

F4110
Kvantová fyzika atomárních soustav
letní semestr 2009 - 2010

XII.
Nízké teploty

KOTLÁŘSKÁ 12. KVĚTNA 2010

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 transitivity teploty pro tělesa v kontaktu (vzájemné tepelné rovnováze)

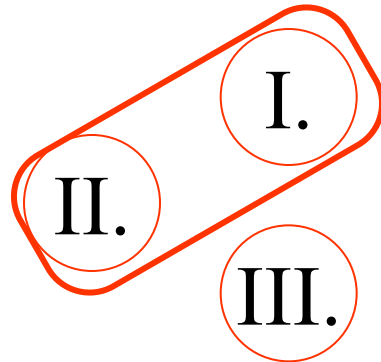
Existence absolutní nuly

- 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 transitivity teploty pro tělesa v kontaktu (vzájemné tepelné rovnováze)



$$T_I = T_{II}$$

Teploměrná látka
Systém I.
(ideální plyn)

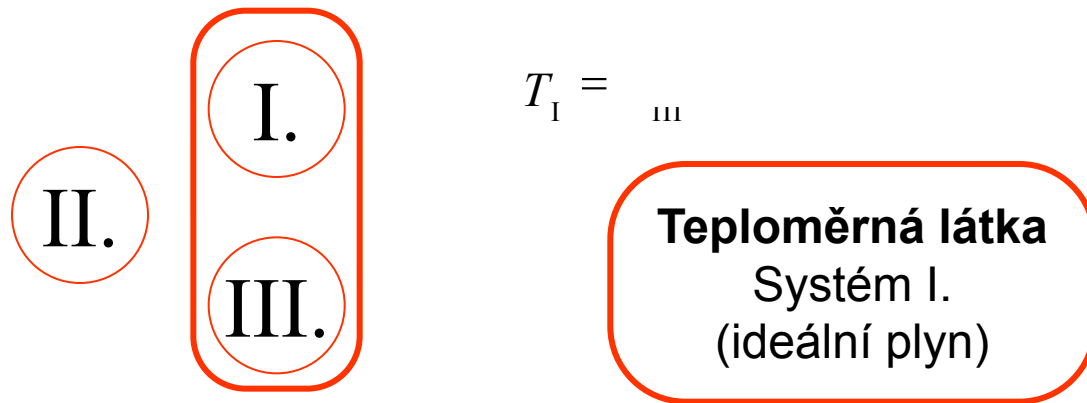
Existence absolutní nuly

- 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 rovnováze)



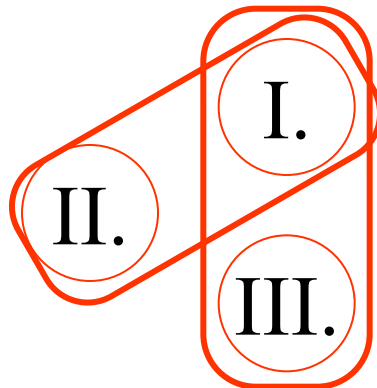
Existence absolutní nuly

- 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)



$$T_I = T_{III} \text{ a } T_I = T_{II} \Rightarrow T_{II} = T_{III}$$

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

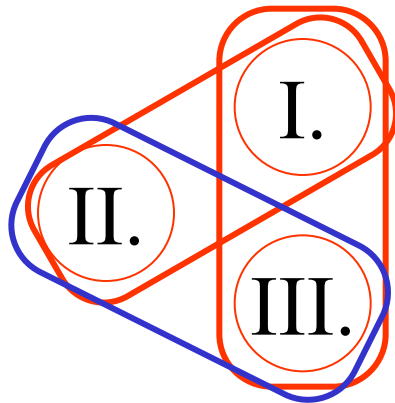
Existence absolutní nuly

- 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)



$$T_I = T_{III} \text{ a } T_I = T_{II} \Rightarrow T_{II} = T_{III}$$

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

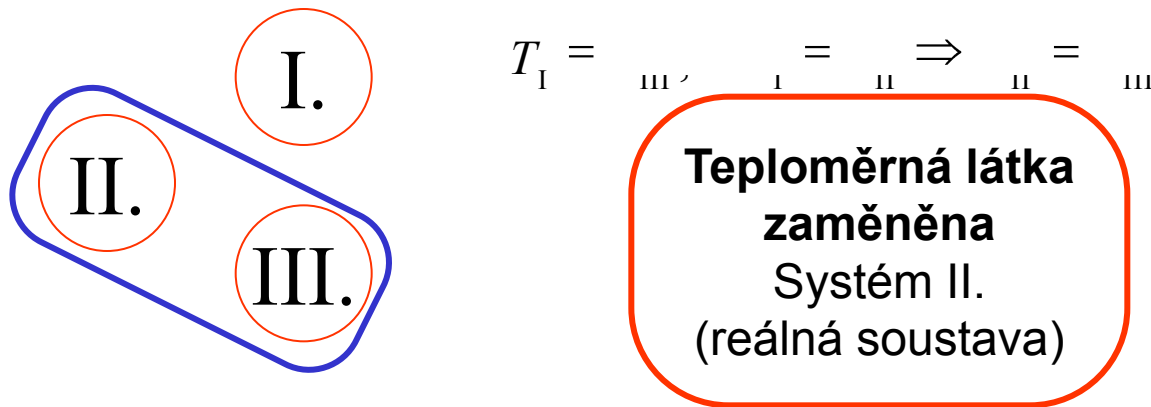
Existence absolutní nuly

- 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)



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 transitivity teploty pro tělesa v kontaktu (vzájemné tepelné rovnováze)
- Absolutní nula není dostižitelná konečným procesem (3. zákon termodyn.)

$$S \rightarrow \dots \rightarrow v \rightarrow \dots \rightarrow \dots \rightarrow \dots \rightarrow$$

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.**)

$$S \rightarrow \dots \rightarrow \dots \rightarrow \dots \rightarrow$$

- 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

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

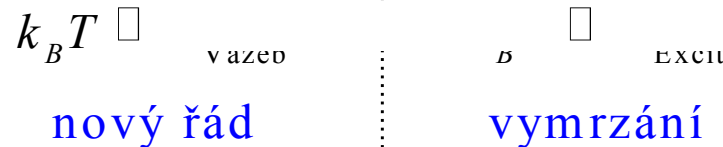
a podmínkou nulové kinetické energie.

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



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

Porovnat teplotu s charakteristickými energiemi



Teploty ve vesmíru

Stupnice	nitra hvězd	$10^6 - 10^8$ K
	hvězdné atmosféry	$10^3 - 10^4$ K
	kometry, 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
	kometry, planety ...	$10^1 - 10^2$ K
	
	reliktní záření jako minimum	$\sim 2,72$ K
	mlhovina Bumerang (suhvězdí 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 <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
0,3	odsávané helium
mK	1933 paramagn. demagnet. 1951 <i>H. London</i> rozpouštěcí refrigerátor
μK	1956 <i>Kurti</i> NDR (jaderná ...) 1985 <i>Hänsch</i> 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.)
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	1947 <i>Bogoljubov</i> teorie supratekutost (mikrosk.) 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
μK	1956 <i>Kurti</i> NDR (jaderná ...) 1985 <i>Hänsch</i> laserové chlazení (princip)	1972 <i>Osheroff</i> supratekutost Helia-3	1947 <i>Bogoljubov</i> teorie supratekutosti
nK	o tom dnes	1986 <i>Müller a Bednorz</i> vysokoteplot. supravodivost	1956 <i>BCS</i> teorie supravodivosti
pK	rekord okolo 100 pK	1995 <i>Wieman, ... Ketterle</i> BEC v atomových parách	1975 <i>Leggett</i> teorie supratekutosti Helia-3

**Bardeen, Cooper a Schrieffer*

Naše hlavní téma *dnes* a *příště*

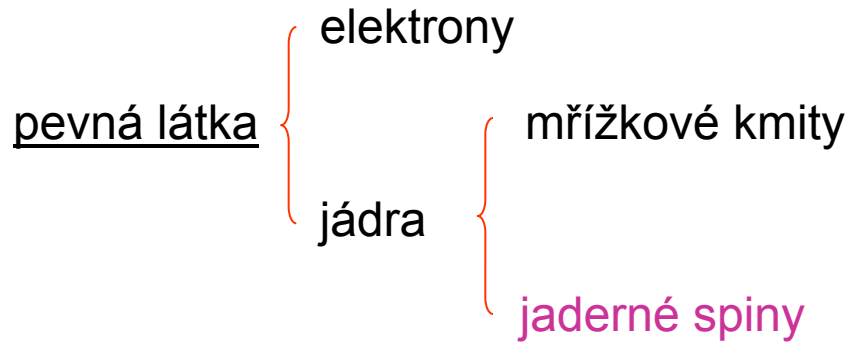
K	Teplotní rekordy	Objevy	Teorie
	1877 <i>Pictet</i> kapalný kyslík?		
77	1895 <i>von Linde</i> kap. vzduch		
22	1898 <i>Dewar</i> kapalný vodík		
	1905 <i>von Linde</i> kap. dusík		
4,2	1908 <i>Kamerlingh-Onnes</i> kapalné helium	1911 <i>Kamerlingh-Onnes</i> supravodivost kovů	
0,3	odsávané helium	odsávané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

**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		
		mřížkové kmity	T_L	τ_L	mřížková relax. doba
	jádra				τ_{LS}
		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		
		mřížkové kmity	T_L	τ_L	mřížková relax. doba
	jádra				τ_{LS}
		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

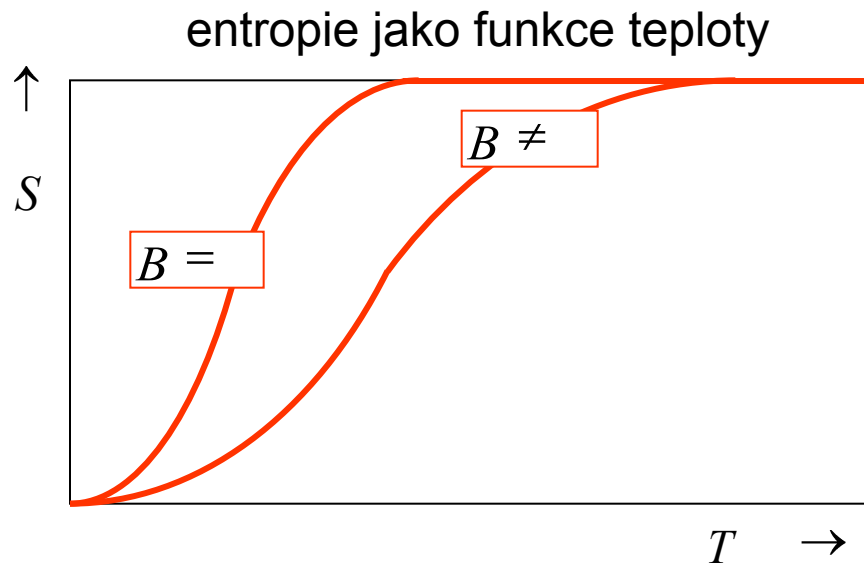
Spin-mřížková relaxace je pomalá!

Můžeme proto generovat nerovnovážnou velmi nízkou spinovou teplotu

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

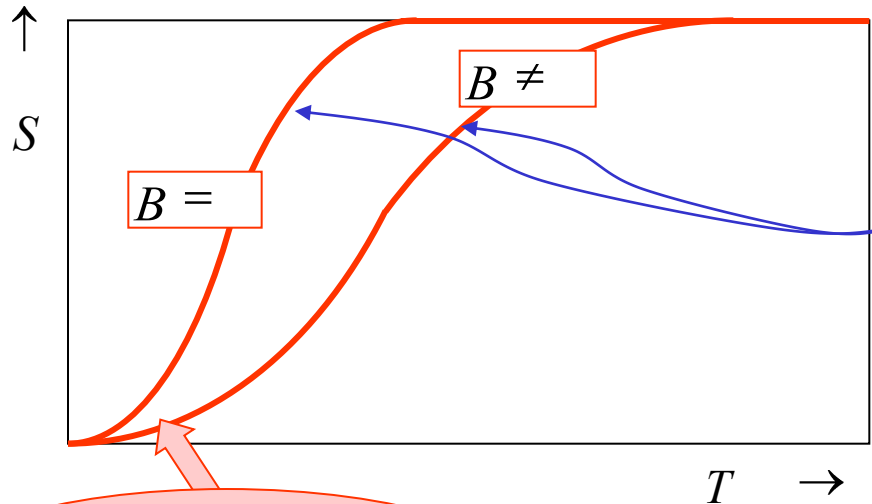
$$T_S \ll T_L$$

Princip chlazení jadernou adiabatickou demagnetisací



Princip chlazení jadernou adiabatickou demagnetisací

entropie jako funkce teploty



chování podle
3. zákona termodyn.

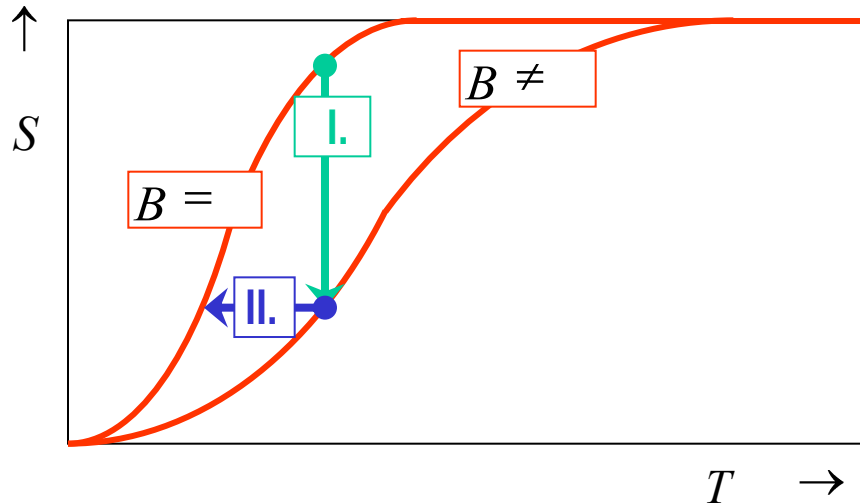
míra orientační neuspořádanosti

$$S \rightarrow -k_B \ln \Omega$$

$$S \approx -k_B \ln \left(\frac{2I + 1}{2} \right)^{N_A}$$

lokální pole jako
míra spinových
interakcí

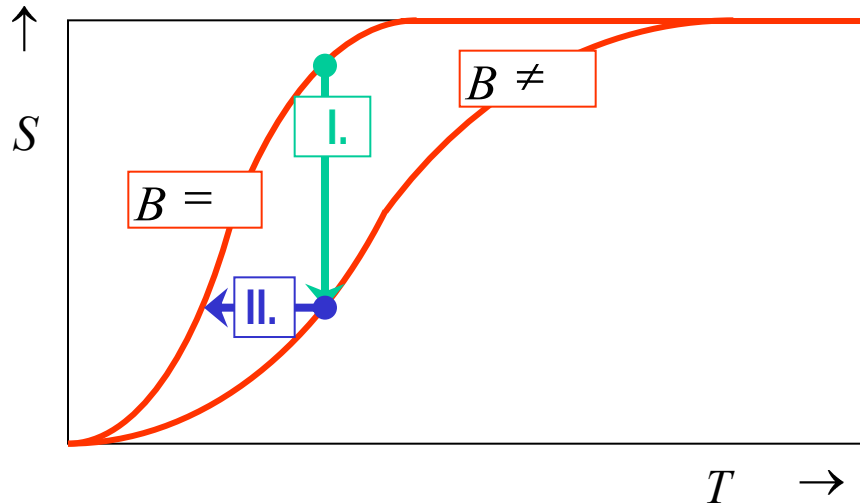
Princip chlazení jadernou adiabatickou demagnetisací



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



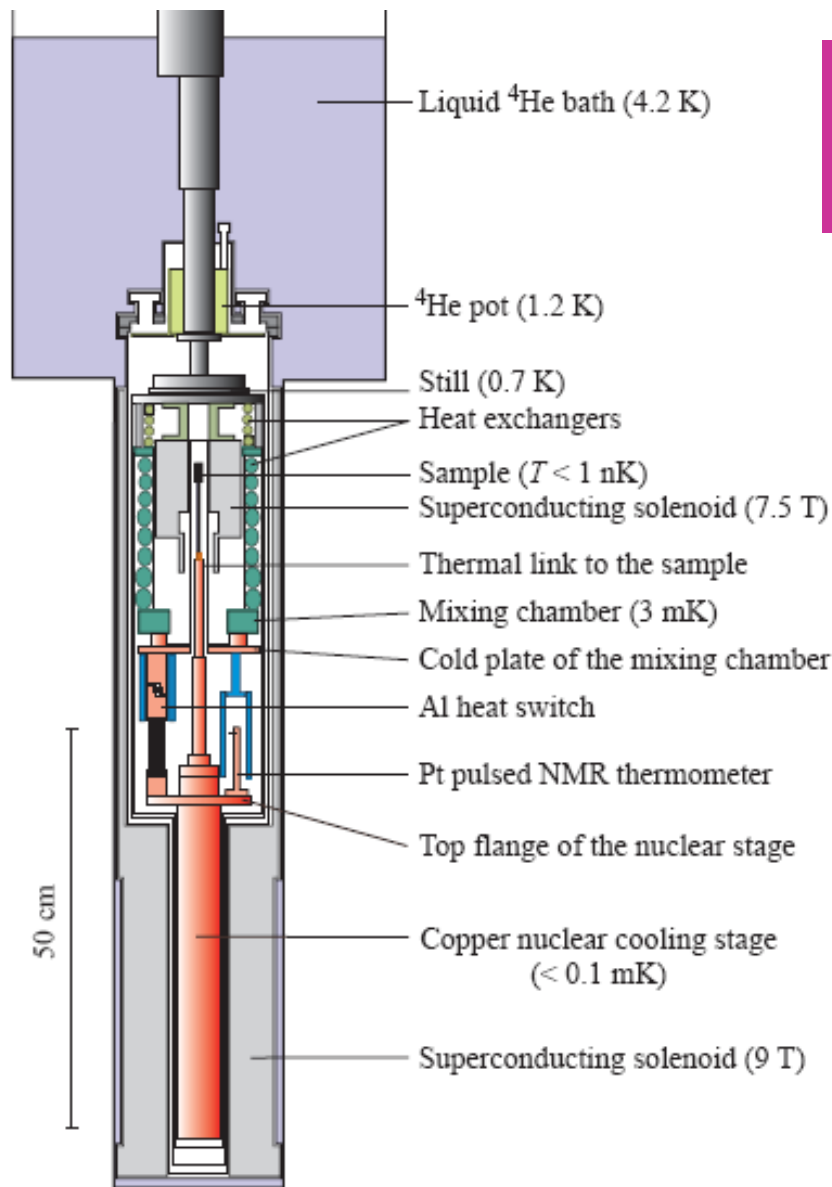
I. KROK *izotermická magnetizace*
 Entropie s magnetickým polem klesá
 ≡ snižuje se orientační neuspořádanost

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

"vysokoteplotní" vzorec

$$T_{\text{kon}} = T_{\text{zac}} \sqrt{\frac{B_{\text{zac}}^2 + \frac{n}{L}}{B^2 + \frac{n}{L}}}$$

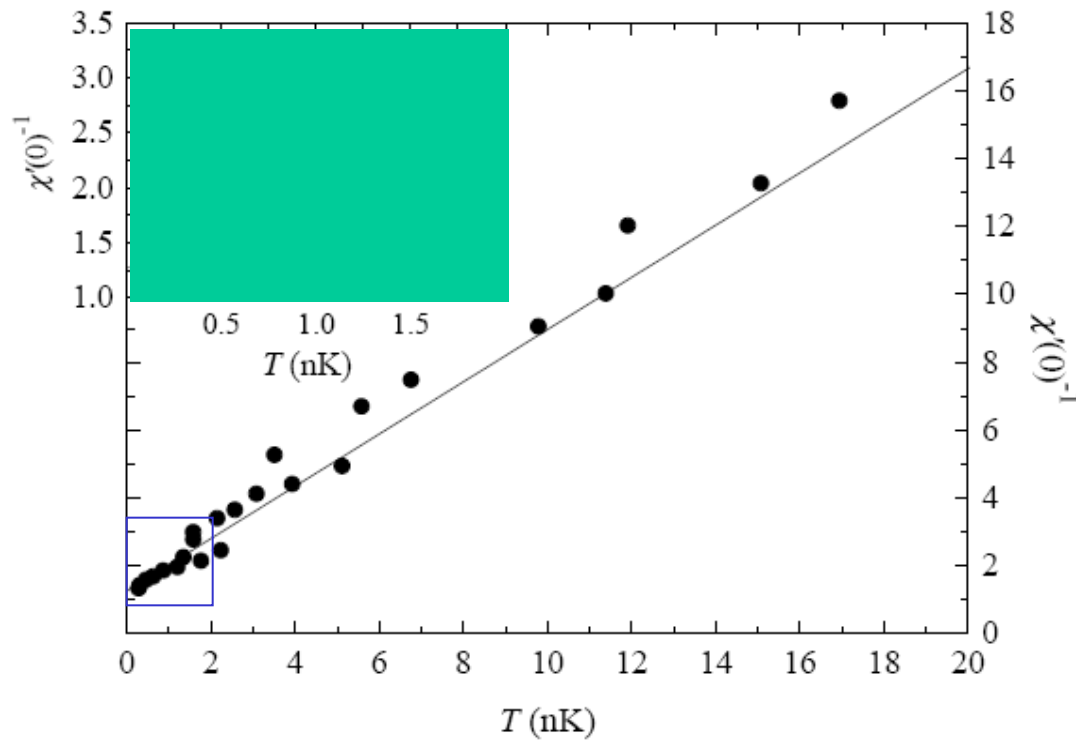
Kryostat, kde byla dosažena rekordní teplota 100 pK



Helsinki University of Technology
YKI, Low Temperature Group
2000

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

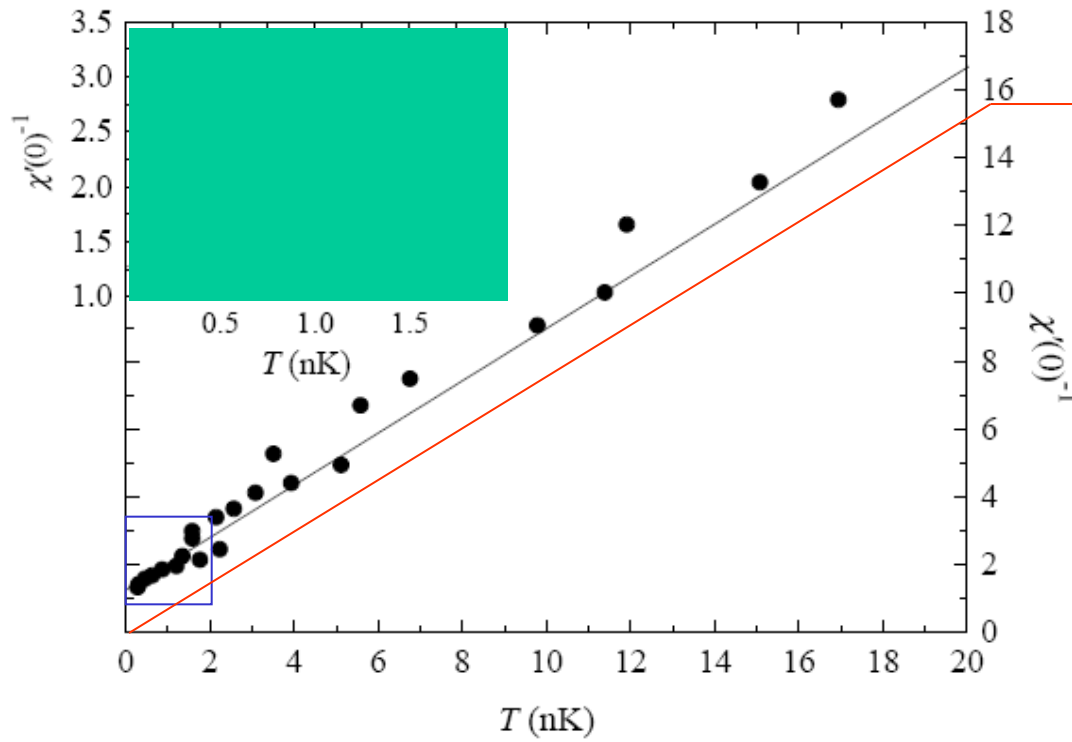
Spinová magnetická susceptibilita monokrystalu rhodia



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

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

Spinová magnetická susceptibilita monokrystalu rhodia

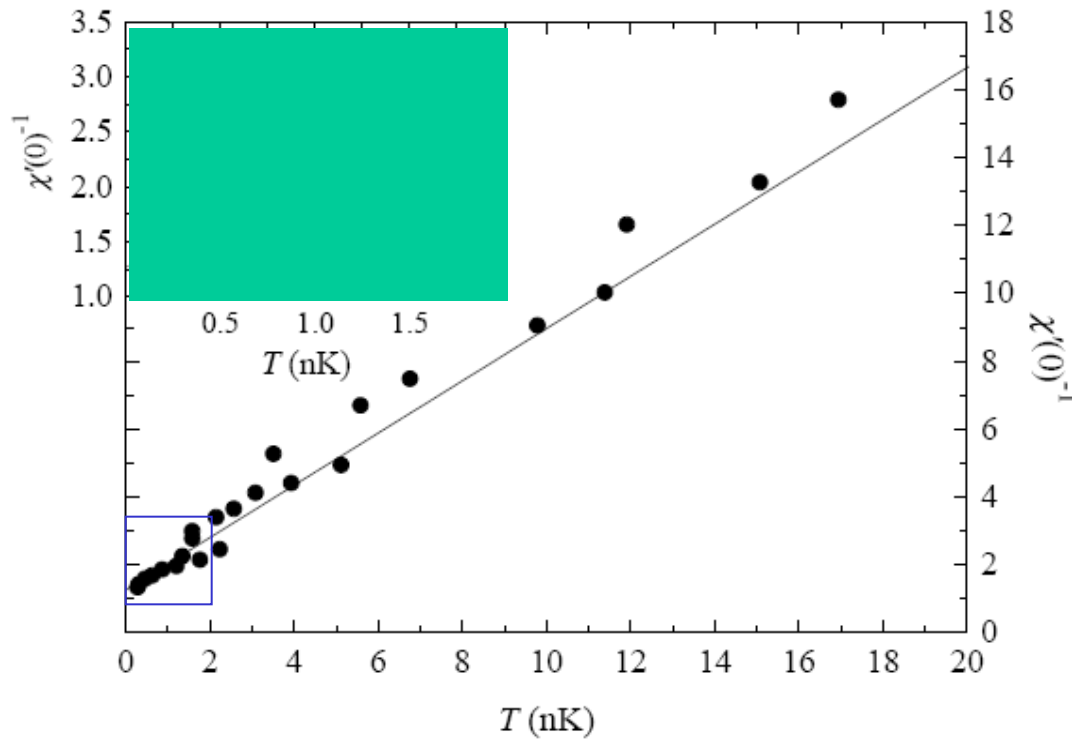


paramagnet (nezávislé spiny)

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

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

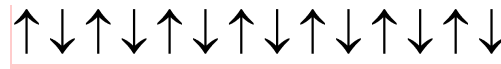
Spinová magnetická susceptibilita monokrystalu rhodia



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

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

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 $\propto \langle J_x \rangle$ itečně měřena

jaderný spin pro rhodium $I = \frac{1}{2}$ $\Rightarrow \uparrow = \downarrow$ $\uparrow = \downarrow$

entropie na spin přímo z definice

$$\frac{S}{R} = - \left[\frac{1}{2} \ln \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \ln \frac{1}{2} \right]$$

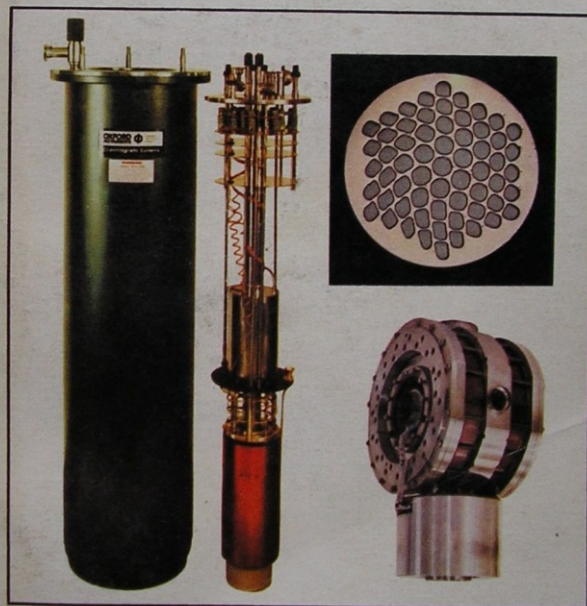
teplota podle základní termodynamické identity $\Delta \frac{1}{T} =$

MILAN ODEHNAL

Supravodivost
a jiné
kvantové
jevy

CV

CESTA
K VĚDĚNÍ



Laserové chlazení atomů

Nobeliste I.



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

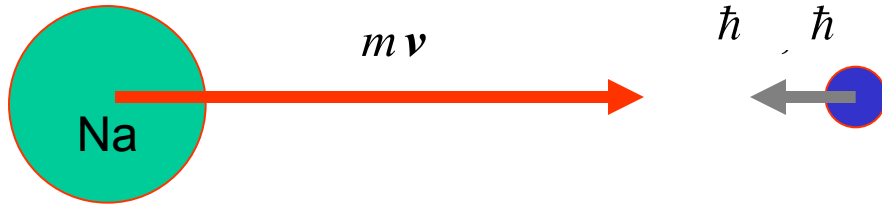
1/3 of the prize

USA

National Institute of
Standards and
Technology
Gaithersburg, MD,
USA

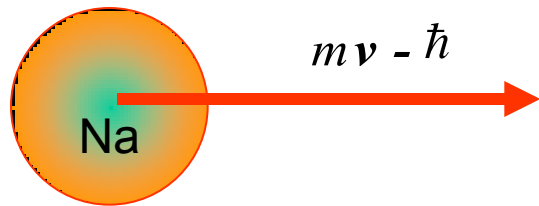
b. 1948

Jednoduché schema brzdění atomů

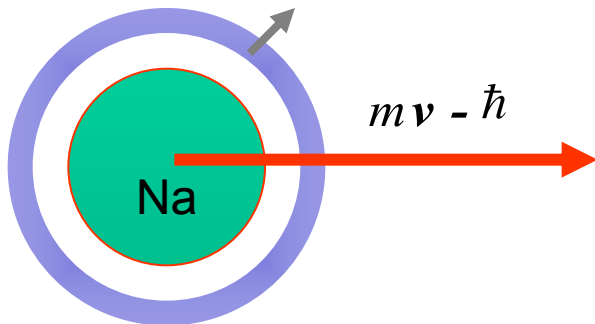


$$\omega = \nu_2 - \dots - \dots \text{úv posun}$$

podmínka absorpce

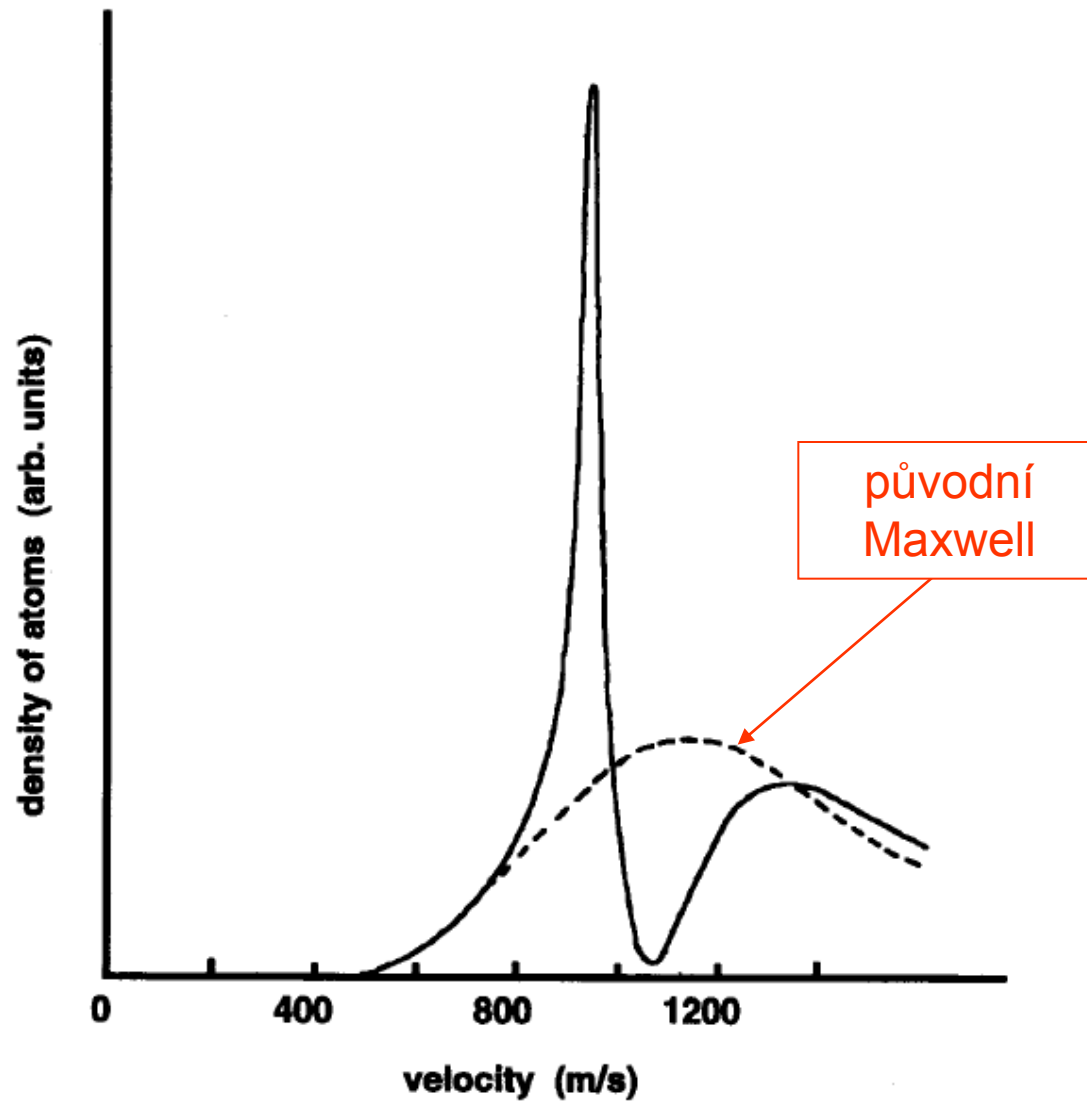


excitovaný atom,
zmenšená hybnost

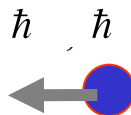


spontánní emisí se atom deexcituje,
foton je v průměru emitován všemi
směry

Rozdělení rychlostí po průchodu brzdícím svazkem

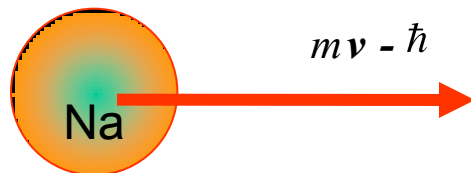


Jednoduché schema brzdění atomů

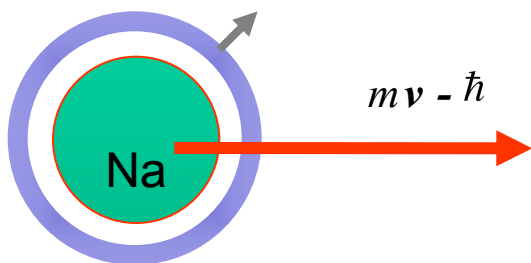


$$\omega = \nu_2 - \dots \dots \text{úv posun}$$

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

JE NUTNO PRŮBĚŽNĚ OBNOVOVAT NALADĚNÍ

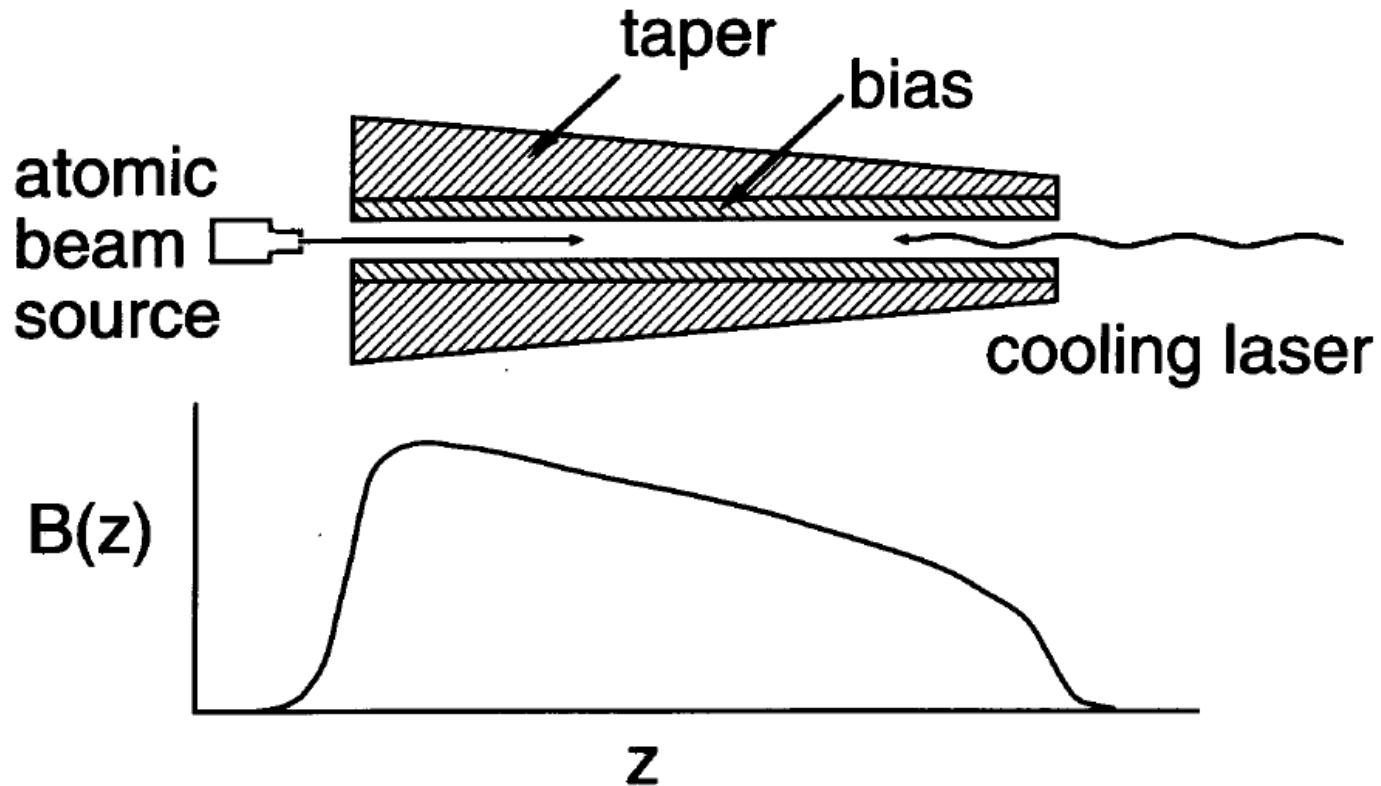
- změnou rezonanční frekvence atomů při zachování frekvence laseru

Zeeman laser cooling

- změnou frekvence laseru zachováme rezonanci s atomy

Chirped laser cooling 40

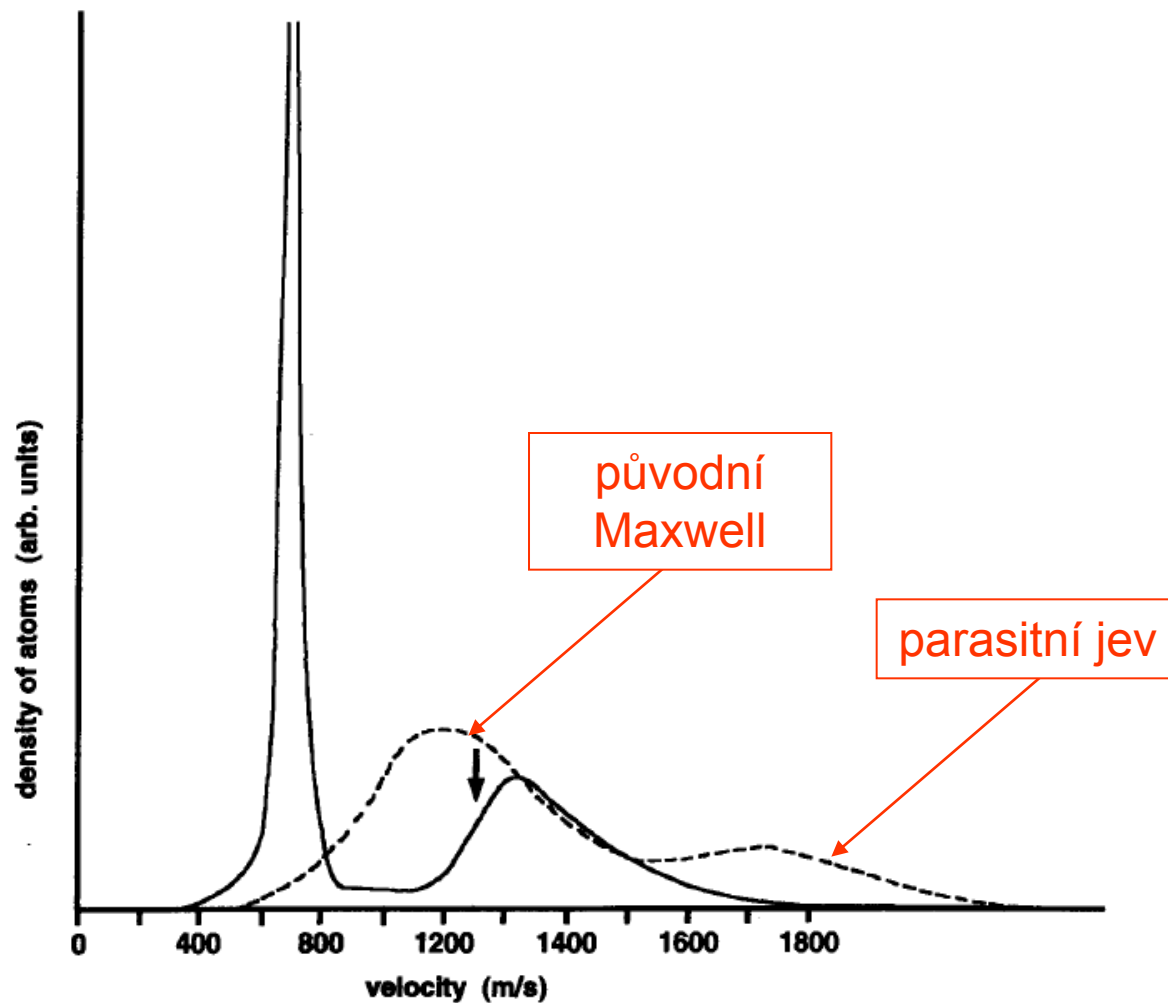
ladění pomocí Zeemanova jevu



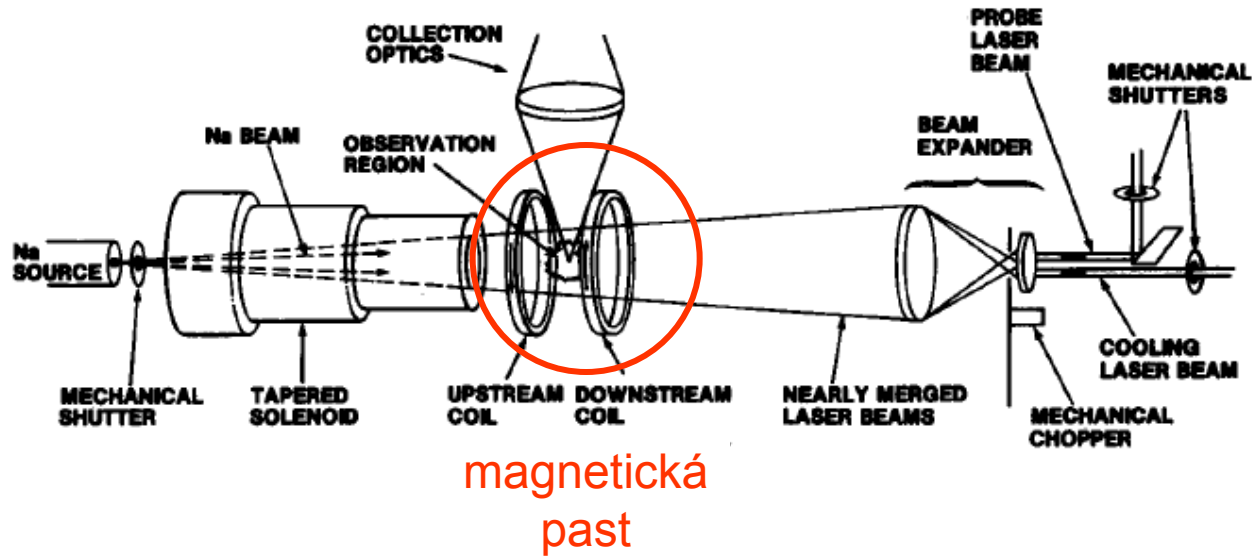
Zpomalený atom není již v resonanci (Dopplerův posun). Možno kompenzovat rozštěpením čar v magnetickém poli ... úměrno B

K tomu konický solenoid

Zlepšený brzdňný účinek

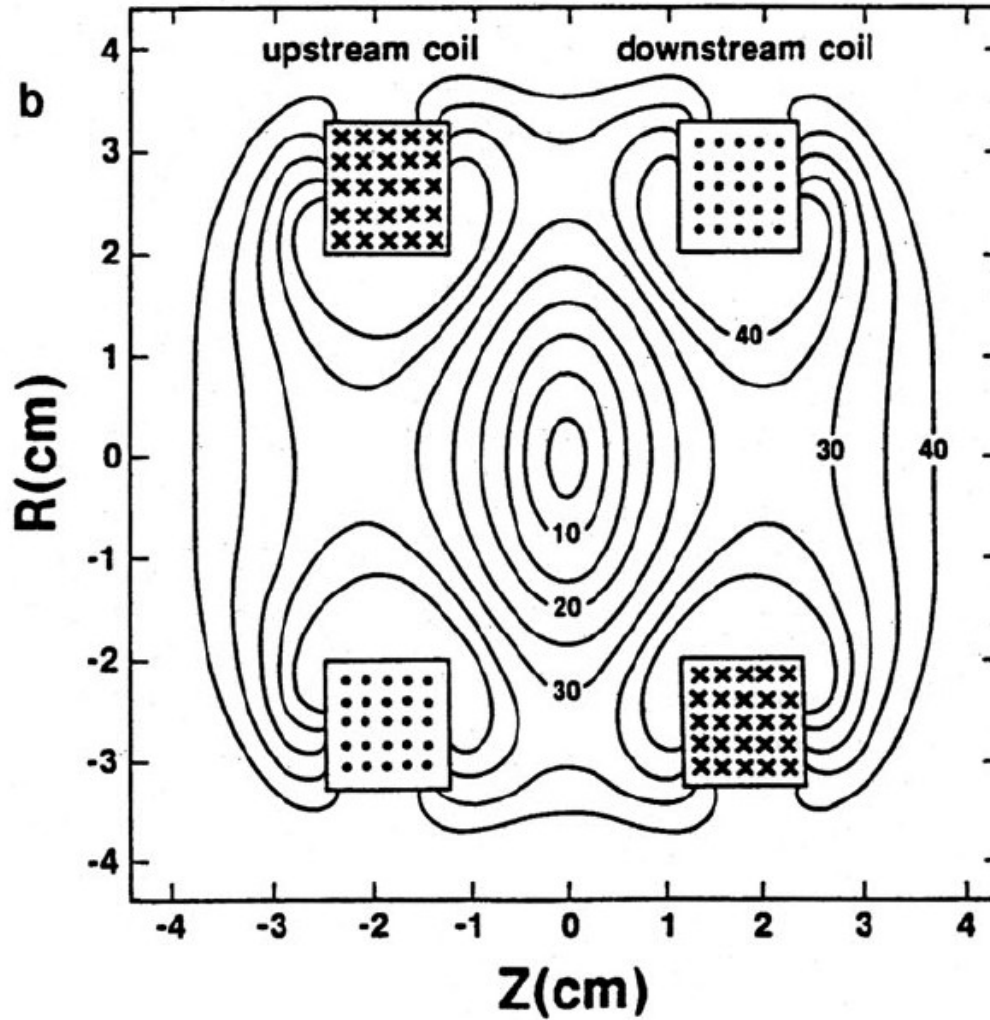


Aparatura podle W. Phillipse



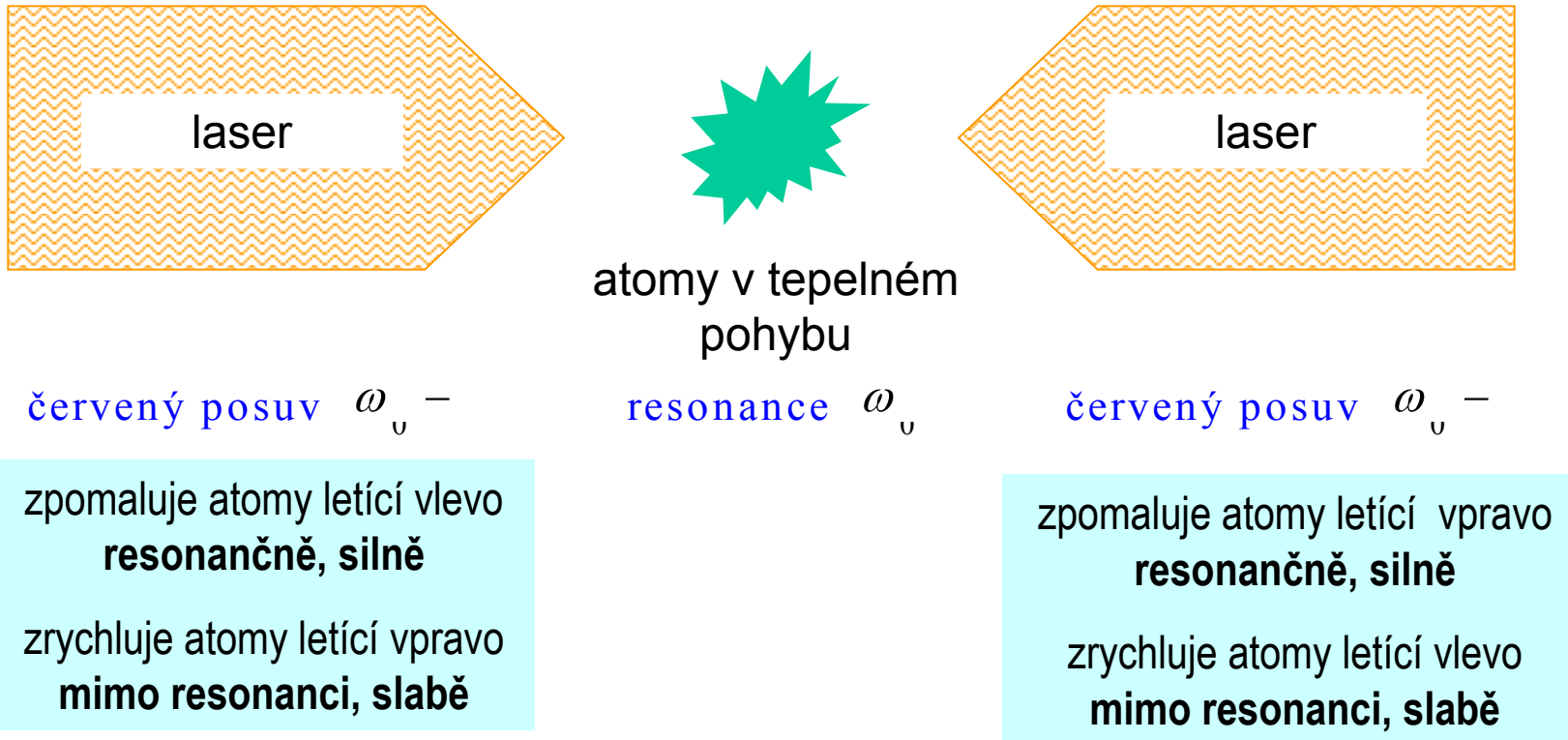
Zpomalené atomy doletěly do pasti a tam zastaveny dodatečným pulsem

Kvadrupólová magnetická past



Dopplerovo chlazení

Princip popsali Hänsch a Schawlow 1985 (oba NP, ale za jiné věci)



Dopplerovo chlazení

Princip popsali Hänsch a Schawlow 1985 (oba NP, ale za jiné věci)



červený posuv $\omega_\nu -$

zpomaluje atomy letící vlevo
resonančně, silně

zrychluje atomy letící vpravo
mimo resonanci, slabě

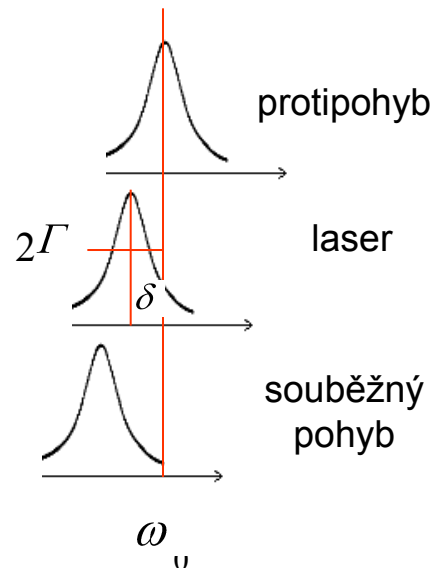
atomy v tepelném
pohybu

resonance ω_ν

červený posuv $\omega_\nu -$

zpomaluje atomy letící vpravo
resonančně, silně

zrychluje atomy letící vlevo
mimo resonanci, slabě



Dopplerovo chlazení

Princip popsali Hänsch a Schawlov 1985 (oba NP, ale za jiné věci)

rozladění se mění podle teploty

laser

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

laser

atomy v tepelném
pohybu

červený posuv $\omega_\nu -$

resonance ω_ν

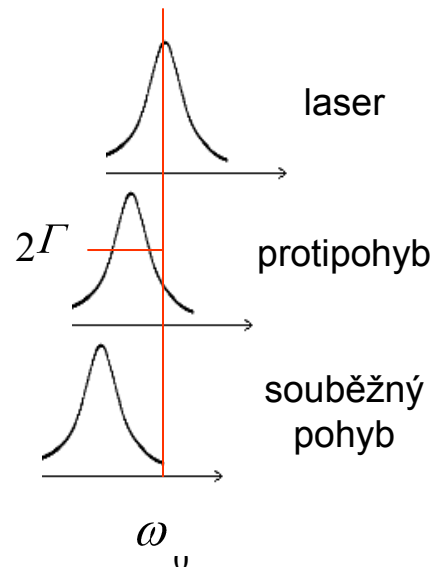
červený posuv $\omega_\nu -$

zpomaluje atomy letící vlevo
resonančně, silně

zrychluje atomy letící vpravo
mimo resonanci, slabě

zpomaluje atomy letící vpravo
resonančně, silně

zrychluje atomy letící vlevo
mimo resonanci, slabě



Dopplerovo chlazení

Princip popsali Hänsch a Schawlow 1985 (oba NP, ale za jiné věci)

rozladění se mění podle teploty

laser

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

laser

atomy v tepelném
pohybu

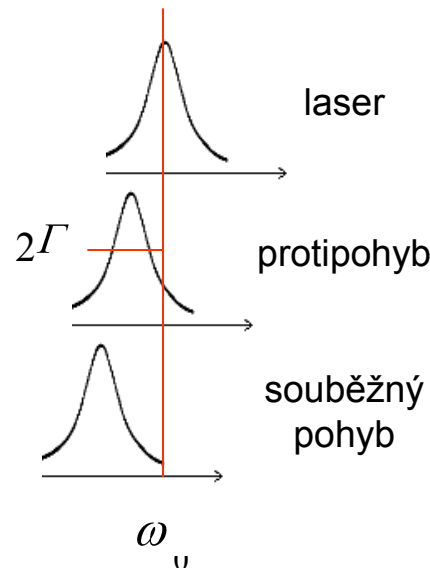
červený posuv $\omega_\nu -$

resonance ω_ν

červený posuv $\omega_\nu -$

zpomaluje atomy letící vlevo
resonančně, silně

zrychluje atomy letící vpravo
mimo resonanci, slabě



zpomaluje atomy letící vpravo
resonančně, silně

zrychluje atomy letící vlevo
mimo resonanci, slabě

mezní teplota

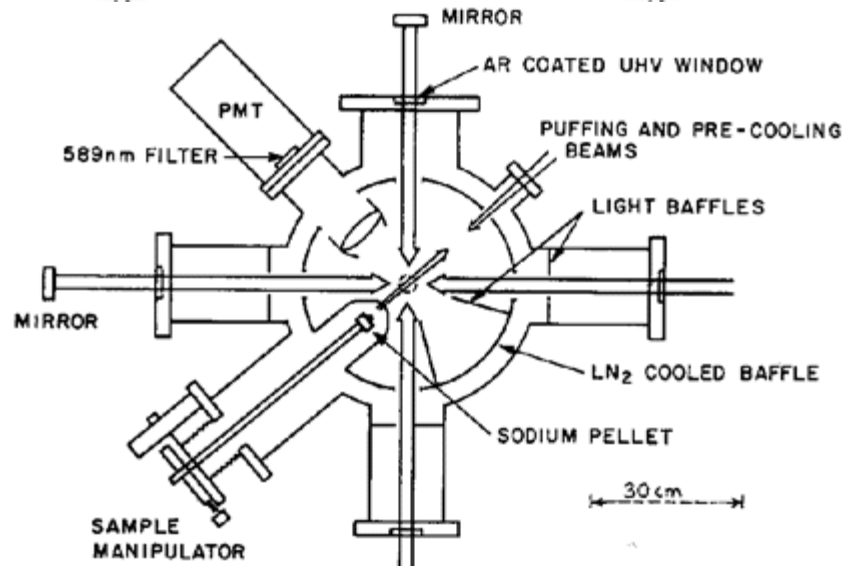
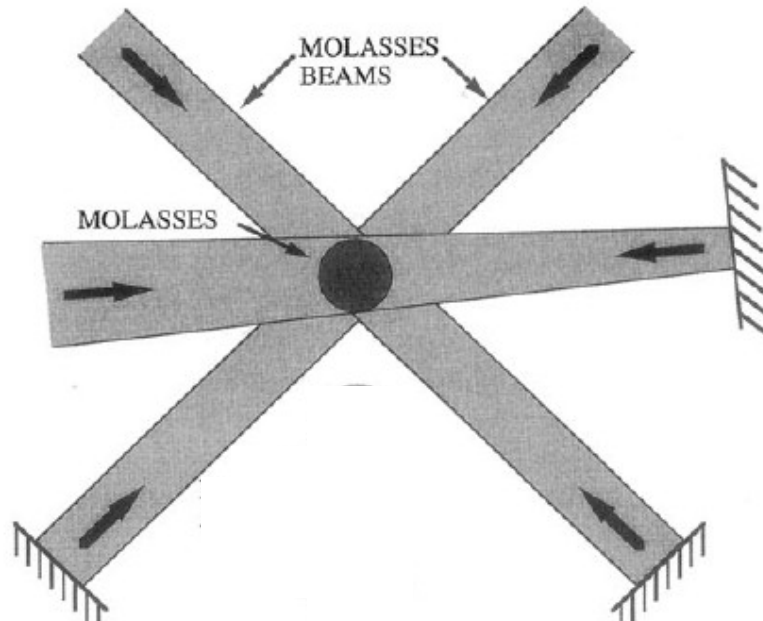
$$k_B T_{\text{Dopp}} = \frac{\hbar \Gamma}{2}$$

Tři zkřížené svazky: 3D Dopplerovo chlazení

je třeba 20 000 fotonů
k zastavení z pokojové
teploty

brzdná síla je pak
úměrná rychlosti:
viskózní prostředí,
„syrup“

Pro intenzivní laser je
to otázka milisekund



Dopplerovo chlazení: realizace Chu

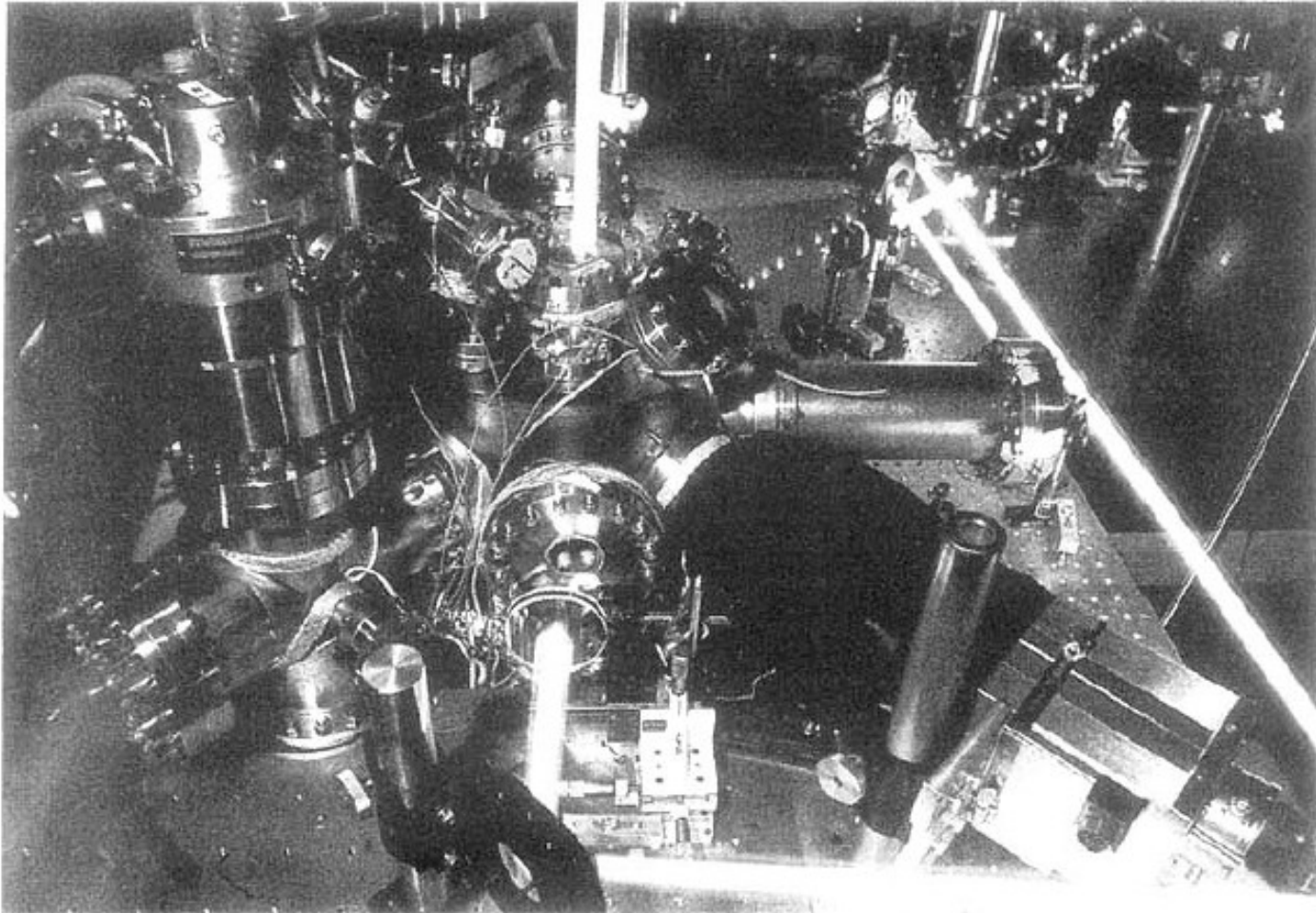
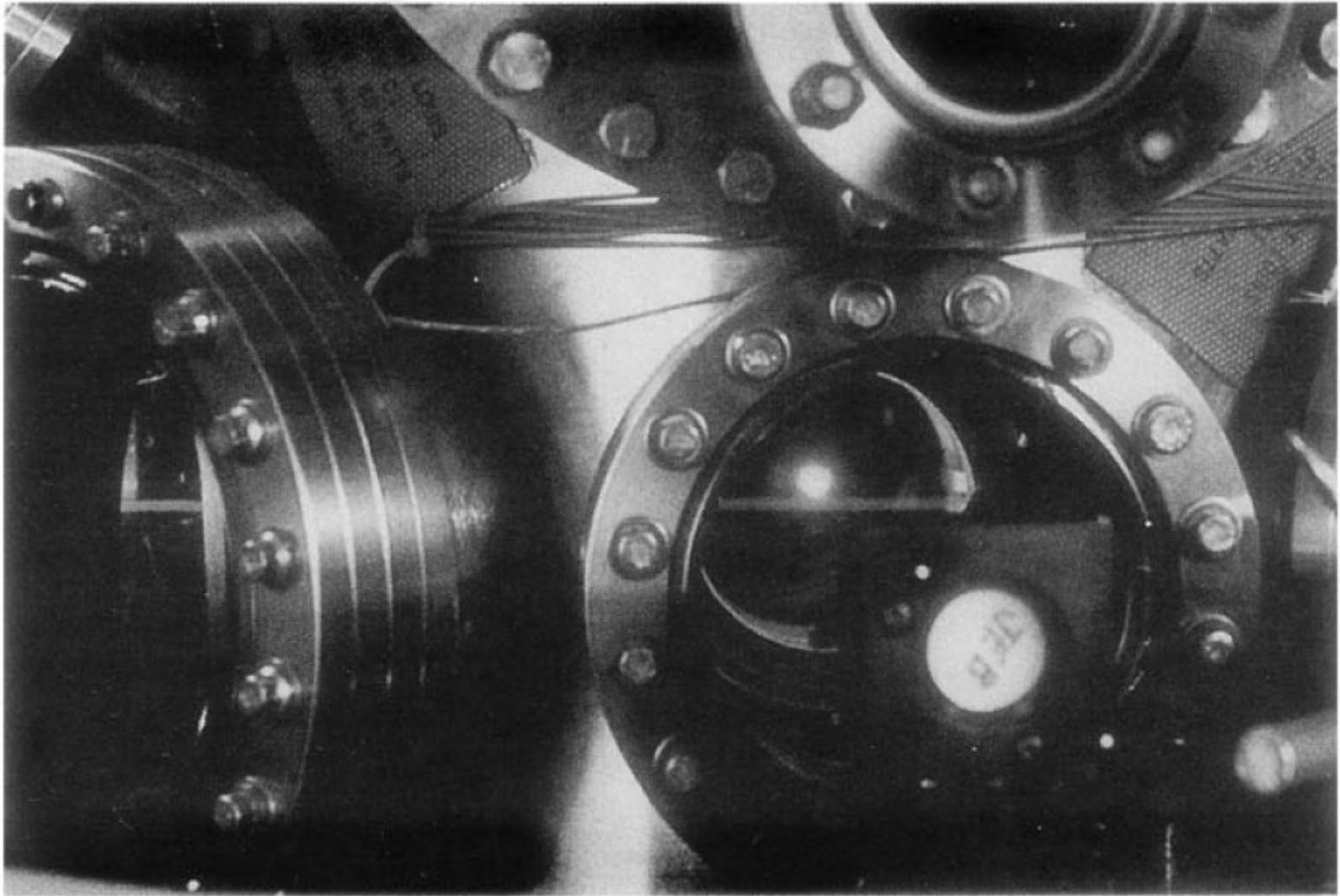
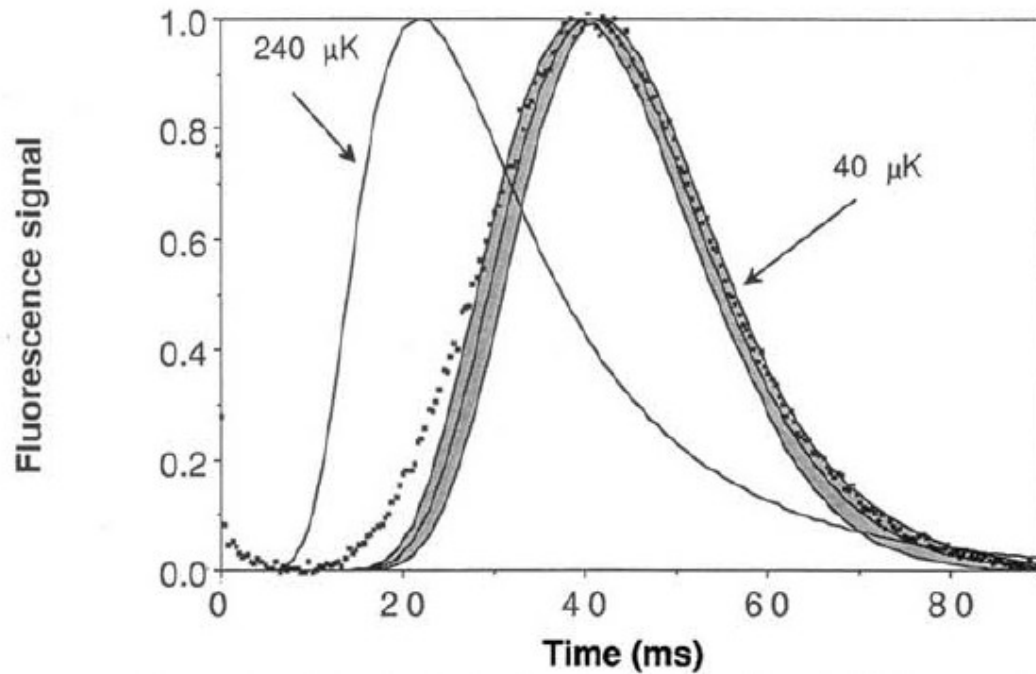


Figure 3 a. A photograph of the apparatus used to demonstrate optical molasses and the first optical trap for atoms. The photograph is a double exposure made by photographing the apparatus under normal lighting conditions and then photographing the laser beams by moving a white card along the beam path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

Dopplerovo chlazení: realizace Chu



Změřená teplota



Pod Dopplerovou mezí 240 μK

... dodatečné chlazení tzv. Sisyfovým jevem objasnil Cohen-Tannoudji

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)

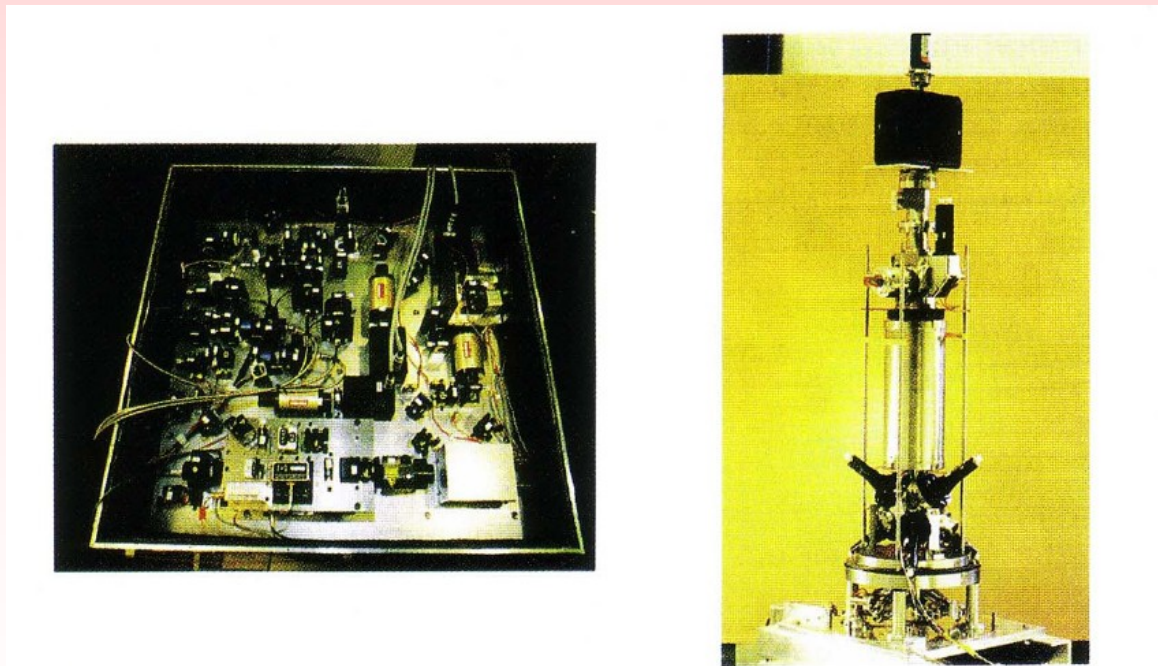


Figure 11. The microgravity clock prototype. The left part is the 60 cm \times 60 cm \times 15 cm optical bench containing the diode laser sources and the various optical components. The right part is the clock itself (about one meter long) containing the optical molasses, the microwave cavity and the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

The end