

# BEC のダイナミクスの実時間観測へ向けた 高分解能結像系の構築

量子・物質工学科 岸本研究室 林 鐘遠

## ・はじめに

本研究室では  $^{87}\text{Rb}$  の BEC (Bose-Einstein Condensate) 中に量子渦 (Quantum Vortex) を書き込み、個々の渦がからみ合ったり、交差したりするダイナミクスを実時間で観測することを目指している。この場合、各々の量子渦のダイナミクスを実時間で観測したいので結像系の分解能も BEC のみを観測する場合と比べて高いことが要求される。即ち、分解能がこの系で一番小さい構造である量子渦の芯のサイズスケールになっている必要がある。我々の実験においては装置の大きさの制約からレンズを物体から 5 cm 程度離れた位置に配置する。従って、本卒業研究では長作動距離 (5 cm 程度) で分解能  $1\mu\text{m}$  程度の高分解能を得るための結像系の構築を目的とした実験を行った。

## ・目指すサイズスケール

BEC のサイズスケールは大体トラップポテンシャルの形で決まり数~数十  $\mu\text{m}$  のオーダーで与えられる。しかし、目指すサイズスケールは上記に述べたように BEC ではなく渦芯の大きさのオーダーである必要があって渦芯の大きさは次式で与えられる BEC の回復長で決まる。

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{8\pi n_0 a}} \quad (1)$$

ここで、 $a$  は散乱長、 $n_0$  は BEC 密度のピーク値である。

典型的な  $^{87}\text{Rb}$  の BEC は散乱長と BEC 密度のピーク値がそれぞれ  $a = 5.29\text{nm}$ 、 $n_0 = 10^{12} \sim 10^{14}$  個/ $\text{cm}^3$  で与えられ式 (1) に代入すると回復長は  $\xi = 0.27 \sim 2.7\mu\text{m}$  のように計算される。従って、本卒業研究では  $1\mu\text{m}$  近傍の分解能達成を目指して実験を行った。

## ・分解能 (レイリーの判定基準)

分解能の定義は様々であってここでは 2 つの点光源を見分ける能力として考えてみる。今、円形開口 (穴の大きさは光の波長程度) と凸レンズ、CCD カメラで構成された簡単な結像系があるとすると、レンズで絞られた光を CCD カメラで観測すると下の図 1 のような回折パターンが見える。

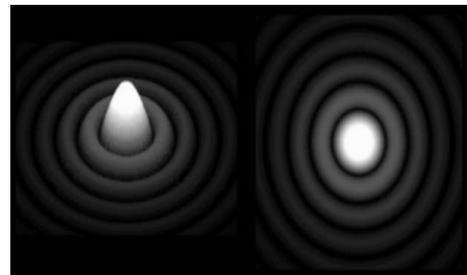


図 1. エアリーパターンの形状

([http://www.glafreniere.com/sa\\_Huygens.htm](http://www.glafreniere.com/sa_Huygens.htm))

それがエアリーパターン (Airy Pattern) であって真ん中の光が約 84% 集中している明るい領域はエアリーディスク (Airy Disk) と呼ばれる。その半径は強度がピークの所から初めてゼロに落ちる所までで下の式 (2) によって与えられる。

$$\varepsilon_0 = 0.61 \times \frac{\lambda}{NA} \quad (2)$$

ここで、 $\lambda$  は光の波長、 $NA$  はレンズの開口数である。

レイリーの判定基準では下の図 2 で示したように 2 つの点光源による 2 つのエアリーディスクがちょうどエアリーディスクの半径の分だけ離れた所を両方に区別がつく最短の距離であるとし分解能の限界を定義している。

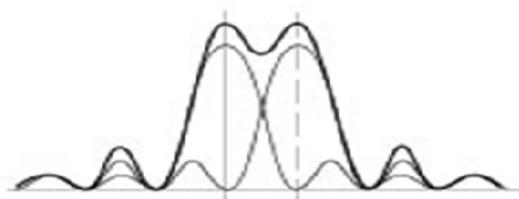


図 2. エアリーディスクの半径による分解能の定義

([http://www.glafreniere.com/sa\\_Huygens.htm](http://www.glafreniere.com/sa_Huygens.htm))

<http://microscopy.berkeley.edu/courses/TLM/optics/imaging.html>)

実際の実験では CCD カメラから得られた光の強度分布のデータを Excel でガウシアンフィッティングしその結果得られた強度分布が実際の光の強度分布と良く一致していることを用いて分解能を見積もった。次の図 3 に示された関係から  $1/e^2$  半径を求めそれに 1.49 をかけることによってエアリーディスク半径、即ちレイリーの判定基準による分解能を求めたのである。

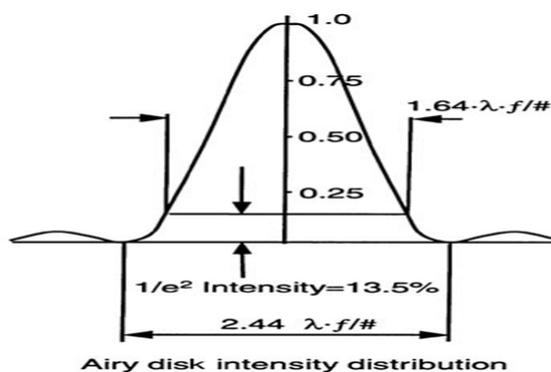


図 3.  $1/e^2$  半径とエアリーディスクの半径の関係

([http://www.mhprofessional.com/downloads/products/0071472487/0071472487\\_chap11.pdf](http://www.mhprofessional.com/downloads/products/0071472487/0071472487_chap11.pdf))

### ・実際の光学系

実際に BEC に書き込まれた量子渦を観測するための光学系の概略図を下に図 4 として示す。

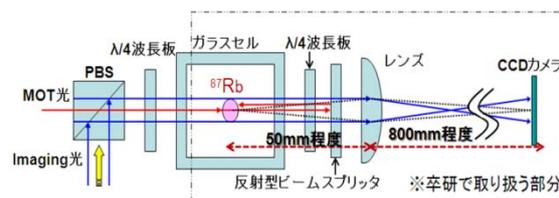


図 4. 実際の光学系の概略図

図から分かるように実際の光学系は PBS の代わりに反射型ビームスプリッターを用いてレンズとガラスセルの間の距離をなるべく短くしたがそれでも装置の大きさの制約により結像系は 50mm 程度の長作動距離を持つことになる。さらに、イメージング光の経路中には様々な光学素子が存在し、それらによる分解能への影響(悪化)を調べる必要がある。本実験ではレンズのみある理想の状況での分解能の評価とガラスセルおよび  $\lambda/4$  波長板挿入時のそれぞれの分解能への影響を調べてみた。

・実験での結像系

本実験での結像系を下の図5で示す。

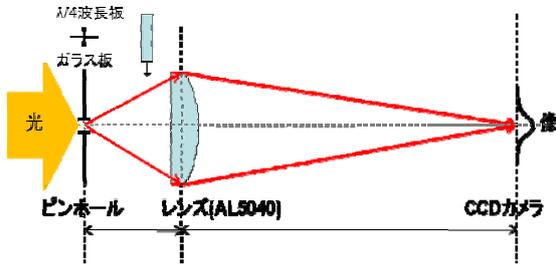


図5. 本実験での結像系の概略図

本実験ではThorlab社の型番AL5040のレンズ (NA=0.554、焦点距離=40.0mm) と穴の大きさが  $1\mu\text{m}$  (渦芯の大きさのオーダー) のピンホール、波長が  $780\text{nm}$  ( $^{87}\text{Rb}$  の共鳴周波数に相当) の光を用いて実験を行った。a と b はそれぞれおよそ  $42\text{mm}$ 、 $750\text{mm}$  で倍率は17程度であった。また、式(2)によるとレンズのみある場合の分解能の理論値は  $0.86\mu\text{m}$  である。

結像系を組む際には光が光軸からずれることによる収差の発生を認識しながら収差の発生による分解能への悪影響を最小化しようとした。

・レンズのみあった場合の分解能

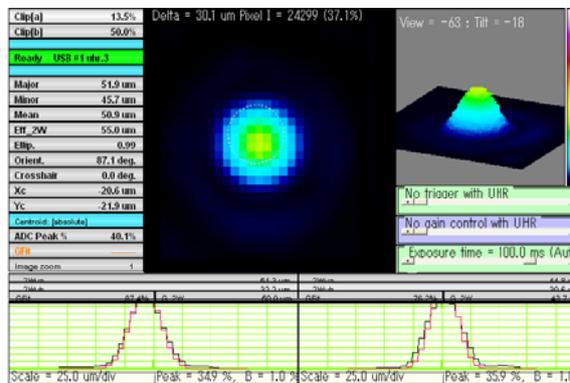


図6. レンズのみあった場合の CCD 画像

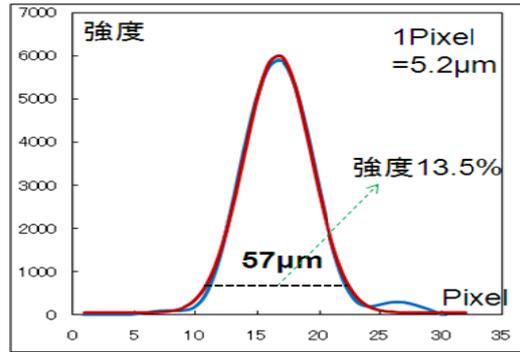


図7. レンズのみあった場合の強度分布データをガウシアンフィッティングした結果

図7から  $1/e^2$  半径は  $57\mu\text{m}$  であってそれを倍率で割り1.49倍するレンズのみある場合の分解能は  $2.5\mu\text{m}$  として求められた。

・ガラス板・λ/4波長板挿入の時

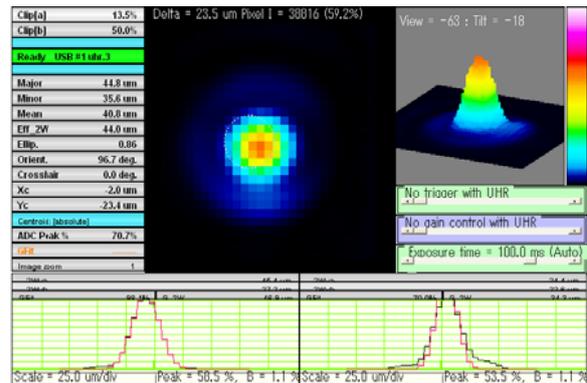


図8. ガラス板挿入時の CCD 画像

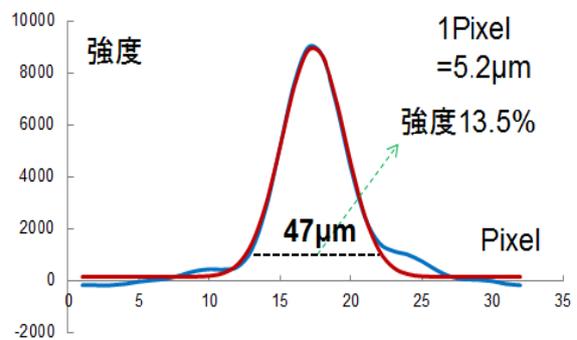


図9. ガラス板挿入時の強度分布データをガウシアンフィッティングした結果

図 9 から  $1/e^2$  半径は  $47\mu\text{m}$  であってそれを倍率で割り 1.49 倍するレンズのみある場合の分解能は  $2.1\mu\text{m}$  として求められた。

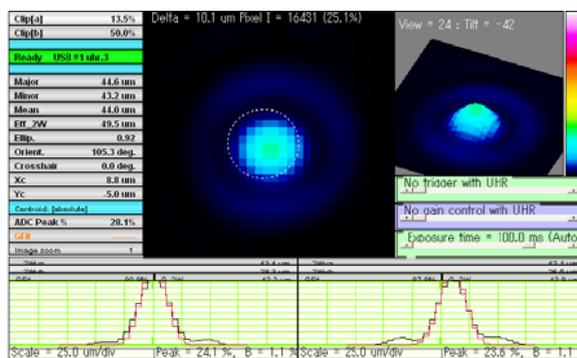


図 10. ガラス板と  $\lambda/4$  波長板を同時に挿入した時の CCD 画像

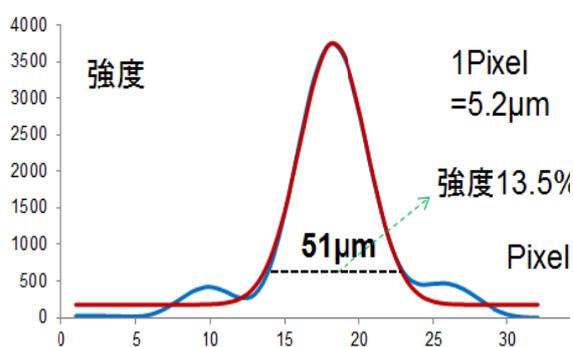


図 11. ガラス板と  $\lambda/4$  波長板を同時に挿入した時の強度分布データをガウシアンフィッティングした結果

図 11 から  $1/e^2$  半径は  $51\mu\text{m}$  であってそれを倍率で割り 1.49 倍するレンズのみある場合の分解能は  $2.2\mu\text{m}$  として求められた。

### ・結論

ガラス板と  $\lambda/4$  波長板をレンズの前に挿入すると分解能が悪くなると予想したが、実験では分解能が良くなったという結果が得られている。しかし  $2\sim 3\mu\text{m}$  程度の分解

能は渦芯の大きさのオーダーであって量子渦のダイナミクスを観測するには十分な値である。従って、本実験の最大の目的であった渦芯の大きさのオーダーの分解能の達成はできたと考えられる。

レンズのみあった場合の分解能がガラス板と  $\lambda/4$  波長板を挿入した時と比べて悪いことが気になるが、その原因は微調整の不手際にあったと考えられる。実際にピンホール以外の光学素子はマイクロメーターを使わずに手で制御を行ったためその精密さが悪かった。レンズのみあった場合に光学素子の微調整により時間を払ってあれば  $2.5\mu\text{m}$  より良い分解能が得られるはずであったと考えられる。

### ・今後の課題

マイクロメーターなどを用いて光学素子の垂直方向の角度制御の精密さを向上し収差の発生を最小化した後  $1\mu\text{m}$  近傍の分解能を達成することを目指す。さらに、本実験で評価できなかった反射型ビームスプリッタによる分解能への影響も調べる必要がある。また、実際の実験系に本実験で用いた結像系を組み込み、実際に分解能が渦芯のサイズスケールまで達成可能であるかどうかを確認する必要もある。