

# 光格子中の BEC 原子を用いた原子数スクイーズド状態の生成

量子物質工学専攻 中川研究室 豊永匡利

## [背景]

近年、ボーズ凝縮体を用いて原子干渉計を構成し万有引力定数の精密測定に向けた高精度な原子干渉計に関する研究も盛んに行われている。BEC 干渉計の分野では如何にして干渉フリンジのコントラスト低下を防ぎ、高感度、高精度な BEC 干渉計を実現するかという取り組みが盛んに行われている。しかし、高感度、高精度な原子干渉計を構成するためには数多くの問題が存在する。それらは実験を行う光学系のレンズ、ミラーの振動、レーザー強度や周波数のゆらぎ、少ない相互作用時間、原子数揺らぎに起因する原子間相互作用による位相拡散などである。これらの要因の中で光学系の振動やレーザーの揺らぎなどは近年のエレクトロニクス発展の恩恵を受け解決しつつあり、また相互作用時間の増大に関する問題も原子を噴水のように打ち上げる Atomic Fountain と呼ばれる手法を用いるなどさまざまな提案、実験が行われている。さらに原子数スクイージングによる原子数の揺らぎの抑制により精度向上を目指す試みは、原子間相互作用による位相拡散を低減する目的で、干渉計内で分かれた BEC 群間の原子数揺らぎをコヒーレント状態での量子雑音限界以下まで圧縮して原子干渉計の精度向上を目指そうとしているものである。

## [本研究の目的]

当初の本研究の本来の目的は光格子を用いて BEC 原子をトラップ、操作し各サイト間の BEC 原子の個数揺らぎをコヒーレント状態の量子雑音限界以下まで圧縮する原子数スクイーズド状態の生成である。長期的な目標は高精度な BEC 干渉計の構築である。しかし光格子に用いる FORT 光学系の設計、セットアップを行い、光格子に BEC をローディングする前段階として BEC の光双極子トラップに向けたアライメントを行っていた所、予想に反した BEC の回折を観測した。これは当初、状況から単純なブラッグ回折によるものでもなく反跳によるものではないと思われた。この振舞いは BEC 干渉計を構成する新たな光のミラーとスプリッターとなりうる可能性があると感じ大変興味深く感じたので、本来の本研究の目的とは外れてしまうがこの BEC の回折の究明もあわせて本研究の目的とした。

## [光双極子トラップ]

光双極子トラップとは中性原子が電場中で分極を起こすことによりポテンシャルがシフト(ライトシフト)する現象を利用したものである。光双極子ポテンシャル  $U_{dip}(r)$  と散乱レート  $\Gamma_{sc}(r)$  は次式で表される。

$$U_{DIP}(r) = \frac{3\pi c^2}{2\omega_0^3} \left( \frac{\gamma}{\omega_0 - \omega} \right) + \left( \frac{\gamma}{\omega_0 + \omega} \right) \approx \frac{3\pi c^2}{2\omega_0^3} \frac{\Gamma}{\Delta} I(r) \quad (1)$$

$$\Gamma_{sc}(r) = \frac{3\pi c^2}{2\hbar\omega_0^3} \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^3 \left( \frac{\gamma}{\omega_0 - \omega} \right) + \left( \frac{\gamma}{\omega_0 + \omega} \right) \approx \frac{3\pi c^2}{2\hbar\omega_0^3} \left( \frac{\Gamma}{\Delta} \right)^2 I(r) \quad (2)$$

光双極子ポテンシャル  $U_{dip}(r)$  はレーザーの強度  $I(r)$  に比例して、レーザーの離調  $\Delta$  に反比例するのでポテンシャルの深さを大きくする場合はレーザーの強度を強くして離調を小さくとれば良い。しかし、(2)式より散乱レート  $\Gamma_{sc}$  はレーザーの強度  $I(r)$  に比例してレーザーの離調  $\Delta$  の 2 次で反比例するので、原子の寿命を長くしたいと考えるならばレーザーの強度を弱めて、離調を大きく取れば良い。そのため効率の良いトラップのためには一般的に散乱レートはレーザーの離調の 2 次で効いてきてしまうので離調は大きくとり、レーザーの強度はポテンシャルを深くするために強い状態にする。

また、(2)式より光双極子ポテンシャルは離調を正に取るか、負に取るかに依存している。青方離調 ( $\Delta > 0$ ) の場合はポテンシャルは正になりシフトし、赤方離調 ( $\Delta < 0$ ) の場合はポテンシャルは負になりシフトする。離調を負にとった場合、ビーム強度の極大点にポテンシャルの極小点ができることからレンズでビームを集光

するだけで容易に双極子トラップポテンシャルを用意することができる。

実際の実験系でこの原子数スクイーズド状態の生成を行うためには何らかの操作により BEC を断熱的に分割しなければならない。実験ではその分割された BEC 原子数のゆらぎをコヒーレント状態の量子雑音限界以下まで圧縮する。手法はセットアップの比較的簡単な 1 次元光定在波によるマルチウェルポテンシャルを用いることとした。(図 1)

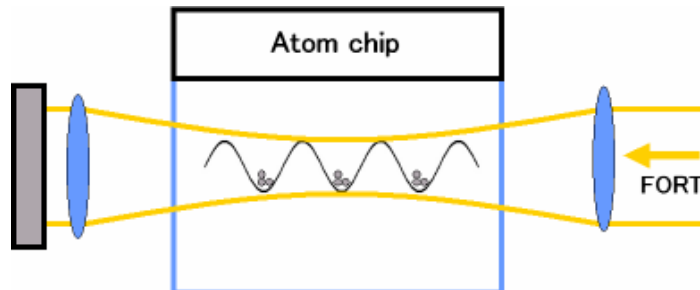


図 1: 1 次元光定在波による原子数スクイーズド状態

[実験装置]

・ BEC 生成装置

この装置は既に卒業された先輩の装置を利用させていただいているのでここでは簡単に述べる。BEC の生成はアトムチップを用いて行っている。生成手順はまず初めに MOT にて 1s~3s かけて  $10^7$  個の  $^{87}\text{Rb}$  原子を集める。次にコイルによる磁場トラップを行いアトムチップ近傍へ原子を輸送し、アトムチップのワイヤートラップにて原子をローディングする。最後に 0.4s~4s かけて蒸発冷却を行い、最大  $2 \times 10^4$  の BEC を生成する。1 サイクル 5s 程度と、実験サイクルがとても早いので効率の良い実験が可能である。

・光格子を用いた BEC トラップ装置

光格子を構成するために、実験機器の性能の制約、実験に必要なポテンシャルエネルギー等の条件を考慮し光学系を設計した。双極子トラップ用の光学系には波長 1552nm の半導体レーザーをファイバーアンプにて最大 2W まで増幅したものを使用している。また、光格子を断熱的に立ち上げることによってスクイーディングを起こさせるためにレーザーの強度を制御させるための AOM を使用した。これは  $2w_0 = 400\mu\text{m}$ 、RF : 111MHz の時、回折効率は 59%であった。アイソレーターの透過効率は 90%であり、最終的に利用できるレーザーパワーは 1.06W であった。

次に、実験に必要なポテンシャルエネルギー深さを見積もった。光格子による原子数スクイーディングを行う際、十分に原子の隣接サイトへのトンネリングが起こらなければならない。この条件は一つの目安として、BEC の温度  $\approx$  ポテンシャルエネルギーの換算温度と考えられる。また原子のトンネリング時との比較対象のため well ポテンシャルの壁が絶縁体となっている状態もあったほうが好ましい。よって条件は式(3)とし、ポテンシャルエネルギー ( $k_B / U_{dip}$ ) の目標値は  $10\mu\text{K}$  とした。

$$\sim 3\mu\text{K} \leq k_B / U_{dip} \tag{3}$$

これらの条件を元に実験に必要な FORT のビームウェスト  $\omega_0$  を求めた結果、十分なポテンシャルで BEC を双極子トラップするためにはビームウェスト  $\omega_0$  が  $\omega_0 = 90\mu\text{m}$  であればよい事が分かった。設計し BEC 生成装置に組み込んだ光格子トラップ光学系を図 2 に示す。

自作のディテクターとスリットを用いてビームウェスト  $\omega_0$  の評価を行った結果、ビームウェストの半径  $\omega_0$  は  $88\mu\text{m}$  となり、この時のシングルパス時のポテンシャルの深さ  $k_B / U_{dip}$  は  $8.3\mu\text{K}$ 、ダブルパス時で  $25.2\mu\text{K}$  となった。また、焦点距離 400mm、750mm レンズ間のビームと焦点距離 400mm、ミラー間のビームはコリメートされている。特に焦点距離 400mm、750mm レンズ間については定盤スペースの制約上、レンズの配置に自由度を持たせる目的でコリメートされるように設計した。なお、レンズは全て THORLABS の BK7 Plano-Convex Lens

を使用している。

現在、BEC 実験装置はブラッグ回折を用いた BEC ラチエットに関する実験も行っているなのでその光学系を崩さないようにこのような配置とした。ミラーB はダイクロイックミラーであり、ブラッグパルスと干渉する FORT 折り返し用の F400 レンズ、ミラーは脱着式となっている。また、ミラーA とミラーB のマウントにはピッチ 0.3mm/360° のリュースズが使われており、アトムチップ近傍での FORT 光を 20 $\mu$ m の分解能でセットアップする事が可能である。

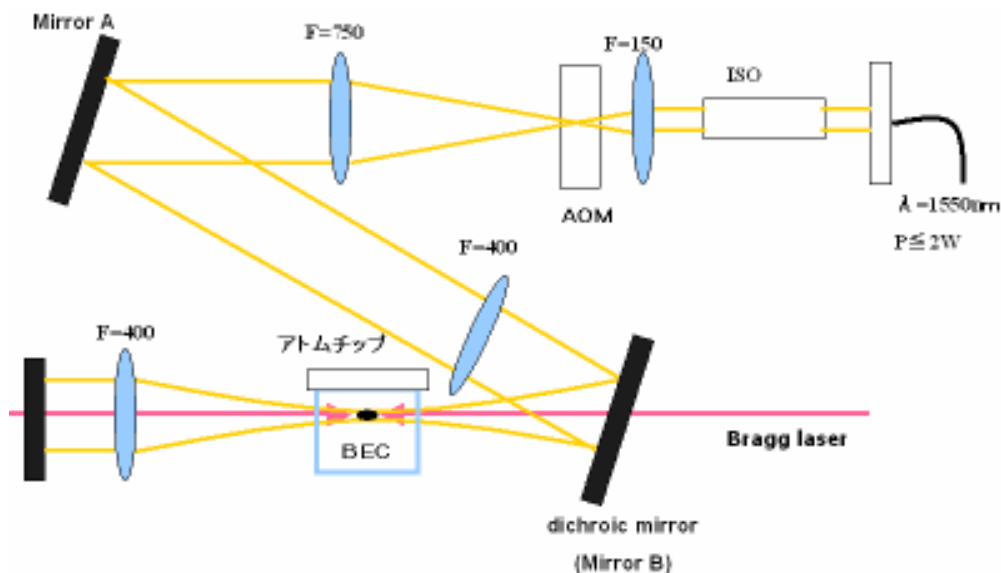


図 2: 光格子トラップ光学系配置図

#### [実験]

目的の項でも述べたように当初の目的は BEC の原子数スクイーズド状態の達成であったが、その目的達成のためにシングルパスによる光双極子トラップを目指したアライメントを行っていた所、とても興味深い BEC の回折を観測した。この回折の原因を調べるために以下の 2 つの実験を行った。

(1) ガラスセルによる反射光の影響を調べるため、入射光と反射光が重なる領域から重ならない領域にかけ FORT 光を鉛直方向に動かし回折が起きるかを調べた。結果を図 3a に示す。グラフの横軸は水平面からの FORT 入射光の角度であり、縦軸は回折した BEC の割合を表す。

結果、回折が起きる領域は水平面から 7mrad(後の計測よりガラスセルの傾きは約 8mrad であり、入射光と反射光はほぼ平行である)の近傍ととても限定的であり、そのほかの領域では落下する BEC と FORT 入射光が確実にオーバーラップするように左右にも振ってみたが回折は観測できなかった。これは FORT 入射光とガラスセルによる反射光により定在波が立ち回折には反射光が重要な役割を持っていることを示すと考えられた。

(2) 次に回折した BEC の運動量を求めるために BEC と FORT 光が重なる時間を求めた。これは FORT 光の照射時間を変化させ、回折の始まる時間を求めることにより運動量を求めた。

結果を図 3b に示す。グラフの横軸は FORT 光の照射時間 (MT 解放の 1ms 前より照射) を表し縦軸は回折した BEC の割合を表す。

結果、TOF イメージから求めた BEC 間距離は 80 $\mu$ m であるのに対し、BEC と FORT 光が相互作用を始める時間から TOF 撮影までの時間 (12.5ms) に対する 2 光子反跳速度 (FORT 光の波長 1.5 $\mu$ m) 分の移動距離は 73.5 $\mu$ m となった。したがって回折した BEC は波長 1560nm の 2 光子反跳速度分の運動量  $2\hbar k$  を持っている結論付けられた。

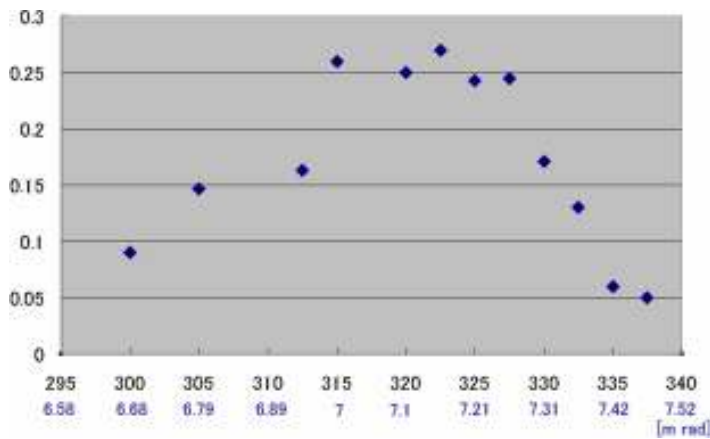


図 3a

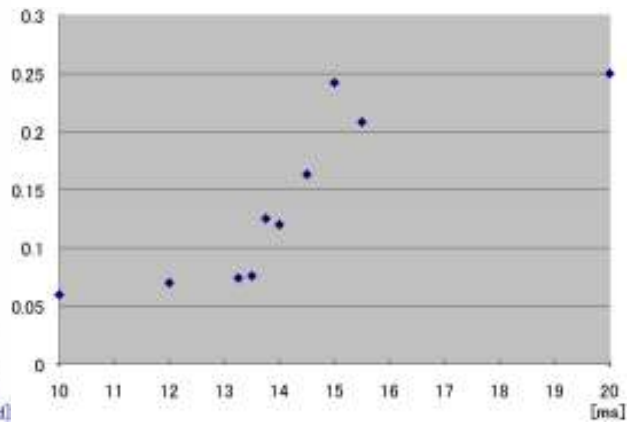


図 3b

[BEC 回折の解釈]

- ・角度のついた定在波によるブラッグ回折の可能性

BEC が鉛直方向に自由落下し、その BEC に水平面からの角度  $\theta$  で定在波を入射させたとする。その際、落下する BEC の速度の  $\theta$  方向の速度成分が入射している定在波の反跳速度と一致する場合、BEC はその反跳速度分に応じた運動量変化を起こし回折する。式(4) (図 4)

式(4)の  $v_{\perp}$  は BEC の自由落下による鉛直方向の速度を表し、 $v_U$  は双極子ポテンシャルにより BEC が加速された場合の鉛直方向の最大速度を表している。この角度のついた定在波により BEC の回折が起きる角度を見積もり、また実験系の正確な傾きを測定し、この 2 つの値を比べ角度のついた定在波による回折の可能性について考察した結果を以下に述べる。

$$\frac{\hbar k}{M} = (v_{\perp} + v_U) \sin \theta \quad (4)$$

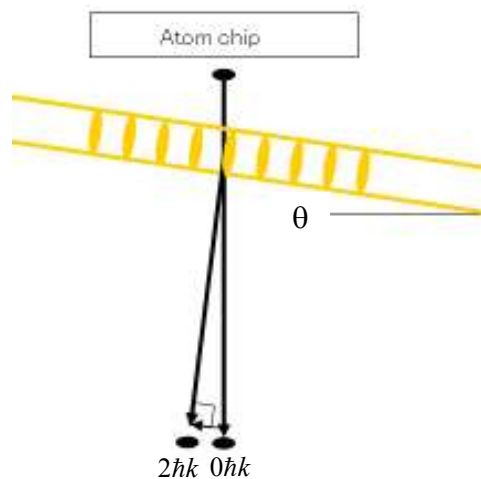


図 4: 角度のついた定在波による回折

初めに回折が起きる角度を求める。磁場トラップの開放後、12.5ms(※13.5ms-1ms)以降に BEC の分離が始まっており、14ms(※15ms-1ms)の時点で完全に BEC は分離している。よって磁場トラップ解放後 14ms の時点で BEC が FORT 光を抜け、この時の落下速度を元に角度のついた定在波による回折がおきるために必要な定在波の角度を求めた。まず自由落下による BEC の速度は  $v_{\perp} = 9.81 \times 14 \times 10^{-3} = 137 \text{ mm/s}$  となる。次に双極子ポテンシャルにより加速された速度の最大値は  $U_{dip} = 1/(2mv_U^2)$ 、 $v_U = 35 \text{ mm/s}$  となる。また、 $^{87}\text{Rb}$  原子が波長 1560nm の光から受ける 1 光子反跳速度は 2.96mm/s である。よって角度の付いた定在波によってブラッグ回折を起こすために必要な角度は  $\theta = 2.96/(137+35) = 17 \text{ mrad} \approx 1.0^\circ$  となった。

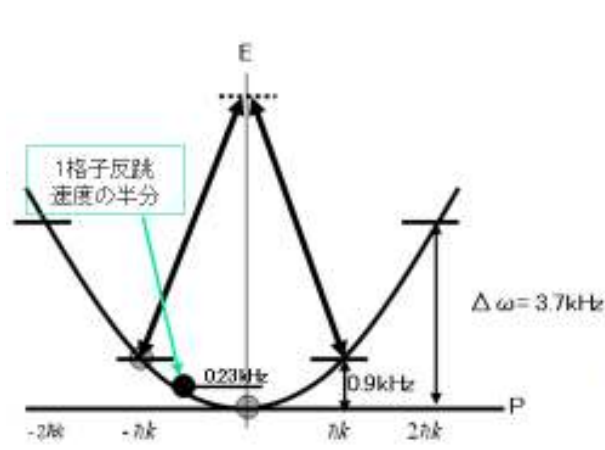
次に実験系の光定在波の傾きについて測定してみた。光定在波の傾きはガラスセルの傾きに依存する。ガラ

スセルの傾きを測定してみた所、傾きは  $8.7\text{mrad}$  ( $0.5^\circ$ ) であった。

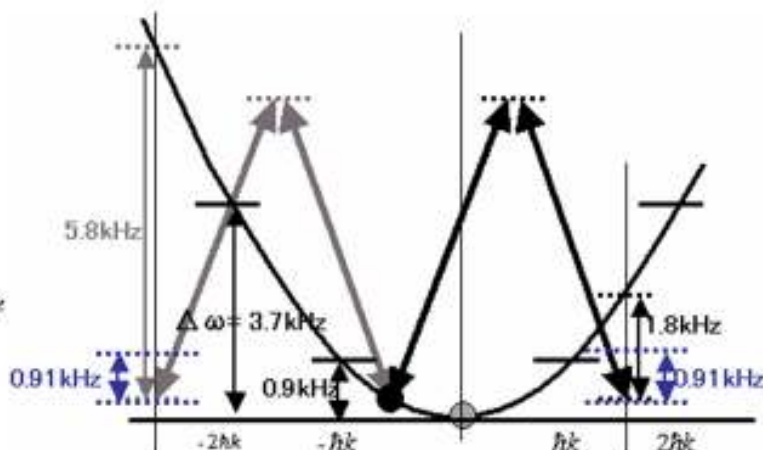
結果、BEC に傾きを持った波長  $1560\text{nm}$  の定在波による回折を引き起こさせるために必要な傾きは  $17\text{mrad}$  ( $1.0^\circ$ ) であった。それに対し光学系の定在波の傾きは  $8.7\text{mrad}$  ( $0.5^\circ$ ) であった。この2つの値は約2倍の開きがあり一見、本実験で得られた BEC の回折は角度のついた光定在波によるブラッグ回折ではないように思える。

しかしここで、FORT 光を BEC が通過する際の BEC, FORT 光間の相互作用時間に対する遷移幅について考える。この遷移幅は BEC が FORT と相互作用する時間の逆数  $\Delta\omega = 1/\Delta t$  で表すことができる。そこで FORT 光のビーム径とその地点を通過する BEC の平均速度から相互作用時間を求めると  $\Delta t = 2 \times 88\mu\text{m} (137 + 20\text{mm/s}) = 1.1\text{ms}$  となり、遷移幅は  $\Delta\omega = 0.91\text{kHz}$  となった。

概略図を図(5a)に示す。また、 $2\hbar k$ 、 $-2\hbar k$  の選択についての概略図を図(5b)に示す。



図(5a) 光定在波によるブラッグ回折の概念図



図(5b) 運動量の選択

なお、実験系の定在波の角度に相当する図(5)における BEC の位置は以下ようになる。

$$\theta = 8.7[\text{mrad}] = v[\text{mm/s}] / 137[\text{mm/s}] \quad v = 1.5[\text{mm/s}]$$

この  $1.5\text{mm/s}$  は  $^{87}\text{Rb}$  の波長  $1.5\mu\text{m}$  光による1光子の反跳速度の約半分に相当する。結果、図(5a)に示すように BEC, FORT 光の相互作用時間による遷移幅のゆらぎを考慮すると BEC と遷移準位を示す位置はとても近く、 $-\hbar k \Rightarrow \hbar k$  遷移の共鳴に近くなる。また  $0\hbar k \Rightarrow 2\hbar k$ 、 $0\hbar k \Rightarrow -2\hbar k$  の選択性については図(5b)で示すように実験系の定在波の傾きに相当する BEC の位置によって共鳴は  $-2\hbar k$  遷移よりも  $2\hbar k$  へ遷移のほうが近く  $0\hbar k \Rightarrow 2\hbar k$  遷移を起こす可能性が高いことが分かった。現状ではこの角度のついた光定在波によるブラッグ回折のモデルと実験での BEC の回折状況が完全に一致するとはいえないが、実験系の角度測定が実験の数ヵ月後という事もあり、BEC 回折の原因がこのモデルで説明できる可能性が高いと考察する。

[原子干渉計への応用]

本実験では双極子トラップに向けたアライメントの際、多くの実験データを得た。その中で2つのケースを紹介しておく。

図 6(b) のセットアップは BEC の磁場トラップより  $760\mu\text{m}$  下の地点で FORT 光と重なる。この時の BEC の回折率は最大で 40% であった。図 6(c) のセットアップは (b) より  $260\mu\text{m}$  (※) 上の地点で FORT 光と重なる。この時の BEC の回折率はほぼ 100% であった。この2点のセットアップは FORT 光のビーム径、強度共に同じであるが FORT 光内を自由落下する BEC の速度が異なる。各点での落下速度は (b) :  $137\text{mm/s}$ 、(c) :  $98\text{mm/s}$  であり、これに双極子ポテンシャルの影響を考慮した BEC, FORT 光間の相互作用時間は (b) :  $1.1\text{ms}$ 、(c) :  $1.5\text{ms}$  となった。これは相互作用時間の長さによって BEC の  $|p = 2\hbar k\rangle$  への回折率が異なる事を意味する。本来ならばさらに長い相互作用時間が期待できる(c)よりも上の地点での実験も行いラビ振動が起きていることを確認したかったのだが現状ではまだその実験を行っていない。



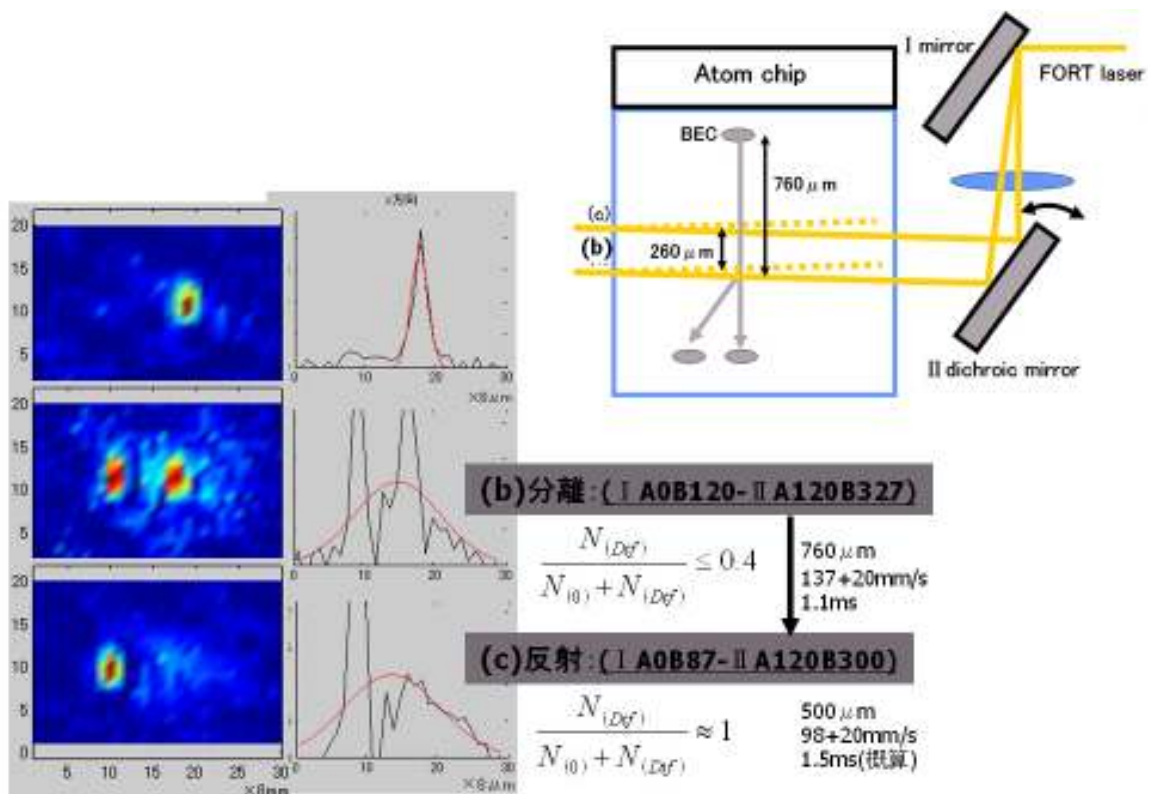


図 6: 原子干渉計への応用

もしラビ振動が起きている場合、 $\pi$ パルス、 $\pi/2$ パルスとなるように適切に FORT 光をセットアップすれば BEC を自由落下させるだけでマッハ・ツェンダー型原子干渉計を構成できるのではないだろうか。

#### [まとめと今後の展望]

本研究の本来の目的は光格子を用いて BEC 原子をトラップ、操作し各サイト間の BEC 原子の個数揺らぎをコヒーレント状態の量子雑音限界以下まで圧縮する原子数スクイーズド状態の生成であった。しかし、光格子に用いる FORT 光学系の設計、セットアップを行い、光格子に BEC をローディングする前段階として BEC の光双極子トラップに向けたアライメントを行っていた所、予想に反した興味深い BEC の回折を観測した。そこで本来の本研究の目的とは多少外れてしまうがこの BEC の振舞いの究明もあわせて本研究の目的とし、回折の原因究明のために FORT の照射位置と照射時間を変化させ BEC の運動量、回折条件を求めるための 2 つの実験を行った。実験の結果、図 6 に示すような BEC の回折像が得られた。この回折した BEC は  $2\hbar k$  の運動量を持っていることが確認できた。この回折は当初、実験のセットアップの状況から単純なブラッグ回折や共鳴光の吸収による反跳によるものではないと思われた。そこでいくつかのモデルを立て考察を行ったところ、角度の付いた光定在波によるブラッグ回折の可能性が高いという結果に至った。また原子干渉計への応用について簡単な考察も行なった。

今後の展望については BEC 回折のモデルについての考察を深め、この回折が BEC 干渉計に利用できるかの可能性を見極めたい。また光格子に BEC をトラップし BEC の原子数スクイーズド状態の達成も目指したい。

#### [参考文献]

- [1] Markus Greiner, Olaf Mandel, Tilman Esslinger, Theodor W. Hansch, Nature, 415, 39(2001)
- [2] Ying-Ju Wang et al., PRL 94, 090405 (2005).
- [3] Munekazu Horikoshi and Ken'ichi Nakagawa, PhysRevLett. 99. 180401(2007)
- [4] 修士論文 小田悠介 中川賢一研究室 “原子干渉計を用いた高精度な重力加速度計の開発” 電気通信大学(2006)
- [5] C. Orzel, et al. Squeezed States in a Bose-Einstein Condensate, Science 291, 2386 (2001)