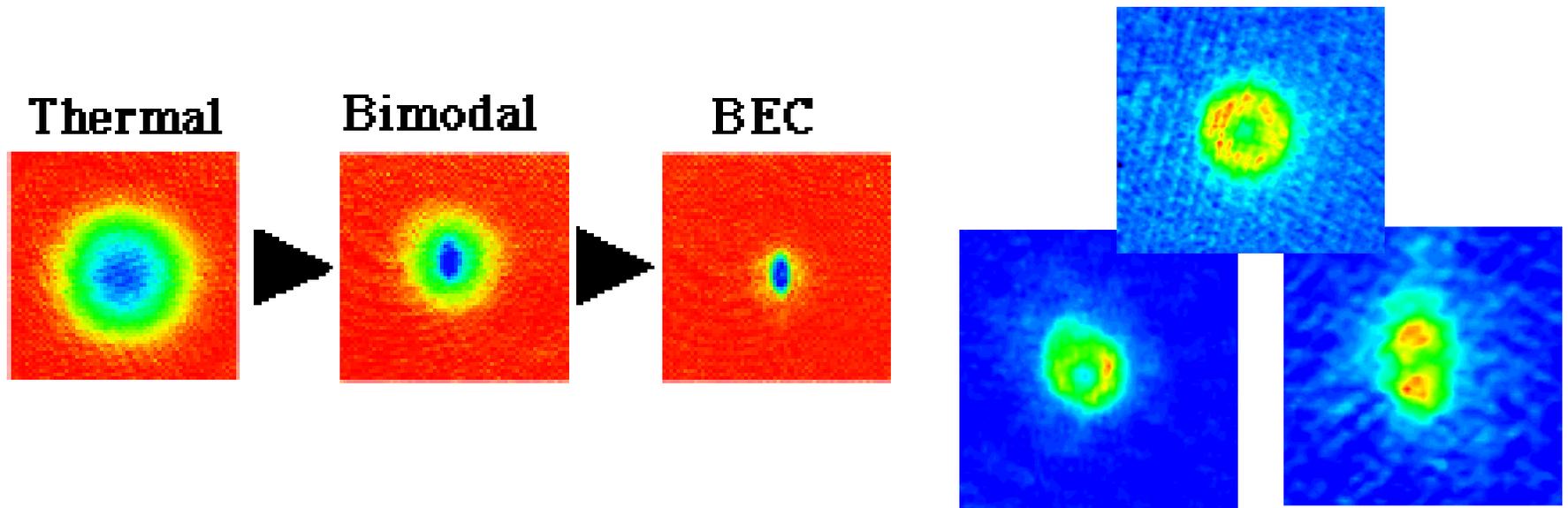


# レーザー冷却法による Bose 凝縮体の生成と その量子渦研究への応用

福井大学大学院工学研究科 ・ 熊倉 光孝



# 講演内容

## (1) イントロダクション

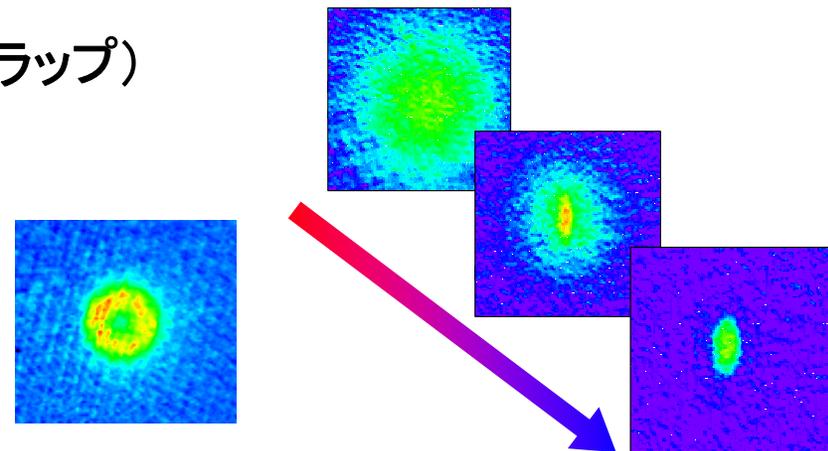
- レーザー冷却法による希薄原子気体の冷却
- 希薄原子気体 Bose-Einstein 凝縮 ( BEC ) の実現とその応用

## (2) レーザー冷却法

- 冷却 ( Doppler 冷却、偏向勾配冷却、蒸発冷却 )
- 捕捉 ( 光双極子トラップ、磁気光学トラップ、磁気トラップ )

## (3) BEC 生成実験 ( $^{87}\text{Rb}$ 原子、磁気トラップ )

## (4) 高次量子渦 ( 循環量子数 4 )



# 概観

1975 レーザー冷却法の提案

1979 原子ビームのレーザーを用いた減速

1985 3次元的な冷却



## mK 以下の極低温原子集団

- **様々な原子種**: アルカリ金属、アルカリ土類、希ガスなど
- **極低温**: mK ~ 100 nK
- **高密度**:  $< 10^{14} / \text{cc}$
- **微小領域**: mm ~ 100 nm

# 冷却の利点

原子が冷えると……

- 光や電磁場による中性原子の運動制御

磁場 (Zeeman効果)                      →                      磁気トラップ

100 Gauss ~ mK

静電場 (Stark効果)                      →                      Stark Atom Chip

1 V /  $\mu\text{m}$  ~  $\mu\text{K}$   $\ll$  Zeeman効果

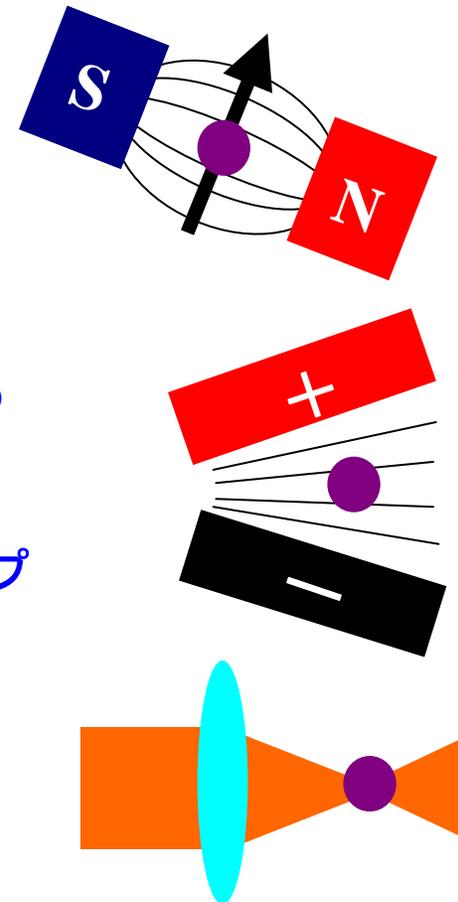
光電場 (AC Stark効果)                      →                      光双極子カトラップ

10 W / (10  $\mu\text{m}$ )<sup>2</sup> ~ mK

- 顕著な量子性                      →                      BEC

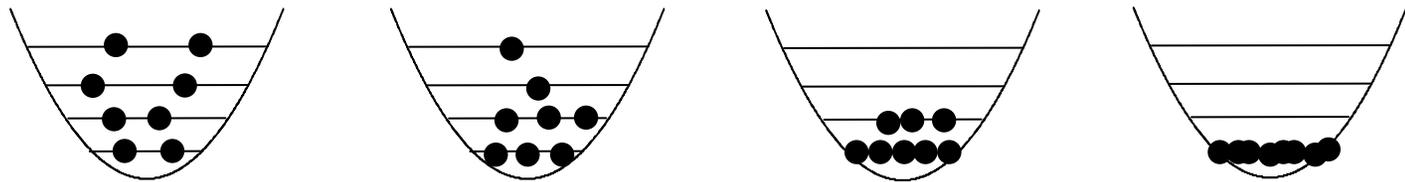
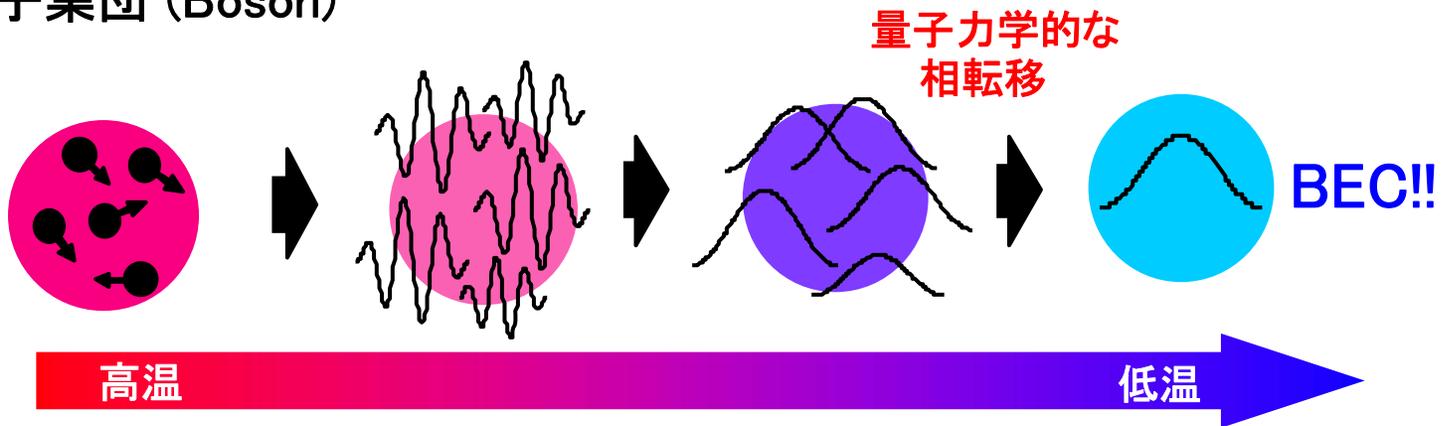
原子の波束のサイズ: 熱的 de Broglie 波長

$$\lambda_{dB} = h / \sqrt{2\pi m k_B T} \sim 1 \mu\text{m} @ 100 \text{ nK}$$



# 量子縮退 (Bose粒子/Bose凝縮)

原子集団 (Boson)

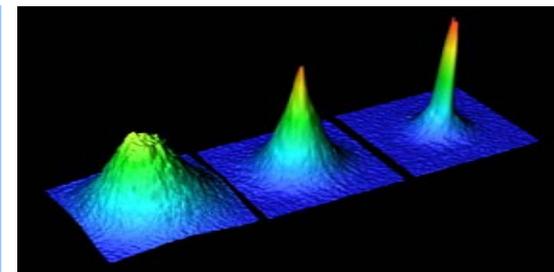


(例) 超流動ヘリウム

BEC転移の条件

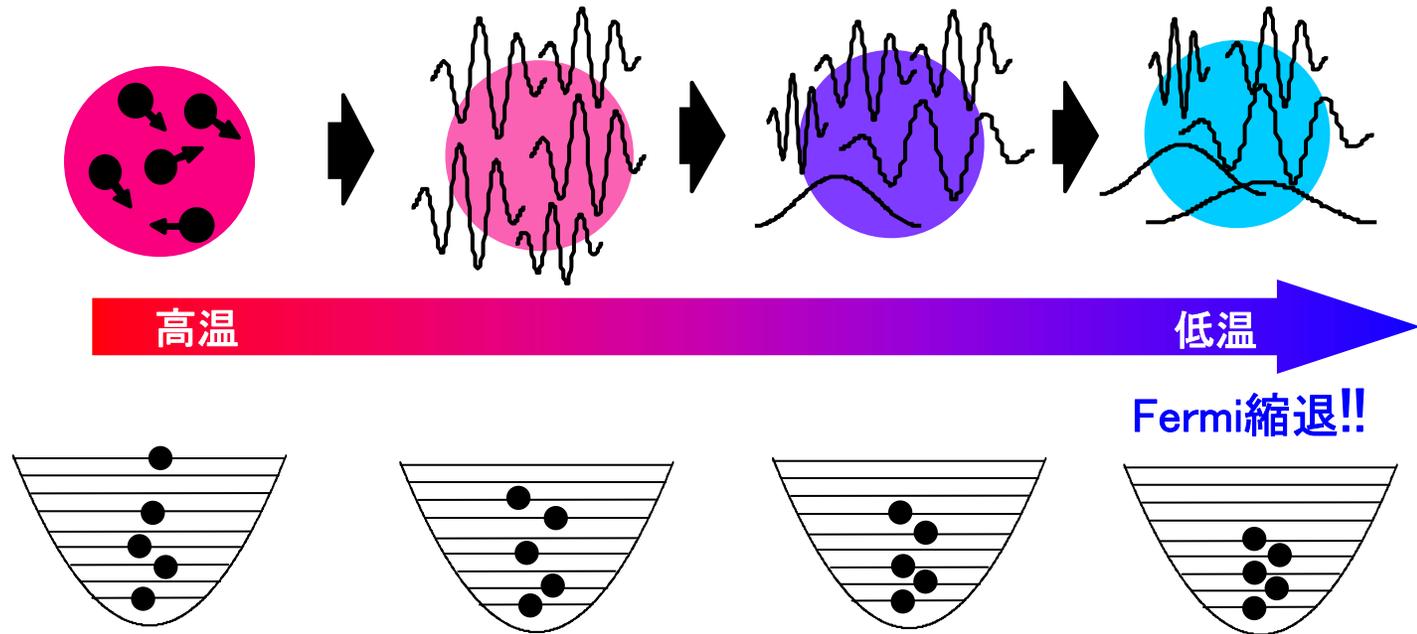
$$\begin{cases} \rho \equiv n \lambda_{dB}^3 \geq 2.61 \\ T \leq T_c \equiv \left( \frac{h^2}{2\pi m k_B} \right) \left( \frac{N}{2.61 V} \right)^{2/3} \end{cases}$$

$$T_c \sim 100 \text{ nK} \quad @ \quad n \sim 10^{13-14} / \text{cc}$$



# 量子縮退 (Fermi粒子/Fermi縮退)

原子集団 (Fermion)



(例) 金属中の自由電子 (Fermi流体)

粒子間の引力相互作用  $\longrightarrow$  Cooper pairの形成とBEC  $\longrightarrow$  超伝導  
(BCS状態)

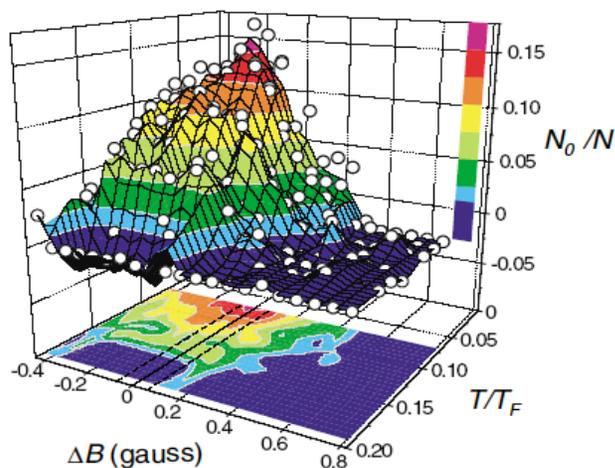
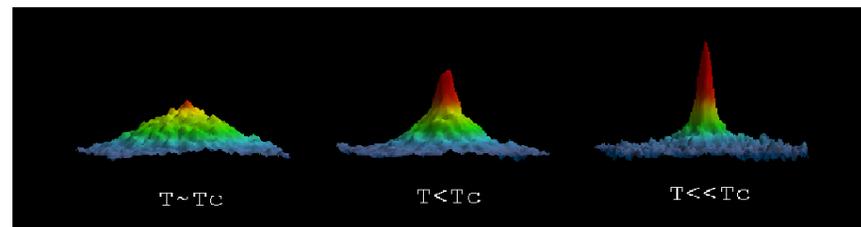
# 希薄原子気体における量子縮退状態の実現

1995 Rb原子でのBEC

1999 K原子でのFermi縮退

2003 アルカリ金属分子のBEC

2004 BEC-BCS Crossover の観測 ( $^{40}\text{K}$ ,  $^6\text{Li}$ )



原子BEC :  $^1\text{H}$ ,  $^7\text{Li}$ ,  $^4\text{He}^*$ ,  $^{23}\text{Na}$ ,  $^{41}\text{K}$ ,  
 $^{52}\text{Cr}$ ,  $^{85}\text{Rb}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ ,  $^{133}\text{Cs}$ ,  $^{174}\text{Yb}$

分子BEC ( Boson ) :  $^{23}\text{Na}$ ,  $^{85}\text{Rb}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ ,  $^{133}\text{Cs}$   
( Fermion ) :  $^6\text{Li}$ ,  $^{40}\text{K}$

Fermi縮退、BCS :  $^6\text{Li}$ ,  $^{40}\text{K}$

# 希薄原子気体における量子縮退状態の利点

これまでの研究対象……

**BEC** : 超流動ヘリウム、超伝導体中の電子対

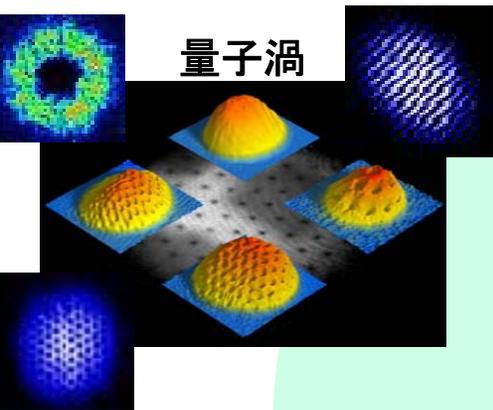
**Fermi縮退**: 金属中の電子

高密度、強い相互作用  
光では直接観測不能

新しい量子縮退状態では……

- 原子の光学遷移を用いた直接観測が可能
- 光、磁場、電場で操作が可能  
位置、運動量、角運動量、散乱長、超流動性

# 原子・分子・光物理学の新展開



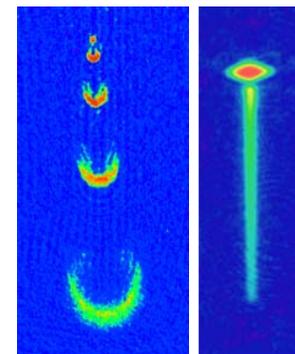
## 量子凝縮相

BEC  
Fermi縮退  
BCS状態  
混合系  
量子渦  
量子トンネル効果  
素励起  
相構造  
量子相転移

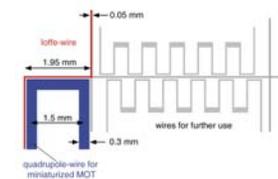
## 超精密工学

原子時計  
周波数標準  
原子干渉計  
原子チップ  
原子レーザー  
原子光学

## 原子レーザー



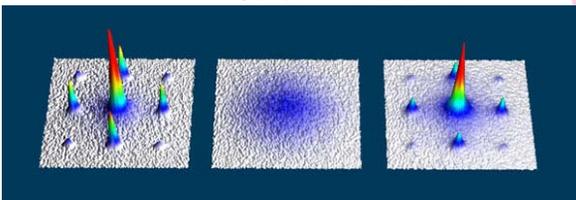
## 原子チップ



## 量子情報処理

量子計算機  
量子暗号  
量子テレポーテーション

## Mott 転移 / 光格子



SF → Mott I → SF

# 研究テーマ@京都大学量子光学研究室

## $^{87}\text{Rb}$ 原子のBEC

- 磁気トラップ

トラップ磁場を利用した高次量子渦の発生  $\iff$  量子凝縮相の研究

- $\text{CO}_2$ レーザー ( $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ ) を用いた光トラップ

スピン自由度

多成分系(相図、相分離)、電場によるスピン共鳴

光格子 ( $d = 5.3 \mu\text{m}$ )

格子点への捕捉、単一格点へのアクセス、操作  $\iff$  量子情報処理

## Yb原子のBEC、Fermi縮退:

- 可視光レーザー ( $\lambda = 532 \text{ nm}$ ) の光トラップ

アルカリ土類様原子

電子スピンを持たない: **spinless BEC**

長寿命な準安定状態: 光周波数標準(スピン禁制遷移)

豊富な同位体 (Boson: 168, 170, 172, **174**, 176; Fermion: 171, 173)

様々な混合系: BEC-BEC, BEC-FD, FD-FD

光格子: fermionを用いた高温超伝導体の**量子シミュレーション**

# レーザー冷却・トラップ法

## (1) 光が原子に与える力

散乱力 → Doppler冷却  
磁気光学トラップ

光双極子力 → 光双極子カトラップ  
(AC Stark 効果) 偏向勾配冷却

## (2) 捕捉法

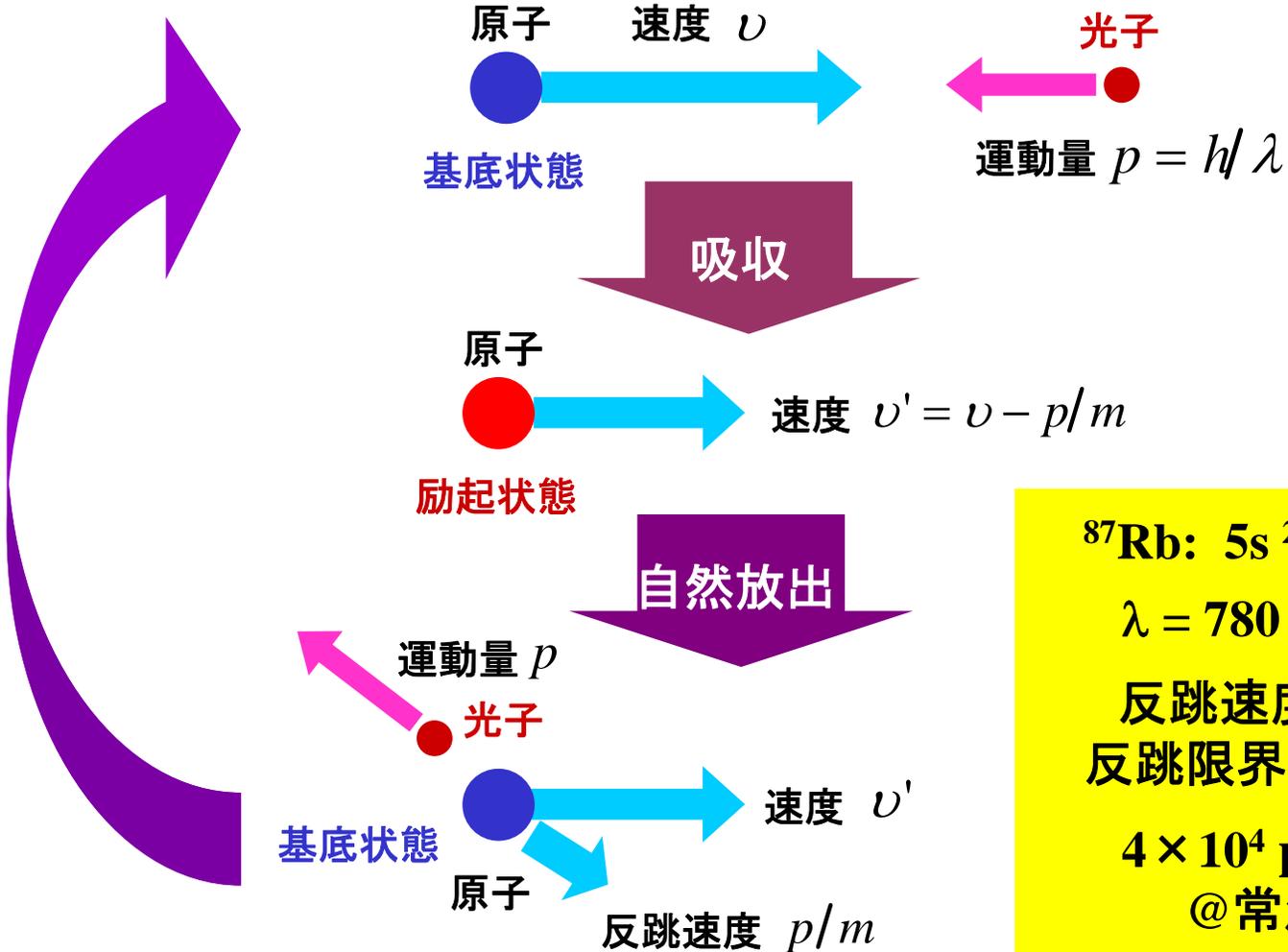
磁気トラップ

## (3) 冷却法

蒸発冷却

光は使用せず

# 散乱力



$^{87}\text{Rb}: 5s\ ^2S_{1/2} \rightarrow 5p\ ^2P_{3/2}$

$\lambda = 780\ \text{nm}, \tau = 27\ \text{ns}$

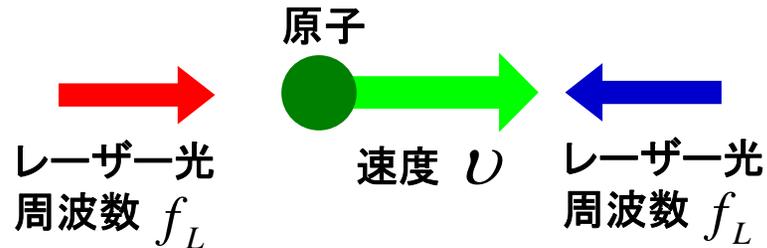
反跳速度  $6\ \text{mm/s}$

反跳限界温度  $360\ \text{nK}$

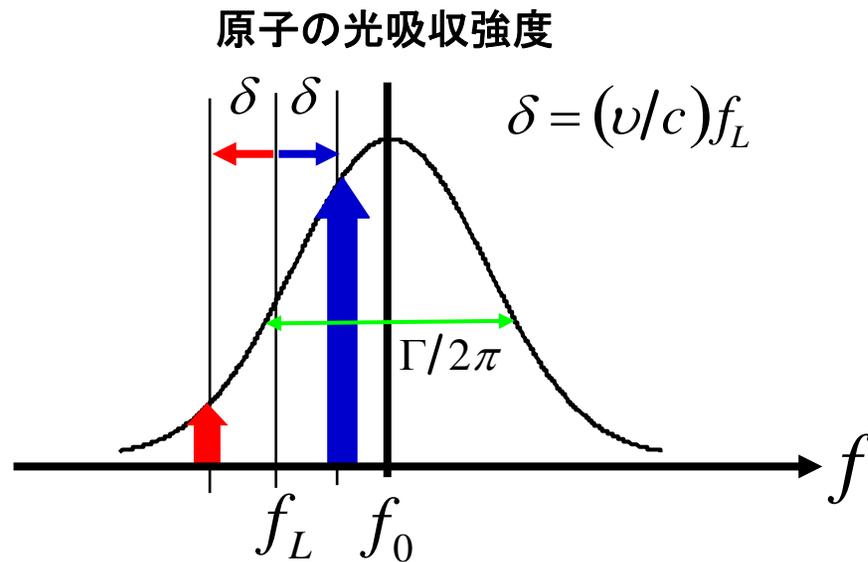
$4 \times 10^4\ \text{photons}, 2\ \text{ms}$

@ 常温  $240\ \text{m/s}$

# Doppler 冷却



Doppler 限界温度  $T_D = h\Gamma/k_B$



$^{87}\text{Rb}: 5s\ ^2S_{1/2} \rightarrow 5p\ ^2P_{3/2}$

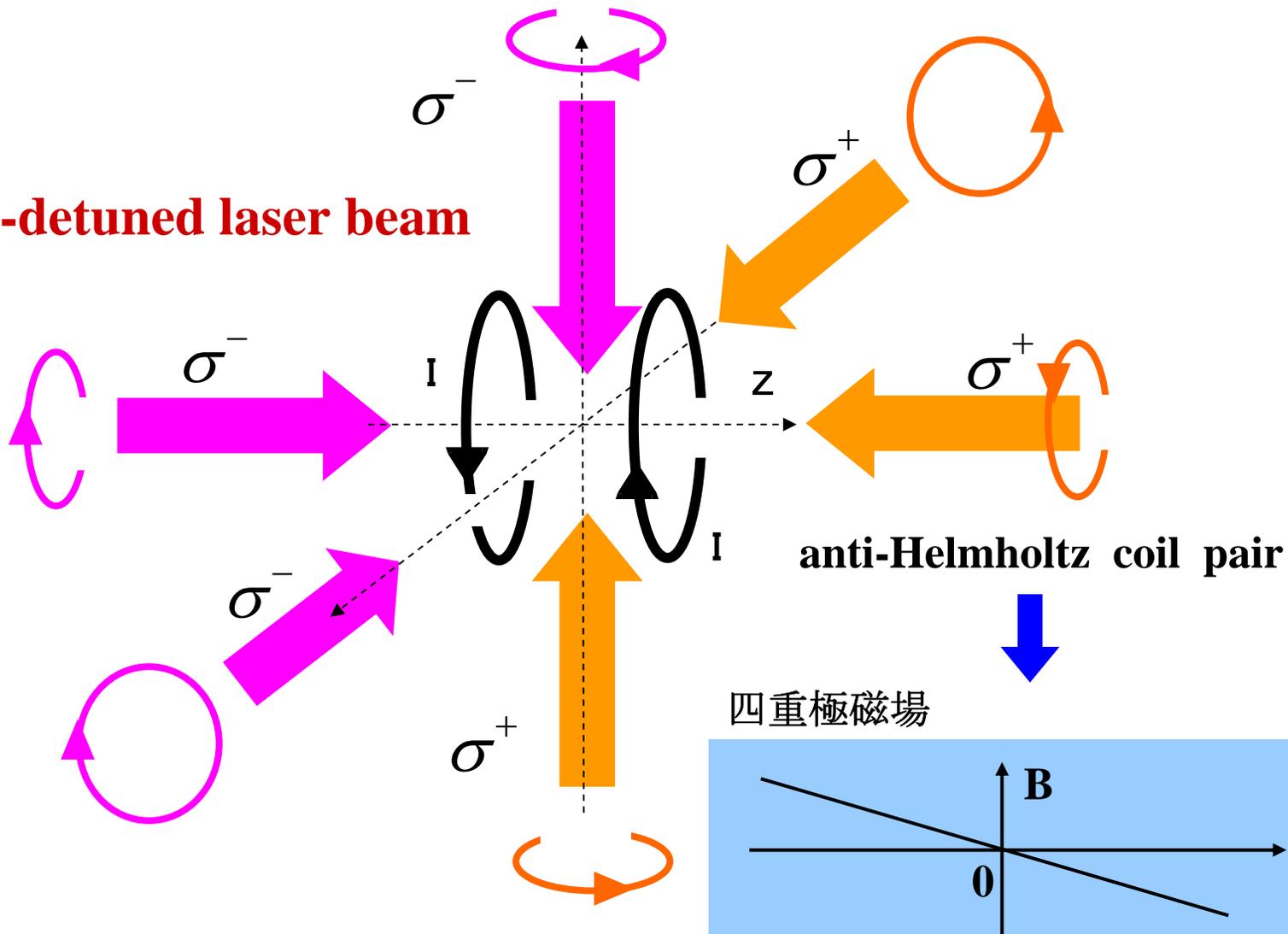
$\lambda = 780\ \text{nm}$

$\tau = 27\ \text{ns}, \Gamma = 2\pi \times 6\ \text{MHz}$

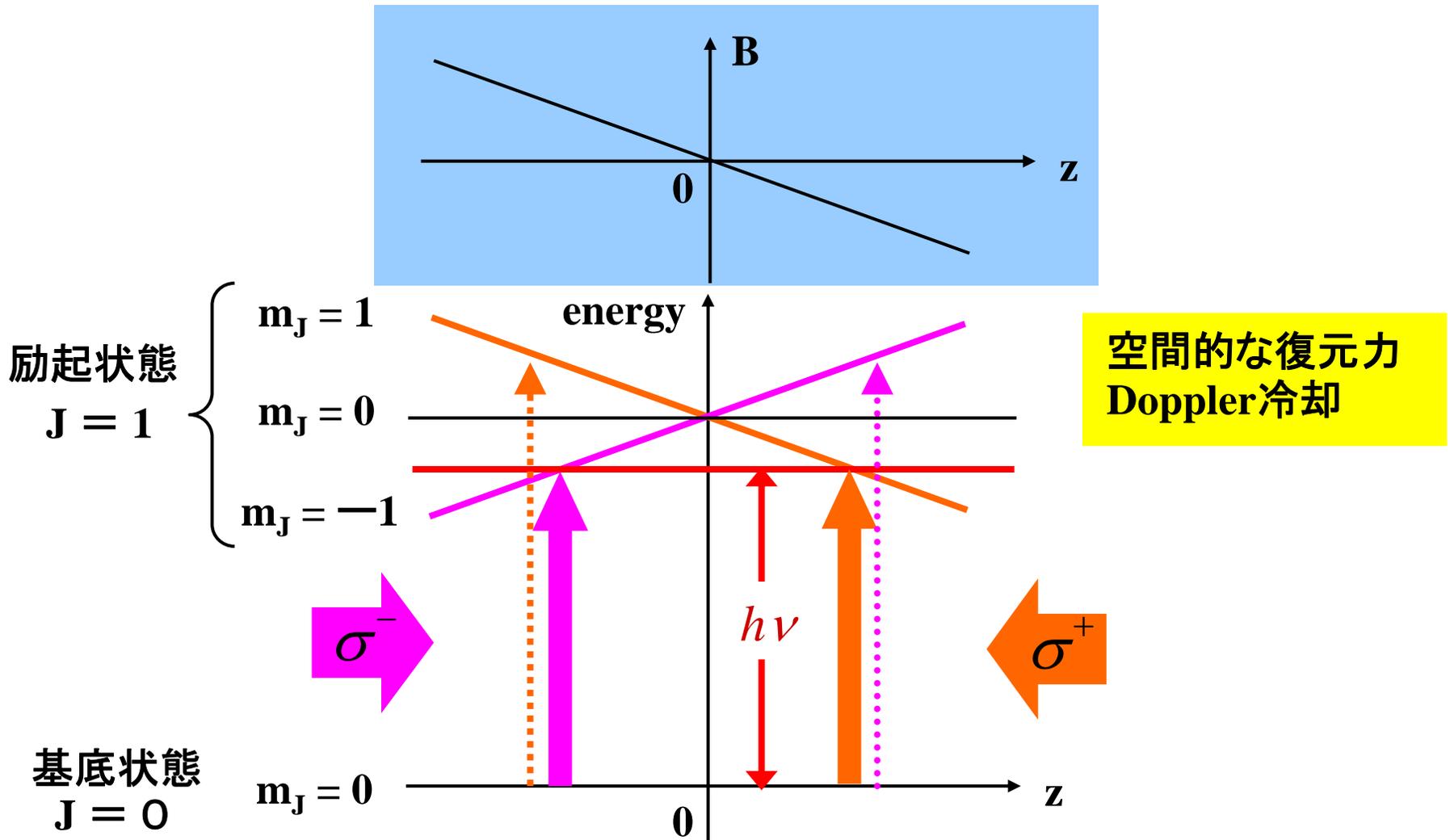
$T_D = 140\ \mu\text{K}$

# 磁気光学トラップ (MOT)

Red-detuned laser beam

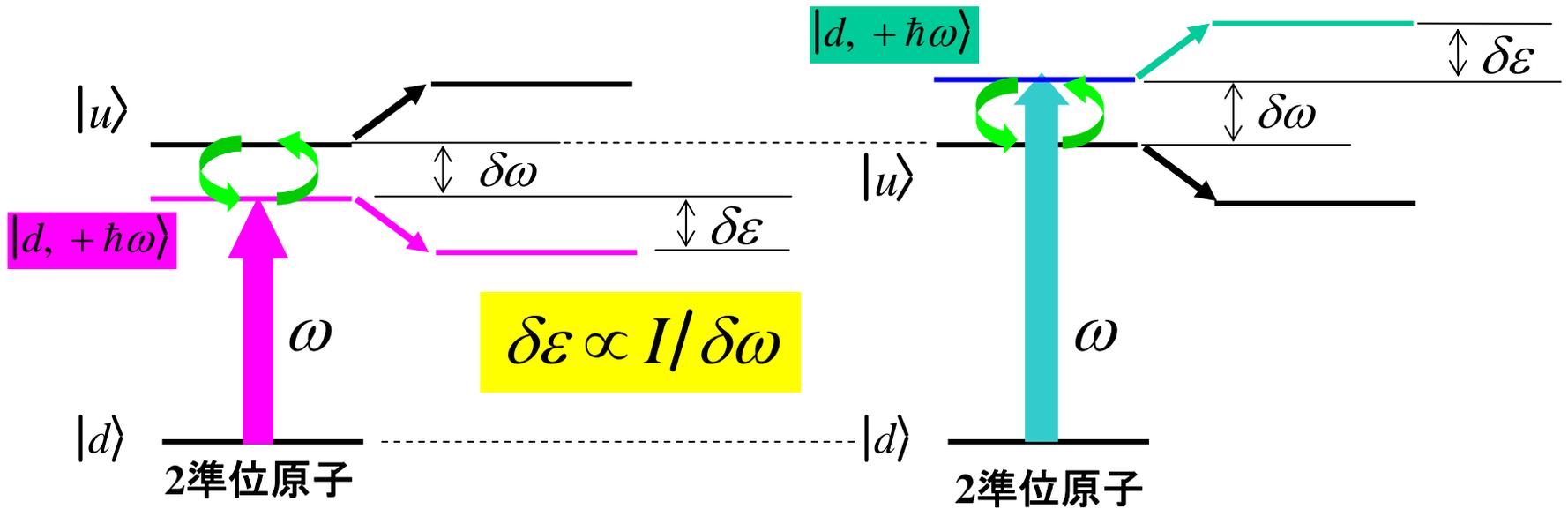


# MOTの原理



# 光双極子力

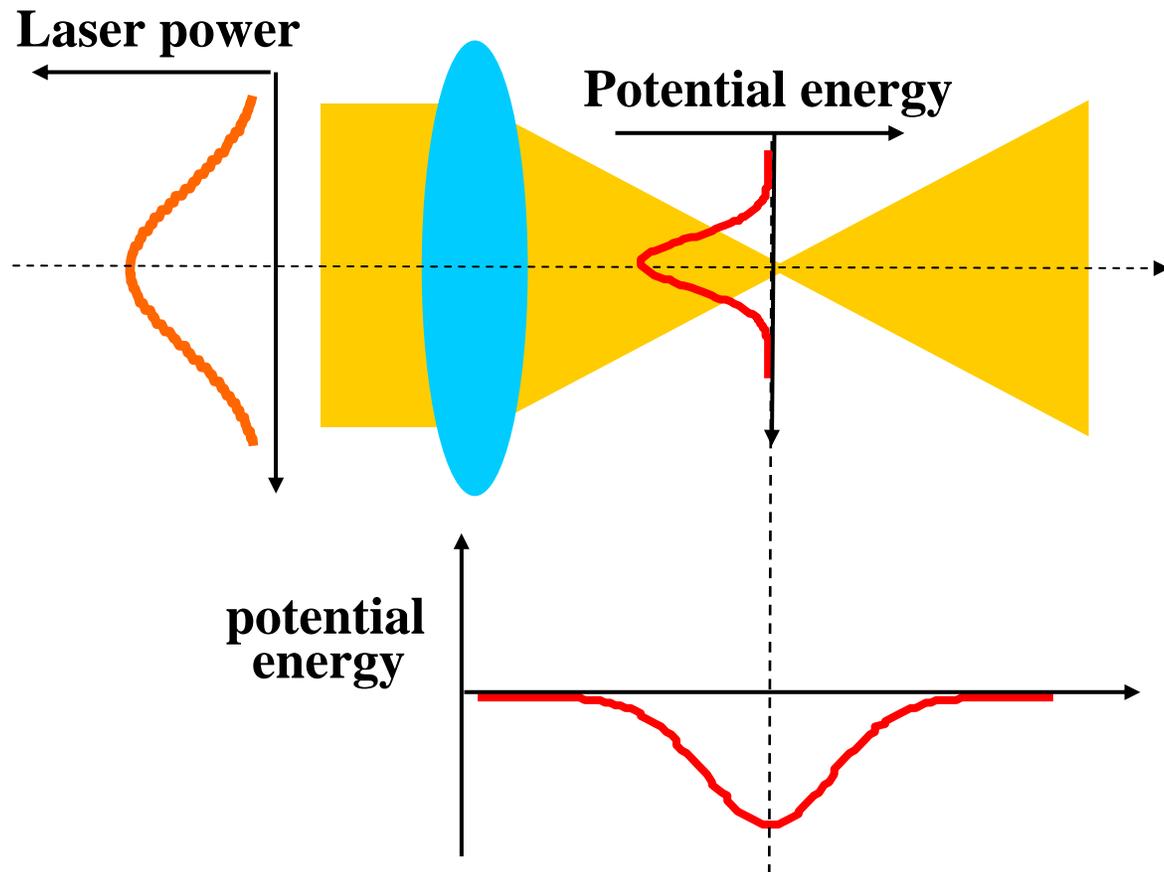
( AC Stark效果、Dressed state )



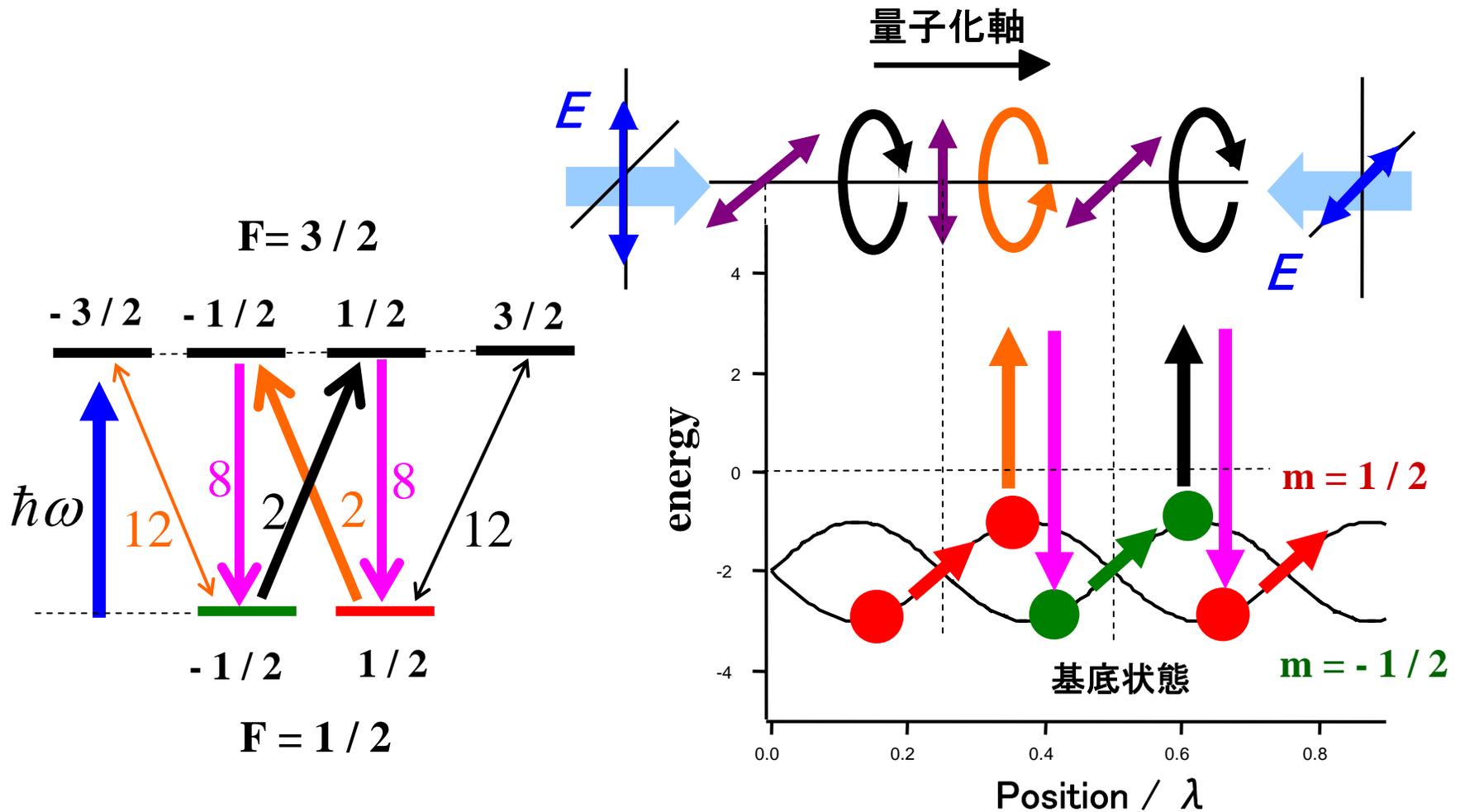
$^{87}\text{Rb}: 5s\ ^2\text{S}_{1/2} \rightarrow 5p\ ^2\text{P}_{1/2} (\lambda = 795\text{ nm})$

$\sim 6\text{ mK} @ 814\text{ nm}, 0.8\text{ W}, 10\ \mu\text{m}$

# 光双極子カトラップ



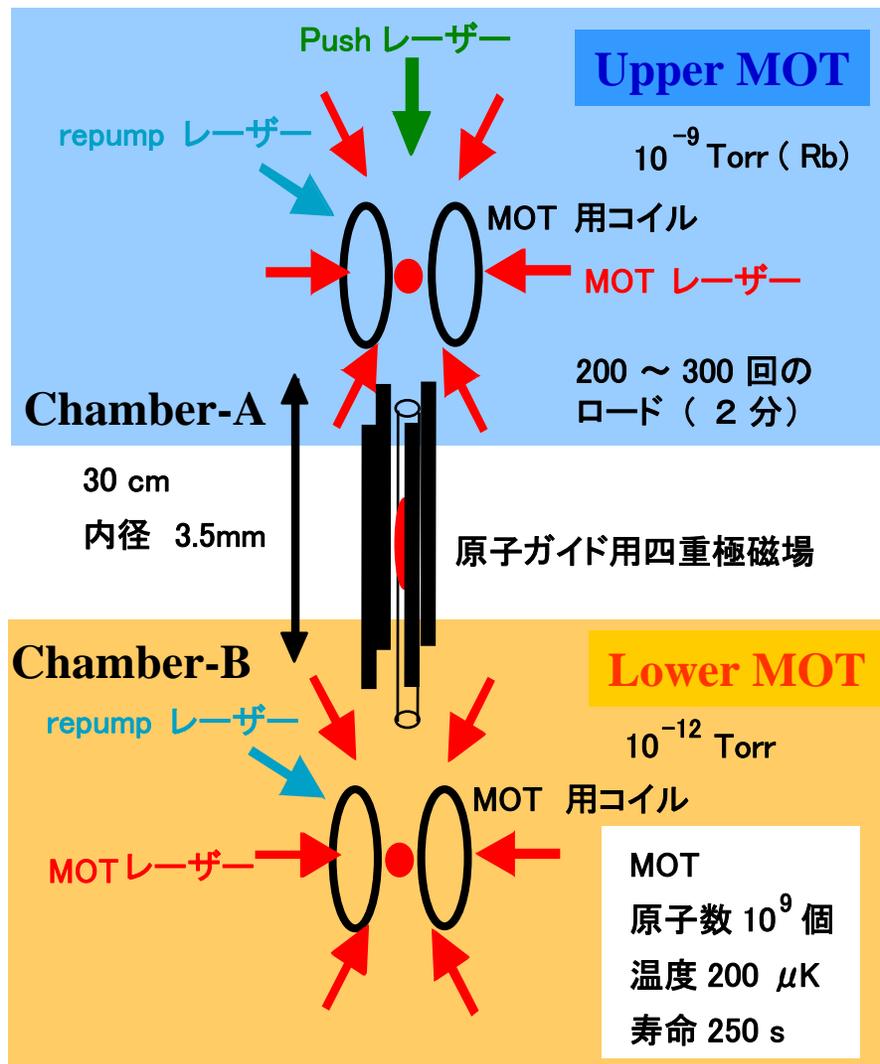
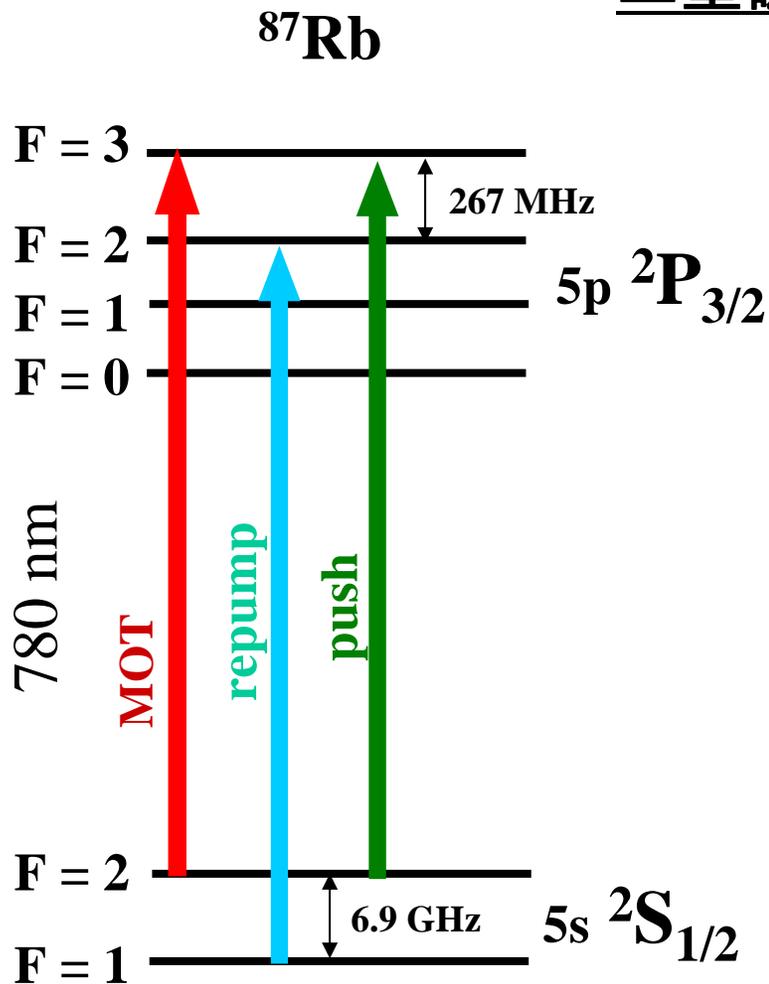
# 偏向勾配冷却 (PGC)



Doppler限界以下、反跳限界程度まで冷却可

# $^{87}\text{Rb}$ のBEC生成 / MOT

## 二重磁気光学トラップ (Double MOT)

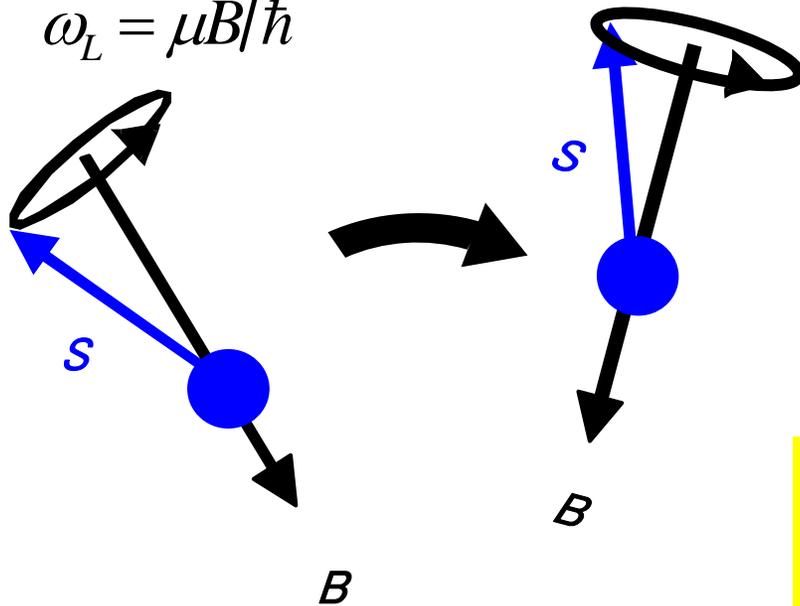


# 磁気トラップ

不均一磁場で原子を捕捉

Lamor precession

$$\omega_L = \mu B / \hbar$$



断熱追従条件

$$\omega_L \gg |dB/dt|/B$$



磁気量子数  $m(\mu)$  が不変

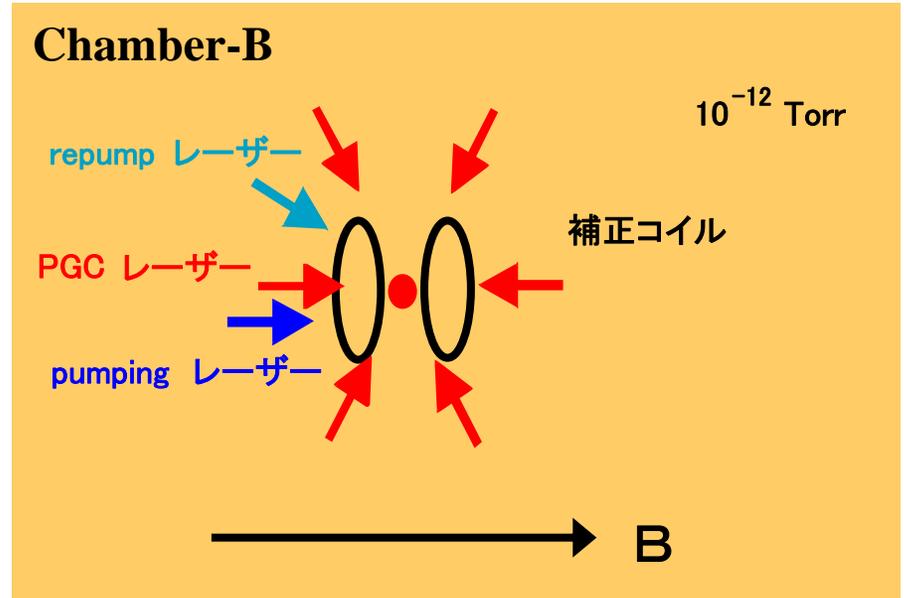
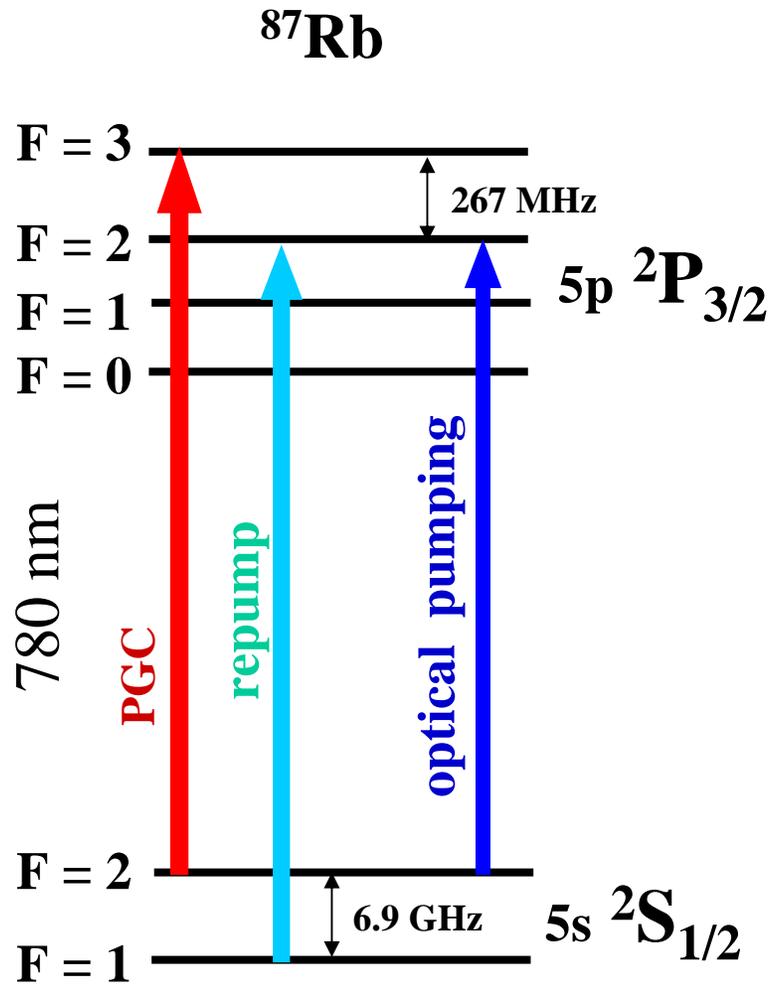
$$U = \mu |B|$$

$\mu > 0$  : 低  $|B|$  へ向かう力

電子スピン (Bohr磁子)

100 Gauss  $\sim$  mK

# 磁気トラップへの移行

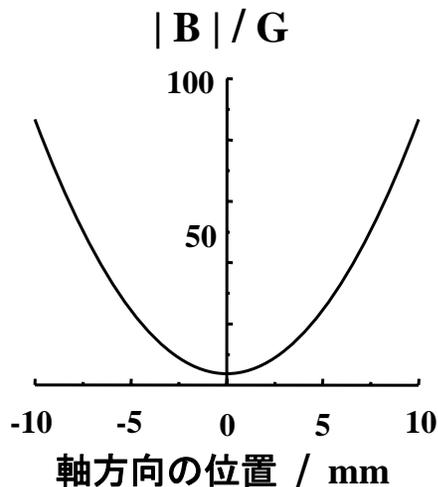
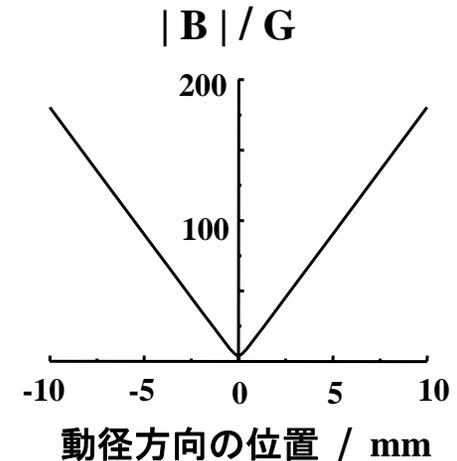
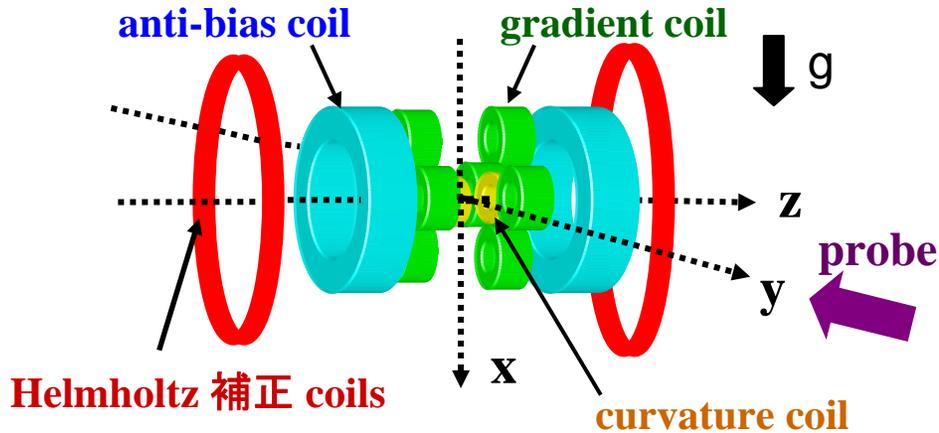


$^{87}\text{Rb}$  in the ground  $F=2$ ,  $m_F=2$  state

# $^{87}\text{Rb}$ のBEC生成 / 磁気トラップ

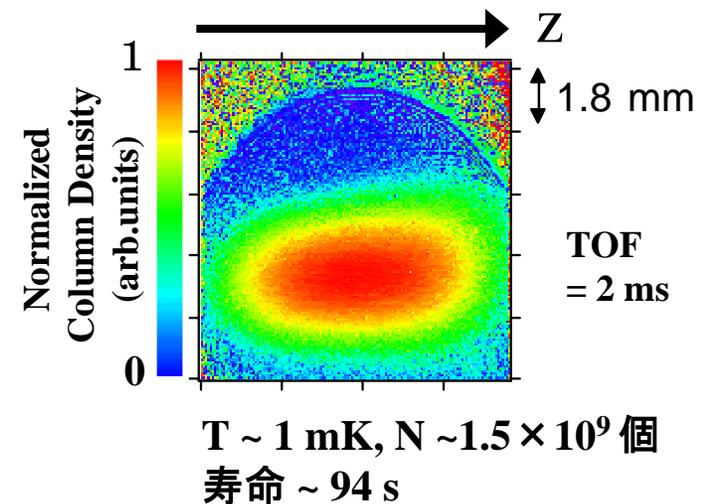
$^{87}\text{Rb}$  in the ground  $F = 2, m_F = 2$  state

## clover-leaf configuration

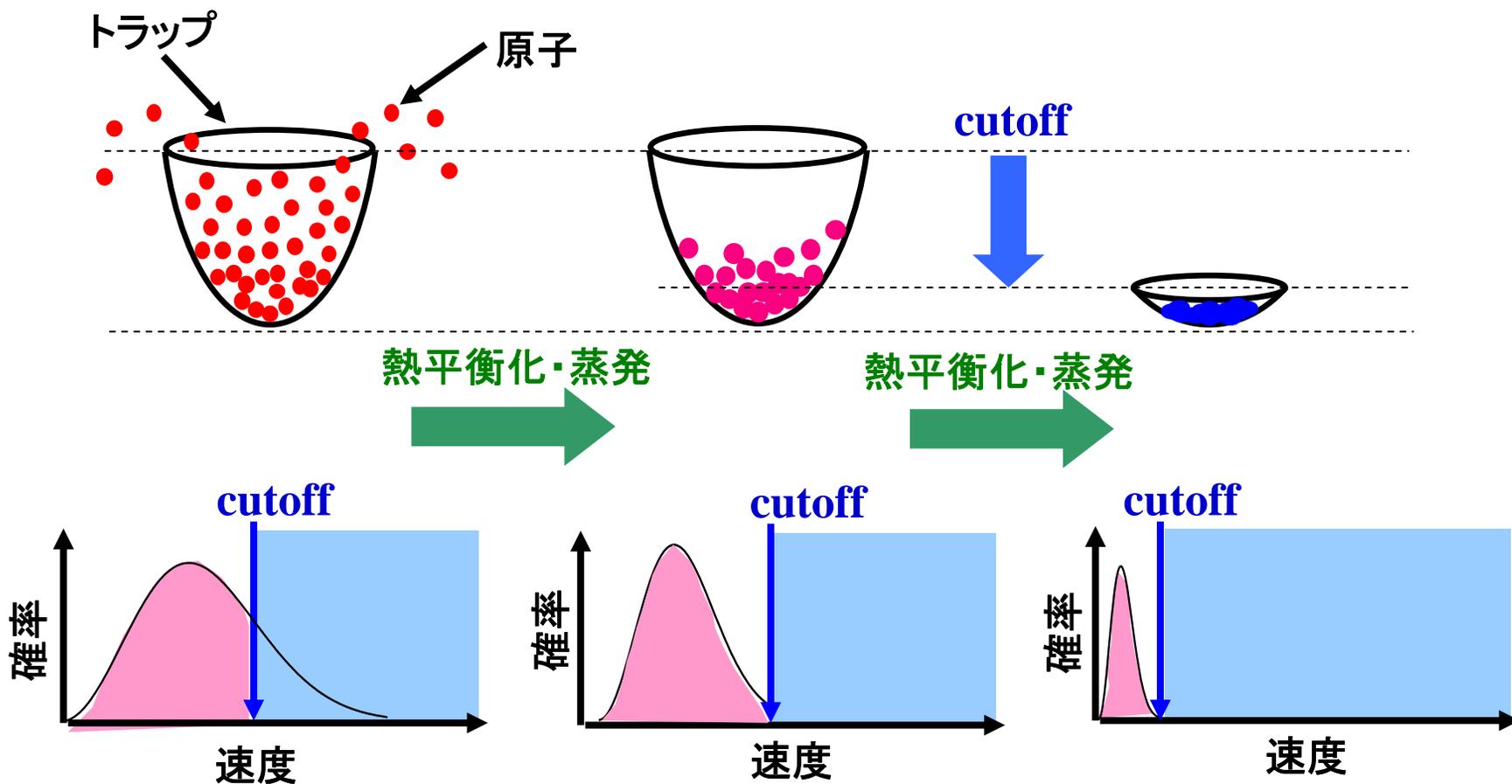


$$\begin{cases} B'_{\text{radial}} = 180 \text{ G/cm} \\ B''_{\text{axial}} = 140 \text{ G/cm}^2 \\ B_0 \sim 0.4 \text{ G} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \omega_{\text{radial}} \sim 2\pi \times 380 \text{ Hz} \\ \omega_{\text{axial}} \sim 2\pi \times 15 \text{ Hz} \end{cases}$$



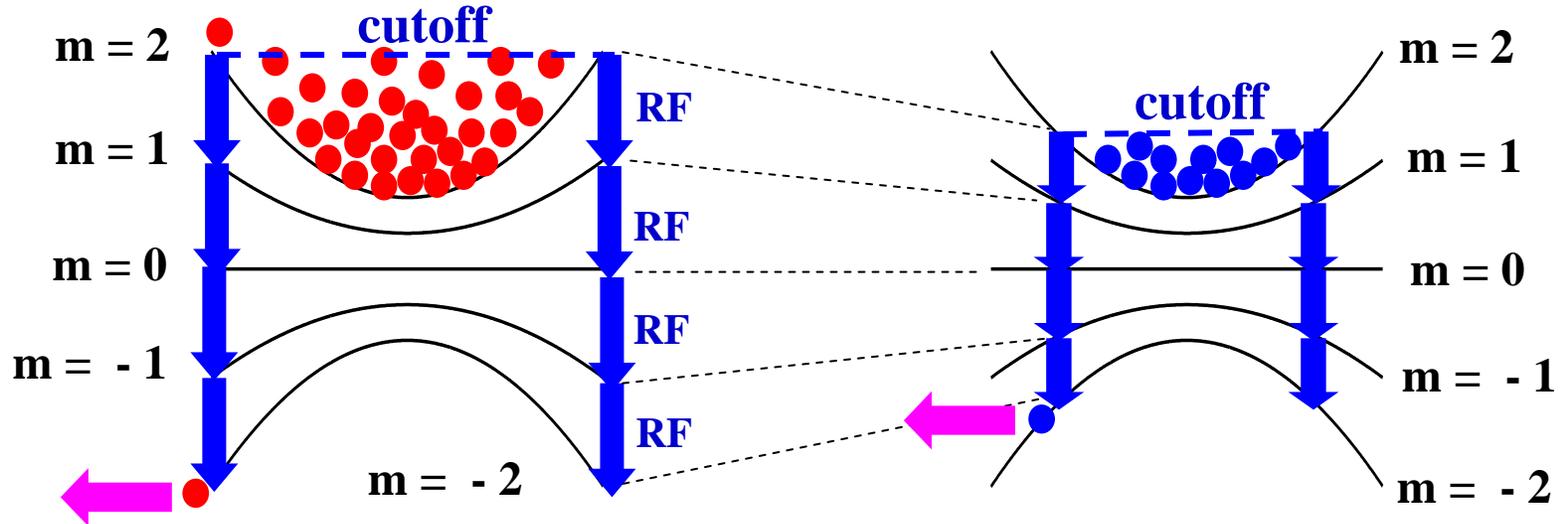
# 蒸発冷却



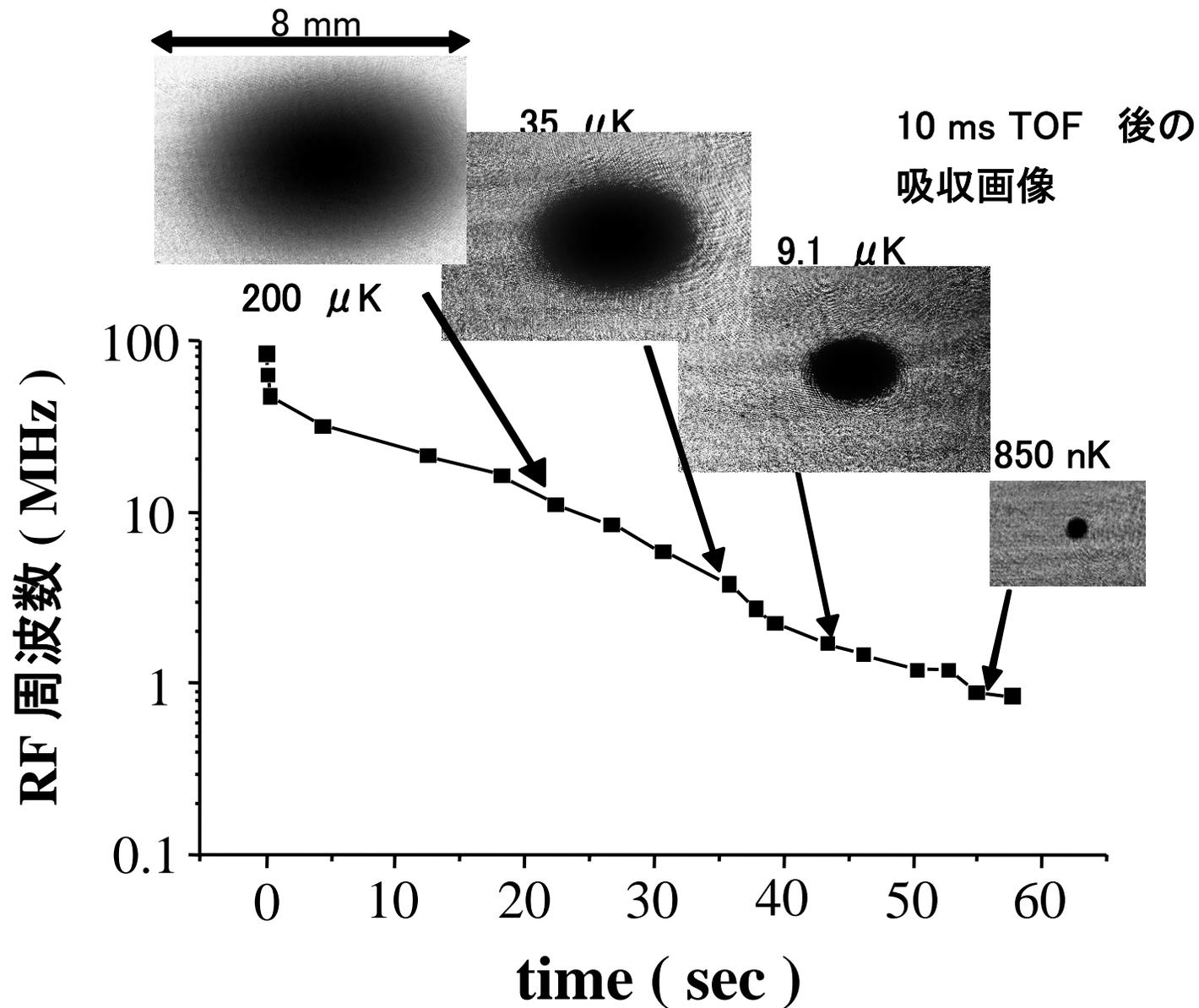
光を用いないので反跳限界以下まで冷却可能

# 蒸発冷却の手法

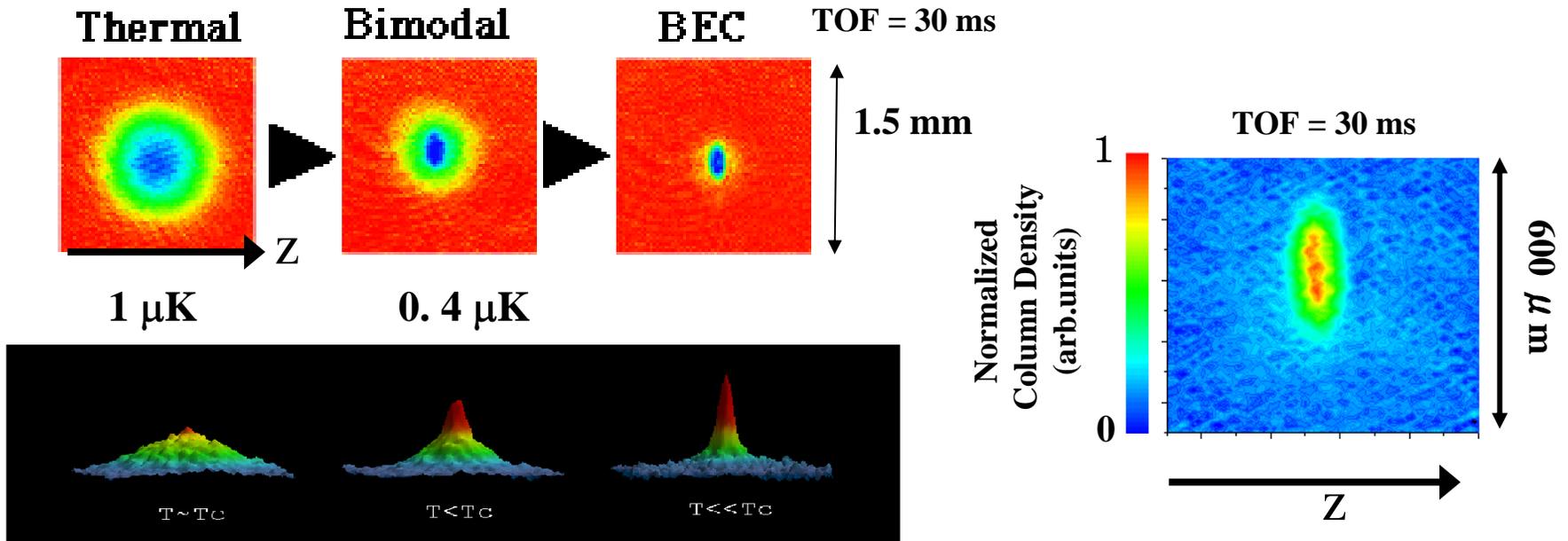
## RF evaporation



# $^{87}\text{Rb}$ のBEC生成 / RF蒸発冷却



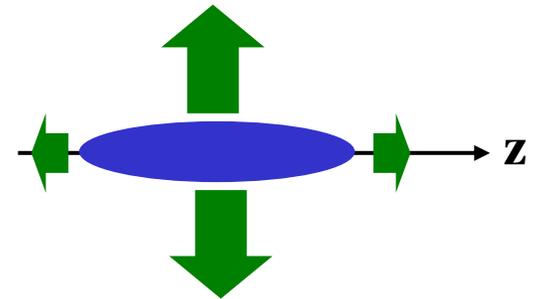
# $^{87}\text{Rb}$ のBEC生成



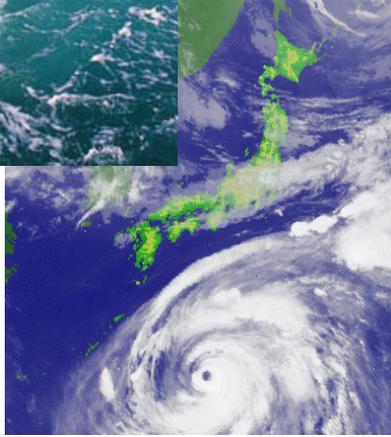
**BEC**  $N=5 \times 10^5$  個、 $\mu \sim 140 \text{ nK}$   
全幅：軸方向  $\sim 30 \mu\text{m}$   
動径方向  $\sim 10 \mu\text{m}$

$\omega_{\text{radial}} \sim 2\pi \times 380 \text{ Hz}$

$\omega_{\text{axial}} \sim 2\pi \times 15 \text{ Hz}$



# $^{87}\text{Rb}$ のBECを用いた量子渦研究



## 渦

身近な物理現象

古典的な流体力学で重要な役割

渦の発生、消滅そしてその運動が流体全体の運動やエネルギー緩和に大きな影響

流れによる渦の変形や渦糸間の相互作用により運動は複雑

超流動体で実現する量子渦

渦度が特異点に閉じ込められた渦

循環の量子化

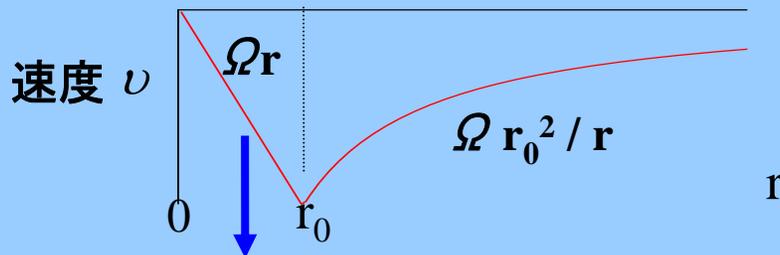
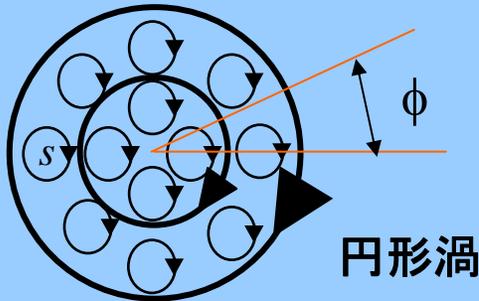
渦を理解する鍵

# 古典的な渦と量子渦

## 古典的な流体

速度場:  $v$

渦度(循環):  $s = \nabla \times v = 2\Omega$



剛体回転的  
角速度  $\Omega = s/2 \neq 0$

## 超流動体

Order parameter:  $\Psi(r) = \sqrt{n(r)} e^{i\theta(r)}$

速度場  $v = (\hbar/m)\nabla\theta$

⇒ 渦度  $s = \nabla \times v = 0$   
剛体とは異なった回転

$$\Psi(r) = \sqrt{n(r)} e^{is\phi}$$

全角運動量  $L_z = Ns\hbar$

速度  $v = (\hbar/m)(s/r)$

循環  $\oint v \cdot dl = 2\pi s(\hbar/m)$

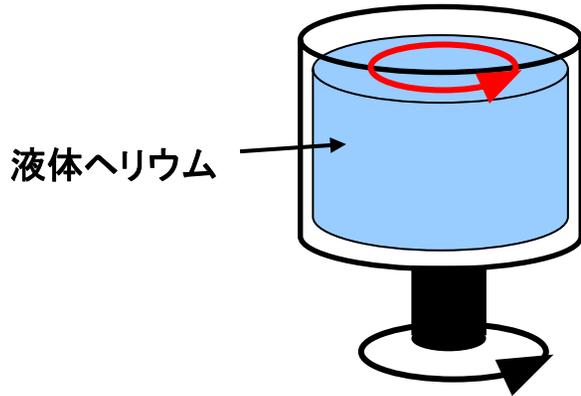
量子渦

超流動性の現れ

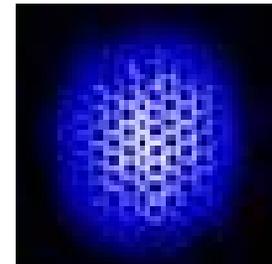
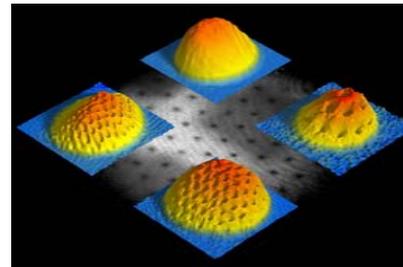
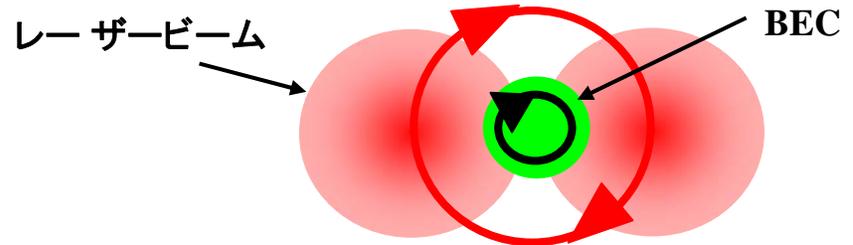
# 量子渦生成法

超流動体：液体ヘリウム

容器を廻す



希薄原子気体のBEC



量子渦、渦格子の観測

$s = 1$ 、 $s > 1$  ~~X~~

$s = 1$  の渦に崩壊した方がエネルギー的に安定

$$v(r)_{s=2} = 2v(r)_{s=1}$$

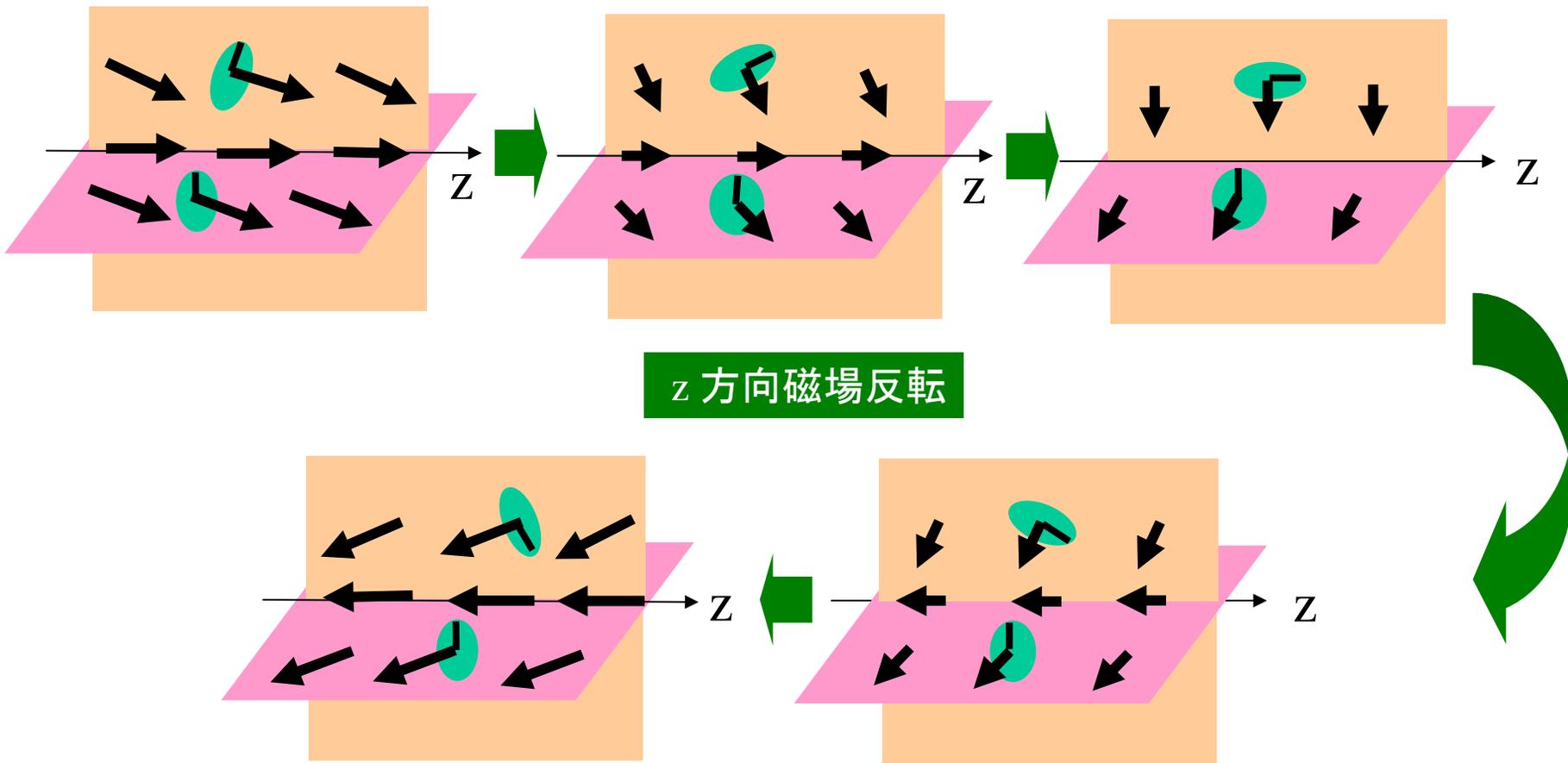
$$E_{s=2} = 4E_{s=1} > 2E_{s=1}$$

原子スピンとトラップ磁場を利用したトポロジカルな高次量子渦生成法

T.Isoshima *et al.*, Phys. Rev. A 61, 63610 (2000)

# 高次量子渦生成法

Ioffe-Pritchard型の磁気トラップ磁場: [radial 方向成分] 四重極型  
[axial 方向成分] 一様

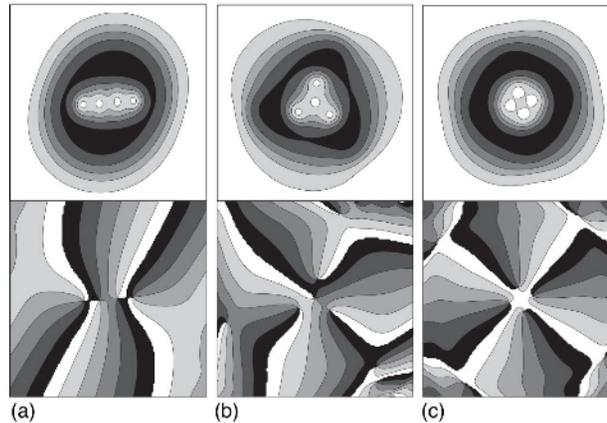


原子スピンの大きさ  $m$  の場合、渦度  $2m$  の量子渦

# 高次量子渦の物理

## ■ 崩壊過程、渦糸のダイナミクス

- (理論予想) 原子間相互作用により安定性や崩壊過程が変化する



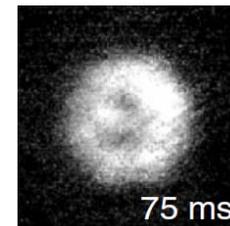
Y.Kawaguchi and T.Ohmi, *Phys. Rev. A* 70, 043610 (2004)

- Kelvinモードなどの励起が渦糸の崩壊ダイナミクスに与える影響
- 渦サイズ  $>$  渦間距離  $\rightarrow$  近接量子渦間の相互作用

# 高次量子渦の生成実験

## ■ 磁気トラップ中に捕捉した $^{23}\text{Na}$ のBECで実証

- $|F, m_F\rangle = |1, -1\rangle, |2, 2\rangle$  を用いてそれぞれ 渦度 2, 4 の量子渦を生成  
A. E. Leanhardt *et al.*, Phys. Rev. Lett. 89, 190403 (2002)
- $|F, m_F\rangle = |1, -1\rangle$  の渦度 2 の量子渦で崩壊を観測  
Y. Shin *et al.*, Phys. Rev. Lett. 93, 160406 (2004)



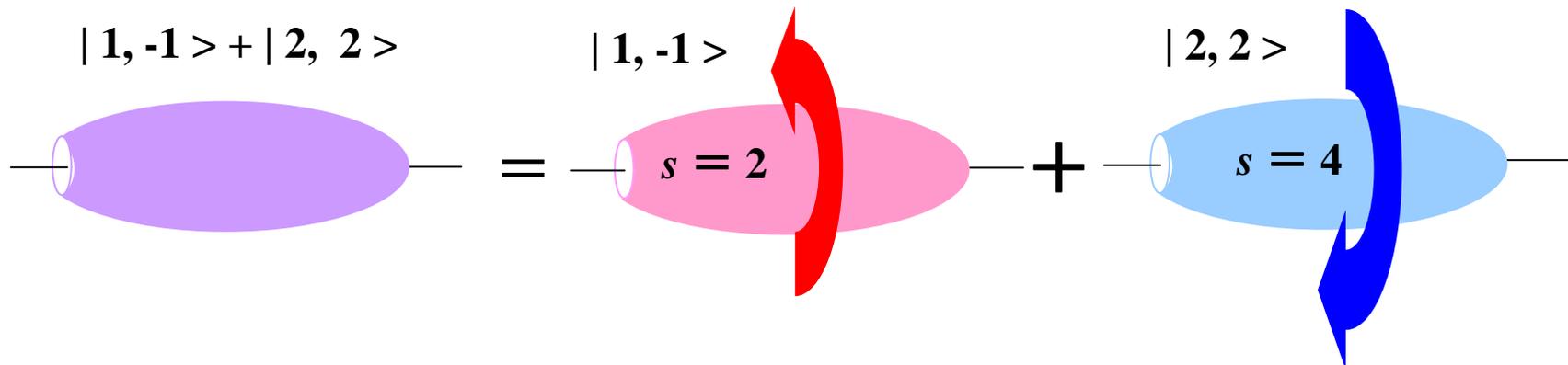
## ■ $^{87}\text{Rb}$ を用いての高次量子渦の生成実験

### 【利点】

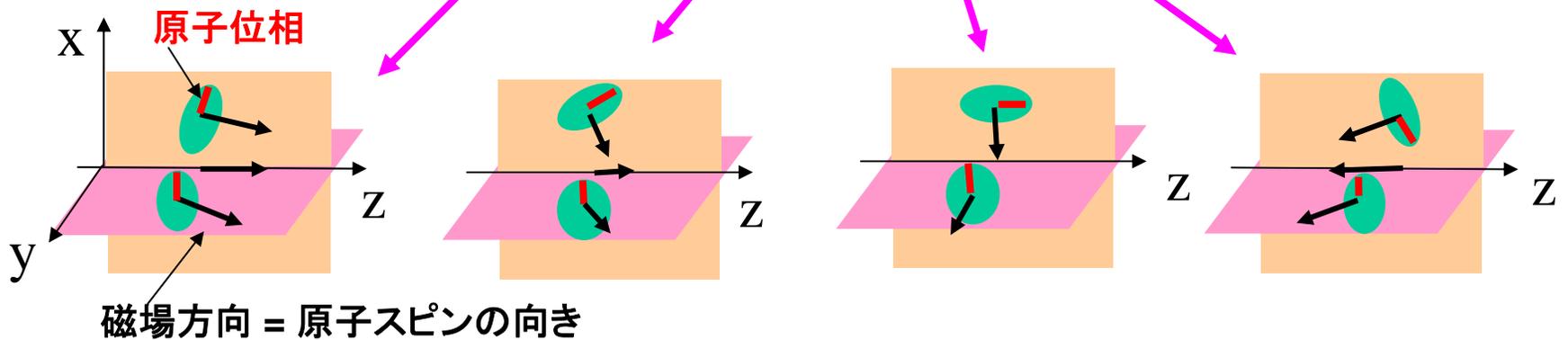
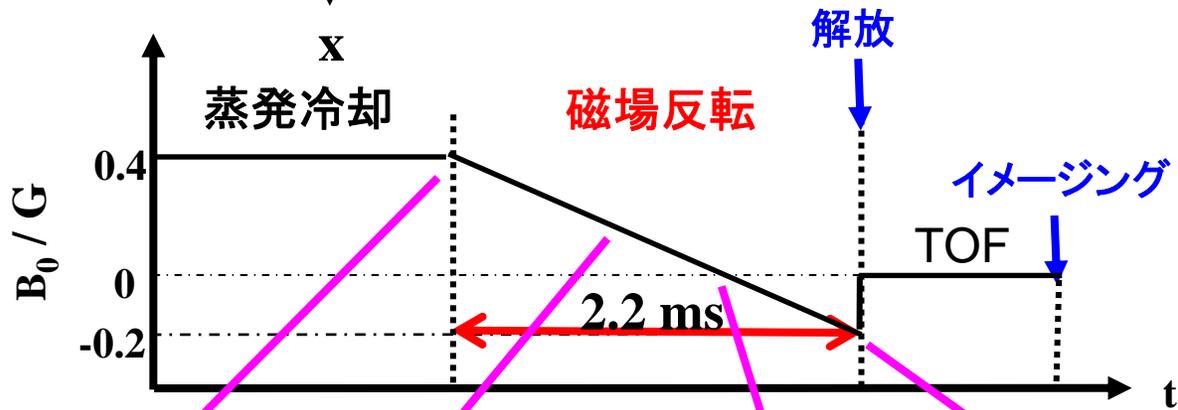
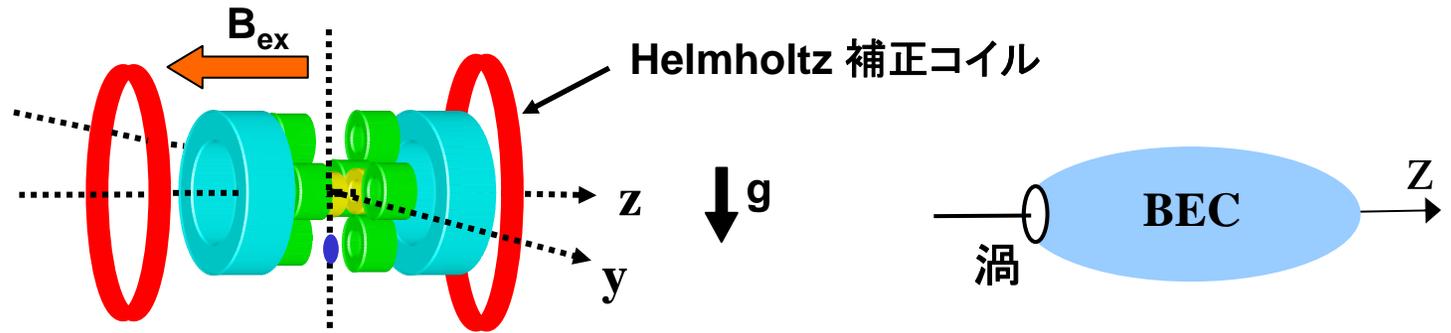
- $|F, m_F\rangle = |1, -1\rangle, |2, 2\rangle$  のdual BEC spin-exchange collision rate が小さい



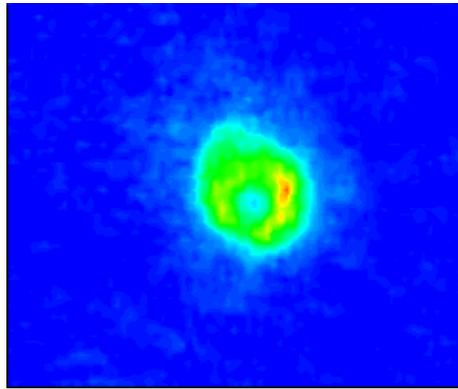
渦度  $s = 2, 4$  で逆回転する量子渦を持つBECのmixture



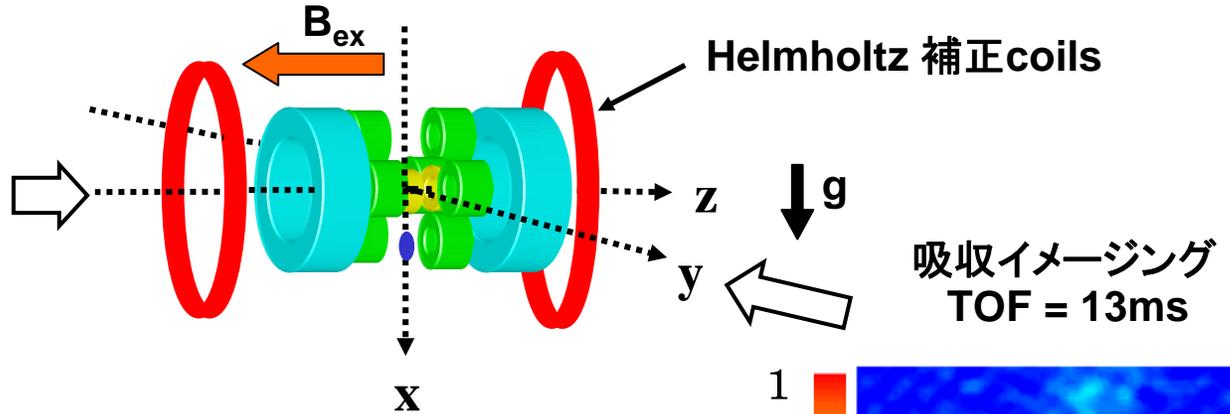
# 磁場反転



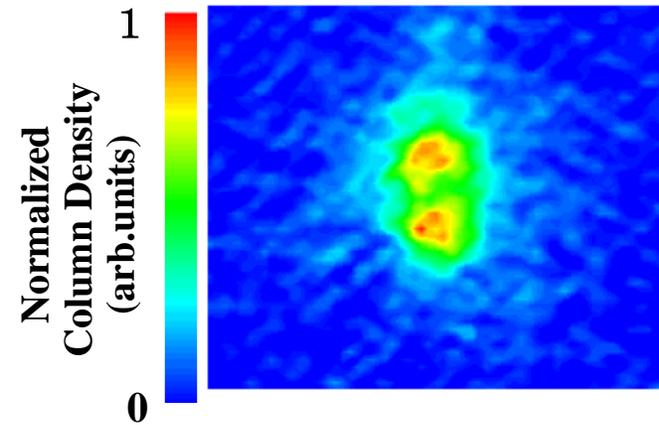
# 量子渦生成



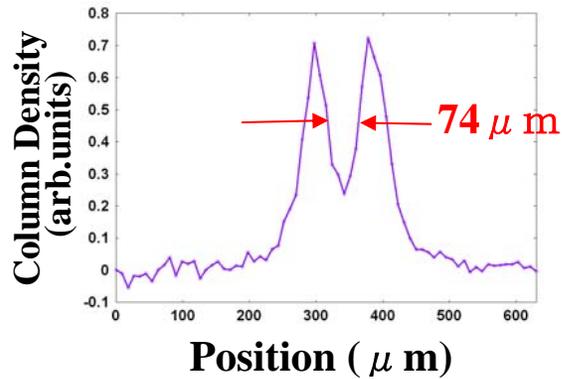
0.6 mm



吸収イメージング  
TOF = 13ms



0.6 mm



- $w = 4$  ( $m_F = 2$ )

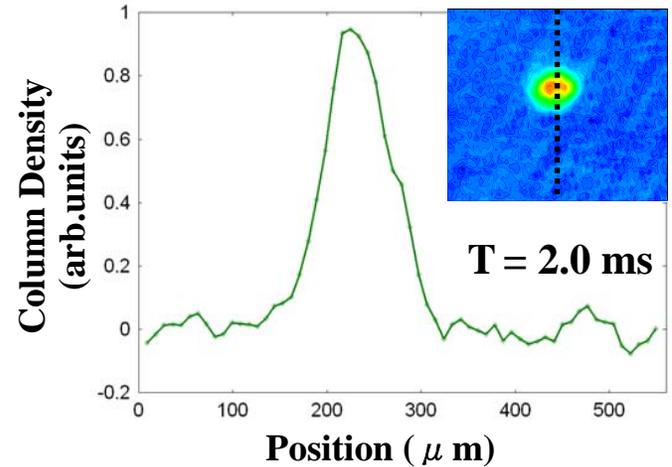
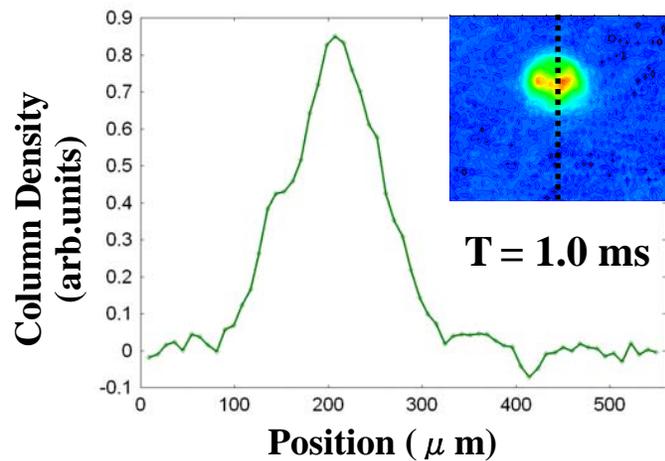
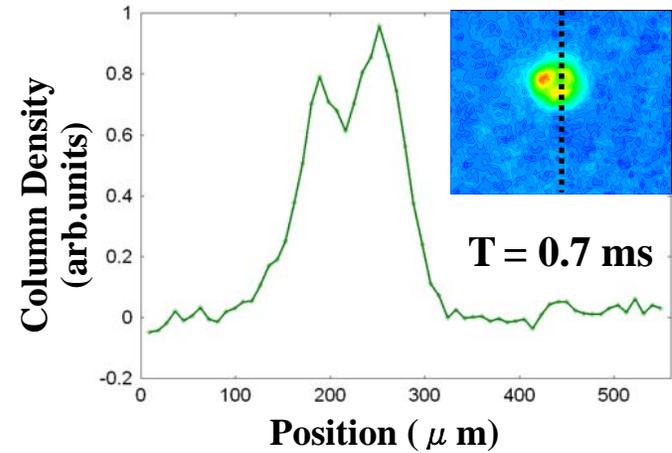
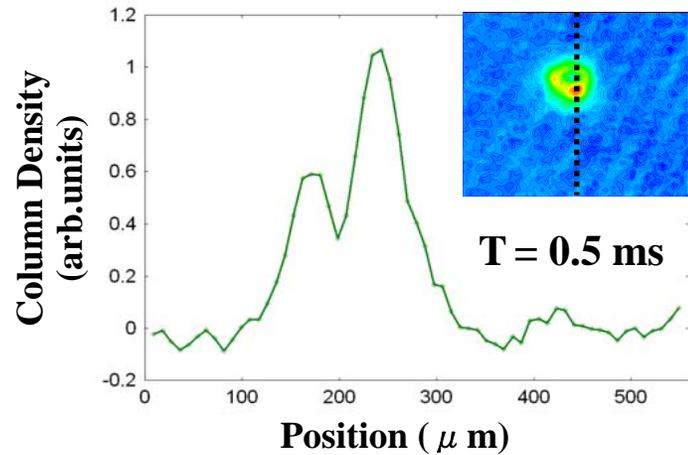
- 理論値

6.1  $\xi \sim 92 \mu\text{m}$  for  $w = 4$

the healing length  $\xi = (8\pi a \bar{n})^{-1/2}$   
 $\bar{n} = 1.2 \times 10^{11} / \text{cm}^3$

# 量子渦の“寿命”

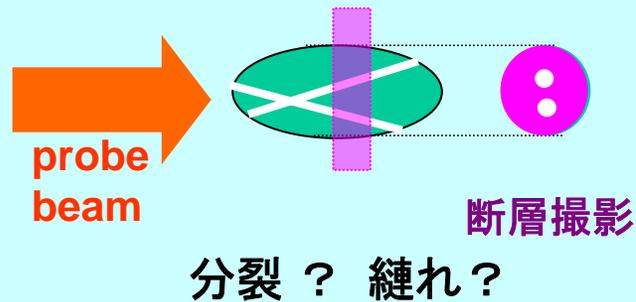
T : 保持時間



“寿命” :  $\tau_{\text{Rb}} \sim 1 \text{ ms} (\ll \tau_{\text{Na}} \sim 75 \text{ ms})$

# 寿命？

なぜ見えなくなるのか...

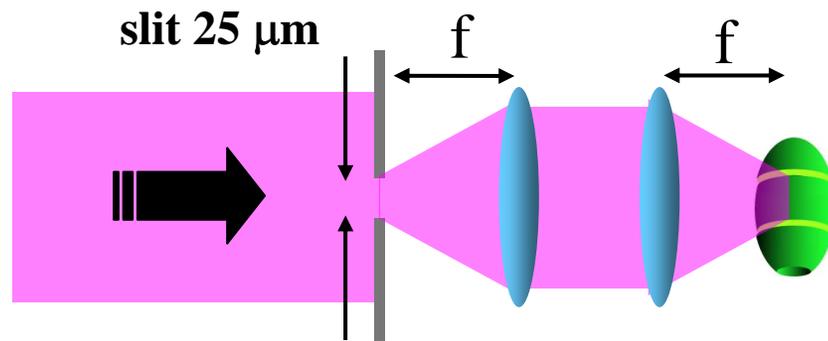
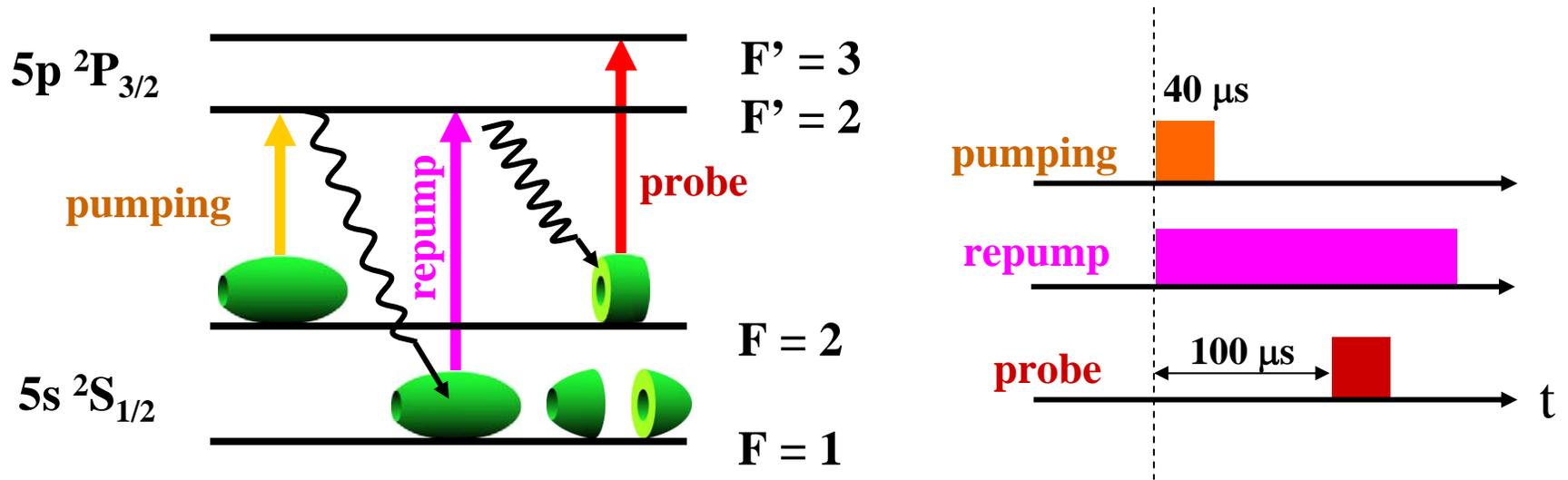


全体の投影撮影



断層撮影

# 断層撮影法



動径方向から入射

# 断層撮影結果 (1)

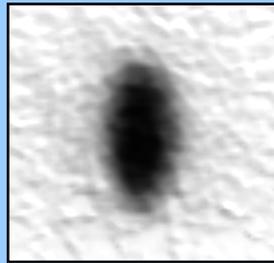
## ■ BEC (渦なし)

TOF : 25ms

動径方向から

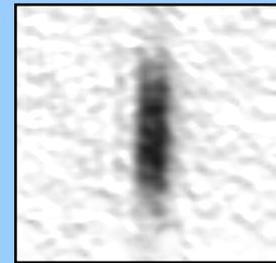
半値全幅

全体



150  $\mu\text{m}$

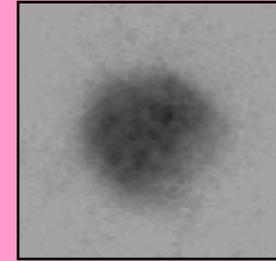
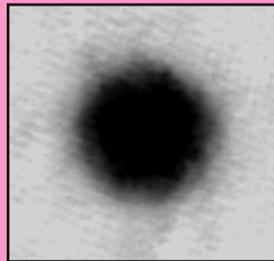
断層



63  $\mu\text{m}$

0.5 mm

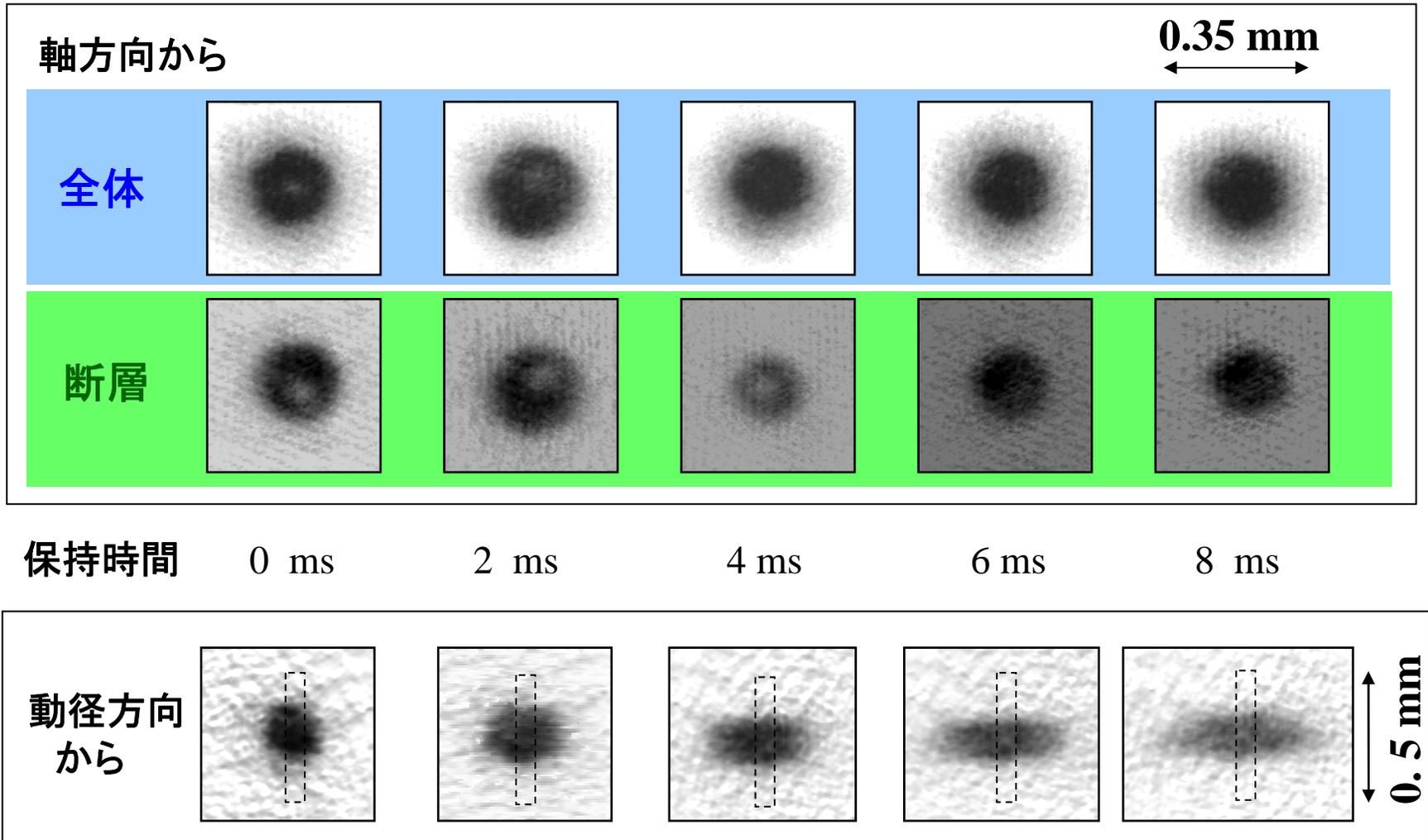
軸方向から



# 断層撮影結果 (2)

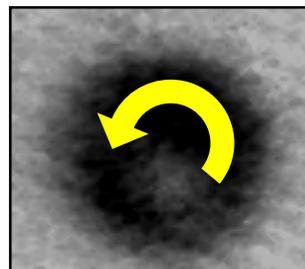
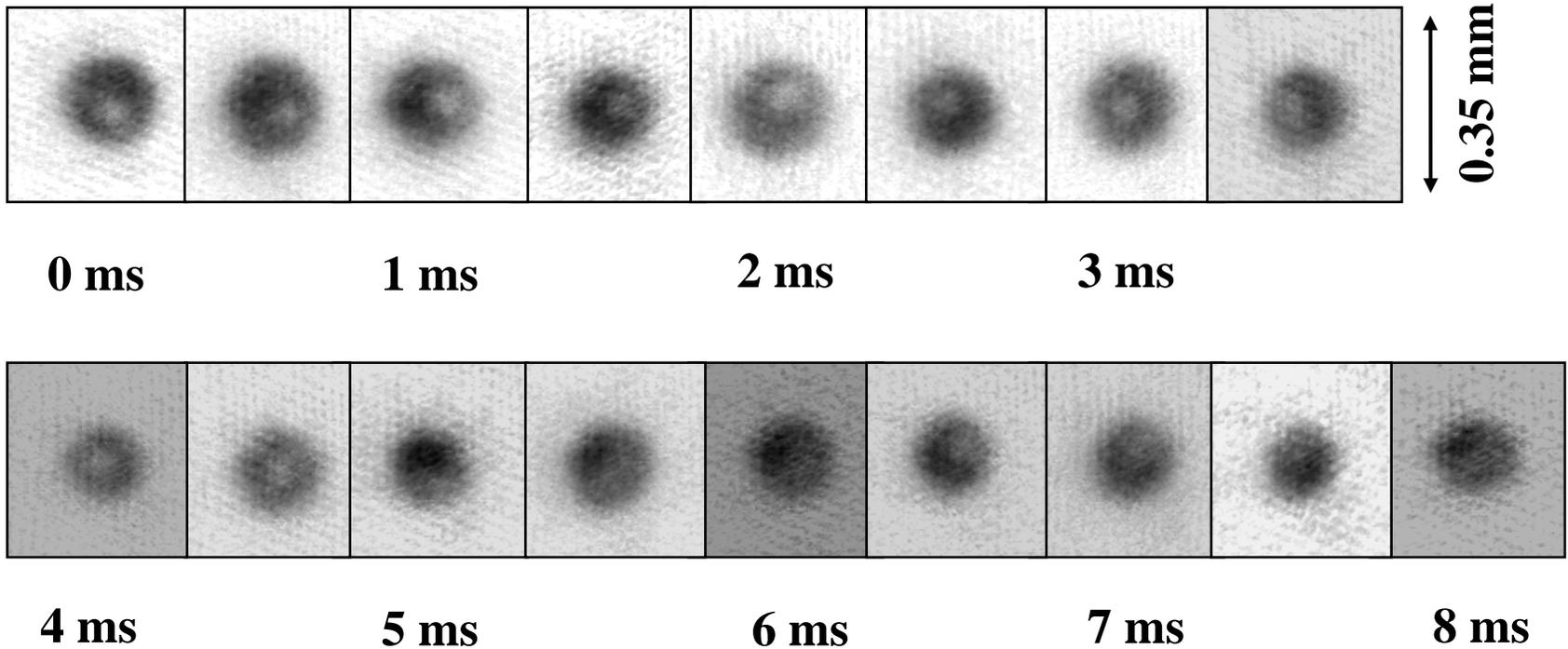
■ BEC(渦あり)

TOF : 15ms



# 断層撮影結果 (3)

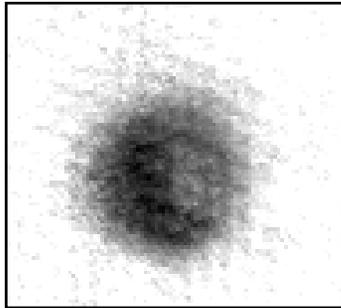
TOF : 15ms



# 課題 (1)

## ■ 渦の崩壊

保持時間 3.5 ms

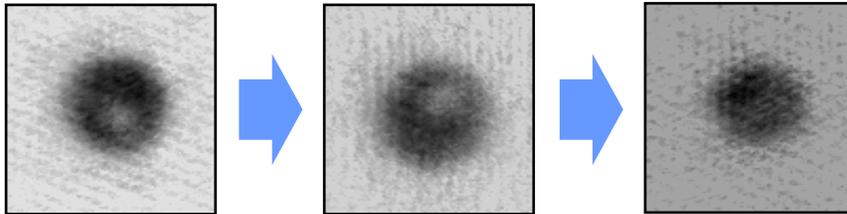


構造？

分解能向上の必要

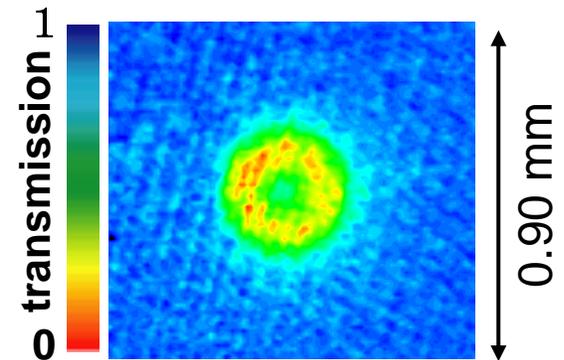
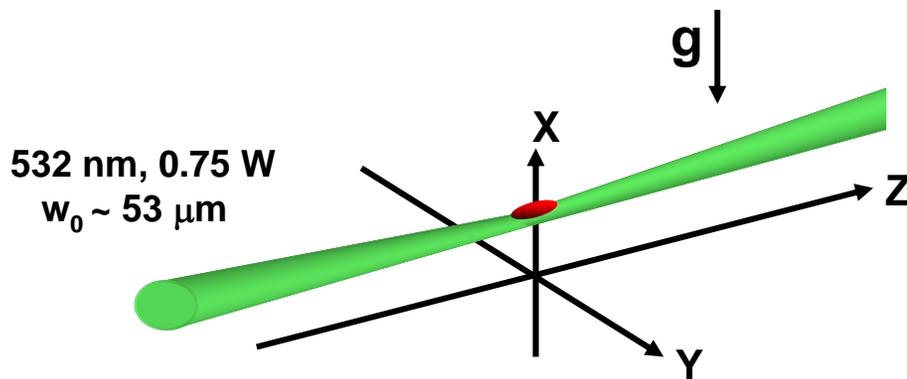
# 課題 (2)

## ■ 渦の回転



渦の生成位置が中心でない  
回転、非対称分布の原因？

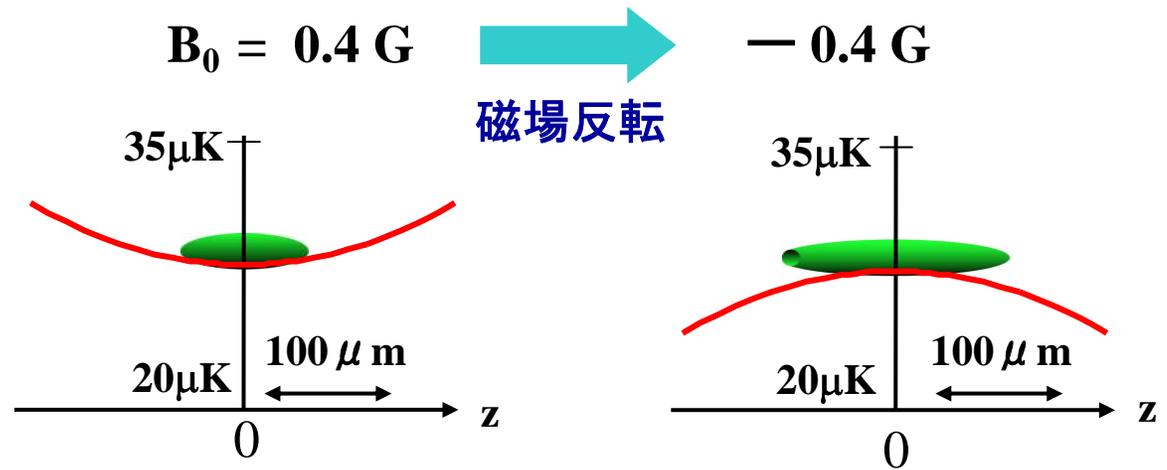
重力の補償



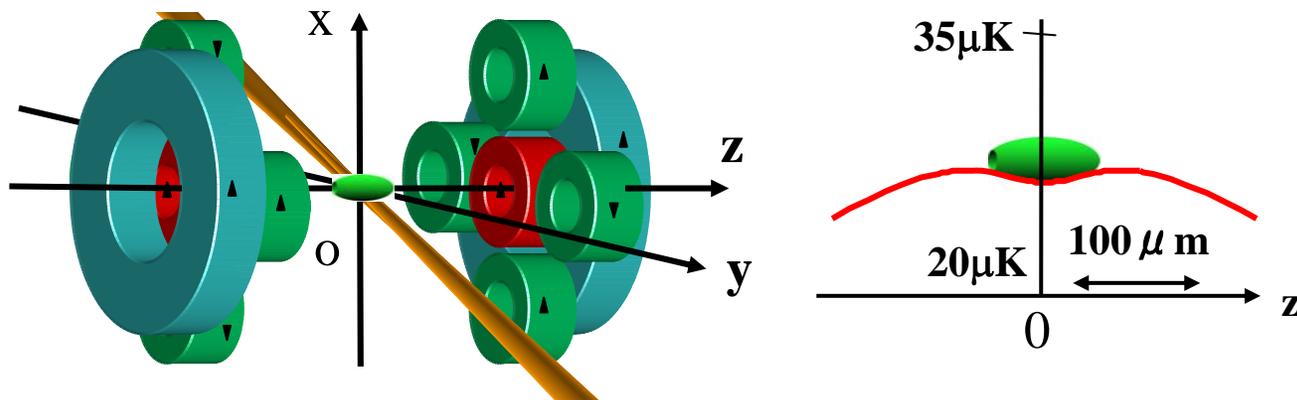
# 課題 (3)

## ■ BECの軸方向への伸長

### 軸方向トラップポテンシャル



### 光双極子トラップによる抑制



# まとめ

- 磁気トラップを用いた $^{87}\text{Rb}$ のBEC生成実験
- トラップ磁場の反転によるトポロジカルな高次量子渦の生成実験  
量子渦の崩壊過程の観測に向けて