

冷却 ^{87}Rb 原子の光双極子トラップ

量子・物質工学科 0413029

加地 真英

<背景・目的>

我々の研究室では、近赤外領域の波長 $1\mu\text{m}$ のレーザーを用いて、レーザー冷却された ^{87}Rb 原子を光双極子トラップしボーズ・アインシュタイン凝縮(BEC)を生成することを目指しています。光双極子トラップは、周波数が原子の共鳴に近く、パワーが空間的に強度分布しているレーザーを用いるのですが、このトラップ自体には冷却効果がないので先に予備冷却されている必要があります。また、BECを生成する条件として、低温と高密度であることが必要になります。高密度の目安として、 10^6 個の原子をトラップすることを目的の一つとして、今回は BEC の前段階である ^{87}Rb 原子の光双極子トラップの実験を行いました。

<光双極子力>

共鳴に近い周波数で、パワーが空間的に強度分布するレーザーを原子に当てると、原子は力を受けます。その方向は、レーザーの周波数が原子の共鳴周波数より高いか低いかで異なり、高い場合を青方離調、低い場合を赤方離調といいます。

式で表すと、
$$U = -\frac{1}{2}\alpha|E|^2$$
$$F = -\text{grad}U$$
$$\alpha : \text{分極率} \quad E : \text{電場}$$

のように表され、電場はレーザーのパワー強度に依存するのでレーザーのパワーに応じた力を受けます。青方離調の場合、原子はパワーの小さい、光軸から遠ざかる方向に力を受け、赤方離調の場合は、逆に光軸に近づく方向に力を受けます。今回の実験では赤方離調を利用しています。



<双極子トラップポテンシャル>

原子が力を受けているとき、そのポテンシャルは、

$$U(r, z) = U_{\max} \frac{w_0^2}{w(z)^2} e^{-\frac{2r^2}{w(z)^2}}$$
$$U_{\max} = \frac{\hbar \Gamma^2 I_{\max}}{8 \Delta I_0}$$

w_0 : ビーム径(半径) I_{\max} : ピーク強度
 $w(z)$: ビーム径広がり I_0 : 飽和強度
 Γ : 散乱レート Δ : 離調

と表され、グラフにすると図1のようになります。パワー10Wで波長 $1.08\mu\text{m}$ 、ビ

ーム径(半径) $50\ \mu\text{m}$ のとき、得られるポテンシャルは $400\ \mu\text{K}$ 近くになります。

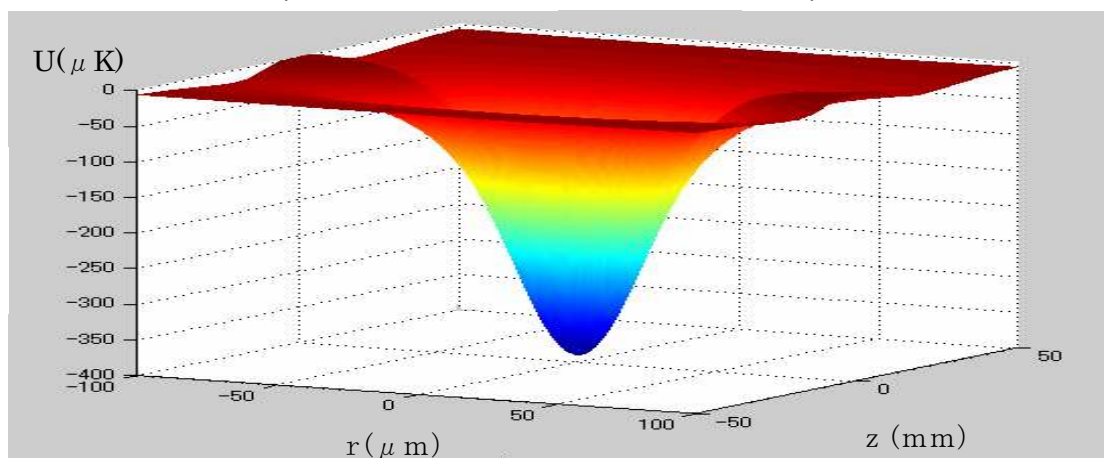
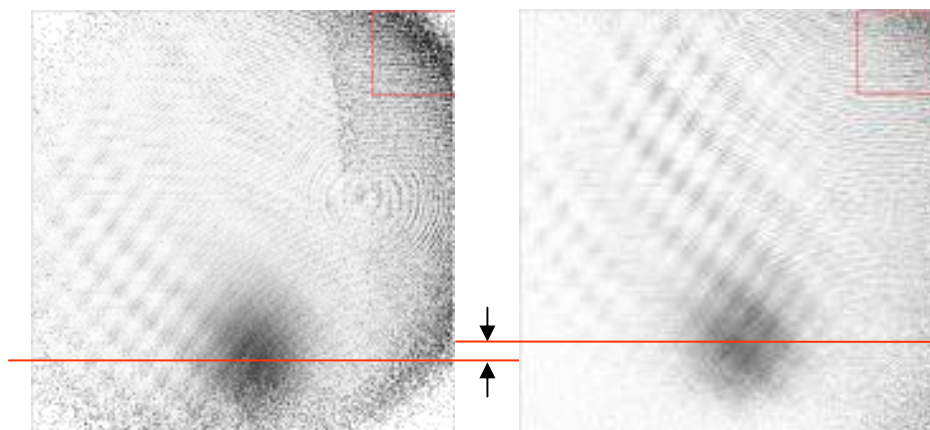


図 1. 双極子トラップポテンシャル

<実験手順>

今回の実験では、冷却とトラップ両方の効果がある磁気光学トラップ(MOT)によって Rb 原子があらかじめ予備冷却されているところに光双極子トラップ用のレーザーを当てて、当てたままの状態と原子を MOT から開放した状態と当てないで原子を開放した状態とを比較して光双極子トラップの効果の評価するという実験を行いました。具体的には、まず MOT で原子をある程度冷却されている状態で捕獲、次に MOT を圧縮(CMOT)、偏光勾配冷却(PGC)でさらに冷却、PGC の最後に少し重なるように光双極子トラップ用のレーザーを当てる、しばらく当てたまま(10ms~30ms)の状態と原子の吸収像を撮影、原子を MOT から開放しただけで同じ時間が経過したものと比較して光双極子トラップの効果の評価をする、という手順を踏みます。このとき、光双極子トラップ用のレーザーには Yb 添加ファイバーレーザーを用い、パワーが 10W で波長は $1.08\ \mu\text{m}$ で原子に当たるときは集光レンズでビーム径が $50\ \mu\text{m}$ になるように調整されています。また、光双極子トラップ用のレーザーは AOM で回折させたものを用いていて、これはコンピュータで操作できるようになっています。

<実験結果>



右が光双極子トラップ用のレーザーを当てたもので、左は当てなかったものです。吸収像の横幅が最も広いところを中心として線を引いたものですが落下距離に差があります。原子を開放してからの時間は 25ms ですが、光双極子トラップ用のレーザーを当てている場合はその間も当てたままです。右の図は光学密度の中心で比較したものです、中心の差は $400\ \mu\text{m}$ でした。光学密度の中心を、原子を開放してからの時間に沿ってプロットしたものが次の図 2 で、赤い点が光双極子トラップ用のレーザーを入れたもの、青い点が入れなかったもの、黄色い点は自由落下の計算値です。このグラフから原子をただ MOT から開放すると自由落下することが分かります。また、レーザーを入れた場合、途中から落下距離に差が出ていることから、光双極子トラップ用のレーザーが MOT の中心からやや下に当たっていること、レーザーが原子を減速または一時的なトラップの効果しかもたらさなかったことがうかがえます。原子を完全にトラップできなかった原因としては、原子の温度が高かったか、レーザーのパワーが足りずに原子をトラップするだけのポテンシャルが得られなかったなどの理由が考えられます。実験で用いる AOM には回折効率などもあるので原子に当たっているときには 10W のパワーが得られないということも十分に考えられますが、偏光勾配冷却でしっかり冷却されていればかなり低温になるはずなので偏光勾配冷却がしっかりかからなかった、というのも原因の一つになっていると考えられます。

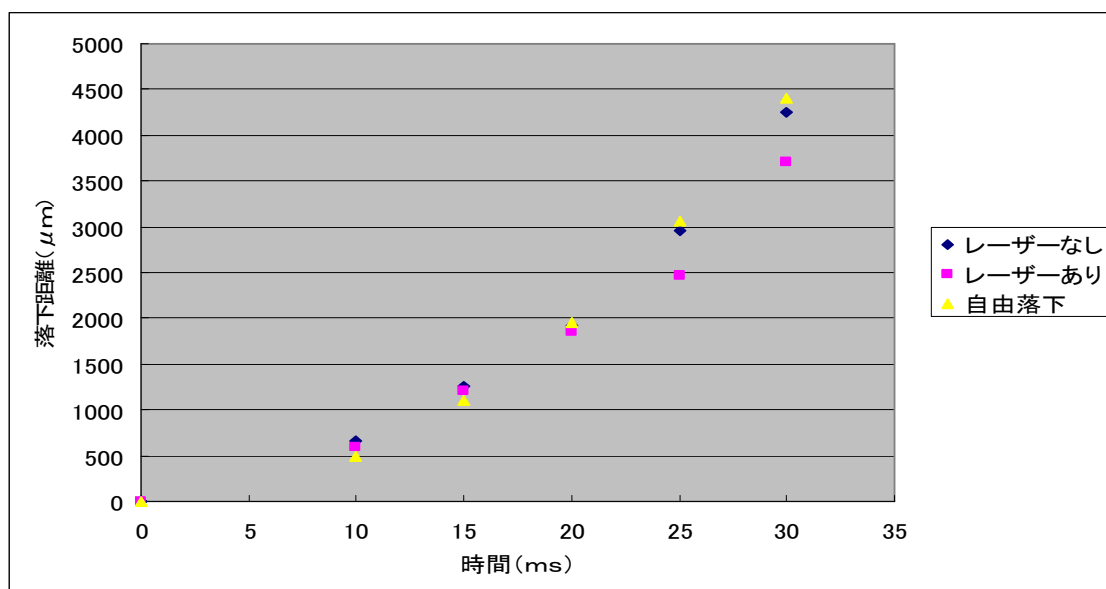
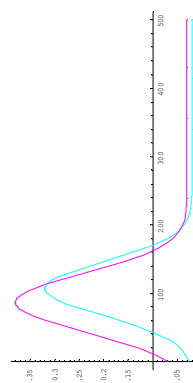


図 2. 原子を開放してからの時間と落下距離の比較

<今後の課題>

ポテンシャルを深くすることで光双極子トラップされやすい状況になります。それには、よりパワーの強いレーザーを用いることでより深いポテンシャルを得ることによりトラップできるはずです。今後は、実際に自分でファイバー融着したもので

すが、そのレーザーでは最大約 19W のパワー出るのでそのレーザーを用いて光双極子トラップの実験をしようと考えています。ちなみに、同じ波長、ビーム径で 19W のときに得られるポテンシャルは約 $700\ \mu\text{K}$ です。また、偏光勾配冷却に少し重ねるようにして光双極子トラップ用のレーザーを当てるとき、重ねる時間を短くするだけでも変化があるようなので、今回の実験では 0.5ms 重ねたのですが、重ねる時間をより短くして実験してみようと考えています。

<参考文献>

中川 悠輔 修士論文「単一原子トラップを用いた原子操作」