

# Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

---

Miloš Rotter

Nobelova cena za fyziku 2003

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 49 (2004), No. 1, 1--10

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/141201>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2004

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



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

# Nobelova cena za fyziku 2003

*Miloš Rotter, Praha*

Švédská královská akademie věd se rozhodla udělit Nobelovu cenu za fyziku v roce 2003 „**za průkopnické příspěvky k teorii supravodivosti a supratekutosti**“. Cena byla rozdělena rovným dílem mezi tři fyziky.

Za práce v teorii supravodivosti byli oceněni:

- ALEXEJ A. ABRIKOSOV (75), ruský a americký občan, který pracoval v moskevském Ústavu fyzikálních problémů a později v Argonnské národní laboratoři ve Spojených státech.
- VITALIJ L. GINZBURG (87), ruský občan, který byl vedoucím teoretické skupiny ve Fyzikálním ústavu P. N. Lebeděva v Moskvě.

Za příspěvek k teorii supratekutosti byl oceněn:

- ANTHONY J. LEGGETT (65), britský a americký občan, který pracoval nejprve na univerzitě v Oxfordu a později se stal profesorem na Illinoiské univerzitě v Urbaně-Champaign ve Spojených státech.

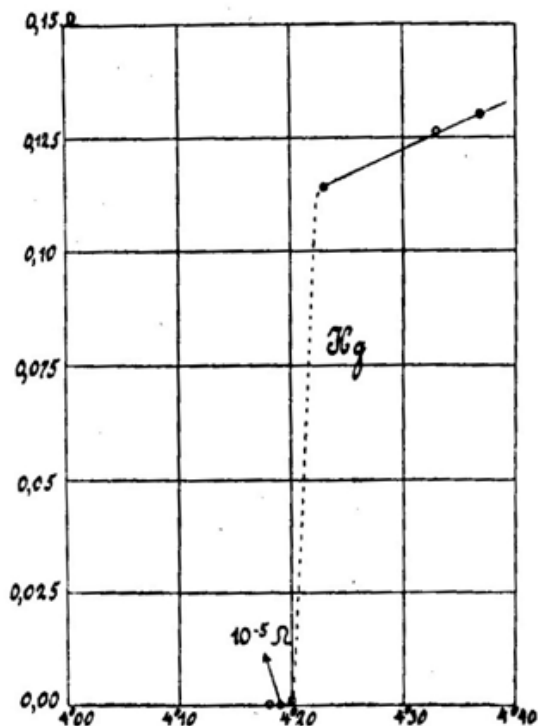
Nobelova cena za rok 2003 doplňuje celou řadu předchozích udělení této ceny za práce týkající se výzkumu kvantových vlastností kondenzovaných systémů — supravodičů a supratekutých kapalin. Velký počet ocenění zřetelně dokládá důležitost těchto prací nejen pro fyziku kondenzovaného stavu, ale i pro tak vzdálené oblasti, jakými jsou fyzika elementárních částic nebo astrofyzika, v nichž modely vyvinuté k popisu kvantových soustav, supravodičů, kvantových kapalin a krystalů našly své uplatnění.

## Objev supravodivosti

Když v roce 1908 Heike Kamerlingh Onnes v nizozemském Leidenu poprvé zkapalnil helium, otevřel tím cestu k zásadním fyzikálním objevům vlastností kondenzovaných soustav při nízkých teplotách. S klesající teplotou se zmenšuje kinetická energie pohybu částic, která při vyšších teplotách znemožňuje pozorovat jejich jemnější interakce, zejména ty, které souvisejí s kvantovou povahou mikrosvěta. Kamerlingh Onnes se nezaměřil jen na zkoumání vlastností kapalného helia, sledoval také změnu elektrického odporu kovů s klesající teplotou. V roce 1911 zjistil, že elektrický odpor rtuti při poklesu teploty pod 4,15 K náhle vymizí (obr. 1). Při dalších experimentech se zjistilo, že se tato vlastnost projevuje i u jiných kovů. Stále jemnějšími měřeními bylo ověřeno,

---

Doc. RNDr. MILOŠ ROTTER, CSc. (1943), Matematicko-fyzikální fakulta UK, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8, e-mail: [rotter@mbx.troja.mff.cuni.cz](mailto:rotter@mbx.troja.mff.cuni.cz)

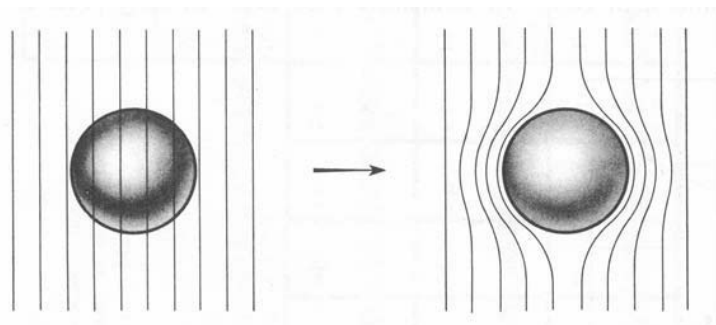


Obr. 1. Záznam měření elektrického odporu rtuti, jímž v roce 1911 Heike Kamerlingh Onnes a Gilles Holst objevili supravodivost [2].

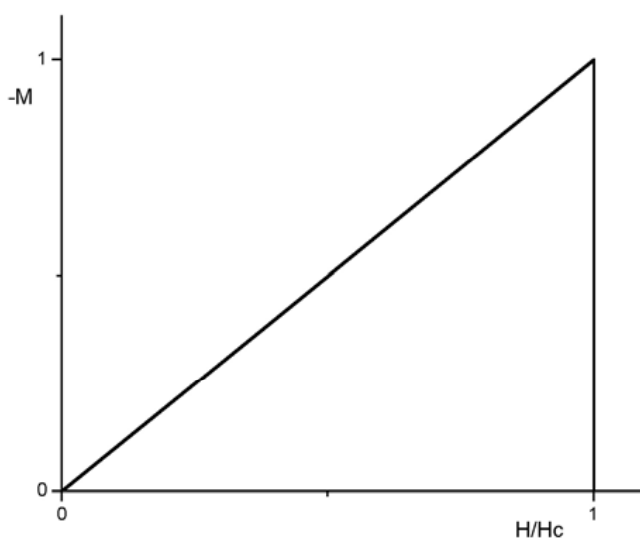
že vodič má v tomto stavu neměřitelně malý elektrický odpor, proto se o něm hovoří jako o supravodiči. Za objev supravodivosti byla Kamerlinghu Onnesovi v roce 1913 udělena Nobelova cena.

Uběhlo bezmála padesát let, než John Bardeen, Leon Cooper a Robert Schrieffer zformulovali mikroskopickou teorii supravodivosti (BCS), za niž obdrželi Nobelovu cenu v roce 1972. Proud v supravodiči vedou kvazičástice, Cooperovy páry, tvořené dvěma vodivostními elektrony, jejichž momenty hybnosti mají stejnou velikost a opačný směr, zároveň jsou jejich spiny opačně orientovány. Vazbu mezi elektrony Cooperova páru zprostředkují kmity krystalové mřížky, fonony. Spárované elektrony vytvářejí kondenzát v základním energetickém stavu, který se krystalovou mřížkou pohybuje bez odporu. Tento kondenzát se vyznačuje vysokou koherencí a je možné jej popsat makroskopickou vlnovou funkcí s jedinou fází. Supravodiče umožňují demonstrovat kvantové jevy v makroskopickém měřítku. Teorie BCS nalezla své analogie i v dalších oblastech fyziky. Popisuje velmi dobře chování tzv. supravodičů 1. druhu, které projevují dokonalý diamagnetismus.

Magnetické vlastnosti supravodičů objevili v roce 1933 Walter Meissner a Robert Ochsenfeld. Zjistili, že supravodič vložený do magnetického pole vytlačuje ze svého objemu siločáry magnetického pole, vytváří se v něm magnetizace stejně velká jako



Obr. 2. Při ochlazení pod kritickou teplotu vytlačuje supravodič ze svého objemu siločáry magnetického pole [2].



Obr. 3. Závislost magnetizace supravodiče 1. druhu na magnetickém poli. Supravodič se chová jako ideální diamagnetikum až do kritického pole  $H_c$ .

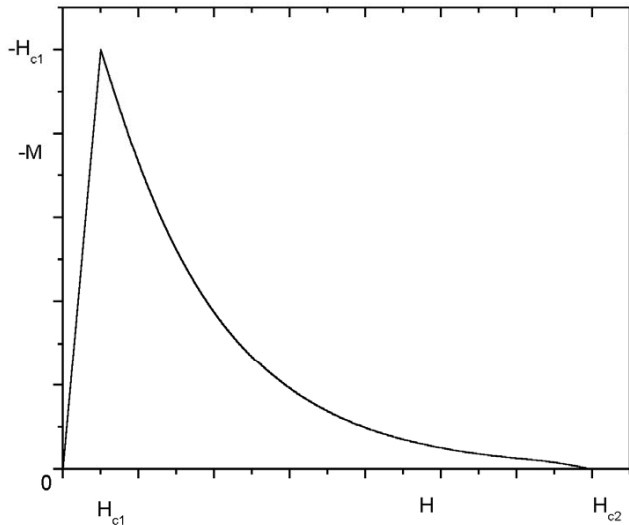
působící pole, ale s opačným směrem (obr. 2). Supravodič se tedy chová jako ideální diamagnetikum.

Meissner a Ochsenfeld zjistili také, že supravodivost může existovat jen ve slabých magnetických polích do kritické hodnoty  $H_c$ . Naděje na využití supravodičů k vytváření silných magnetických polí nebo na přenos velkých proudů beze ztrát tedy nemohly supravodiče 1. druhu splnit (obr. 3).

## Supravodiče 2. druhu

Postupně byl jev supravodivosti zjištěn i u slitin a také u nekovových sloučenin, dokonce i u některých organických látek. Jako supravodiče 2. druhu jsou označovány

materiály, u nichž dokonalý diamagnetismus zaniká při dosažení prvního kritického pole  $H_{c1}$ , vedení proudu beze ztrát se však zachovává až k druhému kritickému poli  $H_{c2}$ , často velmi silnému (obr. 4).



Obr. 4. Závislost magnetizace supravodiče 2. druhu na magnetickém poli. Ideální diamagnetismus mizí nad prvním kritickým polem  $H_{c1}$  a supravodič přechází do smíšeného stavu, kdy stále vede elektrický proud beze ztrát. Nad druhým kritickým polem  $H_{c2}$  supravodivost vymizí.

Supravodiče 2. druhu našly velké uplatnění nejen ve fyzice, ale i v průmyslu a zejména v medicíně. Nejvíce se komerčně využívají mnohažilové kabely ze slitiny NbTi a z intermetalické sloučeniny Nb<sub>3</sub>Sn, pomocí nichž se vyrábějí solenoidy produkující pole s magnetickou indukcí až 15 T. V CERNu v současné době vzniká nový výkonný urychlovač LHC, který bude složen ze soustavy velkých supravodivých magnetů. Supravodivé magnety, které pracují ve zkratovaném (perzistentním) režimu bez přívodu proudu, vydrží dnes několik měsíců bez doplňování kapalného helia. Tyto magnety umožnily rozvoj spektroskopie jaderné magnetické rezonance s vysokým rozlišením, s nímž je spojován význačný pokrok v poznání struktury chemických a biologických objektů. Pro praktický život je snad nejvýznamnější rozšíření metody zobrazování živých tkání pomocí jaderné magnetické rezonance (NMR Imaging) v rezonančních tomografech s velkými supravodivými solenoidy, do nichž může být uložen celý pacient. Těmito tomografy jsou dnes vybavována všechna přední zdravotnická zařízení. Za rozvoj metody NMR Imaging byla v roce 2003 udělena Nobelova cena za lékařství (viz toto číslo PMFA, str. 15–23).

V roce 1986 objevili Georg Bednorz a Alex Müller supravodivost u oxidů mědi s tehdy neobyčejně vysokou kritickou teplotou. Jejich objev byl oceněn Nobelovou cenou již v roce 1987. V následujících letech byla připravena celá řada tzv. vysokoteplotních supravodičů, které projevují supravodivé vlastnosti již při ochlazení kapalným dusíkem. Všechny tyto materiály patří mezi supravodiče 2. druhu.

## Fenomenologická teorie supravodivosti

Chování supravodičů v magnetickém poli nebylo možné interpretovat pomocí mikroskopické teorie BCS. Již v roce 1934 bratři Fritz a Heinz Londonové doplnili Maxwellovy rovnice o platnost Meissnerova-Ochsenfeldova jevu a dostali soustavu rovnic popisujících chování supravodiče v magnetickém poli. Zjistili, že magnetické pole proniká do tenké povrchové vrstvy supravodiče, přičemž jeho amplituda exponenciálně klesá. Charakteristická hloubka vniku  $\lambda$  je řádu desítek mikrometrů.

V roce 1950 publikovali LEV D. LANDAU a VITALIJ L. GINZBURG teoretickou práci, v níž aplikovali Landauovu teorii fázových přechodů 2. druhu z roku 1937 na vznik supravodivého stavu. (L. D. Landau byl za své další práce, jimiž vysvětlil chování supratekutého helia, oceněn Nobelovou cenou v roce 1962.) Práce otištěná v ruském jazyce v časopise ŽETF, za níž je právě V. L. Ginzburg vyznamenán Nobelovou cenou, dlouho unikala pozornosti světových vědců. V ovzduší studené války projevíli newyorští přístavní dělníci iniciativně svou podporu boji s komunistickým nebezpečím tím, že náklad sovětských časopisů vhodili do moře. Zmíněná práce vešla ve známost až po deseti letech prostřednictvím mikrofiší. Landau s Ginzburgem řešili fenomenologickým způsobem přechod do supravodivého stavu za přítomnosti magnetického pole. Předpokládali, že rozdíl hustoty Gibbsova potenciálu mezi supravodivým stavem  $g_s$  a normálním stavem  $g_n$  se dá vyjádřit mocninnou řadou komplexního parametru uspořádání  $\Psi$  s koeficienty, které jsou analytickými funkcemi teploty:

$$g_s = g_n + \alpha(t) |\Psi|^2 + \frac{\beta(t)}{2} |\Psi|^4 + \dots$$

S geniální intuicí zvolili jako parametr uspořádání vlnovou funkci supravodivých elektronů a dovolili jeho změny v prostoru. Z důvodů symetrie se ve výrazu vyskytují jen sudé mocniny parametru uspořádání  $\Psi$ . Koeficienty rozvoje musí splňovat následující podmínky:

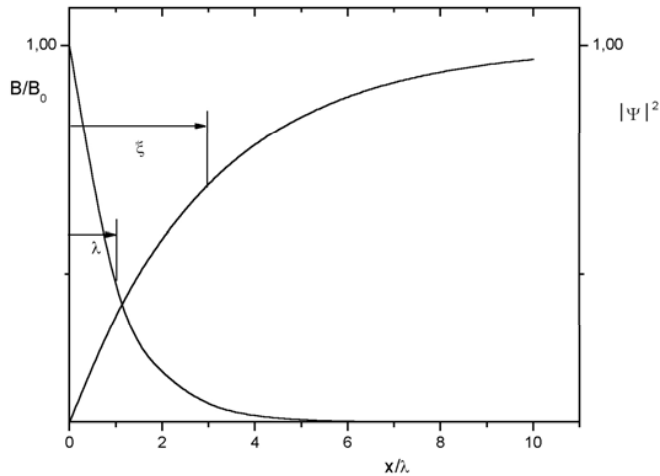
$$\alpha(T) = (T - T_c) \left. \frac{d\alpha}{dT} \right|_{T_c} < 0 \quad \text{pro } T < T_c \quad \text{a} \quad \alpha(T_c) = 0, \\ \beta(T) > 0 \quad \text{a} \quad \beta(T) \approx \beta(T_c).$$

Do výrazu pro hustotu Gibbsova potenciálu byl zaveden i výraz pro kinetickou energii supravodivých elektronů (Cooperových párů), v němž je magnetické pole reprezentováno vektorovým potenciálem  $\vec{A}$ , a také výraz pro hustotu energie magnetického pole  $\vec{B}$ ,

$$g_s = g_n + \alpha(t) |\Psi|^2 + \frac{\beta(t)}{2} |\Psi|^4 + \frac{1}{4m_e} \langle \Psi | (\hat{p} - 2e\hat{A})^2 | \Psi \rangle + \frac{|\vec{B}|^2}{2\mu_0},$$

kde  $\mu_0$  je permeabilita vakua,  $e$  je náboj elektronu a  $m_e$  jeho hmotnost. Z podmínky minima Gibbsova potenciálu s využitím okrajových podmínek tak vznikla soustava Ginzburgových-Landauových (GL) rovnic

$$\alpha(T)\Psi + \beta(T) |\Psi|^2 \Psi + \frac{1}{2m_e} (\hat{p} - 2e\hat{A})^2 \Psi = 0, \\ \vec{j} = -\frac{ie\hbar}{2m} (\Psi^* \nabla \Psi - (\nabla \Psi^*) \Psi) - \frac{2e^2}{m} \vec{A} |\Psi|^2$$



Obr. 5. Schematické znázornění pronikání magnetického pole dovnitř supravodiče a zároveň vzrůstu parametru uspořádání směrem od rozhraní mezi normálním kovem a supravodičem. Znázorněná situace odpovídá supravodiči 1. druhu.

pro parametr uspořádání  $\Psi$  a hustotu supravodivého proudu  $\vec{j}$ . Normální stav popisuje řešení s  $\Psi = 0$ , úplný Meissnerův jev odpovídá  $\Psi \equiv \Psi_0$ , kde  $|\Psi_0|^2 = -\alpha/\beta$  a  $\vec{A} = 0$ .

Z rovnic GL lze určit i hloubku vniku  $\lambda$  magnetického pole do supravodiče, neboť se z nich dá získat rovnice bratří Londonů. Charakteristická délka změny parametru uspořádání uvnitř supravodiče odpovídá koherenční délce  $\xi$  Cooperových párů, jak ji zavedl Brian Pippard (viz schematický obr. 5). V supravodičích 1. druhu platí pro poměr těchto veličin tzv. Ginzburgův-Landaův koeficient

$$\kappa(T) = \frac{\lambda(T)}{\xi(T)} \leq \frac{1}{\sqrt{2}}$$

a povrchová energie supravodiče je kladná.

ALEXEJ A. ABRIKOSOV se pokoušel interpretovat měření kritického pole na tenkých supravodivých vrstvách a zabýval se proto řešením rovnic GL pro případ  $\kappa(T) > 1$ , tedy v supravodičích, v nichž je hloubka vniku magnetického pole větší než koherenční délka a jejichž povrchová energie je záporná. V takových supravodičích je energeticky výhodné, aby magnetické pole vnikalo do supravodiče a vznikaly stěny mezi supravodivými a normálními oblastmi. Vzhledem k tomu, že siločáry magnetického pole musí být uzavřené, normální oblasti, tedy oblasti pronikání magnetického pole do supravodiče, budou mít tvar desek nebo trubic orientovaných ve směru působícího magnetického pole. Abrikosov se řešením rovnic GL pro  $\kappa(T) > 1$  zabýval již krátce po jejich publikaci. Landau však toto řešení se zápornou povrchovou energií považoval za nefyzikální a Abrikosovi nedoporučil v práci pokračovat. V roce 1954 Richard Feynman vyslovil myšlenku vzniku vírů v rotujícím supratekutém heliu, s jejíž pomocí vysvětlil rozpor v předpovědi kritické rychlosti supratekutého helia, jak vyplývala z Landauovy teorie elementárních excitací. Abrikosov přijal myšlenku vírů jako ideální model smíšeného stavu supravodičů 2. druhu a řešení rovnic GL. Svou práci publikoval v roce

1957, tentokrát s vřelou podporou svého učitele L. D. Landaua. Úspěch Landauovy-Ginzburgovy-Abrikosovy teorie byl dovršen prací L. P. Gorkova, který v roce 1959 dokázal, že tyto rovnice jsou limitním případem rovnic mikroskopické teorie BCS. Rovnice GL prokázaly svou užitečnost při studiu vlastností a vývoji technologie výroby technicky důležitých supravodičů 2. druhu, s jejichž pomocí jsou dnes generována silná magnetická pole, např. pro spektroskopii NMR vysokého rozlišení.

Magnetický indukční tok zachycený ve vírech je kvantován, přičemž elementární kvantum magnetického toku má hodnotu  $\Phi_0 = h/2e = 2,07 \cdot 10^{-15}$  Wb. Toto kvantum magnetického toku je asi milionkrát menší než tok vyvolaný zemským magnetickým polem procházejícím ploškou jednoho čtverečního centimetru. Uplatní se zejména v jevech tzv. slabé supravodivosti na rozhraní dvou supravodičů. Tyto jevy, které objevil v roce 1962 Brian D. Josephson (Nobelova cena z roku 1973), umožňují demonstrovat v makroskopickém měřítku kvantovou podstatu supravodivosti. Jsou základem velmi citlivých přístrojů, tzv. skvidů, jimiž lze měřit i nepatrná magnetická pole vytvářená činností lidského srdce nebo mozku.

Jádro víru v supravodiči má rozměr koherenční délky  $\xi(T)$ . Studium struktury a dynamiky mřížky virů je dnes jednou z důležitých oblastí výzkumu supravodivosti, zejména v tzv. vysokoteplotních supravodičích. Mechanismus záchytu vírových linií, tzv. pinningu, je určující pro odolnost supravodivého stavu vůči magnetickému poli a jeho změnám, což je základním kritériem technické použitelnosti supravodičů 2. druhu pro vytváření silných magnetických polí a pro bezztrátový přenos elektrické energie.

## Supratekutost $^3\text{He}$

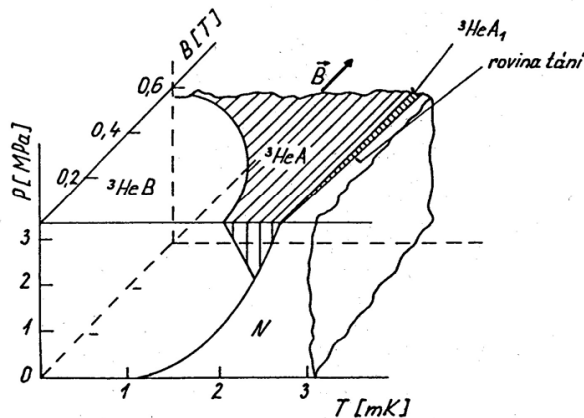
Supratekutost běžného izotopu helia,  $^4\text{He}$ , k níž dochází při teplotě  $T_\lambda = 2,17\text{K}$ , objevil v roce 1938 Petr L. Kapica (Nobelova cena z roku 1978). Objevil tak kapalinu nevídaných vlastností, která může proudit velmi úzkými kanálky bez odporu a vytváří povrchový film, v němž kapalina proudí proti směru gravitace. Měrné teplo helia anomálně vzroste při teplotě  $T_\lambda$ , supratekuté helium, označované jako HeII, má velmi vysokou tepelnou vodivost, projevuje termomechanický a fontánový jev. V supratekuté kapalině se šíří kromě normálního zvuku i jeho další neobvyklé formy. K popisu supratekutého helia HeII použil L. Tisza fenomenologický model směsi dvou kapalin. Jednou složkou je kapalina s normální viskozitou a druhou složkou je supratekutá kapalina. Tímto modelem bylo možné vysvětlit hydrodynamické vlastnosti HeII. Supratekuté chování je však kolektivní jev a nelze rozlišit, které atomy patří k normální a které k supratekuté složce. Supratekutá složka byla ztotožňována s kondenzátem slabě interagujících bozonů. Experimenty s rozptylem neutronů v šedesátých letech však ukázaly, že Boseho kondenzátu není v supratekutém heliu více než 10%. Tento rozpor zůstává dodnes neobjasněn. L. D. Landau použil jiný přístup a vysvětlil chování HeII, zejména šíření různých druhů zvuků, pomocí elementárních excitací, fononů



a rotonů<sup>1)</sup>. Reálnost tohoto modelu byla později potvrzena pomocí experimentů s rozptylem neutronů.

Existence druhého stabilního, podstatně vzácnějšího izotopu helia  $^3\text{He}$  byla objevena teprve krátce před druhou světovou válkou a použitelná množství byla k dispozici až po roce 1948. Jádra atomů  $^3\text{He}$  obsahují tři nukleony, mají tedy spin  $1/2$  a řídí se Fermiho-Diracovou statistikou. Zdálo se tedy, že nemohou vytvořit kondenzát bozonů a  $^3\text{He}$  se nemůže stát supratekutým. Pod vlivem mikroskopické teorie supravodivosti BCS však byla zkoumána možnost párování atomů  $^3\text{He}$  analogicky k vytváření Cooperových párů elektronů v supravodiči. Odhady kritické teploty přechodu  $^3\text{He}$  do supratekutého stavu byly situovány většinou do oblasti ultranízkých teplot, přesto se v řadě laboratoří pokoušeli supratekutost  $^3\text{He}$  objevit.

Douglas D. Osheroff, Robert C. Richardson a David M. Lee našli v roce 1972 zlomy na závislosti tlaku na čase při experimentech s chlazením adiabatickou krystalizací v Pomerančukově komůrce (Nobelova cena za rok 1996). Výsledek zprvu interpretovali jako přechody mezi magnetickými fázemi pevného  $^3\text{He}$ . Jedním z prvních, kdo pochopil, že jde o projev supratekutosti  $^3\text{He}$ , byl ANTHONY J. LEGGETT, který zároveň navrhl experimenty k ověření této hypotézy a také předpověděl některé vlastnosti supratekutých fází  $^3\text{He}$ . V roce 1975 publikoval Leggett rozsáhlou práci, v níž prakticky vybudoval mikroskopickou teorii supratekutosti  $^3\text{He}$ .



Obr. 6. Diagram supratekutých fází  $^3\text{He}$  v závislosti na teplotě, tlaku a magnetickém poli [1].

Zatímco nositelé proudu v supravodičích, Cooperovy páry, vznikají singletním párováním vodivostních elektronů s výsledným nulovým spinovým momentem i nulovým momentem hybnosti, dochází k tripletnímu párování atomů  $^3\text{He}$ ,  $s = 1$ . Párování

<sup>1)</sup> Kvazičástice fonony popisují šíření prvního (normálního) zvuku v supratekutém HeII, jsou analogické fononům v pevných látkách. L. D. Landau zavedl kvazičástice rotony pro popis excitací ve vyšších energiích. Závislost energie  $E$  rotonů na hybnosti  $p$  je určena tzv. disperzní relací  $E = \Delta + (p - p_0)^2 / 2\mu_{\text{ef}}$ . Spektrum rotonů je odděleno energetickou mezerou  $\Delta$ , jeho minimum se nachází v hybnosti  $p_0$  (efektivní hmotnost rotonů  $\mu_{\text{ef}}$  určuje tvar spektra).

atomů zprostředkují fluktuace spinové hustoty, tzv. paramagnony. V důsledku antisymetrie vlnové funkce atomů  ${}^3\text{He}$  jako fermionů musí být i výsledné orbitální kvantové číslo  $L$  liché, v souladu s experimenty je  $L = 1$ . Projekční kvantové číslo tripletního stavu může tedy nabývat hodnot  $+1, 0, -1$ , čemuž odpovídají tři spinové funkce (šipky označují orientaci spinových momentů atomů  ${}^3\text{He}$ ):

$$|\uparrow\uparrow\rangle, \quad \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\downarrow\rangle + |\downarrow\uparrow\rangle) \quad \text{a} \quad |\downarrow\downarrow\rangle.$$

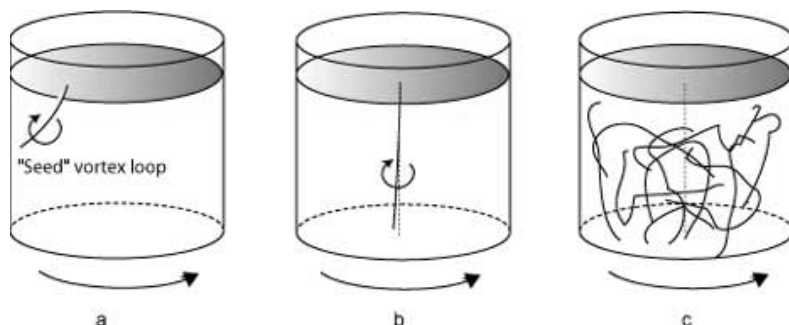
Ve fázovém diagramu  ${}^3\text{He}$  (viz obr. 6) lze rozeznat tři supratekuté fáze: A, B a  $A_1$ , v nichž jsou uvedené kondenzáty v různé míře zastoupeny. Na křivce tání přechází při teplotě asi 2,6 mK normální  ${}^3\text{He}$  fázovým přechodem 2. druhu do anizotropní supratekuté fáze A tvořené superpozicí kondenzátů  $|\uparrow\uparrow\rangle$  a  $|\downarrow\downarrow\rangle$ . Při dalším snižování teploty přejde supratekuté  ${}^3\text{He}$  při teplotě asi 2 mK přechodem 1. druhu do pseudoizotropní fáze B, která obsahuje všechny uvedené kondenzáty. V přítomnosti vnějšího magnetického pole vzniká podél rozhraní mezi normální a supratekutou kapalinou nová fáze  $A_1$  s jediným kondenzátem  $|\uparrow\uparrow\rangle$ , která tedy představuje magnetický supratekutý kondenzát. Existence fáze A byla teoreticky předpovězena již v roce 1961 P. W. Andersonem s W. P. Brinkmanem a P. Morelem (model ABM), podobně jako fáze B byla v roce 1963 rozpracována R. Balianem a N. R. Werthamerem (model BW). Leggett tyto modely aplikoval na konkrétní projevy supratekutosti  ${}^3\text{He}$ , zavedl parametr uspořádání  $\mathbf{d}$  pomocí anihilačních operátorů a popsal jeho vztah k orbitálnímu momentu  $l$  páru a vlnovému vektoru  $\mathbf{k}$ . Velikost parametru uspořádání je úměrná energetické mezeře supratekutého stavu, která je anizotropní ve fázi A a je izotropní ve fázi B. Leggett ukázal, že v přítomnosti spinové-orbitální vazby ve fázi B svírají vektory  $\mathbf{k}$  a  $\mathbf{d}$  spolu tzv. Leggettův úhel  $\Theta_L \approx 104^\circ$ . Rozpracoval také topologii supratekutých fází vedoucí k překvapivým singularitám planárním, čárovým i bodovým, jejichž existence byla ověřena při studiu tečení a rotace supratekutého  ${}^3\text{He}$ .

Nejdůležitější informace o struktuře supratekutých fází poskytly experimenty jaderné magnetické rezonance (NMR). Korelace mezi spinovými a orbitálními momenty atomů  ${}^3\text{He}$  vázanými v „Cooperově páru“ způsobují řadu neobvyklých dynamických jevů pozorovaných při detekci NMR. Normální kapalně  ${}^3\text{He}$  vykazuje běžnou příčnou rezonanci s úzkou čarou o Larmorově frekvenci  $\omega_L = \gamma H_0$ . Při přechodu do fáze A dojde k posunu rezonanční frekvence

$$\omega_{\perp A}^2 = \omega_L^2 + \Omega_A^2(T).$$

Frekvenční posuv, Leggettova frekvence  $\Omega_A(T)$ , je teplotně závislý a nezávisí na magnetickém poli. Ve fázi B se rezonanční frekvence vrátí k Larmorově hodnotě jako v normálním  ${}^3\text{He}$ , statická magnetická susceptibilita však klesne o jednu třetinu. Velkým překvapením bylo experimentální potvrzení Leggettovy předpovědi existence tzv. podélné rezonance, kdy je rezonance vybuzena střídavým polem  $\mathbf{H}_1$  orientovaným paralelně se statickým polem  $\mathbf{H}_0$ :

$$\omega_{\parallel A} = \Omega_A(T) \quad \text{a} \quad \omega_{\parallel B} = \Omega_B(T) \approx 2\Omega_A(T).$$



Obr. 7. Vznik vírů v rotující nádobě se supratekutým  $^3\text{He}$  ve fázi B. Při teplotách vyšších než  $0,6 T_c$ , kde  $T_c$  je teplota přechodu do supratekutého stavu, se vznikající vír rozvine a vytvoří přímou linii rovnoběžnou s osou rotace (b). Při teplotách nižších než  $0,6 T_c$  vznikne v rotující nádobě turbulence (c) [6, 7].

Ve fázi  $A_1$  dochází pouze k příčné rezonanci s normální Larmorovou frekvencí. Při pulzním buzení NMR se pozoruje extrémně dlouhé doznívání rezonančního signálu.

V posledních letech se intenzivně studuje turbulentní proudění kvantových kapalin. Obecná teorie turbulence je přitom jedním z dosud nevyřešených problémů klasické fyziky. Kritéria vzniku turbulence a jejího dynamického vývoje jsou studována v supratekuté fázi  $^3\text{He}$ -B při submilikelvinové teplotě v rotujícím kryostatu. V nedávných experimentech bylo na Helsinské technické univerzitě objeveno teplotně závislé kritérium supratekuté turbulence (viz obr. 7). Studium jevů kvantové turbulence jistě zásadním způsobem přispěje k objasnění obecných zákonů turbulentního proudění.

Nobelovou cenou za fyziku v roce 2003 byly oceněny dnes již klasické teoretické práce, jejichž význam prokázal čas a jež se stále více uplatňují v praktických aplikacích. Staly se základem mnohých zásadních experimentů i rozsáhlého technologického pokroku.

**Poděkování.** Autor děkuje doc. RNDr. LADISLAVU SKRBAKOVI, DrSc., a Ing. JOSEFU ŠEBKOVI, CSc., za cenné připomínky.

## L i t e r a t u r a

- [1] ŠAFRATA, R. S. a kol.: *Fyzika nízkých teplot*. Matfyzpress, Praha 1998.
- [2] KITTEL, CH.: *Úvod do fyziky pevných látek*. Academia, Praha 1965.
- [3] GINZBURG, V. L., LANDAU, L. D.: *ŽETF* 20 (1950), 1064.
- [4] ABRIKOSOV, A. A.: *ŽETF* 32 (1957), 1142.
- [5] LEGGETT, A. J.: *Rev. Mod. Phys.* 47 (1975), 331.
- [6] FINNE, A. P., ARAKI, T. et al: *Nature* 424 (2003), 1022.
- [7] Materiály Královské švédské akademie věd vydané u příležitosti udělení Nobelovy ceny za fyziku v roce 2003, <http://www.nobel.se> a <http://www.kva.se>