

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Olli V. Lounasmaa; George R. Pickett
Supratekuté hélium-3

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 37 (1992), No. 1, 1--10

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138028>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1992

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>

Supratekuté hélium-3

Olli V. Lounasmaa, George R. Pickett

OLLI V. LONASMAA a GEORGE PICKETT studují vlastnosti materiálů v milikelvinových a mikrokelvinových teplotách. Lounasmaa je výzkumným profesorem finské akademie a ředitelem Laboratoře nízkých teplot na technické univerzitě v Helsinkách. Oblast jeho vědeckých zájmů zahrnuje kryogeniku, fyziku velmi nízkých teplot a magnetoencefalografii (výzkum mozku pomocí vysoce citlivých magnetických sond). Pickett je profesorem fyziky nízkých teplot na univerzitě v Lancasteru, kde se jeho práce soustřeďuje na fyziku kondenzované fáze a na techniku experimentů v blízkosti absolutní nuly. V roce 1979 založil se svými kolegy Tonym Guénautem a Ianem Millerem lancasterskou mikrokelvinovou laboratoř.

Velmi vysoké teploty, které převládaly v okamžiku vzniku vesmíru, leží pravděpodobně navždy za hranicemi možností i těch největších urychlovačů částic. Nízkoteplotní fyzici však ve svém oboru již přírodu překonali. Po celých 15 miliard let od velkého třesku v žádném místě vesmíru neklesla teplota pod 3 K, což je teplota kosmického mikrovlnného pozadí. V laboratořích však byly dosaženy teploty, které se měří v nanokelvinech, a dokonce v pikokelvinech. Jevy, které při těchto teplotách probíhají, jsou nejen zcela novým objektem fyzikálního výzkumu, ale jsou to i jevy, které se dosud nevyskytly v celé historii vesmíru.

Mezi všemi neobyčejnými fyzikálními jevy, které velmi nízké teploty odhalily, je snad nejnápadnější supratekutost, proudění kapaliny bez tření a její elektronová analogie, supravodivost. Supratekutost nejběžnějšího izotopu hélia, hélia-4, je známa od roku 1938. V roce 1972 Douglas D. Osheroff, Robert C. Richardson a David M. Lee z Cornellovy univerzity zjistili, že vzácný izotop hélia, hélium-3, může také přejít do supratekutého stavu. Během posledních patnácti let se výzkum vlastností této nové formy hmoty stal nosným vědeckým programem fyziky velmi nízkých teplot.

Vlastnosti supratekutého ^3He mohou být velmi složité, ačkoli jeho struktura je strukturou jednoduché kapaliny složené z identických, chemicky neaktivních atomů inertního prvku. Výzkum jeho vlastností je důležitý nejen sám o sobě, ale kombinace principiální jednoduchosti a zároveň složitosti jeho vlastností činí ze supratekutého ^3He ideální substanci, v níž lze studovat i další problémy fyziky kondenzovaného stavu sahající od vlastností neutronových hvězd až k vlastnostem vysokoteplotních supravodičů.

Hélium za nízkých teplot se nazývá „kvantová kapalina“. Znamená to, že kvantová mechanika hraje důležitou roli nejen v jeho mikroskopických vlastnostech, ale také v jeho makroskopickém chování. Supratekutý charakter hélia je důsledkem souhry kvantové mechaniky, jež postuluje minimální neurčitost v chování jednotlivých atomů a třetího zákona termodynamiky, který vyžaduje, aby se látka stávala dokonale uspořádanou, přibližuje-li se její teplota k absolutní nule. Při vysokých teplotách jsou

OLLI V. LONASMAA, GEORGE R. PICKETT: *The ^3He Superfluids*. Scientific American, Vol. 262, June 1990, No. 6, p. 104-111. Přeložil MILOŠ ROTTER.

Translated with permission. © 1990 by Scientific American, Inc. All rights reserved.

látky v plynném stavu a jejich atomy poletují zcela nahodile. S klesající teplotou látky kondenzují do kapalného skupenství a konečně zamrzají do podoby pevné látky, v níž by poloha každého atomu měla být pevně určena.

Z kvantově mechanického pohledu však Heisenbergovy relace neurčitosti stanoví, že moment hybnosti částice a její polohu v daném okamžiku nelze přesně určit. Měření jedné veličiny je doprovázeno neurčitostí druhé veličiny. Héliové atomy jsou velmi lehké a jen slabě na sebe vzájemně působí, výsledkem je značná neurčitost v jejich polohách dokonce i při absolutní nule. Právě v důsledku velkého nulového pohybu nemohou být při nízkých tlacích atomy hélia dostatečně zafixovány tak, aby vytvořily pevnou fázi.

Dochází k paradoxní situaci, kdy supratekuté hélium zůstává kapalně až do nejnižších teplot, avšak na rozdíl od normálních kapalin, v nichž je tekutost znakem vnitřního neuspořádání, je nízkoteplotní kapalně hélium dokonale uspořádáno, třebaže složitějším způsobem.

Zvláštní typ uspořádání, které nastává v kapalném héliu, je důsledkem fundamentálního rozdílu, který kvantová mechanika stanoví mezi fermiony (nazvanými podle Enrica Fermiho) a bosony (podle Satyendry Natha Boseho). Bosony jsou částice, které jsou nositeli síly, jakými jsou například fotony a piony. Jejich spin je celistvým násobkem základního kvanta momentu hybnosti \hbar , což je Planckova konstanta \hbar dělená 2π . Libovolný počet bosonů se může vyskytovat v témže kvantovém stavu. To znamená, že při absolutní nule mohou všechny bosony daného systému kondenzovat do jediného základního energetického stavu.

Částice, jejichž spin je poločíslným násobkem ($\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$) hodnoty \hbar , jako jsou elektrony, protony a neutrony, nazýváme fermiony. Jsou to částice, z nichž je vystavěna hmota. V daném okamžiku může být určitý kvantový stav obsazen pouze jedním fermionem a tím je vyloučena možnost kondenzace všech částic do jediného základního stavu s nejnižší energií.

Atom ${}^4\text{He}$ sestává ze dvou elektronů, dvou protonů a dvou neutronů, z nichž každý má poločíslný spin. Atom jako celek je tedy boson. Ochladíme-li ${}^4\text{He}$ pod kritickou teplotu nazvanou bod lambda (2,17 K při normálním tlaku), atomy kapaliny začnou kondenzovat do stavu s nejnižší energií. Při velmi nízkých teplotách jsou téměř všechny atomy kapaliny v tomto stavu, takže jediná kvantově mechanická vlnová funkce popisuje chování nejen jednotlivých částic, ale celé makroskopické kapaliny.

K převedení kapaliny do vzbuzeného stavu je třeba dodat významné množství energie a momentu hybnosti. Tato podmínka vlastně zajišťuje existenci supratekutosti. V normální kapalině mohou srážky mezi atomy a srážky atomů se stěnami nádoby snadno přivést atom z jednoho energetického stavu do jiného blízkého stavu a tím způsobit rozptyl energie i brzdění toku kapaliny. Kapalně hélium v základním stavu však nemůže být vybuze do jiného energetického stavu pouhými srážkami při nízkých rychlostech, nedochází tedy k rozptylu energie.

Supratekutost ${}^3\text{He}$ má poněkud jiný charakter. Atomy ${}^3\text{He}$ obsahují jediný neutron a v součtu tedy lichý počet částic. Chovají se jako fermiony, a proto nemohou kondenzovat do společného základního stavu. Helium-3 se nemůže stát supratekutým tak snadno jako ${}^4\text{He}$ složené z bosonů. Při teplotě tisíckrát nižší, než je teplota supratekutého přechodu ${}^4\text{He}$, se v ${}^3\text{He}$ začíná uplatňovat slabá interakce atomů mezi sebou.

Atomy se stejně velkými, ale opačnými momenty hybnosti, začínají vytvářet páry, v nichž se dvě částice otáčejí kolem společného těžiště. Tyto páry, zvané Cooperovy páry (podle Leona N. Coopera, nyní na Brownově univerzitě, který původně navrhl analogické párování elektronů pro vysvětlení supravodivosti), jsou bosony, protože poločíselné momenty hybnosti atomů se složily do celočíselné hodnoty. Mohou tedy kondenzovat do společného základního stavu a vytvářet supratekutou kapalinu.

Vznikají ovšem dvě supratekuté fáze, $^3\text{He-A}$ a $^3\text{He-B}$. Ve fázi A jaderné spinu obou atomů směřují kolmo k ose orbitálního pohybu, ve fázi B je korelace spinů složitější.

Poněvadž se všechny páry atomů ^3He nacházejí v tomtéž kvantovém stavu, vztahy mezi spinem a orbitálním pohybem se netýkají pouze jednotlivého páru, nýbrž supratekuté kapaliny jako celku. Supratekuté ^3He má směrové vlastnosti obdobně jako kapalně krystaly. Může být uspořádáno vnějšími činiteli, jako je magnetické pole, směr tečení kapaliny nebo přítomnost rozhraní. Prostorové rozložení těchto směrů v kapalině se nazývá texturou. Atomy ^4He nemají spin a nemají také směrové vlastnosti; supratekuté ^4He nevytváří tedy texturu.

Chování supratekutých kapalin se liší od konvenčních kapalin nejen kvantitativně, ale i principiálně. Jedna z význačných anomálií se projevuje, začneme-li supratekutou kapalinou otáčet. Normální kapalina ve válcové nádobě rotující kolem osy konstantní rychlostí se otáčí stejnou úhlovou rychlostí a chová se jako tuhé těleso. Rychlost, a tedy i moment hybnosti kapaliny, jsou úměrné vzdálenosti od osy rotace.

Supratekuté hélium však nemůže rotovat jako tuhé těleso vzhledem k svému stavu kvantové kapaliny. Homogenní rotace vyžaduje, aby rychlost, a proto i moment hybnosti lineárně vzrůstaly se vzdáleností od osy rotace. Moment hybnosti a vlnová délka jsou vzájemně nepřímo úměrné, takže kvantová vlnová funkce atomů ve vnější části kapaliny by měla mít kratší vlnovou délku než vlnová funkce atomů blíže k ose rotace. To je velmi dobře možné pro atomy v normální kapalině, protože každému atomu přísluší individuální vlnová funkce. Všechny atomy ve vzorku supratekutého hélia jsou však popsány jedinou kvantově mechanickou vlnovou funkcí a je geometricky nemožné sestrojít kruhovou soustavu maxim a minim, jejichž odstup klesá s rostoucím poloměrem. Supratekuté hélium je ve stavu rotačního klidu vzhledem k vesmíru jako celku.

Lze však sestrojít vlnovou funkci, jejíž vlnová délka vzrůstá s rostoucím poloměrem. Takový model odpovídá pohybu kapaliny ve víru. Tečení kapaliny je nejrychlejší ve středu víru a klesá se vzrůstajícím poloměrem. Proto otáčíme-li nádobou naplněnou supratekutým héliem i relativně malou úhlovou rychlostí, poruší se klidový stav kapaliny a vytvoří se malé víry. Místo aby rotace byla rozložena rovnoměrně v celé kapalině jako v tuhém tělese, proniká do kapaliny podél vírových linií. Vzájemné interakce mezi víry i interakce mezi víry a stěnou nádoby vyvolávají tření, a tak kapalina přestává být kompletně supratekutá.

Cirkulující tok kapaliny spojený s každým z miniaturních vírů odpuzuje sousední víry, takže vytvářejí pravidelnou hexagonální mřížku. Při typické experimentální rotační rychlosti 12 otáček za minutu je vzdálenost mezi víry asi 0,2 mm. (Mřížku vírů v ^4He přímo fotografoval Richard E. Packard a jeho spolupracovníci na kalifornské univerzitě v Berkeley.)

Kvantové víry vznikají snadno v otevřeném objemu supratekuté kapaliny; v omezeném prostoru v nádobě zaplněné jemným práškem k demonstraci bezviskózního proudění supratekuté kapaliny je však vytváření vírů omezeno. Kapalina může proudit bez tření mezi částicemi prášku, nemá však k dispozici prostor pro vytváření cirkulujícího toku kapaliny. To vede k paradoxní situaci, při níž čím jemnější jsou póry, jimiž supratekutá kapalina musí protékat, tím rychleji může téci.

Supratekuté víry v ^4He jsou velmi zajímavé; vnitřní struktura supratekutého ^3He má však za následek vznik kvantových vírů, jejichž vlastnosti jsou ještě složitější. Jejich experimentální studium je proto velmi důležité, ačkoli je mnohem obtížnější. Vzorky musí být nejen ochlazeny na několik milikelvinů nebo ještě níže, ale musí také rotovat, aby docházelo ke vzniku vírů. Prozatím se fyzikům podařilo vyřešit problém tak, že nechávají rotovat celé kryogenní experimentální zařízení.

Velká část znalostí o vzniku vírů v ^3He byla získána v kryostatu ROTA 1, který je v Helsinkách v provozu od roku 1981. Může rotovat rychlostí až 30 otáček za minutu a lze v něm dosáhnout teploty do 0,6 mK. V roce 1988 byl spuštěn nový zlepšený kryostat ROTA 2. Zařízení ROTA je společným projektem finské akademie a sovětské akademie věd. Na tomto experimentu se podílela řada vědců z finských, sovětských a dalších institucí, zejména Peter Berglund, Jurij M. Buňkov, Devi Garibašvili, Pertti J. Hakonen, Olli T. Ikkala, Seppo T. Islander, Matti Krusius, Olli V. Lounasmaa, Jurij Mucharskij, Kaj K. Nummila, Jukka P. Pekola, Riita H. Salmelin, Juha T. Simola, Ladislav Skrbek, Jelil S. Cakadze a řada dalších. Teoretické práce, kterými přispěli Martti M. Salomaa, Grigorij E. Volovik a jejich spolupracovníci, měly rozhodující vliv na úspěch projektu ROTA.

Ke zkoumání vlastností ^3He v rotujícím kryostatu byly použity čtyři různé experimentální metody. Byla to především jaderná magnetická rezonance, dále střídavý gyroskop, kterým se měřily změny momentu hybnosti supratekuté kapaliny, studovala se pohyblivost iontů, která slouží jako citlivé čidlo pro identifikaci textur, a sledoval se rovněž útlum ultrazvuku, který závisí na textuře kapaliny.

Většina současných znalostí o jevech rotace v supratekutém ^3He byla získána pomocí jaderné magnetické rezonance. Stacionární magnetické pole, v němž je rotující ^3He , způsobuje precesi os rotace jader a radiofrekvenční signál se používá ke sklápění jaderných spinů. Kmitočet signálu, který způsobí překlopení spinů, je funkcí interakce mezi atomy ^3He .

Záporné ionty umožňují získat informace o textuře supratekutého ^3He , tedy o makroskopické orientaci spinů a orbitálních os Cooperových párů. Pohyb iontů kapalinou pod vlivem elektrického pole silně závisí na vzájemné orientaci pole a textury supratekuté kapaliny.

Také útlum ultrazvuku je citlivou sondou v textuře supratekutého ^3He . Výhodou použití ultrazvuku je možnost měření ve všech magnetických polích. Útlum ultrazvuku byl v kryostatu ROTA 2 systematicky měřen na kvantových vírech v $^3\text{He-A}$ v slabých magnetických polích i v další supratekuté fázi $^3\text{He-A}_1$, která vzniká v přítomnosti silných magnetických polí.

Na experimentu se střídavým gyroskopem se podílel R. E. Packard a byly při něm měřeny vlastnosti proudění ^3He . Gyroskop je složen z horizontálního toroidu, který

je naplněn ^3He a vyplněn jemným práškem pro zvýšení supratekutého toku, dále z pohonného mechanismu, který vyvolává vibrace toroidu a z přístrojů na měření odezvy supratekuté kapaliny.

Prvním krokem v typickém gyroskopickém experimentu je ochlazení vzorku ^3He pod teplotu supratekutého přechodu, přičemž kapalina zůstává v klidu. Potom kryostat obsahující toroid naplněný ^3He a práškem rotuje po dobu asi jedné minuty stálou rychlostí od jedné do dvaceti otáček za minutu. Během následujících pěti minut po skončení rotace je zaznamenávána amplituda vibrací gyroskopu kolem vertikální osy. Tyto vibrace jsou způsobeny precesí rotující supratekuté kapaliny v toroidu a jsou závislé na momentu hybnosti.

Při nízkých rychlostech rotace není po zastavení kryostatu v toroidu detekován žádný moment hybnosti. Otáčí-li se kryostat pomalu, supratekutá kapalina proniká bez tření póry mezi částicemi prášku v toroidu. Při rotaci rychlejší než kritická rychlost dvě až tři otáčky za minutu začínají vznikat víry. Supratekutá kapalina je víry strhávána a začíná rotovat. Po zastavení kryostatu přetrvává v toroidu moment hybnosti.

Jedním z prvních experimentů prováděných s gyroskopem bylo pečlivé prověření supratekutosti ^3He . Kryostat byl roztočen na největší možnou rychlost, aby se v gyroskopu vytvořil velký moment hybnosti. Potom byl kryostat zastaven a měřil se moment hybnosti. Kryostat se dále udržoval v klidu po dobu 48 hodin s teplotou stále pod bodem supratekutého přechodu a nakonec byl znovu měřen moment hybnosti kapaliny v toroidu. Moment hybnosti $^3\text{He-B}$ zůstal beze změny v rámci desetiprocentní přesnosti měření. Odpor, kterému je vystaven tok kapaliny, odvozený z tohoto experimentu, je alespoň 10^{12} krát menší než odpor, který působí na normální ^3He při těžé teplotě.

Nelze experimentálně prokázat, že $^3\text{He-B}$ teče bez jakéhokoli odporu, avšak výsledek provedeného experimentu dokazuje mimo rozumnou pochybnost, že $^3\text{He-B}$ je skutečně supratekutá a nikoli jen normální kapalinou s velmi malou viskozitou. Také Peter L. Gammel nyní v AT & T Bellových laboratořích a John D. Reppy z Cornellovy univerzity prokázali při použití jiného experimentálního uspořádání existenci perzistentních supratekutých proudů v $^3\text{He-A}$.

V jiném experimentu jsme v Helsinkách studovali další detaily v chování kvantových vírů. Kritická rychlost, při níž se začínají vytvářet víry a při které je supratekutá fáze B strhávána rotujícím gyroskopem, se prudce mění při určitých teplotách a tlacích. Při tlaku 2,3 MPa a teplotě nižší než 1,7 mK je kritická rychlost 7,1 mm/s, avšak při nepatrně vyšší teplotě klesá na 5,2 mm/s. Takováto prudká změna kritické rychlosti svědčí o vzniku nového typu vírů v $^3\text{He-B}$. Helsinská skupina objevila čtyři různé typy vírů v supratekutém ^3He , dva typy ve fázi A a dva ve fázi B na rozdíl od jediného typu kvantových vírů v ^4He .

Ve fázi $^3\text{He-A}$ má jeden typ kvantových vírů singulární charakter, poněvadž obsahuje nespojitost v jádře víru, kde rychlost toku kapaliny prudce mění směr. Druhý typ vírů je spojitý a má dvojité jádro. Ve fázi B jsou oba tyto typy vírů singulární a obsahují nespojitost pole rychlosti ve středu víru. Komplexní teoretická analýza, jejímiž autory jsou Erkki V. Thuneberg z helsinské univerzity a později Salomaa a Volovik,

ukazuje, že víry, které se tvoří při nižších kritických rychlostech, mají jednoduché symetrické válcové jádro, zatímco víry vznikající při vyšších kritických rychlostech mají dvojité jádro.

Dokonce i ^3He , které je v klidu, obsahuje excitace. Tyto excitace jsou tvořeny atomy, které nejsou svázány do Cooperových párů. S každým nespárovaným atomem je spojena stínová částice, „díra“, kterou představuje prázdný stav po atomu, který by měl být spárován. Tyto vzbuzené stavy mají vlastnosti jak částic, tak i děr. Při velkých momentech hybnosti převládají částicové vlastnosti, při malých momentech se excitace chovají jako díry. Excitace se tedy nazývají kvazičásticemi nebo kvazidírami.

Většina experimentálních údajů o balistice kvazičástic v supratekutém ^3He byla získána v kryostatu s jaderným chlazením, který postavil Tony M. Guénault a jeden z nás (Pickett) na univerzitě v Lancasteru. Toto zařízení je v provozu od roku 1980 a může ochladit ^3He na teplotu okolo $100\ \mu\text{K}$, kde tepelné excitace v ^3He mají jen malou četnost. Mezi ty, kdož se podíleli na stavbě a provozu zařízení, patří John Carney, Kees Castelijns, Kenneth Coates, Shaun Fisher, Christopher Kennedy, Vepan Keith, Ian Miller, Simon Mussett, Gregory Spencer a Martin Ward. Jaderný chladicí stupeň tohoto zařízení je neobvyklý tím, že měděný chladicí článek je vnořen přímo do vzorku ^3He a tím je zajištěn dobrý tepelný kontakt.

Výzkum vzorků chlazených v tomto kryostatu byl prováděn pomocí neobyčejně jednoduchého a přesto univerzálního přístroje, který poprvé použil Mervyn Black, Henry Hall a Keith Thompson. Tento přístroj sestává z jemného supravodivého vlákna ohnutého do polokruhové smyčky, jejíž konce jsou upevněny. Je-li vlákno ve slabém magnetickém poli a protéká-li jím proud, působí na smyčku síla, která se ji snaží vychýlit do strany, a to kolmo ke směru magnetického pole.

Střídavý proud vybraného kmitočtu může vyvolat kmitání vlákna na jeho přirozeném rezonančním kmitočtu. Když se však vlákno pohybuje v magnetickém poli, vzniká na jeho koncích napětí úměrné rychlosti pohybu vlákna. Vlákno může být tedy uvedeno do pohybu procházejícím proudem a odezvu lze sledovat snímáním napětí. Tento jednoduchý přístroj byl používán na univerzitě v Lancasteru jako univerzální sonda pro měření ve velmi nízkých teplotách.

Při nízkých rychlostech se vlákno pohybuje v supratekuté kapalině prakticky bez rozptylu energie. Uplatňuje se pouze vnitřní tření ve vlákně, ztráty v připojených elektronických obvodech a srážky s kvazičásticemi. Velikost tlumení je tedy úměrná počtu excitací v kapalině.

Poněvadž se počet kvazičástic mění s teplotou, lze kmitajícího vlákna přímo použít jako teploměru. Možnost přímého měření teploty kapaliny při velmi nízkých teplotách je velmi důležitá. Nelze prakticky získat jiný termometrický materiál, který by byl v dobrém tepelném kontaktu s kapalným ^3He při $100\ \mu\text{K}$, poněvadž hustota excitací, tedy kvazičástic v supratekuté kapalině, které jediné může teploměr detekovat, je srovnatelná s hustotou atomů ve velmi vysokém vakuu za pokojové teploty.

Kromě toho, že je téměř jediným přístrojem schopným přímo detekovat teplotu ^3He , je vláknová smyčka také citlivým teploměrem. Útlum klesá asi o pět řádů mezi teplotou supratekutého přechodu a teplotou, na niž bylo dosud možno ^3He ochladit.

Důležitější než schopnost měření teploty kapalného ^3He je možnost využití vláknové smyčky ke studiu struktury kapaliny. Atomy v supratekutém ^3He jsou svázány do Cooperových párů. Překročí-li maximální rychlost smyčky hodnotu asi 10 mm/s, může vlákno dodat párům dostatek energie k tomu, aby se rozdělily na dva atomy nebo kvazičástice. Při nejnižších teplotách a malých rychlostech se vlákno pohybuje v kapalině prakticky bez tření. Jakmile však vlákno dosáhne kritické rychlosti, zvětší se třecí síla o několik řádů, i když rychlost vzroste pouze o několik procent. Poněvadž změna v tlumení při kritické rychlosti je tak výrazná, jakýkoli anomální tok kapaliny okolo vlákna, který by mohl změnit zdánlivou rychlost vlákna, by výrazně změnil bod, v němž tlumení vzniká.

Rozbíjení párů se může stát také kontrolovaným zdrojem uměle vytvářených kvazičástic a kvaziděr. Zjednodušené schéma procesu rozbíjení párů, jak je navrhl kanadský fyzik Philip Stamp, předpokládá, že vlákno se chová jako pohybující se reflektor vysílající dopředu svazek kvazičástic a dozadu svazek kvaziděr. Při teplotách nepříliš hluboko pod supratekutým přechodem je velké procento částic nespárováno a střední volná dráha mezi srážkami je velmi krátká. Libovolný kvazičásticový „vítr“ se velmi rychle zbrzdí a rozptýlí srážkami s kvazičásticemi a kvazidíry, jež jsou již v kapalině přítomny. Když se však teplota sníží na jednu desetinu teploty supratekutého přechodu, pouze jedna z miliónu částic bude nespárována a pravděpodobnost srážek bude tak malá, že částice větru mohou uletět vzdálenost jednoho kilometru i delší, aniž by došlo ke srážce.

Experimenty při nízkých teplotách potvrdily zásadní přednost tohoto modelu. Je-li v kapalném ^3He umístěna druhá smyčka supravodivého vlákna, pak kvazičástice a kvazidíry budou na ni silově působit, vlákno se rozkmitá a na jeho koncích se objeví napětí. Síla působící na druhé vlákno je přímo úměrná počtu excitovaných částic, které do něho narážejí. Počet částic ve větru je zase úměrný energii rozptýlené prvním kmitajícím vláknem. V podstatě všechna energie dodaná prvním vláknem se přemění v excitace, poněvadž v dané konfiguraci neexistuje jiný mechanismus rozptylu energie. Prokázali jsme rovněž, že svazek částic je úzký tím, že jsme vyšetřovali úhlové rozdělení vysílaných kvazičástic.

Přesto zůstávají některé nevyřešené problémy. Protože se vlákno pohybuje vpřed i vzad, měl by pulsní vysílaný svazek být složen střídavě ze spršek kvazičástic a kvaziděr. Při normálním procesu rozptylu kvazičástic na povrchu tělesa se obrací hybnost částice, takže dopadající částice působí tlakem na odraznou plochu. Při odrazu kvazidíry, jejíž rychlost a hybnost mají opačný směr, dochází k tahovému působení. Přesto však bylo detektorovým vláknem zaznamenáno pouze tlakové působení, a to dopadajících kvazičástic i kvaziděr.

K porozumění tomuto jevu je třeba hlubšího pochopení podstaty excitovaných částic a děr v ^3He . Představa díry vychází z povahy úrovně s nejnižší energií, tedy základního stavu systému částic. Ve stavu s nejnižší energií systému fermionů zaplňují částice všechny stavy až k určité úrovni energie, která je potom určena počtem částic, poněvadž každý fermion se musí nacházet v jiném energetickém stavu. Všechny úrovně s vyšší energií jsou prázdné. Takový základní stav se v teorii pole nazývá vakuem, poněvadž

pokud zůstávají všechny stavy s nižší energií zaplněny a žádná částice není vynesena do nezaplňených hladin, nic nemůže s tímto stavem interagovat.

Je-li jednotlivý fermion vyňat z některého za zaplněných stavů a vynesena do stavu s vyšší energií, situace se výrazně změní. Na částici ve stavu s vyšší energií mohou působit různé síly a vzniká zároveň prázdný kvantový stav, díra. Částice a díra se chovají zcela odlišným způsobem. Zatlačíme-li na částici, bude se pohybovat kupředu. Její hybnost a energie budou růst nebo klesat současně. Díry však reagují opačně. Působíte-li na díru směrem od sebe, bude se k vám přibližovat. Hybnost díry klesá, když její energie vzrůstá a naopak. Díra se chová tak, jako by měla zápornou hmotnost. Poněvadž jde o chybějící částici, má tedy v tomto smyslu hmotnost zápornou.

Nespárované částice v supratekutém ^3He mají obzvlášť zajímavé vlastnosti. Cooperovy páry vytvářející základní stav supratekuté kapaliny sestávají z párů částic s opačnými hybnostmi. Nespárované atomy jsou tedy provázeny dírami s opačnou hybností, nebo — chcete-li — prázdnými stavy, v nichž by měla být částice s opačnou hybností. Z toho vyplývá velmi zvláštní chování děr.

Vztah mezi energií a hybností normální částice je jednoduchý. Obě rostou nebo klesají zároveň. Situace kvazičástic v ^3He není tak jednoduchá. Nespárovaný atom s velkou hybností je situován osaměle mezi prázdnými stavy s velkou hybností, zatímco s tímto atomem spojená díra (stav bez atomu) je nerozlišitelná mezi ostatními prázdnými stavy velkých hybností. Kombinace částice–díra se jeví přesně jako reálná částice a její energie roste s hybností. Nespárovaný atom, jehož hybnost je malá, je naopak nerozlišitelný od myriády spárovaných částic s malou hybností. Naopak díra s malou hybností, která se pohybuje v opačném směru než částice, je ve význačném postavení. Když energie díry roste, její hybnost klesá. Mezi těmito dvěma extrémy vzniká stav, v němž energie kombinace částice–díra má minimum a její rychlost klesá k nule.

Směr rychlosti kvazičástice v malých hybnostech, kdy se jeví jako díra, je opačný než směr rychlosti ve velkých hybnostech, kdy se jeví jako částice. Následkem toho kvazičástice, která vnikne do oblasti, kde působí síla proti jejímu pohybu, postupně ztrácí energii, až její rychlost klesne na nulu. V tom okamžiku začne převažovat její charakter jako díry, rychlost bude mít opačný směr a částice se bude vracet po stejné dráze. Takto síla mění plynule kvazičástici na kvazidíru a naopak. Tento proces, který nemá analogii v rozptylu normálních částic, se nazývá Andrejevova reflexe podle Alexandra F. Andrejeva z moskevského Ústavu fyzikálních problémů, který poprvé navrhl tento mechanismus v souvislosti se supravodivostí.

Andrejevova reflexe může vysvětlit fakt, že na druhé vlákno v experimentu se svazkem kvazičástic působí ráz jak od kvazičástic, tak i od kvaziděr. Když se kvazičástice mění na kvazidíry při Andrejevově reflexi na druhém vláknu, na vlákno působí tlak. Vlákno je rovněž tlačeno při přeměně kvaziděr na kvazičástice. Tím se tento jev liší od normálního procesu, kdy uvedené dva typy excitací mají opačný účinek.

Dvouvláknové zařízení dokáže více než jen demonstrovat podivné chování kvazičástic a kvaziděr. Dovoluje získat všechny parametry nutné k popisu dynamiky kvazičástic v supratekutém ^3He . Obsahuje zdroj i detektor a může pracovat při teplotě okolo $100\ \mu\text{K}$.

Laboratorní výzkum vlastností supratekutých fází ^3He může umožnit odhalení podstaty i takových forem hmoty, se kterými se nelze na Zemi setkat. Usuzuje se například, že neutronová hmota (neutronium) v rychle rotujících pulsarech je supratekutá, přestože teplota v neutronové hvězdě dosahuje asi 10^8 K. Je zřejmé, že neutronovou hmotu nelze studovat v laboratoři; je však možné napodobit její chování pomocí rotujících supratekutých fází ^3He nebo ^4He . Neutrony podobně jako atomy ^3He jsou fermiony a předpokládá se, že neutronium se může stát supratekutým tímtež mechanismem Cooperova párování jako ^3He . Jenom podrobné teoretické výpočty mohou ukázat, zda podobnost mezi supratekutým ^3He a neutroniem je dostatečně blízká, aby takový model vedl k použitelným výsledkům. Bude-li tomu tak, mohou být experimenty v ^3He prováděny takovým způsobem, aby napodobovaly poměry v neutronových hvězdách.

Jaké jsou vyhlídky na nalezení dalších supratekutých systémů v zemských podmínkách? Vážným kandidátem je roztok ^3He v supratekutém ^4He . V závislosti na působícím tlaku lze připravit roztoky až s deseti procenty ^3He . Při jisté dostatečně nízké teplotě mohou atomy ^3He v roztoku vytvářet Cooperovy páry a stát se supratekutým systémem. Přes úsilí řady laboratoří nebyl dosud žádný takový supratekutý přechod pozorován. Hustota atomů ^3He v roztoku tohoto typu je velmi malá, a tak jsou interakce mezi nimi dosti slabé. Odhady přechodové teploty leží v nanokelvinové oblasti mnohem níže, než je 80 až $100\ \mu\text{K}$, na které se dosud podařilo ochladit roztok ^3He v ^4He .

Taková supratekutá kapalina by mohla pomoci odkrýt zcela novou oblast vlastností atomů. Atomy ^3He by nejen vytvářely supratekutou fázi, ale stalo by se tak v supratekuté lázni. Nový systém by obsahoval dvě vzájemně prostoupené, avšak nezávislé supratekuté kapaliny. Takováto dvousložková supratekutá kapalina by musela mít ještě podivnější vlastnosti než jednosložkové dosud známé systémy.

Teorie navíc předpokládá, že by se ve zředěném ^3He mohly vytvářet dva různé typy Cooperových párů. Který typ párování by v daném roztoku převládal, by určovala koncentrace ^3He . Při vysokých koncentracích by vznikaly páry s jadernými spiny atomů paralelními ve stejném směru tak jako v čistém ^3He . Při nižších koncentracích by se však mohly vytvářet páry s opačnými spiny. Při jisté střední koncentraci by mohly existovat současně oba typy párování a vznikla by tak tříložková supratekutá kapalina.

K experimentálnímu ověření takové možnosti patrně dojde až ve vzdálené budoucnosti, poněvadž supratekutý přechod může nastat při teplotách, které jsou podstatně nižší než teploty, na které dokážeme ochladit kapalně hélium dnes. Přesto však se takovýchto teplot jednou bezpochyby dosáhne.

Poznámka překladatele

V původním znění je článek doplněn řadou barevných obrázků s rozsáhlými popisky, které text volně ilustrují. Současné podmínky pro tisk Pokroků bohužel nedovolily tyto obrázky reprodukovat, za což se redakce čtenářům, autorům i původnímu vydavateli omlouvá.

Literatura k dalšímu studiu

Vortices in rotating superfluid ^3He

PERTTI HAKONEN and OLLI V. LOUNASMAA: *Physics Today* 40 (1987), 70–78

The ballistics of quasiparticles in $^3\text{He-B}$ at very low temperatures

A. M. GUENAUT and G. R. PICKETT: *Physica Scripta* T19 (1987), 453–457

Quantized vortices in superfluid ^3He

MARTTI M. SALOMAA and G. E. VOLOVIK: *Reviews of Modern Physics* 59 (1987), 533–613

Microkelvin physics

G. R. PICKETT: *Reports on Progress in Physics* 51 (1988), 1295–1340

Vortices in rotating superfluid ^3He

PERTTI HAKONEN, OLLI V. LOUNASMAA and JUHA SIMOLA: *Physica B* 160 (1989), 1–55

Redakční poznámka k článku „Supratekuté hélium–3“

Ladislav Skrbek, Praha

Výzkum fyzikálních vlastností nejkomplicovanější známé kondenzované soustavy — supratekutých fází ^3He — je náplní práce celé řady předních nízkoteplotních laboratoří. Spektrum výzkumných prací je poměrně široké, proto uvedeme alespoň některé hlavní směry a dosažené výsledky posledních let na různých pracovištích.

Značná část informací o supratekutých fázích ^3He byla získána technikou jaderné magnetické rezonance, používané téměř ve všech laboratořích. Díky nenulovému spinu atomů ^3He (na rozdíl od ^4He) lze touto metodou detekovat např. přechod z normálního stavu do fáze A nebo B a mezi nimi, např. měřením tzv. Leggettova frekvenčního posuvu rezonanční Larmorovy frekvence. K velmi zajímavým výsledkům došla touto technikou moskevská skupina z Ústavu fyzikálních problémů pod vedením akademika A. S. Borovika-Romanova. Fáze $^3\text{He-B}$, umístěná v gradientu vnějšího magnetického pole, se působením radiofrekvenčního signálu jaderné magnetické rezonance spontánně rozdělí na dvě domény — stacionární doménu s časově nezávislou magnetizací ve směru vnějšího pole a homogenně precedující doménu, uvnitř které je precese spinů koherentní. Spojení dvou takových uměle připravených homogenně precedujících domén úzkým kanálkem vedlo k objevu dalšího projevu kvantové mechaniky v makroskopickém měřítku — spinového supraproudu neboli přenosu magnetizace z jedné domény ke druhé. V tomto procesu hraje důležitou úlohu fáze makroskopické vlnové funkce, jejíž pomocí je možné supratekuté ^3He popsat. Přenos magnetizace je analogický s tzv. Josephsonovými jevy mezi slabě vázanými supravodiči, kdy mezi nimi protéká supravodivý proud určený rozdílem fází makroskopické vlnové funkce supravodičů na obou „březích“ Josephsonova přechodu.

RNDr. LADISLAV SKRBEK, CSc. (1955), je samostatným vědeckým pracovníkem laboratoře nízkých teplot Fyzikálního ústavu ČSAV v Řeži.