

「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、さらに、光格子中へのボース凝縮やほぼフェルミ縮退温度までに冷却されたイッテルビウム原子集団の生成に成功した。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、ボース凝縮体のような特殊な系が持つ性質をあえて利用しないやりかたで、量子もつれあい状態を生成することを試みることを計画している。まず、長距離間における原子の量子テレポーテーションに関する新しい手法を提案した。これまででフィルタリング系、検出系、解析系の技術は整った。今後冷却原子集団を利用して実現する予定である。さらに、パラメトリック蛍光を利用して条件付き単一光子状態の生成、保存、再生を行う研究を進めた。1.7GHzのスペクトル幅をもつパラメトリック蛍光を生成し、原子ガスとの相互作用を通し低速度伝搬させることに世界で初めて成功した。さらにactive制御されたファブリペロー共振器に通し、スペクトルを1MHzまで狭窄化した。今後は、これが条件付き単一光子源として利用可能であるかどうかを検証し、冷却原子を用いた単一光子状態の保存再生にトライする。

また、光子対は非局所量子相関などの量子特有の現象が顕著に現れる重要な要素であり、量子情報の分野において欠かせないものとなっている。第3のアプローチとして、光子対と二光子吸収を研究対象として、大きく分けて二種類の研究を行う。一つは、偏光選択性のある二光子吸収を用いて光子対を生成する研究である。この方法は我々が提案したもので、現在はルビジウムのS-S間二光子遷移を対象として実験を進めている。もう一つは、光子対の二光子吸収に関する研究で、光電子増倍管の光電面で誘起された二光子吸収による光電流の測定を行なうものである。コヒーレント光についての予備的実験を終了し、次は光子対状態を入射して光電流を測定する予定である。

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、1) Yb原子のFermi縮退に向けた冷却、2) Yb原子の新しい量子状態制御に向けた光会合、が挙げられる。以下、それぞれの項目ごとに説明する。

1) Yb原子のFermi縮退に向けた冷却

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。我々は、フェルミ同位体 ^{171}Yb に対してボソン同位体 ^{174}Yb との光トラップ中で協同冷却を行うことにより ^{171}Yb を十分に冷却する研究を行った。最も冷却された状態で、フェルミ温度の4倍以下まで到達している。この状態で共同冷却に用いている ^{174}Yb がほとんどなくなっているためこれ以上の冷却はうまくいっていない。さらに、光格子中でフェルミ同位体 ^{171}Yb のスピンの混合状態をもちいて蒸発冷却を行い、ほぼフェルミ温度にまで冷却することに成功した。

2) Yb原子の新しい量子状態制御に向けた光会合

量子縮退集団を特徴付けるs波散乱長をコントロールすることにより、様々な可能性が広がる。本研究では、特にYb原子に対して、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注目している。本研究は第一段階として、蒸発冷却により得られたボース凝縮体、或いは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行い、他では見られない非常に狭い線幅を持つ、分子の振動回転準位への共鳴スペクトルの観測に成功した。

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立することにある。具体的には、原子集団の対称集団状態を利用して、原子の量子テレポーテーション、単一光子状態の保存再生を実現していく。

1) 長距離間における原子の量子テレポーテーションに関する進捗状況

原子集団内の対称集団励起状態を利用することで、長距離間においてエンタングルメントを生成することが出来ること、またそれを利用することで原子の量子テレポーテーションを行うことが可能であることが、Duan, Lukin, Cirac, Zollerらによって理論的に示されている。この方法は、単一の光子の検出を利用したいわゆる観察誘起型のエン

タングルメント生成法であるが、観察時の光路のゆらぎによって、エンタングルメント状態の位相が揺らいでしまうという欠点を持つ。また生成されるエンタングルメントは、単一光子をビームスプリッターに入力した場合に二つの空間モード間で発生するそれと同じタイプのものであり、量子テレポーテーションを行う上で、原子集団を合計6個準備しなければならないといった欠点も持っている。我々は、上記の問題を解決する新しい手法を提案した（現在、論文執筆中のため、ここではその詳細を公開しない）。我々の手法を利用すると、光子検出時の光路の揺らぎは、全く問題にならず、かつ3つの原子集団を準備するだけで、フィデリティ-1の量子テレポーテーションが実現出来る。とはいえ、実際にこのプロジェクトを実現するためには、まず原子集団内に通常の対称集団状態を励起するといった基礎・予備実験から開始する必要がある。平成16年度、我々はガラスセル中に封入されたルビジウム原子集団を用いて、この実験を行った。5 TorrのHeバッファースガスと一緒に同位体分離した ^{87}Rb をガラスセル中に封入し、半導体レーザーを用いて原子を $5S_{1/2} \text{ F}=1$ 状態に光ポンピングした。この状態の原子に約1 GHzの離調をとったチタンサファイアレーザーの光を照射することで自発ラマン過程を起こし、発生した光子をカウントした。原理的にはこの過程を通して、原子系に対称集団状態が励起される。次に $5S_{1/2} \text{ F}=2 \rightarrow 5P_{1/2}$ 遷移に共鳴するレーザーを照射することで、対称集団状態のコヒーレンスを利用して、アンチストークスラマン過程を起こし、同じく発生した光子をカウントした。対称集団状態の励起確率が十分小さい場合は、発生する光場は、P関数が正値とならないような非古典的状态になり、強度相関関数についてのコーシーシュワルツの不等式が大きく破れることになる。これは、パラメトリック下方変換で発生する2モードのスクイーズド状態が、シュワルツの不等式を破れるのと、全く同じ関係にある。理論的には、自己相関関数が2、相互相関関数が $1+1/p$ (p は対称集団状態の励起確率) となり、 $p \ll 1$ においてコーシーシュワルツの不等式(相互相関関数 $^2 <$ 自己相関関数 2)が大きく破れることになる。実際の実験では、自己相関関数はほぼ2となり、相互相関関数も2程度となり、顕著な不等式の破れをみることは出来なかった。これは主に対称集団状態の励起確率 p が大きいことによる。レーザーの強度を下げることでこの問題は原理的には簡単に解決することが出来る。しかし実際には、いくら p を下げて、自発ラマン過程で発生した光子を検出する割合よりも、各種のフィルターから漏れて出た励起レーザー中の光子を検出する割合が増えてしまい、結局シュワルツの不等式を大きく破ることは出来なかった。ガラスセル中の原子集団はドップラー幅をもっており、励起時にはレーザーの離調をこのドップラー幅よりも十分大きくとる必要がある。対称集団状態の励起確率は、離調の2乗に逆比例し、かつ励起レーザーの強度に比例する。つまり、離調で損をした分をレーザー強度で補償する必要がでてくる。当然、大量の光子の中から、目的の一つの光子を検出するのは難しくなってくる。実はこの状況は、我々独自のものではなく、全世界的にセルを用いて実験を行っているグループ共通の問題であり、セルを用いて対称集団状態を励起しているグループは、どこも大きなシュワルツの不等式の破れを観察するに至っていない。本年度の研究では、十分大きなシュワ

ルツの不等式の破れを観察することが出来なかつたが、技術的には大きな進展があり、今後冷却原子集団を利用して原子系のエンタングルメント生成、量子テレポーテーション等を行う上で必要なフィルタリング系、検出系、解析系の技術は整ったといえる。

2) 単一光子状態に関する進捗状況

パラメトリック蛍光を利用して条件付き単一光子状態を生成し、これに対して電磁誘起透明化を行うことで、単一光子状態の保存再生を行うという方向性で研究を進めた。条件付きPPLN導波路、干渉フィルター、エタロンを用いて1.7GHzのスペクトル幅をもつパラメトリック蛍光を生成した。これによりパラメトリック蛍光をルビジウムD1線と相互作用させることが可能となった。実際にドップラー広がりを起こした原子ガスとの相互作用を通し、パラメトリック蛍光を低速度伝搬させることに世界で初めて成功した。得られたパラメトリック蛍光は強度相関関数に関するコーシーシュワルツの不等式を大きく破っており、単一光子状態として十分利用可能な状態といえる。但し、電磁誘起透明化を利用して、光の状態を凍結再生するには、スペクトルをさらに1000分の1に狭窄化し、原子の自然幅（6 MHz）以下にする必要がある。そこで1.7GHzまでスペクトルが狭窄化されたパラメトリック蛍光を、active制御されたファブリペロー共振器に通し、スペクトルを1 MHzまで狭窄化した。このような極限的スペクトル狭窄化も世界で初めての試みである。ファブリペローによる狭窄化について、詳細を述べる。FSR3GHz、フィネス3000のファブリペロー型共振器を作成した。ファブリペロー共振器の共鳴周波数は、時間とともに容易にドリフトしてしまうため、ミラー間距離を安定化する必要がある。通常は、レーザーを共振器に送り、パウンドドリバー法で誤差信号を発生させ、それをミラー間に挿入したPZTに負帰還すればよい。しかし、それでは、パラメトリック蛍光はロック用のレーザーと混ざってしまい、光子統計を行うことが出来なくなる。そこで、パラメトリック蛍光とロック用のレーザーをX分岐型ファイバーで同一空間モードに成形した後、ロック光とパラメトリック蛍光とを時間的に切り替えることで上記の問題を解決することにした。50 μ sの間、ミラー間距離の安定化を行い、その後の50 μ sは、ロック光をカットし、パラメトリック蛍光のみをファブリペローに入力し、光子統計を行うというわけである。この手法は、Cavity QEDでよく利用される方法である。ファブリペロー共振器を通過した後のパラメトリック蛍光をビームスプリッターで二つに分け、それぞれを単一光子検出器で受けることで、同時計数測定を行った。その結果、同時発生した2光子特有の鋭いバンチング信号が計測された。コヒーレンス時間は、500ns程度であり、ここから予想通りパラメトリック蛍光のスペクトル幅が1MHz程度まで狭窄化されたことがわかった。同時計数レートは、0.1 counts/secであった。

第3のアプローチでは、「偏光選択性のある二光子吸収を用いた光子対生成」と「光子対による二光子遷移」の研究を行っている。これらの研究は、二光子遷移という共鳴的な非線形光学現象を量子光学並びに量子情報の分野で利用することを目的としたものである。

1) 「偏光選択性のある二光子吸収を用いた光子対生成」

量子跳躍の手法(Quantum Jump Approach)により生成される光の状態の解析を行ない、光子対状態が生成されることを理論的に導くことができた。そして、外部共振器半導体レーザを波長780nmの光源、チタンサファイアレーザを波長740nmの光源として用いて、ルビジウムS-S非縮退二光子遷移を対象とした実験的検証を開始した。この実験で、光子対生成に必要な偏光選択性がこの非縮退二光子遷移でも存在することを確認した。

2) 「光子対による二光子遷移」

光電子増倍管の光電面での二光子遷移を対象とし研究を行っている。本年度は1064nmの波長のレーザ(コヒーレント光)を用いた実験を行ない、光電流が入射光強度の2乗に比例して増加することを確認した。これは、光電流が光電面の二光子遷移によって誘起された光電子の増倍過程で発生していることを裏付ける結果と言える。現在、疑似位相整合非線形光学結晶で発生させた光子対を光電子増倍管に入射して、光電流を測定する実験を進めている。

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（京都大学大学院理学研究科、助教授）
- ②研究項目：量子縮退原子集団を用いた量子情報処理の基礎研究
 - ・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と強相関係の実現

上妻グループ

- ①研究分担グループ長：上妻 幹男（東京工業大学 大学院理工学研究科、助教授）
- ②研究項目：希薄な原子集団を用いた量子情報処理
 - ・レーザー冷却された原子集団中に励起された対称集団励起状態を利用した長距離間における原子の量子テレポーテーション
 - ・パラメトリック下方変換過程、及び対称集団励起状態を利用した単一光子状態の保存・再生

北野グループ

- ①研究分担グループ長：北野 正雄（京都大学工学研究科、教授）
- ②研究項目：二光子遷移と光子対に関する研究
 - ・偏光選択性のある二光子吸収を用いた光子対生成
 - ・光子対による二光子遷移に関する研究

4. 主な研究成果の発表

(1) 論文発表

高橋グループ

- Y. Takahashi, "Formation of Bose-Einstein Condensates with Optical Trapping Method" The Review of Laser Engineering, Vol.32 No.7 pp463-46 (July 2004)
- 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)
- 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)

上妻グループ

- D. Akamatsu, K. Akiba, and M. Kozuma, "Electromagnetically Induced Transparency with Squeezed Vacuum" Physical Review Letters, Vol.92 No.20 (2004).

北野グループ

- T. Nakanishi, K. Sugiyama, and M. Kitano, "Simulation of Slow Light with Electronics Circuits", American Journal of Physics, Vol. 73, p323 (2005)