

課題番号	GR036
------	-------

**先端研究助成基金助成金(最先端・次世代研究開発支援プログラム)  
実施状況報告書(平成 24 年度)**

本様式の内容は一般に公表されます

研究課題名	ホログラフィックに制御された光ポテンシャルによる大規模2次元量子計算機の実現
研究機関・ 部局・職名	東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
氏名	上妻 幹男

1. 当該年度の研究目的

本研究は、極低温の  $^{171}\text{Yb}$  原子を量子ビットとして使用し、大規模な量子計算を実現することを目的としている。平成 23 年度、我々は、 $^{174}\text{Yb}$  原子集団を量子縮退させ、さらに 100nm 程度のシート状に加工し、2次元量子縮退系を生成することに世界で初めて成功をした。原理的には光定在波を加えるだけで、計算の母体となる 2 次元光格子系を構成できる高みにまで到達した。この実験に用いたのは  $^{174}\text{Yb}$  原子であるが、量子計算を行うためには核スピンを有する  $^{171}\text{Yb}$  原子を起用する必要がある。 $^{171}\text{Yb}$  原子はフェルミオンであるため、他の同位体と混合した上で蒸発冷却を施す、いわゆる協同冷却と呼ばれる手法をとる必要がある。但しこの従来の方法は、光格子系に冷媒として導入した同位体が残存してしまうという致命的な問題をもっている。こうした背景をふまえ、平成 24 年度は、1.  $^{171}\text{Yb}$  原子と  $^{174}\text{Yb}$  原子の同時磁気光学トラップ、2.  $^{171}\text{Yb}$  のみを光トラップ中に残す特別な蒸発冷却の開発、などフェルミオンに関する研究をスタートすることにした。さらにボソンである  $^{174}\text{Yb}$  を用いて、3. 光格子中にトラップされた個々の原子を蛍光撮像する実験にトライすることにした。また可能であれば、4. 単一サイトの原子状態を操作することを目指して研究を行った。

2. 研究の実施状況

1)については、目的を達成することができた。Yb を冷却する際に使用するレーザー光源に周波数変調を施すことで、二つの同位体を同時に冷却するために必要な異なる周波数成分をもたせ、ゼーマン減速された Yb 原子ビームに照射することで、同時磁気光学トラップに成功した。具体的には、 $^{174}\text{Yb}$  を  $7 \times 10^7$  個、 $^{171}\text{Yb}$  を  $3 \times 10^6$  個トラップすることができたが、これは協同冷却によってフェルミ縮退を起こす上で十分な原子数である。

2)については、新しい蒸発冷却の理論的提案と基礎的な実験デモンストレーションを行うことに成功した。提案は以下の通りである。Yb の  $^1\text{S}_0$ - $^3\text{S}_1$  遷移(波長 770nm)から正に離調したレーザーを絞って光トラップを構成することで、 $^{171}\text{Yb}$  と  $^{174}\text{Yb}$  の基底状態に対して引力ポテンシャル、 $^3\text{P}_2$  準安定状態に対して斥力ポテンシャルを誘起する。 $^1\text{S}_0$ - $^3\text{P}_2$  遷移(超狭線幅光学遷移)に対応する 507nm のレーザーを照射することで、エネルギーの高い  $^{174}\text{Yb}$  原子だけを選択的に  $^3\text{P}_2$  準安定状態にうつす。 $^3\text{P}_2$  準安定状態に移った原子は、斥力ポテンシャルを感じてすみやかに光トラップから離脱する。計算上はレーザー線

幅が 10kHz 程度にまで狭窄化されていれば、10nK 程度のエネルギー分解能をもって冷媒となる同位体だけを蒸発冷却できる。実際に、アイデアの骨子となる、基底状態と励起状態のライトシフトをテーラードした光トラップを構成したところ、Yb 原子を光トラップすることに成功した。さらに、1014nm の半導体レーザーから2次高調波発生を行うことで 507nm の光源を作成し、特殊な防音壁と真空槽に囲まれた光共振器からの誤差信号をフィードバックすることで、レーザー線幅を 80Hz にまで狭窄化することに成功をした。これは上記した同位体選択的な蒸発冷却を実現する上で、要求仕様を遥かに凌駕する性能である。

3 については、実験結果を出すには至らなかったが、画期的なアイデアを得ることに成功した。現在、世界各国の主要なグループが、2 次元光格子中の個々の原子からの蛍光を観察するための研究を精力的にすすめている。しかし、現時点でこの実験に成功しているのは、Rb と呼ばれるレーザー冷却との相性がよい原子ただ一種である。他の原子種での実験が全く成功していないのは、2 次元系を構築する上で要求される技術が高いこと以外に、2 次元光格子中で、原子のホッピングをおこすことなく、蛍光を長時間発生させることが難しいことによる。我々は、3 次元コンピューターシミュレーションを行うことで、Yb 原子の場合、現在多くの研究者がトライしている方法では、顕微画像を得ることが難しいことをつきとめた。そして、原子を捕捉する光トラップの波長を工夫することにより、わずか 1ms の間に単一の原子から  $10^5$  個もの蛍光光子を安定的に放出させる方法を発見した。最新の EM-CCD カメラは、1ピクセルに 10 光子到達すれば、画像取得が可能とされている。1原子の画像をおよそ10ピクセルで受け、さらに光子の測定効率として 10%程度が見込めることを考慮すると、1 ピクセルあたり  $10^3$  個の光子が取得できる計算となり、高速かつ高 S/N での画像取得が可能である。建物の改修に伴う研究室の引っ越しのため、最終実験は引っ越し後に行うこととなったが、研究室の引っ越し後、我々は即座に光格子中の Yb 原子の蛍光画像をとらえることができると考えている。

4 については、必要な超狭線幅レーザーの開発は終了したが、如何せん、原子ガス顕微鏡の実現に辿り着くことができなかったため、単一サイトアクセスも実現できていない。

### 3. 研究発表等

雑誌論文 計 1 件	(掲載済み一査読有り) 計 1 件 "All-optical transport and compression of ytterbium atoms into the surface of a solid immersion lens", M. Miranda, A. Nakamoto, Y. Okuyama, A. Noguchi, M. Ueda, M. Kozuma, <b>Phys. Rev. A</b> <b>86</b> , 063615 (2012).  (掲載済み一査読無し) 計 0 件  (未掲載) 計 0 件
---------------	---

様式19 別紙1

<p>会議発表</p> <p>計 8 件</p>	<p>専門家向け 計 7 件</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. "One-way quantum computation with ultra-narrow optical transition of 171Yb atoms", Akimasa Nakamoto, Martin Miranda, Yuki Okuyama, Atsushi Noguchi, Masahito Ueda, and Mikio Kozuma, The 23rd International Conference on Atomic Physics (ICAP 2012), (Palaiseau, France; Jul. 23, 2012).</li> <li>2. "Resolution assessment of a fluorescence microscope for observing single ytterbium atoms trapped in two-dimensional optical lattice", Yuki Okuyama, Martin Miranda, Akimasa Nakamoto, Hitomi Ono, Masahito Ueda, and Mikio Kozuma, The 23rd International Conference on Atomic Physics (ICAP 2012), (Palaiseau, France; Jul. 24, 2012).</li> <li>3. "All optical formation of Ytterbium two-dimensional quasi-condensate near surface of solid immersion lens", Martin Miranda, Akimasa Nakamoto, Yuki Okuyama, Atsushi Noguchi, Masahito Ueda, Mikio Kozuma, The 23rd International Conference on Atomic Physics (ICAP 2012), (Palaiseau, France; Jul. 26, 2012).</li> <li>4. "光帰還および注入同期を用いた 399nm 半導体レーザー光源の開発", 細谷俊之, Martin Miranda, 久富隆佑, 中本顕正, 奥山勇貴, 上妻幹旺、日本物理学会第 68 回年次大会、平成 25 年 3 月 27 日、広島大学.</li> <li>5. "中性原子気体のフェルミ縮退に向けた Yb 同位体の協同冷却", 久富隆佑, Miranda Martin, 細谷俊之, 中本顕正, 奥山勇貴, 上妻幹旺, 日本物理学会第 68 回年次大会, 平成 25 年 3 月 27 日, 広島大学.</li> <li>6. "Yb 同位体混合ガスの選択的蒸発冷却に向けた超狭線幅レーザーの開発", 中本顕正, Martin Miranda, 奥山勇貴, 久富隆佑, 細谷俊之, 野口篤史, 上田正仁, 上妻幹旺, 日本物理学会第 68 回年次大会, 平成 25 年 3 月 27 日, 広島大学.</li> <li>7. "全光学的手法を用いた SIL 直下における Yb2 次元量子縮退ガスの生成", Miranda Martin, 中本顕正, 奥山勇貴, 野口篤史, 上田正仁, 上妻幹旺, 日本物理学会第 68 回年次大会、平成 25 年 3 月 27 日、広島大学.</li> </ol> <p>一般向け 計 1 件</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>8. "原子を使ったコンピューター", 上妻幹旺, 高校生・一般向け公開講演会「東工大が誇る若手研究者たち」, 平成 24 年 8 月 23 日, 東京工業大学.</li> </ol>
<p>図 書</p> <p>計 0 件</p>	

様式19 別紙1

産業財産権 出願・取得状 況  計0件	(取得済み) 計0件  (出願中) 計0件
Webページ (URL)	<a href="http://www.phys.titech.ac.jp/laboratory/kozuma.html">http://www.phys.titech.ac.jp/laboratory/kozuma.html</a> <a href="http://www.kozuma.phys.titech.ac.jp/">http://www.kozuma.phys.titech.ac.jp/</a> <a href="http://ultracold.t.u-tokyo.ac.jp/uedaERATO/kozuma/index-j.html">http://ultracold.t.u-tokyo.ac.jp/uedaERATO/kozuma/index-j.html</a>
国民との科 学・技術対話 の実施状況	「原子を使ったコンピューター」 2012年8月23日 東京工業大学大岡山キャンパス(西9号館デジタル多目的ホール) 高校生・一般向け公開講演会 参加者 64名
新聞・一般雑 誌等掲載 計0件	
その他	

4. その他特記事項

研究代表者である上妻幹男が、本年2月に東京工業大学大学院理工学研究科 物性物理学専攻の教授に昇進した。

実施状況報告書(平成24年度) 助成金の執行状況

本様式の内容は一般に公表されます

1. 助成金の受領状況(累計)

(単位:円)

	①交付決定額	②既受領額 (前年度迄の 累計)	③当該年度受 領額	④(=①-②- ③)未受領額	既返還額(前 年度迄の累 計)
直接経費	125,000,000	59,022,000	42,212,000	23,766,000	0
間接経費	37,500,000	17,706,600	12,663,600	7,129,800	0
合計	162,500,000	76,728,600	54,875,600	30,895,800	0

2. 当該年度の収支状況

(単位:円)

	①前年度未執 行額	②当該年度受 領額	③当該年度受 取利息等額 (未収利息を 除く)	④(=①+②+ ③)当該年度 合計収入	⑤当該年度執 行額	⑥(=④-⑤) 当該年度未執 行額	当該年度返還 額
直接経費	1,827,836	42,212,000	6,003	44,045,839	44,045,839	0	0
間接経費	0	12,663,600	0	12,663,600	12,663,600	0	0
合計	1,827,836	54,875,600	6,003	56,709,439	56,709,439	0	0

3. 当該年度の執行額内訳

(単位:円)

	金額	備考
物品費	41,340,969	各種光学素子等
旅費	1,000,990	研究成果発表旅費
謝金・人件費等	1,464,148	リサーチアシスタント費
その他	239,732	実験機器修理、学会参加費等
直接経費計	44,045,839	
間接経費計	12,663,600	
合計	56,709,439	

4. 当該年度の主な購入物品(1品又は1組若しくは1式の価格が50万円以上のもの)

物品名	仕様・型・性能 等	数量	単価 (単位:円)	金額 (単位:円)	納入 年月日	設置研究機関 名
ハンディークーラー	トーマス科学器 械社製	1	789,600	789,600	2012/4/12	東京工業大学
ピコ/フェムト秒 モードロックチタン サファイアレーザー	米国 SpectraPhysics 社製	1	6,615,000	6,615,000	2012/6/26	東京工業大学
アルミ防音ボックス	VICインターナ ショナル社製	1	2,310,000	2,310,000	2012/6/29	東京工業大学
高周波発生装置	サムウェイ社製	1	1,493,100	1,493,100	2012/7/19	東京工業大学
高速・高精度CCD レーザ変位計	キーエンス社製	1	1,206,450	1,206,450	2012/7/25	東京工業大学
デジタルEMCCDカ メラシステム	アンボール・テクノ ロジー社製	1	5,748,750	5,748,750	2012/9/11	東京工業大学
スタンダード位相変 調器	Model 4431-M	1	626,850	626,850	2012/9/27	東京工業大学
磁気光学トラップ用 真空チャンパー	VICインターナ ショナル社製	1	1,785,000	1,785,000	2012/9/28	東京工業大学
レーザーサーボコ ントローラー	D2-125-RC	1	727,650	727,650	2012/10/1	東京工業大学
497nmSHGモ ジュール	NTTエレクトロニ クス社製	1	892,500	892,500	2013/1/24	東京工業大学