

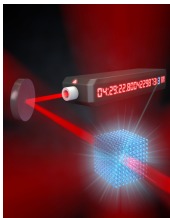
# Hlađenje atoma optičkim frekventnim češljem

Mihaela Bezak

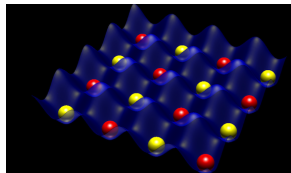
Fizički odsjek, PMF, Bijenička c. 32, 10 000 Zagreb  
*Laboratorij za hladne atome, Institut za fiziku*  
*Mentorica: dr. sc. Ticijana Ban*

Primjena:

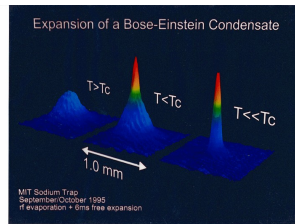
- atomski satovi
- hladne molekule
- Bose-Einsteinov kondenzat
- kvantna računala, kvantni simulatori ...



Slika: Atomski satovi [3]

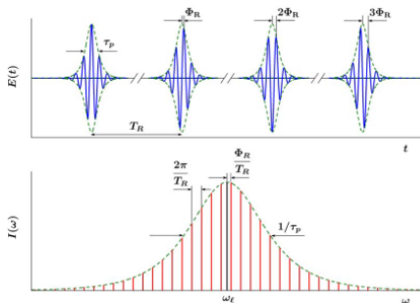


Slika: Kvantni simulatori [5]



Slika: Bose-Einsteinov kondenzat [4]

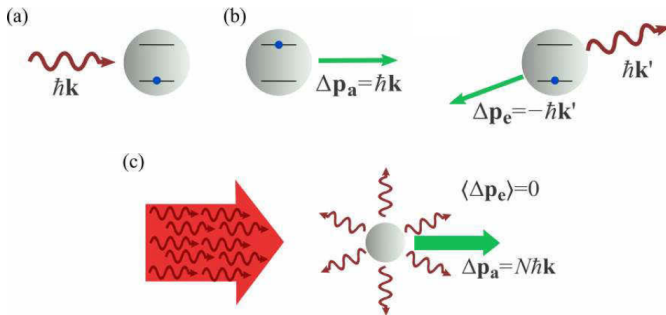
- složena energijska struktura (molekule- dušik, kisik)
- jednostavna energijska struktura (vodik)
  - duboko ultraljubičasto područje
- frekventni češalj
  - ion magnezija
  - atom rubidija
- postizanje sub-Dopplerovih temperatura u interakciji s optičkim frekventnim češljem
  - $\text{lin} \perp \text{lin}$
  - $\sigma^+ - \sigma^+$



Slika: Optički frekventni češalj [2]

## Lasersko hlađenje

- Prijenos momenta impulsa sa fotona na atom u ciklusima apsorpcije i spontane emisije
- Teorijski model: stacionaran atom s dva enerigijska stanja – osnovno i pobuđeno



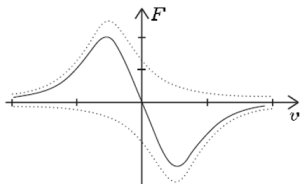
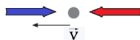
**Slika:** Promjena impulsa atoma: a) apsorpcija fotona b) spontana emisija c) ukupna promjena impulsa atoma [1].

- Radijativna sila

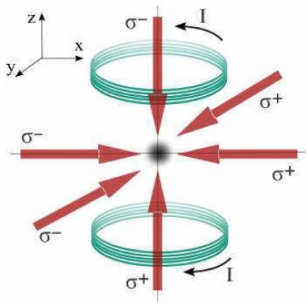
$$F = \hbar k \frac{\Gamma}{2} \frac{I/I_{SAT}}{1 + I/I_{SAT} + 4\delta^2/\Gamma^2}$$

- $\delta \rightarrow \delta - \vec{k}\vec{v}$
- $\delta = \omega_0 - \omega_L < 0$
- za male brzine atoma  $kv < \delta, \Gamma$

$$\vec{F} \approx -\beta\vec{v}$$



Slika: Sila hlađenja kao funkcija brzine



Slika: Konfiguracija MOT-a za zarobljavanje hladnih atoma [1]

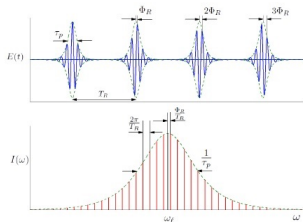
- anti-Helmholtzova konfiguracija zavojnica  $B(z) = Az$
- tri para kružno polariziranih zraka
- ukupna sila na atome

$$\vec{F} = -\beta\vec{v} + \kappa\vec{z}$$

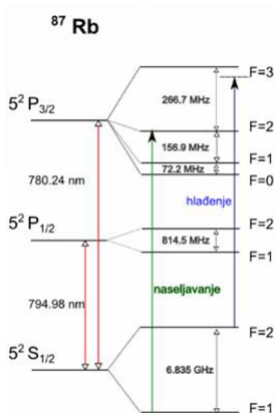
- niz fazno spregnutih femtosekundnih pulseva u frekventnoj domeni
- 

$$f_n = nf_R + f_0$$

- $f_R = 1/T_R$  frekvencija repeticije
- $f_0 = \Phi_R/(2\pi T_R)$  frekvencija pomaka



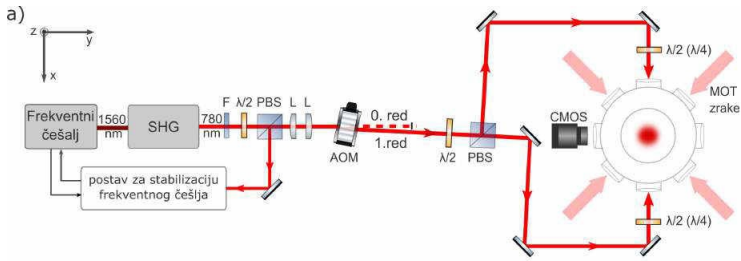
Slika: Femtosekundni pulsevi u vremenskoj i frekventnoj domeni [2].



- mogući prijelazi  $\Delta F = 0, \pm 1$
- lasersko hlađenje-  
 $|5S_{1/2}; F = 2\rangle \rightarrow |5P_{3/2}; F' = 3\rangle$
- $|5S_{3/2}; F' = 2\rangle$  - laser za naseljavanje
  - vraća atome natrag u ciklus

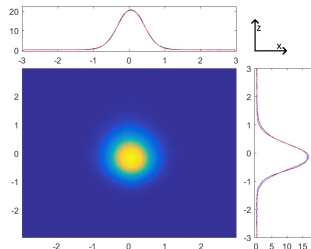
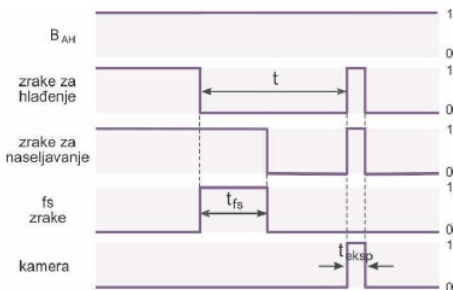
Slika: Energijski dijagram atoma  $^{87}\text{Rb}$  [1].





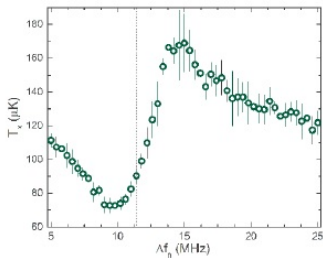
**Slika:** Shematski prikaz postava za hlađenje atomskog oblaka  $^{87}\text{Rb}$  generiranog u MOT-u. Prikazani su: Generator drugog harmonika - SGH, F - filter, PBS - polarizacijski djelitelj zrake,, L - leća, AOM - akusto-optički modulator,  $\lambda/2$  i  $\lambda/4$  - polarizacijska pločica, CMOS - kamera [1].

- slobodno širenje sustava
- različita vremena ekspanzije  $t$
- ravnina okomito na silu teže- pravocrtno gibanje



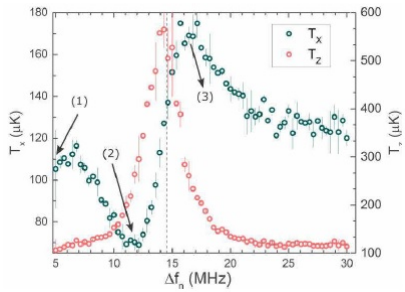
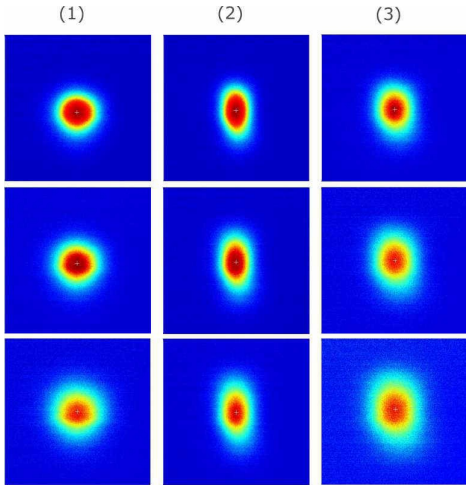
**Slika:** Shema za mjerenje ekspanzije oblaka i snimljena fluorescencija atomskog oblaka [1].

- lin  $\perp$  lin

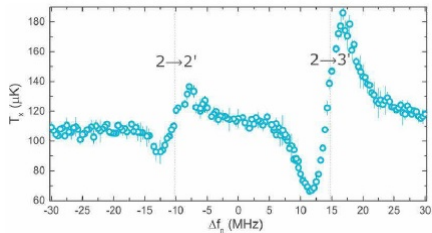


Slika: Ovisnost temperature atoma o pomaku frekvencije n-tog moda FC-a [1].

- $T_{x,min} = (72 \pm 4) \mu\text{K}$



- $\sigma^+ - \sigma^+$



Slika: Ovisnost temperature atoma o pomaku frekvencije n-tog moda FC-a [1].

- $T_{x,min} = (66 \pm 3)\mu\text{K}$
- opaženo hlađenja na prijelazu  $|5S_{1/2}; F = 2\rangle \rightarrow |5P_{3/2}; F' = 2\rangle$

- dobivene slične temperature za obje konfiguracije suprotno propagirajućih laserskih zraka
- sub-Dopplerove temperature su posljedica složenog sub-Dopplerovog mehanizma hlađenja
- FC možemo koristiti za hlađenje atoma



A. Cipriš, Optičko hlađenje atoma frekventnim češljem, Diplomski rad, PMF, Sveučilište u Zagrebu (2017).



N. Vujičić, Utjecaj magneto-optičkih efekata na rezonantne linije rubidijevih atoma, Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu (2011).



Shematski prikaz atomskog sata,

[https://jila.colorado.edu/yelabs/sites/default/files/styles/image\\_700/public/images/publications/Ye\\_Campbell\\_10secatom\\_5a.jpg?itok=V2xAyzKk](https://jila.colorado.edu/yelabs/sites/default/files/styles/image_700/public/images/publications/Ye_Campbell_10secatom_5a.jpg?itok=V2xAyzKk)



A. Steinberg, Ultra cold atoms and Bose-Einstein condensation, MIT,

<http://slideplayer.com/slide/6653269/23/images/1/Ultracold+atoms+and+Bose-Einstein+condensation.jpg>



T. Uehlinger, Quntum simulation, ETH Zürich,

[http://www.ethlife.ethz.ch/archive\\_articles/130524\\_quantenmagnetismus\\_at/quantummagnetism\\_1-hires.jpg](http://www.ethlife.ethz.ch/archive_articles/130524_quantenmagnetismus_at/quantummagnetism_1-hires.jpg)