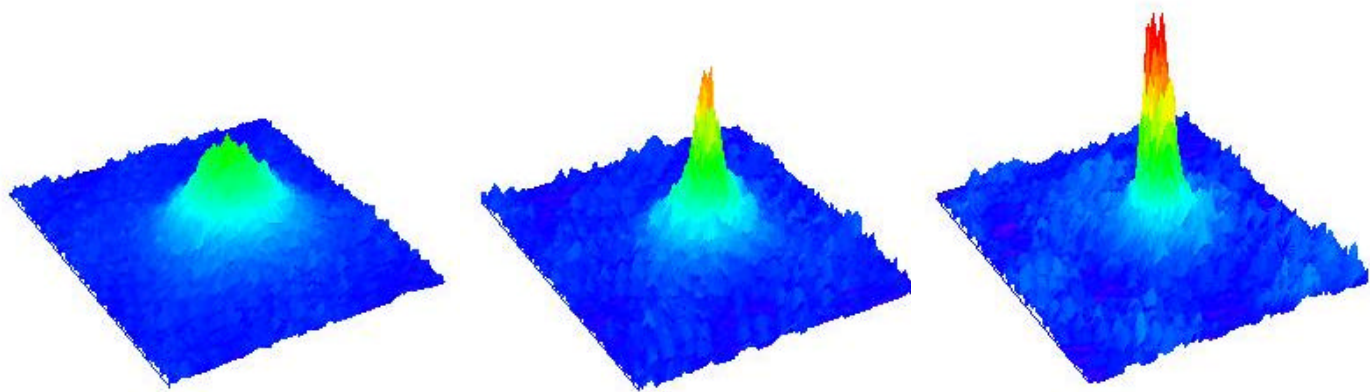


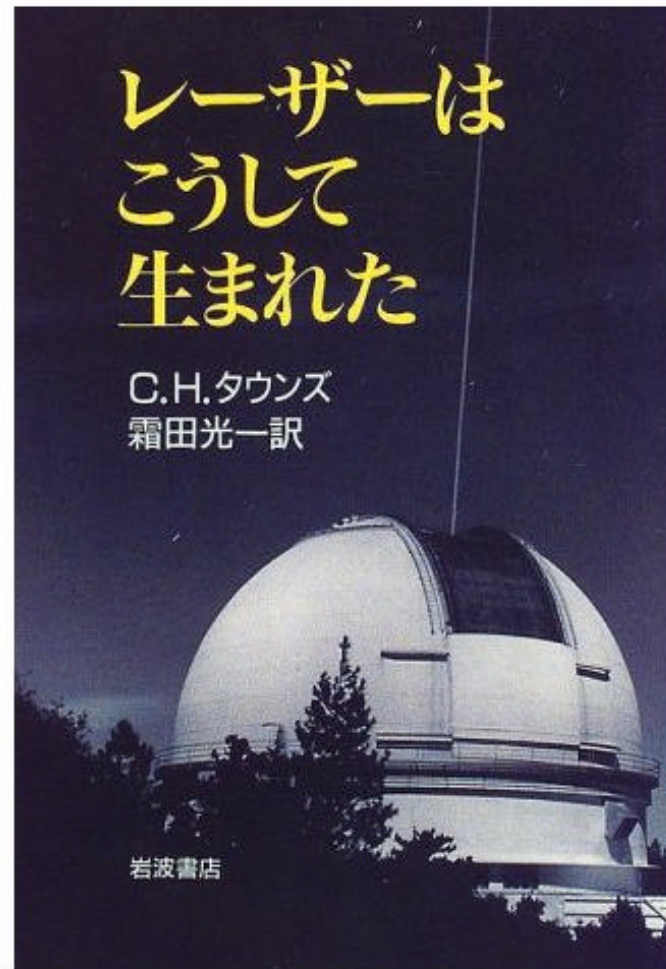
# 原子レーザーはこうして生まれた -原子気体のボース・アインシュタイン凝縮-



相関基礎 (物理部会)

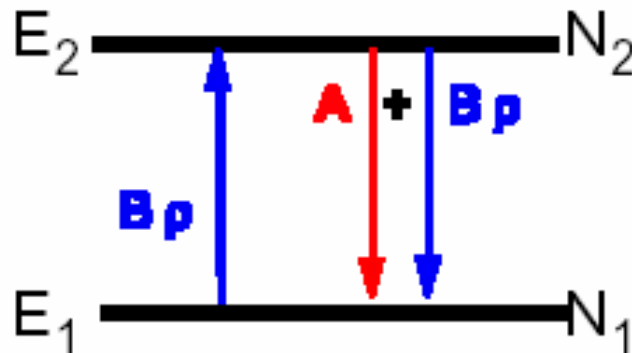
鳥井寿夫 (16号館224A)

# How the laser happened (by Charles H. Townes)

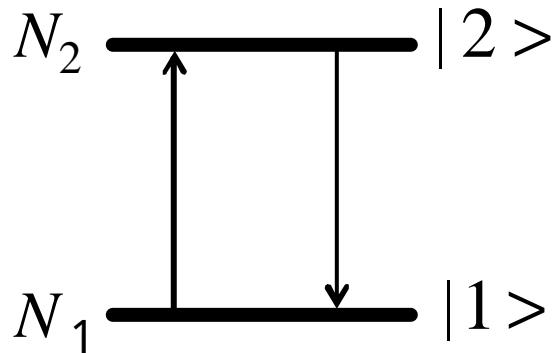


# Einstein's 1917 paper (アインシュタインのA係数、B係数)

“We introduce the following quantum-theoretical hypothesis. Under the influence of a radiation density ... a molecule can make an [upward] transition from state  $n$  to state  $m$  by absorbing radiation energy ... We similarly assume that a [downward]\* transition  $m$  to  $n$  associated with a liberation of radiation energy ... is possible under the influence of the radiation field, and that it satisfies the [same] probability law ... “



# 誘導放出による光の増幅



吸収断面積と誘導放出断面積は等しい  
(アインシュタインのB係数)

$$\mathbf{s} \equiv \mathbf{s}_0 \frac{g^2}{d^2 + (1 + s_0)g^2}$$

吸収 (増幅) 係数

反転分布

$$-N_1 \mathbf{s} + N_2 \mathbf{s} = (N_2 - N_1) \mathbf{s}$$

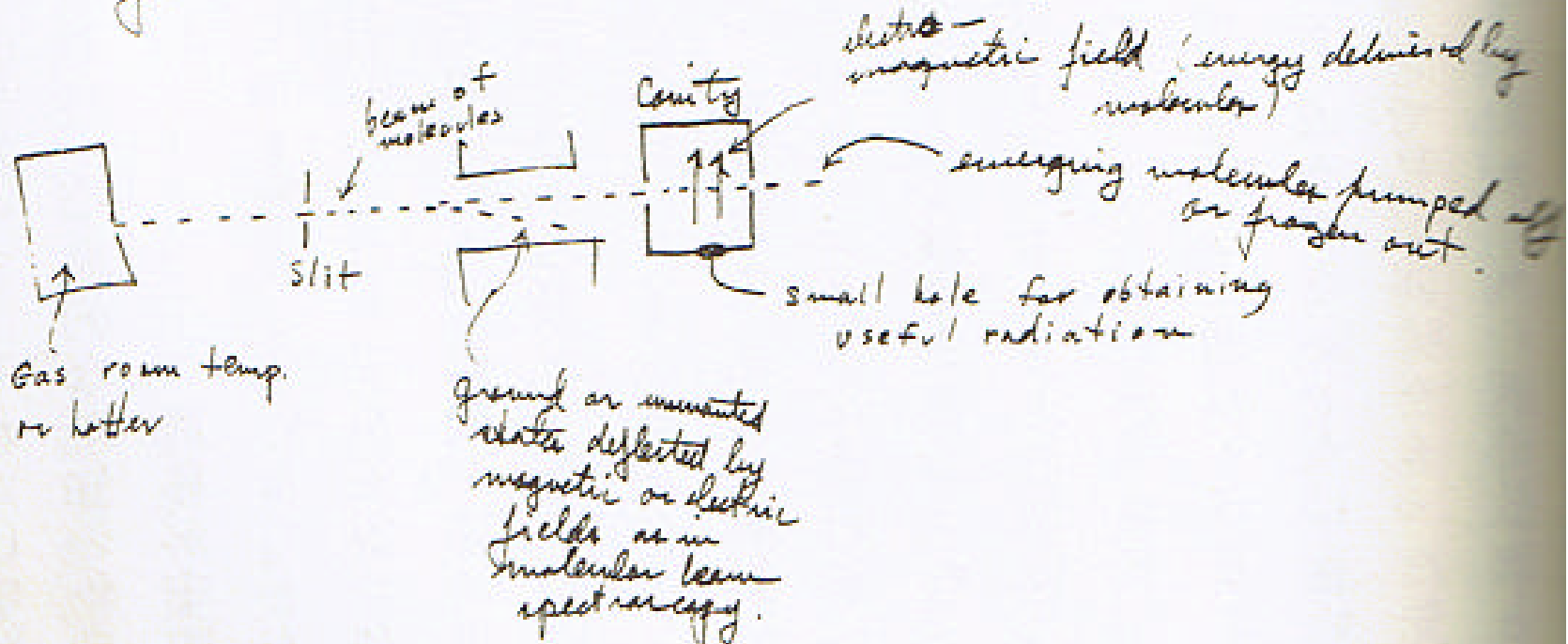
$N_2 > N_1$  増幅

$N_2 < N_1$  減衰

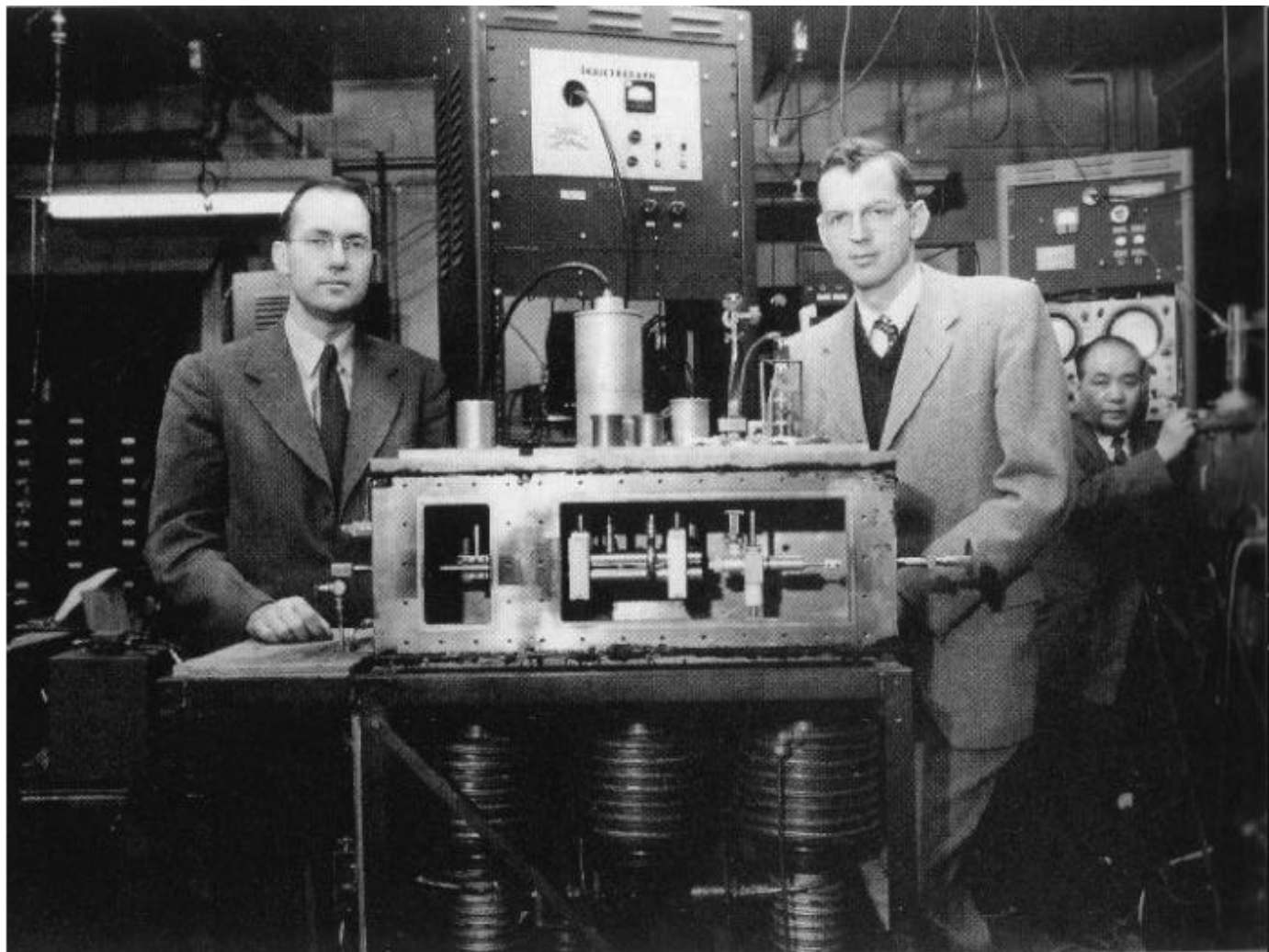
# 最初にレーザーのアイデアを記載した 1951年5月11日のタウンズのノート

May 11, 1951

Apparatus for obtaining short microwaves  
from excited atomic or molecular systems



# コロンビア大学のアンモニアメーザー



# レーザー発明前の同僚の反応

ラビ (1944年 ノーベル物理学賞)

クッシュ (1955年 ノーベル物理学賞)

君はこの研究をやめるべきだ。私たちに  
もうまくいかないことは分かっている。君は  
研究費を無駄にしている。もうやめたま  
え！」

# レーザー (メーザー) の特性

コヒーレントである

(媒質が持つ周波数幅より狭い電磁波を発生する)

(タウンズ (メーザーの発明者) の自伝より)

ボーアの反応

「そんなことは不可能だ！」

(説得後) 「ああそうか、多分君の言うとおりだろう」

フォン・ノイマンの反応

「そんなはずはない！」

(15分後) 「分かった、君の言うとおりだ」

彼らの判断の根拠はエネルギーと時間の不確定性原理



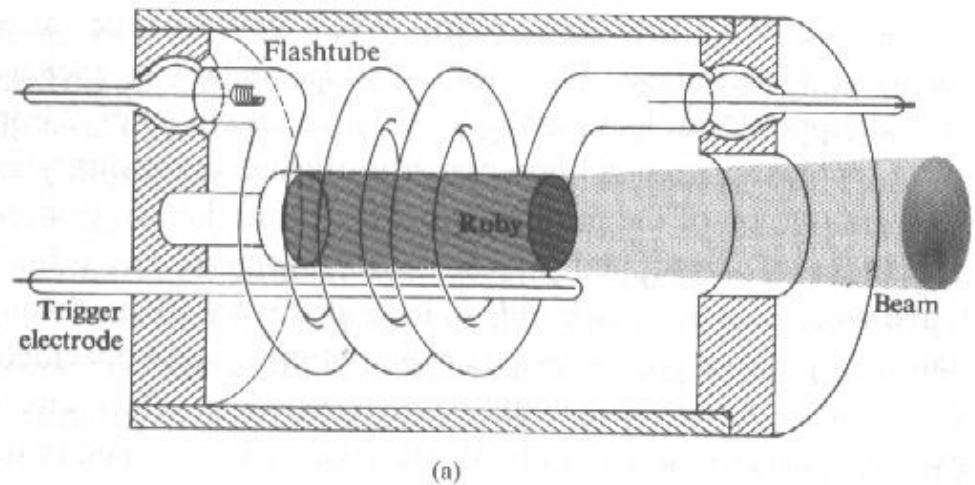
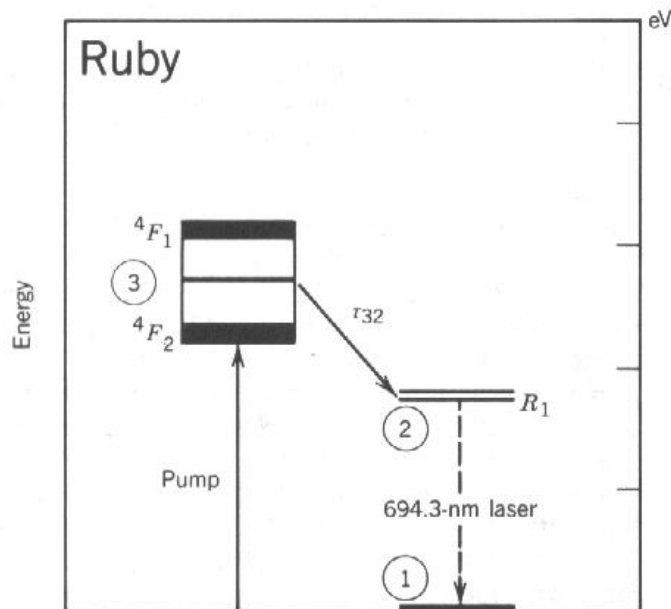
# レーザー開発のエピソードが 物語っていること

・レーザーの原理は量子力学の基本（誘導放出）  
だが、30年間誰も実現しようと思わなかった  
意外と眠っている素晴らしいアイデアがある  
（ファインマン曰く「素晴らしいアイデアかどうかは  
僕がそれに気がつくんだ」と言うかでわかる）

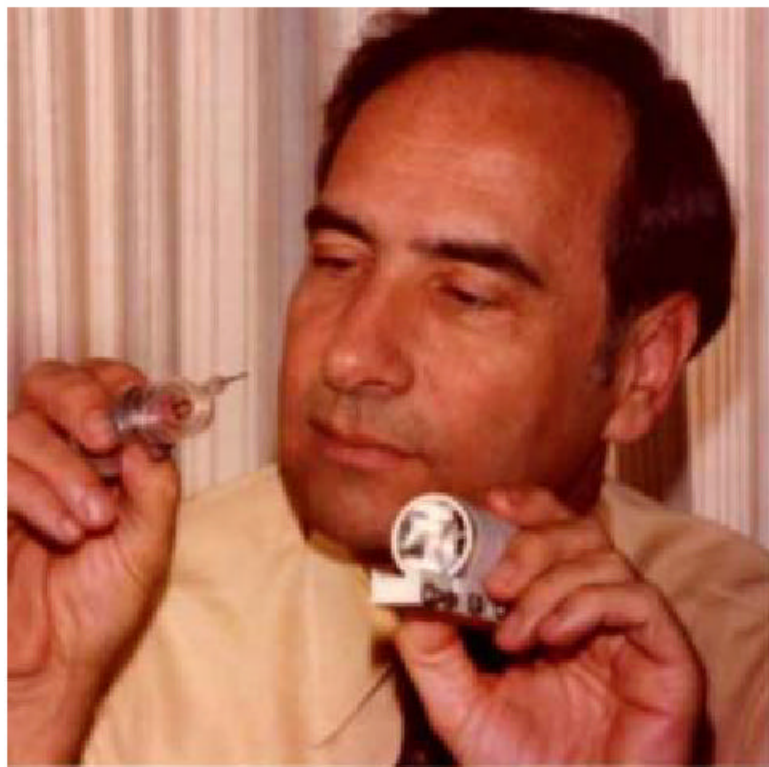
ボーア、フォンノイマンといった量子力学の大御所  
が、レーザーの特性を直感的に理解できない。  
偉い先生の言っていることを信用してはならない

# 世界初のレーザー (Ruby)

## Maiman(1960)



# Maimanのルビーレーザー (1960)





# 種々のレーザーの

**TABLE 13.2-1 Characteristics of a Number of Important Laser Transitions**

Laser Medium	Transition Wavelength $\lambda_o$ ( $\mu\text{m}$ )	Transition Cross Section $\sigma_0$ ( $\text{cm}^2$ )	Spontaneous Lifetime $t_{sp}$	Transition Linewidth <sup>a</sup> $\Delta\nu$		Refractive Index $n$
He-Ne	0.6328	$1 \times 10^{-13}$	$0.7 \mu\text{s}$	1.5 GHz	I	$\approx 1$
Ruby	0.6943	$2 \times 10^{-20}$	3.0 ms	60 GHz	H	1.76
Nd <sup>3+</sup> :YAG	1.064	$4 \times 10^{-19}$	1.2 ms	120 GHz	H	1.82
Nd <sup>3+</sup> :glass	1.06	$3 \times 10^{-20}$	0.3 ms	3 THz	I	1.5
Er <sup>3+</sup> :silica fiber	1.55	$6 \times 10^{-21}$	10.0 ms	4 THz	H/I	1.46
Rhodamine-6G dye	0.56-0.64	$2 \times 10^{-16}$	3.3 ns	5 THz	H/I	1.33
Ti <sup>3+</sup> :Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.66-1.18	$3 \times 10^{-19}$	$3.2 \mu\text{s}$	100 THz	H	1.76
CO <sub>2</sub>	10.6	$3 \times 10^{-18}$	2.9 s	60 MHz	I	$\approx 1$
Ar <sup>+</sup>	0.515	$3 \times 10^{-12}$	10.0 ns	3.5 GHz	I	$\approx 1$

<sup>a</sup>H and I indicate line broadening dominated by homogeneous and inhomogeneous mechanisms respectively.

# レーザー (メーザー) に関係したノーベル物理学賞

- 1964 **Charles Hard Townes, Nicolay Gennadiyevich Basov, Aleksandr Mikhailovich Prokhorov** for fundamental work in the field of quantum electrodynamics, in particular for their construction of oscillators and amplifiers based on the maser-laser principle  
**レーザー (メーザー) の発明**
- 1981 **Nicolaas Bloembergen, Arthur Leonard Schawlow** for their contribution to the development of laser spectroscopy  
**レーザー (非線形) 分光学**
- 1989 **Norman F. Ramsey** for the invention of the separated oscillatory fields method and other atomic clocks  
**水素メーザーによる原子時計**
- 1997 **Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji, William D. Phillips** for their development of laser cooling and trapping of atoms with laser light  
**レーザー冷却**
- 2001 **Eric A. Cornell, Wolfgang Ketterle, Carl E. Wieman** for the achievement of Bose-Einstein condensation in dilute gases of alkali atoms, and for their discovery of the properties of the condensates  
**原子のボース凝縮 (原子レーザー)**
- 2005 **Roy J. Glauber** for his contribution to the quantum theory of optical coherence"  
**光のコヒーレンス**  
**John L. Hall** for his development of the optical frequency comb technique  
**光の絶対周波数測定**

1924年



S. N. Bose

光を粒と考え、この粒同士は同じ状態を取り得るとすると、プランクの式が導けるぞ!!

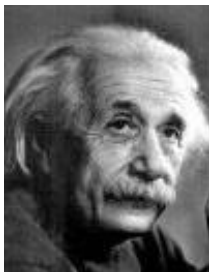
$$n_{BE}(e) = \frac{1}{\exp\left(\frac{e - m}{k_B T}\right) - 1}$$

ボース・アインシュタイン分布

$$e = \hbar\omega, m = 0 \rightarrow \bar{n} = \frac{1}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right) - 1}$$

プランクの式

手紙



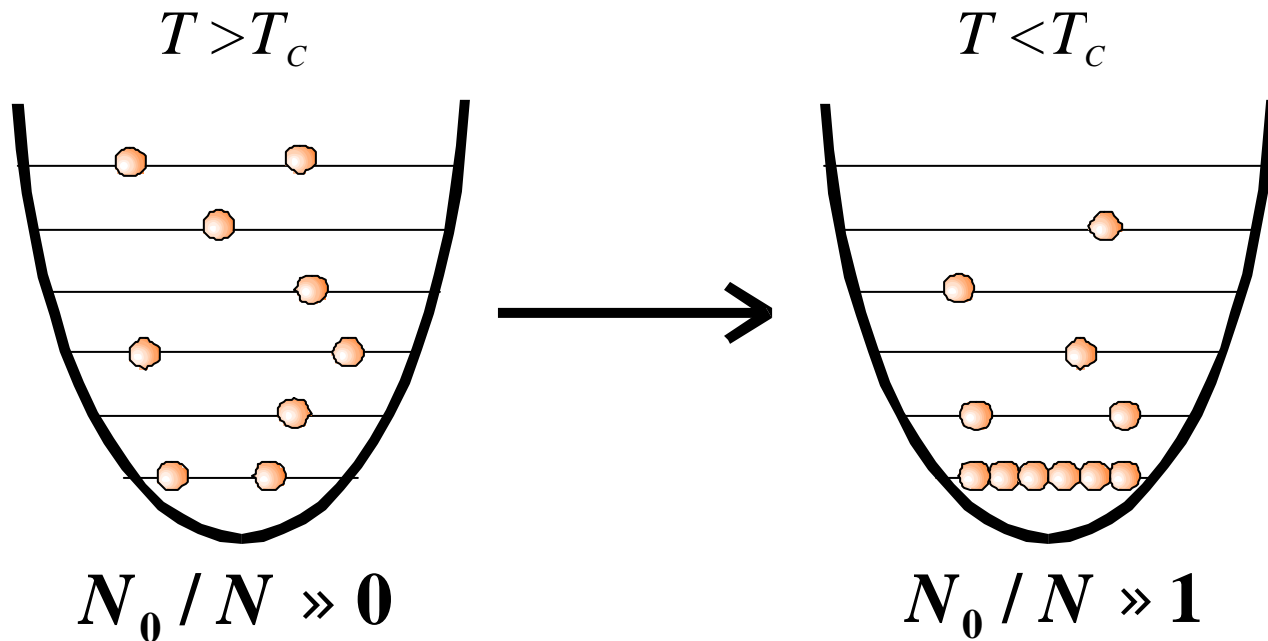
A. Einstein

同じ法則が原子にも成立すると仮定すると、低温でおかしな事が起こるぞ!

ボース・アインシュタイン凝縮

# ボース・アインシュタイン凝縮とは

ボース統計に従う粒子 (ボゾン) の集団を、ある温度以下に冷却すると、最低エネルギー状態を占める粒子数が突然マクロな数になる現象



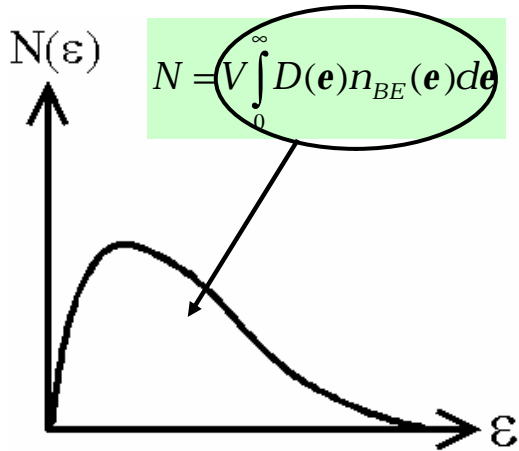


# ボース・アインシュタイン凝縮が起こる条件

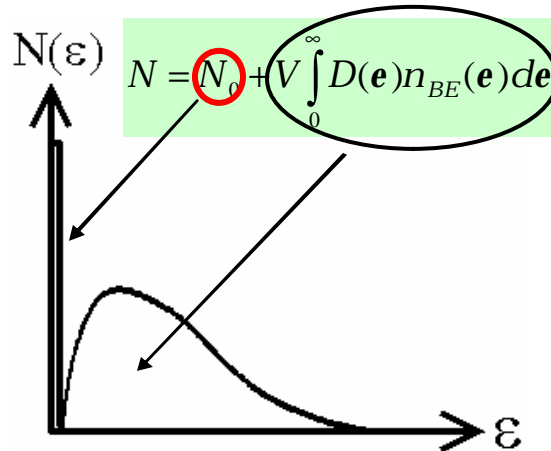
$$r_{ps} \equiv n l_{db}^3 > 2.612 \quad (l_{db} \equiv \frac{h}{\sqrt{2pmk_B T}} : \text{熱的ドブロイ波長})$$

$$\Leftrightarrow T < T_C \equiv \frac{h^2}{2pmk_B} \left( \frac{N}{2.612V} \right)^{2/3} : \text{転移温度}$$

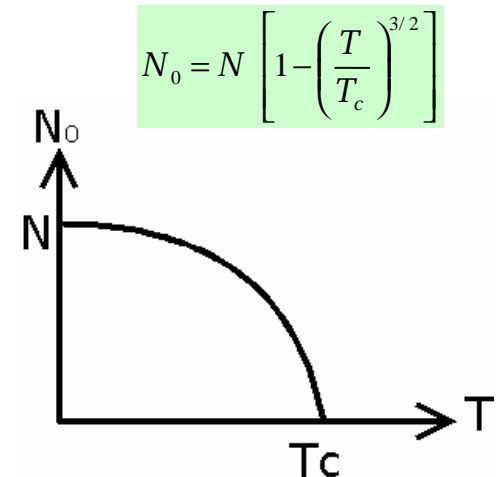
$$T > T_C \quad (r_{ps} < 2.612)$$



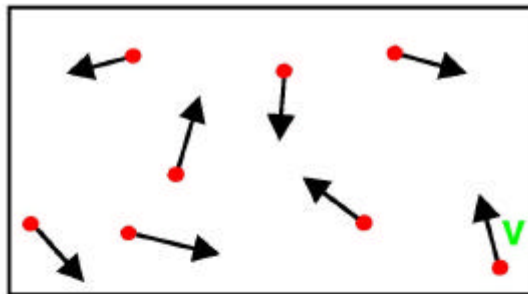
$$T < T_C \quad (r_{ps} > 2.612)$$



$$N_0 \text{ の } T \text{ 依存性}$$



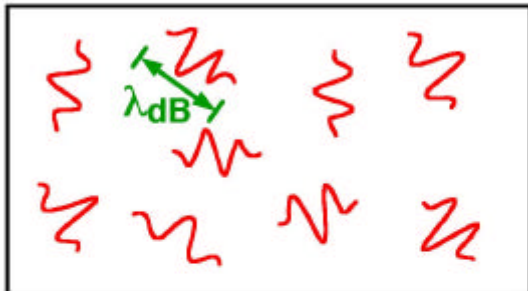
T ~ 300K



原子は粒子のように振舞う

レーザー冷却

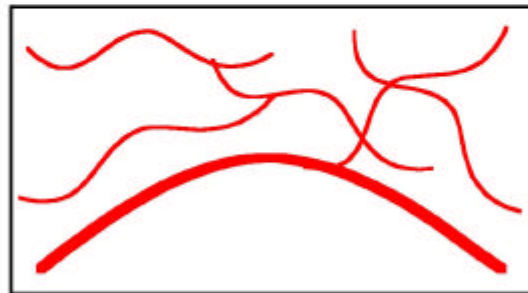
T ~ 1mK



粒子の波動性が顕著になる

蒸発冷却、レーザー冷却

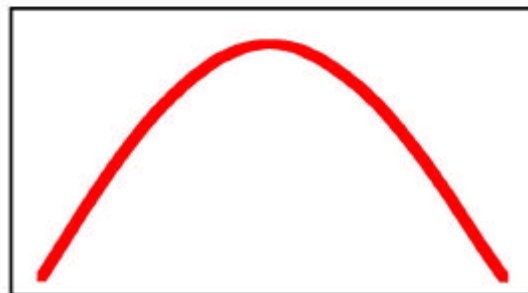
T ~ 1 $\mu$ K



波が重なり始める  
(ボース統計性が顕著になる)

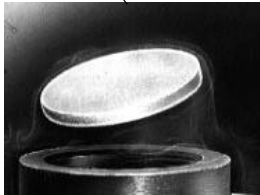
蒸発冷却

T ~ 100nK



一つの巨大な波  
(ボース・アインシュタイン凝縮)

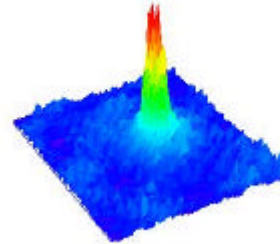
# ボース・アインシュタイン凝縮(BEC)の仲間達



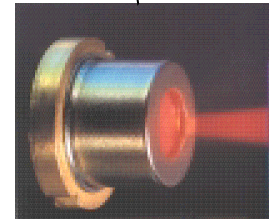
電子対 (クーパ対) の BEC (超伝導)



液体ヘリウム原子の BEC (超流動)



気体原子の BEC (原子レーザー)

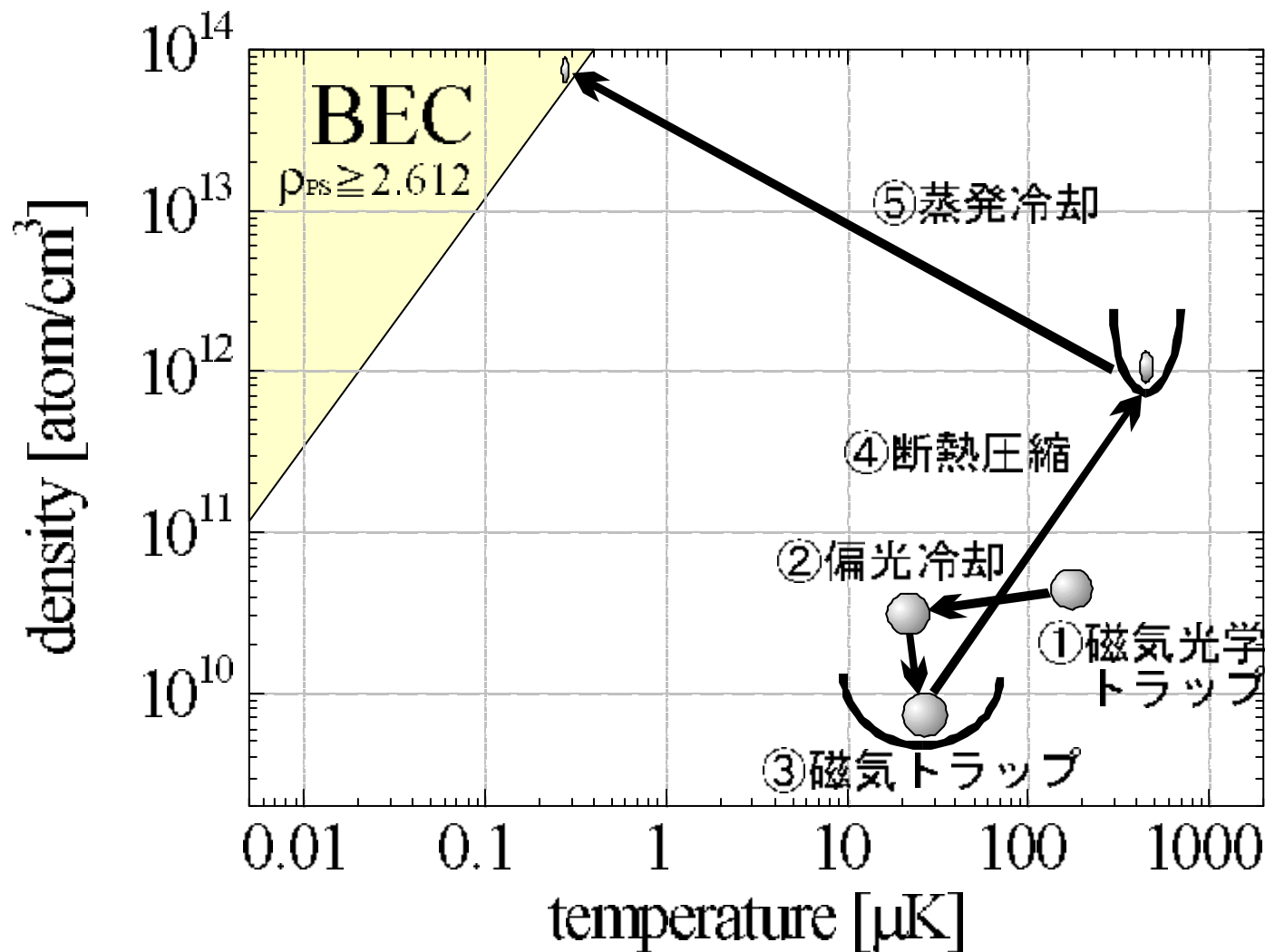


光子の BEC (レーザー)

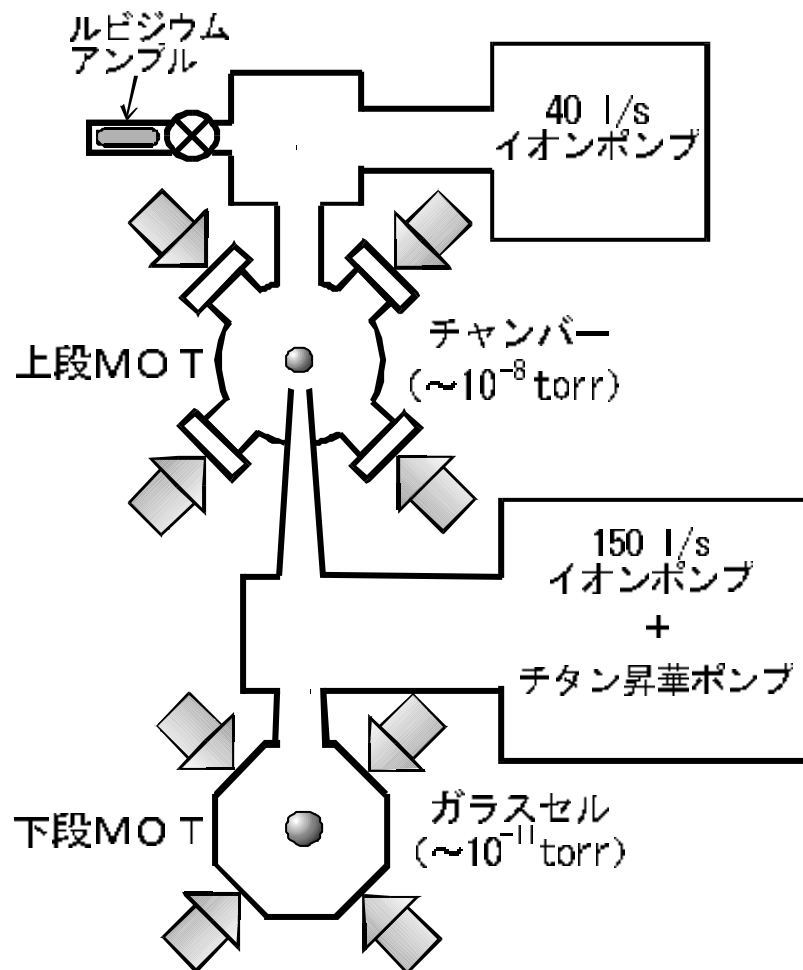
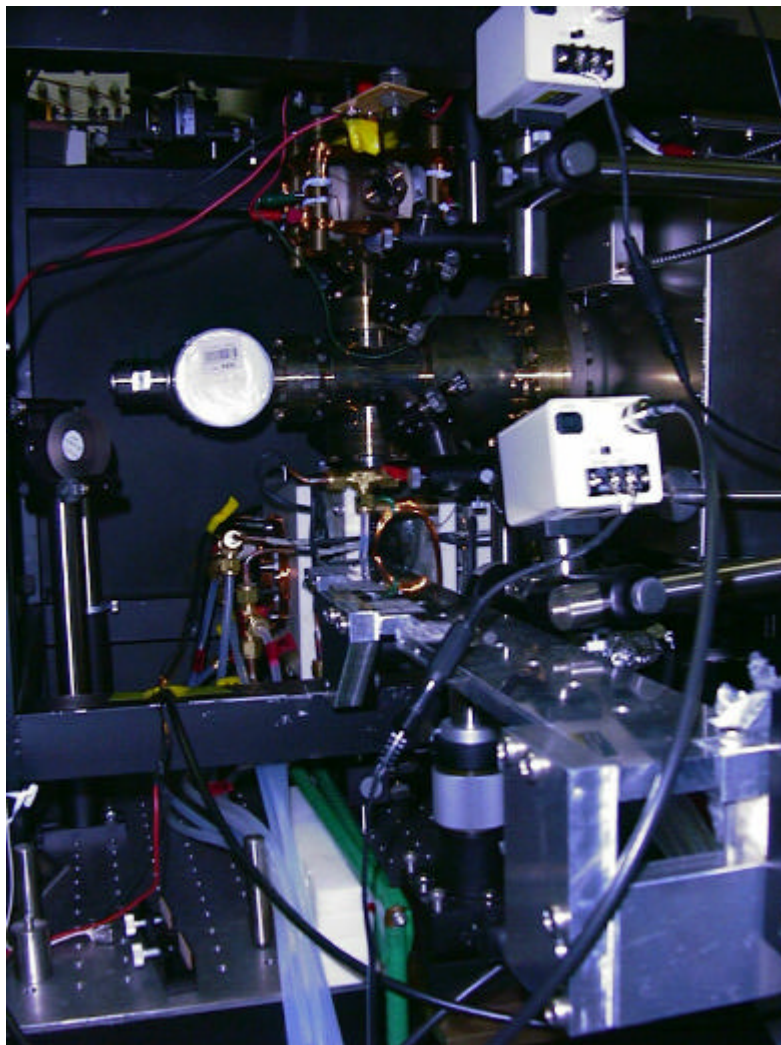
# ボース・アインシュタイン凝縮の歴史

- 1911 水銀で超伝導 (Onnes) ~ 4.2K
  - 1923 物質波の概念 (de Broglie)
  - 1924 ボース統計、ボース凝縮の理論 (Bose, Einstein)**
  - 1925 行列力学 (Heisenberg)
  - 1926 波動力学 (Schrödinger)
  - 1927 液体ヘリウムの 転移 ~ 2.17K
  - 1933 マイスナー効果 (Meissner)
  - 1937 液体ヘリウムの超流動 (Kapitza)
  - 1938 ボース凝縮による超流動の説明 (London) - 転移温度の理論値 3.13K**
  
  - 1957 BCS理論による超伝導の説明 (Bardeen, Cooper, Schrieffer, )
  - 1960 レーザーの発明 (Maiman)
  
  - 1975 レーザー冷却のアイデア (Hänsch, Shallow)
  
  - 1980 ~ レーザーによる原子線の減速 (Phillips他) ~ mK
  - 1985 レーザーによる3次元冷却 (Chu) ~ 240  $\mu$  K
  - 1988 偏向冷却 (Phillips, Cohen-Tannoudji) ~ 3  $\mu$  K
  
  - 1995 蒸発冷却、ボース凝縮実現 (Cornel, Wieman, Ketterle) ~ 100nk**
- 1997年ノーベル物理学賞
- 2001年ノーベル物理学賞

# BECへの道のり

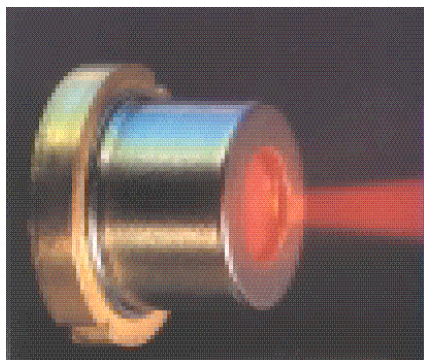


# BEC実験装置@東大駒場



# 光の粒子性

光の周波数を  $\nu$ 、波長を  $\lambda$  とすると、光は



エネルギーが  $E = h\nu = \hbar\omega$   
( $\omega \equiv 2\pi\nu$ )

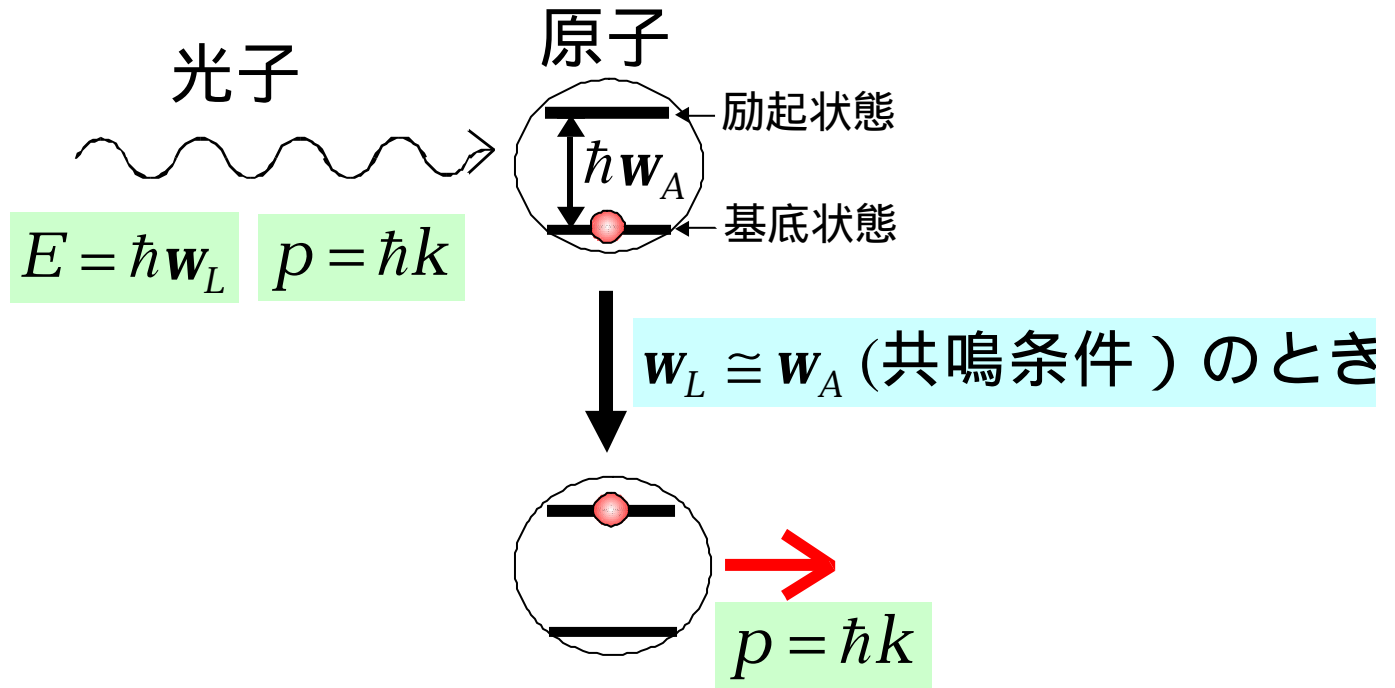
運動量が  $p = h/\lambda = \hbar k$   
( $k \equiv 2\pi/\lambda$ )

(アインシュタイン・ド・ブロイの式)

を持つ粒子のように振舞う(光の粒子性)

この光の粒を「光子」と呼ぶ

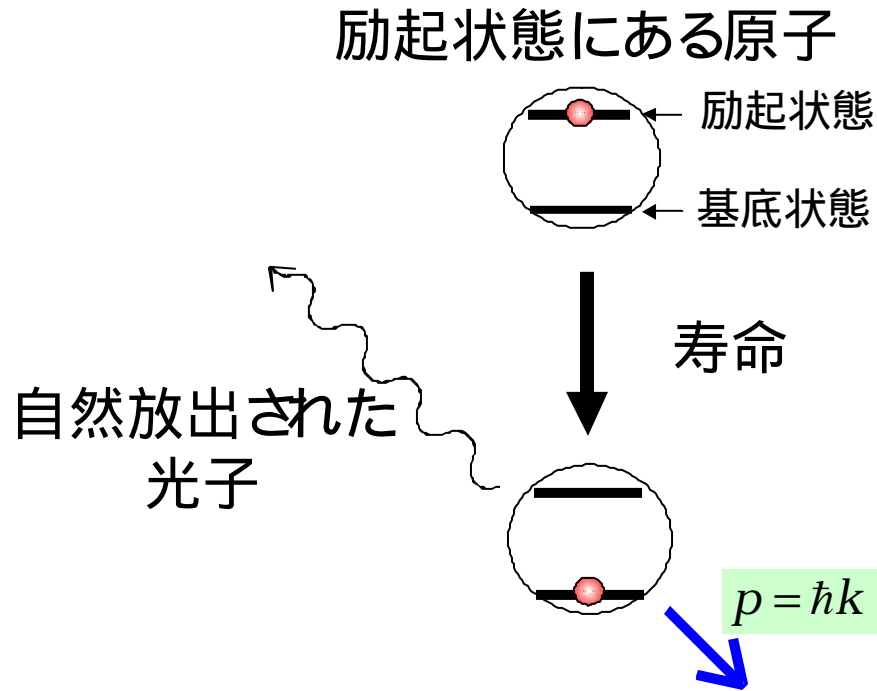
# 原子による光子の吸収



原子は励起状態になり、反跳運動量  $p = \hbar k$  を受ける

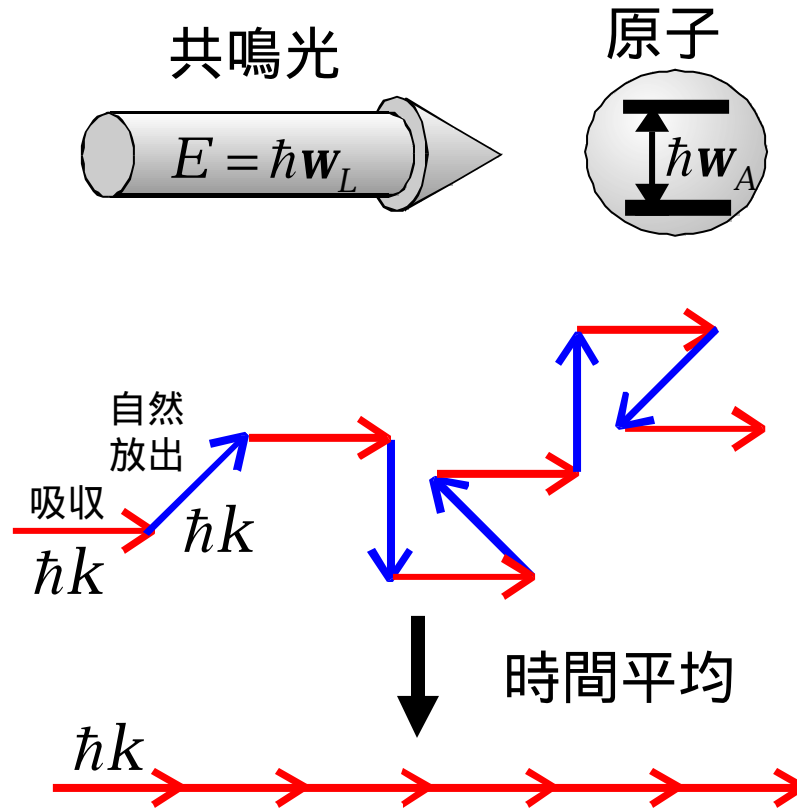


# 原子による光子の自然放出



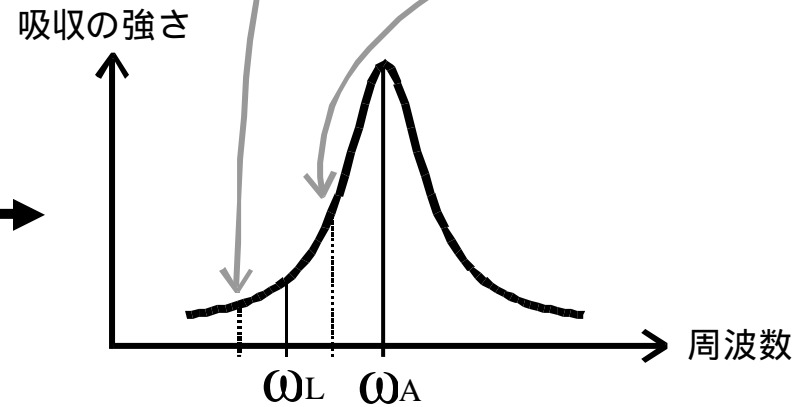
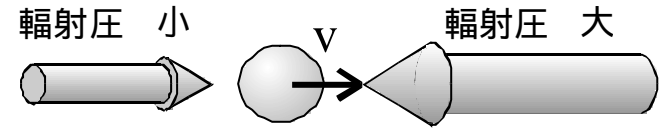
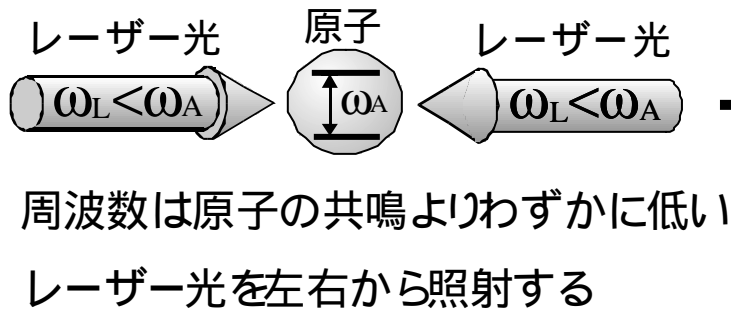
励起状態にある原子は、寿命 の後に光子を自由な方向に自然放出し、反跳運動量  $p = \hbar k$  を受ける

# 吸収と自然放出を繰り返すと



共鳴光の進行方向へ力を受ける(輻射圧)

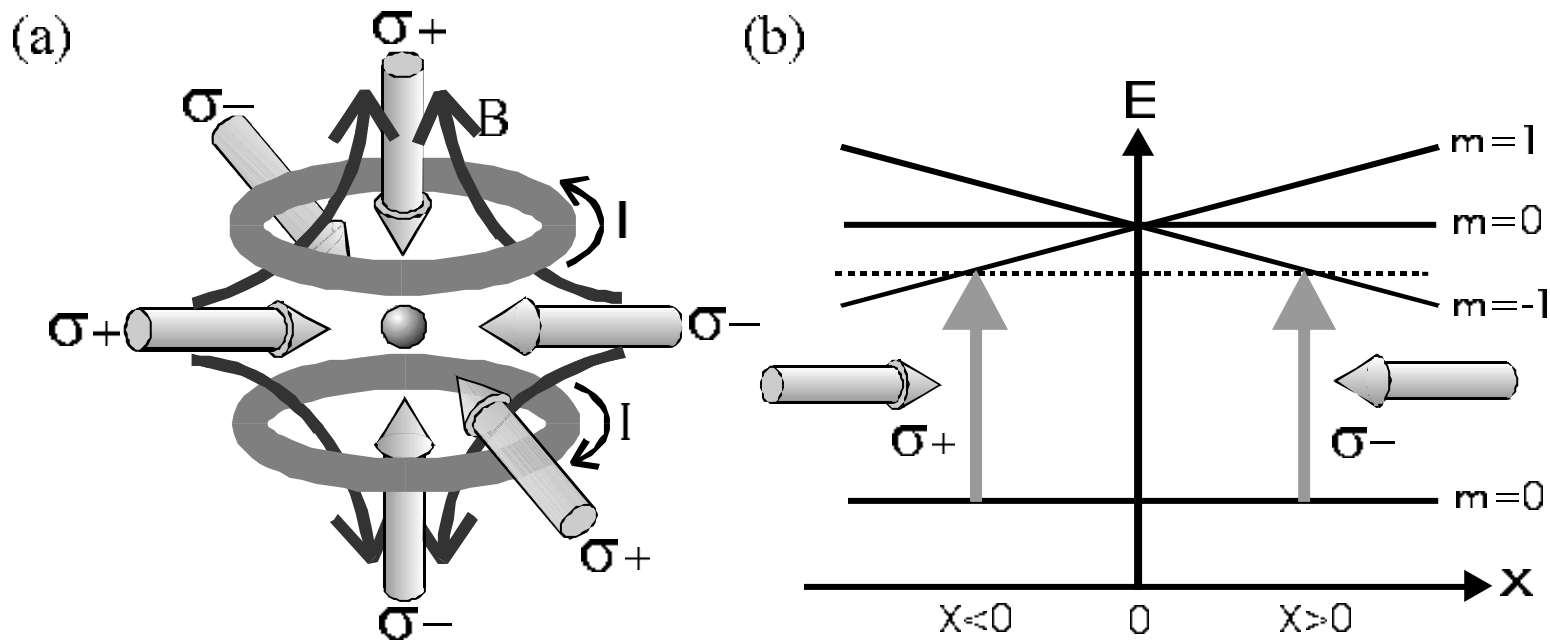
# ドップラー冷却の原理

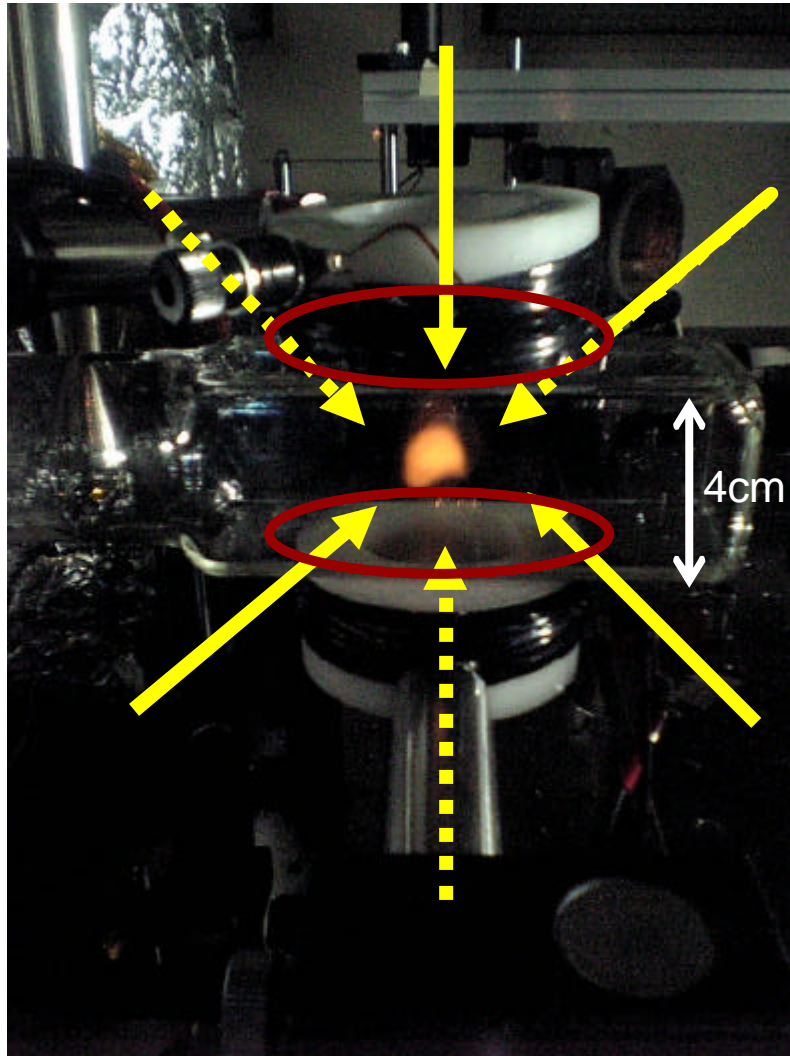
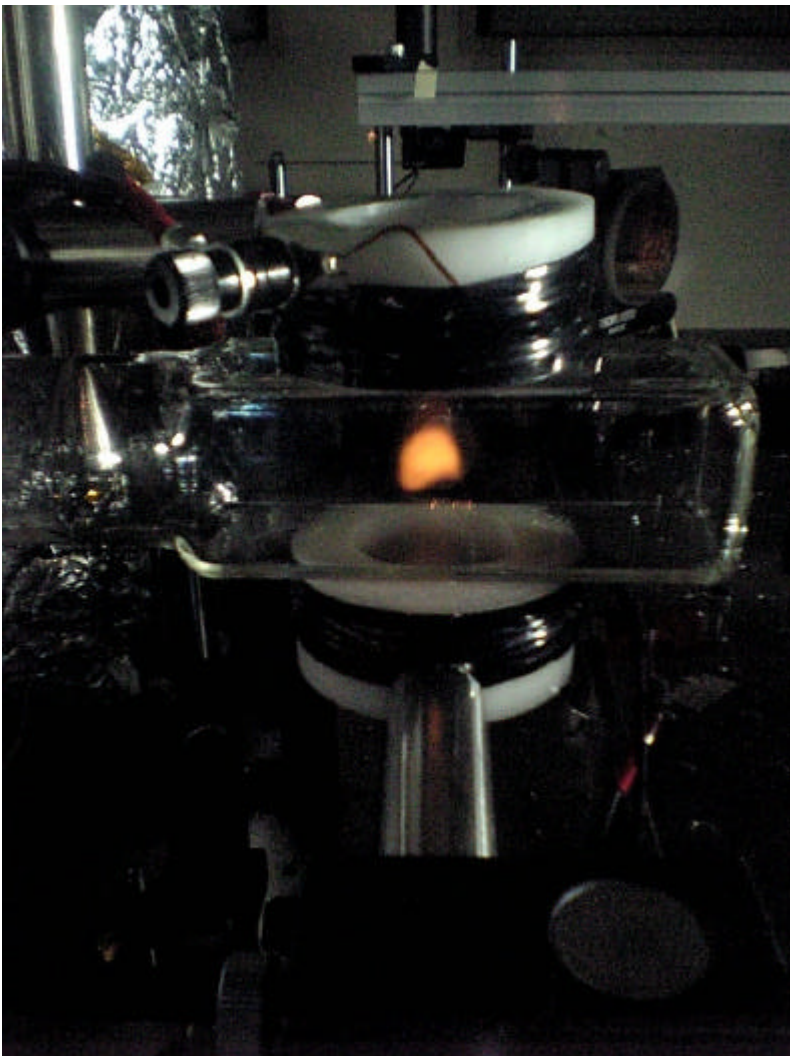


ドップラー効果によって、対向するレーザー光からの輻射圧をより強く受ける

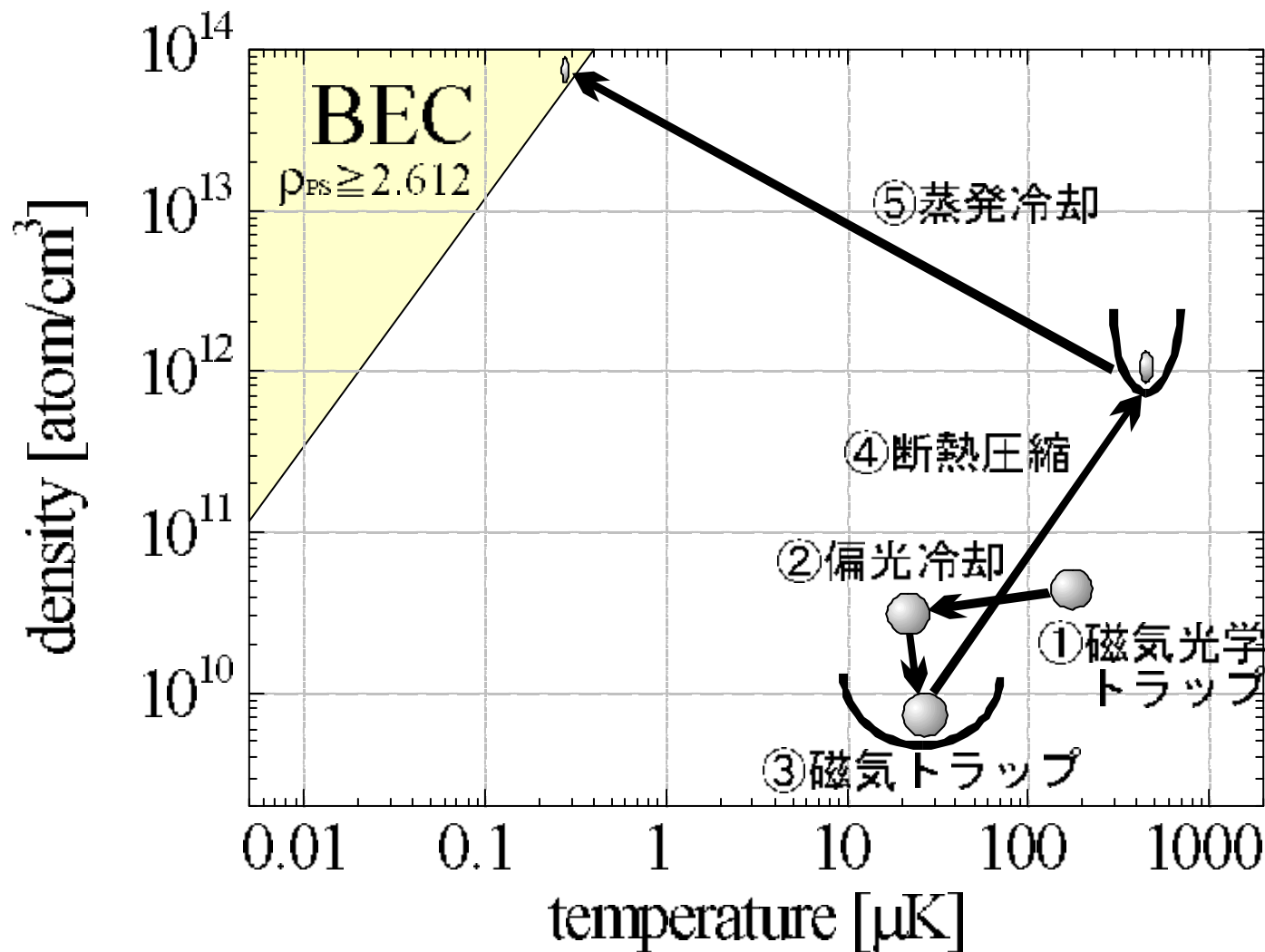
原子は減速される (ドップラー冷却)

# 磁気光学トラップの原理



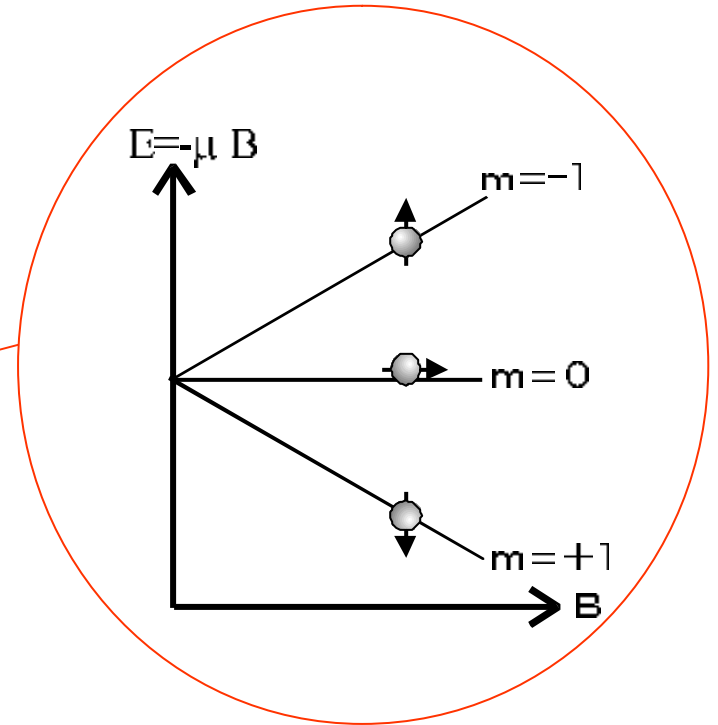
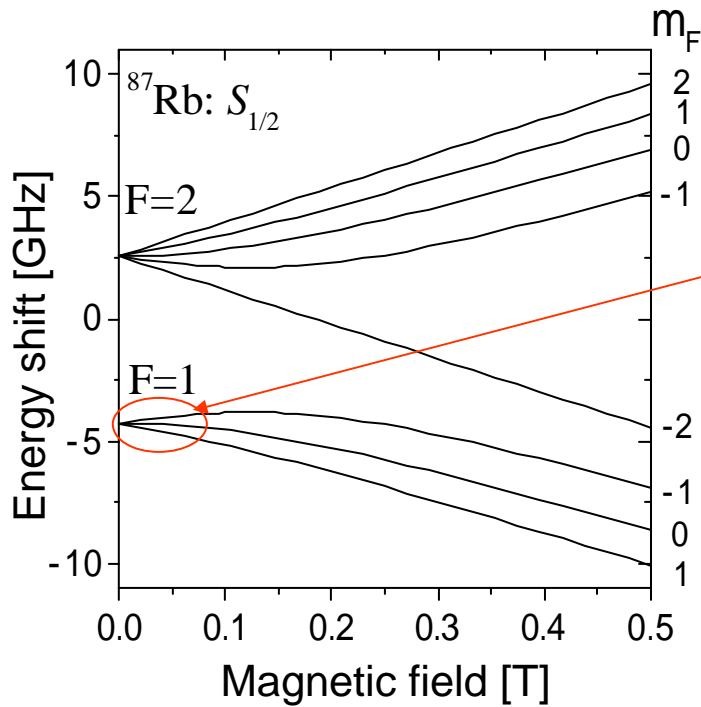


# BECへの道のり

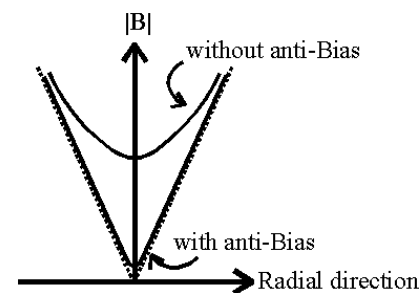
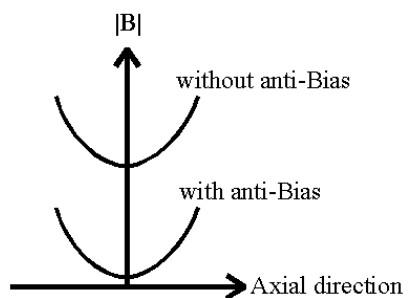
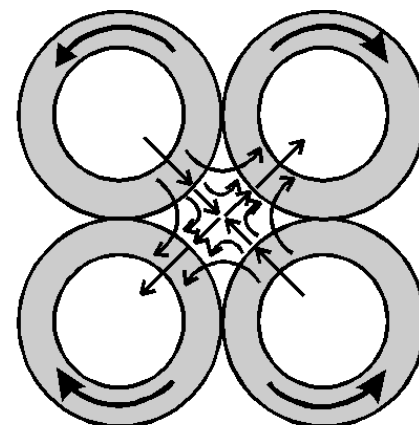
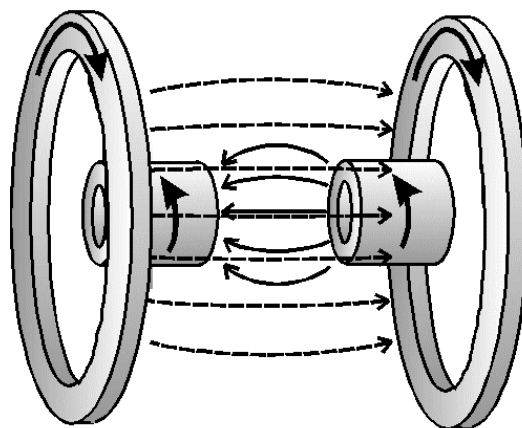
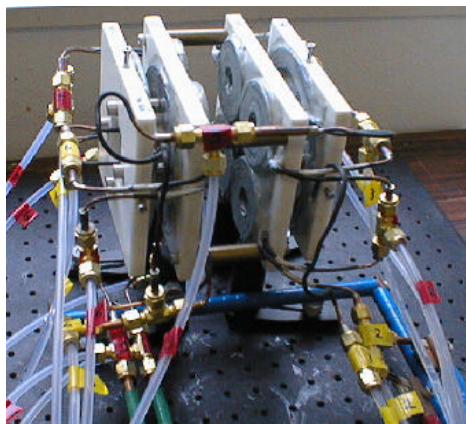


# 磁気トラップの原理

ルビジウム原子のゼーマンシフト

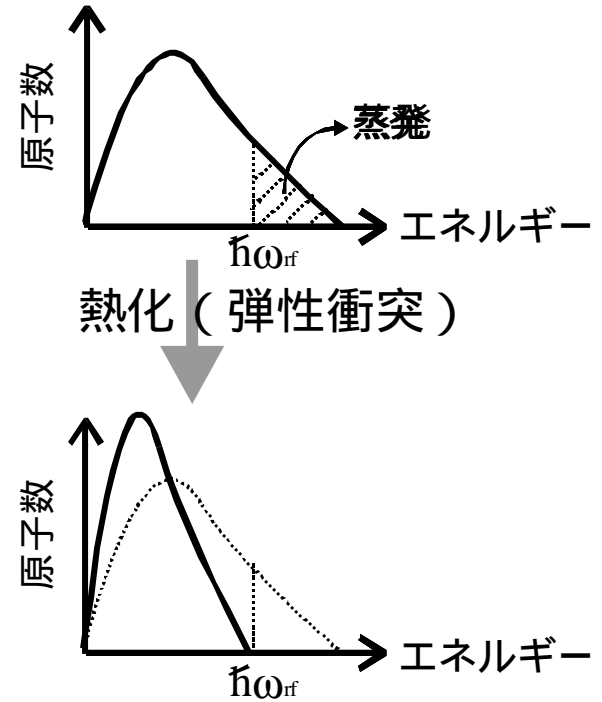
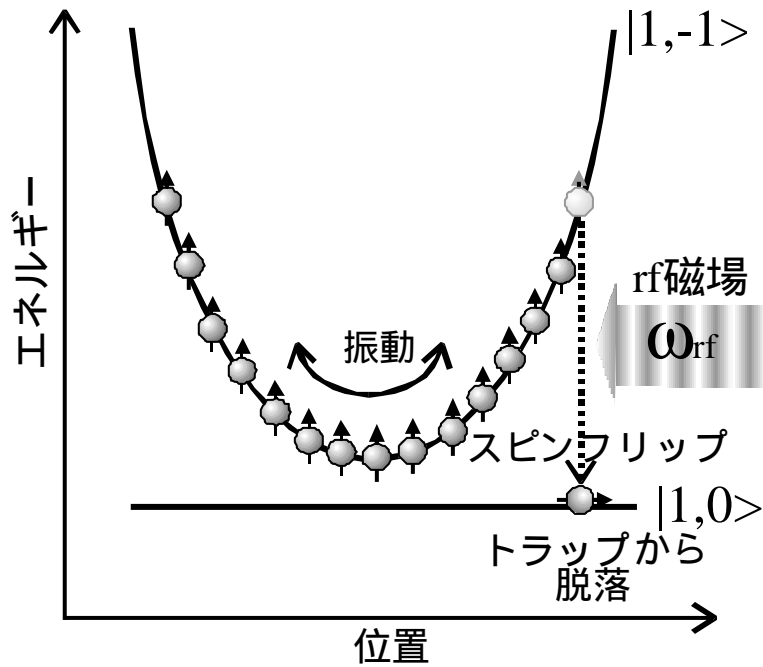


# 磁場トラップポテンシャルの作り方 (クローバーリーフコイル)

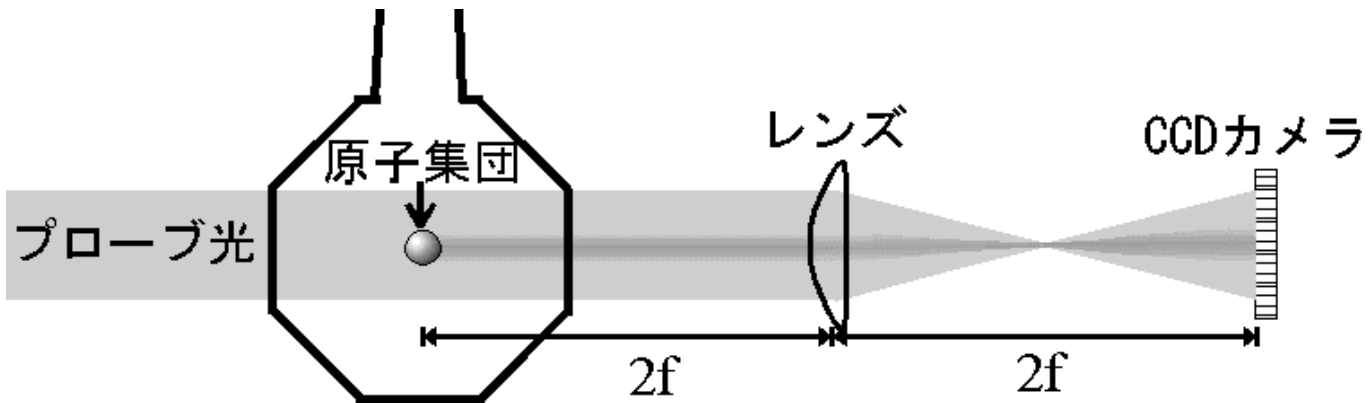




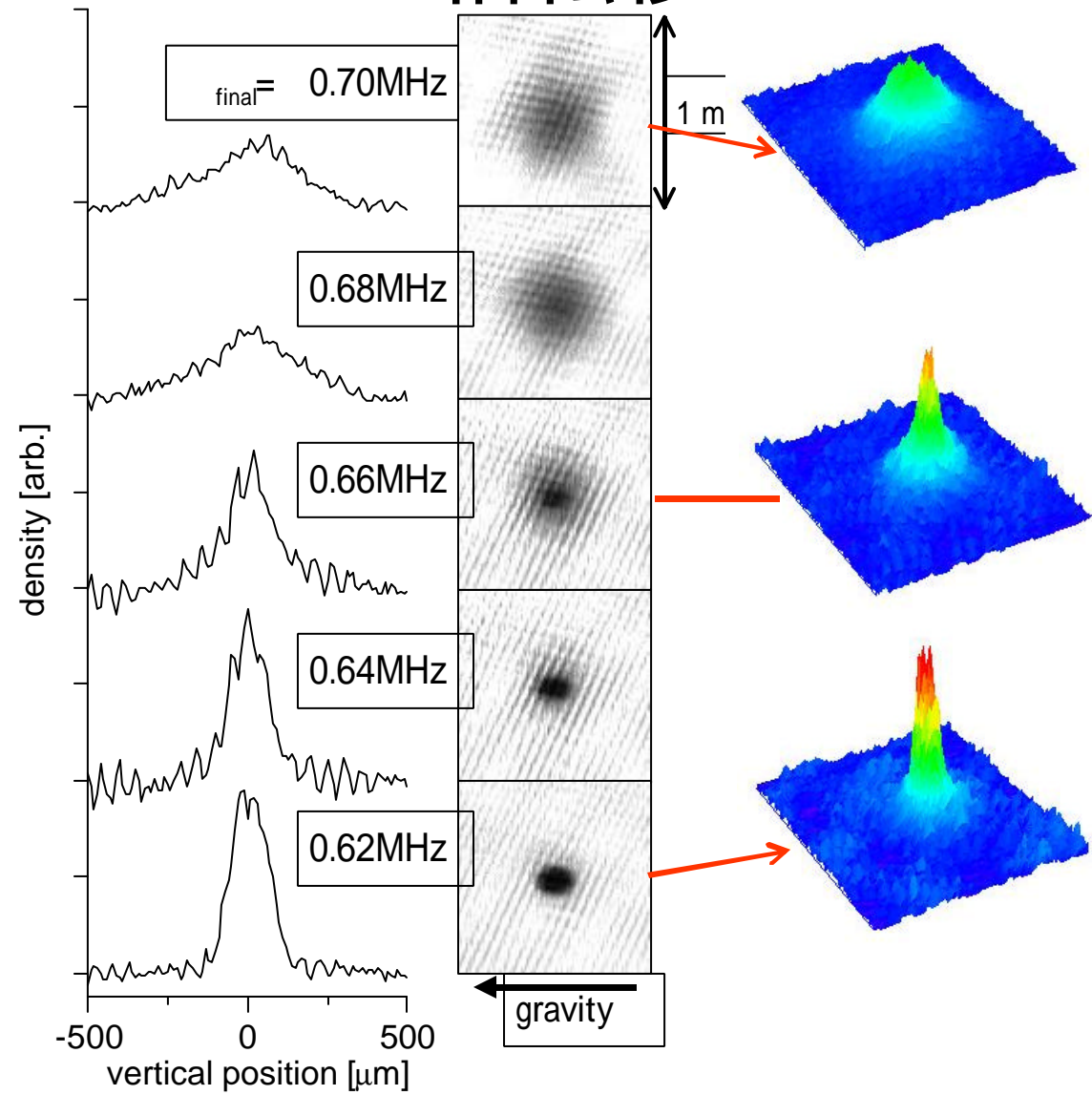
# 蒸発冷却の原理



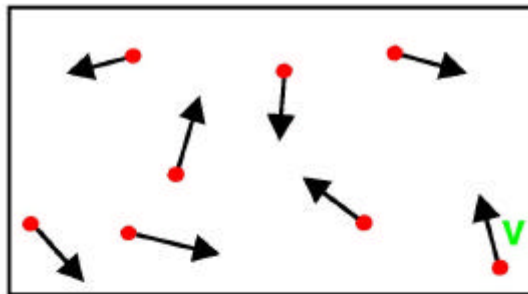
# BEC相転移の確認 (吸収イメージング法)



# BECへの相転移



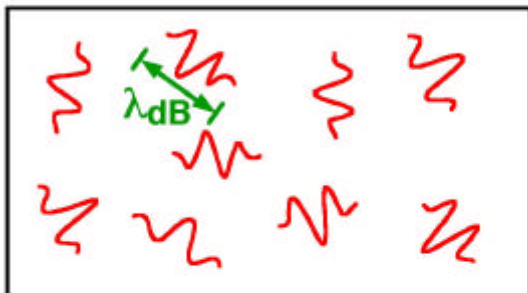
T ~ 300K



原子は粒子のように振舞う

レーザー冷却

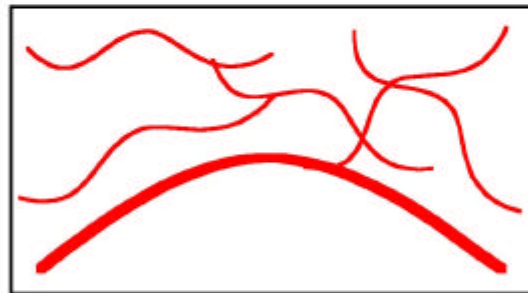
T ~ 1mK



粒子の波動性が顕著になる

蒸発冷却、レーザー冷却

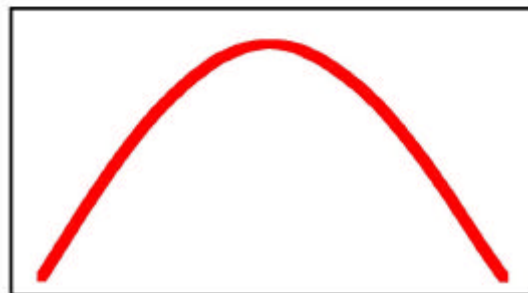
T ~ 1 $\mu$ K



波が重なり始める  
(ボース統計性が顕著になる)

蒸発冷却

T ~ 100nK



一つの巨大な波  
(ボース・アインシュタイン凝縮)

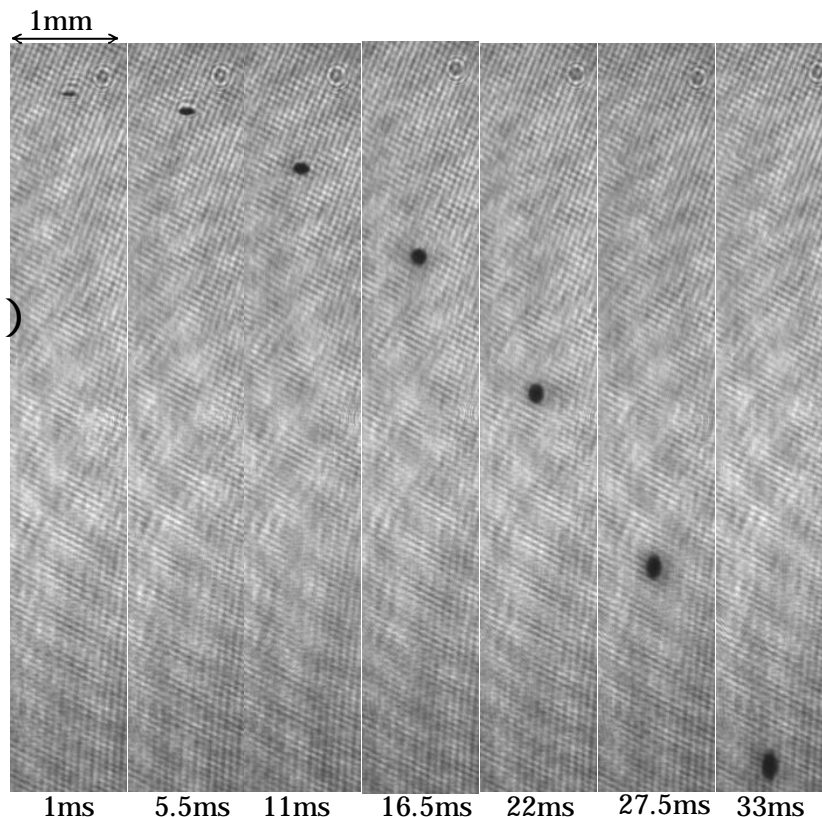
# 原子気体BECの特徴

- すべての方向の運動量幅が一光子反跳運動量以下  
(Rb原子の一光子反跳運動量 :6mm/s)
- 原子集団が空間的に局在 (10 μm ~ 100 μm)
- 空間密度が高い (~ 10<sup>14</sup> atoms/cm<sup>3</sup>)
- 単一の量子状態にすべての原子が存在  
非対角長距離秩序が存在

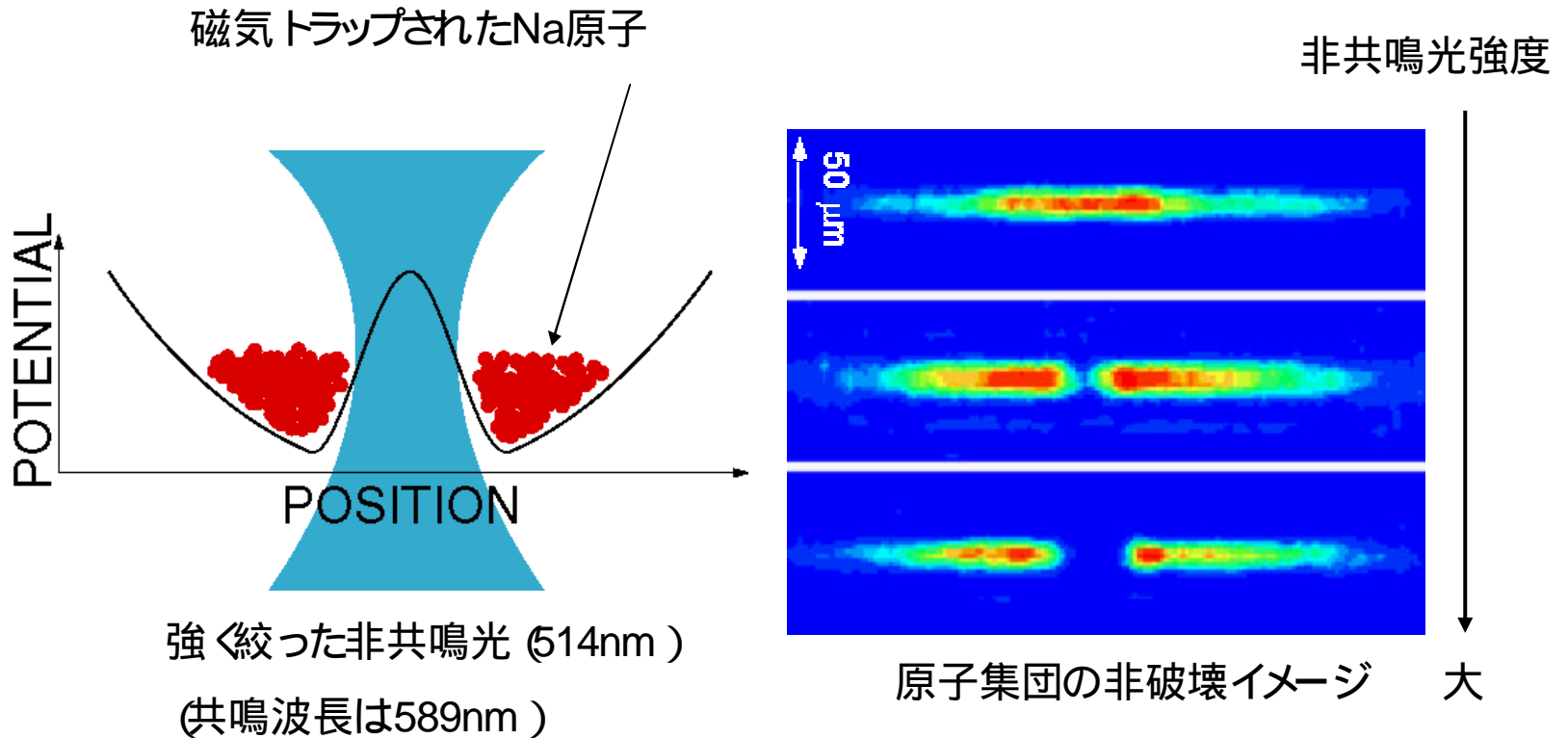
$$\langle \hat{\Psi}^+(\mathbf{r}) \hat{\Psi}(\mathbf{r}') \rangle = \Psi^*(\mathbf{r}) \Psi(\mathbf{r}')$$

$\Psi(\mathbf{r})$  :凝縮体の波動関数  
(秩序パラメータ)

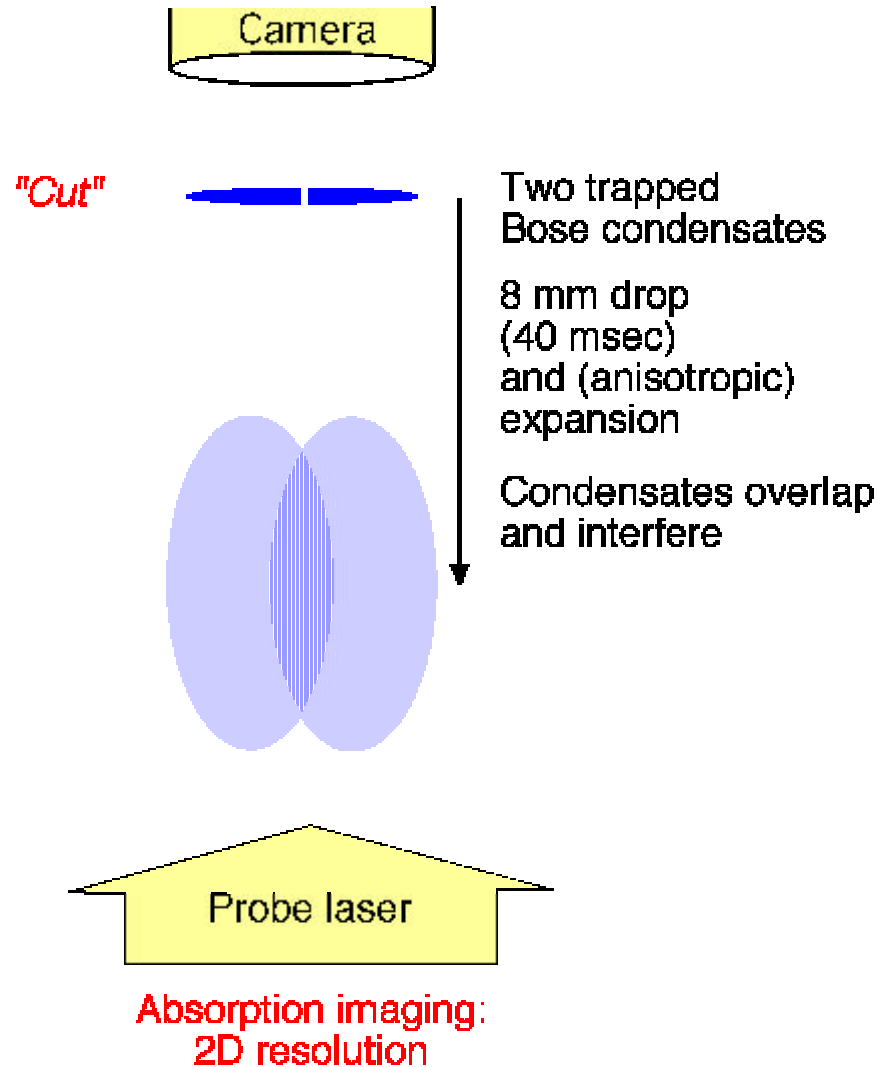
磁気トラップから開放されたBECの時間発展



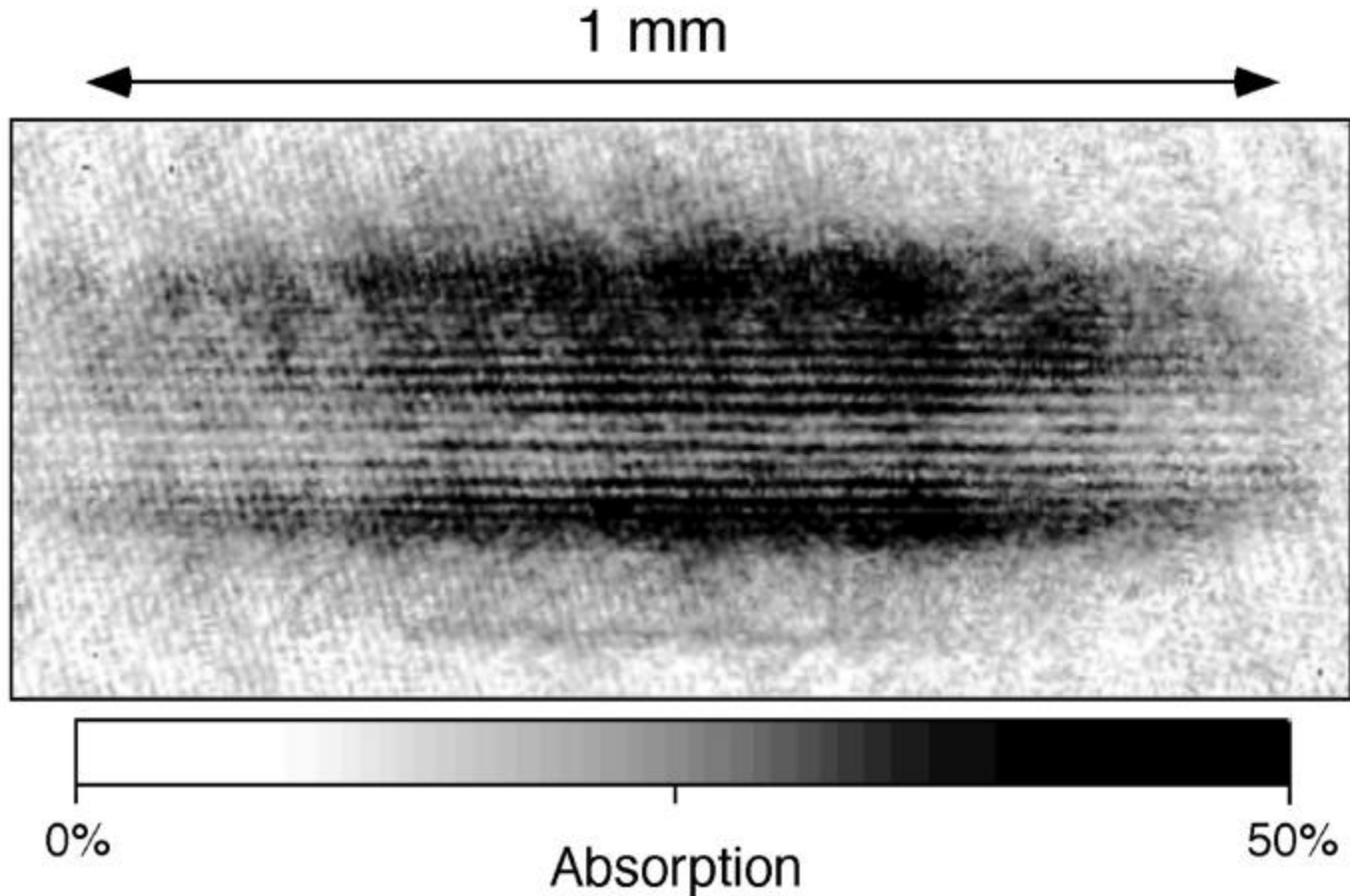
# 独立なBECの作り方



## Interference of two condensates



# 独立なBEC間の干渉



Andrews, Townsend, Miesner, Durfee, Kurn, Ketterle, *Science* **275**, 589 (1997)