

netika, na jehož výzkumu se podílely týmy z Moskvy a Grenoblu [M. Kotrbová a kol., *J. Cryst. Growth* **71**, 607 (1985)].

V roce 1976 získalo oddělení zařízení - tažičku od francouzské firmy LPA pro pěstování krystalů z vlastní taveniny metodou Czochralskiho. Krystaly získávané touto metodou jsou větších rozměrů než u předcházejících metod a mají také blíže k praktickému užití. K rozsáhlejším úkolům patřilo pěstování bezdislokačních monokrystalů granátu $Gd_3Ga_5O_{12}$ (GGG - viz obr. 1) pro studium tzv. bublinových pamětí. Dalším krystalovaným materiálem byl germaničitan vizmutitý, $Bi_4Ge_3O_{12}$, který byl studován jako perspektivní materiál pro detekci záření a nyní je užíván mimo jiné jako detekční součást počítačových tomografií poskytujících cenné služby v lékařství. V posledních sedmi letech se skupina pracovníků vedených Pavlem Boháčkem zabývá přípravou dalšího scintilačního materiálu, $PbWO_4$ (PWO). V první části tohoto období se podílela na mezinárodním výzkumu tohoto materiálu zaměřeném k jeho užití ve fyzice vysokých energií v CERN ve Švýcarsku. Vzhledem k výsledkům dosaženým při tomto výzkumu byla kolektivu 6 pracovníků ústavu udělena v letošním roce cena AV ČR. Členy odměněného kolektivu jsou z chemického oddělení J. Novák a P. Boháček. V posledních třech letech jsou studovány možnosti úpravy scintilátoru PWO pro užití v lékařství [M. Nikl, P. Boháček a kol., *J. Appl. Phys.* **91**, 5041 (2002)].

Kromě materiálů na bázi oxidů jsou v oddělení připravovány metodou Czochralskiho i polovodičové krystaly arzenidů a fosfidů (L. Pekárek). V současné době je zpracováván projekt zaměřený na užití krystalů InP jako detektorů v lékařských rentgenových přístrojích. Vyšší účinnost těchto detektorů umožní významně snížit doby expozice

a tedy i zatížení lidského organismu při pořizování rentgenových snímků.

Třetí část programu chemického oddělení, příprava a studium organických látek, se začala intenzivně rozvíjet s příchodem Miroslava Kašpara do oddělení v roce 1992. Hlavní zájem M. Kašpara byl zaměřen na přípravu feroelektrických kapalných krystalů. Molekuly kapalných krystalů jsou podélného tyčinkovitého tvaru, jejich vzájemné působení vede i tehdy, když je látka v kapalném stavu, k různým typům uspořádání, a tím k anizotropii vlastností podobnou té, která je charakteristická pro pevné krystaly. Podmínkou feroelektrických vlastností ve vrstvách uspořádaných molekul je, aby jejich krajní řetězec obsahoval alespoň jeden chirální uhlík, tj. atom uhlíku, na nějž jsou vázány čtyři různé substituenty. Podmínka to však není absolutní, jak ukázal nedávný objev tzv. banánů, které chirální uhlík neobsahují a u nichž smektické uspořádání ve vrstvách a feroelektrický stav nastávají díky zvláštnímu tvaru molekul, připomínajícímu písmeno V. M. Kašpar vyšel z dostupného, levného materiálu, kyseliny mléčné, obsahující v molekule 1 chirální uhlík. Z ní a z jejích obměn vytvořil celý obor dosud neznámých kapalně krystalických látek vykazujících feroelektrické, antiferoelektrické a další pozoruhodné fáze a vlastnosti. Od roku 2001 jsou připravovány i kapalně krystalické typy „banán“ [M. Kašpar, V. Hamplová a kol., *J. Mater. Chem.* **12**, 2221 (2002)].

Souběžně s rozvojem syntézy vybuďovala Věra Hamplová metody kapalinové chromatografie. Tyto metody jsou užívány k analýze reakčních směsí vznikajících při organických syntézách a k izolaci jednotlivých produktů. Jsou užívány též ve fyzice fullerenu k detekci jednotlivých typů fullerenu a jejich derivátů.

FYZIKA NÍZKÝCH TEPLOT

Ladislav Skrbek, Josef Šebek

Fyzika nízkých teplot jako vědní disciplína vznikla na počátku minulého století, kdy se v roce 1908 Heike Kamerlinghu Onnesovi podařilo zkapalnit helium, které při normálním tlaku vře při 4,2 K v absolutní Kelvinově stupnici (cca -269 °C). Fyzikou nízkých teplot se historicky díky technické náročnosti spojené s jejich dosahováním rozumělo téměř vše, co se týkalo teplot pod bodem varu dusíku, tj. pod 78 K (viz programy celosvětových nízkoteplotních konferencí LT 1-23). Pro popis

mnoha fyzikálních jevů je vhodnější použít ne lineární, ale absolutní logaritmickou teplotní stupnici, která názorně ilustruje nedosažitelnost absolutní nuly, odpovídající hodnotě $-273,15$ °C. Každé snížení teploty o řád vyžaduje zhruba téhož úsilí. Pro dokreslení uvedme, že teplota vesmíru daná teplotou reliktního záření je těsně pod 3 K a tedy každá nízkoteplotní laboratoř je schopna připravit zcela unikátní podmínky, které nikde jinde v přírodě nenalezneme. Případné nalezení oblastí s takto ní-

kou teplotou ve vesmíru by proto bylo jednoznačně chápáno jako důkaz existence civilizace. Fyzika nízkých teplot se zabývá jevy charakterizovanými energiemi či interakcemi řádu kelvinů a méně; nejvýznamnější jsou supravodivost, supratekutost, fyzika helia v širším smyslu a nejnověji jevy spojené s Boseovou-Einsteinovou kondenzací atomů alkaličkových kovů. Jevy studované fyzikou nízkých teplot pravidelně přináší fundamenální poznatky, za které byla udělena celá řada Nobelových cen.

V České republice má fyzika nízkých teplot dlouhou a bohatou historii. První Oddělení nízkých teplot (ONT) v tehdejší Československu bylo založeno v roce 1955 jako součást Ústavu jaderného výzkumu v Řeži. Jeho nejdůležitějším úkolem byla příprava terčů polarizovaných jader, odpovídajících potřebám jaderné fyziky při studiu závislosti jaderných reakcí na spinu interagujících částic. K jejich realizaci byly nutné teploty 10^{-2} - 1 K, kterých nelze dosáhnout bez kapalného helia. K jeho získání je nutný zkapaňovač (obr. 1), který zde byl instalován a spuštěn 13. dubna 1960. Se spinem je spojen magnetický moment, takže energie každé částice s nenulovým spinem nacházející se v magnetickém poli odpovídá vzájemné orientaci spinu a pole. Pro zvýhodnění některé z možných orientací spinu byly využívány obě známé metody - statická i dynamická.



1/ Zkapaňovač helia

Při dynamické metodě se magnetickým polem rozštěpí základní stav a obsazení jednotlivých podhladin se ovlivní vynucenými přechody selektivním působením vysokofrekvenčního pole. Nízké teploty silně ovlivňují rychlost relaxačních procesů a tak lze významné polarizace dosáhnout již při teplotách řádu kelvinů. Jako terčkové protony sloužila jádra vodíku zabudovaná v krystalické vodě dusičnanu lanthanito-hořečnatého. Realizaci velkého terčů dynamicky polarizovaných protonů pro vysoké energie a zejména návrh nové generace protonových terčů na bázi glykolu [H. Glattli, M. Odehnal a kol., Phys. Lett. A **29**, 250 (1969)] lze zařadit mezi největší úspěchy počáteční činnosti ONT. Statická metoda usiluje o dosažení co možná největší hodnoty B/T , kde B je magnetická indukce a T teplota, aby se tak docílilo co nejpříznivějšího obsazení hladin daného Boltzmanovým rozdělením. S využitím zesilujících efektů využívajících vlastností krystalové mřížky se při statické metodě musí chladit na teploty 0,01 K a níže. Statická orientace jader ^{59}Co byla využita při přímém důkazu existence interferenčního členu v rozptylu neutronů na jádrech. Experiment prokázal, že amplitudy pružného a nepružného rozptylu nelze uvažovat odděleně, ale musí se zahrnout i jejich interference. Důsledkem bylo přehodnocení všech do té doby získaných výsledků [J. Honzátka, J. Šebek, J. Stehno a kol., Nucl. Phys. A **209**, 245 (1973)]. Uvedené práce po zásluze získaly ceny AV ČR za fyziku.

Světový ohlas má i další práce z oblasti velmi nízkých teplot - studium magnetických vlastností dusičnanu cerito-hořečnatého, kdy je část magnetických atomů ceru nahrazena nemagnetickým lanthanem. Jeho demagnetizací bylo dosaženo teploty 0,4 mK, rekordně nízké pro metodu demagnetizace elektronových magnetických momentů v paramagnetických solích [S. Šafrata, M. Koláč, J. Matas, M. Odehnal, K. Švec, JLT **41**, 405 (1980)]. Výsledky práce byly základem pro používání této látky pro termometrické účely v oboru teplot nad 0,5 mK, vytvoření praktické teplotní stupnice a vedly ke sjednocení výsledků získaných v různých světových laboratořích.

K dalším významným aktivitám ONT patřilo vytváření silných magnetických polí do 5 T - s nástavci až do 7 T - pomocí klasických vodou chlazených solenoidů Bitterova typu. K tomu bylo zapotřebí generátoru o výkonu 1 MW, přičemž proudovými přívody solenoidu protékal proud 2000 A pod napětím 500 V. Bylo to u nás první a po dlouhou dobu jediné pracoviště, které sloužilo jako experimentální základna i pro další výzkumné ústavy.

Supravodivost, zejména vývoj supravodivých materiálů pro technické využití, byla předmětem zájmu od samého počátku existence oddělení. Byly zde testovány vzorky vyvíjeného supravodiče na

bázi NbZr a NbTi, poté se centrem zájmu stal špičkový materiál Nb-Ge, jehož příprava vyžaduje zvládnout náročnou technologii deposice tenkých vrstev. V análech navždy zůstane údaj o rekordní kritické teplotě 23,2 K naměřené na připraveném vzorku Nb-Al-Ge [J. Růžička, Z. Physik **237**, 432 (1970)].

Důležitou oblastí výzkumu a aplikací supravodivosti je slabá supravodivost. Je založena na existenci Josephsonových jevů, které jsou projevem kvantové mechaniky v makroskopickém měřítku. Kromě toho, že jsou velmi zajímavé z hlediska základního výzkumu, lze je prakticky využít při konstrukci vysoce citlivých detekčních přístrojů. Srdcem těchto přístrojů je supravodivý kvantový interferenční detektor, zkráceně SQUID - z anglického Superconducting Quantum Interference Device, jehož vnitřní stav se díky změně vnějších podmínek skokem mění o kvantum magnetického toku ($\Phi_0 = 2 \cdot 10^{-15}$ Wb). Pro názornější představu - jde přibližně o magnetický tok zemského magnetického pole protékající průřezem lidského vlasu. Zmiňme se o pokusu aplikace slabé supravodivosti v lékařství, spočívajícím ve využití extrémně vysoké citlivosti čidel založených na principech slabé supravodivosti k detekci signálů biologických objektů, jejich stavu či poškození. Podařilo se nám zkonstruovat unikátní přístroj, který detekoval magnetický signál lidského srdce (miliontina zemského magnetického pole) a dokonce i lidského mozku (ještě 30krát slabší) v podmínkách běžných laboratoří bez použití komor stínících vnější rušivé signály. Přístroj se v medicíně dosud významnějším způsobem neujal, obsluha by byla přece jen náročnější a hlavně přístroj poskytuje mnoho nových informací, ke kterým zatím chybí dostatečně názorná interpretace. Na této problematice se v rovině výzkumu stále pracuje, ve světě již existují zařízení mapující činnost lidského mozku pomocí magnetického signálu snímaného až několika sty čidly podobného druhu.

Problematika studovaná v ONT se samozřejmě časem měnila a tomu odpovídal i vývoj nízkoteplotních experimentálních zařízení, např. několika rozpouštěcích refrigerátorů ^3He - ^4He pro dosahování teplot v milikelvinové oblasti. Od jaderné fyziky se přešlo na fyziku pevných látek studovaných při nízkých teplotách metodami jaderné magnetické rezonance (NMR). Byly pozorovány tzv. „zakázané“ přechody na ^1H pomocí vysoce citlivé metody SQUID-NMR při heliových teplotách [M. Kohl, M. Odehnal, V. Petříček, R. Tichý, S. Šafrata, JLT **72**, 319 (1988)] a klasickou metodikou spojitě NMR při velmi nízkých teplotách. Byly studovány relaxační procesy v pevných látkách typu skel vyvolávající parazitní tepelný přítok nebo časově závislé změny elektrického odporu s charakteristickou časovou konstantou řádu dní. Tyto procesy nastávají

při rychlém ochlazení studovaných vzorků, kdy dojde k vytvoření vnitřních tepelně nerovnovážných stavů.

Činnost ONT zahrnovala i praktičtější stránku. Oddělení spolupracovalo s firmou Ferox v Děčíně, v jejímž výrobním sortimentu byly heliové zkapalňovače, Dewarovy nádoby a kryostaty. Byla vyvinuta mnohovrstvá superizolace a v praxi použita při výrobě nádob na kapalný dusík (dřívější STS Říčany). Pracovníci oddělení se věnovali vývoji kryokauteru používaného ve zdravotnictví pro odstraňování některých typů nádorů.

Oddělením za dobu jeho existence prošla více než stovka pracovníků a řada dalších zde byla na pracovních či studijních pobytech. Za všechny uvedme pouze dvě jména těch, kteří na činnosti ONT zanechali nejhlubší stopy. S. Šafrata se rozhodující měrou zasloužil o rozvoj fyziky a techniky nízkých teplot v ČSSR, ONT po dobu téměř 40 let vedl a formoval. Hnací motorem celého oddělení byla fyzikální erudice bohužel předčasně zesnulého M. Odehnala, jehož nápady by jistě stačily naplnit činnost oddělení na mnoho dalších let [M. Odehnal, *Supravodivost a jiné kvantové jevy*, Academia, Praha 1992].

Jako projev mezinárodního uznání činnosti ONT lze chápat přidělení celosvětové konference nízkých teplot LT 21 s 1500 účastníky - vůbec největší v celé této řadě, která proběhla v Praze v roce 1996. Krátce poté si změna podmínek vyžádala reorganizaci ONT a po dohodě FZÚ AV ČR a MFF UK vznikly dvě společné laboratoře, které svou činností navazují na nízkoteplotní problematiku řešenou v ONT v Řeži. Nyní je téměř celé Oddělení nízkých teplot součástí Společné laboratoře nízkých teplot a Společné laboratoře pro magnetická studia, umístěných v prostorách Matematicko-fyzikální fakulty UK. Úzká vazba na MFF UK se projevuje i v aktivní účasti na výuce fyziky, výchově diplomantů a doktorandů.

Současná vědecká aktivita a publikační činnost ONT ve společných laboratořích je průběžně dokumentována (<http://www.fzu.cz/oddeleni/nizteplot>) a lze jí ve zkratce charakterizovat následovně: zaměřili jsme se na fyziku materiálů se silně korelovanými d- a f-elektrony, které jsou zodpovědné za jejich magnetické chování a značně ovlivňují jejich transportní, tepelné a kohezní vlastnosti. Hlavním cílem je určení a vysvětlení korelací mezi elektronovou strukturou a fyzikálními vlastnostmi, což v budoucnosti umožní cílený design nových multifunkčních materiálů s požadovanými parametry. Studované magnetické fázové přechody totiž často vedou k význačným magnetotransportním, magnetotermálním a magnetoelastickým jevům s aplikačním potenciálem. Fyzikální vlastnosti studovaných materiálů - především monokrystalů intermetalických sloučenin [A. V. Andreev, J. Šebek, V. Sechovský a kol., Phil. Mag. B **75**, 827 (1997), Phys.

Rev. B **66**, 144423 (2002)] - jsou určeny elektronovou strukturou, kterou ovlivňujeme například tak, že změním rozložení okolních atomů (změna krystalové struktury) nebo meziatomové vzdálenosti (vnějším tlakem nebo substitucemi, které mění mřížkové konstanty, nikoliv však strukturu). Např. UCoAl je paramagnet vykazující při nízkých teplotách metamagnetismus (s magnetickým momentem uranu) s velmi malým kritickým polem, malá příměs Fe jej změní na feromagnetikum, ač ionty železa zde nenesou magnetický moment. Substituce kobaltu ionty niklu však stabilizuje paramagnetický stav a metamagnetismus zaniká. Využíváme dvě komerční aparatury se špičkovými parametry PPMS-9 a PPMS-14 (Physical Properties Measuring System) umožňující studium magnetických a transportních vlastností, měrného tepla, tepelné vodivosti, Seebeckova jevu, tepelné roztažnosti, magnetostrikce a magnetokalorického jevu za multiextrémních podmínek: v magnetických polích do 9 a 14 T v teplotním oboru 0,35-350 K, přičemž tlakové cely dovolují měření za hydrostatických tlaků až 2 GPa.

V laboratoři Mössbauerovy spektroskopie (na jejímž zřízení se kromě FZÚ AV ČR a MFF UK dále podílí Přírodovědecká fakulta UK a Ústav anorganické chemie AV ČR) studujeme zejména systémy obsahující nanočástice sloučenin a slitin železa [A. Lančok, K. Závěta a kol., JMMM **215**, 30 (2000)]. Jde o nanokompozity tvořené mříží SiO₂ se zabudovanými částicemi různých krystalografických modifikací Fe₂O₃ nebo feritů se spinelovou strukturou a nanogranulární systémy vzniklé řízenou krystalizací amorfních či metastabilních rychle kalených slitin obsahujících Fe. Ve spolupráci s Ústavem fyzikální chemie J. Heyrovského pokračujeme ve studiu zeolitů dopovaných ionty Fe. Díky použití izotopu ⁵⁷Fe můžeme *in situ* sledovat oxidačně-redukční pochody na atomech Fe po expozici různým atmosférám za zvýšené teploty.

Pomocí dvou nekomerčních squidových magnetometrů, které mají až o dva řády vyšší citlivost než komerční magnetometry [G. Tsoy, Z. Janů, M. Novák, R. Tichý, F. Soukup, Physica B **284**, 2122 (2000)], studujeme magnetické a transportní vlastnosti supravodičů. Mezi nejzajímavější materiály

patří ty, jejichž krystalová mřížka má superstrukturu (supermřížku). V některých z nich, mezi něž patří i vysokoteplotní supravodiče, je elektronový transport silně anizotropní. Přirozeně tak vznikají dvojrozměrné vrstvy nebo dokonce jednorozměrné kvantové dráty. V materiálech, u nichž se Fermiho plocha dotýká Brillouinovy zóny supermřížky, dochází ke strukturálním přechodům, vznikají vlny nábojové a spinové hustoty a zásadně se mění elektrická vodivost, která je ovlivněna srážkami elektronů. Vodivost měříme bezkontaktně prostřednictvím magnetického momentu proudu indukovaného ve vzorku. Mezi studované materiály patří např. YBaCuO, BiSrCaCuO, supravodivé fulleridy alkalických kovů, MgB₂ atd. Spolupracujeme se Škodou Plzeň, MFF UK v Praze a ZČU v Plzni na vývoji 10 kVA supravodivého transformátoru se supravodivým omezovačem proudu.

Nově se též věnujeme výzkumu proudění kryogenních kapalin a kryogenní turbulenci. Citlivou metodikou tlumení teplotních vln - tzv. druhého zvuku - studujeme rozpad kvantové turbulence v supratekutém heliu vznikající v protiproudu normální a supratekuté složky. Ukázali jsme, že rozpad klasické a kvantové turbulence má překvapivě řadu shodných rysů, ačkoli kvantová turbulence zahrnuje kvantované víry a jejich dynamiku v supratekuté složce He II [L. Skrbek, A. V. Gordeev, F. Soukup, Phys. Rev. E **67**, 047302 (2003)]. Kryogenní helium - ať už kapalné normální He I, supratekuté He II či chladný heliový plyn - v okolí kritického bodu je nejvhodnější známou pracovní látkou k experimentálnímu studiu turbulentního proudění ultravysokých Reynoldsových a Rayleighových čísel [J. J. Niemela, L. Skrbek a kol., Nature **404**, 827 (2000)]. Ve světle spolupráce se zahraničními pracovišti ve Finsku a Velké Británii, kde se přímo účastníme experimentů s rotujícími supratekutými fázemi ³He [R. Blaauwgeers, L. Skrbek a kol., Phys. Rev. Lett. **89**, 155301 (2002); A. P. Finne, L. Skrbek a kol.; Nature **424**, 1022 (2003)] a proudění He II při milikelvinových teplotách se zdá, že by současné studium klasické a kvantové turbulence mohlo být klíčem k hlubšímu pochopení fyzikálních principů dosud nevyřešeného problému turbulence.