

# Kapicův odpor

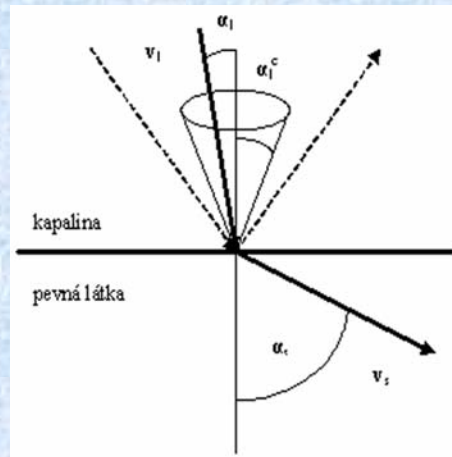
Teplotní rozdíl  $\delta T$ , který vzniká na rozhraní mezi dvěma prostředími, např. mezi kapalinou a pevnou látkou

$$\delta T = R_K \cdot dQ/dt,$$

protéká-li rozhraním tepelný tok  $dQ/dt$ ,  $R_K$  označuje Kavicův odpor.

1941 P. L. Kapica formuloval pro popis experimentů se supratekutým He II,

zpravidla  $R_K = 1/T^3$



Teorii vytvořil v roce 1952 I. M. Chalatnikov – impedanční nepřizpůsobení

přenos tepla fonony – analogie s průchodem fotonů optickým rozhraním

Snellův zákon

$$\sin \alpha_1 / \sin \alpha_2 = v_1 / v_2$$

v kapalině:  ${}^4\text{He}$  ( $T < 1 \text{ K}$ )  $v_l = 238 \text{ m/s}$

${}^3\text{He}$   $v_l = 183 \text{ m/s}$

v pevné látce:  $v_s \sim 5 \text{ km/s} \rightarrow \alpha_l^c < 3^\circ$

pravděpodobnost  $f$ , že fonony dopadající na rozhraní z kapaliny do pevné látky proniknou, odpovídá prostorovému kritickému kuželu

$$f = \pi \sin^2(\alpha_l^c) / 2\pi = \frac{1}{2}(v_l/v_s)^2 \dots\dots\dots f < 10^{-3}$$

Překážkou pro přenos tepla – nepřizpůsobení impedancí  $Z = \rho \cdot v$  pro šíření zvuku v kapalině nebo v pevné látce

Pro téměř kolmý dopad fononů z kapaliny je koeficient přenosu  $\kappa$

$$\kappa = 4 Z_l Z_s / (Z_l + Z_s)^2 \sim 4 \rho_l v_l / \rho_s v_s \dots\dots\dots \text{pro Cu a He je } \kappa \sim 2 \cdot 10^{-3}$$

Rozhraním pronikne jen malá část dopadajících fononů  $f \cdot \kappa \sim 10^{-6}$ , z Debyeova modelu je hustota energie fononů  $U/V$  úměrná  $T^4$ , Polovina fononů směřuje k rozhraní s plochou  $A$  a tok energie je

$$dQ/dt = \frac{1}{2} f \cdot \kappa \cdot U/V \cdot v_l \cdot A$$

V tepelné rovnováze při malém rozdílu teplot  $\delta T$  je Kapicův odpor

$$R_K = \frac{5\hbar^3 \rho_s v_s^3}{4\pi^2 k^4 \rho_l v_l} \frac{1}{AT^3}$$

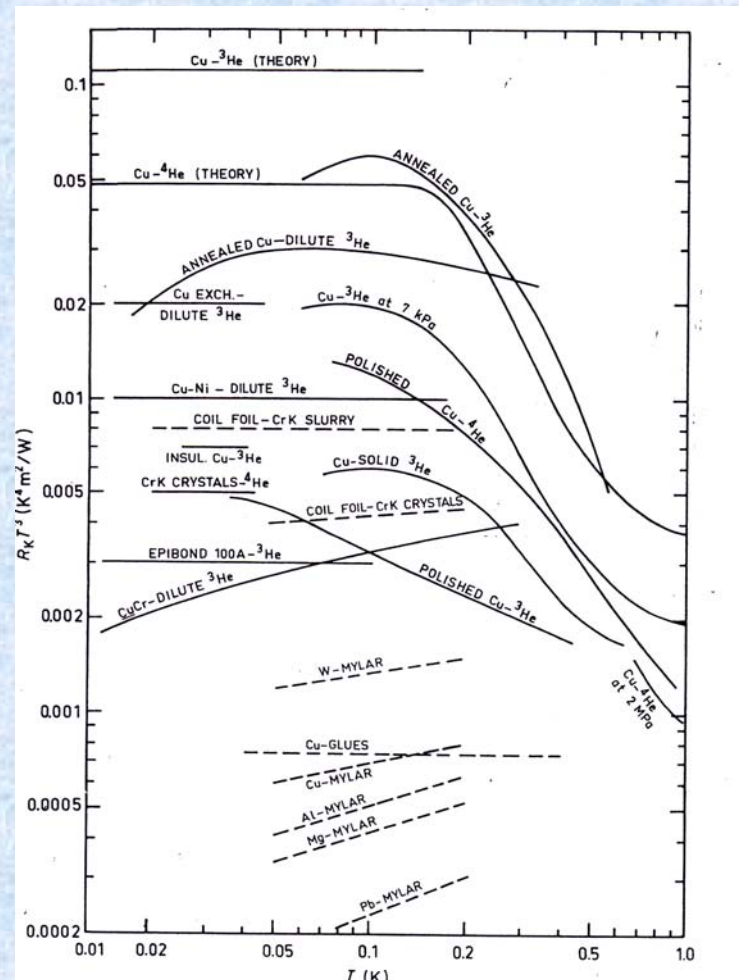
Kapicův odpor  $R_K \sim T^{-3}$  je vážnou překážkou chlazení pro  $T < 1$  K

Experimentální hodnoty Kapicova odporu jsou často nižší než předpověď modelu impedančního nepřizpůsobení

např. Cu –  $^4\text{He}$  při  $T = 100$  mK, toku  $dQ/dt = 0,1 \mu\text{W}$  a ploše  $A = 0,1 \text{ m}^2$  bylo naměřeno  $\delta T = 1,2$  mK, teoreticky  $\delta T = 4,8$  mK

Pro  $^3\text{He}$ : pro  $T = 20$  mK a  $dQ/dt = 0,1 \mu\text{W}$ ,  $A = 0,1 \text{ m}^2$  bylo naměřeno  $\delta T = 0,6$  mK, podle teorie by mělo být  $\delta T \sim 14$  mK

Zvětšování výměnné plochy pomocí jemných spečených prášků (sintrů) Cu, Ag nebo Pt se zrnem menším než  $1 \mu\text{m}$ , dosahuje se měrná plocha  $\sim 1 \text{ m}^2/\text{g}$



# Anomální (magnetický) Kapicův odpor

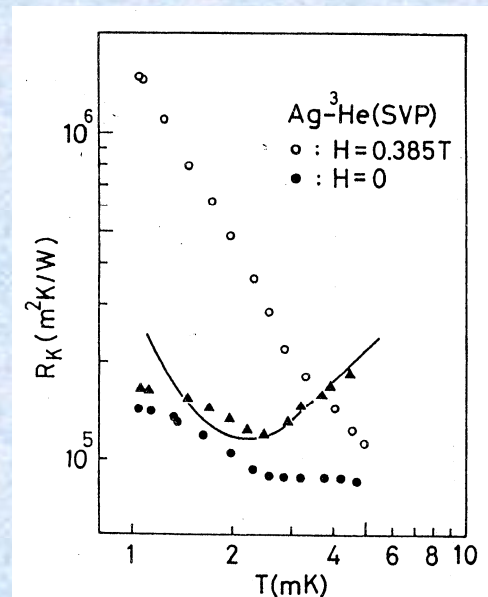
Studie tepelné výměny mezi stříbrnými spečenými prášky a  $^3\text{He}$  vedly k představě nezávislého fononového a magnetického kanálu výměny

$$1/R_K = h_{\text{fon}} + h_{\text{mag}}$$

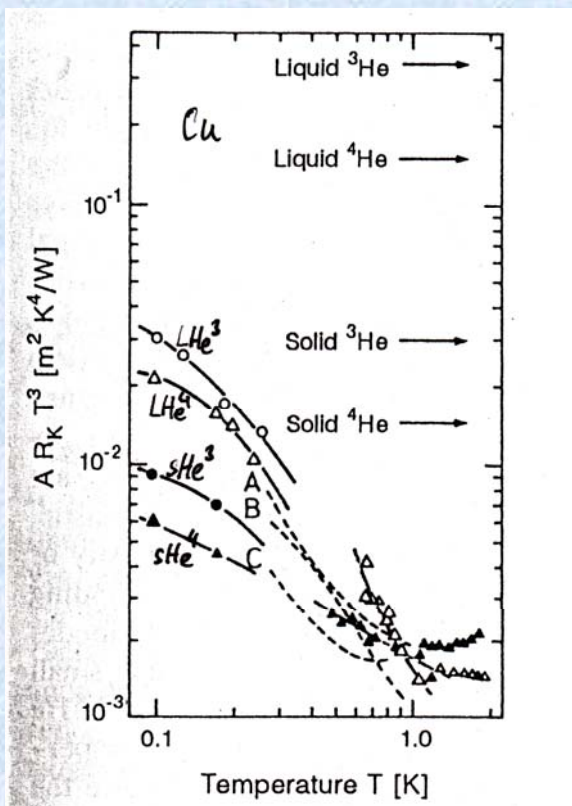
Klesá s magnetickým polem do  $B = 0,2 \text{ T}$ , dále je na poli nezávislý

$h_{\text{mag}}$  vzniká magnetickou dipolární vazbou mezi magnetickými momenty atomů  $^3\text{He}$  a magnetickými momenty v pevné látce – atomy přechodových kovů, paramagnetické ionty, paramagnetické atomy adsorbované na povrchu pevné látky ( $\text{O}_2$ ,  $\text{O}_2^-$ ,  $\text{O}$ )

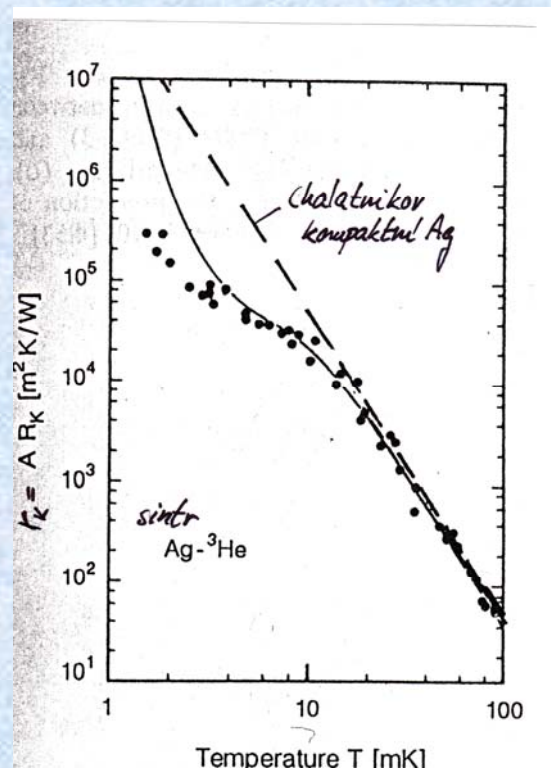
Spojitá křivka – teoretická závislost  $R_K(\text{mag})$ , trojúhelníky – odvozené magnetické příspěvky







Kapicův odpor mezi mědí a kapalným či pevným heliem



Kapicův odpor mezi spečeným stříbrným práškem a  $^3He$