

Ultrahladne molekule

Nina Sedej

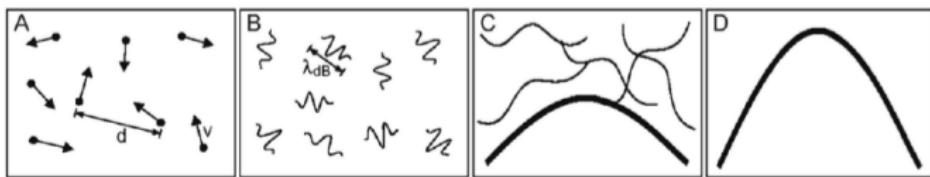
16. maj 2018

Uvod

- ▶ Hlajenje atomov omogoča opazovanje kvantnomehanskih pojavov, ki pri visokih temperaturah niso dostopni
- ▶ Ultrahladne molekule imajo bolj zapleteno strukturo energijskih nivojev kot atomi \Rightarrow še več možnosti za opazovanje fundamentalnih pojavov
 - ▶ Kvantna kemija: preučevanje in nadzorovanje kemijskih reakcij
 - ▶ Interferenčni poskusi
 - ▶ Simulacije kondenzirane snovi
 - ▶ Kvantno računalništvo
 - ▶ itd.
- ▶ Molekule je težko ohladiti pod μK zaradi dodatnih vibracijskih in rotacijskih prostostnih stopenj
- ▶ Alternativa: asociacija iz atomskega Bose-Einsteinovega kondenzata

Bose-Einsteinov kondenzat (BEC)

- ▶ Mera za to, kako veliko področje zaseda valovna funkcija atoma - De Broglijeva valovna dolžina: $\lambda_B = \frac{h}{Mv} = \frac{h}{\sqrt{2\pi M k_B T}}$
- ▶ Pri ohlajanju se λ_B veča (Heisenbergovo načelo nedoločenosti)
- ▶ Valovne funkcije atomov se začnejo prekrivati
- ▶ Gostota v faznem prostoru $PSD = n\lambda_B^3 \gtrsim 2.6$ za BEC



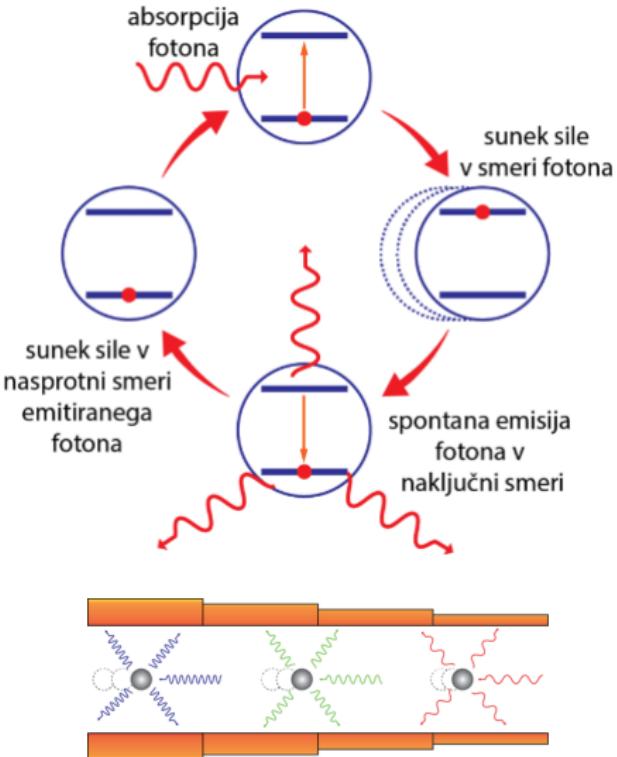
- ▶ Večina atomov je v osnovnem stanju, kar lahko opišemo z makroskopsko valovno funkcijo

Hlajenje atomov

- ▶ Lasersko hlajenje
 - ▶ Nobelova nagrada 1997
- ▶ Evaporacijsko hlajenje
- ▶ Bose-Einsteinov kondenzat (1995)
 - ▶ Nobelova nagrada 2001

Lasersko hlajenje

- ▶ Na atome, ki se gibljejo vzdolž cevi, svetimo z lasersko svetlobo
- ▶ Gibalna količina fotona: $p = \hbar k$
- ▶ Atom absorbira foton in dobi sunek sile v smeri **nasprotni gibanju**
- ▶ Izseva foton v **naključni** smeri - v povprečju ni prispevka k spremembam gibalne količine
- ▶ Nanje deluje samo sila fotonov iz laserja
⇒ upočasnjevanje



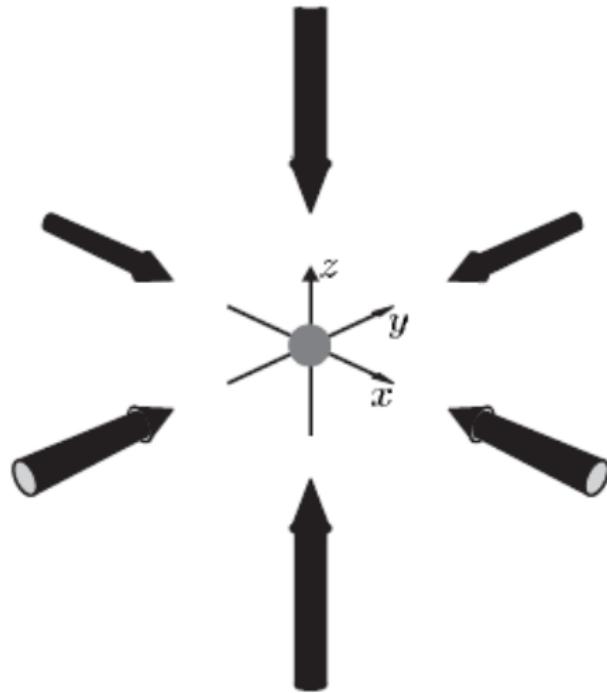
Lasersko hlajenje

Zeemanov upočasnjevalnik

- ▶ Dopplerjev premik : $\omega_0 = \omega + \vec{k} \cdot \vec{v}$
- ▶ Ko se atom upočasni pade iz resonance z lasersko svetlobo
- ▶ To kompenziramo tako, da spremojemo frekvenco atomskega prehoda z zunanjim magnetnim poljem (Zeemanov pojav)
- ▶ V zunanjem magnetnem polju se prej degenerirana stanja z enako vrtilno količino in različno projekcijo razcepijo, razcep se veča z naraščanjem magnetnega polja
- ▶ S primerno izbranim gradientom magnetnega polja zagotovimo, da atom ne pade iz resonance z laserskim žarkom

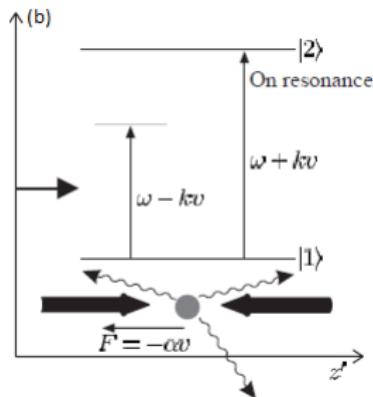
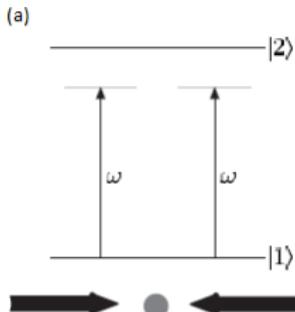
Optična melasa

Upočasnjevanje v vseh treh smereh



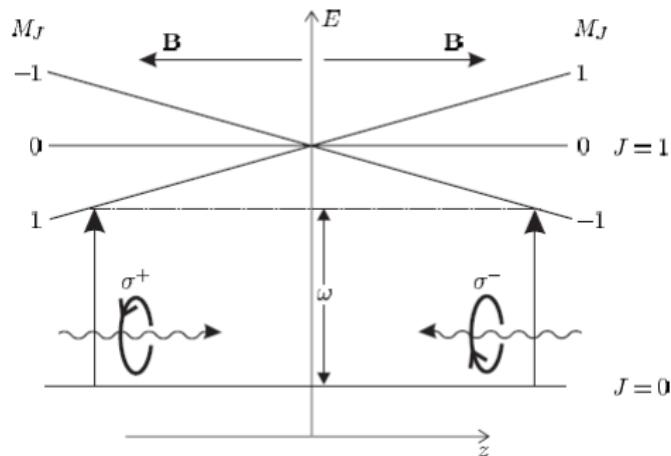
Optična melasa

- ▶ Frekvenca laserja je pod resonančno za mirujoč atom
- ▶ Na mirujoč atom je vsota sil v povprečju 0
- ▶ Atom zaradi Dopplerjevega premika pride v resonanco s tistim žarkom, proti katerem se premika
- ▶ "Viskozna" sila $F = -\alpha v$



Magneto-optična past

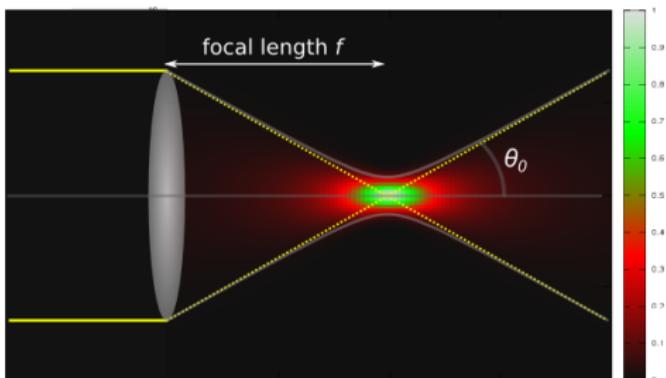
- ▶ Iz optične melase lahko atomi oddifundirajo zaradi naključnih procesov (izsevanje fotona)
- ▶ Dodamo kvadrupolno polje
- ▶ V sredini $B = 0$, z razdaljo od središča linearно narašča
- ▶ Zeemanov razcep povzroči neravnovesje v optičnih silah.



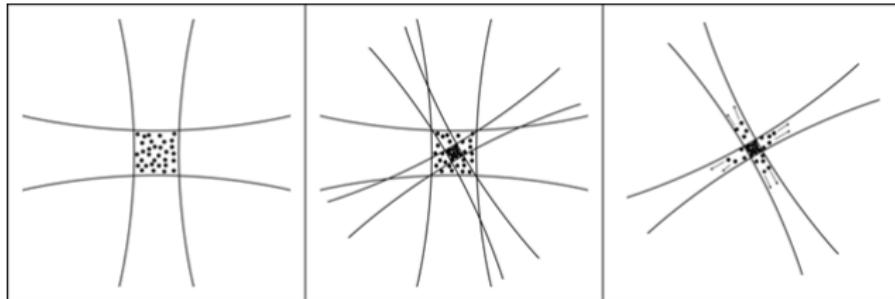
Atome lahko ohladimo na $10 \mu\text{K}$

Optična dipolna past

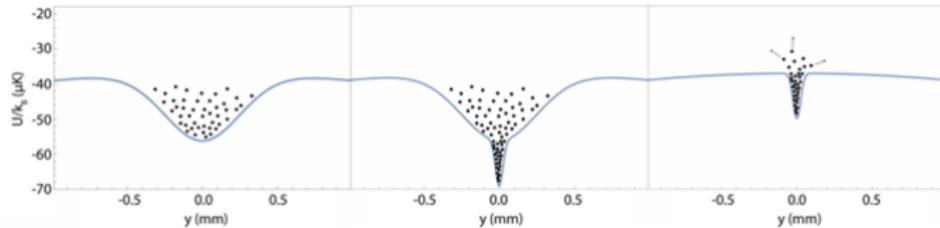
- ▶ Električno polje v atomu inducira električni dipolni moment
- ▶ V gradientu \vec{E} nanj deluje sila v smeri največje intenzitete
- ▶ Fokusiran laserski žarek z Gaussovim profilom
- ▶ Globina nekaj μK
- ▶ Levitacija:
$$mg + \mu_B m_F g_F \frac{\partial B}{\partial z} = 0$$
- ▶ Levitacijski gradient



Evaporacijsko hlajenje

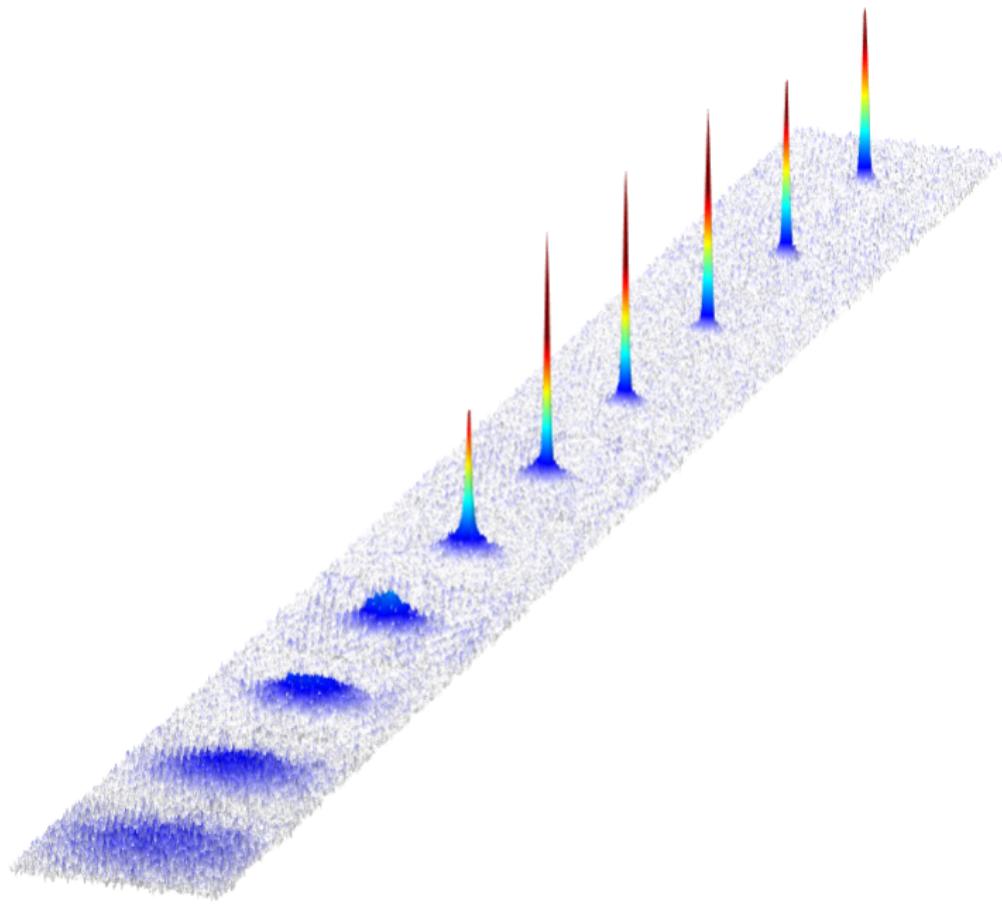


- ▶ Znižujemo globino dipolne pasti
- ▶ Atomi z največ energije lahko pobegnejo
- ▶ Ostali atomi se termalizirajo pri nižji temperaturi
- ▶ Ohlajanje do nekaj 10 nK



	Temperatura	Hitrost	Št. ato-mov	PSD
Pečica	360 K	212 $\frac{m}{s}$	/	/
Zeemanov upo-časnjevalnik	3K	19 $\frac{m}{s}$	/	/
MOT	15 μK	43 $\frac{mm}{s}$	$7 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^{-6}$
Dipolna past	2.5 μK	18 $\frac{mm}{s}$	$7 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^{-4}$
Mala dipolna past (jamica)	1.7 μK	15 $\frac{mm}{s}$	$5 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^{-3}$
BEC	20 nK	1.6 $\frac{mm}{s}$	$1 \cdot 10^4$	>2.6

$$v = \sqrt{\frac{2k_B T}{m}}$$

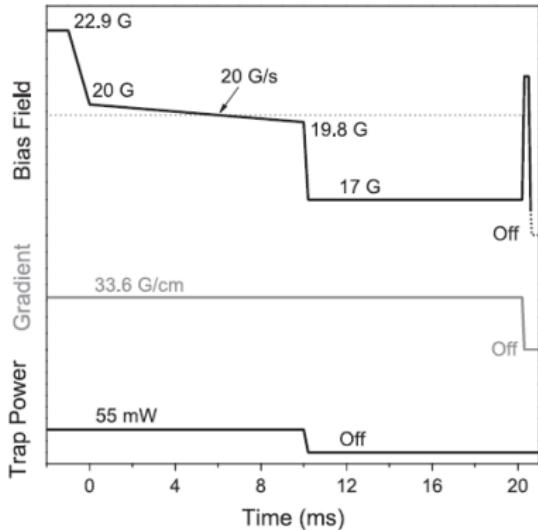
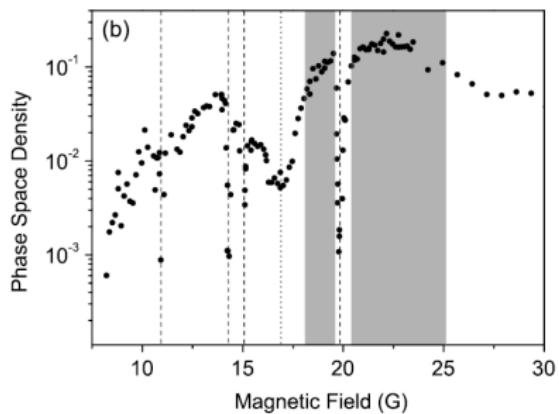


Feshbachove resonance

- ▶ Neelastični trki atomov
- ▶ Če je kinetična energija atomov enaka energiji vezanega stanja pride do Fesbachove resonance - nastanek molekul
- ▶ S spremenjanjem magnetnega polja lahko nadzorujemo moč interakcij med atomi

Magnetoasociacija

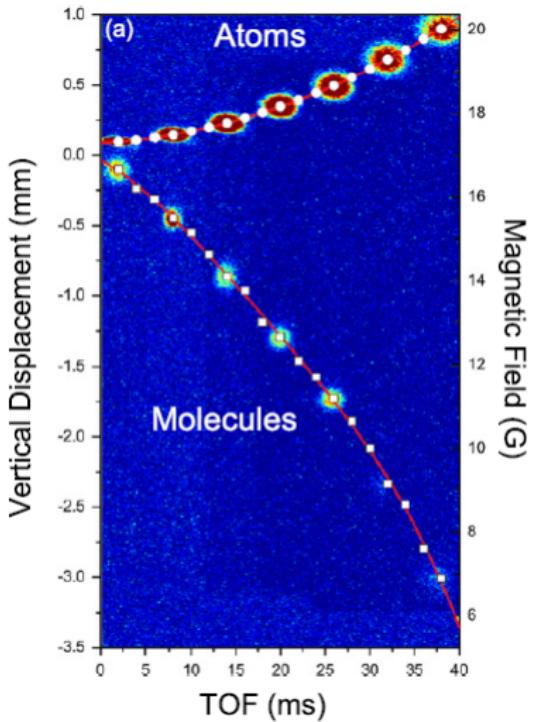
Asociacija atomov v molekule pod vplivom magnetnega polja



- ▶ Pri določenih vrednostih magnetnega polja se močno poveča presek za tvorbo molekul - Feshbachove resonance (levo)
- ▶ Molekule ustvarimo tako, da počasi spreminjamo magnetno polje čez resonanco (desno)

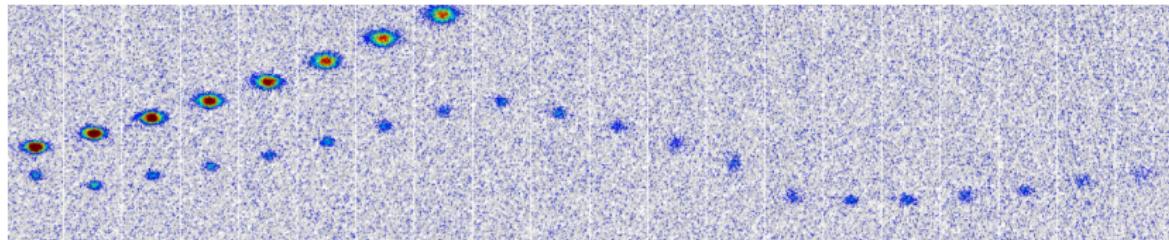
Magnetoasociacija

- ▶ Ugasnemo dipolno past
- ▶ Molekule imajo drugačen magnetni moment kot atomi
⇒ Stern - Gerlachova separacija
- ▶ Za slikanje molekule disasociiramo v atome po obratnem postopku kot pri asociaciji



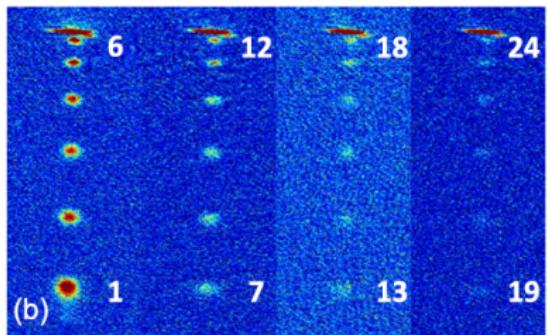
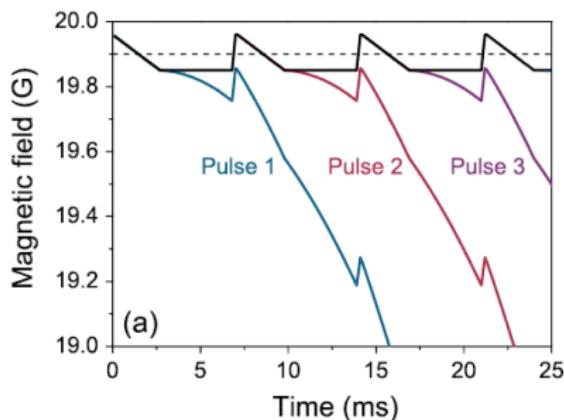
Prehod med stanji

- ▶ Molekule so pri različnih vrednostih magnetnega polja v različnih stanjih
- ▶ Različna stanja imajo različne magnetne momente
- ▶ Proizvedemo molekule z $\mu = -0.9\mu_B$ (levitacijski gradient 52 G/cm)
- ▶ Gradient nastavimo na 40 G/cm, izklopimo dipolno past, da molekule začnejo padati
- ▶ Prehod v stanje z $\mu = -1.5\mu_B$ (levitacijski gradient 31 G/cm)
- ▶ Molekule se zaradi prehodov med stanji izmenično dvigujejo in padajo



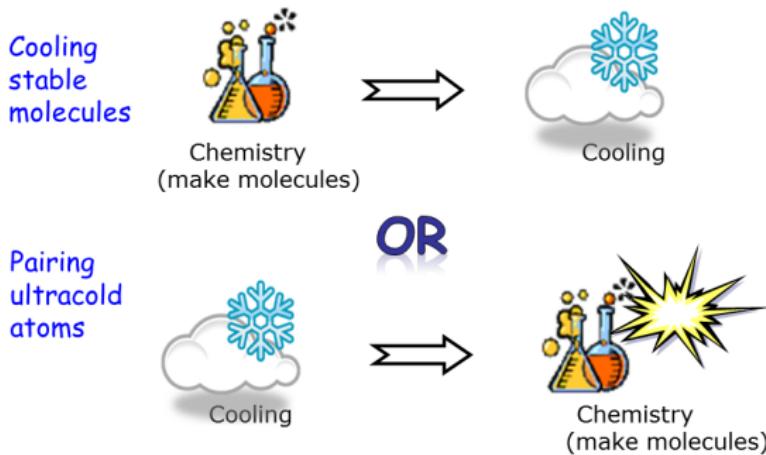
Proizvodnja gruč molekul

- ▶ Dipolna past drži atome na mestu
- ▶ Magnetoasociacija
- ▶ Molekule padajo v manjše magnetno polje
- ▶ Magnetno polje vrnemo na vrednost pred magnetoasociacijo
- ▶ Gruča molekul ne disasociira, ker je padla v prenizko magnetno polje
- ▶ Ponovimo magnetoasociacijo



How do we cool molecules

- Influenced by what science to pursue



Slika: <http://jilawww.colorado.edu/yelabs/research/ultracold-molecules>