

## 12. TEMPERATURA I TOPLINA

(pripremljeno prema poglavlju 12, Cutnell & Johnson: Physics, 9th edition, John Wiley and Sons, (2012), poveznica: [www.pdf-archive.com/2018/04/25/cutnell](http://www.pdf-archive.com/2018/04/25/cutnell) )

**Uobičajene mjerne jedinice.** Za mjerenje temperature koristimo termometar. Mnogi termometri koriste činjenicu da se materijali proširuju s porastom temperature. Na primjer, na slici desno prikazan je uobičajeni živin termometar, sustav koji se sastoji od staklene kugle napunjene živom te spojenom s kapilarnom cijevi. Kad se živa zagrijava, ona se širi u kapilarnu cijev, pri čemu je količina širenja proporcionalna promjeni temperature. Vanjska strana čaše označena je odgovarajućom skalom za očitavanje temperature. Uvedeno je nekoliko jedinica za temperaturu, od kojih su dva popularna izbora Celzijusi i Fahrenheiti. Celzijeva se skala koristi u cijelom svijetu, dok se Fahrenheitova skala uglavnom koristi u Sjedinjenim Državama.

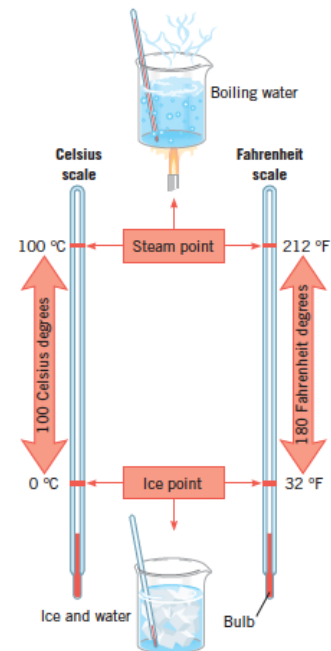


Figure 12.1 The Celsius and Fahrenheit temperature scales.

**Kelvin.** Iako su Celzijeva i Farenhejtova skala naširoko korištene, u znanosti se koristi Kelvinova skala. Uveo ga je škotski fizičar William Thompson (Lord Kelvin, 1824–1907), a u njegovu čast svaki se stupanj na skali naziva kelvin (K). Prema međunarodnom dogovoru, simbol K nije napisan znakom stupnja. Pokazano je da postoji najniža moguća temperatura, ispod koje se nijedna tvar ne može ohladiti. Ova najniža temperatura definirana je kao nulta točka na Kelvinovoj skali i naziva se apsolutnom nulom. Ledište vode je na temperaturi 0 °C, odnosno na temperaturi 273,15 K na Kelvinovoj skali. Temperatura u Kelvinima,  $T$ , i temperatura u Celzijusima,  $T_c$ , povezane su relacijom

$$T = T_c + 273.15 \quad (12.1)$$

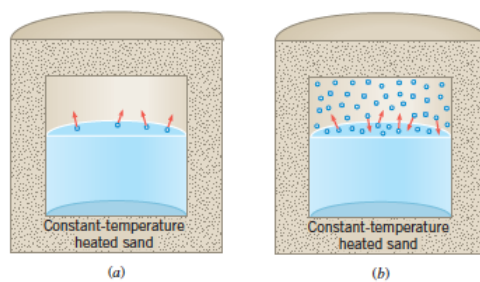
**Toplina i temperatura: Specifični toplinski kapacitet.** Kaže se da je objekt s visokom temperaturom vruć, a riječ „vruće“ povežujemo s toplinom. Kada se dva tijela dodirnu toplina struji s toplijeg tijela na hladnije. Međutim, što je točno toplina? Toplina je energija koja ima svojstvo da struji s tijela više temperature na tijelo niže temperature, upravo zbog razlike u temperaturi. Mjerna jedinica za toplinu je Joule (J).

Za podizanje temperature krutih tvari ili tekućina potrebne su veće količine topline u odnosu na plinove. Također, veća je količina topline potrebna za podizanje temperature tijela veće mase. Eksperimenti pokazuju da je toplina koju tijelo primi,  $Q$ , izravno proporcionalna promjeni temperature tog tijela  $\Delta T$  te njegovoj masi  $m$ . Ovo je iskazano jednadžbom (12.2), gdje je  $c$  konstanta proporcionalnosti koja se naziva specifičnim toplinskim kapacitetom materijala:

$$Q = cm \Delta T \quad (12.2)$$

Mjerna jedinica za specifični toplinski kapacitet: J / (kg · °C)

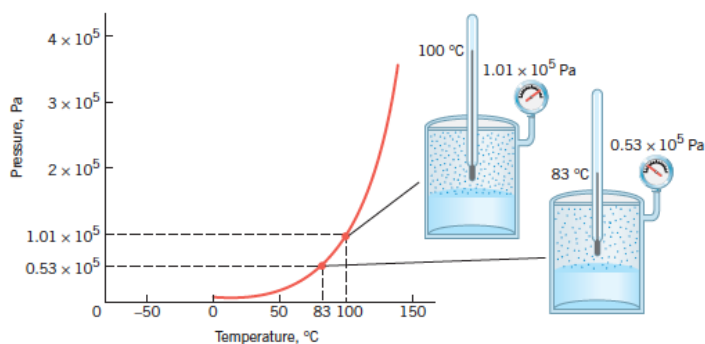
**Agregatna stanja u ravnoteži.** Tvar može biti u ravnoteži u više agregatnih stanja istovremeno, s tim da se ravnoteža ostvaruje za točno određen odnos temperature i tlaka. Da bismo razumjeli kako različita stanja dolaze u ravnotežu, pogledajmo sliku desno koja prikazuje spremnik koji se održava na stalnoj temperaturi. U početku je spremnik djelomično napunjen tekućinom (slika dio (a)).



Zbog termalnih sudara, nekoliko molekula izlazi iz tekućine i stvara paru (plinovito stanje). U početku se molekule pretežno odvajaju od tekućine i stvaraju paru. Međutim, moguć je i suprotni smjer u kojem se molekule pare ponovno pridodaju tekućini. Kada se ostvari da je broj molekula koji iz pare ulaze u tekućinu jednak broju molekula koji se odvajaju od tekućine i odlazi u paru, tad je uspostavljena ravnoteža (slika dio (b)). U ravnoteži tlak pare ostaje konstantan. Tlak pare u koji je ravnoteži s tekućinom naziva se *tlak pare*.

Tlak pare ne ovisi o volumenu prostora iznad tekućine. Ako bi se osiguralo više prostora, isparila bi se i veća količina tekućine, sve dok se ne bi uspostavila ravnoteža pod istim tlakom pare, uz pretpostavku da se održava ista temperatura.

Da bismo razumjeli krivulju isparavanja, razmotrimo što se događa kad voda ključa u otvorenom loncu. Pretpostavimo da je atmosferski tlak  $1.01 \cdot 10^5$  Pa tj. jedna atmosfera. Kada dođe do vrenja, u vodi se formiraju mjehurići vodene pare, koji se dižu prema površini. Do



ovakve pojave dolazi kad je tlak pare jednak atmosferskom tlaku, dakle tlaku koji djeluje na površinu vode. Tlak pare ovisi o temperaturi, a prema grafu na slici gore, za tlak od  $1.01 \cdot 10^5$  Pa potrebna je temperatura od 100 °C. Dakle, pri tlaku od jedne atmosfere voda ključa ako je zagrijana na 100 °C. Uočimo da to znači da će voda ključati na nekoj drugoj temperaturi za neki drugi atmosferski tlak. Npr. pri tlaku od  $0.53 \cdot 10^5$  Pa će ključati ako je temperatura samo 83 °C što je slučaj na nadmorskoj visini od nešto manjoj od pet tisuća metara.

### 13. PRIJENOS TOPLINE

(pripremljeno prema poglavlju 13, Cutnell & Johnson: Physics, 9th edition, John Wiley and Sons, (2012), poveznica: [www.pdf-archive.com/2018/04/25/cutnell](http://www.pdf-archive.com/2018/04/25/cutnell) )

Kada se toplina prenosi u ili iz nekog tijela, može se promijeniti unutarnja energija tog tijela. Pritom dolazi do promjene temperature ili promjene agregatnog stanja.



Prijenos topline utječe na naš život na mnoge načine. Na primjer, zimi peći donose toplinu, dok ljeti klima uređaji odnose toplinu. Gotovo sva naša energija potječe od sunca, a do nas se prenosi kroz prazan prostor s udaljenosti od 150 milijuna kilometara. U ovom ćemo poglavlju raspraviti tri procesa prijenosa topline: konvekcija (toplinsko strujanje), kondukcija (vođenje topline) i zračenje.

**Konvekcija (toplinsko strujanje).** Kad se dio tekućine ili plina zagrije gustoća tog dijela tekućine (plina) se smanjuje. Okolna hladnija (gušća) tekućina djeluje na topliju tekućinu i gura je prema gore. Kako se toplija tekućina diže, okolna hladnija tekućina ju zamjenjuje. Međutim, ta hladnija tekućina se, pak, zagrijava i gura prema gore te se tako se uspostavlja kontinuirani protok koji nosi toplinu. Kad god se toplina prenosi skupnim gibanjem plina ili tekućine, kaže se da se toplina prenosi konvekcijom (toplinskim strujanjem). Sam protok tekućine naziva se konvektivskim strujanjem.

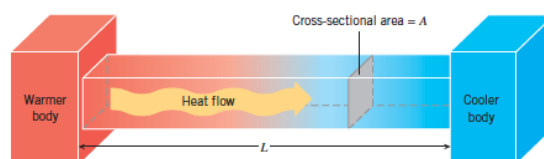
Dim koji se uzdiže iz vatre, poput onoga na slici gore, jedan je vidljivi rezultat konvekcije. Na slici desno prikazan je manje vidljiv primjer konvektivskih struja u loncu s vodom koja se zagrijava na plinskom plameniku. Struje distribuiraju toplinu iz gorućeg plina u sve dijelove vode.



**Kondukcija (vođenje topline).** Svatko tko je pržio hranu u metalnoj tavi zna da metalna ručka postaje vruća. Jasno je da se toplina ne prenosi stujanjem metala, pa konvekcija može biti isključena. Umjesto toga, toplina se prenosi izravno kroz metal procesom koji se naziva kondukcija ili vođenje topline.

Oni materijali koji dobro provode toplinu nazivaju se toplinski vodiči, a oni koji loše provode toplinu nazivaju se toplinskim izolatorima. Većina metala su izvrsni toplinski vodiči, dok su drvo, staklo i većina plastike uobičajeni su toplinski izolatori. Toplinski izolatori imaju mnogo važnih primjena.

Da bi se prikazali faktori koji utječu na provođenje topline, na slici desno prikazana je pravokutna šipka čiji su krajevi u kontaktu s dva tijela, od kojih se jedno održava višoj temperaturi, a



drugo se održava na nižoj temperaturi. U ovoj ćemo analizi gubitke kroz stranice šipke zanemariti. Količina topline  $Q$  koju šipka provede od toplijeg do hladnijeg kraja ovisi o brojnim čimbenicima:

1.  $Q$  je proporcionalan vremenu  $t$  tijekom kojeg se odvija provođenje topline ( $Q \propto t$ ). Više topline će proteći kroz duže vrijeme.
2.  $Q$  je proporcionalan razlici temperatura  $\Delta T$  između krajeva šipke ( $Q \propto \Delta T$ ). Veća razlika uzrokuje veći protok topline.
3.  $Q$  je proporcionalan površini poprečnog presjeka  $A$  šipke ( $Q \propto A$ ).
4.  $Q$  je obrnuto proporcionalan duljini  $L$  šipke ( $Q \propto 1/L$ ).

Objedinjeno, ove proporcionalnosti se mogu zapisti kao  $Q \propto tA\Delta T/L$ . Da bismo dobili jednakost, uvodimo konstantu proporcionalnosti  $k$  koja se naziva toplinska vodljivost, koja je različita za različite materijale.

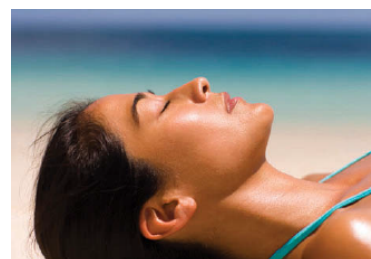
**Provođenje topline kroz materijal.** Toplina  $Q$  provedena tijekom vremena  $t$  kroz šipku duljine  $L$  i površine poprečnog presjeka  $A$  je

$$Q = \frac{kA \Delta T}{L} t \quad (13.1)$$

gdje je  $\Delta T$  razlika temperature između krajeva šipke (viša temperatura minus niža temperatura), a  $k$  je toplinska vodljivost materijala.

SI jedinica toplinske vodljivosti:  $\text{J} / (\text{s} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C})$

**Zračenje.** Energiju sa Sunca donosi na Zemlju u velikim količinama donose valovi vidljive svjetlosti, te infracrveni i ultraljubičasti valovi. Ti su valovi poznati kao elektromagnetski valovi. Izlaganjem Suncu, slika desno, osjećamo vrućinu jer nam tijelo apsorbira energiju sunčevih elektromagnetskih valova. Također, svatko tko je stao uz vatru ili stavio ruku u blizinu žarulje sa žarnom niti doživio je sličan učinak. Dakle, tijela emitiraju elektromagnetske valove, a kada se energija takvih valova apsorbira, može imati isti učinak kao i toplina.



Prijenos energije putem elektromagnetskih valova naziva se zračenje, a za razliku od prijenosa strujanjem ili vođenjem, za ovaj prijenos nije potreban materijal koji provodi toplinu. Na primjer, elektromagnetski valovi sa Sunca prema Zemlji putuju kroz prazan prostor.

**Zračenje.** Zračenje je proces u kojem se energija prenosi elektromagnetskim valovima.

Pri prijenosu energije zračenjem apsorpcija i emisija elektromagnetskih valova jednako su važne. Površina objekta igra značajnu ulogu u određivanju koliko zračenja energije će objekt apsorbirati ili emitirati. Budući da je crna boja povezana s gotovo potpunom apsorpcijom vidljive svjetlosti, pojam savršeno crno tijelo ili, jednostavno, crna tijelo koristi se kada se odnosi na tijela koja apsorbiraju sve elektromagnetske

valove koji padaju na njega.

Svi objekti istodobno emitiraju i apsorbiraju elektromagnetske valove. Kad tijelo ima istu konstantnu temperaturu kao i njegova okolina, količina energije koju tijelo apsorbira mora odgovarati količini energije koju emitira u istom vremenskom intervalu. Savršeno crno tijelo je savršen apsorber, ali ono je ujedno i savršeni emiter.

**Stefan–Boltzmannov zakon zračenja.** Količina zračenja energije koju emitira savršeno crno tijelo,  $Q$ , proporcionalna je vremenskom intervalu zračenja  $t$  ( $Q \propto t$ ). Eksperiment pokazuje da je  $Q$  proporcionalan površini tijela  $A$  ( $Q \propto A$ ), odnosno tijelo s velikom površinom zrači više energije nego ono s malom površinom. Eksperiment također pokazuje da je  $Q$  proporcionalan četvrtoj potenciji temperature  $T$  ( $Q \propto T^4$ ), što znači da se emitirana energija značajno povećava s porastom temperature. Pritom, temperatura mora biti iskazana u Kelvinima. Ako se, na primjer, temperatura objekta udvostruči, objekt emitira  $2^4$ , odnosno 16 puta više energije. Kombinirajući te proporcionalnosti, dobivamo  $Q \propto T^4 A t$ . Uvođenjem konstante proporcionalnosti,  $\sigma$ , poznate kao Stefana-Boltzmannova konstanta dobivamo Stefan–Boltzmannov zakon zračenja.

**Stefan–Boltzmannov zakon zračenja.** Energija zračenja crnog tijela,  $Q$ , koju ono izrači vremenu  $t$ , pri temperaturi  $T$  izraženoj u Kelvinima, iznosi

$$Q = \sigma T^4 A t \quad (13.2)$$

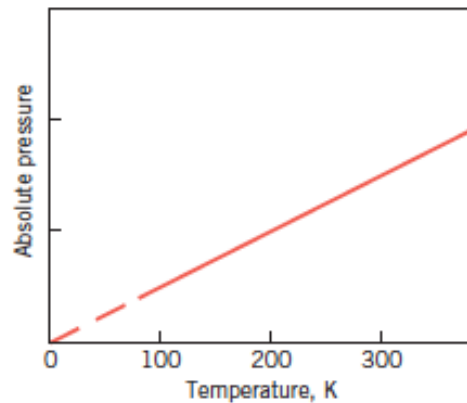
Eksperimentalno je utvrđeno da Stefana-Boltzmannova konstanta iznosi  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ J}/(\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

## 14. JEDNADŽBA STANJA IDEALNOG PLINA I KINETIČKA TEORIJA

(pripremljeno prema poglavlju 14, Cutnell & Johnson: Physics, 9th edition, John Wiley and Sons, (2012), poveznica: [www.pdf-archive.com/2018/04/25/cutnell](http://www.pdf-archive.com/2018/04/25/cutnell) )

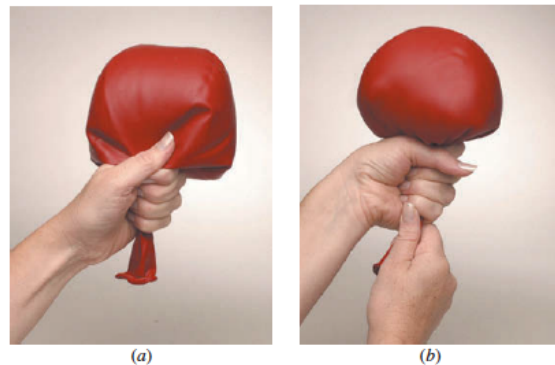
**Jednadžba stanja idealnog plina.** Idealan plin je idealizirani model koji dobro opisuje stvarne plinove koji imaju dovoljno nisku gustoću, odnosno kod kojih je volumen molekula tog plina znatno manji od slobodnog prostora u kojem se te molekule nalaze. Preciznije rečeno, to znači da su molekule plina toliko udaljene da ne djeluju međusobno osim u kratkom vremenu njihovog elastičnog sudara. Zakon o idealnom plinu izražava odnos između apsolutnog tlaka, temperature, volumena i broja molova.

Eksperimentalno se može pokazati da se tlak plina mijenja s temperaturom i da odnos ove dvije veličine opisuje ravna linija, kao na slici desno. Uočimo da je temperatura iskazana u Kelvinima, a ne u Celzijevim stupnjevima. Grafikon pokazuje da je tlak  $P$  izravno proporcionalan temperaturi  $T$  ( $P \propto T$ ), za fiksni volumen i fiksni broj molekula.



Odnos između apsolutnog tlaka i broja molekula idealnog plina je jednostavan. Iskustvo pokazuje da je moguće povećati tlak plina dodavanjem više molekula; upravo se to događa kad se puni guma. Kad se volumen i temperatura plina niske gustoće održavaju konstantnim, udvostručenje broja molekula udvostručuje tlak. Dakle, tlak idealnog plina pri konstantnoj temperaturi i konstantnom volumenu proporcionalan je broju molekula, odnosno broju molova plina  $n$  ( $P \propto n$ ).

Da bismo vidjeli kako tlak plina ovisi o volumenu plina, pogledajmo djelomično ispunjeni balon na slici desno (a). Taj je balon „mekan“, jer je tlak zraka u njemu nizak. Međutim, ako se sav zrak u balonu utisne u manji "mjehurić", kao na slici (b), "mjehur" postaje čvršći. Ovo ukazuje na to da je tlak u manjem volumenu velik te se zbog povećanog tlaka guma znatno rasteže. Dakle, moguće je povećati tlak plina smanjenjem njegovog volumena, ako se broj molekula i temperatura održavaju konstantnim. Može se pokazati da je tlak idealnog plina obrnuto je proporcionalan njegovom volumenu  $V$  ( $P \propto 1/V$ ).



Tri odnosa koja su upravo razmatrana omogućuju nam da tlak idealnog plina izrazimo kao  $P \propto nT/V$ . Ta se proporcionalnost može zapisati kao jednadžba korištenjem univerzalne plinske konstante  $R$ . Eksperimenti su pokazali da za sve plinove dovoljno niske gustoće ova konstanta ima istu vrijednost,  $R = 8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ . Rezultirajuća jednadžba naziva se jednadžba stanja idealnog plina.

**Jednadžba stanja idealnog plina.** Tlak idealnog plina,  $P$ , izravno je proporcionalan temperaturi u Kelvinima,  $T$ , i broju molova plina,  $n$ , a obrnuto je proporcionalan volumenu  $V$ . Drugim riječima,

$$PV = nRT \quad (14.1)$$

gdje univerzalna plinska konstanta ima vrijednost  $R = 8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ .

Ponekad je prikladno izraziti zakon idealnog plina u smislu ukupnog broja čestica  $N$ , umjesto broja molova  $n$ . Da dobijemo takav izraz, množimo i dijelimo desnu stranu jednadžbe (14.1) s Avogadrovim brojem  $N_A = 6.022 \cdot 10^{23}$  čestica/mol. Uočimo da je umnožak  $nN_A$  jednak ukupnom broju čestica,  $N$ :

$$PV = nRT = nN_A \frac{R}{N_A} T = N \left( \frac{R}{N_A} \right) T$$

Konstanta  $R/N_A$  naziva se Boltzmannova konstanta, u čast austrijskog fizičara Ludwiga Boltzmann (1844–1906), a za nju koristimo simbol  $k$ :

$$k = \frac{R}{N_A} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

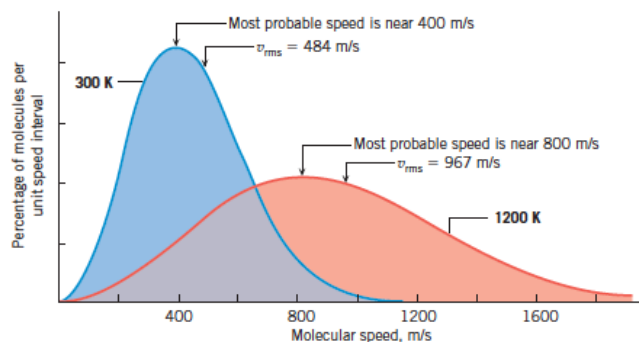
Korištenjem ove konstante, jednadžba stanja idealnog plina postaje

$$PV = NkT \quad (14.2)$$

**Kinetička teorija plinova.** Koliko god bila korisna, jednadžba stanja idealnog plina ne daje uvid u to kako su tlak i temperatura povezani sa svojstvima molekula, kao što su njihova masa i brzina. Kako bi pokazali kako su mikroskopska svojstva molekula povezana s tlakom i temperaturom idealnog plina, ovdje ćemo istražiti dinamiku molekularnog gibanja.

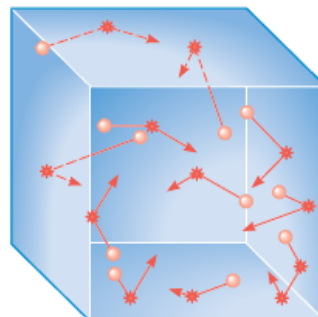
### Raspodjela brzina molekula.

Spremnik napunjen plinom pri standardnoj temperaturi i tlaku sadrži veliki broj čestica (atoma ili molekula). Te se čestice nalaze u stalnom, nasumičnom pokretu, sudaraju se jedna s drugom i sa zidovima spremnika. U toku jedne sekunde čestica prolazi kroz brojne sudare, a svaka mijenja brzinu i smjer kretanja. Posljedično, atomi ili molekule imaju različitu brzinu. Međutim, moguće je govoriti o prosječnoj brzini čestica. U bilo kojem trenutku neki dio čestica ima brzine manje od prosjeka, neke su u blizini prosjeka, a neke veće od prosjeka. Škotski fizičar James Clerk Maxwell (1831-1879) izračunao je raspodjelu brzina molekula za plin s velikim brojem molekula na konstantnoj temperaturi, što odgovara situacijama koje uobičajeno susraćemo. Na slici gore prikazane su Maxwell-ove krivulje raspodjele brzina za kisik,  $\text{O}_2$ , na dvije različite

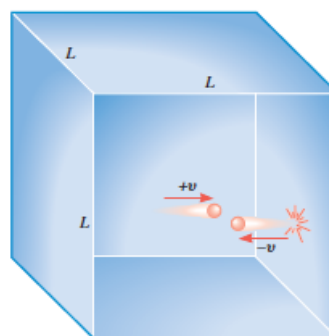


temperature. Kada je temperatura 300 K, na krivulji možemo pročitati da je najvjerojatnija brzina oko 400 m/s. Pri temperaturi od 1200 K, krivulja raspodjele pomiče se udesno, a najvjerojatnija brzina raste na oko 800 m/s. Jedna posebno korisna vrsta prosječne brzine, poznata kao rms brzina ima oznaku  $v_{\text{rms}}$ , također je prikazana na crtežu. Značenje rms brzine bit će raspravljen u nastavku ovog teksta.

**Kinetička teorija.** Ako se kuglom pogodi zid, ona djeluje na taj zid. Kao što slika desno sugerira, čestice plina rade isto, samo što su njihove mase manje, a brzine veće. Međutim, broj čestica plina je toliko velik i one toliko često udaraju u zid da se učinak njihovih pojedinačnih sudara ne može razlučiti, već se njihovi sudari s zidom manifestiraju kao kontinuirana sila. Ukoliko podijelimo silu s površinom zida dobit ćemo tlak kojim plin djeluje na zid.



Da bismo izračunali silu, razmotrimo idealni plin sastavljenom od  $N$  identičnih čestica u kubičnom spremniku, čije su stranice duljine  $L$ . Slika dolje prikazuje jednu česticu mase  $m$  koja udara okomito u desni zid te se od njega elastično odbija. Dok se približava zidu, čestica ima brzinu  $+v$  i količinu gibanja  $+mv$ . Nakon sudara sa zidom, čestica se udaljava brzinom  $-v$  i količinom gibanja  $-mv$ . Ona nakon toga putuje do lijevog zida, gdje se ponovno sudara sa zidom i kreće natrag udesno. Vrijeme koje protekne dva između sudara s desnim zidom  $t$  možemo izračunati ako udaljenost  $2L$ , podijelimo s brzinom čestice; to jest,  $t = 2L/v$ . Prema drugom Newtonovom zakonu, prosječna sila kojom zid djeluje na česticu računa se kao promjena količine gibanja u jedinici vremena:



$$\text{Srednja sila} = \frac{\text{Razlika u količini gibanja}}{\text{Vrijeme između dva sudara}} = \frac{(-mv) - (+mv)}{2L/v} = \frac{-mv^2}{L}$$

Prema trećem Newtonovom zakonu, sila kojom čestica djeluje na zid jednaka je ovoj sili, ali ima suprotni predznak (tj.  $+mv^2/L$ ). Iznos ukupne sile koja djeluje na desni zid,  $F$ , jednaka je broju čestica koje se sudaraju sa zidom tijekom vremena  $t$  pomnoženog s prosječnom silom kojom svaka čestica djeluje na zid. Budući da se  $N$  čestica kreće nasumično u tri dimenzije, jedna trećina ih prosječno udara u desni zid tijekom vremena  $t$ . Stoga je ukupna sila

$$F = \left(\frac{N}{3}\right) \left(\frac{mv^2}{L}\right)$$

U tom je rezultatu  $v^2$  zamijenjen s  $\overline{v^2}$  što predstavlja srednju vrijednost kvadratne brzine. Za korijen srednje vrijednosti kvadratne brzine koristimo kraticu rms. Uvedimo oznaku za korijen srednje vrijednosti kvadratne brzine  $v_{\text{rms}} = \sqrt{\overline{v^2}}$ :

$$F = \left(\frac{N}{3}\right) \left(\frac{mv_{\text{rms}}^2}{L}\right)$$



Tlak je sila po jedinici površine, pa onda imamo da je tlak  $P$  na površinu  $L^2$  jednak:

$$P = \frac{F}{L^2} = \left(\frac{N}{3}\right) \left(\frac{mv_{\text{rms}}^2}{L^3}\right) = \left(\frac{N}{3}\right) \left(\frac{mv_{\text{rms}}^2}{V}\right)$$

gdje je volumen kocke  $V = L^3$ . Ovaj se rezultat može drugačije zapisati kao

$$PV = \frac{2}{3}N \left(\frac{1}{2}mv_{\text{rms}}^2\right) \quad (14.3)$$

S obzirom na to da izraz  $\frac{1}{2}mv_{\text{rms}}^2$  predstavlja kinetičku energiju čestice  $\overline{\text{KE}}$ , slijedi

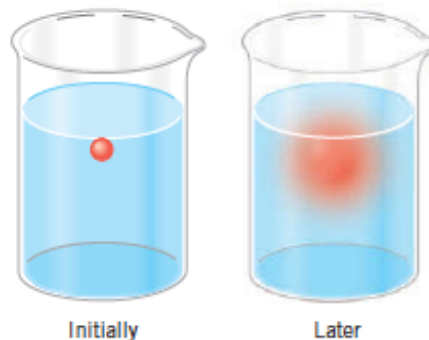
$$PV = \frac{2}{3}N(\overline{\text{KE}})$$

Ovaj je rezultat sličan jednadžbi stanja idealnog plina,  $PV = NkT$ . Obje jednadžbe imaju identične izraze na lijevoj strani, pa izrazi s desne strane moraju biti jednaki: Dakle,

$$\overline{\text{KE}} = \frac{1}{2}mv_{\text{rms}}^2 = \frac{3}{2}kT \quad (14.4)$$

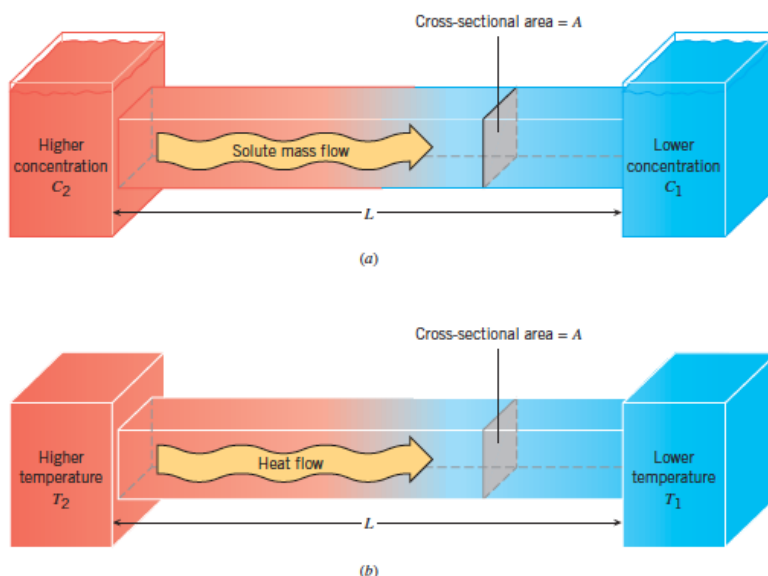
Jednadžba (14.4) je značajna jer nam omogućuje interpretaciju temperature u smislu gibanja čestica plina. Ova jednadžba ukazuje da je temperatura iskazana u Kelvinima izravno proporcionalna prosječnoj kinetičkoj energiji čestice idealnog plina, bez obzira na tlak i volumen. U prosjeku, čestice imaju veću kinetičku energiju kada je plin topliji nego kad je hladniji.

**Difuzija.** Miris parfema koji se nalazi u otvorenoj boci možete osjetiti i ukoliko ste udaljeni od te boce, jer molekule parfema napuštaju prostor iznad tekućine u boci i šire se u zrak. Tijekom putovanja sudaraju se s drugim molekulama, pa njihovi putovi nalikuju cik-cak stazama karakterističnim za Brownovo kretanje. Proces u kojem se molekule kreću iz područja veće koncentracije u područje s nižom koncentracijom naziva se *difuzija*. Difuzija se također događa u tekućinama i krutinama, a slika desno ilustrira difuziju tinte kroz vodu. Međutim, u usporedbi s brzinom difuzije u plinovima, difuzija je obično sporija u tekućinama, a još sporija u čvrstim tvarima. Relativno gledano, difuzija je spor proces, čak i u plinovima.



Da bismo razumijeli odnose veličina u difuziji, razmotrimo situaciju na slici dolje, pod (a). Šuplji kanal duljine  $L$  i područja presjeka  $A$  ispunjen je tekućinom. Lijevi kraj kanala povezan je sa spremnikom u kojem je velika koncentracija otopljene tvari  $C_2$ , dok je desni kraj povezan sa spremnikom u kojem se nalazi mala koncentracija

otopljene tvari  $C_1$ . Zbog razlike u koncentraciji između krajeva kanala,  $\Delta C = C_2 - C_1$ , dolazi do difuzije otopljene tvari s lijevog na desni kraj.



Uočimo sličnost ovog procesa s provođenjem topline duž šipke, koji je ponovo prikazan u slici pod (b). Prisjetimo se, kada se krajevi šipke održavaju na različitim temperaturama,  $T_2$  i  $T_1$ , duž šipke u vremenu  $t$  provede se toplina  $Q$  koja iznosi

$$Q = \frac{kA \Delta T}{L} t \quad (13.1)$$

Analogno ovoj jednadžbi moguće je napisati jednadžbu za difuziju: (1) zamijenimo  $Q$  masom otopljene tvari koja difundira kroz kanal,  $m$ , (2) zamijenimo  $\Delta T$  razlikom u koncentracijama,  $\Delta C = C_2 - C_1$ , te (3) zamijenimo  $k$  konstantom poznatom kao difuzijska konstanta,  $D$ :

$$m = \frac{DA \Delta C}{L} t \quad (14.5)$$

Rezultirajuću jednadžbu je prvi formulirao njemački fiziolog Adolf Fick (1829-1901) te se po njemu naziva Fickovim zakonom difuzije. Korisno je još definirati gustoću struje tvari kao masu tvari  $m$  koja prolazi kroz jedinicu površine  $A$  u vremenu  $t$  kao:  $J = m/At$ .

**Fickov zakon difuzije.** Postoji struja otopljene tvari kroz otapalo,  $J$ , koja je posljedica difuzije, a usmjerena je iz područja manje koncentracije u područje veće koncentracije:

$$J = -D \frac{\Delta C}{L} \quad (13.1)$$

pri čemu je  $\Delta C/L$  koncentracijski gradijent, a  $D$  difuzijska konstanta.

SI jedinica za difuzijsku konstantu:  $m^2/s$

## Fizika za biologe – vježbe

Zadaci sa (\*) preuzeti su iz udžbenika Young & Freedman (2011) University physics with modern physics (rješenja u prilogu).

Zadatke pokušajte riješiti samostalno. Detaljna rješenja će biti poslana naknadno. Sva pitanja šalžite na email: abosilj@phy.hr

### Temperatura i toplina

1. (\*17.2) Prosječna temperatura tijela zdravih ljudi mjerena u ustima iznosi  $310\text{ K}$ . Koliko iznosi dana temperatura ako ju očitamo s termometra baždarenog u stupnjevima Celsiusima?
2. (\*Primjer 17.5) Tijekom borbe s gripom čovjek mase  $80\text{ kg}$  trpi vrućicu od  $39^\circ\text{C}$  ( $102.2^\circ\text{F}$ ), dok u zdravom stanju temperatura njegovog tijela iznosi  $37^\circ\text{C}$  ( $98.6^\circ\text{F}$ ). Ako pretpostavimo da je tijelo većim dijelom voda, koliko topline je potrebno da se temperatura tijela podigne za ta  $2^\circ\text{C}$ ? Specifični toplinski kapacitet vode iznosi  $c_V = 4190\text{ J/kg} \cdot \text{K}$ .
3. (\*Primjer 17.7) Kamper ulijeva  $0.3\text{ kg}$  kave temperature  $70^\circ\text{C}$  u aluminijsku šalicu mase  $0.12\text{ kg}$  sobne temperature,  $20^\circ\text{C}$ . Kolika je ravnotežna temperatura sustava šalice i kave? Pretpostavite da je specifičan toplinski kapacitet kave jednak onom vode te da nema izmjene topline s okolinom. Također, ne dolazi do promjene faza. Specifični toplinski kapacitet aluminijske šalice iznosi  $c_{Al} = 910\text{ J/kg} \cdot \text{K}$ .
4. (\*Primjer 17.12) Čelična šipka duga  $10\text{ cm}$  je zavarena na kraj bakrene šipke duge  $20\text{ cm}$ . Šipke imaju kvadratni poprečni presjek od  $4\text{ cm}^2$ . Slobodni kraj čelične šipke održavamo na temperaturi od  $100^\circ\text{C}$  te slobodni kraj bakrene šipke na  $0^\circ\text{C}$  i šipke držimo izoliranim na slobodnim krajevima. Pronađite ravnotežnu temperaturu na spoju dvije šipke i ukupni prijenos topline u vremenu kroz šipke.
5. (\*Primjer 17.15) Koliki je iznos izračene energije u vremenu, s ljudskog tijela površine  $120\text{ m}^2$  i površinske temperature  $30^\circ\text{C}$ ? Ako je okolina na temperaturi od  $20^\circ\text{C}$  koliko iznosi ukupni gubitak izračene energije u vremenu prema okolini?
6. (\*Primjer 18.3) "Prazan" aluminijski spremnik za ronjenje sadrži  $11\text{ L}$  zraka na temperaturi  $21^\circ\text{C}$  i tlaku  $1\text{ atm} = 101325\text{ Pa}$ . Kada se spremnik brzo napuni temperatura zraka poraste na  $42^\circ\text{C}$  i tlak na  $2.1 \times 10^7\text{ Pa}$ . Kolika je masa dodanog zraka, ako znamo da je njegova prosječna molarna masa  $28.8\frac{\text{g}}{\text{mol}}$  te da je zrak koji udišemo mješavina 78% dušika, 21% kisika i 1% ostalih plinova?
7. (\*Primjer 18.6) Koliko iznosi prosječna translacijska kinetička energija molekule idealnog plina na  $27^\circ\text{C}$ ? Koliko iznosi ukupna nasumična translacijska kinetička energija  $1\text{ mol}$  idealnog plina? Koliko iznosi  $v_{rms}$  (korijen iz srednjeg kvadrata brzina) molekule kisika na danoj temperaturi?