

SUPRAVODIVOSŤ – FENOMENÁLNY OBJAV V PRÍRODNÝCH VEDÁCH

Daniel Kluvanec, Boris Lacsny, Miroslav Boboň, Peter Krupa
Katedra fyziky, FPV, UKF v Nitre

Abstrakt: Príspevok obsahuje niektoré elementárne informácie o supravodivosti ako zaujímavom fyzikálnom jave, ktorý aj z hľadiska vyučovania je pre žiakov veľmi atraktívny. Základná definícia supravodivosti vychádza, prirodzene, zo straty elektrického odporu materiálu pri ochladení vzorky na nízke teploty (pod tzv. kritickú teplotu T_c). Supravodiče však majú zaujímavé aj magnetické a tepelné vlastnosti. Pri skúmaní fyzikálnych vlastností supravodičov ide predovšetkým o komplex elektrických, magnetických a tepelných charakteristík. Aplikácie supravodičov v praxi umožňujú získanie silných magnetických polí (niekoľko 10 T) pomocou supravodivých cievok v prístrojoch a zariadeniach (moderné lekárske prístroje – tomograf, JMR, fyzikálny výskum, dopravné systémy MAGLEV). Výskum v oblasti vysokoteplotnej supravodivosti (II. typu, HTSC) je stále otvorený, mnohé laboratória vo svete sa orientujú na vývoj supravodičov stále s vyššími kritickými teplotami (www.superconductors.org). Vo všetkých informačných zdrojoch sa k supravodivosti pridáva epiteton „fenomenálny jav“. Skúsenosti našej skupiny to plne potvrdzujú. Domnievame sa, že vo vyučovaní fyziky patrí táto téma medzi tie, ktoré nie je možné obísť. V súvislosti s tvorivosťou učiteľa vo vyučovaní fyziky, ide o tému mimoriadne vďačnú. Samotné experimenty sú veľmi atraktívne (aj pre učiteľa) a vytvárajú priestor pre tvorbu nových, resp. modifikovaných pokusov. Sú tu však dva problémy, s ktorými sa musí učiteľ vysporiadať, a to získanie supravodivej vzorky (súčasná cenová ponuka cca niekoľko tisíc Sk) a chladiaceho média – tekutého dusíka. Supravodivé disky typu YBaCuO (T_c okolo 110 K) môžeme školám dodať, na základe objednávky. Tekutý dusík možno získať od zdravotníckych zariadení, insemináčnych staníc a pod. prakticky v každom meste (aktuálna cena je za jeden liter okolo 20 Sk). Tento príspevok vnímame aj ako možnú motiváciu pre školy pri tvorbe školských vzdelávacích programov v rámci reformy školskej fyziky.

Kľúčové slová: Supravodivosť, kritická teplota T_c , BCS teória, Meissnerov efekt, Cooperove elektrónové páry, energetická medzera

Úvod

Supravodivosť materiálov vo fyzike je vnímaná ako jeden z najvýznamnejších a najzaujímavejších objavov za posledné storočie. Objav supravodivosti materiálov mohol nasledovať až po objave metódy získania veľmi nízkych teplôt. Roku 1908 Heike Kamerlingh Onnes (Leiden, Holandsko) objavil postup skvapalnenia hélia (1913 udelenie Nobelovej ceny za supravodivosť a skvapalnenie hélia). Ide o teploty blízke k 0 K, označované ako héliové teploty (hélium I. tekuté; hélium II. supratekuté; bod varu $-268,9\text{ }^\circ\text{C}$, t.j. 3,3 K).

V súčasnosti je dobre známe, že supravodivosť je komplex elektrických, magnetických a tepelných vlastností niektorých jednoduchých prvkov a zlúčenín prvkov pri ich ochladení pod isté teploty nazvané kritické, pričom základná identifikácia supravodiča je strata elektrického odporu pod kritickou teplotou.

Supravodivosťou nazývame extrémnu elektrickú vodivosť niektorých prvkov a zlúčenín prvkov, ktorá sa prejavuje náhlou stratou elektrického odporu vzorky pri jej ochladení pod istú hodnotu, ktorú nazývame kritická teplota T_c .

Rovnako zaujímavá vlastnosť supravodičov je ich diamagnetizmus, čo znamená vytlačanie magnetického poľa zo svojho objemu pod kritickými teplotami. Do roku 1983 bolo možné supravodivé vlastnosti materiálov pozorovať iba pri veľmi nízkych teplotách (okolo -250°C) u niektorých jednoduchých prvkov. V tom období sa začal vývoj pevných zlúčenín, kompozitov (keramické materiály, ktoré sa skladali zo vzácnych kovov a oxidu medi.) so supravodivými vlastnosťami. Bednorz a Müller prišli s nápadom, že atómy medi v takýchto kompozitoch by mohli interagovať omnoho silnejšie s okolitými kryštálmi ako pri normálnych vodičoch. Podarilo sa im takto vytvoriť prvý stabilný keramický materiál, ktorého supravodivé vlastnosti sa prejavovali aj pri vyšších teplotách (niekoľko desiatok K). Takéto supravodiče sa nazývajú *vysokoteplotné* (High Temperature Superconducting, v skratke HTSC).

Tento objav otvoril priestor pre vývoj nových typov keramických supravodičov, ktorých kritická teplota presahuje hodnoty niekoľko desiatok K, resp. sto K. Aktuálny stav z vývojových laboratórií potvrdený certifikačnými laboratóriami (osem separátnych testov v certifikačných laboratóriách) je na kritickej hodnote 185,6 K ($-87,6^{\circ}\text{C}$), $\text{Sn}_{1,0}\text{Pb}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{Ba}_4\text{Tm}_5\text{Cu}_7\text{O}_{20+}$. Portál www.superconductors.org v marci 2008 priniesol informáciu „On March 6, 2008, Superconductors.ORG measured signs of superconductivity just over 185 Kelvin in an optimized 1223/1212 intergrowth, marking the first observation of superconductivity at earth ambient temperatures“, čím vymazal predchádzajúci rekord 181 K z januára 2008.

1 Základné pojmy zo supravodivosti

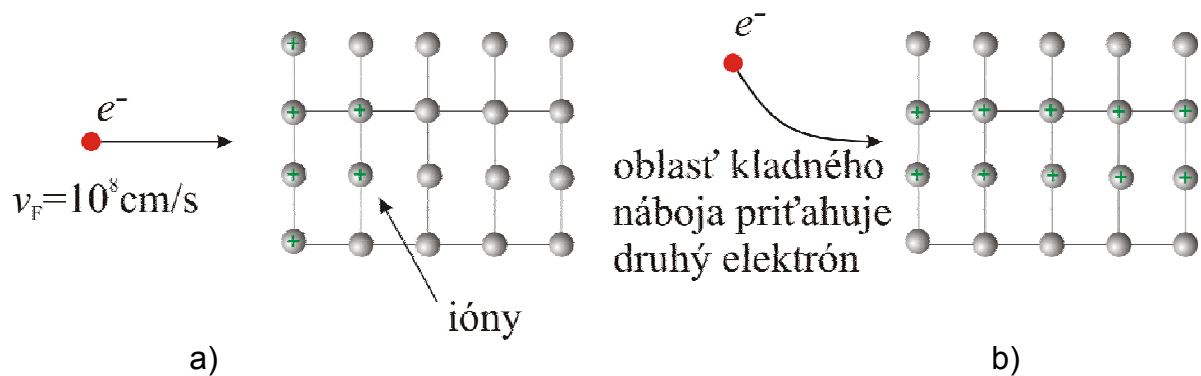
Teoretické opísanie a vysvetlenie NT supravodivosti bolo zavŕšené roku 1957, keď traja americkí fyzici John Bardeen, Leon Cooper a Robert Schrieffer sformulovali konzistentnú teóriu, ktorá dokázala dané javy vysvetliť. Za teóriu supravodivosti dostali roku 1972 Nobelovu cenu. Na ich počesť táto teória sa nazýva *BSC*. Významný podiel na teoretickom objasnení supravodivosti majú aj ďalší významní vedci, napr. A. A. Abrikosov, L. Landau, V. L. Ginzburg, I. P. Gorkov, F. London, H. London...



Obr. 1 J. Bardeen, L. Cooper a R. Schrieffer, tvorcovia kvantovej teórie supravodivosti [2].

BCS kvantovo mechanická teória je postavená na myšlienke, že elektróny v supravodivom materiáli sa formujú do tzv. Cooperovych párov, ktoré sa môžu silne koordinovane pohybovať vo vodiči. Z hľadiska kvantovej teórie ide o jednočasticové stavy s dvomi elektrónmi, ktoré obsadzujú stavy s vlnovými vektormi $\mathbf{k}\uparrow$ a $-\mathbf{k}\downarrow$ a ktoré sú obsadzované ako dvojice (buď sú obsadené oba stavy alebo sú oba stavy voľné), obr. 2. Cooperove páry sa správajú ako častice s nulovým spinom, tzn. bozóny. Pre ich rozdelenie platí Boseho – Einsteinova kvantová štatistika. V normálnom stave (pri teplote vzorky nad T_c), je energia elektrónov v tej istej vzorke rozdelená podľa Fermiho – Diracovej kvantovej štatistiky. Fermiho energia E_F pri nízkych teplotách zhora uzatvára rozdelenie energie elektrónov. V supravodivom stave, pri teplotách pod T_c , Fermiho hladina degeneruje, rozštiepi sa do energetickej medzery so šírkou E_g , v ktorej energeticky sú umiestnené Cooperove páry elektrónov. Čím väčšia

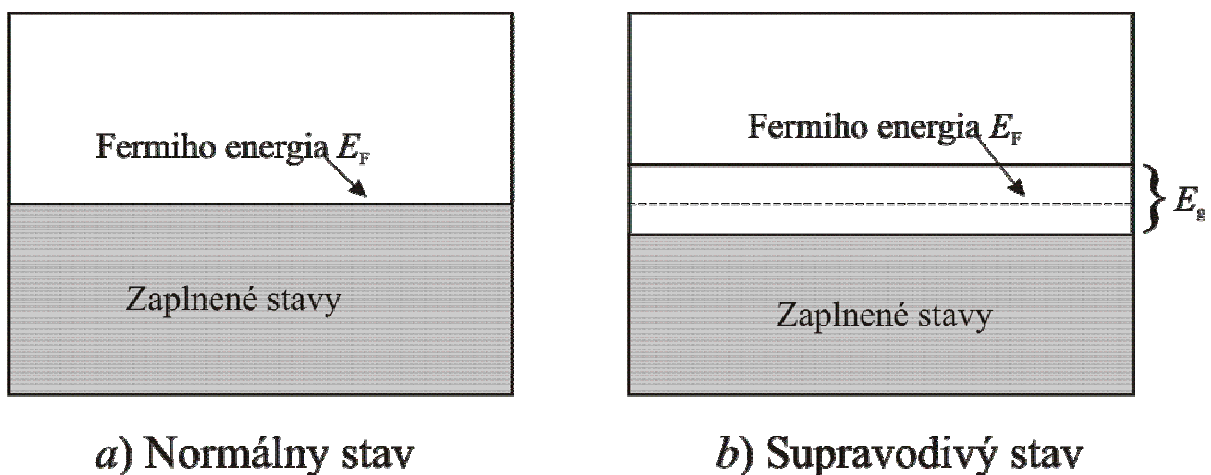
energia je potrebná na rozpad Cooperových párov, tým vyššia kritická teplota je potrebná na to, aby sa supravodič vrátil do normálneho stavu.



Obr. 2 Normálne elektrónové vedenie elektrického prúdu (a), vedenie elektrického prúdu Cooperovými párami (b).

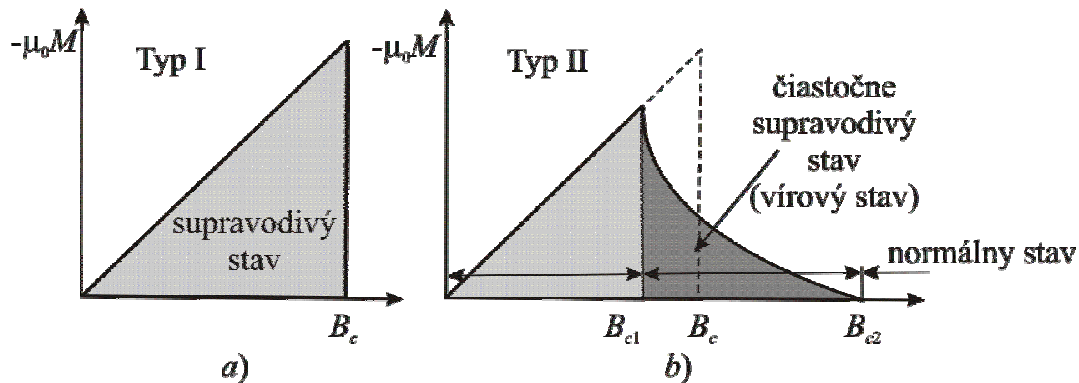
2 Základné postuláty BCS teórie

1. Príťažlivá interakcia medzi elektrónmi je podmienená existenciou energetickej medzery so šírkou E_g , (obr. 3), $E_g \sim 10^{-4} E_F$. Šírka energetickej medzery E_g je relatívne veľmi malá. Kým E_F v pevných látkach je rádovo niekoľko eV, E_g nadobúda rádovo hodnoty $\sim 10^{-22} \text{ J}$.

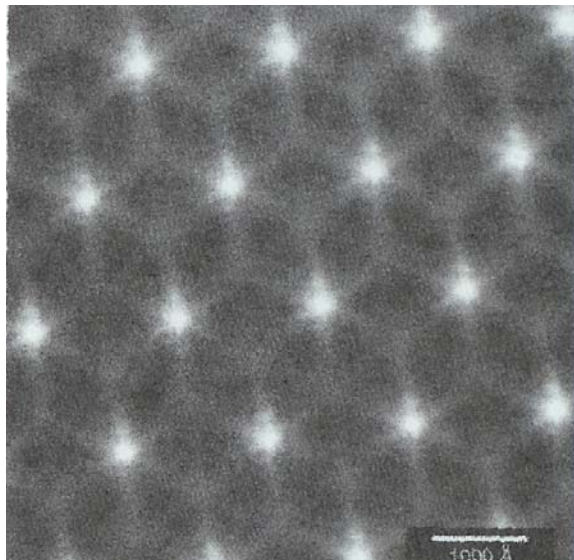


Obr. 3 Fermiho hladina v supravodičoch v a) v normálnom stave a b) v supravodivom stave, E_g – energetická medzera.

2. Termodynamické procesy v supravodivej vzorke pri ochladení pod kritickú teplotu vedú ku vzniku energetickej medzery, ako dôsledku interakcia medzi elektrónmi s vyššími energiami a mriežkou. Elektrón uvoľní fonón (deformuje mriežku). Iný elektrón vidí deformovanú mriežku, prispôsobí jej svoj stav (príjme fonón), druhý elektrón interaguje s prvým prostredníctvom deformácie mriežky. Tvoria dvojice elektrónov, Cooperové páry. Jednočasticové stavy sú obsadzované dvojicami elektrónov s vlnovými číslami $k\uparrow$ a $-k\downarrow$. Oba stavy buď sú obsadené alebo sú voľné.
3. Z teórie BCS vyplýva aj hĺbka vniku magnetického poľa do vzorky, čo prirodzeným spôsobom vysvetľuje aj ústredný fenomén magnetických vlastností supravodičov, Meissnerov jav, obr. 4.



Obr. 4 Magnetizačná charakteristika a) supravodiča I. typu (jednoduché prvky s nízkou kritickou teplotou), b) supravodiča II. typu (zlúčeniny, kompozity, HTSC). V oboch prípadoch na vodorovnej osi znázorňujeme indukciu \mathbf{B} vonkajšieho (aplikovaného) magnetického poľa, na zvislú os indukciu indukovaného magnetického poľa $\mathbf{B}_i = -\mu_0 \mathbf{M}$ (tvoreného vlastnou vzorkou), kde \mathbf{M} je magnetizácia. Znamienko - uvádza významnú skutočnosť, že magnetizácia je opačná ako aplikované pole, tzn., že vo vnútri vzorky je magnetické pole nulové. Vzorka je v čistom a vynútenom (ideálnom) diamagnetickom stave. Tento významný magnetický jav supravodičov nazývame **Meissnerov efekt**.



Obr. 5: Povrch vzorky HTSC NbSe₂ snímaný tunelovým mikroskopom. Magnetický tok z vírových centier sú biele terčiky usporiadané hexagonálne, pričom ich hrana ma veľkosť asi 0,1 $\mu\text{m} = 1000$ Å. Úprava povrchu vzorky je analogická ako pri snímaní Bitterových obrazcov na feromagnetických vzorkách.

Zásadne sa však líšia magnetizačné charakteristiky supravodičov I. a II. typu, po prekročení istej hodnoty \mathbf{B}_c , tzv. kritickej indukcie aplikovaného magnetického poľa. Kým u mäkkých supravodičov diamagnetizmus náhle vymizne (tzn. $\mathbf{M} \rightarrow 0$), obr. 4 a), u tvrdých supravodičov postupne nelineárne klesá k nule, medzi hodnotami B_{c1} a B_{c2} magnetickej indukcie, dolnou a hornou kritickou indukciou aplikovaného poľa, obr. 4 b). Vzdialenosť bodov B_{c1} a B_{c2} je v skutočnosti oveľa väčšia, ako je znázornené na obr. 4. Obvykle $B_{c2}/B_{c1} \sim 100$. Oblasť (1) charakteristiky sa volá supravodivá (čistá supravodivosť), oblasť (2) sa nazýva **vírová**, v ktorej ide o kombináciu čistej supravodivosti s tzv. vírovým stavom. Supravodič je zdrojom silného magnetického poľa, ktoré spôsobujú **vírové centrá** (spinnig efekt), obr. 5.

4. Kritérium prechodu do supravodivého stavu vychádza z hustoty elektrónových stavov na Fermiho hladine $D(E_F)$ a parametra U interakcie elektrónov s mriežkou,

ktorý možno odhadnúť s elektrického odporu supravodiča. Pre $D(E_F) \ll 1$ z teórie BCS vyplýva konečný výraz

$$T_C = 1,14 T_D \exp\left(-\frac{1}{U D(E_F)}\right),$$

T_D je Debyeova teplota supravodiča.

5. Z BCS teórie plynie zaujímavý výsledok: čím je väčší odpor pri normálnej teplote (~ 300 K), tým je väčší predpoklad, že kov po ochladení sa stane supravodičom.
6. Presnými meraniami je dokázané, že tok magnetickej indukcie supravodivým prstencom je kvantovaný efektívnou hodnotou náboja $2e$ a nie e , ako pri normálnej vodivosti. Základný stav v BCS teórii je stav elektrónového páru a kvantovanie toku je po kvantách, v ktorých vystupujú náboje $2e$. Základné (najmenšie) kvantum magnetickeho toku v supravodiči je

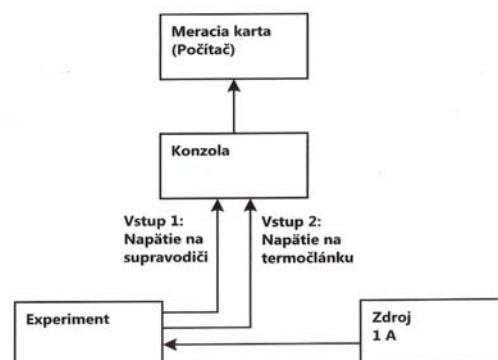
$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} = 2,068 \cdot 10^{-15} \text{ T} \cdot \text{m}^2.$$

Magnetický tok Φ_0 sa nazýva fluxoid, rep. fluxon.

Pozn.: Pri experimentoch súvisiacich so supravodičmi je potrebné používať chladiace médium, ktoré je schopné ochladiť vzorky pod ich kritické teploty. Ako chladiace médium používame najmä tekutý dusík (teplota varu dusíka je $-196,3$ °C), príp. tekuté hélium. Pri práci s tekutým dusíkom je potrebné prísne dodržiavať bezpečnostné pravidlá. Všetci, ktorí s ním pracujú, podpisujú prehlásenie, že sú poučení o bezpečnostných pravidlách pri práci s dusíkom. Ide o dve riziká: tekutý dusík svojou nízkou teplotou môže spáliť napr. živočíšne tkanivo (tento postup sa používa v zdravotníctve napr. pri odstraňovaní bradavíc), veľmi nebezpečné je zasiahnutie očí tekutým dusíkom (je nevyhnutné používať uzavreté ochranné okuliare). Transport dusíka a jeho skladovanie sa realizuje v špeciálnych zosilnených kontajneroch, ktoré majú aj bezpečný systém odvetrávania. Pri laboratórnej teplote sa zvyšuje tlak pár dusíka na vysoké hodnoty, že môže spôsobiť explóziu samotnej nádoby alebo jej uzáverov, čo je druhé riziko. S dusíkom môže manipulovať len osoba poučená a v blízkosti týchto systémov (cca 3 m) sa nemajú zdržovať ďalšie osoby.

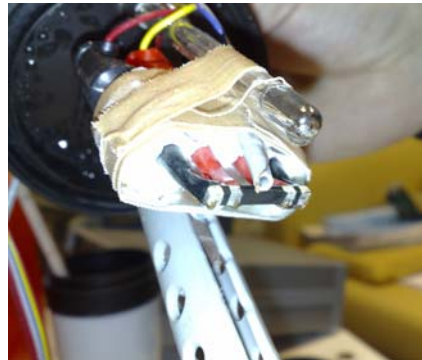
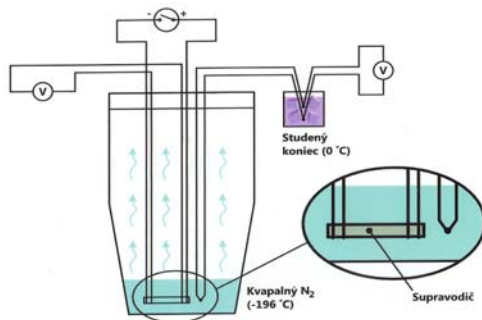
3 Experiment 1: Meranie tepelnej charakteristiky supravodiča

V experimentoch, ktoré prezentujeme chceme demonštrovať základné vlastnosti HTSC. V 1. experimente uvedieme rýchlu a pomerne presnú metódu merania odporovej charakteristiky supravodivej vzorky $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.26}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+x}$ (Bi 2223): $2 \times 2 \times 4$ mm, ktorú sme navrhli ako laboratórnu metódu vhodnú aj pre bežné školské laboratória.



Obr. 6 Bloková schéma zariadenia na laboratórne meranie odporovej charakteristiky a criticalkej teploty T_c HTSC.

Základnou časťou meracieho systému je Dewarova nádoba (DN), do ktorej je vložená koncová meracia jednotka, obr. 7. (obr. 8).



Obr. 7: Náčrtok zostavy zariadenia na meranie odporovej charakteristiky a kritickej teploty T_c HTSC.

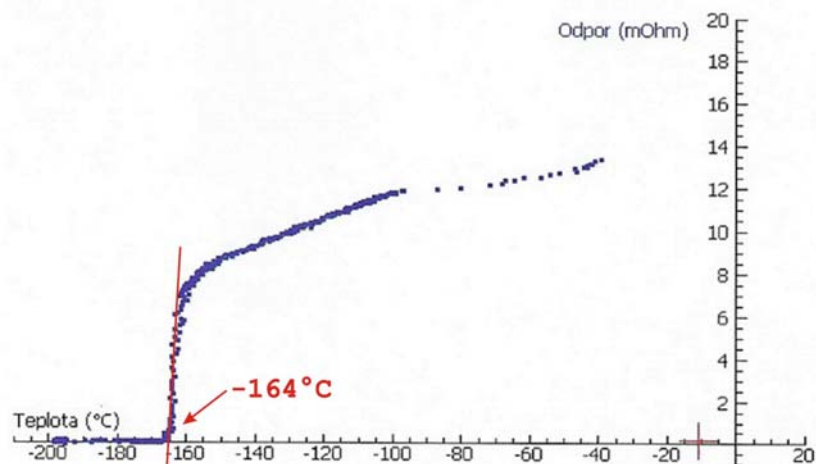
Obr. 8 Meracia jednotka, v strede vzorka s naparenými kontaktmi a meracím koncom termočlánku.

Samotná vzorka má štyri prípojné body, dva prúdové a dva napäťové pre štvorbodovú metódu merania odporu. Na úrovni stredu vzorky je merací koniec termočlánku Cu-Ko (obr. 7, obr. 8), pomocou ktorého sa určuje teplota v bezprostrednom okolí HTSC vzorky (v dobrom priblížení aj teplota samotnej vzorky). Porovnávací koniec termočlánku je ponorený do ľadovej triešte mimo Dewarovej nádoby.

Zmenu teploty vzorky sme riešili kontinuálnym vsúvaním (ponáraním) meracej jednotky do dusíka, resp. vysúvaním (vynáraním) z tekutého dusíka, manuálne, pomocou skrutkového mechanizmu, obr. 8 modrá rúrka. Oveľa jednoduchší a spoľahlivý postup je, ktorý sme navrhli neskôr, pomocou pevného uloženia meracieho systému v DN, pričom tekutý dusík sa nechá prirodzene odparovať. V našom prípade začiatkové množstvo kvapalného dusíka je približne 100 cm^3 . Celý experiment pritom prebehne za dobu 12 – 15 min. Teplota vzorky sa pritom zmení z -196 °C približne na -120 °C . To znamená, že pri kvalitnom počítačovom spracovaní údajov z meracieho systému možno dostatočne presne zaznamenať potrebné údaje, graficky zobrazíť požadované funkcie a určiť kritickú teplotu T_c vzorky. K tomu používame merací systém IP Coach spojený s meracou jednotkou cez interface – konzolu Cma a interface kartu AUR 12. Vzorkovanie hodnôt napätia sa deje s časovou konštantou 1 s (systém umožňuje nastaviť väčšie i menšie hodnoty časovej konštanty).

Pozn.: Počítačové spracovanie možno realizovať aj pomocou iného počítačového meracieho systému.

Nastavenie záznamu hodnôt, napr. elektrického odporu, teploty vzorky, ako funkcie času a potrebných grafov, je v systéme IP Coach pomerne jednoduché. **Najdôležitejšie je grafické zaznamenanie závislosti elektrického odporu HTSC vzorky ako funkcie teploty**, obr. 9. Výhodou z didaktického hľadiska je, že záznam prebieha v reálnom čase, graf sa dopĺňa bod po bode v časovom slede po 1 s, čo možno priamo pozorovať na zobrazovacej jednotke (monitor, projekčné plátno pri použití dataprojektora).

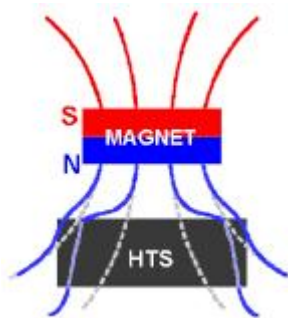


Obr. 9 Grafický počítačový výstup závislosti elektrického odporu HTSC vzorky ako funkcie teploty. Pri poklese teploty, pri hodnote približne -164 °C (T_c) sa náhle zvýši odpor vzorky na normálnu hodnotu, napr. pri teplote -130 °C je okolo $10\text{ m}\Omega$.

4 Experiment 2: Magnetická levitácia

Veľmi atraktívne a neobvyklé sú javy súvisiace s demonštráciou magnetických polí a síl vzoriek HTSC. Stručne ich nazývame magnetická levitácia (vznášanie). V anglickej terminológii sa označujú MAGLEV (Magnetic Levitation). Hlavný smer aplikácie týchto javov je v dopravných systémoch (Magnetic Levitation Train), [2], [7], [10] - [15].

Takmer každá internetová stránka univerzity, obchodných inštitúcií, či vývojových laboratórií v oblasti supravodivosti obsahuje informácie, zobrazenia, statické, či dynamické modely súvisiace s magnetickou levitáciou. To potvrdzuje vysokú popularitu tejto témy vo fyzike, technike a popularizácii vedy.



Obr. 9 Indukčné čiary vírového magnetického poľa HTSC a indukčné čiary permanentného magnetu.

Základom pre fyzikálne vysvetlenie magnetickej levitácie sú **vírové magnetické polia** HTSC. Supravodič ochladený pod svoju kritickú teplotu, umiestnený v blízkosti externého (vonkajšieho) magnetického poľa (napr. permanentného magnetu), má aktivované svoje vírové centrá – na hraniciach zŕn a defektoch. Stabilizovať polohu levitujúceho magnetu nad supravodičom môže silné (a zložené) magnetické pole, ktoré reaguje na každú zmenu polohy magnetu a vracia ho do stabilnej polohy. Tento stav trvá dovtedy, kým kotúč (doštička apod.) HTSC sa udržuje vo vírovom supravodivom stave (teplota HTSC je nižšia ako T_c).



Obr. 10 Levitácia magnetu nad doštičkou HTSC.

Ak napr. vložíme magnet na supravodivý disk, magnet môže zostať v tejto spojenej polohe s diskom alebo pri pokuse o tento stav, magnet je vymrštený do okolia (vysvetlite prečo). Získať správnu polohu pre demonštráciu levitácie, je vecou poznania fyzikálnych vlastností HTSC a praktických skúseností.

Na demonštráciu magnetickej levitácie používame HTSC $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (v skratke sa používa názov YBaCuO), ktorého kritická teplota je 90 K ($-183\text{ }^\circ\text{C}$) a dva magnety NdFeB s priemerom 3,5 mm a 15 mm.



Obr. 11 Levitujúci kotúč HTSC pod magnetom.



Obr. 12 : Levitujúci magnet, ktorý nesie 100 g hliníkový disk.

Kvôli lepšej názornosti magnetickej sily je v sade hliníkový kotúč, ktorý pevne spojíme s magnetom, obr. 12. Pri správnom umiestnení kotúča s magnetom nad HTSC, rotujúci kotúč s magnetom levituje, pokiaľ supravodič chladený dusíkom má nižšiu teplotu ako kritickú (obr.12). Kombinácie HTSC a magnetu môžu byť rôzne, môžeme pritom uplatniť vlastnú nápaditosť a tvorivosť založenú na dobrých fyzikálnych poznatkoch.

Záver

Výskum v oblasti supravodivosti je veľmi vďačná téma. Dôvody sú predovšetkým v tom, že takmer 50 rokov po základnom objave supravodivosti sa venovala pozornosť supravodivosti I. typu. Výskumné laboratória venujú pozornosť supravodivosti II. typu (HTSC) až v ostatných desaťročiach. Aj najvyššie ocenenia za vedecké výsledky vo fyzike v tomto desaťročí boli udelené za prínos v oblasti supravodičov. Nepochybne, táto téma patrí medzi fyzikálne zaujímavé a atraktívne tak pre učiteľov ako i študentov.

Naše pracovisko ponúka spoluprácu jednotlivcom i skupinám v oblasti základného výskumu a didaktických aplikácií v oblasti supravodičov.

Hoci nie každý experiment sa snaživému fyzikovi pri demonštrácii pred plénom podarí, ako sa to stalo i nám v Smoleniciach. Máme tú výhodu, že si experiment

vieme aj predstaviť ako myšlienkový. Napokon, meranie T_c na vzorke HTSC Bc. Peter Krupa pri druhom pokuse úspešne zvládol.



Obr. 13 Základné experimenty prezentujú študenti ŠP Fyzika materiálov Mgr. Miroslav Boboň (vpravo) – magnetickú levitáciu; Bc. Peter Krupa – meranie teplotnej charakteristiky odporu a T_c vzorky HTSC.

PodĎakovanie

Práca vznikla s podporou Ministerstva školstva Slovenskej republiky v rámci projektu KEGA 3/6472/08.

Literatúra

- [1] Kittel, Ch.: Úvod do fyziky pevných látok. Československá akadémia vied, Academia Praha 1985. 598 s. ISBN 21 – 103 – 85.
- [2] www.superconductors.org
- [3] Kittel, Ch.: Introduction to Solid State Physics. John Wiley and Sons, Inc. USA 2005. 680 p. ISBN 0-47-41526-X.
- [4] Blatt Frank J.: Modern Physics. McGRAW-HILL, Inc. New York 1992. 517 p. ISBN 007-005877-6.
- [5] Ashcroft, Neil W., Mermin David N.: Solid State Physics. Brooks/Cole, Thomson Learning. USA 1976. 826 p. ISBN 0-03-083993-9.
- [6] Halliday, D., Resnick, R., Walker, J.: Moderní fyzika. VUT v Brne. Nakl. VUTIUM a PROMETHEUS Praha 2006. ISBN 81-7196-213-9.
- [7] http://www.kf.fpv.ukf.sk/Supravodice_prednaska_slovak.html
- [8] Dekker, J.A.: Fyzika pevných látok. Československá akadémia vied, Academia Praha 1966. 543 s. ISBN 21 -036 – 66.
- [9] Kluvanec, D., Zelenický, L., Krupa, P.: Measuring the Transition Temperature of the HTSC ($\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.26}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+x}$). CoPhys '2008. International conference about the scientific work at the Department of Physics, Juni 19 2008.
- [10] <http://www.physics.udel.edu/~bnikolic/teaching/phys624/lectures.html>
- [11] <http://www.fys.uio.no/super/levitation/>
- [12] <http://www.coolmagnetman.com/magsuper.htm>
- [13] http://www.rtri.or.jp/rd/maglev/html/english/maglev_frame_E.htm
- [14] <http://www.fzu.cz/~jirsa/htm/principles.htm>
- [15] <http://www.matchrockets.com/ether/superconductor.html>

Adresa autorov

Prof. RNDr. Ing. Daniel Kluvanec, CSc., Email: dkluvanec@ukf.sk
 Mgr. Boris Lacsny, PhD., Email: blacsny@ukf.sk
 Mgr. Miroslav Boboň, Email: mbobon@ukf.sk
 Bc. Peter Krupa, Email: krupa.peter@gmail.com
 Katedra fyziky FPV UKF, Tr. A. Hlinku 1, 949 74 Nitra