

## 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) 実績報告書

本様式の内容は一般に公表されません

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 幹旺

1. 研究実施期間 平成23年2月10日～平成26年3月31日

2. 収支の状況

(単位:円)

	交付決定額	交付を受けた額	利息等収入額	収入額合計	執行額	未執行額	既返還額
直接経費	125,000,000	125,000,000	13,944	125,013,944	125,013,944	0	0
間接経費	37,500,000	37,500,000	0	37,500,000	37,500,000	0	0
合計	162,500,000	162,500,000	13,944	162,513,944	162,513,944	0	0

3. 執行額内訳

(単位:円)

費目	平成22年度	平成23年度	平成24年度	平成25年度	合計
物品費	425,250	54,326,210	41,340,969	23,360,243	119,452,672
旅費	0	573,920	1,000,990	60,000	1,634,910
謝金・人件費等	0	1,046,128	1,464,148	0	2,510,276
その他	0	827,754	239,732	348,600	1,416,086
直接経費計	425,250	56,774,012	44,045,839	23,768,843	125,013,944
間接経費計	127,575	17,579,025	12,663,600	7,129,800	37,500,000
合計	552,825	74,353,037	56,709,439	30,898,643	162,513,944

4. 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
エアベアリングステージ	米国エアロテック社製	1	1,513,487	1,513,487	2012/2/8	東京工業大学
SLM X10468-05	浜松ホトニクス社製	1	1,995,000	1,995,000	2011/12/28	東京工業大学
LM10-t	英国NaNoSight社製	1	4,998,000	4,998,000	2011/11/18	東京工業大学
Verdi-V18-PZT	米国コヒレント社製	1	15,361,500	15,361,500	2011/8/23	東京工業大学
HTK-20-SD	協和機設社製	1	3,675,000	3,675,000	2011/7/19	東京工業大学
純水製造装置	日本ミリポア社製	1	1,467,900	1,467,900	2011/7/15	東京工業大学
光共振器キャビティアセンブリ	米国Advanced Thin Films, Inc.社製	1	2,730,000	2,730,000	2011/4/14	東京工業大学
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

様式20

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	アンドール・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バー	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
ファイバーアンプ (高出力ファイバーアンプリファイヤー)	Azur Light Systems社製 型式:ALS-IR-15P-SF	1	3,137,400	3,137,400	2013/8/27	東京工業大学
光増幅器	Keopsys社製 CYFA-PB-BW2-PM-33-NL1-OM1-B202-FA-C1	1	2,987,250	2,987,250	2014/1/15	東京工業大学
オールメタルゲートバルブ	VAT 48132-CE01	2	603,430	1,206,860	2013/12/13	東京工業大学

5. 研究成果の概要

レーザーで冷却されたYb原子を、光の干渉によって作られた2次元周期ポテンシャル(卵パックのようなもの)にトラップし、原子を量子ビットとして起用することで、大規模な量子計算を行うことを目的として研究を行った。2次元周期ポテンシャル中に冷却された原子をトラップすることが出来ても、各サイトにトラップされた個々の原子を弁別して顕微観察することが出来なくては、上記の量子計算は実行できない。そのため本プロジェクトでは、光学顕微鏡の分解能を向上させる力をもつ固浸レンズの直下にて、100nK程度の温度をもつ原子集団を100nm程度の薄いシート状にし、それらを2次元周期ポテンシャル中にトラップし、個々のサイトを分解して観察する顕微鏡を開発することを目指した。量子ビットのコヒーレンス時間は、迷走磁場によってスピンのフリップすることにより制限される。レーザー冷却が容易なアルカリ原子は、基底状態に電子性のスピンをもち、磁気モーメントが大きい。本研究目的には不向きである。我々は磁気モーメントが電子のその2000分の1しかない核スピンに着目し、基底状態に核スピンのみをもつ特殊な原子種であるYbに対して、上記の顕微鏡を構築することにした。4年間の研究を通し、Yb原子を100nm程度の薄いシート状に加工する技術を開発するとともに、固浸レンズ系を利用することで、2次元周期ポテンシャル中に閉じ込められた個々の原子を、各サイトを分解する形で画像化することに世界で初めて成功した。今後、量子計算、新規材料探索を進める上で、圧倒的な力をもつ装置を開発することが出来たといつてよい。

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) 研究成果報告書

本様式の内容は一般に公表されます
------------------

研究課題名 (下段英語表記)	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
	Implementation of a large-scale quantum computer with an optical lattice system controlled by a spatial phase modulator
研究機関・部局・職名 (下段英語表記)	東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
	Tokyo Institute of Technology, Graduate School of Science and Engineering, Professor
氏名 (下段英語表記)	上妻 幹旺
	Mikio Kozuma

### 研究成果の概要

(和文): 光学顕微鏡の分解能をその屈折率分だけ増大させる固浸レンズとガラスセルとを一体化させ、 $10^{-11}$ Torr の超高真空を作り出す技術を開発した。この超高真空中において、イッテルビウム(Yb)のボース凝縮体を、固浸レンズの直下  $1.8\mu\text{m}$  の場所にて圧縮し、120nm 程度の薄いシート状にすることに成功した(2次元量子縮退ガス)。圧縮に使用した光を折り返すことで、2次元光格子を形成し、トラップされた原子に共鳴光を照射し、原子からの蛍光をEM-CCDカメラで撮像することで、各サイトを分解して個々の原子を観測することに世界で初めて成功した。我々が開発した系は、今後、量子計算、物性研究、さらには新規材料探索を行う上で、究極の舞台となるであろう。

(英文): A novel type of glass cell with a solid immersion lens which increases the numerical aperture of an optical microscope system was developed and ultra-high vacuum ( $10^{-11}$ Torr) was achieved with this glass cell. Ultra-cold Yb atoms were loaded into a single layer of a standing wave near the surface of the solid immersion lens. Bose condensate of Yb atoms was created in the first layer of the standing wave and compressed into a thin layer of 120nm, positioned  $1.8\mu\text{m}$  below the surface of the lens. 2 dimensional optical lattice potential was superposed to the thin atomic cloud and an individual atom in each site was clearly visualized by detecting fluorescence

lights with an EM-CCD camera. The system developed here can be a powerful tool to perform complicated tasks of quantum information processing and also investigate the condensed matter physics.

1. 執行金額 162,513,944 円  
 (うち、直接経費 125,013,944 円、 間接経費 37,500,000 円)

2. 研究実施期間 平成 23 年 2 月 10 日～平成 26 年 3 月 31 日

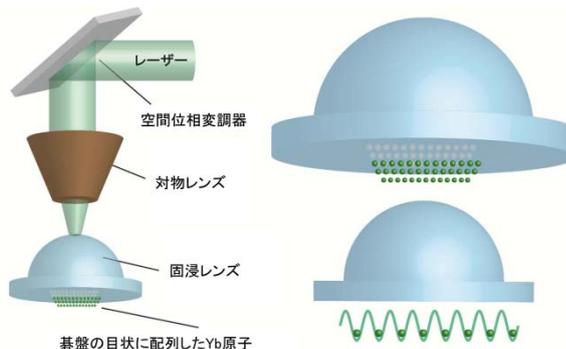
3. 研究目的

古典計算機では手が届かない領域の計算を、短時間で完遂する力をもつのが量子計算機である。計算能力の質的変化が魅力となり、これまで理論及び実験研究が精力的になされてきた。この 10 年の間に、量子計算を行う候補として、光子、原子、分子、イオン、超伝導素子、量子ドット、など多くのものが現れたが、実験は難を極め、ごく少数の量子ビット間における演算を実現するにとどまっている。しかし冷静に状況を観察してみると、多くの系で地道な基礎研究がなされた結果、どの系が演算回数を飛躍的に伸ばすことができるか、またどの計算方法が現実的であるか、などがかなり明確になってきた。さらに量子エレクトロニクス技術の目覚ましい進展に後押しされ、大規模量子計算が実現できる可能性が今まさに萌芽しているといえる。

本研究は、光学顕微鏡の分解能をその屈折率分だけ増大させる力をもつ固浸レンズの表面から約  $1\mu\text{m}$  離れた平面内に、光ポテンシャルを駆使して、中性イッテルビウム (Yb) 原子集団を基盤の目状に配置し、個々の原子を量子ビットとして起用することで、大規模な量子計算を実現することを目指す。これまでも中性原子を用いた量子計算に関する実験研究がなされてきたが、その多くが基底状態に電子性のスピンを有するアルカリ原子を利用していた。電子性スピンはボーア磁子程度の磁気モーメントを有するため、迷走磁場の影響でスピンの回転が速く、長時間にわたってスピン情報を保持することができないという欠点をもつ。これに対して Yb 原子は、基底状態が  $^1S_0$ 、すなわち電子性スピンのキャンセルしており、核スピンしか顕わにならない。核スピンの対応する磁気モーメントの大きさは核磁子程度、つまりボーア磁子の 2000 分の 1 であるため、スピン情報を長時間にわたって保持することが可能となるのである。

4. 研究計画・方法

右図のように、非共鳴のレーザー光を空間位相変調器におし、対物レンズで結像することで、2 次元光トラップを構成し、Yb 原子集団を基盤の目状に捕獲する。最初はボソンである  $^{174}\text{Yb}$  を用いてボース凝縮体を 2 次元周期ポテンシ



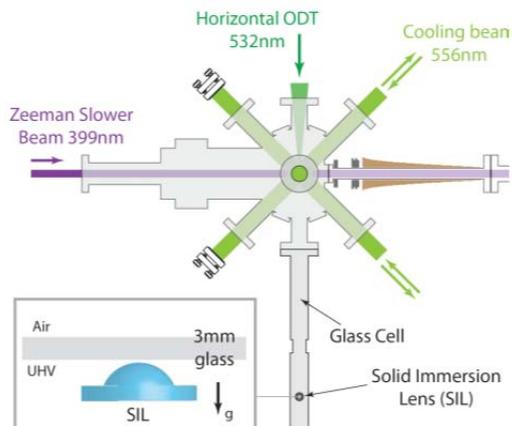
ヤルに捕獲する実験を行い、後には $^{171}\text{Yb}$ を用いてフェルミ縮退した原子集団を捕獲する実験に移行する。量子計算を行うためには核スピンの必要だが、 $^{171}\text{Yb}$ の核スピンは $I=1/2$ であるため、もともと適切な同位体といえる。しかしフェルミ縮退をおこすためには $^{174}\text{Yb}$ と $^{171}\text{Yb}$ とをレーザーによって同時に冷却し、光トラップ中で協同冷却する必要があるため、まずは単体でボース凝縮を起こすことの出来る $^{174}\text{Yb}$ を用いた実験からはじめる。量子計算を行うためには、光トラップの各サイトに1個ずつ原子を配置する必要があるが、その状況を確認するためには、原子からの蛍光を結像することで、各サイトを分解して観測できる光格子原子顕微鏡を開発する必要がある。 $^{174}\text{Yb}$ 原子を使ってこの光格子原子顕微鏡を開発した後、 $^{171}\text{Yb}$ を使った実験に移行する。 $^{171}\text{Yb}$ をフェルミ縮退させ、光格子中でバンド絶縁状態を形成すれば、各サイトに原子を1個ずつ配置することが可能となる。

光格子中の各原子を用いて量子計算を行う具体的な方法として、クラスター計算と呼ばれる手法をとることとする。ユニタリーなゲートを組み合わせる通常の量子計算とは異なり、複数の量子ビット間にクラスター状態を形成した後、個々の量子ビットを射影測定することで計算を進めていくのがこの手法の特徴である。中性原子気体のように、 $10^6$ 個といった巨大な数の量子ビットを比較的容易に準備し、かつ光格子によってそれらを規則正しく配置できる系の場合、クラスター計算は特に有効な手法となりうる。実際2003年にI. Blochらは、Rbボース凝縮体に対してMott転移をおこし、原子を光格子のサイト内に1個ずつトラップした後、電子スピンの依存したポテンシャル制御を施し、Ising型の相互作用を誘起することで、クラスター状態を生成することに成功している。この実験により、大規模な量子計算を実現できる可能性が高まったが、電子スピンを利用しているため、系のコヒーレンス時間が1msにとどまったこと、さらにスピンを1個ずつ射影測定することが出来なかったことが大きな壁となった。

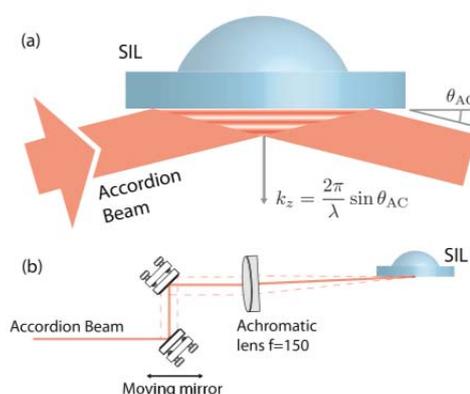
コヒーレンス時間の問題については、電子スピンを核スピンの交換に換えれば、確実に3桁以上の向上がみこめる。先述したように、我々はRbなどのアルカリ原子ではなく、2電子系のYbを用いることでこの問題を回避する。一方、詳細は割愛するが、I. Blochらが起用したクラスター状態の生成方法は、電子スピンに対しては有効だが、核スピンに対しては適用できないという問題がある。我々はYbがもつ超狭線幅光学遷移を利用してトラップをすることで、核スピンに依存したIsing型相互作用を誘起できることに気が付いた。本プロジェクトではこの方法にのっとりクラスター状態の生成を目指す。量子計算を遂行するためには、光格子中の個々の原子の核スピンを射影測定する必要がある。先に述べた光格子原子顕微鏡は、原子からの蛍光を集めることで、2次元光格子中の原子画像を直接取得することができるが、個々の原子を順番に射影測定することはできない。我々は、位相空間変調器を使って、特定のサイトの光ポテンシャルのみ、その深さを変化させ、超狭線幅光学遷移を使ってその特定のサイトにトラップされた原子を準安定状態に励起するという手法をとる。準安定状態への励起は核スピンに依存した形で行うことができるので、そこからさらに上準位への双極子遷移をたたき、原子からの蛍光をモニターすれば、必要な射影測定を実現することができる。かくして、大規模なクラスター計算を遂行することが可能となる。

5. 研究成果・波及効果

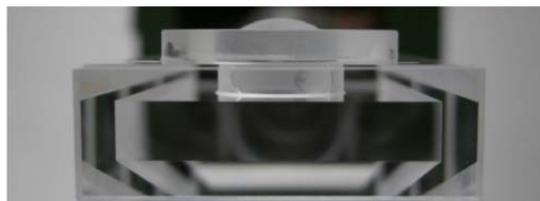
最初の研究成果として、右図のように、超高真空チャンバー内で  $^{174}\text{Yb}$  原子集団を光トラップし、空気ベアリング型ステージを使って、光トラップ (Horizontal ODT:532nm) の絞り位置を移動させることで、原子を真空チャンバーよりガラスセルへと400mm 移動させることに成功した。400mm もの長距離にわたって、温度を上昇させることなく極低温原子を輸送する技術がプロジェクトの初期の段階で確立したことで、その後の研究が加速することとなった。



原子を移動後、ガラスセル部において縦方向からもトラップ光を導入し、十字型のトラップを構成することで原子集団の閉じ込めを強化し、蒸発冷却を施すことでボース凝縮を生成した。右図のように固浸レンズへの入射角度を自在に変化できる(つまり、発生する定在波の周期を変えられる)光アコーディオン技術を開発し、固浸レンズの直下  $1.8\mu\text{m}$  の場所で、Yb 原子集団を  $120\text{nm}$  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した。

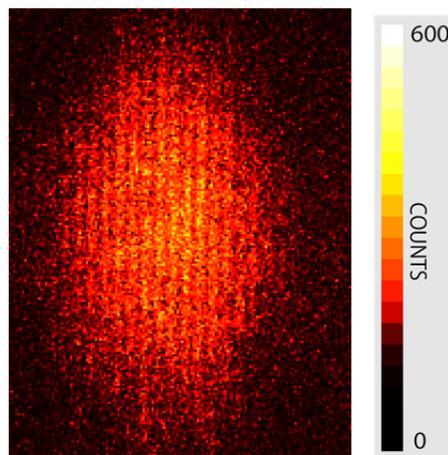


薄いシート状になった原子集団に対し、まず1次元光格子を刻み、トラップされた原子の蛍光画像を取得する実験を行った。これまでは、固浸レンズ内部の乱反射光が、干渉によって表面近傍に形成した光ポテンシャルを乱すことを恐れ、コヒーレンス長が短い  $\text{Ti}::\text{S}$  パルスレーザーを利用してアコーディオン光を作成していた。光格子原子顕微鏡を実現するためには、光格子の各サイトに原子をトラップしたまま蛍光を放出させる必要がある。画像化に足る蛍光光子を得る前に原子がサイトから逸脱しないようにするためには、 $100\text{mK}$  程度のポテンシャルが必要となるが、非共鳴のパルスレーザーでこのような深いポテンシャルを形成することは難しい。そこで我々は、原子の励起状態からさらに上の状態への光学遷移に対して近共鳴となる光を照射し、蛍光顕微鏡を動作させる際、原子を励起状態にたたき続けることで、必要なポテンシャルを取得するという新しい光ポテンシャル形成方法を考えた。この目的を達成するためには、当然 CW レーザーを用いて光ポテンシャルを形成する必要があるが、そうすると、固浸レンズからの乱反射が問題となってくる。この問題を解決するため、「固浸レンズ一体型超高真空ガラスセル」を構築することにした(右図)。作成されたセルを使って  $10^{-11}\text{Torr}$  の超高真空を達成することができ、その後の実験は全てこのセルを使って進めることとなった。固浸レンズ一体型セル

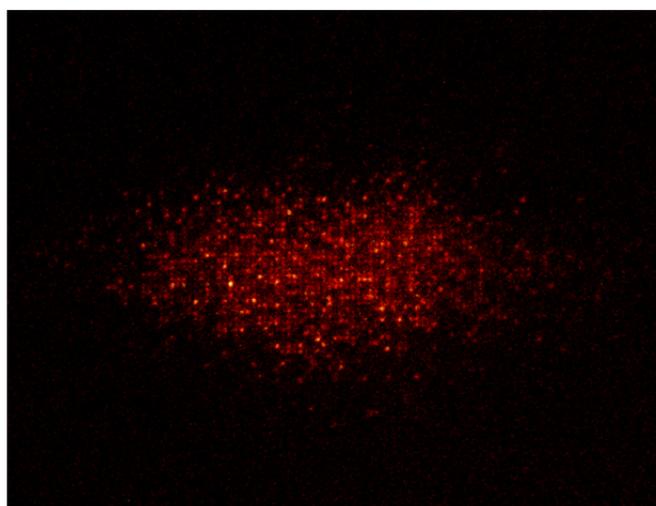


を作成する技術をもったグループは、世界でも我々の研究室のみである。

新しく開発したセルに設置された固浸レンズの下方から、1080nm のレーザーを照射、表面で反射させ、その光を折り返すことで、原子を 100nm 程度の薄いシート状に圧縮するだけでなく、そこに 540nm 周期の1次元ポテンシャルを刻むことに成功した。トラップされた原子の分布を画像化した結果が右図である。同様の系を、X、Y 2 方向か作ること、2 次元周期ポテンシャル中に原子をトラップすることにも成功し、さらに各サイトを分解して原子を画像化することにも成功した(右下図)。かくして、「世界初の Yb 原子顕微鏡の実現」という金字塔を打ち立てることに成功した。



光格子原子顕微鏡の開発以外にも、いくつかの研究上の進展があった。上記の実験に用いたのは  $^{174}\text{Yb}$  原子(ボソン)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(フェルミオン)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。そこで、 $^{171}\text{Yb}$ 、 $^{174}\text{Yb}$  の同時磁気光学トラップを構築し、 $^{174}\text{Yb}$  を  $7 \times 10^7$  個、 $^{171}\text{Yb}$  を  $3 \times 10^6$  個トラップすることに成功した。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。



また光格子中の個々の原子のスピンを射影測定するためには、超狭線幅光学遷移(507nm)を励起するレーザーが必要となる。我々は 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、レーザー線幅をサブ kHz に狭窄化することに成功をした。またこのレーザーを用いて、実際に  $^{174}\text{Yb}$  原子の超狭線幅光学遷移を観測することに成功した。

最終目的とするところの大規模量子計算の実現にまでは至らなかったが、Yb 原子に対して、光格子原子顕微鏡を実現した意義は大きいといえる。S/N 向上などの地道な努力が今後も要求されるのは勿論であるが、光格子中の核スピンをベースとした量子情報処理研究の道が見ついたといつて過言ではないだろう。ところで我々は、Yb 原子顕微鏡の実現を契機に、これまで誰もレーザー冷却を行ったことのない原子種であるユウロピウム(Eu)のレーザー冷却研究を始めることとした。Eu は基底状態に  $7\mu_B$  もの磁気モーメントを有しており、核スピンのみしか有しない Yb とは異なり、長距離・異方的相互作用を発現する。量子情報処理という観点では圧倒的に不利な原子種であ

## 様式21

るが、物性研究、材料探索という観点では極めて興味深い原子種といえる。特に基底状態に超微細構造があるため、磁場ではなく RF(ラジオ波)を照射することで、ゼロ磁場下におけるフェッシュバッハ共鳴(RF フェッシュバッハ)が誘起出来る可能性があり、スピンと軌道角運動量とが絡んだ新たな物性現象が発現する可能性が高いといえる。将来的には光格子 Eu 原子顕微鏡を構築することを計画しており、これにより量子ホール系、超固体、さらには準結晶の物理など、様々な新奇物性研究を展開し、新規材料探索の道をひらけるものと信じる。

6. 研究発表等

<p>雑誌論文 計 3 件</p>	<p>(掲載済み—査読有り) 計 3 件</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. “Projective measurement of a single nuclear spin qubit by using two-mode cavity QED”, Y. Eto, A. Noguchi, P. Zhang, M. Ueda, M. Kozuma, <b>Phys. Rev. Lett.</b> <b>106</b>,160501 (2011).</li> <li>2. “Quantum-state tomography of a single nuclear spin qubit of an optically manipulated ytterbium atom”, A. Noguchi, Y. Eto, M. Ueda, M. Kozuma, <b>Phys. Rev. A</b> <b>84</b>, 030301(R) (2011).</li> <li>3. “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).</li> </ol> <p>(掲載済み—査読無し) 計 0 件</p> <p>(未掲載) 計 0 件</p>
<p>会議発表 計 24 件</p>	<p>専門家向け 計 21 件</p> <p>1～3 は、東日本大震災のため、学会が開催されず概要集提出のみとなった。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. “BiBO 結晶を用いた Yb ゼーマンスローワー用高出力 399nm 光源の開発”, 中本顕正, 野口篤史, Miranda Martin, 衛藤雄二郎, 上田正仁, 上妻幹旺, 日本物理学会第 66 回年次大会, 平成 23 年 3 月 27 日, 新潟大学.</li> <li>2. “超狭線幅レーザーを用いた光トラップ中での蒸発冷却の実現”, Miranda Martin, 野口篤史, 中本顕正, 衛藤雄二郎, 上田正仁, 上妻幹旺, 日本物理学会第 66 回年次大会, 平成 23 年 3 月 27 日, 新潟大学.</li> <li>3. “表面 2 次元光格子中 Yb 原子集団の生成と観察”, 野口篤史, 中本顕正, Miranda Martin, 衛藤雄二郎, 上田正仁, 上妻幹旺, 日本物理学会第 66 回年次大会, 平成 23 年 3 月 27 日, 新潟大学.</li> <li>4. “Yb 原子を用いた量子計算機の実現にむけて”, 上妻幹旺, 分子化学研究所 光子科学フォーラム, 平成 23 年 11 月 16 日, 豊橋.</li> <li>5. “2次元光格子の実験”, 上妻幹旺, 日本物理学会秋季大会シンポジウム, 平成 23 年 9 月 26 日, 富山大学.</li> <li>6. “2次元光格子に向けた Ytterbium 原子の BEC の生成”, Miranda Martin, 中本顕正, 野口篤史, 上田正仁, 上妻幹旺, 日本物理学会秋季大会, 平成 23 年 9 月 24 日, 富山大学.</li> <li>7. “表面 2 次元 Yb 原子気体顕微鏡の構築”, 中本顕正, 野口篤史, Miranda Martin, 衛藤雄二郎, 上田正仁, 上妻幹旺, 日本物理学会秋季大会, 平成 23 年 9 月 24 日, 富山大学.</li> <li>8. “光アコーディオンを用いた冷却 Yb 原子集団の空間圧縮”, Miranda Martin, 中本顕正, 奥山勇貴, 尾野仁深, 野口篤史, 上田正仁, 上妻幹旺, 日本物理学会第 67 回年次大会, 平成 24 年 3 月 26 日, 関西学院大学.</li> </ol>

	<p>9. “半球レンズを用いた蛍光顕微鏡の分解能評価”, 奥山勇貴, Miranda Martin, 中本顕正, 尾野仁深, 上田正仁, 上妻幹旺、日本物理学会第 67 回年次大会、平成 24 年 3 月 26 日、関西学院大学.</p> <p>10. “量子原子気体顕微鏡のための空間位相変調器を用いた光ポテンシャル生成”, 尾野仁深, 中本顕正, Miranda Martin, 奥山勇貴, 上田正仁, 上妻幹旺, 日本物理学会第 67 回年次大会, 平成 24 年 3 月 26 日, 関西学院大学.</p> <p>11. “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).</p> <p>12. “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).</p> <p>13. “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).</p> <p>14. “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.</p> <p>15. “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.</p> <p>16. “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.</p> <p>17. “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.</p> <p>18. “Quantum microscope with Ytterbium atoms”, Martin Miranda and Mikio Kozuma, Quantum Science Symposium Asia-2013 (Tokyo; Nov. 26, 2013).</p> <p>19. “注入同期を用いた 270mW 出力半導体レーザー光源の開発”, 細谷俊之, Miranda Marutin, 井上遼太郎, 上妻幹旺, 日本物理学会第 69 回年次大会 2014 年 3 月 27 日, 東海大学.</p> <p>20. “Yb 量子原子気体顕微鏡の実現に向けた二次元光格子形成のための光源開発”, 奥山勇貴, Miranda Martin, 井上遼太郎, 上妻幹旺, 日本物理学会第 69 回年次大会 2014 年 3 月 27 日, 東海大学.</p>
--	---

	<p>21. “2次元光格子 Yb 原子顕微鏡の開発”, Miranda Martin, 奥山勇貴, 細谷俊之, 井上遼太郎, 上妻幹旺, 日本物理学会第 69 回年次大会 2014 年 3 月 27 日, 東海大学.</p> <p>一般向け 計 3 件</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 高校生・一般向け公開講演会 「原子を使ったコンピューター」、上妻 幹旺、2011 年 11 月 26 日、東京工業大学大岡山キャンパス・西 2 号館 4 階 1 号室 (55 名参加)</li> <li>2. 高校生・一般向け公開講演会 「原子を使ったコンピューター」、上妻 幹旺、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(64 名参加)</li> <li>3. 一般向け公開講演会 「原子を使ったコンピューター」、上妻 幹旺、2013 年 9 月 18 日、 東京工業大学 田町キャンパスイノベーションセンター(57 名).</li> </ol>
<p>図 書</p> <p>計 0 件</p>	
<p>産 業 財 産 権</p> <p>出 願 ・ 取 得 状 況</p> <p>計 0 件</p>	<p>(取得済み) 計 0 件</p> <p>(出願中) 計 0 件</p>
<p>Web ページ (URL)</p>	<p><a href="http://www.phys.titech.ac.jp/laboratory/kozuma.html">http://www.phys.titech.ac.jp/laboratory/kozuma.html</a></p> <p><a href="http://www.kozuma.phys.titech.ac.jp/">http://www.kozuma.phys.titech.ac.jp/</a></p> <p><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></p>
<p>国民との科学・技術対話の実施状況</p>	<p>高校生・一般向け公開講演会 「原子を使ったコンピューター」、上妻 幹旺、2011 年 11 月 26 日、東京工業大学大岡山キャンパス・西 2 号館 4 階 1 号室 (55 名参加)</p> <p>高校生・一般向け公開講演会 「原子を使ったコンピューター」、上妻 幹旺、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(64 名参加)</p> <p>一般向け公開講演会 「原子を使ったコンピューター」、上妻 幹旺、2013 年 9 月 18 日、 東京工業大学 田町キャンパスイノベーションセンター(57 名)</p>
<p>新聞・一般雑誌等掲載</p> <p>計 0 件</p>	

その他	
-----	--

7. その他特記事項

本プロジェクト中に、研究室のメンバーが以下の賞を受賞した。

助教である井上遼太郎氏が第8回日本物理学会若手奨励賞を受賞。

博士課程であるミランダ・マルティン君が手島精一記念研究賞、ならびに優秀修士論文賞を受賞。

修士課程の野口篤史君が同じく優秀修士論文賞を受賞。

また研究代表者の上妻幹旺が、プロジェクト中に教授に昇格した。