

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

E. L. Andronikašvili

Tekuté helium

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 1 (1956), No. 3, 269--281

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/137140>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1956

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>

Zároveň s hľadáním nových možností použítí ultrazvuku je nutno se zabývat rozšířením již známých method. V poslední době bylo na příklad použito známé vlastnosti ultrazvuku — urychlování difusních pochodů — k urychlení impregnace tkaniny v kabelovém průmyslu, k urychlení máčení osiva v bakteroidních roztocích a pod. Jiným příkladem rozšíření známých method je použítí ultrazvuku v zubním lékařství.

Úspěšné provádění prací ve všech třech uvedených směrech vyžaduje dobré spolupráce fysiků, chemiků, biologů, technologů, konstruktérů a jiných pracovníků. Pro rychlý rozvoj všech prací je kromě toho potřeba vyrábět speciální ultrazvukové aparatury jak laboratorní, tak průmyslové. Dosud trvajícím stav, že ti, kteří chtěli ultrazvuku použít, byli nuceni si sami zhotovit potřebné zařízení, je brzdou dalšího rozvoje použítí ultrazvuku.

Pro rozšíření pokrokových ultrazvukových method v technice je vedle práce vědců a inženýrů, kteří vypracovávají a zároveň zkoumají možnosti použítí ultrazvuku v různých odvětvích národního hospodářství, potřeba spolupráce průmyslu, projevující se v používání a seriové výrobě ultrazvukových laboratorních a průmyslových zařízení.

Stanislav Kubík

PROF. E. L. ANDRONIKAŠVILI,
člen korespondent AN Gruz. SSR

TEKUTÉ HÉLIUM

Жидкий гелий

Priroda, 1954, č. 6, str. 13—23.

Hélium je veľmi vzácny prvok na zemi. Medzi inými prvkami nachádzajúcimi sa na našej planéte je jeho koncentrácia veľmi malá: na jeden atóm hélia pripadá 200 miliónov atómov iných látok. V zemskej atmosfére je ho viacej: na jeden atóm hélia pripadá na 200 tisíc iných atómov.

Tak ako u iných chemických prvkov môže byť hmota a zloženie héliového atómového jadra rôzne, len náboj jadra ostane nezmenený. Vo väčšine prípadov majú atómy hélia jadro zložené z dvoch protónov a dvoch neutrónov. Atómová váha takéhoto hélia je rovná štyrom. Súčasne existujú aj iné typy héliových jadier, lepšie povedané, iné izotopy hélia. Tak sa napr. vyskytujú atómové jadrá hélia s atómovou váhou rovnou trom, zložené z dvoch protónov a jedného neutrónu. Sú tiež atómové jadrá hélia, ktoré majú atómovú váhu rovnú šiestim, zložené z dvoch protónov a štyroch neutrónov. Rôzne izotopy hélia sa označujú He^3 , He^4 , He^6 .

V prírodných podmienkach tvorí izotop He^3 malú prísadu k atómom He^4 a jeho koncentrácia neprevyšuje jednu desiatistinu percenta. Izotop He^6 sa všeobecne v prírode nenachádza a získava sa iba umelou cestou.

Obyčajne sa pod slovom hélium rozumie plyn. Tento plyn je chemicky inertný a nevstupuje do žiadnych chemických reakcií.

Pokusy premeniť plynné hélium do tekutého stavu sa podnikali nie raz. Nakoniec v r. 1908 sa podarilo Holanďanovi Kamerlingh-Onnesovi zkvapalnenie hé-

lia: pri teplote o málo vyššej ako absolútna nula, približne 5°K (t. j. — 268°C) sa objavili prvé kvapky tekutého hélia, úplne priehľadnej tekutiny, sedemkrát ľahšej ako voda.

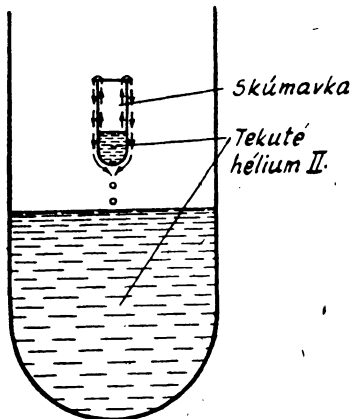
Odvtedy sa začala rozvíjať jedna z najzaujímavejších vied — fyzika nízkych teplôt: tekuté hélium sa pre svoje vlastnosti nestalo len jedinečným objektom pozorovania, ale tiež prostredím, ktoré dalo fyzikom nepredvídané možnosti experimentovania v blízkosti absolútnej nuly s akýmikoľvek látkami.

Nezamrzajúca tekutina

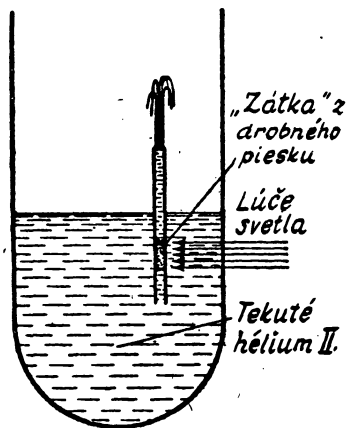
Pri atmosférickom tlaku vri hélium pri teplote $4,2^{\circ}\text{K}$. Pripomeňme, že absolútna nula je tá teplota, pri ktorej u všetkých látok prestáva tepelný pohyb. Je jasne vidieť, aké slabé sily pôsobia medzi atómami tekutého hélia, keď nepatrný tepelný pohyb stačí na to, aby už pri $4,2^{\circ}\text{K}$ porušil medziatómovú väzbu a premenil hélium na paru.

Slabé vzájomné pôsobenie medzi atómami má tiež za následok, že hélium predstavuje jedinú tekutinu, ktorá nezamrzá pri žiadnej teplote, ba ani pri absolútnej nule. Skryštalizovať možno hélium pri dostupných teplotách ($0,001^{\circ}\text{K}$) iba vtedy, ak podrobíme hélium tlaku 25 atm.

Tekuté hélium má aj iné pozoruhodné vlastnosti. Tak napr. pri teplote $2,19^{\circ}\text{K}$ nastáva premena, na základe ktorej má hélium úplne nové vlastnosti. Preto sa tekuté hélium, ktoré má teplotu vyššiu ako $2,19^{\circ}\text{K}$, nazýva tekuté hélium I, pod teplotou $2,19^{\circ}\text{K}$ sa nazýva tekuté hélium II. Teplota, pri ktorej nastáva táto premena, sa nazýva bod lambda. Je charakteristické, že pod bodom lambda až do najnižších teplôt ostáva hustota hélia nezmenená.



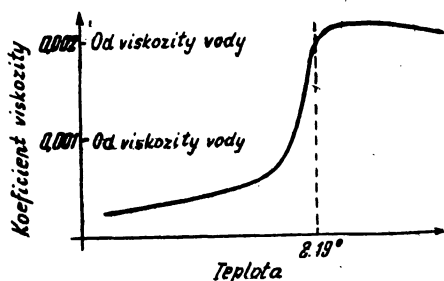
Obr. 1: Na skúmavke nachádzajúcej sa nad héliovou vanou vytvára sa tenká vrstva hélia (naznačená šipkami). Zospođu skúmavky odkvapkávajú kvapky vytvárajúce sa z vrstvy.



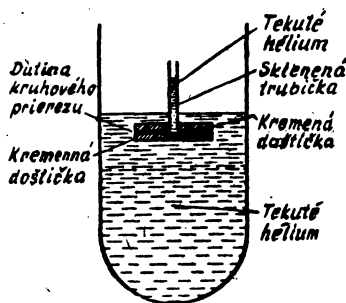
Obr. 2: Hélium II je vystrekované teplom vybaveným v zátku z drobného piesku pri pohltení energie svetelného lúča.

Hélium I sa chová búrlivo, aktívne vri v celom objeme; hélium II naopak pokojne, zrkadlo jeho povrchu je hladké. Zato keď naberieme hélium II do skúmavky a potom ju vytiahneme a ponecháme nejaký čas nad hladinou hélia II v héliovej vani, ako ukazuje obr. 1, tak hélium II pomaly vyprázdni skúmavku cez jej okraj: pokryje skúmavku tenkou vrstvou a po tejto vrstve vytečie von.

No, stačí zahriať tekuté hélium do bodu lambda a vlastnosť tečenia po vrstve sa stratí. Tento zjav prvý objavil Kamerlingh-Onnes a podrobne ho vysvetlil P. G. Strelkov, Dount a Mendelson, B. C. Lazarev a B. N. Jeselson. Tekuté hélium I, ako všetky ostatné skvapalnené plyny — dusík, kyslík, vodík — veľmi zle vodi teplo. Naproti tomu tekuté hélium II nachádzajúce sa v dlhých a tenkých ka-



Obr. 3: Keezom zmeral, že viskozita hélia II so znižovaním teploty plynule klesá počnúc od bodu lambda.



Obr. 4. Kapicov viskozimeter.

pilárach, nadobúda, ako ukázal Keezom, novú vlastnosť: veľmi vysokú tepelnú vodivosť prevyšujúcu tepelnú vodivosť jedného z najlepších vodičov tepla, meď.

Allen a Johnson objavili ešte jednu zvláštnosť hélia II, t. zv. fontánový efekt. Hélium sa urýchľuje teplom, ktoré sa uvoľní v kapiláre ponorenej do tekutiny (obr. 2) a vytvorí následkom toho fontánu vysokú 20 až 30 cm. To trvá nepretržite dotiaľ, kým sa neprestane dodávať teplo.

Supratekuté hélium

Prv ako boli objavené vlastnosti tekutého hélia, ako sa to často vo vede stáva, bol konštatovaný podstatný rozpor vo výsledkoch meraní jednej a tej istej fyzikálnej veličiny, koeficienta viskozity.

Najprv bola viskozita tekutého hélia meraná metódou tlmenia kmitov kovového kotúča ponoreného do tekutého hélia a zaveseného na tenkej pružnej niti. Výsledky jedného z takých meraní, ktoré vykonal Keezom, sú na obr. 3. Tento holandský fyzik zistil, že pri prechode cez bod lambda sa viskozita tekutého hélia II hoci rýchle, predsa len spojite mení.

V roku 1938 sa meraniu viskozity tekutého hélia venoval akademik P. L. Kapica. Kapicov viskozimeter bol zostavený z dvoch kremenných doštičiek na seba zabrúsených. V jednej z nich bol urobený kruhový otvor, do ktorého sa zastrčila sklenená trúbka (obr. 4). Do trúbky sa nalialo tekuté hélium a pozorovala sa rýchlosť, s ktorou vytekalo cez úzku kruhovú medzeru medzi dvoma kremennými doštičkami, tesne na seba priloženými. Proti očakávaniu sa ukázalo, že koeficient viskozity tekutého hélia sa mení pri prechode cez bod lambda skokom až 10.000krát. Zistilo sa, že koeficient viskozity hélia je taký malý, že sa prakticky nedá merať. Preto nazval Kapica hélium II supratekutým. Pozdejšie boli tieto Kapicove pozorovania potvrdené Angličanmi Allenom a Misenerom.

Naskytá sa teraz otázka: nevzái príčina rozchádzajúcich sa výsledkov, ktoré dávajú všeobecne známe experimenty, v nesprávnosti použitia opísaných metód za takých nízkych teplôt? Odpoveď na túto otázku je ľahká: pri teplotách nad bodom lambda dávajú obidve metódy identické výsledky. Zistilo sa, že problém nie

je v metóde. Problém je v tom, že hélium I sa chová ako obyčajná tekutina. U hélia II sa všetko stáva neobvyklé.

Ak je hélium II uzatvorené do úzkej kapiláry, medzery, alebo je v tenkej vrstve, chová sa ako ideálna tekutina bez viskozity. Naproti tomu ak je naliate do nádoby, chová sa ako normálna viskózna tekutina. No, možno sa tieto rozdiely vzťahujú nielen ku zjavom spojeným s mechanickým premiestňovaním tekutiny? Je možné, že jestvujú i iné zjavy, pri ktorých sa prejavuje supratekutosť? Nie je napr. pri nulovej viskozite mysliteľné, že existujú netlmené »prúdy«, ktoré by sa zúčastnili na prenose tepla a podmieňovali by vysokú tepelnú vodivosť? Pod týmto zorným uhlom rozvíjal P. L. Kapica ďalšie pozorovania.

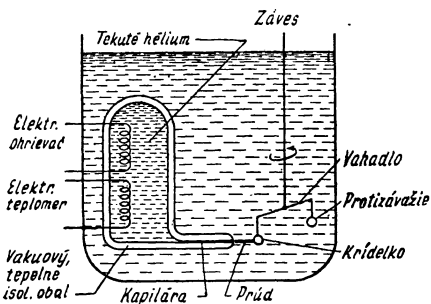
Kapicove pozorovania prenosu tepla kapilárou zaplnenou héliom II ukázali, že vlastnosť tejto tekutiny odovzdávať teplo sa znižuje pri akýchkoľvek poruchách jeho klúdu. Tak na príklad premiestňovanie, pohyb tekutiny cez kapiláru, pulzácie tlaku, atď. značne znižujú koeficient tepelnej vodivosti. Ukázalo sa, že mechanizmus prenosu tepla cez hélium II je podstatne odlišný od mechanizmu skutočnej tepelnej vodivosti a súvisí s konvekčnými prúdmi. Avšak tak ako hustota tekutého hélia II nezávisí od teploty, tak účasť obyčajných konvekčných prúdov je v danom prípade vylúčená.

Pri tom pod obyčajným konvekčným prúdom rozumieme zjav, že ohriaty objem tekutiny, ktorý je ľahší, vypláva navrch a chladnejší, ťažší sa ponorí dolu.

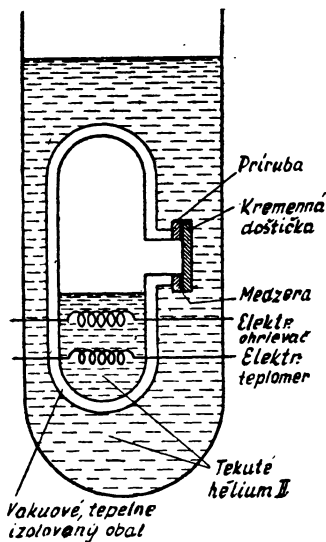
Charakter zvláštnych konvekčných prúdov, ktorých dôsledkom je veľká tepelná vodivosť hélia II, vyšetril P. L. Kapica experimentom na obr. 5. Malá sklenená baňka obsahujúca elektrický ohrievač a elektrický teplomer sa obklopi skleneným obalom, ktorý tepelne izoluje. S vonkajším prostredím je baňka spojená iba tenkou sklenenou kapilárou.

Zvonku sa proti kapiláre ponorí miniatúrne vahadielko váh. Ak na krídlečko vahadla pôsobí sila, váhy sa na pružnom závесе pootočia. Celé zariadenie je ponorené v tekutom héliu II.

Akonáhle bol zapätý elektrický ohrievač, v baňke sa začalo vyvíjať teplo, z otvoru kapiláry šiel dobre upravený prúd, ktorý keď udrel do krídlečka, zá-



Obr. 5: Z kapiláry vyteká prúd vyvíjajúci tlak na krídlečko krútiacich sa závaží otáčajúcich sa na závесе vo smere ukázanom šípkou. Celé zariadenie je ponorené do héliovej vane.



Obr. 6: Bez ohľadu na to, že vo vnútornom objeme sa vybaňuje teplo v el. ohrievači, teplota v tomto objeme sa nezväčšuje. Čím viacej tepla sa vybaňuje, tým skôr sa naplní vnútorný objem tekutým héliom II, pritekajúcim cez úzku medzeru medzi prírubou a doštičkou.

važie sa stočilo o dostatočne veľký uhol. Vo vnútri baňky sa teplota pri tom nezvýšila, ale baňka sama, čo je zvlášť dôležité, sa v priebehu doby nevyprázdňovala.

Zaujímavá je i druhá modifikácia tohto pokusu, pri ktorej baňka s ohrievačom i teplomerom je zavesená na vahadlo a v rovnováhe s protizávažím. Prúd vytekajúci z diery kapiláry vyvíjal v tomto prípade na baňku reaktívny tlak, na základe ktorého sa vahadlo torzných váh pootočilo o určitý uhol, veľkosť ktorého závisela od množstva tepla vyvinutého v ohrievači.

Ani v tomto prípade sa baňka v závislosti na čase nevyprázdňovala, bez ohľadu na to, že z nej vychádzal prúd.

Čo je to? Pohyb dvoch prúdov tekutiny idúcich proti sebe v kapiláre a majúcih rôzne vlastnosti? Prečo tedy žiadnym spôsobom sa nedá zistiť vtekanie hélia do baňky. Alebo nie prúd tekutiny sa pohybuje po kapiláre a naráža na krídlielko otáčajúcich sa závaží, ale tepelný prúd alebo lepšie povedané »tepelný vietor«? No, keď je to teplo, tak prečo pôsobí ako impulz, ako keby bolo viazané na hmotu?

Ktorá z týchto dvoch hypotéz je správna? Odpoveď je neočakávaná: správne sú obe hypotézy.

Ako odfiltrovať tekutinu od tepla v nej obsiahnutom?

Druhý pokus ešte presnejšie previedol taktiež P. L. Kapica, V boku dvojstennej sklenenej baňky (obr. 6), tepelne izolovanej od okolia, bola vytvorená dobre zabrúsená kremenná prírubu. Túto prírubu bolo možné zakryť taktiež dobre zabrúsenou kremennou doštičkou. Medzera medzi prírubou a doštičkou se v priebehu pokusu mohla meniť až do jednej desaťtisíciny milimetra. V sklenenej baňke bol umiestený elektrický ohrievač a teplomer.

Celé zariadenie sa ponorilo do tekutého hélia. Teplota v zariadení a vonku bola rovnaká.

Nehľadiac na to, že medzera medzi kremennými doštičkami bola veľmi úzka, hélium II pod vplyvom rôznosti hladín pomaly vtekalo do zariadenia. To nie je ani čudné, lebo už vieme, že hélium II pretekajúce úzkou medzerou nemá viskozitu. Čudné je to, že rýchlosť vtekania hélia II sa zväčšuje so zväčšovaním množstva tepla vyvinutého za jednotku času v ohrievači. To ale nie je to hlavné. Hlavný uzáver z tohto pokusu je, že teplota v sklenenej baňke, nehľadiac na väčšie množstvo tepla vyvinutého v nej, ostáva nezmenená. To znamená, že cez úzku medzeru do zariadenia vtekala tekutina značne chladnejšia ako tekutina, ktorou bol naplnený obsah sklenenej baňky i obklopujúca ju héliová vaňa.

Cez medzeru prúdilo toľko chladu, koľko bolo potrebné, aby sa kompenzovalo vyhrievačom vytvorené teplo. Odkiaľ sa berie chladná tekutina? Jediný dôsledok sa ponúka sám: úzka medzera prepustí tekuté hélium II, no neprepustí v ňom obsiahnuté teplo. Medzera odfiltruje teplo a síce tým viac, čím je užšia.

Odtiaľto ešte jeden záver siahajúci ešte ďalej: so stratou obsiahnutého tepla nadobudlo hélium II novú vlastnosť — supratekutosť. Stratilo viskozitu, stratilo schopnosť prejavovať trenie. Teda viskozita je vlastnosť tepla.

Poznáme dva spôsoby, ako prinútiť hélium II, aby pretekalo cez úzku medzeru: alebo ho treba pretlačovať rôznymi tlakmi na koncoch medzery, alebo ho treba sať teplom, alebo, čo je to isté, rozdielom teplôt. V tomto zmysle možno hovoriť o novom druhu tlaku — »tepelnom tlaku«, pričom tepelný tlak je úplne zhodný s inými druhmi tlakov, napr. s hydrostatickým. Tepelný tlak môže pôsobiť v tom istom smere ako tlak hydrostatický, zosilujúc ho, no môže s takým istým účinkom pôsobiť i v opačnom smere a potom hydrostatický tlak oslabuje.

Opísané zjavy dávajú možnosť dosiahnúť zníženie teploty pomocou filtrácie hélia II. Napr. keď máme dve nádrže, z ktorých jedna je naplnená héliom II, a navzájom ich spojíme kapilárou, cez ktorú sa začne pretláčať hélium (obr. 7), tak teplota tekutiny v druhej nádrži bude nápadne nižšia ako v prvej. Potom počiatkové množstvo tepla rozdelené na začiatku pokusu po celej hmote tekutiny, sa na konci pokusu — po prechode časti hélia do druhej nádrže — rozdelí v menšej hmote ostávajúcej v prvej nádrži, a preto sa teplota tejto časti zvýši.

Prečo sa tekuté hélium líši od iných tekutín?

Odpoveď na túto otázku dáva akademik L. D. Landau, podľa ktorého tepelný pohyb v héliu II možno si predstaviť ako súhrn oddelených »kvánt« vyznačujúcich sa nevelkým množstvom tepelnej energie. To znamená, že obsah tepelnej energie sa v jednotlivých častiach tekutiny nemôže meniť plynule. Musí sa nutne meniť nevelkými skokmi. Hodnota takého skoku určuje energiu jedného kvanta. Z toho vysvitá, že do tekutého hélia privedené teplo sa rozdelí po celom objeme tekutiny vo tvare konečného, hoci veľmi veľkého počtu jednotlivých kvánt. Zvláštnosť tepelných kvánt vytvorivších sa v héliu II spočíva v tom, že každé z nich môže priviesť do tepelného pohybu pomerne malý objem tekutiny. No to však neznačí, že to alebo ono tepelné kvantum je pevne viazané určitou skupinou atómov: teraz toto kvantum uviedlo do tepelného pohybu jednu skupinu susedných atómov, ale v okamžiku prešlo celou tekutinou a už je tepelným pohybom vzbudený iný objem hmoty.

Podľa charakteru tepelného pohybu, do ktorého sú uvádzané atómy hélia II, sa tepelné kvantá delia na rotóny a fonóny. Tie druhé sú analogické obyčajným zvukovým vlnám. Pri nízkych teplotách je fonónov značne viac ako rotónov. Ale blízko bodu lambda naopak počet rotónov nápadne prevyšuje počet fonónov.

Pri absolútnej nule nejstávajú v héliu II žiadne tepelné kvantá. Pri zvýšení teploty vznikajú vždy nové a nové kvantá tepla, ale ich počet je nedostatočný na to, aby sa dostali do tepelného pohybu všetky atómy tekutiny, celá jej masa.

To znamená, že pri nízkych teplotách množstvo tepla nestačí na celú tekutinu a v každom momente istá jej časť zachováva vlastnosti, ktoré mala pri teplote absolútnej nuly. Preto pri nízkych teplotách sa môžeme na tekuté hélium II pozeráť ako na veľmi riedké primiesenie submikroskopických častíc, majúcich tepelný pohyb, do základnej hmoty absolútne chladnej tekutiny.

So zvyšovaním teploty sa stav vecí mení: absolútne chladnej tekutiny začína byť stále menej. Teraz už treba pozeráť na ňu ako na malé primiesenie do hmoty teplej tekutiny. Nakoniec pri teplote $2,19^{\circ}$ abs., t. j. v bode lambda, prímiesenie absolútne chladnej tekutiny mizne a hélium II nadobúda vlastnosti obyčajnej tekutiny. Teraz teplo pôsobí na celú tekutinu. Podľa toho hélium II pod bodom lambda sa javí ako zmes dvoch zložiek: teplej (alebo normálnej) a chladnej (alebo supratekutej); pričom každej z týchto zložiek možno prisúdiť odpovedajúce fyzikálne veličiny — »normálnu« hustotu a »supratekutú« hustotu. Je jasné, že súčet oboch hustôt je rovný obyčajnej hustote hélia II.

Z tohto hľadiska sa stanú zrozumiteľnými všetky zjavy, o ktorých sa hovorilo vyššie. Napr. v pokuse ukázanom na obr. 5 k teplu vyvinutému sa v ohrievači smeruje supratekutá zložka hélia II, majúca vlastnosť absolútne chladnej tekutiny. Z diery kapiláry vyteká prúd normálnej (teplej) tekutiny, ktorá pôsobí tlakom na krídľá torzných váh. Prečo tedy bez ohľadu na prácu elektrického ohrievača ostane teplota v baňke nezmenená? Preto, že všetko teplo odoberá

pritekajúca absolútne chladná tekutina, po čom sa v nej prejavujú normálne vlastnosti.

Tekutina pôsobí tlakom na obtekané predmety v dôsledku trenia. Pretože supratekutá zložka hélia II nemá viskozitu, nemôže pôsobiť a skutočne nepôsobí tlakom na obtekané predmety. Preto tedy P. L. Kapica nemohol objaviť jej prúdenie, preto pôsobila na baňku zavesenú k vahadlu torzných vah reakcia iba zo strany normálneho prúdu.

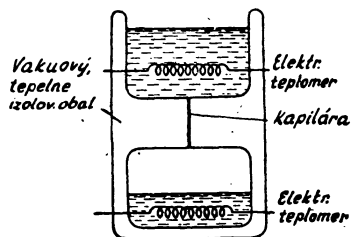
Prvá hypotéza je teda správna: u spodu kapiláry vznikli súčasne dva prúdy tekutého hélia II idúce navzájom opačným smerom. V priebehu takého zložitého pohybu prenos hmoty neprebíha a hélium samo, ako celok, je v kľude.

Tepelné kvantá vznikajú vo vrstvách hélia II bezprostredne priliehajúcich k ohrievaču. Jednako pokus ukazuje, že v héliu II nevznikajú rozdiely teplôt aj keď sa nerovnomerne zohrieva. To znamená, že tepelné kvantá sa veľmi rýchle vzdiaľujú od ohrievača. Ich pohyb v danom prípade prechádza v prostredí nemajúcom viskozitu, neprejavuje sa odpor a kvantá tepla letia zotrvačnosťou pomerne slabo sa rozptyľujúc na svojej ceste, vzniká ako by tepelný prúd.

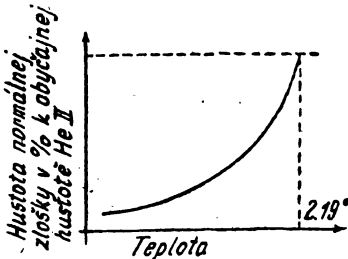
Druhá hypotéza je tiež správna: tepelné kvantá sa pohybujú po kapiláre, vytvárajú po východe z diery »tepelný prúd«, oprú sa o krídlo torzných vah a vychýlia krídlo. A tekutina ako celok v tomto prípade zotrva v kľude.

Jedna z veľkých predností Landauovej teórie je možnosť dvojakým spôsobom vysvetľovať zjavy prebiehajúce v héliu II. Zatiaľ sme uvažovali súčasné pohyby normálnej i supratekutej zložky, idúce navzájom v opačných smeroch. Vo vrstve merajúcej jednu stotisícinu milimetra pohybuje sa iba supratekutá komponenta hélia II, lebo pri tak malej hrúbke pohyb viskózne tekutiny sa prakticky nemôže vyskytovať. Tepelné kvantá v tomto prípade ako by sa prilepili k stene, ktorej teplota určuje ich počet. Aj pre fontánový efekt je vysvetlenie: supratekutá zložka smeruje ako obyčajne oproti teplu vyvíjajúcemu sa v kapiláre. Pohybuje sa tým rýchlejšie čím väčšie množstvo tepla dodá ohrievač za jednotku času. Pri tom nadobúda takú kinetickú energiu, že prechádzajúc v blízkosti ohrievača sa premení v normálnu viskóznú tekutinu, stále stráca rýchlosť a pokračuje v postupe hore, vytvárajúc fontánu.

Nebolo by prirodzené, keby sa teória takej dôležitej oblasti fyziky ako supratekutost rozvíjala iba v jednej zemi. Skutočne je možné priniesť dostatočne dlhý výčet teoretických prác z rôznych zemí. Niektoré z nich, ako napr. teória supratekutosti vypracovaná v Amerike Tiszom, súperili s Landauovou teóriou. Jednako



Obr. 7: Z vrchnej časti nádoby preteká tekuté hélium II cez kapiláru do spodnej časti. Pretože teplo neprechádza cez kapiláru, teplota vo vrchnej časti nádoby sa postupne zvyšuje. V dolnej časti nádoby má hélium II teplotu nižšiu ako počiatočná teplota v hornej časti.



Obr. 8: Vodorovná bodkovaná čiara značí, že hustota hélia II nezávisí od teploty. Hustota normálnej zložky má priebeh plnej krivky — rýchle klesá s teplotou počnúc od bodu lambda.

celý rad experimentálnych faktov dokázal správnosť tých predstáv, ktoré boli vyvinuté v Sovietskom sväze školou L. D. Landaua.

Stojí a pohybuje sa

Mnoho rôznych zjavov umožnila objasniť i správne opísať teória supratekutosti L. D. Landaua. Teraz sa sila teórie preveruje na zjavoch experimentálne ešte neobjavených, na zjavoch, ktorých existenciu teória je schopná predpovedať. Teória Landaua vydržala túto previerku a predpovedala celý rad neočakávaných faktov. Hľa jeden z nich. Keď hladkú valcovú baňku naplníme héliom II a privedieme do otáčivého pohybu, tu sa jej pohybu musí zúčastniť, ako by sa predpokládalo, len normálna zložka. Supratekutá zložka hélia II, na ktorú nepôsobia viskózne sily, nemusí byť nutne v pohybe. Uskutočnením takého pokusu by sa mohla bezprostredne dokázať možnosť súčasnej existencie dvoch druhov pohybu v héliu II: normálneho pohybu predchádzajúceho rýchlosťou rôznou od nuly a supratekutého, ktorého rýchlosť je v danom prípade rovná nule.

Ak by bolo navyše možné nejakým spôsobom zmerať teplotnú závislosť hustoty jednej zo zložiek, bolo by nám jasné na akú časť tekutiny sa nedostávajú tepelné kvantá pri tých alebo iných teplotách.

Taký pokus, pri ktorom otáčanie bolo zamenené harmonickými torznými kmitami valcového zariadenia, zaveseného na pružnej niti, previedol E. L. Andronikašvili. Torzné kmity zariadenia sa diali okolo jeho osi symetrie. Zariadenie bolo vytvorené vo tvare systému rovnoobežných plochých diskov, vzdialených od seba 0,2 mm. To bolo nevyhnutné preto, aby bola vo zlomku času odpovedajúcemu jednej perióde kmitania uvedená do pohybu celá hmota hélia II. Pretože zariadenie je schopné uviesť do súhlasného pohybu len tu časť tekutiny, ktorá je v danom okamžiku v tepelnom pohybe, je meranie pri rôznych teplotách pohybujúcej sa tekutiny jedným zo spôsobov skúmania charakteristických zvláštností tepelných kvánt (podiel pohybujúcej sa tekutiny je priamo úmerný množstvu týchto kvánt). Čím je väčšia hmota tekutiny pohybujúcej sa spolu so zariadením, tým je dlhšia perióda kmitov.

Výsledky tohto pokusu je vidieť na obr. 8, na ktorom bodkovaná čiara rovnoobežná s osou úsečiek znázorňuje celkovú hustotu hélia II, rovnakú pre všetky teploty. Plná čiara znázorňuje teplotnú závislosť hustoty normálnej zložky v percentách vzhľadom k plnej hustote hélia II a ukazuje, že táto veličina prudko klesá so znižovaním teploty.

Týmto pokusom bolo tak bezprostredne dokázané, že s pohybom zariadenia hélium II sa pohybuje spolu so zariadením iba čiastočne. »Čiastočne« ostáva nepohyblivé. Možno povedať, že to je jeden z nie z mnohých paradoxných faktov, známych v experimentálnej fyzike.

Znova o viskozite

Teraz, keď sme sa zoznámili s reálnou možnosťou uskutočniť iba normálny druh pohybu, keď sme poznali teplotnú závislosť hustoty normálnej zložky, môžeme sa znovu zaoberať otázkou viskozity. No, akej viskozity? Viskozity hélia II ako celku alebo viskozity jeho normálnej zložky?

Ako vyplýva z teórie, má fyzikálny zmysel iba normálna zložka. To vyplýva bezprostredne aj z experimentu. Kezom nemohol o tom nič vedieť a preto meral veličinu, nemajúcu fyzikálneho významu. Výsledky jeho pozorovania boli už ukázané vpredu (viď obr. 3), no tieto výsledky nie sú správne.

Meranie viskozity hélia II previedol znova Andronikašvili. Na obr. 9 vidíme, že začínajúc bodom lambda viskozita prudko klesá, potom v intervale teplôt od $1,9^{\circ}$ K do $1,6^{\circ}$ K ostáva konštantná a pri ďalšom znížení teploty začína prudko vzrastať. Krivka Keezoma zatiaľ od bodu lambda prudko klesá dole. Pokusy, o ktorých sa tu hovorí ako aj merania Keezoma boli prevedené metódou merania tlmenia kmitania disku zaveseného na pružnej niti.

Súčasne s experimentálnym sledovaním viskozity išlo i o ďalšie teoretické vysvetlenie tepelných kvánt, ktoré sa prejavujú ako nositelia viskózných vlastností tekutiny.

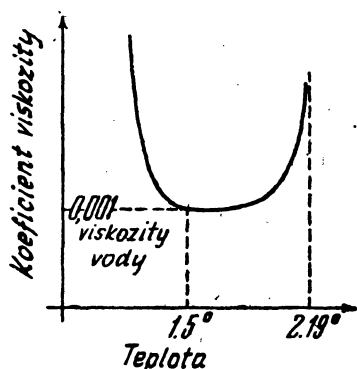
I. M. Chalatinikovovi sa podarilo dokázať, že viskózne vlastnosti hélia II pri teplotách vyše $1,5^{\circ}$ K určujú sa chovaním jedného druhu tepelných kvánt — rotónov. Niže $1,5^{\circ}$ K potom základná úloha začína prináležať fonónom, s čím je zviazané prudké zväčšenie koeficientu viskozity so znížením teploty.

Naposledy bolo meranie viskozity znovu prevedené v iných štátoch: v Belgii Van Ytterbeek a v Anglii Hollis-Hallet tiež metódou kmitajúceho disku. Výsledky týchto meraní navzájom súhlasili. Navyiac podľa výsledkov Holandana Mellinka, ktorý zmeral tepelnú vodivosť hélia II v kapilárach s priemerom 10μ , sa tiež zistilo, že je možné určiť viskozitu normálnej zložky hélia II a dosiahnuť dobrého súhlasu s výsledkami zobrazenými na obr. 9.

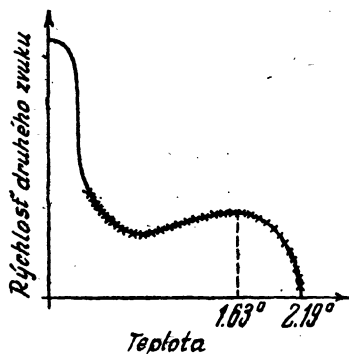
Zdalo by sa, že by bolo možné ukončiť merania viskozity normálnej zložky, no nie, táto veličina sľubuje experimentátorom ešte veľa starostí.

Druhý zvuk

Teória Landaua predpovedala ešte jeden nový základný zjav, ktorý dostal názov »druhý zvuk«, hoci tento »zvuk« nie je počut. Potom čo J. M. Lifšic teoreticky objasnil najvýhodnejšie podmienky pozorovania, objavil V. P. Peškov experimentálne druhý zvuk.



Obr. 9: Nad $1,5$ abs. viskozita hélia II je určovaná rotónmi, pod $1,5$ abs. je viskozita hélia II určovaná fonónmi.



Obr. 10: Landau presne predpovedal závislosť rýchlosti druhého zvuku od teploty. Nasledujúce pokusy plne potvrdili jeho predpovede. Hodnoty označené krížikmi sú získané experimentálne.

Prečo tento zvuk dostal meno »druhý«? Áno, je skutočne »druhý«, lebo vedľa neho v héliu II jestvuje i prvý zvuk alebo jednoducho zvuk, ktorý bol dávno známy. Najmä bolo známe, že rýchlosť šírenia sa prvého zvuku je málo závislá od teploty a je rovná 220 m/sek.

Teraz keď skúmanie druhého zvuku bolo provedené doslova vo všetkých kryogenných laboratóriách sveta, vzniklo veľa rôznych metód jeho vzbudenia a zachytenia.

No v r. 1945, keď sa o existencii tohto javu bolo možné iba dohadovať, nebolo tak jednoduché rozmýšľať o prostriedku, pomocou ktorého by bolo možné tento nepočuteľný zvuk vzbudiť a zachytiť. V pokuse V. P. Peškova bol zdrojom druhého zvuku tenký nichromový drôtik zmotaný do tvaru špirály a uložený v niekoľkých radoch na čelný povrch valca. Nichromovým drôtikom sa prepúšťal striedavý elektrický prúd, na základe čoho bolo možné napodobiť ohriatu rovinu. Keďže prúd bol striedavý, tak teplota ohriatej »roviny« v závislosti na čase sa periodicky menila. Periodické zmeny teploty, ako už vieme, vzbudzujú v blízkosti ohriatej plochy zmeny koncentrácie tepelných kvánt, ale tieto sa prejavujú ako zdroj vlnenia (šírenie vlny od »rovinného zdroja«).

V obyčajnej zvukovej vlne mení sa tlak a s tým i hustota prostredia: vo vrchole vlny sú väčšie ako je stredná hodnota tlaku a hustoty — v dole menšie. U druhého zvuku to takto nemôže byť: veď hustota hélia II prakticky nezávisí od teploty a nevelké jej kmitanie už v nijakom prípade nemôže vyvolať merateľné zmeny tlaku. Vo vlne druhého zvuku sa mení teplota a s ňou aj množstvo tepelných kvánt. Mení sa pozorovateľne i hustota normálnej zložky hélia II. Vo vrchole vlny je teplota vyššia, v dole menšia. Vo vrchole vlny je hustota normálnej zložky väčšia, v dole je menšia. Z toho vyplýva, že so šírením vlny druhého zvuku je viazaný kmitavý pohyb tepelných kvánt. Druhý zvuk je možné vysvetliť i inak, totiž ako proces vzájomného pohybu normálnej a supratekutej zložky, kmitajúcich jedna vzhľadom k druhej.

Druhý zvuk je teda proces šírenia sa tepelných vln v tekutom héliu II, proces, ktorý nie je tlmený z toho dôvodu, že prechádza prostredím majúcim veľmi malú viskozitu.

Ako zachytiť tento zvuk? Prístroje na detekciu obyčajného zvuku nie sú vhodné pre túto úlohu. Keďže druhý zvuk bol vyvolaný tepelnou metódou, zrejme pri jeho detekcii možno postupovať analogicky. Ako prijímač druhého zvuku tedy slúžil dlhý drôtik z fosforového bronzu, t. j. elektrický odpor, ktorý v oblasti nízkych teplôt závisí na teplote. Keď cez takéto teplomer prechádza vrch vlny druhého zvuku, jeho odpor sa zväčší, pri prechádzaní dolu sa zmenší a tento proces sa periodicky opakuje.

So zvláštnou pečlivosťou vyšetroval V. P. Peškov závislosť rýchlosti druhého zvuku na teplote. Jeho merania zachytili teplotný interval od bodu λ do 1° K. Ako je vidieť z obr. 10, rýchlosť druhého zvuku rýchle vzrastá od nuly pri teplote bodu λ po svoju maximálnu hodnotu, t. j. 20,3 m/sec. pri teplote $1,63^{\circ}$ K.

Zahraniční výskumníci predĺžili meranie rýchlosti druhého zvuku až po teplotu rovnú $0,02^{\circ}$ K. Všetky tieto pokusy plne potvrdili ten tvar krivky tepelnej závislosti rýchlosti druhého zvuku, ktorý predpovedel L. D. Landau.

Izotopy hélia

Fyzikovia už dávnejšie zaujímalo chovanie izotopu hélia He^3 v blízkosti absolútnej nuly, no riešiť túto otázku sa všeobecne nedarilo, lebo koncentrácia tejto prímеси v obyčajnom héliu He^4 je veľmi malá. Pomohla sama supratekutosť: vo všetkých prípadoch sa He^3 chovalo ako normálna zložka. He^3 nechcelo ísť po vrstve, nepohybovalo sa vlivom tepelných kvánt preč od zdroja tepla a viazlo v kapiláre. Na základe týchto vlastností bol založený celý rad dômyselných metód

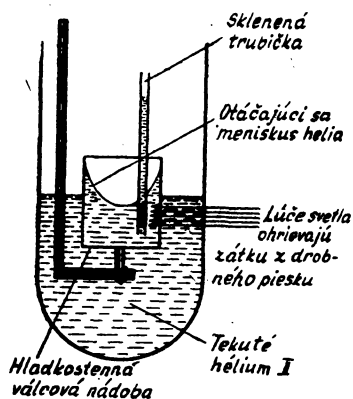
na obohatenie obyčajného hélia He^4 prímiesami izotopu He^3 . Pomocou týchto metód dala sa zvýšiť koncentrácia He^3 sto až tisíc ráz. Najúčinnějšíu metódu vypracovali sovietski výskumníci B. N. Jeselson a B. G. Lazarev, ktorí využili k tomu fontánový efekt.

Znamená to, že He^3 , ktorý tvorí malú prímies a nesleduje pohyb supratekutej zložky, sám nemôže mať vlastnosť supratekutosti? I. A. Pomerančuk teoreticky dokázal, že jednotlivé atómy supratekutej tekutiny, ak sú rozptýlené v inej supratekutej tekutine, predsa sa budú zúčastňovať na tepelnom pohybe najmä normálnej zložky. Významným potvrdením tohto náhľadu bol nový experimentálny fakt získaný na jeseň v r. 1953. Gutmanovi a Arnoldovi podarilo sa po prvý krát dostať do tekutého hélia He^4 izotop He^6 . Dokázali, že atómy radioaktívneho izotopu He^6 vchádzajúc do zoskupenia hélia II taktiež sa nezúčastňujú na pohybe supratekutej zložky.

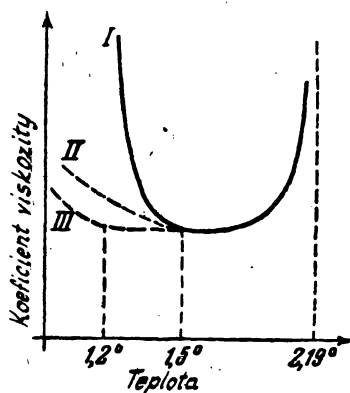
Tekuté hélium nerozpúšťa v sebe žiadne iné hmoty, iba jeho vlastné izotopy sú schopné vytvoriť s ním zvláštny roztok $\text{He}^4\text{---}\text{He}^3$ a $\text{He}^4\text{---}\text{He}^6$. Preto vlastnostiam roztoku $\text{He}^4\text{---}\text{He}^3$ najmä rozloženiu prímies medzi tekutou a plynnou fázou bol v súčasnosti venovaný rad prác. Podstatný vplyv prímies He^3 na vlastnosti tekutého hélia spočíva predovšetkým v posunutí bodu lambda na stranu nízkych teplôt a tiež vo zmenách zákona šírenia druhého zvuku, ktoré predpovedal i J. A. Pomerančuk. Experimentálne zistené rýchlosti druhého zvuku v roztokoch $\text{He}^4\text{---}\text{He}^3$ nielen potvrdili tieto predpovede, no tiež presne súhlasili s predom vypočítanými hodnotami.

V r. 1949 Sidoriak, Grilli a Hammel po prvý raz dostali čistý izotop He^3 v tekutom stave. Tak isto ako základný izotop He^4 je čisté He^3 pri nízkych teplotách nezamrzajúca tekutina a možno ju zkrystalizovať iba pod tlakom, ktorý sa rovná približne 27 atm. pri teplotách nižších ako 1°K .

Ako sa chová čisté tekuté He^3 s ohľadom na supratekutosť? Povedalo by sa, že ak je shodná štruktúra vonkajších elektronových sfér oboch izotopov, ich chovanie musí bez výnimky rovnaké pri všetkých teplotách. Ako zistil Abraham, Osborn a Weinstock, tekuté hélium He^3 však nie je supratekuté. Z toho vyplýva,



Obr. 11: Bez ohľadu na rýchle otáčanie so s nadkritickou rýchlosťou hélium II nestráca fontánový efekt. V tomto pokuse sklenená trubka nedovoľí héliu II vytvoriť fontánu, ale zdvihnutie hladiny tekutiny podporuje v trubke fontánový efekt.



Obr. 12: Krivka I — viskozita normálnej zložky zmeraná metódou tlmenia diska. Krivka II — viskozita normálnej zložky zmeraná metódou otáčajúceho sa valca. Krivka III — viskozita normálnej zložky zmeraná metódou tlmenia druhého zvuku. Nad $1,5$ abs. všetky krivky splývajú.

že fyzikálne vlastnosti kolektívu atómov môžu podstatne závisieť od vlastností jadra samého atómu.

Rôzne chovanie dvoch »množín« atómov He^4 s jednej strany a He^3 zo strany druhej, musí byť objasnené rôznosťou vlastností tepelných kvánt vznikajúcich pri nízkych teplotách. Ako už vieme, v hélíu He^4 jednotlivé tepelné kvantum môže ovlivniť tepelným pohybom iba pomerne nevelkú skupinu atómov. Keďže He^3 nie je supratekuté, jediné tepelné kvantum v tejto tekutine, ako sa zdá, prináleží, keď nie celej tekutine, tak v každom prípade dostatočne početnej »skupine« atómov, zaberajúcich pomerne veľký objem. Preto v tekutom He^4 zrovnateľne väčší počet tepelných kvánt nestačí na celú tekutinu, v tekutom He^3 , naopak malý počet tepelných kvánt stačí k tomu, aby vtiahlo do tepelného pohybu celé množstvo atómov. Toto sú zatiaľ domnienky, ktoré je možno vysloviť s ohľadom na charakter tepelných kvánt vznikajúcich v He^3 .

Kritická rýchlosť

P. L. Kapica zistil pri vyšetrowaní pohybu supratekutej zložky v úzkej medzere (viď obr. 6) za podmienok, pri ktorých normálna časť ostane nepohyblivá, že zvýšenie rýchlosti prúdenia vedie k pozoruhodným tepelným efektom, najmä vznikne rozdiel teplôt medzi vnútorným a vonkajším objemom, ktoré sú navzájom spojené úzkou medzerou. Rýchlosť, pri ktorých vznikajú tieto efekty, boli nazvané »kritické«. Existencia kritických rýchlostí ukazuje, že bezviskózne prúdenie supratekutej zložky možno pozorovať iba pri dostatočne malých pohyboch.

Kritická rýchlosť závisí od podmienok, pri ktorých sa deje pohyb hélia II. Pri pohyboch, ktoré sa odohrávajú v baňke väčších rozmerov, nastávajú kritické zjavy pri menších rýchlostiach ako pri pohybe kapiláru, alebo v medzere. Pri pohybe po medzere sa však kritická rýchlosť dosiahne ľahšie ako pri pohybe po vrstve. Kritická teplota závisí tiež od teploty.

Od tej doby, čo P. L. Kapica vysvetlil tento zjav, bol pozorovaný v tej alebo v onej forme pri väčšine pokusov konaných pre vyšetrowanie vlastností hélia II, ale predsa fyzika zatiaľ nemá systematické výsledky v tejto otázke. V dôsledku toho nebola vytvorená ani z časti uzavretá teória tohoto zjavu.

K čomu dochádza u hélia II pri dosiahnutí kritickej rýchlosti? Jedno je jasné: pri väčších rýchlostiach oba typy pohybu — supratekutý a normálny — prestanú byť nezávislými jeden na druhom. Inými slovami to znamená, že normálny pohyb začína strhovať tiež supratekutú zložku. Veľmi nedostatočné údaje o charaktere odohrávajúcich sa zmien získame v nepriamych údajov holandského fyzika Mellinka o pohybe normálnej zložky. Rozbor ukázal, že s prechodom cez kritickú rýchlosť rastie viskozita normálnej zložky.

Zachováva sa pri rýchlostiach prevyšujúcich kritickú hodnotu aspoň časť zjavov spojených so supratekutosťou? Zatiaľ bolo prevedené málo pokusov schopných odpovedať na túto otázku. Jednako ako na zvláštny príklad možno ukázať na zjavy sprevádzajúce rovnomerné otáčanie valcovej nádoby naplnenej héliom II, ktoré pozoroval Andronikašvili so spolupracovníkmi.

Pri pohybe s menšou rýchlosťou ako kritická meniskus hélia II musel by sa nápadne odlišovať od meniska iných tekutín. V skutočnosti meniskus hélia II pri rýchlostiach 10 do 50 cm/sek. (1—5 obr./sek.) sa v podstate shodoval s meniskom iných tekutín. To dokazuje, že otáčanie hélia II deje sa v danom prípade rýchlosťou značne väčšou ako je kritická.

Ako sa ukázalo, hélium II otáčajúce sa takými rýchlosťami je schopné vytvárať fontánu. Naviac, fontánový efekt zistený za týchto podmienok bol rovný fon-

tánovému efektu pozorovanému v nepohyblivej tekutine (obr. 11). Z toho plynie, že tiež v ďaleko zakritických podmienkách je zjav supratekutosti ako taký ešte zachovaný.

Nové neočakávané problémy

V tomto článku sme upozornili na meranie viskozity normálnej zložky hélia II, ktoré previedli Andronikašvili, Van Itterbeck, Hollis-Hallet a konečne Mellink. Zdálo by sa, že to stačí: aj metóda kmitajúceho disku, aj metóda pretláčania normálnej zložky cez úzku medzeru viedli k rovnakým číselným výsledkom a k rovnakej teplotnej závislosti koeficienta viskozity.

Jednako novými metódami boli získané nové hodnoty, ktoré nesúhlasia s predchádzajúcimi výsledkami. Tieto nesúhlasy dotýkajú sa hlavne oblasti teplôt, ležiacich pod $1,5^{\circ}$ K.

Tak napr. K. N. Zinovieva vyšetrovala tlmenie druhého zvuku a zistila, že viskozita hélia II v intervale od $1,8^{\circ}$ do $1,2^{\circ}$ K všeobecne nezávisí od teploty a začína vzrástať iba pod $1,2^{\circ}$ K.

Hollis-Hallet, ktorý dosiahol, ako aj druhí, metódou kmitajúceho disku prudké vzrastanie viskozity pri znížení teploty nižšie $1,5^{\circ}$, prišiel za použitia nových metód založených na plynulom otáčaní valca k celkom odlišným výsledkom. Zistilo sa, že čím je menšia rýchlosť otáčania, tým menšia je viskozita a iba po prepočtení výsledku na »nulové« rýchlosti sa viskozita hélia II, zmeraná metódou otáčajúceho sa valca, shoduje s viskozitou nameranou metódou kmitajúceho disku. No tento súhlas neplatí pre teplotu pod $1,5^{\circ}$ K. (Obr. 12.)

Zdá sa, že ako výsledok dlhého úsilia vedci vystihli podstatu iba tej zložky viskozity hélia II, ktorá je podmienená len jedným typom tepelných kvánt, totiž rotónami. Viskózne sily vznikajúce pohybom fonónov treba ešte ďalej vyšetrovať.

Veru nie často sa stretávame u hmoty s takými »úskočnými« vlastnosťami. No, ako sa často stáva vo vede, objavenie nových vlastností tekutého hélia môže sa začať so vznikom veľkých rozporov medzi výsledkami meraní jednej a tej istej fyzikálnej veličiny. Také veľké rozpory už vznikli.

A znovu sa týkajú viskozity.

Preložil ing. Július Kodrík