

F4110
Kvantová fyzika atomárních soustav
letní semestr 2007 - 2008

XII.
Nízké teploty

KOTLÁŘSKÁ 14. KVĚTNA 2008

Fyzika nízkých teplot

Existence absolutní nuly

- Absolutní nula teploty pro ideální plyn
definována vztahem

$$\frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle = \frac{3}{2} k_B T$$

a podmínkou nulové kinetické energie.

Existence absolutní nuly

- Absolutní nula teploty pro ideální plyn

definována vztahem

$$\frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle = \frac{3}{2} k_B T$$

a podmínkou nulové kinetické energie.

- Pro všechny další systémy se použije **transitivnosti teploty** pro tělesa v kontaktu (vzájemné tepelné rovnováze)

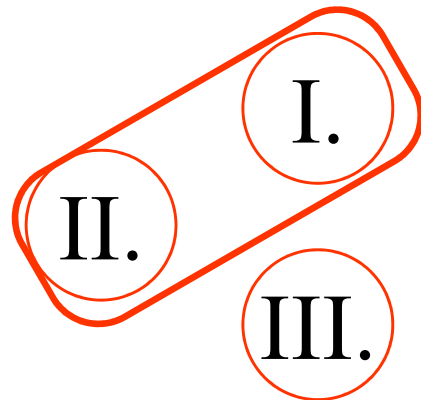
Existence absolutní nuly

- Absolutní nula teploty pro ideální plyn
definována vztahem

$$\frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle = \frac{3}{2} k_B T$$

a podmínkou nulové kinetické energie.

- Pro všechny další systémy se použije **transitivnosti teploty** pro tělesa v kontaktu (vzájemné tepelné rovnováze)



$$T_I = T_{II}$$

Teploměrná látka
Systém I.
(ideální plyn)

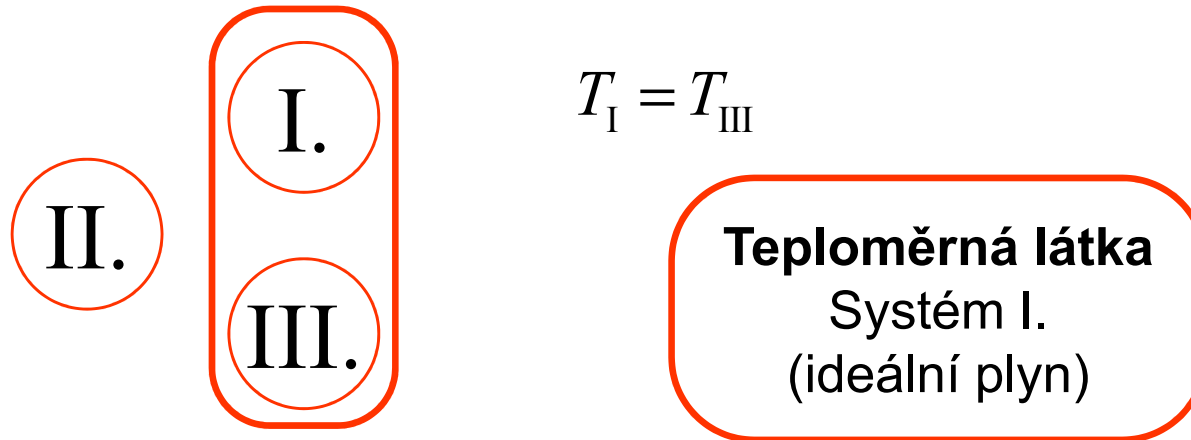
Existence absolutní nuly

- Absolutní nula teploty pro ideální plyn
definována vztahem

$$\frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle = \frac{3}{2} k_B T$$

a podmínkou nulové kinetické energie.

- Pro všechny další systémy se použije **transitivnosti teploty** pro tělesa v kontaktu (vzájemné tepelné rovnováže)



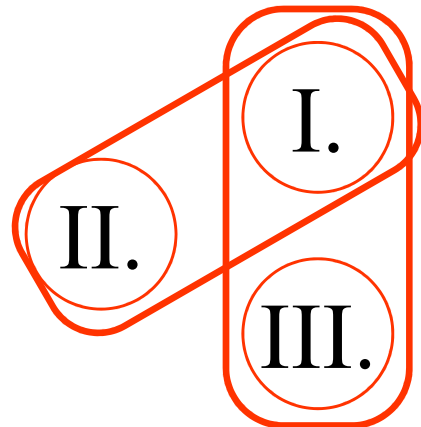
Existence absolutní nuly

- Absolutní nula teploty pro ideální plyn
definována vztahem

$$\frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle = \frac{3}{2} k_B T$$

a podmínkou nulové kinetické energie.

- Pro všechny další systémy se použije **transitivnosti teploty** pro tělesa v kontaktu (vzájemné tepelné rovnováže)



$$T_I = T_{III}, \quad T_I = T_{II} \Rightarrow T_{II} = T_{III}$$

**Teploměrná látka
zaměněna
Systém II.
(reálná soustava)**

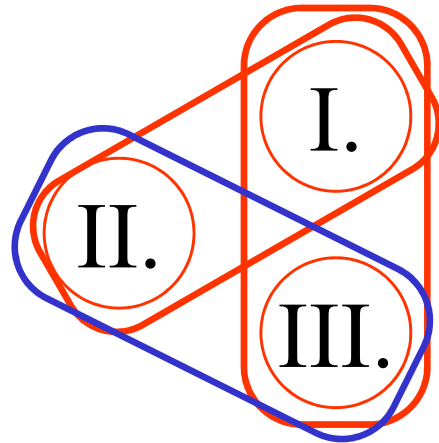
Existence absolutní nuly

- Absolutní nula teploty pro ideální plyn
definována vztahem

$$\frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle = \frac{3}{2} k_B T$$

a podmínkou nulové kinetické energie.

- Pro všechny další systémy se použije **transitivnosti teploty** pro tělesa v kontaktu (vzájemné tepelné rovnováže)



$$T_I = T_{III}, \quad T_I = T_{II} \Rightarrow T_{II} = T_{III}$$

**Teploměrná látka
zaměněna
Systém II.
(reálná soustava)**

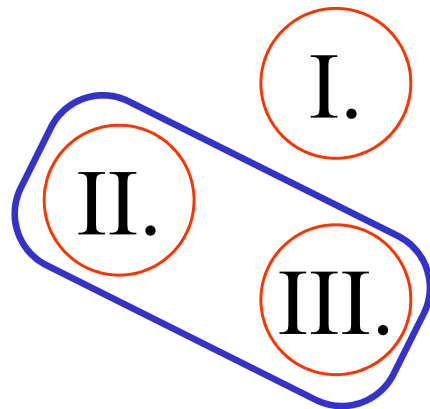
Existence absolutní nuly

- Absolutní nula teploty pro ideální plyn
definována vztahem

$$\frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle = \frac{3}{2} k_B T$$

a podmínkou nulové kinetické energie.

- Pro všechny další systémy se použije **transitivnosti teploty** pro tělesa v kontaktu (vzájemné tepelné rovnováže)



$$T_I = T_{III}, \quad T_I = T_{II} \Rightarrow T_{II} = T_{III}$$

**Teploměrná látka
zaměněna
Systém II.
(reálná soustava)**

Existence absolutní nuly

- Absolutní nula teploty pro ideální plyn

definována vztahem

$$\frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle = \frac{3}{2} k_B T$$

a podmínkou nulové kinetické energie.

- Pro všechny další systémy se použije **transitivnosti teploty** pro tělesa v kontaktu (vzájemné tepelné rovnováze)
- Absolutní nula není dostižitelná konečným procesem (**3. zákon termodyn.**)

$$S \rightarrow 0, \quad C_v \rightarrow 0, \quad \dots \text{ při } T \rightarrow 0$$

Existence absolutní nuly

- Absolutní nula teploty pro ideální plyn

definována vztahem

$$\frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle = \frac{3}{2} k_B T$$

a podmínkou nulové kinetické energie.

- Pro všechny další systémy se použije **transitivnosti teploty** pro tělesa v kontaktu (vzájemné tepelné rovnováze)
- Absolutní nula není dostižitelná konečným procesem (**3. zákon termodyn.**)

$$S \rightarrow 0, \quad C_v \rightarrow 0, \quad \dots \text{ při } T \rightarrow 0$$

- Zvláštní jevy, **makroskopické kvantové jevy**, jako supravodivost, v blízkosti nuly. Ovšem co je „blízkost“ ? Vysokoteplotní supravodivost, život, ...

Existence absolutní nuly

- Absolutní nula teploty pro ideální plyn

definována vztahem

$$\frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle = \frac{3}{2} k_B T$$

a podmínkou nulové kinetické energie.

- Pro všechny další systémy se použije **transitivnosti teploty** pro tělesa v kontaktu (vzájemné tepelné rovnováže)
- Absolutní nula není dostižitelná konečným procesem (**3. zákon termodyn.**)

$$S \rightarrow 0, \quad C_v \rightarrow 0, \quad \dots \text{ při } T \rightarrow 0$$

- Zvláštní jevy, **makroskopické kvantové jevy**, jako supravodivost, v blízkosti nuly. Ovšem co je „blížkost“ ? Vysokoteplotní supravodivost, život, ...

Porovnat teplotu s charakteristickými energiemi

$$k_B T \square E_{\text{Vazeb}}$$

nový řád

$$k_B T \square E_{\text{Excit}}$$

vymrzání

Teploty ve vesmíru

Stupnice	nitra hvězd	$10^6 - 10^8$ K
	hvězdné atmosféry	$10^3 - 10^4$ K
	komety, planety ...	$10^1 - 10^2$ K
	
	reliktní záření jako minimum	$\sim 2,72$ K
	mlhovina Bumerang (suhvězdí Kentaura)	1,15 K

Teploty ve vesmíru

Stupnice	nitra hvězd	$10^6 - 10^8$ K
	hvězdné atmosféry	$10^3 - 10^4$ K
	komety, planety ...	$10^1 - 10^2$ K
	
	reliktní záření jako minimum	$\sim 2,72$ K
	mlhovina Bumerang (souhvězdí Kentaura)	1,15 K

Pozemský rekord
-89,3°C ↔ 183.75 K

1983 Antarktida
stanice Vostok

Teploty ve vesmíru

Stupnice	nitra hvězd	$10^6 - 10^8$ K
	hvězdné atmosféry	$10^3 - 10^4$ K
	komety, planety ...	$10^1 - 10^2$ K
	
	reliktní záření jako minimum	$\sim 2,72$ K
	mlhovina Bumerang (suhvězdí Kentaura, objevena 1998, teplota určena 2003)	1,15 K
	důvod: rychlá expanse plynů z centrální hvězdy	

Pozemský rekord
-89,3°C ↔ 183.75 K

1983 Antarktida
stanice Vostok



Nízké teploty v laboratoři (jen výběr !!)

K Teplotní rekordy

1877 *Pictet* kapalný kyslík?

77 1895 *von Linde* kap. vzduch

22 1898 *Dewar* kapalný vodík

1905 *von Linde* kap. dusík

4,2 1908 *Kamerlingh-Onnes*
kapalné helium

0,3 odsávané helium

mK 1933 paramagn. demagnet.

1951 *H. London* rozpouštěcí
refrigerátor

μK 1956 *Kurti* NDR (jaderná ...)

1985 *Hänsch* laserové
chlazení (princip)

nK

pK

Nízké teploty v laboratoři (jen výběr !!)

K Teplotní rekordy

1877 *Pictet* kapalný kyslík?

77 1895 *von Linde* kap. vzduch

22 1898 *Dewar* kapalný vodík

1905 *von Linde* kap. dusík

4,2 1908 *Kamerlingh-Onnes*
kapalné helium

0,3 odsávané helium

mK 1933 paramagn. demagnet.

1951 *H. London* rozpouštěcí
refrigerátor

μK 1956 *Kurti* NDR (jaderná ...)

1985 *Hänsch* laserové
chlazení (princip)

nK o tom dnes

pK rekord okolo 100 pK

Nízké teploty v laboratoři (jen výběr !!)

K	Teplotní rekordy	Objevy
	1877 <i>Pictet</i> kapalný kyslík?	
77	1895 <i>von Linde</i> kap. vzduch	
22	1898 <i>Dewar</i> kapalný vodík	
	1905 <i>von Linde</i> kap. dusík	
4,2	1908 <i>Kamerlingh-Onnes</i> kapalné helium	1911 <i>Kamerlingh-Onnes</i> supravodivost kovů
0,3	odsávané helium	
mK	1933 paramagn. demagnet. 1951 <i>H. London</i> rozpouštěcí refrigerátor	1937 <i>Kapica</i> supratekutost Helia-4
μK	1956 <i>Kurti</i> NDR (jaderná ...) 1985 <i>Hänsch</i> laserové chlazení (princip)	1972 <i>Osheroff</i> supratekutost Helia-3 1986 <i>Müller a Bednorz</i> vysokoteplot. supravodivost
nK	o tom dnes	
pK	rekord okolo 100 pK	1995 <i>Wieman, ... Ketterle</i> BEC v atomových parách

Nízké teploty v laboratoři (jen výběr !!)

K	Teplotní rekordy	Objevy	Teorie
	1877 <i>Pictet</i> kapalný kyslík?		
77	1895 <i>von Linde</i> kap. vzduch		
22	1898 <i>Dewar</i> kapalný vodík		
	1905 <i>von Linde</i> kap. dusík		
4,2	1908 <i>Kamerlingh-Onnes</i> kapalné helium	1911 <i>Kamerlingh-Onnes</i> supravodivost kovů	
0,3	odsávané helium		1924 <i>Einstein</i> Bose- Einsteinova kondensace
mK	1933 paramagn. demagnet. 1951 <i>H. London</i> rozpouštěcí refrigerátor	1937 <i>Kapica</i> supratekutost Helia-4	1939 <i>Landau</i> supratekutost (fenom.) 1947 <i>Bogoljubov</i> teorie supratekutost (mikrosk.)
μK	1956 <i>Kurti</i> NDR (jaderná ...) 1985 <i>Hänsch</i> laserové chlazení (princip)	1972 <i>Osheroff</i> supratekutost Helia-3 1986 <i>Müller a Bednorz</i> vysokoteplot. supravodivost	1956 <i>BCS</i> * supravodivost kovů 1975 <i>Leggett</i> supratekutost Helia-3
nK	o tom dnes		
pK	rekord okolo 100 pK	1995 <i>Wieman, ... Ketterle</i> BEC v atomových parách	

**Bardeen, Cooper a Schrieffer*

Naše hlavní téma *dnes*

K	Teplotní rekordy	Objevy	Teorie
	1877 <i>Pictet</i> kapalný kyslík?		
77	1895 <i>von Linde</i> kap. vzduch		
22	1898 <i>Dewar</i> kapalný vodík		
	1905 <i>von Linde</i> kap. dusík		
4,2	1908 <i>Kamerlingh-Onnes</i> kapalné helium	1911 <i>Kamerlingh-Onnes</i> supravodivost kovů	
0,3	odsávané helium	odsávané helium	1924 <i>Einstein</i> Bose- Einsteinova kondensace
mK	1933 paramagn. demagnet. 1951 <i>H. London</i> rozpouštěcí refrigerátor	1937 <i>Kapica</i> supratekutost Helia-4	1939 <i>Landau</i> teorie supratekutosti 1947 <i>Bogoljubov</i> teorie supratekutosti
μK	1956 <i>Kurti</i> NDR (jaderná ...) 1985 <i>Hänsch</i> laserové chlazení (princip)	1972 <i>Osheroff</i> supratekutost Helia-3 1986 <i>Müller a Bednorz</i> vysokoteplot. supravodivost	1956 <i>BCS</i> teorie supravodivosti 1975 <i>Leggett</i> teorie supratekutosti Helia-3
nK	o tom dnes		
pK	rekord okolo 100 pK	1995 <i>Wieman, ... Ketterle</i> BEC v atomových parách	

**Bardeen, Cooper a Schrieffer*

Naše hlavní téma *dnes* a *příště*

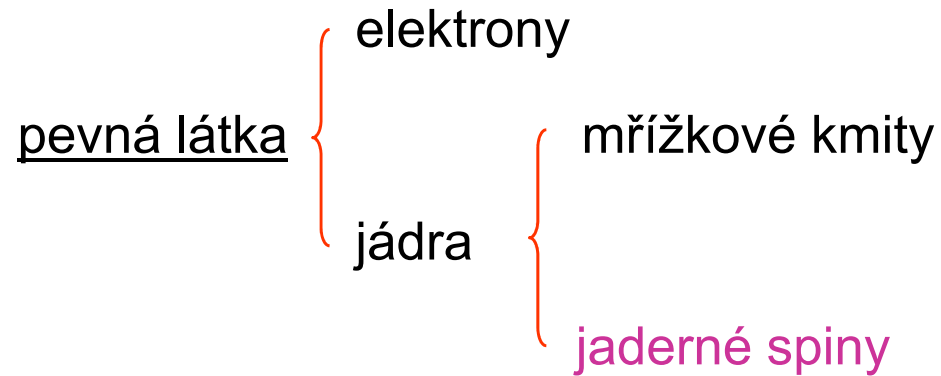
K	Teplotní rekordy	Objevy	Teorie
	1877 <i>Pictet</i> kapalný kyslík?		
77	1895 <i>von Linde</i> kap. vzduch		
22	1898 <i>Dewar</i> kapalný vodík		
	1905 <i>von Linde</i> kap. dusík		
4,2	1908 <i>Kamerlingh-Onnes</i> kapalné helium	1911 <i>Kamerlingh-Onnes</i> supravodivost kovů	
0,3	odsávané helium	odsávané helium	1924 <i>Einstein</i> <i>Bose-</i> <i>Einsteinova</i> kondensace
mK	1933 paramagn. demagnet. 1951 <i>H. London</i> rozpouštěcí refrigerátor	1937 <i>Kapica</i> supratekutost Helia-4	1939 <i>Landau</i> teorie supratekutosti 1947 <i>Bogoljubov</i> teorie supratekutosti
μK	1956 <i>Kurti</i> NDR (jaderná ...) 1985 <i>Hänsch</i> laserové chlazení (princip)	1972 <i>Osheroff</i> supratekutost Helia-3 1986 <i>Müller a Bednorz</i> vysokoteplot. supravodivost	1956 <i>BCS</i> teorie supravodivosti 1975 <i>Leggett</i> teorie supratekutosti Helia-3
nK	o tom dnes		
pK	rekord okolo 100 pK	1995 <i>Wieman, ... Ketterle</i> BEC v atomových parách	

**Bardeen, Cooper a Schrieffer*

Jaderná adiabatická demagnetisace

Chlazení jadernou adiabatickou demagnetisací

NDR nuclear demagnetization refrigeration



Chlazení jadernou adiabatickou demagnetisací

NDR nuclear demagnetization refrigeration

<u>pevná látka</u>	elektrony		T_e			
		jádra	mřížkové kmity	T_L	τ_L	mřížková relax. doba
					τ_{LS}	spin-mřížková relax. doba
	jaderné spiny		T_S	τ_S	spin-spinová relax. doba	

Chlazení jadernou adiabatickou demagnetisací

NDR nuclear demagnetization refrigeration

<u>pevná látka</u>	elektrony		T_e			
		jádra	mřížkové kmity	T_L	τ_L	mřížková relax. doba
					τ_{LS}	spin-mřížková relax. doba
	jaderné spiny		T_S	τ_S	spin-spinová relax. doba	

Pokud je uvnitř podsystemů rychlá termalisace, může nerovnovážný systém být popsán pomocí několika teplot těchto podsystemů

V rovnováze se teploty všech podsystemů vyrovnají – po uplynutí nejdelší vzájemné relaxační doby

Spin-mřížková relaxace je pomalá!

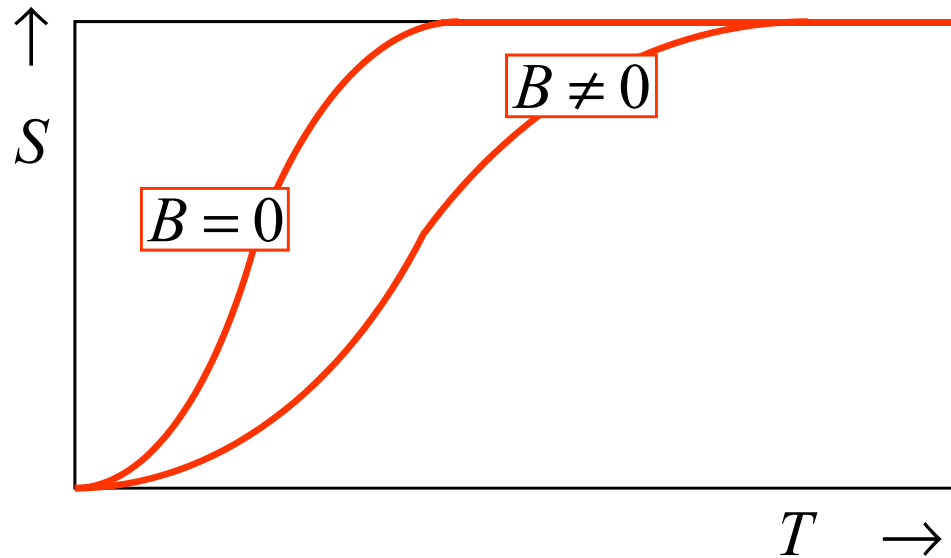
Můžeme proto generovat nerovnovážnou velmi nízkou spinovou teplotu

$$\tau_{LS} \ll \tau_L \quad \tau_{LS} \ll \tau_S$$

$$T_S \ll T_L$$

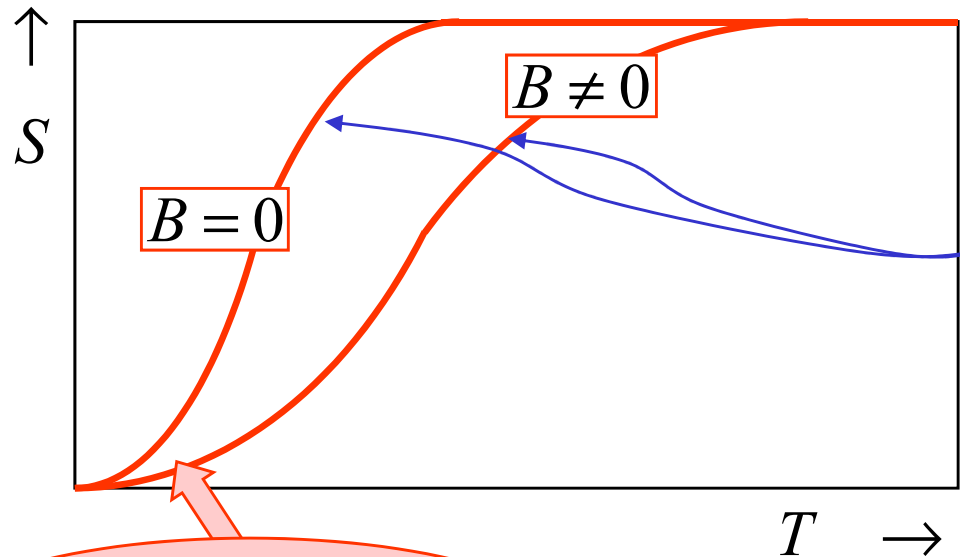
Princip chlazení jadernou adiabatickou demagnetisací

entropie jako funkce teploty



Princip chlazení jadernou adiabatickou demagnetisací

entropie jako funkce teploty



chování podle
3. zákona termodyn.

míra orientační neuspořádanosti

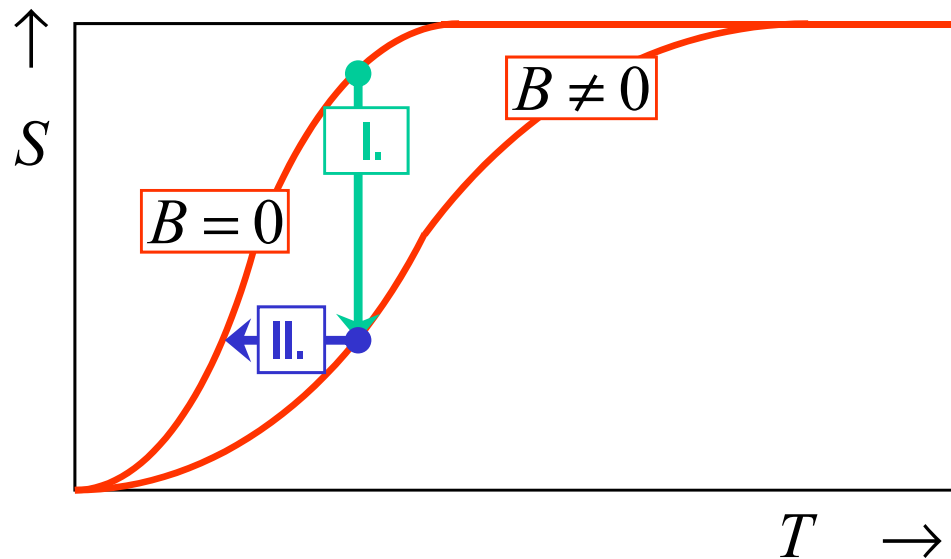
$$S \rightarrow S_{\infty} = -N_A k_B \ln w$$

$$N_A k_B \ln(2I + 1)$$

$$S \approx S_{\infty} - N_A C (B^2 + B_{\text{loc}}^2) / T^2$$

lokální pole jako
míra spinových
interakcí

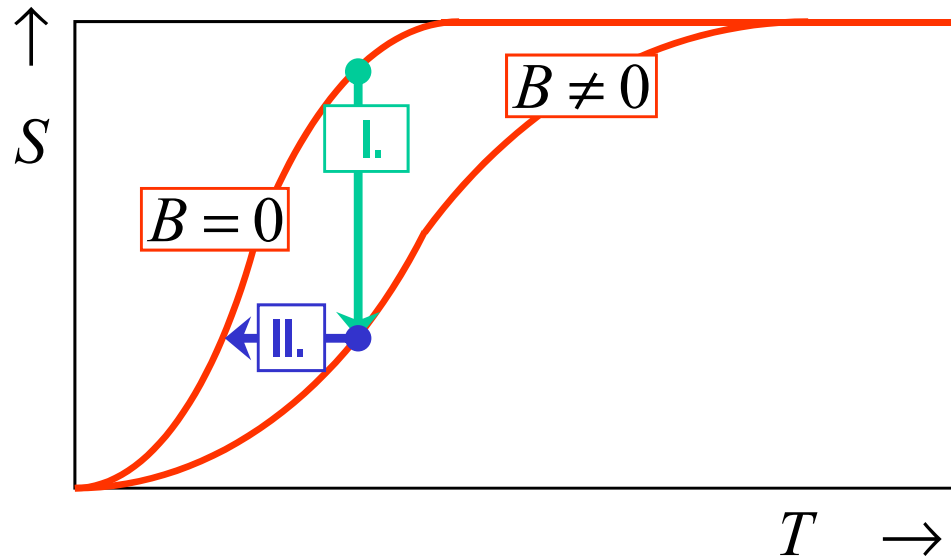
Princip chlazení jadernou adiabatickou demagnetisací



I. KROK *izotermická magnetizace*
Entropie s magnetickým polem klesá
≡ snižuje se orientační neuspořádanost

II. KROK *adiabatická demagnetizace*
Teplota a vnitřní energie klesají

Princip chlazení jadernou adiabatickou demagnetisací



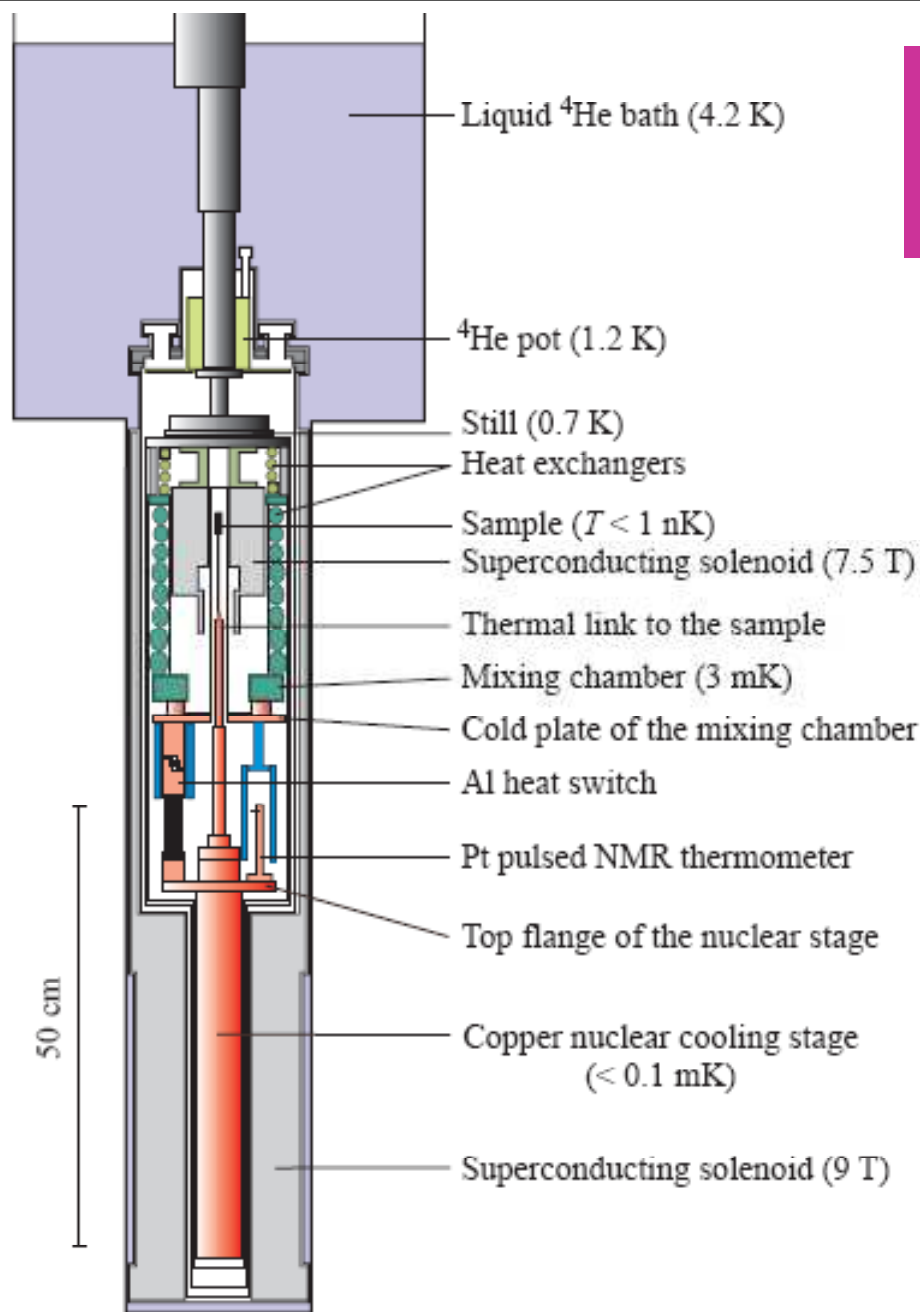
I. KROK *izotermická magnetizace*
Entropie s magnetickým polem klesá
≡ snižuje se orientační neuspořádanost

II. KROK *adiabatická demagnetizace*
Teplota a vnitřní energie klesají

"vysokoteplotní" vzorec

$$T_{\text{kon}} = T_{\text{zač}} \sqrt{\frac{B_{\text{kon}}^2 + B_L^2}{B_{\text{zač}}^2 + B_L^2}}$$

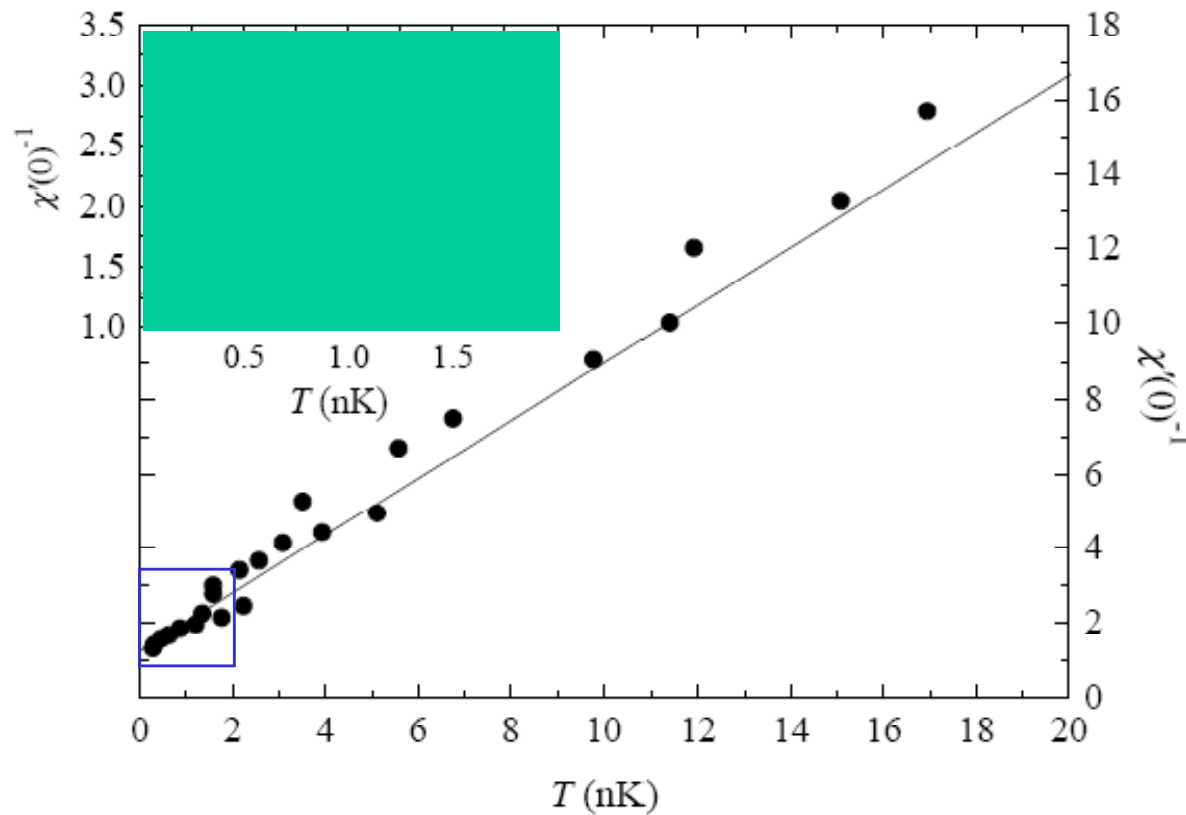
Kryostat, kde byla dosažena rekordní teplota 100 pK



Helsinki University of Technology
YKI, Low Temperature Group
2000

1. Předchlazení čerpáním helia 0,7 K
2. První stupeň: rozpouštěcí refrigerátor 3 mK
3. Druhý stupeň: NDR v mědi $< 0,1$ mK
4. Třetí stupeň: NDR v samotném vzorku: monokrystal Rh < 1 nK

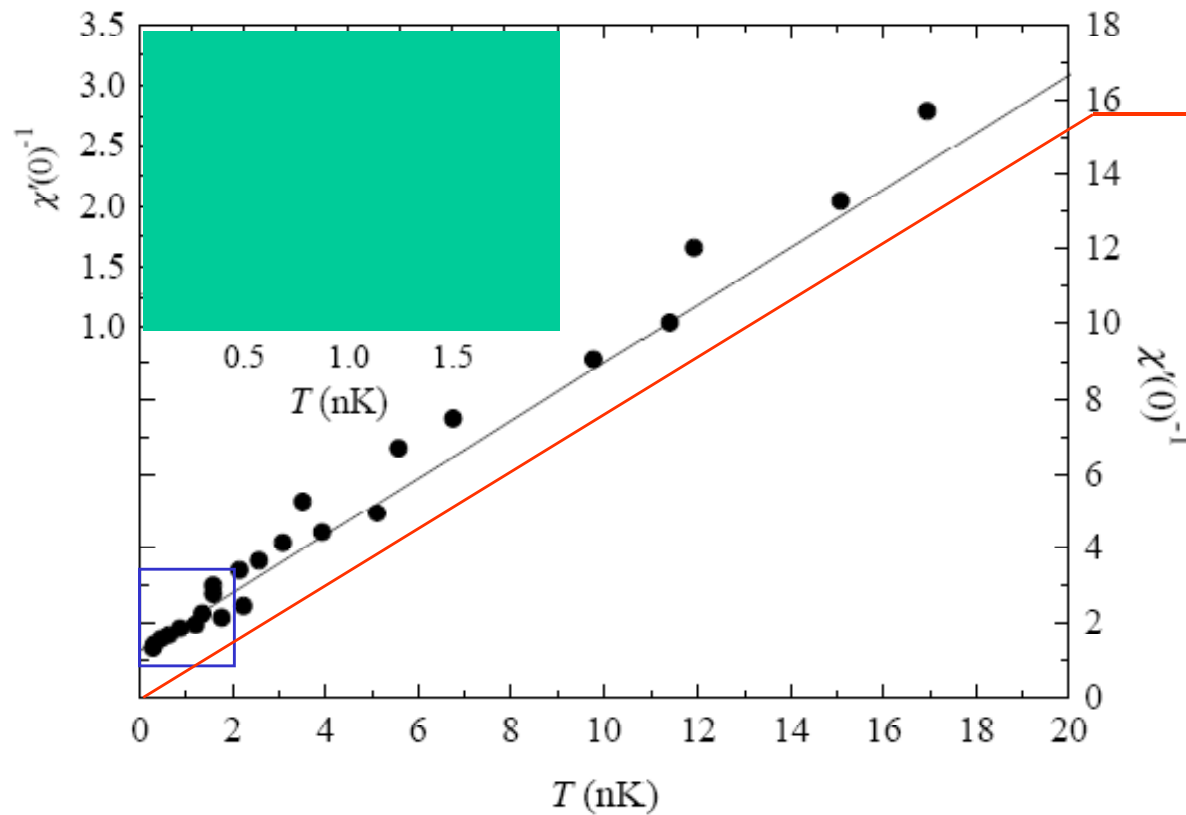
Spinová magnetická susceptibilita monokrystalu rhodia



$$\chi'(0) = \frac{\lambda}{T - \theta},$$

$$\theta = -1.65 \text{ nK}$$

Spinová magnetická susceptibilita monokrystalu rhodia

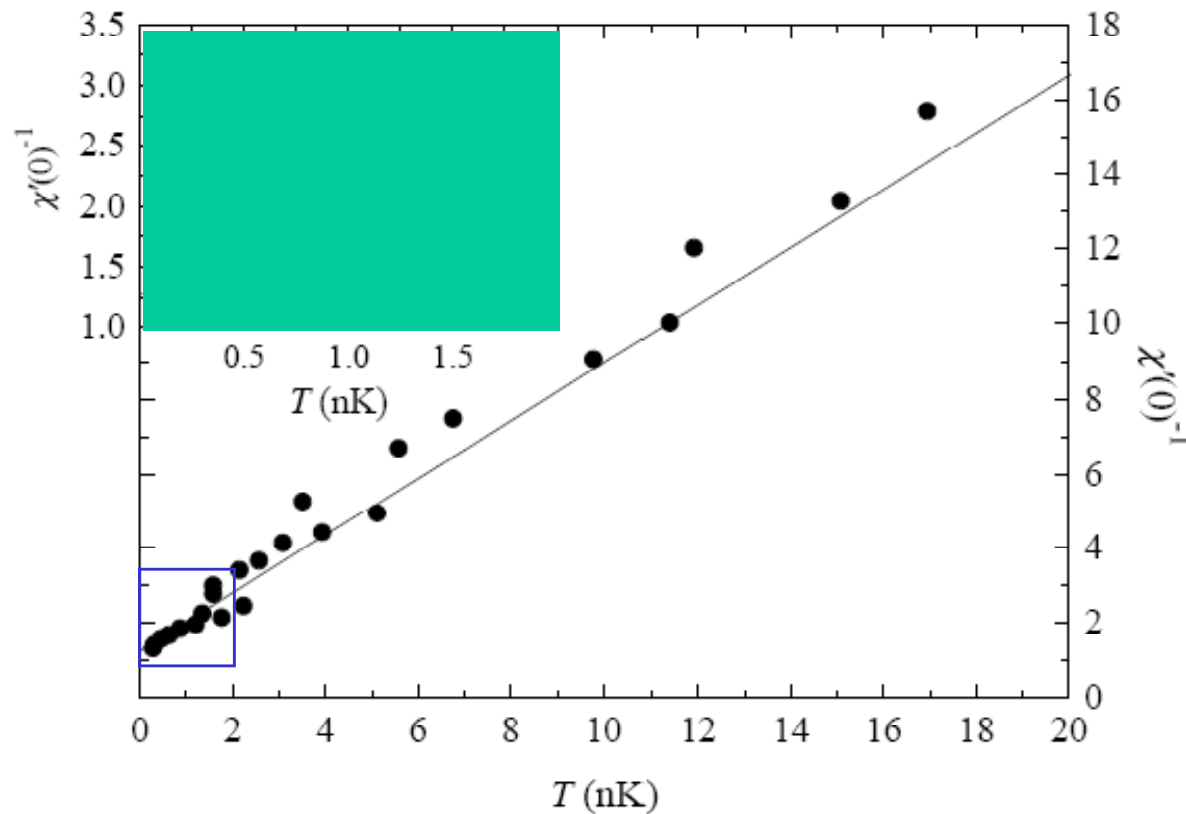


paramagnet (nezávislé spiny)

$$\chi'(0) = \frac{\lambda}{T - \theta},$$

$$\theta = -1.65 \text{ nK}$$

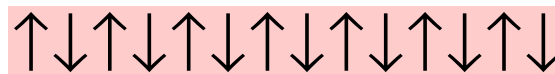
Spinová magnetická susceptibilita monokrystalu rhodia



$$\chi'(0) = \frac{\lambda}{T - \theta},$$

$$\theta = -1.65 \text{ nK}$$

Curie-Weissův zákon jaderné spiny v rhodiu ... antiferomagnetické uspořádání



Spinová magnetická susceptibilita monokrystalu rhodia

V těchto extrémních podmínkách

- vzorek je ovládán prostřednictvím spinů, na které působí magnetické pole
- sám vzorek (jeho spinový podsystem) působí jako chladicí medium
- měření pomocí nízkofrekvenční NMR udává susceptibilitu i statickou limitu (polarisaci)
- primární veličinou je právě *polarisace*, s níž přímo souvisí *entropie* vzorku jako základní termodynamická veličina
- *teplota* je odvozena z reakce na tepelné pulsy podle schematu:

atomová polarisace $\propto \mu_J p$ je skutečně měřena

jaderný spin pro rhodium $I = \frac{1}{2} \Rightarrow p = w_{\uparrow} - w_{\downarrow}; \quad w_{\uparrow} + w_{\downarrow} = 1$

entropie na spin přímo z definice

$$\frac{S}{R} = -\frac{1+p}{2} \ln \frac{1+p}{2} - \frac{1-p}{2} \ln \frac{1-p}{2}$$

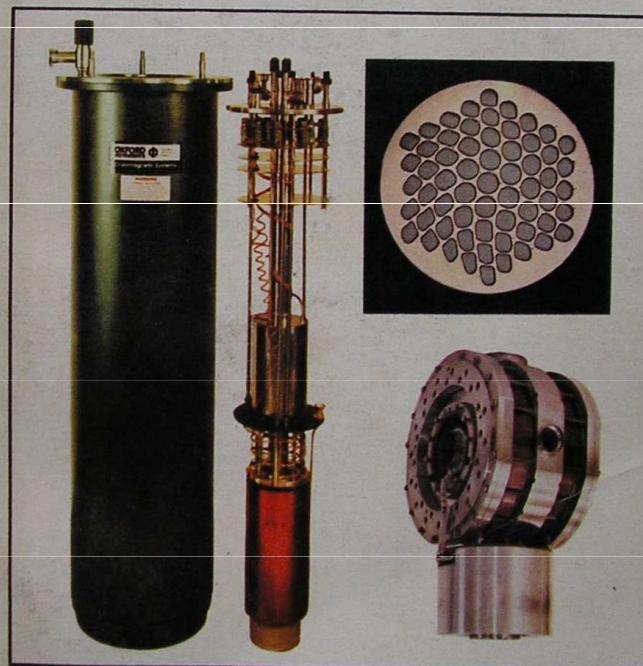
teplota podle základní termodynamické identity $\Delta Q = T \Delta S$

MILAN ODEHNAL

Supravodivost
a jiné
kvantové
jevy

CV

CESTA
K VĚDĚNÍ



Laserové chlazení atomů

Výklad pana Příbyla

*(pro pohodlí jsou příslušné folie
s růžovým pozadím vloženy)*

Laserové chlazení atomů



Myšlenka laserového chlazení



**Theodor W. Hänsch a Arthur L. Schawlow
na Stanfordově univerzitě.**

Theodor W. Hänsch a Arthur Leonard Schawlow



(n.1941)



(1921-1999)

Držitelé NP - Schawlow (1981) $\frac{1}{4}$ za práci na vývoji laseru a laserové spektroskopie

- Hänsch (2001) $\frac{1}{4}$ za příspěvek k vývoji přesných měřících metod založených na laserové spektroskopii a za objev metody optického frekvenčního hřebenu.

1970 – nový typ laseru emitující fotony s extrémně vysokým spektrálním rozlišením, což umožnilo velmi přesné měření frekvencí přechodu v Balmerově sérii a později po zdokonalení metody i frekvenční přechody v Lymanově sérii

1974 - myšlenka laserového chlazení atomárních plynů pro zvýšení interakční doby vodíkových atomů s laserovým paprskem, trvá dalších deset let do realizace

1975 - Hans Dehmelt a David Wineland navrhnou příbuznou metodu laserového chlazení uvězněných iontů, v roce 1978 předvedeno skupinou Petera Toscheka (mj. Hänschův školitel)



The Nobel Prize in Physics 1997

"for development of methods to cool and trap atoms with laser light"



Steven Chu

🕒 1/3 of the prize

USA

Stanford University
Stanford, CA, USA

b. 1948



**Claude
Cohen-Tannoudji**

🕒 1/3 of the prize

France

Collège de France; École
Normale Supérieure
Paris, France

b. 1933
(in Constantine, Algeria)



William D. Phillips

🕒 1/3 of the prize

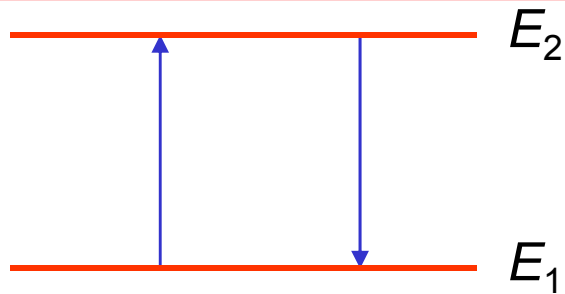
USA

National Institute of
Standards and
Technology
Gaithersburg, MD, USA

b. 1948

Titles, data and places given above refer to the time of the award.
Photos: Copyright © The Nobel Foundation

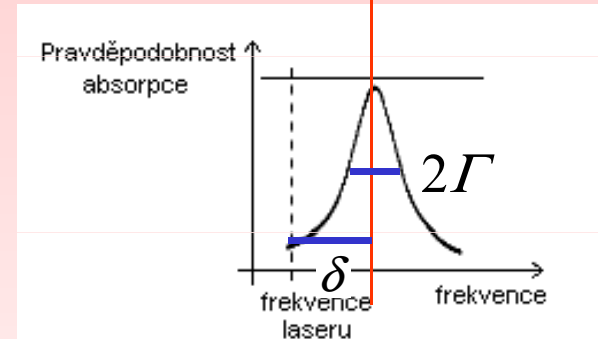
Princip laserového chlazení 1. Dopplerův jev



atom může absorbovat s menší pravděpodobností i fotony o trochu jiné frekvenci

podmínka pohlcení (vyzáření) fotonu o určité energii

$$E_2 - E_1 = \hbar\omega_0 \quad (= \hbar\omega_{D_2})$$



Dopplerův jev →

frekvence laseru nižší než Bohrova frekvence stojícího atomu

→

atomy pohybující se proti laseru absorbují silně
po laseru absorbují slabě

kruhává frekvence

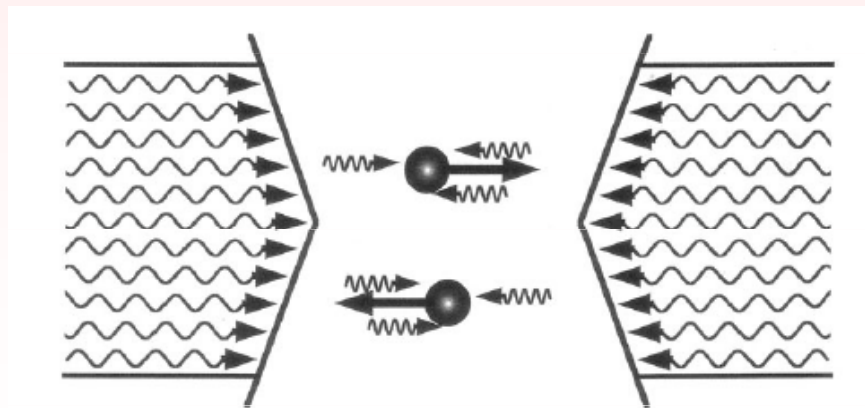


Figure 12. Doppler cooling in one dimension.

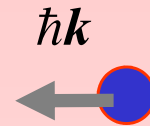
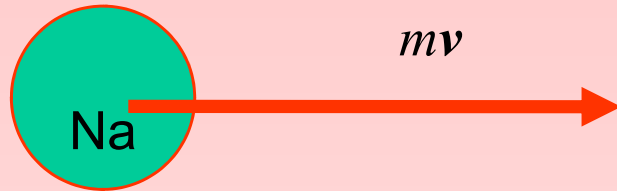
teplota Dopplerovského chlazení

$$m \langle v_i^2 \rangle = k_B T = \frac{\hbar\Gamma}{4} \left(\frac{\Gamma}{2\delta} + \frac{2\delta}{\Gamma} \right)$$

$$k_B T_{\text{Dopp}} = \frac{\hbar\Gamma}{2}$$

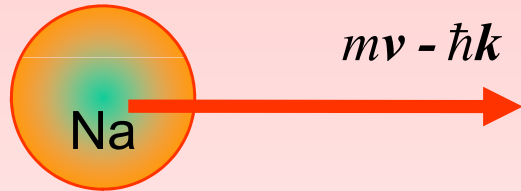
„životnost“ excitovaného stavu

Princip laserového chlazení 2. Brzdění atomů

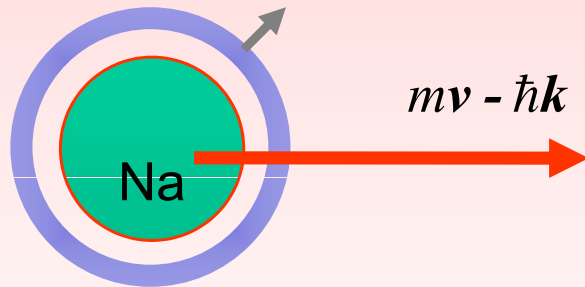


$$k = \omega_{D_2} / c$$

podmínka absorpce

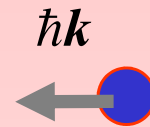


excitovaný atom,
zmenšená hybnost



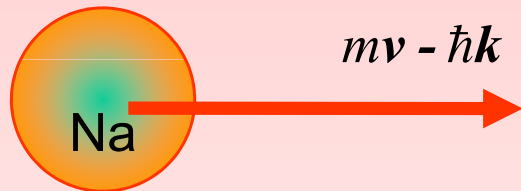
spontánní emisí se atom
deexcituje, foton je v průměru
emitován všemi směry

Princip laserového chlazení 3. *Optimalisace brzdění*

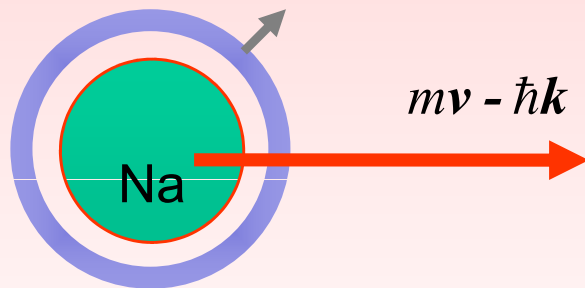


$$k = \omega_{D_2} / c$$

podmínka absorpce



excitovaný atom,
zmenšená hybnost



spontánní emisí se atom
deexcituje, foton je v průměru
emitován všemi směry

Zpomalované atomy přestávají rezonovat s laserovým paprskem

DVOJÍ MOŽNÁ ODPOMOC

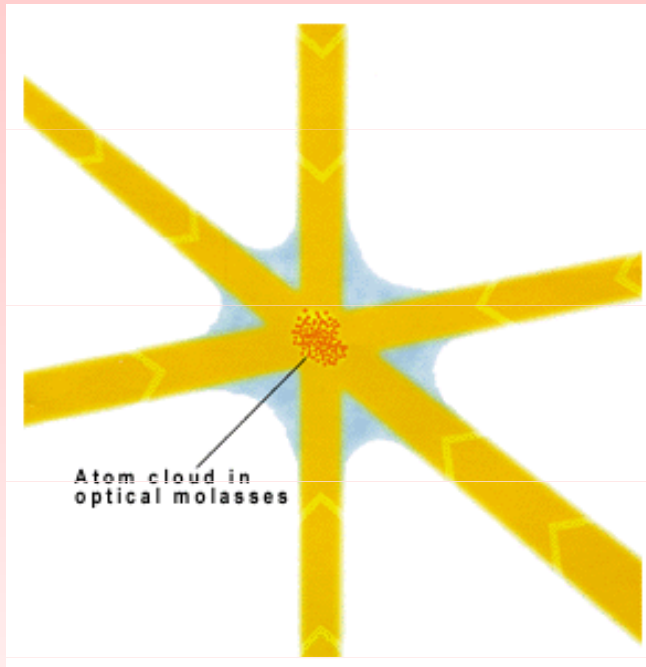
- změnou frekvence laseru zachováme rezonanci s atomy

Chirped laser cooling

- změníme rezonanční frekvenci atomů při zachování frekvence laseru

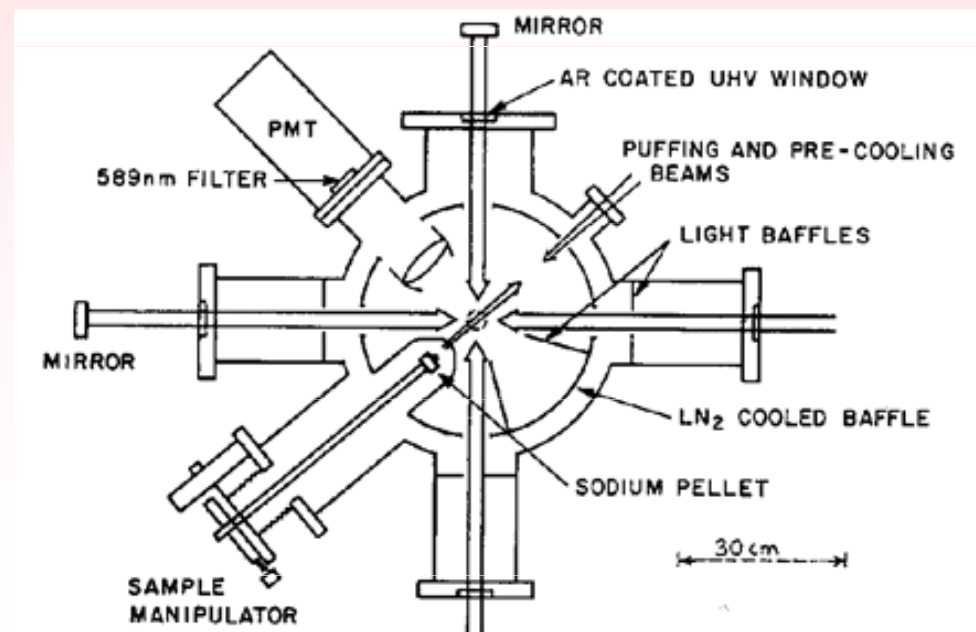
Zeeman laser cooling

3D chlazení a optický sirup



Steven Chu v roce 1985 použil tři dvojice laserových paprsků (tj. 3D realizace chlazení) ke zpomalení atomu sodíku

V průsečíku se atomy chovají jako v husté tekutině, odtud název „**optický sirup**“



Realizace

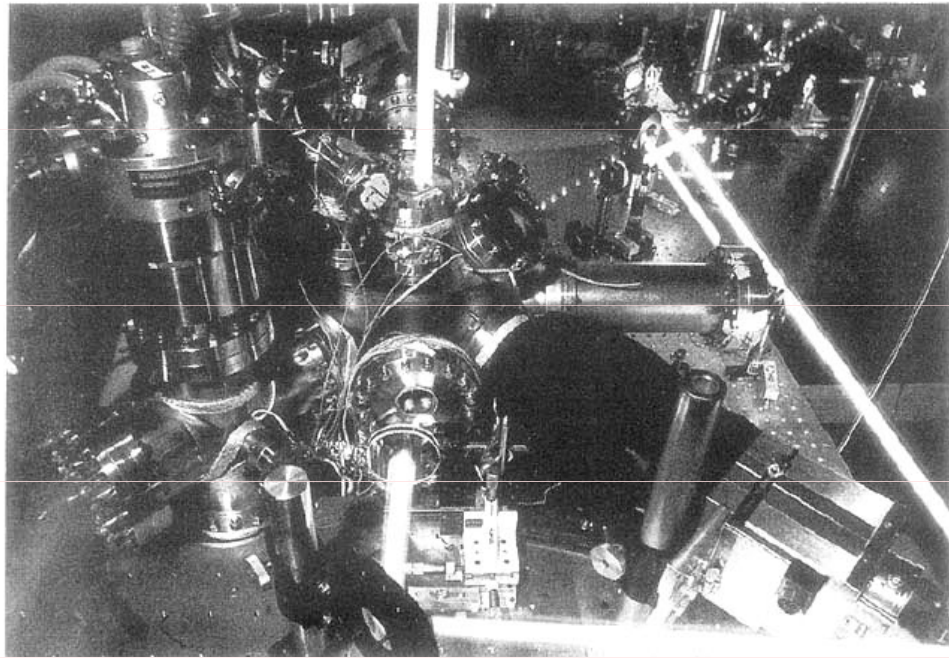


Figure 3 a. A photograph of the apparatus used to demonstrate optical molasses and the first optical trap for atoms. The photograph is a double exposure made by photographing the apparatus under normal lighting conditions and then photographing the laser beams by moving a white card along the beam path in a darkened room. The 10 Hz pulsed laser used to evaporate the sodium pellet (doubled YAG at 532nm) appears as dots of light.

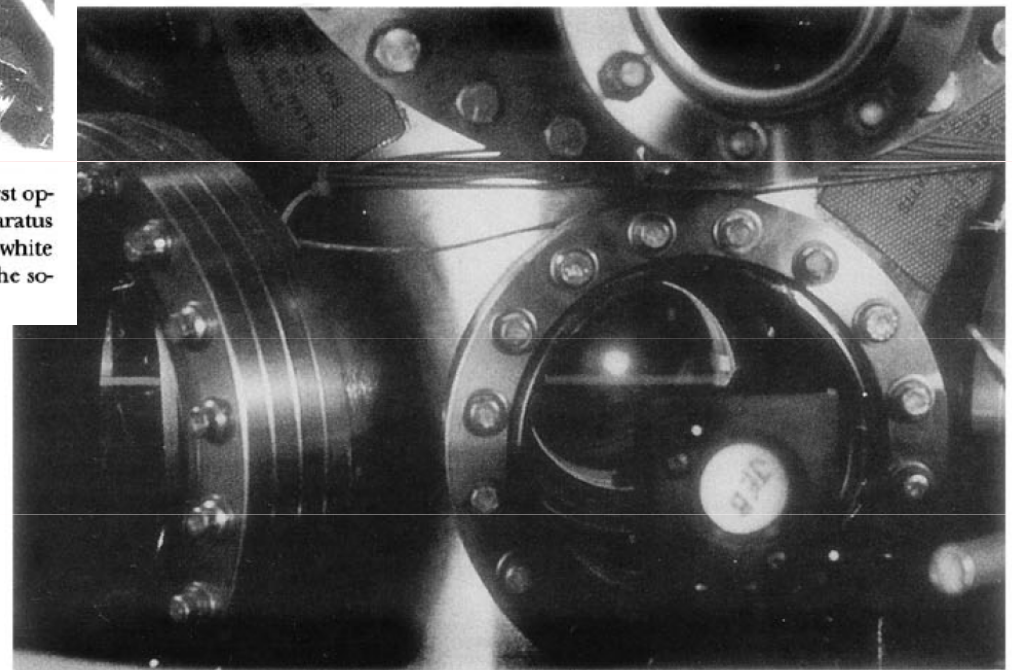
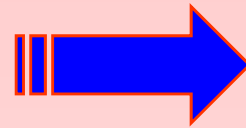


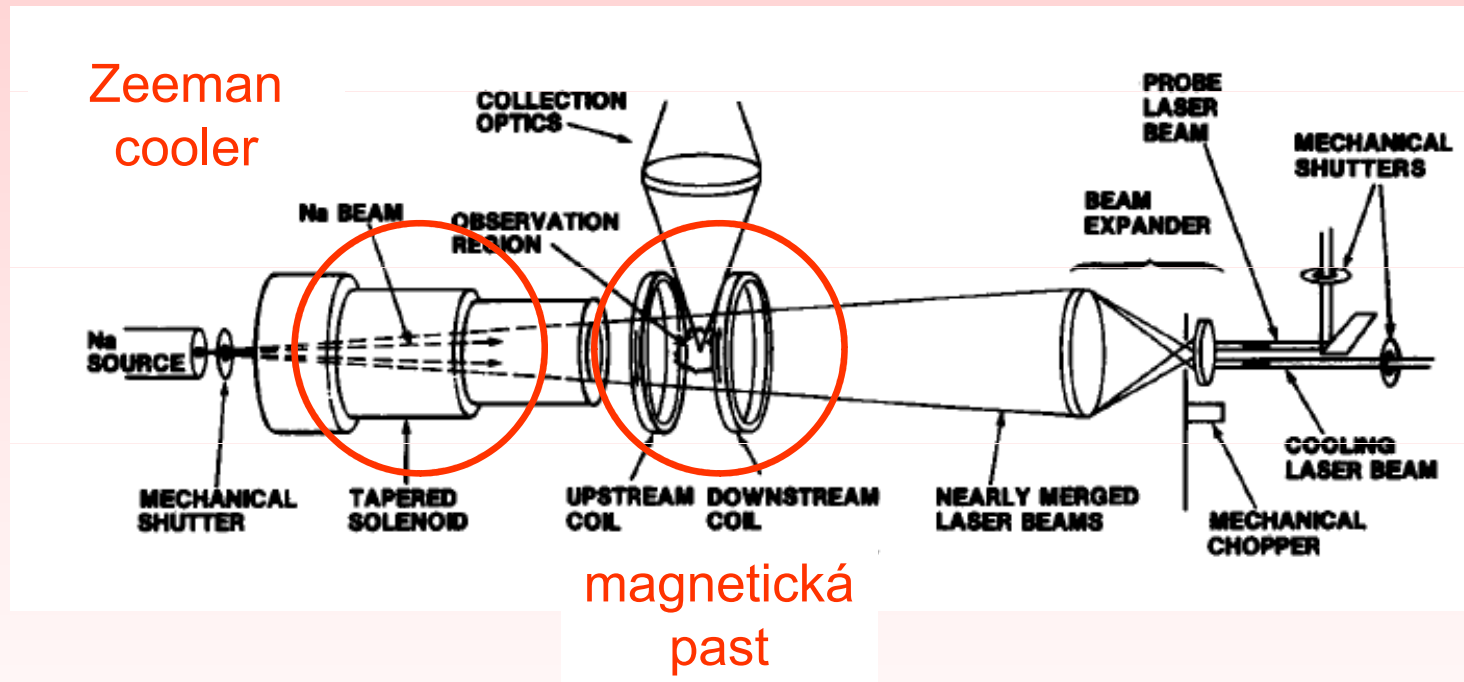
Figure 5 b. A photograph of atoms confined in a magneto-optic trap. The line of fluorescence below the ball of trapped atoms is due to the atomic beam used to load the trap.

Magnetické pasti

William D. Phillips užívá
nehomogenního
magnetického pole



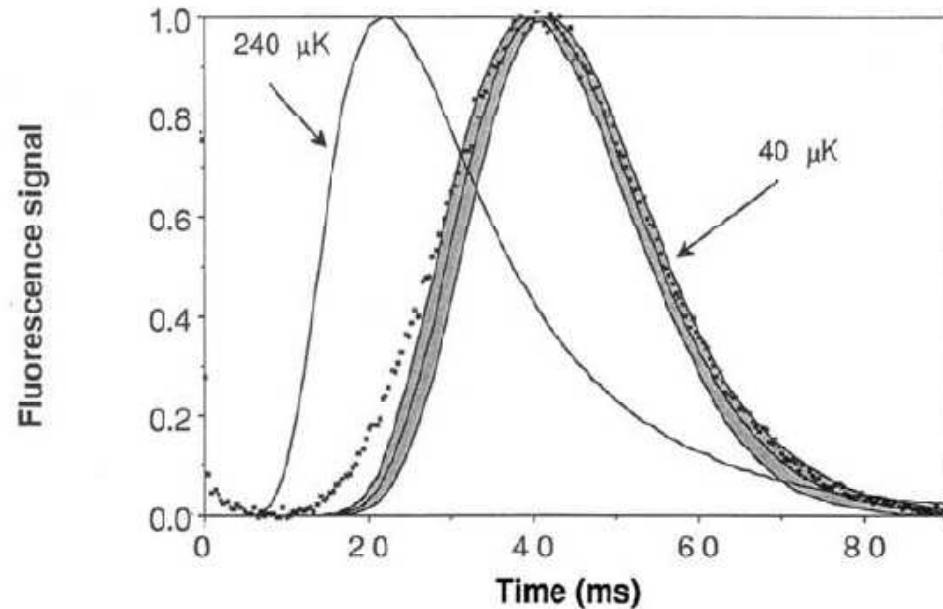
atomy lze chytat (většina
atomů se chová jako malý
magnet)



Zpomalené atomy doletěly do pasti a tam zastaveny dodatečným pulsem

užívají metody fontány (fountain) a sprchy (shower) k určení
teploty zachycených atomů

Phillipsovy výsledky



atomy jsou ve skutečnosti
studenější
(přibližně 40 μK)

X

Dopplerovský model připouští
240 μK

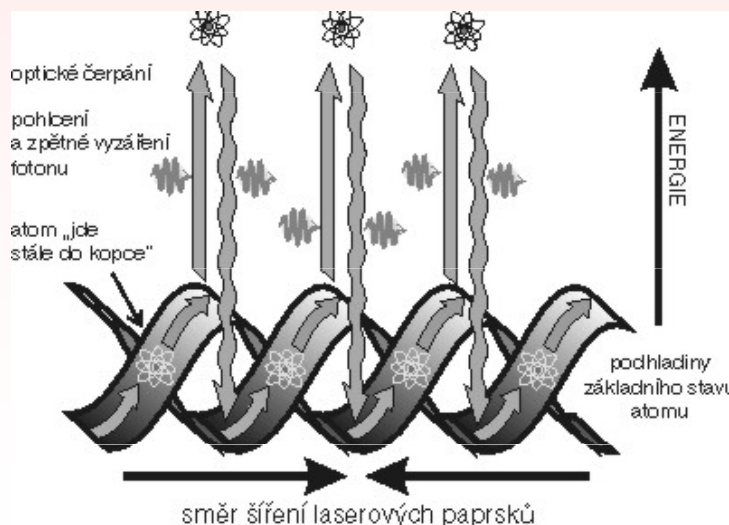
$$k_B T_{\text{Dopp}} = \frac{\hbar \Gamma}{2}$$

atomy Na

$$\Gamma/2\pi = 10 \text{ MHz}$$

odpovídá 30 cm/s podél dané osy

Cohen-Tannoudji přichází s mechanismem dodatečného tzv. **Sisyfova chlazení** (polarization gradient cooling)



v úvahu je totiž třeba brát všechny relevantní energetické hladiny příslušného atomu (včetně takzvané hyperjemné struktury)

další model chlazení uvažuje tzv. **temné stavy**, tj. situace, kdy je zabráněno ochlazenému atomu absorbovat a emitovat fotony

Užitečnost laserového chlazení

- delší pozorovací doba umožňuje lepší zkoumaní (spektroskopie)
- vytvoření a studium Boseova-Einsteinova kondenzátu plynů
- atomový laser (Wolfgang Ketterle, 1996)
- atomové hodiny s vysokou přesností (navigace)
- litografie (mikroelektrické součástky)

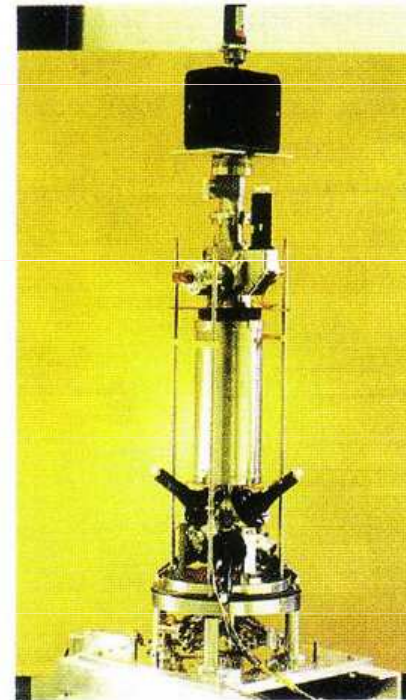
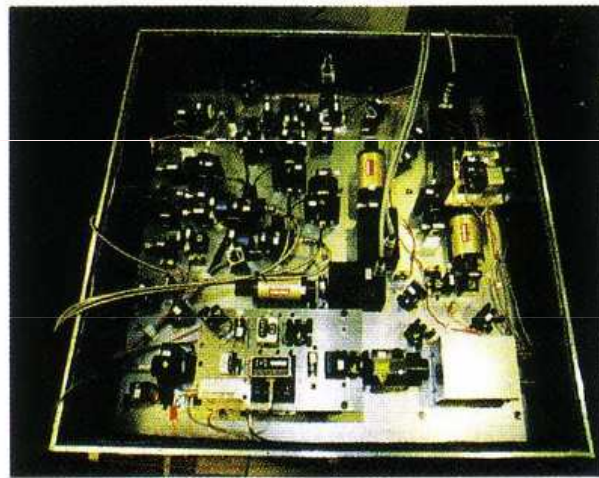
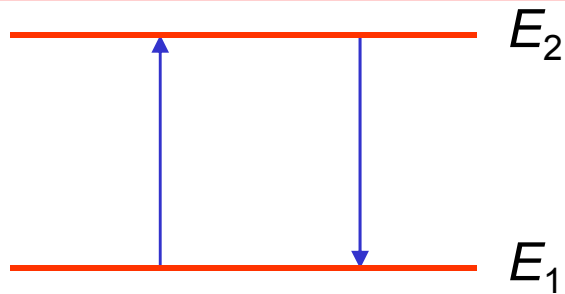


Figure 11. The microgravity clock prototype. The left part is the 60 cm × 60 cm × 15 cm optical bench containing the diode laser sources and the various optical components. The right part is the clock itself (about one meter long) containing the optical molasses, the microwave cavity and the detection region.

The end

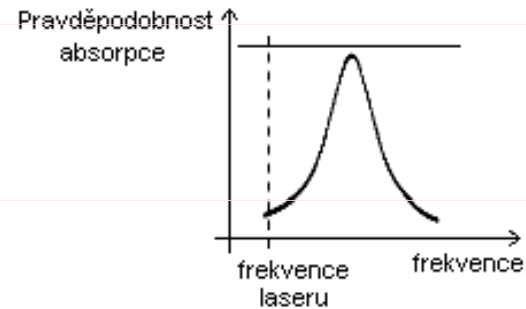
Princip



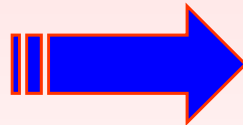
atom může absorbovat s menší pravděpodobností i fotony o trochu jiné frekvenci

podmínka pohlcení (vyzáření) fotonu o určité energii

$$E_2 - E_1 = h f$$



Dopplerův jev



nižší frekvence laseru než frekvence pohlcovaná atomem



atomy pohybující se proti laseru mohou absorbovat fotony

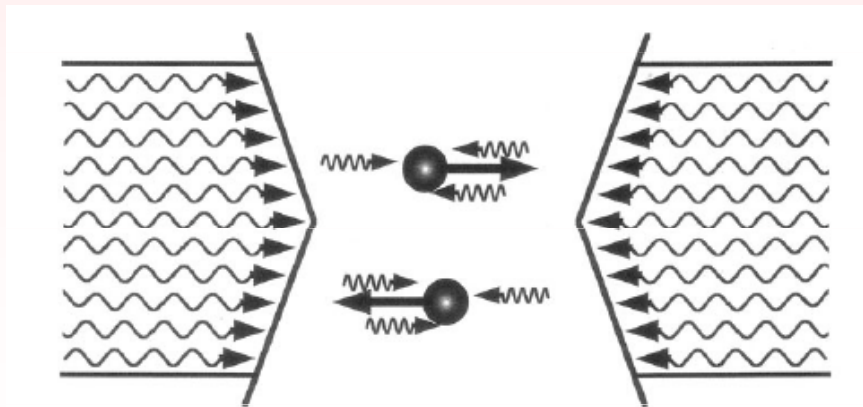


Figure 12. Doppler cooling in one dimension.

teplota Dopplerovského chlazení

$$m \langle v_i^2 \rangle = k_B T = \frac{\hbar \Gamma}{4} \left(\frac{\Gamma}{2\delta} + \frac{2\delta}{\Gamma} \right)$$

$$k_B T_{\text{Dopp}} = \frac{\hbar \Gamma}{2}$$

kruhová frekvence

„životnost“ excitovaného stavu

Aparát

Experimental Apparatus for Yb Magneto-Optical Trap

University of Washington

