

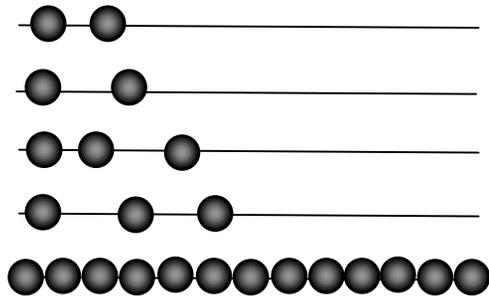
ルビジウム原子の ボースアインシュタイン凝縮生成

自然科学研究科物理学専攻 平野研
伊東健一

Introduction

ボースアインシュタイン凝縮 (ボース凝縮、BEC)とは

$T \leq T_C$ で



歴史

- 1925年 Einsteinの予言
- 1937年 液体Heの超流動
- 1938年 London He超流動を
ボース凝縮で説明
- 1980年代 レーザー冷却の発展
- 1995年 気体原子のBEC実現

Rb, Na, Li

気体原子のボース凝縮の利点・・・原子間相互作用が小さい
本研究の目的 ^{87}Rb (原子番号37)のボース凝縮を生成
効率の良い装置

ボース凝縮の生成手順

ボース凝縮の発生条件

$$n\lambda_{dB}^3 \geq 2.612..$$

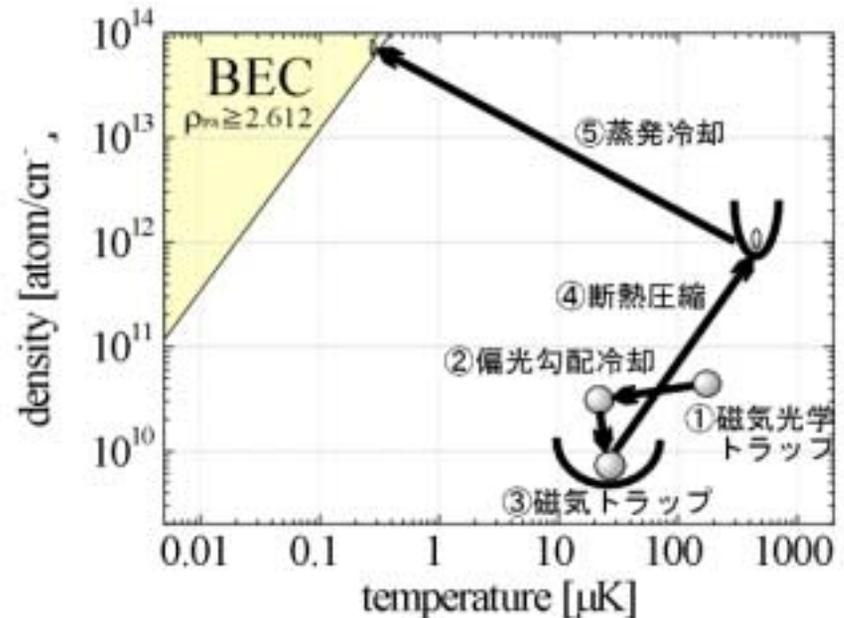
n : 原子密度

$\lambda_{dB} \equiv \frac{h}{\sqrt{2\pi mk_B T}}$: 熱的ドブロイ波長

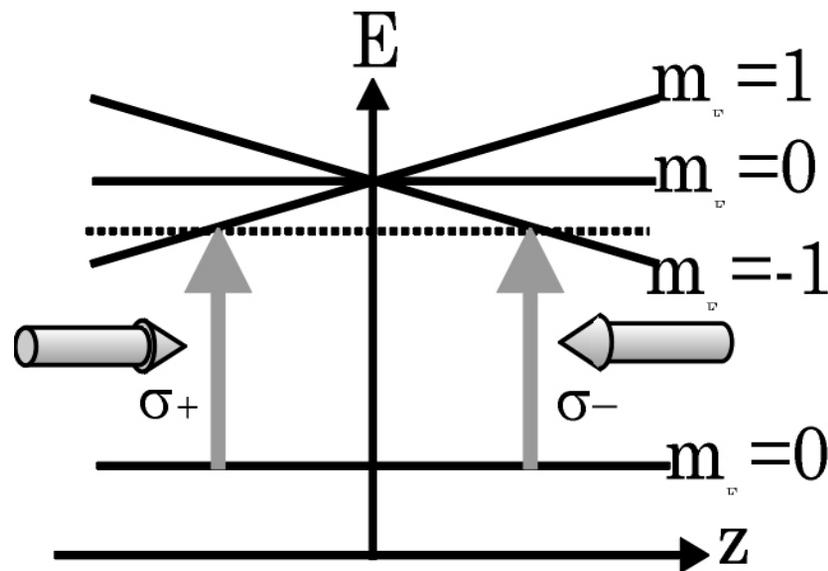
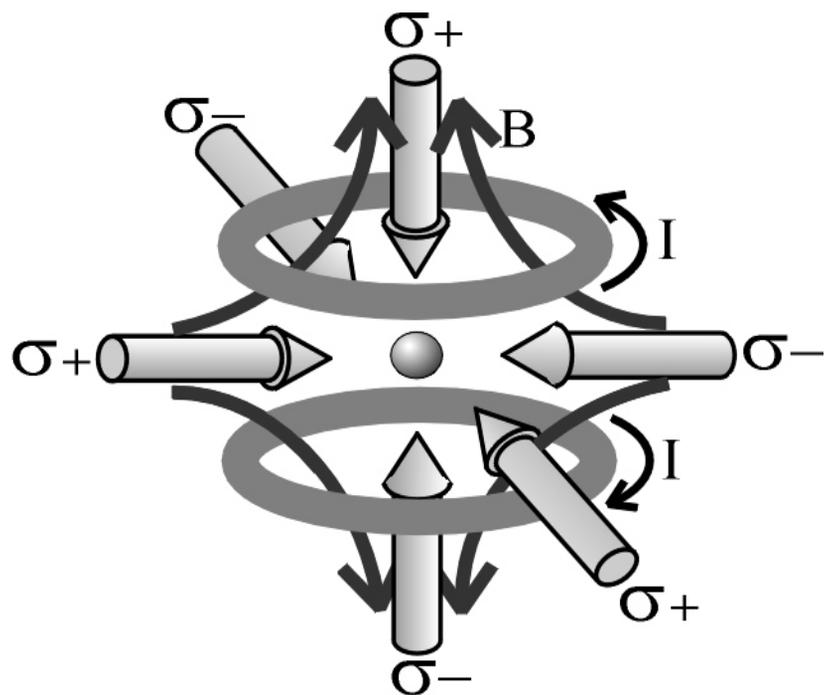
$n\lambda_{dB}^3 \equiv \rho_{ps}$: 位相空間密度

個々の原子の波動関数が
重なり合うとき

生成手順



磁気光学トラップ(MOT)の原理



励起状態 $F=1$ $m_F=-1, 0, 1$
 基底状態 $F=0$ $m_F=0$

Z軸上の磁場
 ゼーマンシフト

$$B_z = bz$$

$$\Delta E = g_F \mu_B b m_F z$$

Double MOT & Loading system

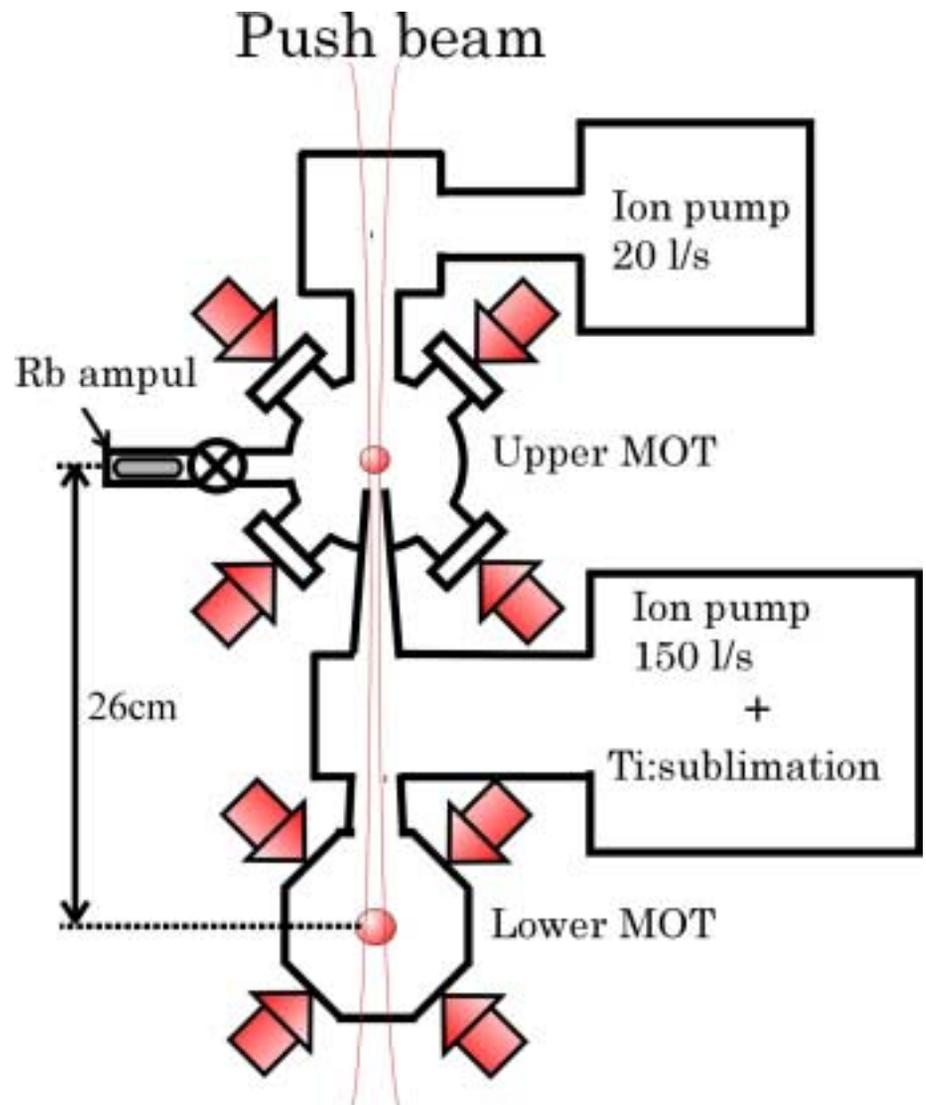
BECを生成するには
超高真空中でMOTを
行う必要がある

真空度

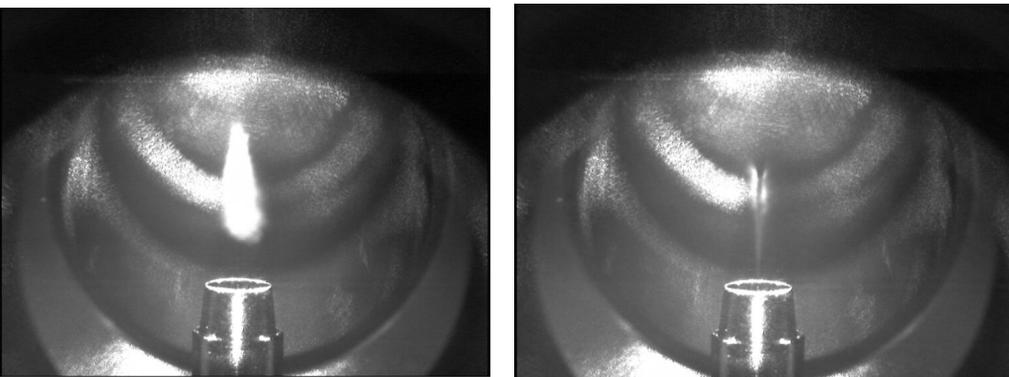
上側 $\sim 10^{-8}$ torr

下側 $\sim 10^{-11}$ torr

Upper MOTに上側から
共鳴光を照射して下側
の真空槽に原子を供給

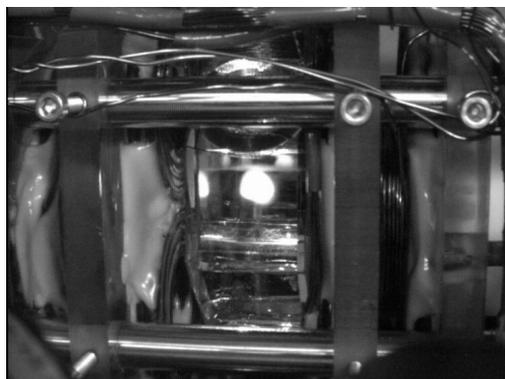


CCD images & Loading profile

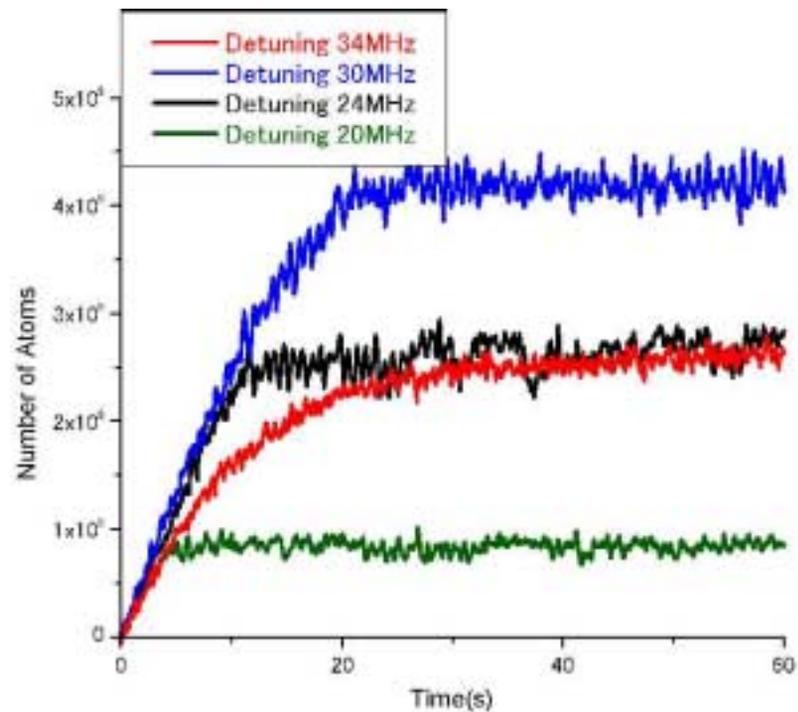


3秒で $\sim 10^9$ 個

Upper MOT

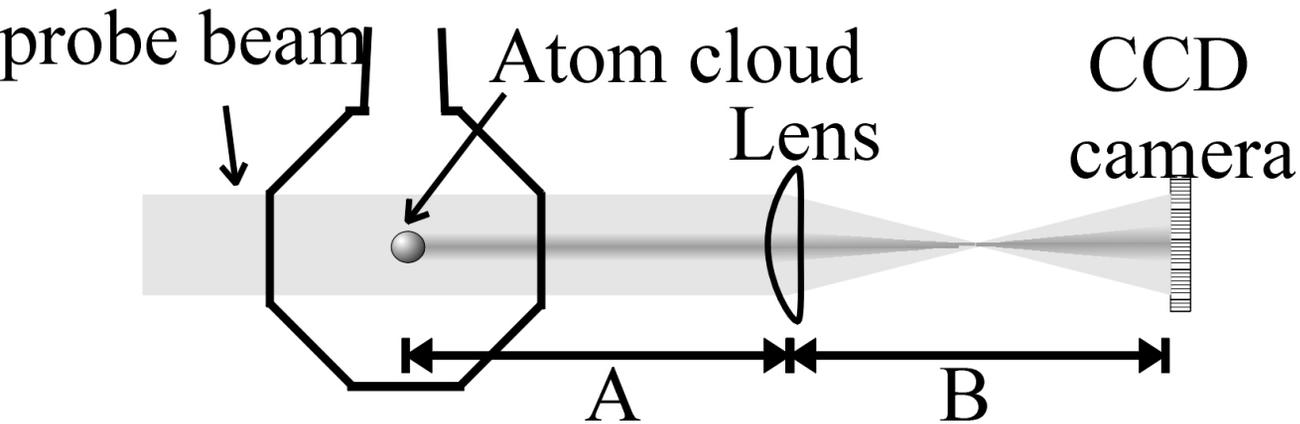


Lower MOT

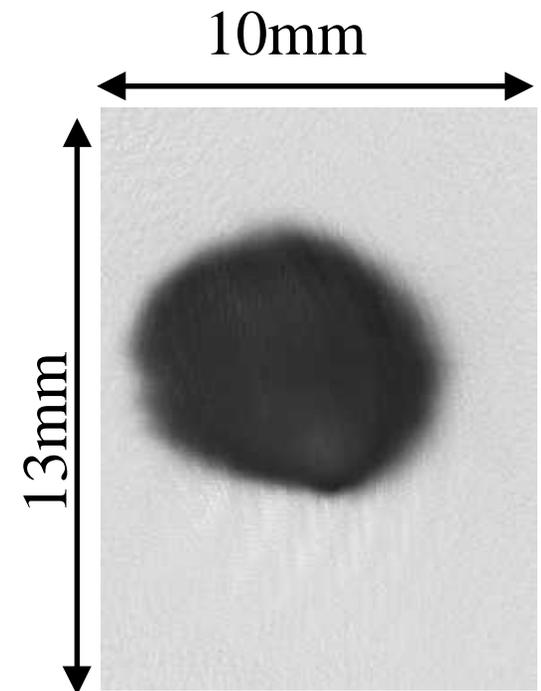


吸収イメージング

Resonant



共鳴したProbe光を
パルスの(Δt=0.1ms)に照射

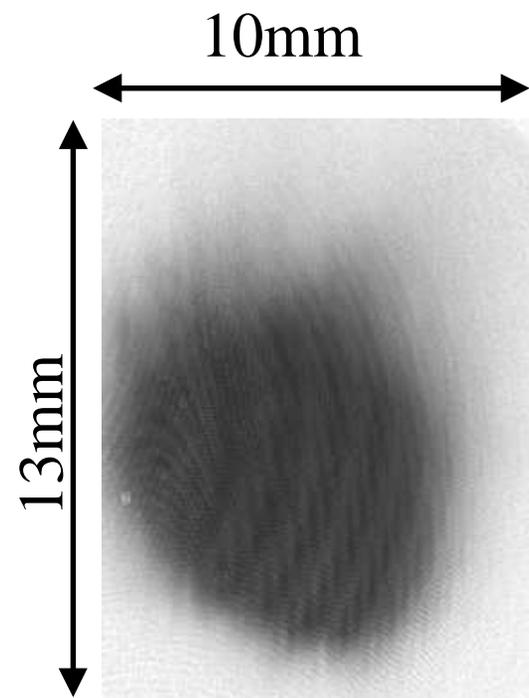
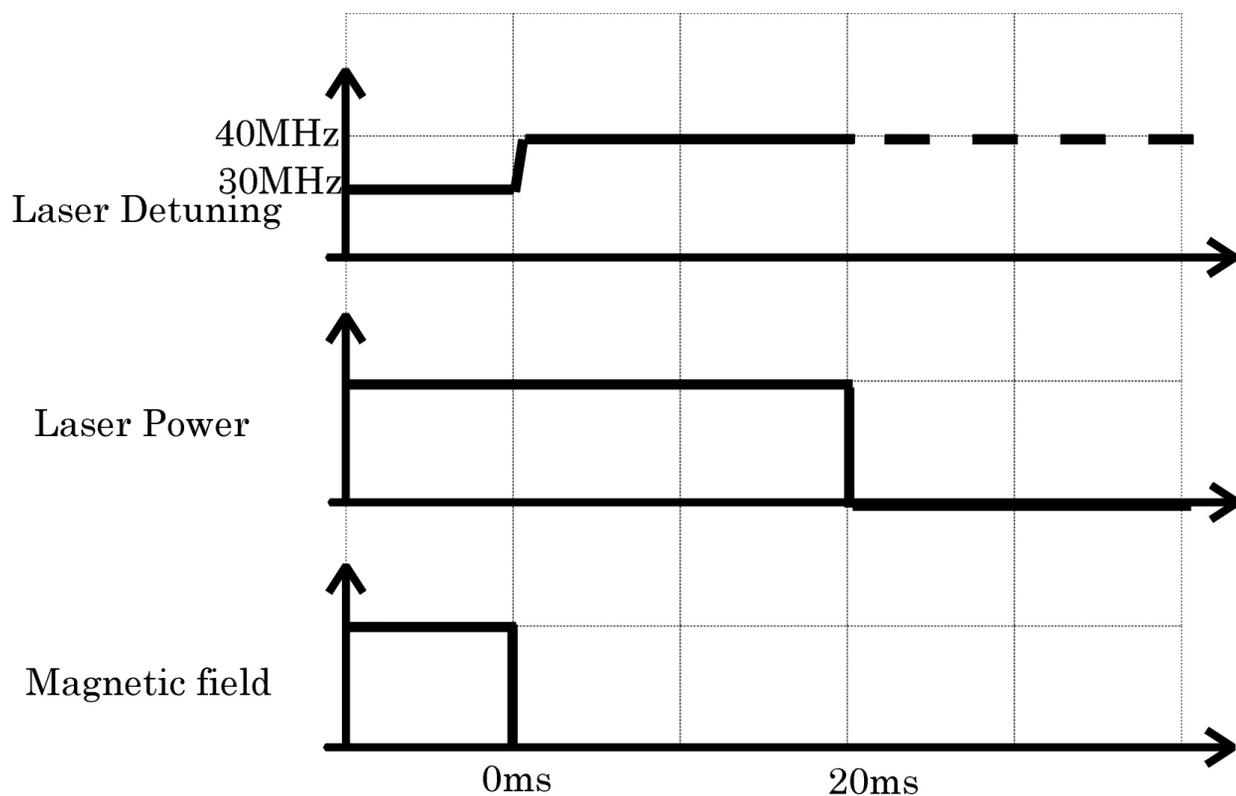


~10⁹個

偏光勾配冷却

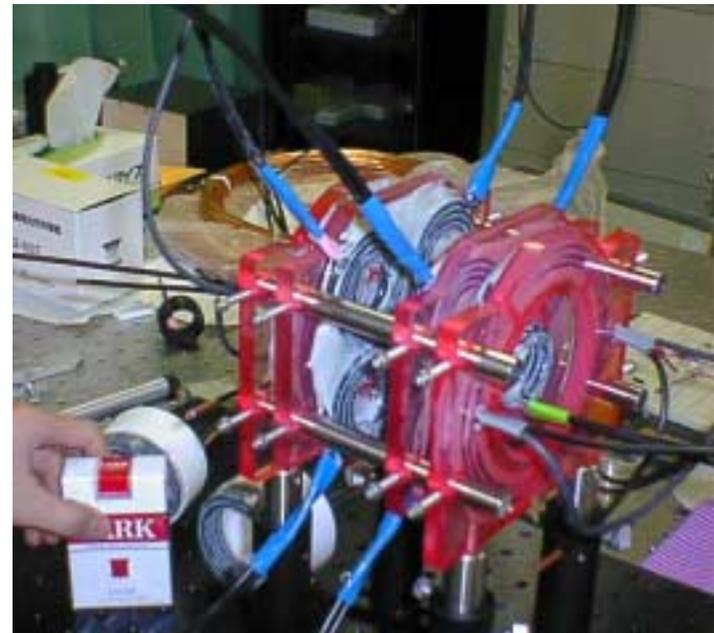
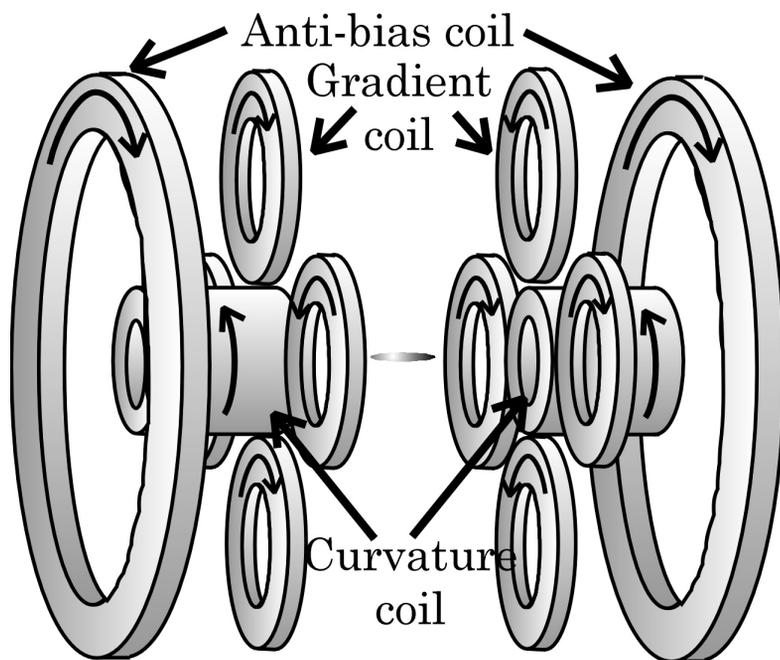
磁場→0 (地磁気補正)

離調→大

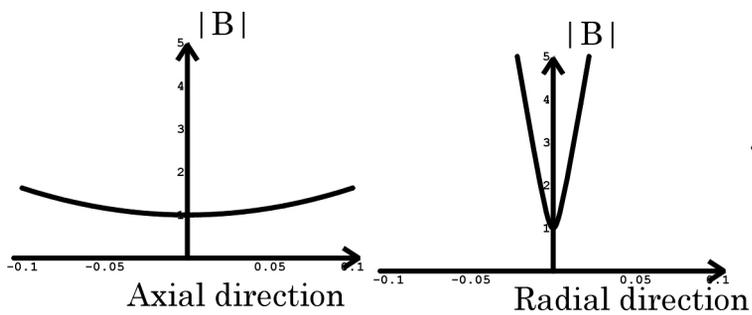
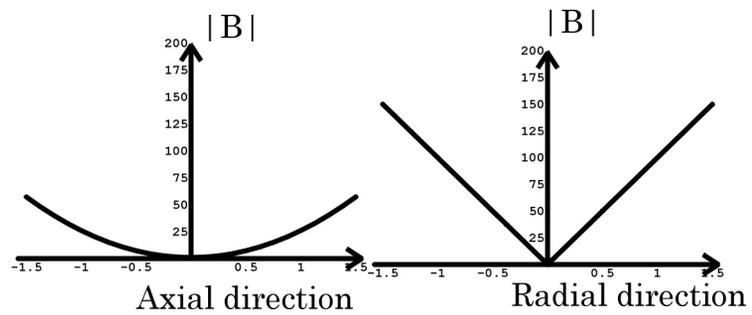
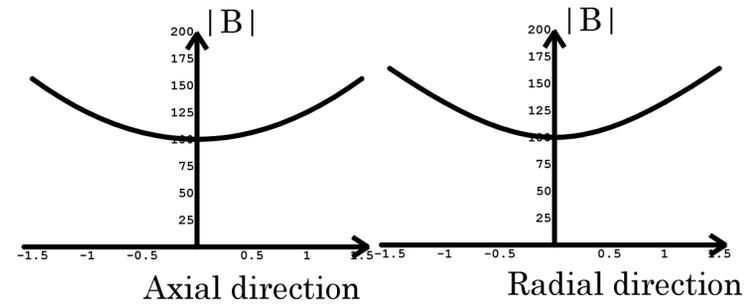
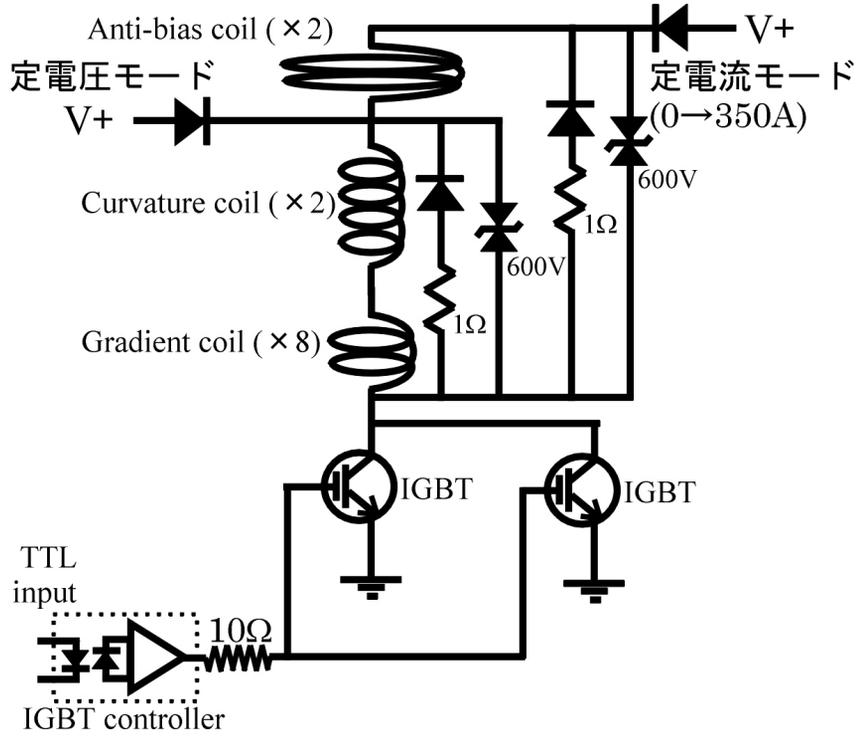


磁気トラップ

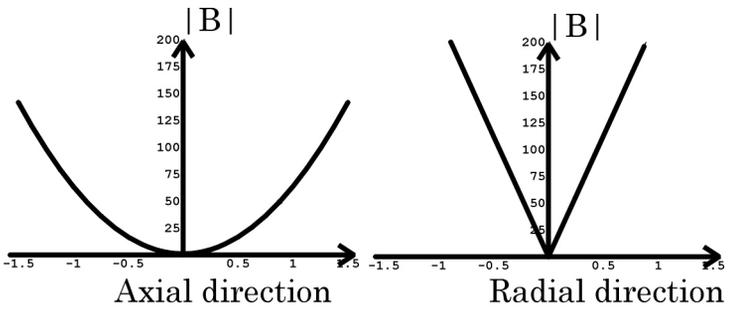
$U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$ を利用して
ポテンシャルを作る



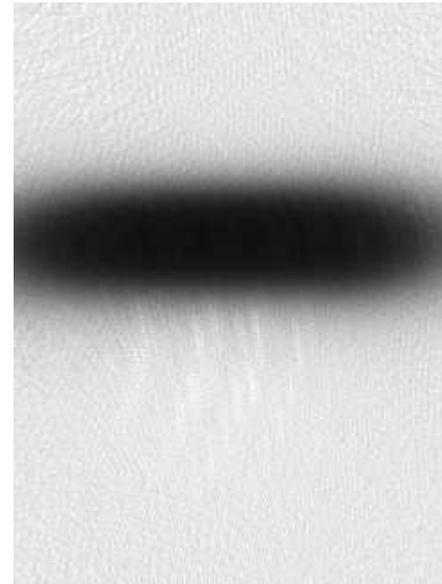
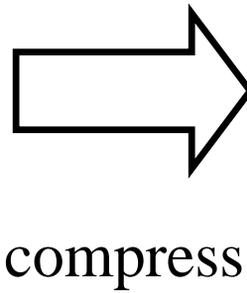
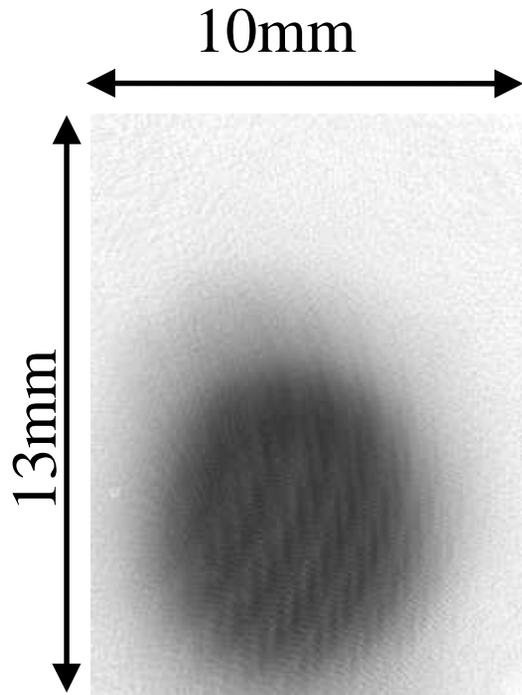
磁気トラップ回路とポテンシャルの推移



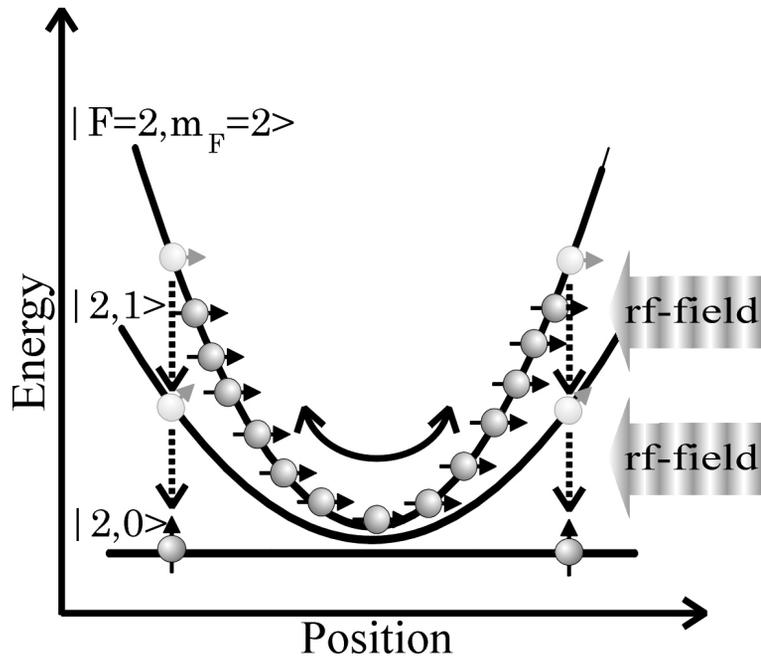
← 拡大



磁気トラップの吸収イメージ

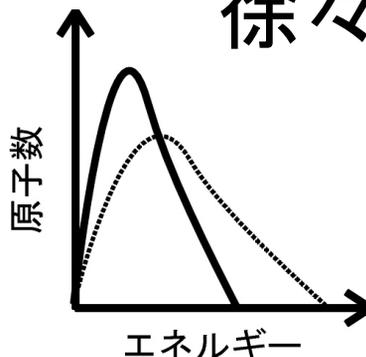
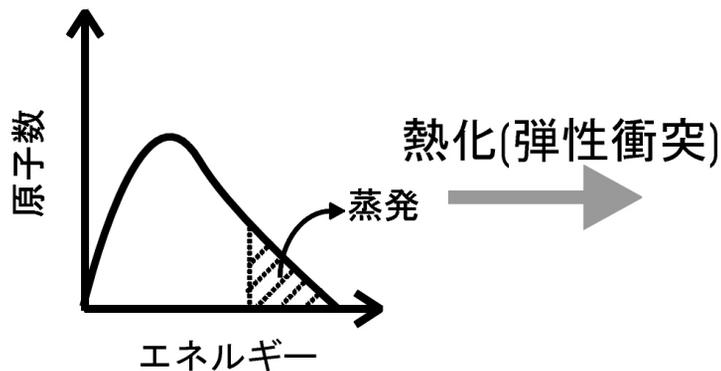


蒸発冷却の原理

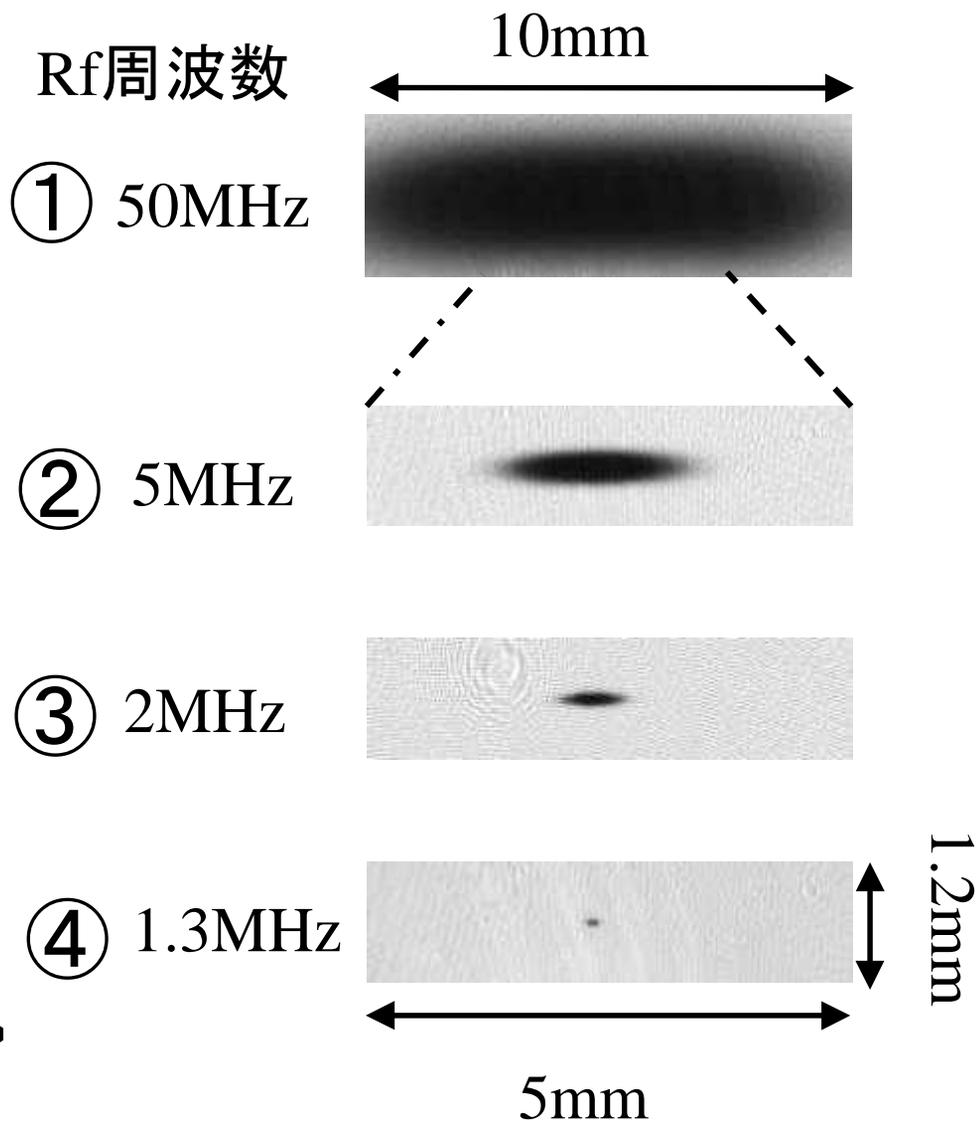
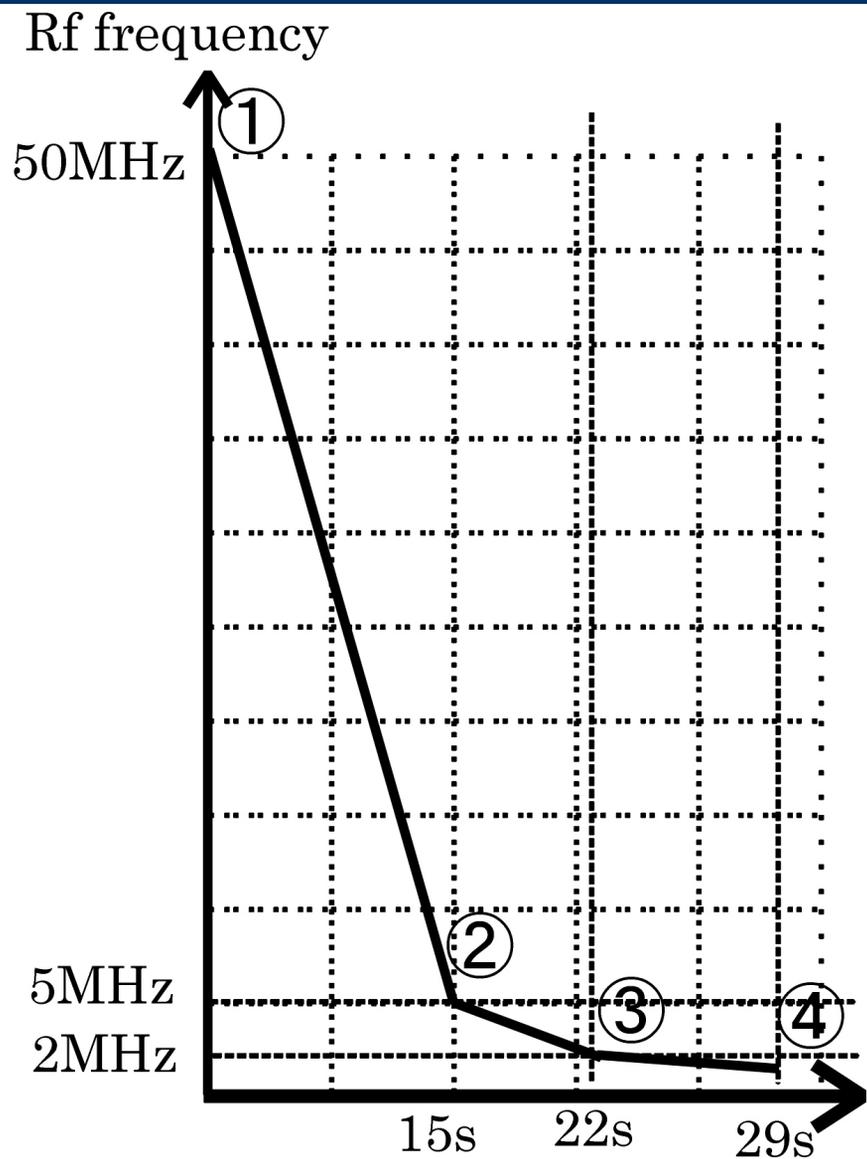


Rf磁場(ラジオ波)を照射して
エネルギーの高い原子のみ
を選択的にトラップから逃がす

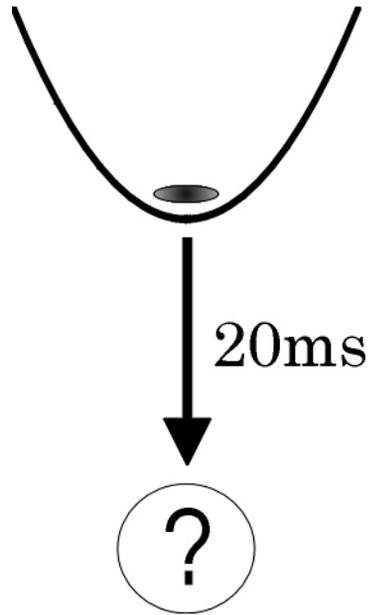
Rf磁場の周波数を
徐々に下げていく



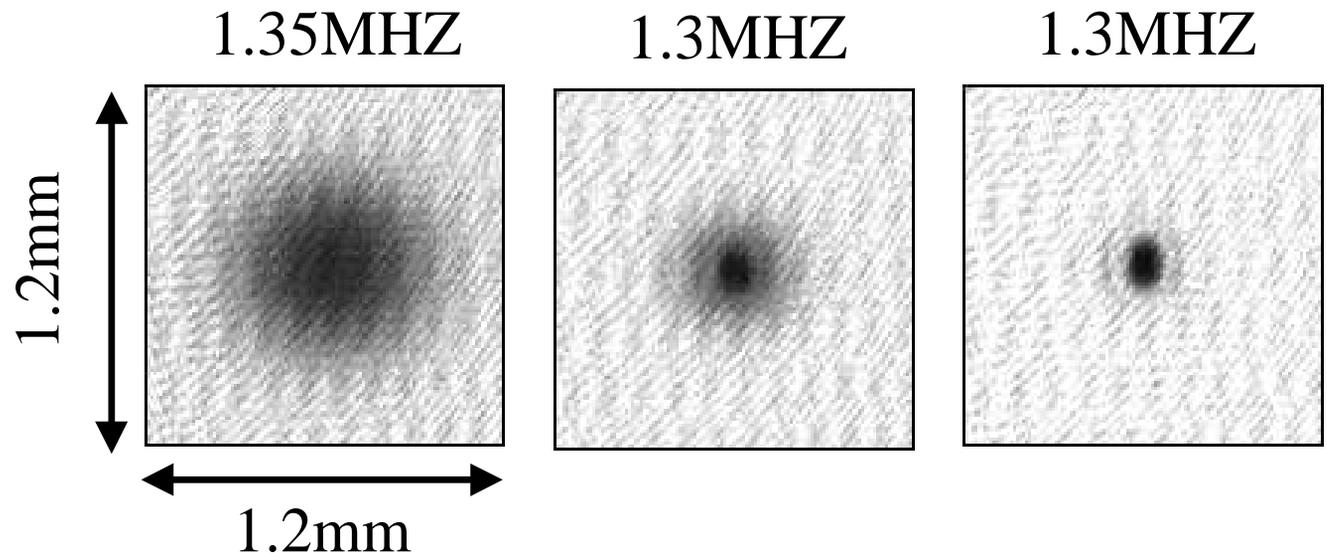
蒸发冷却



Time of Flight images



磁気トラップを切ってから
20ms後の吸収イメージ



光学密度

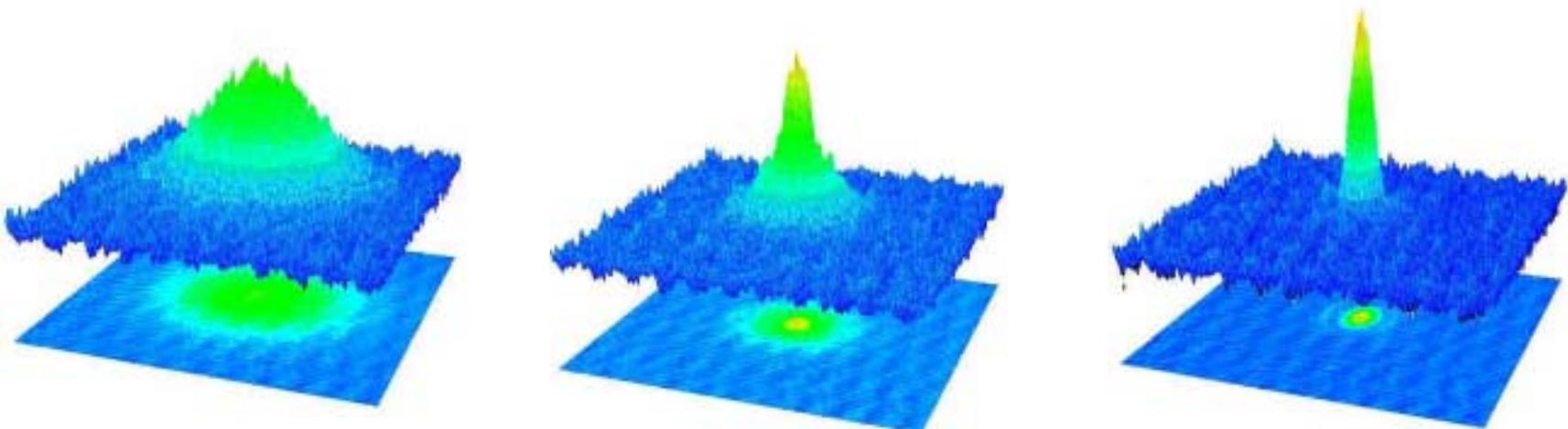
$$\frac{dI(x, y)}{dz} = -\sigma_{abs} n(x, y, z) I(x, y)$$

$$I(x, y) = I_0(x, y) e^{-OD(x, y)}$$

$$OD(x, y) \equiv \sigma_{abs} \int_{-\infty}^{\infty} n(x, y, z) dz$$

光学密度

CCDカメラのデータから実際に光学密度をプロット



ボース凝縮の波動関数

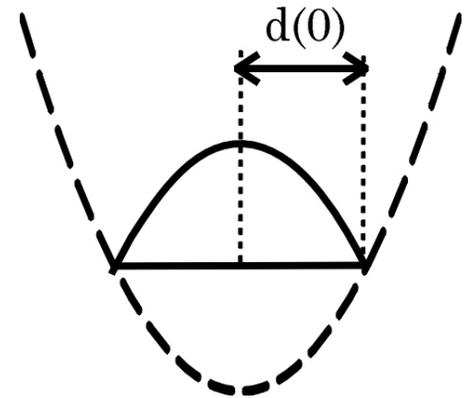
$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V_{trap}(\mathbf{r}) + U_0 |\Phi(\mathbf{r})|^2 \right] \Phi(\mathbf{r}) = \mu \Phi(\mathbf{r})$$



トーマス・フェルミ近似

$$\left[V_{trap}(\mathbf{r}) + U_0 |\Phi(\mathbf{r})|^2 \right] \Phi(\mathbf{r}) = \mu \Phi(\mathbf{r})$$

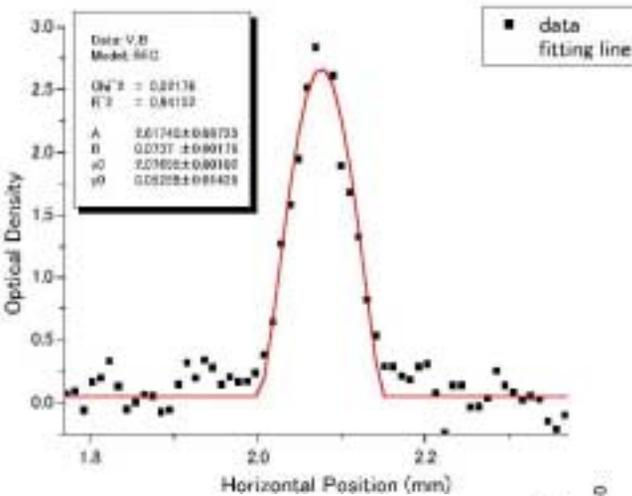
$$n_{TF}(\mathbf{r}) = |\Phi(\mathbf{r})|^2 = \begin{cases} \frac{\mu - V_{trap}(\mathbf{r})}{U_0} & (\mu > V_{trap}(\mathbf{r})) \\ 0 & (\mu < V_{trap}(\mathbf{r})) \end{cases}$$



$$n_{TF}(\mathbf{r}) = \frac{\mu}{U_0} \left[1 - \left(\frac{x^2}{d_x^2} + \frac{y^2}{d_y^2} + \frac{z^2}{d_z^2} \right) \right]$$

観測されたボース凝縮体の特性

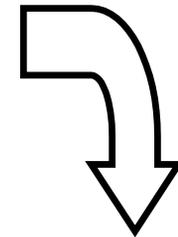
フィッティングより得られたデータ



$$OD_{\max} = 2.6 \pm 0.1$$

$$d_x = 74 \pm 10 \mu\text{m}$$

$$d_y = 105 \pm 10 \mu\text{m}$$



$$N_0 = (1.8 \pm 0.5) \times 10^5$$

$$\mu = (145 \pm 30) \text{ nK}$$

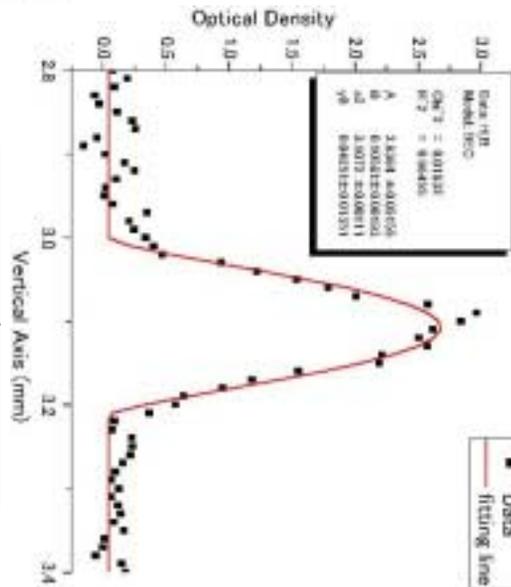
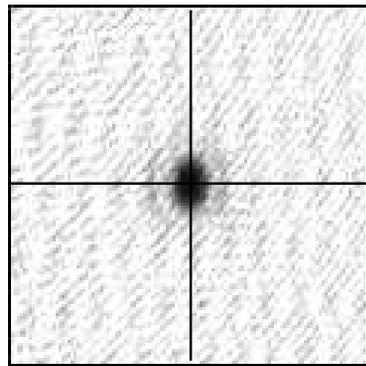
初期のサイズ

$$d_x(0) = 66.4 \pm 0.9 \mu\text{m}$$

$$d_y(0) = 3.0 \pm 0.3 \mu\text{m}$$

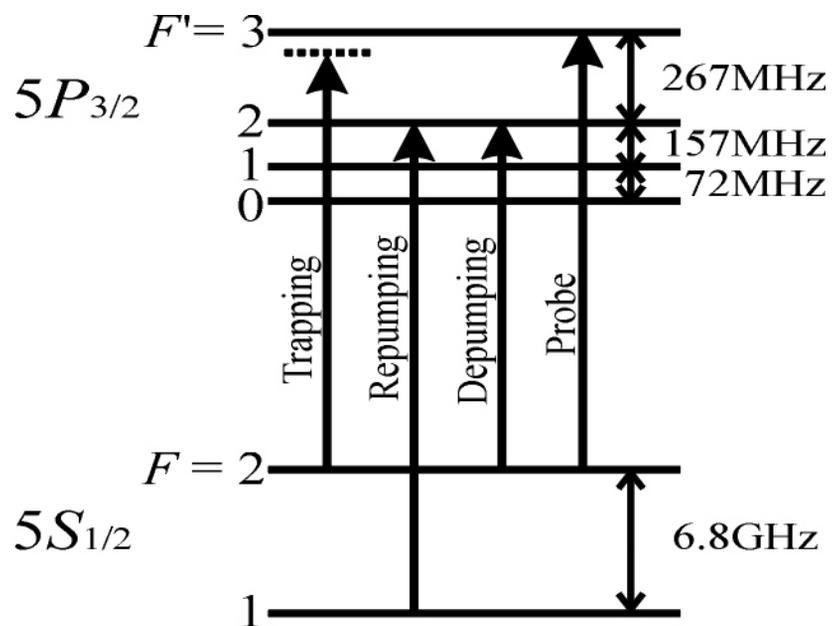
調和振動子のゼロ点エネルギー

$$E = \frac{1}{2} \hbar (\omega_x + \omega_y + \omega_z) = 10 \text{ nK}$$



実験に用いる遷移と自作半導体レーザー

^{87}Rb D₂ line 超微細構造

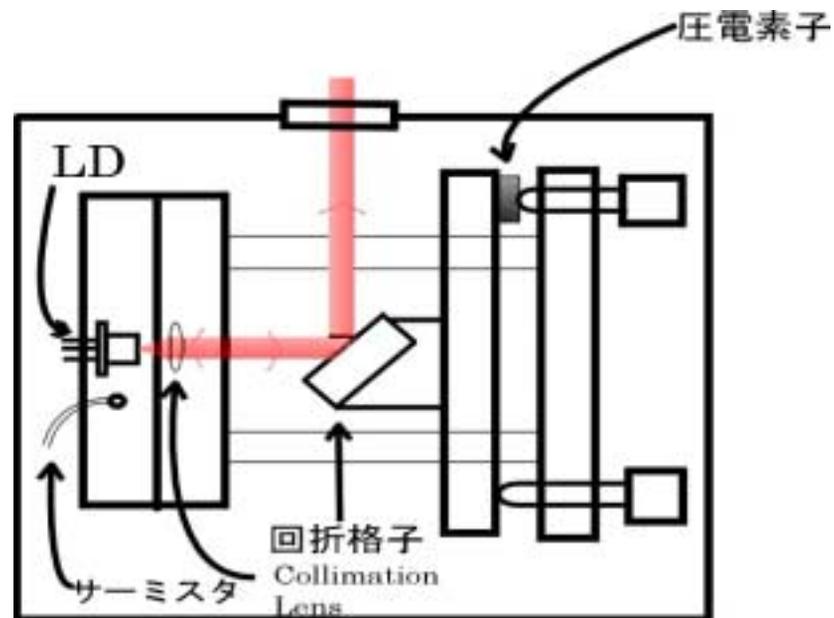


原子の全角運動量 F で指定

$$F=I+J, \quad J=L+S$$

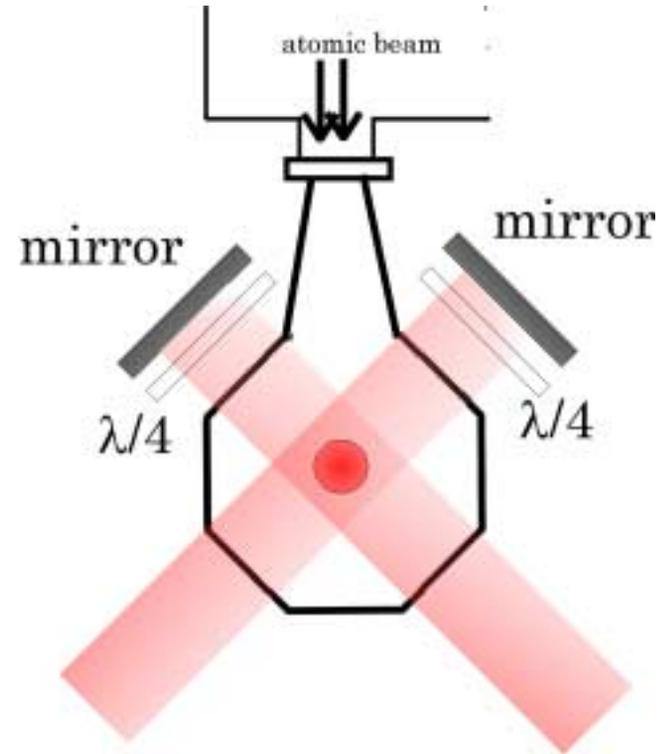
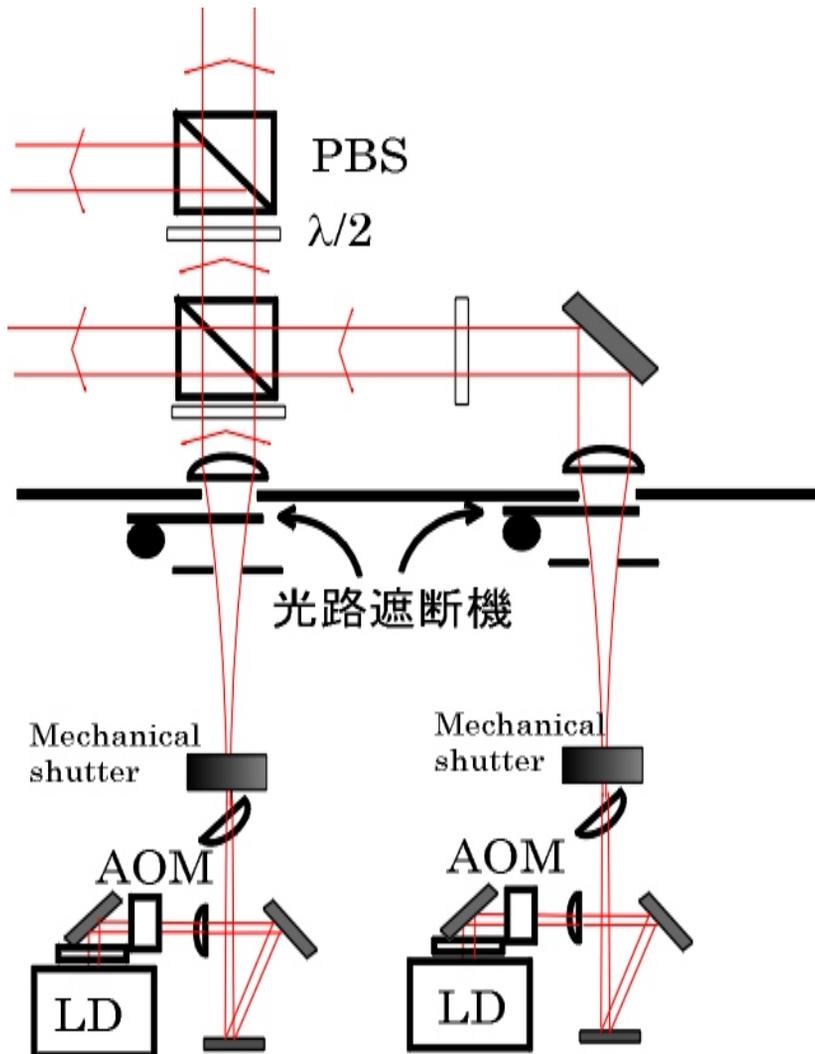
I :核スピン、 L :軌道角運動量、
 S :電子スピン

外部共振器型半導体レーザー



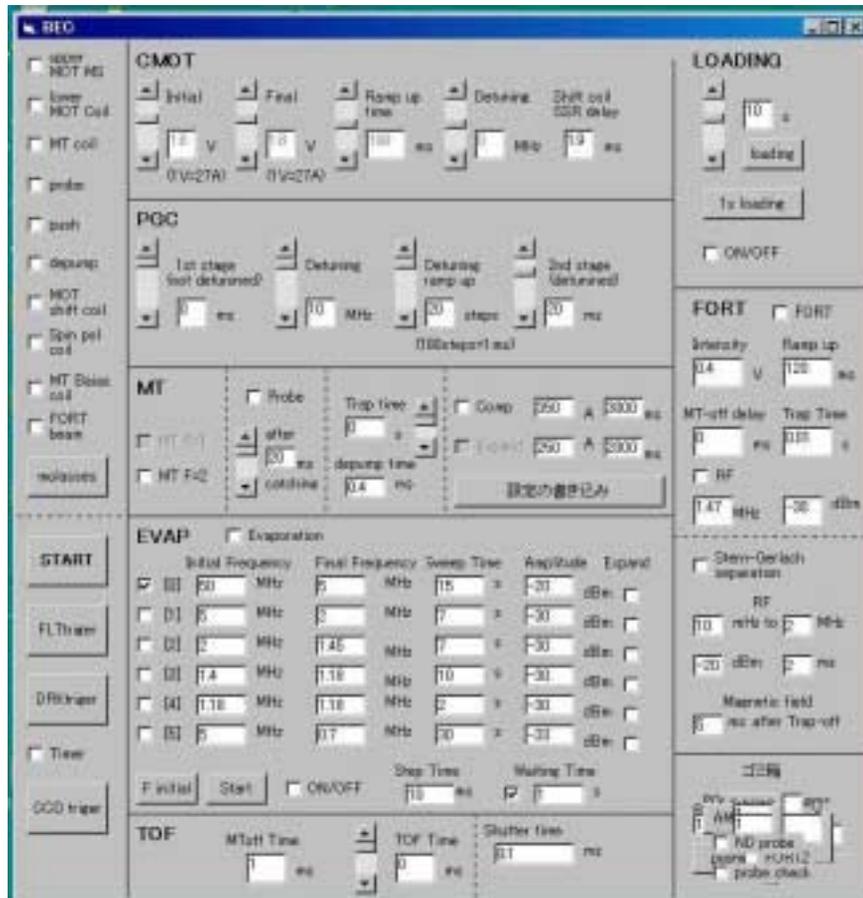
圧電素子で共振器長を制御

光学系 (MOT)



ビーム径 $\sim 25\text{mm}$
強度 $2\text{mW}/\text{cm}^2$

プログラム



- レーザー光のスイッチング
 - 磁場のON/OFF
 - 断熱圧縮時の電源の制御
 - シンセサイザーの周波数制御
 - シャッターのON/OFF
- etc.....

すべてをミリ秒単位で正確に制御

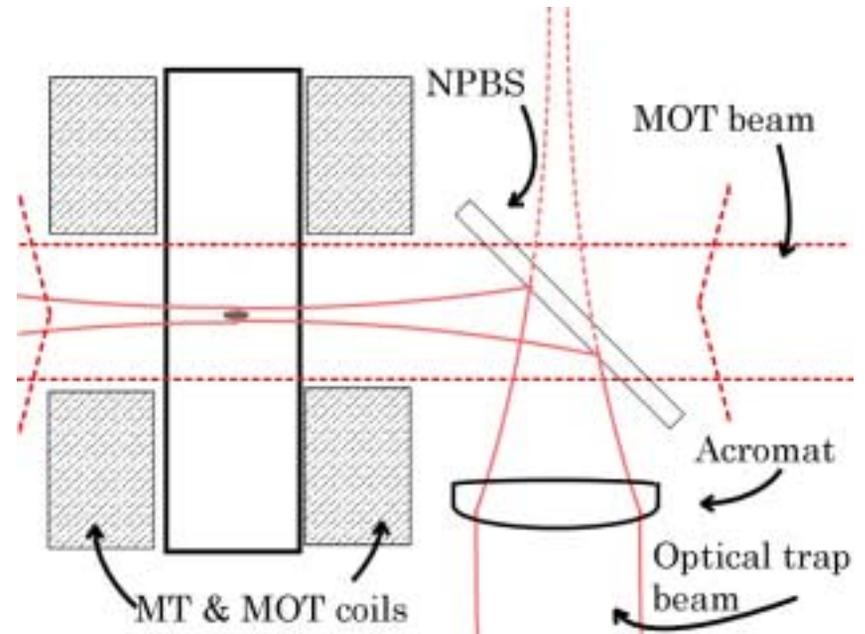
今後の展望

スピン自由度のあるBEC

磁気トラップ : スピン自由度無し



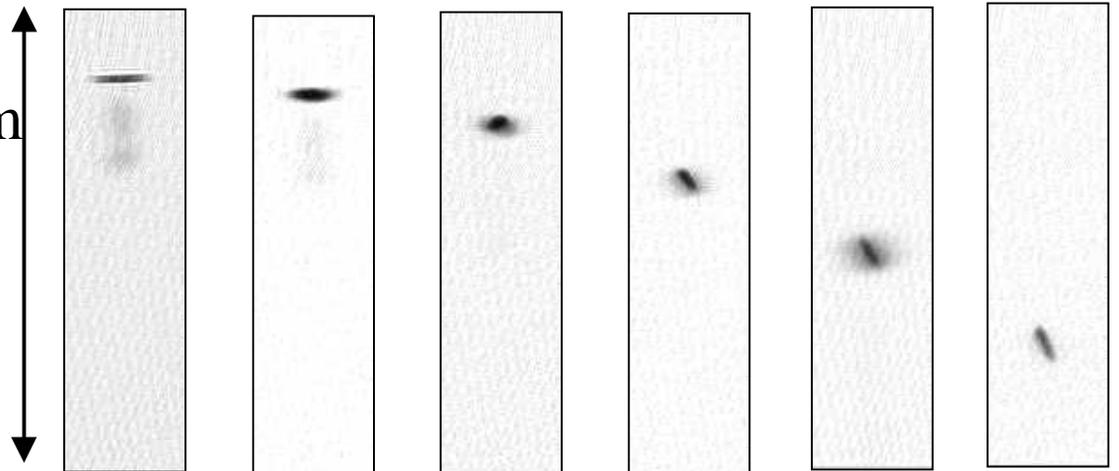
光双極子カトラップ



1.3mm



6mm



今現在
10ms間、BECを
光トラップする事に成功

まとめ

- ^{87}Rb のボース凝縮体を生成
- Double MOT+Push beam で原子を高効率にロード

課題

- ボース凝縮生成条件の揺らぎ

外部磁場の変化、装置の磁化??

- 装置の煩雑さ

現在LD5台→高出力で線幅の狭いレーザーの開発