

量子シミュレーション用の光双極子トラップの特性評価

中川研究室 白澤慶

1.研究背景・目的

現在は世界中で量子情報や量子コンピュータ、量子シミュレータ[1]の研究が行われている。特に量子シミュレータは解析が難しい量子状態を再現し制御する手法として研究が続けられており、実現することで特定の状態の解析に対して計算コストを抑えることができると期待されている。量子ビットとして用いられるものとしてイオンや光子など、様々な系が存在するが、我々の研究室ではコヒーレンス時間の長さや系の制御が容易であることから冷却中性原子を用いた量子シミュレーションの開発を行っている。

この系においては冷却中性原子同士の相互作用を利用することによって量子シミュレーションを行うが、その実現には原子の捕獲が必要である。我々の研究室では原子と光の相互作用を利用した光双極子トラップを使用しており、原子の状態はトラップの特性に依存する。本研究の目的は、トラップの特性の一つである原子を捕獲しておける時間を示す特性である、トラップ寿命の測定を行うために光双極子トラップに含まれる原子数の評価を行なった。

2.原子のトラップ原理

原子を捕獲し量子シミュレーションに応用するためには原子を冷却が必要になる。しかし、光双極子トラップには冷却の機能がないため冷却のために磁気光学トラップも用いている。この2つのトラップを併用することによって原子の冷却と捕獲を行うことが可能になる。

2.1.磁気光学トラップ(MOT)[2]

原子が外から磁場の影響を受けることによって、磁気副準位を持つエネルギー準位の縮退がとけることが知られている。これを、アンチヘルムホルツコイルを用いて形成される四重極磁場とドップラー冷却に用いるレーザー光を3次元的な方向から照射することで原子の冷却と捕獲を同時に可能にするものがMOTである。アンチヘルムホルツコイルによって形成される磁場の強さは原点付近において位置依存性を持ち $B(r) = \frac{dB}{dz} \left(-\frac{x}{2}, -\frac{y}{2}, z \right)$ と表すことができる。また、縮退が解けた準位の $m_f = -1$ に対してのみレーザー光の吸収が起きるため常に原点方向に力がかかるため原子を捕獲することが可能である。

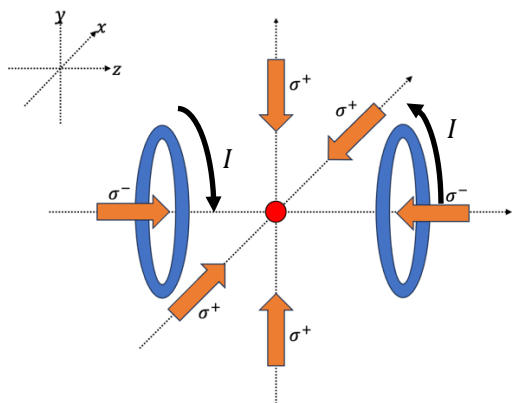


図1 MOTの配置図

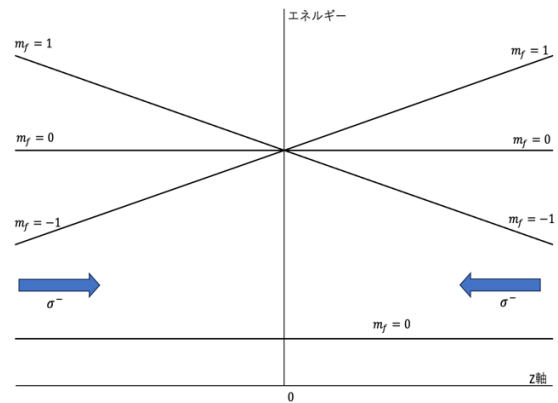


図2 MOTの原理図

2.2.光双極子トラップ[10]

MOTを用いることで原子の冷却と捕獲を同時に行うことができるが、原子の内部状態が変化してしまうため量子ビットとして利用できる原子を捕獲できていない。そこで、光双極子トラップに捕獲法を変更することで内部状態を保持したまま原子をトラップすることが可能である。この光双極子トラップとはレーザーパワーから原子が受ける力を利用した原子のトラップ法である。図3のように赤方離調レーザーにおいては集光点の方向に原子は力を受ける。その力は保存力であり、ポテンシャルUを形成する。ポテンシャルの深さや強度勾配を操ることによって原子の状態を決定が可能になる。トラップの深さはレーザーのパワーと集光点におけるビーム半径(スポット半径)によって決定される。

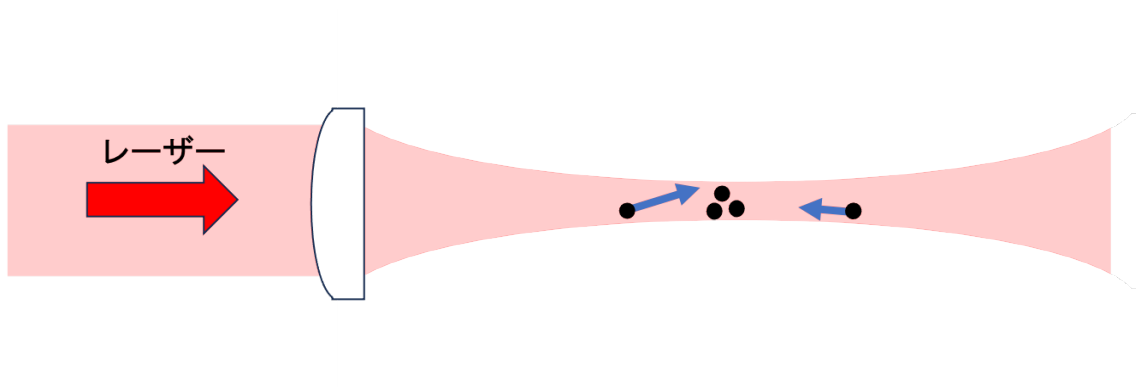


図3 光双極子トラップによる原子の捕獲

今回の実験における光双極子トラップに用いるレーザー光のパワーは150mW、スポット半径は $5\mu\text{m}$ である。この時、見積もられる集光点のトラップの深さは -1.26mK となる。

3.光双極子トラップ内の原子数評価方法

3.1.実験装置

原子の冷却と捕獲を MOT と光双極子トラップを用いて行なったのちに捕獲された原子の観測と状態を計測するための装置が以下の図 4 になる。トラップされた中性原子(^{87}Rb)からの蛍光量をカメラで観測する装置である。中性原子が存在する範囲からは蛍光が明るく見え、存在しない範囲からの傾向は暗く見えることを利用して原子が捕獲されている位置(図 5 の囲い部分)の決定を行なった。

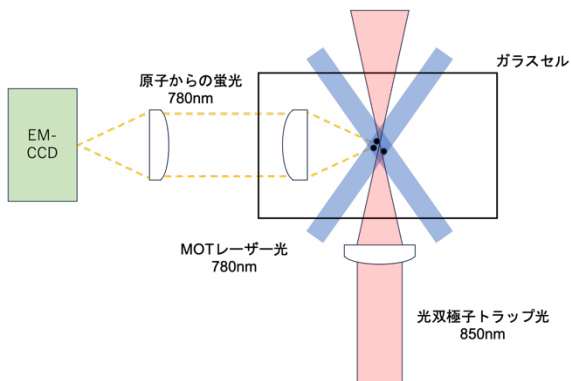


図 4 原子の観測方法

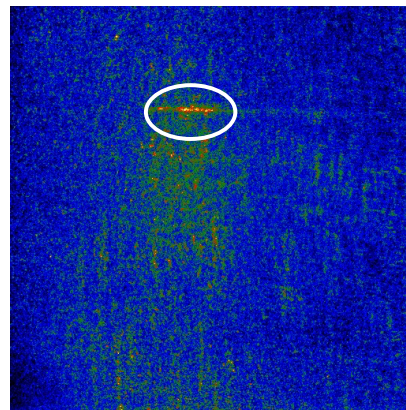


図 5 カメラで観測した画面

3.2.蛍光量観測シーケンス

上記の図 4 より、MOT と光双極子トラップの重なった範囲に原子が捕獲される。この状態から、光双極子トラップに含まれる原子数を評価するための実験シーケンスを以下の図 6 に示す。このシーケンスでは、過程(2)において MOT を切ることによって原子を光双極子トラップにのみ捕獲、過程(3)においてトラップからの蛍光量を観測することによってトラップに含まれる原子数の見積もりを行なった。MOT を切る時間は 150ms、カメラの露光時間は 100ms である。

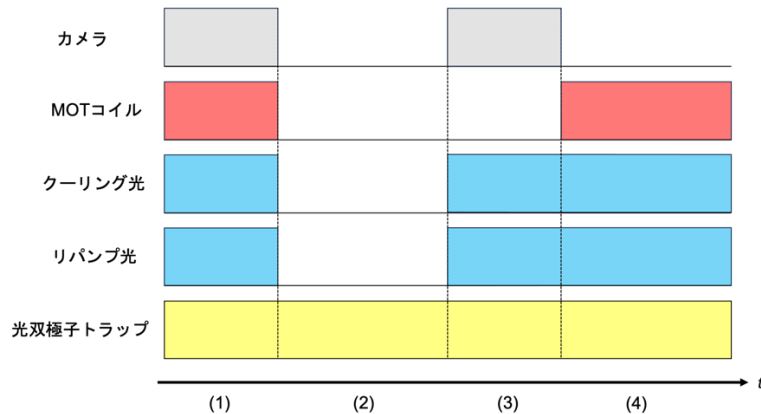


図 6 蛍光観測の時間系列モード

4.原子数評価の結果

トラップからの蛍光量を MOT がついている状態と無い状態の蛍光量からバックグラウンドの蛍光を引いたものを示したのが以下の図 7 である。また、別実験から求めた原子 1 個からの蛍光量を 960counts/100ms として、代表点 $t=150\text{s}$ における蛍光量から原子数を求める。結果は MOT が無い状態の原子数は 23.2 個, MOT がある状態の原子数は 9.93 個となった。

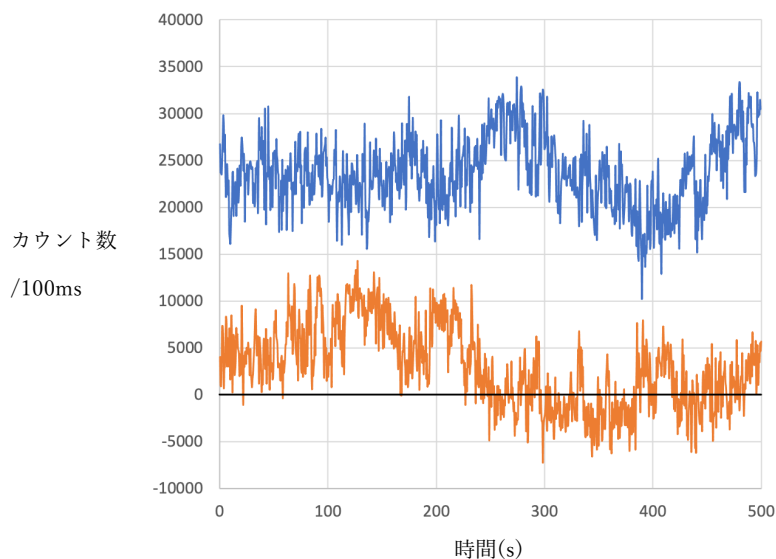


図 7 観測された蛍光信号(青:MOT あり/オレンジ:MOT なし)

5.今後の展望

蛍光量観測を実施し、トラップに含まれる原子数の見積もりを代表点において実施した。また、MOT が無い状態における蛍光量がマイナスになる範囲が存在しているが、これは迷光のゆらぎによる影響だと考えられる。そのため、原子がトラップされているとして観測した範囲を見直し、再度の蛍光量観測を実施し原子数評価の妥当性の検討と、原子のトラップ寿命の測定が今後の展望である。

参考文献

- [1] Feynman, Richard P, "Simulating physics with computers," International journal of theoretical physics, 21, 6, 467–488 (1981)
- [2] 久我隆弘,"量子光学", 朝倉書店 (2003)