

Spontaneous Pattern Formation in an Antiferromagnetic Quantum Gas

反強磁性の量子ガスにおける自発的なパターン形成

J. Kronjager, C. Becker, P. S. Panahi, K. Bongs, and
K. Sengstock

Phys. Rev. Lett. **105**, 090402 (2010)

10-041-006 平野研究室 岩出聰

概要

^{87}Rb $F = 2$ のスピン自由度をもったボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)を作り、大きさの異なる外部磁場をかけたところ、対称性の異なるスピンの空間パターンが観測された。

実験結果は数値シミュレーションと一致した。

発表の流れ

1. 予備知識

- (1) Bose-Einstein凝縮体(BEC)
- (2) スピン自由度をもつBEC

2. 実験

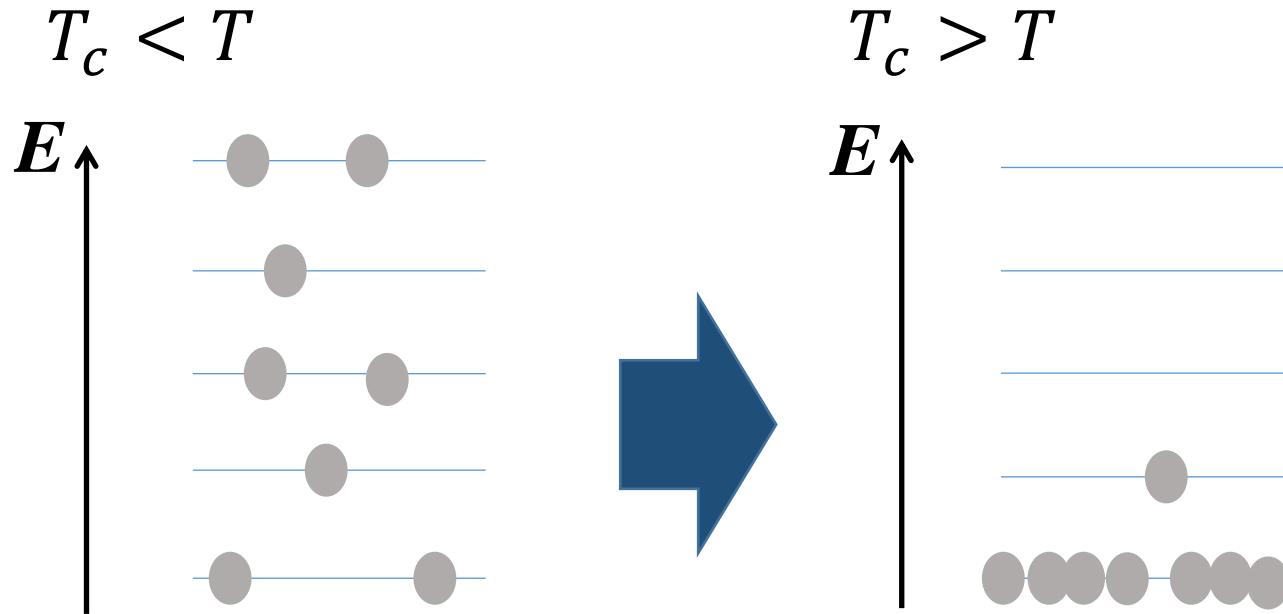
3. まとめ

Bose-Einstein凝縮体

統計力学の復習

Bose-Einstein Condensation

ある温度 T_c 以下で、巨視的な数の原子が最低エネルギー状態を占める現象。



スピン自由度をもつBEC

\hat{F} :全角運動量 $\hat{F} = \hat{L} + \hat{S} + \hat{I}$

$$\hat{F}_z \Phi_{m_F} = m_F \hbar \Phi_{m_F}$$

\hat{F}_z の固有値 $m_F = -F \dots F$
→磁気副準位

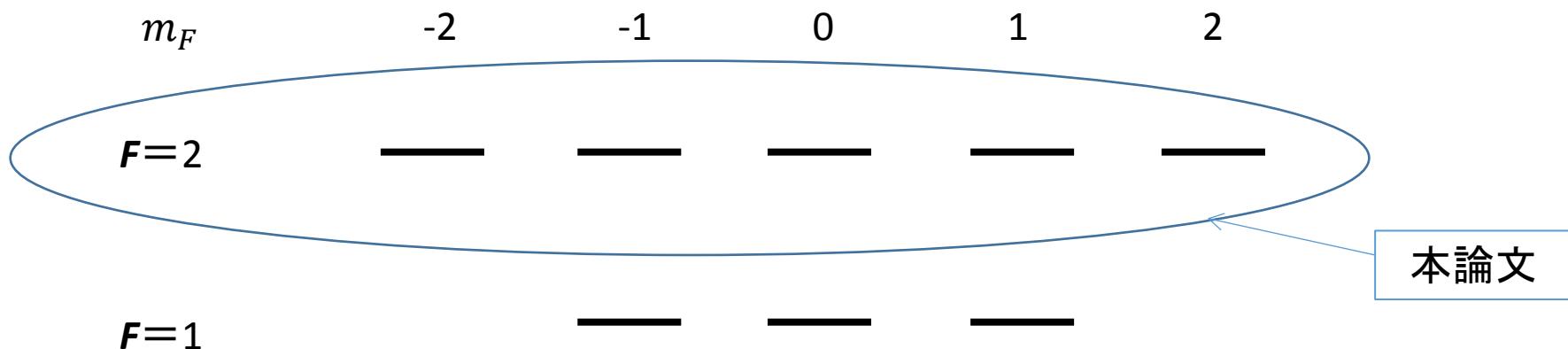
\hat{L} :軌道角運動量

\hat{S} :電子スピン

\hat{I} :核スピン

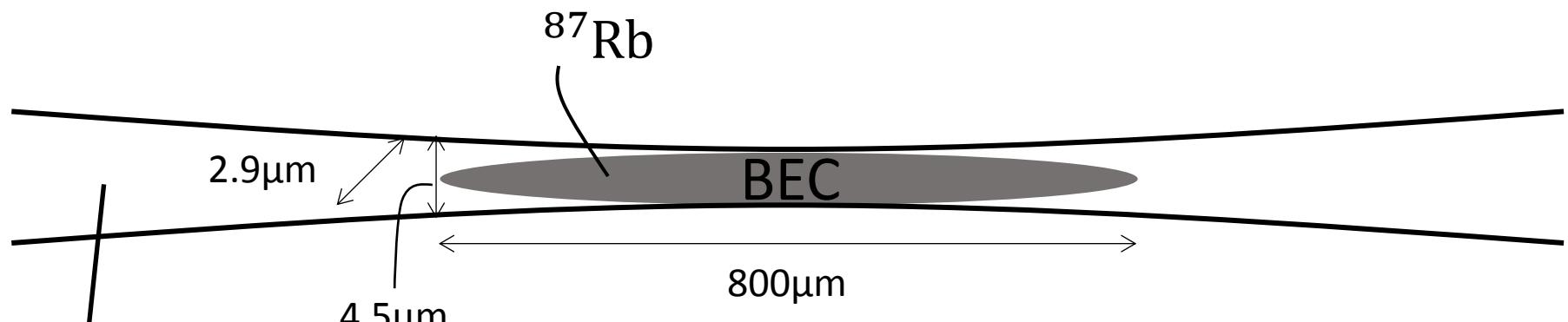
Φ_{m_F} :波動関数

^{87}Rb の基底状態では、



スピン自由度をもつBEC → 色々なスピン状態をとることができる

今回作成したBECと実験方法

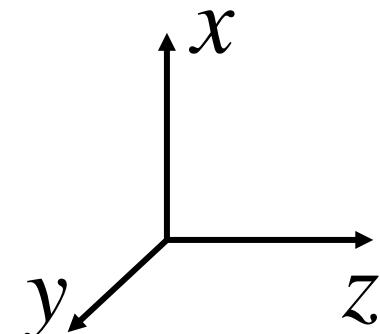


光トラップ

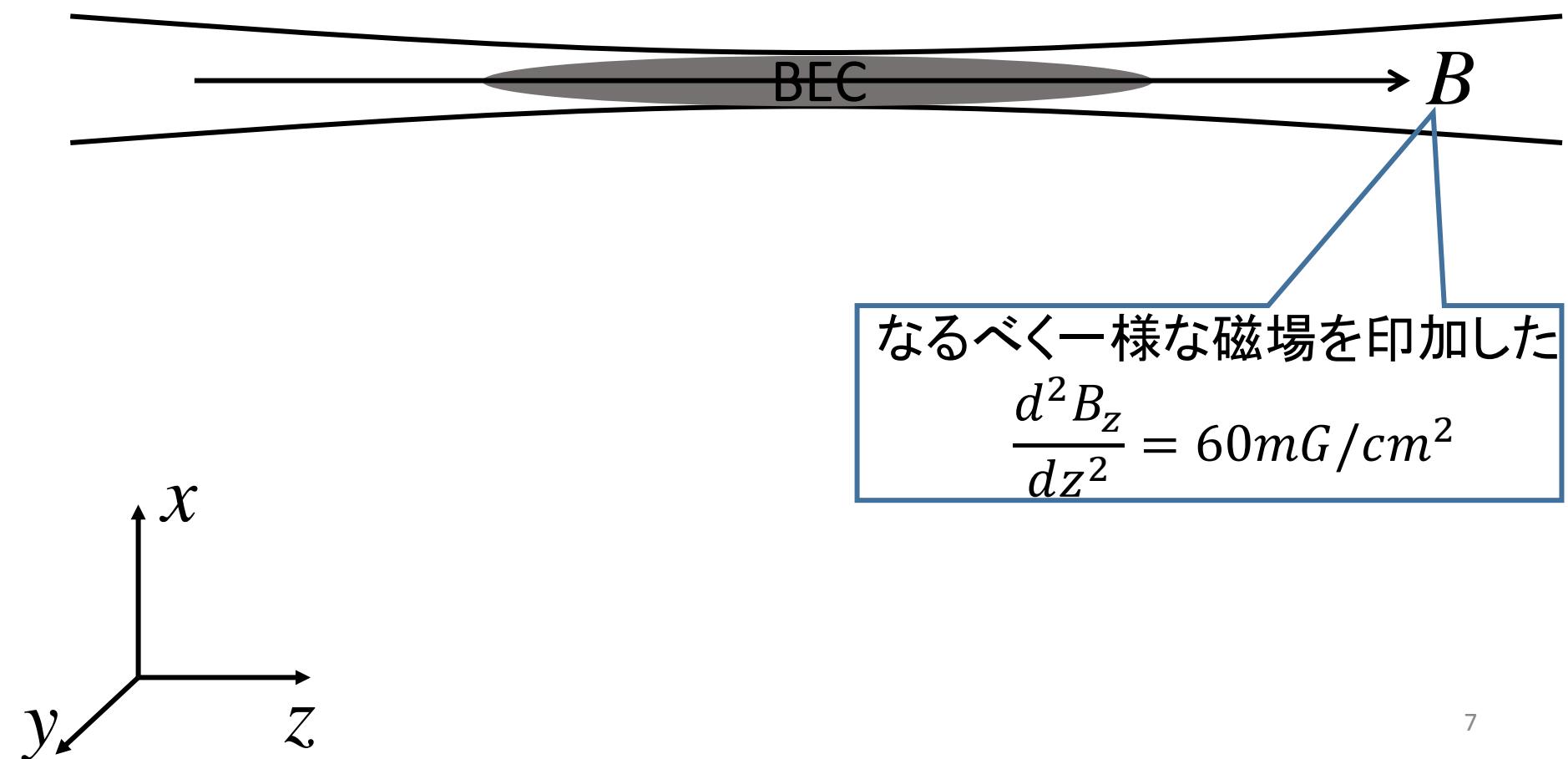
m_F -2 -1 0 1 2

$F=2$ —————

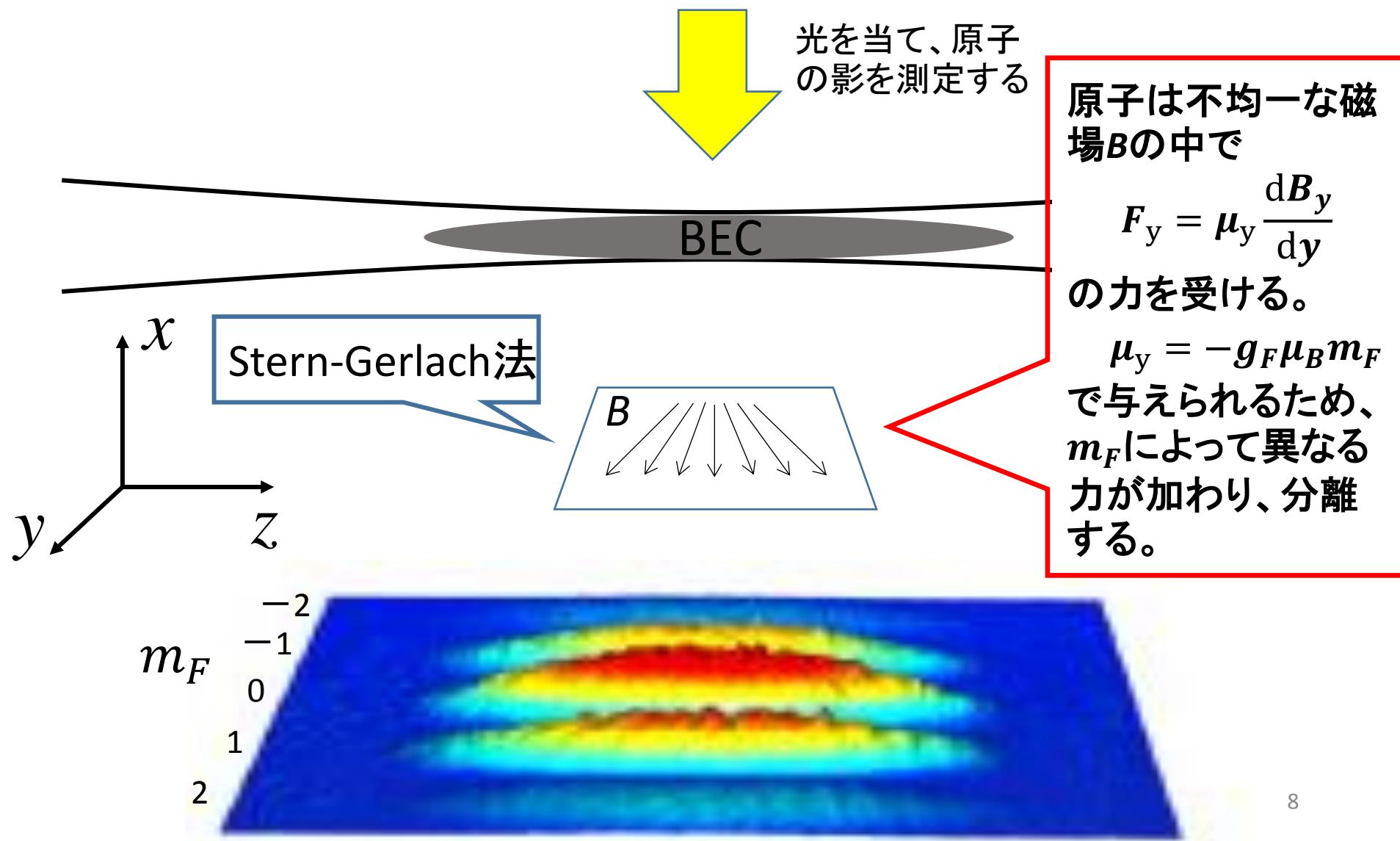
$F=1$ —————



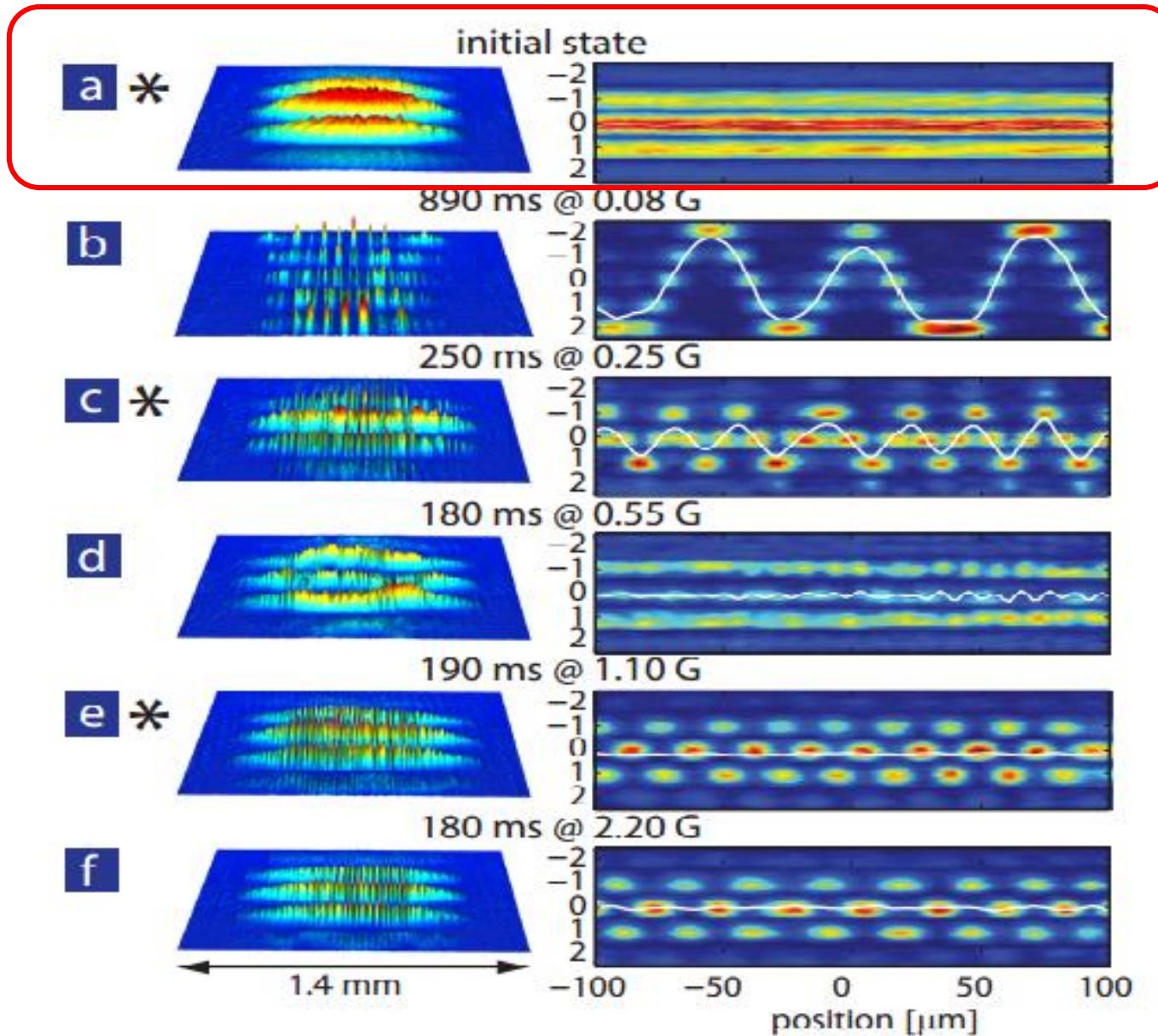
今回作成したBECと実験方法



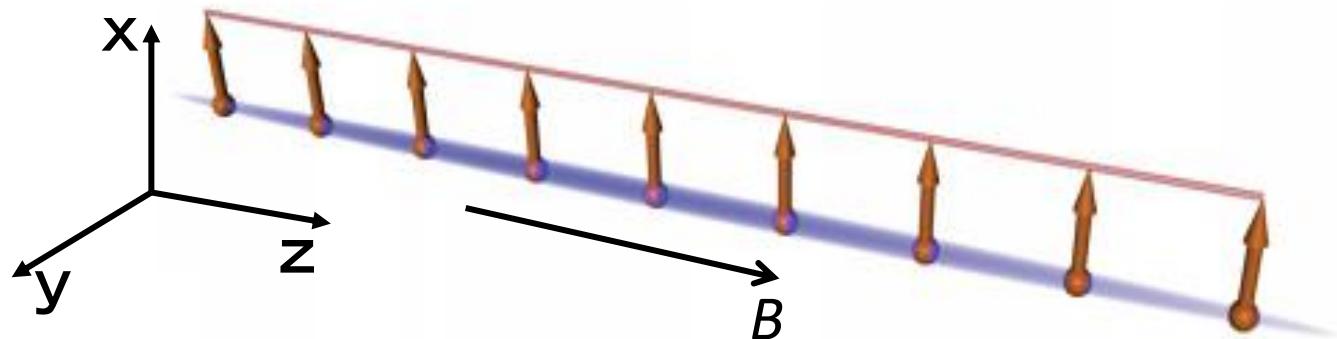
今回作成したBECと実験方法：SG法



実験結果



初期状態のスピンパターン



スピンが x 軸方向を向いた状態を用意する。

この初期状態を x 軸方向にシュテルン-ゲルラッハ法で分離し、スピンパターンを見たとする。

→測定されるスピンは $m_F = 2$ のみ。

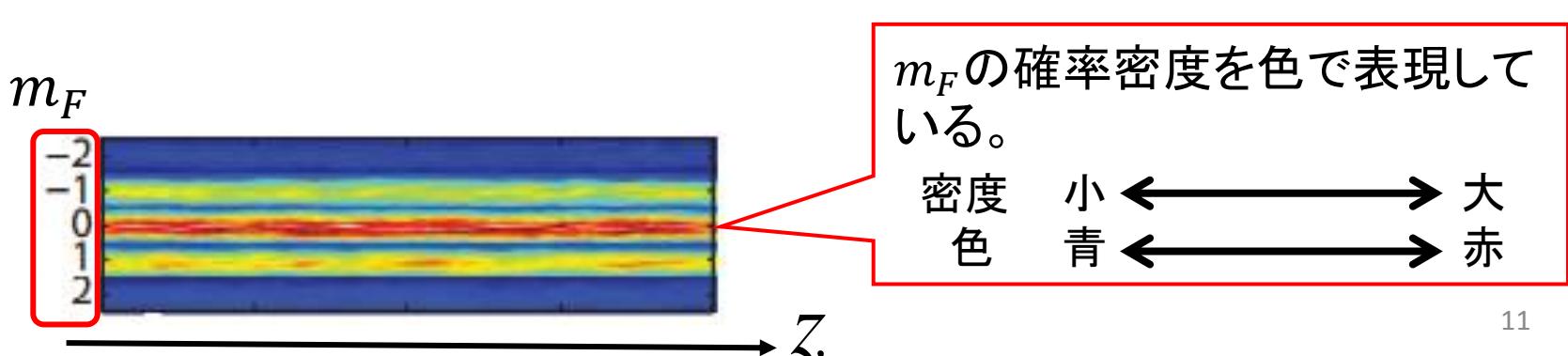
初期状態のスピンパターン

この実験ではy軸に対する m_F の値を測定する。

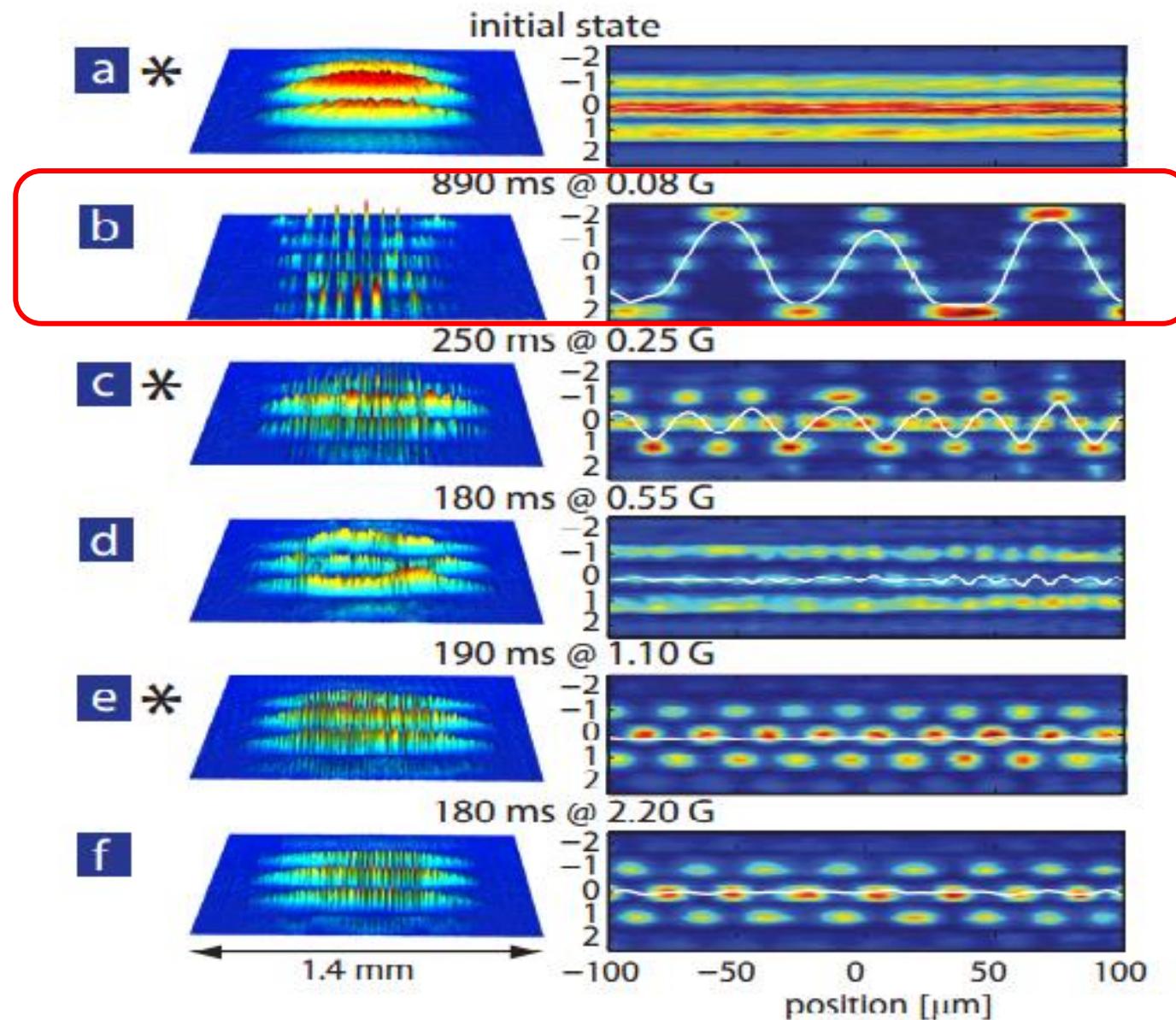
x軸からy軸へ $m_F=2$ を基底変換すると

$$|+2\rangle_x \Rightarrow \frac{1}{4}|-2\rangle_y + \frac{1}{2}|-1\rangle_y + \frac{\sqrt{6}}{4}|0\rangle_y + \frac{1}{2}|+1\rangle_y + \frac{1}{4}|+2\rangle_y$$


のように書ける。y軸方向にSG法で分離させた場合、下図のようなパターンが見える。

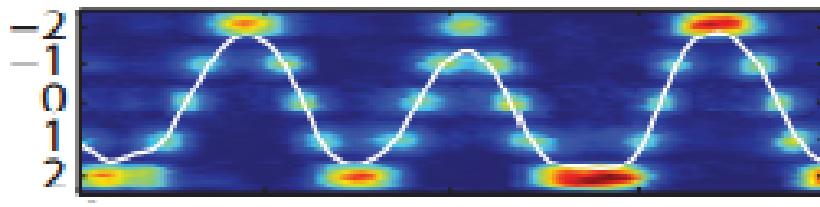


実験結果



低磁場ではらせん運動が起こっている

$m_F 890 \text{ ms} @ 0.08\text{G}$



磁場勾配のないとき

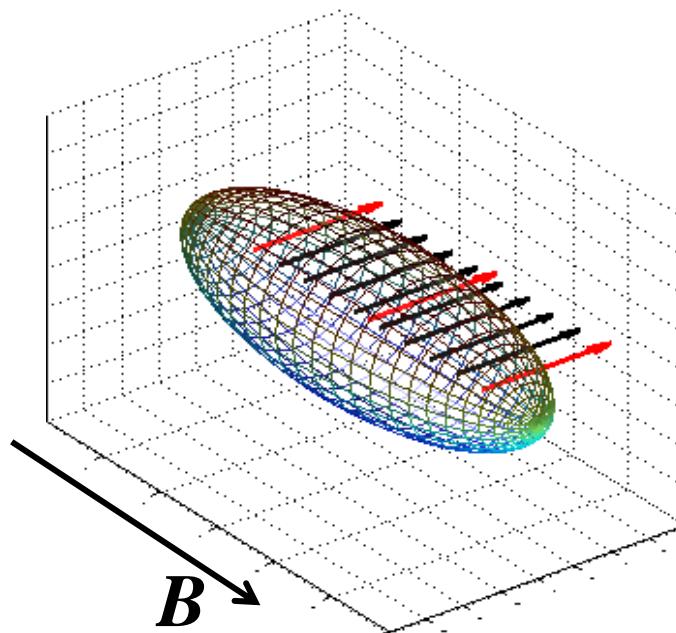
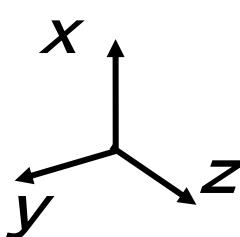
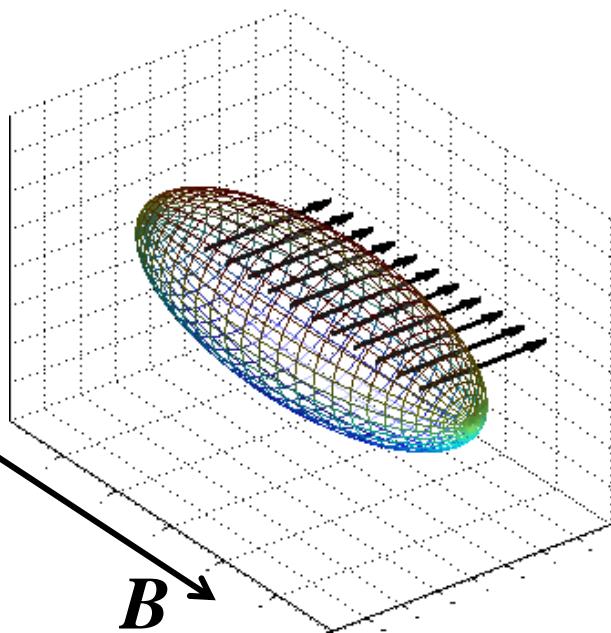
$$\Gamma = \gamma F \times B$$

γ : 磁気回転比

→歳差運動

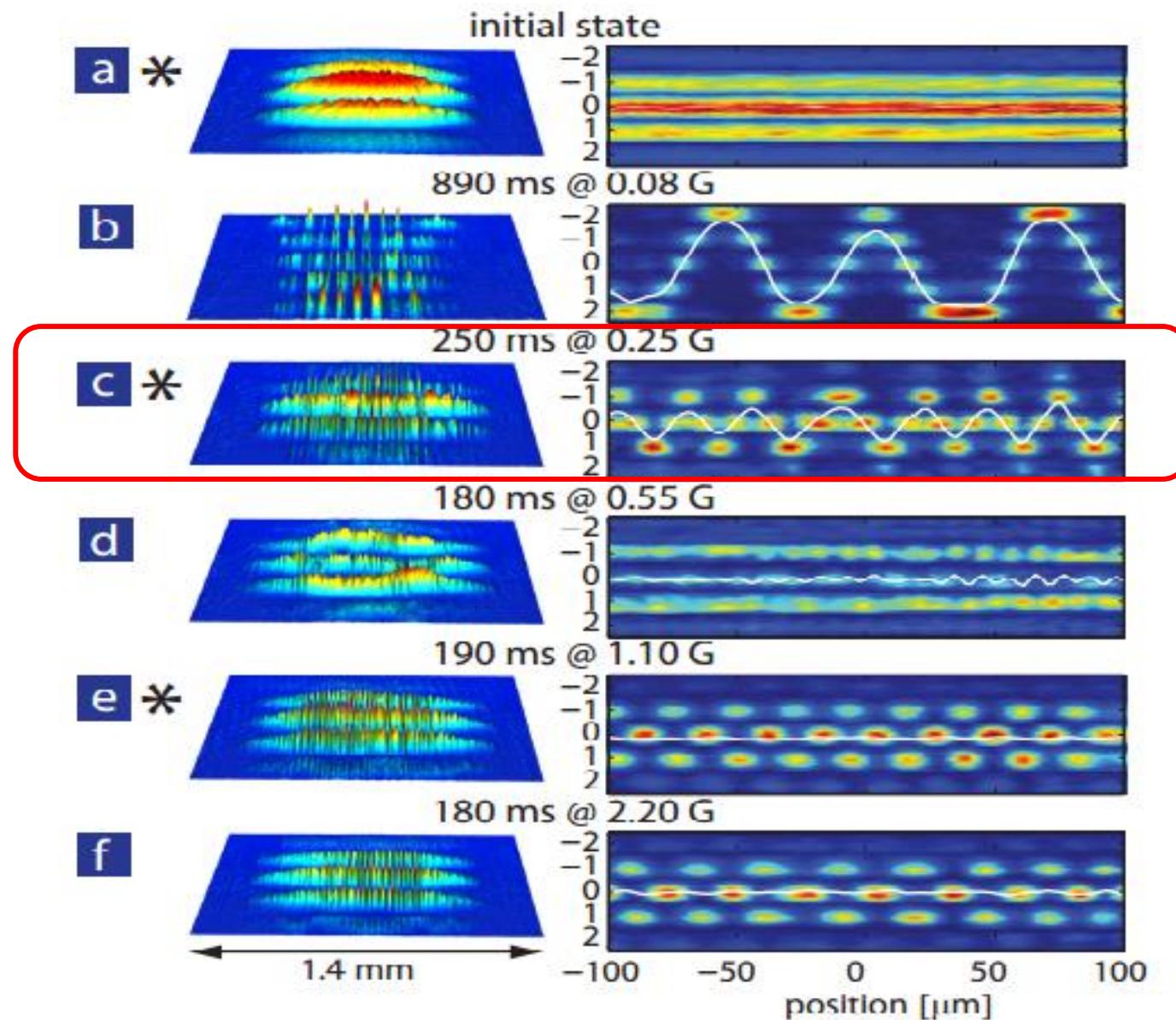
Z

磁場勾配のあるとき



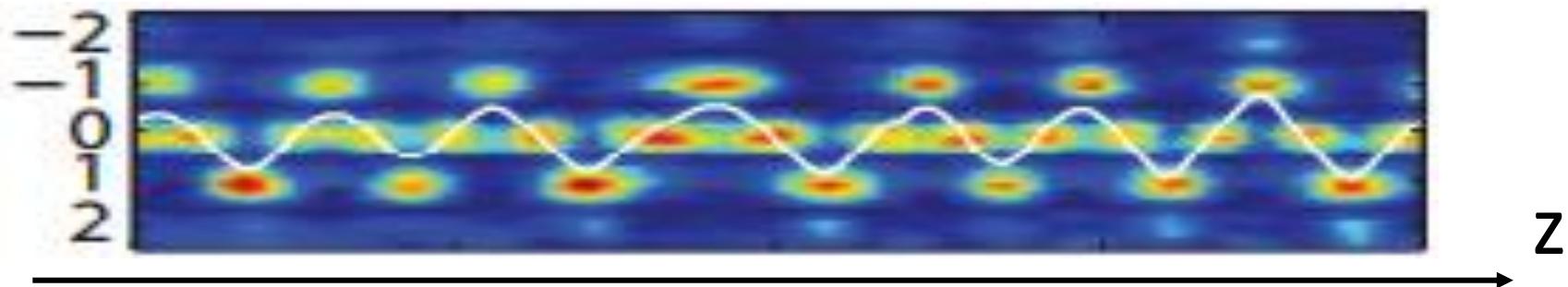
歳差運動の周波数 $\omega = \gamma B$ なので、磁場の大きさによって歳差運動はずれていく。 → らせん運動

実験結果

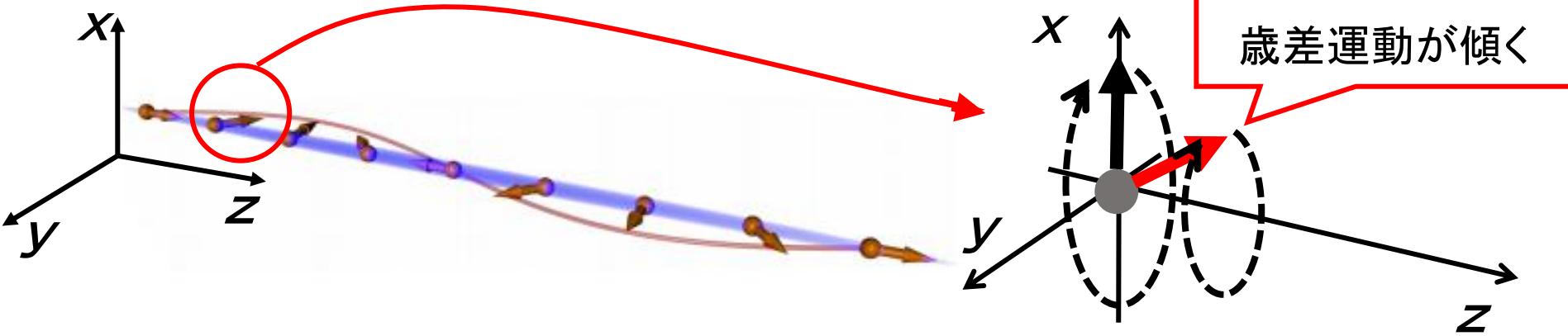


歳差運動が傾いている

m_F 250 ms @ 0.25 G



0.08Gの磁場をかけたときより周期
が短くなり、振幅も小さくなっている。

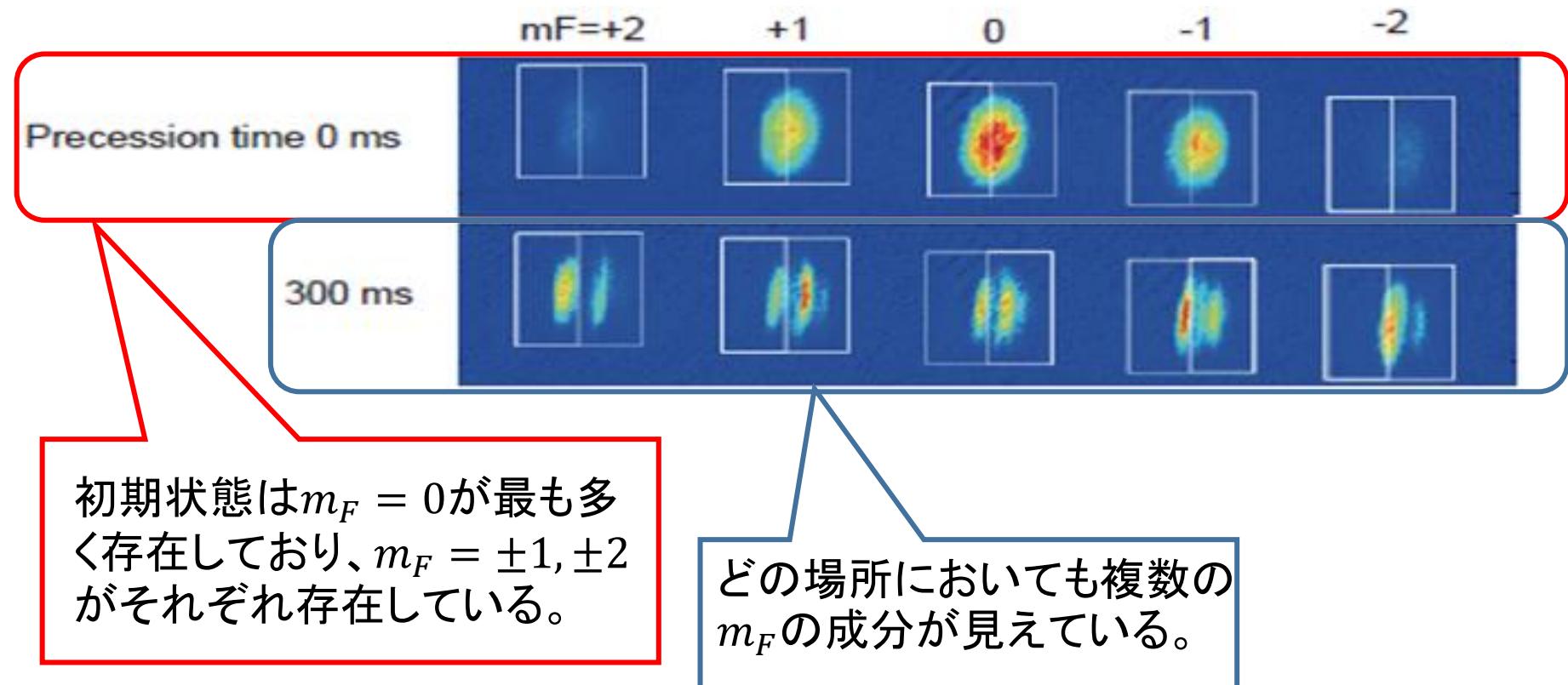


x-y平面上で回転していたスピinnがz方向に傾く。
→磁気双極子モーメントの相互作用のため

平野研究室の実験結果

^{87}Rb のスピン自由度をもったBECに

外部磁場90mG、磁場勾配 $\frac{dB_z}{dz} = 0.8\text{mG/cm}$ を印加する。

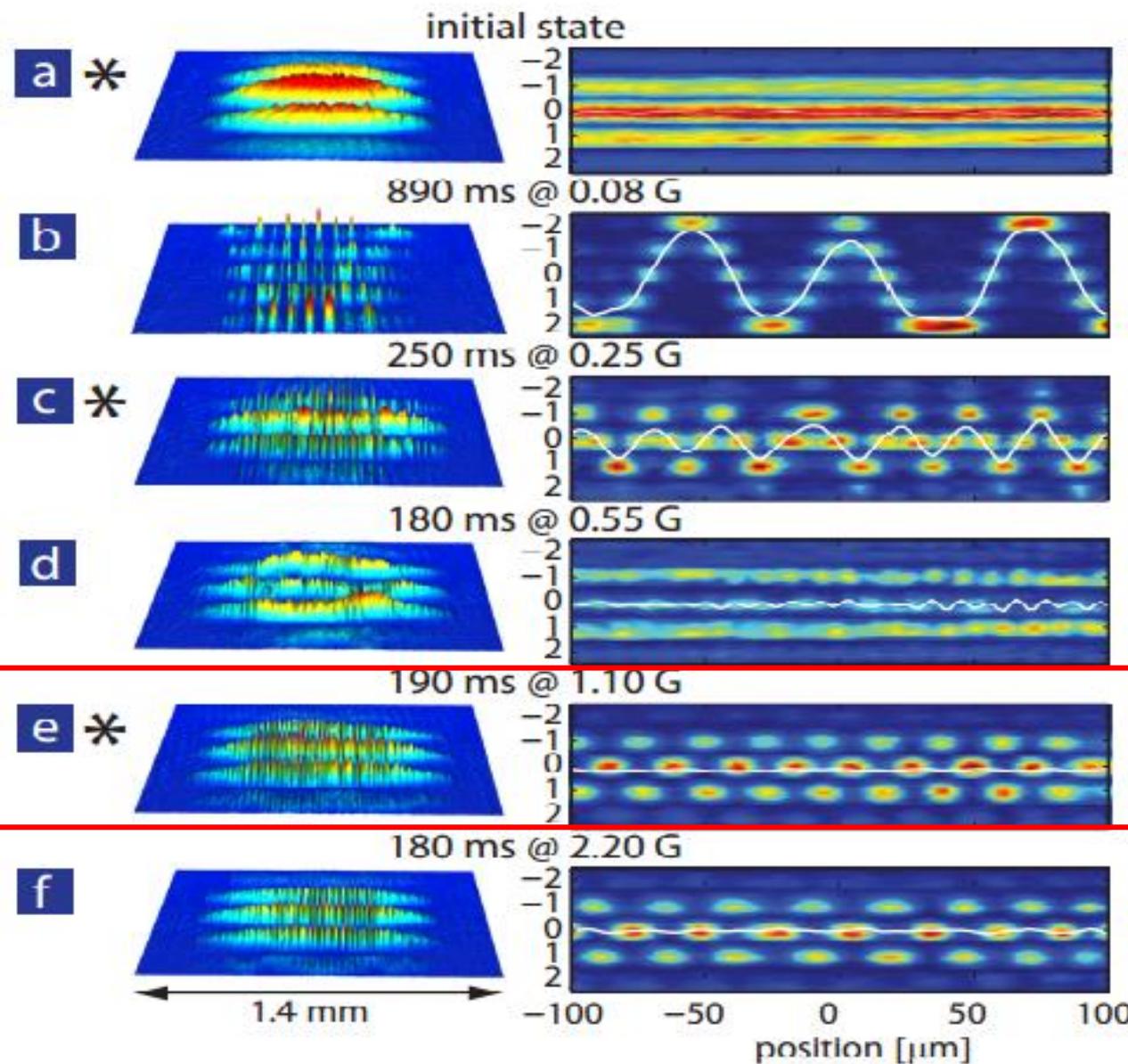


スピンの歳差運動は傾いている

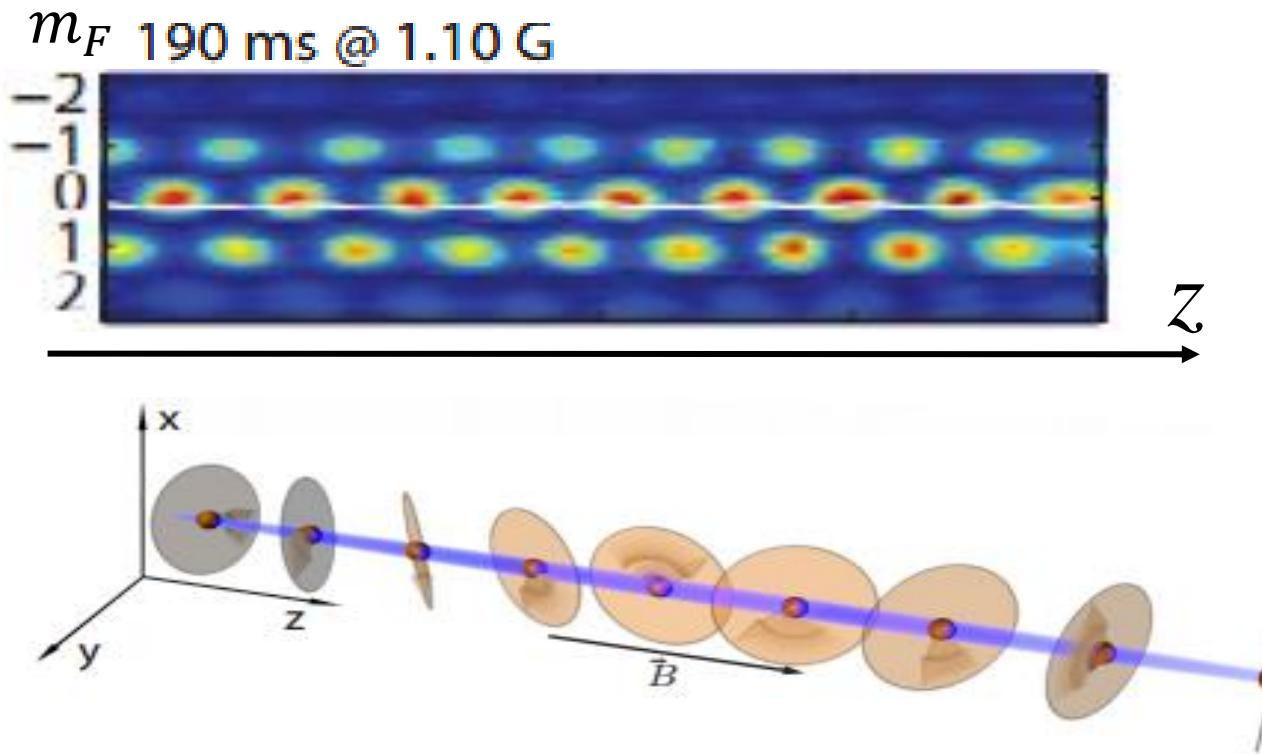
→磁気双極子モーメントの相互作用を考慮したシミュレーションに合う

Preliminary

実験結果



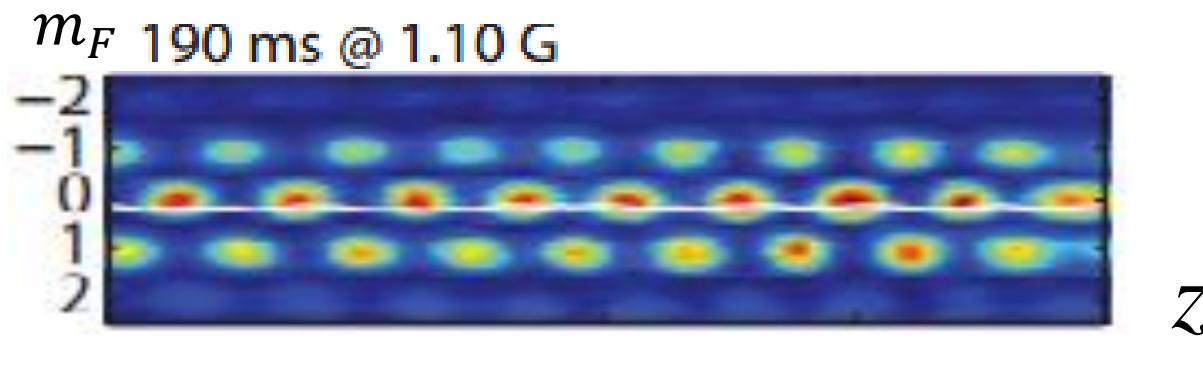
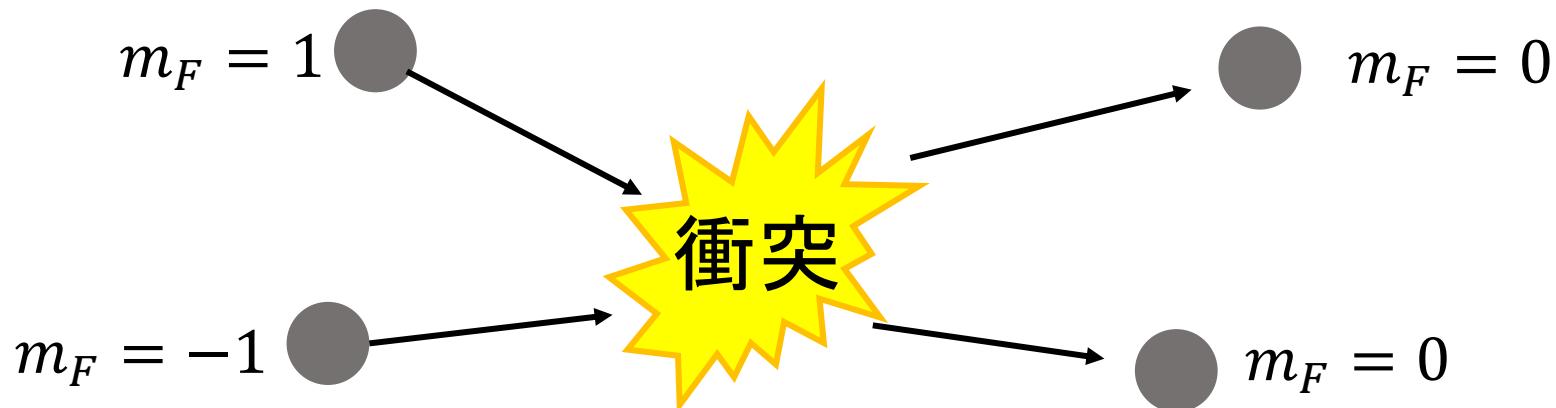
スピンベクトルの打ち消し合い



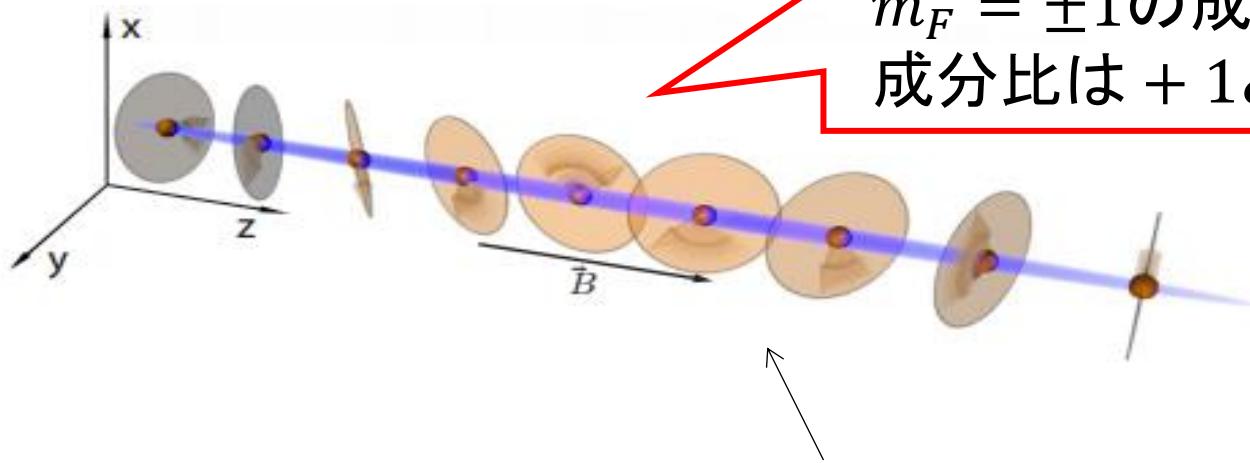
外部磁場が大きいとき、二原子間の衝突が起こると、
 $m_F = 1$ と $m_F = -1$ は打ち消しあうため、スピンベクトルは0
となる。しかしどの方向で $m_F = 0$ であるかは場所によって
様々である。

原子の衝突

外部磁場が大きいとき、二体の衝突を起こした原子は、 m_F が小さいほうがエネルギーが低いため、 $m_F = 0$ となる。

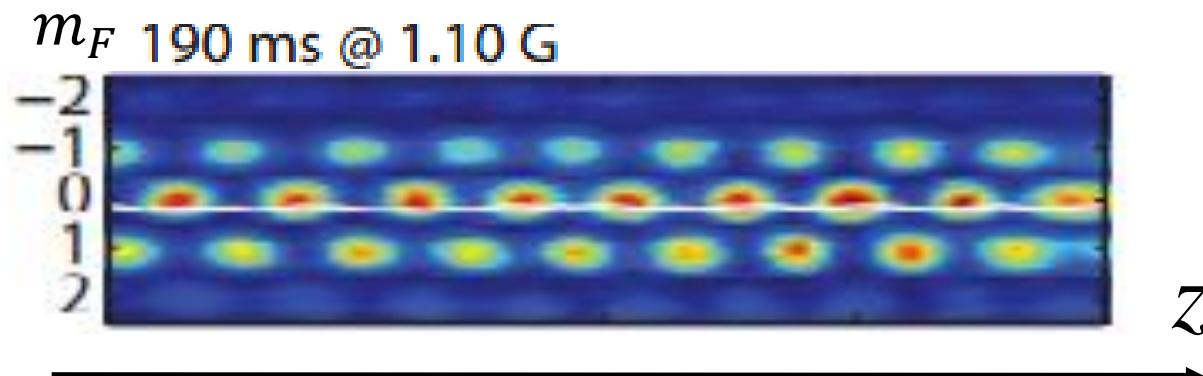


スピンベクトルの打ち消し合い

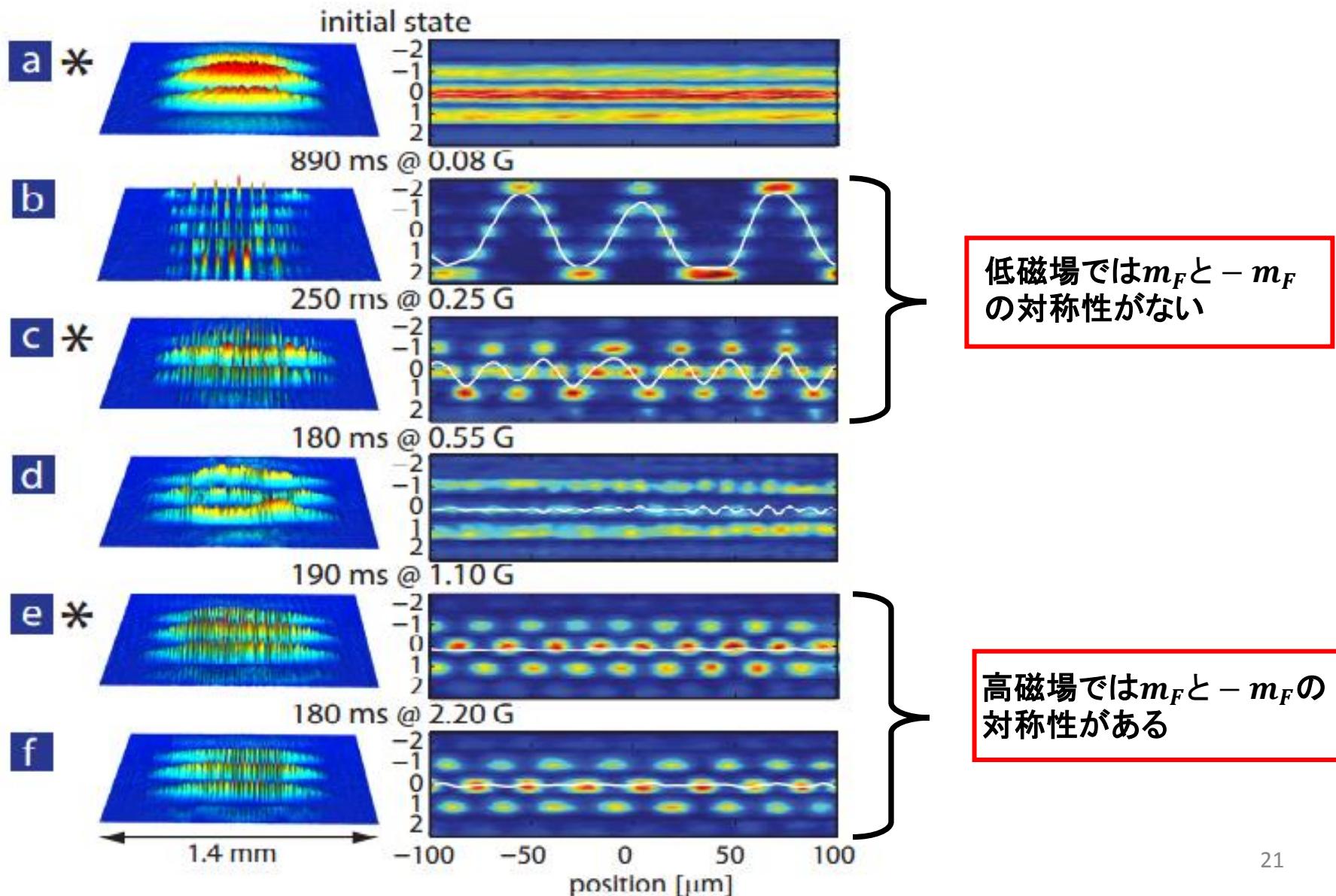


スピンベクトルの大きさは0だが、それぞれの原子はy軸方向に $m_F = \pm 1$ の成分を持っている。成分比は + 1 と - 1 で対称

$m_F = 0$ となる方向はz軸の場所によって変化する。



実験結果



Gross-Pitaevskii方程式(GP方程式)

※ m_F が一成分の場合

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Phi(r, t) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V_{trap}(r) \right] \Phi(r, t) + \underline{U_0 |\Phi(r, t)|^2 \Phi(r, t)}$$

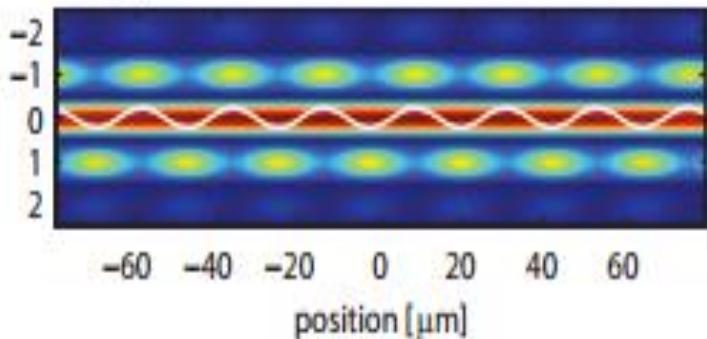
二粒子間の相互作用による項

これを m_F の 5 つの成分について解析し、シミュレーションを行った。

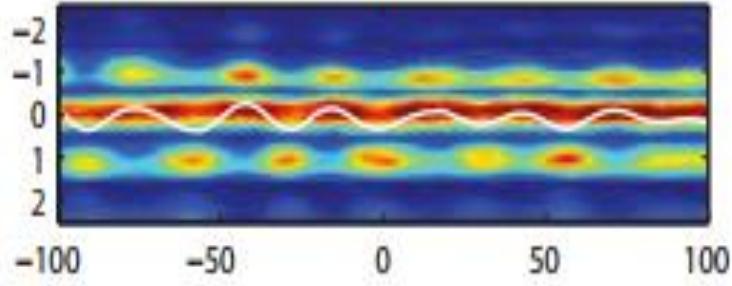
低磁場、高磁場における理論値と実験値

低磁場

Theory

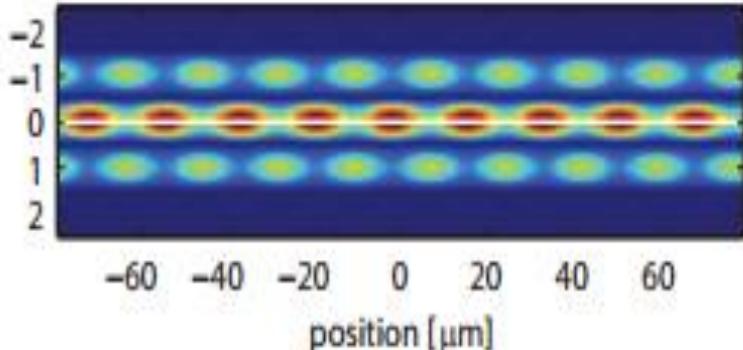


Experiment 180 ms @ 0.25 G

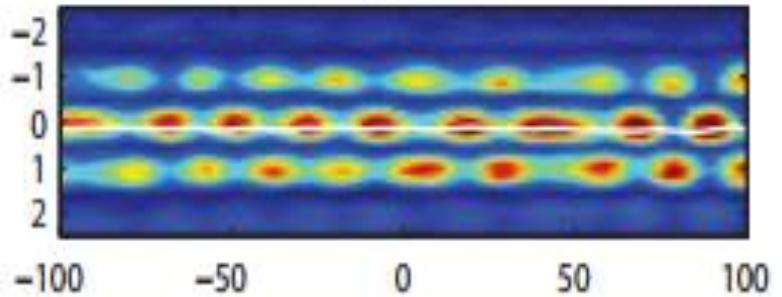


高磁場

Theory



Experiment 140 ms @ 1.10 G



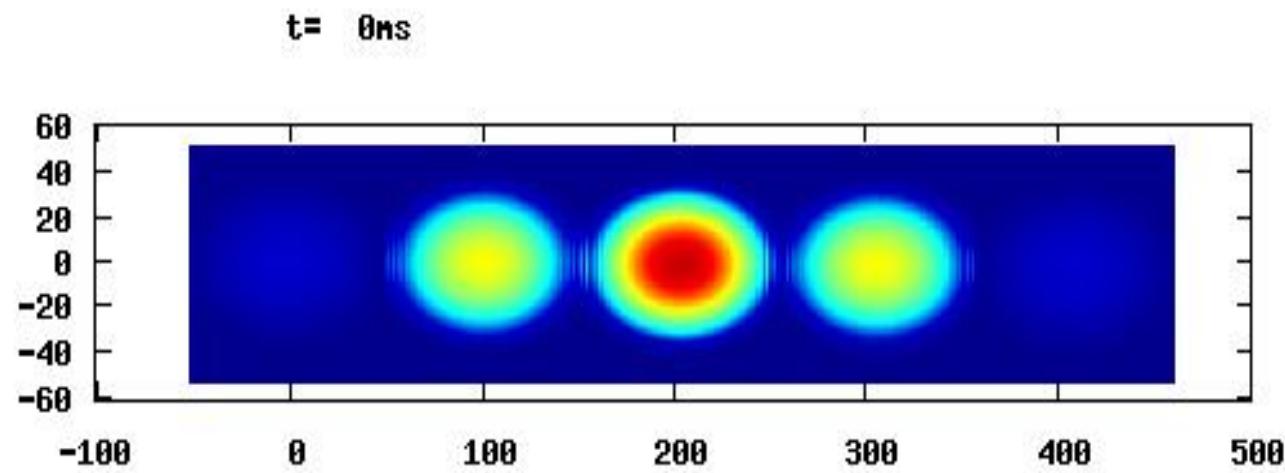
4. まとめ

^{87}Rb $F = 2$ におけるスピン自由度をもったBECに大きな異なる外部磁場をかけたとき、対称性の異なる2種類のスピンパターンが観測でき、理論シミュレーションに良く合った。

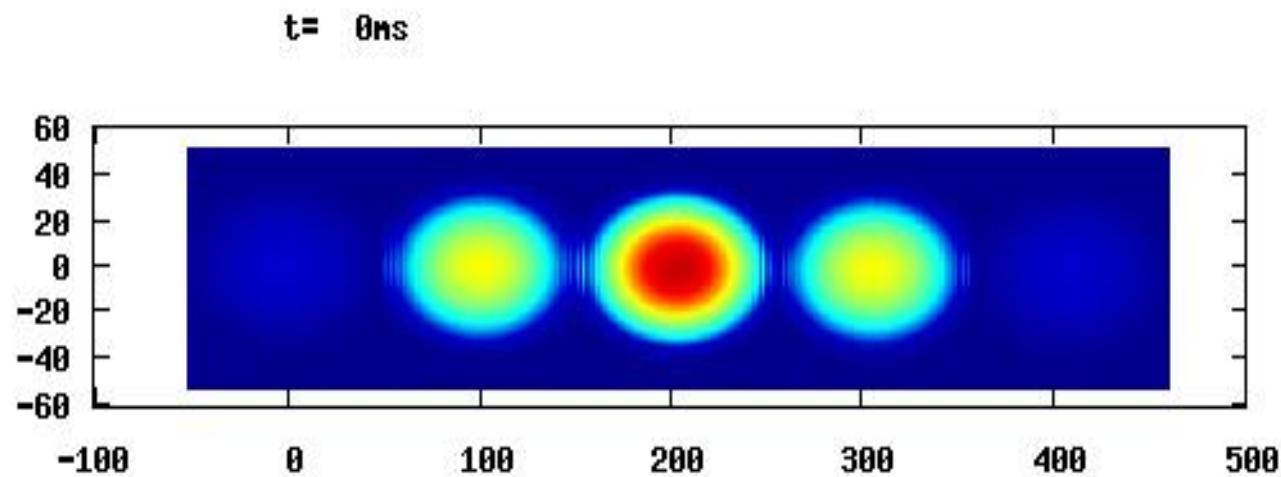
外部磁場を0.25G印加したのときのスピンパターンは磁気双極子モーメントの相互作用によるものではないかと考察した。

外部磁場が高いのときのスピンパターンは原子の衝突によるスピンの打ち消し合いによるもの。

磁気双極子相互作用を考慮した シミュレーション



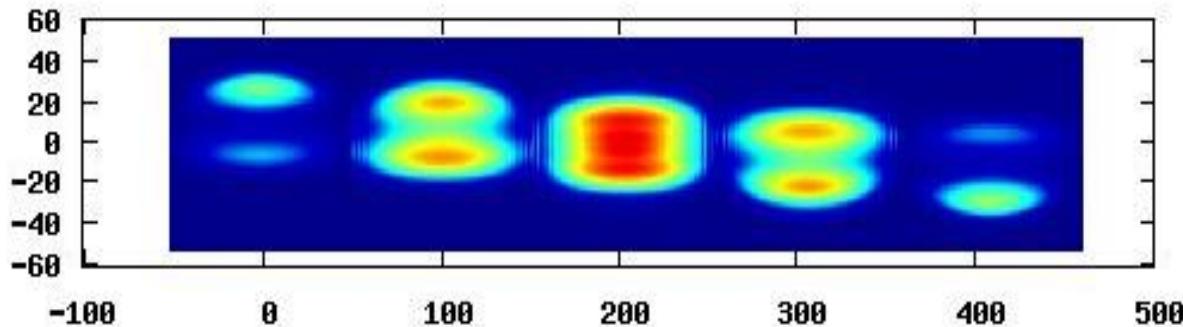
磁気双極子相互作用を考慮していない シミュレーション



シミュレーションの比較

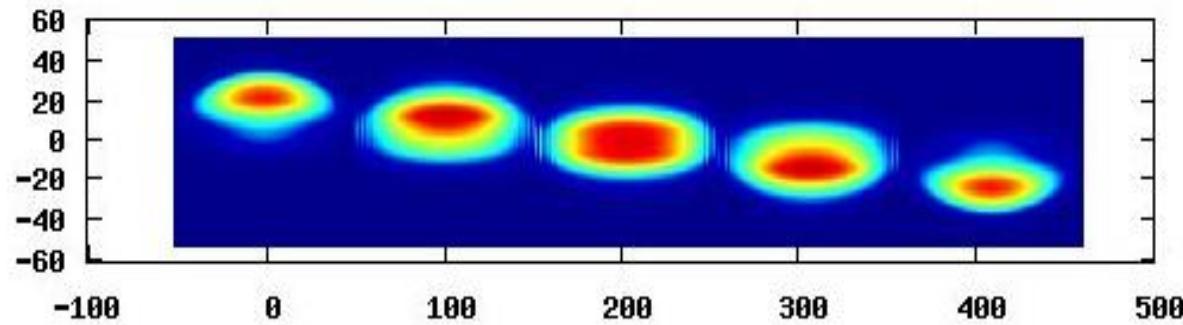
磁気双極子相互作用を考慮

$t=140\text{ns}$



磁気双極子相互作用を考慮していない

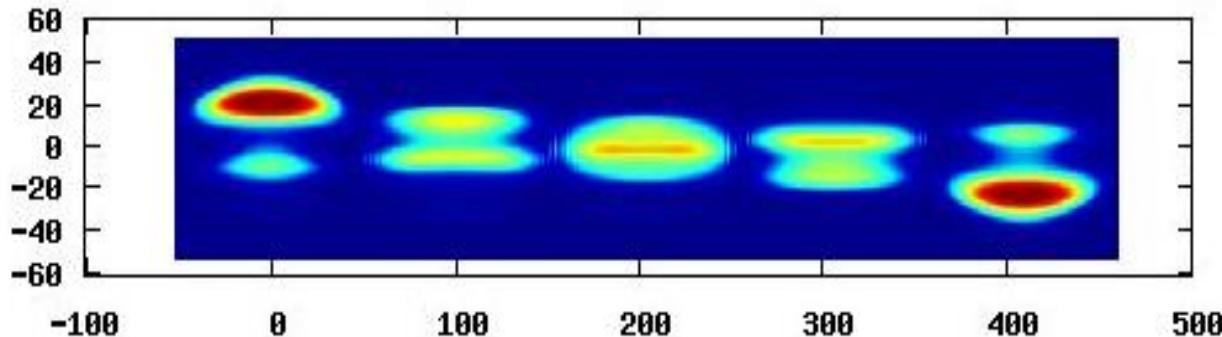
$t=140\text{ns}$



シミュレーションの比較

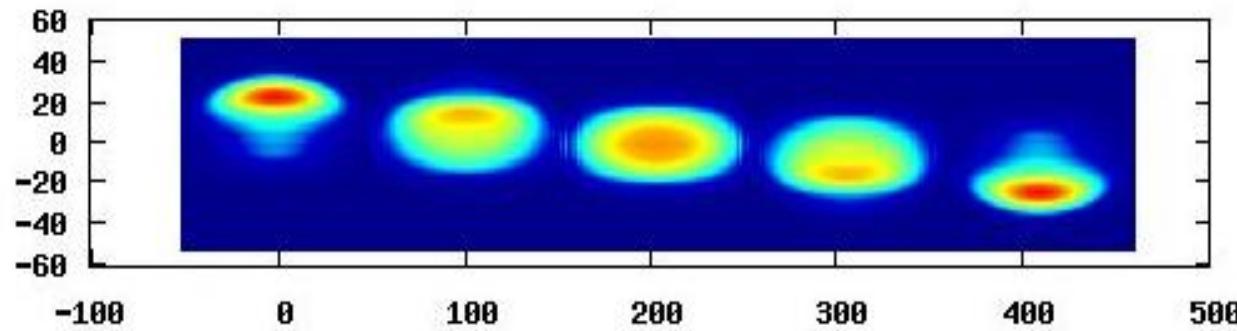
磁気双極子相互作用を考慮

$t=300\text{ms}$



磁気双極子相互作用を考慮していない

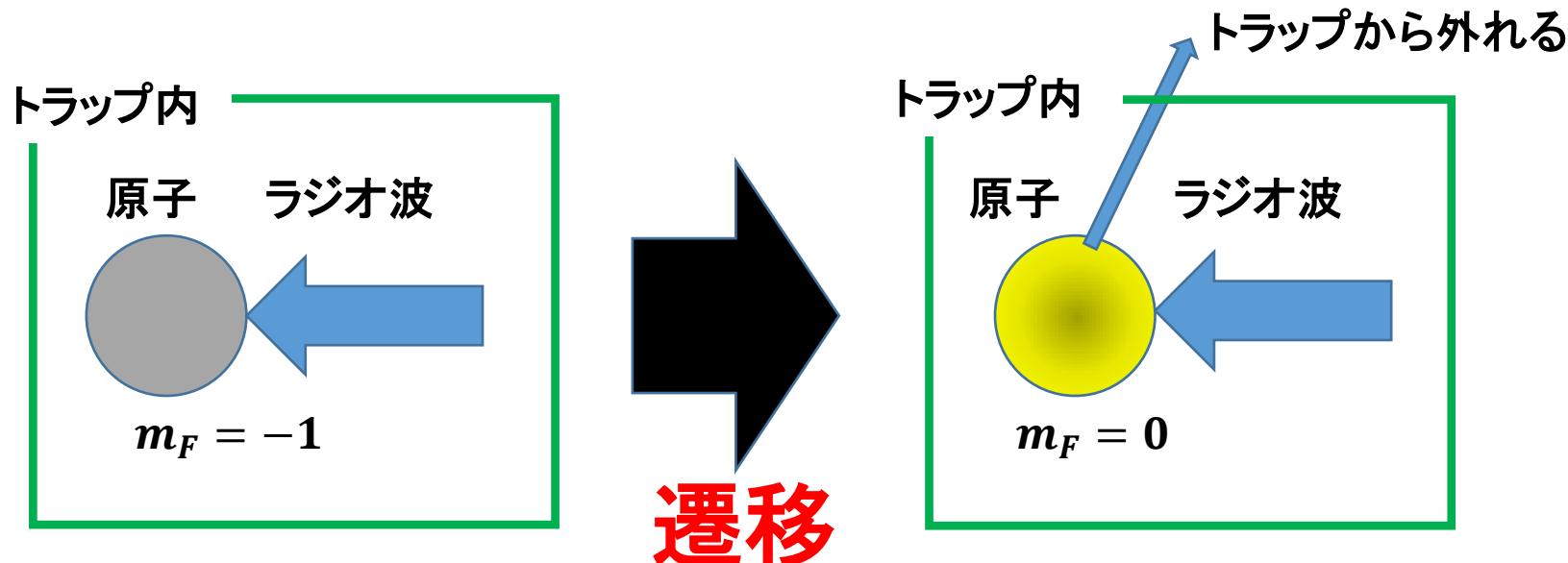
$t=300\text{ms}$



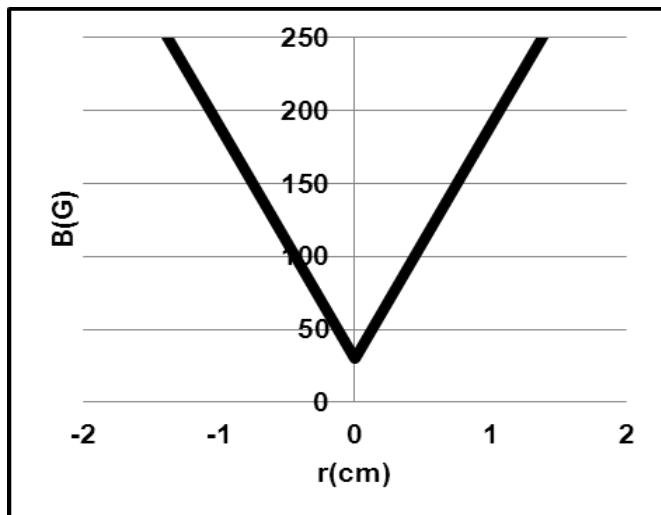
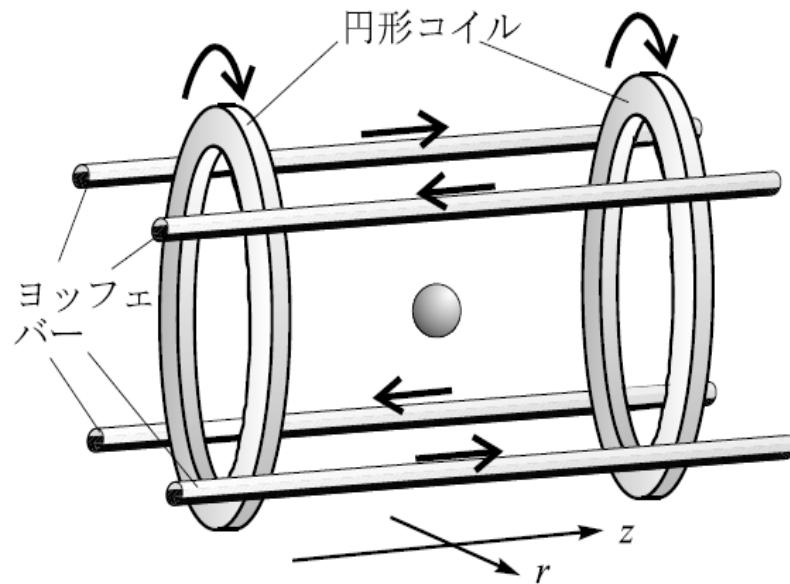
磁気トラップ内の運動エネルギーの大きい原子をトラップから逃がすことによって冷却する。

原子の持つエネルギーに等しい周波数のラジオ波を当てるとき、その原子は $m_F = -1 \rightarrow 0$ に遷移する。

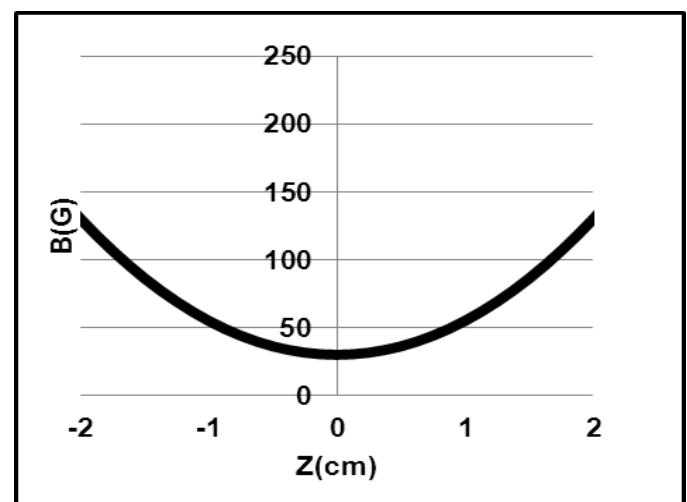
すると、遷移した原子はトラップに捕獲されなくなり、トラップから外れる。



例: ヨッフェバーコイル



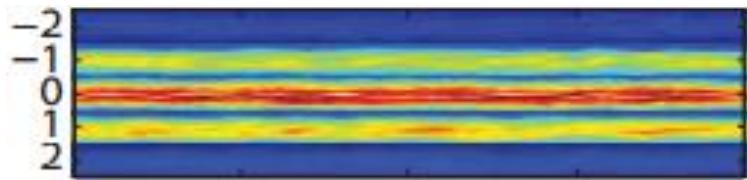
R方向の磁場変化



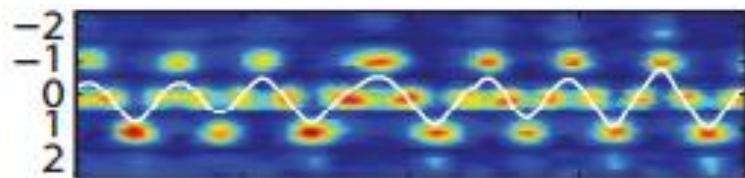
Z方向の磁場変化

スピンの状態

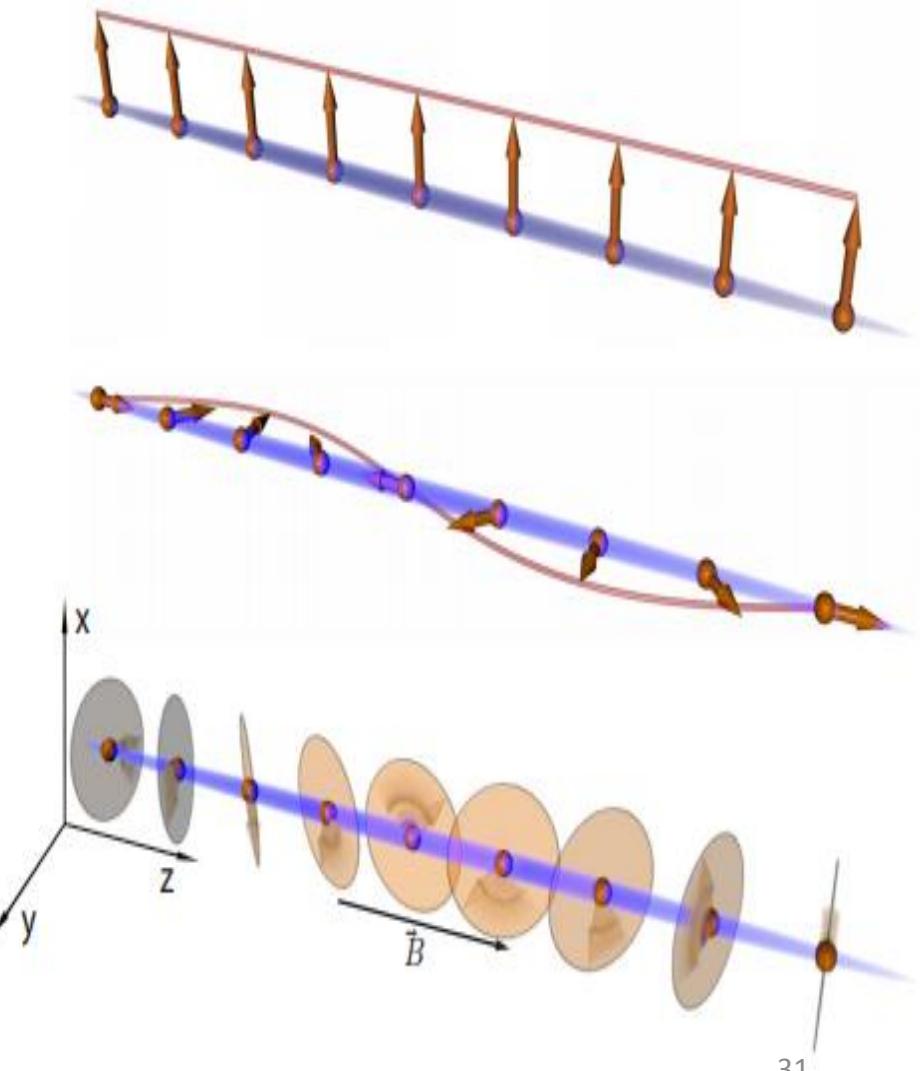
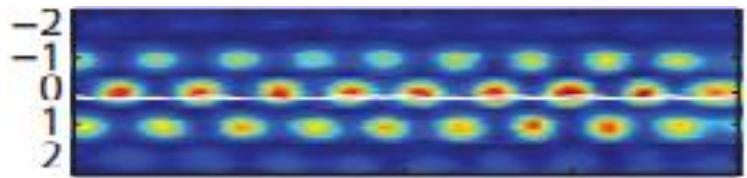
初期状態



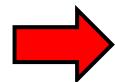
250 ms @ 0.25 G



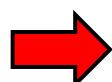
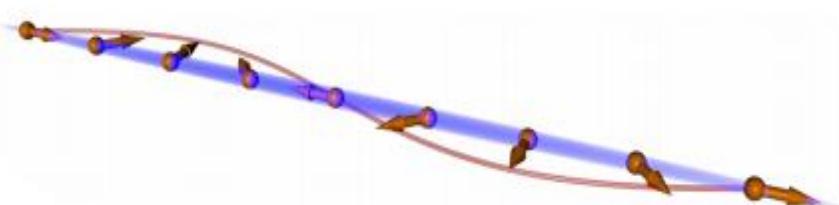
190 ms @ 1.10 G



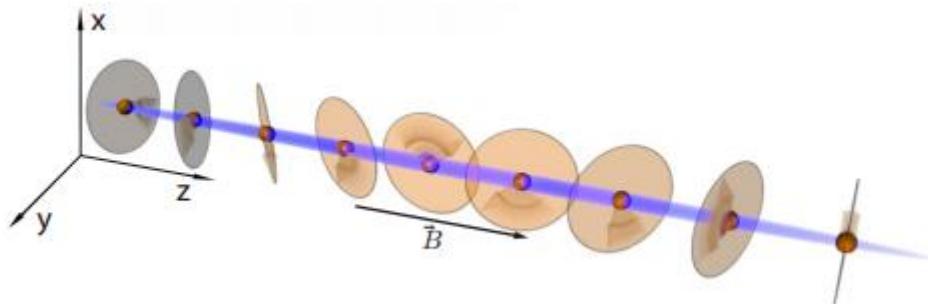
初期状態に磁場をかけると、ラーモア歳差運動が起こる



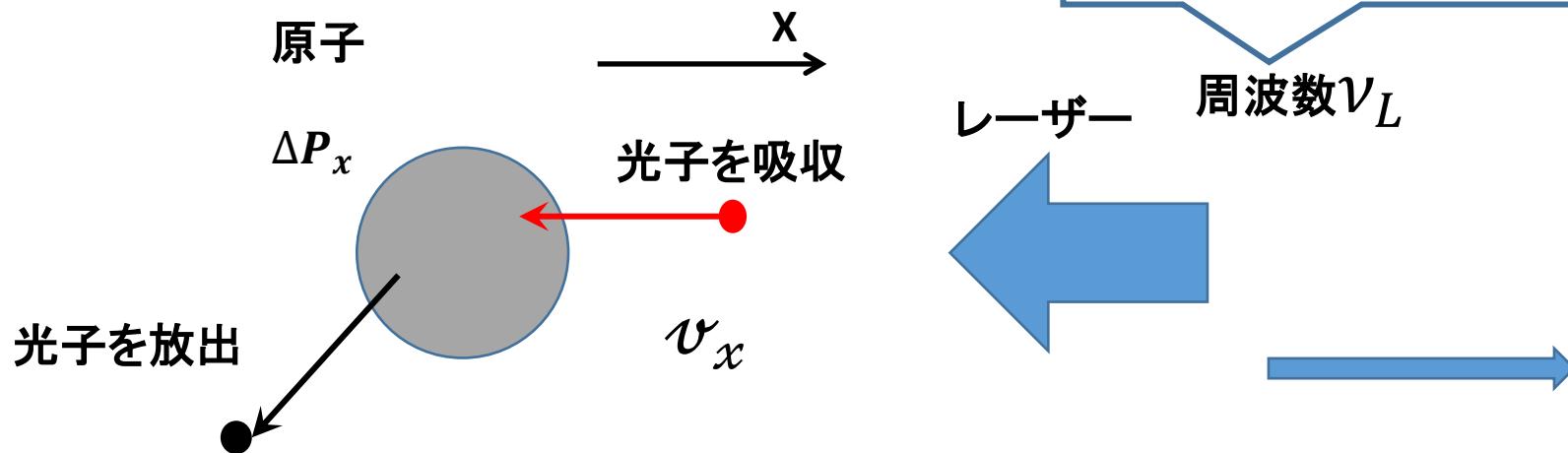
低磁場の場合歳差運動の様子が現れる



高磁場の場合、 $F = -2, 2$ が打ち消しあうが、スピン自由度を持った状態になる。



レーザー冷却



レーザーの周波数を原子の共鳴周波数から δ だけ下にする。

$$\nu_L = \nu_0 + \delta, \quad \nu_0: \text{原子遷移周波数}, \quad \delta \ll \nu_0$$

ドップラー効果より

$$\nu'_L = \nu_L (1 + v_x/c) \approx \nu_0 + \delta + v_x \nu_0 / c$$

$$\delta = - v_x \nu_0 / c$$



この運動量はレーザーと逆方向に動く原子にのみ発生する。
6方向からレーザーを当てれば原子は冷却される。

(2) BECの作り方

1. レーザー冷却

2. 磁気トラップ^o

3. 蒸発冷却

4. 光トラップ^o

(2) BECの作り方

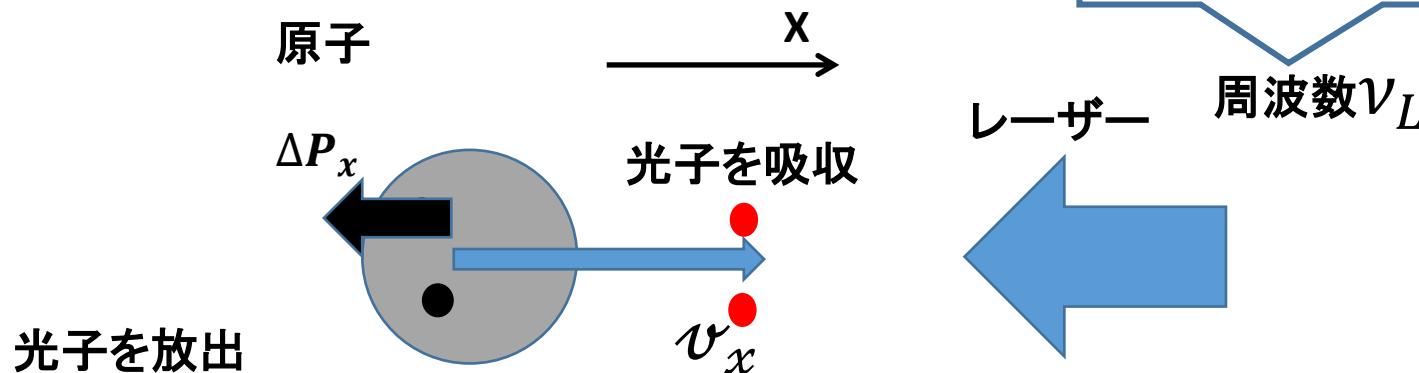
1. レーザー冷却

2. 磁気トラップ

3. 蒸発冷却

4. 光トラップ

レーザー冷却



レーザーの周波数を原子の共鳴周波数から δ だけ下にする。

$$\nu_L = \nu_0 - \delta, \quad \nu_0: \text{原子遷移周波数}, \quad \delta \ll \nu_0$$

ドップラー効果より

$$\nu'_L = \nu_L (1 + v_x/c) \approx \nu_0 - \delta + v_x \nu_0 / c$$

$$\delta = v_x \nu_0 / c$$

この運動量はレーザーと逆方向に動く原子にのみ発生する。
6方向からレーザーを当てれば原子は冷却される。

(2) BECの作り方

1. レーザー冷却

2. 磁気トラップ

3. 蒸発冷却

4. 光トラップ

磁気トラップ

磁場 B 中の原子のエネルギー ΔE は

$$\Delta E = g_F \mu_B m_F |B|$$

g_F : g 因子,

μ_B : ボーア磁子,

m_F : 磁気副準位

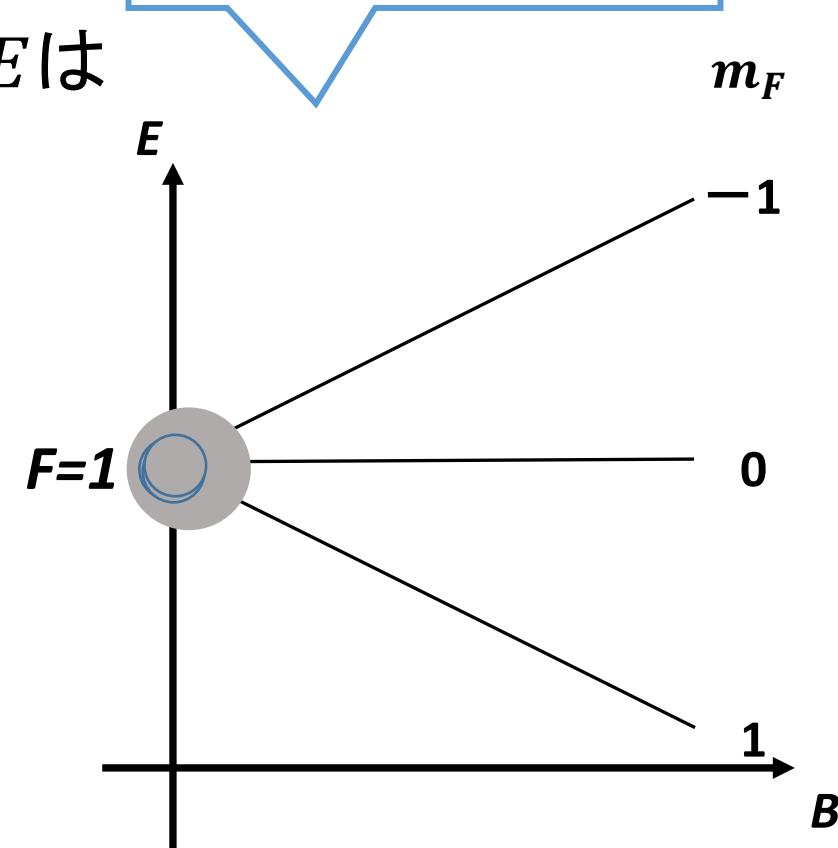
と表せる。

$F=1$ のとき $g_F = -\frac{1}{2}$ となる。

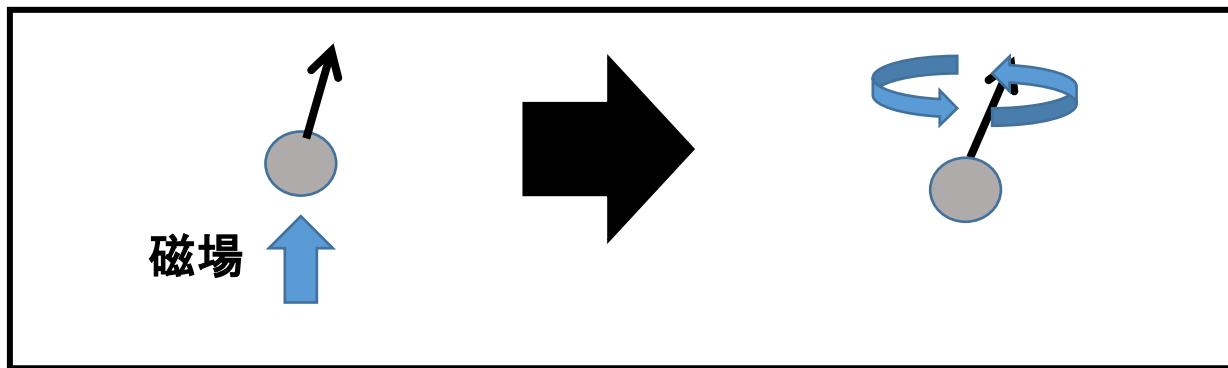
これにより、 $m_F = -1$ に

シフトした原子は不均一な磁場の中で、極小点にトラップされる。

原子は磁場をかけることで
ゼーマンシフトする



ラーモア歳差運動



磁場中の磁気双極子モーメント $\mu_F = \gamma F$ にかかるトルクは、

$$\Gamma = \mu_F \times B$$

とかける。このときの運動方程式は

$$\frac{\partial \mu_F}{\partial t} = \Gamma$$

であるので、

$$\text{運動方程式} : \frac{1}{\gamma} \frac{\partial \mu_F}{\partial t} = \mu_F \times B$$

となる。

(2) BECの作り方

1. レーザー冷却

2. 磁気トラップ

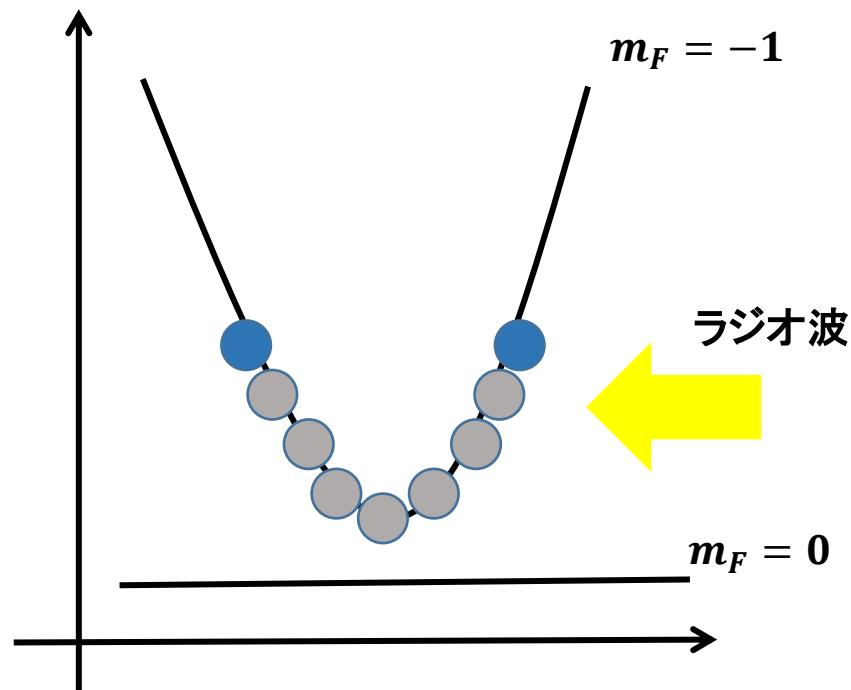
3. 蒸発冷却

4. 光トラップ

蒸発冷却

原子の持つエネルギーに等しい周波数のラジオ波を当てるとき、その原子は $m_F = -1 \rightarrow 0$ に遷移する。すると、遷移した原子はトラップに捕獲されなくなり、トラップから外れる。

エネルギーの大きさ



(2) BECの作り方

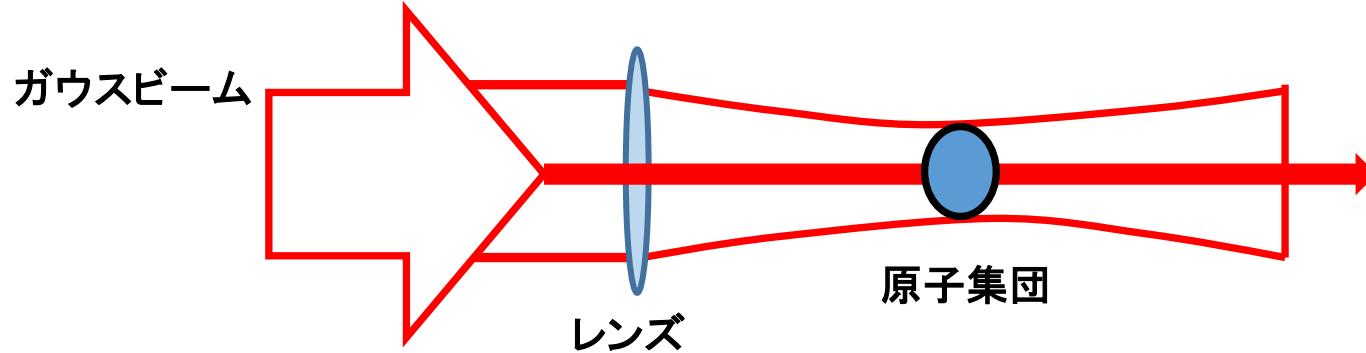
1. レーザー冷却

2. 磁気トラップ

3. 蒸発冷却

4. 光トラップ

光トラップ



光を用いて、原子をトラップする。

原子が感じるポテンシャルUは

$$U \propto -\frac{I(r)}{\delta}$$

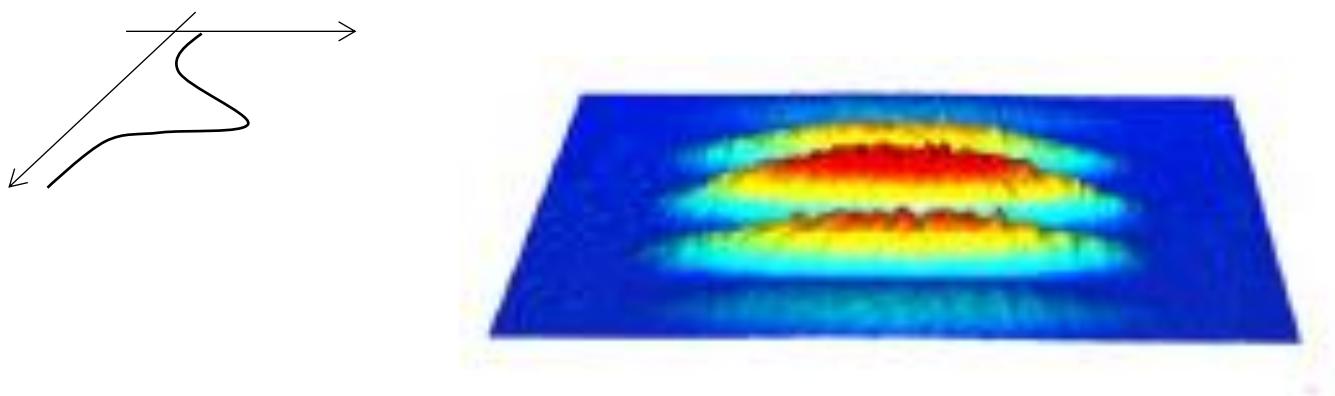
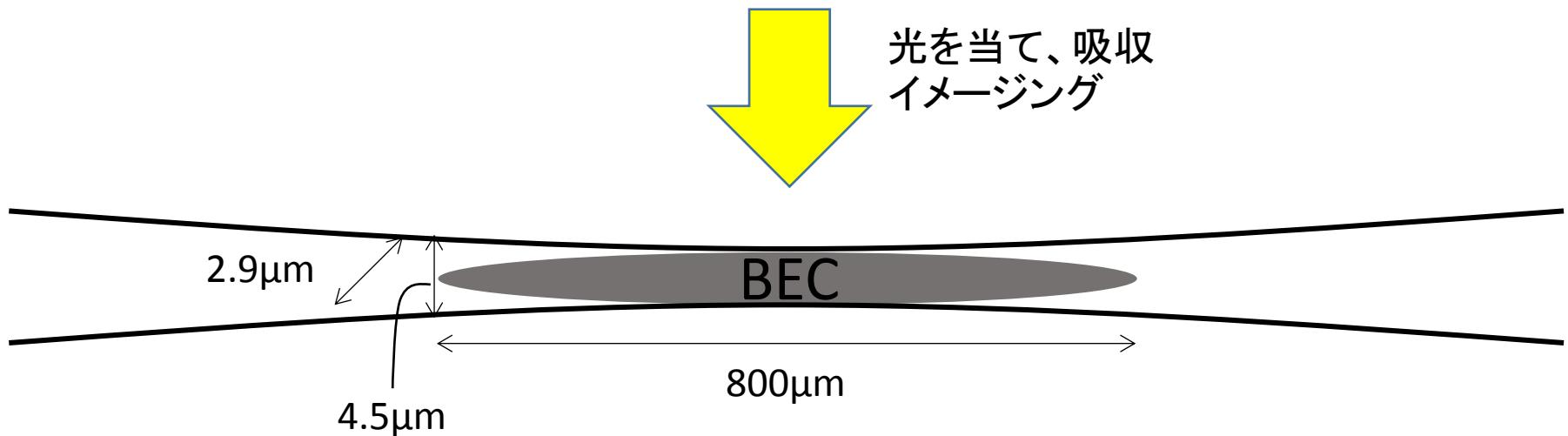
$I(r)$:レーザーの強度,

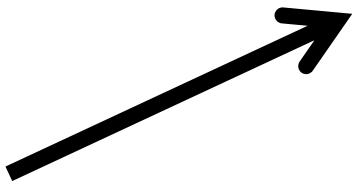
δ :原子の共鳴周波数とレーザーの周波数の差

を満たす。

ガウスビームは中心付近の強度が強いため、原子集団はガウスビームの中心付近にトラップされる。

今回作成したBEC





1. 概要

1. 反強磁性を持つ ^{87}Rb $F = 2, m_F = -2$ の
スピノールBECを作る。

核スピンを持つ原子の全角運動量
スピン自由度を持ったBECも $l + s$
 l : 核スピン, l : 軌道角運動量 s : スピン角運動量

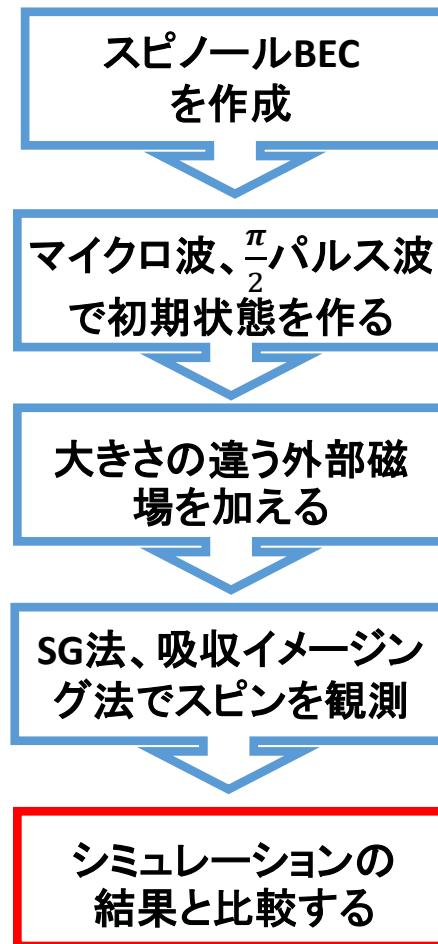
磁気副準位
 $m_F = -F, \dots, F$

2. そこに大きさの違う外部磁場をかけ、スピンの変化を見る。

3. 2つの特徴的なスピンパターンに着目し、GP方程式による
シミュレーションを行い、整合性を確かめる。

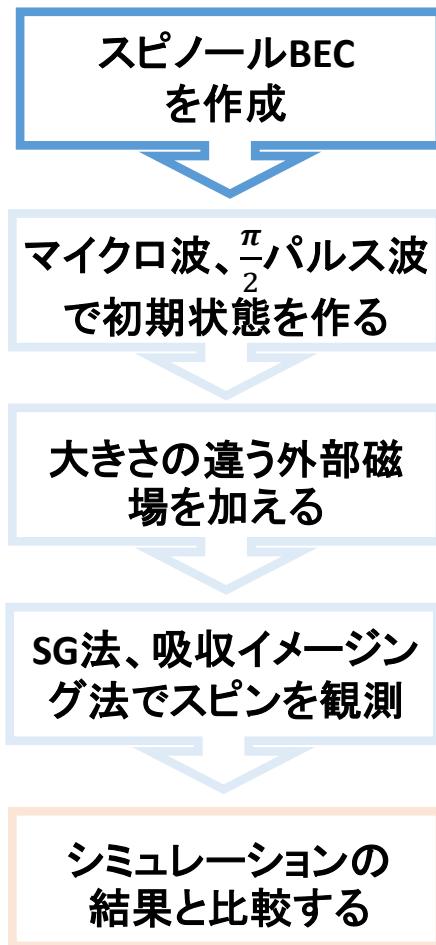
Gross-Pitaevskii方程式

3. 実験

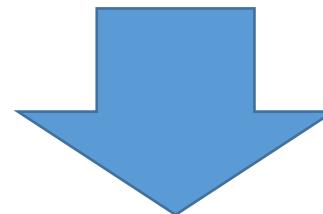


実験の手順

3. 実験



ルビジウム原子を冷却し、 ${}^{87}\text{Rb}$ $F = 1$, $m_F = -1$ の BEC を作成する。



光トラップを使い、スピノールBECを作成する。

3. 実験

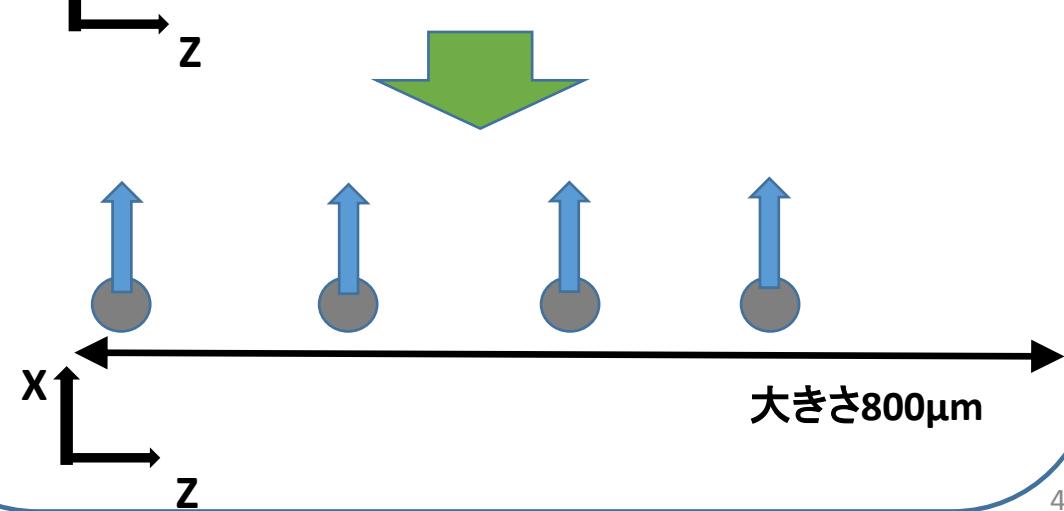
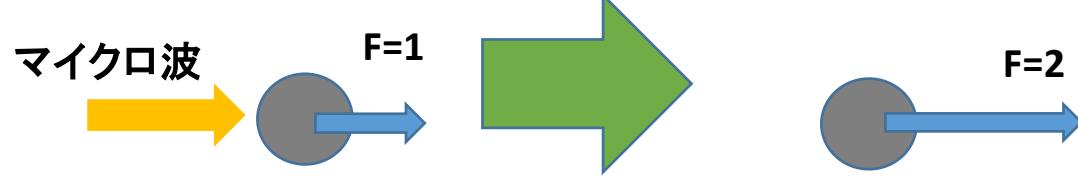
スピノールBEC
を作成

マイクロ波、 $\frac{\pi}{2}$ パルス波
で初期状態を作る

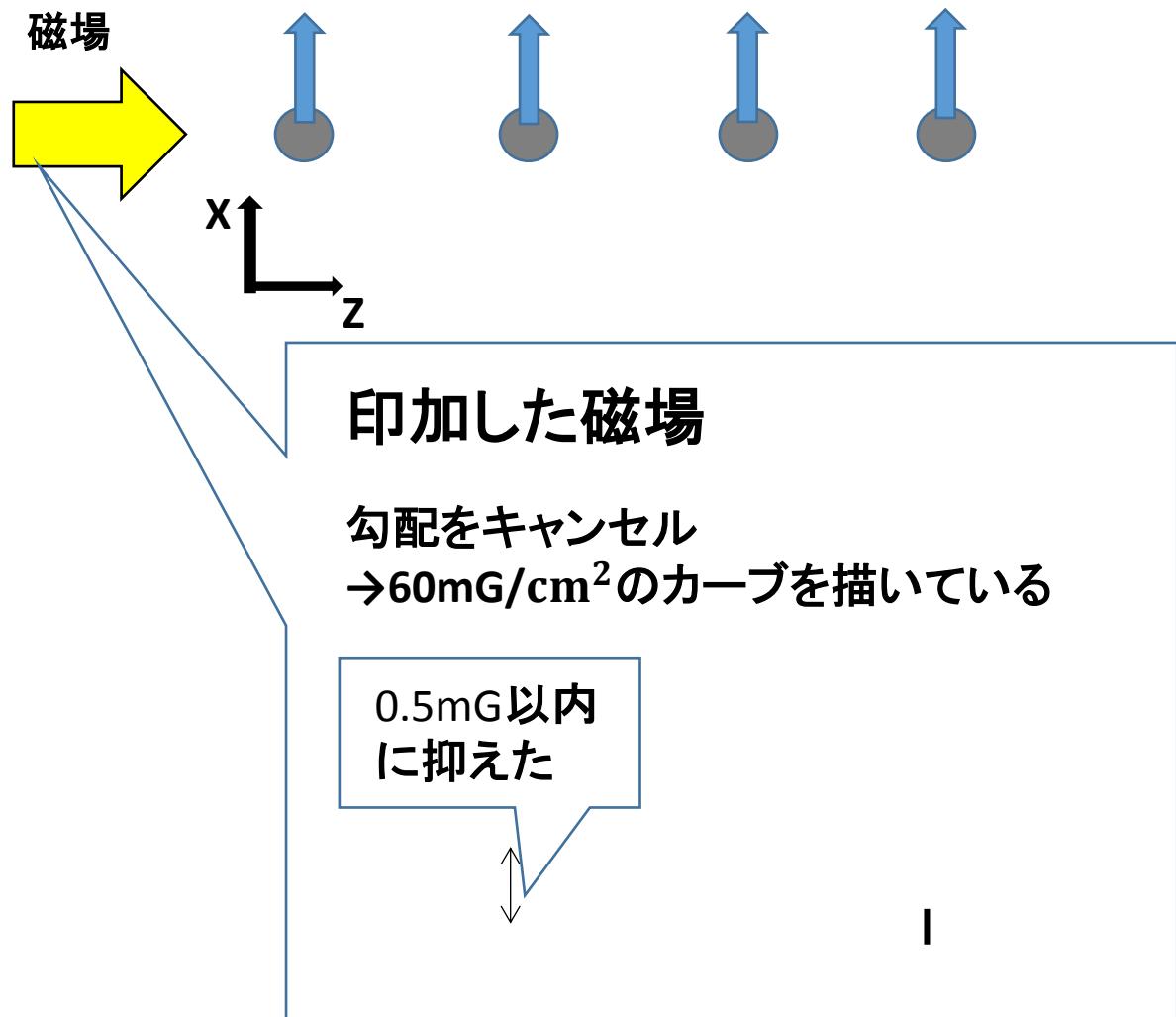
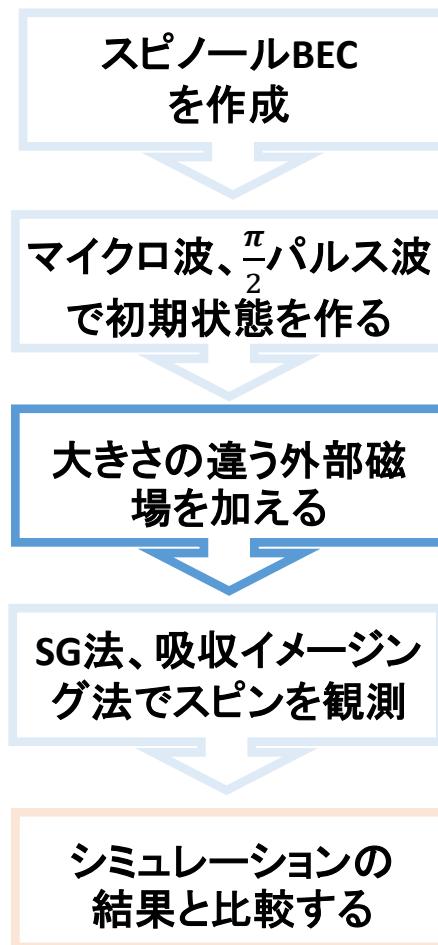
大きさの違う外部磁場を加える

SG法、吸収イメージング法でスピンを観測

シミュレーションの
結果と比較する



3. 実験



3. 実験

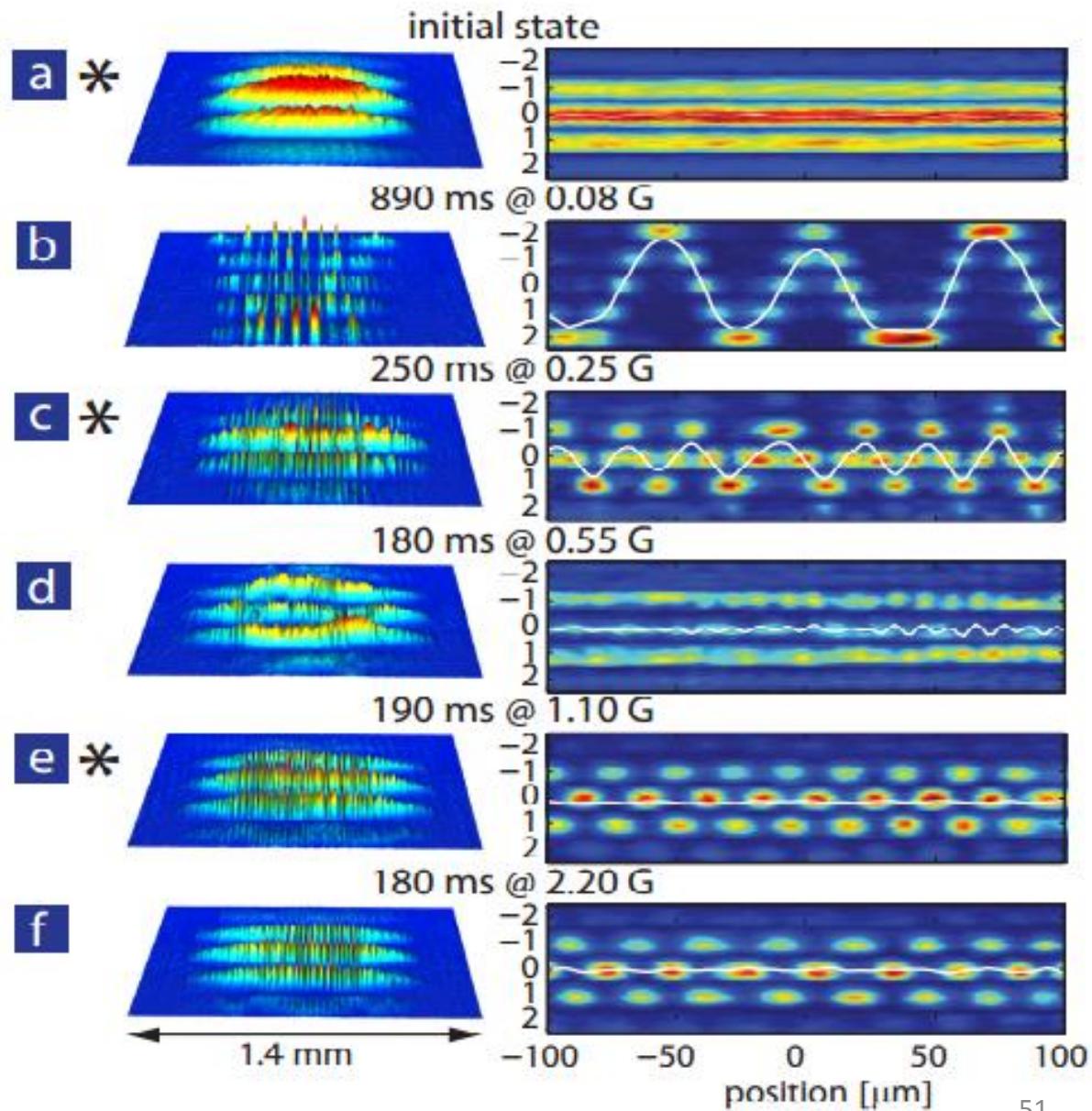
スピノールBEC
を作成

マイクロ波、 $\frac{\pi}{2}$ パルス波
で初期状態を作る

大きさの違う外部磁場を加える

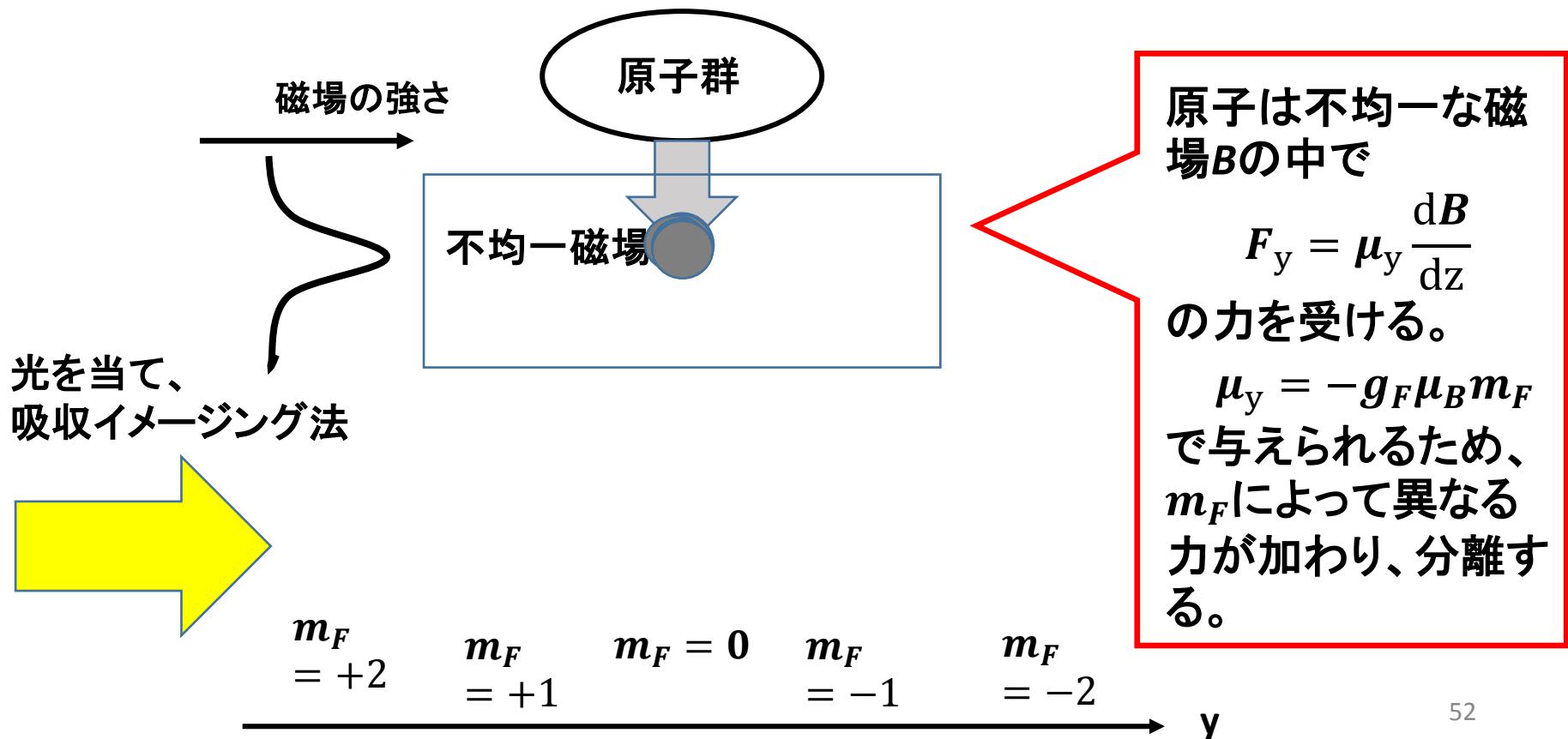
SG法、吸収イメージング法でスピンを観測

シミュレーションの
結果と比較する



Stern-Gerlachのスピン分離

原子集団を不均一な磁場の中に入れると、それぞれのスピンの状態ごとに分離する。



吸収イメージング法

スピン分離した原子に共鳴する光を当てる。

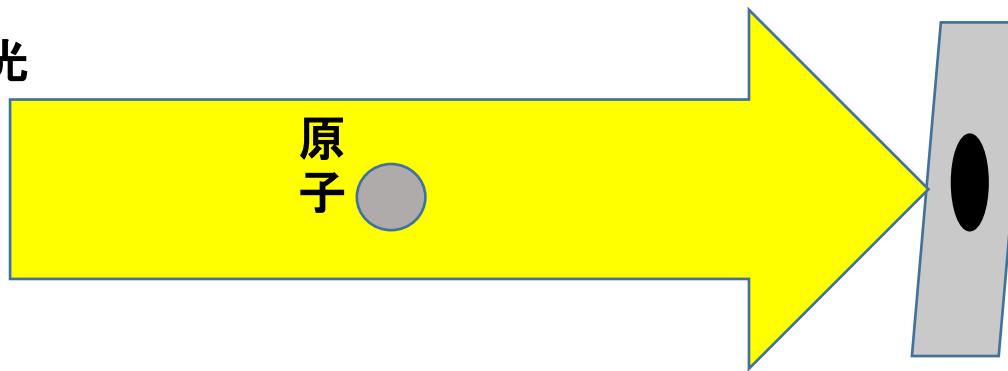


原子が光を吸収した部分は影となって現れる。



これを用いてスピンの状態を観測する。

共鳴光

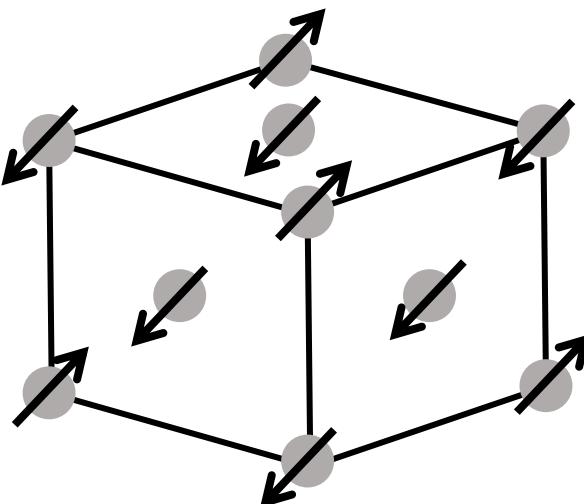


影ができる！

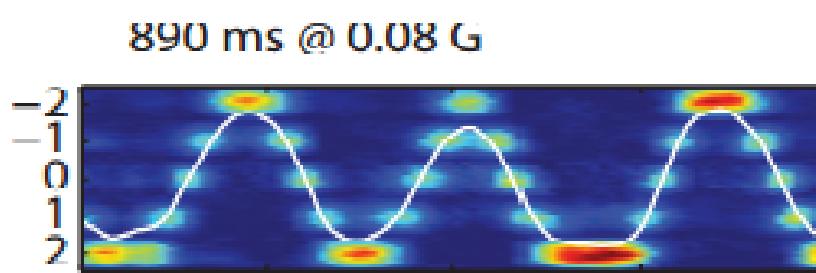
2. 予備知識 反強磁性とは

隣り合う磁気双極子モーメントが互いに反対を向く
ような磁性のこと

例：面心立方格子の場合



低磁場ではらせん運動が起こっている

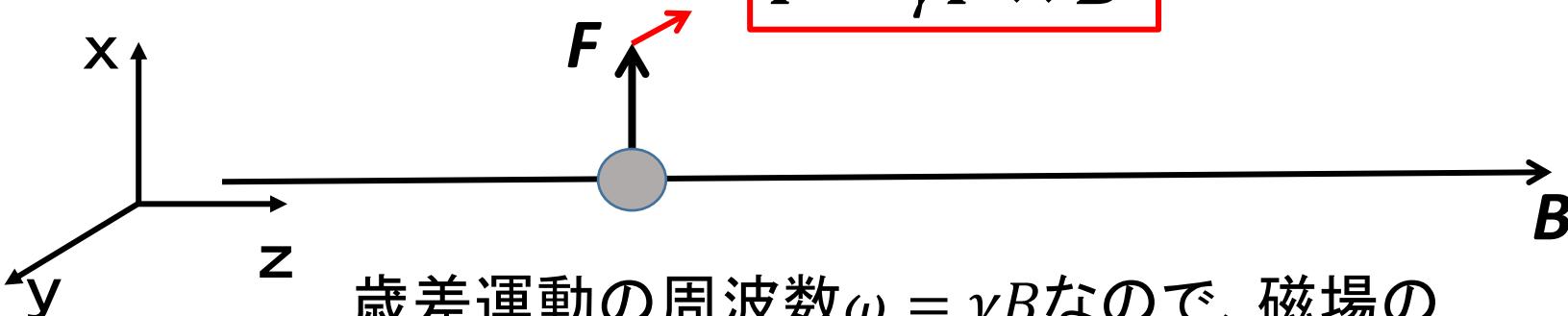


らせん運動をしていると考察

ラーモア歳差運動

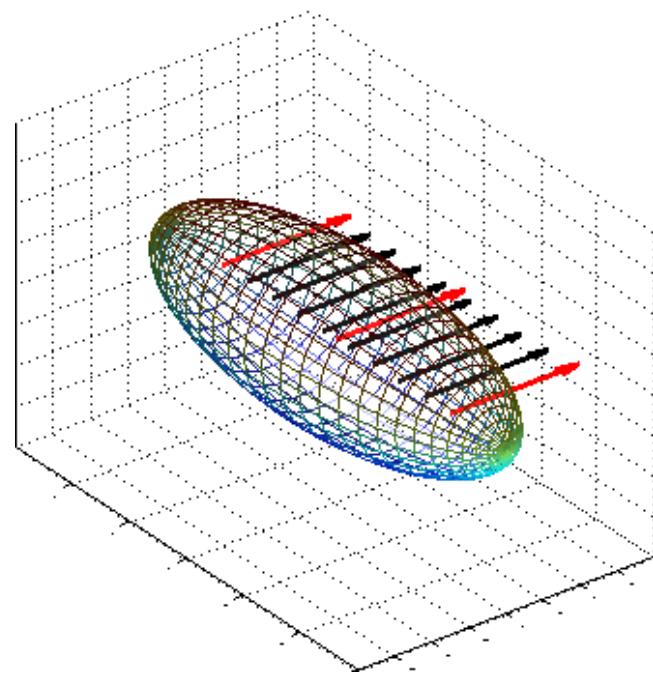
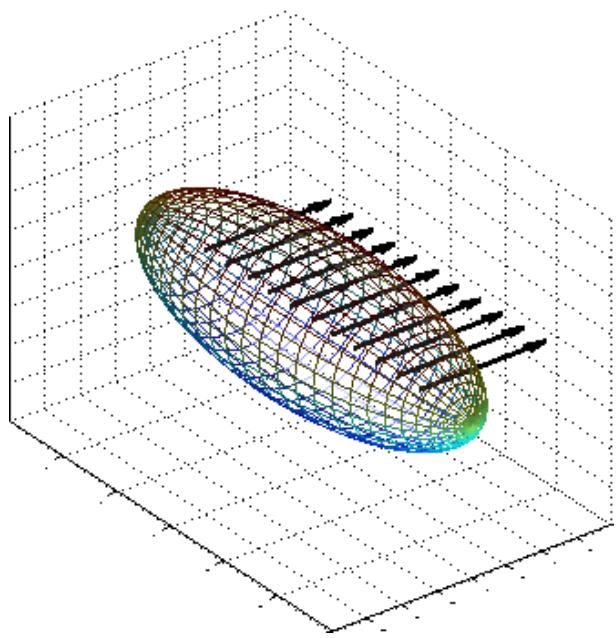
$$\Gamma = \gamma F \times B$$

γ : 磁気回転比



歳差運動の周波数 $\omega = \gamma B$ なので、磁場の大きさによって歳差運動はずれていく。

→ らせん運動



スピノン自由度をもつBEC

スピノン自由度をもたない

→磁気トラップ

原子に磁場をかけてトラップする。

トラップされる原子は

$F = 1$ のときは $m_F = -1$

$F = 2$ のときは $m_F = 1, 2$

だけである。

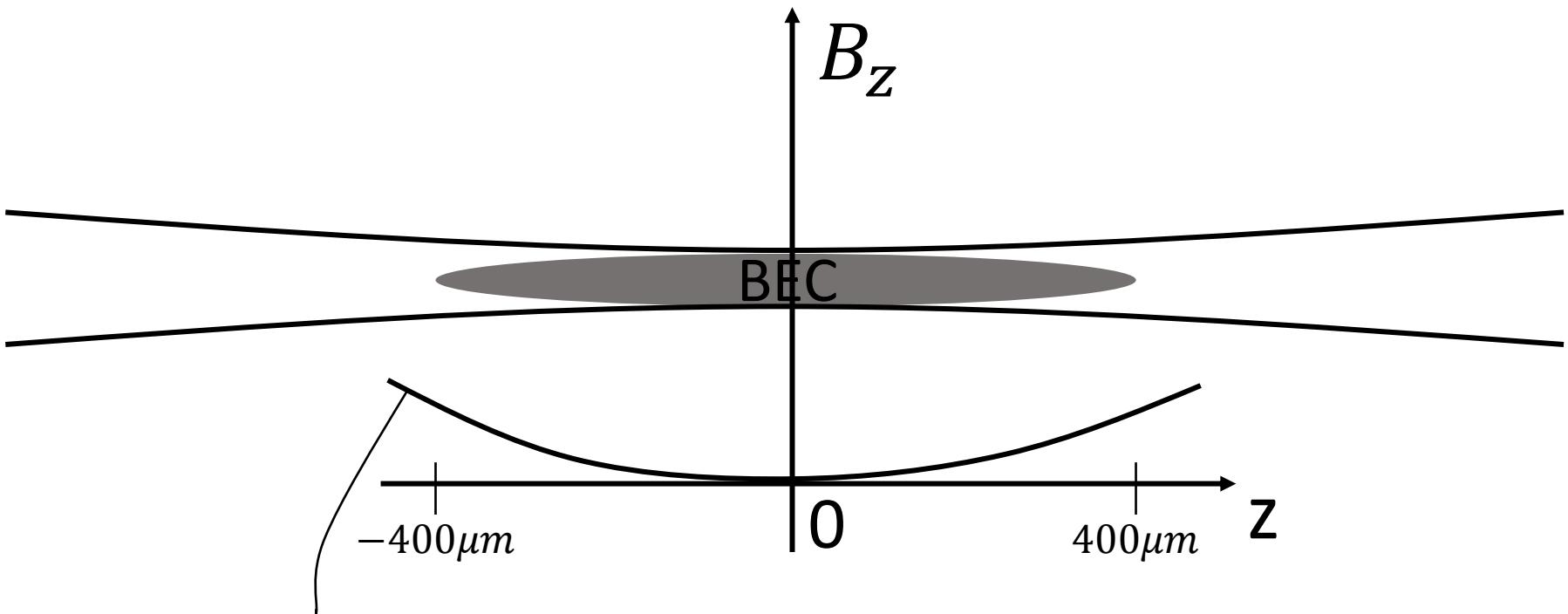
スピノン自由度をもつ

→光トラップ

原子に光を当ててトラップする。

全てのエネルギー準位の原子をトラップすることができる。

今回作成したBECと実験方法



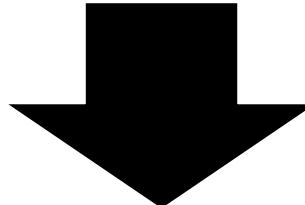
$$\frac{d^2 B_z}{dz^2} = 60 \text{mG/cm}^2$$

なるべく均一な外部磁場をかけようとした結果、図のような曲率を持つ外部磁場となつた。

本論文で言っていること

本論文では実験で現れたパターンがGP方程式に合っていると言っている

しかし現れたパターンの原因となる現象が何かは言っていない



そこで、平野研究室で行っている研究の結果から、どのような現象が起こっているかを考察する

