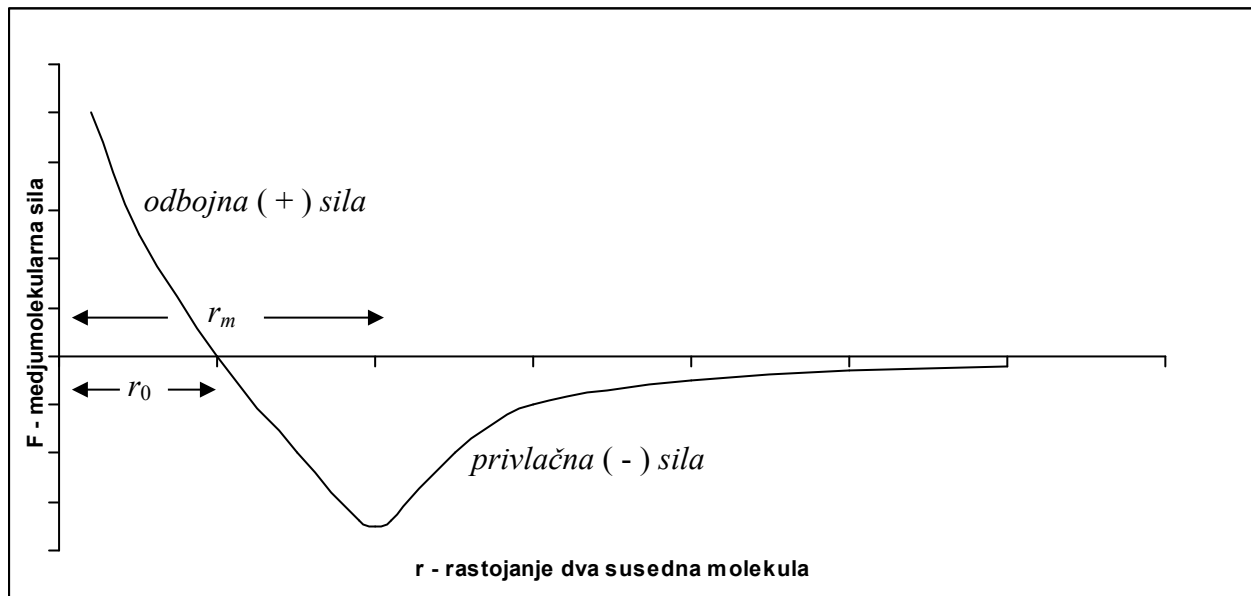


# MOLEKULARNA FIZIKA

## FIZIKA AGREGATNIH STANJA

### Međumolekularne sile



sl. 1.

Na grafiku na sl. 1. je prikazana zavisnost sile, kojom međusobno deluju dva susedna molekula, od njihovog međusobnog rastojanja.

Rastojanje ta dva molekula ( $r$ ) je prikazano na horizontalnoj osi, dok je vrednost međumolekularne sile ( $F_{mm}$ ) prikazana na vertikalnoj osi.

Za jednostavno čitanje grafika najbolje je pretpostaviti da je jedan molekul uvek u koordinatnom početku, dok je drugi negde na  $r$  – osi. Tamo gde se nalazi pokretni molekul treba povući vertikalnu do grafika. Dužina te vertikale pokazuje jačinu sile kojom ta dva molekula međusobno deluju. Ako je grafik iznad  $r$  – ose tada je sila pozitivna, a to znači da je odbojna. A ako je grafik ispod  $r$  – ose tada je sila negativna tj. privlačna.

Funkcija ima nulu na rastojanju koje ćemo obeležiti sa  $r_0$ . Funkcija ima minimum na rastojanju koje se može obeležiti sa  $r_m$ .

Grafik se čita na sledeći način:

- na rastojanju  $r_0$  dva molekula uopšte ne deluju međusobno nikakvom silom,
- na rastojanju manjem od  $r_0$  dva molekula se odbijaju, a što su bliže to je odbijanje jače,
- na rastojanju većem od  $r_0$  ali manjem od  $r_m$  dva molekula se privlače, a sa povećanjem rastojanja privlačenje je sve jače,
- na rastojanju  $r_m$  međusobno privlačenje je maksimalno,
- na rastojanjima većim od  $r_m$  sila je i dalje privlačna, ali sada sa povećanjem rastojanja sila slabi.

Osnova delovanja međumolekularne sile je električna – Kulonova sila. Prilikom međusobnog približavanja ili udaljavanja dva molekula dolazi do prostorne preraspodele naelektrisanja u njima što izaziva njihovo međusobno dejstvo.

Pomoću ovog grafika se objašnjava veliki broj pojava u prirodi. Jedna od njih je mogućnost da se odredi međusobno rastojanje susednih molekula u čvrstim, tečnim i gasovitim telima, a na osnovu nekih poznatih makro – osobina ovih tela.

O čvrstim telima znamo da su velike gustine – što ukazuje na mala rastojanja između molekula, a istovremeno znamo da se molekuli ne kreću slobodno po telu – jer bi tada oblik čvrstog tela bio promenljiv, već znamo da oni osciluju oko svojih stalnih položaja u telu – jedino rastojanje

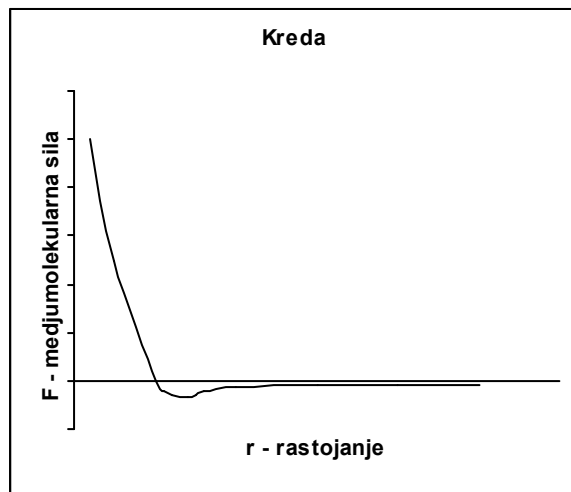
na grafiku koje može objasniti oscilovanje molekula je rastojanje  $r_0$ . Ovo objašnjenje je sledeće: zamislimo dva molekula na rastojanju  $r_0$  – tada između njih ne deluje nikakva sila. Iz definicije unutrašnje energije tela znamo da molekuli imaju svoju ličnu energiju na svim temperaturama većim od apsolutne nule. Jednim delom ova energija je kinetička, a drugim delom potencijalna. Zbog toga što poseduje kinetičku energiju molekul se kreće i ako pokuša da se udalji od sebi susednog molekula onda ga privlačna sila vrati nazad, a kada pokuša da mu se približi tada ga odbojna međumolekularna sila vraća u početni položaj, što znači da posmatrani molekul osciluje.

Kao potvrdu prethodne analize možemo navesti i otpornost čvrstih tela na istezanje i sabijanje. Naime ako čvrsto telo pokušamo da istegnemo to dovodi do udaljavanja njegovih molekula koji tada počnu da se privlače i združenim privlačenjem pružaju otpor istezanju i eventualnom kidanju. Ako pak pokušamo da sabijemo čvrsto telo to dovodi do približavanja njegovih molekula i do pojave odbojnih međumolekularnih sila koje svojim združenim delovanjem sprečavaju dalje sabijanje. Treba primetiti da u oba ova slučaja međumolekularne sile ne samo da pružaju otpor pokušanoj deformaciji, već i po prestanku dejstva sile, koja vrši deformaciju, pokušavaju da vrata molekule na početna rastojanja ( $r_0$ ), tj. pokušavaju da telo vrata u prvobitni oblik – što je osnova osobine elastičnosti čvrstih materijala.

Tečnosti su nešto razređenije od čvrstih tela ali ne previše – to ukazuje da su rastojanja između susednih molekula nešto veća od  $r_0$ , ali ne previše velika. Dakle rastojanja susednih molekula su malo veća od  $r_0$ , ali i manja od  $r_m$ . Između njih deluju slabe privlačne sile koje drže tečnost na okupu, a molekulima omogućavaju haotično kretanje u okviru tečnosti. Molekuli se pod dejstvom ovih slabih međusobnih privlačenja ipak ne vraćaju na rastojanja  $r_0$ , zato što imaju veću kinetičku energiju od molekula čvrstih materijala, a dobili su je zagrevanjem – ne treba ispustiti iz vida činjenicu da tečnost nastaje od čvrstog tela topljenjem a za to je osnovni način zagrevanje tela.

Gasovi su jako razređeni u odnosu na tečnosti i čvrste materijale, što ukazuje na to da su molekuli gasa na jako velikim međusobnim rastojanjima. To rastojanje je mnogo veće od  $r_0$  i  $r_m$  omogućava veliku slobodu molekulima jer između njih deluju vrlo slabe privlačne sile, koje je moguće i zanemariti – kao u slučaju idealnog gasa. Još jedna važna karakteristika gasova je da su oni nastali zagrevanjem i isparavanjem tečnosti pri čemu su molekuli dobili tako veliku kinetičku energiju da su u stanju da »lete« u gravitacionom polju, za razliku od molekula tečnosti koji za to nemaju dovoljno velike brzine – pa zato tečnost uvek zauzima dno posude u kojoj se nalazi, dok gas ispunjava jednako celu njenu zapreminu. Ovo poslednje svakako nema neposredne veze sa međumolekularnim silama u gasu i u tečnosti, ali osobina da se gasovi mogu relativno lako sabijati ili širiti je u neposrednoj vezi sa velikim međusobnim rastojanjima molekula gasa.

*Zanimljivo je primetiti da razmišljanje o razlici između agregatnih stanja zasovanoj na različitoj međusobnoj udaljenosti molekula može da nas dovede na pomisao da bi se jedan gas mogao prevesti u tečno stanje ne samo hlađenjem, već i enormnim sabijanjem pri čemu bi bilo potrebno da molekule dovedemo na rastojanja karakteristična za tečnost, ali i da bi se na isti način tečnost mogla pretvoriti u čvrsto telo. Da je to istina može nam poslužiti zemljino jezgro koje se sastoji od nikla i gvožđa ( Ni – Fe zona ). Temperatura jezgra je oko 7000 stepeni Celzijusa ( što je za oko 2000 stepeni toplije od površine Sunca ), ali umesto da bude u gasovitom stanju ova mešavina dva metala je ipak u čvrstom stanju – zbog ogromnog spoljašnjeg pritiska ( oko 1 000 000 puta većem od atmosferskog, a radi poređenja pritisak u gumama automobila je oko 2 puta veći od atmosferskog ) kojem je izložena.*



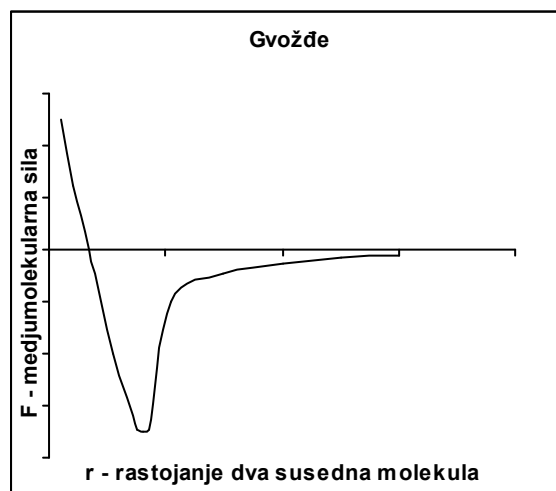
sl. 2.

Na kraju, grafik nije isti za sve materijale.

Na primer: školska krede nije uopšte sklona istezanju, ali i pri vrlo slaboj sili, koja je isteže, dolazi do njenog kidanja. To ukazuje na to da je grafik izuzetno plitak ali i uzan u oblasti oko rastojanja  $r_m$ .

Zato su privlačne sile između molekula krede izuzetno slabe, a i na već sasvim malo povećanim rastojanjima, do kojih dolazi zbog sile koja vrši istezanje, privlačenje će naglo opasti i molekuli krede više neće moći da spreče svoje razdvajanje, tj. kidanje.

Sa druge strane gvožđe ima vrlo dubok i uzan deo grafika oko  $r_m$  što ukazuje da i sa veoma malim povećanjem rastojanja između molekula (pri istezanju) dolazi do naglog i velikog povećanja privlačnih sila između susednih molekula što, osim u slučaju izuzetno jakih sila istezanja, onemogućava dalje istezanje gvožđa. Međutim, ako su sile istezanja ipak dovoljno jake da savladaju združene privlačne međumolekularne sile tada će molekuli gvožđa biti dovedeni na rastojanja veća od  $r_m$ , a tu privlačne sile naglo opadaju, pa će posledica biti kidanje posmatranog komada gvožđa.



sl. 3.

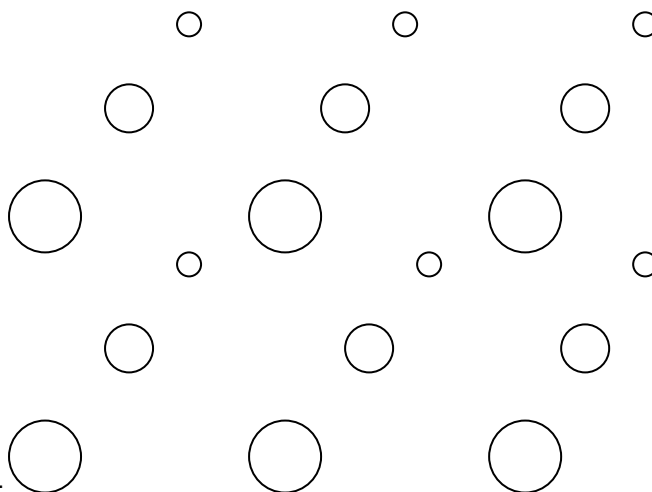
### Kristalni i amorfni materijali

Svi čvrsti materijali se mogu podeliti na kristalne i amorfne. Možemo ih razlikovati na mikro i na makro – nivou.

Na mikro – nivou, tj. na nivou molekula može se reći da kristali imaju, dok amorfni materijali nemaju kristalnu rešetku.

Ovde treba reći da će se pod molekulima, u ovom tekstu, podrazumevati i atomi, zato što se oni mogu smatrati jednoatomnim molekulima.

Kada bi mogli da vidimo molekule i međumolekularni prostor između njih, tada bi u kristalnom materijalu mogli da uočimo da izvestan broj susednih molekula gradi neku pravilnu geometrijsku figuru: kocku, tetraedar, oktaedar itd. što je prikazano na sl. 4. Radi jednostavnosti je izabrana figura – kocka. Ali, ako se pogledaju osam molekula levo, desno, gore ili dole može se videti da oni grade kocke i da je tako u svim pravcima u kristalu. Na osnovu toga se može reći da je kristalna rešetka pravilan geometrijski raspored izvesnog broja susednih molekula koji se periodično ponavlja u svim pravcima u kristalu.



sl. 4.

Ovo periodično ponavljanje je jako važno jer se i kod amornih materijala može desiti da susedni molekuli grade pravilnu geometrijsku figuru, ali njima susedni molekuli uopšte ne moraju da imaju isti geometrijski raspored. Dakle, amorfni materijali nemaju kristalnu rešetku. Njihovi molekuli su haotično raspoređeni po telu, a njihov ovako nepravilan raspored je uslov da se oni, istina vrlo sporo, mogu premeštati po unutrašnjosti tela. To dalje znači da amorfni materijali nemaju stalan oblik, pa je to i razlog za njihov naziv jer je: morfos – oblik, a prefiks a – znači negaciju. Dakle, prevod reči amorfan je bezobličan.

Na makro – nivou razlika između kristalnih i amornih materijala je u načinu topljenja.

Ako uzmimo komad leda, kao primer kristalnog tela, pa ga neprekidno zagrevamo – kada se njegova temperatura poveća na  $0^{\circ}C$ , tada otpočinje topljenje ali tada možemo uočiti da temperatura

više ne raste iako led neprekidno zagrevamo. Temperatura će ponovo početi da raste tek kada se sav led istopi. Na ovaj način je tačka topljenja leda strogo određena, pa ju je lako meriti. Ovo je osobina svih kristalnih materijala. Najkraće objašnjenje je da temperatura leda dok se topi ne raste zbog toga što količina toplote koju on prima u tom periodu ne ide na povećanje njegove unutrašnje energije tj. temperature, već na rasturanje njegove kristalne rešetke.

Ako sada posmatramo topljenje nekog amorfno materijala – recimo jednog komada plastike, a pod istim uslovom da je zagrevanje neprekidno, tada će temperatura plastike neprekidno rasti, a pre prelaska u tečnost plastika će proći kroz razmekšano – želatinozno stanje. Zbog neprekidnog porasta temperature, kao i zbog različitog stepena razmekšanosti pritom, praktično je nemoguće odrediti tačku topljenja amorfno materijala.

Primeri kristalnih materijala su: drago kamenje, ali i drugi prirodni ili veštački kristali kao kvarc, plavi kamen, šećer, sve vrste leda ( ne samo led od vode, već i vodonični led, azotni led, ugljen dioksidni led itd.). Takođe, svi metali se mogu naći u kristalnom stanju.

Primeri amorfno materijala su: plastika, guma – koja je na sobnoj temperaturi u želatinoznoj fazi, ali ne samo guma već i žele bombone, puding, pihtije, ratluk, smola, vosak, itd. Amorfno materijali su još: drvo, asfalt, staklo, itd.

*Kod ovih primera staklo, bar po svom izgledu, više liči na kristale nego na amorfne materijale. Ipak staklo je amorfno. Treba se samo setiti da se u fabrikama stakla stakleni predmeti prave i duvanjem. Staklo koje se duva nije ni u čvrstom a ni u tečnom stanju nego se nalazi u želatinoznoj fazi – a to znači da je amorfni materijal. Zanimljivo je da stara prozorska okna na sunčanoj – južnoj strani kuće mogu da promene oblik tako što se pod dejstvom sunca staklo zagreva i omekšava, a onda sporim višegodišnjim slivanjem nestane gornji deo okna. Ovo je i najbolji primer za tvrdnju da su amorfno materijali bezoblični i da je jedna od njihovih glavnih osobina da sporo teku.*

*Da je i asfalt amorfno materijal jasno je ako pogledamo tragove ( kolotečine ) koje u njemu ostavljaju vozila a naročito leti kada se asfalt razmekša. Zanimljiva je pojava poprečnih talasastih nabora na asfaltu ispred semafora. Oni su posledica kočenja, kada točkovi prestanu da se kotrljaju i počnu da se klizu. Tada vozilo smiče sloj razmekšanog asfalta i gurajući ga ispred sebe pravi ove talase na ulici.*

*Često pitanje na mojim predavanjima je: a kako drvo može da bude amorfno materijal kada će se ono pri zagrevanju sigurno upaliti i izgoreti, uostalom ko je ikada video razmekšano ili tečno drvo ? Izgleda kao logičan prigovor zar ne ? Međutim ovde nije uzeto u obzir da drvo gori samo u prisustvu kiseonika – treba znati da je gorenje proces burne oksidacije. Ako drvo zagrevamo bez prisustva kiseonika tada će se ono, kao i svaki drugi amorfno materijal, prvo razmekšati, pa istopiti, da bi sa nastavkom zgrevanja na kraju isparilo.*

*Prethodni primer me je asociirao na još jednu pogrešnu predstavu koju jako često imamo. Reč je o utisku da vazduh može da bude samo u gasovitom stanju, dok recimo dijamant može da bude samo čvrst. Ovakvo mišljenje je posledica našeg neposrednog i svakodnevnog iskustva sa ovim materijalima. Ipak, vazduh se može ohladiti dovoljno da kondenzuje, a onda da se kristalizuje u led, kao što se dijamant može zagrejati do tačke topljenja, pa onda do tačke ( zamislite ) ključanja, a to znači do isparavanja – i ovde je kao i kod drveta potrebno ukloniti kiseonik zato što je i ugljenik sklon burnoj oksidaciji. Ako neko pomisli da je ovo pominjanje ugljenika greška, moram da ga razuverim, zato što iz hemije znamo da je dijamant jedan od dva pojavna oblika ugljenika, dok je drugi pojavni oblik ugljenika – grafit. Umesto naziva – pojavni oblik možemo koristiti naziv – alotropska modifikacija.*

*Kao završnu reč o ovom, mogu reći da su naučnici u laboratorijama do sada uspeli da svaki materijal pretvore u svako od tri osnovna agregatna stanja: čvrsto, tečno i gasovito sa samo jednim izuzetkom – a to je helijum koji još uvek niko nije uspeo da kristalizuje. Razlog je to što temperatura potrebna za očvršćavanje helijuma jeste tako blizu apsolutne nule, da je do sada nismo uspeli da postignemo.*

## Deformacije čvrstih tela

Sve deformacije čvrstih tela se mogu podeliti na 5 osnovnih vrsta, a to su:

- istezanje
- sabijanje
- savijanje
- uvrtnje ( torzija ) i
- smicanje.

Sve ove deformacije mogu biti:

- elastične i
- plastične ( neelastične ).

Deformacija tela je elastična ako se po prestanku dejstva sile, koja vrši deformaciju, telo vrati u prvobitni oblik.

Deformacija tela je plastična ako i po prestanku dejstva sile, koja vrši deformaciju, telo ostane trajno deformisano.

Kao primer za ove dve vrste deformacija možemo uzeti oprugu iz hemijske olovke. Ako je malo istegnemo pa pustimo ona će se vratiti u prvobitni oblik – što je primer za elastičnu deformaciju. Ako je jako istegnemo, tada će ona i po prestanku dejstva sile istezanja ostati trajno istegnuta – što je primer za plastičnu deformaciju.

### Hukov zakon

Ovo je zakon koji važi isključivo za elastično istezanje. Na sl. 5. je prikazan jedan štap koji stoji vertikalno i koji je pričvršćen za nepomičnu podlogu. Na njega deluje sila  $F$  naviše i vrši njegovo istezanje. Početna dužina štapa je obeležena sa  $l$ , dok je površina njegovog poprečnog preseka obeležena sa  $S$ . Ova veličina pokazuje debljinu štapa. Štap pod dejstvom sile povećava svoju dužinu za  $\Delta l$  i ova veličina se u fizici naziva – apsolutno istezanje.

Hukov zakon je obrazac koji pokazuje kojim je veličinama apsolutno istezanje  $\Delta l$  direktno, a kojim obrnuto srazmerno. Taj obrazac glasi:

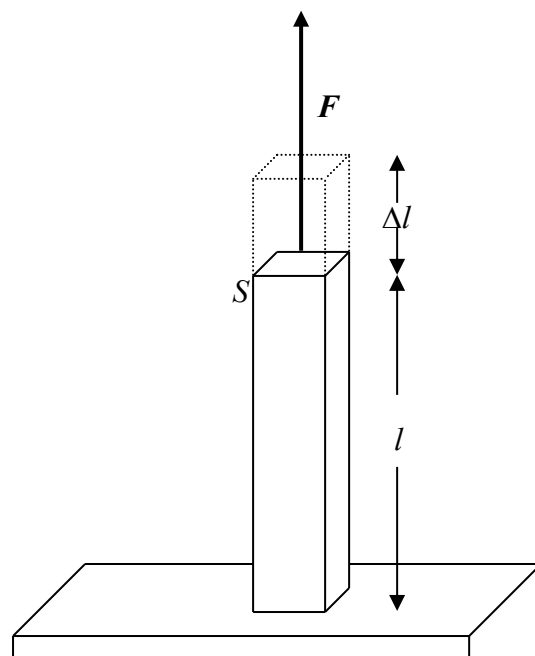
$$\Delta l = \frac{F \cdot l}{E \cdot S}.$$

Dakle, što je sila, koja vrši istezanje, jača to je i apsolutno istezanje tela veće.

Što je štap duži – apsolutno istezanje je veće. Uzmite kao primer dva lastiša, jedan dug 10 cm, a drugi dug 1 m. Ako ih istežete jednakom silom tada će povećanje dužine biti mnogo veće kod dužeg lastiša – približno 10 puta veće.

Što je štap deblji to je njegovo apsolutno istezanje manje.

Na kraju, apsolutno istezanje zavisi od vrste materijala od koga je štap napravljen. Uzmite kao primer recimo gumu i čelik. Veličina  $E$  u imeniocu Hukovog zakona je Jungov moduo elastičnosti i on je konstanta za dati materijal, ali za različite materijale ima različite vrednosti. Ono što je neobično u vezi sa ovom konstantom je njen položaj u obrascu. S' obzirom da se nalazi u imeniocu sledi da je apsolutno istezanje obrnuto srazmerno vrednosti  $E$ . Ako uzmemo da je elastičnost čelika u odnosu na gumu mnogo manja, to znači da će se čelik mnogo manje istegnuti od gume, a odatle proizilazi da je Jungov moduo čelika u odnosu na gumu mnogo veći. Dakle, situacija je malo neobična: konstanta čiji naziv je moduo elastičnosti kod elastičnijih materijala ima manju vrednost.



sl. 5.

Uobičajeno je da se Hukov zakon prikazuje i na sledeći način:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{E} \cdot \frac{F}{S}$$

Veličina:  $\frac{\Delta l}{l} = \delta$  se naziva relativno istežanje, a pokazuje za koliko se poveća dužina jedinice dužine ( 1 m ) štapa.

Veličina:  $\frac{F}{S} = \sigma$  se naziva napon na istežanje, a pokazuje kolika sila deluje na jedinicu površine poprečnog preseka štapa.

Zamenom se dobija:

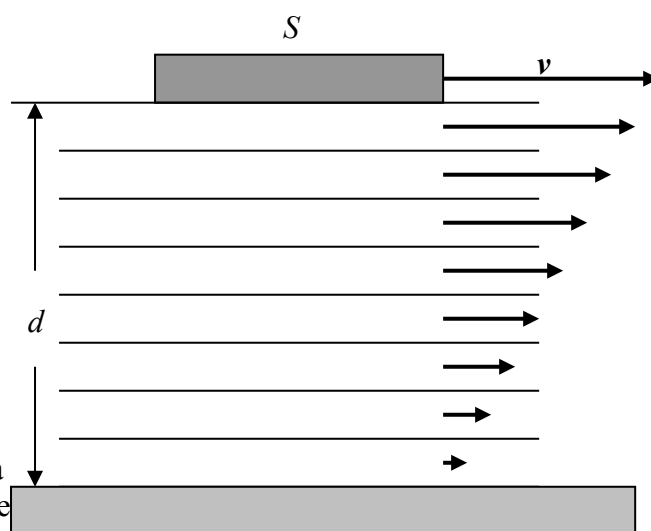
$$\delta = \frac{1}{E} \cdot \sigma$$

Dakle, Hukov zakon možemo izreći na sledeći način: relativno istežanje tela je direktno srazmerno naponu na istežanje kojem je ono izloženo.

### Njutnov zakon viskoznosti.

Njutnov zakon viskoznosti se odnosi na slučaj prikazan na sl. 6. Površinom tečnosti se, pod dejstvom neke spoljašnje sile kreće ploča od čvrstog materijala brzinom  $v$ . Dodirna površina ploče i tečnosti je  $S$ , a dubina tečnosti, tj. rastojanje od ploče do dna  $d$ .

Između ploče i površinskog sloja tečnosti deluje viskozna sila ( sila trenja ) koja se zasniva na međusobnom privlačenju molekula ploče sa molekulima tečnosti. Ova sila deluje na ploču u smeru suprotnom od smera njenog kretanja, dok na površinski sloj tečnosti deluje u smeru kretanja ploče. Dakle, njeno dejstvo je dvojako. Ova sila se suprotstavlja spoljašnjoj sili koja pokreće ploču i ako su ove dve sile iste jačine to prouzrokuje ravnomerno kretanje ploče. A delujući na površinski sloj tečnosti viskozna sila ga vuče u smeru kretanja ploče i uzrokuje njegovo kretanje u smeru kretanja ploče. Na isti način viskozna sila deluje između svaka dva susedna sloja tečnosti, sve do dna. Posledica je da se slojevi tečnosti, gledano prema dnu, kreću sve sporije – što je prikazano na slici.



sl. 6.

Njutnov zakon viskoznosti se odnosi na viskoznu silu i glasi:

$$F_v = \eta \cdot S \cdot \frac{v}{d}$$

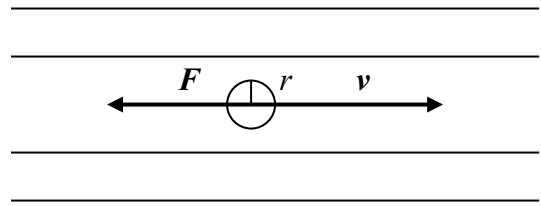
Dakle, u primeru na sl. 6. viskozna sila je direktno srazmerna dodirnoj površini ploče i tečnosti, kao i brzini ploče, a obrnuto je srazmerna dubini tečnosti. Viskozna sila zavisi i od vrste tečnosti preko vrednosti koeficijenta viskoznosti  $\eta$ . Za datu tečnost koeficijent viskoznosti je konstanta, ali za različite tečnosti ima različitu vrednost. Kao primer za tečnost sa velikim koeficijentom viskoznosti može se uzeti motorno ulje. Zato nije neobično što mnoga ulja u svom imenu imaju naziv: »visk« ili čak »super visk«.

Razlika viskozne sile u odnosu na silu suvog trenja je što ova prva zavisi od dodirne površine. Takođe, ne postoji viskozna sila mirovanja – što znači da se ploča koja miruje na površini tečnosti može pokrenuti proizvoljno malom silom.

## Stoksov zakon

Ovaj zakon se odnosi na silu kojom tečnost pruža otpor kretanju tela kroz nju, što je prikazano na sl. 7. Telo ima loptasti oblik poluprečnika  $r$ , a kroz tečnost se kreće brzinom  $v$ . Ako je koeficijent viskoznosti tečnosti obeležen sa  $\eta$ , tada Stoksov zakon glasi:

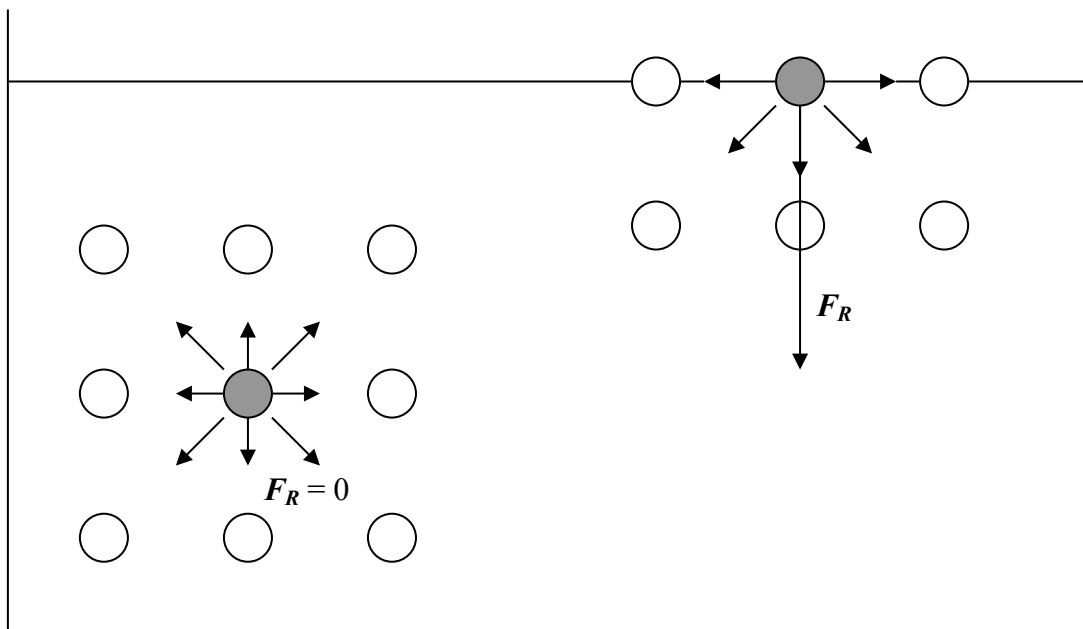
$$F = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v.$$



sl. 7.

## Površinski napon kod tečnosti

Površinski napon je osobina površine svake tečnosti. Postojanje ove osobine je moguće objasniti na sledeći način. Posmatrajmo jedan molekul koji se nalazi unutar neke tečnosti i jedan molekul koji se nalazi na njenoj površini ( sl. 8. ). Posmatračemo i sile kojima okolni molekuli tečnosti deluju na izabrana dva molekula.

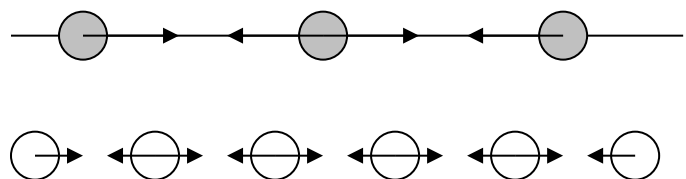


sl. 8.

Okolni molekuli ih privlače međumolekularnim silama, zato što se susedni molekuli tečnosti nalaze na rastojanju:  $r_0 < r < r_m$  - vidi grafik međumolekularnih sila ( sl. 1. ).

Razlika između ova dva izabrana molekula je u tome što je molekul unutar tečnosti sa svih strana okružen molekulima, pa se njihova privlačenja međusobno poništavaju, dok iznad površinskog molekula nema molekula tečnosti iznad njega, pa privlačne sile koje na njega deluju naniže nisu poništene. Vektorski zbir ovih neponištenih sila je rezultujuća sila koja deluje na svaki površinski molekul – pokušavajući da ga odvuče sa površine u dubinu tečnosti.

Pod dejstvom ove rezultujuće sile izvestan broj površinskih molekula odlazi u dubinu, pa zbog toga na površini tečnosti ostaje smanjeni broj molekula koji se preraspoređuju tako da pokriju čitavu površinu tečnosti – a to znači na međusobno povećanim rastojanjima ( sl. 9. ) u odnosu na molekule koji čine dublje sloje-



sl. 9.

ve tečnosti. Zbog toga su rastojanja susednih molekula na površini tečnosti bliska rastojanju  $r_m$ , a to znači da su međusobna privlačenja između njih pojačana ( vidi sl. 1. ).

Površinski napon kod tečnosti se upravo i zasniva na ovom pojačanom privlačenju površinskih molekula.

Posledica je da molekuli površine tečnosti jako teže da se međusobno približe, a to znači da tečnost teži da smanji svoju slobodnu površinu. Ovo je i prvi način da se iskaže definicija površinskog napona. Dakle: površinski napon je težnja tečnosti da smanji svoju slobodnu površinu.

Zanimljivo je da je površinski napon uzrok što su kapi tečnosti okrugle. Tečnost u kapi teži da smanji svoju slobodnu površinu, a iz geometrije je poznato da od svih tela jednake zapremine lopta ima najmanju površinu, pa zato kap zauzima oblik lopte.

Površinski napon je uzrok da je površina tečnosti u sudu ravna – zato što je to način da površina bude minimalna – izuzev kada neka spoljašnja sila izazove neravnu površinu, tj. njenu ustalasanost.

*Mehur od sapunice posle izvesnog vremena mora da prsne. Zid mehura je u tečnom stanju, a ova tečnost ima jako veliku površinu – pri čemu u površinu mehura ulazi i njegova spoljašnja i unutrašnja površina. Zbog površinskog napona mehur smanjuje svoju slobodnu površinu tako što se smanjuje, a višak tečnosti koji na ovaj način nastaje formira kap na dnu mehura. Kada ova kap dovoljno naraste gravitacija je, vukući je naniže, otkine od mehura i tada mehur prsne.*

Drugi način da se iskaže površinski napon glasi: površina tečnosti se ponaša kao zategnuta elastična membrana.

Ako na površinu vode (  $\rho = 1 \frac{gr}{cm^3}$  ) pažljivo spustimo gvozdenu (  $\rho = 7.8 \frac{gr}{cm^3}$  ) iglu pljoštimice, a tako da njena gornja površina ostane suva – što znači da se površina vode nalazi ispod igle – tada će igla ostati da »leži« na površini vode, tj. neće potonuti. Ovde je nepravilno reći da igla »pliva«, jer na vodi mogu plivati samo ona tela čija je gustina manja od gustine vode. Način da igla potone je da svojom težinom razmakne molekule vode i da prođe između njih na putu do dna. Međutim, površinski molekuli vode se jako privlače zbog površinskog napona i pokazuje se da igla nema dovoljnu težinu da ih razmakne, ona samo uspe da ulegne površinu, pa tako ostaje da »leži« na površini kao na nekoj zategnutoj elastičnoj membrani.

*Ovaj efekat koristi larva komarca, koja je takođe teža od vode, a koja ipak leži na površini bare što joj omogućava da diše. Jedan od načina za uništavanje ovih larvi je da se po površini bare prospe mala količina petroleja. Kako je gustina petroleja manja od gustine vode on će ostati na površini. Kako se molekuli petroleja međusobno izuzetno slabo privlače, ali se zato mnogo jače privlače sa molekulima vode doći će do razlivanja petroleja po celoj površini bare. Petrolej će se tada podvući ispod larve komarca, ali kako je površinski napon petroleja mnogo slabiji od površinskog napona vode ( zato što je osnova površinskog napona jako privlačenje susednih površinskih molekula, a privlačenje između molekula petroleja je izuzetno slabo ), težina larve će razmaknuti molekule petroleja i ona će potonuti i udaviće se. Pritom treba imati na umu da je površinski sloj molekula vode prekriven slojem molekula petroleja – što znači da voda više nema slobodnu površinu, a samim tim nema ni površinski napon.*

U prethodnom primeru se može uočiti da postoje dve vrste privlačnih međumolekularnih sila:

- između susednih molekula iste supstance – ove sile u fizici imaju ime: kohezione sile i
- između susednih molekula dve različite supstancije – ime ovih sila je: athezione sile.

*Zanimljivo je da izuzetno slabe kohezione sile petroleja u odnosu na prilično jake athezione sile sa velikim brojem drugih materijala omogućava neočekivano lako merenje prečnika molekula petroleja. Eksperiment je prilično jednostavan. Prvo se pomoću graduisane menzure precizno izmeri zapremina neke male količine petroleja. Zatim se ovaj petrolej prospe po površini mirne vode. Zbog jakih athezionih, a slabih kohezionih sila petrolej se razlije tako da svaki molekul petroleja može da dođe u kontakt sa površinskim molekulima vode. To znači da se petrolej razlio tako da je formirao jednomolekularni sloj na površini vode. Sada je potrebno da se precizno izmeri površina (  $S$  ) razlivenog petroleja i kako je već poznata njegova zapremina (  $V$  ), jasno je da je debljina (  $d$  ) sloja petroleja:*



$$d = \frac{V}{S}.$$

Kako je sloj petroleja jednomolekularni to znači da je izračunata debljina sloja jednaka prečniku molekula petroleja.

Naročito jake athezione sile petrolej pokazuje u kontaktu sa staklom. Zato će se petrolej u petrolejskoj lampi penjati iz rezervoara na dnu petrolejke uz staklene zidove bez obzira na gravitacionu silu. Posle dovoljno dugog vremena – dva tri meseca, petrolej će uspeti da se popne na vrh i da se preko njega prelije zamastivši spoljašnje zidove lampe. Zato u nekim krajevima narod pogrešno veruje da petrolej može da prođe kroz staklene zidove.

Najlakši način da se uvedu dve važne veličine koje opisuju površinski napon tečnosti, a to su: koeficijent površinskog napona  $\gamma$  i sila površinskog napona  $F_{pn}$ , je da se pri objašnjenju ove osobine tečnosti upotrebi energetski pristup.

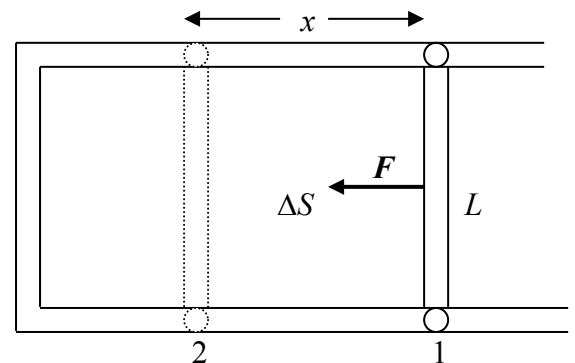
Pojačane privlačne međumolekularne sile između susednih molekula na površini tečnosti znače da površinski molekuli tečnosti imaju povećanu potencijalnu energiju. Kako svaki sistem teži da pređe u stanje sa što manjom energijom, tako i površina tečnosti teži da smanji svoju potencijalnu energiju, a to je moguće postići smanjenjem te površine – što i jeste formulacija ove osobine tečnosti.

Međutim, ako želimo da povećamo površinu tečnosti, tada moramo izvršiti rad  $A$ . Koliki će ovaj rad biti zavisi od vrste tečnosti, a veličina koja opisuje prirodu tečnosti je koeficijent površinskog napona  $\gamma$ . Koeficijent površinskog napona date tečnosti je brojno jednak onom radu koji treba izvršiti da bi došlo do jediničnog povećanja površine te tečnosti:

$$\gamma = \frac{A}{\Delta S},$$

gde je  $\Delta S$  rečeno povećanje površine tečnosti.

Vežu između koeficijenta površinskog napona i sile površinskog napona najlakše je uspostaviti iz primera prikazanog na sl. 10. Na slici je pravougaoni ram čija je desna strana pomična žica dužine  $L$ . U ramu je opna od sapunice. Ova opna je u tečnom stanju, a njena površina je ogromna u odnosu na vrlo malu zapreminu, pri čemu treba imati na umu da opna ima dvostruku površinu. Zato će jaka sila površinskog napona vući pokretnu stranicu ulevo, težeći da smanji slobodnu površinu opne. Neka je put koji pritom ona pređe, od tačke 1 do tačke 2 obeležen sa  $x$ .



sl. 10.

Sada rad koji je pritom izvršila sila površinskog napona može da se odredi na dva načina.

Prvi način se zasniva na prethodnoj definiciji koeficijenta površinskog napona:

$$\gamma = \frac{A}{\Delta S} \quad \Rightarrow \quad A = \gamma \cdot \Delta S.$$

Sa slike se vidi da je promena površine:

$$\Delta S = 2L \cdot x$$

pa je:

$$A = 2\gamma \cdot L \cdot x$$

Drugi način je das upotrebimo obrazac za rad sile, naime rad sile nad datim telom je jednak proizvodu sile koja vrši rad i puta koji pređe to telo, što važi pod uslovom da sila deluje duž tog puta:

$$A = F \cdot x.$$

Sada je jasno da ako su leve strane ovako dobijenih izraza za rad iste, tada moraju biti jednake i njihove desne strane:

$$F \cdot x = 2\gamma \cdot L \cdot x$$

Sledi:

$$F = 2\gamma \cdot L.$$

Brojni faktor 2 se javlja zato što opna ima dve površine. U nekom slučaju u kome bi tečnost imala samo jednu površinu intenzitet sile površinskog napona bi bio dvostruko manji:

$$F = \gamma \cdot L.$$

Iz prethodnog izraza koeficijent površinskog napona je:

$$\gamma = \frac{F}{L}.$$

Dakle: Koeficijent površinskog napona date tečnosti je brojno jednak sili površinskog napona koja deluje na jedinicu dužine granične linije koja oivičava površinu te tečnosti.

### **Agregatna stanja i faze supstancije**

Svaki materijal se može naći u jednom od četiri agregatna stanja. To su:

- čvrsto
- tečno
- gasovito i
- plazma.

Od svih navedenih stanja jedino je potrebno objasniti šta je četvrto agregatno stanje, tj. stanje plazme. To je stanje u kome ja materija visoko jonizovana, tj. čiji su atomi izgubili deo svojih elektrona ili sve njih. Da bi elektroni napustili atome u kojima se nalaze potrebna im je energija za raskidanje privlačenja koje ih vezuje za atomsko jezgro. Materija se može naći u ovom stanju ako se nalazi na jako visokoj temperaturi kao što je slučaj u zvezdama. Dakle sunčeva materija je u stanju vruće plazme. Međutim, materija se može jonizovati i pod uticajem nekog visokoenergetskog zračenja, kao što su X ili  $\gamma$  - zraci. U ovom slučaju reč je o hladnoj plazmi. Reč je o tome da ovi zraci obično ne zagrevaju značajno materiju kroz koju prolaze, ali izazivaju njenu visoku jonizaciju. Ako tragamo za vrućom plazmom na Zemlji to je otvoreni plamen.

Još su stari Grci znali za ova četiri agregatna stanja, samo što su ih oni nazivali elementima. Četiri elementa kod starih Grka su:

- zemlja
- voda
- vazduh i
- vatra.

U ovoj oblasti razmatraćemo samo prva tri agregatna stanja: čvrsto, tečno i gasovito.

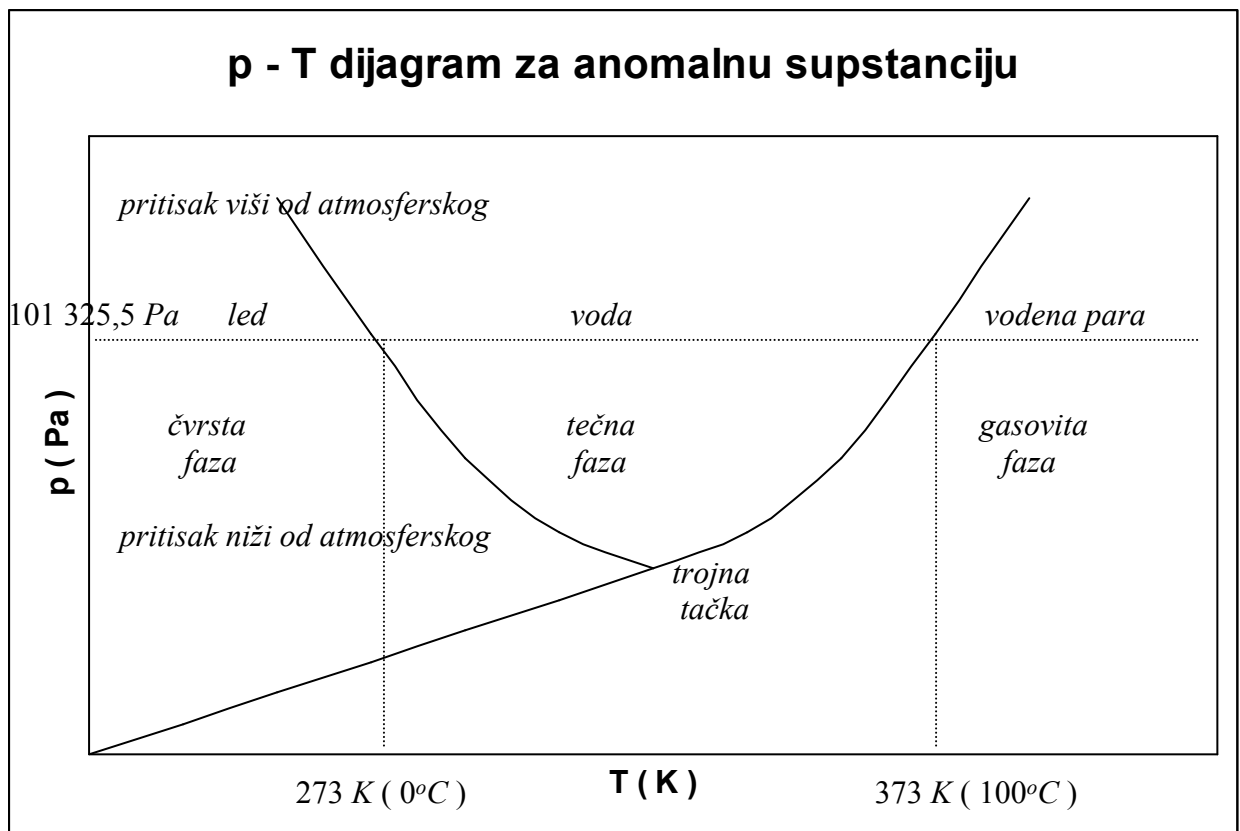
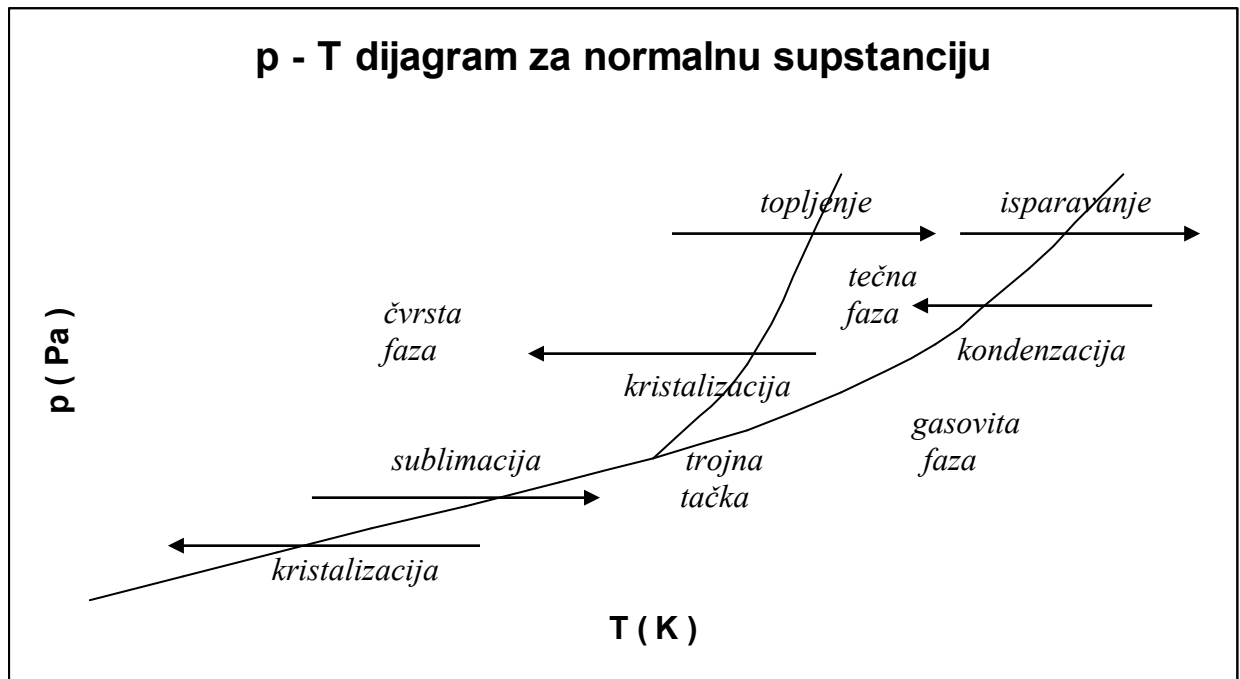
Sa razvojem fizike došlo je do pokušaja da se definiše pojam agregatnog stanja. Međutim, pokazalo se da je agregatno stanje nemoguće definisati. Zato je u fiziku uveden pojam faze koja je slična sa agregatnim stanjem, ali na koju je, za razliku od agregatnog stanja, moguće primeniti pomenutu definiciju. Ova definicija glasi: faza je posebno stanje istorodne supstancije koje se karakteriše određenim fizičkim osobinama, a koje se održavaju u određenom domenu temperature i pritiska.

Normalno, kristalni materijali imaju četiri faze: čvrsta, tečna, gasovita i faza plazme – pa se kod njih pojam faze ni po čemu ne razlikuje od pojma agregatnog stanja.

Međutim, amorfni materijali imaju sva četiri agregatna stanja, ali samo tri faze. Na primer komad plastike ima i čvrsto i tečno agregatno stanje, ali ima samo tečnu fazu. To je posledica stroge primene definicije faze. Naime, ne postoji ni jedna bitna razlika u fizičkim osobinama čvrste i tečne plastike, a to važi i za ostale amorfne materijale. Molekuli su u oba ova stanja haotično raspoređeni, a isto se tako i kreću, pa nema nikakvog opravdanog razloga da smatramo da tu postoje dve faze. Sada se samo treba setiti da smo ranije rekli da i u čvstom agregatnom stanju amorfni materijali »teku« ali sporo.

## p – T dijagram faza i faznih prelaza

Čvrsto, tečno i gasovito agregatno stanje je moguće prikazati na  $p - T$  dijagramu. Pritom treba voditi računa da sve materijale možemo podeliti na normalne i anomalne. Zato i postoje dva grafika.



sl. 11. a) i b)

Kako voda spada u anomalne supstancije drugi grafik je prikazan za vodu. U prirodi pored vode ima jako malo anomalnih supstancija: bizmut, silicijum, liveno gvožđe ...

Zajednička karakteristika svih anomalnih materijala je da najveću gustinu imaju u tečnom agregatnom stanju. Na primer: voda ima najveću gustinu na  $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Uzrok tome je rastresita struktura kristalne rešetke ovih materijala, tj velika međuatomska rastojanja susednih atoma. To znači da led ima manju gustinu od vode i da može da pliva na površini vode – što je bilo od presudnog značaja za razvoj života na našoj planeti.

*Naime, da je led teži od vode on bi tada, u toku zime ili hladnih perioda u zemljinoj istoriji, tonuo na dno okeana, mora, jezera i reka što bi na kraju dovelo do potpunog zaleđivanja sve vode koja postoji na našoj planeti. Ovakav razvoj događaja bi onemogućio stvaranje i održavanje života u morima i okeanima rane Zemlje. Nasuprot tome, led pliva na površini vode što onemogućava smrzavanje dubljih slojeva, zato što je led poznat kao odličan toplotni izolator ( setite se samo da su eskimski igloi napravljeni od snega i leda ).*

*To takođe znači da ako zaledimo punu a zatvorenu flašu vode, tada će nastali led u pokušaju da zauzme veću zapreminu izazvati rasprskavanje flaše.*

Na oba grafika se mogu uočiti tri glavna polja koja predstavljaju: čvrstu, tečnu i gasovitu fazu datog materijala. Na prvom – grafiku normalne supstancije je prikazano svih šest faznih prelaza. Analogni fazni prelazi postoje i kod anomalnih supstancija. Treba obratiti pažnju na isti naziv dva od njih, a to je kristalizacija. Tako se naziva i prelazak supstancije iz tečnog u čvrsto stanje, ali i prelazak supstancije iz gasovitog, direktno u čvrsto stanje.

*Ovaj poslednji proces i njemu suprotan proces sublimacije su relativno retki i neobični procesi. Međutim i sa njima imate iskustva jer je primer za sublimaciju direktno isparavanje snega ako je izložen jakom suncu i ako je temperatura oko nule ( celzijusa ). Tada možemo videti da sneg kopni, ali na zemlji ispod njega tlo ostaje suvo.*

Proces sublimacije je direktan prelazak supstancije iz čvrstog u gasovito stanje.

*Zanimljivo je da sublimacija ima veze sa načinom na koji naftalin ubija moljce.*

*Neke čvrste supstancije pokazuju izrazitu sklonost ka sublimaciji. Takav je recimo i naftalin. Kada naftalin sublimira ( a pritom se nije istopio, pa samim tim nije ni uprljao odeću u koju je stavljen ), moljac udiše paru naftalina. U grlu moljac ima jako mnogo sitnih dlačica, a molekuli naftalina su dosta krupni i lepe se za ove dlačice. Posle izvesnog vremena grlo moljca se zatvori i on se uguši.*

*Proces kristalizacije, suprotan procesu sublimacije, dovodi do stvaranja inja. Dakle inje nastaje kada se atmosferska vodena para u dodiru sa jako rashlađenim predmetima direktno smrzava bez prolaska kroz tečno stanje.*

Da bi se p – T dijagram mogao razumeti bitno je uočiti da su na vertikalnoj osi prikazane različite vrednosti pritiska kome materijal, koji posmatramo, može biti izložen. Međutim, mi živimo stalno izloženi atmosferskom pritisku atmosfere na površini naše planete. Ovaj pritisak iznosi:

$$p_A = 101325,5\text{ Pa}.$$

Vrednost ovog pritiska se neznatno menja na istom mestu zemljine površine – što je obično povezano sa promenama vremenskih prilika. Smanjeni vazdušni pritisak ( ciklon ) obično prati loše vreme, a povećani vazdušni pritisak ( anticiklon ) je pratilac vedrog vremena. To znači da je naše iskustvo sa materijalima i njihovim promenama agregatnog stanja vezano za samo jednu vrednost pritiska – a to je horizontalna linija na p – T dijagramu za vodu na nivou  $101325,5\text{ Pa}$ .

A šta se dešava sa vodom ako je izložena značajno višim ili nižim pritiscima od atmosferskog ?

Na nekom pritisku koji je viši od atmosferskog ( sl. 11. b ) voda se ledi na temperaturi nižoj od  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ali i ključa na temperaturi višoj od  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

*Zato kada je temperatura ispod nule a stanemo na sneg on se otopi ispod cipela. Time što stane na sneg čovek svojom težinom poveća pritisak na njega i spusti mu temperaturu topljenja dovoljno da on počne da se topi. Ovo je takođe osnova klizanja po ledu. Kada čovek stane na ledenu površinu povećani pritisak na led izaziva njegovo topljenje. Zato između cipela i leda nastaje tanak sloj vode koji omogućava klizanje. Prisustvo ovog vodenog sloja je bitno jer je inače koeficijent trenja klizanja između suvog leda i cipela prilično veliki i onemogućava klizanje. Dakle, iznenađujuća činjenica je da led nije klizav sam po sebi već da ga takvim čini tanki sloj vode na njegovoj površini. To znači da ako je napolju jako hladno ( -  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  ili manje ) tada nema klizanja, jer je tada povećani pritisak nedovoljan da otopi led. Međutim, čak i na tako niskim temperaturama*

je moguće klizanje, ali je za to potrebno značajno povećanje pritiska na led – a to se vidi na grafiku za vodu. Zato je u takvim uslovima potrebno koristiti klizaljke. Površina na kojoj tada klizač stoji je značajno manja od površine na kojoj stoji čovek u cipelama. Zato je pritisak na led značajno povećan i dovoljan da otopi led ispod klizaljki i da time omogući klizanje. U prethodnom zaključivanju korišćena je obrnuta srazmera pritiska i površine na koju sila deluje:  $p = \frac{F}{S}$ .

Primer za ključanje vode na povećanom pritisku je ekspres lonac. Pritisak u njemu je povećan u odnosu na normalni atmosferski zato što je para, koja se u njemu stvara, hermetički zatvorena, pa zato u njemu voda (jelo) ključa na temperaturi većoj od 100° C (vidi grafik). To je razlog da se jelo brže skuva. Naime, jelo ne kuva ključanje vode kako se to obično misli, već jelo kuva visoka temperatura. Stoga, što je temperatura veća to će i proces kuvanja biti kraći.

Ako je pritisak iz nekog razloga značajno niži od atmosferskog voda se leđi na temperaturi višoj od nule, dok ključa na temperaturi nižoj od 100° C.

Sa ovim imaju iskustvo planinari. Kada se popnu na nekoliko hiljada metara nadmorske visine, atmosferski pritisak je dosta nizak, pa se zato iako je temperatura veća od nule sneg ne topi. Ovo je jedan od važnih razloga da su visoki planinski vrhovi skoro uvek pod snegom. U takvim uslovima problem je i kuvanje jer voda vri na temperaturi nižoj od 100°C. Tako mogu biti potrebni sati da bi se skuvalo obično jaje. Zato je mnogo bolje u takvim uslovima ispeći ga na žaru.

### Trojna tačka

Sa daljim snižavanjem pritiska temperatura smrzavanja i ključanja su sve bliže jedna drugoj, da bi se na jednom određenom pritisku javila trojna tačka. Za vodu ovaj pritisak iznosi:

$$p_u = 611,8 \text{ Pa.}$$

Ako je voda u nekoj zatvorenoj posudi i ako je njena temperatura pritom:

$$T_u = 273,16 \text{ K}$$

tada se voda nalazi na uslovima koji odgovaraju trojnoj tački. Tada se voda u toj posudi nalazi istovremeno u sva tri agregatna stanja i istovremeno vrši svih 6 faznih prelaza. Dakle može se desiti da voda u toj posudi istovremeno i ključa i leđi se.

Treba uočiti da je pritisak koji odgovara trojnoj tački mnogo manji od atmosferskog – pa je to razlog da mi nemamo neposredno iskustvo sa ovom pojavom.

### Latentna toplota topljenja $\lambda_T$ ( $\frac{J}{kg}$ )

Latentna toplota topljenja datog kristalnog materijala, na temperaturi topljenja, je brojno jednaka onoj količini toplote koju treba dovesti jedinici mase tog materijala da bi on prešao iz čvrste u tečnu fazu na nepromenjenoj temperaturi.

$$\lambda_T = \frac{Q}{m}$$

Ako kao primer tog kristalnog materijala uzmemo vodu, tada je ta količina toplote, koju je potrebno dovesti jednom kilogramu leda na 0 °C da bi prešao u vodu na nepromenjenoj temperaturi:

$$\lambda_T = 3,35 \cdot 10^5 \frac{J}{kg}.$$

Latentna toplota topljenja je karakteristična samo za kristalne materijale, što je u vezi sa njihovim načinom topljenja. Amorfni materijali je nemaju jer se ne tope na isti način kao kristali.

Kako pri topljenju led prima ovu količinu toplote, a njegova temperatura pritom ne raste, objašnjenje je da sva ova energija se troši na rasturanje njegove kristalne rešetke. Preciznije, molekuli koji su vezani u kristalnoj rešetki leda imaju negativnu potencijalnu energiju – koja potiče od privlačnih međumolekularnih sila. Da bi prešli u slabije vezano stanje u tečnosti potrebna im je energija, a nju dobijaju od dovedene količine toplote koja i predstavlja latentnu toplotu topljenja.

Pri obrnutom procesu, tj. pri kristalizaciji vode u led, 1 kg vode oslobađa istu ovu količinu toplote od 335 000 J.

## Latentna toplota isparavanja $\lambda_l$ ( $\frac{J}{kg}$ )

Latentna toplota isparavanja datog materijala, na temperaturi ključanja, je brojno jednaka onoj količini toplote koju treba dovesti jedinici mase tog materijala da bi on potpuno ispario na nepromenjenoj temperaturi.

$$\lambda_l = \frac{Q}{m}$$

Uzmimo ponovo vodu kao primer. Ta količina toplote, koju je potrebno dovesti jednom kilogramu vode na  $100\text{ }^\circ\text{C}$  da bi prešla u vodenu paru na nepromenjenoj temperaturi, iznosi:

$$\lambda_l = 2,26 \cdot 10^6 \frac{J}{kg}$$

što je negde oko 6,75 puta veća količina toplote od one potrebne za topljenje jednog kilograma leda.

Pri obrnutom procesu, tj. pri kondenzaciji jednog kilograma vodene pare u vodu na  $100\text{ }^\circ\text{C}$  oslobađa se u okolnu sredinu količina toplote od  $2\ 260\ 000\ J$ .

*Naše iskustvo sa latentnom toplotom isparavanja je hlađenje koje se zasniva na isparavanju. Za svakog od nas pojedinačno svakako je najvažnija primena ovog principa u sistemu hlađenja našeg tela koji se zasniva na znojenju, a onda na isparavanju znoja sa površine kože. Isti princip primenjujemo i kada duvamo u vrelu supu, ili u vrelu kafu da bi smo je ohladili. Ovim postizemo dve stvari: prvo naš dah je hladniji od vrela supe, ali druga stvar je mnogo efikasnija – a to je intenziviranje isparavanja. Naime, duvanjem uklanjamo veliku količinu vodene pare koja se nalazi iznad vrela supe i koja ometa dalje intenzivno isparavanje.*

## Metastabilna stanja supstancije

Ponovo ćemo za primer uzeti vodu. Voda ima dva metastabilna stanja i to su:

- pregrejana voda i
- prehlađena para.

Pregrejana voda nastaje kada voda pri zagrevanju a na normalnom pritisku pređe preko tačke ključanja tj. preko  $100\text{ }^\circ\text{C}$ , a pritom ne proključa.

Ova mogućnost postoji zato što postoje uslovi koji moraju biti ispunjeni da bi voda mogla da proključa. Razmotrimo zato kako uopšte dolazi do ključanja vode.

Neka se voda nalazi u posudi koja je stavljena na vrelu ringlu. Vrlo brzo voda na dnu posude dolazi do  $100\text{ }^\circ\text{C}$  i tada na dnu počinje stvaranje mehurova vodene pare. Kada dovoljno narastu ovi mehuri postaju lakši od okolne vode i kreću ka površini. Tada ulaze u više slojeve vode koji su hladniji od pare u njima, što znači da je spoljašnji pritisak na mehur manji od njihovog unutrašnjeg pritiska. Ova razlika pritisaka izaziva prskanje mehurova u tečnosti, a zvuk njihovog rasprskavanja nazivamo strujanje vode. Međutim, vremenom sloj vode koji je dostigao  $100\text{ }^\circ\text{C}$  je sve deblji, a to znači da se mehuri rasprskavaju sve bliže površini tečnosti. Kada cela zapremina vode dostigne temperaturu ključanja, tada rasprskavanja mehurova u tečnosti više nema, pa oni počnu da izbijaju na površinu vode gde se rasprskavaju u vazduhu. Mi u tom trenutku kažemo da je voda proključala.

Dakle, ključanje je isparavanje tečnosti celom zapreminom, a ne samo sa svoje površine. Osnova ključanja je stvaranje mehurova vodene pare unutar tečnosti. No, da bi mehur mogao da nastane potreban je centar za stvaranje mehura. Centar može biti čestica nečistoće, jon, ili mali mehur nastao od vazduha rastvorenog u vodi. Molekuli vodene pare se tada lepe za centar za isparavanje i postepeno formiraju mehur.

Dakle, voda može postati pregrejana tečnost ako je zagrevamo, a u njoj ne postoje centri za pravljenje mehurova.

*Ovakva situacija se često javlja u parnim kotlovima. Voda u parnom kotlu je izložena dugotrajnom ključanju što potroši sav vazduh rastvoren u njoj na stvaranje mehurova. Za takvu vodu stručnjaci kažu da je “istrošena”. Ona više nije u stanju da ključa, a to je dovede do pregrejanog stanja. Tada je najbolje ugastiti vatru i ostaviti je da se sama postepeno ohladi. Vrlo bi*

*opasan bio pokušaj njenog hlađenja dolivanjem u kotao sveže hladne vode. Na taj način bi se u kotlu odjednom pojavio veliki broj novih centara za stvaranje mehurova, u vidu mehurića poteklih od rastvorenog vazduha u svežoj vodi. Tada bi voda u kotlu, zbog visoke temperature, naglo i vrlo burno proključala i ogromna količina nastale pare bi mogla da izazove eksploziju kotla.*

Prehlađena para nastaje kada vodena para pri hlađenju na normalnom atmosferskom pritisku se ne kondezujе u kapi čak i ako se temperatura spusti ispod 0 °C.

Da bi se vodena para kondenzovala u kapi potrebno je da u pari postoje centri za kondenzaciju. Centar za kondenzaciju može biti čestica nečistoće ili jon. Molekuli vode se tada lepe za ovakav centar i postepeno formiraju kap.

Vodena para može postati prehlađena ako u pari nedostaju centri za kondenzaciju, tj. ako je para čista i neutralna.

*Primer za prehlađenu vodenu paru je magla.*