

冷却原子の精密操作を利用した表面相互作用の探索

Research on the interaction between atoms and a dielectric surface by precise manipulation of cold atoms

物理学専攻 真下 太郎

研究の背景および目的

メタマテリアルやスピントロニクス等の新規光デバイス開発において、媒質界面や表面近傍の微小領域内における微弱な原子-表面間の相互作用の詳細な理解が求められている。近接場相互作用としては、van der Waals 効果[1]、Casimir-Polder 効果[2]の研究が世界的に広く行われている。これらの効果の大きさはナノ物質の表面からの距離の冪乗として減少するため、表面領域のみを選択的に測定する必要がある。

物質表面近傍での物理現象を解明するために波長以下の領域に存在する光近接場を利用した研究が盛んに行われている[3][4]。本研究では、表面が平坦なガラス表面である場合、近接場相互作用の効果を van der Waals 効果として考えると、その大きさは表面からの原子の距離 z を用いて $\propto z^{-3}$ と表され、表面から 100 nm 程度の領域では数 MHz の周波数シフトとしてあらわれる。表面近傍の 1 μm 以下の領域を選択的に観測するために、エバネッセント場を利用する[5]。エバネッセント場による電場は、表面から半波長程度の長さの浸み込み深さを持ち、波数はレーザー光の入射角に依存する。エバネッセント場を原子の励起光として利用し、表面から半波長程度の領域内の原子を選択的に分光し、近接場相互作用の効果を探索する。

近共鳴光トラップ(NORT)を用いた双極子力と輻射圧による高効率な原子の捕獲

原子-表面間の相互作用の観測のためには、冷却原子を安定的に捕獲、制御する必要がある。 ^{87}Rb の D2 線の共鳴(波長 780 nm)から近い周波数をもつレーザー光(近共鳴光トラップ, NORT)による冷却原子の捕獲可能条件を探索した。

NORTは従来の遠共鳴光トラップ(FORT)と比較すると、従来の双極子力に加えて輻射力を利用でき、FORTではできなかった磁気副準位間で異なるトラップを実現できるため、研究の発展が期待される。冷却原子を捕獲可能なポテンシャル形成に必要な光強度が2桁程度小さいため、光耐性が高くない光学機器を導入でき、装置の選択肢を広くすることができる。NORT光の共鳴からの離調を固定した状態で焦点位置を変化させ、冷却原子集団に与えるNORT光による輻射力と双極子力のバランスを制御する。輻射力と双極子力の釣り合うような焦点距離(平衡焦点距離)において、NORT中で安定的に冷却原子を保持

可能となる(図1)。各離調での平衡焦点距離を実験結果から求め、冷却原子をNORT中にトラップ可能である条件を新たに提示することができた(図2)[6]。

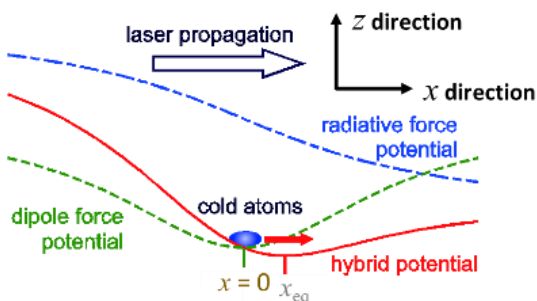


図1：NORT中の双極子力と輻射力

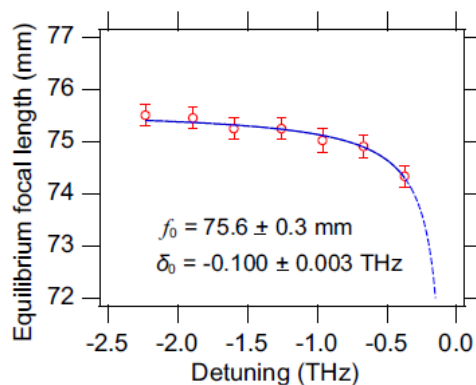


図2：平衡焦点距離の離調依存性

近共鳴光トラップ(NORT)による冷却原子の操作と制御

NORTにより捕獲した冷却原子集団を安定的にガラス表面近傍に輸送する。NORT光軸方向(x 軸方向)は前述の焦点可変レンズによる光トラップの焦点位置制御、表面と平行な水平方向(y 軸)は AOM(音響光学素子)に周波数変調を加えることによるNORT光の回折の制御、表面に垂直な方向(z 軸)は可動ステージを用いたNORT光路上レンズ位置の制御によるNORT光の屈折の変化を利用した独立した3軸空間操作を実現する(図3)。冷却原を表面近傍に輸送時、NORT光強度を変調してパラメトリック共鳴現象を起こすことでトラップ中の原子を加熱させ、残留原子数を評価することにより、トラップ周波数を測定した。これにより、冷却原子がガラス表面に入射するNORT光と反射するNORT光の重ね合わせ領域に形成される光定在波中(図4)に捕獲されることを確認した。

また、冷却原子を表面への輸送中に光トラップから解放することにより、輸送による上向き運動量を持つ冷却原子を表面に接近させる、原子打ち上げ法を行った。原子を表面に打ち上げた後、2.5 ms 後にNORT光を照射し、冷却原子を

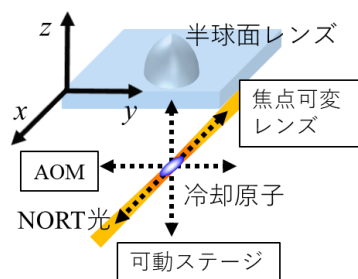


図3：冷却原子の3軸独立操作

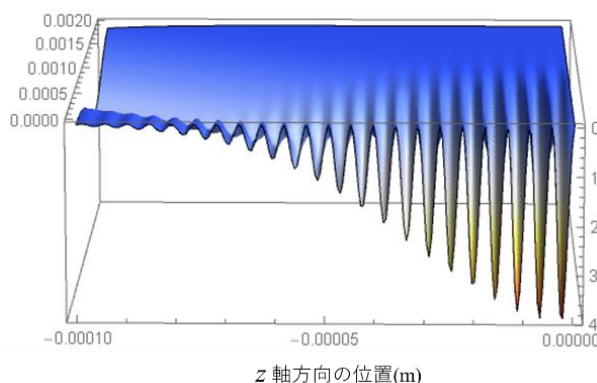


図4：表面近傍の NORT 光による光トラップポテンシャル

NORT中に再トラップすることにより、表面近傍の冷却原子を選択的に捕獲する(図5)。

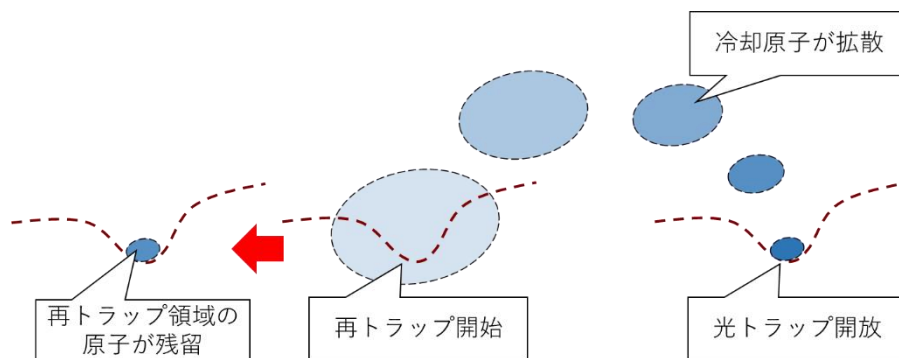


図5：打ち上げ原子の再トラップ概念図

エバネッセント場による表面相互作用の観測

NORTにより表面近傍に形成された光定在波中と、表面に打ち上げた冷却原子に対してエバネッセント場を励起光として照射し、原子数の変化を評価する。光定在波の場合は、エバネッセント場照射時にNORT光によるライトシフトを原子スペクトル上に観測した。表面相互作用である van der Waals 効果による周波数シフトを正確に評価するために、NORT光によるライトシフトを排除可能である原子打ち上げ法におけるスペクトルを測定した(図6)。原子打ち上げ後のエバネッセント場照射開始時間(TOF時間)を0 ~ 2.4 ms、

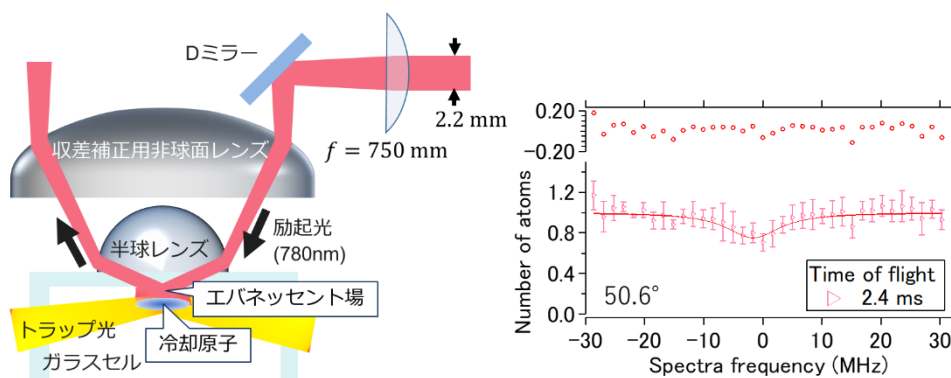


図6：実験セットアップ(左図)とエバネッセント場によるスペクトル(右図)

右図の縦軸は規格化された原子数、横軸は励起光の掃引周波数を表わす。

表面における励起光の入射角を $47.3 \sim 51.4^\circ$ (臨界角 43.0°)まで変化させて、スペクトルを評価した。結果、スペクトル線幅の広がりを入射角依存性を観測した。

TOFが小さい条件では、入射角増加時に中心周波数がプラスにシフトし、TOFが大きくなるに従い、入射角増加時にスペクトル中心周波数がより大きくマイナスにシフトすることを測定した(図6)。この入射角増加時の中心周波数のマイナスシフトが van der Waals 効果による周波数シフトを表すと見積もる。TOF、入射角がともに大きい場合は、表面近

傍でエバネッセント場と相互作用した原子が再トラップ領域内に存在するため、再トラップ後のNORT中における van der Waals シフトしている原子の割合が多くなると見積もれる。また、エバネッセント場の浸み込み深さが短く、表面から離れた原子と光の相互作用が減少し、スペクトルに van der Waals シフトが現れていると考える。これにより、打ち上げ時間の制御による表面相互作用の選択的観測を実現した。

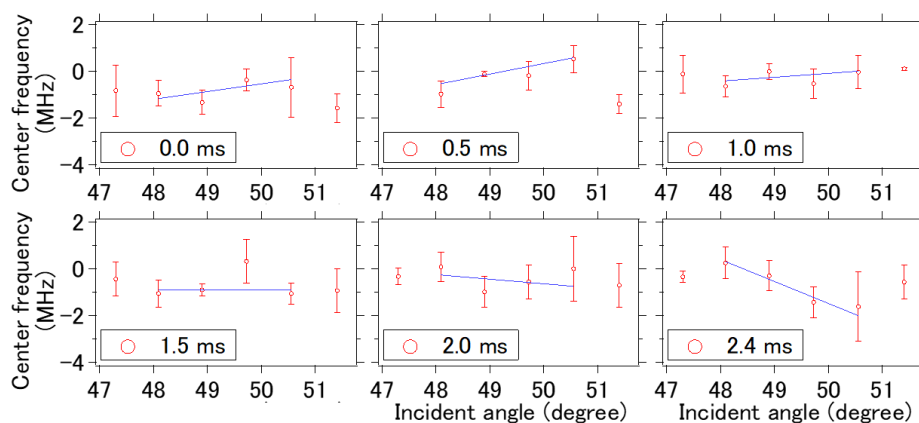


図7：スペクトル中心周波数の異なる打ち上げ時間ごとの入射角依存性
縦軸は中心周波数、横軸は入射角を表わす。

結論と今後の展望

本研究では、NORTの特性である輻射力と双極子力を利用した新しい光トラップ法を確立した。NORTによる冷却原子の精密な空間操作を実現し、表面相互作用の一つである van der Waals 力による影響を、エバネッセント場と原子打ち上げ法を組み合わせた新しい手法で確認した。相互作用を観測できる打ち上げ時間の実験ではスペクトルの中心周波数のマイナスへのシフトが見られ、原子-表面間の相互作用である van der Waals シフトが発生していると思われた。この研究成果により、局所的に保持した冷却原子をプローブとして用いた表面相互作用の探索を実現し、表面相互作用観測の新たな発展が期待できる。

参考文献

- [1] A. Landragin, J. -Y. Courtois, G. Labeyrie, N. Vansteenkiste, C. I. Westbrook, and A. Aspect, *Phys. Rev. Lett.* **77**, 1464 (1996).
- [2] H. Bender, Ph. W. Courteille, C. Marzok, C. Zimmermann, and S. Slame, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 083201 (2010).
- [3] S. Tojo, M. Hasuo and T. Fujimoto, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 053001 (2004).
- [4] D. Bloch and M. Ducloy, *Adv. At. Mol. Opt. Phys.* **50**, 91 (2005).
- [5] P. Boissel and F. Kerherve, *Opt. Commun.* **37**, 397 (1981).
- [6] T. Mashimo, M. Abe, and S. Tojo, *Phys. Rev. A* **100**, 063426 (2019).