

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Supravodivost a její využití v praxi

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Robert ZELENKA**
Osobní číslo: **E12B0165P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Supravodivost a její využití v praxi**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište fyzikální principy teorie supravodivosti.
2. Sestavte přehled dnes dostupných supravodivých materiálů.
3. Demonstrujte využití supravodivosti na konkrétních aplikacích.
4. Diskutujte v současnosti řešené problémy a možný vývoj do budoucna.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Broulím**
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2014**
Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2015**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Vlastimil Škočij, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce shrnuje základní fyzikální principy popisující jev supravodivosti v kontextu s historickým vývojem tohoto fenoménu. Práce se také věnuje členění supravodičů dle různých kritérií a především pak jejich využití v praktických aplikacích, které známe již dnes. Na závěr jsou diskutovány možné trendy dalšího vývoje materiálů a také dalších aplikací.

Klíčová slova

Supravodivost, supravodič, HTS, LTS, kritické parametry supravodičů, Meissnerův jev, ideální diamagnetikum, skvid, kryotron, magnetická rezonance, Cooperovy páry.

Abstract

The bachelor thesis summarizes fundamental physical principles describing superconductivity in the context with the historical evolution of this phenomenon. The work also contains the classification of superconductors according to various criteria and practical usage of superconductivity in applications known today. The last part discusses possible courses of development and evolution in the field called superconductivity.

Key words

Superconductivity, superconductor, HTS, LTS, critical parameters of superconductors, Meissner effect, perfect diamagnetism, squid, cryotron, magnetic resonance, Cooper pairs.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 3.6.2015

Robert Zelenka

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	8
ÚVOD	10
1 HISTORIE SUPRAVODIVOSTI	11
1.1 VÝVOJ SUPRAVODIVÝCH MATERIÁLŮ V POSLEDNÍCH 20 LETECH	13
2 FYZIKÁLNÍ PRINCIPY SUPRAVODIVOSTI	15
2.1 KRITICKÉ PARAMETRY.....	15
2.2 MEISSNERŮV JEV	16
2.3 BCS TEORIE.....	17
2.4 JOSEPHSONŮV JEV	19
2.4.1 Stejnoseměrný Josephsonův jev	20
2.4.2 Střídavý Josephsonův jev	20
3 DĚLENÍ SUPRAVODIVÝCH MATERIÁLŮ	21
3.1 DĚLENÍ SUPRAVODIČŮ DLE CHOVÁNÍ V MAGNETICKÉM POLI.....	21
3.1.1 Supravodiče I. druhu.....	21
3.1.2 Supravodiče II. druhu	22
3.2 DĚLENÍ SUPRAVODIČŮ DLE TEPLoty	24
3.2.1 LTS supravodiče.....	24
3.2.2 HTS supravodiče.....	25
4 PRAKTICKÉ APLIKACE SUPRAVODIVOSTI	26
4.1 SUPRAVODIVÉ KABELY	26
4.2 HTS S TEPLOU A STUDENOU IZOLACÍ.....	28
4.3 SUPRAVODIVÉ TRANSFORMÁTORY	28
4.4 SUPRAVODIVÉ MOTORY A GENERÁTORY	30
4.5 SUPRAVODIVÉ AKUMULÁTORY ELEKTRICKÉ ENERGIE	31
4.6 MAGNETICKÁ LEVITACE S VYUŽITÍM SUPRAVODIČŮ	32
4.6.1 Maglev v dopravě.....	33
4.7 URYCHLOVAČE.....	34
4.8 VYUŽITÍ V MEDICÍNĚ – ZOBRAZOVÁNÍ A DIAGNOSTIKA	35
4.9 SKVIDY.....	36
4.10 KRYOTRONY.....	38
5 NOVÉ TEORIE, VÝZKUMY, ZAŘÍZENÍ A DALŠÍ SMĚŘOVÁNÍ VÝVOJE	40
5.1 SUPRAVODIVOST PŘI 190 K	41
5.2 PNIKTIDY	41
5.3 ŘÍZENÍ KRITICKÉ TEPLoty SUPRAVODIČE SVĚTELNÝM PAPSREM	42
ZÁVĚR	43
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	45
PŘÍLOHY	1

Seznam symbolů a zkratek

BCS	Teorie supravodivosti (Bardeen, Cooper, Schrieffer)
squid.....	Superconducting Quantum Interference Device – supravodivé kvantové interferenční zařízení
T	Teplota [K]
T_c	Kritická teplota [K]
\mathbf{B}	Magnetická indukce [T]
B_c	Kritická magnetická indukce [T]
\mathbf{H}	Intenzita magnetického pole [A/m]
H_c	Kritická intenzita magnetického pole [A/m]
\mathbf{J}, \mathbf{j}	Proudová hustota [A/m^2]
J_c	Kritická proudová hustota [A/m^2]
ρ	Měrný elektrický odpor – rezistivita [$\Omega \cdot m$]
\mathbf{E}	Intenzita elektrického pole [V/m]
t	Čas
λ_L	Londonova hloubka vniku [m]
μ_0	Permeabilita vakua [H/m]
m	Hmotnost elektronu [kg]
n	Hustota elektronů
q	Náboj [C]
HTS.....	High Temperature Superconductivity – vysokoteplotní supravodivost
LTS	Low Temperature Superconductivity – nízkoteplotní supravodivost
MRI.....	Magnetic Resonance Imaging – magnetická rezonance
NMR	Nuclear magnetic resonance – nukleární magnetická rezonance
BSCCO	HTS materiály na bázi prvků bismut stroncium vápník měď a kyslík
YBCO	HTS materiály na bázi prvků yttrium baryum měď a kyslík
TBCCO	HTS materiály na bázi prvků thallium baryum vápník měď a kyslík
VN.....	Vysoké napětí
SMES.....	Superconducting Magnetic Energy Storage – supravodivý magnetický zásobník energie
EMS	Elektromagnetická suspenze
EDS.....	Elektrodynamická suspenze

LHC Large Hadron Collider – velký hadronový srážecí (urychlovač)

DC Direct Current - stejnosměrný proud

RF Resonant Frequency – rezonanční frekvence

UV Ultraviolet – ultra fialové (záření)

Úvod

Supravodivost je fenomén, který svět zná již od roku 1911, kdy se nizozemskému fyzikovi Heike Kamerling-Onnesovi v laboratoři v Leidenu podařilo využít zkapalněné helium k postupnému ochlazení rtuti a měřit přitom její odpor. Proč si vybral právě rtuť? Již tehdy bylo možné pomocí opakovaných destilací připravit velmi čistou rtuť - bez příměsí a nečistot - a díky tomu mohlo měření probíhat bez větších nepřesností. Při postupném snižování teploty rtuti elektrický odpor klesal lineárně – až do bodu tzv. kritické teploty, kdy odpor skokově poklesl na neměřitelnou hodnotu. Tento jev byl nazván supravodivost.

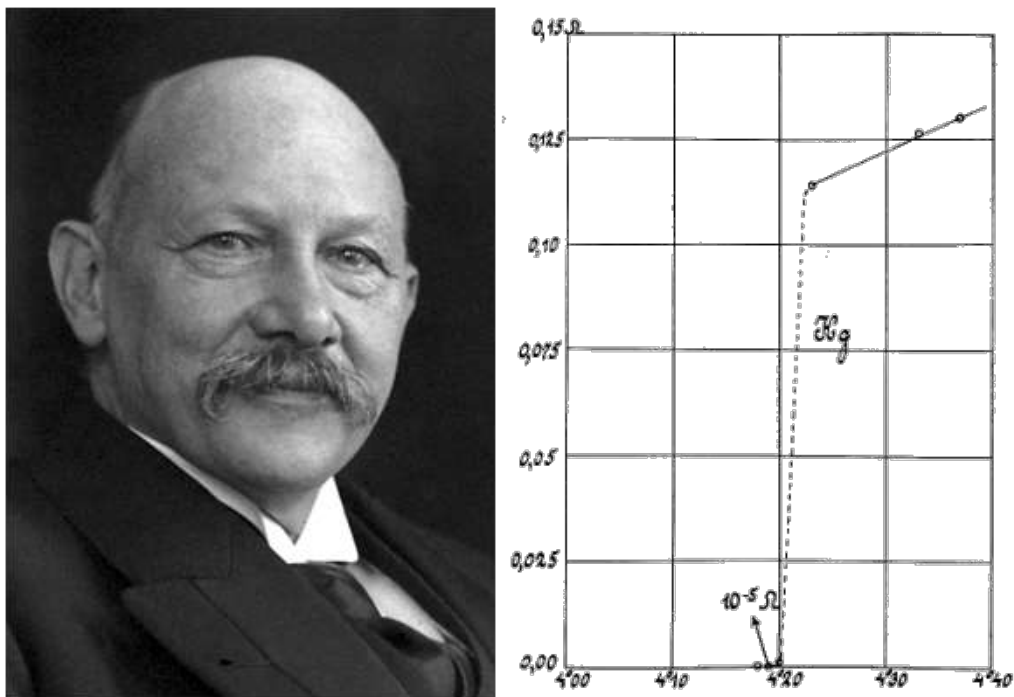
Další Onnesův experiment spočíval v připojení podchlazeného olověného prstence k baterii a k jejímu následnému odpojení. Elektrický proud smyčkou protékal bez připojeného zdroje i o několik hodin později - bez změřitelného úbytku. Opakovaný experiment z roku 1962 nezaznamenal jakýkoliv měřitelný úbytek proudu ani za 2 roky od odpojení zdroje od supravodivé smyčky.

Cílem této bakalářské práce je zmapovat a zformulovat nejdůležitější informace, výzkumy a objevy týkající se supravodivosti, zejména pak její nejpodstatnější využití v praxi ve spojitosti s budoucím směřováním tohoto oboru.

Bakalářská práce je rozdělena do pěti kapitol. První kapitola přibližuje historický vývoj supravodivosti, druhá kapitola se věnuje popisu základních fyzikálních principů, které objasňují principy a jevy spojené se supravodivostí, třetí kapitola rozebírá, na jakém základě jsou supravodiče klasifikovány do jednotlivých skupin, čtvrtá kapitola uvádí důležité přístroje, aplikace a zařízení fungující jen díky existenci supravodivosti a konečně pátá kapitola seznamuje čtenáře s novými teoriemi, s výhledem do budoucna, ale i s problémy, které zatím činí překážky pro masivnější uplatnění supravodičů.

1 Historie supravodivosti

Objev supravodivosti je připisán nizozemskému fyzikovi Heikemu Kamerlingh Onnesovi z univerzity v Leidenu. V roce 1911 provedl experimentální pokus se rtutí, kterou pomocí tekutého helia zchladil na teplotu 4,2 K. Odpor rtuti skokově poklesl na nulovou hodnotu (resp. na neměřitelně nízkou hodnotu). V roce 1913 dostal za tento objev Nobelovu cenu [1], [2].



Obr. 1.1 - Heike Kamerlingh Onnes a jeho autentický graf závislosti odporu na teplotě se zaznamenaným skokovým poklesem odporu rtuti [1], [2].

Dalším významným milníkem byl rok 1933. Němečtí fyzici Walther Meissner a Robert Ochsenfeld objevili klíčovou vlastnost supravodičů, kterou je dokonalé vytěšňování magnetického pole ze svého objemu. Tento jev je nazýván Meissnerův jev, Meissnerův efekt, Meissner-Ochsenfeldův jev nebo také perfektní diamagnetismus. Odpuzování magnetického pole z objemu supravodiče může být tak silné, že je možné dosáhnout levitace magnetu nad supravodičem [3].

V průběhu následujících let vědecké bádání směřovalo k objevování nových supravodivých kovů, jejich slitin a sloučenin, které by za co nejvyšších teplot (nej snadněji dostupných) dosahovaly nulového odporu.

V roce 1941 byla objevena sloučenina niob nitridu s kritickou teplotou $T_c = 16$ K. V roce 1953 slitina vanadu a křemíku s $T_c = 17,5$ K [4].

V roce 1957 američtí fyzici John Bardeen, Leon Cooper a John Schrieffer dali za vznik první široce přijaté teorii supravodivosti označenou jako BCS teorie, jejíž název je odvozen dle počátečních písmen jejich příjmení. V roce 1972 byli za tuto teorii oceněni Nobelovou cenou [2]. BCS teorie vysvětluje supravodivost v teplotách blízkých absolutní nule pro prvky a jejich jednoduché sloučeniny. Nicméně při vyšších teplotách BCS teorie přestává postačovat k plnému objasnění teorie supravodivosti [4].

V roce 1962 americká společnost Westinghouse přišla na trh s prvním komerčně vyráběným supravodivým kabelem, jehož jádro bylo tvořeno slitinou Nb-Ti. V 60. letech 20. století započal vývoj elektromagnetů vytvořených z kompozitu mědi a Nb-Ti firmou Rutherford-Appleton Laboratory. Jejich použití pak přišlo v roce 1987 v Tevatronu – americkém urychlovači částic, který byl do roku 2008, největším na světě [4], [5].

V roce 1962 – tentokrát v Anglii – Brian D. Josephson předpověděl, že elektrický proud je schopen proudit mezi dvěma supravodivými materiály i přes to, že jsou odděleny izolací, která supravodivá není. Tato předpověď byla později ověřena a Brian D. Josephson v roce 1973 získal Nobelovu cenu [2]. Zmiňovaný tunelový efekt se později začal nazývat Josephsonův jev. Aplikace Josephsonova jevu vedla k sestrojení zařízení s názvem Superconducting QUantum Interference Device (squid) – supravodivé kvantové interferenční zařízení, schopné detekovat extrémně slabá magnetická pole [4].

Rok 1986 patří k průlomovému datu. Alex Müller a Georg Bednorz z výzkumné laboratoře IBM ve Švýcarsku vytvořili křehkou sloučeninu na bázi keramiky, která dosáhla do té doby nejvyšší kritické teploty $T_c = 30$ K. Jednalo se o sloučeninu lanthanu, barya, mědi a oxidu. Keramika je běžně využívána jako izolační materiál s velmi špatně vodivými vlastnostmi. Alex Müller a Georg Bednorz v roce 1986 ještě nedokázali tento jev zcela objasnit, i přes to za tento objev byli o rok později oceněni Nobelovo cenou [2], [4].

Müllerův a Bednorzův objev otevřel dveře dalším vědcům ke zkoumání supravodivosti i v jiných materiálech, než jen v kovech. V roce 1987 se vědcům z Alabamy podařilo nahrazením yttria za lanthan vytvořit sloučeninu s kritickou teplotou $T_c = 90$ K, značenou jako YBCO. 92 K je teplota, kterou lze poměrně snadno dosáhnout s použitím tekutého dusíku, což je na rozdíl od do té doby využívaného tekutého helia daleko dostupnější chladicí médium. V dalších letech se hojně experimentovalo s materiály na bázi perovskitové keramiky [4].

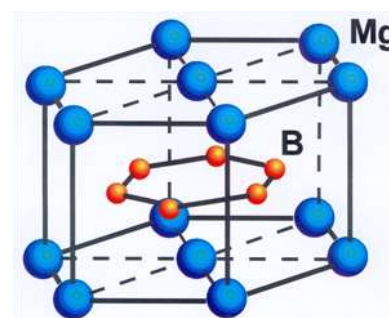
V roce 1994 byla vytvořena sloučenina rtuti, thalia, barya, vápníku, mědi a oxidu, která dosáhla do té doby rekordně nejvyšší kritické teploty $T_c = 138$ K. Je-li tento materiál vystaven působení extrémně vysokého tlaku (více než 300 000 atmosfér), lze kritickou teplotu zvýšit až o 30 stupňů [4].

1.1 Vývoj supravodivých materiálů v posledních 20 letech

V roce 1997 bylo zjištěno, že slitina zlata a india se při teplotách blízkých absolutní nule chová jako supravodič a zároveň i jako magnet. Tyto dva jevy se v doposud objevených materiálech výhradně vylučovaly [4].

Následující roky byly vytvořeny první vysokoteplotní supravodivé materiály, které neobsahovaly žádnou měď (2000) a také první supravodivý materiál vytvořen pouze z perovskitové keramiky (2001) [4].

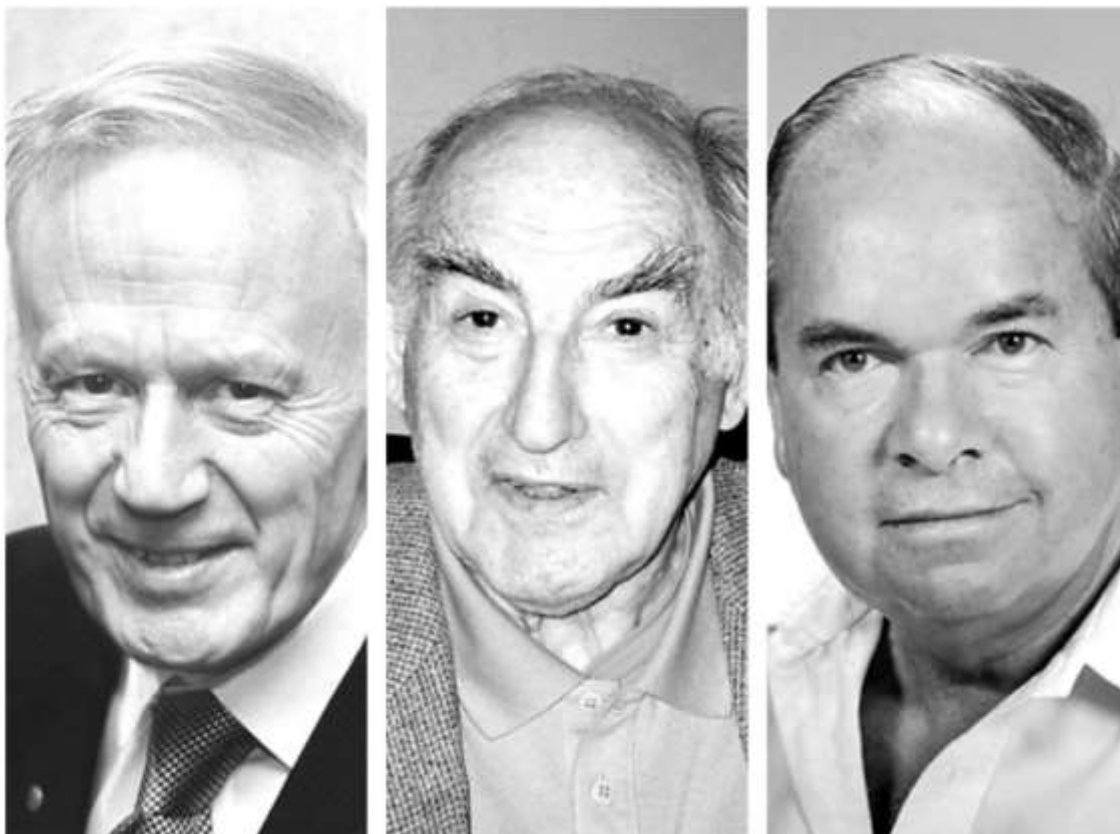
Japonským inženýrům se v roce 2001 podařilo naměřit kritickou teplotu $T_c = 39$ K u MgB_2 . Významný objev to byl proto, jelikož doposud se takto vysokých kritických teplot u materiálů z elementárního prvku nebo u binárních sloučenin nikdy nedosáhlo. Hodnota 39 K je i přes to daleko pod výše zmíněnými kritickými teplotami u materiálů ze složitějších sloučenin [4], [6].



Obr. 1. 2 - Struktura MgB_2 [8].

Vývoj v tomto směru vedl k uplatnění sloučeniny MgB_2 v několika komerčních aplikacích, ve kterých předčil do té doby preferované Nb-Ti a Nb_3Sn . Jednalo se například o supramagnety využívané v magnetické rezonanci [4], [8].

V roce 2003 byla udělena Nobelova cena za fyziku A. A. Abrikosovi, V. L. Ginzburgovi a A. J. Leggettovi za přínos a průkopnictví v oblastech teorie supravodivosti a supratekutosti [2].



Obr. 1. 3 – Nositelé Nobelovy ceny A. A. Abrikosov, V. L. Ginzburg a A. J. Leggett [1], [2].

V roce 2008 se japonským vědcům podařilo objevit supravodivost v novém typu materiálu – ve vrstvené sloučenině LaAsFeO dopované fluorem s kritickou teplotou 26 K. Jednalo se o první supravodič vytvořený na bázi železa. Tento objev nastartoval spoustu vědeckých týmů ke zkoumání podobných sloučenin a během několika měsíců vznikla celá řada supravodivých materiálů podobného typu, jejichž kritická teplota se blížila až k 50 K [4], [9].

Úkolem moderní vědy je nalézt takové látky a materiály, jejichž kritická teplota dosahuje co nejvyšších hodnot. Zároveň je nutné, aby taková látka mohla být snadno použitelná v praxi, tzn. její mechanické vlastnosti, hmotnost a teplotní odolnost musí dovolat bezproblémové použití v současných aplikacích a jejich možných modifikacích na základě využití těchto supravodivých látek.

2 Fyzikální principy supravodivosti

2.1 Kritické parametry

S klesající teplotou se snižuje elektrický odpor vodiče. Z hlediska struktury látky - rezistivita závisí na množství srážek mezi elektrony a kmitajícími atomy. Elektrony při srážce s atomy předávají část své kinetické energie. Tento tepelně-vibrační pohyb atomů v rámci mřížky způsobující při rostoucích teplotách ohřev materiálu (Jouleovy ztráty), je s klesající teplotou redukován. Se zvyšující se teplotou supravodivého materiálu výše popsáný jev způsobuje přechod materiálu do nesupravodivého stavu [10].

Jedním z parametrů určující supravodivost je tedy teplota. Velikost teploty, při které materiál přechází do supravodivého stavu (odpor se dostává na neměřitelně nízkou hodnotu) se nazývá kritická teplota T_c . Na základě kritické teploty dělíme supravodiče na nízkoteplotní a vysokoteplotní [10].

Druhý a třetí parametr určující supravodivost jsou kritická magnetická indukce B_c a kritická hodnota elektrického proudu vztaženého na jednotku průřezu – kritická proudová hustota J_c . Je-li hodnota magnetické indukce, proudové hustoty nebo teploty vyšší než hodnota kritická, supravodivost zaniká [10].

Je-li supravodič vystaven okolnímu magnetickému poli, teplotně závislá kritická magnetická indukce B_c je dána následujícím vztahem.

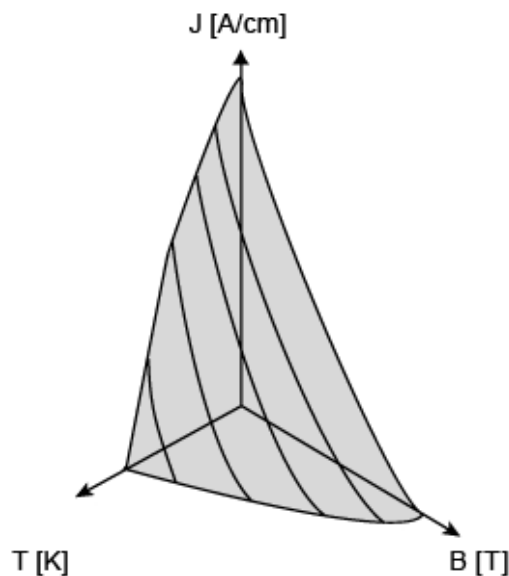
$$B_c(T) = B_c(0) \cdot \left[1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)\right]^2 \quad (2.1)$$

Kde $B_c(0)$ je kritická magnetická indukce při $T = 0$ K. Při kritické teplotě je kritická indukce nulová a platí závislost $B_c(T_c) = 0$ [10].

Na základě chování supravodičů v magnetickém poli je klasifikujeme na supravodiče I. typu a supravodiče II. typu [10].

Pakliže je proud protékající supravodičem zvyšován, roste spolu s ním i velikost vybuzeného magnetického pole, které se snaží do supravodiče vniknout, zároveň je však ze svého objemu vypuzováno. Je-li elektrický proud nad hranicí kritické hodnoty, resp. je-li $J > J_c$, je i vybuzená indukce $B > B_c$. Supravodivost zaniká vlivem průniku magnetického pole do celého objemu vodiče a tedy - uvnitř vodiče pak platí: $\mathbf{B} \neq \mathbf{0}$ [10], [11].

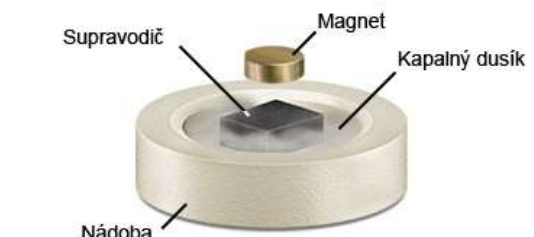
Lze také říct, že oblast supravodivosti je dána funkcí tří veličin – J , B , T .



Obr. 2.1 – Supravodivost jako funkce tří veličin – J , B , T [12].

2.2 Meissnerův jev

Meissnerův jev objevený v roce 1933[3] říká, že supravodič se chová jako dokonalé diamagnetikum a tedy - magnetické pole je z jeho objemu vypuzováno (magnetická indukce je uvnitř supravodiče rovna nule).



Obr. 2.2 – Demonstrace Meissnerova jevu [13].

Meissnerův jev lze odvodit z 2. Maxwellovy rovnice:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.2)$$

Kde \mathbf{E} je intenzita el. pole a t je čas. Ohmův zákon v diferenciálním tvaru je dán:

$$\mathbf{E} = \rho \mathbf{j} \quad (2.3)$$

přičemž ρ značí měrný elektrický odpor (rezistivita) a vektor \mathbf{j} symbolizuje proudovou hustotu. V supravodivém stavu víme, že platí nulový odpor: $\rho = 0$ a tedy formulujeme:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0 \quad (2.4)$$

I při splnění podmínky supravodivosti, kdy vnější $B < B_c$, meissnerovské vypuzování magnetického pole z objemu vodiče přesto není dokonalé. Ve skutečnosti vždy existuje tenká povrchová vrstva vnějšího magnetického pole, které do povrchu supravodiče proniká. V oblasti průniku se indukují stínící proudy, jejichž magnetické pole v supravodivém materiálu vytvoří jakýsi štít, který poté brání dalšímu vniku okolního magnetického pole do objemu supravodiče [10], [11].

V roce 1935 byl tento jev zkoumán bratry Londonovými, kteří na základě svých výzkumů definovali hloubku vniku magnetického pole – λ_L . Hloubka vniku závisí také na teplotě supravodiče. Významně roste při teplotě blízké se T_c [14], [15].

$$\lambda_L = \sqrt{\frac{m}{\mu_0 n q^2}} \quad (2.5)$$

Kde m je hmotnost elektronu, n je koncentrace elektronů v supravodiči a q je náboj [15].

2.3 BCS teorie

Teorie pojmenovaná dle pánů Bardina, Coopera a Schiefra z roku 1957, oceněná v roce 1972 Nobelovo cenou, popisuje mikroskopické děje uvnitř konvenčních supravodičů, které zapříčiňují bezodporový tok elektrického proudu [2].



Obr. 2.3 - John Bardeen, Leon Neil Cooper a John Robert Schrieffer – Autoři BCS teorie [2].

Klasický vodič umožňuje průchod elektrického proudu prostřednictvím volných elektronů, které se dle Coulombova zákona odpuzují. V supravodiči je tomu jinak. Volné elektrony zde vlivem elektron-fononové interakce mezi sebou vytvářejí spojené dvojice - tzv. Cooperovy páry. Ty jsou na rozdíl od samotných elektronů schopny obsadit stejnou energetickou hladinu s jiným Cooperovým párem, díky čemuž můžeme hovořit o supravodivosti [14], [16].

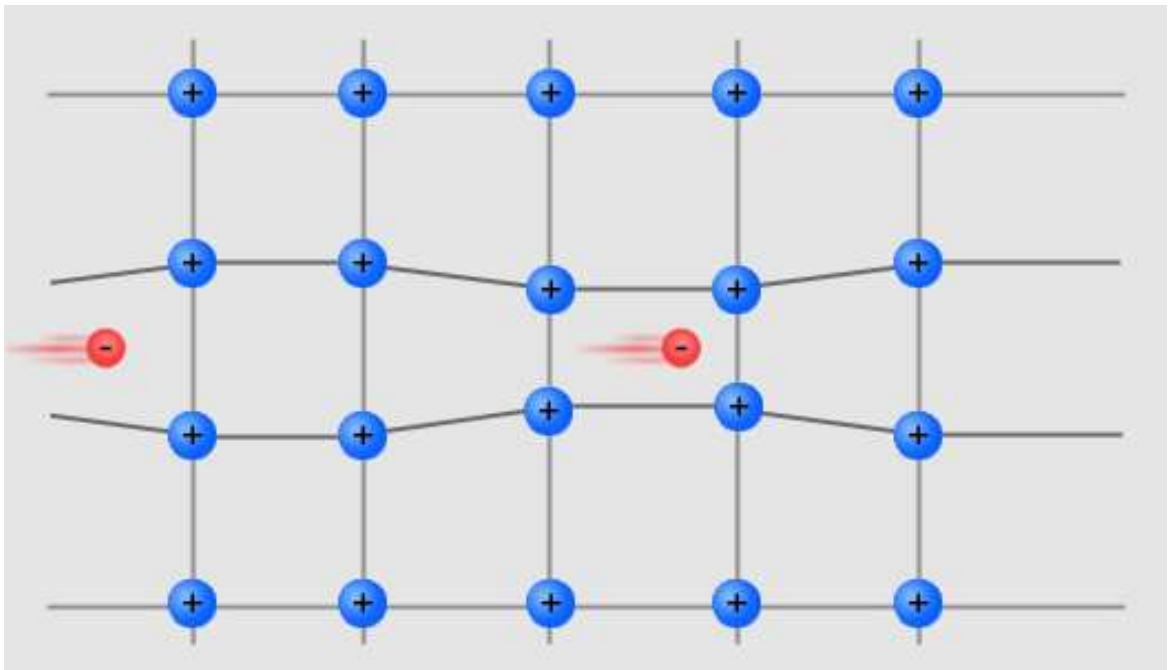
Cooperovy páry tedy nejsou fermiony¹, ale bosony² (nebo bozony) a na rozdíl od elektronů (fermiony) Pauliho vylučovací princip³ nesplňují [14].

¹ Fermiony jsou částice, které mají poločíselný spin a řadíme mezi ně například elektrony, protony nebo neutrony [14], [17].

² Částice zvané bosony mají celočíselný spin (jak mechanické, tak magnetické momenty jsou orientovány opačně a výsledný moment je tedy nulový) a řadíme mezi ně např. elektrony, fotony, fonony [14], [17].

³ Pauliho vylučovací princip říká, že žádné dva fermiony nemohou existovat v jednom systému se stejným kvantovým číslem (v jednočásticovém stavu) [14], [17].

Zjednodušenou formulaci BCS teorie ve své publikaci „Základy fyziky a chemie pevných látek II.“ nabízí Doc. RNDr. Bohumil Kratochvíl, CSc.: „První elektron se pohybuje strukturou kationtů. Podél jeho dráhy je struktura lokálně deformovaná coulombovským přitahováním. Tím se v této oblasti dočasně zvýší hustota kladného náboje. Druhý elektron sleduje dráhu prvního a ještě zachytí deformovanou strukturu před relaxací. Tak vznikne přitažlivá interakce druhého elektronu směrem k nadbytečné polarizaci struktury a s tím i k prvnímu elektronu. Přitahování je samozřejmě možné pouze za podkritických teplot, za vyšší teploty vibrace struktury pár elektronů rozdělí“ [10].

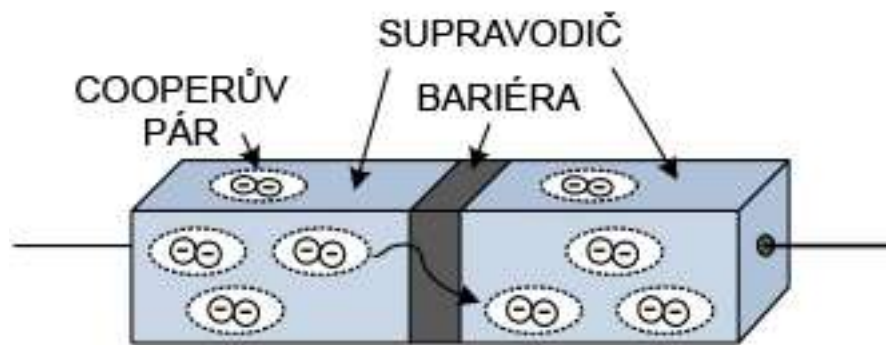


Obr. 2.4 – Znárodnění Cooperových párů v rámci elektron-fononové interakce [18].

K tepelně-vibračnímu pohybu podchlazené (a zpomalené) struktury nedochází. Nedochází tedy ani ke srážkám elektronů s atomy a energie se tudíž neztrácí.

2.4 Josephsonův jev

Brian David Josephson v roce 1962 dokázal předpovědět proces tunelování Cooperových párů mezi dvěma supravodiči oddělenými tenkou vrstvičkou izolantu (řádově méně než 1 μm). Tento jev byl průlomový pro vývoj přístrojů, které využívají detekci extrémně slabého magnetického pole. Dle charakteru proudu můžeme Josephsonův jev rozdělit na střídavý a stejnosměrný [19].



Obr. 2.5 – Josephsonův jev [19].

2.4.1 Stejnoseměrný Josephsonův jev

Mějme supravodič protékaný stejnosměrným proudem na jednom místě oddělený tenkým dielektrickým materiálem o šířce několika desítek nm. Tok proudu je i přes nulový rozdíl potenciálu na obou stranách dielektrické bariéry umožněn díky fázovému rozdílu vlnových funkcí oddělených konců supravodičů. Napětí se na dielektrické bariéře nevytvoří [20].

2.4.2 Střídavý Josephsonův jev

Mějme stejnou představu jako výše s tím rozdílem, že tentokrát na přechod přivedeme střídavé napětí. Na přechodu vzniknou proudové oscilace a díky tomu lze na tomto principu vytvářet převodníky napětí na frekvenci [20].

3 Dělení supravodivých materiálů

Supravodivé materiály můžeme klasifikovat na základě jejich chování v magnetickém poli (supravodiče I. druhu a supravodiče II. druhu) anebo dle jejich kritické teploty na supravodiče vysokoteplotní – High Temperature Superconductors (HTS) a nízkoteplotní - Low Temperature Superconductors (LTS).

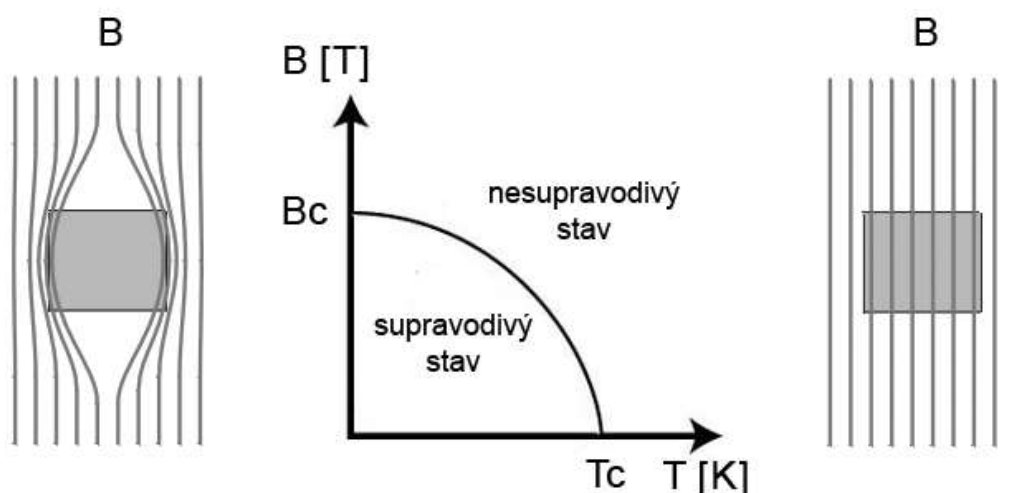
3.1 Dělení supravodičů dle chování v magnetickém poli

Na počátku padesátých let pánové Ginzburg a Landau vytvořili fenomenologickou teorii supravodivosti popisující supravodivý jev v makroskopickém měřítku. Teorii rozváděl i Alexei Abrikosov a dokázal tento matematický model aplikovat k objasnění pronikání magnetického pole do supravodičů II. typu, za což se v roce 2003 stal spolu s Ginzburgem a Leggettem nositelem Nobelovy ceny [2]. Na základě rozdílného chování určitých supravodičů v magnetickém poli supravodiče dělíme na supravodiče I. typu a supravodiče II. typu.

3.1.1 Supravodiče I. druhu

Skupina těchto supravodičů, označovaných také jako „měkké supravodiče“, byla objevena jako první. Jsou v ní zahrnuty především kovové supravodiče. Pro navození supravodivého stavu je potřeba vyvinutí nejnižších teplot. Supravodivý stav nastává okamžitě a velmi strmě při dosažení kritické teploty. Supravodiče I. druhu vykazují perfektní diamagnetismus. Jejich nevýhoda oproti velmi nízké kritické teplotě je i velmi nízká kritická magnetická indukce B_c . Jsou charakterizovány pouze jedním kritickým polem B_c [17], [21].

Ještě donedávna platilo, že mezi supravodiče prvního typu řadíme výhradně čisté prvky. V roce 1992 publikoval francouzský výzkumný tým z Grenoble Institute of Technology objev první supravodivosti typu I u sloučeniny $TaSi_2$ [22]. Od té doby přibylo pouze několik sloučenin, jejichž chování vůči magnetickému poli odpovídá supravodivosti typu I, například ZrB_{12} , $YbSb_2$, $LaPd_2Ge_2$ a z roku 2005 pak objev supravodiče typu I obsahující poprvé i oxid - $Ag_5Pb_2O_6$ [23]. Výčet dalších netypických supravodivých sloučenin I. typu lze najít v článku reportující objev výše zmíněné vrstvené sloučeniny $Ag_5Pb_2O_6$ [23].



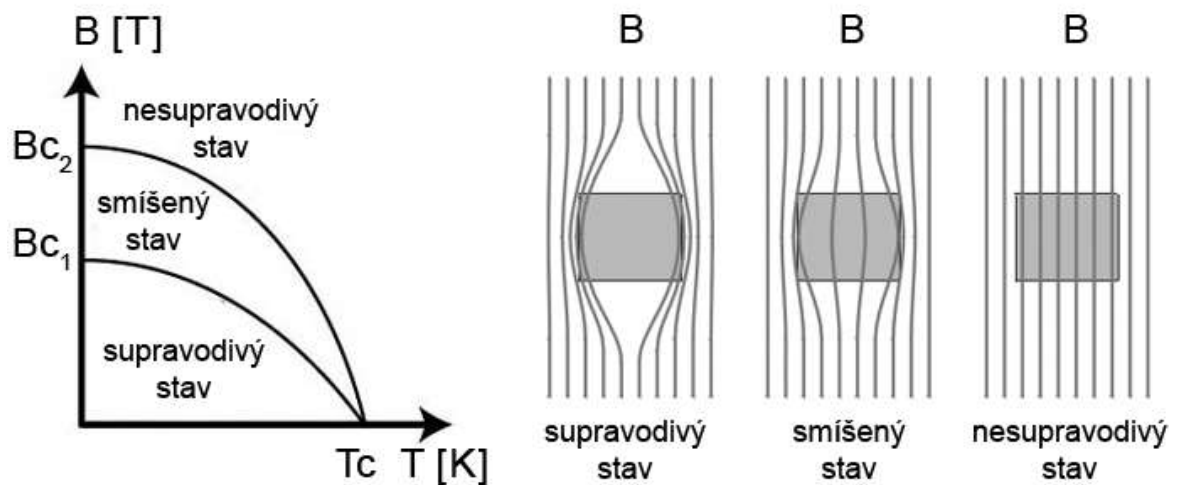
Obr. 3.1 – Supravodiče I. typu – pronikání magnetického pole po překročení kritických hodnot je okamžité a absolutní [24].

3.1.2 Supravodiče II. druhu

Supravodiče 2. druhu, nazývané také jako tvrdé (kritická intenzita magnetického pole H_c bývá v řádech 10^5), mají na rozdíl od supravodičů prvního druhu dvě kritické hodnoty magnetické indukce – B_{c1} a B_{c2} . Zánik supravodivosti při dosažení kritické indukce tedy nenastane naráz [17], [25].

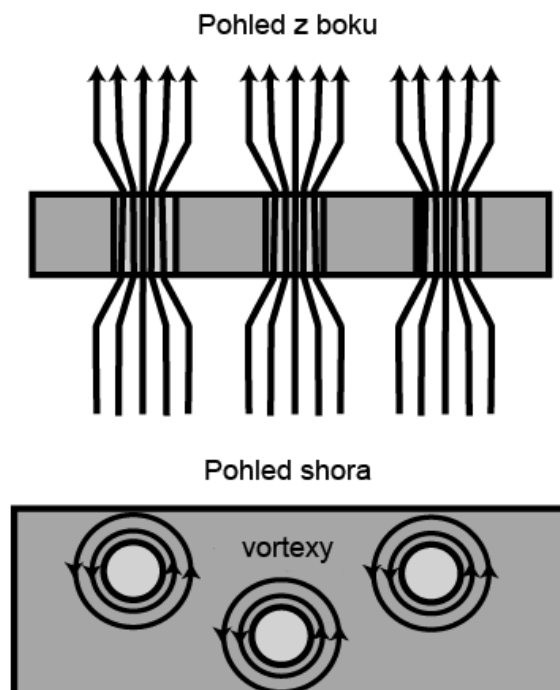
U těchto supravodičů nelze aplikovat Meissnerův jev v konečné platnosti. Supravodič se chová jako perfektní diamagnetikum pouze než dosáhne kritické indukce B_{c1} (zpravidla poměrně nízká hodnota). Po jejím dosažení přejde vodič do tzv. smíšeného stavu, ohraničeného kritickými hodnotami B_{c1} a B_{c2} . Ve smíšeném stavu magnetické pole proniká do objemu vodiče jen částečně, přičemž dojde k vytvoření tzv. laminární struktury supravodivých a nesupravodivých kanálků. Pole tedy prochází oblastmi ve formě tenkých nití zvaných vortexy (česky tokočáry) [17], [26].

Existence vortexů je stejně jako hloubka vniku doprovázená stínícími proudy. Tyto proudy tvoří i zde „štít“ fungující jako neprostupné stěny – v tomto případě stěny jádra víru. Jádro víru je tedy izolováno od magnetického pole, je nesupravodivé a prochází jím magnetický tok. Je-li vnější magnetické pole zvyšováno až na úroveň B_{c2} , supravodivost zcela zaniká [26].



Obr. 3.2 – Supravodiče II. typu – pronikání magnetického pole je postupné, nejprve ve formě vortexů, poté již ve formě absolutní [24].

Supravodivost II. typu je projevována v drtivé většině případu u supravodivých slitin a sloučenin, mimo to i v niobu, vanadu a techneciu, což jsou ojedinělé prvky, které jsou kupodivu sami o sobě supravodiči II. typu [27].



Obr. 3.3 – Supravodiče II. typu – průnik magnetického indukčního toku vodičem, pohled z boku a shora [28].

3.2 Dělení supravodičů dle teploty

Když byla v roce 1986 objevena vysokoteplotní supravodivost, očekávalo se, že elektrotechnický průmysl v blízké době čeká revoluce. I přes obrovský význam tohoto objevu je však skutečností, že vzhledem ke značně složitým a obtížně konstruovatelným sloučeninám HTS supravodičů a také vzhledem k jejich mechanicky nevýhodným vlastnostem (křehkost aj.) je stále ještě většina supravodivých aplikací a přístrojů vyrobena na bázi LTS supravodičů [26].

Dělení supravodičů na HTS a LTS je dáno použitím chladicího média. K chlazení HTS supravodičů se převážně používá tekutý dusík (teplota varu dusíku je 77 K [29]) a k chlazení LTS supravodičů pak kapalné helium s teplotou varu 4,22 K [29]. Určovat přesnou teplotní hranici, která by jednoznačně determinovala zařazení supravodiče do skupiny LTS nebo HTS, je trochu zavádějící. V posledních letech se začalo experimentovat s vystavováním určitých supravodičů extrémně vysokým tlakům, při nichž rapidně rostou kritické teploty, proto je možné, že některý materiál by spadal při atmosférickém tlaku do skupiny LTS a při několiksetkrát vyššímu tlaku do skupiny HTS. Obecně přijatou teplotní hranicí však je 25 K. Dosáhne-li supravodivý materiál kritické teploty při teplotách vyšších, hovoříme o vysokoteplotních supravodičích. Je-li k přechodu do supravodivého stavu zapotřebí využít nižších teplot, jedná se o nízkoteplotní supravodiče [30].

3.2.1 LTS supravodiče

Nízkoteplotní LTS supravodiče byly objeveny v rámci prvních výzkumů, během pokusů mapujících jev supravodivosti. Mezi LTS řadíme všechny kovové prvky a jejich slitiny. Nízkoteplotní supravodiče přecházejí do supravodivého stavu při velmi nízkých teplotách zpravidla nepřesahujících 23 K [30]. K chlazení je zapotřebí tedy využívat kapalného helia, jehož teplota varu je 4,22 K [29]. Lze také říct, že veškeré objevené supravodiče před rokem 1986 jsou LTS (a zároveň supravodiče I. typu). Až s objevy po roce 1986 začaly být supravodivé materiály klasifikovány mimo jiné na LTS a HTS [31].

Výhody LTS jsou zjevné na první pohled. Jedná se o klasické kovy (případně jejich slitiny) a jako takové tyto materiály disponují dobrými mechanickými vlastnostmi i poměrně snadnou realizací jejich výroby. Často využívané nízkoteplotní supravodiče jsou vyrobeny

ze slitin NbTi a NbTs, využití najdou pro výrobu silných elektromagnetů a ty se dále využívají například v MRI a NMR, spektrometrech, a dalších projektech [31].

3.2.2 HTS supravodiče

Velmi nízké teploty potřebné k dosažení supravodivosti byly překážkou pro masivnější uplatnění LTS supravodičů, proto se výzkumy soustředily na objevení materiálů, které by dosahovaly supravodivosti za dostupnějších teplot. Objev supravodivých keramických sloučenin v roce 1986 znamenal velký úspěch a rozvoj nového typu materiálů s obrovským potenciálem pro využití [31].

Do roku 2001 [6] se předpokládalo, že HTS supravodiče jsou pouze sloučeniny na bázi mědi a oxidu (kupráty). Překvapivý objev vysokoteplotní supravodivosti u MgB_2 s kritickou teplotou 39 K v roce 2001 [6] a dále v roce 2008 u materiálů na bázi železa zvaných pniktidy, znamenal další důkaz o tom, že vysokoteplotní supravodivost je zdaleka ještě neprobádaná oblast [9], [32].

MgB_2 je slibným materiálem. Díky své jednoduché struktuře a příznivým mechanickým vlastnostem může být poměrně nenáročnými způsoby zpracováván ve vodiče nebo tenké filmy resp. tenké vodivé pásy, chcete-li a v budoucnu může nalézt zajímavá uplatnění, například viz kapitola 4.1 [9].

Nejvýznamnější HTS materiály jsou rodiny kuprátů na bázi bismutu stroncia vápníku mědi a kyslíku, zvaných BSCCO a nebo druhá významná rodina na bázi yttria barya mědi a kyslíku, zvaná YBCO. Využití nalézají v aplikacích magnetické levitace, přenosu energie, zásobnících energie nebo urychlovačů částic [31].

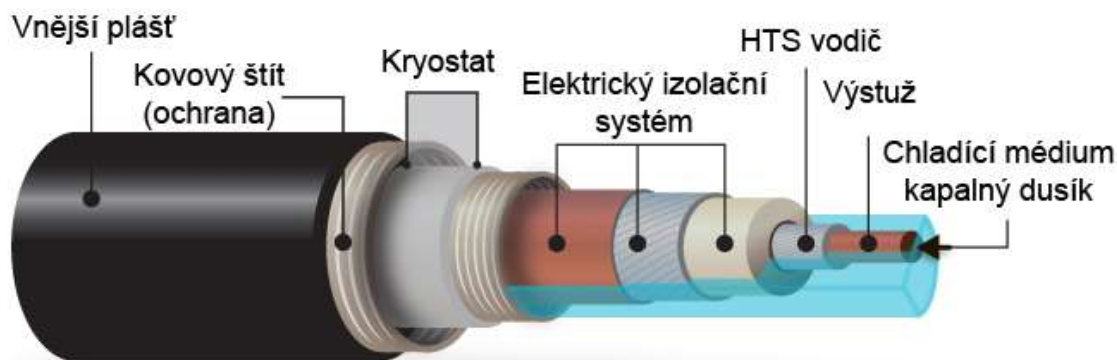
Supravodivost v HTS supravodičích nebyla doposud spolehlivě vědecky objasněna. BCS teorie hovořící o vzniku Cooperových elektronových párů se skutečně uplatňuje pouze u LTS supravodičů. Elektron-fononová interakce nemůže při teplotách vyšších než 23 K zapříčinit vznik Cooperových párů [14].

4 Praktické aplikace supravodivosti

Supravodivost nachází uplatnění v obrovské řadě aplikací. V této kapitole se pokusím nastínit nejvýznamnější aplikace a stroje využívající ke svému chodu supravodiče, případně fyzikální principy odvozené z tohoto jevu, které dnes a denně usnadňují život lidem po celém světě.

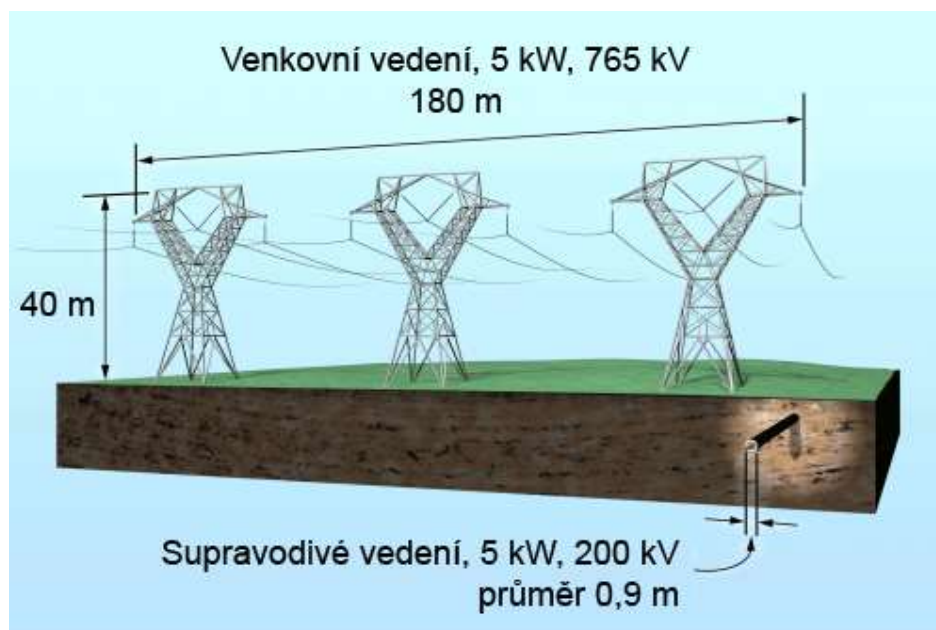
4.1 Supravodivé kabely

Se zvyšující se vzdáleností mezi odběratelem elektrické energie a jejím zdrojem rostou i přenosové ztráty. Supravodivé kabely HTS díky schopnosti bezztrátově vést elektrický proud jsou schopny tyto ztráty zcela eliminovat.



Obr. 4.1 – Typická konfigurace HTS kabelu [33].

Supravodivé HTS kabely mohou přenášet několikanásobně větší výkony než tradiční hliníkové nebo měděné kabely. Americká společnost AMSC, která se mimo jiné zabývá výrobou supravodivých HTS kabelů, udává k produktu Amperium Brass Laminated Wire Type 8700 schopnost vést až 200x větší elektrický proud v porovnání s konvenčním měděným kabelem o srovnatelných rozměrech. Ekvivalentní výkony přenášené běžným vedením lze tedy díky supravodičům přenášet s daleko menšími průřezy a díky tomu rapidně omezit materiál i prostorové využití krajiny pro přenos elektrické energie [34].



Obr. 4.2 – Porovnání supravodivého vedení s konvenčním vedením [35].

HTS kabely jsou tvořeny buďto stovkami spletenými tenkými HTS vlákny opředenými okolo měděného jádra v kombinaci s chladičím systémem, nebo jsou tvořeny tenkými a ohebnými keramickými pásky. Chlazení je zprostředkováno levným a dostupným tekutým dusíkem, případně také tekutým vodíkem [36], [37].

Komerčně dostupné a využívané materiály pro supravodivé kabely jsou $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (BSCCO) – označován jako materiál 1. generace s kritickou teplotou 92 K a $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO) – označován jako materiál 2. generace s kritickou teplotou 110 K [36], [37].

V roce 2001 byl objeven materiál MgB_2 s kritickou teplotou 39 K [6]. I přes poměrně nízkou kritickou teplotou je tento materiál považován za velmi perspektivní pro komerční využití v odvětví supravodivých kabelů a to proto, že je vytvořen z relativně levných a snadno dostupných materiálů [36], [37].

MgB_2 je velmi dobře mechanicky i chemicky kompatibilní s celou řadou čistých prvků a běžných slitin. Pro současný výzkum je tento materiál velmi atraktivní a do budoucna lze předpokládat, že bude nadále rozvíjen a kombinován se snadno dostupnými materiály s cílem dosažení co nejvyšších kritických teplot. MgB_2 je už dnes velmi oblíben díky příznivému poměru cena/výkon [36], [37].

4.2 HTS s teplou a studenou izolací

HTS supravodiče využívají dva možné principy distribuce chladícího média a dělíme je tedy na HTS s teplou izolací a HTS se studenou izolací [38].

U supravodičů s teplou izolací je na kryogenní teplotu chlazeno pouze samotné jádro vodiče, zatímco izolace je ve styku s běžnými teplotami. Jedná se tedy o běžnou izolaci používanou u konvenčního vedení [38].

U supravodičů se studenou izolací je jak vodivá, tak izolační část chlazena současně. Takto silně podchlazená izolace se samozřejmě chová jinak než izolace pracující při běžných teplotách, proto je potřeba u tohoto typu věnovat izolaci větší pozornost [38].

HTS kabely se studenou izolací v konfiguraci se třemi vodivými jádry lze provozovat třífázový přenos a enormně tak snížit jak ztráty, tak prostorové požadavky [38].

Oproti konvenčním vodičům mají HTS supravodiče celou řadu výhod. Jejich mechanické vlastnosti jsou díky kompaktnímu a robustnímu složení velmi výhodné i v náročných podmínkách. HTS kabely jsou samozřejmě velmi odolné vůči vnějšímu magnetickému poli, jejich hmotnost i prostorové nároky jsou oproti konvenčnímu vedení několikanásobně nižší [38].

Na druhou stranu je potřeba zajistit bezproblémovou cirkulaci chladícího média, což ale u současných systémů není považováno za větší problém [38].

4.3 Supravodivé transformátory

V porovnání s konvenčními transformátory, supravodivé transformátory nabízejí mnoho výhodných vlastností.

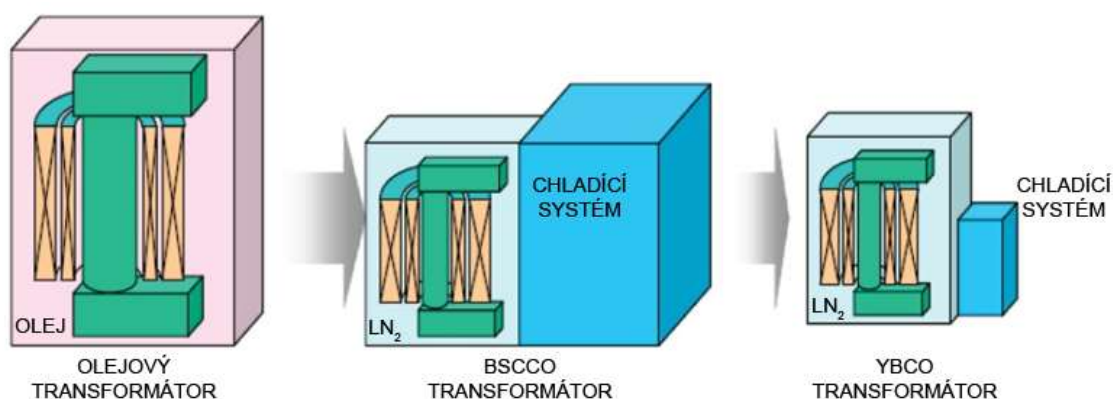
Absence oleje znamená minimalizaci ekologického zatížení spojeného s výrobou či likvidací oleje. V případě nehody klasického olejového transformátoru, kdy dojde k úniku oleje do okolí, vzniká značná ekologická havárie.

Olejové transformátory s sebou nesou i určitou technickou zátěž a další nutnou péči. Nutná je například kontrola stavu oleje, případné jeho čištění, dále také vysoká hmotnost i velikost a tedy obtížná přeprava i manipulace, olejové transformátory také nemohou být z bezpečnostních důvodů umístěny na libovolném místě, zpravidla je zakázáno umístění v budovách, výrobních halách a v prostorech, kde bývá přítomnost většího počtu lidí.

Z těchto důvodů se nabízí jako velmi výhodná alternativa použití transformátorů supravodivých.

Technické parametry supravodivých transformátorů převyšují olejové transformátory téměř ve všech aspektech. Teploty vinutí konvenčních transformátorů s měděným vinutím se pohybují od 105 do 175 °C, proudová hustota nabývá 5 až 7 A/mm² a celkové ztráty dosahují až 10 % příkonu. Supravodivé transformátory při provozní teplotě 77 K zatěžují vinutí proudovou hustotou okolo 100 A/mm², výhledově však lze očekávat více než zdvojnásobení této hodnoty, čímž se ještě zefektivní celková přenosová výkonová kapacita. Z toho vyplývá, že celková hmotnost i rozměry rapidně klesají navzdory prostorovým nárokům chladicího systému, jehož médium je levný a dostupný tekutý dusík [39].

Nevýhodou supravodivých transformátorů je fakt, že při kriticky nízkých teplotách klesá odpor také transformátorových plechů, čímž rostou ztráty vířivými proudy. Navíc olejové VN transformátory dosahují účinnosti až 99,7 %. Lze tedy v současnosti jako zásadní přednost supravodivých transformátorů brát „pouze“ jejich velikost a hmotnost [40].



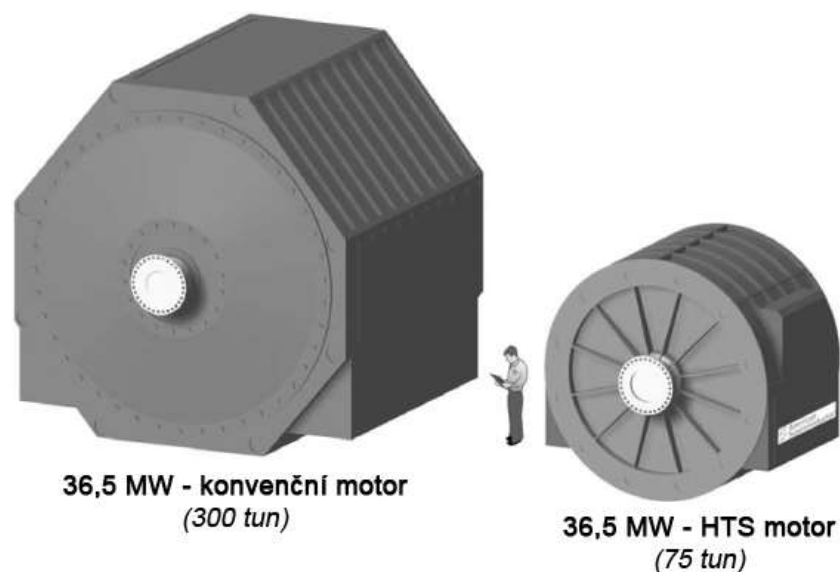
Obr. 4.3 – Porovnání supravodivého vedení s konvenčním vedením [41].

4.4 Supravodivé motory a generátory

Supravodivé točivé stroje pracují při kryogenních teplotách. Díky tomu dochází k eliminaci nežádoucího tepelného proudění, které značně ovlivňuje životnost a funkčnost konvenčních točivých strojů. Tepelné ztráty zde v podstatě neexistují a tak můžeme u supravodivých motorů a generátorů hovořit o značně vyšší efektivitě, která může přesahovat až 98% [42].

Typická konfigurace těchto strojů představuje rotor s navinutými HTS vodiči, které musí být soustavně „předchlazeny“ tekutým dusíkem. Následná cirkulace chladícího média, která celý supravodivý systém ochladí na pracovní teplotu je zapříčiněna plyným heliem. Statorové vinutí není tvořeno supravodivými cívkami a jeho teplota odpovídá teplotě okolí [43].

Nespornou výhodou supravodivých motorů a generátorů je také jejich nižší hmotnost a velikost. Supravodivým vinutím prochází v porovnání s konvenčními elektrickými stroji daleko větší proud, který je schopen vybudit magnetické pole, jehož indukce může přesahovat až 5 T (záleží samozřejmě na konfiguraci, tento příklad odpovídá 1 MW HTS elektromotoru vyvíjenému společností Kawasaki ve spolupráci s Tokyo University of Marine Science Technology, National Maritime Research Institute a Japan Super - conductivity Organization CO. LTD.) [43].



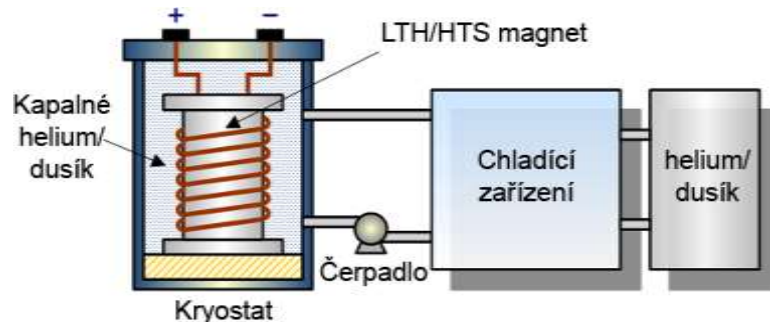
Obr. 4.4 – Porovnání supravodivého HTS motoru s konvenčním motorem [44].

Velmi dobré uplatnění HTS elektrických strojů je v lodích, letadlových lodích, ale i ventilátorech, čerpadlech a kompresorech [42], [43].

4.5 Supravodivé akumulátory elektrické energie

Superconducting magnetic energy storage (SMES) je technologie uchovávání elektrické energie, založená na třech základních principech. Za prvé: supravodiče jsou schopny vést proud beze ztrát. Za druhé: procházející elektrický proud vytváří magnetické pole. Za třetí: magnetické pole lze využívat k uchování energie [45].

Střídavý proud je přes usměrňovač převeden na stejnosměrný elektrický proud a ten je přiváděn do chlazené supravodivé cívky, okolo které se vytváří magnetické pole. Jelikož je cívka supravodivá, Jouleovy ztráty jsou nulové, a tak je umožněna takřka nekonečná cirkulace proudu v cívce, v jejímž magnetickém poli je energie tímto způsobem uchovávána. K uvolnění elektřiny stačí cívku naakumulovanou energii uvolnit přes invertor a výsledný střídavý proud pak přivést do zátěže [46].



Obr. 4.5 – Schématická konfigurace zařízení SMES [41].

SMES technologie disponuje oproti jiným způsobům uchování elektrické energie velmi velkou účinností, která může přesáhnout až 97%. Rychlost odezvy se řádově pohybuje v milisekundách – akumulátory SMES jsou tedy schopny během velmi krátkého času uvolnit velké množství energie a navíc nepodléhají opotřebení v důsledku cyklického zatěžování [46].

Tyto vlastnosti jsou velmi výhodné v energetice, kde při rychlých nárůstech odběru vzniká nedostatek energie. Pro stabilitu distribuční a přenosové soustavy je potřeba energii rychle doplňovat [47].

Praktické realizace akumulátorů SMES jsou vytvořeny z cívek z Nb-Ti. Nb-Ti patří mezi supravodiče nízkoteplotní, a tak i jeho chlazení musí být na teplotu 4,2 K a jako chladící médium tedy musí být použito tekuté helium, jehož nevýhody jsou zmíněny v předešlých kapitolách, nicméně v současnosti probíhají experimentální výzkumy s využitím HTS supravodičů [45].

4.6 Magnetická levitace s využitím supravodičů

Magnetické levitační systémy mohou pracovat na několika rozdílných principech. K vyvození levitačních sil, které jsou nutné k dosažení stabilní rovnováhy levitovaného tělesa, se používají: permanentní magnety (stabilita obtížně dosažitelná), diamagnetické materiály (interagující s magnetickým polem), elektromagnety se zpětnovazební regulací budícího proudu elektromagnetu, elektromagnety s dynamickými proudy, hybridní kombinované systémy, supravodiče a permanentní magnety, supravodiče a supravodivé magnety a další [48], [49].

Magnetické pole je aktivně vypuzováno z objemu supravodiče na základě Meissnerova jevu. Vložíme-li do okolního prostoru supravodiče permanentní magnet, jeho magnetické siločáry do supravodiče proniknout nemohou. Na povrchu supravodiče se indukují stínící proudy, které díky nulovému měrnému odporu nejsou omezovány (nedochází ke vzniku Jouleovo tepelných ztrát). Stínící proudy generují magnetické pole opačného působení vůči vnějšímu poli, které právě vznik těchto proudů zapříčinilo. Také se říká, že dochází k vytváření zrcadlového magnetického pole [49] - [51].

Tento princip nabízí velmi stabilní možnost levitace. Se změnou polohy (tím i velikosti), orientace, či rozložení magnetického pole permanentního magnetu okamžitě dochází ke změně velikosti indukovaných proudů na povrchu supravodiče a tím pádem i ke změně velikosti zrcadlového magnetického pole tak, aby změna polohy, orientace nebo rozložení magnetického pole permanentního magnetu byla vždy vykompenzována [50], [51].

Permanentní magnet tak může být do jisté míry manipulován a pohybován a zároveň neustále levitován na tzv. magnetickém polštáři, který má značnou schopnost udržet i hmotnost vyšší nežli jen samotnou hmotnost permanentního magnetu [50].

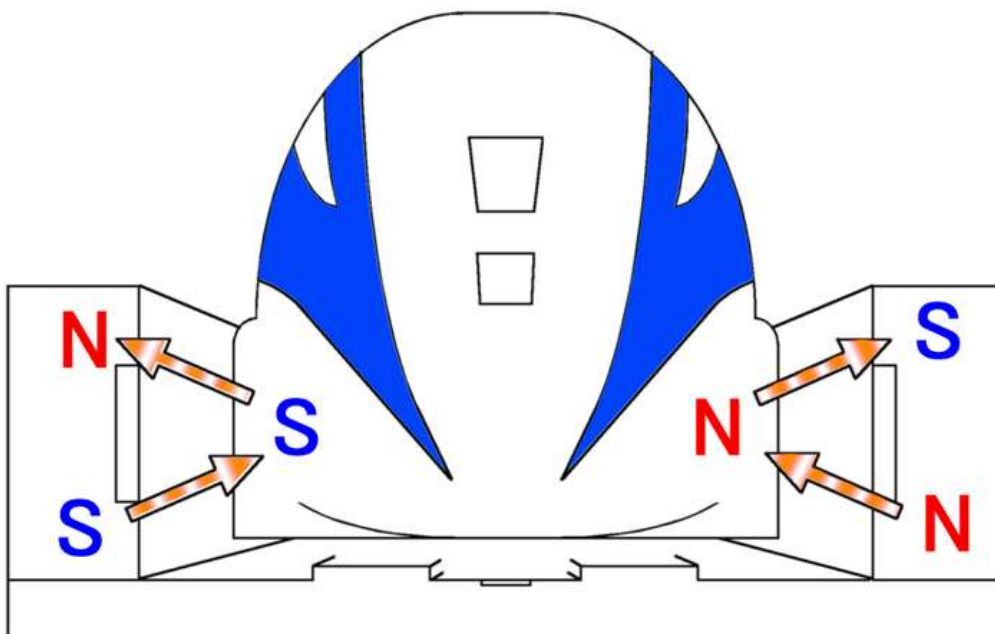
Uplatnění levitace nalézáme v řadě aplikací už dnes. Dá se ale předpokládat, že technický vývoj přinese spoustu dalšího využití, které se v současnosti nacházejí pouze teoretické rovině.

Perspektivita levitace je a bude využívána v rámci: dopravy, využití bezkontaktních ložisek, bezkontaktních indukčních tavení a dalších zařízení.

4.6.1 Maglev v dopravě

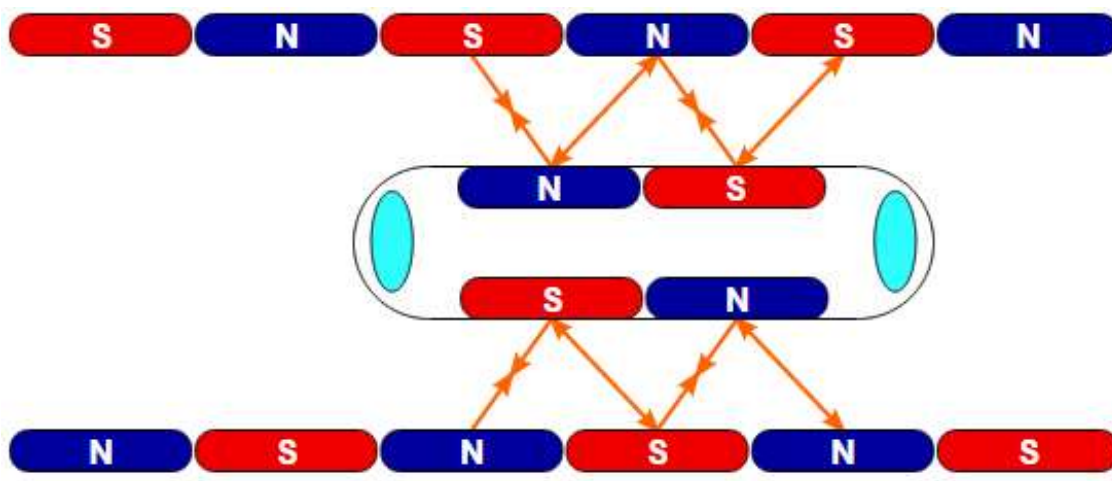
Magnetická levitace (Maglev) je využívána v železniční dopravě několik let. Výhod oproti konvenčním vozům je spousta. Zásadní jsou několikanásobně vyšší dosahované rychlosti (rychlostní omezení představuje pouze odpor vzduchu), tichý chod, nízké náklady na údržbu a na provoz. Nevýhodou je velmi nákladná realizace celého systému [49], [52].

Vysokorychlostní vlaky maglev existují v současných systémech ve třech formách: systém s elektromagnetickou levitací – electromagnetic suspension (EMS), systém s elektrodynamickou levitací – electrodynamic suspension (EDS) a systém na bázi permanentních magnetů Inductrack. Supravodiče najdeme pouze v systému EDS [49].



Obr. 4.6 – Japonský systém maglev dopravy – EDS [53].

V systému EDS je vytvářeno odpuzivé magnetické pole působící mezi dráhou a vlakovou soupravou (magnetický polštář). Ve vlakové soupravě jsou umístěny supravodivé cívky spolu s chladicím médiem (tekuté helium), které vytvářejí extrémně silné magnetické pole. V dráze je zabudován hliníkový pás nebo cívky, ve kterých se při pohybu vozidla indukují vířivé proudy, jejichž magnetické pole je opačné vůči poli buzeném supravodivými cívkami. Tím vzniká síla, jež zdvihá vlakovou soupravu do výšky zhruba 10 – 15 cm [49].



Obr. 4.7 – Znáznornění principu vlakové technologie EDS [53].

Levitace u těchto typů vozidel je tedy možná pouze za pohybu s určitou minimální (kritickou) rychlostí – proto je potřeba tato vozidla vybavovat i koly [49].

EDS vlaky jsou poháněny lineárním motorem, jehož primární (statorová) část je uložena ve formě trojfázového vinutí v dráze a sekundární (rotorová) část umístěna na podvozku vozidla [49], [51].

4.7 Urychlovače

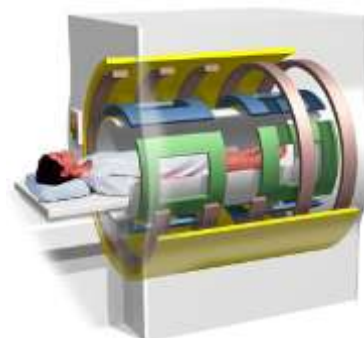
Urychlovače částic se začaly vytvářet ve 30. letech 20. století za účelem zkoumání struktury jádra atomů. Od té doby byly urychlovače využívány ke zkoumání a vysvětlování mnoha jevů částicové fyziky. Jejich úkolem je urychlit a zvýšit energii paprsku částic pomocí elektrického pole (akcelerace částic) a magnetického pole (přesné řízení trajektorie). Urychlovače jsou budovány buď v kruhové, nebo lineární formě – záleží především na charakteru experimentů, které se zkoumají [54].

V 27 km dlouhém protonovém urychlovači Large Hadron Collider - Velký hadronový urychlovač (LHC) v rámci organizace Conseil Européen pour la recherche nucléaire - Evropská organizace pro jaderný výzkum (CERN) jsou proti sobě směřovány dva vysokoenergetické paprsky částic, jejichž rychlost je při nejvyšších hodnotách téměř na hodnotě rychlosti světla [55].

Při cyklickém urychlování v kruhovém urychlovači jsou používány extrémně silné elektromagnety, které vytvářejí magnetické pole v maximální velikosti 8,4 T, což je více než 100 000 silnější pole, než jaké má Země. Proud, který v supravodivých cívkách elektromagnetů vytváří takto silné pole, dosahuje 11 850 A. [55].

4.8 Využití v medicíně – zobrazování a diagnostika

Dlouhodobým trendem v zobrazování a diagnostice ve zdravotnictví je snaha dosáhnout co nejuvěrnějších výsledků za použití metod, které mají minimální nepříznivé účinky na lidský organismus. Moderní vyšetřovací metody k zobrazení struktury tkání lidského těla se již neobejdou bez magnetické rezonance.



Obr. 4.8 – Magnetická rezonance [56].

Magnetická rezonance - Magnetic Resonance Imaging (MRI) využívá princip nukleární magnetické rezonance, která spočívá v analýze magnetických momentů atomových jader s lichým nukleonovým číslem. Lidské tělo je přibližně z 70% složeno z vody. V každé tkáni je tedy zastoupena voda, resp. vodík, jehož nukleonové číslo je liché (1) [56].

Nukleony (protony a neutrony), z nichž je složeno jádro atomů, mají svůj spin – rotační moment hybnosti, který má za následek vytvoření magnetického momentu. Je důležité zdůraznit, že se zkoumají pouze atomy s lichým nukleonovým číslem, což znamená, že počet neutronů a protonů je různý. Jádra se sudým nukleonovým číslem mají spin, a tudíž i magnetický moment je „vyvážen“. Navenek se tedy vyruší a nebylo by vlastně co zkoumat [56], [57].

Je-li lidské tělo vystaveno velmi silnému magnetickému poli, které přístroj magnetická rezonance vytváří díky supravodivým cívkám, dochází v těle působením tohoto pole k orientaci spinů atomů do stejného směru, jako je působící vnější magnetické pole. Vyšleme-li do těla zároveň střídavé elektromagnetické pulsy tak, abychom řízeně určité atomy natočili jiným směrem, při následném návratu do zorientované polohy (směr daný supravodivými elektromagnety) lze na základě vyzařování elektromagnetických vln z jednotlivých atomů způsobených „přeorientováním“ a následným „znovu zorientováním“ pomocí výpočetní techniky určit složení dané látky [56], [58].

Na podobných principech funguje i spektroskopie nukleární magnetické resonance. Opět je zapotřebí vytvořit velmi silné magnetické pole, jehož se poměrně snadno dá dosáhnout supravodivými cívkami. Pro oba systémy se využívají supravodiče prvního typu, k jejichž chlazení je zapotřebí tekuté helium. Pracovní proud se pohybuje okolo 100 A a vybuzené magnetické pole bývá okolo 1,5 T. Záleží samozřejmě na konkrétním modelu přístroje [56], [57].

4.9 Skvidy

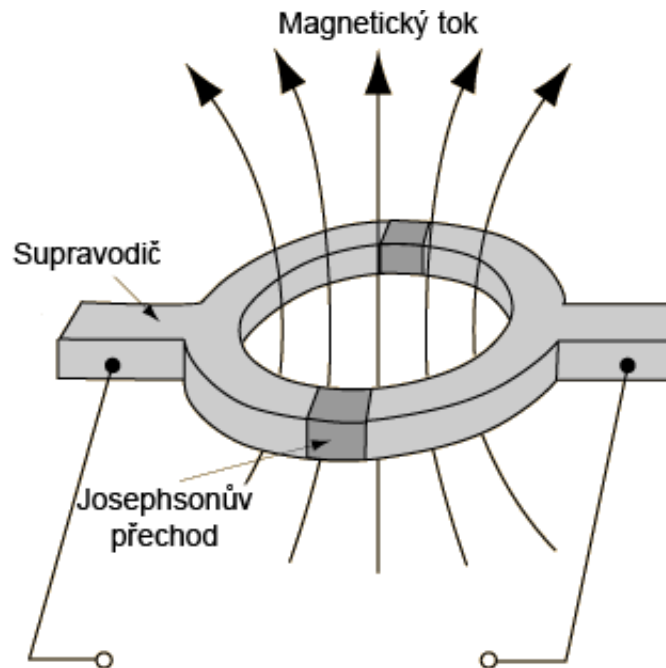
Název skvid je odvozen z anglického SQUID (superconducting quantum interference device – supravodivé kvantové interferenční zařízení). Skvidy jsou zařízení schopná měřit extrémně slabá magnetická pole.

Pomocí skvidů se v několika zajímavých experimentech měřila magnetická pole v mozcích myši za účelem zjištění, jestli jsou myši díky magnetickému poli v rámci mozku schopny orientovat se a používat tak mozek také jako navigační zařízení podobné kompasu. Skvidy jsou schopné měřit magnetické pole řádově při 10^{-14} T. Pro porovnání, magnetické pole srdce je 10^{-10} T a magnetické pole mozku 10^{-13} T [59].

Skvidy pracují na principu Josephsonova jevu. Vývoj těchto zařízení začal již v 60. letech 20. století. Doposud existují skvidy ve dvou variantách – stejnosměrné direct current (DC) skvidy a střídavé resonant frequency (RF) skvidy [60].

DC skvid obsahuje dva Josephsonovy přechody v rámci supravodivého prstence, kterým protéká stejnosměrný proud, proto se také označuje stejnosměrný skvid. Celkový proud je

funkcí vnějšího magnetického pole. Tento typ skvidu se nejčastěji používá jako nulový indikátor [60].



Obr. 4.9. – DC skvid [60].

RF skvidy pracují pouze s jedním Josephsonovým přechodem, jedná se tedy o jednodušší systém. RF vychází z anglických slov resonant frequency (rezonanční frekvence, v Česku se však spíše používá označení vysokofrekvenční skvidy nebo také střídavé skvidy) [60].

Supravodivý prstenec s jedním Josephsonovým přechodem o určité indukčnosti je ve vzájemné vazbě s paralelním rezonančním obvodem, kterým je pak na základě indukční vazby detekováno vnější magnetické pole v okolí skvidu. Tento typ skvidů má nižší citlivost než výše zmíněný stejnosměrný skvid, nicméně díky své jednodušší konstrukci je častěji využíván například pro výrobu magnetometrů, v biomedicině nebo v geologii [60].

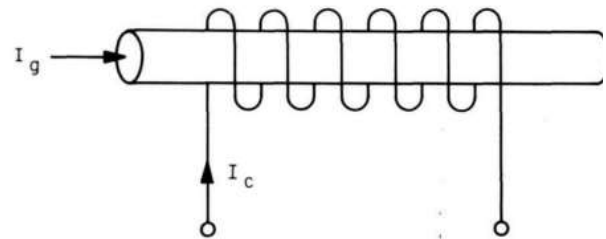
Většina skvidů je vyrobena ze supravodičů LTS, na bázi niobu, jejichž chlazení musí být zprostředkováno tekutým heliem. Dielektrickým oddělení bývá tenký plátek mědi nebo zlata a dalších kovů, jejichž ochlazení na 4 K nezpříčiní vznik supravodivosti [61].

Moderní skvidy na bázi keramických HTS supravodičů druhého typu mohou pracovat při teplotách 77 K, která je dosažitelná tekutým dusíkem. Pro výrobu se využívají sloučeniny YBCO, BSCCO nebo TBCCO [61].

4.10 Kryotrony

Supravodivé spínače zvané kryotrony pracují na principu přerušení supravodivého stavu ochlazeného vodiče vlivem silným externím magnetickým polem. Počátek výzkumu kryotronu se datuje rokem 1950, kdy jeho vynálezce Dudley Buck nastoupil na magisterské studium michiganského technologického institutu MIT a započal svůj výzkum – nejprve v rámci své diplomové práce - později se pak stal předmětem disertační práce [62].

Základní konstrukce kryotronu sestává ze dvou komponent – základní a řídicí obvod přístroje. Základní obvod je tvořen tenkým přímým vodičem s průřezem 0,2 mm. Po sérii výzkumů a experimentů s materiály byl jako nejlepší materiál pro tuto část přístroje stanoven tantal. Kolem základního obvodu je navinuta vrstva niobového drátu se značně tenčím průřezem (80 μm) [62], [63].

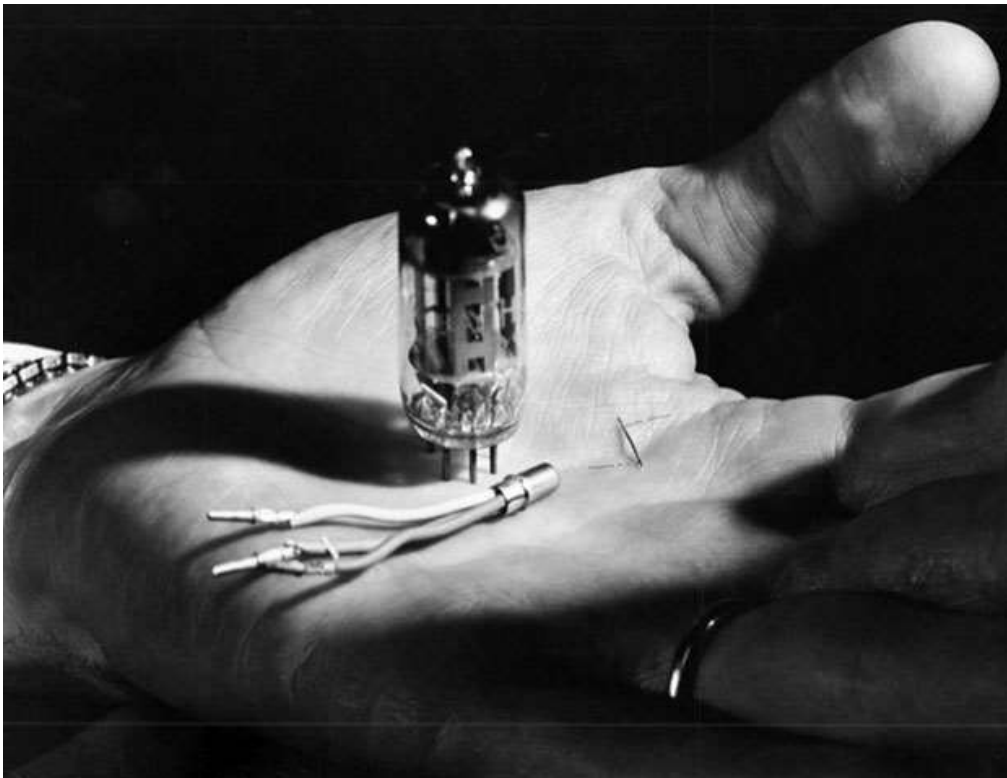


Obr. 4.10 – Kryotron [63].

Kritická teplota niobu je 8 K, zatímco kritická teplota tantalu je 4,4 K. Ochladíme-li celý přístroj na teplotu kapalného helia 4,2 K, můžeme s jistotou říct, že řídicí – niobová část – je při teplota 4,2 K bezpečně a stabilně ve stavu supravodivém. Pro základní – řízenou část přístroje – stačí pouze slabé externí magnetické pole vybuzené oddělenou řídicí částí k přerušení supravodivého stavu a navození stavu odporového, kterým neprotéká žádný proud [62], [63].

Lze tak změnou intenzity magnetického pole poměrně snadno přecházet ze supravodivého do odporového stavu, aniž by bylo zapotřebí jakkoli manipulovat s teplotou. Pomocí řídicího obvodu mohou být malým proudem řízeny o mnoho větší proudy obvodu řízeného. Vznikl tak elektronický přepínač, který měl potenciál nahradit ve výpočetní technice tehdy využívané elektronky. Vhodným propojením lze sestavit složitá pole o několikatisícovém zastoupení kryotronů, díky nimž je možné realizovat logické funkce. Oproti elektronkám měly kryotrony minimální rozměry (které se s dalším vývojem ještě výrazněji minimalizovaly), zanedbatelný odběr a vyšší spínací rychlosti [62] - [64].

O pár let dříve byl vyvíjen i tranzistor – se stejným potenciálem nahradit elektronky. Dudley Buckovi se dlouho nedařilo dosahovat vyšších spínacích rychlostí, než tehdejšími tranzistorům. S vývojem kryotronů se tým Dudleyho Bucka tehdy zabýval i mikrominiaturizací a integrací, která mohla přinést kýžené zvýšení rychlosti, které by překonalo i tranzistory. Experimenty s tenkými vrstvami a dalšími slitinami znamenaly průlomové objevy, které byly dále využívány v mikroprocesorové technice, založené na tranzistorech [62].



Obr. 4.11 – Porovnání velikosti kryotru s elektronikou a tranzistorem [62].

Zkonstruováním 100 nm tenkého filmu ze slitiny olova, bizmutu a stroncia se dokázal v roce 1955 přiblížit spínací rychlosti tehdy nejrychlejších tranzistorů na desetinásobek. Na této bázi byly sestaveny kryotronové bistabilní klopné obvody, hradla, multivibrátory i paměti [62], [63].

V roce 1959 Dudley Buck náhle zemřel ve věku 31 let. Výzkum kryotronů a tenkých vrstev pokračoval i nadále, avšak v 60. letech se většina vědců zabývajících se touto technikou přeorientovala na vývoj polovodičových prvků výpočetní techniky. Nicméně spousta nápadů a vizí z hlavy Dudleyho Bucka byla přetransformována do podoby použitelné v polovodičových výpočetních systémech, jejichž využití přetrvává dodnes [62].

5 Nové teorie, výzkumy, zařízení a další směřování vývoje

Pro současný resp. budoucí vývoj supravodivých materiálů je nutné objevit takové sloučeniny, které dokážou být supravodivé i při pokojové teplotě. Problém je, že ani v současnosti není zcela uspokojivě vysvětlena a popsána supravodivost ve vysokoteplotních supravodičích, objevených v roce 1986. Výzkum v této souvislosti nadále probíhá a začínají se objevovat teorie, které by mohly pomoci nalézt matematicko-fyzikální model, který by spolehlivě popsal podstatu vysokoteplotních supravodičů. Pokud by se definitivně podařilo nalézt řešení tohoto problému, otevřely by se dveře pro snad i jednodušší vývoj HTS pro skutečně pokojové teploty, použitelné v širokém spektru aplikací. Jednalo by se o další revoluci.

V současnosti se pracuje se dvěma hlavními teoriemi vysvětlující vysokoteplotní supravodivost. První z nich se nazývá rezonující valenční vazba, jejíž převážným autorem je Philip Anderson z Princetonovy univerzity v New Jersey. Teorie říká, že mechanismus párování elektronů je přímo dán uspořádáním kuprátových struktur. Sousedící atomy mědi se stávají propojenými články díky chemickým vazbám valenčních elektronů. Každý atom má v každém valenčním pásu elektron orientovaný s opačným spinovým momentem vůči sousednímu atomu, resp. vůči spinu elektronu sousedního atomu (antiferomagnetický materiál). Chemická vazba pak uzamkne tyto spinově spojené páry v pevnou pozici a proud nemůže protékat. Pokud je materiál nadopován příměsovým prvkem, vznikne nerovnováha a řetězovými reakcemi vznikají nové elektronové páry, které navenek působí jako pohyblivé dvojice elektronů, zvané Cooperovy páry, zapříčiňující supravodivost [32].

Druhá teorie, která má v odborných kruzích více příznivců, se nazývá spinová fluktuace. Za touto teorií stojí Philippe Monthoux z univerzity v Edinburghu, Alexander Balatsky z Los Alamos National Laboratory v Novém Mexiku a David Pines z univerzity v Illinois-Urbana Champaign. Teorie říká, že kupráty jsou bez dopování příměsových prvků uspořádané antiferomagnetické struktury, tzn. valenční elektrony každého atomu mědi se řadí v „zástupech“, kdy jejich spiny jsou vzhledem k sousedním vždy opačné. Magnetická pole vytvářená v důsledku těchto spinů uzavřou elektrony do pevné pozice. V dopovaných kuprátech příměsové atomy naruší tuto pevnou stabilní vazbu a vznikne prostor pro kmity elektronů. Díky těmto kmitům pak vzniká pulzace struktury, která je analogická k elektron-

fononové interakci známé z BCS teorie. A stejně jako v BCS teorii i v teorii spinové fluktuace jsou strukturální kmity zodpovědné za vznik Cooperových párů [32].

5.1 Supravodivost při 190 K

Nejvyšší kritická teplota supravodivého materiálu byla doposud naměřena u materiálu na bázi kuprátů s kritickou teplotou $T_c = 133$ K [65] při běžném tlaku a 164 K při tlaku zvýšeném [66]. Vědecká skupina ve složení A. P. Drozdova, M. I. Eretnse a I. A. Troyana z Max-Planck Institut für Chemie z německého Mainzu 1. 12. 2014 zveřejnila práci, v níž zkoumaný plyn H_2S (sulfan známý také jako sirovodík) při postupném zvyšování okolního tlaku přecházel v kov (při $P \sim 90$ GPa) a následně i v supravodič (při $P < \sim 150$ GPa) [67].

Ve studii čínských vědců z Jiangsu Normal University z města Xuzhou dříve z roku 2014 byl demonstrován supravodivý potenciál H_2S při 160 GPa s kritickou teplotou 80 K. Pro vyšší dosažitelné kritické teploty bylo uvažováno složitějších struktur sloučenin vodíku a síry [68].

Tento předpoklad byl v letošním roce vyvrácen, když při tlaku o $P > 150$ GPa byla naměřena kritická teplota rekordních 190 K [67].

Z BCS teorie vyplývá i závislost supravodivosti na hmotnosti atomů. Lehčí atomy mohou snadněji (za vyšších teplot) dosahovat kýženého rozkmitání mřížky nutné pro vznik Cooperových párů. V roce 1968 britský fyzik Neil Ashcroft předpověděl, že vodík by mohl být supravodivým za určitých teplot a tlaků, díky své nízké hmotnosti [69].

Dosažená kritická teplota je velmi slibná pro budoucí vývoj a pro budoucí pochopení mechanismu vysokoteplotní supravodivosti. Pracovat se supravodivými materiály při tlacích v řádech gigapaskalů je samozřejmě pro průmyslové využití zcela nemožné [69].

5.2 Pniktidy

V roce 2008 Hideo Hosono se svým týmem z Tokyo Institute of Technology v Japonsku objevil nový typ vysokoteplotních supravodičů, vytvořených na bázi železa a arsenu, nazývané pniktidy. Tyto materiály jsou supravodivé při nižších teplotách (horní hranicí je odhadem asi 55 K [70] než doposud známé kupráty, vyznačují se kompaktnější strukturou a jsou slibným objevem především proto, poněvadž vzniká nový prostor pro vědecké bádání,

který by mohlo poodhalit mechanismus vysokoteplotní supravodivosti, případně vyvrátit dosavadní myšlenky, které mohly vysvětlovat vysokoteplotní supravodivost pouze u kuprátů, nikoliv však obecně pro všechny vysokoteplotní supravodiče [32].

5.3 Řízení kritické teploty supravodiče světelným paprskem

Výzkumný tým profesora Yorama Dagona z Tel Aviv University v roce 2012 publikoval práci zabývající se měněním vlastností vysokoteplotního supravodivého materiálu ozáření jeho molekul světelným paprskem [71].

Zatímco většina pokusů o vytvoření HTS s co nejvyšší kritickou teplotou se uchylovala k náročným strukturálním změnám materiálů, dopováním příměsových prvků a dalším složitým postupům, izraelští vědci zkusili poněkud snadnější metodu. Velmi tenký supravodivý film o tloušťce přibližně 50 nm ozářili světelným paprskem a pozorovali zajímavé chování. Molekuly protáhly svůj objem a změnily tak svůj tvar a tím i své vlastnosti – tou hlavní byla změna kritické teploty [71].

Pokus probíhal na třech odlišných molekulách. První testovaná molekula po ozáření zvýšila svou teplotu supravodivého filmu. Pokus s druhou molekulou byl trochu odlišný – při ozáření světlem z viditelného spektra (viditelné světlo lidským okem je přibližně v rozmezí 390 – 790 nm) se kritická teplota supravodivého filmu snížila, ale při exponování UV paprskem se kritická teplota naopak zvýšila. Třetí molekula reagovala na ozáření světlem z viditelného spektra jako spínač – při exponování se supravodivost pásku zvýšila a naopak bez světla se kritická teplota snížila [71].

Výhodou těchto objevů je, že ke změnám vlastností není zapotřebí měnit teplotu okolního chladicího média, stačí pouze světlem řídit základní vlastnosti [71].

Závěr

I přes nedozírný význam supravodivého jevu nebylo doposud možné naplno využít potenciálu, který se v tomto fyzikálně technickém odvětví skrývá. Supravodivost má ambice jednoho dne změnit svět techniky a tím i náš každodenní život. Než se tak stane, je potřeba zvládnout vyřešit zásadní otázku - vysokoteplotní supravodivost. Vysokoteplotní supravodivost známe díky převratnému objevu vysokoteplotních supravodivých keramik pánu Georga Bednorze a Alexe Müllera již od roku 1986.

Ani dnes však bohužel princip vysokoteplotní supravodivosti není spolehlivě vysvětlen a matematicky popsán. Řešení tohoto klíčového problému by mohlo znamenat zelenou pro realizaci supravodivých materiálů spolehlivě fungujících při pokojové teplotě. Většina teoretických konceptů možného využití supravodičů by pak mohla zapomenout na mnohdy poměrně obtížně realizované a realizovatelné chlazení. Navzdory objevu vysokoteplotních supravodičů je v dnešní době většina supravodivých aplikací sestrojena ze supravodičů nízkoteplotních a to pro jejich příznivé konstrukční vlastnosti, ačkoliv nutnost chlazení drahým kapalným heliem je velkou nevýhodou. Vysokoteplotním supravodičům k chlazení postačuje dostupný a levný kapalný dusík, avšak nevýhodné konstrukční vlastnosti tohoto typu supravodičů, jejichž nejvýznamnější skupina jsou v podstatě křehké a složitě konstruovatelné keramiky, nedovolují jejich větší uplatnění.

Posunout vývoj supravodivosti na další úroveň není jednoduché. Vědecké týmy musí skloubit špičkové vědění ze širokého spektra oborů, kterých se supravodivost více či méně dotýká – jedná se o elektrotechniku, fyziku nízkých teplot, materiálovou chemii, strojní inženýrství, kryogeniku a pravděpodobně ještě další vědní obory. V minulosti byly překážkou i geopolitické rozpory světových mocností USA a Sovětského svazu. Známý je případ z přístavu v USA, kde tamější dělníci projevíli iniciativní „boj s komunistickým Sovětským svazem“ poněkud nešťastným způsobem - vyložení nákladu ruskojazyčných časopisů přímo do moře. Mezi tiskovinami byl i časopis ŽETF, v němž byla publikována práce vědce V. L. Ginzburga (později oceněna Nobelovou cenou). Převratná práce tak unikala pozornosti vědecké obci západního světa. Na západ se dostala až asi o 10 let později díky mikrofiším.

Vypracování tohoto textu probíhalo důsledným studováním a analyzováním velkého množství zejména zahraniční literatury. Velký důraz byl kladen na vysvětlení především

principů a fyzikální podstaty ať už samotné supravodivosti nebo zmiňovaných přístrojů a aplikací. Celá řada pasáží byla sepsána na základě informací čerpaných z anglicky psané literatury získané prostřednictvím portálu Google Books, který nabízí ohromné množství mimo jiné i technické literatury zcela zdarma.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] DELFT, Dirk van a Peter KES. The discovery of superconductivity. *Physics Today* [online]. 2010, **63**(9): 38-43 [cit. 2015-05-24]. DOI: 10.1063/1.3490499. Dostupné z: https://www.lorentz.leidenuniv.nl/history/cold/DelftKes_HKO_PT.pdf
- [2] All Nobel Prizes in Physics. *Nobelprize.org* [online]. 2015 [cit. 2015-05-30]. Dostupné z: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/
- [3] GOODSTEIN, David a Judith GOODSTEIN. Richard Feynman and the History of Superconductivity. *Physics in Perspective* [online]. 2014, **2**(1): 30-32 [cit. 2015-05-30]. DOI: 10.1007/s000160050035. ISSN 14226944. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s000160050035>
- [4] The History of Superconductors. ECK, Joe. *Superconductors* [online]. 2015 [cit. 2015-05-30]. Dostupné z: <http://www.superconductors.org/history.htm>
- [5] LEWIS, Tanya. Incredible Technology: *How Atom Smashers Work*. In: *Live Science: Scientific News, Articles and Current Events* [online]. 2013 [cit. 2015-05-30]. Dostupné z: <http://www.livescience.com/38812-how-atom-smashers-work.html>
- [6] BUD'KO, S. L., G. LAPERTOT, C. PETROVIC, C. E. CUNNINGHAM, N. ANDERSON a P. C. CANFIELD. Boron Isotope Effect in Superconducting MgB₂. *Physical Review Letters* [online]. 2001, **86**(9): 1877-1880 [cit. 2015-05-30]. DOI: 10.1103/PhysRevLett.86.1877. ISSN 0031-9007. Dostupné z: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.86.1877>
- [7] ÄKÄSLOMPOLO, Laura. MgB₂. *Department of Applied Physics / Aalto University* [online]. 2012 [cit. 2015-05-30]. Dostupné z: <http://physics.aalto.fi/wp-content/uploads/2012/04/MgB2.jpg>
- [8] BRACCINI, Valeria, Davide NARDELLI, Roberto PENCO a Giovanni GRASSO. Development of ex situ processed MgB₂ wires and their applications to magnets. *Physica C: Superconductivity* [online]. 2007, **456**(1-2): 209-217 [cit. 2015-05-30]. DOI: 10.1016/j.physc.2007.01.030. ISSN 09214534. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921453407000329>
- [9] KAMIHARA, Yoichi, Takumi WATANABE, Masahiro HIRANO a Hideo HOSONO. Iron-Based Layered Superconductor La[O 1- x F x]FeAs (x = 0.05–0.12) with T_c = 26 K. *Journal of the American Chemical Society* [online]. 2008, **130**(11): 3296-3297 [cit. 2015-05-30]. DOI: 10.1021/ja800073m. ISSN 0002-7863. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ja800073m>
- [10] KRATOCHVÍL, Bohumil. *Základy fyziky a chemie pevných látek II* [online]. 1. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 1990, 160 s. [cit. 2015-05-30]. ISBN 80-708-0055-0. Dostupné z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-80-7080-055-0/pages-img/

- [11] *Mezinárodní Konference Diagnostika '07, pořádaná Oddělením Elektrotechnologie, Katedry Technologí a Měření Fakulty Elektrotechnické, Západočeské Univerzity v Plzni, Nečtiny, 11. - 13. září 2007* [online]. Plzeň, 2007 [cit. 2015-05-30]. ISBN 978-807-0435-571. Dostupné z: <http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce2/99.pdf>
- [12] Superconductivity. HOFMANN, Philip. *Department of Physics and Astronomy (IFA)* [online]. 2009 [cit. 2015-05-30]. Dostupné z: http://users-physics.au.dk/philip/pictures/solid_superconductivity/magfield.gif
- [13] COYNE, Kristen. Nothing Up My Sleeve: The Meissner Effect. *MagLab - The largest and highest powered magnet lab in the world* [online]. 2015 [cit. 2015-05-30]. Dostupné z: https://nationalmaglab.org/images/education/magnet_academy/learn_basics/articles/superconductivity/superconductivity-meissner.jpg
- [14] KULHÁNEK, Petr. Vysokoteplotní supravodivost. *Aldebaran Bulletin* [online]. 2004, 2(36) [cit. 2015-05-30]. ISSN 1214-1674. Dostupné z: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2004_36_hts.html
- [15] BUSCHOW, K.H.J. *Concise Encyclopedia of Magnetic and Superconducting Materials* [online]. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2005 [cit. 2015-05-30]. ISBN 00-804-5765-7. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=N9mvytGEBtwC>
- [16] REICHEL, Jaroslav. Elektrostatické silové působení bodových elektrických nábojů, Coulombův zákon. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2012 [cit. 2015-05-30]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/221-elektrostaticke-silove-pusobeni-bodovych-elektrickyh-naboju-coulombuv-zakon>
- [17] ROTTER, Miloš. 90 let kapalného helia. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie* [online]. Praha: Jednota českých matematiků a fyziků, 1998, 43(4): 298-307 [cit. 2015-05-30]. ISSN 0032-2423. Dostupné z: http://dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/139745/PokrokyMFA_43-1998-4_4.pdf
- [18] Introduction to Inorganic Chemistry/Electronic Properties of Materials: Superconductors and Semiconductors. *Wikibooks* [online]. 2015 [cit. 2015-05-30]. Dostupné z: http://en.wikibooks.org/wiki/Introduction_to_Inorganic_Chemistry/Electronic_Properties_of_Materials:_Superconductors_and_Semiconductors
- [19] GALLOP, J. C. *SQUIDS, the Josephson effects and superconducting electronics* [online]. Philadelphia: Adam Hilger, 1991, x, 232 p. [cit. 2015-05-30]. ISBN 07-503-0051-5. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=ad8_JsfCdKQC
- [20] ŠÍRA, Martin, Věra NOVÁKOVÁ ZACHOVALOVÁ, Jan OTYCH a Jaroslav ZŮDA. Kvantové etalony v metrologoo elektrických veličin. In: *Vybrané problémy metrologie fyzikálních a elektrických veličin: Učební texty k semináři* [online]. 2012 [cit. 2015-05-30]. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_08_1206.pdf

- [21] ANNETT, James F. *Superconductivity, superfluids, and condensates* [online]. New York: Oxford University Press, 2004, xi, 186 p. [cit. 2015-05-30]. ISBN 01-985-0756-9. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=WZcXmBrZlc8C>
- [22] GOTTLIEB, U., J. C. LASJAUNIAS, J. L. THOLENCE, O. LABORDE, O. THOMAS a R. MADAR. Superconductivity in TaSi 2 single crystals. *Physical Review B* [online]. 1992, **45**(9): 4803-4806 [cit. 2015-05-30]. DOI: 10.1103/PhysRevB.45.4803. ISSN 0163-1829. Dostupné z: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.45.4803>
- [23] YONEZAWA, Shingo a Yoshiteru MAENO. Type-I superconductivity of the layered silver oxide Ag 5 Pb 2 O 6. *Physical Review B* [online]. 2005, **72**(18): - [cit. 2015-05-30]. DOI: 10.1103/PhysRevB.72.180504. ISSN 1098-0121. Dostupné z: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.72.180504>
- [24] ÄKÄSLOMPOLO, Laura. Critical magnetic field of a superconductor. *Department of Applied Physics / Aalto University* [online]. 2012 [cit. 2015-05-30]. Dostupné z: <http://physics.aalto.fi/wp-content/uploads/2012/04/critical.jpg>
- [25] ŠOTT, Miloslav. Supravodivé materiály a jejich použití ve vědě a technice. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie* [online]. Praha: Jednota českých matematiků a fyziků, 1969, **14**(4): 163-177 [cit. 2015-05-30]. ISSN 0032-2423. Dostupné z: http://dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/139281/PokrokyMFA_14-1969-4_1.pdf
- [26] JIRSA, Miloš. Supravodiče – hit blízké budoucnosti. In: *Otevřená věda* [online]. Praha: Fyzikální ústav AVČR, 2005 [cit. 2015-05-30]. Dostupné z: <http://archiv.otevrena-veda.cz/users/Image/default/C2Seminare/MultiObSem/005.pdf>
- [27] ROSE-INNES, A.C. a E.H. RHODERICK. *Introduction to Superconductivity* [online]. 2nd ed. London: Elsevier Science, 1978 [cit. 2015-05-30]. ISBN 03-231-6192-8. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=kPglxqICiRYC>
- [28] HOFMANN, Philip. Vortex. *ScienceBlogs - As the world turns* [online]. 2011 [cit. 2015-05-30]. Dostupné z: <http://scienceblogs.com/startswithabang/files/2011/10/vortex.png>
- [29] MIKULČÁK, Jiří. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2007, 206 s. ISBN 978-807-1963-455.
- [30] ECK, Joe. Superconductor Terms. *Superconductors.org* [online]. 2009 [cit. 2015-05-31]. Dostupné z: <http://www.superconductors.org/terms.htm>
- [31] MAHER, Eamonn a Ralph DELMDAHL. Commercial Exploration of HighTemperature Superconductivity: Excimer Lasers Enable Novel Coated Superconductor Cylinders. In: *Laser Tools, Applications, Systems, Products, and Solutions / Coherent* [online]. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010 [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/latj.201090058/pdf>

- [32] SHEAHEN, Thomas P, R. Blakeslee GILPIN a . Introduction to high-temperature superconductivity: Still in suspense. *Nature* [online]. 2011, **475**(7356): 55-78 [cit. 2015-05-26]. DOI: 10.5149/9780807869277_gilpin.8. Dostupné z: <http://www.nature.com/news/2011/110720/pdf/475280a.pdf>
- [33] Superconducting Transmission & Distribution Cable. In: *STI - Superconductor Technologies, Inc.* [online]. 2013 [cit. 2015-05-31]. Dostupné z: http://www.suptech.com/Cables_Oct_10.pdf
- [34] Amperium ® Brass Laminated Wire: Type 8700. In: *AMSC* [online]. 2014 [cit. 2015-05-31]. Dostupné z: http://www.amsc.com/library/BRSAMP8700_DS_A4_0514_WEB.pdf
- [35] MCCALL, Jack. Rise of the superconductor, Part 2. In: *Renewable Energy Focus* [online]. 2009 [cit. 2015-05-31]. Dostupné z: <http://www.renewableenergyfocus.com/view/5926/rise-of-the-superconductor-part-2/>
- [36] Superconducting cable systems. In: *NEXANS DEUTSCHLAND GMBH* [online]. Hannover, 2014 [cit. 2015-05-31]. Dostupné z: http://www.nexans.de/eservice/Germany-de_DE/fileLibrary/Download_540144810/Germany/files/Nexans_Superconducting_cable_systems.pdf
- [37] Superconducting Transmission & Distribution Cable. In: *SUPERCONDUCTOR TECHNOLOGIES, INC* [online]. 2013 [cit. 2015-05-31]. Dostupné z: http://www.suptech.com/Cables_Oct_10.pdf
- [38] NARLIKAR, A. *High temperature superconductivity* [online]. New York: Springer, 2004, 2 v. [cit. 2015-05-31]. ISBN 35404063952-. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=cdMw34i0Hr4C>
- [39] JANU, Z., J. WILD, P. REPA, Z. JELINEK, F. ZIZEK, L. PEKSA, F. SOUKUP a R. TICHY. Experimental setup for precise measurement of losses in high-temperature superconducting transformer. *Cryogenics* [online]. 2006, **46**(10): 759-761 [cit. 2015-05-26]. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2006.05.003. ISSN 00112275. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0011227506000968>
- [40] Supravodivost - perspektivní technologie blízké budoucnosti. In: *Odborné časopisy - Časopis Elektro* [online]. 2007 [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/supravodivost-perspektivni-technologie-blizke-budoucnosti--12718>
- [41] FUNK, Jeffrey. Superconducting materials becoming economically feasible for energy applications. *Slideshare* [online]. University of Singapore, 2013 [cit. 2015-05-31]. Dostupné z: <http://www.slideshare.net/Funk98/mt5009-superconducting-materials-presentation-1106>
- [42] HTS motors and generators. *Superpower-inc.com* [online]. 2015 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.superpower-inc.com/content/hts-motors-and-generators>

- [43] UMEMOTO, K, K AIZAWA, M YOKOYAMA, K YOSHIKAWA, Y KIMURA, M IZUMI, K OHASHI, M NUMANO, K OKUMURA, et al. Development of 1 MW-class HTS motor for podded ship propulsion system. In: *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2010, s. 032060- [cit. 2015-05-27]. DOI: 10.1088/1742-6596/234/3/032060. ISSN 1742-6596. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/1742-6596/234/i=3/a=032060?key=crossref.d63952668beecc3a1c19a2b3f002623f>
- [44] American Superconductor Corporation - Annual report. *AMSC* [online]. 2005 [cit. 2015-05-31]. Dostupné z: <http://ir.amsc.com/secfiling.cfm?filingID=1193125-05-125214&CIK=880807>
- [45] Energy Storage: Superconducting magnetic energy storage (SMES). *ClimateTechWiki* [online]. 2013 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.climatetechwiki.org/technology/jiqweb-ee>
- [46] Superconducting magnetic energy storage. In: *CLCF Ceasing Operations | Centre for Low Carbon Futures* [online]. 2012 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: http://www.lowcarbonfutures.org/sites/default/files/superconductingmagneticenergystorage_final.pdf
- [47] Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES). *Superpower-inc.com* [online]. 2012 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.superpower-inc.com/content/superconducting-magnetic-energy-storage-smes>
- [48] MOON, Francis C. a with selected sections by Pei-Zen CHANG. *Superconducting levitation applications to bearings and magnetic transportation* [online]. Weinheim: Wiley-VCH, 2004 [cit. 2015-05-31]. ISBN 978-352-7617-531. Dostupné z: <https://books.google.ca/books?id=jebqpatVJJMC>
- [49] MAYER, Daniel. Magnetická levitace a její využití. *Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku* [online]. Praha: FCC PUBLIC s. r. o., 2003, **13**(1): 4-12 [cit. 2015-05-27]. ISSN 1210-0889. Dostupné z: <http://automa.mpresent.cz/download/el010304.pdf>
- [50] BŘEŇ, David. Levitující femtokapičky. *Aldebaran bulletin* [online]. 2004, **2**(39) [cit. 2015-05-31]. ISSN 1214-1674. Dostupné z: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2004_39_lev.html
- [51] NAVE, Rod. Magnetic Levitation. *HyperPhysics Concepts* [online]. 2000 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/maglev.html>
- [52] Magnetic Levitation or Maglev Propulsion. *The Venus Project Foundation* [online]. 2015 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://venusproject.org/new-energy/magnetic-levitation-or-maglev-propulsion.html>
- [53] ANTHONY, Sebastian. Japanese maglev train begins public testing, buzzes peaceful countryside at 313 mph. In: *Latest Technology News | Tech Blog | ExtremeTech* [online]. 2013 [cit. 2015-05-31]. Dostupné z: <http://www.extremetech.com/extreme/165372-japanese-maglev-train-begins-public-testing-buzzes-peaceful-countryside-at-313-mph>

- [54] How an accelerator works. In: *CERN / Accelerating science* [online]. 2015 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://home.web.cern.ch/about/how-accelerator-works>
- [55] Pulling together: Superconducting electromagnets. In: *CERN / Accelerating science* [online]. 2015 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://home.web.cern.ch/about/engineering/pulling-together-superconducting-electromagnets>
- [56] Nukleární magnetická rezonance NMRI. ULLMANN, Vojtěch. *AstroNuklFyzika - jaderná fyzika, astrofyzika, kosmologie, filosofie* [online]. 2009 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/Scintigrafie.htm#NMR>
- [57] Funkční magnetická rezonance. *FMRI Brno* [online]. 2004 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: http://fmri.mchmi.com/main_index.php?strana=13
- [58] Magnetická rezonance (MR). *Mediscan Praha 4-Chodov* [online]. 2009 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.mediscan.cz/magneticka-rezonance>
- [59] NAVE, Rod. SQUID Magnetometer. *HyperPhysics Concepts* [online]. 2000 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/squid.html>
- [60] SAXENA, Ajay Kumar. *High-Temperature Superconductors* [online]. Springer Science & Business Media, 2012 [cit. 2015-05-31]. ISBN 978-3-642-28481-6. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=4RC_XxG9UX4C
- [61] JENKS, William G., Ian M. THOMAS a John P. WIKSWO. SQUIDS. *Digital Encyclopedia of Applied Physics* [online]. Weinheim, Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH, 2003, s. 457-468 [cit. 2015-05-28]. DOI: 10.1002/3527600434.eap468. ISBN 3527600434. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/3527600434.eap468>
- [62] Dudley Buck's Forgotten Cryotron Computer. BROCK, David C. *IEEE Spectrum: Technology, Engineering, and Science News* [online]. 2014 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://spectrum.ieee.org/computing/hardware/dudley-bucks-forgotten-cryotron-computer>
- [63] DLOUHÁ, Jarmila. Supravodivost a její použití — kryotron. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie* [online]. 1959, 4(2): 179-194 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: http://dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/138692/PokrokyMFA_04-1959-2_4.pdf
- [64] BREMER, John. The Invention of a Superconducting Integrated Circuit. In: *IEEE History Center* [online]. 2007 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: http://www.ieee.org/documents/44480_IEEE_newsletter.pdf
- [65] SCHILLING, A., M. CANTONI, J. D. GUO a H. R. OTT. Superconductivity above 130 K in the Hg–Ba–Ca–Cu–O system. *Nature* [online]. 1993-5-6, 363(6424): 56-58 [cit. 2015-05-28]. DOI: 10.1038/363056a0. ISSN 0028-0836. Dostupné z: <http://www.nature.com/doifinder/10.1038/363056a0>

- [66] GAO, L., Y. Y. XUE, F. CHEN, Q. XIONG, R. L. MENG, D. RAMIREZ, C. W. CHU, J. H. EGGERT a H. K. MAO. Superconductivity up to 164 K in $\text{HgBa}_2\text{Ca}_{m-1}$. *Physical Review B* [online]. 1994, **50**(6): 4260-4263 [cit. 2015-05-28]. DOI: 10.1103/PhysRevB.50.4260. ISSN 0163-1829. Dostupné z: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.50.4260>
- [67] DROZDOV, A. P., EREMETS a I. A. TROYAN. Conventional superconductivity at 190 K at high pressures. In: *Cornell Unviersity* [online]. Mainz, 2014 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1412/1412.0460.pdf>
- [68] LI, Yinwei, Jian HAO, Hanyu LIU, Yanling LI a Yanming MA. The metallization and superconductivity of dense hydrogen sulfide. *The Journal of Chemical Physics* [online]. 2014, **140**(17): 174712- [cit. 2015-05-28]. DOI: 10.1063/1.4874158. ISSN 0021-9606. Dostupné z: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jcp/140/17/10.1063/1.4874158>
- [69] NETO, Lauro Grippa. High Temperature Superconductivity Record Smashed By Sulphur Hydride. In: *The Physics arXiv Blog* [online]. 2014 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <https://medium.com/the-physics-arxiv-blog/high-temperature-superconductivity-record-smashed-by-sulphur-hydride-c853795079bb>
- [70] REN, Zhi-An, Guang-Can CHE, Xiao-Li DONG, Jie YANG, Wei LU, Wei YI, Xiao-Li SHEN, Zheng-Cai LI, Li-Ling SUN, et al. Superconductivity and phase diagram in iron-based arsenic-oxides $\text{ReFeAsO}_{1-\delta}$ (Re = rare-earth metal) without fluorine doping. *EPL (Europhysics Letters)* [online]. 2008, **83**(1) [cit. 2015-06-01]. DOI: 10.1209/0295-5075/83/17002. ISSN 0295-5075. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0295-5075/83/i=1/a=17002?key=crossref.f707b275406279154f8f9ebedfb7b506>
- [71] Controlling Superconductors with Light. In: *Tel Aviv University* [online]. 2012 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <https://english.tau.ac.il/news/superconductors>

Přílohy

Příloha č. 1: Tabulka známých supravodivých prvků, slitin a sloučenin

Tabulka 1 – Významné supravodivé materiály [27]

Materiál	Kritická teplota [K]	Materiál	Kritická teplota [K]
<i>Prvky</i>		<i>A15 fáze</i>	
Uhlík	15	Nb ₃ Ge	23,2
Olovo	7,2	Nb ₃ Si	19
Lanthan	4,9	Nb ₃ Al	19
Tantal	4,47	Nb ₃ Sn	18,1
Rtuť	4,15	V ₃ Si	17,1
Cín	3,72	Ta ₃ Pb	17
Indium	3,40	V ₃ Ga	16,8
Thallium	1,70	Nb ₃ Ga	14,5
Rhenium	1,697	V ₃ In	13,9
Protaktinium	1,40		
Thorium	1,38	<i>HTS supravodiče</i>	
Hliník	1,175	HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₈	138
Gallium	1,10	HgBa ₂ CaCu ₂ O ₆	124
Gadolinium	1,083	HgBa ₂ CuO ₄	98
Molybden	0,915	Tl ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	127
Zinek	0,85	TlBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₉	123
Osmium	0,66	TlBa ₂ Ca ₃ Cu ₄ O ₁₁	112
Zirkonium	0,61	Tl ₂ Ba ₂ Ca ₃ Cu ₄ O ₁₂	112
Americium	0,60	Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	110
Kadmium	0,517	Bi ₂ Sr ₂ CaCu ₂ O ₈	110
Ruthenium	0,49	Bi ₂ Sr ₂ CuO ₆	20
Titan	0,40	Ca _{1-x} Sr _x CuO ₂ (P ~ 5 GPa)	110
Uran	0,20	TmBa ₂ Cu ₃ O ₇	90
Hafnium	0,128	GdBa ₂ Cu ₃ O ₇	94
Iridium	0,1125	YBa ₂ Cu ₃ O ₇	93
Lutecium	0,100	Pb ₂ Sr ₂ YCu ₃ O ₈	70
Beryllium	0,026	GaSr ₂ (Y, Ca)Cu ₂ O ₇	70
Wolfram	0,0154	La _{1,85} Ba _{1,15} CuO ₄	35
Platina	0,0019	(Nd,Sr,Ce) ₂ CuO ₄	35
Rhodium	0,000325	Pb ₂ (Sr,La) ₂ Cu ₂ O ₆	32
		La _{1,85} Sr _{0,15} CuO ₄	38
<i>Kovy a slitiny</i>		<i>Nezařazené supravodiče</i>	
Nb _{0,6} Ti _{0,4}	9,8	Cs ₃ C ₆₀	40
Nb	9,25	MgB ₂	39
Tc	7,80	Ba _{0,6} K _{0,4} BiO ₃	30
V	5,40	YNi ₂ B ₂ C	15,5
		LiTiO ₂	13

Příloha č. 2: Tabulka nositelů Nobelovy ceny za objevy v oblasti supravodivosti*Tabulka 2 – Nositelé Nobelovy ceny za fyziku v oblasti supravodivosti [2]*

Rok udělení ceny	Jméno laureáta	Objev
1913	Heike Kamerlingh Onnes	Za výzkum vlastností látek při nízkých teplotách, který vedl k objevení supravodivosti i k výrobě kapalného helia.
1972	John Bardeen, Leon N. Cooper, J. Robert Schrieffer	Za vytvoření teorie supravodivosti, zvané BCS teorie.
1973	Leo Esaki, Ivar Giaever, and Brian D. Josephson	Za experimentální objev tunelového jevu v polovodičích a supravodičích.
1987	Georg Bednorz a K. Alex Müller	Za důležitý objev vysokoteplotních supravodičů na bázi keramiky.
2003	Alexei A. Abrikosov, Vitaly L. Ginzburg, and Anthony J. Leggett	Za průkopnické příspěvky k objasnění teorie supravodivosti a supratekutosti.