

Fyzika nízkých teplot

- Měření nízkých teplot
 - Teplotní stupnice ITS90
 - Plynové a parní teploměry
 - Odporové teploměry
 - Polovodičové teploměry
 - Další typy teploměrů pro měření nízkých teplot
- Tepelné izolace a hladinoměry kryokapalin
 - Přenos tepla vedením, zářením,...
 - Tepelné izolace - vakuová, superizolace, pěnová,....
 - Dewarova nádoba
 - Různé typy hladinoměrů pro kryokapaliny
- Aplikace nízkých teplot
 - Aplikace ve vakuové technice
 - Aplikace v průmyslu, ve zdravotnictví, v dopravě,...
 - Aplikace v raketové technice

Měření nízkých teplot

- Teplotní stupnice ITS-90
- Plynové a parní teploměry
- Odporové teploměry
- Polovodičové teploměry
- Další typy teploměrů pro měření nízkých teplot

Teplotní stupnice

Definice teploty:

Pro každý systém existuje jistá intenzivní stavová veličina - teplota, mající stejnou hodnotu ve všech systémech, které jsou navzájem v rovnováze.

Rozsah teplotní stupnice a velikost jednoho stupně je věcí dohody.

Teplotní stupnice

- Kelvinova stupnice
- Celsiova stupnice
- Farenheitova - USA
- Rankinova - USA
- Réaumurova stupnice - záp. Evropa do konce 19. stol
- ...

Kelvinova stupnice

definována 1854 pomocí Carnotova cyklu

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

$$u = 1 - \frac{Q_1}{Q_2}$$

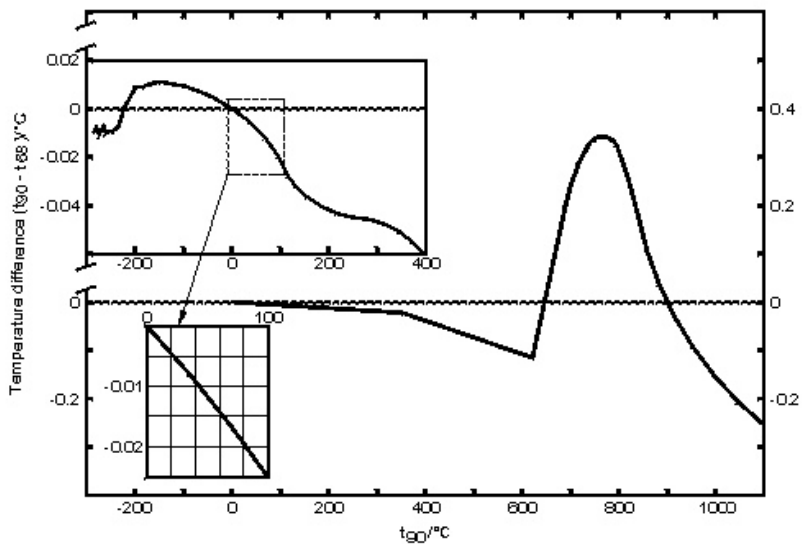
Q_1 - teplo odevzdané

Q_2 - teplo přijaté

ITS-90

Mezinárodní teplotní stupnice ITS-90, www.ITS-90.com.
17 pevných teplotních bodů, rozsah 0,65 - 1357,77 K

Starší stupnice IPTS-68 - 11 pevných bodů + 11 sekundárních bodů,
rozsah 2,172 - 1337 K - problém s teplotou bodu varu kryokapalin,
vliv hydrostatického tlaku
(105 mK/10 cm pro O₂, 58 mK/10 cm pro N₂)



ITS-90

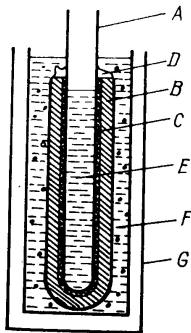
| Number | Temperature T ₉₀ K | t ₉₀ °C | Substance a | State b |
|--------|----------------------------------|--------------------|--------------------------|---------|
| 1 | 0,65 to 5 | -272,5 to -268,15 | He | V |
| 2 | 13,8033 | -259,3467 | e-H ₂ | T |
| 3 | 17 | -256,15 | e-H ₂ (or He) | V |
| 4 | 20,3 | -252,85 | e-H ₂ (or He) | V |
| 5 | 24,5561 | -248,5939 | Ne | T |
| 6 | 54,3584 | -218,7916 | O ₂ | T |
| 7 | 83,8058 | -189,3442 | Ar | T |
| 8 | 234,3156 | -38,8344 | Hg | T |
| 9 | 273,16 | 0,01 | H ₂ O | T |
| 10 | 302,9146 | 29,7646 | Ga | M |
| 11 | 429,7485 | 156,5985 | In | F |
| 12 | 505,078 | 231,928 | Sn | F |

ITS-90

v rozsahu 0,65 - 5 K, definice pomocí tenze par ^3He a ^4He

$$T_{90}[K] = A_0 + \sum_{i=1}^9 A_i \left[\frac{\ln(P) - B}{C} \right]^i$$

Trojný bod vody



Obr. 53. Realizace trojného bodu vody (273,16 K)

B - odplyněná, redestilovaná voda, F - voda a tající led, C - led, D - vodní pára, po několika hodinách, v části E teplota trojného bodu $273,16 \text{ K} \pm 0,2 \text{ mK}$

J.Jelínek, Z. Málek: Kryogenní technika, SNTL, Praha, 1982

Supravodivé teplotní body

| supravodič | čistota | kritická teplota [K] |
|------------|---------|----------------------|
| Pb | 6N | 7,201 |
| In | 5N | 3,416 |
| Al | 5N | 1,175 |
| Zn | 6N | 0,844 |
| Cd | 6N | 0,515 |

přesnost 2 mK, reprodukovatelnost 1 mK

Plynový teploměr

princip - měření tlaku

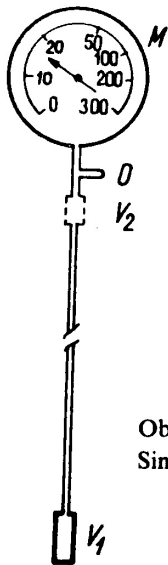
plyn He (ideální plyn), tlak plynu vždy nižší než tenze par pro danou teplotu, referenční tlak a teplota T_0 , p_0

$$T = T_0 \frac{p}{p_0}$$

za předpokladu $V_2 \ll V_1$

rozsah měřených teplot 1 – 300 K

mag.pole nemá vliv



Obr. 36. Jednoduchý
Simonův plynový teploměr

Korekce

- parazitní objem V_2
- termomolekulární rozdíl tlaků
- neideální plyn
- změna teploty manometru během měření

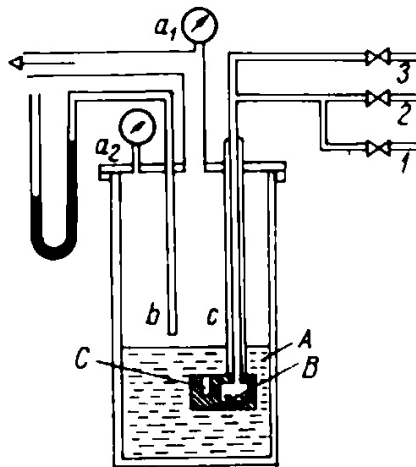
$$T = \frac{P}{\frac{P_0}{T_0} + \frac{P_0 - P}{T_p} \frac{V_2}{V_1}}$$

přesnost až 0,01 K

Parní teploměr

- rovnovážný tlak par nad hladinou zkapalněného plynu
- závislosti pro čisté látky změřeny
- zpravidla pracují mezi trojným bodem a bodem varu
- citlivost až $10^{-4} K$

Parní teploměr



J.Jelínek, Z. Málek: Kryogenní technika, SNTL, Praha, 1982

Parní teplotměř

| látka | rozsah teplot [K] | max.rozsah [K] |
|------------------------|-------------------|----------------|
| ^3He | 1,5 - 3,3 | 0,3 - 3,3 |
| ^4He | 2,3 - 4,5 | 0,9 - 5,2 |
| H_2 | 13,8 - 21,2 | 13,8 - 33,2 |
| Ne | 24,5 - 28,1 | 21,0 - 44,4 |
| N_2 | 63 - 80 | 63 - 126 |
| O_2 | 70 - 93 | 54 - 154 |
| CH_4 | 86 - 116 | 90 - 191 |
| NO | 107 - 123 | |
| CF_4 | 90 - 150 | |
| C_2H_4 | 133 - 174 | |

Odporové teploměry

tepelné kotvení, ohřev teplotního čidla

- kovové
- slitinové
- uhlíkové
- termistory
- germaniové
- galiumarsenidové

Výkonové zatížení

| teplotní oblast [K] | výkonové zatížení [W] |
|------------------------|--------------------------|
| 10^2 až 10 | 10^{-6} až 10^{-8} |
| 10 až 1 | 10^{-8} až 10^{-10} |
| 1 až 10^{-1} | 10^{-10} až 10^{-12} |
| 10^{-1} až 10^{-2} | 10^{-12} až 10^{-14} |

pro teplotní snímač délka 10 mm, průměr 3 mm, zvýšení chyby o 0,1 %,
pro 100 K , $100 \Omega \Rightarrow 100 \mu\text{A}$,
pro 1 K , $100 \Omega \Rightarrow 1 \mu\text{A}$,

Kovové teploměry

Pt teploměry

- Pt drátek 0,05 - 0,2 mm
- při 0 °C odpor 10 – 100 Ω
- problém s pnutím
- závislé na mag. poli, B = 5 T, T = 20 K, chyba 100%

$$W_r(T) + \Delta W(T) = W(T) = \frac{R_T}{R_{273,16K}}$$

$$W(29,7646^\circ\text{C}) \geq 1,11807, \text{ nebo } W(-38,8344^\circ\text{C}) \leq 0,844235$$

$$T = 273,16 \times \left(B_0 + \sum_{i=1}^{15} B_i \left[\frac{W_r(T)^{1/6} - 0,65}{0,35} \right]^i \right)$$

v rozsahu 13,8033 K až 273,16 K, s přesností 0,1 mK

$$T = 273,15 + \left(D_0 + \sum_{i=1}^9 D_i \left[\frac{W_r(T) - 2,64}{1,64} \right]^i \right)$$

v rozsahu 273,16 K až 1235 K, s přesností 0,13 mK

Cu teploměry

- Cu drátek 0,05 - 0,1 mm, se smaltovou izolací
- lineární závislost až do teplot LN_2
- levné, méně citlivé na mech. pnutí
- přesnost 0,1% do 70 K, 70 - 200 K asi 1%
- závislé na mag. poli, $B = 5 \text{ T}$, $T = 4 \text{ K}$, chyba 300%

Pb, In teploměry

lepší citlivost než **Pb** : 9 – 300 K,

In : 3,5 – 300 K, přesnost 0,1 K

Slitinové teploměry

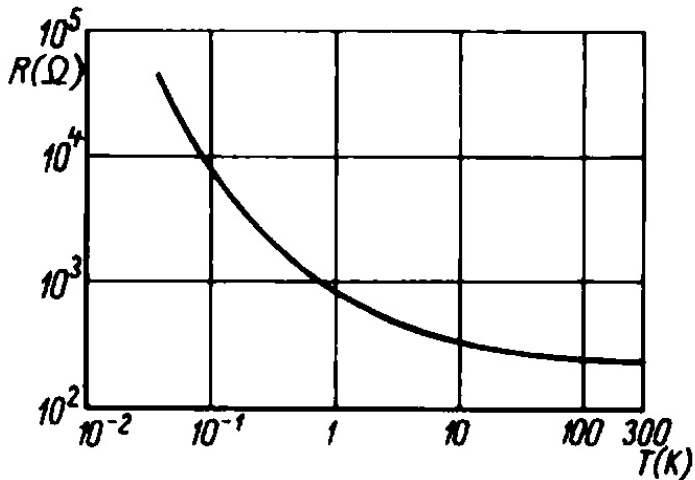
- Rh + 0,5% Fe, slabá závislost na mag. poli
- konstantan - Cu60/Ni40
- manganin - Cu84/Mn12/Ni4
 - pod 100 K mají téměř konstantní součinitel odporu
 - závislé na mag. poli

Uhlíkové teplotoměry

- uhlíkový odpor
- problém s ohřevem a mechanickým namáháním
- reprodukovatelnost - formátovat, různé šarže - různé vlastnosti
- malá závislost na mag.poli $B = 10 \text{ T}$ asi 9%
- pro rozsah 2 – 20 K s chybou asi 0,5 %:

$$\log R + \frac{C}{\log R} = A + \frac{B}{T}$$

Uhlíkové teploměry



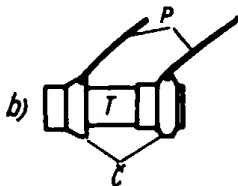
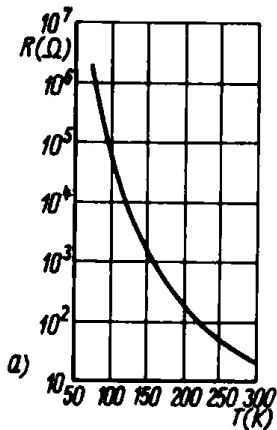
J.Jelínek, Z. Málek: Kryogenní technika, SNTL, Praha, 1982

Termistory

- kysličník niklu a manganu
- velký součinitel odporu
- slabá závislost na mag.poli
- 4 – 300 K
- reprodukovatelnost - formátování pro stabilitu 0,1%
 - 50 cyklů z 293 na 77 K
 - 7 dnů při pok.teplotě
 - 50 cyklů z 293 na 77 K
 - 14 dnů skladovat

$$R = R_0 \exp \left[-K \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right]$$

Termistory



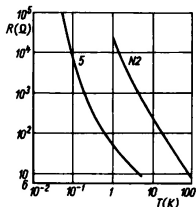
Obr. 42. a) Teplotní závislost odporu čs. termistoru TH 120/22-20, b) celkové uspořádání termistoru TH 120/22-20 (T vlastní termistor, \check{C} koncové kontaktující kovové čepičky, P přívody)

Germaniové teploměry - GRT

- Ge + příměs As, Ga, Sb, Bi
- rozsah od 50 mK do 100 K - dva snímače
- přesnost až 0,5 mK
- dobrá stabilita
- sekundární standart
- silná závislost na mag. poli

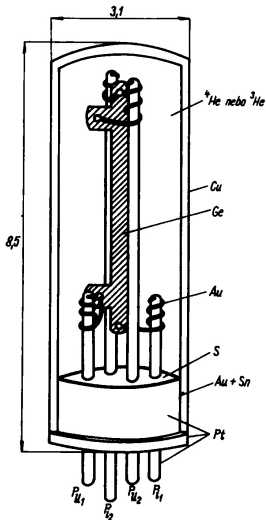
$$\log R = \sum_{n=0}^m A_n (\log T)^n, m \sim 13$$

Germaniové teploměry



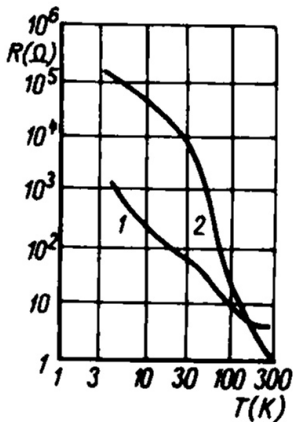
Obr. 44. Závislosti $R(T)$ dvou typů Ge snímačů (5 a N2) Scientific Instruments [98]

Obr. 45. Schéma uspořádání čtyřelektrodového Ge snímače Cryocal použitelného jako sekundární termometrický standard [99] (*Ge* germanium, P_i proudové přívody, P_n napěťové přívody, *Au* zlaté drátkové pružné přívody, *Pt* platina, *Cu* zlacené měděné pouzdro plněné plyným He, *Au + Sn* pájka s bodem tání 280 °C, *S* sklo)



Galiumarsenidové teploměry

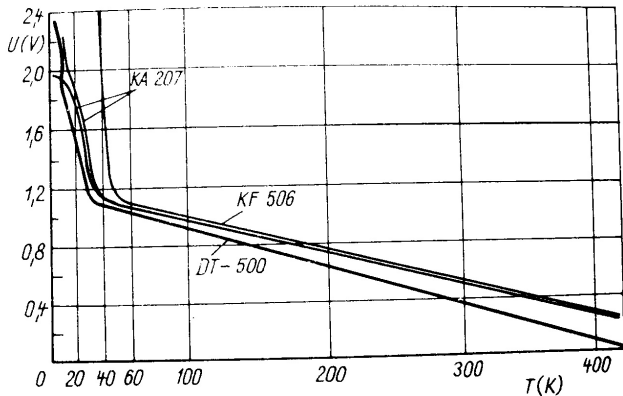
- GaAs monokrystal
- dopován Cu, Mn, nebo Zn
- slabá závislost na mag. poli
- dobrá dlouhodobá stabilita
- použitelné do 300 K



Obr. 46. Závislost $R(T)$
 odporového snimače GaAs
 dopovaného zinkem (1)
 a manganem (2) [111, 112]

Teploměr s PN přechodem

- Si diody, tranzistory
- napětí na PN přechodu
- $B = 5 \text{ T}$; chyba 2,4 K
- měří do 400 K
- dobrá reprodukovatelnost pro běžné měření



Obr. 50. Teplotní závislost spádu napětí na Si diodě DT-500 při proudu $10 \mu\text{A}$ v propustném směru [123], na dvou čs. Si diodách KA 207 a na čs. Si tranzistoru KF 506 (báze-emitor) při proudu $50 \mu\text{A}$ (diody) a $150 \mu\text{A}$ (tranzistor) v propustném směru [124]

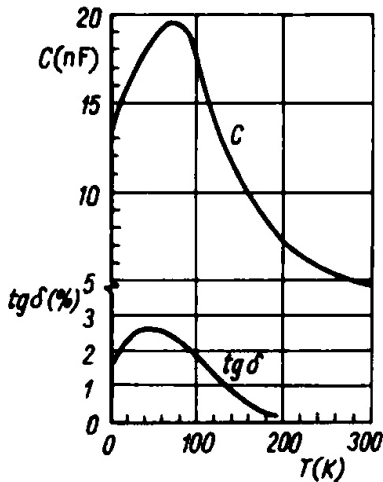
J.Jelínek, Z. Málek: Kryogenní technika, SNTL, Praha, 1982

Kapacitní teploměry

- dielektrikum SrTiO_3
- nezávislé na mag. poli
- nepoužitelné v rozsahu 60 – 70 K
- měří až do 10 mK

$$T = \sum_{n=0}^4 A_n C^n$$

Kapacitní teploměry

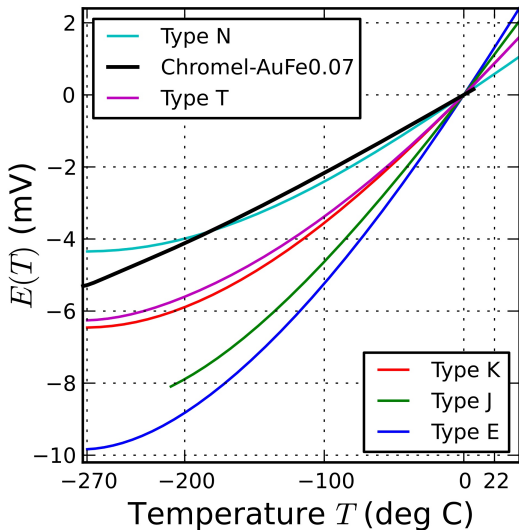


Obr. 51. Teplotní závislost elektrické kapacity C a tangenty ztrátového úhlu $tg \delta$ (měřeno 7,5 mV při 5 kHz) sklokeramického $SrTiO_3$ kondenzátoru [130]

Termočlánky

- malé rozměry
- citlivost zpravidla klesá s teplotou
- referenční teplota - blízko měřené teplotě
- vliv složení, mech. deformace, různé tavby 10% rozdíl
- spojování
- K - NiCr-NiAl
- J - Fe-CuNi
- T - Cu-CuNi
- Chromel Ni₉₀Cu₁₀ - Au+Fe_{0,07}

Termočlánky



Akustická termometrie

- měření rychlosti zvuku
- většinou He + akustický rezonátor
- typicky rozsah 2 – 20 K
- USA v roce 1965 - kalibrace Ge teploměřů

$$v^2 = \kappa \frac{RT}{M}; \quad \kappa = \frac{C_p}{C_v}$$

Krystalový teploměr

- závislost rezonanční frekvence křemenného výbrusu na teplotě
- rozsah $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $250\text{ }^{\circ}\text{C}$
- př. základní frekvence $28,2\text{ MHz}$, citlivost 1 kHz/K
- přesnost až $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$f = f_0(1 + \alpha\Delta T)$$

M.Kreidl: Měření teploty, BEN , Praha 2005

Optické vláknové senzory teploty

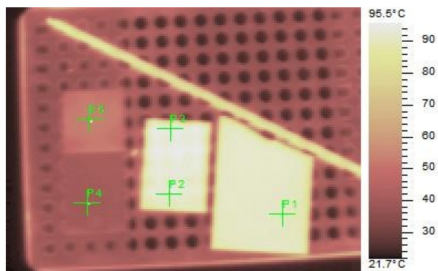
- vlákno $\sim 400 \mu\text{m}$
- amplitudová modulace
- fázová
- polarizační
- rozložení vlnové délky - posun absorpční čáry
- Fabry-Perotův rezonátor
- $-272 \text{ }^\circ\text{C}$ až $250 \text{ }^\circ\text{C}$
- chyba měření asi $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ až $0,8 \text{ }^\circ\text{C}$

M.Kreidl: Měření teploty, BEN , Praha 2005

Infračervené teploměry

- pyrometry - detekce infračerveného záření
- rozsah $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $10000\text{ }^{\circ}\text{C}$
- $0,4\text{ }\mu\text{m}$ až $25\text{ }\mu\text{m}$
- emisivita

M.Kreidl: Měření teploty, BEN , Praha 2005



| Bod | ϵ | teplota | $\epsilon = 1$ | materiál |
|-----|------------|----------|----------------|-----------------------|
| P1 | 0,73 | 103,0 °C | 90,8 °C | korund |
| P2 | 0,77 | 102,8 °C | 93,2 °C | sklo |
| P3 | 0,79 | 103,0 °C | 94,9 °C | sklo pískované |
| P4 | 0,07 | 100,0 °C | 40,4 °C | Al leštěný |
| P5 | 0,21 | 101,9 °C | 53,2 °C | Al leštěný, pískovaný |

Měření velmi nízkých teplot

primární

- šumové
- tlak tání pevného ^3He
- osmotický tlak mezi ^4He a $^3\text{He} + ^4\text{He}$
- polarizační jev
- anizotropie γ záření

sekundární

- tenze par ^3He
- odporové teploměry
- magnetická susceptibilita paramagnetických látek
- statická jaderná susceptibilita
- spektra jaderné magnetické rezonance

Šumové teploměry

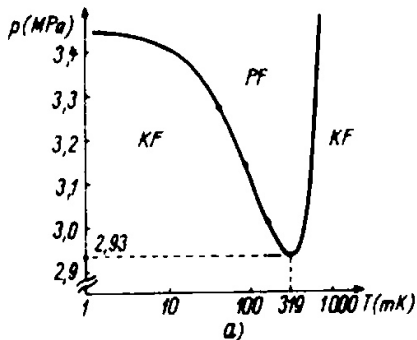
- Johnsonův šum - bílý šum
- oblast mK a μK
- napětí řádu 10^{-10} V
- supravodivý detektor magnetického toku Squid (napětí až 10^{-15} V)

$$\overline{U^2} = 4kTR\Delta f$$

R - odpor, Δf šířka kmitočtového pásma

Tlak tání pevného ^3He

- rozsah 319 mK - 2,5 mK
- tlak tání se mění od 2,9 do 3,4 MPa



J.Jelínek, Z. Málek: Kryogenní technika, SNTL, Praha, 1982

Osmotický tlak mezi ^4He a $^3\text{He} + ^4\text{He}$

- porézní materiál odděluje supratekuté ^4He a 0,1% $^3\text{He} + ^4\text{He}$
- vznikne rozdíl tlaků - závisí teplotě
- rozsah 10 – 700 mK prakticky lineární
- diferenciální manometr, nezávislý na mag. poli

Polarizační jev v Mossbauerově spektroskopii

- primární teploměr
- radioaktivní materiál
- obsazení hladin je závislé na teplotě
- ohřev vzorku

Anizotropie γ záření

- 2 – 20 mK
- radioaktivní materiál - ^{54}Mn a ^{60}Co
- obsazení hladin je závislé na teplotě
- ohřev vzorku

Magnetické teploměry

- závislost magnetické susceptibility na teplotě pro paramagnetické látky
- dusičnan ceritohořečnatý, dusičnan ceritolantanohořečnatý
- Squid
- teploty i pod 1 mK

$$\chi = \frac{C}{T}$$

Statická jaderná susceptibilita

- Cu 99,9999 %
- Squid
- μK oblast

Jaderné magnetické rezonance NMR

- dynamická susceptibilita nepřímo úměrná teplotě
- vzorek v mag.poli
- kolmo působí vf mag. pole
- pulzní provoz
- Cu, Pt, Al
- μK oblast