

TERMODINAMIKA

Sadržaj

Temperatura i toplota			
Nulti princip termodinamike	186	Makroskopski opis idealnog gasa	203
Toplota i masena količina toplote	186	Jednačina stanja idealnog gasa	204
Latentna toplota faznog prelaza	189	Gasni zakoni. Boyle-Mariotov zakon.	206
Širenje čvrstih tela pri zagrevanju	190	Gej-Lisakov i Šarlov zakon	207
Širenje tečnosti pri zagrevanju	192	Kinetička teorija gasova	209
Širenje gasova pri zagrevanju	193	Osnovna jednačina kinetičke teorije gasova	211
Prenošenje toplote. Provodenje toplote.	194	Molekularni model pritiska idealnog gasa	212
Prenošenje toplote konvekcijom	195	Daltonov zakon	213
Prenošenje toplote zračenjem	197	Molekularni model temperature idealnog gasa	214
Molekulsko kinetička teorija gasova	198	Stepeni slobode kretanja molekula	215
Atomsko-molekulski sastav materije	200	Raspodela energije po stepenima slobode	216
	201	Unutrašnja energija idealnog gasa	217
		Toplotna i masena količina toplote idealnog gasa	218

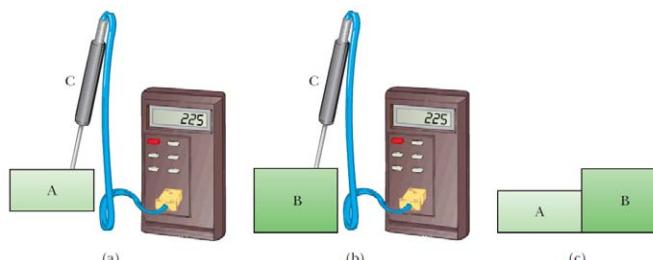
144

Temperatura i toplota. Nulti princip termodinamike.

- **Temperatura** je mera unutrašnje energije tela ili mera zagrejanosti tela (stepen toplotnog stanja), pri čemu se uvek vrši poređenje sa drugim telima.
- Za tela se kaže da su u **toplotonom kontaktu**, ako mogu razmenjivati toplotu.
- **Termička** (toplota) **ravnoteža** tela je situacija kada su tela u toplotnom kontaktu i ako je razmenjena toplota jednaka nuli (ako im je **temperatura jednaka**).

▪ **Nulti princip** (zakon) **termodinamike**:

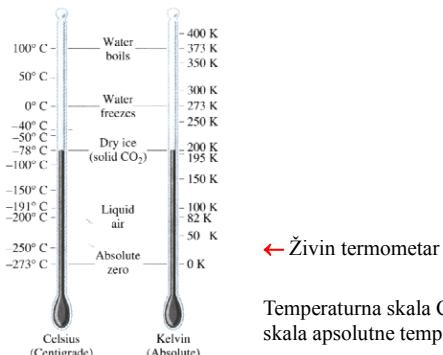
Ako su tela A i B, svako pojedinačno u toplotnoj ravnoteži sa telom C, tada su i tela A i B u toplotnoj ravnoteži jedno sa drugim.



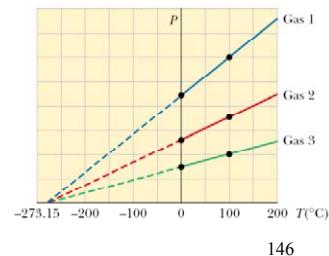
145

Temperatura i toplota.

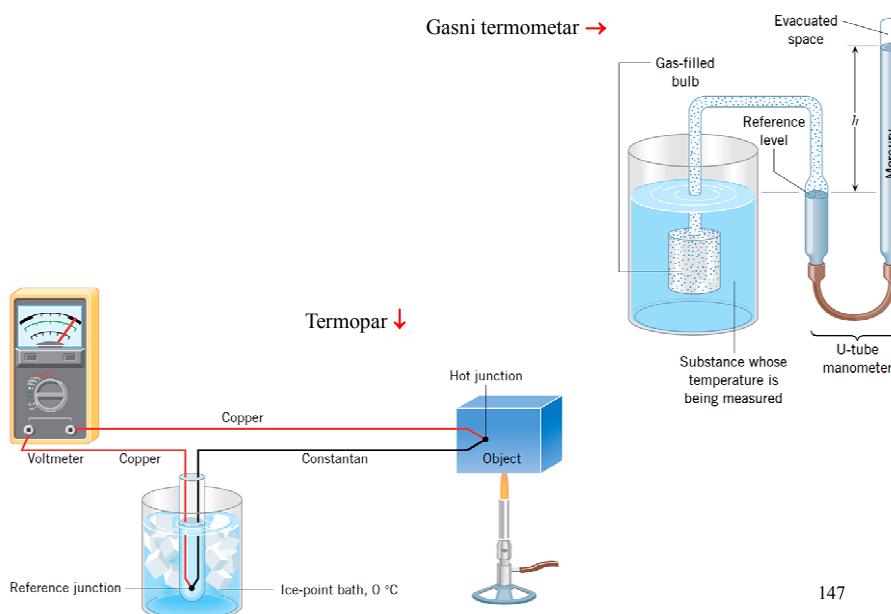
- Za merenje temperature se koriste **termometri**, čiji se rad zasniva na **reverzibilnoj** promeni neke *fizičke osobine* sa temperaturom (dužina čvrstog tela, zapremina tečnosti, pritisak gasa pri stalnoj zapremini, električni otpor, ...).
- Gasni termometri** (H_2 , He), **termometri sa tečnošću** (Hg , alkohol), **metalni termometar**, **termoelement** (termopar).
- Temperaturne skale: **Celzijusova**, Farenhajtova, Reomirova, **skala apsolutne temperature**.



$$T = 273.16 + t \text{ [K]}$$



Termometri i temperaturne skale



Toplota i masena količina toplote

- **Toplota** je jedan od vidova energije i manifestuje se kada se ona razmenjuje između tela kao rezultat **razlike u temperaturi** između njih.
- U kontaktu dvaju tela različitih temperatura, toplota prelazi sa tela **više** na telo **nije** temperature sve dok se one ne izjednače.
- Pošto je temperatura mera unutrašnje energije (mera ukupne energije kretanja molekula tela, ali i potencijalne energije koju oni poseduju zbog interakcije sa ostalim molekulima), proces prelaska toplote je proces **razmene unutrašnje energije** između tela.
- **Količina toplote** je unutrašnja energija razmenjena između tela. Jedinica je Džul ([J]).
- **Masena količina toplote c (specifična toplota)** je toplota koju treba dovesti **telu jedinične mase** da bi mu se temperatura promenila za jedinicu. Jedinica je [J/kg°C].

$$\Delta Q = cm\Delta t$$

$$c = \frac{\Delta Q}{m \Delta t}$$

$$Q = m \int_{t_1}^{t_2} c(t) dt$$

$$c = \frac{dQ}{m dt}$$

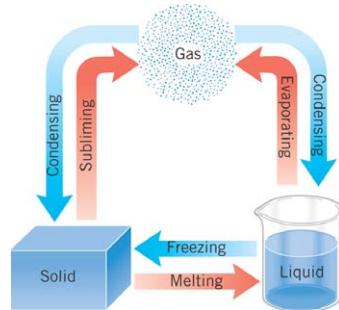
- **Toplotni kapacitet C_k** nekog tela je količina toplote koju treba dovesti **telu** da bi mu se temperatura povisila za jediničnu vrednost.

$$C_k = \frac{dQ}{dt} = mc$$

148

Latentna toplota faznog prelaza

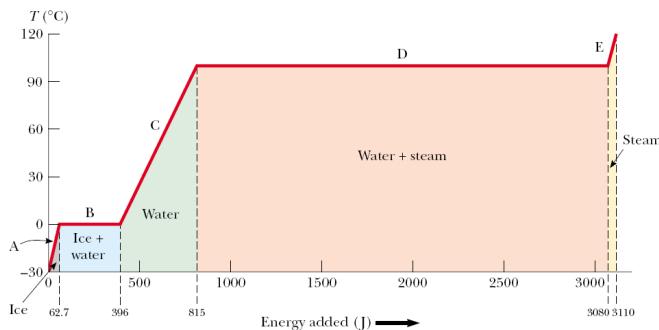
- **Fazni prelaz** je promena u obliku postojanja neke materije. U širem smislu, osim promene agregatnog stanja (čvrsto - tečno - gasovito), promena faze podrazumeva i promene u unutrašnjoj gradi (strukturi) materijala.
- Prilikom faznog prelaza usled dovođenja ili odvođenja toplote **menja se unutrašnja energija tela**, ali **bez promene temperature tela**.
- Promena **agregatnog stanja** strukturno uređenih (kristalnih) **materijala** praćena je **apsorpcijom** ili **oslobađanjem** toplote i dešava se na tačno definisanoj temperaturi.



149

Latentna toplota faznog prelaza

- Prilikom promene agregatnog stanja, bilo da supstanca prima toplotu, bilo da je osloboda, **temperatura se ne menja**.



- Latentna toplota q** (u [J/kg]) je toplota oslobodena ili apsorbovana prilikom promene agregatnog stanja (faznog prelaza) jedinične mase supstance.

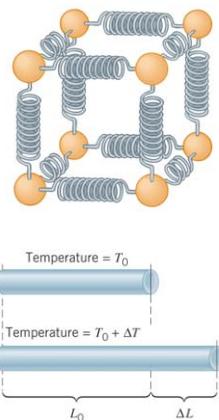
$$q = \frac{\Delta Q}{m}$$

150

Širenje čvrstih tela pri zagrevanju

- Pri zagrevanju povećava se zapremina tela jer se **ravnotežna rastojanja** između molekula i atoma, koji čine građu tela, postepeno povećavaju.
- U slučaju da je jedna dimenzija tela znatno veća od ostalih, tada se širenje može svesti na **linearno** širenje.
- Za uže temperaturne intervale, relacija koja sasvim zadovoljavajuće opisuje promenu linearnih dimenzija tela sa temperaturom glasi:

$$\ell = \ell_0(1 + \alpha t) \quad \Rightarrow \quad \alpha = \frac{\Delta \ell / \ell_0}{\Delta t}$$



- Termički koeficijent **linearog** širenja α predstavlja **relativnu** promenu linearnih dimenzija tela pri jediničnoj promeni temperature.
- Zapreminska širenje čvrstih tela opisuje:

$$V = V_0(1 + \gamma t)$$

γ - termički koeficijent zapreminskog širenja ($\gamma=3\alpha$).

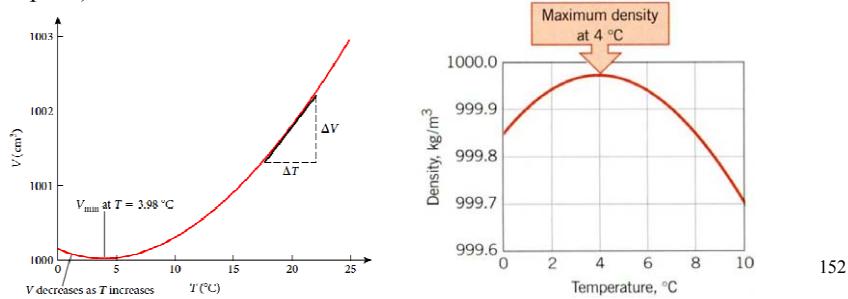
151

Širenje tečnosti pri zagrevanju

- Usled toga što tečnosti nemaju stalan oblik, kod njih možemo govoriti samo o **zapreminskom** širenju.

$$V = V_0(1 + \gamma t)$$

- Voda ima **anomalno** ponašanje u pogledu termičkog širenja zbog posebne prirode hemijskih veza u molekulima i između njih.
- Od 0 °C do 4 °C koeficijent γ je negativan (sažimanje, smanjenje zapremine vode → povećanje gustine) dok je iznad 4 °C pozitivan (zapremina raste → gustina opada).



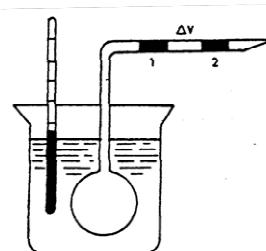
Širenje gasova pri zagrevanju

- Kao i kod tečnosti, i gasovi se mogu okarakterisati samo termičkim koeficijentom **zapreminskog** širenja.
- Pri promeni temperature, kod gasova se istovremeno menjaju i zapremina i pritisak.
- Ako se pritisak održava konstantnim ($p=\text{const.}$):

$$V_t = V_0(1 + \gamma t)$$

γ - termički koeficijent zapreminskog širenja

$$\gamma = \frac{1}{273.15} = 0.0036604 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$



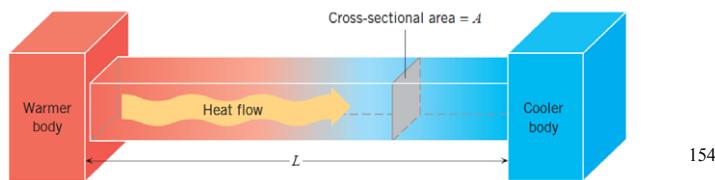
- Svi gasovi imaju isti termički koeficijent širenja (Šarlov zakon).

Prenošenje topote

- Prenos topote sa jednog na drugo telo se odvija spontano i to sa toplijeg na hladnije telo.
- Principijelno, razlikuju se tri načina prenosa topote: **provodenje**, **konvekcija** (strujanje) i **zračenje**.

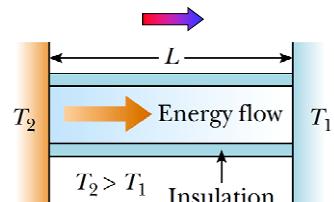
1. Provodenje topote

- Prenos topote **provodenjem** se ostvaruje **interakcijom** delića koji vrše termičko kretanje, pri čemu se delovi tela ne pomeraju.
- Provodenje topote je proces u kome se toplota prenosi **direktno kroz materijal** pri čemu **ne dolazi do premeštanja** sastavnih delova materijala.
- Materijale, prema tome kako provode toplotu, delimo na **toplotne provodnike** i **toplotne izolatore**.



1. Provodenje topote

- Količina topote Q koja se **provodenjem** prenosi kroz materijal u obliku šipke zavisi od:
 - vremena provodenja τ ,
 - razlike temperature ($t_2 - t_1$),
 - površine poprečnog preseka S ,
 - dužine šipke L .



$$Q = \lambda S \frac{t_2 - t_1}{L} \tau$$

λ – koeficijent toplotne provodljivosti (u [W/mK])

$(t_2 - t_1)/L = \Delta t/\Delta x$ – **gradijent temperature**

- Veća količina topote se prenese za **duži period provodenja**, pri većoj razlici temperatura uspostavljenoj na **kraćem rastojanju** i pri većem poprečnom preseku kroz koji se toplota prenosi.

2. Prenošenje topline konvekcijom (strujanjem)

- Prenošenje topline putem **pokretanja (strujanja)** toplog materijala (fluida) je **konvekcija**.
- **Prirodna konvekcija** je pojava kada se topli materijal kreće sam od sebe (spontano) zbog **razlika u gustini**.
- **Prinudna konvekcija** je kretanje (strujanje) toplog materijala pod uticajem **spoljašnjih faktora**.
- Razmena topline između **površine** na jednoj temperaturi t_1 i **fluida** na drugoj temperaturi t_2 zavisi od niza činilaca:
 - oblik i nagib **dodirne površine**;
 - gustina, viskoznost, masena količina topline, toplotna provodljivost **fluida**;
 - način kretanja **fluida** (laminarno ili turbulentno), ...
- Količina topline Q koju **površina S** primi ili preda **konvekcijom** u **toku vremena τ** , ako je između površine i fluida **razlika temperatura Δt** , iznosi



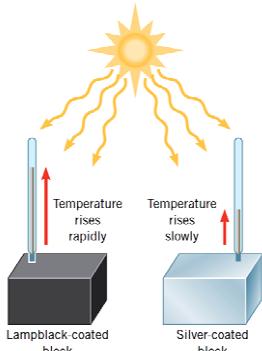
$$Q = h S \Delta t \tau$$

h - koeficijent konvekcije

156

3. Prenošenje topline zračenjem

- Toplota se između tela može prenositi i **bez direktnog kontakta – zračenjem**, tj. emisijom elektromagnetskog toplotnog zračenja.
- Sva tela **neprestano** zrače, ali istovremeno i apsorbuju energiju u obliku elektromagnetskih talasa. U tome značajnu ulogu ima površina tela.
- Ukupna energija zračenja koje pada na neko telo delimično se **apsorbuje**, delimično **reflektuje**, a delimično **prođe** kroz njega.
- Kada je neko telo u termodinamičkoj ravnoteži sa okolinom, znači da su **jednake** količine **emitovane i apsorbovane** energije putem zračenja.



$$a + r + t = 1$$

a - koeficijent apsorpcije

r - koeficijent refleksije

t - koeficijent transparencije

Za $a=1$ - **apsolutno crno telo** - apsorbuje svu toplotu
Za $r=1$ - **apsolutno belo telo** - reflektuje svu toplotu
Za $t=1$ - **apsolutno transparentno telo** - propušta svu toplotu (zračenje)

157

3. Prenošenje topline zračenjem

- Količina topline Q koja se putem zračenja emituje od strane **apsolutno crnog tela** srazmerna je vremenu emitovanja τ , površini S , ali i emisionoj sposobnosti (moći) tela W_{ec} , koja je srazmerna T^4 .

$$Q = \sigma T^4 S \tau$$

- Ukupna emisiona moć (sposobnost) **crnog tela** W_{ec} (energija koju telo izrači sa jedinične površine u jedinici vremena) data je **Štefan-Bolcmanovim zakonom**:

$$W_{ec} = \sigma T^4 \quad \sigma = 5.7 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$$

Štefan-Bolcmanova konstanta

- Emisiona moć (sposobnost) W_e bilo kojeg tela zavisi od **relativne** emisione sposobnosti tela e ($0 < e < 1$), koja je karakteristika materijala i strukture površine tela koje zrači:

$$W_e = e \sigma T^4$$

158

Molekulsko - kinetička teorija gasova. Jednačina stanja idealnog gasa

- Prva saznanja i iskustva o tome da toplota može izvršiti korisni rad - XVII vek - uticaj na razvoj nauke o toploti – termofizike.
- Rezultat intenzivnih istraživanja u hemiji i fizici u XVII, XVIII i XIX veku je zaključak da su **atomi i molekuli** su osnovni sastavni delovi materije - materija je **diskretnе** prirode.
- Rezultat saznanja da je materija sastavljena od atoma i molekula pogodovao je nastanku tzv. **molekulsko-kinetičke teorije gasova** – teorije koja polazeći od proučavanja ponašanja **mikroskopskih** sastavnih delova materije pokušava (i uspeva) da objasni mnoge **makroskopske pojave** i **termičke veličine** (pritisak gase, temperatura i njena promena, promena agregatnog stanja, prenošenje toplote, ...).

159

Atomsko-molekulski sastav materije

- Relativna atomska masa A_r - neimenovan broj koji pokazuje koliko je puta prosečna masa atoma nekog elementa veća od 1/12 mase atoma izotopa ugljenika C-12 (tzv. atomska jedinica mase $u=1.66 \cdot 10^{-27}$ kg).
- Prosečna masa atoma je srednja vrednost mase atoma **normalne izotopske smeše** koja se u prirodi nalazi.
- Relativna molekulska masa M_r - neimenovan broj koji pokazuje koliko je puta prosečna masa nekog molekula veća od 1/12 mase izotopa atoma ugljenika C-12.
- 1 mol je ona količina supstance (atomi, molekuli, joni, elektroni, ...), koja sadrži toliko elementarnih jedinki koliko je atoma sadržano u 0.012 kg izotopa ugljenika C-12.

160

Atomsko-molekulski sastav materije

- Molarna masa je odnos mase supstance m i broja molova n (masa jednog mola supstance):

$$M = \frac{m}{n}$$

- 1 mol sadrži Avogadrov broj čestica N_A $N_A = 6.022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- Broj molova neke supstance se nalazi preko odnosa mase supstance m i molarne mase M :

$$n = \frac{m}{M} = \frac{N}{N_A}$$

161

Makroskopski opis idealnog gasa.

Jednačina stanja idealnog gasa.

- Osobine gasova su veoma važne u mnogim termodinamičkim procesima (vremenske prilike, parne mašine, motori sa gasovima kao radnim supstancama, ...).
- Osnovni parametri (veličine) koji opisuju stanje gasa su:
 - ❖ pritisak p [Pa]
 - ❖ zapremina V [m^3]
 - ❖ temperatura T [K]
 - ❖ količina n [mol]
- Eksperimentima je jednostavno utvrđena **međuzavisnost** između parametara za slučaj gasa na relativno **niskim pritiscima**, reda atmosferskog, i **temperaturama reda sobne** (gasovi male gustine).



162

Jednačina stanja idealnog gasa.

Pod tim uslovima pojam **idealni gas** predstavlja skup **velikog broja** čestica (atoma ili molekula):

- koje se kreću potpuno **nasumično**;
- koje imaju **zanemarljivu zapreminu** u poređenju sa zapreminom suda u kome se gas nalazi (posmatraju se kao **materijalne tačke**);
- u kome su **rastojanja** između molekula **velika**, pa su međumolekularne **sile zanemarljive**;
- u kojima molekuli međusobno interaguju isključivo **elastičnim sudarima** – tada se interakcija vrši putem kratkodometnih međumolekularnih sila.
- Dakle, pri **niskim pritiscima** i **visokim temperaturama** svi gasovi se mogu smatrati idealnim.

163

Jednačina stanja idealnog gasa.

Eksperimenti su pokazali sledeće:

- ako se gas održava na konstantnoj temperaturi, pritisak određene količine gase je obrnuto proporcionalan zapremini suda u kome se nalazi (Bojl-Mariotov zakon);
- ako se pritisak gase održava konstantnim, zapremina određene količine gase je direktno proporcionalna temperaturi gase (Šarlov zakon);
- ako se zapremina gase održava konstantnom, pritisak određene količine gase je direktno proporcionalan temperaturi (Gej-Lisakov zakon).

Ova zapažanja su objedinjena u jednačini stanja idealnog gasa:

$$pV = nRT$$

$$pV = \frac{m}{M} RT = \frac{N}{N_A} RT = NkT$$

$$pV = NkT$$

$R=8.314 \text{ J/molK}$ – univerzalna gasna konstanta; $k=1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ – Boltzmanova konstanta ($k=R/N_A$).

- Svaka promena nekog od parametara uzrokuje promenu ostalih. U slučaju konstantne količine gasa:

$$\frac{pV}{T} = \text{const.}$$

164

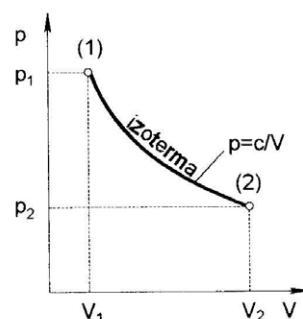
Gasni zakoni. Bojl-Mariotov zakon.

- Ponašanje idealnog gasa opisuju Bojl-Mariotov, Gej-Lisakov i Šarlov zakon.
- **Bojl-Mariotov zakon:** Pri konstantnoj temperaturi, zapremina date mase gase obrnuto je srazmerna pritisku.

$$pV = nRT \quad (n = \text{const.}, T = \text{const.})$$

$$pV = \text{const.}$$

- Krive na p - V dijagramu koje opisuju procese promene stanja gase pri konstantnoj temperaturi su izoterme.



165

Gej Lisakov i Šarlov zakon

- **Šarlov zakon:** Zaređene količine idealnog gasa pri konstantnom pritisku menjaju se linearno sa promenom temperature:

$$(n = \text{const.}, p = \text{const.})$$

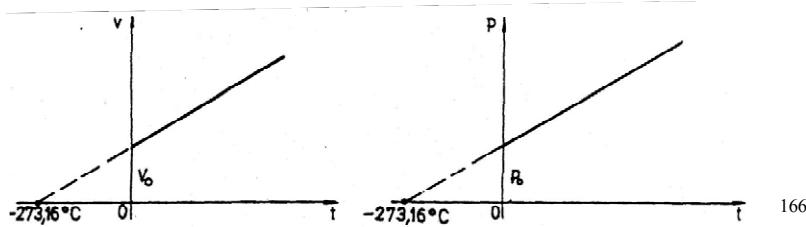
$$V = V_0(1 + \gamma t)$$

- **Gej-Lisakov zakon:** Pritisak određene količine idealnog gasa pri konstantnoj zaređini menjaju se linearno sa promenom temperature:

$$(n = \text{const.}, V = \text{const.})$$

$$p = p_0(1 + \gamma t)$$

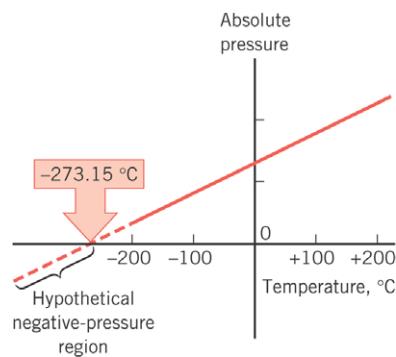
- Krive na p - V dijagramu koje opisuju procese promene stanja gase pri konstantnom pritisku, odnosno zaređini su **izobare**, odnosno **izohore**.



166

Gej Lisakov i Šarlov zakon

- Gej-Lisakov i Šarlov zakon ukazuju na najnižu moguću temperaturu u prirodi - **apsolutnu nulu** (-273.16°C), na kojoj idealan gas ne vrši pritisak na zidove suda. Ovo je početak skale absolutne temperature (Kelvinova skala).
- Pošto je pritisak posledica udara molekula o zidove suda, sledi da na ovoj temperaturi molekuli prestaju da se kreću.



167

Kinetička teorija gasova

- **Molekulsко-kinetičка теорија** gasova polazi od molekula, kao najmanjih sastavnih delova gasa i na osnovу njihovog ponašanja i uz statistički pristup objašnjava i povezuje njihove **makroskopsке особине** (pritisak, temperatura, energija).

Osnovне pretpostavke kinetičke teorije gasova:

- ❖ Sva tela se sastoje od **velikog broja** stabilnih čestica (molekula, atoma) i međumolekulskog prostora. To znači da se njihovo ponašanje može izučavati primenom statističkog računa.
- ❖ Gas se posmatra kao čista supstanca. To znači da su svi molekuli jednaki.
- ❖ **Rastojanje** između pojedinih čestica je **veliko** u poređenju sa njihovim sopstvenim dimenzijama. To znači da se molekuli gase posmatraju kao materijalne tačke, a njihova ukupna zapremina je zanemarljivo mala u poređenju sa zapreminom prostora koji gas ispunjava.
- ❖ Između molekula deluju **sile** električne prirode koje zavise od **vrste molekula** i međumolekularnog **rastojanja**.

168

Kinetička teorija gasova

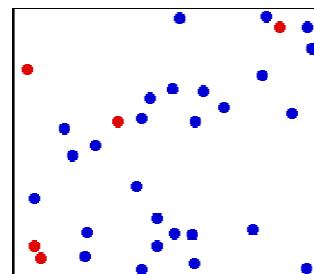
- ❖ Molekuli se u gasovima **stalno i хаотично крећу**. Na ovo kretanje se može uticati samo promenom temperature. Haotičnost (nasumičnost) kretanja znači da se bilo koji molekul može kretati u bilo kom pravcu sa jednakom verovatnoćom i to sa brzinom koja ima širok spektar vrednosti.
- ❖ Pošto se molekuli **idealnог** gase kreću se haotično, u svim pravcima podjednako verovatno, oni interaguju sa drugim molekulima i zidovima suda i neprekidno **менјају** pravac i intenzitet brzine (menja se količina kretanja koju poseduju) usled razmene energije sa ostalim molekulima
- ❖ Interakcije (sudari) između molekula su **потпуно еластичне** i ostvaruju se samo putem kratkodometnih sila (na malom rastojanju). Na većim rastojanjima se uzima da molekuli ne utiču jedan na drugi.

169

Osnovna jednačina kinetičke teorije gasova

- Primena prepostavki kinetičke teorije gasova omogućava povezivanje veličina koje se odnose na **jedan** molekul sa **parametrima** koji opisuju stanje gasa (pritisak, temperatura).
- Molekuli gase u sudu se haotično kreću i sudarajući se sa zidovima suda deluju izvesnom silom na njih. Iako je sila slaba, zbog ogromnog broja molekula, ukupna sila delovanja gasa na zidove suda je velika. Kada se ona obračuna po jedinici površine, dobija se veličina **pritiska** gase.
- Pritisak gase je uslovjen topotnim kretanjem molekula i zavisi od njihove **brzine**, odnosno **kinetičke energije translacionog kretanja**.
- Osnovna jednačina kinetičke teorije gasova daje zavisnost između **pritiska** i **srednje kinetičke energije translacionog kretanja** molekula gasa.

$$p = f(\bar{\varepsilon}_\tau)$$



170

Osnovna jednačina kinetičke teorije gasova Molekularni model pritiska idealnog gasa

- Ukupan **pritisak** na dati zid suda u kome se molekuli gasa nalaze:

$$p = \frac{2}{3} \left(\frac{N}{V} \right) \frac{m \bar{v}^2}{2}$$

N – broj molekula; V – zapremina suda; m – masa molekula; \bar{v}^2 – srednja vrednost kvadrata brzine za sve molekule u gasu.

- Srednja kinetička energija **translacionog** kretanja **jednog** molekula:

$$\bar{\varepsilon}_\tau = \frac{m \bar{v}^2}{2}$$

- **Osnovna jednačina kinetičke teorije gasova** – pritisak idealnog gasa je proporcionalan **konzentraciji molekula** (broju molekula po jedinici zapremine) i srednjoj **kinetičkoj energiji translacionog kretanja** molekula gasa:

$$p = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \bar{\varepsilon}_\tau$$

171

Daltonov zakon

- Osnovna jednačina kinetičke teorije gasova primenjena na smešu gasova:

$$\frac{N}{V} = \frac{N_1}{V} + \frac{N_2}{V} + \dots \quad p = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \bar{\varepsilon}_\tau = \frac{2}{3} \left(\frac{N_1}{V} + \frac{N_2}{V} + \dots \right) \bar{\varepsilon}_\tau$$

N_i/V – koncentracija molekula i -tog gasa u smeši gasova

$$p = p_1 + p_2 + \dots$$

p_i – parcijalni pritisak – pritisak koji vrši pojedina komponenta smeše, kada bi se u sudu nalazila sama u istoj količini kao i u smeši.

Daltonov zakon:

Za idealne gasove pritisak koji vrši smeša gasova jednak je zbiru parcijalnih pritisaka gasova koji čine smešu.

172

Molekularni model temperature idealnog gasa

$$pV = NkT \quad p = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \bar{\varepsilon}_\tau \Rightarrow pV = \frac{2}{3} N \bar{\varepsilon}_\tau = NkT$$


$$\bar{\varepsilon}_\tau = \frac{3}{2} kT$$

- Srednja kinetička energija **translatornog** kretanja molekula gase srazmerna je apsolutnoj temperaturi.
- Obrnuto, **temperatura** je mera srednje **kinetičke energije translatornog** kretanja molekula gasa:

$$T = \frac{2}{3k} \bar{\varepsilon}_\tau$$

i od nje zavisi i pritisak gasa:

$$p = \frac{N}{V} kT$$

- Na $T=0$ K (apsolutna nula) teorijski prestaje kretanje molekula gasa i pritisak postaje jednak nuli.

173

Stepeni slobode kretanja molekula

$$\overline{v_x^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2} \Rightarrow \frac{mv_x^2}{2} = \frac{1}{3} \frac{mv^2}{2} = \frac{1}{3} \frac{3}{2} kT = \frac{1}{2} kT \quad \leftarrow \text{Kinetička energija jednog molekula gasa duž jedne (x-koordinatne ose.)}$$

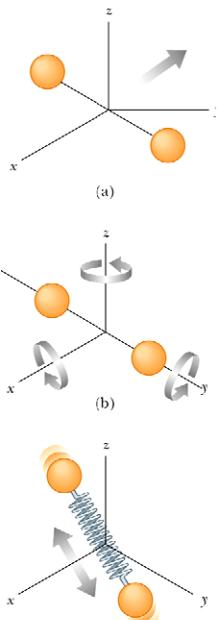
- Slično tome:

$$\frac{mv_y^2}{2} = \frac{mv_z^2}{2} = \frac{1}{2} kT$$

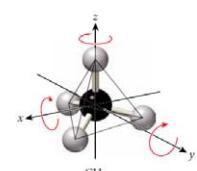
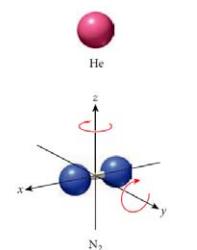
- Svaki **nezavisan pravac kretanja** molekula gasa (duž x-, y- i z-ose) doprinosi ukupnoj kinetičkoj energiji **translatornog** kretanja u **jednakom** iznosu ($kT/2$).
- Nezavisni načini kretanja su tzv. **stepeni slobode kretanja** molekula idealnog gasa.
- **Broj stepeni slobode** kretanja sistema čestica je broj **nezavisnih koordinata** koji određuju položaj sistema.
- Drugim rečima, to je **broj mogućih vrsta kretanja** pomoću kojih možemo opisati složeno kretanje čestica sistema.

174

Raspodela energije po stepenima slobode



- Molekuli gase osim **3 translatorna** načina kretanja (duž sve 3 ose koordinatnog sistema) imaju mogućnost i **rotacije**, a na višim temperaturama **atomi** i znatno **osciluju** oko ravnotežnih položaja **u molekulu**.
- jednoatomni molekul – 3t
- dvoatomni molekul – 3t+2r
- tro- i višeatomni molekul – 3t+3r
- Prosečna energija po stepenu slobode kretanja (ne samo za **translatorni**, već i za **rotacioni** i **oscilatorni**):
- **Molekul sa i stepeni slobode** kretanja ima **srednju kinetičku energiju**:



$$\bar{\epsilon}' = \frac{1}{2} kT$$

$$\bar{\epsilon} = i\bar{\epsilon}' = \frac{i}{2} kT$$

175

Unutrašnja energija idealnog gasa

- **Unutrašnja energija U** idealnog gasa je zbir **energija kretanja** pojedinih molekula, ali u širem smislu i **potencijalnih energija** koje molekuli poseduju zato što na njih deluju ostali molekuli međumolekulskim silama.
- Ako smatramo da su **međumolekulske interakcije zanemarljive**, uzima se u obzir samo **kinetička energija** kretanja svih molekula.

$$U = \sum_{i=1}^N \varepsilon_i = N\bar{\varepsilon}$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{i}{2} kT$$

$$U = \frac{i}{2} NkT$$

$$Nk = Nk \frac{N_A}{N_A} = nR$$

$$U = \frac{i}{2} nRT$$

- **Temperatura** je mera srednje **kinetičke energije** molekula gasa.
- Unutrašnja energija U idealnog gasa zavisi od **apsolutne temperature**, ali, strogo uzevši, i od **broja stepeni slobode** molekula (vrsta molekula).