Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Miloš Rotter
90 let kapalného helia

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 43 (1998), No. 4, 298--307

Persistent URL: http://dml.cz/dmlcz/139745

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1998

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

A kdyby nic jiného, máme před sebou další zajímavý důkaz, že se příroda chová podle předpovědí kvantové mechaniky, i když ty se někdy mohou zdát poněkud šílené.

Literatura

[1] LANGELAAN, G.: *Moucha.* In: *Lupiči mrtvol* (Orbis, edice Kobra, Praha 1970).
[2] Mladá Fronta Dnes, 16. ledna 1998, 9.
[3] PERES, A.: *Quantum Theory: Concepts and Methods.* Kluwer, Dordrecht 1995.
[4] BENNETT, C. H., BRASSARD, G., CRÉPEAU, C., JOSZA, R., PERES, A., WOOTTERS, W. K.: Phys. Rev. Lett. *70* (1993), 1895.
[5] WEINFURTER, H.: Europhys. Lett. *25* (1994), 559.
[6] COLLINS, G. P.: Physics Today, February 1998, 19.
[7] MANDEL, L., WOLF, E.: *Optical Coherence and Quantum Optics.* Cambridge Univ. Press, Cambridge 1995.
[8] ZUKOWSKI, M., ZEILINGER, A., WEINFURTER, H.: In: *Fundamental Problems in Quantum Theory*, Vol. 755 of the Annals of the New York Academy of Sciences, 1995, p. 91.

90 let kapalného helia

Miloš Rotter, Praha

1. Zkapalnění helia

Když před devadesáti lety, přesněji 10. července 1908, profesor Heike Kamerlingh Onnes v holandském Leidenu poprvé zkapalnil helium, položil tak základy nového oboru fyziky, fyziky nízkých teplot, jehož výsledky výrazně ovlivnily i další oblasti poznání fyzikálního obrazu světa. Ke zkapalnění helia došlo právě deset let poté, co James Dewar v Královském institutu v Londýně zkapalnil vodík. Prvek helium byl objeven teprve v sedmdesátých letech devatenáctého století, nejprve na základě spektrálních čar ve slunečním spektru. O deset let později byl prokázán jeho výskyt také na Zemi. O zkapalnění helia se pokoušel nejen Dewar, ale i řada dalších fyziků a inženýrů. Způsob, jakým se na zkapalnění helia připravoval Kamerlingh Onnes, se však principiálně lišil od tehdejší běžné praxe fyzikálního výzkumu.

Když v roce 1882 získal Kamerlingh Onnes, ve svých 29 letech, profesorské místo na univerzitě v Leidenu, zajímal se o Van der Waalsovu teorii korespondenčních

Doc. RNDr. MILOŠ ROTTER, CSc. (1943), katedra fyziky nízkých teplot, MFF UK, V Holešovičkách 2, Praha 8.

stavů reálných plynů. Pro předpověď kritických parametrů plynů bylo třeba s vysokou přesností měřit izotermy plynů, zejména v blízkosti přechodu do kapalného stavu. Kamerlingh Onnes se projevoval především jako nadaný experimentální fyzik s vyhraněným smyslem pro technologické zázemí experimentu. Byl jedním z prvních přírodovědců, kteří si uvědomili, že vědecký pokrok není možný bez příslušného technického zabezpečení prováděného na profesionální úrovni. Pochopil, že skončila doba experimentování pomocí nejjednodušších prostředků, s nimiž se čas od času profesor uchyloval do své laboratoře, když mu to pedagogické povinnosti dovolily. Rozhodl se systematicky budovat moderní laboratoř pro zkapalňování plynů a pro měření jejich vlastností. V roce 1901 založil při své laboratoři také školu sklářů a jemných mechaniků, aby mohl pro spolupráci získávat ty nejkvalitnější technické pracovníky. Zkušeností absolventů této školy využívala v dalších letech také řada světových laboratoří při stavbě skleněných vakuových a kryogenních aparatur. V mnohém vděčí tradici školy založené Kamerlinghem Onnesem rovněž rychlý nástup holandského elektrotechnického průmyslu.

V letech 1892–94 se Kamerlingh Onnes věnoval se značnou péčí budování velkých zařízení na zkapalňování vzduchu a vodíku, jejichž kapacita pak vystačila pro potřeby ústavu po dalších třicet let. Snažil se pro svou laboratoř získat ty nejvýkonnější a nejmodernější vývěvy a kompresory. Kamerlingh Onnes projevoval rovněž výborné manažerské schopnosti v moderním smyslu, otevřel svou laboratoř všem schopným vědcům, ať přicházeli odkudkoli. Byl také skvělým diplomatem, který dokázal neúnavně získávat finanční zdroje pro vybavení a provoz své laboratoře i na platy svých spolupracovníků. Aby zajistil rychlou publikaci výsledků prací své laboratoře, založil vlastní odborný časopis Communications from the Physical Laboratory of the University of Leiden, později zvaný Communications from the Kamerlingh Onnes Laboratory, z něhož čerpali poučení všichni, kdo se ve světě zabývali fyzikou a technikou nízkých teplot. Časopis vychází dodnes a je příznačné pro dnešní dobu, že v posledních letech je z ekonomických důvodů k dispozici pouze v elektronické podobě na domovské stránce `www` leidenské univerzity.

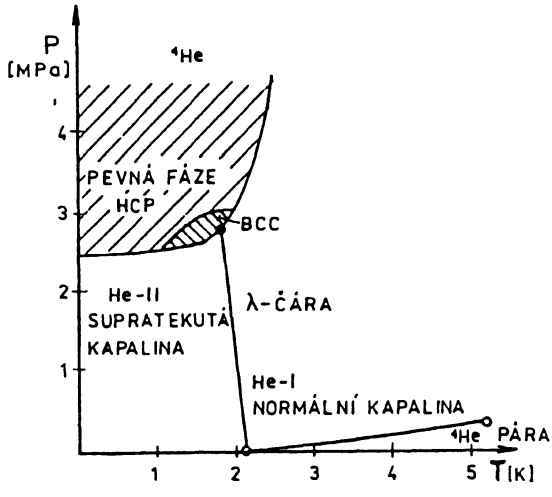
Kamerlingh Onnes se při své práci setkal i s vážnými a neočekávanými těžkostmi. Ke konci roku 1890, když už měl připraveny plány na stavbu zařízení ke zkapalňování vodíku, bylo náhle budování laboratoře vážně ohroženo. Jakási vlivná osoba s vyhraněným smyslem pro otázky bezpečnosti práce se obrátila na holandské ministerstvo vnitra s žádostí o okamžité zastavení prací v laboratoři a o vytvoření státní komise, která by posoudila bezpečnost práce se stlačenými plyny, k níž se Kamerlingh Onnes připravoval. Stavební práce byly skutečně zastaveny a byla jmenována komise, jejímž členem byl jmenován také J. D. Van der Waals. Kamerlingh Onnes se obrátil s žádostí o podporu také na zahraniční kolegy a dostalo se mu jí zejména od Jamese Dewara. Komise konstatovala, že plánovaná bezpečnostní opatření jsou dostatečná a že potenciální nebezpečí při zacházení se stlačenými plyny je malé. Komise argumentovala například tím, že energie uvolněná při explozi plynu stlačeného v tlakové lahvi je mnohem menší než energie spojená s explozí tří kilogramů střelného prachu, což bylo množství, které předpisy dovolovaly skladovat a transportovat bez zvláštních opatření. Záležitost

byla nakonec kladně vyřízena a Kamerlingh Onnes mohl po dvouleté přestávce opět pokračovat v práci.

Vodík se v Leidenu dařilo zkapalňovat v potřebném množství od roku 1906, tedy osm let po jeho prvním zkapalnění J. Dewarem. Zařízení pracovalo s průmyslovou spolehlivostí a dávalo až čtyři litry kapalného vodíku za hodinu. Kamerlingh Onnes se systematicky připravoval na zkapalnění posledního dosud nezkapalněného plynu — helia. Měl k dispozici větší množství monazitového písku, z něhož žíháním získával plynné helium, které potom podroboval mnohonásobnému čištění. Ke zkapalnění měl nakonec k dispozici 200 l plynného helia s rezervou ještě asi 160 l.

Podle měření izoterm provedených J. Dewarem i podle nejnovějších měření leidenských se měl kritický bod helia nacházet mezi 5 a 6 K. Vše bylo připraveno k rozhodujícímu experimentu. Průběh památného dne 10. července 1908 byl později detailně popsán v časopise leidenské laboratoře. Den předem bylo připraveno 75 litrů kapalného vzduchu, zkapalňování vodíku začalo ráno v 5.45 hod. Ve 13.30 hod. bylo již připraveno 20 litrů kapalného vodíku. Delikátní operaci prochlazení zkapalňovače helia kapalným vodíkem svěřil Kamerlingh Onnes svému zkušenému mechaniku Flimovi. Musel zejména zabránit namrznutí i jen nepatrného množství vzduchu na skleněné stěny zkapalňovače, což by znemožnilo pozorovat kondenzující helium. Cirkulace helia byla zahájena v 16.20 hod., teplota v nádobě, v níž mělo kondenzovat kapalné helium, byla měřena plynovým teploměrem. Počáteční rychlý pokles teploty se zpomalil a posléze zcela zastavil. Stále nebyla pozorována přítomnost kapalného helia, a tak asi v půl osmé večer usoudili, že se pokus zřejmě nezdařil. Někdo z přihlížejících navrhl, aby nádobu osvítili zespodu, a tehdy vlivem odrazu světla poprvé spatřili hladinu helia a zjistili, že nádoba byla téměř zaplněna kapalným heliem. Kamerlingh Onnes tak poprvé získal asi 60 cm^3 kapalného helia. Nechal větší část kapaliny odpařit a začal vývěvou odčerpávat páry helia, až snížil jejich tlak na úroveň 10 torr (1,3 kPa) a snažil se tak dosáhnout trojného bodu helia. Netušil tehdy, že se přiblížil téměř k teplotě 1 K. Když po desáté hodině večerní ukončil práci, zapsal si Kamerlingh Onnes do deníku: „Nejen přístroje pracovaly dnešního dne na maximu svých možností, ale experiment vyžadoval, aby i moji spolupracovníci se pokusili o nemožné." Ve zprávě o experimentu si povšiml zejména velmi malé hustoty helia, které je asi osmkrát lehčí než voda, a také velmi malého povrchového napětí kapalného helia.

V následujících letech opakoval pokusy o ochlazení helia a používal stále výkonnější vývěvy. Ani při tlaku par 0,2 torr (26 Pa), kterému odpovídá teplota 1,04 K, však nedosáhl ztuhnutí helia. Pevné helium získal až v roce 1926 W. H. Keesom, žák Kamerlingha Onnese, při stlačení helia na tlak 2,5 MPa, a tak prokázal, že helium nemá trojný bod (viz obr. 1). Poté co Kamerlingh Onnes v roce 1911 objevil supravodivost rtuti, věnoval se plně zkoumání tohoto jevu. Pokusy s kapalným heliem však v leidenské laboratoři pokračovaly i nadále. Bylo zjištěno, že hustota helia vykazuje maximum v okolí teploty 2,2 K. Při této teplotě později pozorovali také skokovou změnu elektrické permitivity kapalného helia. Když v letech 1922–23 zkoumali tepelnou kapacitu kapalného helia, naměřili v okolí teploty 2,2 K extrémně vysoké hodnoty, které však považovali za projev chyb v metodice měření, a v publikaci z roku 1925 uvedli údaje jen od 4 K do 2,6 K. Kamerlingh Onnes se vlastně až do své smrti v roce 1926 nedozvěděl, že



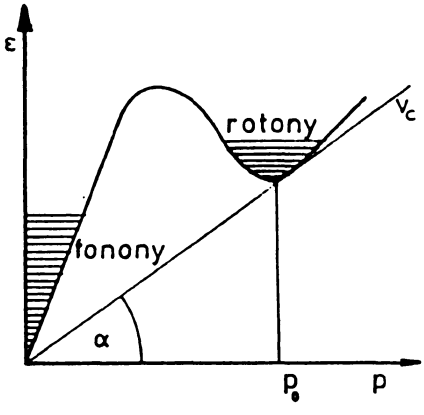
Obr. 1. Fázový diagram ^{4}He.

již od počátku pozoroval projevy fenomenálního kvantového jevu — supratekutosti. Švédská královská akademie ocenila zásluhu Heike Kamerlingha Onnese za zkapalnění helia udělením Nobelovy ceny za fyziku za rok 1913.

2. Supratekutost ^{4}He

Ve výzkumu supratekutosti helia pokračovali jiní, jak v Leidenu, tak i v Torontu, v Cambridgi a v Moskvě. V roce 1934 Keesom znovu podrobně proměřil měrnou tepelnou kapacitu helia a zjistil, že k jejímu výraznému vzrůstu dochází ve velmi úzké teplotní oblasti okolo teploty 2,17 K a že tento vzrůst má tvar řeckého písmene λ. Proto se tato teplota také označuje T_λ. V roce 1935 byl v Torontu pomocí torzních kmitů válce pozorován pokles viskozity pod teplotou T_λ. O rok později zjistil Keesom, že helium ochlazené pod tuto teplotu nabývá vysoké tepelné vodivosti, asi dvěstěkrát vyšší, než jakou má čistá měď při pokojové teplotě. Keesom nazval toto helium supratepelně vodivým. V průběhu roku 1937 prováděl v Moskvě Petr J. Kapica experimenty s heliem protékajícím velmi úzkými kanálky, při nichž zjistil, že viskozita He II (při teplotě nižší než 2,17 K) je alespoň jedenapůltisíckrát menší než viskozita normálního He I (nad teplotou 2,17 K). Nazval tento jev supratekutostí. Kapica tehdy získal ke spolupráci vynikajícího teoretického fyzika Lva D. Landaua a ten v roce 1941 navrhl model vysvětlující chování He II. V té době již C. J. Gorter vyslovil ideu dvoukapalinového modelu, podle níž je He II tvořeno směsí dvou kapalin, normální s hustotou ϱ_n a supratekuté s hustotou ϱ_s, celková hustota He II je pak jejich součtem $\varrho = \varrho_n + \varrho_s$. Podle Fritze Londona dochází při fázovém přechodu T_λ k Boseho-Einsteinově kondenzaci atomů helia. Jaderné spiny dvou protonů a dvou neutronů v jádře ^{4}He se vzájemně kompenzují, a proto mají atomy ^{4}He nulový spin a chovají se tedy jako bozony. Landau zvolil jiný přístup, vysvětlil chování He II pomocí dvou typů kolektivních excitací — fononů a rotonů. Fonony jsou kvazičástice spojené s šířením zvuku v heliu, rotony jsou neobvyklé lokalizované excitace spojené s vírovým

pohybem kapaliny. Kritická rychlost v_k, při níž dochází ke vzniku excitací (viz obr. 2), je dána směrnicí tečny ke křivce rotonů. Landaův model excitací byl experimentálně ověřen pomocí rozptylu neutronů v He II a byly určeny parametry disperzní relace v obr. 2. Spočtená kritická rychlost v_k se však ukázala být o několik řádů vyšší než kritické rychlosti, které se při různých pohybech v He II naměřily. Odstranit tento nesoulad se podařilo Richardu P. Feynmanovi předpokladem existence vírů v He II, jejichž cirkulace je kvantovaná.

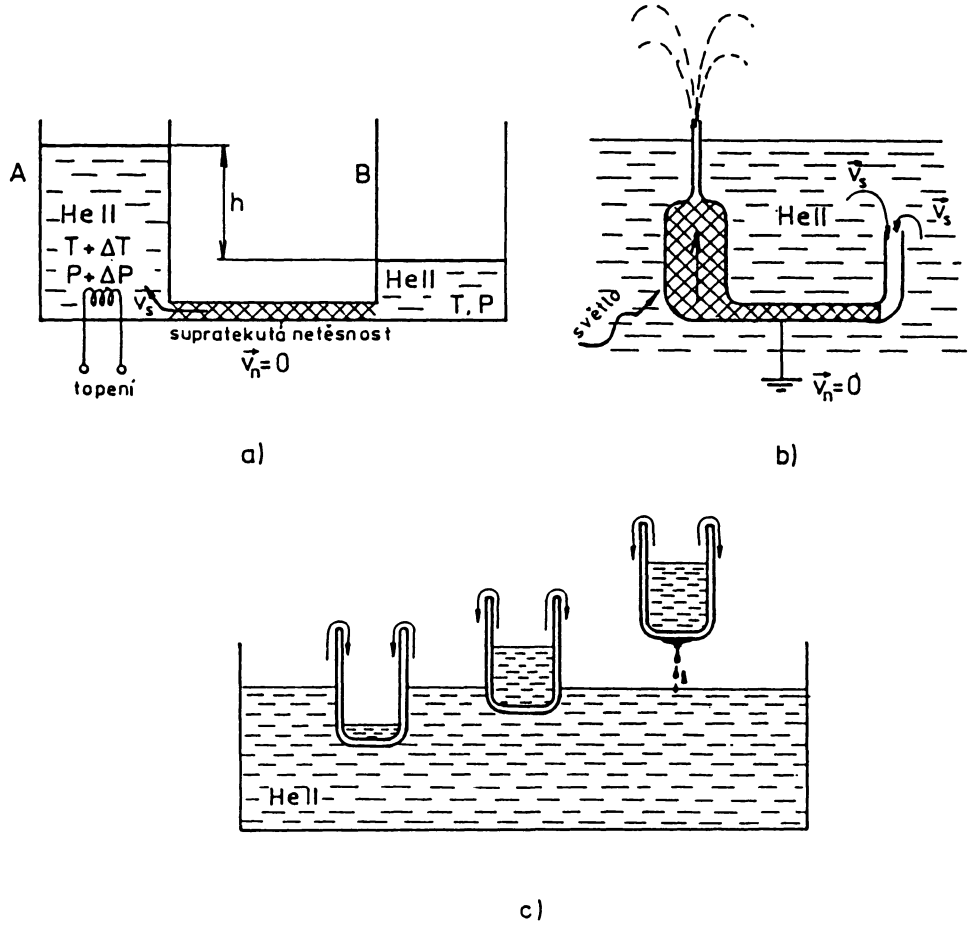


Obr. 2. Závislost energie excitací ε na hybnosti p pro He II.

Dynamika vírové struktury supratekutého helia je stále předmětem intenzivního studia. Nalezla svou analogii i v astrofyzice. Bylo možné experimentálně simulovat chování rotujících neutronových hvězd — pulzarů. Skokové změny rychlosti rotace pulzarů lze vysvětlit rozpadem určitého počtu metastabilních vírů v neutronové kapalině, která se nachází v nitru hvězdy. Geniální hypotéza o tom, že nitro neutronových hvězd je kapalné a nachází se v supratekutém stavu (ačkoli se jeho teplota odhaduje na 108 K), byla vyslovena již v roce 1959. Předpokládala existenci supratekutosti v souboru neutronů, které mají fermionový charakter, řadu let před objevem supratekutosti v ^{3}He, jak uvidíme dále.

Model supratekutosti, který jsme zde ve zjednodušené podobě nastínili, umožňuje vysvětlit pozoruhodné projevy supratekutosti, jakými jsou termomechanický jev (viz obr. 3a), fontánový jev (viz obr. 3b) nebo tečení supratekutého filmu po stěnách nádob (viz obr. 3c). Model dvousložkové kapaliny a kolektivních excitací vysvětluje i neobvyklé typy zvuku pozorované v He II. Druhý zvuk představuje teplotní vlny, které nejsou provázeny změnami hustoty kapaliny, třetí zvuk se šíří v povrchovém supratekutém filmu a čtvrtý zvuk pouze v úzkých kanálcích, kterými může protékat jen supratekutá kapalina. Uvedené modely však stále nepostihují mikroskopickou podstatu supratekutosti ^{4}He.

Za práce o supratekutosti helia dostal Lev D. Landau v roce 1962 Nobelovu cenu za fyziku.



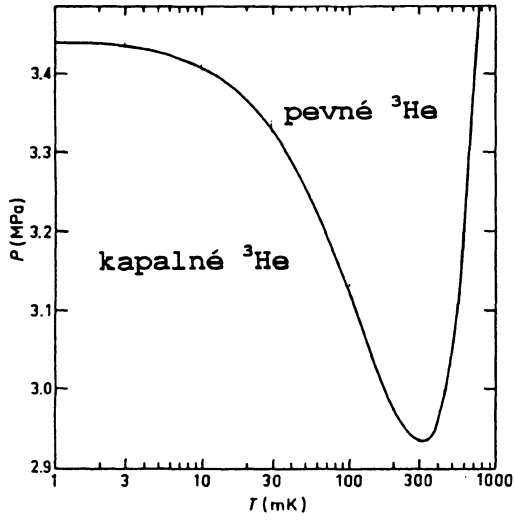
Obr. 3. a) Termomechanický jev. Při ohřevu roste v levé nádobce teplota a zároveň tlak.
b) Fontánový jev v He II. Při ozáření prášku v trubici se kapalina ohřívá, díky pronikající supratekuté složce se zvyšuje její tlak a kapalina vystřikuje z kapiláry.
c) Prostřednictvím supratekutého filmu vtéká kapalina do zkumavky nebo z ní naopak vytéká.

3. Supratekuté fáze ^{3}He

Druhý stabilní izotop helia — helium 3 je v přírodě mnohem vzácnější. Na jeden jeho atom připadá v přirozené koncentraci helia řádově milion atomů ^{4}He. Použitelná množství ^{3}He začala být k dispozici až po 2. světové válce zásluhou rozvoje jaderné fyziky i jaderného zbrojení. Vzniká totiž při rozpadu radioaktivního tritia. Rozdílné atomové hmotnosti těchto dvou stabilních izotopů helia jsou příčinou jejich výrazně odlišných fyzikálních vlastností. Ke zkapalnění ^{3}He je třeba chladit až na teplotu 3,2 K, ve fázovém diagramu ^{3}He rovněž nenalezneme trojný bod. Vlastní mechanické a magnetické, tj. spinové momenty dvou protonů a jednoho neutronu se v jádře ^{3}He uspořádají tak, že výsledný spin je roven 1/2 a atomy ^{3}He se chovají jako fermiony. Odlišné chování izotopů helia, které je důsledkem platnosti Boseho-Einsteinovy statistiky

pro bozony a Fermiho-Diracovy statistiky pro fermiony, se projeví při velmi nízkých teplotách. Fermiony, jejichž energetické stavy se řídí Pauliho principem, nemohou ani při absolutní nule teploty vytvářet kondenzát se všemi částicemi v základním jednočásticovém energetickém stavu. Existence jevu supratekutosti v ^{3}He se proto zdála být a priori vyloučena.

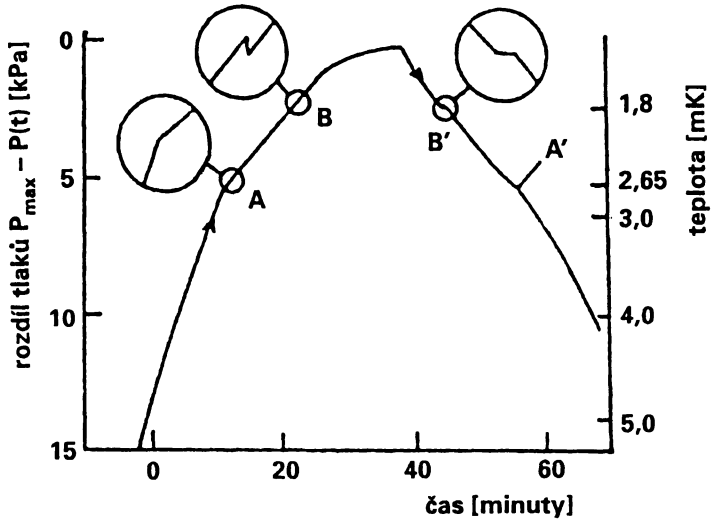
Souběžně s teorií supratekutosti se vyvíjela i teorie supravodivosti a stávalo se stále zřejmějším, že mezi těmito dvěma jevy existují mnohé souvislosti. V roce 1957 formulovali J. Bardeen, L. N. Cooper a J. R. Schrieffer mikroskopickou teorii supravodivosti (Nobelova cena za rok 1972). V této teorii, označované jako BCS, předpokládali, že elektrony v kovech se mohou jistým způsobem vzájemně přitahovat a vytvářet tak novou částici, tzv. Cooperův pár. Tyto částice už nejsou Fermiho částicemi jako jednotlivé elektrony, ale mají charakter bozonů. Páry jsou tvořeny z takových elektronů, které mají jak mechanické, tak i magnetické momenty orientovány proti sobě a výsledný moment páru je tedy nulový. Takové kvazičástice už mohou vytvářet Boseho kondenzát a způsobit tak bezztrátový přenos elektrického náboje, tedy supravodivost.



Obr. 4. Křivka tání ^{3}He v oblasti Pomerančukova jevu.

Předpokládalo se, že k párování podle teorie BCS může dojít i mezi jinými fermiony, například mezi atomy ^{3}He. Teoretický odhad kritické meze, pod níž by párování mohlo nastat, vedl zpravidla k teplotám mnohem nižším, než jaké mohla soudobá kryogenní technika poskytnout. Přesto se řada laboratoří pustila do hledání supratekutého ^{3}He, někdy i současně se zkoumáním vlastností pevného ^{3}He, které projevuje zajímavé vlastnosti magnetické soustavy spinových momentů atomových jader. Takovou problematikou se pod vedením profesora Davida Lee zabýval i doktorand Douglas Osheroff na Cornellově univerzitě v Ithace ve státě New York. Spolu s mladým spolupracovníkem Robertem Richardsonem připravovali aparaturu pro chlazení ^{3}He na teplotu blízkou 1 mK.

K chlazení ^{3}He použili tzv. Pomerančukovu komůrku, v níž se kapalné ^{3}He v adiabatickém procesu, tedy tepelně izolované, postupně stlačuje a přechází přitom do

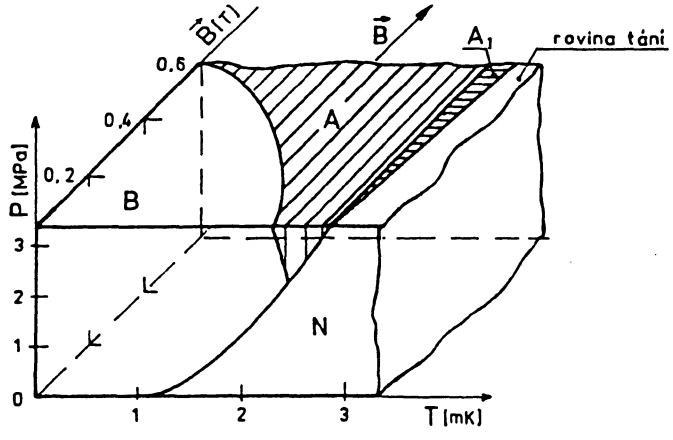


Obr. 5. Průběh časové závislosti tlaku a teploty ^{3}He v Pomerančukově komůrce při rovnoměrné kompresi a expanzi. Tento obrázek publikovaný v časopise Physical Review Letters *28* (1972), 885, byl prvním důkazem existence supratekutých fází ^{3}He.

pevného skupenství. Při této krystalizaci dochází k absorpci tepla, a tedy ke snižování teploty ^{3}He. Metodu chlazení adiabatickým stlačováním na základě anomálního průběhu křivky tání ^{3}He navrhl v roce 1950 ruský fyzik Ilja Pomerančuk. Pod teplotou 319 mK je totiž kapalná fáze uspořádanější než pevné ^{3}He a má tedy nižší entropii. Na křivce tání je při této teplotě minimum (viz obr. 4), a tak ^{3}He předběžně ochlazené pod tuto teplotu při adiabatickém stlačování postupně krystalizuje a jeho teplota klesá. Osheroff, Lee a Richardson rovnoměrně snižovali objem ^{3}He v komůrce a měřili přitom jeho tlak. Pozorovali, že hladký nárůst tlaku a tedy i pokles teploty s časem byl ve dvou bodech narušen. Nejprve se v bodě A náhle změnil sklon křivky a poté v bodě B tlak dokonce krátce poklesl, anomální body se objevily i při zpětném zvětšování objemu komůrky (viz obr. 5). Když se dalšími měřeními přesvědčili, že anomálie nejsou způsobeny nějakou systematickou chybou měření, publikovali autoři takto naměřenou křivku v článku nazvaném „Důkaz existence nové fáze v pevném ^{3}He“, který zaslali 10. 2. 1972 do časopisu Physical Review Letters. V článku také konstatovali, že jimi zjištěné fázové přechody však nebyly nalezeny při měření magnetické susceptibility pevného ^{3}He. V dalších experimentech se autoři zaměřili na rozlišení mezi projevy kapalné a pevné fáze. Použili k tomu metodu jaderné magnetické rezonance, jejíž signál v kapalné fázi se výrazně liší od signálu v pevné fázi ^{3}He. V nové Pomerančukově komůrce bylo prostřednictvím rozložení teploty zajištěno, že krystalky ^{3}He vznikaly přednostně v určité části komůrky. Magnetické pole působící v komůrce bylo vytvořeno tak, aby pomocí jeho gradientu bylo možné zvolit oblast, v níž rezonanční signál vznikal, podobně jako to ve zdokonalené formě dělá soudobá rezonanční tomografie. Již 20. 4. 1972 ve 2.40 hod. si Douglas Osheroff mohl do svého laboratorního deníku zapsat „Dnes v noci jsem objevil BCS přechod v kapalném ^{3}He“. Jako anekdota zní skutečnost, že článek, v němž byly popsány výsledky experimentů jaderné magnetické

rezonance, které jednoznačně prokázaly přítomnost supratekutých fází ^{3}He, byl zprvu redakcí časopisu Physical Review Letters odmítnut. Jeden z recenzentů totiž napsal, že „systém se nemůže chovat tak, jak autoři tvrdí, že se chová".

V dalších experimentech se ukázalo, že existují dvě supratekuté fáze ^{3}He. Při snižování teploty se normální ^{3}He nejprve přemění ve fázi A, podle současných zpřesněných měření při teplotě 2,50 mK na křivce tání, a tato fáze při teplotě 1,95 mK přejde ve fázi B. V přítomnosti magnetického pole se podél fázového rozhraní objeví ještě třetí supratekutá fáze nazvaná A_1 (viz obr. 6). Hydrodynamika supratekutých fází ^{3}He je v mnohém podobná hydrodynamice supratekutého ^{4}He. Přímé ověření supratekutých vlastností nových fází provedla poprvé helsinská skupina pod vedením Olli V. Lounasmaa měřením viskozity prostřednictvím útlumu kmitů tenkého kovového vlákna umístěného kolmo k magnetickému poli. Řadu zásadních experimentů vykonal se svými spolupracovníky John C. Wheatley na univerzitě v La Jolla. Ke chlazení ^{3}He používal metodu adiabatické demagnetizace paramagnetických solí, která umožnila studovat chování supratekutých fází i v nižších tlacích pod křivkou tání. V dnešní době má řada světových laboratoří k dispozici kryogenní aparatury s několika chladicími stupni, kde nejnižších teplot na úrovni desítek mikrokelvinů se dosahuje jadernou demagnetizací.



Obr. 6. Fázový diagram ^{3}He s vyznačenou oblastí normální fáze N, supratekutých fází A a B a vznikem supratekuté fáze A_1 v závislosti na působícím magnetickém poli.

Zcela neobvyklé jevy byly pozorovány při měření magnetické rezonance jader ^{3}He a zejména na výsledcích těchto měření je založena teorie vzniku supratekutého stavu ^{3}He. Ve fázi A je rezonanční signál posunut k vyšším frekvencím oproti rezonanci v normálním ^{3}He, tento posuv se s klesající teplotou zvětšuje a je zároveň nezávislý na velikosti působícího magnetického pole. Při přechodu do fáze B posuv zmizí a intenzita signálu klesne na polovinu. V obou fázích je možné pozorovat i zcela nový druh rezonance, při níž je statické magnetické pole rovnoběžné s vysokofrekvenčním rezonančním polem (v běžné jaderné magnetické rezonanci musí být tato pole na sebe kolmá).

Teoretický model párování atomů ^{3}He podal záhy po zveřejnění výsledků rezonančních měření anglický fyzik A. J. Leggett. Na rozdíl od vzniku supravodivosti v kovech, kdy se párují elektrony s opačnými spinovými i orbitálními momenty tak, aby výsledný magnetický i mechanický moment páru byl nulový, tvoří páry atomů ^{3}He spinové i orbitální triplety. Znamená to, že jejich výsledný spinový i magnetický moment má hodnotu 1 a podle kvantové mechaniky může v prostoru zaujímat tři různé polohy. Hovoříme o třech kondenzátech označených symbolicky $(\uparrow\uparrow)$, $(\downarrow\downarrow)$ a $(\downarrow\uparrow + \uparrow\downarrow)$ podle orientace spinů jader ^{3}He vytvářejících páry. Fáze A je tvořena prvními dvěma kondenzáty a je ve svých vlastnostech silně anizotropní. Je zajímavé, že existence takovéto fáze byla teoreticky předpovězena již v roce 1961 jako jedno ze zobecnění teorie BCS. Podle autorů teorie P. W. Andersona, W. F. Brinkmana a P. Morela se fáze A někdy označuje také jako fáze ABM. Ve fázi A_1 v přítomnosti magnetického pole existuje pouze kondenzát orientovaný do směru pole $(\uparrow\uparrow)$ a vznikne tak anizotropní magnetická fáze. Ve fázi B jsou přítomny všechny tři kondenzáty a fáze se chová jako izotropní. Její existence byla opět teoreticky předpovězena již v roce 1963 R. Balianem a N. R. Werthamerem, označuje se také jako fáze BW. S orientací spinových momentů je podle pravidel kvantové mechaniky svázána i orientace orbitálních momentů. Supratekuté ^{3}He se tak projevuje jako kapalina se složitými anizotropními topologickými vlastnostmi, které se uplatňují zejména při tečení kapaliny v různých zúžených prostorech a při vzniku vírů v rotující kapalině. Těmto jevům se nyní intenzivně věnuje řada špičkových experimentálních i teoretických pracovišť. V poslední době se provádějí experimenty, při nichž se generují kvantové víry v ^{3}He prudce ochlazeném pod kritickou teplotu a modelují se tak procesy vzniku tzv. kosmických strun, které podle některých představ vznikaly v počátečním stadiu vývoje vesmíru po tzv. Velkém třesku.

Královská švédská akademie věd ocenila objev supratekutých fází ^{3}He udělením Nobelovy ceny za rok 1996 Davidu M. Lee, Douglasu D. Osheroffovi a Robertu C. Richardsonovi.

Literatura

[1] MENDELSSOHN, K.: *The Quest for Absolute Zero.* World University Library, London 1968.
[2] ODEHNAL, M.: *Supravodivost a jiné kvantové jevy.* Academia, Praha 1992.
[3] JÁNOŠ, Š.: *Svet v blízkosti absolutnej nuly.* Alfa, Bratislava 1989.
[4] ŠAFRATA, S. a kol.: *Fyzika nízkých teplot.* Matfyzpress, Praha 1998.
[5] ROTTER, M., ŠAFRATA, S.: Vesmír *76* (1997), 72.
[6] FEHER, A., MLÝNEK, R.: Vesmír *76* (1997), 76.