

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03704

研究課題名(和文) 薄膜状原子波プローブによるナノ光磁場相互作用の探索

研究課題名(英文) Search for nano-optmagnetic interaction using matter wave probe

研究代表者

東條 賢 (Tojo, Satoshi)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：30433709

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：薄膜状のレーザー冷却原子によって生成する、薄膜状原子波を未知の場を探索するプローブとして用いて相互作用を探索した。薄膜状原子波を打ち上げてガラス表面と相互作用させることで、光電磁場を利用したファンデルワールス力によるエネルギーシフトを観測し、理論計算との比較により矛盾ない説明ができることを示した。また光磁場に応答する磁気双極子遷移を用いた励起実験を行い、光磁場を冷却原子集団へ転写できることを確認した。これらにより高感度測定に適した冷却原子を用いた未知の場の探索の有用性を示唆し、光電場に比べて数桁感度の劣る光磁場でも薄膜状原子波への転写が可能であることを示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

レーザー冷却原子を用いた実験は高感度測定が可能であり、近年ナノ空間の微小領域での利用が期待されてきた。一方で、固体表面の作るナノ空間で用いられる固体プローブではそれ自体が場を構成し正確に測ることが困難だった。一方で、冷却原子を用いた実験では希薄であるために場を邪魔しない代わりに、固体の振動や熱の影響を多大に受けて測定の困難さがあった。本研究ではこれらの欠点を克服し利点を組み合わせた薄膜状原子波プローブを用いた表面相互作用の観測に成功した。予想されたファンデルワールス力だけでなく高次の相互作用を示唆する結果を得ており、研究の発展および研究手法や他分野との連携が期待できる成果といえる。

研究成果の概要(英文)：We search for nano-optmagnetic interaction using membrane-like ultracold rubidium atoms. In general, a probe which searches for unknown fields is consist of solid materials. Unfortunately, a solid probe tends to break the searching field due to its high density property. We apply "dilute" ultracold gases to provide from any disturbance for an atomic gas probe due to its dilute density property. By using optical trapped ultracold rubidium atoms, we have observed unknown sub-wavelength area close to a dielectric surface with a fountain method from precisely manipulated optical dipole trap. We have obtained energy shifts of the ultracold atoms experienced surface van der Waals potential region. In comparison with numerical calculation, the experimental shifts can be explained by the surface van der Waals potential and indicated to a possibility of higher order interactions. In addition, we have observed magnetic dipole transition indicated to a transcription of an optical magnetic field.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：光近接場 レーザー冷却原子 多重極子遷移

1. 研究開始当初の背景

既存の光学測定では、強度計測や光子数計測を始め偏光や空間モードについて、光電場に注目して光科学分野が発展してきた。多くの物体の比誘電率は真空値 1.0 から大きく異なるため光電場との相互作用が大きく測定が可能な一方で、比透磁率は真空値 1.0 とほぼ同値なため光磁場との相互作用が観測されにくい。そのため光磁場を利用した計測はほとんど注目されてこなかった。近年、電磁メタマテリアルやスピントロニクスを利用した新しい物質創製から透磁率や磁場応答性が注目されつつあるが、可視光領域である 10^{14} Hz 程度の光磁場の直接利用は依然困難で、マクロ領域の光磁場センサーが開発され始めているものの、光電場からの類推等の補助的扱いに留まる。特に物質界面や表面近傍の微小領域である近接場は、単一原子からのボトムアップでもマクロ領域からのトップダウンでも近似が困難であり、近接場領域特有の素過程の理解のためには直接測定によって正確な場を知ることが必須である。従来の光電場ナノイメージングでは、微細固体プローブによって量的改良が実現され、近接場や表面相互作用などの多くの学術的な問いに対し答えを提供してきた。

一方で、磁場測定では低周波帯域では測定されているが、微細固体プローブ自体が被測定場を乱すため質的限界が排除されておらず、微小空間の光磁場応答をはじめとする多くの問いが未開拓のままである。例えば、表面-原子間相互作用の一つである van der Waals ポテンシャルでは電気双極子およびその高次の電気多重極子モーメントを起因として描写され、磁気的な効果はほとんど考慮されていない。また表面プラズモン共鳴や電磁メタマテリアルでは円電流や磁気双極子に対応する分極によって説明されるが、局所領域の光磁場そのものの応答性や量子性については未開拓であるが、応答性の低さから敬遠されてきた。

2. 研究の目的

本研究は、これまで注目されてこなかった微小領域（ナノ領域）の光磁場イメージングを実現し、新しい量子状態の探索を目的としている。原子の電子遷移である電気双極子遷移と磁気双極子遷移はそれぞれ振動電場および磁場に対して優れた応答を示す一方、光学禁制遷移である磁気双極子遷移は遷移レートが低く、測定自体が困難だった。これまで微小領域での光磁場は固体プローブによる光電場測定から推定されてきたが、プローブ自身が光電場の外乱を引き起こし推定が複雑化する。マクロ領域では光電場・光磁場、ナノ領域では光電場までは利用が達成されているが、ナノ領域の光磁場利用は未だ限定的である。本研究では、操作性が高く高感度測定に優れたレーザー冷却原子で構成される薄膜状原子波をプローブとして使い、増幅された磁気双極子遷移による特異なナノ光磁場の原子波転写（光磁場ナノイメージング）を実現する。微小領域の光磁場-原子間相互作用を利用した新たな量子状態の発現と制御を目指し、光電場応答では観測しえない光磁場相互作用の探索をする。

3. 研究の方法

本研究では、これまで報告者が研究を続けてきた光学禁制遷移のひとつである磁気双極子遷移を利活用する。一般に禁制遷移強度は許容遷移より数桁低い一方、ナノ領域では遷移強度が数倍から数桁増強し光磁場測定が可能となる。局所に保持可能で波の性質を有するレーザー冷却原子波を用い、特異な光磁場を有するラゲールガウス光(LG光)を冷却原子波に転写し、光磁場測定実現を目指す(図1)。既存のナノ空間の光学測定では、固体プローブによる光電場散乱を用いるため表面から 10 nm 以下の領域ではプローブと測定場との相互作用が無視できないが、本研究では光学密度の低い薄型原子波プローブへ転写測定するため、測定場をほとんど乱すことなく連続的な動的 2 次元観測も可能である。本研究は、ナノ空間の原子の磁気双極子遷移増強効果を用いて、可視光域の光磁場をシート状の冷却原子波に転写し、ナノ空間の光磁場をイメージングする、新しい独創的な研究と考えている。

これまでほぼ電場のみ注目が集まっていた光測定に対し、これまで注目されなかった光磁場測定による光測定の質的転換と光磁場を使った新しい量子状態操作へと発展を見込んでいる。近年注目されている電磁メタマテリアルなどの、新奇物質内での光磁場の素過程への適用や光磁場を使った新しいドレスト状態など、学術的独自性や発展可能性を内包している。

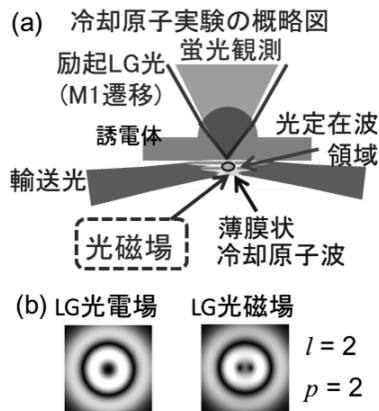


図 1. (a) 実験概略図。LG 光の光磁場を冷却原子に転写し測定。(b) LG 光の光電場と光磁場 (計算)。

4. 研究成果

ガラス近傍の原子波の安定生成と観測を行った。真空槽内に光保持のための光トラップ技術を利用し、ガラス表面近くへの冷却 Rb 原子の輸送を実現した。光トラップのトラップ形状に依存するトラップ周波数をパラメトリック共鳴実験により測定し、光定在波領域では閉じ込め領域が急峻になる傾向を確認し、輸送光トラップ自身による光定在波の生成および安定的捕獲を実現した。光定在波から解放された原子波を用いて打ち上げ型実験を行った。冷却原子は室温のガラス表面と衝突した際に急激な温度差によって散逸する。これを利用して打ち上げられた原子集団とガラス表面とのダイナミクスを推定することができる。ガラス表面に打ち上げられた冷却原子の原子数と打ち上げ時間との関係を表す。理論計算との比較により打ち上げ後 0.2 ms 後から表面との相互作用により原子が減少していることがわかった。

さらにガラス表面の共鳴原子の相互作用を観測する。これは原子波自身の高感度性を用いて、ガラス表面のファンデルワールスポテンシャルの測定が期待できる。その際には共鳴原子生成のために図 1 の実線のように全反射励起によって表面からわずか 1 波長程度の領域のみの原子波を励起させることが可能となる。図 2 では光散乱レートの励起波長依存性を表している。自由空間での原子では $\delta = 0$ のときに共鳴となるが、evanescent 光照射時ではわずかに低周波数側にシフトしていることを確認した。これはガラス表面原子がファンデルワールスポテンシャルの影響を受けてエネルギーシフトすることによって説明できる。図 3 ではファンデルワールスシフトを考慮に入れた計算と実験との比較によりこれまで困難だった冷却原子の表面近傍のエネルギーシフトを初めて確認し、ファンデルワールスポテンシャルを考慮した計算と矛盾のない結果を得た。この成果により薄型原子波を用いた表面との相互作用観測可能であることを実験的に初めて示し、さらに量子縮退原子波を用いることで高感度測定が可能であることを示唆している。

光学禁制遷移である磁気双極子・電気四重極子遷移の実験では薄膜原子波を直接利用することが難しいため、磁気光学トラップ冷却原子を用いた実験を行った。磁気双極子・電気四重極子遷移である 5P-6P 遷移 (911nm) の励起スペクトルの測定に成功した (図 4)。結果により、電気四重極子遷移と磁気双極子遷移の両方の遷移を実現し、冷却原子集団への光磁場転写を実現した。光トラップへの移行および薄膜原子波への転写実験への可能性を示唆する結果となった。

特異な空間モードを有するラゲールガウス光 (LG 光) の生成について、新たに空間位相変調器を用いた高効率 LG 光の生成に成功した。これまで用いてきたマイクロミラーアレイによる LG 光生成効率の数倍となる 50% 以上の高効率生成を確認した。LG 光を用いた $1\mu\text{m}$ 以下の局所領域の閉じ込め実験を行い、LG 光による高周波数離調を用いた斥力トラップを実現している。LG 光による原子波のとの相互作用観測実験が十分可能であることを示し今後の発展につながる結果を得た。

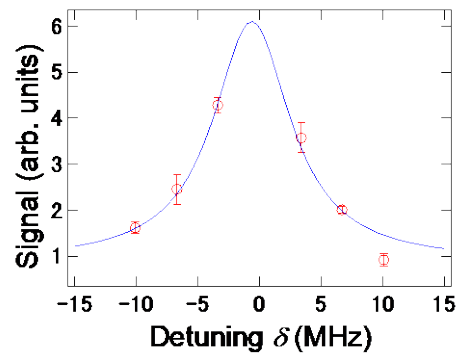


図 2. 冷却原子散乱レートの Evanescent 光励起周波数依存性。 $\delta = 0$ で通常光の共鳴条件。

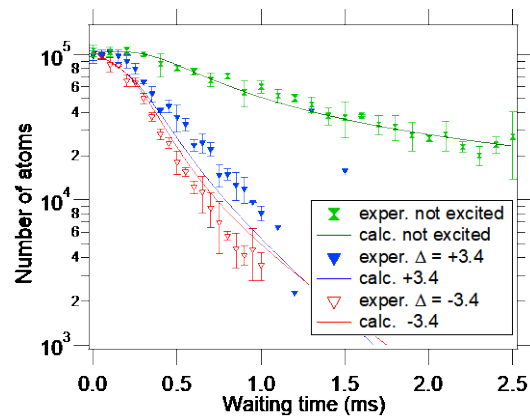


図 3. Evanescent 光照射時の冷却原子数 (実験および理論計算)。

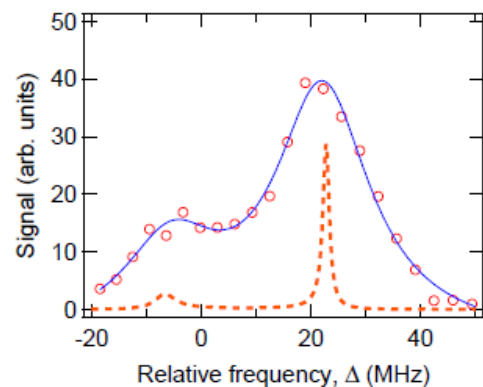


図 4. 911 nm 光磁場による発光スペクトル。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Mashimo Taro, Abe Masashi, Tojo Satoshi	4. 巻 100
2. 論文標題 Effective trapping of cold atoms using dipole and radiative forces in an optical trap	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 063426-1, -7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.100.063426	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Abe Masashi, Itoyama Ryohei, Komiyama Yuta, Ito Takuma, Mashimo Taro, Tojo Satoshi	4. 巻 99
2. 論文標題 Quantitative investigation of the Zeeman and Paschen-Back effects of the hyperfine structure during the rubidium 52S1/2 52D5/2 two-photon transition	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 053420-1, -8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevA.99.053420	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 東條賢, Ali Zaheer, Arpana Singh, Chamali Gunawardana, Tien Tran, Andrei Sidrov, Krzysztof Giergel, Krzysztof Sacha, Peter Hannaford
2. 発表標題 ボースアインシュタイン凝縮体を用いた時間結晶の生成
3. 学会等名 第2回新方式精密計測による物理・工学的変革を目指す回路技術調査専門委員会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大木凌, 真下太郎, 阿部真志, 東條賢
2. 発表標題 近共鳴ラゲルガウスビームと超低温ルビジウム原子の相互作用観測
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 海老原賢、田中豪、阿部真志、東條賢
2. 発表標題 冷却ルビジウム原子中の二重共鳴を使ったドレスト状態の観測
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryo Yasuda, Masashi Abe, Satoshi Tojo
2. 発表標題 Two-Photon Spectroscopy of 5S - 5D Transition of Ultracold Rubidium Atoms in a Magnetic Field
3. 学会等名 28th Annual International Laser Physics Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sakura Seta, Taro Mashimo, Masashi Abe, Satoshi Tojo
2. 発表標題 Spectroscopy of Ultracold Rubidium Atoms via Optical Double Resonance in an Optical Trap
3. 学会等名 28th Annual International Laser Physics Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 真下太郎、阿部真志、東條賢
2. 発表標題 近共鳴光トラップを利用した冷却ルビジウム原子による表面近傍での5S-5D二光子分光
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福井美樹、阿部真志、東條賢
2. 発表標題 冷却ルビジウム原子を用いた光学禁制遷移5P-6Pの観測
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安田良、阿部真志、東條賢
2. 発表標題 磁場における冷却ルビジウム原子の5S-5D二光子遷移スペクトル
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 阿部真志、安田良、東條賢
2. 発表標題 ルビジウム原子のF状態を介した緩和過程の観測
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福井美樹、阿部真志、東條賢
2. 発表標題 冷却ルビジウム原子を用いた光学禁制遷移5P-6Pの観測
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 阿部真志、安田良、東條賢
2. 発表標題 ルビジウム7F状態の磁場依存性の観測
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 真下太郎、阿部真志、東條賢
2. 発表標題 近共鳴光トラップを利用した冷却ルビジウム原子による表面近傍での5S-5D二光子分光II
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東條研究室 https://www.phys.chuo-u.ac.jp/j/tojo/
--

6. 研究組織			
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	阿部 真志	中央大学・理工学部・助教	2022年3月退職
	(Masashi Abe) (40803292)	 (32641)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------