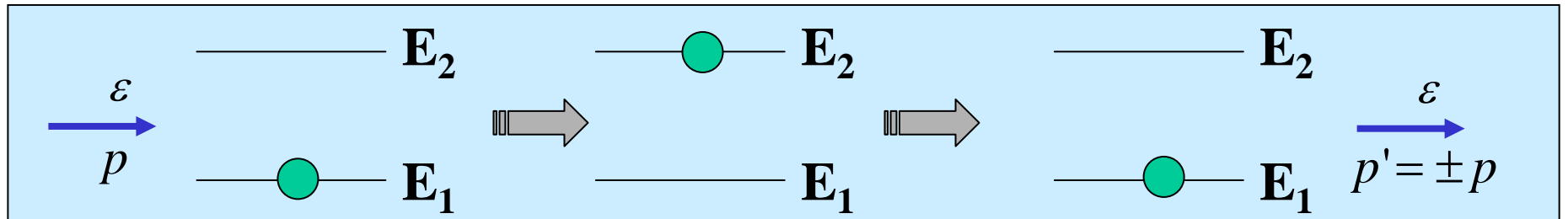


3. レーザー冷却・トラップの原理

3 - 1. 光が原子に及ぼす力: その1 - 放射圧

(i) 運動量の授受

$$\varepsilon = h\nu = \hbar\omega \quad p = h/\lambda = \hbar k$$



$$\begin{aligned}
 & \leftarrow P = MV \quad \leftarrow P' = MV' \quad \leftarrow P'' = MV'' \\
 & p + P = P' \quad P' = P'' + p'
 \end{aligned}$$

P' を消去 $\longrightarrow p + P = P'' + p'$

$$P'' - P = M(V'' - V) = M\Delta V = p - p'$$

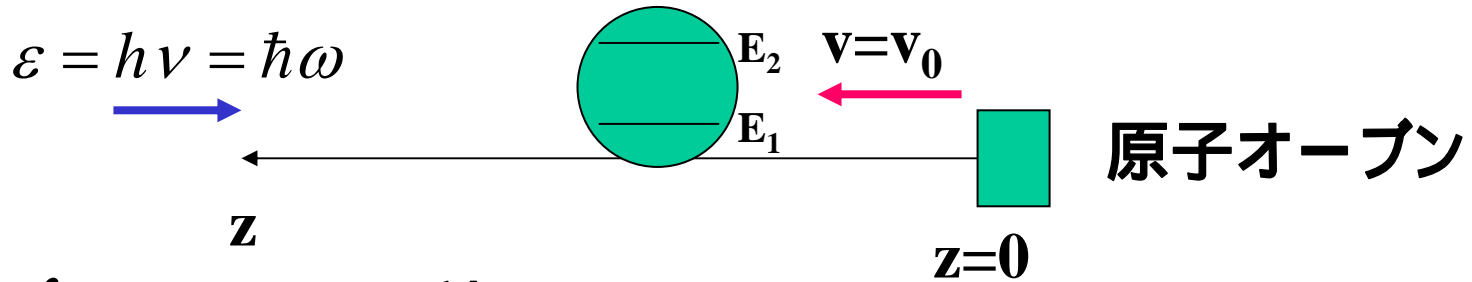
$N (>> 1)$ 回の吸収放出サイクルを繰り返すと $M\Delta V = N \times p - N \times \langle p' \rangle = N \times p$

力の表式: $F \equiv \frac{dP}{dt} = \frac{dN}{dt} \times p = q \times \hbar k \quad q \leq \frac{1}{2T_1}$

例: $^{23}\text{Na} \quad a \equiv F/M = 10^6 \text{ m/s}^2 \quad t = V_0/a = 1 \text{ msec} \quad l = V_0^2/(2a) = 0.5 \text{ m} \quad N = MV_0/(\hbar k) = 3 \times 10^4$

3. レーザー冷却・トラップの原理

(ii) Zeeman 減速法



光のドップラー(Doppler)効果:

「速度 v_0 で角周波数 ω の光源に向かっていく原子が感じる光の周波数は $\omega' = \omega(1 + \frac{v_0}{c})$ となる」

$$t=0: z(0)=0, v(0)=v_0 \longrightarrow \omega' = \omega(1 + v_0/c) = (E_e - E_g)/\hbar$$

$$t=l: z(l)=l, v(l)=0 \longrightarrow \omega' = \omega = (E_e - E_g)/\hbar$$

W. Phillips

「ドップラー効果による共鳴のシフトをZeeman効果によるエネルギーシフトで補えばいい」

$$\omega \frac{v(z)}{c} = \alpha B(z)$$

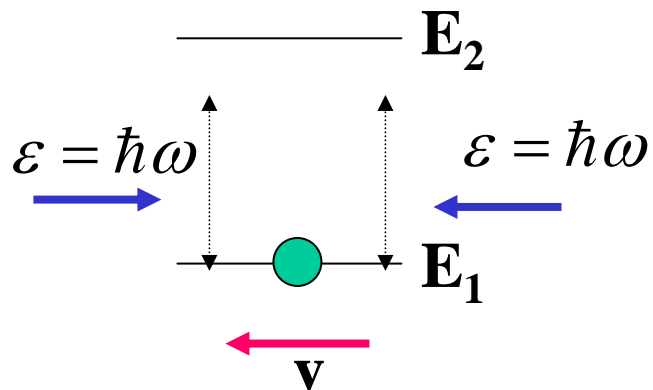
等加速度直線運動

$$2a(l-z) = v(z)^2 \quad (2al = v_0^2)$$

3. レーザー冷却・トラップの原理

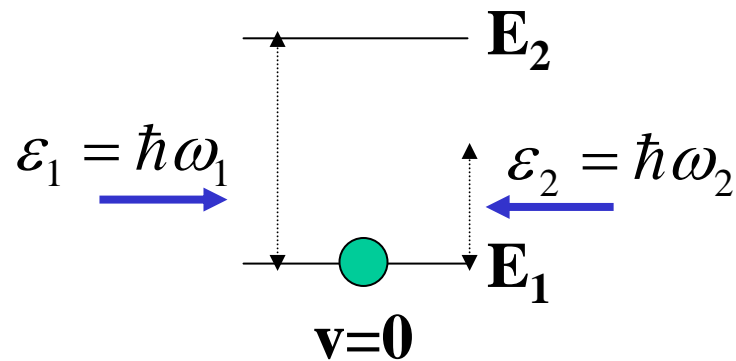
3 - 2. ドップラー冷却法

(i) 光モラセス中の2準位原子



“実験室系”

$$\varepsilon = \hbar\omega < E_2 - E_1$$



“原子の静止系”

$$\varepsilon_1 = \hbar\omega_1 = \hbar\omega\left(1 + \frac{v}{c}\right) = E_2 - E_1$$

$$\varepsilon_2 = \hbar\omega_2 = \hbar\omega\left(1 - \frac{v}{c}\right) \ll E_2 - E_1$$

ドップラー限界温度:

$$k_B T_D = \frac{\hbar}{2T_1}$$

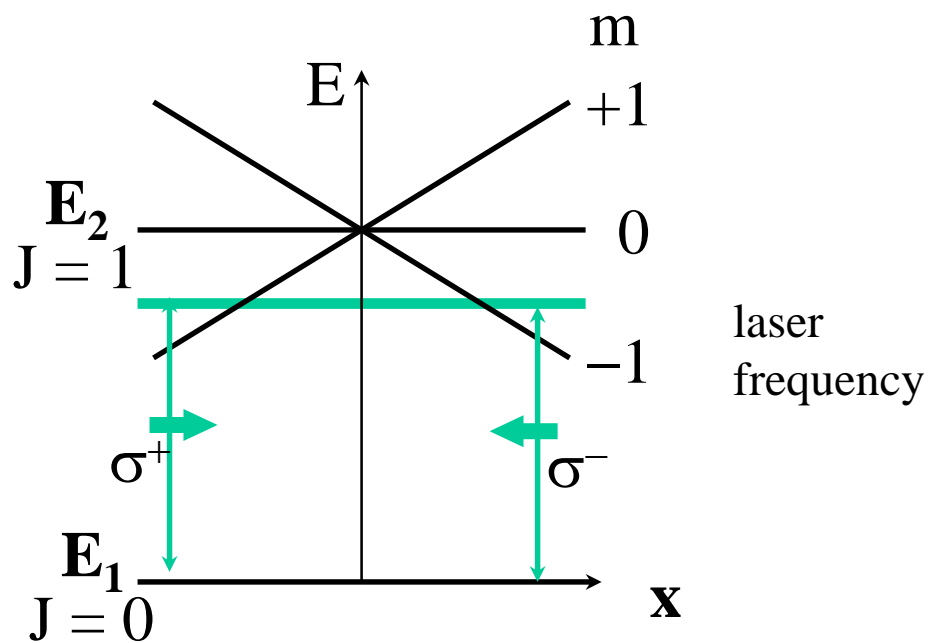
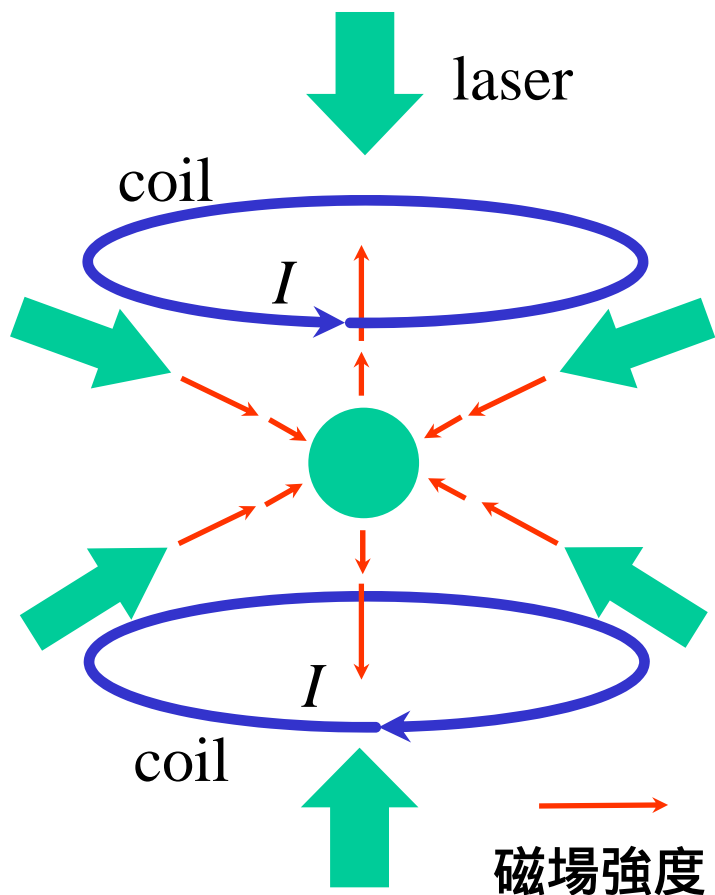
例: ^{23}Na $T_D = 240 \mu\text{K}$

3. レーザー冷却・トラップの原理

(ii) 磁気光学トラップ (Magneto-Optical Trap: MOT)

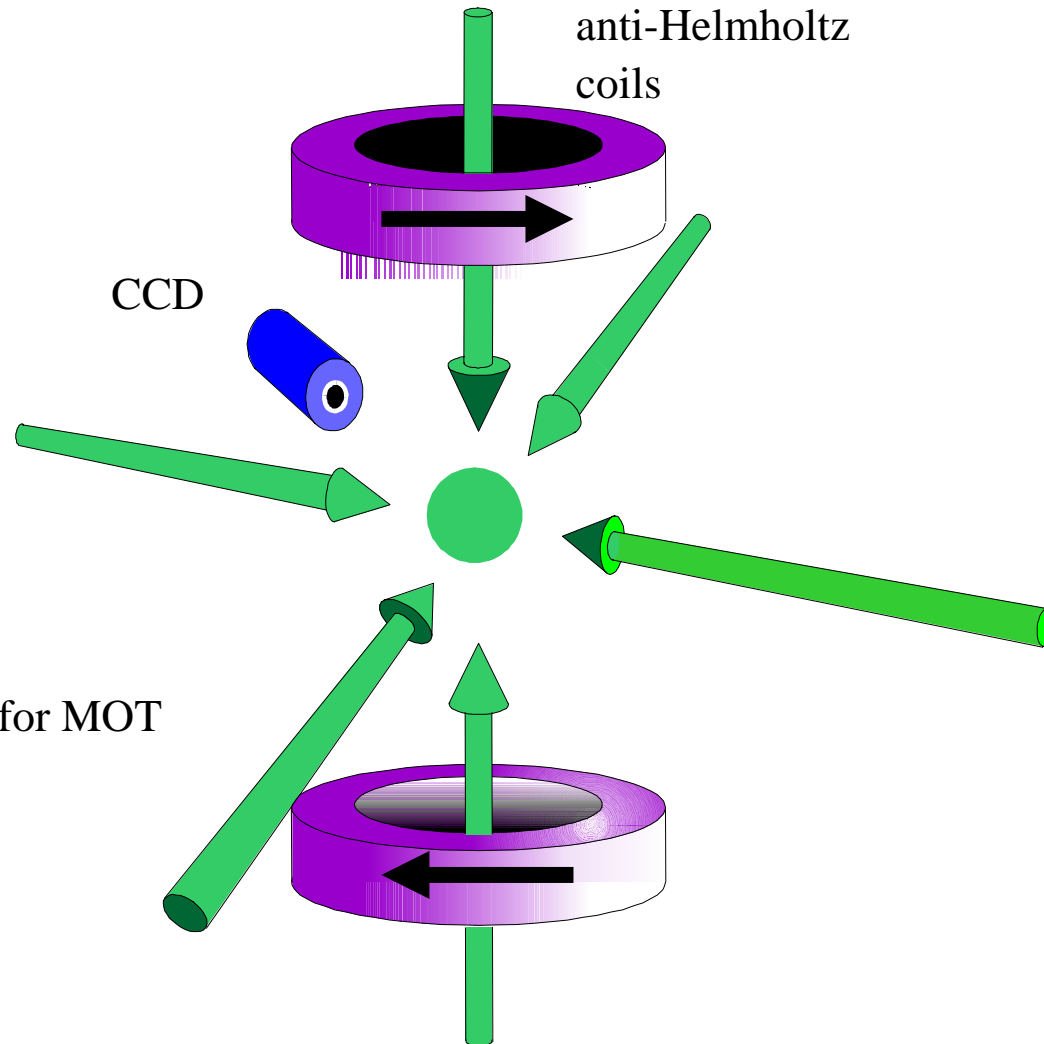
3次元的な不均一(=空間的に変化する)磁場によるゼーマン効果を利用

→ 空間のある領域に閉じ込める (=トラップ) することが可能



Magneto Optical Trap (MOT)

原子のMOT



原子数 = 10^8

温度

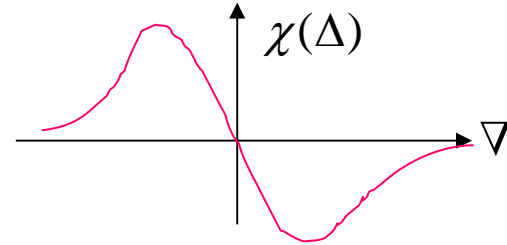
$T = 12 \mu\text{K}$

3 . レーザー冷却・トラップの原理

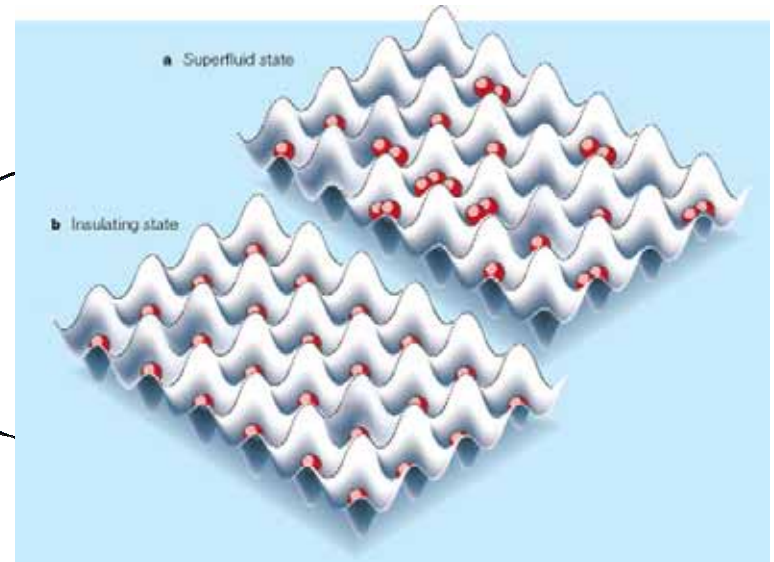
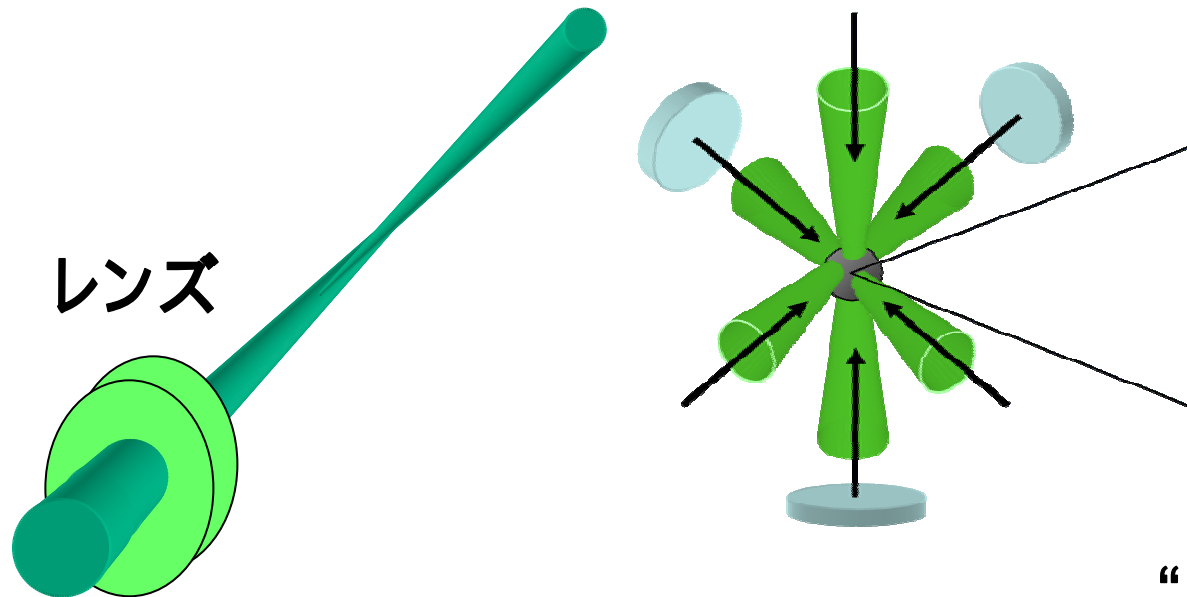
3 - 3 . 光が原子に及ぼす力: その2 - 双極子力

光双極子相互作用: $V_{\text{int}} = -p \times E$ $p = \chi E$: 光誘起電気双極子モーメント

$$U_{\text{pot}}(r) = \int_0^E dV_{\text{int}} = -\int_0^E p dE = -\frac{\chi E(r)^2}{2}$$

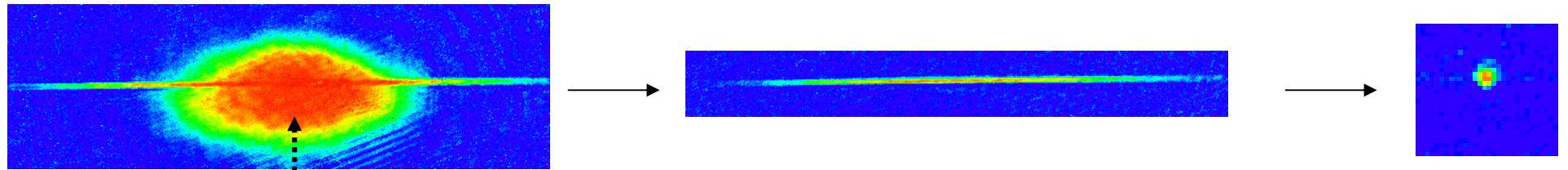


→ 強度が空間的に極大または極小を持つようなレーザービームを用いることで、トラップすることが可能

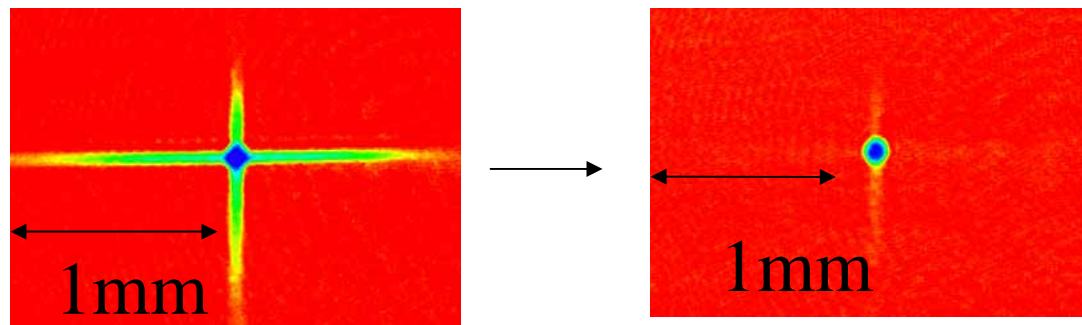
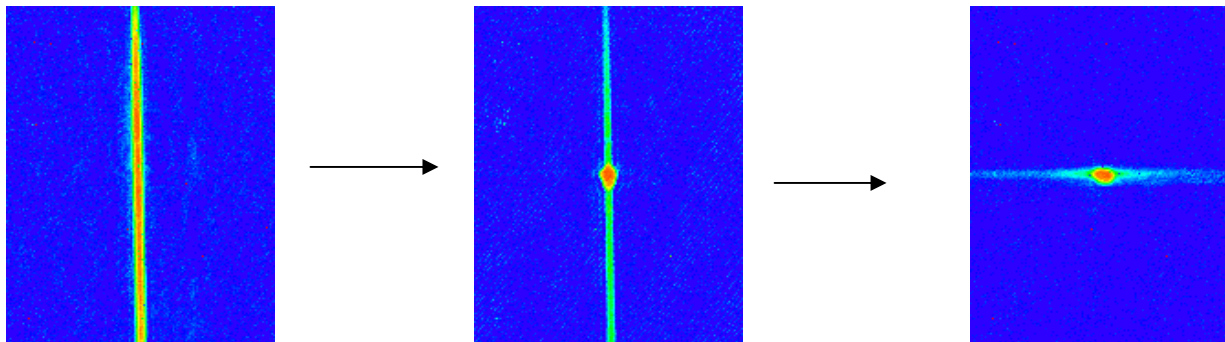


“光格子”

Gallery of Optical Trap



MOT



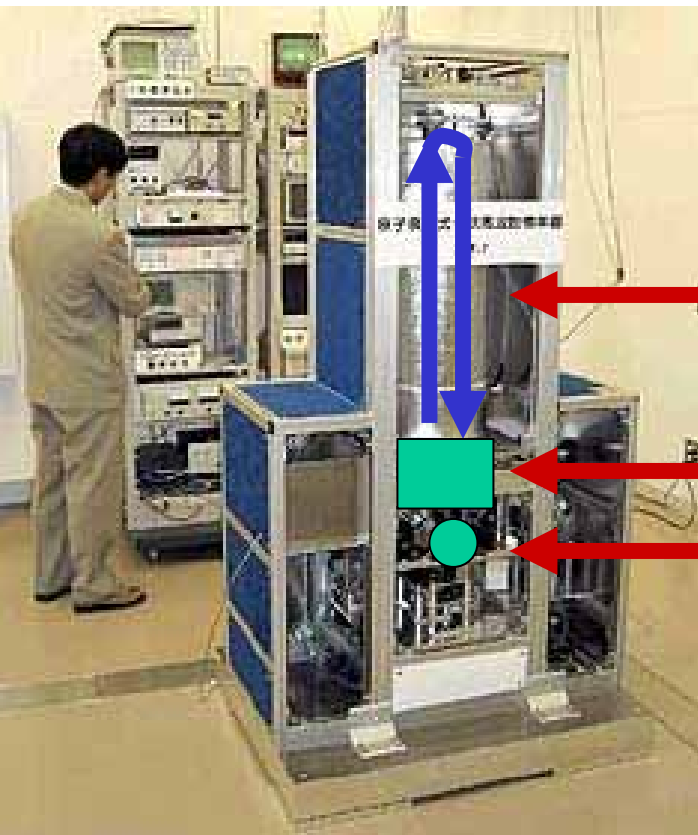
3. レーザー冷却・トラップの原理

3 - 4. レーザー冷却原子の応用

原子光学、ボース・アインシュタイン凝縮、量子光学実験、超精密測定
原子時計 (**原子泉方式のCs原子時計**)、量子計算、量子情報通信、など

1秒の定義: 「セシウム133原子(^{133}Cs)の基底状態の2つの超微細準位間の遷移に対応する放射の9192631770周期の継続時間」

1mの定義: 「光が真空中で1/299792458(s) の間に進む距離」
光速 $c=299,792,458 \text{ m/s}$ 「憎くなく二人で寄ればいつもハッピー」



原子の打ち上げと
自由落下

$$\Delta\omega \sim \frac{1}{T} \quad T: \text{観測時間}$$

$$\text{自由落下: } T = 2 \frac{v_0}{g}$$

マイクロ波共振器

レーザー冷却

$$v_0 = 5 \text{ m/s} \rightarrow T = 1 \text{ s}, L = \frac{v_0^2}{2g} = 1.3 \text{ m}$$

2千万年に1秒の誤差
($< 10^{-14}$)