

平成30年 6月13日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05234

研究課題名(和文) 光近接場における局在光 冷却原子間の高次相互作用の観測およびメカニズムの解明

研究課題名(英文) Experimental research on higher-order interaction between cold atoms and localized light by optical near-field

研究代表者

東條 賢 (Tojo, Satoshi)

中央大学・理工学部・准教授

研究者番号：30433709

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：制御性の高いレーザー冷却原子を用いて、誘電体であるガラス表面近傍へ原子をし、原子の高次相互作用である光学禁制遷移の観測を実現するためには光のみを用いた制御技術が必要だった。本研究では、あまり行われていなかった光トラップへの直接移行技術を確立し、微弱信号の観測に適している発光観測の確立に成功した。ナノ空間における多重極子遷移については理論的な示唆も不完全だったが、微小空間における光と原子の相互作用について数値計算を遂行し、信号が数桁増幅する結果を示した。ナノ構造体近傍の酸素分子の禁制遷移観測実験を行い、発光増幅を示唆する結果を得ている。これらの成果について2件の査読付き論文により発表した。

研究成果の概要(英文)：We research on higher order interaction between ultracold rubidium atoms and localized light by optical near-field. It is necessary to establish the observation system of higher-order interaction, namely optical forbidden transitions, of cold atoms near the dielectric surface. We succeed the observation of emission from trapped cold atoms via optical forbidden and optical-optical double resonant transitions. Due to change different wavelength of emission from excitations, the observed emission indicate to be improved signal-to-noise ratio in spite of weaker transition in several orders of magnitude in comparison with allowed ones. In view of theoretical research, we calculate transition probabilities of optical forbidden transitions near a nanoedge, and the results show highly enhancement of transitions in several orders of magnitude due to high-order interactions. In our experiment, we confirm several factor magnification of forbidden transitions of oxygen molecules near nano-edges.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：多重極子遷移増幅 光近接場 レーザー冷却原子

## 1. 研究開始当初の背景

光は原子との相互作用に関して、高い反応性をしめす。光学では、通常では自由空間中の等方的な領域の取り扱いが前提であり、局在領域で生成する近接場については取り扱いが異なる。局所性の代表例である光近接場については、光については球面波を多重極子モードについて展開することで表されている一方で、原子については平面波の延長上としての扱いに留まっている。つまり、原子および物質では平面波で支配的となる電気双極子モーメントに起因する効果を主として取り扱う場合が多かった。近年、多重極子モーメントによる効果に目を向けられ始めているが、実験による評価の困難さから電気双極子近似を用いた現象論的な議論に留めざるを得なかった。

代表者はこれまで室温原子気体を用いた近接場の高次効果について、他に先駆けて実験的および理論的研究を行い、多重極子の遷移効率が波数依存することを実証してきた。またレーザー冷却原子やボースアインシュタイン凝縮体を用いた高感度高空間分解測定による相互作用の研究を行い、これらの技術および研究手法を光近接場研究へ応用する下地を培ってきた。近年、光近接場に特化したレーザー冷却装置を整備し、同時に近接場-原子間の高次効果の数値シミュレーションを進めてきた。表面近傍の複雑な局在現象の理解には、高次効果の観測および相互作用メカニズム解明が必要不可欠とわかり本研究の必要性が高まっていた。

## 2. 研究の目的

制御性の高いレーザー冷却原子を用いて、誘電体表面近傍に誘起される光近接場における局在的な光-冷却原子間の高次相互作用の観測技術の確立とそのメカニズムの解明を目的とした。

## 3. 研究の方法

制御性の高いレーザー冷却原子を用いて、誘電体であるガラス表面近傍への原子の導入、原子の多重極子遷移の観測を実現し、ガラス近傍に誘起する光近接場と原子の相互作用を観測する。真空槽内で操作性の高いレーザー冷却ルビジウム (Rb) 原子に対し光双極子カトラップ (光トラップ) による空間操作を行い、冷却原子を表面近傍領域へ導入する。双極子モーメントと異なり電場勾配や磁場に依存する多重極子モーメントによって、多重極子の電磁場分布測定の観測を行う。光電場勾配を用いた全く新しい分光測定法を確立し、局在近接場光-原子間結合の高次効果の観測と解明を目指す。

## 4. 研究成果

冷却原子の輸送は、安定的に超低温原子を用意するための要素技術確立が必要である。レーザー冷却原子集団の原子数安定化およ

び低温化を実現し、光トラップによる原子集団の捕獲と輸送制御に成功した。ガラス表面の近接場領域への輸送も確認し、近接場光学実験の基礎実験に着手した。冷却 Rb 原子数および温度を安定化させるために、これまで使用していたレーザー光源の安定化と、3軸打ち返し冷却磁気光学トラップ装置 (MOT) の改良を行った。簡易型の3軸打ち返し MOT では原子数  $10^7$  個および  $100 \mu\text{K}$  の原子を得ていたが、光トラップへの輸送効率が悪く原子数  $10^5$  個および  $20 \mu\text{K}$  の原子集団を得る程度だった。光学禁制遷移である多重極子遷移を安定的に得るためには高密度および低温の原子集団が必要であることが新たにわかった (目標見積値は  $10^6$  個および  $5 \mu\text{K}$  以下)。初年度では、安定的 MOT 実現のために打ち返しが型でなく独立した6軸による MOT の実現を行った。これにより光の輻射圧の制御性が格段に改善され、原子数  $10^7$  個かつ  $10 \mu\text{K}$  以下の超低温冷却原子を得た。輸送後の原子数  $10^6$  程度かつ  $10 \mu\text{K}$  程度の原子を得ることができ、光近接場実験への基礎実験は実現した。しかし超低温集団への実現には初期の光トラップ移行効率を上げる必要があるが、通常用いられる磁気トラップの研究が多い一方で、光トラップへの直接移送はあまり研究がされておらず、MOT-光トラップ移行の技術確立が必須であることがわかった。

冷却原子の輸送には MOT から光トラップへの安定的かつ低温の原子集団輸送技術では、予備冷却による  $5 \mu\text{K}$  以下の実現と高効率輸送技術が必要である。用いる偏光勾配冷却では共鳴からの離調が最終温度を決めるため、レーザー装置の改良により離調を通常 ( $40 \text{ MHz}$  程度) より大きい離調 ( $200 \text{ MHz}$ ) を実現して  $2 \mu\text{K}$  の集団を用意し、通常効率である  $10\%$  程度の移送効率を  $30\%$  程度まで改良し、 $3 \times 10^6$  個および  $2 \mu\text{K}$  の光トラップを実現した。この技術によりガラス表面に保持する原子数を1桁増大し相互作用観測のための要素技術として確立できた [学会発表①③⑧⑩⑫⑬]。結果をまとめ査読付き投稿論文にて発表した [雑誌論文①、図1]。

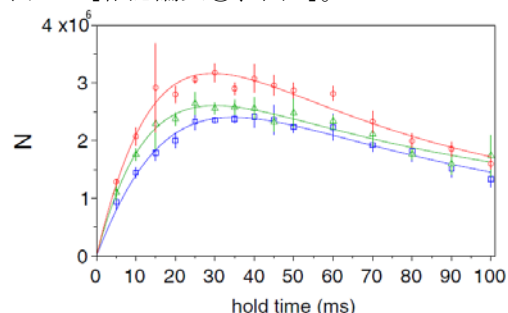


図1、光トラップへの移行原子数

特殊なナノ構造を有する表面近傍の光近接場分布の見積りに関しては、平面波の展開では限界がある。これは平面波を適用した際に求められる、原子の多重極子遷移レートが光の波数の次数に比例することに限界があることを意味し、平面波における多重極子遷

移の遷移レートはせいぜい数倍から 10 倍程度にしかならなかったが、これを超越する可能性を示唆していた。

遠方場であるマクロからの類推は非常に困難であり、ナノ空間を丁寧にモデル化した数値計算を行う必要がある。本研究では、MIT グループの公開電磁場計算コードを用いて、ナノ構造を有する物質への光散乱を基に、近接場における光電場および磁場強度分布を計算した。光学禁制遷移である電気多重極子遷移の励起効率は、光電場振幅ではなく光電場勾配が支配的であり、またその光電場勾配の次数が原子内部遷移の多重極子の次数に関係があることがわかった。これは通常用いる平面電磁場を用いた遠方場近似では不十分であり、光電場の球面調和関数展開と原子の球面調和関数が大きな結合をする可能性を示している。原子の内部電子状態は球面調和関数で表すが、これが光電磁場へ適用して光電場の球面調和関数展開へ繋がった。原子の状態遷移は波動関数と演算子の結合の度合いに大きく依存することに注目すると、本研究で新たに導入した光の球面波展開こそが原子の多重極子遷移レートと大きく結びつくことになる。その結果、多重極子遷移が数桁以上の増強効果を得ることを得て、今後のナノ構造体の設計方針を固めることができた。数桁の増強効果については学術論文誌にて発表を行った [雑誌論文②、図 2]。我々の確立した高空間分解能を有する実験技術により測定可能であることが示唆されている。

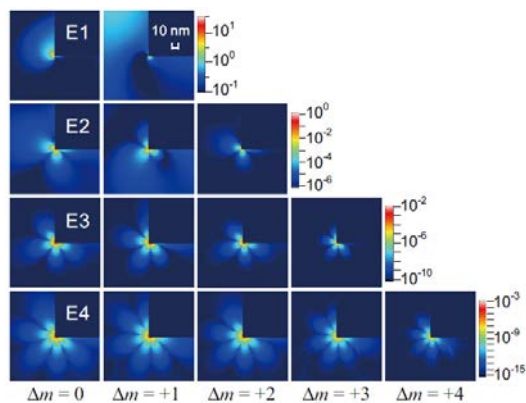


図 2、多重極子遷移の増強の空間分布。電気双極子遷移(E1)、四重極子遷移(E2)、八重極子遷移(E3)、十六重極子遷移(E4)の遷移レートの増強効果。

冷却原子の輸送では、前述したように安定的に超低温原子を用意するための要素技術確立が必要だった。我々は、微小信号の観測に優れる原子発光に注目し、高次相互作用観測のための発光観測系を立ち上げ、共鳴光である 780 nm への発光観測に成功した。しかし冷却光でもある 780 nm 光では散乱光や迷光の影響を排除できない。さらに 5S-5P (780 nm) に対し 5P-5D (776 nm) による 2 段階励起過程を用いて、緩和過程の 1 つである 420

nm 光の発光観測を狙い、二重共鳴による冷却原子発光に初めて成功した [学会発表⑥]。

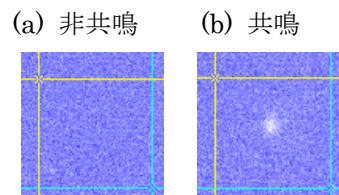


図 3、二重共鳴発光の観測 (420 nm 観測)。(a) 776 nm 非共鳴 (離調 4 MHz)、(b) 776 nm 共鳴。

同時に、5S-5D 励起については電気四重極子遷移 (389 nm) に相当し、778 nm による非共鳴 2 光子励起も可能である。高次相互作用観測のために 2 光子励起過程の光強度および磁場依存性について定量的評価を行い、磁場との非線形相互作用いわゆるパッシェンバック効果の観測に成功した。結果については現在まとめて論文作成中である

[学会発表②⑤⑩⑬]。このスペクトルを利用してレーザー光周波数の安定化を実現し、多重極子遷移スペクトル観測に成功した [学会発表⑦⑫]。また、表面ナノ構造体を有した誘電体サンプルへの多重極子遷移実験を行っている。酸素分子の磁気双極子遷移 (762 nm 帯) を用いてナノ構造近傍の発光スペクトル変化を確認し、ナノ構造近傍の多重極子遷移の観測に初めて成功した [学会発表⑦]。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

① 柴田 康介, 米川 翔太, 東條 賢, Loading of atoms into an optical trap with high initial phase-space density, *Physical Review A* **96**, 013402 (2017) (査読有)

② 柴田 康介, 東條 賢, Daniel Bloch, Excitation enhancement in electric multipole transitions near a nanoedge, *Optics Express* **25**, 9476 - 9489 (2017) (査読有)

[学会発表] (計 16 件)

① 真下 太郎, 阿部 真志, 東條 賢, 近共鳴光トラップを用いた高密度冷却ルビジウム原子集団の生成, 第 73 回日本物理学会年次大会 (2018 年 3 月 22-25 日, 大阪大学豊中キャンパス)

② 阿部真志, 糸山亮平, 真下太郎, 東條 賢,  $^{87}\text{Rb}$  原子の 2 光子分光による  $5^2\text{S}_{1/2} - 5^2\text{D}_{5/2}$  遷移の磁場依存性の観測, 第 73 回日本物理学会年次大会, 大阪大学豊中キャンパス, 大阪, 2018 年 3 月 22-25 日

③ 真下 太郎, 阿部 真志, 東條 賢, Effective loading of cold rubidium atoms into an

optical trap using variable focus lens、International OSA Network of Students Okinawa 2017 (IONS Okinawa 2017)、沖縄、沖縄科学技術大学院大学、2017年10月25-27日

④ 真下 太郎、柴田 康介、阿部 真志、東條 賢、焦点可変レンズを用いた高密度冷却ルビジウム原子集団の生成、日本物理学会 2017年秋季大会 (2017年9月21-24日、岩手大学、岩手)

⑤ 糸山 亮平、小見山 裕太、真下 太郎、阿部 真志、東條 賢、Zeeman and Paschen-Back resolved spectra of rubidium 5S-5D two-photon excitation、The 30th International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC XXX)、ケアンズ (オーストラリア)、2017年7月26日-8月1日

⑥ 田中 豪、小林 豊、柴田 康介、阿部 真志、東條 賢、Observation of atom-surface interaction near dielectric surface using ultracold rubidium atoms、The 30th International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC XXX)、ケアンズ (オーストラリア)、2017年7月26日-8月1日

⑦ 東條 賢ほか9名、Spectroscopic study on optically controlled magnetic-field etching on the nano-scale、International Conference on Laser Spectroscopy (ICOLS 2017)、アルカション (フランス)、2017年7月2-8日

⑧ 柴田 康介、米川 翔太、東條 賢、Rb 原子の光モラセスから光トラップへの高効率ローディング、第72回日本物理学会年次大会、大阪大学豊中キャンパス、2017年3月17-20日

⑨ 小林 豊、旭 智志、田中 豪、柴田 康介、東條 賢、Observation of Atom-Surface Interaction in Evanescent Field Using Ultracold Atoms、12th European Conference on Atoms Molecules and Photons (ECAMP12)、フランクフルト (ドイツ)、2016年9月5-9日

⑩ 小見山 裕太、伊藤 拓馬、真下 太郎、柴田 康介、東條 賢、Zeeman resolved spectra of rubidium 5S-5D two-photon excitation、12th European Conference on Atoms Molecules and Photons (ECAMP12)、フランクフルト (ドイツ)、2016年9月5-9日

⑪ 米川 翔太、日比野 達彦、田中 豪、柴田 康介、東條 賢、Radiative Force to

Laser-Cooled Atoms by Near Optical Resonant Trap、12th European Conference on Atoms Molecules and Photons (ECAMP12)、フランクフルト (ドイツ)、2016年9月5-9日

⑫ 東條 賢、Laser spectroscopy of gaseous atoms in local field using optical forbidden transitions、23rd International Conference on Spectral Line Shapes (ICSL23)、トラン (ポーランド)、2016年6月19-24日

⑬ 伊藤 拓馬、小見山 裕太、真下 太郎、柴田 康介、東條 賢、Laser Power Dependence of Two-Photon Excitation Spectra in Rubidium 5S-5D Transition、24th Annual International Laser Physics Workshop (LPHYS'15)、上海 (中国)、2015年8月21-25日

⑭ 旭 智志、小林 豊、一ノ関 夏生、柴田 康介、東條 賢、Observation of Atom-Surface Interaction Using Precise Controlled Optical Traps、24th Annual International Laser Physics Workshop (LPHYS'15)、上海 (中国)、2015年8月21-25日

⑮ 日比野 達彦、米川 翔太、一ノ関 夏生、柴田 康介、東條 賢、Near Optical-Resonant Trap for Laser Cooled Rubidium Atoms、24th Annual International Laser Physics Workshop (LPHYS'15)、上海 (中国)、2015年8月21-25日

⑯ 東條 賢、柴田 康介、Daniel Bloch、Angle-dependent enhanced excitation of atomic multipole transitions near nanostructure、The 10th Memorial of Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics (APNFO10)、函館、2015年7月7-10日

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.phys.chuo-u.ac.jp/j/tojo/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

東條 賢 (TOJO, Satoshi)

中央大学・理工学部・准教授

研究者番号:

30433709

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

柴田 康介 (SHIBATA, Kosuke)

阿部 真志 (ABE, Masashi)