

「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 助教授)

「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。第一に、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、Yb 原子フェルミ縮退を実現し、光格子への導入に成功した。今後は、フェルミ原子を光格子に導入して、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。第二に、光と原子の間の量子情報のやりとり実現を目標に、連続量状態の保存再生、Qubit 状態の保存再生、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の研究を進めている。連続量状態の保存再生については、冷却 Rb 原子集団を用いた真空スクイーズド状態の遅延に成功し、Qubit 状態の保存再生については、パラメトリック下方変換過程で発生した光子対を同じく冷却 Rb 原子集団に保存再生することに成功した。さらに、原子集団と単一光子との間に軌道角運動量に関する  $2 \times 2$  次元のエンタングルメントを生成することに成功した。第三に、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い、特に、光子対と原子の2光子相互作用に注目し、光子対生成においては、4 光波混合を利用した新しい光子対生成法について研究を行った。また、任意の 2 光子波動関数を用いて理論的解析を行うとともに、光電子増倍管の光電面でのカスケード2光子吸収に起因する光電流について重要な知見を得た。今後は、単体の気体原子を用いた共鳴 2 光子吸収の実験へとつなげていく予定である。

## 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。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 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。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。

本年度は、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、フェルミ同位体  $^{171}\text{Yb}$  に対しては、ボソン同位体  $^{174}\text{Yb}$  との光トラップ中で協同冷却により  $^{171}\text{Yb}$  をフェルミ温度の 0.7 倍以下までの冷却に成功した。 $^{173}\text{Yb}$  については、6 成分のスピ状態間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 BEC とフェルミ縮退の混合の生成にも成功した。また、 $^{170}\text{Yb}$  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、また共同冷却により  $^{176}\text{Yb}$  BEC と  $^{174}\text{Yb}$  BEC の混合系を生成することに成功した。

また、2光子光会合分光法を、 $^{168}\text{Yb}$  以外の6つの同位体について網羅的に行い、これら6つの同位体について基底状態の束縛状態の結合エネルギーを決定することにより、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。

また、 $^{174}\text{Yb}$  原子 BEC を 1 次元光格子に導入し、第一ブリリュアンゾーンの運動量分布の観測に成功し、また、明瞭な干渉パターンを観測することに成功し、量子縮退 Yb 原子集団が光格子に導入できていることを確認できた。

さらに、散乱長制御のための光フェッシュバツハ共鳴効果も観測することに成功した。散乱長がもともと小さい  $^{176}\text{Yb}$  同位体および負で大きい  $^{172}\text{Yb}$  同位体を用いて、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を入射することにより、光フェッシュバツハ共鳴特有のスペクトルの観測に成功した。

また、超狭線幅遷移を利用した量子気体の高分解能プローブのための、超高安定な光源を開発し、高分解能レーザー分光に成功した。 $^1\text{S}_0$ - $^3\text{P}_0$  遷移 (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、これをレーザー冷却されたフェルミ同位体  $^{171}\text{Yb}$  原子に共鳴励起し、フェルミ縮退した分布のスペクトルを得ることに成功した。また、 $^1\text{S}_0$ - $^3\text{P}_2$  遷移 (507nm) に対しても、1014nm の半導体レーザー光の第二高調波発生により約 10 mW の出力を得ることに成功し、BEC の励起に成功した。

また、上妻グループの目的は、希薄な原子集団を利用した量子情報処理技術を確認することにある。特に、量子絡み合い状態にある光子対に対して量子メモリを実現することは、量子リピーターを構築し、地球規模での量子通信を実現する上で最も重要な任務であるといえる。上記した非古典場は、パラメトリック下方変換過程を利用することで、比較的容易に生成することが可能である。しかしながら、パラメトリック過程で生成される光 (パラメトリック蛍光対) は、100GHz から 10THz といった非常に広い周波数帯域をもっている。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、情報を担体である光の周波数帯域と、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が、光源の広帯域性を保ったまま、量子メモリの応答帯域を飛躍的に上昇させるというのが理想といえる。そのような観点から、我々はパラメトリック過

程で発生する蛍光対をレーザーによって極低温( $\sim 100\mu\text{K}$ )にまで冷却された原子系に保存し再生するという研究を行い、パラメトリック蛍光対をレーザー冷却されたルビジウム原子集団中に保存し再生することに成功した。まず、チタンサファイアレーザーからの出力(795nm)をPPLN導波路に通すことで、倍波(397.5nm)を得た。この倍波を別のPPLN導波路に通すことでパラメトリック過程を誘起し、蛍光対を発生させた。生成されたパラメトリック蛍光対は10THz程度の周波数幅をもっている。グレーティング、エタロン等によって400MHz程度まで周波数幅を狭窄化した。さらに電磁誘起透明化現象を利用して周波数一時間フィルタリングを行い、最終的に原子系と周波数のマッチングがとれる成分(10MHz程度)のみを選択的に保存した。再生後の光場に対して強度相関測定を行ったところ、スーパーバンチング性が検出され、さらにコヒーレンス時間が保存前に比べて劇的に長くなる現象が確認された。この研究によって、パラメトリック過程を利用した伝統的な量子情報通信技術とEITを用いた量子メモリ技術とが世界で初めてリンクされたことになる。

北野グループでは、光と原子の非線形相互作用の一つである2光子遷移に着目して研究を行っている。2光子吸収に関する研究は、ドップラーフリー分光に代表されるような非線形分光の分野で発展してきているが、その研究の多くは光の量子性は問題にしておらず、光は量子化しない半古典論の枠組みで解析されている。しかし、非線形な光学過程には光の量子性が問題になることも事実であり、2光子吸収もその例外ではない。我々の研究では、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いる。その中でも特に、光子対と原子の2光子相互作用に注目している。

研究は大きく2つに分かれる。1つは、光子対を生成する方法に関するもので、従来法の光学結晶の3光波混合を利用するもののほかに、フォトニック結晶ファイバーの4光波混合を用いた生成法にも取り組んでいる。もう1つは光子対を用いた2光子遷移に関する研究である。ただし、この2つは独立ではなく光子対の生成に関する研究は、光子対による2光子遷移の実験のために用いることを想定している。

光子対と原子の2光子相互作用を理論的に解析するために我々は2光子波動関数を導入して計算を行った。計算では2光子遷移確率の他に、中間状態への1光子遷移確率も計算した。それによって、2光子波動関数の形を選ぶことで、2光子遷移確率を1光子遷移確率より大きくすることが可能であることが分かった。2光子相互作用が1光子相互作用より大きくなることは、量子状態の検出や制御にとって非常に重要な条件であると考えている。

光子対と原子の2光子相互作用に関する実験として、光電子増倍管の2光子カスケード遷移を利用した光子対検出の実験を行っている。数百nW程度の高強度の光子対を得るために導波路型PPLN結晶を利用した光子対生成実験を行った結果、200mW程度のポンプ光(532nm)に対して、百nW強の光子対(1064nm)が得られた。現在のところ、この光子対を用いて光電子増倍管の光子対検出を試みている最中である。

### 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 助教授)

##### 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 助教授)

##### ②研究項目

- ・冷却原子集団に対する QND 測定を用いた量子トモグラフィー
- ・空スクイーズド状態の冷却原子集団への転写と再生
- ・冷却原子集団を用いたパラメトリック蛍光対の保存と再生
- ・冷却原子集団と単一光子との間の軌道角運動量エンタングルメントの生成

#### (3)「北野」グループ

##### ①研究者名

北野 正雄(京都大学 教授)

##### 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
- ・2光子波動関数を用いた2光子遷移の解析
- ・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
- ・電磁誘起透明化を利用した高非線形効果の研究

### 4. 研究成果の発表等

#### (1)論文発表(原著論文)

##### 高橋グループ

- 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)

- M. Kumakura, T. Hirokuni, M. Okano, Y. Takahashi, and T. Yabuzak, “Topological formation of a multiply charged vortex in the Rb Bose-Einstein condensate: Effectiveness of the gravity compensation”, Phys. Rev. A, Vol. 73, pp. 063605-1-063605-7 (2006)
- T. Fukuhara, Y. Takasu, M. Kumakura, Y. Takahashi, “Degenerate Fermi Gases of Ytterbium”, Phys. Rev. Lett. **98**, 0304012 (2007).

#### 上妻グループ

- K.Akiba, D.Akamatsu, M.Kozuma: Frequency-filtered parametric fluorescence interacting with an atomic ensemble; Optics Communications **259** (2006) 789-792.
- T.Tanimura, D.Akamatsu, Y.Yokoi, A.Furusawa, M.Kozuma: Generation of a squeezed vacuum resonant on a rubidium D1 line with periodically poled KTiOPO4; Optics Letters **31** (2006) 2344-2346.
- K.Usami, J.Takahashi, M.Kozuma: How to measure the quantum state of collective atomic spin excitation; Physical Review A **74** (2006) 043815.
- R.Inoue, N.Kanai, T.Yonehara, Y.Miyamoto, M.Koashi, M.Kozuma: Entanglement of orbital angular momentum states between an ensemble of cold atoms and a photon; Physical Review A **74** (2006) 053809.

#### 北野グループ

- Y. Tamayama, T. Nakanishi, K. Sugiyama, and M. Kitano: “Observation of Brewster’s effect for transverse-electric electromagnetic waves in metamaterials: Experiment and theory” Physical Review B, 73, 193104 (2006)
- 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, 758-765 (2006)
- 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)