平成 19 年度
実績報告

「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」
平成 15 年度採択研究代表者

高橋　義朗

京都大学大学院理学研究科・教授

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

1. 研究実施の概要

原子集団を用いた量子情報処理を実現することを目標にしている。第一のアプローチでは、光格子中の量子縮退原子集団を用いた強相関量子多体系の量子シミュレーターの実現を目指した研究を行っている。これまでに Yb 原子のボース凝縮やフェルミ縮退を実現し、光格子への導入に成功している。今年度は、光格子中の Yb 原子ボース凝縮体について、超流動・原子数スクイーズド状態の転移を観測し、超狭線幅遷移を用いた高分解能レーザー分光によりその振舞いを明らかにするとともに、フェルミ原子を混合した効果について実験的に調べた。今後、フェルミハバードモデルの量子シミュレーションを行う予定である。第二に、希薄な原子集団を用いた量子情報処理の基盤技術を構築することを目的として研究を行っている。今年度の成果として、1. Qubit 状態の保存再生については、パラメトリック蛍光、ならびに条件付単一光子状態の保存再生に世界ではじめて成功することが出来た。2.連続量状態の保存再生については、真空スクイーズド状態の保存再生に同じく世界で初めて成功することができた。3. 離れた原子集団間における多次元エンタングルメントの生成については、単一光子－原子集団間における軌道角運動量状態のエンタングルメントを3×3次元空間で評価する系を構築し、実験を行うに至った。3×3次元エンタングルメントを確認するには至らなかったが、周波数フィルタリングによって回避が可能であり、近く3×3次元エンタングルメントが確認できると考えられる。 第三のアプローチとして、2光子吸収を全量子的に取り扱い、そこから発現する光の量子性に着目して研究を行ってきた。今年度は、特に、波動関数の制御に関して、量子的波動関数で記述される量子相関光子対の研究を主に行い、4光波混合を用いた光子対生成法や2光子吸収を用いた光子対検出の実験を行った。

2. 研究実施内容

まず、高橋グループの研究目的は、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しようというものである。特に、2電子系原子 Yb には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、ハバードモデルで記述される。様々なパラメーター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。

本年度は、まず、Yb 原子の BEC とフェルミ縮退の混合について、4 重極振動を誘起して、その原子間相互作用の詳細を調べた。さらに、Yb 原子 BEC を 1 次元光格子に導入し、明瞭な干渉パターンを観測することに成功した。さらに、光格子の強度をコントロールすることにより、超流動状態から原子数スクイーズド状態への転移を観測することに成功した。さらに、これについてもフェルミ粒子を混合したときの影響を、干渉パターンの Visibility を測定することにより定量的に調べた。

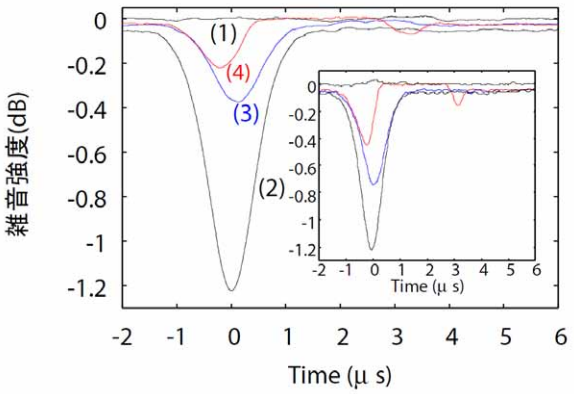
また、超狭線幅遷移を利用した量子気体の高分解能レーザー分光にも成功した。$^1S_0$–$^3P_0$ 遷移（578nm）では、BEC に対しても高分解能分光を行い、その平均場相互作用を明らかにした。特に、フェルミ原子のスペクトルとの明瞭な違いを明らかにし、その起源が量子統計性に基づくものであることを明らかにした。また、$^1S_0$–$^3P_2$ 遷移（507nm）に対しても、BEC の励起に成功し、その平均場相互作用を明らかにするとともに、一次元光格子に導入された BEC について、超流動状態から原子数スクイーズド状態への転移について、高分解能レーザー分光により詳細にスペクトルを測定することに成功した。また、この遷移の光周波数を光周波数コムを用いて正確に決定することに成功した。

さらに、光Feshbach共鳴の可能性についても理論計算により定量的に評価した。スピン禁制の異重項間遷移を用いることにより、非常に大きい効果が得られることを明らかにしたが、特に興味深い系として、異種フェルミオン ^{171}Yb–^{173}Yb 間の場合について計算し、新しい BEC－BCSクロスオーバーの系となりうることを見出した。

また、光の偏光状態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行い、冷却Yb原子を用いてスピンスクイージングを実現することに成功し、その振舞いが理論どおりであることを確認した。さらに、光共振器中で原子スピンのファラデー回転相互作用が増強される効果を実験的に確認した。

上妻グループでは希薄な原子集団を用いた量子情報処理の基盤技術を構築することを目的として研究を行っている。特に、光の量子情報を原子集団中に保存し再生する技術は、長距離量子通信に必要な量子ノードを提供する。量子メモリを実現するために、これまで大きく二つの実験的アプローチがとられてきた。一つは、電磁誘起透明化現象（EIT）を用いる方法であり、もう一つはスピンの量子非破壊測定（QND）を活用する方法である。上妻グループでも、前述したようにパラメトリック下方変換過程によって発生した条件付き単一光子を原子集団中に保存し再生することに

今年度成功した。さらに、今回、レーザー冷却された Rb 原子集団をメモリ媒体として、真空スクイーズド状態を保存し再生することに成功した。実験では、原子集団から再生された光の直交位相振幅の揺らぎがショットノイズ以下に抑えられていることをホモダイン検出器によって確認した。右図は、それぞれ(1)ショットノイズ、(2)原子集団がない場合の真空スクイーズドパルス、(3)EIT によって遅延した真空スクイーズドパルス、(4)コントロール光を On/Off することで保存再生された真空スクイーズドパルスをさす。図は 1MHz～2MHz の帯域でスクイージングを評価した結果、挿入図は 1MHz 以下の帯域で評価した結果である。低周波になるほどノイズの寄与が多くなるが、EIT によって誘起される透明度がますため、再生光のスクイーズレベルが向上するのがわかる。



北野グループでは、主に波動関数の制御について、特に、光子対の波動関数(2 光子波動関数)のもつ量子相関に着目して研究を行っている。2 光子干渉は、この量子相関を利用した干渉法で、回折限界を超えるリソグラフィー技術(量子リソグラフィー)など古典光では実現できない応用が考えられている。光子対の生成に関しては、3 光波混合を利用したものが多く研究されているが、4 光波混合を利用して光子対を生成することも試みている。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。この性質は、2 光子干渉がポンプ光に対する回折限界を超える点で重要である。また、2 光子干渉において光電子増倍管内での 2 光子吸収を利用することにより、1 台の検出器で 2 光子干渉実験を行うという研究も行っている。これは、量子リソグラフィーの原理実験となる。

光子対の生成に関する 4 光波混合の研究の多くは通常の光ファイバを利用しているが、これでは波長が通信波長帯に限られる上に、非線形性も低いため生成効率も悪い。しかし、フォトニック結晶ファイバを用いることでより短波長の光子対を作ることが可能であり、強い光閉じこめ効果から高い非線形性も期待できる。実験には、760nm にゼロ分散波長をもつフォトニック結晶ファイバ(Crystal fiber 社製)を利用した。昨年度までの実験では、ポンプ光波長付近でのみ生成された光スペクトルの分析を行っていたが、今年度はより広い周波数帯域でスペクトルの分析を丹念に行った。その結果、ポンプ光波長をゼロ分散波長よりわずかに大きくしたとき(760nm-761nm)に、光子対がポンプ光の波長とは大きく異なる波長領域に出現することが、分光器のスペクトルの解析よりわかった。次に、これまでの実験ではできなかった、光子対を 2 台の光子検出器の同時検出によって直接観測する実験を行った。光子対の時間差は、回路的な限界である 1ns を下回っており、光子が2つ同時に生成されていることを意味する。現在、生成が確認された光子対を用いて 2 光子干渉の実験を行っている。

3. 研究実施体制

(1)「高橋」グループ

①研究者名：高橋義朗（京都大学）

②研究項目

・イッテルビウム原子のBECおよびフェルミ縮退の実現

・光格子中へのBEC原子およびフェルミ縮退原子の導入と操作

・光会合による散乱長制御

・異方的相互作用をする特異なイッテルビウム原子BECの実現

・超狭線幅光学遷移による量子縮退状態の高分解能分光

(2)「上妻」グループ

①研究者名：上妻幹旺（東京工業大学）

②研究項目

・真空スクイーズド状態の保存再生

・原子集団のスピントモグラフィー

・単一光子状態の保存再生

・原子-光子間多次元エンタングルメント

・原子-光子間多次元エンタングルメント

・真空スクイーズド状態の保存再生

・Rb ボース凝縮体を用いた保存再生

(3)「北野」グループ

①研究者名：北野正雄（京都大学）

②研究項目

・偏光選択性2光子吸収を利用した光子対生成

・フォトニック結晶ファイバを利用した光子対生成

・光電子増倍管の光電面でのカスケード2光子遷移を利用した光子対検出

・時間相関光子対と原子の2光子相互作用に関する研究

・電子回路を用いたシュレディンガー方程式のシミュレーション

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表（原著論文）

〈高橋グループ〉

[1]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)
[2]T. Fukuhara, Y. Takasu, S. Sugawa, Y. Takahashi, “Quantum Degenerate Fermi Gases of Ytterbium Atoms”, Journal of Low Temperature Physics,148,441-445(2007)
[3]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)
[4]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)
[5]T. Fukuhara, S. Sugawa, and Y. Takahashi, “Bose-Einstein condensation of an ytterbium isotope”, Phys. Rev. A ,Vol.76,051604-1-4(November2007)
[6]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)
[7]K. Enomoto, M. Kitagawa, S. Tojo, and Y. Takahashi, “Hyperfine-structure-induced purely long-range molecules”, Phys. Rev. Lett. 100, 123001(2008)
[8] 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(2008)
[9] A. Yamaguchi, S. Uetake, Y. Takahashi,” A diode laser system for spectroscopy of the ultranarrow transition in ytterbium atoms,” Appl. Phys. B 91, 57(2008)
[10]J. Kobayashi, K. Shibata, T. Aoki, M. Kumakura, and Y. Takahashi, “Fictitious Magnetic Resonance by Quasi-Electrostatic Field”, (submitted)
[11]J. Kobayashi, Y. Izumi, M. Kumakura, and Y. Takahashi, “Spinor Molecule in Atomic Bose-Einstein Condensate”, Phys. Rev. A (submitted)
[12]T. Fukuhara, S. Sugawa, Y. Takasu, and Y. Takahashi,“ Quantum degenerate gases and the mixtures of ytterbium atoms”, to appear in International School of physics “ Enrico Fermi”
〈上妻グループ〉
[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”, Phys. Rev. Lett. 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”, Phys. Rev. Lett. 99, 153602 (2007).
[3] K. Usami and M. Kozuma, “Observation of a Topological and Parity-Dependent Phase of

m=0 Spin States", Phys. Rev. Lett. 99, 140404 (2007).
[4] K. Akiba, K. Kashiwagi, T. Yonehara, and M. Kozuma, "Frequency-filtered storage of parametric fluorescence with electromagnetically induced transparency", Phys. Rev. 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).
〈北野グループ〉
[1] 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**, 45-48 (2007)
[2] 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**, 572-577 (2007)