Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Miloš Matyáš

Základní experimentální poznatky o supravodivosti

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 10 (1965), No. 6, 320--324

Persistent URL: http://dml.cz/dmlcz/138337

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1965

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.

This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* http://project.dml.cz

ZÁKLADNÍ EXPERIMENTÁLNÍ POZNATKY O SUPRAVODIVOSTI

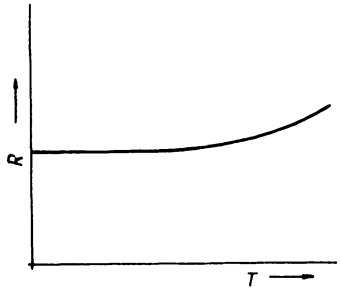
MILOŠ MATYÁŠ, Praha

Přestože je supravodivost známa více než 60 let, objasnit tento jev se podařilo teprve v posledních 10 letech díky intenzívní experimentální a teoretické práci. Supravodivost je fundamentální jev, který má analogie v řadě fyzikálních oblastí. V současné době známe již nejen podstatu supravodivosti, ale i některé její využití v technické praxi. V tomto článku budou uvedeny některé základní experimentální poznatky.

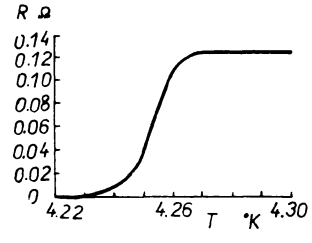
IDEÁLNÍ ELEKTRICKÁ VODIVOST A KRITICKÉ MAGNETICKÉ POLE

V roce 1908 se podařilo H. K. ONNESOVI zkapalnit hélium. Tím byla otevřena experimentálním fyzikům cesta až k teplotě okolo 1°K. Jednou z prvních otázek, kterou si položili v této souvislosti, bylo studium elektrického odporu při nízkých teplotách. Do té doby bylo známo, že se odpor při $T \to 0$ blíží určité konstantní hodnotě, která se nazývá zbytkovým odporem. Teplotní závislost odporu je znázorněna na obr. 1.

Roku 1911 měřil Onnes elektrický odpor velmi čisté rtuti při teplotách v okolí bodu varu kapalného hélia a zjistil, že její odpor náhle klesl těsně pod bodem



Obr. 1. Schematické znázornění teplotní závislosti kovu, který není supravodičem.



Obr. 2. Přechod z normální vodivosti do supravodivosti u rtuti.

varu na nulu. Jeho měření je znázorněno na obr. 2, z kterého je patrné, že pokles odporu proběhl asi v 0,05 stupně. Tento nový jev byl nazván supravodivostí a teplota, při které byl pozorován náhlý pokles odporu prakticky na nulu, se nazývá kritickou teplotou. Později byla supravodivost pozorována ještě u některých dalších kovových prvků.

Na supravodivý stav má velký vliv magnetické pole H. Existuje jisté kritické magne-

tické pole H_c, kdy při $H \geq H_c$ přestává být kov supravodičem. Toto pole je funkcí teploty $T \leq T_c$. Platí vztah

$$H_c = H_0 \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right], \tag{1}$$

kde H_0 značí kritické magnetické pole při absolutní teplotě.

Hned zpočátku bylo důležitou otázkou, jak veliký je odpor supravodiče. K řešení byl použit následující pokus. Vypnutím magnetického pole byl indukován proud ve dvou soustředných smyčkách ze supravodivého kovu, z nichž vnější byla pevná a vnitřní otočná. Obě smyčky byly kruhového tvaru a ve výchozí poloze byly kolmé ke směru magnetického pole. Proud indukovaný v obou smyčkách po vypnutí magnetického pole měl stejný směr, a proto se pohyblivá smyčka upevněná na torzním vláknu vychýlila ze své původní polohy. Z torzního momentu lze určit poměr proudů na začátku pokusu a po uplynutí určité doby t, a tento poměr klesá s časem exponenciálně. První pokusy byly provedeny ONNESEM a TUYNEM v roce 1924 a po 38 letech dovršeny QUINNEM a ITTNEREM. Nejnovější výsledky ukazují, že specifický odpor supravodiče je řádově 10^{-23} ohm cm. Měření na nejčistší mědi při stejných teplotách, která však není supravodičem, ukazují, že její specifický odpor je řádově 10^{-9} ohm cm. Z těchto údajů je patrné, že je možné považovat supravodič za prakticky ideální vodič, v němž se udrží proud velmi dlouho téměř beze změny.

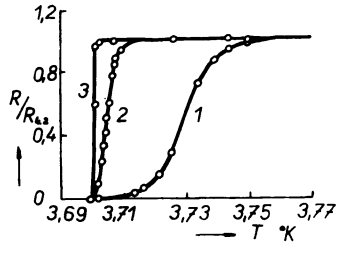
SUPRAVODIVÉ MATERIÁLY

Některé čisté kovy, u kterých byla pozorována supravodivost, jsou uvedeny v tabulce I. V ní je u každého z nich udána kritická teplota T_c a kritické magnetické pole H_0 při absolutní nule. Přechod z normální vodivosti do supravodivosti však vždy

Tabulka I

Prvek	T_c(°K)	H_o(gauss)
hliník	1,19	99
kadmium	0,56	30
galium	1,09	51
indium	3,407	283
lantan	5,95	1600
rtuť	4,153	411
olovo	7,19	803
niob	9,22	1944
technecium	8,2	—
vanad	5,30	1310
molybden	0,95	—
zirkon	0,56	47
iridium	0,14	20

neprobíhá v úzkém teplotním intervalu, kdy je hodnota T_c dobře definovatelná. Nejužší je u monokrystalů cínu, kde obnáší asi $6 \cdot 10^{-4}$ stupně. Měříme-li však již na polykrystalickém cínu, rozšíří se interval teplot odpovídající přechodu z normální vodivosti do supravodivosti (obr. 3). Lze tedy říci, že teplotní interval přechodu vzrůstá s počtem krystalů přítomných v drátu. Stejný vliv vykazuje vzrůstající počet příměsí, mechanické namáhání atd. Dnes se jako kritická teplota T_c definuje teplota, při které poklesne elektrický odpor supravodiče na polovinu hodnoty, kterou měl těsně před přechodem z normální vodivosti do supravodivosti.



Obr. 3. Přechod z normální vodivosti do supravodivosti 1. u polykrystalického cínu, 2. u cínového drátu s velkými zrny, 3. u monokrystalu cínu.

V nedávné době byly zkoumány supravodiče Hg, Sn, Pb a Tl, které byly vždy složeny z jednoho izotopu daného prvku. Ukázalo se, že T_c není konstantní u různých izotopů téhož prvku, nýbrž se mění s hmotou M izotopu podle rovnice $T_c = \alpha \cdot M^{-\frac{1}{2}}$, kde α je konstanta. Je pozoruhodné, že tuto závislost předpověděla nejprve teorie.

Supravodivost je omezena jen na určité prvky z Mendělejevovy periodické tabulky. Všechny kovy nejsou supravodiči. Tento anomální jev nebyl pozorován např. u alkalických a ušlechtilých kovů, u kovů alkalických zemin, u molybdenu, chromu, wolframu atd., přestože jejich teplota byla snížena až na 10^{-2} °K. U všech těchto kovů závisí odpor na teplotě způsobem, který je schematicky znázorněn na obr. 1.

Supravodivost byla dále pozorována u binárních slitin, a to v těchto případech: 1. slitina je tvořena dvěma supravodivými prvky; 2. slitina může být tvořena jedním supravodivým a jedním normálním prvkem, ovšem zachová si strukturu supravodivého prvku; 3. supravodivými mohou být některé intermetalické sloučeniny.

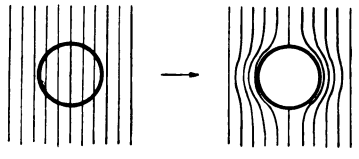
Teplotní intervaly přechodu pozorované v 1. a 2. případě mohou být až 2°. Třetí případ je zajímavý tím, že obsahuje i sloučeniny jako Au_2Bi, LiBi, NiBi, které jsou tvořeny nesupravodivými prvky. Pokud se týká vizmutu, je supravodivý pouze v tenké vrstvě vypařené ve vakuu na skleněnou podložku ochlazenou na 4°K nebo je-li vystaven hydrostatickému tlaku 20 000 až 40 000 atm při teplotách okolo 6°K. Jinak není vizmut supravodivý. U těchto sloučenin je zajímavé i to, že v případě přesného stechiometrického poměru vykazují podobně jako čisté kovy velmi úzký teplotní interval přechodu z normální vodivosti do supravodivosti, tedy že je u nich dobře definována kritická teplota.

Supravodivost byla pozorována dále na sloučeninách, a to u hydridů, boridů, karbidů, nitridů, silicidů a sulfidů. Všechny tyto látky mají kovový vzhled, ovšem od kovů se liší především teplotní závislostí elektrického odporu. Např. CuS se stává supravodivým při 16°K, NbC při 10,1 až 10,5°K, NbH při 7 až 13°K, NbN při 15 až 16°K.

Nejvyšší dosud známou kritickou teplotu má intermetalická sloučenina Nb_3Sn, a to 18,1°K.

MEISSNERŮV JEV

V roce 1933 ukázali MEISSNER a OCHSENFELD, že při ochlazování supravodiče v magnetickém poli pod kritickou teplotu dochází při $T = T_c$ k vytěsnění magnetického pole z měřeného vzorku (obr. 4). Tento jev se nazývá dnes Meissnerovým jevem a byl v době svého objevení v rozporu s tehdejšími znalostmi. Je-li odpor



Obr. 4. Meissnerův jev.

$\varrho = 0$, pak platí, že $\boldsymbol{E} = \varrho\, \boldsymbol{I} = \mathrm{O}$. Je-li elektrické pole $\boldsymbol{E}$ nulové, pak časová změna magnetické indukce $\boldsymbol{B}$ je rovna nule

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{B}}{\mathrm{d}t} = -\, c\, \mathrm{rot}\, \boldsymbol{E} = 0\,. \tag{3}$$

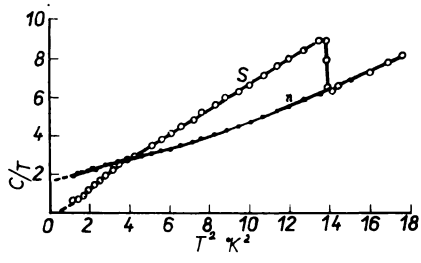
To tedy znamená, že by se magnetické pole uvnitř supravodiče při přechodu z normálního stavu do supravodivého nemělo měnit, pokládáme-li supravodič ve světle předcházejících faktů za ideální vodič s nulovým odporem. Tento rozpor Meissnerova jevu s tehdejšími znalostmi se stal výchozím bodem k fenomenologickým rovnicím, které pro supravodič odvodili F. a H. LONDONOVÉ. Jejich rovnice jsou obdobou Maxwellových rovnic pro normální vodiče.

SPECIFICKÉ TEPLO SUPRAVODIČE

Specifické teplo supravodiče, podobně jako u normálního kovu, je dáno součtem specifického tepla mřížky C_g a specifického tepla elektronů C_e. Lze tedy psát rovnici

$$C_s = C_{gs} + C_{es}\,. \tag{4}$$

Na obr. 5 je uvedeno měření, které provedli CORAK a SATTERWAITE na cínu. Jednou měřili na supravodivém cínu, podruhé na jeho normální vodivé fázi, kterou v celém teplotním intervalu realizovali tak, že měřili při magnetickém poli vždy vyšším než kritické pole cínu. Pro C_s je charakteristický zlom na křivce při $T = T_c$, kdežto



Obr. 5. Teplotní závislost specifického tepla cínu v normálním (*n*) a supravodivém (*s*) stavu.

křivka $C_n(T)$ zůstává hladká. Rozbor experimentálních dat vedl k důležitému poznatku, že

$$C_{es} \sim e^{-K/T} . \tag{5}$$

To tedy znamená, že existuje jistý energetický skok v energetickém spektru vodivostních elektronů, který nebyl u normálních kovů znám. Existuje-li mezi základním a vybuzeným stavem elektronů zakázaný pás energie Δ, pak podle Boltzmannovy statistiky je pravděpodobnost obsazení hladin vybuzeného stavu úměrná $e^{-\Delta/kT}$ a z toho jako důsledek plyne rovnice (5). Zakázaný pás Δ byl v nedávné době experimentálně potvrzen pomocí absorpčních spekter supravodičů v dalekém infračerveném oboru.

ZÁVĚR

V tomto článku jsme uvedli několik základních experimentálních výsledků o supravodivém stavu, které naznačují jeho zvláštnosti a odlišnost od normálního vodivostního stavu. Supravodivost dlouho nebyla teoreticky objasněna. Existovaly již dříve fenomenologická teorie bratří LONDONŮ (z roku 1935) anebo termodynamika přechodu z normální fáze do supravodivé (z roku 1934), které popisovaly makroskopické chování supravodičů. Mikroskopická teorie opírající se o kvantovou mechaniku byla rozvinuta teprve až v roce 1957 a jejími autory jsou BARDEEN, COOPER a SCHRIEFFER.

Konkurenci doutnavkových stabilizátorů napětí

představují křemíkové Zenerovy diody; např. sovětská D 817 G má Zenerovo napětí 100 V a snese proud 50 mA.

Sk