

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 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

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点)

研究代表者： 高橋 義朗（京都大学大学院理学研究科 教授）

主たる共同研究者：

北野 正雄（京都大学大学院工学研究科 教授）

＜2光子吸収による光子対生成の理論＞

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＞

3. 研究内容及び成果：

3-1. 研究課題全体の研究内容及び成果

このチームは、京大の2グループ、東工大グループからなる体制で、原子アンサンブルを用いた量子情報処理技術開発に取り組み、特に量子シミュレーションと量子メモリの基礎検討で優れた成果を上げた。各グループ間の連携がうまく図られ、若手研究者の育成にも深い配慮がなされた。将来の日本の量子情報処理の研究を担うであろう豊富な人材が育った。

3-2. 京大グループ(高橋義朗)の研究内容

このグループは、Ybの7つの同位体を用いた光格子トラップの基礎実験で世界をリードする実を持つグループである。優れた実験技術と深い物理的理解を合わせ持つ数少ない研究グループである。本CRESTでは、この光格子技術を用いて強相関物質の機構を解明する量子シミュレーターの開発を目指した。このために重要なパラメータであるS波散乱長(相互作用の強さ)をphotoassociation分光法を用いて、7つの同位体間の全て(28通り)について評価した。次に、光フェシュバツハ共鳴という手法を開発して、この散乱長を人工的に変調する実験技術を確立した。同時に、Ybのボゾン原子でBEC凝縮体を、Ybのフェルミ原子でフェルミ縮退をそれぞれ実現した。最後に、これらの技術を組み合わせて3次元光格子中での超流動ーモット絶縁体の量子相転移の観測に成功した。光格子を用いた量子シミュレーションの研究では、マックスプランク量子光学研究所のBlochのグループが一步先行していたが、Ybという将来性の高い原子で光格子技術を立ち上げられた実績は大きな成果であった。今後の発展が楽しみである。

3-3. 東工大(上妻幹旺)の研究内容

このグループは、ノーマル状態にある原子アンサンブルへの非古典光(例えば真空スクイーズド状態)の捕獲保存に成功し、この系を用いた量子メモリのあり方の一つを示した。この研究テーマでは、ハーバード大学のLukinのグループが古典光の保存に成功していたが、東工大グループは初めて非古典光の保存に成功した。

また、原子アンサンブルと単一光子数状態間のエンタングルメントの生成にも成功した。これらの成果は世界的にも高く評価されている。

3-4. 京大グループ(北野正雄)の研究内容

このグループは、2光子吸収という非線形光学を用いた様々な量子情報処理のあり方を検討し、その過程の深い理解と技術を確立した。3つのグループともに、大学院生やポスドクなどの若手研究者の育成に積極的に取り組み優れた人材を育てた。

#### 4. 事後評価結果

##### 4-1. 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

このチームからの発表論文数は8件(国内)、45件(国際)、招待講演数は39件(国内)、35件(国際)であった。

主なものを以下にリストアップした。

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. 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)
3. 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)
4. T. Fukuhara, Y. Takasu, M. Kumakura, and Y. Takahashi, "Degenerate Fermi Gases of Ytterbium", Phys. Rev. Lett. 98,030401-1-4(January 2007)
5. 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  $^{174}\text{Yb}$  via Photoassociation Spectroscopy", Phys. Rev. Lett. 98., 203201-1-4(18 May 2007)
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 November 2007)
7. K. Enomoto, M. Kitagawa, S. Tojo, and Y. Takahashi, "Hyperfine-structure-induced purely long-range molecules", Phys. Rev. Lett. 100, 123001-1-4(2008)
8. K. Enomoto, K. Kasa, M. Kitagawa, and Y. Takahashi, "Optical Feshbach Resonance Using the Intercombination Transition", Phys. Rev. Lett. 101, 203201 (2008)
9. 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).
10. D. Akamatsu, Y. Yokoi, M. Arikawa, S. Nagatsuka, T. Tanimura, A. Furusawa, and M. Kozuma, "Ultralow Propagation of Squeezed Vacuum Pulses with Electromagnetically Induced Transparency", Physical. Review Letters 99, 153602 (2007).
11. K. Usami and M. Kozuma, "Observation of a Topological and Parity-Dependent Phase of  $m=0$  Spin States", Physical. Review Letters 99, 140404 (2007).
12. D. Akamatus, K. Akiba, and M. Kozuma, "Electromagnetically induced transparency with

squeezed vacuum ”, Physical Review Letters 92, 203602 (2004).

文献4は、フェルミ原子であるYb同位体でフェルミ縮退 ( $T \leq T_F$ ) を実現したものである。文献5は、Yb同位体のS波散乱長をphotoassociation分光法で評価したものである。文献8は、Yb原子間の相互作用の強さを光フェッシュバツハ共鳴という新しい方法で変調することに成功したものである。文献9は原子アンサンブルへ真空スクイズド状態を保存して取り出すことに成功したものである。

#### 4-2. 成果の戦略目標・科学技術への貢献

このチームの中心的テーマであった光格子にトラップされた冷却原子を用いた量子シミュレーションの研究は量子情報処理技術という研究分野の幅を広げる上でも、また原子・光物理と固体物理の接点・境界領域での新しいパラダイムを築くという点でも、極めて重要な研究であった。元々、磁性と強相関系の理論と実験に伝統のある我が国であり、日本の原子・光物理実験の中心的存在であるこのチームが、この新しい境界領域で今後果たすべき役割は極めて大きいものがある。

幸い、研究代表者、共同研究者はまだ若く、良い若手も育っていることから、将来が楽しみである。

#### 4-3. その他の特記事項(受賞歴など)

以下に受賞歴をリストアップする。

- [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)
- [3] 上妻幹旺: 東工大挑戦的研究賞  
(平成17年1月: “真空スクイズド状態の原子アンサンブルへの転写と再生”)
- [4] 北野正雄: 第11回松尾学術賞(松尾学術振興財団) (平成19年度)

以上