

原子の情報担体化に向けた原子リザーバーの開発

Development of an atom reservoir towards the quantum information processing

プロジェクト代表者： 大向 隆三（教育学部・准教授）

Ryuzo Ohmukai (Associate Professor, Faculty of Education)

1 はじめに

原子は物質を構成する最小の単位であり、エネルギー準位や運動状態など多彩な内的・外的自由度を併せ持つ。近年のレーザー分光における研究の進展により、原子の有するこれらの自由度を光で制御することが可能になりつつある。このような技術が実現すれば、原子の量子状態を自在に操作し、高感度にそれを検出することが可能となるので、並列処理、低エネルギー消費や微細化などの長所を兼ね備えた全く新しい情報処理及び通信デバイス技術を確立できると期待されている。このような原子を情報担体として利用する技術は、既存の情報処理・通信能力の限界を超えるためのブレークスルーになるだけでなく、将来の社会基盤となりうる重要な技術としてその実現に向けた研究の社会的要請も大きい。原子を情報担体化して実際にデバイス化するためには、基板表面上で原子の自由度を制御可能な「原子チップ」と呼ばれる高度情報処理系を構築することが必須となる。そこで本研究では、原子チップの実現に向けた基盤研究として、基板表面上で情報担体となる原子を効率よく発生させ、リザーバーに蓄えておくための技術を開発するとともに、その原子の特性を計測する実験を行った。

2 実験配置

本実験で使用する原子は、レーザー光源とのマッチングやエネルギー構造の詳細に研究された原子として、ルビジウム (Rb) 原子を使用することとした。原子の自由度を光で制御するためには、動きのほぼ静止した（冷却された）状態の原子をまず発生させなければならないので、レーザー冷却の技法により高効率に原子の動きを止めて基板上でそれを捕獲したままりザーブする技術を開発する方法を試みた。我々が使用した、基板表面上で原子を冷却し捕獲するための（「表面トラップ」と称する）実験装置の概略を Fig.1 に示す。ここでは、室温の原子を捕獲・冷却する技術として磁気光学トラップ (MOT) [1] を利用しているが、従来の MOT とは異なり、真空槽内に配置した鏡面（基板）による光反射を用いることで2組の円偏光レーザービームペアと四重極磁場によって MOT を構成した。これにより、鏡面（基板）表面近傍で原子の捕獲領域を形成することが可能となる。Rb 原子はアンプルから真空層へ供給される。レーザー光源は、単一周波数発振を行う外部共振器型半導体レーザー (LD) であり、その発振周波数は Rb 原子の飽和吸収分光法を用いて安定化されている。外部共振器型 LD を出射した光は、直ちに光ファイバーに入れられ、真空チャンバー手前までガイドして原子の捕獲・冷却に使用した。このため、実験室の環境変化によって生じる光路のずれがほとんどなく、

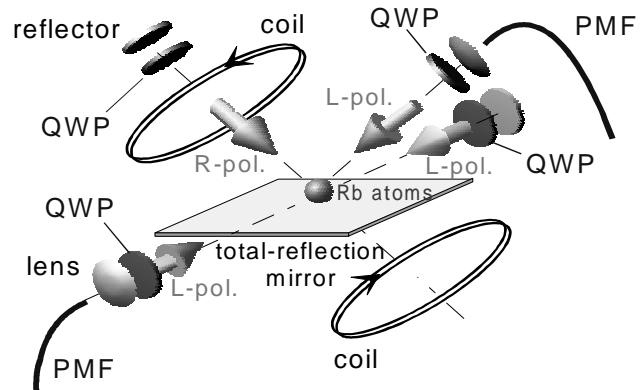


Fig. 1 実験配置 (QWP は波長板、PMF は偏光保持ファイバー、L-pol.とR-pol.はそれぞれ左回り円偏光と右回り円偏光を示す)

結果的に再現性のよい実験を行うことが可能となった。

3 実験結果

実際の実験では、Fig. 1 の配置を上下逆にした配置で実験を行った。真空チャンバーに備えたビューポートから CCD カメラを使い Rb 原子の捕獲・冷却の様子を観察した結果を Fig. 2 に示す。加えた磁場勾配は 10 G/cm である。中央の白く、雲のように見える部分が Rb 原子の放つレーザー誘起蛍光である。鏡面(基板)の下には何も配置していないので原子は自由落下していこうとするが、基板表面上で MOT が行われているために原子は落下せず、同じ位置でこのレーザー誘起蛍光の雲が永続的に観測された。しかも、画像から明らかなように、基板表面のすぐ下 (1.8 mm) の位置で、冷却原子を生成・捕獲できていることも判った。この蛍光スポット (原子雲) のサイズを計測したところ、直径約 9 mm の球状であった。この原子雲サイズから見積もると、基板表面近傍で捕獲・冷却された Rb 原子の数は、 1.8×10^7 個に達すると考えられる。

次に、この原子雲に存在する原子の空間密度と原子の到達温度を決定するため、冷却 Rb 原子雲による共鳴プローブ光の吸収率を計測した。この計測結果を Fig. 3 に示す。図の横軸は時間を表しており、 $t = 0$ (ms) で MOT を遮断した以降にプローブ光透過率がどのように変化したかを示す。MOT 遮断後は、MOT で冷却された温度を反映して空間的に拡散するので、この透過率の時間変化から、基板表面近傍で捕獲された Rb 原子の到達 (冷却) 温度は、 $350 \pm 100 \mu\text{K}$ と求められた。この到達温度は、Rb 原子のドップラー冷却限界温度の値にほぼ等しく、我々実験配置で効果的に原子を捕獲・冷却できたことが判る。

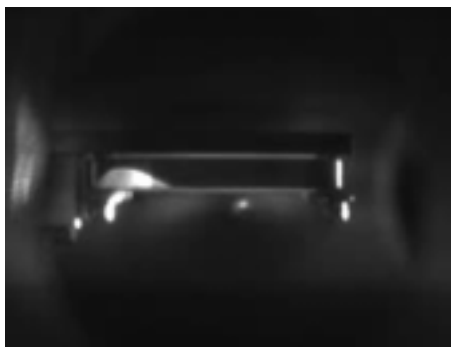


Fig. 2 原子の表面トラップ実験結果

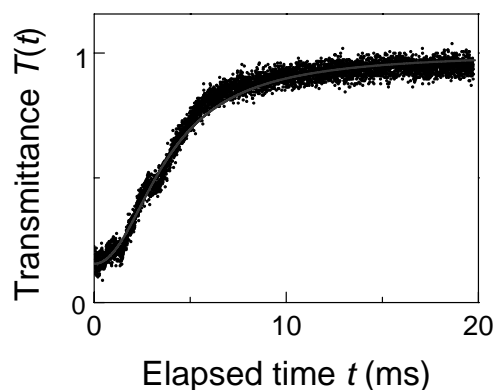


Fig. 3 共鳴プローブ光の透過率測定結果

4 まとめ

我々は基板表面の光反射を利用した新たな実験配置を用いて原子の表面トラップを試み、効率的に Rb 原子の捕獲・冷却を達成することに成功した。基板表面から 1.8 mm の位置に、 1.8×10^7 個の Rb 原子を到達温度 $350 \pm 100 \mu\text{K}$ で生成できることを確認した。これらの特性により、我々の開発した実験装置は原子リザーバーとして十分な性能を有していると結論付けることができる。今後、原子チップの開発に向け、このリザーバーからの原子を用いて原子のガイド、微小領域トラップ、光による原子への情報記録・プロセッシング・情報出力など、原子を情報担体として高機能化する技術に取り組む予定である。

(参考文献)

[1] E. L. Raab, M. Prentiss, A. Cable, S. Chu, D. Pritchard: Phys. Rev. Lett. 59 (1987) 2631.