

レーザー冷却原子の高分解能光学測定

High resolution optical measurement for laser cooled atom

中央大学大学院 理工学研究科 物理学専攻

学籍番号:13N2100009L

須永 裕司

1.研究背景および目的

微小空間の原子系を観測するにあたって、有力な方法の1つとしてレーザーによる冷却・捕獲がある。原子を人為的に操作および制御することが可能であり、局所的に多彩な現象を観測できる。原子光学（レーザー冷却原子）の分野では原子集団の振る舞いを観測するために、数 $10\mu\text{m}$ 程度の空間分解能がしばしば用いられる[1][2]。これにより、ボースアインシュタイン凝縮や原子波干渉といった現象の可視化が実現された。近年では分解能が $1\mu\text{m}$ 程度に到達する結像系を冷却原子と固体表面との相互作用を観測するため、 $1\mu\text{m}$ 以下の高空間分解能測定の実現と、時事刻々と変化するダイナミクス観測のため、高時間分解能の実現を目指す。

本研究では、その漸進として空間分解能においては擬似点光源を用いて設計した光学系に対しての原子集団輸送の輸送位置のシビアさや開口数の制約を実験的に検証することで実際に想定されうる分解能を見積もることと安定した高速連続撮影を実現することにある。

2.光学設計および空間分解能評価

原子集団のサンプルを覆っているガラスセルに付属している半球レンズを用いることで大きなNAをもった光学系を組み、回折限界程度まで解像度を上げることを目指し、その光学設計に取り組んだ。回折限界に依存するパラメータであるNAを大きくすることでより光を絞り込むことができるが、NAが大きいということはレンズに取り込む光の量（光束）も多くなるということである。これにより、懸念されるのが収差の影響である。単レンズで考えれば、レンズの外側にいけばいくほど中心との屈折する位置が変わってくるので球面収差がきいてくる。このように収差の補正はスポットサイズを小さくする上で必要不可欠である。そこでレンズのお皿が一定の曲率半径を持たない非球面レンズにより、収差を抑えることにした。



図1 既製品非球面レンズを用いた結像系の設計

非球面を設計するにあたって比較的安価なこともあり、参考の意味を込めて既製品の非球面レンズで結像系を設計およびシミュレーションして見た。非球面レンズでの入射面の収差が大きく、出射面での収差補正でも球面収差の影響が結像点で出てしまう。そこで可能な限り NA を小さくしていき、スポットサイズが原子間相互作用をはじめとするナノ空間領域の物理現象が見られるであろう $1\mu\text{m}$ 程度まで絞り込んでいくことにした。これにより $\text{NA}=0.493$ でスポットサイズ $9.248\mu\text{m}$ 、倍率 19.3 倍の光学系を実現できた。これは実質 $1\mu\text{m}$ 以下のものを捉えることができるレベルを達成できたことになる。既製品の非球面レンズでこのレベルの光学系を組むことができるのであれば、オリジナルの設計ではより高解像度の光学系を組むことが期待できる。



図 2 オリジナル非球面レンズを用いた結像系の設計

既製品での問題点である入射面の収差を面に曲率を持たせ、出射面の非球面で補正することで抑え込むことができた。これにより、 $\text{NA}=0.957$ でスポットサイズが $12.24\mu\text{m}$ 、倍率 17.6 倍の光学系実現できた。これは実質 $1\mu\text{m}$ 以下の解像度を達成できたことに相当する。また結像レンズを $f=300\text{mm}$ から $f=500\text{mm}$ に変えることで $\text{NA}=0.943$ でスポットサイズ $11.982\mu\text{m}$ 、倍率 32.2 倍を実現できた。これにより、実質ナノ空間レベルの解像度を達成できた。この非球面レンズを実験系に導入する前に既製品の非球面レンズで擬似的に性能を評価し、どの程度設計およびシミュレーションに信頼が持てるかを検証していく。

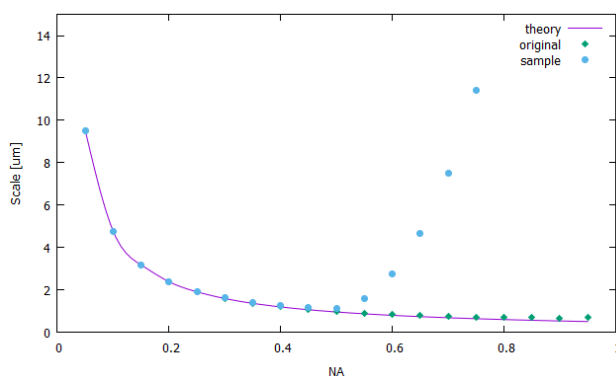


図 3 設計したレンズの分解能の NA 依存性

ピンホールを使い、擬似点光源を作り出すことでそれを原子集団の発光に見立て、どの程度の空間分解能を得られるかというのを仮想実験系で評価する。同時に既製品の非球面レンズで設計した光学系がどの程度の精度を発揮するか、それによってオリジナル品はどの程度であると見積もれるか、原子集団サイズに渡っての良好な分

解能と位置のズレの許容範囲を知るため視野範囲を評価した。実験方法としては基本的に光学設計ソフト ZEMAX によって設計およびシミュレーションした光学系をそのまま使うのだが、実際の実験系に即して鉛直に光路を組んでいる。ピンホールと非球面レンズは3軸ステージと2軸のあおりで自由度をもたせてあり、この2つでピントや視野をあわせこんでいく。また結像位置には CMOS カメラを置き、その撮像を解析することで評価していく。

結果、図5から視野 X（紙面に平行な方向）においてはぼけが最良 $3\mu\text{m}$ から $0.5\mu\text{m}$ 以内になる視野幅は最良位置から $\pm 0.5\text{mm}$ 程度、図6から視野 Y（紙面に垂直な方向）においても同条件で $\pm 0.3\text{mm}$ 程度であった。

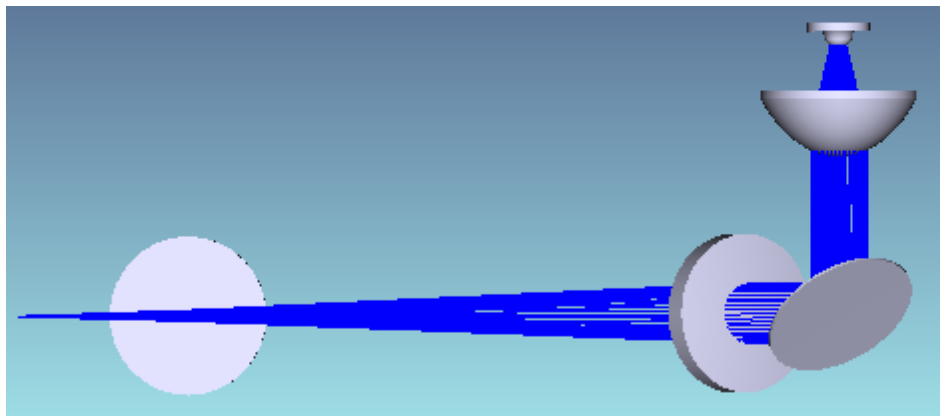


図4 作成した光学系

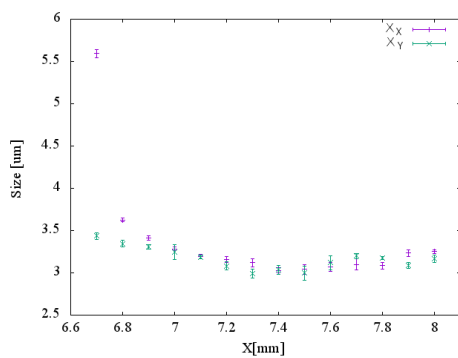


図5 視野 X 評価

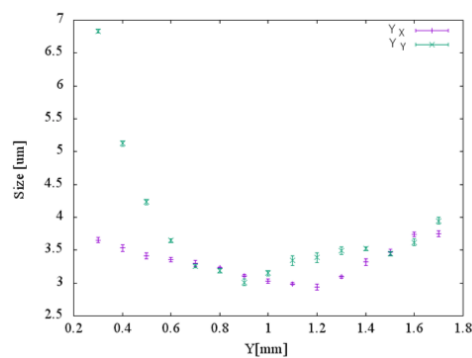


図6 視野 Y 評価

3.冷却原子生成過程

連続撮影を用いて MOT（磁気光学トラップ）の立ち上がり時間を評価することにした。MOT 生成開始と同時に撮影を開始することで生成過程を見ていく。EMCCD カメラ自体の設定は exposure time を 100ms で $32 \times 512\text{pixel}$ を 32 フレーム撮るので 3.2s の生成時間を見ることにした。

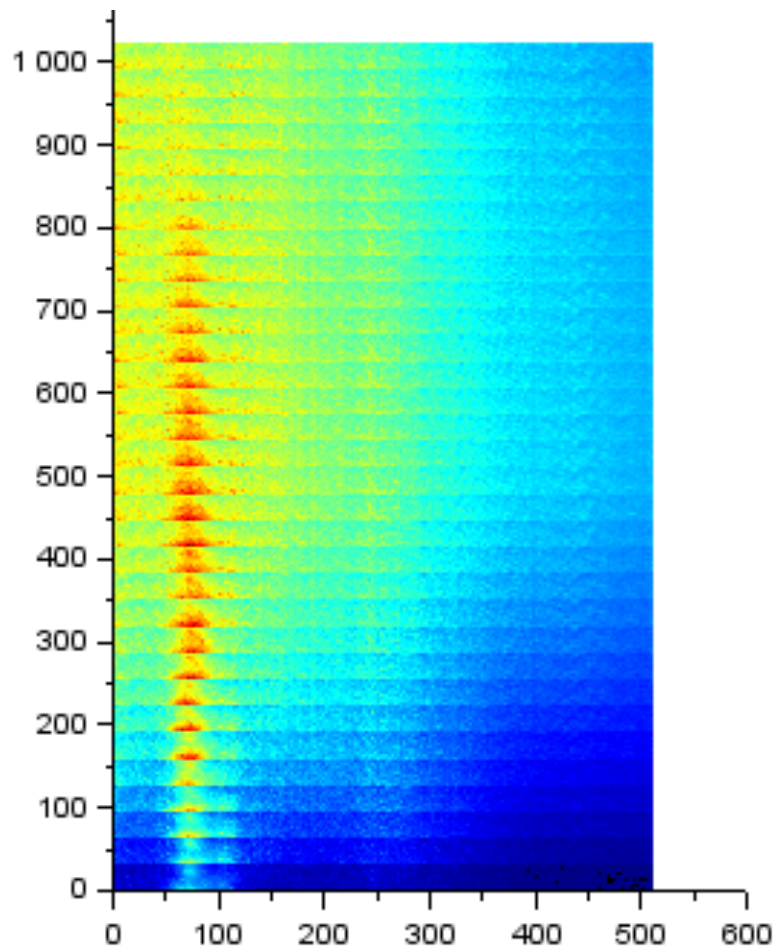


図7 MOT 立ち上がり連続撮影

図7は Kinetics mode で連続撮影したものを縦に貼り合わせたものである。注意しておきたいのが、一番下の縦32pixelが1フレーム目である。徐々に原子集団が増えていく過程が見られるが、途中から減っていつてしまう。これは何らかの原因でMOTが消失したと考えられる。

4.まとめ

空間分解能に関してはシミュレーション上ではあるものの、大きいNAで倍率を考慮した小さなスポットサイズを両立する設計ができた。

時間分解能ではEMCCDカメラで安定して撮影することができることを確認できた。

参考文献

- [1] W. S. Bakr, J.I. Gillen, A. Peng, S. Foelling, & M. Greiner, *Nature* **462**, 74-77 (2009).
- [2] W. S. Bakr et al., *Science* **329**, 547 (2010).