Atomok hűtése és csapdázása lézerrel

Demeter Gábor

MTA RMKI Plazmafizikai Főosztály

Vázlat

Rövid történelem

- Maxwell: az el. mágn. sug. impulzust hordoz, ki is mutatták (1933)
- Lézer, intenzív monokromatikus sugárzás, atomi átmenetekkel rezonáns
- 1970-es években előkerült lézerfény „ereje”
- 80-as 90-es évek óriási fejlődés
- Doppler hűtés, szub-Doppler hűtés, MOT, atom optika
- Chu, Cohen-Tannoudji, Phillips - 1997 Nobel díj
- Lézeres hűtés technikákat rutinszerűen alkalmaznak mindenféle atomfizikai kísérletben - atomnyalábok lassítása, atomfelhők lehűtése, csapdázása, kvantum-informatikai, nanotechnológiai alkalmazások, frekvenciastandard
- Bose-Einstein kondenzáció alkáli atomok gőzeiben - Cornell, Ketterle, Wieman - 2001 Nobel díj

Egyenletek:

Hamilton op. a TKP. mozgásával: $\hat{\mathrm{H}} = \frac{\hat{p}^2}{2M} + \sum \hbar\omega_i |i\rangle\langle i| - \hat{\mathbf{d}}\mathbf{E}$

TKP. impulzusváltozás $\frac{d}{dt}\hat{p} = \frac{i}{\hbar}[\hat{H}, \hat{p}] = \nabla(\hat{\mathbf{d}}\mathbf{E})$

Klasszikus erő (Ehrenfest tétel): $F = \langle\nabla(\hat{\mathbf{d}}\mathbf{E})\rangle$

Ha most $\Delta x \ll \lambda$ ($\Rightarrow \Delta p \gg \hbar k$) akkor $F = \nabla\langle\hat{\mathbf{d}}\mathbf{E}\rangle = \langle\hat{\mathbf{d}}\mathbf{e}\rangle\nabla E$

$\langle\hat{\mathbf{d}}\mathbf{e}\rangle = Tr(\hat{\varrho} \cdot \hat{\mathbf{d}}\mathbf{e})$

Ez még nem $F(R, v, t)$!

$\hat{\mathbf{d}}\mathbf{e}$-t az optikai Bloch egyenletek megoldása adja.

Legegyszerűbb eset: kétállapotú atom. Optikai Bloch egy. a sűrűségoperátor mátrixelemeire ($\sigma_{eg} = \varrho_{eg} \cdot e^{i\omega t}$, $\delta = \omega - \omega_0$, $\hbar\Omega = Ed_{eg}$):

$$\dot{\varrho}_{gg} = -\dot{\varrho}_{ee} = i\frac{\Omega}{2}(\sigma_{eg} - \sigma_{ge}) + \gamma\varrho_{ee}$$
$$\dot{\sigma}_{eg} = i\delta\sigma_{eg} - i\frac{\Omega}{2}(\varrho_{ee} - \varrho_{gg}) - \frac{\gamma}{2}\sigma_{eg}$$

Ha ezt megoldjuk: $\langle \hat{\mathbf{d}}\mathbf{e} \rangle = d_{eg}(\sigma_{eg} \cdot e^{-i\omega t} + \sigma_{ge} \cdot e^{i\omega t})$

Monokromatikus tér: $E(z,t) = \frac{1}{2}[E(z) \cdot e^{i(\phi(z) - \omega t)} + c.c]$

$\Rightarrow$ Az atomra ható erő:

$$F = \frac{1}{2}\nabla\Omega(\sigma_{ge} + \sigma_{eg}) - \frac{i}{2}\Omega\nabla\phi(\sigma_{ge} - \sigma_{eg})$$

Hogy lesz ebből $F(R, v, t)$? $t > \gamma^{-1}$-re stacionárius megoldás $\rightarrow$ „Álló” (Lassan mozgó $v \cdot \gamma^{-1} \ll \lambda$) atomra erő $F(R)$ kapható. $F(R, v)$ perturbációszámítással...

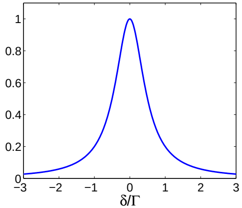
Sugárzási nyomás (Scattering force / Spontaneous force / Light-pressure)

$$\text{síkhullám:}\quad E(z,t) = \frac{1}{2}[E_0 \cdot e^{i(kz-\omega t)} + c.c] \Rightarrow \nabla\Omega = 0, \nabla\phi = k$$

$$F_{spont} = \hbar k \gamma \frac{\Omega^2}{4\delta^2 + \gamma^2 + 2\Omega^2}$$

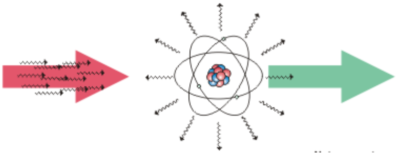
$$\text{Ha}\quad \Omega \ll \gamma \quad \Rightarrow \quad F = \hbar k \frac{\gamma\Omega^2}{\gamma^2 + 4\delta^2}$$

Abszorpciós vonalalak



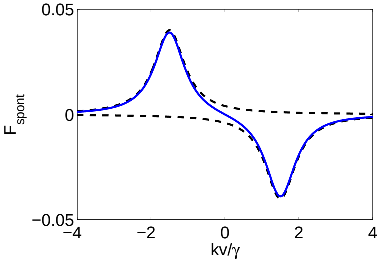
$$\text{Ha}\quad \Omega \gg \gamma, \delta \quad \Rightarrow \quad F = \hbar k \gamma / 2$$

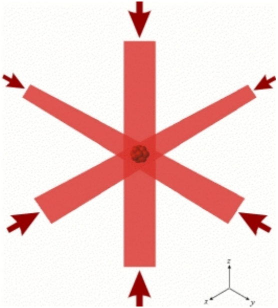
$$\text{rezonáns szórás:}\quad a = 10^4 - 10^5 \times g!$$



Mi van, ha mozog az atom? Doppler eltolódás: $\delta' = \delta - k \cdot v$

Két gyenge, szembenhaladó hullám, $\pm k, \delta < 0$ $\Rightarrow$ optikai melasz





F_{spont} disszipatív, $\delta < 0$ esetén hűt, $\delta > 0$ esetén fűt.
Nem helyfüggő, csapdázásra nem használható.

Dipólerő:

$$\text{állóhullám:}\quad E(z,t) = \frac{1}{2}E_0\cos(kz)[e^{-i\omega t} + c.c.]$$

$$\Rightarrow \nabla\Omega = -\Omega_0 k\sin(kz), \nabla\phi = 0$$

$$\text{Álló atomra:}\qquad F_{dip} = -\delta\hbar\frac{\nabla(\Omega^2)}{4\delta^2+\gamma^2+2\Omega^2}$$

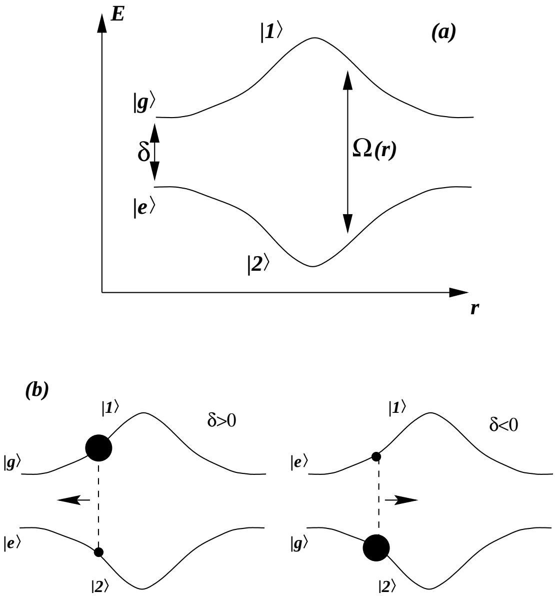
$$F_{dip} = -\nabla U_{dip}\ \text{ ahol }\ U_{dip} = \frac{\hbar\delta}{2}\ln(4\delta^2+\gamma^2+2\Omega^2)$$

Hogyan értelmezhető?

- Szinteltolódás (A.C. Stark shift, light-shift)

$$\Delta E = \sqrt{\Omega^2 + \delta^2}$$

- Felöltözött állapotok
- Ha $\delta < 0$, duzzadóhely felé húz
- Ha $\delta > 0$, csomópont felé húz
- Ha $\delta = 0$, $F_{dip} = 0$
- Nincs max. értéke mint a sugárzási nyomásnak

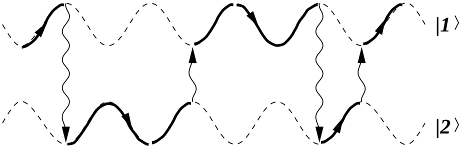


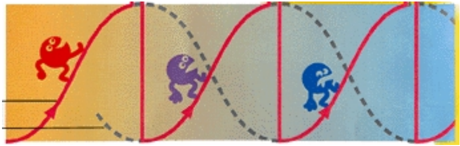
Lassan mozgó atomra ható dipólerő:

- $\delta < 0$ esetén fűt, $\delta > 0$ esetén hűt
- spont. em. - átmenet a felöltözött állapotok között.

$$|1\rangle \longleftrightarrow |2\rangle$$

- Átmeneti valószínűség helyfüggő, mert $|e\rangle$ tartalom helyfüggő.
- Sziszifusz mechanizmus





Hőmérséklet

Megjegyzések:

- Ált. nincs termikus egyensúly, a sebességeloszlás nem Maxwell-Boltzmann.
- Ált. egyszerűen $\frac{1}{2}k_B T = \langle E_{kin}\rangle$-el definiáljuk a hőmérsékletet.
- Sokszor 1D-ban hűtünk, külön „transzverzális” illetve „longitudinális” hőmérséklet.

Doppler hűtés:

- Kis v-re $F = -\beta v$ súrlódási erő
- spont. em. véletlenszerű visszalökődés, $D = 2(\hbar k)^2 \cdot \frac{1}{\Delta t}$ diffúziós állandó
- random walk model (Brown mozgás) : $k_B T_D = D/\beta$
- $\delta = -\gamma/2$ esetén $k_B T_D = \hbar\gamma/2$

Termikus sebesség:

$T \approx 10^2 - 10^3\mathrm{K}$
$v_{therm} \approx 10^2 - 10^3\mathrm{m/s}$

$k \cdot v_c = \gamma$
Velocity capture range

$T_c \approx 10^{-2} - 10^{-1}\mathrm{K}$
$v_c \approx 1\mathrm{m/s}$

Doppler:
$k_B \cdot T_D = \frac{\hbar\gamma}{2}$

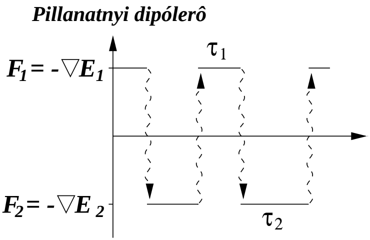
$T_D \approx 10^{-4}\mathrm{K}$
$v_D \approx 30\mathrm{cm/s}$

visszalökődési (recoil)
$k_B \cdot T_r = \frac{\hbar^2 k^2}{M}$

$T_r \approx 10^{-7} - 10^{-6}\mathrm{K}$
$v_r \approx 1\mathrm{cm/s}$

$$\varepsilon = \frac{\omega_r}{\Gamma} \approx 10^{-3} \rightarrow T_r = 4\varepsilon T_D = 4\varepsilon^2 T_c$$

Dipólerő:



- A dipólerő „korlátlanul” nagy lehet.
- De a fluktuációk is:

$$D = \frac{\hbar^2}{2\gamma}\left(\frac{\Omega^2}{\Omega^2 + 2\delta^2}\right)^3 (\nabla\Omega)^2$$

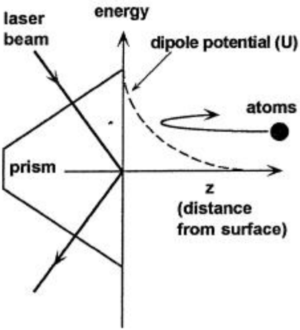
- Hűteni nem jó.

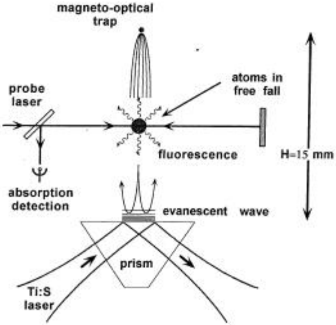
Erősen elhangolt (far detuned) tér $\delta \gg \Omega$:

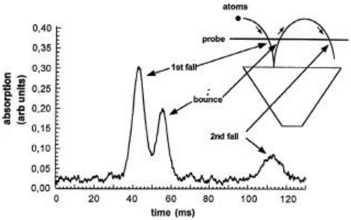
$$F_{dip} = -\frac{\hbar}{4\delta}\nabla(\Omega^2), \qquad U_{dip} = -\frac{\hbar}{4\delta}\Omega^2$$

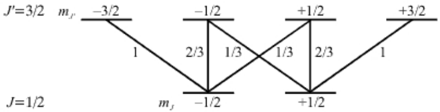
- Nincs hűtés de csapdának jó.
- Gyakorlatilag alapállapotban van az atom, nincs spontán emisszió ($\varrho_{ee} \sim \Omega/\delta$)

- Erősen elhangolt evaneszcens hullám - atomtükör

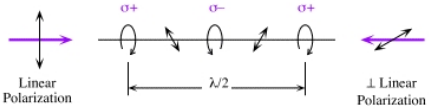


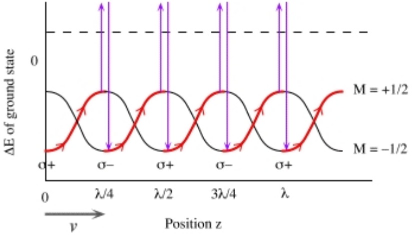


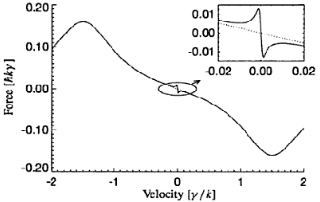




- „Többszintes atom” itt: $|g, m\rangle, \;\; |e, m'\rangle$
- Különböző alnívók között és különböző polarizációk esetén más Ω
- Stac. állapot kialakulása: optikai pumpálás $\tau_{pump} \gg \gamma^{-1}$ lehet
- Ha a polarizáció helyfüggő $\Rightarrow$ sziszifusz mechanizmus
- $F_{polgrad} \gg F_{spont}$
- 3D-ben „magától létrejön”

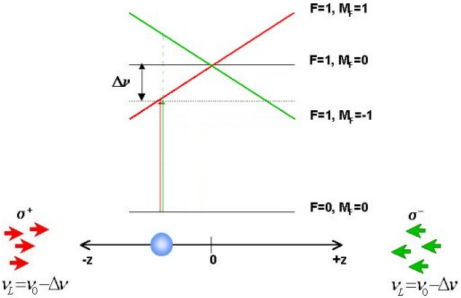






Magneto-optikai csapda

- Sugárzási nyomás helyfüggővé tétele: $\mathbf{B}(\mathbf{r}) \Rightarrow \sigma^+$ ill. σ^- átmenetek rezonanciafrekvenciája helyfüggő
- Csapdáz és hűt egyszerre - középen $\mathbf{B}(\mathbf{r}) = 0 \Rightarrow$ Doppler hűtés, szélén visszatérítő erő
- Termikus háttérgőzből is tölthető



RMKI MOT :

- atomfelhő átmérő: 0.8 mm
- csapdázott atomok száma: 10^6
- élettartam: 0.4 s
- hőmérséklet: $100 - 200\mu K$
- nyomás: 10^{-8} *Torr*