## 拡散レーザー冷却に用いる散乱体の評価と温度測定法に関する研究

岸本研究室 1910390 武澤淳之介

#### 1. 研究背景・目的

原子を冷却してトラップするに当たり、有用とされる方法の 1つは磁気光学トラップ(MOT)である。MOT は、対向させた 円偏光レーザー光と一対のコイルに逆向きに電流を流して不均 一磁場を作ることによって中心へと向かう輻射圧を生み出し原 子を冷却・トラップする方法である。一般的に、この方法は6 本のレーザー光の偏光および強度バランスと磁場勾配や地磁気 補正を要する等、複雑な調整を伴う。一方、最近、十分小さ い磁場環境下において拡散光のみを利用して原子を冷却する

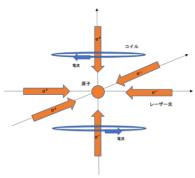


図1 磁気光学トラップ概要図

ことが可能な拡散レーザー冷却(DLC)の実現と応用が複数報告されてきている[1][2][3]。この手法は、偏光や光強度バランスの繊細な調整を要しないため、より簡便な冷却技術の一つとなるが、トラップを形成できるわけではないため、この手法単体では捕縛までには至らない。そこで、この DLC 法を用いた原子の新たな冷却・トラップの組み合わせ方法を模索することが最終的な目的となる。

また、今回の研究では、まずこの拡散レーザー冷却で不可欠となる重要な構成要素のうち、使 用を検討している反射型拡散シートの評価を行うこととした。

# 2. 拡散レーザー冷却(DLC)装置

拡散レーザー冷却(DLC)装置は、高い反射率で乱反射がおきる表面間を複数回乱反射することを利用して、原子が拡散光の中で極低温までレーザー冷却する装置である。このDLC装置で用いる拡散材料で重要となる要素は大きく3つある。1つ目は、装置をコーティングする拡散媒質の拡散反射率の高さ。2つ目は、装置内部において拡散多重反射から均質な拡散光の内部状態を形成できるくらいの拡散角度の広さ。3つ目が、内部から光が漏れないような装置自体の密閉性の高さである。今回、DLC装置を作成するにあたって使用を検討しているのが

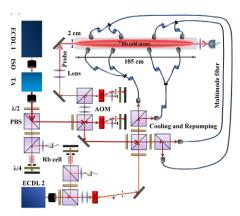


図 2 先行研究における DLC 装置[1]

PMR10P1 -ポリテトラフルオロエチレン拡散反射シート(以下拡散シート)であり、裏面がシールのようになっているため、真空ガラスセルをコーティングして密閉性の高い DLC 装置の作成できると考えている。それにあたり、事前にこの反射型拡散シートについて 780nm 光源を用いて実際に拡散角度の広さ、反射率の高さについて測定を行った。

#### 3. 反射型拡散シートの拡散特性測定

反射型拡散シートに関しての測定は図3,4の形で行なった。スクリーンの小さな穴から光を通

して、図3のイメージ(オレンジの円)のように拡散シートからの反射光をスクリーン裏面からカメラで撮影して画像解析を行なった。スクリーンには撮影した画像の pixel を mm に変換する基準として方眼紙を用いた。図4は図3の設定の拡散シートに替えて、ミラーとレンズの組み合わせを利用し、ミラーからの反射光の広がり分布が拡散シートの時と同程度の広がりでスクリーンに映るように配置した。

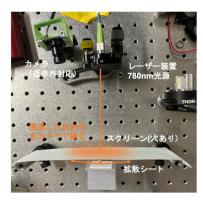


図3 反射型拡散シートの拡散角度の 測定のための光学系の例

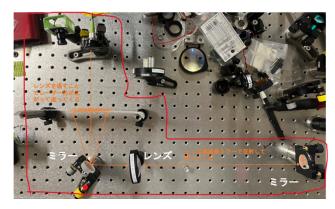


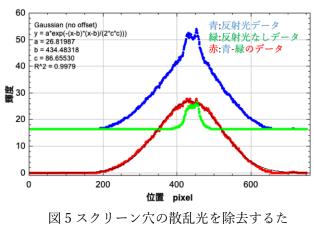
図4 拡散シートの反射率の測定

## 測定した項目は、

- ① スクリーンとシート間の距離を変化させて拡散角度を求める測定
- ② スクリーンとシート間の距離が一定な条件で、拡散シートからの反射光のピーク値と $e^{-2}$ 半幅の入射レーザーパワー依存性を測定
- ③ 図4の設定で、ミラーからの反射光のピーク値と $e^{-2}$ 半幅の入射レーザーパワー依存性を測定
- ④ 拡散シートの反射率の測定(ミラーからの反射光と拡散反射光を比較して算出)の4つである。
- ②、③の測定は観測スクリーンの厚みから入射光パワーによっては拡散シートからの反射光が弱い部分でスクリーン裏面まで透過しきらずに裏面からの観測時に幅等の見積もりを誤る可能性があるため、画像解析からの結果と入射光パワーの関係を調べ、十分入射光パワー依存性が引きくなる条件で④の反射率測定を行う際に必要となる値を得た。また、画像解析の際は、入射光レーザーがスクリーン穴を透過時に穴の淵に生じる散乱光による影響を押させるため、拡散シートからの反射光の画像とミラーによる反射をさせた時の画像から、反射体(拡散シート、ミラー)がない入射光だけが透過する時の画像を差引いた。

#### 4. 拡散シートの測定結果

これらの測定では画像解析の結果から以下の図5のように反射光と反射光が返ってこない場合の データを差し引きすることによって反射光がガウシアン分布ととることがわかった。図5で、青 は入射光が穴の淵で散乱している影響が残っている反射光のプロット、緑が反射体なしの場合の プロット、赤が青から緑を引いたプロットであり、この赤のデータを図中の関数でフィッティン グしたデータを使用した。



めの画像解析例

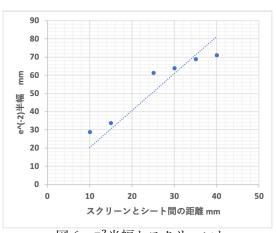


図 6  $e^{-2}$ 半幅とスクリーンと シート間の距離依存性

①の測定から、スクリーンとシート間の距離に対して $e^{-2}$ 半幅は図6のようになった。このデー タに対する近似直線の傾きから半幅拡散角度は約64度という結果を得られた。ここから十分な 強度の拡散光が広く拡散反射していることを確認できた。②と③の測定では、どちらの場合にお いてもレーザー光の出力と反射光のピーク値はほぼ線形の形を持つことが確認できた。また、 e-2半幅に関しては理想的には出力に関わらず横ばいになることが予想されたが、実際には低い 出力時から強い出力に変化するにあたって飽和していく傾向が見られた。これは、特に低出力の 場合、スクリーン裏面を通して拡散光を観測する際に、ピークからある程度離れた距離での拡散 光強度が弱くなりすぎて、カメラの観測閾値以下となって幅が小さくなることが原因と考えられ た。以下が出力と $e^{-2}$ 半幅の関係を調べた結果である。

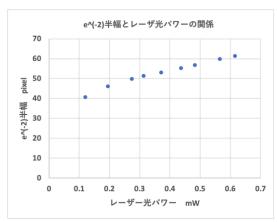


図7 拡散シートからの反射光の e-2半幅と出力の関係

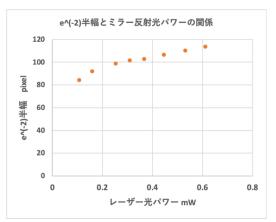


図8 ミラーからの反射光の e-2半幅と出力の関係

このことから、④における反射率の測定の際に拡散反射光とミラーからの反射光を比較する際 に、観測スクリーンの透過閾値の条件を揃えるために、拡散シートからの拡散反射ビームとミラ ーからの反射ビームのe<sup>-2</sup>半幅がほぼ等しくなるようにした。また、その時のレーザー光の出力 は図7から0.500mW以上は必要と考えた。実際に測定した時は、レーザー光の電流値を固定し

て出力を約0.520mW で測定を行ったため、図8から0.520mW の際に $e^{-2}$ 半幅がどの程度になるかを読み取って予め求めておいた拡散角度から拡散反射光測定時のスクリーン-拡散シート間の距離を計算して約7mm の位置に設定して測定した。この測定の結果、反射率は約92%と求めることができた。

## 5. 温度評価法についての検討

DLC の特徴として冷却された原子は全体的に分布する。そのため、飛行時間撮像法といった 方法のように単純にトラップから解放して全体の原子集団の広がりから速度分布の広がりを測る 方法をとることは困難である。そこで、DLC 装置を実際に使用した際の原子の冷却温度の評価 方法は以下の図のようなものを検討している。

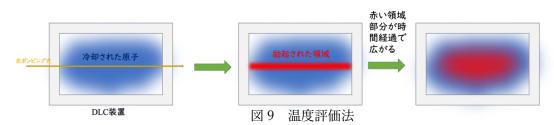


図9のようにまず DLC 装置内の冷却された原子集団に対して、ある領域のみに光ポンピング光を差し込んで、その特定領域のみを励起させ特定の内部状態(図7中の赤い領域)に移す。その後、その特定の内部状態にある狭い領域の原子集団がマクスウェル・ボルツマン分布に従って時間経過で内部に広がっていく様子を観察して間接的に温度を評価する。

## 6. まとめと今後の展望

本研究は DLC 法を用いた原子の新たな冷却・トラップの組み合わせ方法を模索することが最終的な目的となり、その準備段階として装置作成に使用を検討している拡散反射シートに関しての拡散角度と反射率について測定を行った。その結果、拡散シートの拡散角度はe-2半幅に対して約64度であり、反射率は約92%と求められた。この反射率の場合、DLC 装置内部においてレーザー光が9回反射された時点で強度が半分程度に落ち込み、先行研究[1]における反射率約98%の場合の35回に比べ強度が落ち込むのは早く、冷却効率に関して悪くなることが予想されるが、今後実際にDLC 装置に使用してこの反射率の有用性を評価する予定である。今回、反射光に対して観測スクリーンの影響が想像以上に多かったことから観測スクリーンを現在のものよりも薄いものに変更して同様の実験を行なって今回の結果と比較してより正確なデータを得ること、冷却用の光源、拡散レーザー冷却装置の開発、開発後に実際に冷却を行なってその冷却温度の評価をすることが今後の展望となる。

## 参考文献

- [1] J.-Y. Wan et al. Quasi-one-dimensional diffuse laser cooling of atoms. Physical Review A, 105, 033110, 2022.
- [2] P. Liu et al. Scheme for a compact cold-atom clock based on diffuse laser cooling in a cylindrical cavity. Physical Review A, 92, 062101, 2015.
- [3] Y.-L. Meng et al. Satellite-borne atomic clock based on diffuse laser-cooled atoms. Frontiers in Physics, 10, 985586, 2022.