

「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

第一のアプローチとして、原子気体のボース凝縮体やフェルミ縮退状態などの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ションを行うことを計画している。これまでに、量子縮退原子の安定生成システム、高感度検出システムを開発し、イッテルビウム原子集団のフェルミ縮退温度以下までの冷却に成功し、さらに光格子中特有のボース凝縮体の運動量分布の観測に成功した。今後は、光会合による原子間相互作用の制御などの技術開発とともに、特に、2次元光格子中のフェルミ縮退したイッテルビウム原子を対象とした強相関量子多体系の量子シミュレーターなどの量子情報処理への応用を目指していく。

第二のアプローチとして、比較的容易に準備できる希薄な原子集団を用いて、「相補的な性質をもつ光と原子との間で、エンタングルメントを共有する」、あるいは「両者の間で量子情報を自由にやりとりする」、といった量子情報処理を実現するための実験研究を行っている。平成17年度、我々は光と冷却原子集団との間に軌道角運動量に関するエンタングルメントを生成することに世界で初めて成功した。測定は、 2×2 の次元で行ったが、系が本質的に多次元の性質をもっていると推察することはごく自然である。さらに、真空スクイーズド状態を原子集団に転写、再生する実験研究に関して大幅な進展が得られた。これまでは、PPLN導波路を用いてRb原子と共鳴する(795 nm)真空スクイーズド状態を生成していたが、今回 -2.75 dBのスクイーズを得るに至っており、こうして得られた比較的素性のよい真空スクイーズド状態を利用して、これまで観察していたものにくらべて、10倍近く細い電磁誘起透明化窓を観察することに成功した。従って、近い将来、超低速度伝播、保存、再生が実現する可能性が極めて高い。

第三のアプローチとして、量子情報の分野において欠かせないものとなっている光子対を研究対象とする。一般的には非常に小さい光子間の非線形相互作用を、光子対がもつ量子相関によって増強することで、光子間の状態操作等への応用を目指している。これまでの研究で、理論的枠組みの構築と、時間相関光子対の効率的生成について進展があった。今後は、生成された光子対を利用して2光子遷移を誘起する実験を行う予定である。

2. 研究実施内容

第一のアプローチでは、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も含めた、量子情報処理への応用の可能性を追求するものである。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** にはフェルミ粒子を含んだ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を生成し、様々なパラメーターでその振舞いを研究することは、強相関量子多体系に対して現実の量子系を用いたシミュレーターとみなすことができる。

本年度の具体的研究実施内容として、まず、「**Yb** 原子の **Fermi** 縮退の実現」が挙げられる。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 0.9 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 0.6 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ッキングによる効果の観測に成功した。

また、量子シミュレーションを行ううえで、量子縮退した原子集団を光格子へ導入または光格子中で生成することは重要なステップである。これまでに我々は、フェルミ同位体 ^{171}Yb および ^{173}Yb の両方について、光格子中においてほぼフェルミ温度にまで冷却することに成功した。さらに ^{174}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た。これらは固体系のシミュレーションに向けた重要な第一歩である。

さらに「**Yb** 原子の新しい量子状態制御に向けた光会合」についても研究を進展させることができた。量子縮退集団を特徴付ける散乱長をコントロールすることにより、シミュレーションの可能性を広げることが可能であるが、本研究では、2 原子から光を介して分子を生成する光会合という手法を用いて、その s 波散乱長を制御することに着目している。本年度には、フェルミ同位体 ^{171}Yb および ^{173}Yb の超低温原子集団を用いて $^1\text{S}_0 + ^3\text{P}_1$ 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世界に先駆けて行うことに成功し、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。

さらに、「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。実験では **Rb** 原子のスピンオール **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、量子情報処理において特に重要な特徴をもち、今後の応用性が期待できる。

また、第2のアプローチの目的は、希薄な原子集団を用いて量子情報処理を行う基礎技術を確認することにある。まず、単一光子と冷却原子集団との間における軌道角運動量に関するエンタングルメントの生成について研究を行った。図1のように予めハイパーファインポンピングされた原子集団にC数とみなせるような光を照射するとAnti-stokes Raman過程がおこる。この際、ある特定の空間モードに射出された単一の光子を検出すると、原子のディック状態を1つ励起することができる。原子系のデコヒーレンス時間内であれば、Stokes Raman過程を誘起するような光を照射することで、好きな時刻に単一光子を取り出すことが可能となる。このようにして発生した単一光子が、実は原子集団との間に軌道角運動量のエンタングルメントをもつことを我々は確かめた。図2は dislocation をもつホログラムとシングルモードファイバーとの組み合わせを利用して、軌道角運動量に関する量子トモグラフィーを行った結果である。量子トモグラフィーによって再構成された密度行列要素から、エンタングルメントの指標である Entanglement of formation を評価したところ、0.6 という値を得た。この研究によって、多次元のエンタングルメントを原子集団と単一の光子との間で共有できる可能性がでてきた。

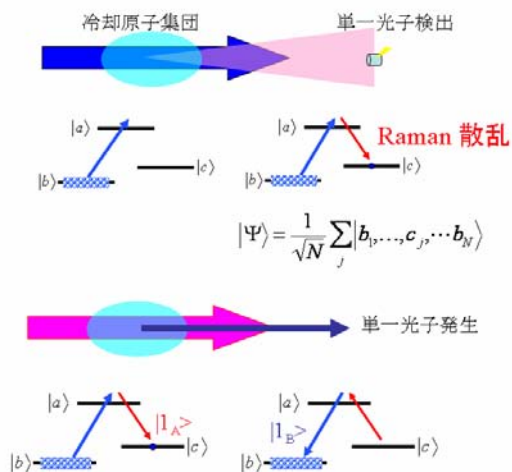


図1 原子集団を用いた単一光子状態の生成

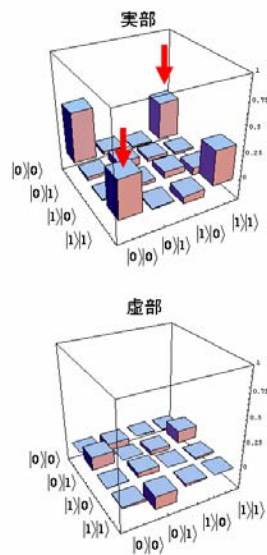


図2 16基底による量子トモグラフィー

さらに、真空スクイズド状態を原子集団に転写、再生する実験研究に関して大幅な進展が得られた。これまでは、PPLN 導波路を用いて Rb 原子と共鳴する（795nm）真空スクイズド状態を生成していたが、得られるスクイズングレベルは-1.5dB程度にとど

まっていた。これは主に導波路構造によるロスや photo refractive damage が原因と考えられる。原子系への情報転写の際、数 10 % 程度の field loss が発生することは避けがたく、上記のようなレベルの真空スクイズド状態を用いて最終目的を実現することは大変難しいといえる。今回、東大古澤研究室との共同研究を通して、PPKTP 結晶を用いたダブル、スクイザーを開発することに成功した。具体的には、 -2.75dB のスクイズを得るに至っており、この値は当波長におけるチャンピオンデータである。実験パラメーターを解析した限りにおいて、アラインメント等の工夫により、 -5dB 程度のスクイズが今後得られる可能性が極めて高い。こうして得られた比較的素性のよい真空スクイズド状態を利用して、これまで観察していたものにくらべて、10 倍近く細い電磁誘起透明化窓を観察することに成功した。従って近い将来、超低速度伝播、保存、再生が実現する可能性が極めて高い。

さらに、第 3 のアプローチとして光子と原子の非線形相互作用を研究している。このような、光の非線形相互作用は、光子を量子状態とした状態の操作あるいは状態検出に不可欠なものである。その中でも特に、時間相関のある光子対に関して、その生成とそれを用いた原子との 2 光子相互作用に関する研究を行っている。

光子対の生成に関する研究は、自発パラメトリック下方変換を用いる従来の方法の他に 2 種類を行っている。1 つは、偏光選択性 2 光子吸収を利用する方法である。これについては、アルカリ金属を封入したセルを用いて行っていたが、より高い相互作用が必要なことが分かった。そのためには、高密度な冷却原子を用いるか、電磁誘起透明化を用いた高い非線形相互作用などを用いる必要があると考え検討中である。もう 1 つは、フォトニック結晶ファイバ中の四光波混合を利用した光子対の生成法で、これについては、ポンプ光強度に対する出力光の強度の依存性から、光子対が生成されていることを確認している。

光子対の 2 光子相互作用に関する研究は、理論と実験を両方行っている。理論に関しては、原子の 2 光子遷移を、2 光子波動関数を用いて全量子的に解析した。その結果、2 光子吸収が入力する 2 光子波動関数の形に大きく依存することが分かった。このような理論的根拠を元に実験を進めている。光電子増倍管の光電面内のカスケード 2 光子遷移を対象とした実験では、コヒーレント光中の偶然に存在する 2 光子を光電子増倍管の 2 光子遷移で検出することはできたが、まだ時間相関光子対を検出するには至っていない。これは、半導体レーザで用意できるコヒーレント光よりも、光子対ビームの出力が少ないからである。これについては光学系の改良などで対処する。また、孤立原子の共鳴 2 光子遷移を用いた研究も進行中である。

3. 研究実施体制

「高橋」グループ

①研究分担グループ長：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
- ・ 光散乱の無視できるコヒーレントスピン操作法の開発

「上妻」グループ

①研究分担グループ長：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
- ・ 真空スクイーズド状態の熱ガス原子集団への転写と再生
- ・ 単一光子保存再生の広帯域化
- ・ 冷却原子集団を用いた単一光子状態の生成
- ・ QND測定に最適な冷却原子集団のデザイン
- ・ Rb D1線と共鳴する真空スクイーズド状態の生成
- ・ 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
- ・ EIT用光源の作成、および真空スクイーズド状態の生成
- ・ 電磁誘起透明化窓を用いた保存再生についての系統的評価
- ・ 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

「北野」グループ

①研究分担グループ長：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

4. 主な研究成果の発表

(1) 論文（原著論文）発表

- 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”, to appear in Phys. Rev. Lett.
- 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., Vol.74, No.9, pp2622-2630 (2005)

- 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 Vol. 175, pp235-241(2005)
- 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. 83,33(2006)
- 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, 83,107 (2006)
- 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, 83,21(2006)
- T. Nakanishi, K. Sugiyama, and M. Kitano, "Simulation of Slow Light with Electronics Circuits" American Journal of Physics, Vol.73,323-329, April (2005)
- K.Akiba, D. Akamatsu, and M.Kozuma, "Frequency-filtered parametric fluorescence interacting with an atomic ensemble" Optics communications(Accepted)