクリミネータ付きのカウンタに入力することで特定の振幅のパルスのみを計数することができる。つまり、これによって特定の時間差で検出される光子の組のみを計数することができる。実験で設定した、TACの時間差電圧変換係数は0.2 V/nsである。

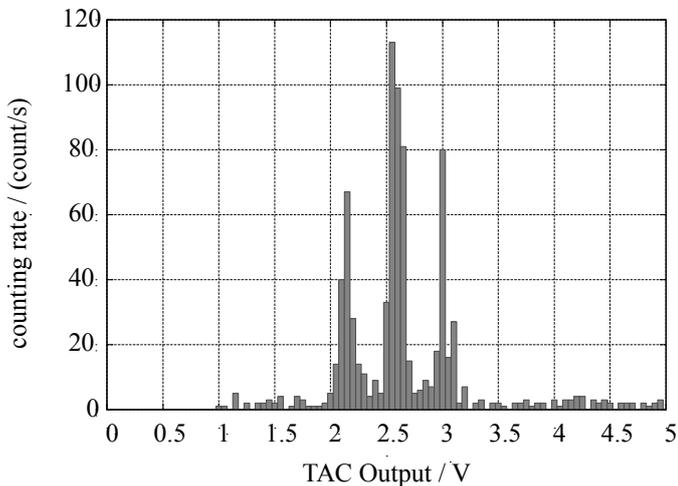


図 11 TAC 出力の波高値分布

振幅に関するヒストグラムを図11に示す。左から、 $V = 2.1V$ 付近、 $V = 2.6V$ 付近、 $V = 3.0V$ 付近に3つのピークがみられる。中央のピークは2光子干渉に寄与する2つの光子が同じ経路を通った場合に対応し、左右のピークは2つの光子が別々の経路を通った場合に対応する。カウンタの設定で特定のピークの計数も行うことができる。

波高値が2.0V から3.2V の TAC 信号を計数した結果を図12の左側に丸印で示す。比較のためにフォトダイオード PD によるポンプ光の干渉信号を点線で示している。ポンプ光による1光子干渉の半分の周期の2光子干渉が見受けられるが、この設定では、干渉に寄与しない光子対も計数しているために、干渉縞の明瞭度は40%と古典限界50%を超えていない。次に、波高値が2.45V から2.75V の TAC 信号を計数した結果を図10右に示す。この場合、2光子干渉に寄与する光子対だけが測定される。その結果、先ほどよりも明瞭度が大きく向上し、古典限界50%を超える83%の明瞭度の2光子干渉縞を得ることができた。明瞭度をさらに向上させるためには、ファイバからの出力光をコリメートするときのレンズの色収差を小さくする必要があると考えられる。

以上のように、4光波混合で得られた光子対にも古典電磁気学では説明のつかない時間

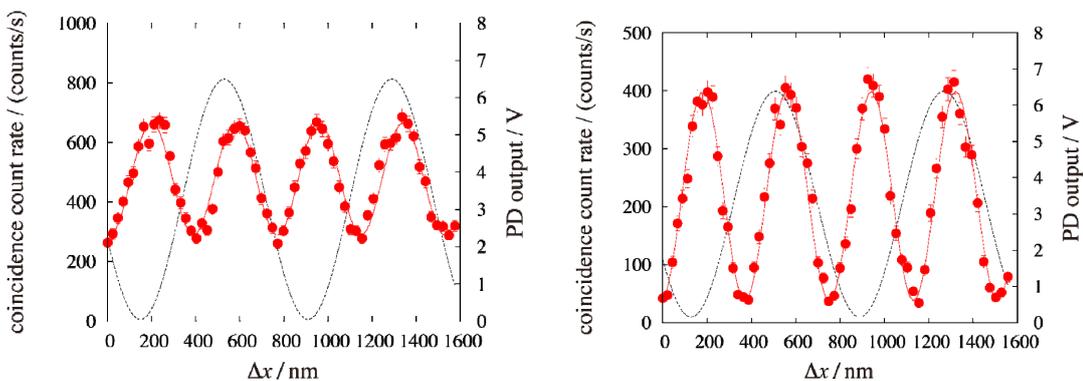


図 12 2光子干渉の実験。丸印が測定点。点線がポンプ光の1光子干渉縞。左図が同時計数のゲート時間が6nsの場合。右図が1.5nsの場合。

的量子相関が存在し、その2光子干渉縞はポンプ光の波長 760nm の半分の 380nm であった。このように、短い波長の光子対を生成することが可能な4光波混合を用いた光子対生成法は、2光子干渉に基づく新たな高分解能リソグラフィ技術[Boto et al. PRL, **85**, 2733 (2000)]や高感度位相測定法として有効と考えている。

(e) 電子回路による波動伝搬のシミュレーション

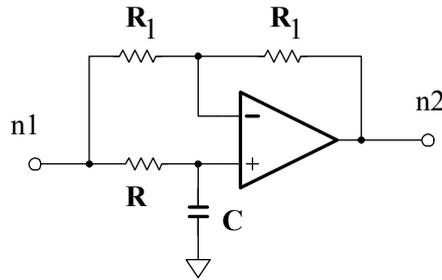


図 13 群速度制御の回路モデル

近年、光速を越える群速度や非常に遅い群速度といった、光の群速度に関する研究が盛んに行われている。我々は以前、光速を越える群速度と物理的に等価な、負の負群遅延を発生させる電子回路について研究を行った[Nakanishi et al. Am. J. Phys., **70**, 1117 (2002)]。この回路に適当な電気パルスを入力すると、同じ形のパルスが負の遅延時間で出力される。つまり、出力パルスの方が入力パルスより先に出力される。これは、一見奇妙で因果性を破っているように思えるが、実際は因果性の破れには関係しない問題である。

一方、遅い光に関しては、媒質中を電磁気誘導透明化(Electromagnetically Induced Transparency, EIT)を用いて光の群速度を極端に遅くする方法や、光を完全に停止(正確には断熱過程で光の状態を原子の集団スピンの状態に転写)する方法が考案されている。光の量子状態をも媒質中に集団スピンとして保存することができる上、必要なときに光として取り出せる。この技術は(量子)光メモリーとして注目されている。本研究では、この非常に遅い光伝搬現象にも目を向け、包絡線の形を変えない波動伝搬を集中定数回路で表現する方法を考案した。オールパスフィルターとして知られる回路(図 13)を縦続接続すれば、波動伝搬をシミュレートできる[Nakanishi et al. Am. J. Phys., **73**, 323 (2005)]。回路の時定数 $T_i = R_i C_i$ で決まる周波数 $1/T_i$ よりも小さい周波数に帯域制限された信号に対して、時定数 T_i が一段あたりの遅延時間になる。抵抗値は回路ごと、そして時間ごとに変えることができるように設計している。それにより、遅延時間 T_i は場所の関数にもなり時間の関数にもなる。これは EIT の実験において、カップリング光(制御光)の強度を変え、群速度を変えることに相当する。光を止める実験を回路でシミュレートすることも可能で、その場合は回路定数を一斉に変えて、一段あたりの遅延時間を極めて大きくすればよい。図14がその実験結果を表している。横軸を回路段数、縦軸を時間として、回路の出力値をプロットしている。 $t < 4s$ では、回路一段あたりの遅延時間は 0.08s にしている。この間では電気信号は一定の速度で回路間を伝搬していることが分かる。時刻 $t = 4s$ に一斉に遅延時間を約 20 倍の 1.6s にすると、信号はほとんど停止状態となる。 $t = 7s$ で再びもとの遅延時間に戻すと、信号は再び伝搬を開始する。EIT の実験と同様にこの回路の実験においても入力パルスの周波数帯域は決まった値より狭くする必要はある。この条件を満たさないパルスを入れると光の実験の場合も回路の実験の場合も同じように波形の減衰と著しい変形がもたらされる。このように、回路で EIT における光の伝搬をシミュレートできる上、回路では、パラメータを簡単かつ自由に変えることができるという利点があるため、時間的およ

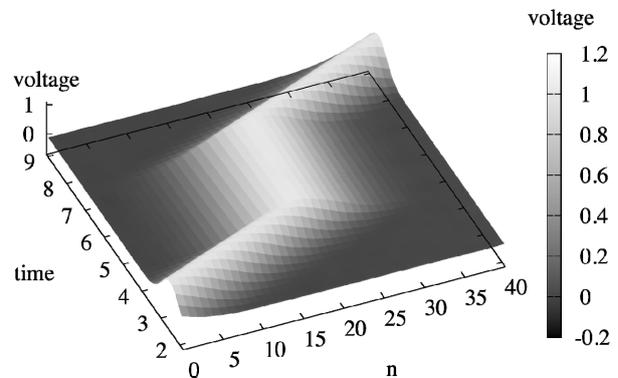


図 14 光凍結現象の回路シミュレーション

び空間的に同時に群速度を変化させるなど、光伝搬の実験では困難なことも実現できる。

以上のような光伝搬のシミュレーション以外に、シュレディンガー方程式の回路シミュレーションについても研究を行った。シュレディンガー方程式は、波動関数と呼ばれる複素関数 $\psi(x,t)$ に関する偏微分方程式である。この $\psi(x,t)$ や確率密度関数 $|\psi(x,t)|^2$ などは抽象的でわかりにくく、シュレディンガー方程式自体が量子的なものであると間違っ

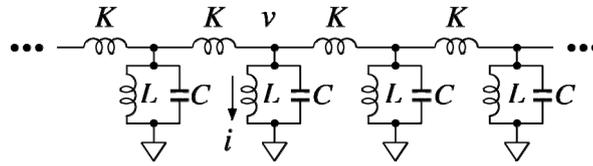


図 15 シュレディンガー方程式の回路モデル

とがある。しかし、シュレディンガー方程式自体は単なる波動方程式で特に量子的なところはない。したがって、電子回路のような古典系においてもシミュレートすることは可能である。

我々は、図15に示すようなインダクタ K で結合された並列 LC 共振回路がシュレディンガー方程式を表現していることを示した。回路表現では、共振器にかかる電圧が波動関数 $\psi(x,t)$ の実数部、コイルに流れる電流が虚数部、共振器に蓄えられるエネルギーが確率 $|\psi(x,t)|^2$ に対応する。また、質量 m が回路の結合の強さ ($\sim 1/K$) に、ポテンシャルエネルギーが共振器の共振周波数に相当する。以上のような対応関係により、量子力学の抽象的な概念が、具体的な回路のパラメータに置き換わっている。このように、回路における物理量と量子力学における物理量の対応が明瞭で、抽象的な概念を理解するのに大いに役に立つモデルと考える。

(2)研究成果の今後期待される効果

北野グループでは、光子対による2光子吸収の理論的解析を行った。その際、任意の2光子状態を表現することができる2光子波動関数を用いて定式化を行った。その結果、2光子吸収確率は2光子波動関数の形に大きく依存していることが分かった。これを実験に移すには、波動関数の形を自在に制御する必要がある。しかし最近の研究によって、様々な方法で、様々な形の2光子波動関数をもつ光子対を生成することができるようになってきており、実験的検証も行えるのではないかと思われる。

光電子増倍管の2光子吸収を用いた光子対検出の実験においては、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は成功したものの、信号雑音比は十分大きいとはいえなかった。最近になり、光子対ビームではなく、強いポンプ光と弱い種光(シグナル光とアイドラー光)を同時に入射することで得た非古典光を用いることで、高い明瞭度かつ大きな信号の2光子干渉信号が得られることが予測されている[Kolkiran and Agarwal:Opt. Lett. **16**, 6479 (2008)など]。このような理論的予測を、光電子増倍管の2光子吸収を用いた光子対検出法で検証できるのではないかと考えている。このような研究は、量子リソグラフィという量子光の応用の検証として大きな意味を持つと考えている。また、光電子増倍管の2光子吸収は中間状態の寿命が非常に短いので、非常に高い同時性をもつ光子対のみを計数できる。このような性質は、干渉計を用いない光子対の相関時間の測定や、2次コヒーレンス $g^{(2)}(0)$ の精密測定などに応用できると考えている。

4光波混合を用いた光子対生成については、3光波混合を用いる従来法に比べて短波長の光子対を生成するのに有利であり、回折限界を超える干渉法である量子リソグラフィという応用を考えたときに有効の方法であると考えている。また、シングルモードファイバを用いることで、単一横モードに光子対が生成されるので、非常に質の高い干渉実験ができる点も今後の応用を考えたときに有利であるといえる。

§ 4 研究参加者

① 高橋グループ(量子縮退原子集団を用いた量子情報処理の基礎研究)

	氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
○	高橋 義朗	京都大学	教授	量子縮退原子を用いた量子情報処理研究全般	H15.10~H21.3
	高須 洋介	京都大学	助教	レーザー冷却実験	H19. 4~H21.3
	熊倉 光孝	京都大学	助手	量子縮退原子を用いた量子情報処理研究全般	H15.10~H18.3
	植竹 智	京都大学	CREST 研究員	Yb原子を用いた量子シミュレーション研究	H16. 4~H21.3
	並木 亮	京都大学	研究員	量子情報理論	H20. 4~H21.3
	東條 賢	京都大学	CREST 研究員	レーザー冷却実験	H16. 4~H18.3
	青木 貴稔	京都大学	研究員	レーザー冷却実験	H17. 4~H18.9
	榎本 勝成	京都大学	研究員	レーザー冷却実験	H17. 4~H19.3
	北川 昌明	京都大学	大学院生	レーザー冷却実験	H16. 4~H19.3
	加藤 豊	京都大学	大学院生	レーザー冷却実験	H16. 4~H18.3
	泉 勇氣	京都大学	大学院生	レーザー冷却実験	H16. 4~H17.3
	廣谷 太志	京都大学	大学院生	レーザー冷却実験	H16. 4~H17.3
	高野 哲至	京都大学	大学院生	原子物理実験	H16. 4~H21.3
	山口 敦史	京都大学	大学院生	レーザー冷却実験	H16. 4~H20.3
	市原 直	京都大学	大学院生	原子物理実験	H16. 4~H18.3
	岡野 真之	京都大学	大学院生	レーザー冷却実験	H16. 4~H21.3
	橋本 大祐	京都大学	大学院生	レーザー冷却実験	H16. 4~H18.3
	福原 武	京都大学	大学院生	レーザー冷却実験	H16. 4~H21.3
	笠 健太郎	京都大学	大学院生	レーザー冷却実験	H17. 4~H19.3
	柴田 康介	京都大学	大学院生	レーザー冷却実験	H17. 4~H19.3
	山本 裕明	京都大学	大学院生	レーザー冷却実験	H17. 4~H19.3
	加藤 真也	京都大学	大学院生	レーザー冷却実験	H18. 4~H21.3
	素川 靖司	京都大学	大学院生	レーザー冷却実験	H18. 4~H21.3
	杉本 昌仁	京都大学	大学院生	レーザー冷却実験	H18. 4~H21.3

	布山 美慕	京都大学	大学院生	レーザー冷却実験	H18. 4～H20.3
	辻本 拓也	京都大学	大学院生	レーザー冷却実験	H19. 4～H21.3
	原 秀明	京都大学	大学院生	レーザー冷却実験	H19. 4～H21.3
	和山 弘	京都大学	大学院生	レーザー冷却実験	H19. 4～H21.3
	垣内 久	京都大学	大学院生	レーザー冷却実験	H19. 4～H21.3
	田家 慎太郎	京都大学	大学院生	レーザー冷却実験	H20. 4～H21.3
	斉藤 悠	京都大学	大学院生	レーザー冷却実験	H20. 4～H21.3
	土井 弘大	京都大学	大学院生	レーザー冷却実験	H20. 4～H21.3
	村松 真臣	京都大学	大学院生	レーザー冷却実験	H20. 4～H21.3
	清水 秀世	京都大学	CREST 事務員	経理、庶務	H19. 4～H21.3
	浅野 希	京都大学	CREST 事務員	経理、庶務	H16. 1～H19.3

② 上妻グループ(希薄な原子集団を用いた量子情報処理の研究)

	氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
○	上妻 幹旺	東京工業大学	教授	研究の総括、データ解析	H15.10～H21.3
	本多 和仁	東京工業大学	助教	真空スキューズド状態の保存再生	H19. 4～H21.3
	宇佐見 康二	東京工業大学	さきがけ研究員	原子集団のスピンモグラフィ	H16. 4～H20.5
	赤松 大輔	東京工業大学	大学院生	真空スキューズド状態の保存再生	H16. 4～H19.3
	秋葉 圭一郎	東京工業大学	大学院生	単一光子状態の保存再生	H16. 4～H20.3
	金井 紀文	東京工業大学	大学院生	原子-光子間多次元エンタングルメント	H16. 4～H18.3
	高橋 純一	東京工業大学	大学院生	原子集団のスピンモグラフィ	H16.4～H18.3
	谷村 崇仁	東京工業大学	大学院生	真空スキューズド状態の保存再生	H16. 4～H18.3
	井上 遼太郎	東京工業大学	大学院生	原子-光子間多次元エンタングルメント	H17. 4～H21.3
	横井 芳彦	東京工業大学	大学院生	真空スキューズド状態の保存再生	H17. 4～H19.3
	柏木 孝介	東京工業大学	大学院生	単一光子状態の保存再生	H18. 4～H20.3
	米原 健矢	東京工業大学	研究員	原子-光子間多次元エンタングルメント&Rb ボース凝縮体を用いた保存再生	H18. 4～H21.3

	有川 学	東京工業大学	大学院生	真空スクイーズド状態の保存再生	H18.4~H21.3
	永塚 哲史	東京工業大学	大学院生	Rb ボース凝縮体を用いた保存再生	H18.4~H21.3
	笠原 嘉晃	東京工業大学	大学院生	Rb ボース凝縮体を用いた保存再生	H19.4~H21.3
	長崎 慎	東京工業大学	大学院生	Rb ボース凝縮体を用いた保存再生	H19.4~H21.3
	赤城 裕	東京工業大学	学部 4 年生	Rb ボース凝縮体を用いた保存再生	H20.4~H21.3
	野口 篤史	東京工業大学	学部 4 年生	原子-光子間多次元エンタングルメント	H20.4~H21.3

③ 北野グループ(時間相関光子対による 2 光子遷移に関する研究)

	氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
○	北野 正雄	京都大学	教授	2 光子吸収理論	H15.10~H21.3
	杉山 和彦	京都大学	准教授	光子対の生成実験	H15.10~H21.3
	中西 俊博	京都大学	助教	光子対による原子の 2 光子共鳴	H15.10~H21.3
	小林 弘和	京都大学	大学院生	光電子増倍管を用いた光子対検出	H17.4~H21.3
	酒見 和生	京都大学	大学院生	フォトニック結晶ファイバを用いた光子対生成	H18.4~H20.3
	玉手 修平	京都大学	大学院生	空間相関光子対の 2 光子相互作用の研究	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
David Roberts(研究員)	量子情報処理研究	京都市	H17.11.9~H17.11.10
Cheng Chin(助教授)	量子情報処理研究	京都市	H18.9.3~H18.9.5

§ 6 成果発表等

① 高橋グループ

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 4件、国際(欧文)誌 32件)

- [1] Y. Takasu, K. Komori, K. Honda, M. Kumakura, T. Yabuzaki, and Y. Takahashi, "Photoassociation Spectroscopy of Laser-Cooled Ytterbium Atoms" Phys. Rev. Lett., Vol.93 No.12 pp123202-1-4 (15 September 2004)
- [2]高橋義朗 “光トラップ法を用いたボース・アインシュタイン凝縮体の生成” レーザー研究, **32** No.7 463-468(2004)
- [3]高橋義朗 “イッテルビウム原子のボース・アインシュタイン凝縮” 固体物理, 39 No.2 , 99-105 (2004)
- [4] M. Takeuchi, S. Ichihara, T. Takano, M. Kumakura, T. Yabuzaki, and Y. Takahashi, "Spin Squeezing via One-Axis Twisting with Coherent Light", Phys. Rev. Lett. Vol.94 No.2, pp023003-1-4 (18 January 2005)
- [5]M. Iinuma, Y. Takahashi, I. Shake, M. Oda, H. M. Shimizu, A. Masaike, T. Yabuzaki, "Proton Polarization with Naphthalene Crystals by Integrated Solid Effect on the Photoexcited Triplet State", J. Phys. Soc. Jpn., 74, No.9, 2622-2630 (2005).
- [6]M. Iinuma, Y. Takahashi, I. Shake, M. Oda, H. M. Shimizu, A. Masaike, T. Yabuzaki, "Proton Polarization with P-terphenyl Crystal by Integrated Solid Effect on Photoexcited Triplet State", Journal of Magnetic Resonance 175, 235-241(2005).
- [7] Y. Takasu, T. Fukuhara, M. Kitagawa, M. Kumakura, Y. Takahashi, "Quantum Degenerate Gases of Ytterbium Atoms", Laser Physics, Vol. 16, No.4, p.713 (2006)
- [8]J. Kobayashi, Y. Izumi, M. Kumakura, and Y. Takahashi, "All-Optical Formation of Molecules with Spin Degree of Freedom in an Atomic Bose-Einstein Condensate", Laser Physics, Vol. 16, No.4, p.718(2006).
- [9] M. Takeuchi, T. Takano, S. Ichihara, A. Yamaguchi, M. Kumakura, T. Yabuzaki, and Y. Takahashi, "Fast polarimetry system for the application to spin quantum non-demolition measurement", App. Phys. B. Vol. 83, No.33 (2006)
- [10] M. Takeuchi, T. Takano, S. Ichihara, Y. Takasu, M. Kumakura, T. Yabuzaki, and Y. Takahashi, "Paramagnetic Faraday rotation with spin-polarized ytterbium atoms", App. Phys. B, Vol. 83, No. 107 (2006)
- [11] J. Kobayashi, Y. Izumi, M. Kumakura, and Y. Takahashi, "Stable all-optical formation of Bose-Einstein Condensate using pointing-stabilized optical trapping beams", App. Phys. B, Vol. 83, p. 21 (2006)
- [12] S. Tojo, M. Kitagawa, K. Enomoto, Y. Kato, Y. Takasu, M. Kumakura, and Y. Takahashi, "High-resolution photoassociation spectroscopy of ultracold ytterbium atoms by using the

- intercombination transition”, Phys. Rev. Lett, Vol.96, pp.153201-1-4 (21 April 2006)
- [13] M. Kumakura, T. Hirotsu, M. Okano, Y. Takahashi, and T. Yabuzaki, “Topological formation of a multiply charged vortex in the Rb Bose-Einstein condensate: Effectiveness of the gravity compensation”, Phys. Rev. A, Vol. 73, pp. 063605-1-7 (2006)
- [14] M. Kumakura, T. Hirotsu, M. Okano, T. Yabuzaki, and Y. Takahashi, “Topological Creation of a Multiply Charged Quantized Vortex in the Rb Bose-Einstein Condensate” Laser Physics, 16(2), 371 (2006).
- [15] T. Fukuhara, Y. Takasu, M. Kumakura, and Y. Takahashi, “Degenerate Fermi Gases of Ytterbium”, Phys. Rev. Lett. 98,030401-1-4(January 2007)
- [16] K. Enomoto, M. Kitagawa, K. Kasa, S. Tojo, and Y. Takahashi, “Determination of the s-Wave Scattering Length and the C6 van der Waals Coefficient of ^{174}Yb via Photoassociation Spectroscopy”, Phys. Rev. Lett. 98., 203201-1-4(18 May 2007)
- [17] T. Fukuhara, Y. Takasu, S. Sugawa, Y. Takahashi, “Quantum Degenerate Fermi Gases of Ytterbium Atoms”, Journal of Low Temperature Physics,148,441-445(2007)
- [18] Masayuki Okano, Hideki Yasuda, Kentaro Kasa, Mitsutaka Kumakura, and Yoshiro Takahashi, “Splitting of a quadruply quantized vortex in the Rb Bose-Einstein condensate”, Journal of Low Temperature Physics,148,447-451(2007)
- [19] M. Takeuchi, S. Ichihara, T. Takano, M. Kumakura, and Y. Takahashi, “Spin Noise Measurement with Diamagnetic Atoms”, Phys. Rev. A ,Vol.75,063827-1-4(June2007)
- [20] T. Fukuhara, S. Sugawa, and Y. Takahashi, “Bose-Einstein condensation of an ytterbium isotope”, Phys. Rev. A ,Vol.76,051604-1-4(November2007)
- [21] T. Isoshima, M. Okano, H. Yasuda, K. Kasa, J. A. Huhtamaki, M. Kumakura, and Y. Takahashi, ”Spontaneous splitting of a quadruply charged vortex” Phys. Rev. Lett .99. 200403-1-4(16 November2007)
- [22]高橋義朗“冷却原子を用いた量子シミュレーション” Optonics, No.314, 174-179,(2008).
- [23] K. Enomoto, M. Kitagawa, S. Tojo, and Y. Takahashi, “Hyperfine-structure-induced purely long-range molecules”, Phys. Rev. Lett. 100, 123001-1-4(2008)
- [24] M. Kitagawa, K. Enomoto, K. Kasa, Y. Takahashi, R. Ciurylo, P. Naidon, and P. S. Julienne, ” Two-color photoassociation spectroscopy of ytterbium atoms and the precise determinations of s-wave scattering lengths” Phys. Rev. A 77, 012719-1-8(2008)
- [25] A. Yamaguchi, S. Uetake, Y. Takahashi, ” A diode laser system for spectroscopy of the ultranarrow transition in ytterbium atoms,” Appl. Phys. B 91, 57-60(2008)
- [26] T. Fukuhara, S. Sugawa, Y. Takasu, and Y. Takahashi, “ Quantum degenerate gases and the mixtures of ytterbium atoms”, Proceedings of the International School of Physics “Enrico Fermi”, Course CLXIV, , Varenna, 20 - 30 June 2006, edited by M. Inguscio, W. Ketterle, and C. Salomon

(IOS Press, Amsterdam 2008), pp. 857-866.

[27] T.Takano, M. Fuyama, R. Namiki, and Y. Takahashi, “Continuous variable quantum swapping gate between light and atoms”, Phys. Rev. A. **78**, 010307-1-4(2008)

[28] S. Uetake, A. Yamaguchi, S.Kato, Y. Takahashi, “High power narrow linewidth laser at 556 nm for magneto-optical trapping of ytterbium” Appl. Phys. B 92,33-35 (2008)

[29] A. Yamaguchi, S. Uetake, D. Hashimoto, J.M. Doyle, Y. Takahashi “Inelastic Collisions in Optically Trapped Ultracold Metastable Ytterbium” arXiv:0802.0461(2008)

[30] S. Uetake, A. Yamaguchi, D. Hashimoto, Y. Takahashi “High-resolution laser spectroscopy of ultracold ytterbium atoms using spin-forbidden electric quadrupole transition” Appl. Phys. B DOI 10.1007/s00340-008-3225-x (2008)

[31]高橋義朗“レーザー冷却技術とその応用”光学,37 巻,第 7 号, 362-369(2008).

[32]T. Takano, M. Fuyama, R. Namiki, and Y. Takahashi “Spin squeezing of a cold atomic ensemble with the nuclear spin of one-half” arXiv:0808.2353v1

[33] S. Uetake, A. Yamaguchi, S.Kato, T. Fukuhara, S. Sugawa, K. Enomoto, Y. Takasu, and Y. Takahashi “Quantum Degenerate Gases of Ytterbium Atoms” Proceedings of the 9th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the light of new technology.

[34] J. Kobayashi, K. Shibata, T. Aoki, M. Kumakura, Y. Takahashi, “Fictitious Magnetic Resonance by Quasi-Electrostatic Field ” arXiv:0810.4037v1

[35] K. Enomoto, K. Kasa, M. Kitagawa, and Y. Takahashi, “Optical Feshbach Resonance Using the Intercombination Transition”, Phys. Rev. Lett (to appear)

[36] J. Kobayashi, Y. Izumi, K. Enomoto, M. Kumakura, Y. Takahashi, “Spinor Molecule in Atomic Bose-Einstein Condensate” arXiv (submitted)

(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 17 件、国際会議 22 件)

[1] Y. Takahashi, “Bose-Einstein Condensation of Ytterbium Atoms”, International Conference on Laser Spectroscopy(ICOL03) (Palm Cove, Queensland, Australia) (2003.7.15)

[2] Y. Takahashi, “Bose-Einstein Condensation of Ytterbium Atoms”, International Laser Physics Workshop(LPHYS'03) (Hamburg, Germany) (2003.8.29)

[3] Y. Takahashi, “Bose-Einstein Condensation of Ytterbium Atoms”, The 9th Japan-US Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy (Yatsugatake) (2003.9.17)

[4] 高橋義朗, “原子の BEC から分子の BEC へ”, 分子構造総合討論会シンポジウム低温分子の

生成・反応と分光 (京都市) (2003.9.26)

[5] 高橋義朗, "原子を操るレーザー冷却技術", New Direction of Particle Physics(TEA03) (京都市) (2003.10.15)

[6] 高橋義朗, "低温原子の光会合", 日本分光学会レーザー部会・理研合同シンポジウム冷たい原子・分子の分光学とその応用 (和光市) (2004.1.15)

[7] Y. Takahashi, "Spinless and Spinor Bose Einstein Condensation", The 8th East Asia Workshop on Reaction (Okazaki)(2004.3.9)

[8] 高橋義朗, "レーザー冷却原子を用いた永久電気双極子モーメントの探索計画", 原子・分子・光科学(AMO)討論会(東京都) (2004.7.9)

[9] J. Kobayashi, Y. Izumi, M. Kumakura, and Y. Takahashi, "All-optical formation of molecules with spin-degree of freedom in atomic Bose-Einstein condensate", 14th INTERNATIONAL LASER PHYSICS WORKSHOP (Keihanna Plaza, Kyoto) (2005.7.8)

[10] M. Kumakura, T. Hirofumi, M. Okano, T. Yabuzaki, and Y. Takahashi, "Topological creation of a multiply charged quantum vortex in the Rb Bose-Einstein condensate", 14th INTERNATIONAL LASER PHYSICS WORKSHOP (Keihanna Plaza, Kyoto) (2005.7.8)

[11] Y. Takasu, T. Fukuhara, M. Kitagawa, M. Kumakura, and Y. Takahashi, "Quantum degenerate gases of Ytterbium atoms", 14th INTERNATIONAL LASER PHYSICS WORKSHOP (Keihanna Plaza, Kyoto) (2005.7.8)

[12] Y. Takahashi, "Quantum Degenerate Gases of Ytterbium Atoms", International Conference on Quantum Electronics 2005 (Toshi Center Kaikan, Tokyo)(2005.7.15)

[13] Y. Takahashi, "Toward Quantum Simulation with cold Ytterbium Atoms", Summer School of Quantum Information Processing (Kochi, Japan) (2005.9.7)

[14] Y. Takahashi, "Quantum Degenerate Gas of Ytterbium Atoms", ESF conference BEC2005 (Sant Feliu, Spain) (2005.9.14)

[15] Y. Takahashi, "Quantum Degenerate Gas of Ytterbium Atoms", International Seminar on Progress and Excitement in AMO Physics (Chofu)(2006.1.17)

[16] 高橋義朗, "レーザー光で量子気体を創る", 京都大学 COE シンポジウム(京都大学、京都)(2006.2.14)

[17] 高橋義朗, "イッテルビウム原子の BEC", 応用物理学会第 7 回光・量子エレクトロニクス業績賞受賞記念講演(武蔵工業大学、東京)(2006.3.23)

[18] Y. Takahashi, "Quantum Degenerate Gases of Ytterbium Atoms", International Symposium on Quantum Fluids and Solids(Kyoto University, Kyoto)(2006.8.2)

[19] Y. Takahashi, "Quantum Degenerate Gases of Ytterbium atoms", US-Japan Seminar on Quantum Electronics (Colorado, USA 2006.8.24)

- [20] K. Enomoto, M. Kitagawa, K. Kasa, and Y. Takahashi, “Photoassociation spectroscopy of ytterbium atoms with dipole-allowed and intercombination transitions”, Ultracold Group II Atoms: Theory and Application (Harvard University, USA, 2006.9.19)
- [21] Y. Takahashi, “Toward Quantum Simulation and Quantum Interface Using Cold Atoms”, US-Japan workshop on Quantum Information Science and Technology (Hawaii, USA 2006.10.17)
- [22] Y. Takahashi, “High resolution laser spectroscopy of ultracold Ytterbium”, CUA seminar (Cambridge, USA) (2007.4.3)
- [23] Y. Takahashi, “High resolution laser spectroscopy of ultracold Ytterbium” International Conference on Laser Spectroscopy (ICOLS2007) (Telluride, CO, USA) (2007.6.28)
- [24] 高橋義朗, “量子縮退気体の高分解能レーザー分光”, 研究討論会「高密度励起物質の光物性」(宇治市)(2007.7.5)
- [25] 高橋義朗, “Fundamental Physics using Cold Ytterbium Atoms”, ワークショップ「Fundamental Physics using Atoms」(京都市) (2007.8.5)
- [26] Y. Takahashi, “High resolution laser spectroscopy of ultracold Ytterbium Atoms”, 7th CLEO Pacific Rim conference on lasers and electro-optics (Seoul, Korea) (2007.8.28)
- [27] 高橋義朗, “Atomic Physics Approach to Quantum information Processing”, 第三回量子情報未来テーマ開拓研究会 (沖縄) (2007.9.1, 9.3)
- [28] 高橋義朗, “中性原子のボソン・フェルミオン混合気体 : イッテルビウム原子を中心として” 基研研究会「熱場の量子論とその応用」(京都) (2007.9.6)
- [29] Y. Takahashi, “Novel Cold Atomic Gas-from ultra high resolution laser spectroscopy to scalable quantum computation” 4th Annual Symposium Japanese-German Frontiers of Science (湘南)(2007.11.4)
- [30] 高橋義朗, “イッテルビウム原子を用いた量子縮退気体の研究” 東京工業大学COE 量子ナノ物理学 第3回公開シンポジウム(東京)(2007.12.20)
- [31] 高橋義朗, “Quantum Degenerate Gases of Ytterbium Atoms” Strategy Seminar in Ueda ERATO Project, University of Tokyo (東京)(2008.1.22)
- [32] 高橋義朗, “原子気体の BEC と量子縮退状態” 日本物理学会第63回年次大会(近畿大学、東大阪市)(2008.3.24)
- [33] S. Uetake, “High Resolution Spectroscopy of Quantum Degenerate Yb”, Ultra cold NanoMatter 2008 (Black Creek Conference Centre, Canada)(2008.2.15)
- [34] 高橋義朗, “原子スピン集団の量子非破壊測定とその展開” 第5回AMO討論会 首都大学東京 (2008.6.14)
- [35] 高橋義朗, “Quantum Degenerate Gases of Ytterbium Atoms”, ISQM-TOKYO'08 日立製作

所 基礎研究所(埼玉)(2008.8.27)

[36] 高橋義朗, “Quantum Simulation Using Cold Atoms in Optical Lattice” 第4回量子情報未来テーマ開拓研究会(沖縄)(2008.9.8)

[37] 高須洋介, “光を用いたイッテルビウム原子間相互作用の制御” 日本物理学会 2008 年秋季大会(岩手大学上田キャンパス 盛岡市)(2008.9.21)

[38] 高橋義朗, “冷却原子気体のスピンスクイージング”, 第3回量子ICT運営会議(メルパルク東京)(2008.9.30)

[39] 高橋義朗, “Quantum Degenerate Gases of Ytterbium Atoms in an Optical Lattice”, DMQ S 2008 (東京大学本郷キャンパス)(2008.10.20)

② 口頭発表 (国内会議 48 件、国際会議 6 件)

[1] 高橋義朗, “原子アンサンブルを用いた量子情報処理”, 量子情報処理シンポジウム(東京都)(2004.1.21)

[2] 竹内誠, 市原直, 高野哲至, 高須洋介, 熊倉光孝, 高橋義朗, 藪崎努, “ファラデー回転によるスピンスクイージング”, 日本物理学会 2004 年年次大会(福岡大学,福岡市)(2004.3.29)

[3] 廣谷太志, 福原武, 小林淳, 熊倉光孝, 高橋義朗, 藪崎努, “ ^{87}Rb ボーズ凝縮体における磁場反転による高次量子渦の生成”, 日本物理学会 2004 年年次大会(福岡大学,福岡市)(2004.3.27)

[4] Y. Takahashi, “Introduction to Atomic Physics”, 量子情報未来テーマ開拓研究会(知念、沖縄)(2004. 8.8-12)

[5] 小林淳, 泉勇氣, 榎本勝成, 熊倉光孝, 高橋義朗, “冷却 Rb 原子の 2 光子光会合”, 日本物理学会 2004 年秋季大会(青森大学, 青森市)(2004.9.12)

[6] 山口敦, 溝口昌毅, 橋本大祐, 加藤豊, 高須洋介, 植竹智, 熊倉光孝, 高橋義朗, “冷却 Yb 原子の準安定 $^3\text{P}_2$ 状態への光励起”, 日本物理学会 2004 年秋季大会(青森大学, 青森市)(2004.9.12)

[7] 竹内誠, 市原直, 高野哲至, 熊倉光孝, 高橋義朗, “スピンスクイージング実現へ向けた原子集団スピン測定 II”, 日本物理学会 2004 年秋季大会(青森大学, 青森市)(2004.9.12)

[8] 高野哲至, 市原直, 竹内誠, 熊倉光孝, 高橋義朗, “パルス光によるスピンの量子非破壊測定”, 日本物理学会 2004 年秋季大会(青森大学, 青森市)(2004.9.12)

[9] 竹内誠, “スピンスクイージング実現へ向けた原子集団スピン測定”, 量子情報合同ワークショップ(浅虫温泉, 青森市)(2004.9.16)

[10] 小林淳, “冷却 Rb 原子の光会合と光格子”, 量子情報合同ワークショップ(浅虫温泉, 青森市)(2004.9.6)

- [11] 熊倉光孝, “ ^{87}Rb ボーズ凝縮体における高次量子渦の生成と安定化”, 量子情報合同ワークショップ(浅虫温泉,青森市)(2004.9.17)
- [12] 岡野真之, 廣谷太志, 福原武, 熊倉光孝, 高橋義朗, “ ^{87}Rb ボーズ凝縮体に生成された高次量子渦の安定化”, 第 60 回日本物理学会年次大会 (千葉大学, 千葉県)(2005.3.25)
- [13] 小林淳, 泉勇氣, 熊倉光孝, 高橋義朗, “冷却 Rb 原子の 2 光子光会合 II”, 第 60 回日本物理学会年次大会(千葉大学, 千葉県)(2005.3.25)
- [14] 加藤豊, 東條賢, 笠健太郎, 高須洋介, 竹内誠, 熊倉光孝, 高橋義朗, “Yb 原子の異重項間遷移を用いた光会合分光”, 第 60 回日本物理学会年次大会 (千葉大学, 千葉県)(2005.3.26)
- [15] 橋本大祐, 山口敦史, 植竹智, 市原直, 高野哲至, “冷却 Yb 原子の準安定 $^3\text{P}_2$ 状態への光励起 II”, 第 60 回日本物理学会年次大会 (千葉大学, 千葉県)(2005.3.26)
- [16] 北川昌明, 福原武, 高須洋介, 熊倉光孝, 高橋義朗, “光格子中の冷却 Yb 原子 I”, 第 60 回日本物理学会年次大会 (千葉大学, 千葉県)(2005.3.26)
- [17] 福原武, 北川昌明, 高須洋介, 熊倉光孝, 高橋義朗, “光格子中の冷却 Yb 原子 II”, 第 60 回日本物理学会年次大会(千葉大学, 千葉県)(2005.3.26)
- [18] S. Tojo, Y. Kato, K. Kasa, Y. Takasu, M.Kumakura, and Y.Takahasi, “Photoassociation Spectroscopy of Laser-Cooled Ytterbium Atoms using the Intercombination Transition”, International Conference on Quantum Electronics 2005 (Toshi Center Kaikan, Tokyo)(2005.7.12)
- [19] 岡野真之, 笠健太郎, 熊倉光孝, 高橋義朗, “高次量子渦を持ったボーズ凝縮体の断層撮影”, 日本物理学会 2005 年秋季大会(同志社大学京田辺キャンパス, 京都市) (2005.9.19)
- [20] 福原武, 高須洋介, 熊倉光孝, 高橋義朗, “Yb 原子のフェルミ縮退に向けた冷却”, 日本物理学会 2005 年秋季大会 (同志社大学京田辺キャンパス, 京都市) (2005.9.19)
- [21] 高須洋介, 福原武, 熊倉光孝, 高橋義朗, “ ^{172}Yb および ^{176}Yb 原子のボーズ凝縮実現に向けた蒸発冷却 II” 日本物理学会 2005 年秋季大会 (同志社大学京田辺キャンパス, 京都市) (2005.9.19)
- [22] 山口敦史, 橋本大祐, 植竹智, 熊倉光孝, 高橋義朗, “冷却 Yb 原子の準安定 3P_2 状態への光励起 III”, 日本物理学会 2005 年秋季大会 (同志社大学京田辺キャンパス, 京都市) (2005.9.19)
- [23] 市原直, 高野哲至, 竹内誠, 山本裕明, 熊倉光孝, 高橋義朗, “パルス光によるスピンの量子非破壊測定 II” 日本物理学会 2005 年秋季大会 (同志社大学京田辺キャンパス, 京都市) (2005.9.20)
- [24] 小林淳, 柴田康介, 青木貴稔, 熊倉光孝, 高橋義朗, “準静電場による原子スピン共鳴”, 日本物理学会 2005 年秋季大会 (同志社大学京田辺キャンパス, 京都市) (2005.9.20)
- [25] 北川昌明, 東條賢, 榎本勝成, 熊倉光孝, 高橋義朗, “Yb 原子の異重項間遷移を用いた光会合分光 II”, 日本物理学会 2005 年秋季大会 (同志社大学京田辺キャンパス, 京都市)(2005.9.20)

- [26] 高橋義朗, “冷却原子集団を用いた量子シミュレーション”, 量子情報ワークショップ(リゾーピア箱根,箱根)(2005.12.15)
- [27] K. Enomoto, S. Tojo, M. Kitagawa, Y. Nishio, Y. Takasu, M. Kumakura, and T. Takahashi, “Photoassociation spectroscopy of ultracold Yb atoms using the intercombination transition (3P1-1S0)”, EU Training School and Workshop, Achievements and Perspectives of Cold Molecules(Les Houches , FRANCE)(2006.3.8)
- [28] 福原武, 高須洋介, AjayWasan, 熊倉光孝, 高橋義朗, “Yb 原子のフェルミ縮退に向けた冷却 II”, 日本物理学会 2006 年年次大会 (愛媛大学・松山大学, 愛媛県) (2006.3.29)
- [29] 榎本勝成、東條賢、北川昌明、西尾洋祐、高須洋介、熊倉光孝, 高橋義朗, “冷却 Yb 原子の光会合を用いた散乱長の決定”, 日本物理学会 2006 年年次大会 (愛媛大学・松山大学, 愛媛県) (2006.3.29)
- [30] 高橋義朗, “Quantum Simulation Using Quantum Degenerate Ytterbium Atoms in Optical Lattices”, 「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」研究会 (関西セミナーハウス, 京都, 2006.5.25-5.27)
- [31] T.Fukuhara, S. Sugawa, Y. Takasu, and Y. Takahashi, “Quantum Degenerate Gases and the Mixture of Ytterbium”, International School of Physics “Enrico Fermi” CLXIV Course Ultra-cold Fermi Gases (Villa Monastero, Varenna, Italy)(2006.6.29)
- [32] K. Enomoto, M. Kitagawa, K. Kasa, and Y. Takahashi, “Photoassociation spectroscopy of ytterbium atoms with dipole-allowed and intercombination transitions”, Ultracold Group II Atoms: Theory and Application (Harvard University)(2006.9.19)
- [33] 岡野真之, 安田英紀, 笠健太郎, 熊倉光孝, 高橋義朗, “ ^{87}R ボース凝縮体における高次量子渦の分裂”, 日本物理学会 2006 年秋季大会(千葉大学西千葉キャンパス, 千葉県)(2006.9.24)
- [34] 素川靖司, 福原武, 高須洋介, 高橋義朗, “ ^{170}Yb 原子のボース・アインシュタイン凝縮の実現”, 日本物理学会 2006 年秋季大会 (千葉大学西千葉キャンパス, 千葉県)(2006.9.24)
- [35] 福原武, 素川靖司, 高須洋介, 高橋義朗, “Yb 原子混合量子縮退”, 日本物理学会 2006 年秋季大会 (千葉大学西千葉キャンパス, 千葉県)(2006.9.24)
- [36] 山口敦史, 植竹智, 橋本大祐, 加藤真也, 高橋義朗, “冷却 Yb 原子の準安定 3P2 状態での衝突特性”, 日本物理学会 2006 年秋季大会 (千葉大学西千葉キャンパス, 千葉県)(2006.9.24)
- [37] 高野哲至, 布山美慕, 山本裕明, 高橋義朗, “ファラデー回転相互作用を用いたスワッピングゲート”, 日本物理学会 2006 年秋季大会 (千葉大学西千葉キャンパス, 千葉県)(2006.9.26)
- [38] 福原武、素川靖司, 高橋義朗“スピン偏極によるYbフェルミ原子冷却の最適化” (鹿児島大学郡元キャンパス、鹿児島県)(2007.3.20)
- [39] 山口敦史、植竹智、加藤真也、高橋義朗“冷却Yb原子の準安定 3P2 への直接励起I” (鹿児島大学郡元キャンパス、鹿児島県)(2007.3.19)

- [40] 高野哲至、布山美慕、高橋義朗、“パルス光によるスピンの量子非破壊測定III”,((鹿児島大学郡元キャンパス、鹿児島県)(2007.3.21)
- [41] 加藤真也、山口敦史、植竹智、高橋義朗“冷却Yb原子の準安定 $3P_2$ への直接励起II”日本物理学会 2007 年春季大会(鹿児島大学郡元キャンパス、鹿児島県)(2007.3.19)
- [42] 榎本勝成、笠健太郎、北川昌明、N. Polchai、原秀明、高橋義朗“光フェッシュバツハ共鳴を用いた冷却Yb原子の散乱長の制御”(鹿児島大学郡元キャンパス、鹿児島県)(2007.3.20)
- [43] 植竹智、山口敦史、加藤真也、李瑛、細川瑞彦、高橋義朗“冷却Yb原子 $1S_0-3P_0$ 遷移の高分解能分光”日本物理学会 2007 年春季大会(鹿児島大学郡元キャンパス、鹿児島県)(2007.3.19)
- [44] 北川昌明、榎本勝成、笠健太郎、原秀明、高橋義朗“2光子光会合を用いたYb原子全同位体のs波散乱長の決定”(鹿児島大学郡元キャンパス、鹿児島県)(2007.3.20)
- [45] 高橋義朗, T. Fukuhara, S. Sugawa, A. Yamaguchi, S. Kato, S. Uetake, Y. Takasu, Y. Takahashi, “光格子中のイッテルビウム原子気体を用いた量子シミュレーション” 「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」A03A04 合同研究会(高野山)(2007.7.14)
- [46] 植竹智、山口敦史、加藤真也、福原武、李瑛、細川瑞彦、高橋義朗、“冷却 Yb 原子 $1S_0-3P_0$ 遷移の高分解能分光 II”、日本物理学会 第 62 回年次大会(北海道大学札幌キャンパス)(2007.9.24)
- [47] 福原武、辻本拓也、素川靖司、高須洋介、高橋義朗、“Yb ボース・フェルミ混合系における集団振動”、日本物理学会 第 62 回年次大会(北海道大学札幌キャンパス)(2007.9.24)
- [48] 原秀明、榎本勝成、北川昌明、高須洋介、高橋義朗、“冷却イッテルビウム原子の異核分子光会合”、日本物理学会 第 62 回年次大会(北海道大学札幌キャンパス)(2007.9.24)
- [49] A.Yamaguchi, S.Uetake, S.Kato, T.Fukuhara, S.Sugawa, H.Ito, Y.Li, M.Hosokawa, and Y.Takahashi, “Ultra high-resolution laser spectroscopy of ultracold ytterbium atoms”, Asian CORE Symposium on Advanced Laser Spectroscopy,(kobe)(2007.9.25)
- [50] Y. Takahashi, T. Fukuhara, S. Sugawa, S. Uetake, A. Yamaguchi, S. Kato, Y. Takasu, “Quantum Degenerate Gases of Ytterbium Atoms” International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials (PSM2007) (岐阜)(2007.10.30)
- [51] 高橋義朗、“冷却原子集団を用いた量子シミュレーション” 量子情報ワークショップ(熱海)(2007.12.13)
- [52] 素川靖司、福原武、杉本昌仁、田家慎太郎、高須洋介、高橋義朗、“冷却 Yb 原子の光格子実験”、日本物理学会第 63 回年次大会(近畿大学、東大阪市)(2008.3.25)
- [53] 山口敦史、植竹智、加藤真也、伊東宏之、高須洋介、高橋義朗、“冷却 Yb 原子の $1S_0-3P_2$ 遷移を用いた高分解能分光”、日本物理学会第 63 回年次大会(近畿大学、東大阪市)(2008.3.25)
- [54] 高野哲至、村松真臣、村上亮、並木亮、高橋義朗、“パルス光によるスピンの量子非破壊測定の実現” 日本物理学会 2008 年秋季大会(岩手大学上田キャンパス 盛岡市)(2008.9.22)

③ ポスター発表（国内会議 27 件、国際会議 9 件）

- [1] T. Takano, S. Ichihara, M. Takeuchi, M. Kumakura, Y. Takahashi, “Spin Squeezing by Quantum Non-Demolition Measurement”, 量子情報未来テーマ開拓研究会(知念, 沖縄)(2004.8.8)
- [2] 高野哲至, 市原直, 竹内誠, 熊倉光孝, 高橋義朗, “スピンド QND によるスピンスクイズィング”, 第10回量子情報技術研究会(学習院大学, 東京)(2004.5.24)
- [3] 泉勇氣, 小林淳, 榎本勝成, 熊倉光孝, 高橋義朗, “冷却 Rb 原子の光会合と光格子”, 量子情報合同ワークショップ(浅虫温泉, 青森市)(2004.9.6)
- [4] 北川 昌明, 福原武, 高須 洋介, 熊倉 光孝, 高橋 義朗, “冷却 Yb 原子の光格子実験”, 量子情報合同ワークショップ(浅虫温泉, 青森市)(2004.9.6)
- [5] 高野哲至, 市原直, 竹内誠, 熊倉光孝, 高橋義朗, “スピンスクイズィング実現へ向けた原子集団スピン測定”, 量子情報合同ワークショップ(浅虫温泉, 青森市)(2004.9.6)
- [6] 植竹智, 山口敦史, 橋本大佑, 熊倉光孝, 高橋義朗, “冷却 Yb 原子の準安定 3P_2 状態への光励起”, 量子情報合同ワークショップ(浅虫温泉, 青森市)(2004.9.6)
- [7] T. Fukuhara, Y. Takasu, M. Kumakura, and Y. Takahashi, “Quantum Simulator of the Hubbard Model Using Fermionic Yb Atoms in an Optical Lattice”, Summer School of Quantum Information Processing (Kochi University, Kochi) (2005.9.6)
- [8] Y. Takasu, T. Fukuhara, M. Kumakura, and Y. Takahashi, “Quantum simulator using mixture of different isotopes in an optical lattice”, Summer School of Quantum Information Processing (Kochi University, Kochi) (2005.9.6)
- [9] 植竹智, 山口敦史, 橋本大佑, 熊倉光孝, 高橋義朗, “散乱長制御に向けた冷却 Yb 原子準安定 $3P_2$ 状態の研究”, 量子情報ワークショップ(リゾーピア箱根, 箱根)(2005.12.14)
- [10] 東條 賢, 北川 昌明, 榎本 勝成, 高須 洋介, 熊倉 光孝, 高橋 義朗, “量子シミュレーションに向けた冷却 Yb 原子の光誘起フェッシュバツハ共鳴” 量子情報ワークショップ(リゾーピア箱根, 箱根)(2005.12.14)
- [11] Takeshi Fukuhara, Yosuke Takasu, Mitsutaka Kumakura, Yoshiro Takahashi, “Quantum Simulator Using Fermionic Yb Atoms in an Optical Lattice”, 量子情報ワークショップ(リゾーピア箱根, 箱根)(2005.12.14)
- [12] Takeshi Fukuhara, Yosuke Takasu, Mitsutaka Kumakura, Yoshiro Takahashi, “Quantum simulator using mixture of different isotopes in an optical lattice”, 量子情報ワークショップ(リゾーピア箱根, 箱根)(2005.12.14)
- [13] 高野哲至, 市原直, 竹内誠, 山本裕明, 熊倉光孝, 高橋義朗, “冷却イッテルビウム原子を用いたスピンの量子非破壊測定”, 量子情報ワークショップ(リゾーピア箱根, 箱根)(2005.12.14)
- [14] 小林淳, 柴田康介, 青木貴稔, 熊倉光孝, 高橋義朗準静電場による光散乱のないコヒーレン

トなスピン操作”, 量子情報ワークショップ(リゾーピア箱根,箱根)(2005.12.14)

[15] 岡野真之, 笠健太郎, 熊倉光孝, 高橋義朗, “BECにおける高次量子渦の生成”, 量子情報ワークショップ(リゾーピア箱根, 箱根)(2005.12.14)

[16] K. Enomoto, S. Tojo, M. Kitagawa, Y. Nishio, Y. Takasu, M. Kumakura, and T. Takahashi “Photoassociation spectroscopy of ultracold Yb atoms using the intercombination transition (3P1-1S0)”, EU Training School and Workshop, Achievements and Perspectives of Cold Molecules(Les Houches , FRANCE)(2006.3.7)

[17] T.Fukuhara, S. Sugawa, Y. Takasu, and T. Takahashi, “Quantum Degenerate Gases and the Mixture of Ytterbium”, International School of Physics “Enrico Fermi” CLXIV Course Ultra-cold Fermi Gases (Villa Monastero, Varenna, Italy)(2006.6.29)

[18] T. Fukuhara, Y. Takasu, S. Sugawa, and Y. Takahashi, “Fermi Degeneracy and Bose-Einstein condensation of Ytterbium atoms” 20th International Conference on Atomic Physics (Innsbruck, Austria)(2006.7.20)

[19] A. Yamaguchi, S. Uetake, D. Hashimoto, S. Kato, M. Sugimoto, Y. Takahashi, “High Density Optical Trapping of Ytterbium Atoms in the 3P_2 State” 20th International Conference on Atomic Physics (Innsbruck, Austria)(2006.7.20))

[20] Takeshi Fukuhara, “Quantum Degenerate Fermi Gases and the of Ytterbium atoms” International Symposium on Quantum Fluids and Solids (Kyoto University)(2006.8.3)

[21] Masayuki Okano, “Splitting of a quadruply quantized vortex in the Rb Bose-Einstein condensate” International Symposium on Quantum Fluids and Solids (Kyoto University)(2006.8.3)

[22] T.Takano, M.Fuyama, H.Yamamoto, and Y.Takahashi, “Atomic Spin Squeezing Towards Sub-Shotnoise Measurement Of Permanent Electric Dipole Moment”, The 17th International Spin Physics Symposium (Kyoto University, Kyoto)(2006.10.5)

[23] 加藤真也、柴田康介、山口敦史、垣内久、植竹智、高橋義朗 “光格子量子計算機の実現に向けた超狭線幅光学遷移の絶対周波数測定”, 第三回量子情報未来テーマ開拓研究会(沖縄) (2007.9.3,9.4)

[24] 福原武、素川靖司、辻本拓也、高須洋介、高橋義朗 “Quantum Simulation Using Ytterbium Atoms in an Optical Lattice”, 第三回量子情報未来テーマ開拓研究会(沖縄) (2007.9.3,9.4)

[25] S. Kato, A. Yamaguchi, S. Uetake, Y. Takahashi, H. Ito, Y. Li, M. Hosokawa, “Optical Frequency Measurement of Ultra-Narrow Optical Transition in Neutral Ytterbium Atoms”, Asian CORE Symposium on Advanced Laser Spectroscopy (kobe)(2007.9.25)

[26] S. Uetake, A. Yamaguchi S. Kato, T. Fukuhara, Y. Li, M. Hosokawa Y. Takahashi, “High-resolution spectroscopy of 1S0-3P0 transition in ultra-cold ytterbium atoms”, Asian CORE Symposium on Advanced Laser Spectroscopy (kobe)(2007.9.25)

[27] 垣内久、加藤真也、山口敦史、植竹智、高橋義朗 “Ultra Narrow width transition towards quantum simulation and quantum computation” 京都大学21世紀COEシンポジウム(京都市)

(2007.10.1~2)

[28] 辻本拓也、高須洋介、高橋義朗“Possible New Superfluid State in Fermi Mixtures of Ytterbium Atoms”, 京都大学21世紀COEシンポジウム(京都市)(2007.10.1~2)

[29] S. Kato, A. Yamaguchi, S. Uetake, Y. Takahashi, H. Ito, Y. Li, M. Hosokawa, “Optical Frequency Measurement of Ultra-Narrow Optical Transition in Neutral Ytterbium Atoms”, 京都大学21世紀COEシンポジウム(京都市)(2007.10.1~2)

[30] S.Sugawa, T.Fukuhara, Y.Takasu, Y.Takahashi, “Bose-Einstein Condensation of Ytterbium atoms in 1D optical lattices”, 京都大学21世紀COEシンポジウム(京都市)(2007.10.1~2)

[31] A.Yamaguchi, S.Uetake, S.Kato, T.Fukuhara, S.Sugawa, H.Ito, Y.Li, M.Hosokawa, and Y.Takahashi, “極低温イッテルビウム原子の高分解能分光”, 京都大学21世紀COEシンポジウム(京都市)(2007.10.1~2)

[32] Y. Takasu, H. Hara, and Y. Takahashi, “Photoassociation Dynamics in Bose-Einstein Condensate”, 京都大学21世紀COEシンポジウム(京都市)(2007.10.1~2)

[33] 福原武、素川靖司、辻本拓也、高須洋介、高橋義朗“Quantum Simulation Using Ytterbium Atoms in an Optical Lattice”, 京都大学21世紀COEシンポジウム(京都市)(2007.10.1~2)

[34] 原 秀明、榎本勝成、北川昌明、高須洋介、高橋義朗“Photoassociation of heteronuclear molecules of ultracold Yb atoms”, 京都大学21世紀COEシンポジウム(京都市)(2007.10.1~2)

[35] M.Okano, H.Hara, Y.Takasu, and Y.Takahashi, “Towards production of novel ultracold gases of lithium-ytterbium polar molecules”, 京都大学21世紀COEシンポジウム(京都市)(2007.10.1~2)

[36] Ryo Namiki, Masato Koashi, and Nobuyuki Imoto, “Fidelity criterion for quantum-domain transmission and storage of coherent states beyond unit gain constraint“, 第四回量子情報未来テーマ開拓研究会(沖縄) (2008.9.2,9.9)

(3)特許出願

なし

(4)受賞等

①受賞

[1]高橋義朗、藪崎努 応用物理学会 H17 年度光・量子エレクトロニクス業績賞、
“イッテルビウム原子の BEC”(2006.3.22)

[2]高橋義朗、第12回久保亮五記念賞
“超冷却イッテルビウム原子気体の実現”
(Realization of a ultra-cold quantum gas of Ytterbium atoms), (2008.10.11)

②新聞報道

[1]“Ytterbium joins the condensates”, PhysicsWeb, 31 July, 2003

[2]“A Spinless BEC”, Physics News Update, Number 652, September 4, 2003

③その他

(5)その他特記事項

[1] 高橋義朗, 高野哲至, ”原子スピン集団による量子インターフェース”, 「量子情報通信－基礎から最前線まで－」(単行本)第5部(原子・イオン系に基づく量子インターフェース)第2章

[2] 嶺重慎, 高橋義朗, 田中耕一郎 ”第2章 レーザー光で創る量子気体” 「光と物理学」 P27-43(2007.10).

② 上妻グループ

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 0 件、国際(欧文)誌 10 件)

[1] K. Honda, D. Akamatsu, M. Arikawa, Y. Yokoi, K. Akiba, S. Nagatsuka, T. Tanimura, A. Furusawa, and M. Kozuma, “Storage and Retrieval of a Squeezed Vacuum”, **Physical Review Letters** **100**, 093601 (2008).

[2] D. Akamatsu, Y. Yokoi, M. Arikawa, S. Nagatsuka, T. Tanimura, A. Furusawa, and M. Kozuma, “Ultraslow Propagation of Squeezed Vacuum Pulses with Electromagnetically Induced Transparency”, **Physical Review Letters** **99**, 153602 (2007).

[3] K. Usami and M. Kozuma, “Observation of a Topological and Parity-Dependent Phase of $m=0$ Spin States”, **Physical Review Letters** **99**, 140404 (2007).

[4] K. Akiba, K. Kashiwagi, T. Yonehara, and M. Kozuma, “Frequency-filtered storage of parametric fluorescence with electromagnetically induced transparency”, **Physical Review A** **76**, 023812 (2007).

[5] M. Arikawa, K. Honda, D. Akamatsu, Y. Yokoi, K. Akiba, S. Nagatsuka, A. Furusawa, and M. Kozuma, “Observation of electromagnetically induced transparency for a squeezed vacuum with the time domain method”, **Optics Express** **15**, 11849 (2007).

[6] R. Inoue, N. Kanai, T. Yonehara, Y. Miyamoto, M. Koashi, and M. Kozuma, “Entanglement of orbital angular momentum states between an ensemble of cold atoms and a photon”, **Physical Review A** **74**, 053809 (2006).

[7] K. Usami, J. Takahashi, and M. Kozuma, “How to measure the quantum state of collective

atomic spin excitation”, **Physical Review A** **74**, 043815 (2006).

[8] T. Tanimura, D. Akamatsu, Y. Yokoi, A. Furusawa, and M. Kozuma, “Generation of a squeezed vacuum resonant on a rubidium D_1 line with periodically poled KTiOPO_4 ”, **Optics Letters** **31**, 2344 (2006).

[9] K. Akiba, D. Akamatsu, M. Kozuma, “Frequency-filtered parametric fluorescence interacting with an atomic ensemble”, **Optics Communications** **259**, 789 (2006).

[10] D. Akamatus, K. Akiba, and M. Kozuma, “Electromagnetically induced transparency with squeezed vacuum”, **Physical Review Letters** **92**, 203602 (2004).

(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 15 件、国際会議 8 件)

[招待講演:国内会議]

[1] 上妻幹旺、“光-原子間における量子情報のやり取り”、日本分光学会レーザー一部会・理研合同シンポジウム 冷たい原子・分子の分光学とその応用、(理化学研究所、1月15日、2004年)。

[2] 上妻幹旺、“光量子情報の原子系への転写”、第7回原子分子光科学(AMPS)、(東京大学、3月13日、2004年)。

[3]上妻幹旺、“Quantum information processing with atomic ensembles”、量子情報未来テーマ開拓研究会、(沖縄、8月5日、2004年)。注:CREST主催の夏の学校におけるレクチャー講演)

[4] M. Kozuma, “Quantum information processing and quantum memory: experimental approach from atomic physics”, The 10th Symposium on the Physics and Application of Spin-Related Phenomena in Semiconductors (PASPS-10), (東京工業大学すずかけキャンパス、6月10日、2004年)。

[5] 上妻幹旺、“光と原子による量子計算・量子通信の実現性”、電子情報通信学会2004年ソサイエティ大会、(徳島、9月23日、2004年)。

[6] 上妻幹旺、“量子テレポーテーション”、世界物理年「春休みイベント」「めざせ！未来のインシュタインー対話を通して知る物理学の最前線」、(東京、3月21日、2005年)。

[7] 上妻幹旺、“エンタングルメントとは何か？”、富士写真フィルム株式会社社内講演、(先進コア技術研究所、小田原 6月15日、2005年)。

[8] 上妻幹旺、“原子集団ー単一光子間におけるエンタングルメントの生成”、第3回原子・分子・光科学(AMO)討論会、(東京大学、6月16日、2005年)。

[9] 上妻幹旺、“Electromagnetically Induced Transparency with Squeezed Vacuum”、第2回量子情報未来テーマ開拓研究会、(高知工科大、9月5日、2005年)。注:CREST主催の夏の学校におけるレクチャー講演)

[10] 上妻幹旺、“原子アンサンブルを用いた光量子情報の制御”、第4回エクストリーム・フォトニク

ス研究会「コヒーレント光科学」(蒲郡、11月9日、2006年)。

[11] 上妻幹旺、“原子を止める、光を止める”、蔵前工業会・蔵前技術士会 第108回例会講演会、(田町、2月5日、2007年)。

[12] 上妻幹旺、“Cavity QED”、第3回量子情報未来テーマ開拓研究会、(沖縄、9月3日、2007年)。注:CREST主催の夏の学校におけるレクチャー講演)

[13] 上妻幹旺、“スクウィーズド光のEITによる捕捉”、第17回量子情報技術研究会(QIT17)(岡山、11月22日、2007年)。

[14] 上妻幹旺、“真空スクウィーズド状態の保存と再生”、凝縮系の超高速現象とコヒーレント制御、(東京、2月21日、2008年)。

[15] 上妻幹旺、“Nuclear spin Cavity QED”、第4回量子情報未来テーマ開拓研究会、(沖縄、9月10日、2008年)。注:CREST主催の夏の学校におけるレクチャー講演)

[招待講演:国際会議]

[1] M. Kozuma, “Ultra-slow propagation of squeezed vacuum by using electro-magnetically induced transparency”, Japan-Germany Colloquium 2004 Quantum Optics, (Wildbad, Germany 10 February, 2004).

[2] M. Kozuma, “Communication of quantum information between light and atoms”, ESF-JSPS Frontier Science Conference Series for Young Researchers, Quantum Information and Quantum Physics (Shonan 12 March 2005).

[3] M. Kozuma, “Quantum information processing and quantum memory: experimental approach from atomic physics”, First International Symposium on Nanometer-scale Quantum Physics, nano PHYS'05 (Tokyo, 26 January 2005). 注)東工大物理 COE のシンポジウム講演)

[4] M. Kozuma, D. Akamatsu, K. Akiba, T. Tanimura, and Y. Yokoi, “Quantum information processing and quantum memory: Experimental approach from atomic physics”, International Conference on Quantum Electronics 2005 (Tokyo, 14 July 2005).

[5] M. Kozuma, “Entanglement of orbital angular momentum states between an ensemble of cold atoms and a photon”, The 10th US-Japan Joint Seminar (Breckenridge, USA, 24 August, 2006).

[6] M. Kozuma, “Quantum Repeaters and Multi-Party Protocols”, US-Japan workshop on Quantum Information Science and Technology (Maui, USA, 17 October 2006).

[7] M. Kozuma, “Slow Light”, 9th Annual Japanese-American Kavli Frontiers of Science Symposium (Irvine, USA, 9 December 2006).

[8] M. Kozuma, “Entanglement of orbital angular momentum states between an ensemble of cold atoms and a photon”, International Symposium on “Topology and Singularity in Optical Physics” (Hokkaido, 24 July 2007).

② 口頭発表 (国内会議 33 件、国際会議 0 件)

- [1] 赤松大輔、秋葉圭一郎、上妻幹男;電磁誘起透明化を用いた真空スクイーズド状態の超低速度伝搬の実現;日本物理学会 第59回年次大会(2004年3月29日)。
- [2] 金井紀文、高橋純一、西周慶久、上妻幹男;Long MOTの生成とその評価;日本物理学会 第59回年次大会、(2004年3月27日)。
- [3] 秋葉圭一郎、赤松大輔、上妻幹男;原子スピッコヒーレンスを用いた光子間における非古典的相関の操作、日本物理学会 第59回年次大会(2004年3月29日)。
- [4] 高橋純一、金井紀文、西周慶久、宇佐見康二、上妻幹男;Long MOTの生成とその評価 II;日本物理学会2004年秋季大会、(2004年9月13日)。
- [5] 谷村崇仁、赤松大輔、上妻幹男;LBO-ダブラーおよびPPLNを組み合わせたスクイーディング・レベルの改善;日本物理学会2004年秋季大会、(2004年9月14日)。
- [6] 赤松大輔、谷村崇仁、秋葉圭一郎、上妻幹男;電磁誘起透明化を用いた真空スクイーズド状態の超低速度伝搬の実現 II、日本物理学会2004年秋季大会、(2004年9月14日)。
- [7] 金井紀文、高橋純一、宇佐見康二、上妻幹男;原子アンサンブル内に励起された Symmetric collective mode を利用した非古典光の生成、日本物理学会2004年秋季大会、(2004年9月14日)。
- [8] 秋葉圭一郎、赤松大輔、上妻幹男;原子アンサンブルを用いた条件付き単一光子の遅延の実現、日本物理学会2004年秋季大会、(2004年9月14日)。
- [9] 横井芳彦、赤松大輔、谷村崇仁、上妻幹旺, “ルビジウム原子の超微細構造を用いた電磁誘起透明化の評価”, 日本物理学会 2005年秋季大会(同志社大学京田辺キャンパス, 2005.9.20)
- [10] 赤松大輔、横井芳彦、谷村崇仁、秋葉圭一郎、古沢明、上妻幹旺, “周波数縮退真空スクイーズド状態による電磁誘起透明化の観察”, 日本物理学会 2005年秋季大会(同志社大学京田辺キャンパス, 2005.9.20)
- [11] 谷村崇仁、赤松大輔、横井芳彦、古沢明、上妻幹旺, “電磁誘起透明化と MOT を用いた2モードスクイーズド状態の量子メモリ機構の提案”, 日本物理学会 2005年秋季大会(同志社大学京田辺キャンパス, 2005.9.20)
- [12] 秋葉圭一郎、上妻幹旺, “原子線幅以下までのパラメトリック蛍光の周波数狭窄化”, 日本物理学会 2005年秋季大会(同志社大学京田辺キャンパス, 2005.9.20)
- [13] 井上遼太郎、金井紀文、秋葉圭一郎、小芦雅人、上妻幹旺, “対称集団励起とスピン自由度とを利用した量子テレポーテーションの提案”, 日本物理学会 2005年秋季大会(同志社大学京田辺キャンパス, 2005.9.20)
- [14] 赤松大輔、横井芳彦、谷村崇仁、秋葉圭一郎、古澤明、上妻幹旺, “周波数縮退真空スクイーズド状態による電磁誘起透明化の観察 II”, 日本物理学会第 61回年次大会(松山大学、2006.3.30)

- [15] 谷村崇仁、赤松大輔、横井芳彦、古澤明、上妻幹旺、“PPKTP 結晶を用いた Rb D1 線における真空スクイーズド状態の発生”、日本物理学会第 61 回年次大会(松山大学、2006.3.30)
- [16] 金井紀文、井上遼太郎、米原健矢、上妻幹旺、“冷却原子集団内に励起した対称集団状態を利用した非古典相関光子対の生成”、日本物理学会第 61 回年次大会(松山大学、2006.3.30)
- [17] 井上遼太郎、金井紀文、米原健矢、宮本洋子、小芦雅斗、上妻幹旺、“冷却原子集団と光の軌道角運動量相関”、日本物理学会第 61 回年次大会(松山大学、2006.3.30)
- [18] 宇佐見康二、高橋純一、上妻幹旺;冷却原子の集団スピン状態の測定、日本物理学会 2006 年秋季大会(千葉大学西千葉キャンパス、千葉県、2006.9.23-9.26)。
- [19] 赤松大輔、横井芳彦、谷村崇仁、古沢明;上妻幹旺;電磁誘起透明化による真空スクイーズド状態の超低速度伝播、日本物理学会 2006 年秋季大会(千葉大学西千葉キャンパス、千葉県、2006.9.23-9.26)。
- [20] 米原健矢、井上遼太郎、宮本洋子、小芦雅斗、上妻幹旺;冷却ルビジウム原子集団-単一光子間の軌道角運動量に関する高次元エンタングルメントの評価に向けた改良、日本物理学会 2007 年春季大会(鹿児島大学郡元キャンパス、鹿児島県、2007.3.19)。
- [21] 横井芳彦、赤松大輔、秋葉圭一郎、谷村崇仁、古澤明、上妻幹旺;ルビジウム原子に共鳴する高レベルスクイーズド光の生成、日本物理学会 2007 年春季大会(鹿児島大学郡元キャンパス、鹿児島県、2007.3.21)。
- [22] 赤松大輔、横井芳彦、古澤明、上妻幹旺;電磁誘起透明化を利用した真空スクイーズド状態の保存と再生、日本物理学会 2007 年春季大会(鹿児島大学郡元キャンパス、鹿児島県、2007.3.21)。
- [23] 柏木孝介、秋葉圭一郎、上妻幹旺;単一光子状態の保存再生に向けたパラメトリック蛍光の周波数狭窄化、日本物理学会 2007 年春季大会(鹿児島大学郡元キャンパス、鹿児島県、2007.3.21)。
- [24] 秋葉圭一郎、柏木孝介、米原健矢、上妻幹旺;電磁誘起透明化を用いたパラメトリック蛍光のモード選択的な保存と再生、日本物理学会 2007 年春季大会(鹿児島大学郡元キャンパス、鹿児島県、2007.3.21)。
- [25] 有川学、本多和仁、赤松大輔、横井芳彦、秋葉圭一郎、永塚哲史、古澤明、上妻幹旺;時間領域ホモダイン測定による真空スクイーズド状態の電磁誘起透明化の観測、日本物理学会第 62 回年次大会(北海道大学札幌キャンパス、北海道、2007.9.21-24)。
- [26] 本多和仁、有川学、赤松大輔、横井芳彦、秋葉圭一郎、永塚哲史、古澤明、上妻幹旺;電磁誘起透明化を用いた真空スクイーズド光遅延の時間領域測定、日本物理学会第 62 回年次大会(北海道大学札幌キャンパス、北海道、2007.9.21-24)。
- [27] 柏木孝介、秋葉圭一郎、上妻幹旺;量子メモリに向けたパラメトリック蛍光の評価、日本物理学会第 62 回年次大会(北海道大学札幌キャンパス、北海道、2007.9.21-24)。
- [28] 秋葉圭一郎、柏木孝介、有川学、上妻幹旺;電磁誘起透明化を用いたパラメトリック蛍光の保存と再生、日本物理学会第 62 回年次大会(北海道大学札幌キャンパス、北海道、

2007.9.21-24)。

[29] 井上遼太郎、米原健矢、宮本洋子、小芦雅斗、上妻幹旺;原子集団-光子間多次元エンタングルメントの評価、日本物理学会第 62 回年次大会 (北海道大学札幌キャンパス, 北海道, 2007.9.21-24)。

[30] 井上遼太郎、米原健矢、宮本洋子、小芦雅斗、上妻幹旺;原子集団-光子間軌道角運動量エンタングルメントにおける多次元性の評価、日本物理学会第 63 回年次大会 (近畿大学本部キャンパス, 東大阪, 2008.3.23-26)。

[31] 秋葉圭一郎、柏木孝介、有川学、上妻幹旺;電磁誘起透明化を用いた条件付き単一光子状態の保存と再生、日本物理学会第 63 回年次大会 (近畿大学本部キャンパス, 東大阪, 2008.3.23-26)。

[32] 本多和仁、有川学、永塚哲史、秋葉圭一郎、古澤明、上妻幹旺; 電磁誘起透明化を用いた条件付き単一光子状態の保存・再生II、日本物理学会第63回年次大会 (近畿大学本部キャンパス, 東大阪, 2008.3.23-26)。

[33] 笠原嘉晃、宇佐見康二、上妻幹旺; 時計遷移擬スピンの量子ノイズ測定に向けた原子数揺らぎの抑制、日本物理学会第 63 回年次大会 (近畿大学本部キャンパス, 東大阪, 2008.3.23-26)。

③ ポスター発表 (国内会議 0 件、国際会議 5 件)

[国際会議ポスター]

[1] K. Akiba, K. Kashiwagi, T. Yonehara, and M. Kozuma: Frequency filtered storage of parametric fluorescence with electromagnetically induced transparency; The Photons, Atoms and Qubits conference 2007 (Royal Society, London, September 2-5, 2007).

[2] K. Honda, D. Akamatsu, M. Arikawa, Y. Yokoi, K. Akiba, S. Nagatsuka, A. Furusawa, and M. Kozuma: Propagation of Squeezed Vacuum Pulses inside a Cold Atomic Ensemble with Electromagnetically Induced Transparency; Quantum-Atom Optics Downunder (Wollongong, Australia, December 3-6, 2007).

[3] R. Inoue, T. Yonehara, Y. Miyamoto, M. Koashi, and M. Kozuma: Estimation of Three-Dimensional Entanglement between an Atomic Ensemble and a Photon; Quantum-Atom Optics Downunder (Wollongong, Australia, December 3-6, 2007).

[4] R. Inoue, N. Kanai, T. Yonehara, Y. Miyamoto, M. Koashi, and M. Kozuma, "Entanglement of orbital angular momentum states between an ensemble of cold atoms and a photon", 20th International Conference on Atomic Physics (Innsbruck, Austria, 2006.7.16-7.21).

[5] D. Akamatsu, Y. Yokoi, A. Furusawa, and M. Kozuma, "Ultraslow propagation of squeezed vacuum with electromagnetically induced transparency", 20th International Conference on Atomic Physics (Innsbruck, Austria, 2006.7.16-7.21).

(3)特許出願

無し

(4)受賞等

①受賞

上妻幹旺:東工大挑戦的研究賞
(平成17年1月:“真空スクイーズド状態の原子アンサンブルへの転写と再生”)

②新聞報道

無し

③その他

以下の論文に関する研究が Science news にて報道された。

参照 URL

<http://sciencenow.sciencemag.org/cgi/content/full/2008/229/1?rss=1>

“Storage and Retrieval of a Squeezed Vacuum”, K. Honda, D. Akamatsu, M. Arikawa, Y. Yokoi, K. Akiba, S. Nagatsuka, T. Tanimura, A. Furusawa, and M. Kozuma, **Physical Review Letters** **100**, 093601 (2008).

(5)その他特記事項

[投稿中の論文]

“Storage and retrieval of nonclassical photon pairs and conditional single photons generated by parametric down-conversion process”, K. Akiba, K. Kashiwagi, M. Arikawa, and M. Kozuma, submitted.

[解説記事]

[1] 上妻幹旺:「基礎からの量子光学 第28回 光の保存と再生」、OPTRONICS 4月号、Vol.27, No.316 (2008).

[2] 上妻幹旺:「量子メモリ」、レーザー研究 36、421 (2008).

③ 北野グループ

(1) 原著論文発表 (国内(和文)誌 4件、国際(欧文)誌 3件)

[1] T. Nakanishi, K. Sugiyama, and M. Kitano: “Simulation of Slow Light with Electronics Circuits”, Am. J. Phys., **73**, 323 (2005)

[2] Y. Tamayama, T. Nakanishi, K. Sugiyama, and M. Kitano: “Observation of Brewster’s effect for

transverse-electric electromagnetic waves in metamaterials: Experiment and theory” Phys. Rev. B, **73**, 193104 (2006)

[3] 北野正雄,中西俊博:「光の異常な伝搬を電気回路でシミュレートする」日本物理学会誌, **61**, 758 (2006)

[4] 北野正雄:「量子光学の基礎理論とレーザーによる超精密計測」化学, **61**, 20 (2006)

[5] 北野正雄:「球面上の電場は定義すべきか」大学の物理教育, **13**, 45 (2007)

[6] 北野正雄,中西俊博:「メタマテリアル・左手系材料の新規な光学特性」光学, **36**, 572 (2007)

[7] M. Kitano: “The vacuum impedance and unit systems,” IEICE Trans. Electron. **E92-C**,No.1,(2009) 印刷中.

(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 7 件、国際会議 5 件)

[1] M. Kitano: “Velocity Control of Light and Microwaves”, 2004 Microwave Workshops and Exhibition, Yokohama, 2004.11.10.

[2] 北野正雄:「光の速度制御とその応用」日本光学会年次学術講演会,学術総合センター, 2005.11.25.

[3] 北野正雄:「光の群速度とその制御」量子エレクトロニクス研究会「フォトンマニピュレーションとその応用」,上智大学軽井沢セミナーハウス, 2006.1.14.

[4] 北野正雄:「光の速度とその制御」OPN 研究会「時間・空間軸での光波操作技術とそのデバイスへの応用」,マホロバマイズ三浦, 2006.3.17.

[5] 中西 俊博:「原子の共鳴的 2 光子遷移の量子光学への応用」量子計算研究会北海道, 電子科学研究所, 北海道大学, 2006.7.14.

[6] M. Kitano: “Observation of Brewster’s effect for transverse-electric electromagnetic waves in metamaterials” 10th Japan-U.S. Seminar on Fundamental Issues and Applications of Ultracold Atoms and Molecules, Beaver Run Resort Conference Center, Breckenridge, Colorado, 2006.8.24.

[7] 北野正雄:「メタマテリアルによるs波ブリュースター現象と無反射伝搬」理研シンポジウム 電磁メタマテリアル, 理化学研究所 大河内記念ホール, 2006.10.1.

[8] M. Kitano: “Simulation of anomalous light propagation with electric circuits” COE International Symposium, Kyoto University, 2006.10.23.

[9] T. Nakanishi: “Slow light” Japan Society for the Promotion of Science and U.S. National Academy of Sciences, Arnold and Mabel Beckman Center Irvine CA, 2006.12.9.

[10] 北野正雄:「磁氣的ブリュースター現象と無反射伝搬」第 54 回応用物理学関係連合講演会

シンポジウム「電磁メタマテリアル」, 青山学院大学, 2007.3.17.

[11] 北野 正雄 : 「メタ物質による電磁波の制御とコヒーレンス」, 物性研究所短期研究会「短波長コヒーレント光と物質中のコヒーレンスの生成・消滅」, 東京大学物性研究所, 2007.11.27.

[12] M. Kitano : “Manipulation of Electromagnetic Fields with Metamaterial,” Global COE 1st International Symposium on Photonics and Electronics Science and Engineering, Katsura-Campus, Kyoto University, 2008.3.4.

② 口頭発表 (国内会議 20 件、国際会議 0 件)

[1] 池田充彦, 北野正雄, 杉山和彦: 「励起準位 Yb+からの生成分子イオンの特性測定用イオントラップ装置の開発」 電子情報通信学会, 福井大学, 2004.5.

[2] 杉山和彦: 「モード同期レーザーによる光周波数計測技術と光周波数標準」 原子・分子・光科学(AMO)討論会, 東京都, 2004.7.

[3] 岩城吉剛, 中原雅之, O. Kazharsky, 北野正雄, 杉山和彦: 「外部共振器を用いた自励発振型半導体レーザーのモード同期」日本物理学会, 青森大学, 2004.9.

[4] 杉山 和彦, S. Slyusarev, 御園 雅俊, 北野 正雄, J. Knight, W. Wadsworth, and P. Russell: 「光分周のための1オクターブ光周波数コムの実現 (IV)」日本物理学会, 青森大学, 2004.9.

[5] 杉山和彦: 「超短パルスモード同期レーザーによる光周波数の計測・分周技術」量子情報処理シンポジウム, 東京都, 2004.12.20.

[6] 中西俊博, 北野正雄: 「2光子吸収を利用した光子対生成」量子情報処理シンポジウム, 東京都, 2004.12.20.

[7] 生田力三, 北野正雄, 杉山和彦: 「Yb+時計遷移用半導体レーザーの開発」電子情報通信学会, 金沢大学, 2005.5.

[8] 岩城吉剛, O. Kazharsky, 北野正雄, 杉山和彦: 「外部共振器型自励発振半導体モード同期レーザーの周波数制御」日本物理学会, 東京理科大, 2005.3.

[9] S. Slyusarev, 北野正雄, 杉山和彦, J. Knight, W. Wadsworth, and P. Russell: 「光分周のための1オクターブ光周波数コムの高周波数安定化」日本物理学会, 東京理科大, 2005.3.

[10] 中西俊博, 杉山和彦, 北野正雄: 「2光子吸収の偏光選択性を利用した光子対生成 ～ Quantum Jump Approach による解析～」 電子情報通信学会, 金沢大学, 2005.5.18.

[11] 玉山泰宏, 中西俊博, 杉山和彦, 北野正雄: 「メタ物質による TE 波ブリュースター現象」日本物理学会, 同志社大学京田辺キャンパス, 2005.9.20.

[12] 小林弘和, 中西俊博, 杉山和彦, 北野正雄: 「光電子増倍管による光子対検出」日本物理学会, 同志社大学京田辺キャンパス, 2005.9.20.

[13] 中西俊博, 杉山和彦, 北野正雄: 「時間相関光子対と原子の非線形相互作用」日本物理学会, 愛媛大学・松山大学, 2006.3.30.

[14] 小林弘和, 中西俊博, 杉山和彦, 北野正雄: 「光電子増倍管による光子対検出 II」 日本物理学会, 日本物理学会, 鹿児島大学, 2007.3.20.

[15] 小林弘和, 中西俊博, 杉山和彦, 北野正雄: 「光電子増倍管における 2 光子吸収を利用した光子対検出」 電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会, 福井大学, 2006.6.1.

[16] 小林弘和, 中西俊博, 杉山和彦, 北野正雄: 「光電子増倍管における 2 光子吸収を利用した光子対検出 II」, 電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会, 金沢大学, 2007.5.25.

[17] 中西俊博, 若狭恭裕, 杉山和彦, 北野正雄: 「電子回路によるシュレディンガー方程式のシミュレーション」, 日本物理学会, 近畿大学, 2008.3.26.

[18] 中西俊博: 「メタマテリアルによる波動伝搬制御 - 回路的アプローチ」 輻射科学研究会, 京都大学, 2008.3.27.

[19] 中西俊博, 酒見和生, 小林弘和, 杉山和彦, 北野正雄: 「フォトニック結晶ファイバによる光子対の生成と 2 光子干渉」 電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会, 福井大学, 2008.5.23.

[20] 中西俊博, 酒見和生, 小林弘和, N. Tung, 杉山和彦, 北野正雄: 「フォトニック結晶ファイバを用いた光子対の生成と 2 光子干渉」 日本物理学会, 岩手大学, 2008.9.22.

③ ポスター発表(国内会議 0 件、国際会議 3 件)

[1] H. Kobayashi, T. Nakanishi, K. Sugiyama, and M. Kitano: “Photon-pair detection using two-photon absorption in photomultiplier tubes,” Global COE 1st International Symposium on Photonics and Electronics Science and Engineering, Katsura-Campus, Kyoto University, 2008.3.4.

[2] H. Kobayashi, T. Nakanishi, K. Sugiyama, and M. Kitano: “Photon-pair detection using two-photon absorption in photomultiplier tubes,” The Ninth International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing, University of Calgary, Canada, 2008.8.21.

[3] T. Nakanishi, K. Sakemi, H. Kobayashi, K. Sugiyama, and M. Kitano: “Two-photon interference with photon pairs created in photonic crystal fiber,” The Ninth International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing, University of Calgary, Canada, 2008.8.23.

(3)特許出願
無し

(4)受賞等

①受賞

北野正雄: 第11回松尾学術賞(松尾学術振興財団)

②新聞報道

科学新聞 2007年11月9日 (松尾学術賞受賞について)
藪崎努: 日本物理学会誌 63号3巻, p.229「第11回松尾学術賞受賞 北野正雄氏」

③その他

(5)その他特記事項

著書 北野正雄: 新版「マクスウェル方程式」(サイエンス社、出版予定)

§7 研究期間中の主な活動

ワークショップ・シンポジウム等

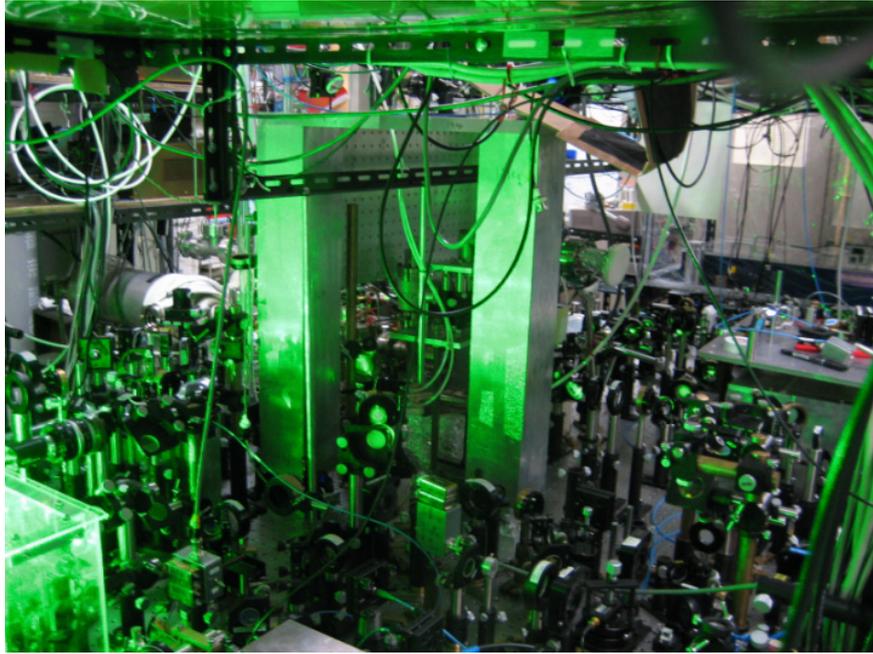
年月日	名称	場所	参加人数	概要
H18.2.14	Post-COE Mini workshop on cold atoms: Fermion and optical lattice	京都大学	22名	Esslinger 教授を交えての、冷却原子、特にフェルミオンと光格子に関する最近の研究成果について発表を行い、これからの方向性について議論を行った。

§8 結び

チームが当初掲げた目標に対して、完全に達成したわけではないが、各グループにおいて非常に努力した結果、それぞれの目標にむけて大きく前進できたとはいっていいのではないかと考えている。この結果を土台にして、今後の新たな展開も望めると考えている。

チーム全体としては表に現れない協力関係によって、順調にかつ柔軟に研究を遂行できたのではないかと感じている。各グループの出身者(博士課程卒業者および大学卒業者)の人事交流がチーム内で盛んにあったことは特筆すべき事柄といえる。また、本チームの若手研究者間で強いネットワークが築かれつつあるのは、将来に向けて大変明るい材料である。これには、量子情報未来テーマ開拓研究会の役割が非常に大きかったといえる。特に、北野グループでは研究スタート時に比べ、学生の人数が大幅に増えた。特に、博士の学生が増えたことで、研究室での議論も活発になり、互いに切磋琢磨しながら研究を進めることができるようになったのではないかと考える。

また、チームの枠を超えて、同じクレスト研究のチーム間にも人的ネットワークが形成できたことは、大変有意義であった。研究総括をはじめとする J S T の研究支援体制に大いに感謝したい。



実験室の実験装置



京大高橋グループのメンバー