

空間光変調器を用いた 無欠損な原子アレイの作成方法の開発

中川研究室 吉田 佑策

1 序論

近年、中性原子やイオン、光の量子状態を制御することによる新しい基盤技術の実現に向けた研究が行われている。量子シミュレータは量子情報処理技術の1つであり、超伝導体や磁性体などの制御が難しい量子多体系の特異なふるまいを、レーザー冷却された中性原子などの制御可能な別の量子多体系で模倣し、実験的にシミュレーションを行うことによってもとの系での量子状態の解析を行うものである。

我々の研究室では、中性原子である Rb の、Rydberg 状態を用いて原子間に相関を持たせることで制御可能な量子多体系を構成し量子シミュレータの開発を行っている。これまでの研究[1]では6個の原子を正六角形状に配置し、その量子もつれ状態の時間発展の様子の観測に成功している。より複雑な系の解析を行うためにはより多数の単一原子を用いて原子アレイを構成する必要があるが、赤方離調光による光誘起衝突によって光マイクロトラップアレイの1つのトラップ光に単一原子がトラップされる確率は最大で50%である。構成する原子アレイのトラップの数 N の増加に伴って、そのすべてに単一原子がローディングされる確率は $(0.5)^N$ となり指数関数的に減少をしてしまう。このようなトラップの充填確率の低下に対して、一度大量かつランダムにトラ

ップを行った後にトラップされている原子を並び替えて欠損しているトラップの位置に再配置し、目的の配置での原子アレイを形成する手法が注目されている。しかし先行研究[2][3]のような手法を我々の研究室で行うためには、主に機材的な面とプログラムの面で準備が足りていないため、実践することができない。そこで現在の我々の研究室の設備でも行うことができるような並び替えによる再配置の手法を新しく考案することを目標に研究を行った。

2 空間光変調器について

光マイクロトラップアレイの形成には空間光変調器 (SLM) を用いる。本実験で用いた LCOS-SLM (Liquid Crystal On Silicon-Spatial Light Modulator) では、図1に示すようにシリコン基板に形成された CMOS アクティブマトリクス回路上の画素電極に電圧を印加することで液晶層中の液晶の配向を SLM のピクセル単位で制御し、屈折率の変化によって入射される光に位相変化を与えることができる。SLM によって変調された光に対して、レンズのフーリエ変換作用によって、レンズの後焦点面に任意の光強度分布を形成することができる。

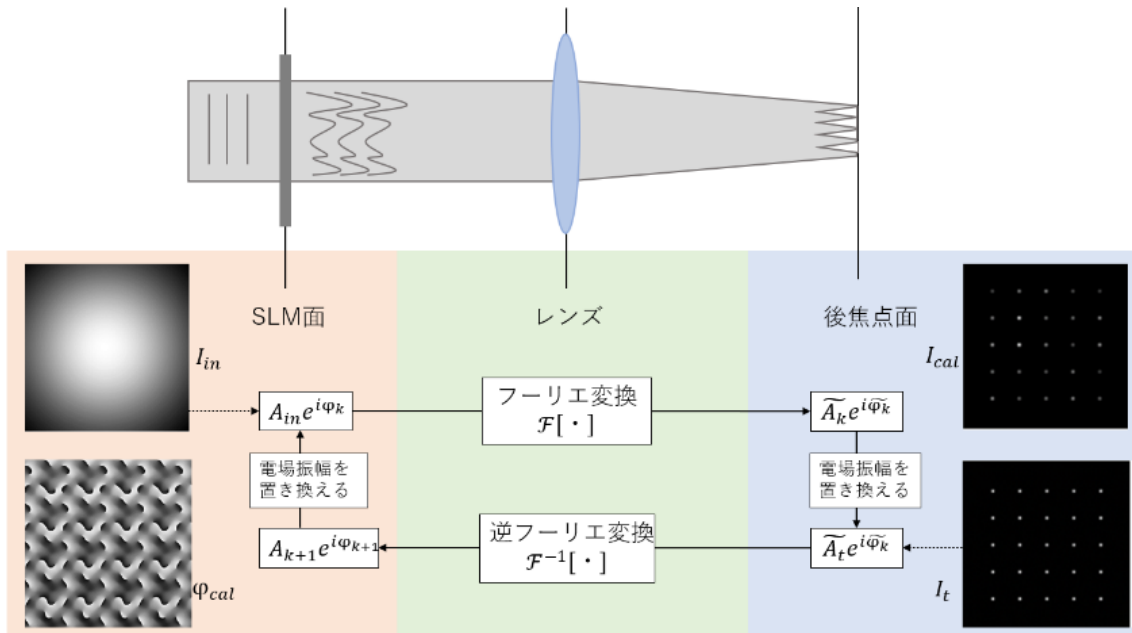


図1 GS アルゴリズムのブロック図

本研究ではGS (Gerchberg-Saxton) アルゴリズムと呼ばれる反復型の位相最適化アルゴリズムを用いてSLMに実装する位相ホログラムを求めた。SLMへの入射電場振幅 $A_{in} \propto \sqrt{I_t}$ とランダムな初期位相 φ_0 に対して、図1に示すようにフーリエ変換と電場振幅の置き換えを繰り返すことで、計算によって得られる光強度分布と目的の光強度分布が一致するような位相ホログラム φ_{cal} を求めるのがこのアルゴリズムによる計算のゴールである。これまでの研究で用いられていたGSアルゴリズムの計算プログラムのパラメータを、今回新調したSLMであるSmall 512×512 Spatial Light Modulator (ODP512-785, meadowlark optics社)のものに変更して図2のような位相ホログラムの計算を行った。また、計算で得られた位相ホログラムに、無変調の光と1次の回折光を分離するようなホログラムを足し合わせてSLMに実装し、図3

に示すように、レンズの焦点面で得られる光強度分布を、CCDカメラを用いて撮影した。なお撮影の際にGSアルゴリズムに入力した焦点距離のレンズを用いると、CCDカメラの分解能の都合で撮影が行えないため、25倍大きい焦点距離のレンズを用いることでスポット光半径、およびスポット光間隔を25倍に拡大して撮影を行った。これによってGSアルゴリズムの計算プログラムを用いて目的の光強度分布を得られるような位相ホログラムが求められていること、SLMがその位相ホログラムによって目的の光強度分布を無変調の光と分離した形で得られることの確認を行うことができた。

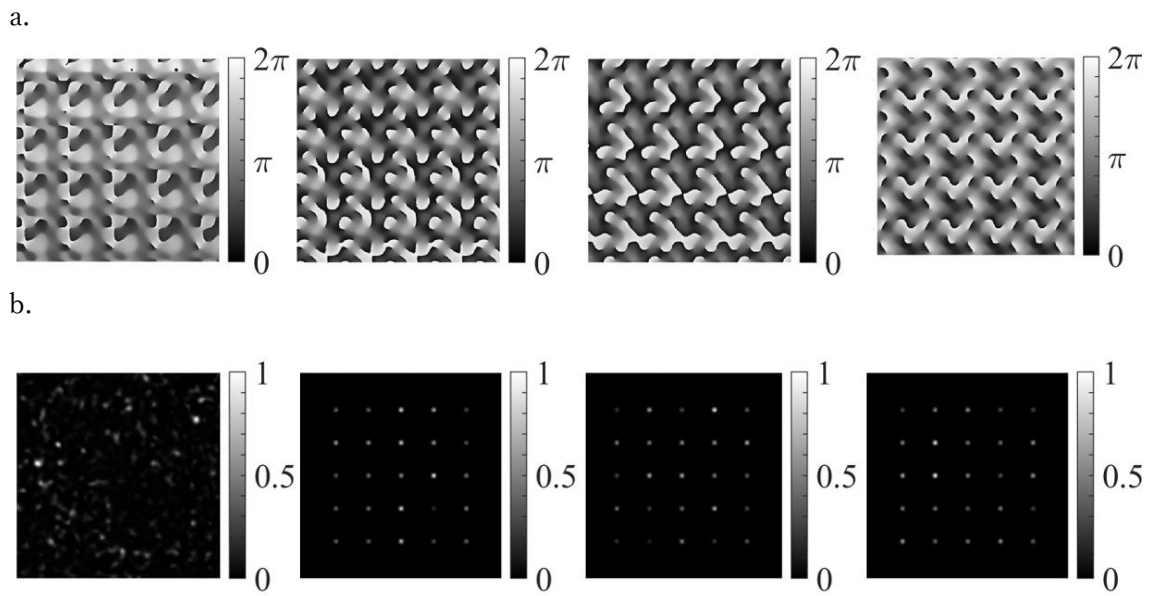


図2 GS アルゴリズムによる計算（左から反復回数 1、10、20、100）

a. 計算によって得られた位相ホログラム

b. 計算機で得られた焦点面での光強度分布

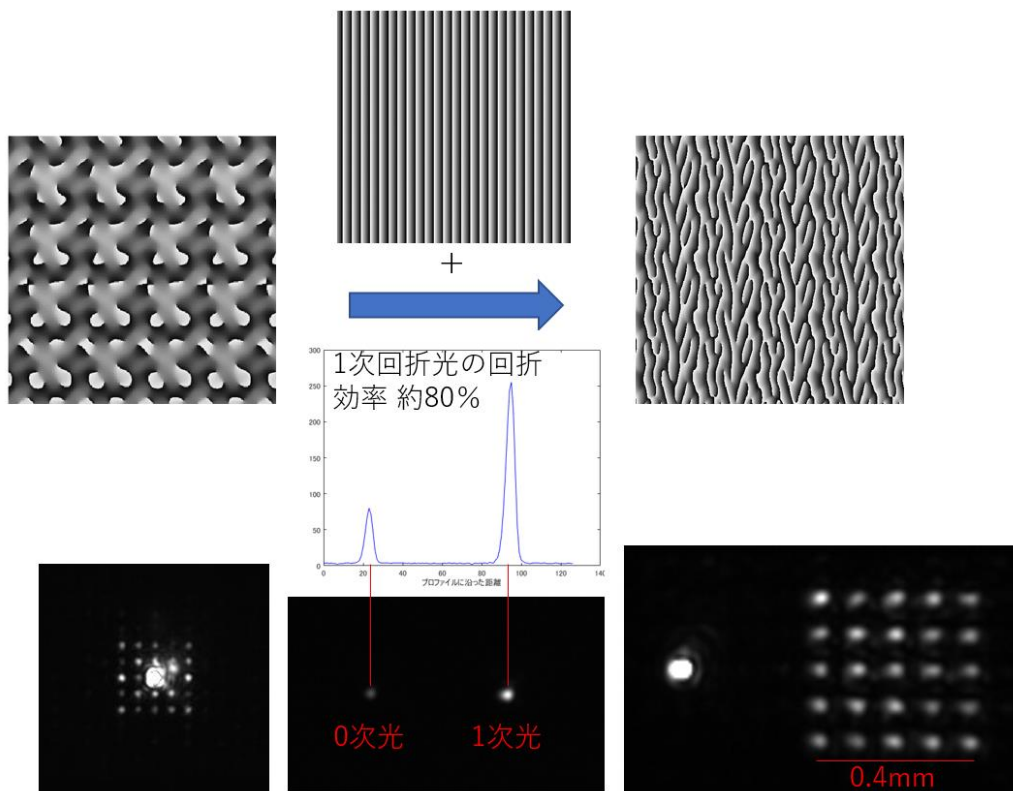


図3 SLM に実装した位相ホログラムとカメラで観測した光強度分布

3 考案した並び替えの方法について

ここでは考案した SLM で形成される光マイクロトラップアレイを動かして 7×7 の正方格子中に1つのスポットあたり50%でランダムに充填される単一原子から、 5×5 の正方格子状の無欠損な原子アレイへと再配置する手法について述べる。この手法の特徴は

- ・複数の領域に分割することで、SLMによる原子操作の特徴である複数の原子を同時に操作できることを活かしたもの
- ・さらに並び替え動作を行う領域を分割して制限することで、必要となる動作パターン数を少なくし、あらかじめ動作パターンに対応する位相ホログラムを用意することで、オンタイムでの高速な計算を省略したもの

であることが挙げられる。

まず図4に示すように、3個のトラップの組で並び替え動作を行う領域を分割する。各々の領域は目的の 5×5 の正方格子の内側と外側で接続されており、外側にある原子を内側に移動させることで 5×5 の正方格子を充填させる。分割した領域について見ると、L字型のものとI字型のものが存在しており、それぞれ最初の充填状況として原子がL字型のものについては1個以上、I字型のものについては2個以上充填されていれば 5×5 の正方格子を充填させることができる。3個のトラップの組での最初の原子の充填状況は図5に示す8パターン存在している。8個あるL字型の領域全てで 5×5 の正方格子を充填させることができるような配置となる確率は約34%であり、8個あるI字型の領域全てについては約0.4%である。ここでI字型の

領域について、図6に示すようにその外側に1個確実に原子が用意できると仮定すると、 5×5 の正方格子を充填させることができる確率は向上し、8個のI字型の領域全てについて確率は約34%となる。正方格子中央の1つのスポットについては50%で充填されるものとする、全体で 5×5 の正方格子を充填させることができる確率は5.9%となる。

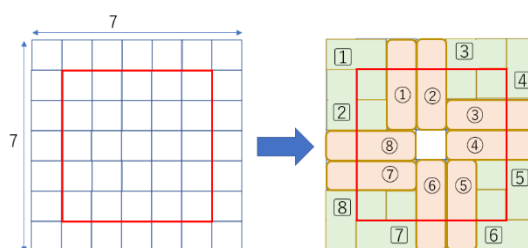


図4 3個のトラップの組への分割

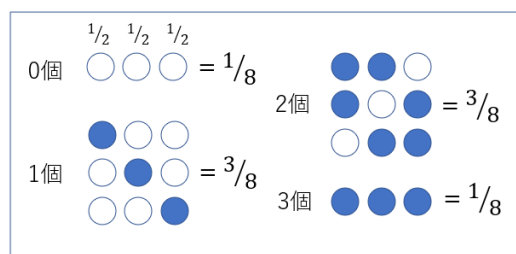


図5 3個のトラップ内の充填状況

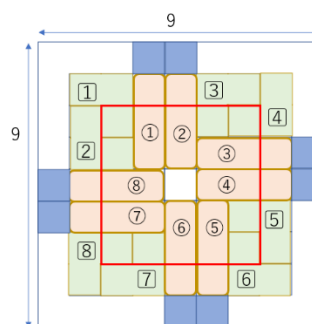


図6 I字型の外側に確実に原子を1個用意できるとした仮定での分割パターン

L字型、およびI字型の分割した領域について、各々動作パターンは図7に示すようにL字型3パターン、I字型6パターン存在している。ここで図8に示すような90度の回転対称である1/4の領域にさらに分割して動作させることを考える。各々の領域では最大で2スポット間の移動が必要となり、1スポット間の移動に対して位相プログラムを8枚切り替えるとする、1/4に分割せず16個の領域を同時に操作した場合では全体では $3^8 \times 6^8 \approx 11 \times 10^9$ のパターン数が存在しており、必要な位相プログラムのファイルサイズは約46PBとなる。それに対してこの1/4の分割を行うことで全体での動作パターンは $3^2 \times 6^2 \times 4 = 324 \times 4 = 1296$ パターンとなり、全体の動作に必要な位相プログラムのファイルサイズは約5.2GBとなり、例えばUSBメモリやHDDで予め用意しておくことが現実的な数値となる。なお位相プログラム1枚のファイルサイズは約260KBである。また、この1/4の分割を行った場合、SLMのリフレッシュレートが200Hz以上のため、全体の並び替えにかかる時間を見積ると約320msとなる。

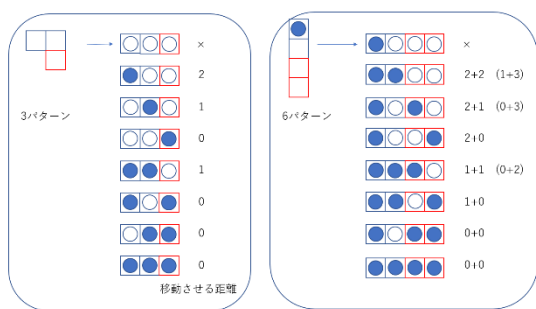


図7 L字型、I字型の領域での並び替え動作パターン

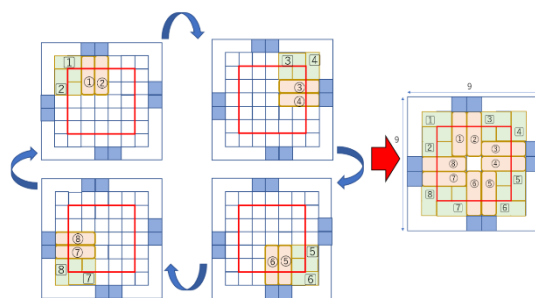


図8 1/4に分割した動作領域

この考案した並び替えによる再配置の方法について、その動作を行うプログラムを作成しシミュレーションを行った。まず50%の確率でランダムに充填される7×7の正方格子の初期配置から、考案した方法で5×5の無欠損な正方格子が作成できるかどうかを判断するプログラムを作成し10000回の動作を行ったところ、568回、確率にして5.68%で5×5の無欠損な正方格子への並び替えが行えると判断された。また、このプログラムを基にして、実際に並び替えを行うプログラムを作成し動作させたところ、並び替えが行えると判断された場合すべてで図9に示すような並び替えを行うことができた。

この方法の課題として、まずI字型の領域において確実に用意できると仮定した原子の用意をどのようにするかが挙げられる。例えば最外殻部だけで並び替えを行い充填させる方法が考えられるが、その並び替えに要する動作パターンや位相プログラム、時間を考慮しなければならなくなる。また5×5以上の大きさの原子アレイを目的とした場合には、今回のように3個のスポットの組では目的の配置の内部と外部で

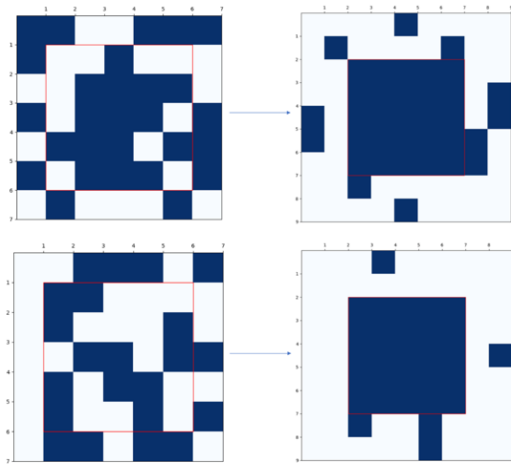
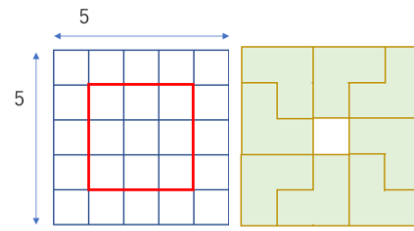


図9 計算機上での並び替えのシミュレーション

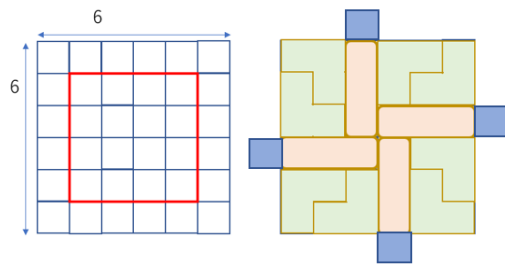
接続できないため、大きさに合わせて新たに組み合わせ方を考えなければならなくなる。逆に5×5より小さい正方格子状の配置を目的とした場合は図10に示すような分割による並び替えを適応できる。特に3×3の正方格子状の配置の場合、上述の問題となっているI字型の領域が存在しないため確率通りに無欠損な原子アレイを作成することができるのではないかと考えている。

4 まとめ

本研究では無欠損な原子アレイを作成する方法を新しく考案した。SLMの特徴である複数の原子を同時に操作可能である点と、動作する領域を制限することで必要な動作パターンを少なくし予め対応する位相ホログラムを用意できることがこの方法の特徴である。今後の展望として、実際に光学系で3×3の正方格子状の原子アレイの作成に取り組みたいと考えている。



$$3 \times 3 \text{の原子アレイ} : \left(\frac{7}{8}\right)^8 \times \frac{1}{2} \approx 17.2\%$$



$$4 \times 4 \text{の原子アレイ} : \left(\frac{7}{8}\right)^{12} \approx 20.1\%$$

図10 3×3、4×4の正方格子状の無欠損な原子アレイへの並び替え

参考文献

- [1]田村光『光マイクロトラップアレイ中の冷却リユードベリ原子を用いた量子シミュレータ』博士論文, 電気通信大学 (2018)
- [2]W. Lee et al. Phys. Rev. A 95, 053424 (2014)
- [3]K.N. Schymik et al. Phys. Rev. A 102, 063107 (2020)