

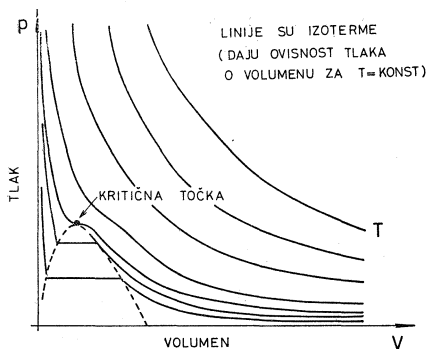
Niskotemperaturna fizika: suprafluidni helij

dr KSENOFONT ILAKOVAC, Zagreb

Toplina je poseban oblik energije, koji je sadržan u kinetičkim i potencijalnim energijama čestica (atoma, molekula, ...) od kojih su sastavljene tvari. Toplinska energija je pojam koji pridružujemo nasumnom (slučajnom, kaotičnom) gibanju čestica u tijelima. Temperatura tijela je mjera sadržaja toplinske energije u tijelu po stupnju slobode. Npr., u idealnom monoatomskom plinu svaki atom ima tri stupnja slobode: gibanje u x , y i z smjeru. Po svakom stupnju slobode na apsolutnoj temperaturi T atomi imaju prosječnu kinetičku energiju $\frac{1}{2}kT$. Ukupna toplinska energija takvog plina s N atoma iznosi stoga $N \cdot 3 \cdot \frac{1}{2} k T = \frac{3}{2} N k T$.

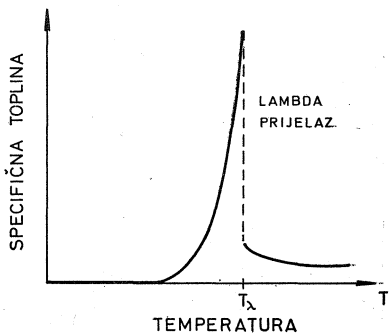
Helijev plin je monoatomski i uvijek se uzima kao najbolji primjer idealnog plina. Razlog je što su sile između helijevih atoma vrlo slabe, pa se potencijalna energija svih parova atoma može zanemariti na temperaturama iznad oko 50 K, na normalnom ili sniženom tlaku. Snižavanjem temperature javljaju se sve veća odstupanja od idealnog plina, što se opaža u p - V dijagramu u odstupanju izoterma ($T = \text{konst.}$) od Boyle-Mariotteovog zakona $p V = \text{konst}$ (vidi sl. 1).

Kritična temperatura je najviša temperatura za koju nalazimo da je $(dp/dV)_T = 0$ (tangenta izoterme u $p - V$ dijagramu je vodoravna). Točka u kojoj se nalazi da je ispunjen gornji uvjet naziva se kritičnom točkom, a to je točka u kojoj se javlja kapljevina (tekuća faza).



Sl. 1. $p-V$ dijagram He. Za više temperature vrijedi Boyle-Mariotteov zakon, a kako se temperatura približava kritičnoj, odstupanja su sve veća. Ispod kritične temperature, u uvjetima unutar crtkane linije, imamo dvije faze: tekućinu i pare.

Tlak zasićenih para neovisan je o volumenu ako je $T = \text{konst.}$ (izoterme su vodoravne).



S. 2. Specifična toplina tekućeg He. Na $T_\lambda = 2,18 \text{ K}$ opaža se diskontinuitet

Poznate su dvije vrste helijevih atoma: ^4He , koji u atomskoj jezgri sadrži 2 protona i 2 neutrona a u atomskom omotaču 2 elektrona, i ^3He , koji u svojoj jezgri sadrži 2 protona i 1 neutron, a u atomskom plaštu također 2 elektrona (po dva protona i elektrona obvezni su jer je kemijski redni broj helija 2). Na niskim temperaturama razlika od jednog neutrona bitna je u ponašanju: ^4He i ^3He .

Kritične točke ^4He i ^3He navodimo radi usporedbe:

$$^4\text{He} \quad T = 5,21 \text{ K}, \quad p = 2,26 \text{ atm}, \quad \rho = 0,041 \text{ g/cm}^3$$

$$^3\text{He} \quad T = 3,38 \text{ K}, \quad p = 1,22 \text{ atm}, \quad \rho = 0,0693 \text{ g/cm}^3$$

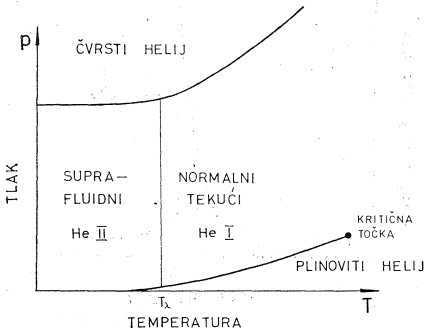
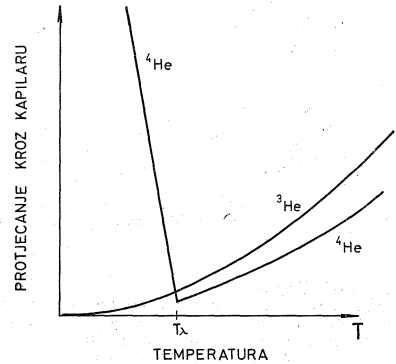
T = temperatura u kelvinima, p = tlak, ρ = gustoća.

One se mogu objasniti omjerom masa njihovih atoma (4 : 3). Jedan i drugi tekući helij ostaju tekući sve do apsolutne nule, ako se tlak znatno ne povisi. Minimalni tlak za postizanje čvrstog ^4He iznosi 25 atm ($25,3 \cdot 10^5 \text{ Pa}$), odnosno 29,3 atm ($29,7 \cdot 10^5 \text{ Pa}$) za ^3He . Privlačne sile među helijevim atomima nedovoljne su na nižim tlakovima za lokalizaciju atoma u kristalnoj rešetci. Velike razlike svojstava tekućeg ^4He i ^3He javljaju se na temperaturama oko 2K i nižima. Tada tekući ^4He postaje suprafluidan, a ^3He ostaje normalna tekućina. Npr. omjer specifičnih toplina ^4He i ^3He na 0,5 K iznosi oko 1/250, a na 0,25 K oko 1/1950! Dok ^3He postaje sve viskozniiji, ^4He postaje suprafluidan i protječe kroz najsitnije pore bez trenja! Te ogromne razlike posljedica su neobičnog uzroka: ^4He sadrži tri vrste čestica u parovima i ponaša se kao tzv. bozon. Takve čestice imaju težnju (koja se opaža na niskim temperaturama) da zaposjedaju ista energetska kvantna stanja. Kada se u nekom sustavu mnoge čestice nalaze u istom kvantnom stanju, javljaju se makroskopske kvantne pojave. ^3He sadrži jedan neutron manje, pa nespareni neutron zajedno s dva protona i dva elektrona čini da se ti atomi ponašaju kao tzv. fermioni. Za njih nalazimo još neobičnije svojstvo od prethodnoga: takve dvije čestice ne mogu biti u istom kvantnom stanju! To je Paulijev princip isključenja istih stanja poznat iz atomske fizike: u atomima nalazimo maksimalno dva elektrona u K ljusci, osam u L ljusci, itd. Tri elektrona ne mogu biti u K ljusci, jer je popunjena s dva.

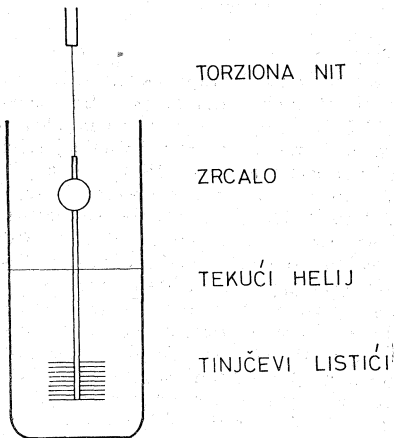
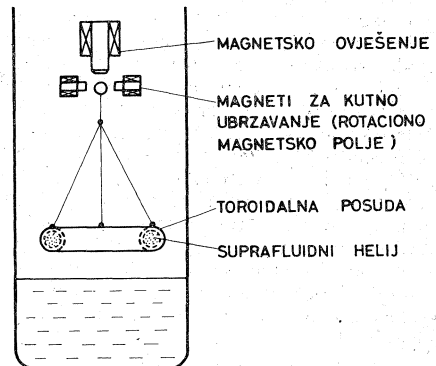
U slijedećim razmatranjima ograničit ćemo se na opis svojstava suprafluidnog tekućeg helija. To je tekućina toliko neobična da je dobila naziv kvantne tekućine. Kvantne pojave poznate su u »mikrosvijetu«, u atomima, atomskim jezgrama i molekulama. Ovdje nalazimo makroskopski sustav (npr. par litara ^4He) koji pokazuje kvantna svojstva.

Otkriće prijelaza u novo stanje tekućeg helija (Keesom 1932) proizašlo je iz mjerenja toplinskog kapaciteta. Na temperaturi $T_\lambda = 2,18 \text{ K}$ opažen je maksimum i prekid (sl. 2), koji zbog sličnosti s grčkim slovom λ dobiva naziv λ -prijelaz, a temperatura prijelaza, T_λ . Fazni dijagram

koji pokazuje granice plinovite, dviju tekućih i čvrste faze ^4He prikazan je na sl. 3. Uočimo neobično svojstvo helija: nije moguće ravnotežno stanje, u kojemu bismo imali plinovitu, tekuću i čvrstu fazu. U istraživanjima protjecanja He II (tekućeg helija na temperaturama ispod T_λ) kroz sitne propuste (*Kapica 1938, Allen 1939*) otkriveno je neobično svojstvo He II da postaje neviskozna tekućina. Na sl. 4. prikazana je usporedba protjecanja ^4He i ^3He . ^3He ponaša se normalno: snižavanjem temperature svaka tekućina postaje viskozniija. Međutim, protjecanje ^4He ispod T_λ naglo raste. Brzina protjecanja ^4He je također to veća što je propust sitniji!

Sl. 3. Fazni (p - T) dijagram ^4He Sl. 4. Protjecanje ^4He i ^3He kroz sitni propust

Za objašnjenje neobičnih svojstava He II uveden je tzv. dvofluidni model. Dio He II je normalna tekućina, a dio suprafluidna. Suprafluidnu tekućinu čine svi helijevi atomi koji se nađu u osnovnom energetska atomskom stanju (da vrijedi Paulijev princip, najviše jedan atom mogao bi biti u tom stanju). Svi atomi (oni u normalnom i oni u suprafluidnom stanju) identični su, pa se stanja neprekidno izmjenjuju između atoma u tekućini. Kako se temperatura snižava, broj atoma u normalnom stanju naglo se smanjuje. Prva mjerenja odnosa normalne i suprafluidne komponente načinjena su pomoću usporednih pločica od tinjčevih listića, koji su bili nanizani na mikroskopskim razmacima, obješeni na torzionu nit i uronjeni u tekući helij (vidi sl. 5). Iznad T_λ

Sl. 5. Mjerenja omjera normalne i suprafluidne komponente pomoću torzionog njihala uronjenog u tekući helij (*Androkašvili 1946*)

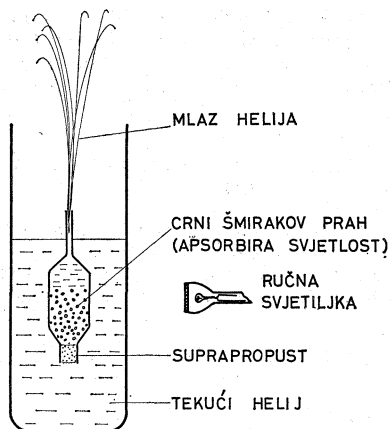
Sl. 6. Toroidalna posuda sa suprafluidnim helijem

prigušenje torzionih titranja bilo je vrlo jako. Ispod T_λ prigušenje je nestalo: helij je postao neviskozna! Međutim, frekvencija torzionih titraja mijenjala se s temperaturom: odmah ispod T_λ frekvencija je bila niska, a snižavanjem temperature frekvencija se povećavala. Frekvencija tor-

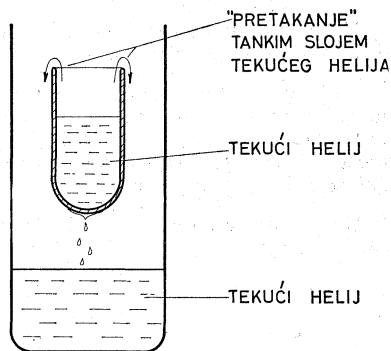
zionih titraja iznosi $\nu = 2\pi \sqrt{D/I}$, gdje je D konstanta torziona niti (omjer momenta sile i kuta zakreta niti) a I moment tromosti. Dakle, moment tromosti njihala smanjuje se pri snižavanju temperature. Razlog je sve manji postotak normalne komponente, koja slijedi gibanje pločica. Suprafluidna komponenta ne slijedi gibanje. Ona miruje, iako se na mikroskim razmacima gibaju tinjčevi listići kao i normalna komponenta.

Ako se tekući helij stavi u toroidalnu posudu, koja se okreće na temperaturi iznad T_λ , helij slijedi gibanje posude (vidi sl. 6). Ako se za vrijeme vrtnje temperatura snizi ispod T_λ , suprafluidna komponenta vrti se i dalje zajedno s posudom. Ako se zatim posuda zaustavi, suprafluidna komponenta nastavi se vrtjeti. Snižavanjem temperature povećava se dio He II u suprafluidnom stanju, pa se posuda počne vrtjeti u protivnom smjeru. Ako se međutim, temperatura malo povećava ali ostane ispod T_λ , posuda se počne vrtjeti u protivnom smjeru. Da je naziv suprafluidnost (nenadmašiva fluidnost) adekvatan, možemo razumjeti ako uočimo da se vrtnja suprafluidne komponente u posudi ne mijenja danima (ako je temperatura stalno ispod T_λ).

Opišimo kratko još neke neobične osobine He II. Ako se He II lokalno zagrije, na to mjesto velikom brzinom navire suprafluidna komponenta. To ima za posljedicu snažno hlađenje tog mjesta. Toplinska vodljivost He II veća je gotovo 200 puta od vodljivosti najboljeg toplinskog vodiča, bakra, na sobnoj temperaturi!! Druga pojava koja je posljedica velike pokretljivosti suprafluidne komponente jest pojava »arteškog zdenca« (»efekt fontane«): Neka se He II nalazi u dvije posude, koje su spojene tzv. suprapropustom, koji je sličan molekularnom situ (pregrada s mnogo vrlo sitnih rupica). Ako se jedna posuda malo zagrije, u tu će posudu navrijeti suprafluidni helij i tlak će se osjetno povećati. Ako posuda ima otvor, helij u mlazu izlazi kroz otvor (vidi sl. 7). Treća



Sl. 7. Efekt »arteškog zdenca« (fontane): kada se upali ručna svjetiljka, crni šmirakov prah apsorbira svjetlosnu energiju, i suprafluidni helij navire u posudu. Tako se dobiva mlaz visine do 25 cm



Sl. 8. Površinski transfer He II

pojava, koja je posljedica neviskoznog gibanja suprafluidne komponente jest tzv. drugi zvuk. Prvi zvuk su valovi u kojima se izmjenjuju područja povišenog i sniženog tlaka (i gustoće), a izmjene toplinske energije (zbog brzine širenja zvuka) zanemarive su. Prvi zvuk u He II izaziva se poput zvuka u zraku mehaničkim silama. Drugi zvuk je titranje suprafluidne u odnosu na normalnu komponentu. Mo su valovi toplinske energije pri stalnom tlaku. Ti valovi proizvode se grijanja uronjenim u He II.

Suprafluidni helij pokazuje svojstvo neograničenog penjanja uz površine s kojima je u dodiru. Da bi ostao suprafluidan, mora temperatura površine biti ispod T_λ ! Ako u posudi imamo He II, onda se ta tekućina penje u vidu tankog sloja, prelazi rub posude, i s najniže točke kapa. Ta pojava naziva se površinski transfer (sl. 8). Nalazi se da je brzina gibanja helija i debljina sloja ovisna o vrsti i kvaliteti podloge.

Tekući ^3He pokazuje također pojavu suprafluidnosti, ali na znatno nižim temperaturama (oko 0,001 K). Kvalitativno objašnjenje jest da se ^3He atomi vežu u parove koji onda čine bozonske čestice. U tim stanjima nalazimo niz novih svojstava. Smjese ^3He i ^4He pružaju nam još daljnje pojave, koje pobuđuju veliki interes. Kao što se vidi, niskotemperaturna fizika pruža još velike mogućnosti istraživanja svojstava materije.