

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Miloslav Šott

Supravodivé materiály a jejich použití ve vědě a technice

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 14 (1969), No. 4, 163--177

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139281>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1969

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>

SUPRAVODIVÉ MATERIÁLY A JEJICH POUŽITÍ VE VĚDĚ
A TECHNICE

MILOSLAV ŠOTT, Řeč.

I. HISTORIE OBJEVU A STUDIA SUPRAVODIVOSTI

Od roku 1908 byla po mnoho let fyzikální laboratoř university v Leidenu jediným místem na světě, kde bylo k dispozici kapalné hélium. Záhy po úspěšném zvládnutí techniky zkvalitňování zahájil KAMERLINGH ONNES studium termodynamických vlastností kapalného hélia a v roce 1911 také studium elektrické vodivosti kovů při teplotách v oboru 2°K až 4°K (-271°C až -269°C). Jeho zájem souvisel s prvními pokusy o formulaci elektronové teorie kovů (P. DRUDE, 1900) a o jednotnou interpretaci tepelné a elektrické vodivosti a termoelektrické síly, založenou na statistických vlastnostech elektronového plynu (H. A. LORENTZ, 1905). Metoda pokusů byla zcela běžná: měřeným vzorkem, umístěným v kapalném héliu (jehož teplotu bylo možné snižovat pod $4,2^{\circ}\text{K}$ čerpáním par) se pouštěl proud známé intenzity a potenciometricky se měřil spád napětí na vzorku.

Zatímco v případě platiny se pokles odporu s klesající teplotou zastavil na konstantní hodnotě, u rtuti Kamerlingh Onnes pozoroval v závislosti $R(T)$ ostrý zlom — při určité teplotě odpor poklesl prakticky skokem na neměřitelně malou hodnotu. Tento jev nebylo možno vysvětlit z tehdejších znalostí o kovech — bylo nutno konstatovat, že jde o fázovou změnu, o přechod rtuti do zcela nového stavu. Vzhledem k praktickému zmizení odporu byl tento stav nazván *supravodivým stavem* a teplota, při níž změna probíhá, *kritickou teplotou* T_{kr} . Kamerlingh Onnes také objevil, že supravodivý stav lze rozrušit vnějším magnetickým polem. Přitom přechod ze supravodivého do normálního stavu probíhá rovněž skokem při dosažení *kritického pole* H_{kr} .

Vedle rtuti provedl Kamerlingh Onnes řadu měření na cínu, který se ukázal (v bílé modifikaci) ideálním pokusným supravodičem ($T_{kr} = 3,7^{\circ}\text{K}$). Dnes je supravodivý stav znám již u 25 čistých kovů a velké řady slitin a intermetalických směsí. První světová válka přerušila další rozvoj bádání, jehož nový rozmach začíná v třicátých letech. Průkopníky jsou opět Holanďané, žáci a mladší spolupracovníci Kamerlingha Onnese (DE HAAS, GORTER, CASIMIR, KEESOM). Supravodivost se však studuje také v Německu (MEISSNER, OCHSENFELD, MENDELSSOHN), Anglii (LONDON,

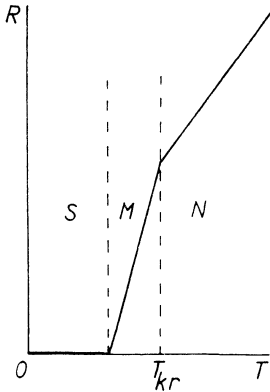
SHOENBERG) a SSSR (ALEKSEJEVSKIJ, ŠUBNIKOV, ŠAENIKOV). Toto období přináší mnoho nových experimentálních výsledků, zejména podrobně se studují magnetické vlastnosti supravodičů a jejich tepelná vodivost. Záhy bylo experimentálního materiálu tolik, že byly učiněny první pokusy o fenomenologickou teorii supravodivosti (CASIMIR a GORTER 1934, F. LONDON a G. LONDON 1935, LANDAU 1937).

Třetí vlna v rozvoji bádání o supravodivosti přichází na začátku druhé poloviny tohoto století. Je podmíněna jednak širokým rozmachem prací v oboru nízkých teplot a jejich technických aplikací a také rozvojem nových metod v teoretické fyzice. Během let 1950—1960 se od fenomenologického popisu pozorovaných jevů dospělo až k mikroskopické teorii supravodivosti — zásluhu na tom má celá plejáda fyziků, zejména sovětských a amerických (H. FRÖHLICH, A. B. PIPPARD, J. BARDEEN, L. COOPER, J. SCHRIFFER, L. D. LANDAU, N. N. BOGOLJUBOV, V. L. GINZBURG, A. A. ABRIKOSOV, I. M. CHALATNIKOV, L. P. GOR'KOV). Základem teorie supravodivosti je představa o *vázaných dvojicích elektronů*, které se v supravodiči pohybují dokonale volně, bez nejmenší ztráty energie. Jejich vznik a pohyb se řídí kvantově-mechanickými zákonitostmi, umožňujícími dobře vysvětlit pozorované vlastnosti a dokonce předvídat nové. S rozvojem teorie souvisí také rozmach praktických aplikací supravodivosti. V laboratorní technice nízkoteplotních experimentů se užívá celé řady supravodivých prvků, jako jsou hladinoměry pro kapalné hélium, tepelné klíče, elektrické přepínače a zařízení pro modifikaci magnetických polí v malých objemech (filtrace zvlnění, stínění, konzervování pole). Z rámce laboratoří do praxe překračuje již vývoj kryotronů pro konstrukci paměťových prvků a logických obvodů kybernetických strojů. Technicky nejvýznamnějšími se v posledních letech staly nově vyvinuté materiály schopné přenášet veliké elektrické proudy v silných magnetických polích. Tyto materiály otevřely nové cesty ke konstrukci výrobně jednoduchých a provozně levných magnetů na mimořádně silná magnetická pole a v této souvislosti i nové perspektivy v tak významných oblastech vědy a techniky jako jsou bublinkové komory pro detekci částic z obřích urychlovačů, zařízení pro řízenou termojadernou reakci a magnetohydrodynamické generátory.

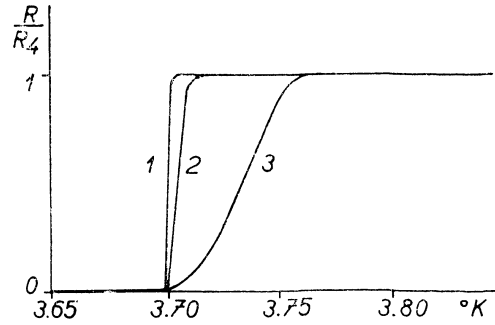
2. ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI SUPRAVODIČŮ

Již v úvodu jsme použili pojmů kritická teplota a kritické pole. Použili jsme jich ve smyslu ostrých, „bodových“ hodnot T a H , při nichž dochází skokem k přechodu z normálního do supravodivého stavu (nebo naopak). To je ovšem zjednodušené — ve skutečnosti má tento přechod vždy konečné trvání a závislost odporu na T (nebo H) je při dostatečně jemném měřítku spojitá, jak je to schematicky naznačeno na obrázku 1. Písmena S , M , N označují pořadě supravodivý stav, mezistav a normální stav. Někdy je šířka mezistavu malá proti přesnosti, s níž měříme teplotu nebo odpor vzorku — přechod je *prakticky* okamžitý při ostře určené teplotě T_{kr} . V mnoha případech však mezistav trvá dostatečně dlouho, aby mohl být detailně studován průběh

$R(T)$ — pak ovšem termín „kritická teplotě“ potřebuje další dohodu. Obvykle se jí rozumí teplota, při níž se objeví první známky zlomu na křivce $R(T)$, jdeme-li směrem $N \rightarrow S$. Kritické teploty různých supravodivých materiálů se značně liší, všechny však leží pod 20°K (-253°C).



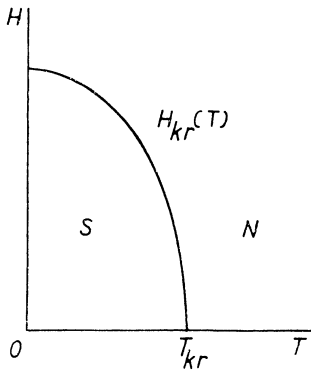
Obr. 1.



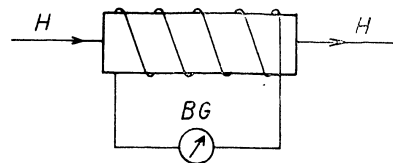
Obr. 2.

Kritická teplota a charakter mezistavu závisí velmi silně na chemické čistotě a na krystalické formě materiálu. Jako příklad srovnáme křivky $R/R_4(T)$ pro čistý cín,

uvedené na obrázku 2 (R_4 znamená odpor při $4,2^\circ\text{K}$, což je teplota kapalného hélia při normálním tlaku par). Křivky 1, 2, 3 odpovídají monokrystalu, polykrystalickému vzorku s velkými krystaly a jemnozrnnému polykrystalickému materiálu.



Obr. 3.



Obr. 4.

Vše, co bylo dosud řečeno o kritické teplotě, platí za předpokladu, že na studovaný vzorek nepůsobí žádné vnější magnetické pole. Vliv magnetického pole může způsobit přechod $S \rightarrow N$ i u supravodiče, jehož teplota je značně nižší než T_{kr} . Sledujeme-li, jakého pole H je třeba k vyvolání přechodu $S \rightarrow N$ při dané teplotě $T < T_{kr}$, najdeme křivku závislosti kritického pole na teplotě, která má tvar znázorněný na obrázku 3. Hodnoty kritických polí u různých supravodičů se liší ve velmi širokých mezích — od několika gaussů (G) do mnoha desítek kilogaussů (kG).

Při určení T_{kr} záleží na tom, jaký je měřicí proud v supravodiči. Při jeho zvyšování se bude T_{kr} posouvat k nižším teplotám a mezistav M rozšiřovat. Při každé konstantní teplotě $T < T_{kr}$ lze najít *kritickou intenzitu proudu* I_{kr} jež způsobí rozrušení supravodivého stavu. SILSBEE (1916) vyslovil domněnku, že rozrušení stavu S kritickým proudem je ekvivalentní jeho rozrušení vnějším magnetickým polem, neboť proud tekoucí supravodičem vytváří vlastní magnetické pole podobně jako u obyčejného vodiče. Musí tedy být $H_{kr} = cI_{kr}$, kde c je pro daný supravodič konstanta závislá jen na materiálu a geometrii. Většinou není výhodné studovat $S - N$ přechod metodou kritického proudu, protože při obnovování odporu se vyděluje značné Jouleovo teplo, které nejen dělá měření obtížným a nepřesným, ale v mnoha případech vede i ke zničení vzorků.

Charakter přechodu $S - N$ závisí také na *frekvenci* měřicího proudu — vysoká frekvence má vliv na rozšíření oblasti M při zachování T_{kr} ; v některých případech může vůbec rozrušit supravodivý stav (např. $2 \cdot 10^{13}$ Hz v případě Sn).

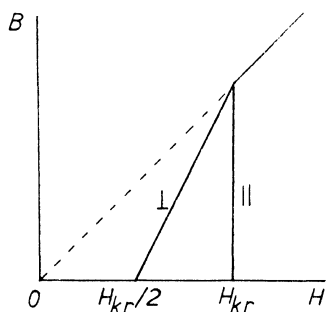
Základem pro zkoumání magnetických vlastností supravodičů byl překvapující objev, že supravodič se chová jako ideální diamagnetikum, z jehož vnitřku jsou zcela vytlačeny magnetické siločáry (MEISSNER - OCHSENFELD, 1933). Tato skutečnost byla demonstrována pokusem, jehož schéma je na obrázku 4. Válec V ze supravodivého materiálu je ovinut cívkou, v jejímž obvodu je balistický galvanometr BG. Zapnutí magnetického pole H podél osy válce, pokud je ve stavu N , vyvolá impuls ručky BG, odpovídající proniknutí pole dovnitř válce. Jestliže budeme nyní válec pomalu ochlazovat až pod teplotu T_{kr} , zaregistruje BG nový impuls stejné velikosti ale opačného směru. To znamená, že uvnitř válce V se skokem obnovil stav, který existoval před aplikací vnějšího pole H — neboli: magnetické pole zvnitřku válce bylo vytlačeno v okamžiku přechodu do supravodivého stavu.

Později byl též jev demonstrován názorným pokusem (ARKADIEV 1945), v němž permanentní magnet, položený na cínový talíř, se samovolně zvedá v okamžiku, kdy cín přejde do supravodivého stavu. Na tomto principu lze konstruovat nízko-temperaturní variantu magnetického závěsu bez tření.

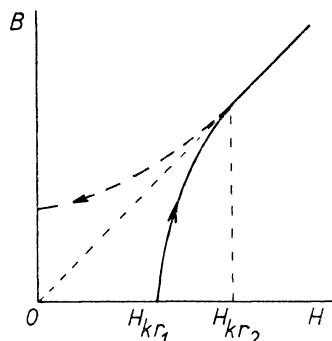
Je třeba poznamenat, že vytlačení magnetického pole ze supravodiče *není důsledkem změny* $R \rightarrow 0$ při přechodu pod T_{kr} . Podle zákonů elektrodynamiky indukují se v okamžiku aplikace vnějšího pole H ve vodiči stínící proudy, které se snaží kompenzovat působící pole. Pokud je odpor vodiče konečný (to odpovídá stavu N v popsanych pokusech), není kompenzace úplná, takže uvnitř vodiče je magnetická indukce $B \neq 0$. Následující změna odporu by podle zákonů elektrodynamiky běžných vodičů mohla vést ke změně B pouze tehdy, kdyby se změnilo H . Protože však v pokusu Meissnera a Ochsenfelda zůstává vnější pole konstantní, neměla by se měnit ani indukce B . Fakt, že se skokem mění na $B = 0$, je tedy principiálně nový jev, vlastní pouze supravodičům. Proto se při popisu supravodivého stavu musí podmínky $R = 0$ a $B = 0$ považovat za rovnocenné a nezávislé.

3. PRONIKÁNÍ MAGNETICKÉHO POLE DO SUPRAVODIČE

Dosavadní popis diamagnetického chování supravodiče je poněkud idealizován. Dokonalé vytlačení pole zevnitřku supravodiče předpokládá, že kompenzující proudy, indukované v okamžiku přechodu $N - S$, tekou *jen po povrchu* supravodivého tělesa. Ve skutečnosti musí ovšem vrstvička, v níž tekou, mít konečnou hloubku, kterou nazýváme *hloubkou průniku* magnetického pole. Hloubka průniku závisí na teplotě supravodiče — je minimální při $T \rightarrow 0$ (10^{-5} až 10^{-6} cm) a značně se zvětšuje při $T \rightarrow T_{kr}$. Rozdělení pole pronikajícího dovnitř supravodiče ani detaily růstu hloubky průniku s rostoucí teplotou nejsou dosud spolehlivě známy. Je však pochopitelné, že vliv hloubky průniku na chování a vlastnosti supravodiče bude tím větší, čím menší a tenčí bude vzorek — proto se supravodivost v tenkých vrstvách stala relativně samostatným oborem jak v teoretické problematice, tak v praktických aplikacích.



Obr. 5.



Obr. 6.

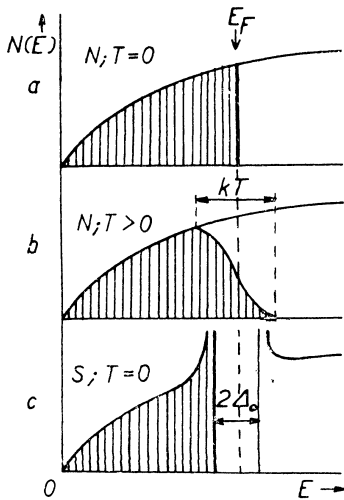
Další faktor, který hraje podstatnou roli pro chování supravodiče v magnetickém poli, je jeho geometrie. Představme si dlouhý válec z čistého kovového supravodiče (jako v případě Meissnerova a Ochsenfeldova pokusu), který má teplotu $T < T_{kr}$. Aplikujme na něj vnější magnetické pole $H > H_{kr}$ (které rozruší supravodivost) a sledujme průběh magnetické indukce B uvnitř válce při postupném snižování H . Zjistili bychom závislost na vzájemné orientaci H a podélné osy válečku o , znázorněnou pro případy $H \nearrow o$ a $H \perp o$ na obrázku 5. Je vidět, že při $H \perp o$ existuje široká oblast mezistavu ($1/2 H_{kr} < H < H_{kr}$), kdy vnější pole postupně proniká do supravodiče. Při srovnání se vzorky jiných tvarů se ukáže, že šířka mezistavu je dána demagnetizačním faktorem vzorku (0 pro dlouhý válec podél H , $1/2$ pro válec s osou kolmou k H , $1/3$ pro kouli atd.). Podstatné je, že průběh závislosti $B(H)$ zůstává lineární a vratný (stejný při $S \rightarrow N$ i $N \rightarrow S$). Závislost na demagnetizačním faktoru lze pochopit tak, že supravodivý „zárodek“ vznikající při průchodu H_{kr} mění v různých případech různě rozložení siločar uvnitř vzorku, čímž se různě utvářejí dočasné „nadkritické“ oblasti ($H > H_{kr}$) se zhuštěním siločar.

Všechno co bylo dosud řečeno platí pro čisté kovové supravodiče (s výjimkou Nb).

U Nb a supravodivých slitin je průběh pronikání pole podstatně jiný (z důvodů, o nichž bude řeč později). Ani v ideálním případě podlouhlého válce s osou rovnoběžnou s H nenajdeme rychlý a vratný $S - N$ přechod, ale velmi široký mezistav s nelineární závislostí $B(H)$. Přechod je charakterizován dvěma kritickými poli: H_{kr1} , kdy vnější pole začíná pronikat, a H_{kr2} , kdy se úplně obnoví normální stav ($B = H$). V literatuře se takovým materiálům říká *supravodiče 2. druhu* nebo také *tvrdé* (vzhledem k tomu, že H_{kr2} mohou být velmi velká – až přes 10^5 G); „obyčejným“ kovům se pak říká *supravodiče 1. druhu* nebo *měkké* (H_{kr} bývá nejvýš řádu 10^2 G). Obrázek 6 ukazuje (plnou čarou) průběh $B(H)$ ve směru $S \rightarrow N$ pro supravodiče 2. druhu. Čárkovaná linie naznačuje, že při obráceném přechodu $N \rightarrow S$ tyto supravodiče jeví hysterezi (proces není vratný).

4. ZÁKLADY SOUČASNÉ TEORIE SUPRAVODIVOSTI

Pomineme dřívější fenomenologické teorie, které se snažily popsat pozorované jevy v podstatě modifikacemi elektrodynamiky. Pokusíme se (pokud to je možné bez příslušného matematického aparátu) podat součanou představu o vzniku supravodivosti a použít ji k výkladu dříve popsaných vlastností supravodičů.



Obr. 7.

Vydeme ze základního předpokladu elektronové teorie kovů, že elektrická i tepelná vodivost jsou podmíněny vodivostními elektrony, které se mohou odpoutat od svých atomů a pohybovat se v krystalické mřížce. Rozdělení rychlostí těchto elektronů se počítá stejně jako statistické rozdělení rychlostí molekul v plynu (odtud termín „elektronový plyn“). O působení iontů na elektrony se předpokládá, že se uplatňuje hlavně na povrchu krystalu, kde zabraňuje jejich úniku z mřížky. Uvnitř se vlivy iontů vzájemně kompenzují, takže výsledný potenciál je konstantní a na elektron tedy nepůsobí žádné síly. (To je ovšem pravda jen v prvním přiblížení – viz dále.)

Kvantová mechanika přiřazuje každému elektronu vlnovou funkci, která vyhovuje Schrödingerově rovnici. Její řešení dovoluje najít možné energetické stavy elektronů a aplikace Pauliho principu dává odpověď na otázku, kolik elektronů může být v každém z nich.

V obrázcích 7a, b, c udává křivka $N(E)$ hustotu energetických stavů (tj. počet možných stavů elektronů o dané energii E); šrafované oblasti ukazují skutečné obsazení těchto stavů elektrony. U normálního vodiče při $T = 0$ jsou zaplněny všechny

nejnižší energetické stavy. Maximální energie ještě obsazeného stavu se nazývá energií Fermiho E_F a je jednou ze základních charakteristik kovů a polovodičů ve fyzice pevných látek. Při $T > 0$ dochází k rozmytí v obsazení horních stavů kolem E_F – některé elektrony ze stavů $E < E_F$ mohou být excitovány tepelným pohybem; proto šířka plyného rozdělení odpovídá energii kT (k je Boltzmannova konst.).

Základním východiskem mikroskopické teorie supravodivosti je předpoklad, že za určitých podmínek mohou vznikat *vázané dvojice elektronů* s opačně orientovanými spiny. Takové dvojice jsou nositeli proudu, ale nepodléhají Pauliho principu – to vede ke změně v hustotě energetických stavů, vyznačené pro $T = 0$ na obrázku 7c. Ve spektru energií se objevuje *mezera* o šířce $2\Delta_0$ kolem Fermiho hladiny. Hustota stavů $N(E)$ se asymptoticky blíží ∞ pro $E = E_F \pm \Delta_0$ a je rovna nule uvnitř mezery.

Při $T = 0$ mají všechny elektrony supravodiče energii $E \leq E_F - \Delta_0$ a jsou vázány v párech. K rozrušení jednoho páru je nutno dodat energii $\varepsilon > 2\Delta_0$. Šířka energetické mezery při $T = 0$ je základním parametrem určujícím vlastnosti supravodiče a je vázána ke kritické teplotě vztahem $2\Delta_0 \doteq 3,5kT_{kr}$. Při zvyšování T se energetická mezera $\Delta(T)$ zmenšuje se zmenšováním rozdílu ($T_{kr} - T$) a mizí při $T = T_{kr}$, kdy se rozruší i poslední supravodivá dvojice a obsazení elektronových hladin bude odpovídat obrázku 7b.

Víme, že mezi elektrony působí poměrně silné odpuzivé elektrostatické síly ubývající se čtvercem vzdálenosti. Aby mohla vzniknout vázaná dvojice elektronů, musí být toto odpuzování kompenzováno a překonáno nějakou přitažlivou interakcí. Kromě gravitačního působení (které je v případě elektronů zcela zanedbatelné proti silám elektrostatickým) neznáme však žádnou přímou interakci vedoucí k přitahování dvou elektronů. Pro vznik vázaných dvojic musíme proto předpokládat vznik přitažlivé interakce nepřímé, zprostředkované mřížkou. Pohyb elektronu mřížkou vyvolá vždy její nepatrnou distorzi, nepatrný výkyv nejbližších iontů z jejich rovnovážných poloh. Při vysoké teplotě je tato fluktuace zcela zanedbatelná proti teplotním kmitům. Při teplotě $T \rightarrow 0$ tepelné vibrace mřížky ustávají a zbytková interakce mezi elektronem a ionty se projeví. Nepatrné vychýlení kladného iontu ovlivní ovšem další elektrony v jeho okolí. Tak se může stát, že dva elektrony se dostanou do vzájemné závislosti přes interakci s ionty, při níž si vzájemně vyměňují nepatrná kvanta energie (fonony) odpovídající vibracím iontů kolem rovnovážné polohy (fononová výměnná vazba). Vazba dvojic je ovšem velmi slabá – energie tepelného pohybu při 20°K (-253°C), která odpovídá $2,76 \times 10^{-15}$ ergu, rozruší párovou korelaci u všech dosud známých supravodičů.

Z hlediska rozhodující úlohy mřížky při zprostředkování párové vazby je pochopitelné, proč u téhož kovu se mění T_{kr} a šířka mezistavu při změně krystalické struktury (viz obr. 2). Rovněž lze vysvětlit, proč se supravodivost nepozoruje u kovů, které jsou nejlepšími vodiči při normálních teplotách (Cu, Ag, Al). Dobrá vodivost těchto kovů souvisí s minimální interakcí mezi vodivostními elektrony a ionty, které proto nemohou zprostředkovat vazbu elektronových párů.

Praktické vymizení odporu v supravodiči se vysvětluje tím, že vázané dvojice jako celek nemohou vydávat a přijímat energii, a proto jimi přenášený proud se šíří beze ztrát. Pro vysvětlení magnetických vlastností je nutno vzít v úvahu hloubku průniku magnetického pole λ a vzdálenost ξ_0 , na kterou působí přitažlivé síly při tvoření dvojic. Typické hodnoty průniku jsou kolem 5×10^{-6} cm. Pro parametr ξ_0 (nazývaný někdy korelační vzdáleností) udává teorie u čistých kovových supravodičů 1. druhu hodnotu řádově 10^{-4} cm. V důsledku $\xi_0 > \lambda$ mají tyto supravodiče kladnou povrchovou energii $E_p \doteq (\xi_0 - \lambda) H_{kr}^2 / 8\pi$ na hranici supravodivé a normální fáze, která se začne tvořit při přechodu $N - S$. Velikost této povrchové energie určuje chování supravodiče v mezistavu.

U supravodičů 2. druhu je korelační vzdálenost ξ_0 podstatně menší, neboť v důsledku strukturálních vlastností (Nb) a přítomnosti cizích atomů v mřížce (slitiny) dochází k intenzivnímu rozptylu elektronů, který ruší „dálkovou“ vazbu dvojic. Je proto $\xi_0 < \lambda$ což vede ke změně znaménka povrchové energie na hranici fází S a N a tím ke zcela odlišnému průběhu přechodu. Změnu vnitřní struktury supravodičů 2. druhu při postupném pronikání pole do supravodiče popisuje teorie A. A. ABRIKOSOVA, podle níž při $H = H_{kr1}$ se dosud homogenní supravodič rozpadne na soustavu supravodivých a normálních vláken orientovaných ve směru pole. Mezi H_{kr1} a H_{kr2} probíhá proces zhušťování vláken N na úkor vláken S až při dosažení H_{kr2} splynou vlákna N v homogenní normální vodič. Měníme-li vnější pole v opačném směru, není proces formování vláken vratný, materiál jeví hysterezi („zamrzání“ pole).

5. JOSEPHSONŮV JEV

Teorie supravodivosti založená na párové korelaci elektronů byla prověřena nejen tím, že mohla vysvětlit pozorované elektrické a magnetické vlastnosti supravodičů. Dokázala mnohem více: předpovědět a popsat nový jev, který byl dodatečně experimentálně prokázán. Jak už bylo uvedeno, působí párová interakce mezi elektrony na vzdálenost řádu 10^{-4} cm; tato veličina udává tedy horní mez velikosti vázaného elektronového páru. Vzhledem k velké hustotě elektronů v kovu to znamená, že „objemy“ korelovaných dvojic se vzájemně prolínají, že dovnitř jedné dvojice zasahují tisíce až miliony dalších. Při přenosu proudu se všechny dvojice pohybují – nemohou se však pohybovat nezávisle, neboť kvantová mechanika nedovoluje, aby se v jednom místě setkaly 2 elektrony se stejným impulsem a stejnou orientací spinu. Aby se takové možnosti předešlo, musí se celý souhrn dvojic pohybovat synchronně, se stejným momentem hybnosti (v těžištové soustavě). V řeči kvantové mechaniky to znamená, že vlnové funkce všech párů mají stejný vlnový vektor a stejnou fázi.

Je zřejmé, že fázová korelace párů je nezbytná uvnitř každého monolitního supravodiče, že však dva různé supravodiče mohou být fázově zcela nezávislé. JOSEPHSON si položil otázku, co se stane v případě, kdy dva supravodiče budou tak blízko, že

sice ještě nesplynou, ale bude možné tunelové pronikání supravodivých párů z jednoho do druhého*) (vzdálenost řádu 10 Å).

Na základě obecných principů teorie předpověděl, že v takovém případě se projeví rozdíl fáze v obou supravodičích tak, že v místě tunelového spoje poteče stejnosměrný proud, jehož intenzita bude funkcí fázového rozdílu. Přiloží-li se na tunelový spoj vnější stejnosměrné napětí, bude se navíc v mezeře generovat střídavé pole o velmi vysoké frekvenci. Oba tyto efekty byly experimentálně potvrzeny.

6. APLIKACE SUPRAVODIVÝCH MATERIÁLŮ V LABORATOŘÍCH

Je přirozené, že pozoruhodných vlastností supravodičů bylo nejdříve využito v technice fyzikálních experimentů; zmíníme se jen o některých příkladech:

a) Hladinoměry pro kapalné hélium

Při práci s kapalným héliem v uzavřených kovových Dewarových nádobách nelze kontrolovat hladinu zrakem. Malé cívečky z vhodného supravodivého drátu, umístěné trvale v nádobě nebo na posuvné tenkostěnné trubičce, prozradí polohu hladiny s přesností 1–2 mm. Měřicí proud (případně nepatrný pomocný ohřev cívečky) se nastaví tak, že ve styku s kapalinou přechází cívka do supravodivého stavu, kdežto nad hladinou se okamžitě obnoví její normální odpor – změna se projeví náhlou výraznou výchylkou na připojeném voltmetru.

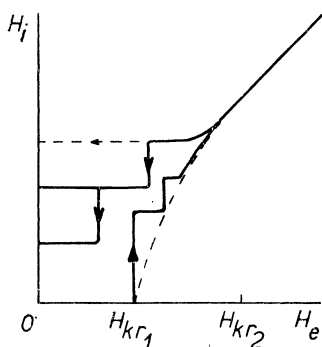
b) Odstínění nebo konzervování stejnosměrného magnetického pole

V experimentální praxi je často třeba chránit určitou část aparatury před vlivy magnetických polí potřebných v části jiné. V mnoha případech stačí k odstranění rušivého pole obal nebo přepážka ze supravodivého materiálu, jehož kritické pole je při dané teplotě vyšší než to, které má být odstíněno. Naopak jindy je žádoucí udržet poměrně silné pole uvnitř malého objemu. Toho lze docílit v dutině válce ze supravodiče 2. druhu o vysokém H_{kr2} . Nejprve se se vnějším polem $H_e > H_{kr2}$ vyvede válec ze supravodivého stavu, potom se H_e snižuje. Díky hysterezi se může uvnitř válce udržet pole $H_i \leq H_{kr2}$, i když vnější pole klesne až na nulu (obr. 8). Na rozdíl od pronikání pole do plného válce (obr. 6) mění se pole v dutině skoky, jejichž velikost a počet závisí na materiálu a geometrii válce a na rychlosti změny H_e . Nevýhodou je, že proces zamrzání není většinou reprodukcibilní a vykazuje velkou citlivost k různým podmínkám (způsob změny H_e , fluktuace teploty apod.). Na obrázku jsou vyznačeny různé možnosti zamrznutí pole (přičemž $H_i \approx H_{kr2}$ je velmi nepravděpodobné).

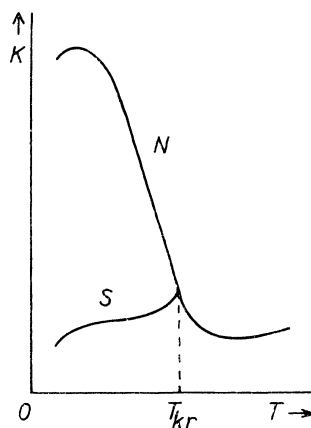
*) Tunelovým jevem nazýváme v kvantové mechanice takový proces, při němž nějakým rozhraním projde částice, jejíž energie je menší než potenciální bariéra, která průchodu brání. Nejznámějším případem ve fyzice je radioaktivní rozpad alfa. V běžném životě jsou známé případy, že se kluk dostane na fotbal, ačkoli nemá na vstupné a ohrada kolem hřiště je vyšší než on.

c) Filtrace zvlňnění magnetického pole

Při použití bezželezových magnetů (solenoidů) velmi vadí střídavá složka výsledného magnetického pole, způsobená zvlňněním proudu z motorogenerátorů. Podstatně snižuje přesnost u řady magnetických měření a některá zcela vylučuje. K jejímu potlačení uvnitř experimentální aparatury lze s úspěchem použít dutých válců ze supravodiče, jejichž stěna je po délce přerušena vloženým tenkým pruhem mědi. Šířka měděného proužku určuje účinnost stínění, neboť dodává celému válci konečný, i když velmi malý odpor. Ten určuje časovou konstantu pro vířivé proudy indukované vlivem zvlňněného pole (čím nižší R , tím nižší frekvence se účinně filtrují – ovšem souvislý supravodivý váleček s $R = 0$ by stínil nebo konzervoval i základní stejnosměrné pole, což je v daném případě nežádoucí).



Obr. 8.



Obr. 9.

d) Tepelné klíče

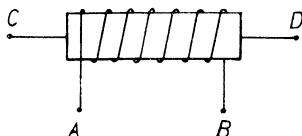
Tepelná vodivost supravodičů (K) se výrazně mění při přechodu ze stavu N do stavu S – charakter změny je znázorněn na obrázku 9. Podstatné snížení tepelné vodivosti ve stavu S je dáno tím, že vázané elektronové dvojice nepřenášejí tepelnou energii. Největší rozdíl ve vodivosti (až $1 : 10^5$) je u nečistších kovů s velkou koncentrací volných elektronů (Sn , Pb , In) – příměs nečistot, na nichž se volné elektrony mohou rozptylovat, silně snižuje vodivost ve stavu N . V praxi nízkoteplotních experimentů je často třeba zkoumaný vzorek střídavě uvádět do kontaktu s nějakou teplotní lázní nebo zase naopak tepelně izolovat. V takovém případě se provede mechanické spojení dráty nebo fóliemi z vhodného materiálu s co nejvyšším rozdílem vodivostí, kolem nichž lze vytvořit nadkritické magnetické pole buď malými cívečkami uvnitř aparatury, nebo vnějším magnetem. Klíč se trvale udržuje na $T < T_{kr}$ a přepíná se ze stavu vodivého do nevodivého magnetickým polem.

e) Elektrické vypínače a přepínače

Možnosti „přepínání“ stavů S a N změnou vnějšího magnetického pole lze v laboratorní praxi využít nejen pro regulaci tepelného kontaktu, ale i v elektrických kontrolních a měřicích obvodech. Už roku 1935 CASIMIR a DE HAAS použili kombinace supravodivého drátu, ovinutého cívkou z jiného supravodiče o vyšších kritických parametrech. Proud dodávaný přes vnitřní supravodič do studovaného obvodu byl zapínán a vypínán magnetickým polem vnější cívečky. Vhodnou kombinací lze na tomto principu konstruovat i složitější prvky jako přepínače, modulátory a podobně. V jednotlivých případech bylo supravodivých obvodů použito ke konstrukci zesilovačů s vysokým ziskem a mimořádně citlivých galvanoměrů (nevýhodou v těchto případech jsou velké časové konstanty).

7. KRYOTRONY

Široká oblast technické aplikace ovládaného S — N přechodu se otevřela v roce 1956, kdy D. A. BUCK poukázal na možnost použití tohoto jevu při konstrukci kybernetických strojů. Východiskem jeho úvah a prvních pokusů byl prvek (v podstatě shodný s vypínačem Casimira a de Haase), pro který se vžil název kryotron.



Obr. 10.

Pracovní část kryotronu (viz obr. 10) tvořil malý kousek supravodivého drátu (Ta, Pb, Sn), ovládacím prvkem byla jednovrstvá cívečka z velmi tenkého niobového drátku, navinutá na povrchu vnitřního supravodiče (Nb se volí proto, že má H_{kr} podstatně vyšší než ostatní čistě kovové supravodiče). Pokud je vnitřní drát v supravodivém stavu, je mezi C a D nulový odpor — to platí do té doby, dokud intenzita magnetického pole, tvořeného niobovou cívkou, nepřekročí kritické pole vnitřního supravodiče (teplota se udržuje konstantní, zpravidla 4,2°K). V tom okamžiku proběhne přechod $S \rightarrow N$ a mezi body C a D se obnoví odpor. Jakmile naopak poklesne proud v ovládací cívečce, obnoví se opět stav S ($R = 0$). Poměrně malými impulsy na vstupu kryotronu A — B můžeme přepínat výstup C — D mezi dvěma krajními polohami: vede — nevede. A to je přesně to, co tvoří základní prvek všech klopných obvodů v elektronice, ať už klasické či tranzistorové.

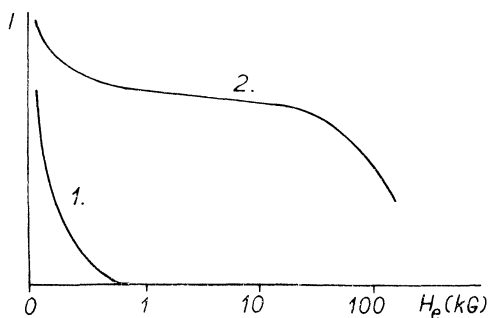
Buckova zásluha je v tom, že jako první položil otázku, zda lze pomocí kryotronů vytvořit všechny prvky potřebné pro paměťové buňky a logické obvody počítačů a jaké výhody (případně nevýhody) by taková zařízení měla proti nejlepším součas-

ným celotranzistorovým strojům. První část otázky je v podstatě zodpověděna kladně – všechny obvody pro potřebné funkce lze vytvořit. Obtížnější je odpověď na otázku o perspektivní produktivitě a rentabilitě při výrobě, obsluze a údržbě. Jedna nevýhoda, bránící masovému rozvoji kryotronových počítačů, je nasnadě – je to nutnost pracovat při teplotě kapalného hélia. V současné době pouze v USA a v SSSR jsou připraveny podmínky pro to, aby mohlo být kapalné hélium dodáváno kamkoli z velkovýroben podobně jako kapalný dusík nebo plyny v tlakových lahvích. Rozvoj technologie a použití kapalného hélia však pokračuje dosti rychle v řadě menších technicky pokročilých zemí (i u nás). Na druhé straně je už dnes jasné, že kryotronové stroje by měly některé nepopíratelné přednosti, mezi něž patří: zanedbatelná spotřeba, vyšší provozní spolehlivost, velkokapacitní paměti (10^6 až 10^9 jednotek) v malém objemu. I technologie výroby a montáže by mohla být podstatně levnější a rychlejší než u tranzistorovaných počítačů. Nepoužívalo by se ovšem drátového kryotronu, popsaného výše, ale kryotronů sestavených ze dvou vzájemně izolovaných velmi tenkých vrstev (pod 1 mikron), uložených příčně nebo podélně, z nichž jedna zastává funkci pracovního a druhá ovládacího prvku. Takové kryotrony mají délku nejvýš několik mm a existují již zařízení, která dovolují postupným vakuovým napařováním potřebných vrstev připravit rychle a levně celé velmi složité obvody na destičkách o rozměrech do 10×10 cm. Pokračující výzkum chování supravodičů v tenkých vrstvách přináší doslova denně nové poznatky, které vedou k dosažení špičkových parametrů (zejména mimořádné operační rychlosti, překračující o 1 až 2 řády nejlepší současné obvody s tunelovými diodami). Zdá se tedy, že kryotronová zařízení jsou budoucností kybernetiky.

8. SUPRAVODIVÉ SOLENOIDY NA VELMI SILNÁ MAGNETICKÁ POLE

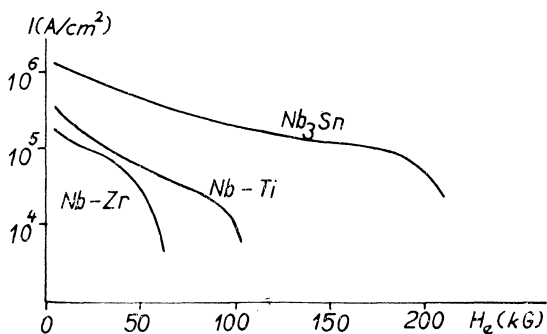
Myšlenka využít nulového odporu supravodiče k bezztrátovému přenosu proudu je tak stará, jako sám objev supravodivosti. Již v Leidenu byly provedeny pokusy s „věčnými“ proudy, které se v prstencích ze supravodivého kovu (Sn) udržely bez měřitelných ztrát tak dlouho, dokud byla udržována $T < T_{kr}$. Pokud však výzkum zůstával u supravodičů 1. druhu, byla možnost bezztrátového přenosu omezena velmi nízkým kritickým polem těchto materiálů – přenášený proud mohl být jen velmi slabý. Teprve s objevem supravodičů 2. druhu a zejména slitin typu Nb_3Sn a Nb-Zr začíná na počátku šedesátých let éra silnoprůdových aplikací supravodivosti. Uvedli jsme už, jaké jsou hlavní rozdíly v chování supravodičů 1. a 2. druhu. Obrázek 11 ukazuje, jak se tyto rozdíly projevují v závislosti kritické hustoty proudu na vnějším poli. Kritická pole supravodičů 1. druhu jsou i při teplotách $T \ll T_{kr}$ vždy menší, než 1 kG. Přitom kritická proudová hustota klesá velmi rychle s rostoucím H_e . Naproti tomu křivka $I(H_e)$ pro supravodič 2. druhu má velmi dlouhou plochou část, kde v širokém intervalu H_e je materiál schopen přenášet veliké proudy. Jako příklad uveďme slitinu Nb_3Sn , která zůstává supravodivá při proudové hustotě $I = 10^5$ A/cm²

ve vnějších polích až do 200 kG. První pokusy použít Nb_3Sn k výrobě solenoidů (1960–61) ukázaly, že materiál má nevhodné metalurgické a mechanické vlastnosti. Těžko se vyrábí a ještě hůře zpracovává. Je velmi křehký, což ztěžuje jak tažení drátů, tak manipulaci s nimi. Proto se pozornost obrátila ke slitinám typu Nb-Zr. Tyto slitiny lze připravovat s různým poměrem obou složek a ovlivňovat v širokých mezích



Obr. 11.

jejich supravodivé i mechanické vlastnosti žiháním (zejména mezi jednotlivými operacemi mechanickými) nebo příměsími třetí složky (Ti). Z materiálů tohoto typu se v letech 1962–1965 podařilo konstruovat solenoidy, které dávaly magnetická pole 50–70 kG v mezerách o průměru 2–5 cm. Pro srovnání s dosavadní technikou uvedme, že magnety se železným jhem a pólovými nástavci mohou dávat nejvýše 30 kG a bezželezové solenoidy na 50 kG při mezeře kolem 5 cm vyžadují k provozu trvalý příkon nejméně 1 MW a s tím související technicky náročný systém chlazení.



Obr. 12.

Během posledních 3–4 let se věnovalo mnoho pozornosti zlepšení kvality supravodivých materiálů. Za rozhodující pokrok lze považovat zjištění, že uložením supravodivých drátů nebo pásek do měděné matrice se významně zlepšují a stabilizují elektrické vlastnosti vodičů a usnadňují se i podmínky pro vinutí. Dalším pokrokem je ovládnutí technologie výroby supravodičů na bázi Nb-Ti, které značně předčí

slitiny typu Nb-Zr v možnosti dosažení vyšších polí (kolem 100 kG). Pro vytvoření magnetických polí až 200 kG přichází nadále v úvahu jako nejlepší materiál Nb₃Sn. Potíže s jeho mechanickými vlastnostmi se podařilo vyřešit přípravou velmi tenkých Nb fólií, na jejichž povrchu se chemicky nebo difúzí vytváří vrstvička Nb₃Sn a celý vodič se elektrochemicky nebo mechanicky pokrývá mědí. Vzniklý pásek o šířce asi 10–12 mm a tloušťce řádově 0,1 mm má vynikající vlastnosti elektrické i mechanické.

Pro srovnání jsou na obrázku 12 uvedeny charakteristické křivky $I(H_e)$ pro hlavní typy používaných materiálů. Tyto křivky odpovídají krátkým vzorkům ve vnějším poli. Je samozřejmé, že u hotového solenoidu jsou poměry složitější, neboť různé části vodiče budou vystaveny různým polím, přičemž proud, který může vinutí přenášet, bude vždy určen jeho nejslabším místem. Zhruba lze říci, že maximální proudová hustota ve vinutí při daném poli solenoidu H_s je asi 5–10krát nižší než kritická hustota v krátkém vzorku ve stejně silném vnějším poli H_e .

Vodiče všech těchto typů se komerčně vyrábějí v USA a některé z nich také v SSSR, Anglii, Francii a Japonsku. Laboratorně a poloprovozně byly podobné materiály vyvinuty, zkoušeny a použity v řadě dalších zemí, mezi nimi také v ČSSR a NDR.

Počet aplikací supravodivých solenoidů je už dnes veliký a denně roste. Nejde jenom o to, že nahrazují dosavadní typy magnetů všude, kde záleží na malých rozměrech a minimální spotřebě. Ještě významnější je to, že otevírají nové perspektivy. Zejména jde o termojaderné reakce a magnetohydrodynamické (MHD) generátory elektrické energie. V obou těchto případech byla dosud hlavní technickou překážkou obtížnost realizace velmi silných polí v dostatečně velkých objemech. Dnes se pracuje na projektech, které mohou tento problém úspěšně vyřešit (zejména v případě MHD generátorů). Z dalších zajímavých aplikací supravodivých solenoidů uvedme např. solenoid o průměru 1,8 m, který byl zkonstruován pro americké družice Agena. Jeho pole má takovou konfiguraci, že účinně odklání nabitě částice, které se k družici přiblíží a chrání tak přístroje i eventuálně lidskou posádku před účinkem ionizačního záření (zejména radiačních pásů, které jsou důsledkem pokusných výbuchů jaderných zbraní). Další ze zajímavých aplikací je konstrukce solenoidů, které vytvářejí magnetická pole v bublinkových komorách. Tato zařízení slouží k detekci a zviditelnování drah elementárních částic z největších urychlovačů a ke studiu jejich vzájemných interakcí. Velikost bublinkové komory a intenzita magnetického pole omezují horní hranici energií, které lze studovat. Bylo by žádoucí dosáhnout polí 40–50 kG v objemech řádu 100 m³. Že nejde o nemožnou (a dokonce ani ne o příliš vzdálenou) perspektivu dokazuje firemní zpráva společnosti National Research Corporation – Supercon Division ze října 1967 o úspěšném vyzkoušení solenoidu, který dal pole 30 kG v mezeře o průměru 60 cm, přičemž vnější průměr celého solenoidu byl pouze 90 cm (váha 800 kg, délka vinutí 750 m). Tento solenoid byl jen poslední funkční zkouškou materiálu (pásek o průřezu 50 × 2,5 mm obsahující 6 fólií Nb-Ti metalurgicky vázaných v měděné matici), jehož firma použije pro výrobu magnetu o vnitřním průměru 4,9 m, který bude použit na bublinkové komoře v Argonne National

Laboratory (s dokončením se počítá už začátkem roku 1969). To je nesporně největší supravodivý magnet, který je již ve stadiu realizace. Ve stadiu projektových příprav jsou podobné magnety v dalších ústavech zabývajících se fyzikou vysokých energií v USA, SSSR, Anglii, Francii a v CERNu (společná organizace několika západoevropských zemí pro výzkum v oblasti vysokých energií).

9. VÝHLEDY – ZÁVĚR

Uvedené aplikace supravodivosti jsou jen ty nejnámější, ale zdaleka ne všechny. Jen namátkou lze ještě jmenovat ultracitlivé bolometry (detektory tepelného záření), supravodivé rezonanční dutiny, urychlovače a vysokofrekvenční generátory. V oblasti silnoproudých aplikací pak se již dnes vážně posuzují možnosti využití supravodičů ve vinutí točivých strojů a pro transformaci a dálkový přenos elektřiny.

Jak už bylo jednou zdůrazněno (v souvislosti s aplikací kryotronů v kybernetických strojích) je technické využití supravodivosti podmíněno masovým ovládnutím a rozšířením techniky velmi nízkých teplot. Šíření této techniky z laboratoří do technické praxe již začalo – alespoň ve světovém měřítku. I u nás se projevují první náznaky takového vývoje. Je zřejmé, že perspektivy supravodivých materiálů mohou být významným příspěvkem k tomu procesu, jemuž jsme začali říkat vědeckotechnická revoluce a který jako nikdy dosud spojuje neoddělitelně vědu a techniku s výrobním procesem i životními podmínkami nás všech.

Literatura

- [1] V. L. NEWHOUSE: *Applied Superconductivity*, John Wiley, N. York—London—Sydney, 1964.
- [2] E. A. LYNTON: *Superconductivity*, Methuen - London, J. Wiley - N. York, 1962, ruský překlad *Sverchprovodimost'*, Mir Moskva, 1964.
- [3] J. W. BREMER: *Superconductive Devices*, Mc Graw-Hill, N. Y. - Toronto—London, 1962, ruský překlad *Sverchprovodjaščije ustrojstva*, Mir, Moskva, 1964.

Z HISTORIE STARÝCH MĚR A ZAVEDENÍ METRICKÉ SOUSTAVY

RUDOLF KOLOMÝ, Moravská Třebová

V dějinách lidstva můžeme sledovat dlouhodobou snahu po získání základních a pokud možno co nejobektivnějších jednotek pro měření veličin a jejich neustálé zpřesňování a rozšiřování. V tomto článku si povšimneme vývoje délkových jednotek.

U nás byl dán základ sjednocení délkových a plošných měr již za Přemysla Otakara II. Kronikář Václav Hájek z Libočan o několik století později popisuje ve své „Kro-