

## **VSEBINA**

### **MERJENJE FIZIKALNIH KOLIČIN**

Merjenje dolžin in določanje leg predmetov

Merjenje časa

Določanje hitrosti in pospeškov

Določanje mase

Masna spektroskopija

Merjenje sil

Mikroskop na atomsko silo

Merjenje tlaka

Merjenje viskoznosti

Merjenje zračnega upora

Merjenje temperature

Kalorimetrija

Merjenje toplotne prevodnosti

Električna merjenja

Optična spektroskopija

Infrardeča spektroskopija

Spektroskopija jedrske magnetne resonance

Difrakcija rentgenskih žarkov

Sinhrotron

### **FIZIKA V TEHNIKI**

Uporaba električnih in magnetnih sil in navorov

Električne sile

Magnetne sile

### **ENERGETIKA**

Izkoriščanje sončne toplote - fototermika

Sončne elektrarne

Toplotni stroji

Gorivne celice

Energija vetra

Vodna energija

Jedrska energija

### **FIZIKA V VREMENOSLOVJU**

Energijski pretoki na zemeljskem površju

Gibanje zračnih mas

Statična elektrika v atmosferi

Prebojna jakost električnega polja

### **VESOLJE**

Enote v astronomiji

Ločljivost teleskopov

Novo odkriti planetni sistemi

### **PRENOS PODATKOV, TELEFONIJA IN RADIO**

ČLOVEŠKO TELO / Mehanika človeškega telesa / Ostrina vida / Sluh

ŠPORT IN PROSTI ČAS / Atletika / Kolesarstvo / Navtika / Na smučeh / Na vrveh

## MERJENJE FIZIKALNIH KOLIČIN

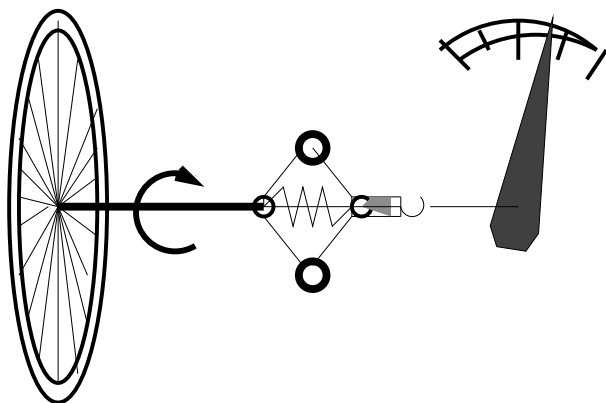
### Uvod

Le redke fizikalne količine lahko merimo neposredno. Vzemimo za primer merjenje dolžin predmetov. Če položimo ob merjeni predmet merilni trak, poravnamo en konec traku z enim koncem predmeta in odčitamo število dolžinskih enot na traku na drugem koncu predmeta, smo izvedli meritev na najbolj neposreden način. Če merimo razdaljo med dvema točkama z laserskim merilnikom, izmeri merilnik najprej čas preleta laserskega žarka od prve točke do zrcala, ki ga postavimo v drugo točko in nazaj in nato izračuna razdaljo. Še dosti več posrednikov je potrebno, če merimo razdaljo z GPS napravo, kot bomo videli kasneje. V tem primeru je posrednik sistem satelitov, ki krožijo okrog Zemlje visoko nad ozračjem. GPS naprava izmeri zakasnitve večjega števila radijskih signalov in nato določi lege točk na zemlji.

Merilniki fizikalnih količin so lahko analogni ali digitalni. Analogni merilniki izkoriščajo povezavo, ali podobnost obnašanja dveh količin - na primer jakosti električnega toka in zavrtitve tuljave v magnetnem polju, skozi katero teče električni tok. Z vrednostjo kota zavrtitve tuljave povežemo vrednost kotu analogne količine - to je jakost električnega toka. Sodobne merilne naprave nam posredujejo rezultate merjenj v številčni (digitalni) obliki. Tudi digitalni merilniki temeljijo na povezavi merjene količine z neko drugo fizikalno količino. Razlika med analognim in digitalnim merilnikom je v tem, da se slednji izogibajo gibljivim delom in da temeljijo na povezavi merjene količine z neko električno količino, ki ji določijo številčno vrednost in jo prikažejo na zaslonu. Istočasno spravijo rezultat merjenja tudi v računalniški spomin in je tako na voljo za računalniško obravnavo. Ponazorimo razliko med digitalnim in analognim merilnikom na primeru merilnika hitrosti cestnega vozila. V analognem merilniku prenese pletena žična vrstica vrtenje od kolesa v ohišje merilnika, kjer sredobežna sila napenja prožno vzmet, raztezek vzmeti povzroči odklon kazalca, ki pokaže doseženo hitrost na številčnici (glej sliko 1). Digitalni merilnik hitrosti pa je narejen tako, da pritrdimo na kolo magnetek, ob kolo pa tuljavico, v kateri se inducira pri vsakem vrtljaju kolesa napetostni sunek. Vse preostalo opravi elektronsko vezje, ki zazna napetostni sunek, prešteje nihaje elektronske ure med dvema zaporednima sunkoma in s tem določi frekvenco vrtenja kolesa. Nato pomnoži frekvenco z obsegom kolesa in rezultat je hitrost, ki jo prikaže v številski obliki na tekoče kristalnem prikazovalniku. Vzporedno lahko izračuna in prikaže napravica tudi povprečno hitrost, prevoženo pot in čas vožnje. Digitalni merilniki bi bili lahko tudi mehanske naprave. Na sliki 1 je prikazan merilnik razdalj. Spodnje kolo, ki se kotali vzdolž poti, ki jo merimo, pomakne naprej pri vsakem polnem obratu srednje kolo za kot  $2\pi/10$  in enak učinek ima srednje kolo na zgornje kolo. Rezultat meritve je v številčni obliki prikazan v okvirčkih.

### Merjenje dolžin in določanje leg predmetov

Poleg navadnih ravnil in metrov v obliki kovinskih trakov, ki nam omogočajo milimeter-sko natančnost, omenimo kljunasto merilo in mikrometersko vijačno merilo, s katerima lahko dosežemo desetmikronske natančnosti. Osnova teh naprav je *nonij* (slika 3), ki ga sestavljata dve daljici z dolžino  $l$ , ena je razdeljena na  $n$ , druga pa na  $n - 1$  enakih delov. Ko ti dve daljici vzporedimo, lahko njun relativni premik določimo z natančnostjo  $l/n^2$ , saj se, če premikamo en trak glede na drugega, zapovrstoma pokrivajo pari črtic - po ena na enem traku in ena na drugem traku po vsaki pretečeni razdalji  $l/n^2$ . Pri kljunastem



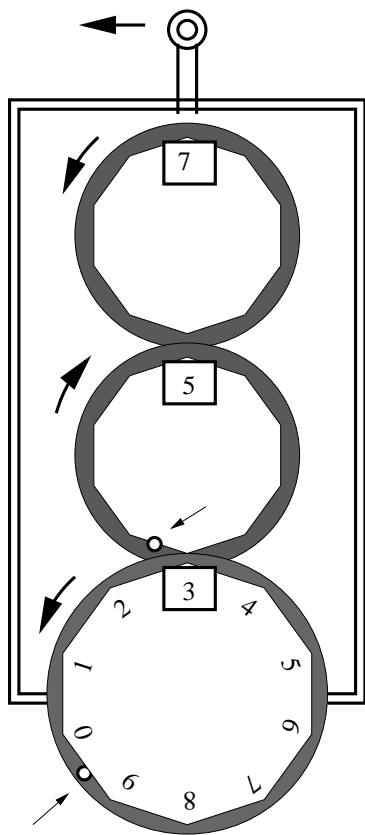
Slika 1: Analogni merilnik hitrosti vrtenja kolesa

merilu sta običajni vrednosti  $n = 10$  in  $l = 1\text{ cm}$ , natančnost je stomikronska, pri mikrometerskem vijačnem merilu pa se  $l$  nanaša na kot zavrtitve vijaka, s katerim reguliramo merilno režo. Dosežena natančnost pa je deset mikrometrov.

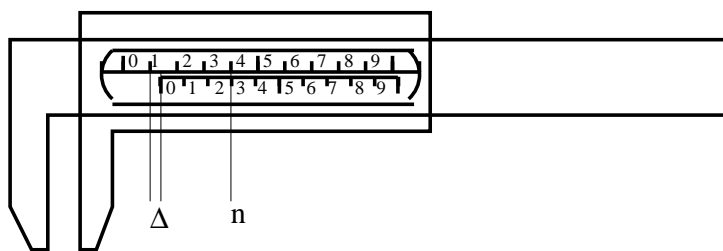
Velike razdalje lahko merimo na več načinov. Triangulacija je postopek, pri katerem izmerimo na poljubnem način (lahko tudi s polaganjem metra v obliki kovinskega traku) razdaljo med dvema točkama. Če želimo vedeti, kakšna je razdalja od točk A in B do tretje točke C, nam teh dveh razdalj ni treba meriti na enak (zamuden) način, kot smo merili razdaljo med točkama A in B, ampak izmerimo kota ABC in BAC in nato določimo razdalji AC in BC z razrešitvijo trikotnika, v katerem poznamo eno stranico in dva kota. Laserski merilniki omogočajo hitro neposredno merjenje razdalj. Če želimo izmeriti razdaljo med točkama A in B, postavimo merilnik v točko A, zrcalo v točko B, naprava izmeri čas, ki ga potrebuje optični signal, da prepotuje razdaljo do zrcala in nazaj in izračuna in izpiše razdaljo med točkama A in B. Takšni merilniki so seveda dražji od metrov v obliki kovinskih trakov, vendar je njihova cena še vedno dostopna osebam, ki jih potrebujejo za poklicno delo, kot so na primer geodeti.

Omenimo še sisteme, ki omogočajo določanje koordinat na zemeljskem površju ali v zraku. To so sistemi satelitske navigacije. Sistem, ki ga je postavila vojska Združenih držav Amerike je znan po kratici GPS, kar je okrajšava za *Global Positioning System*. Sistem omogoča meritve z natančnostjo enega metra, s približno desetkrat manjšo ločljivostjo pa je dostopen civilni javnosti po vsem svetu. Postavitev sistema predstavlja velik finančni zalogaj, saj si ga lahko privoščijo le najbogatejše države na svetu. Evropska unija postavlja sistem Galileo za satelitsko navigacijo s 30 sateliti, ki bo dostopen civilnemu prebivalstvu in bo deloval z natančnostjo enega metra.

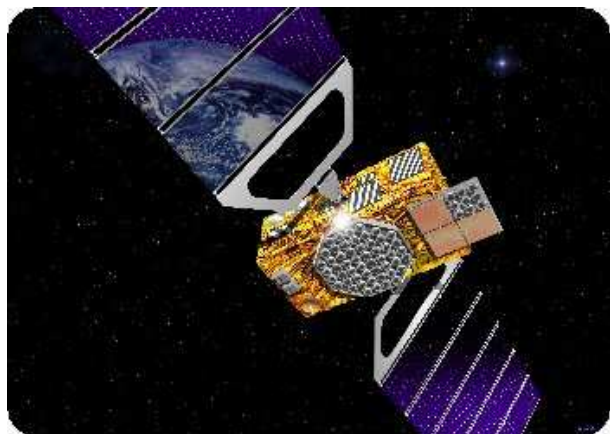
Poglejmo si, kako deluje sistem satelitske navigacije. Temelj sistema je večje število umetnih satelitov, ki krožijo nad Zemljo in neprestano oddajajo sinhronizirane radijske signale. Naprava na Zemlji, ki sprejema signale vsaj od štirih ali petih satelitov, ima vgrajen računalniški program, ki iz razlike časov med prispelostjo signalov od posameznih satelitov izračuna svojo zemljepisno širino, dolžino in nadmorsko višino. Na sliki 5 je ilustriran poenostavljen primer, ko ležijo sprejemnik in trije sateliti v skupni ravnini. Naj bosta  $t_1$  in  $t_2$  zakasnitvi signalov prvega in drugega satelita glede na tretji satelit, ki je prejemu najbližji. Ker potujejo signali s svetlobno hitrostjo, nam povesta vrednosti



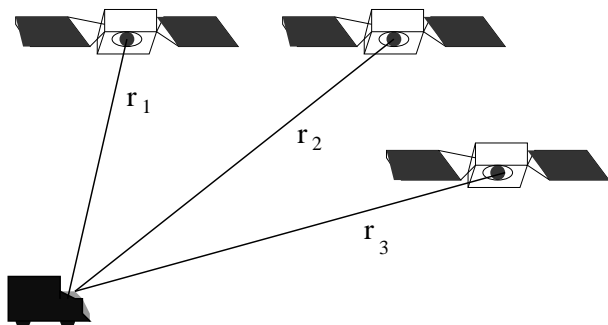
Slika 2: Digitalni merilnik dolžin. Krogca na spodnjem in srednjem kolesu, ki sta označena s puščicama, predstavljata mozni, ki zavrti kolo nad sabo, ko pride z njim v stik, za kot  $2\pi/10$ . Številke v treh okvirčkih kažejo vrednost izmerjene poti. Zgornja številka kaže desetice, srednja enice, spodnja pa desetine v enotah obsega spodnjega kolesa.



Slika 3: Kljunasto merilo. Vrednost dolžine, ki ustreza razprtju kljuna, preberemo na zgornjem merilu levo od črtice, ki označuje na spodnjem merilu ničlo. Velikost preostanka, ki je na sliki označena z  $\Delta$ , določimo tako, da preštujemo število presledkov do mesta, kjer sta črtici na zgornjem in spodnjem merilu na istem mestu. Na sliki je to pri  $n=3$ , kar pomeni, da je izmerjena vrednost enaka 1,3 enote.



Slika 4: Satelit iz evropskega navigacijskega sistema Galileo



Slika 5: S treh satelitov prihajajo signali, ki so bili oddani istočasno, do sprejemnika z različnimi zakasnitvami. Računalnik v sprejemniku določi svojo lego z rešitvijo enačb (\*) in (\*\*).

$t_1$  in  $t_2$ , da sta daljici  $l_1$  in  $l_2$  za  $ct_1$  in  $ct_2$  daljši od  $l_3$ . To lahko zapišemo v obliki dveh enačb

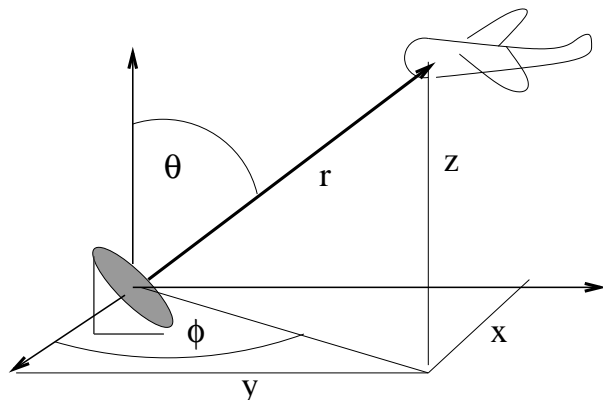
$$\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} - \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2} = ct_1 \quad (*)$$

$$\sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2} - \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2} = ct_2. \quad (**)$$

Imamo torej opravka s sistemom dveh nelinearnih enačb z neznankama  $x$  in  $y$ , ki predstavljata ravninski koordinati sprejemnika. V trirazsežnem prostoru mora sprejemnik ujeti signale vsaj štirih satelitov in nato rešiti tri enačbe v katerih nastopajo kot neznanke njegove tri koordinate  $x, y, z$ , ki jih je mogoče pretvoriti v zemljepisno širino, zemljepisno dolžino in nadmorsko višino.

Obstojajo tudi majhne in cenene naprave, ki v ozko omejenih okoljih delujejo podobno kot GPS sistemi. To so dodatki, s katerimi opremijo proizvajalci avtomatske kosilnice trat, sesalce za prah in podobne naprave, ki se orientirajo po antenah, ki jih je potrebno namestiti na vogale površin, po katerih se gibljejo avtomatske naprave. Tudi slepim osebam lahko takšne naprave zelo olajšajo gibanje, če jim z zvočnimi signali sporočajo, kje se nahajajo.

Tudi radarski sistemi, s katerimi so opremljena letališča, pristanišča, ladje in zračna



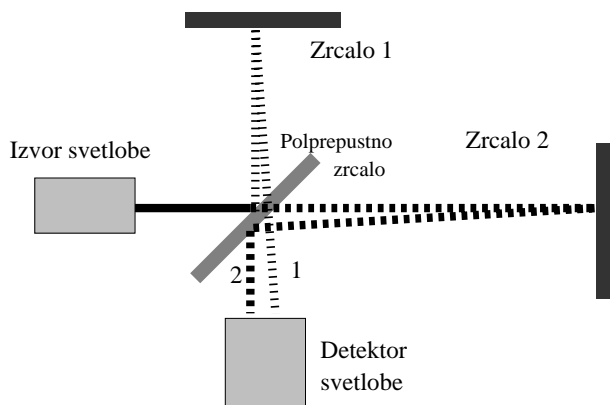
Slika 6: Radarska naprava lahko določi lego objekta, na katrem so se odbili radarski valovi

plovila, delujejo lokalno. Radarska naprava oddaja kratke sunke elektromagnetnega valovanja milimeterskih, centimeterskih ali decimeterskih valovnih dolžin ter sprejema odbito valovanje. Smer oddanega in odbitega radarskega žarka ter čas zakasnitve odbitega žarka določata lego ovire, na kateri se je radarski signal odbil. Iz slike 6 je razvidno, da smer (kota  $\theta$  in  $\varphi$ ) in razdalja med radarskim oddajnikom in opazovanim objektom ( $r$ ) natančno določata prostorske koordinate objekta. Velja namreč  $x = r \sin \theta \cos \varphi$ ;  $y = r \sin \theta \sin \varphi$  in  $z = r \cos \theta$ .

Morska voda vpija vse vrste elektromagnetnega valovanja, zato so radarski valovi in vidna svetloba neuporabni za določanje lege predmetov globoko pod morsko gladino. Uporabno pa je zvočno valovanje. Delfini, podobno kot netopirji, lovijo plen tudi podnevi tako, da ga zaznavajo s prisluškovanjem. Lovijo odbite zvoke, ki so jih poslali v okolico. Človek je po vzoru delfinov skonstruiral naprave, ki se imenujejo sonarji in so za podvodni svet to, kar so radarji za svet nad zemeljskim površjem. Sonarji oddajajo kratke piske in lovijo odboje, ki jih povzročata morsko dno, ladje, podmornice ali ribje jate.

Pri merjenju majhnih razdalj, manjših od milimetra, ali celo manjših od mikrona se uporabljajo interferometri. Na sliki 7 je skiciran Michelsonov interferometer. Žarek, ki ga oddaja izvor, se razcepi na polprepustnem zrcalu. Del žarka nadaljuje pot do zrcala 1, del pa do zrcala 2. Na zrcalih se delna žarka odbijeta in nadaljujeta pot proti polprepustnemu zrcalu, kjer se zopet lahko odbijeta ali sta prepuščena. Tista dva dela žarkov, ki nadaljujeta pot proti detektorju svetlobe (na sliki sta označena s številčkama 1 in 2), interferirata. Lahko se ojačita ali oslabita. Ojačita se, kadar je razlika njunih optičnih poti po prvem razcepu na polprepustnem zrcalu cel mnogokratnik valovne dolžine. Če torej premikamo eno od zrcal v smeri, ki je pravokotna na žarke, bo intenziteta svetlobe, ki jo zazna detektor, nihala s periodo  $\lambda/2$ , kajti pri premiku zrcala za polovično valovno dolžino se pot žarka spremeni za celo valovno dolžino. Ta pojav omogoča natančno merjenje dolžin, saj je, če imamo izvor, ki daje točno določeno valovno dolžino svetlobe, potrebno pri premikanju zrcala le prešteti minime in maksime intenzitete, ki jih izmeri detektor svetlobe.

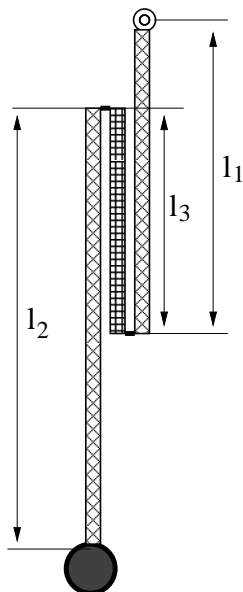
## Merjenje časa



Slika 7: Michelsonov interferometer

Običajne ure delujejo na osnovi mehanskih nihalo. V stenskih ali stolpnih urah meri čas težno nihalo, katerega nihajni čas podaja izraz  $T = 2\pi\sqrt{l/g}$ , če je utež dovolj točkasta in prečka z dolžino  $l$ , na kateri visi utež, dovolj lahka, da je nihalo dovolj podobno matematičnemu nihalu - sicer pa moramo uporabiti izraz za fizično nihalo  $T = 2\pi\sqrt{J/mgr^*}$ , kjer je  $J$  vztrajnostni moment nihala,  $r^*$  pa razdalja med težiščem in obesiščem. Ure s težnimi nihali imajo najmanj dve pomanjkljivosti. Prva je ta, da je njihov tek odvisen od velikosti težnega pospeška - torej od geografske širine. Njihovo točnost uravnavamo z vijakom, ki omogoča daljšanje in krajšanje nihala. Dolžina nihala pa je občutljiva tudi na temperaturne spremembe. To pomanjkljivost se deloma odpravi na način, ki je prikazan na sliki 8. Prečka, ki nosi utež, je sestavljena iz treh segmentov. Segmenta z dolžinama  $l_1$  in  $l_2$  naj imata koeficient temperaturnega raztezka  $\alpha_1$ , segment z dolžino  $l_3$  pa  $\alpha_2$ . Spremembo dolžine nihala s temperaturo izrazimo takole:  $dl = ((l_1 + l_2)\alpha_1 - l_3\alpha_2)$ . Če velja  $\alpha_1/\alpha_2 = l_3/(l_1 + l_2)$ , bo dolžina nihala neodvisna od temperature.

V nekaterih starejših urah lahko še vedno najdemo nemirke - to so sučna nihala na polžasto vzmet, ki nihajo z nihajnim časom  $T = 2\pi\sqrt{D/J}$ . Konstanto polžaste vzmeti smo označili z  $D$ . Tudi v tem primeru je nihajni čas odvisen od temperature, vendar je mogoče najti rešitve, ki temperaturno odvisnost odpravijo na podoben način, kot je prikazano na sliki 8. Mehanske ure so podvržene tudi pomanjkljivostim, ki izvirajo iz utrujanja in obrabe materialov, iz katerih so narejena nihala. Pred nekaj desetletji so svet preplavile elektronske ure. Naredili so nihalo milimeterske velikosti v obliki kvadra ali glasbenih vilic iz enaga najtrših in najodpornejših, najboljstojnejših - in ne predragih - materialov, kar jih je najti v naravi. To je silicijev dioksid v obliki monokristala, ki mu pravimo kremen ali kvarc. Takšno nihalo vgradijo v električno vezje, ki mu dovaja energijo, da nihanje ne zamre. Kremen je namreč piezoelektrik, kar pomeni, da se na mehansko deformacijo odzove z električno napetostjo, na napetost pa z deformacijo. V uro vgradijo še elektroniko, ki šteje nihaje in prikaže čas. Tako nastane zelo natančna kremenčeva ura, ki v enem letu prehiteli ali zaostane le za nekaj sekund. Za nadaljnjo izboljšavo natančnosti se je potrebno v celoti odpovedati uporabi mehanskih nihalo in zgraditi ure, ki temeljijo na gibanju (dinamiki) v svetu atomov. Danes se uporabljajo cezijeve ure, ki tečejo bolj enakomerno, kot je enakomerno vrtenje Zemlje. Sekunda zato ni več definirana kot 1/86400-ti del dneva, ampak kot 9.192.631.770 nihajnih časov valovanja, ki ga oddaja atom cezija 133 pri prehodu med dvema energijskima stanjema, ki nastaneta na



Slika 8: Nihalo, katerega dolžina ni občutljiva na spremembe temperature

račun hiperfine cepitve osnovnega energijskega stanja. 24 ur sestavljenih iz tako definiranih sekund je ustrezalo dolžini enega dneva pred nekaj desetletji. Ker se vrtenje Zemlje upočasnjuje, dodajajo po potrebi prestopne sekunde, podobno kot se dodaja prestopnim letom 29. februar. Pomembna razlika med dodajanjem prestopnih dni in prestopnih sekund je v tem, da je za določanje prestopnih let potrebna dosti manj natančna ura, kot za določanje prestopnih sekund. Zato so že pred stoletji lahko določili za naslednjih nekaj tisoč let pravilo za izračun, katera leta bodo prestopna, medtem ko je videti, da pravilo, kako dodajati prestopne sekunde, ni v človeškem dosegu. Hitrost vrtenja Zemlje je namreč odvisna od naključnih dogodkov, kot so potresi in gibanje zračnih gnot. Dolgoročnih napovedi za ti dve vrsti pojavov še ni na vidiku in zato bo tudi potreba po dodajanju prestopnih sekund temeljila na meritvah dolžine pretekle polovice leta in ne bo napovedljiva.

Izdelava atomskih ur zahteva visoko tehnologijo in tudi vzdrževanje je drago, zato so instalirane samo v osrednjih ustanovah nekaterih držav. Videti je pa, da se bodo razvile nove tehnologije, ki bodo omogočile proizvodnjo atomskih ur žepnega in ročnega formata. Že danes pa so ljudem na voljo ure, ki kažejo čas z natančnostjo atomskih ur. Kupiti je namreč mogoče ure, ki jih uravnava radijski signali, ki jih proži cezijeva ura, ki je instalirana v državnem zavodu, ki skrbi za natančno merjenje časa.

### Določanje hitrosti in pospeškov

Hitrost in pospešek nekega telesa poznamo, če vemo, kako se spreminja njegova lega v prostoru v odvisnosti od časa. Povedali smo že, kako merimo razdalje in čas. Omenimo le nekaj naprav, ki mogočajo posredno merjenje kinematičnih količin.

- Laserski merilnik hitrosti na osnovi časa preleta signala  
Merilnike te vrste uporablja prometna policija za merjenje hitrosti vozil v cestnem prometu. Laserska naprava odda dva kratka svetlobna signala z natančno določenim



časovnim zamikom in ulovi na gibajočem se predmetu odbita signala. Z merjenjem časov zakasnitve obeh signalov določi naprava razdaljo in hitrost gibajočega se vozila. Račun, ki poveže spremembo med dolžinama časovnih intervalov med oddanimi signaloma in med sprejetima signaloma, je enak računu, ki ga je treba opraviti pri obravnavi Dopplerjevega pojava (glej izpeljavo enačbe M100).

- Merilnik hitrosti na osnovi Dopplerjevega pojava radarskih ali zvočnih valov  
V prometu se za meritve hitrosti vozil uporabljajo poleg laserskih merilnikov tudi merilniki hitrosti, ki uporabljajo radarsko valovanje. Snop radarskega valovanja, ki ga oddaja merilnik, se odbije na vozilu in naprava zmeri frekvenco odbitega valovanja. Frekvenca je povišana ali znižana za prispevek, ki je približno sorazmeren razmerju med hitrostjo vozila in svetlobno hitrostjo pri približevanju, oziroma oddaljevanju vozila. Radarski merilnik ima nakatere pomanjkljivosti v primerjavi z laserskim merilnikom. Radarski snop je širok in merilec ne ve vedno, hitrost katerega vozila je izmeril. Težava je tudi v tem, da se vozniki lahko opremijo z detektorji radarskega valovanja, in avtomobil lahko samodejno zmanjša hitrost, kadar se znajde v radarskem snopu. Laserski žarek je zelo tanek in merilec ga lahko nameri na točno določen del vozila, tako da ga voznikov detektor, če bi ga imel, ne more zaznati.

Podobno, kot delujejo radarski merilniki hitrosti cestnih vozil in zračnih plovil, delujejo tudi merilniki hitrosti podvodnih plovil. Podmornica, na primer, ki se giblje s hitrostjo  $v_1$  in odda zvok s frekvenco  $\nu$ , sprejme na drugi podmornici odbiti signal s spremenjeno frekvenco, iz katere je mogoče izračunati relativno hitrost obeh podmornic.

- Merilnik hitrosti na osnovi Bernoullijeve enačbe  
Hitrost ladij nekateri še vedno izražajo z vozli. Danes pomeni hitrost enega vozla eno morsko miljo preplute poti v eni uri. Ena morska milja pa ustreza razdalji med dvema točkama, ki ležita na istem poldnevniku, razlika njunih zemljepisnih širin je pa ena ločna minuta - to znese 1852 m. V srednjem veku so merili hitrost ladje tako, da so vrgli s krova en konec vrvi, ki je bil bil opremljen z deščico, ki je delovala kot vodno sidro, po dolžini vrvi pa so bili enakomerno razporejeni vozli. Hitrost ladje so določili kot število vozlov, ki so zdrseli s krova v času, ko se je iztekla peščena ura. Današnji merilniki hitrosti plovil temeljijo na vodnem upor, za kopenska vozila in zračna plovila pa se lahko izkorišča zračni upor. Fizikalne osnove teh merilnikov podaja Bernoullijeva enačba, iz katere izhaja tudi izraz za zastojni tlak in za kvadratni zakon upora.
- Merilnik hitrosti na osnovi GPS signalov  
GPS sprejemniki postajajo vse cenejši in zato postaja določanje hitrosti z njihovo pomočjo vse pogostejša in elegantna rešitev. Te vrste merilniki ne morejo kazati trenutne hitrosti, ampak povprečne hitrosti v dovolj dolgem časovnem intervalu, da je relativna napaka razdalj in s tem nenatančnost izmerjene hitrosti dovolj majhna.

## Določanje mase

Izdelava tehtnic ima že tisočletno tradicijo in trimestno natančnost so pri tehtanju dosegali že pred stoletji. Pri tehtanju se bodisi meri sila teže tako, da se meri raztezek na

umerjeni vzmeti, ali pa se išče ravnovesje navorov znane uteži in merjene mase. Pri prvi od omenjenih metod ne moremo doseči prav velike natančnosti, saj določamo maso na osnovi enačbe  $mg = kx$ . Ker nastopa v enačbi produkt zemeljskega težnega pospeška in mase, je natančnost, skatero določimo maso, odvisna od natančnosti, s katero je določen zemeljski težni pospešek. Ta pa se spreminja z zemljepisno širino, odvisen je pa tudi od sestave tal v bližini. Gore, doline in gmote kamenin z nadpovprečno gostoto namreč spreminjajo vrednost težnega pospeška. Pri natančnem tehtanju moti tudi vzgon v zraku, ki ga pa lahko odpravimo, če tehtamo v brezračnem prostoru. Višje natančnosti dosežemo s primerjanjem neznane mase z natančno umerjenimi utežmi. V tem primeru določimo neznano maso iz enačbe, ki izenačuje navora, ki ga povzročata znana in neznana masa:  $m_x g l_x = m_0 g l_0 =$  od koder sledi  $m_x = m_0 (l_0 / l_x)$ . Lekarniške tehtnice imajo ročici obeh vzvodov enako dolgi, decimalne tehtnice imajo ročico vzvoda, na kateri visijo uteži, destkrat daljšo. Dobre tehtnice dosežajo visoko natančnost, tako da je relativna napaka manjša od ene milijoninke ali celo od ene milijardinke.

### Masna spektroskopija

Posebno eleganten način tehtanja atomov in molekulskih fragmentov dosežemo z napravami, ki jih imenujemo masni spektrometri. To so naprave, ki najprej ustvarijo ione, jih pospešijo, nato pa jih usmerijo vzdolž vakuumskih vodov skozi magnetno polje, ki mora biti pravokotno na hitrost delcev. V magnetnem polju se nabiti delci gibljejo po krožnem tiru, tako da je produkt radialnega pospeška in mase enak magnetni sili

$$evB = mv^2/r. \quad (*)$$

Ker pa smo delce pospešili z napetostjo  $U$ , velja

$$mv^2/2 = eU. \quad (*)$$

Iz zgornjih dveh enačb lahko izrazimo maso delca

$$m = eB^2 r^2 / (2U). \quad (**)$$

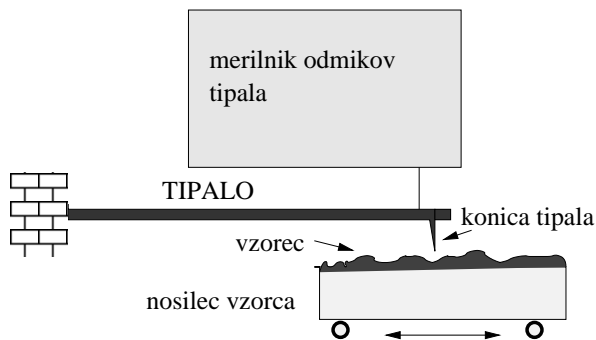
Če hočemo torej izmeriti maso delca, moramo poznati napetost, s katero smo ga pospešili, gostoto magnetnega polja, s katerim nabite delce uklanjamo, polmer kroga, po katerem krožijo delci in njihov naboj. Posebne izvedbe masnih spektrometrov omogočajo zelo natančno določanje mase delcev in predstavljajo dragoceno pomoč kemikom, ko določajo kemijsko sestavo spojin.

### Merjenje sil

Najenostavnejši način merjenja sil omogočajo vijačne vzmeti. Pri dinamometru na vijačno vzmet izmerimo raztezek in določimo silo, če smo prej določili koeficient vzmeti (glej sliko (M7)). Poleg elastičnosti se uporablja za merjenje sil tudi piezoeffekt - to je lastnost nekaterih snovi, da postanejo pri obremenitvi generatorji električne napetosti. Takšni merilci imajo prednost, kadar hočemo predstaviti rezultat z elektronskim prikazovalnikom, ali če želimo pretvoriti rezultat v digitalno obliko.

### Mikroskop na atomsko silo

Najšibkejše sile, ki jih še lahko merimo, so v velikostnem razredu pikonewtona (pN).



Slika 9: Mikroskop na atomsko silo

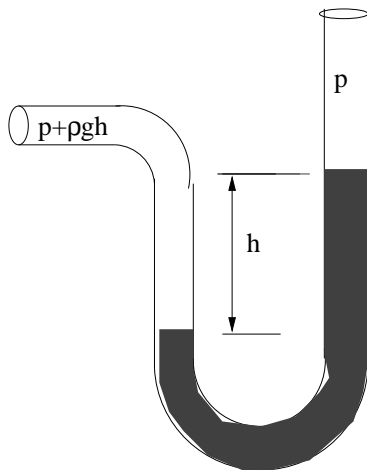
Merilniki tako majhnih sil so vgrajeni v naprave, ki jim pravimo mikroskop na atomsko silo. V takšnem mikroskopu (glej sliko 9) se pomika po površini preiskovanega vzorca koničasto tipalo, ki je pripeto na prožno držalo. Upogibi držala, ki so posledica odbojnih in privlačnih sil med tipalom in površino, povzročijo spremembe v merilniku odmikov tipala. Za merjenje odmikov se najpogosteje uporablja kakšen od naslednjih treh fizikalnih pojavov: spreminjanje kapacitete kondenzatorja, katerega ena plošča je pripeta na tipalo; spreminjanje smeri laserskega žarka, ki se odbija na zrcalcu, ki je pripeto na tipalo, ali merjenje električne napetosti, ki jo ustvari piezoelektrični kristalček, ki je vpet med ohišje in držalo tipala. V vsakem od treh primerov se izhodna električna napetost pretvori v digitalni signal in ko prečeše tipalo celotno površino vzorca, se pojavi na zaslonu mikroskopa na atomsko silo slika površine vzorca. Ločljivost takšnega mikroskopa je lahko do tisočkrat boljša od optičnih mikroskopov. Uspeli so opazovati razporeditev posameznih atomov na površini vzorca in oblike bioloških makromolekul, ki so jih nanесли na ravno trdno površino.

### Merjenje tlaka

Tlak merimo z barometri. Najpreprostejši barometer je cevka v obliki črke U, ki je v spodnjem delu napolnjena s tekočino. Razlika tlakov nad tekočino v obeh krakih je enaka  $\Delta p = \rho gh$ , kjer je  $h$  razlika med ravnema tekočine,  $\rho$  pa je gostota tekočine (glej sliko 10). Če je tekočina voda, ustreza enemu metru višinske razlike približno 10 kilopascalov, če pa je tekočina živo srebro ( $\rho = 1353,4 \text{ kg/m}^3$ ), ustreza enemu metru 133,322 kilopascalov, 760 milimetrom pa 101,3 kilopascalov ali 1013 milibarov, kar je normalni zračni tlak ob lepem vremenu na morski gladini. Že Evangelista Torricelli je leta 1643 izmeril zračni tlak. Njemu v čast je bila dolgo v uporabi enota *tor*, ki je predstavljala tlak, ki ustreza en milimeter visokemu stolpcu živega srebra. Danes se živosrebrni barometri le redko uporabljajo. Bolj priročne in elegantne so izvedbe barometrov v obliki majhnih posodic, iz katerih izsesajo zrak, prožne vzmeti pa merijo silo na eno od sten posodice. Spremenljiv raztezek vzmeti prevedejo v električni signal, ki ga pretvorijo v digitalni zapis. Posebej zahtevna je konstrukcija merilnikov zelo velikih tlakov (kilobari, megabari) in zelo majhnih tlakov v režimu visokega vakuumu.

### Merjenje viskoznosti

Viskoznost je fizikalna količina, ki ima, podobno kot električna prevodnost, zelo velik razpon vrednosti. Največje vrednosti ima viskoznost pri steklih. Na osnovi površne ocene



Slika 10: Barometer v obliki U cevke

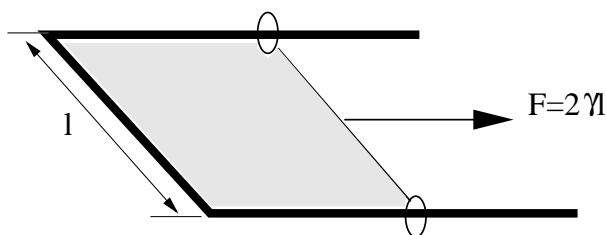
pridemo do zaključka, da so stekla trdne snovi, če pa jih opazujemo desetletja ali stoletja, ugotovimo, da se obnašajo kot zelo viskozne tekočine, saj je moč opaziti, da se okenska stekla debelijo nad spodnjim robom in tanjšajo pod zgornjim robom. Med tekočinami kažejo najmanjšo vrednost viskoznosti nizkomolekularne tekočine blizu vrelišča, še manjše vrednosti viskoznosti pa kažejo plini. Način merjenja viskoznosti moramo prilagoditi velikostnemu redu pričakovanega rezultata. Za zelo viskozne tekočine lahko uporabimo način, ki temelji na merjenju strižne hitrosti, ki je posledica učinka strižnih obremenitev:  $\eta = (F/S)/(dv/dz)$ . Lahko merimo tudi hitrosti padanja kroglice v viskozni tekočini, viskoznost pa izračunamo kot  $\eta = F_u/(6\pi r v)$ . Za vrednost sile  $F_u$  postavimo razliko med težo kroglice in silo vzgona. Viskoznost lahko določimo tudi z merjenjem pretokov tekočine ali plina skozi cevke z znano dolžino in premerom ali z merjenjem dušenja sučnih nihaj, ki nihajo v viskoznem mediju. Viskoznost merimo v enotah *pascalsekunda* ( $Pa\ s$ ). Uporablja se tudi enota *poise*, ki je desetkrat manjša ( $1\ Pa\ s = 10\ poise$ ).

### Merjenje površinske napetosti

Eden od načinov merjenja površinske napetosti je prikazan na sliki 11. Površinska napetost tekočine se spreminja s temperaturo in tlakom, odvisna je pa tudi od sestave tekočine. Vemo namreč, da se z dodatkom detergenta vodi močno zmanjša površinska napetost. Z rastočo temperaturo površinska napetost pada in pri kritični temperaturi pade na nič. Površinsko napetost lahko dokaj natančno določimo z merjenjem dviga tekočine v kapilarah, vendar moramo izmeriti tudi mejni kot, saj tudi ta določa velikost kapilarnega dviga. Mejni kot pa je lahko različen pri vsaki snovi, s katero pride dana tekočina v stik. Mejni kot določamo z analizo fotografskih posnetkov področja, kjer pride tekočina v stik s steno.

### Merjenje zračnega upora

Zračni upor avtomobilskih in letalskih modelov merijo v vetrovnikih. Vetrovniki so velike in drage naprave in le največje svetovne tovarne si jih lahko privoščijo. Model ohišja avtomobila, letala, ali letalskega krila pritrdijo na posebno držalo, ki meri sile, ki jih povzročata zračni tok. Običajno se merita dve komponenti sile: komponenta v smeri zračnega toka - to je sila zračnega upora in komponenta v pravokotni smeri na smer zračnega toka - če



Slika 11: Merjenje površinske napetosti

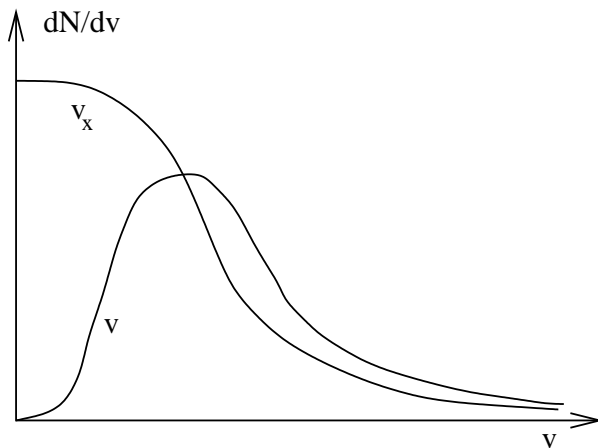
deluje v smeri navzgor, ji pravimo sila aerodinamičnega vzgona.

### Merjenje temperature

Temperatura je definirana na osnovi povprečne količine kinetične energije na prostostno stopnjo osnovnih gradnikov snovi. Zmnožek Boltzmannove konstante ( $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ) in temperature izražene v enotah Kelvinove temperaturne skale je enaka povprečni vrednosti energije na prostostno stopnjo. Če imamo opravka z enoatomsko snovjo in so osnovni gradniki atomi, so edina oblika prostostnih stopenj translacijska gibanja atomov, kinetična energija, ki izvira iz tega gibanja, pa je oblika pripadajoče notranje energije. Torej lahko zapišemo  $mv_{povp}^2/2 = k_B T/2$ . Pri sobni temperaturi so povprečni hitrosti atomov ali molekul nekaj kilometrov v sekundi. Dejanske hitrosti molekul imajo dokaj široko porazdeljene vrednosti, kot je razvidno s slike12. Če je snov sestavljena iz dvoatomskih molekul, ima vsaka molekula poleg translacijskih prostostnih stopenj še eno vibracijsko prostostno stopnjo in dve rotacijski prostostni stopnji. Tudi za pravkar našete prostostne stopnje velja tako imenovani ekviparticijski izrek, ki pravi, da je povprečna količina kinetične energije na prostostno stopnjo enaka  $k_B T/2$ . Nelinearne triatomske molekule, kot so na primer molekule vode, imajo devet prostostnih stopenj: tri translacijske, tri rotacijske in tri vibracijske prostostne stopnje. V splošnem primeru ima molekula z  $N$  atomi, če je snov v plinastem stanju, po tri translacijske, tri rotacijske prostostne stopnje in  $3N - 6$  vibracijskih prostostnih stopenj. Pri prehodu snovi v tekoče in v trdno stanje se translacijske in včasih tudi rotacijske prostostne stopnje pretvorijo v vibracije.

Če bi hoteli neposredno meriti temperaturo, bi morali meriti porazdelitev translacijskih, rotacijskih in vibracijskih hitrosti molekul in iz dobljene porazdelitve bi potem izračunali temperaturo. Takšni postopki so sicer izvedljivi, vendar zelo dragi in zamudni. Zato merimo temperaturo vedno posredno, tako da merimo fizikalne količine, ki so od nje odvisne - na primer tlak, gostoto, temperaturne raztezke, spremembe električne upornosti ali električno napetost, ki jo generirajo termočleni. Posebej odlikovane snovi, ki so uporabne za izvedbo termometrov, so idealni plini, saj je tlak idealnega plina sorazmeren temperaturi. Pri ostalih fizikalnih količinah, kot so na primer temperaturni raztezki, električna prevodnost in napetost termočlenov, je sorazmernost le približna in je potrebno zato merilnike ustrezno prilagoditi.

Najpogosteje se uporabljajo tekočinski termometri. V njih je merilna tekočina (alkohol ali živo srebro) zaprta v stekleno posodico, iz katere vodi kapilara. Če je volumski raztezek tekočine  $\beta_t$  večji od volumskega raztezka stekla  $\beta_s$ , bo pri segrevanju zavzemala tekočina vedno več prostora in stolpec v kapilari se bo daljšal. Za daljšanje stolpca velja enačba



Slika 12: Maxwell - Boltzmannova porazdelitev hitrosti molekul v plinu. Krivulja, ki je označena z  $v_x$  predstavlja verjetnost, da bomo našli v plinu molekulo, katere komponenta hitrosti bo imela vzdolž neke poljubno izbrane smeri vrednost, ki ustreza mestu na abscisni osi. Krivulja, ki je označena z  $v$ , pa velja za celotno hitrost.

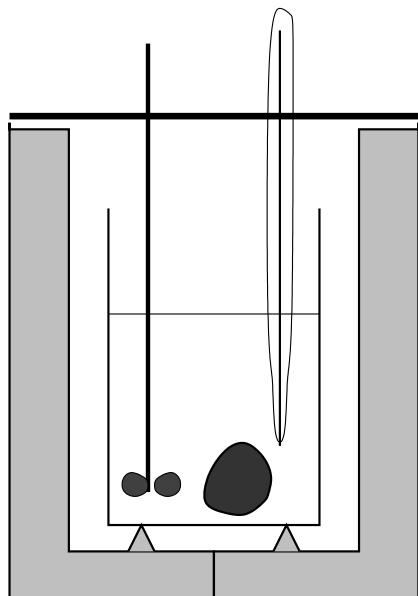
$\delta l = V/S(\beta_t - \beta_s)\Delta T$ . Z  $V_t$  smo označili volumen tekočine, z  $S$  pa presek kapilare.

Termometri, ki izkoriščajo raztezanje kovin v trdnem stanju, so najpogosteje oblikovani kot bimetalni trak, v katerem se deformacija, ki jo povzroči raztezek, ojači, ker se trak krivi v smeri, hjer je kovina z manjšim termičnim raztezkom. Takšen bimetalni trak se lahko vgradi v stikalo, ki izklaplja grelec in tako nastane regulator temperature.

Termometri s številčnimi prikazovalniki temperature temeljijo najpogosteje na temperaturni odvisnosti električnega upora kovinskega tipala ali na spreminjanju gonilne električne napetosti termočlenov s temperaturo.

## Kalorimetrija

Merjenje specifičnih in latentnih toplot in toplot kemijskih reakcij poteka v kalorimetrih. Kalorimetri so toplotno izolirane posode, v katerih izvajamo poskuse, na osnovi katerih se določajo pravkar omenjene količine. Bistveni del kalorimetra je posoda, ki ima vgrajeno mešalo in termometer. Posoda je navadno delno napolnjena z vodo. V to vodo običajno potopimo merjenec, ki porablja ali oddaja toploto. Iz znane mase vode in izmerjene spremembe temperature določimo količino toplote, ki jo je porabil ali oddal merjenec. Vzemimo primer merjenja specifične toplote  $c_x$  neke trdne snovi. Merjenec z maso  $m$  segrejemo v vreli vodi na  $100^\circ$  in ga prenesemo v kalorimetrično posodo, kjer je voda z maso  $m_v$  in temperaturo  $T_v$ . Pod vplivom merjenca se voda v kalorimetru segreje na končno temperaturo  $T_k$ . Izenačimo količini toplote, ki si jo izmenjata merjenec in voda v kalorimetru:  $m_v c_v (T_k - T_v) = m c_x (100^\circ C - T_k)$ . Iz te enačbe izrazimo neznanko  $c_x$  in jo izračunamo, kajti vse ostale količine poznamo. Rezultat bi bil le približen, kajti pri natančnem računu moramo upoštevati številne popravke. Omenimo samo dva popravka. Upoštevati moramo toplotno kapaciteto posode kalorimetra, nadalje moramo upoštevati, da se v času, ko čakamo, da si voda in merjenec izmenjata toploto, nekaj toplote izgubi.



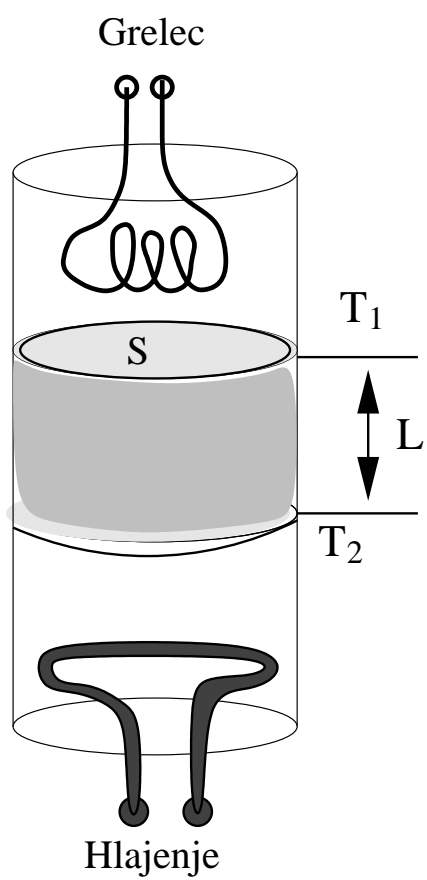
Slika 13: Kalorimeter opremljen z mešalom in termometrom

### Merjenje toplotne prevodnosti

Merilniki toplotne prevodnosti so oblikovani tako, da merjenemu vzorcu na eni strani dovajajo, na drugi strani pa odvzemajo toploto in istočasno merijo temperatutni gradient. Merilnik toplotne prevodnosti je skiciran na sliki14. Če poznamo moč  $P$ , ki jo oddaja grelec, temperaturno razliko  $\Delta T = T_1 - T_2$ , in višino vzorca  $L$  ter površino  $S$ , lahko izrazimo koeficient toplotne prevodnosti  $\lambda = (PL)/(\Delta TS)$ .

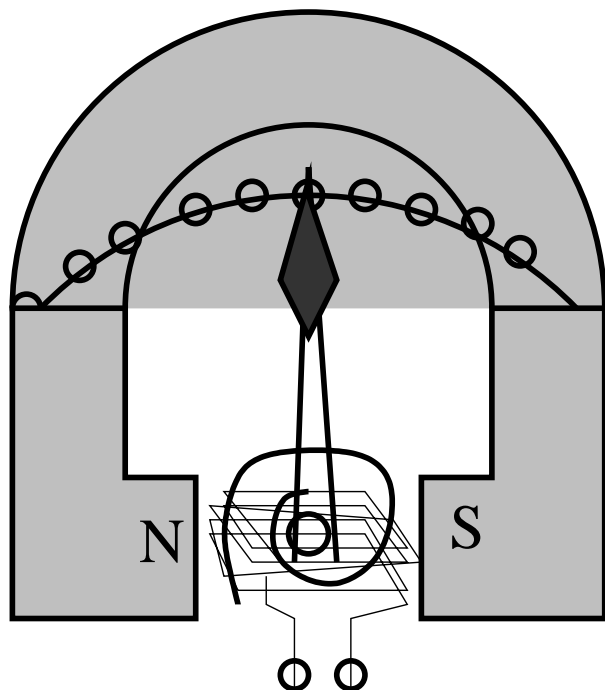
### Električna merjenja

Osnovni električni instrumenti so ampermeter, voltmeter in ohmmeter, ki so navadno združeni v en sam instrument, ki ga s posebnim gumbom preklaplja v zeleno funkcijo. Obstojajo digitalni in analogni inštrumenti. Razlikujejo se v tem, kako predstavljajo rezultat meritve. Digitalni inštrumenti imajo prikazovalnik, kjer je vrednost toka, napetosti ali upora predstavljena v obliki številčne vrednosti, pri analognih inštrumentih pa odčitujemo izmerjeno vrednost, ki jo kaže kazalec. Digitalni inštrumenti temeljijo na polprevodniških tehnologijah. Takšni inštrumenti navadno nimajo gibljivih delov. Pri analognih inštrumentih prikazuje vrednosti električnih količin kazalec, ki se odklanja iz ravnovesne lege. Gibljivi del inštrumenta, na katerega je pritrjen kazalec, se postavi v lego, ki ustreza ravnovesju med magnetnim navorom in mehanskim navorom:  $NISB = D\varphi$  - glej sliko 15. V tej enačbi nastopa od električnih količin le električni tok - torej je s tem pojasnjeno delovanje ampermetra.  $B$  je gostota magnetnega polja, ki ga ustvarja trajni magnet,  $N$  je število obojev tuljave, skozi katero teče električni tok,  $D$  je konstanta polžaste vzmeti,  $\varphi$  pa je kot odklona kazalca. Iz ampermetra lahko vedno naredimo voltmeter, tako da tuljavici zaporedno vežemo ohmski upor. Z različnimi vrednostmi uporov dosežemo različna merilna območja voltmetrov. Tudi ampermetrom lahko spreminjamo območje, vendar le navzgor. Vzemimo, da ima tuljava na sliki 15 upor  $R = 0,1\Omega$  in doseže ampermeter poln odklon pri 10 mA. Če tuljavi vzporedno zvežemo devetkrat manjši upor  $R_s = R/9$ , smo ampermetru podesorili območje, saj bo sedaj polni odklon dosežen takrat, ko bo celoten tok enak 100 mA. Razdelil se bo v razmerju uporov - torej bo 10



Slika 14: Merjenje toplotne prevodnosti





Slika 15: Inštrument na vrtljivo tuljavo

mA teklo skozi tuljavo in povzročilo poln odklon ampermetra z razširjenim območjem, 90 mA pa bo teklo skozi upor  $R_s$ . Opisani inštrument lahko uporabimo tudi kot merilnik upora. V inštrument vgradimo baterijo, ki požene skozi merjeni upor tok, ki je obratno sorazmeren merjenemu uporu, odklone kazalca pa opremimo z izračunanimi vrednostmi upora.

### Optična spektroskopija

Elektroni se običajno nahajajo v atomih in v molekulah v najnižih ležečih energijskih stanjih. Če se znajde atom ali molekula v svetlobnem žarku, lahko elektromagnetno valovanje vzbudi elektrone, da preidejo v vzbujena stanja. Vsak atom in vsaka molekula prehaja iz osnovnega stanja v vzbujeno stanje ob natančno določenih valovnih dolžinah vpadne svetlobe. Naprave, ki jim pravimo optični spektrometri za področje ultravijolične in vidne svetlobe, izkoriščajo to lastnost in se lahko uporabljajo za določanje kemijskih spojin v vzorcih neznane sestave. Vsi laboratoriji, ki opravljajo kemijske analize, so opremljeni z optičnimi spektrometri. Spektrometri morajo imeti svoj izvor svetlobe, ki ima navadno obliko žarnice. Svetloba iz izvora gre skozi monokromator, ki je srce spektrometra in prepusti le žarke določene valovne dolžine. Tako dobljen monokromatski žarek presvetli vzorec, ki ga raziskujemo. Vzorec lahko žarek vpije (absorbira), ali pa ga prepusti. Na koncu optične poti je detektor, ki pove, koliko žarka je bilo prepuščenega in koliko ga je vzorec absorbiral. Spektrometer je priključen na računalnik, ki prikaže spekter na zaslonu, lahko pa ga natisnemo na papir. Spekter ima obliko diagrama, na katerem nanašamo na vodoravno (abscisno) os valovne dolžine ali frekvence svetlobe, na navpično (ordinatno) os pa količino prepuščene ali absorbirane svetlobe. Če imamo opravka z atomarnimi vzorci, ali če nas zanima samo to, kateri elementi so prisotni v vzorcu, uporabimo emisijske spektrometre, pri katerih postavimo vzorec na začetek optične poti, ga z električno napetostjo

segrejemo do zelo visokih temperatur, da oddaja lastno svetlobo, monokromator in detektor pa povesta, katere valovne dolžine so prisotne v spektru. Iz tega podatka lahko ugotovimo, kateri kemijski elementi so prisotni v vzorcu.

Optični spektrometri so najpogosteje opremljeni z monokromatorji, ki delujejo na osnovi interference na mrežici, kjer prehaja svetloba skozi vzporedne reže, ki so med sabo oddaljene za razmik  $d$ . Svetloba z valovno dolžino  $\lambda$  se pri prehodu skozi mrežico ojači samo v smeri, pri kateri je razlika poti dveh žarkov, ki gresta skozi dve sosednji reži enaka celemu mnogokratniku valovne dolžine ( $d \sin \alpha = N\lambda$ ). Druga vrsta monokromatorjev ima obliko optične prizme, na kateri se svetloba dvakrat lomi. Prizma mora biti narejena iz stekla, ki ima močno disperzijo, tako da se vijolična svetloba lomi dosti močneje, kot rdeča svetloba.

### Infrardeča spektroskopija

Infrardečo svetlobo imenujemo vse vrste elektromagnetnega valovanja, ki ima valovne dolžine daljše kot 0,8 mikrometra in krajše od 100 mikronov. Takšna valovanja oddajajo predmeti, ki jih segrevamo, preden začnejo žareti. Človeško oko žarkov teh valovnih dolžin ne zaznava, zaznavamo pa jih s kožo, saj vemo, da smo pozimi sposobni v temi v hladnem prostoru ugotoviti, v katerem kotu je vroča peč. Tudi nekatere vrste kač imajo poleg navadnih oči, ki so občutljive za vidno svetlobo, še par oči v obliki vdolbin v koži, s katerimi zaznavajo toplotno sevanje (infrardečo svetlobo) glodalcev, s katerimi se hranijo.

Infrardeči spektrometri so zgrajeni podobno, kot spektrometri na vidno svetlobo in merijo, kako vzorec prepušča, ali kako odbija infrardečo svetlobo. Njihova prednost pred spektrometri na vidno svetlobo je v tem, da podobne - predvsem organske molekule, ki izkazujejo skoraj enake absorpcijske spektre v vidnem področju, kažejo odločne razlike v prepuščanju infrardeče svetlobe. Infrardeči absorpcijski spektri so pokazatelj nihajnih frekvenc molekul. Atom z maso  $m$ , ki je vpet na preostanek molekule z valenčno kemijsko vezjo, niha. Če se vez obnaša kot idealna vijačna vzmet s konstanto  $k$ , bo atom nihal s krožno frekvenco  $\omega = \sqrt{k/m}$ . Če se takšen atom znajde v žarku infrardeče svetlobe, ki ima valovno dolžino  $\lambda = 2\pi c/\omega$ , bo nastopila resonanca in energija žarka se bo porabila za vzbujanje nihanja omenjenega atoma. Infrardeči žarek bo prišel skozi vzorec, ki vsebuje takšen atom pri valovni dolžini  $\lambda = 2\pi c/\omega$  oslavljen. Ker ima molekula več nihajnih frekvenc, vtisne molekula v absorpcijski spekter svoj karakteristični odtis, po katerem jo je mogoče prepoznati. Molekula, ki je sestavljena iz  $N$  atomov ima običajno  $3N-6$  načinov nihanja in lahko tudi toliko različnih nihajnih frekvenc. Izjeme so linearne molekule, ki imajo  $3N-5$  načinov nihanja. Dvoatomske molekule imajo torej en sam način nihanja z nihajno frekvenco  $\omega = \sqrt{k(m_1 + m_2)/m_1 m_2}$ , kjer sta  $m_1$  in  $m_2$  masi obeh atomov,  $k$  pa je konstanta vzmeti valenčne vezi, ki veže oba atoma. Nelinearne triatomske molekule nihajo na tri različne načine. Infrardeča spektroskopija je nepogrešljiva v laboratorijih, kjer imajo opravka z velikim številom različnih organskih molekul, kot je to primer v farmacevtski, kozmetični in prehrambeni industriji, v industriji barvil in podobnih dejavnostih.

Posebnost infrardečih spektrometrov v primerjavi s spektrometri za področje ultravijolične in vidne svetlobe je v tem, da pogosto uporabljajo za določanje valovnih dolžin poleg interference na mreži in disperzije tudi interferenco, ki ustvari stoječe valovanje med

dvema vzporednima polprepustnima zrcaloma. Spektrometer izmeri jakost stoječega valovanja pri različnih vrednostih razdalje med zrcali in nato s Fourierovo transformacijo pretvori dobljeni podatek v spekter.

### Spektroskopija jedrske magnetne resonance

Laboratoriji raziskovalnih inštitutov in industrijski laboratoriji so pogosto opremljeni s spektrometri, ki temeljijo na pojavu jedrske magnetne resonance (JMR ali NMR). Opišimo na kratko fizikalne osnove, na katerih temelji ta vrsta spektroskopije. Pomagajmo si s primerjavo z makroskopsko vrtavko, ki jo postavimo na mizo in jo zavrtimo. Če smo jo postavili popolnoma navpično, bo os vrtavke mirovala, če pa smo jo postavili tako, da je os nagnjena glede na navpičnico za nek kot  $\alpha$ , se vrtavka ne bo zvrnila, ampak bo precesirala s precesijsko frekvenco  $\omega_{prec}$  tako, kot napoveduje enačba (M47). Na podoben način, kot se obnašajo makroskopske vrtavke, se obnašajo tudi delci v svetu atomov: elektroni in atomska jedra. Jedro vodikovega atoma - to je proton, je vrtavka z vrtilno količino  $\Gamma = (1/2) \times 1,055 \times 10^{-34} \text{kgm}^2/\text{s}$ . Pravimo, da ima proton spin. Enako vrtilno količino ima tudi vsak elektron. Vrtilni količini pripada magnetni moment  $p_m$  (glej enačbo (E42)), katerega vrednost lahko ocenimo, če si predstavljamo, da naboj delca z maso  $m$  kroži okrog svoje osi na razdalji  $r$  s kotno hitrostjo  $\omega$ . Dobimo  $p_m = e/T \times \pi r^2$ . Oznaki  $T$  ustreza čas enega zasukata delca okrog svoje osi. Vrtilno količino delca izrazimo kot produkt vztrajnostnega momenta ( $mr^2$ ) in kotne hitrosti  $\Gamma = mr^2 2\pi/T$ . Iz primerjave obeh zgornjih enačb izluščimo zvezo med vrtilno količino in magnetnim momentom

$$p_m = (1/2)(e/m)\Gamma. \quad (JMR1)$$

Vrtilni količini elektrona in protona sta enaki, ker pa ima proton 1836 krat večjo maso kot elektron, je magnetni moment protona približno tolikokrat manjši. Če se nahaja proton v magnetnem polju, je njegova energija v odvisnosti od usmerjenosti njegove vrtilne količine (ki ima isto usmerjenost, kot magnetni moment) podana z enačbo (E44), ki napoveduje energijsko ugodno stanje, kadar kažeta magnetni moment in magnetno polje v isto smer. Takšno stanje lahko primerjamo s stanjem mehanske vrtavke, ki se nahaja v težnostnem polju tako, da je njena os navpična, visi pa 'z glavo navzdol', kar pomeni, da je pritrdišče osi nad težiščem vrtavke. Če je os odmaknjena od navpične lege, potem se pojavi precesija. Tudi vrtilne količine protonov v snovi, kjer je prisotno magnetno polje, se lahko znajdejo v stanju precesije s precesijsko frekvenco, ki sledi iz enačbe (M47), ki pravi, da je precesijska frekvenca enaka kvocientu navora, ki deluje na vrtavko in komponente vrtilne količine, ki sega izven osi vrtavke. Navor, ki deluje na magnetni moment v magnetnem polju podaja enačba (E43), komponenta vrtilne količine, ki sega izven osi je  $\Gamma \sin\alpha$ , tako da dobimo

$$\omega_{prec} = (e/2m)B. \quad (JMR2)$$

Za proton v magnetnem polju z gostoto en tesla, dobimo precesijsko frekvenco  $\nu = \omega/2\pi = 42,58 \text{MHz}$ .

Precesija spinov protonov je dovzetna za resonančne pojave. Proton, ki se znajde v polju elektromagnetnega valovanja, katerega frekvenca je enaka precesijski frekvenci, bo iz elektromagnetnega vala črpal energijo in se dvigal proti višjim energijskim stanjem. Instrumenti za jedrsko magnetno resonanco izkoriščajo ta pojav in omogočajo uporabnikom, da pridobijo pomembne podatke o lastnostih molekul, katerih sestavni deli so merjeni

protoni. Naloga spektrometra je, da ustvari dovolj močno magnetno polje, v katerega postavimo vzorec in da natančno izmeri resonančno precesijsko frekvenco. Vsak proton se na račun vpliva preostanka molekule nahaja v nekoliko spremenjenem magnetnem polju in izkazuje resonanco pri nekoliko drugačni frekvenci - govorimo o kemijskih premikih - in tako je rezultat merjenja širok nabor spektralnih črt, ki sestavljajo spekter. Izkaže se, da raste uporabnost podatkov, ki jih vsebuje spekter JMR, sorazmerno z gostoto magnetnega polja, v katerega postavimo vzorec. Dobri spektrometri dosegajo že magnetna polja z gostoto 21 Tesla. Zato potrebujejo izredno močne električne tokove, ki jih zagotavljajo s superprevodnimi navitji. Supraprevodno stanje električnih vodnikov je mogoče doseči le pri temperaturah blizu absolutne ničle in zato mora imeti takšen spektrometer dvojni plašč - v zunanjem je tekoči dušik, v notranjem pa tekoči helij.

Najpomembnejši rezultati, ki jih pridobimo s spektrometri jedrske magnetne resonance, je struktura bioloških makromolekul, kjer JMR tehnologija tekmuje z rentgensko difrakcijo. Prva je uspešnejša pri manjših (manj kot tisoč atomov) gibkih molekulah, druga pa pri večjih molekulah, ki imajo eno samo rigidno strukturo.

### Difrakcija rentgenskih žarkov

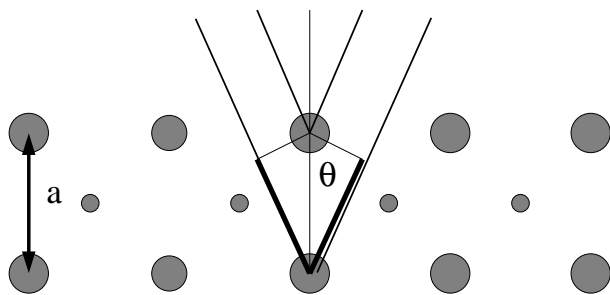
Rentgenski žarki so umeščeni v spekter elektromagnetnega valovanja kot nadaljevanje ultravijoličnega spektra v smeri proti krajšim valovnim dolžinam in višjim frekvencam - to je na območju valovnih dolžin med nekaj stotinkami nanometra do nekaj sto nanometrov. V zgodnjem obdobju po odkritju so se rentgenski žarki uporabljali predvsem za pogled v notranjost človeškega telesa in tudi za iskanje napak v kovinskih in drugih konstrukcijah. Do danes so tovrstno uporabo rentgenskih žarkov, ki temelji na absorpciji, ki je močnejša v snoveh, ki vsebujejo več težkih elementov, še izpopolnili, tako da ustvarijo z računalniško obdelavo rezultatov presvetljevanja človeškega telesa ali predmetov tridimenzionalne slike notranje zgradbe z milimetersko ločljivostjo. S tehnikami, ki temeljijo na difrakciji in interferenci rentgenskih žarkov pa je mogoče pridobiti vpogled v notranjo zgradbo snovi na nanometerski skali. Rentgenska difrakcija je podoben pojav, kot interferenca zvočnega valovanja, ki ga oddajata dve sireni rešilnega avtomobila, ali interferenca na mrežici monokromatorja v optičnem spektrometru. Ko zadane rentgenski žarek kristal kuhinjske soli, na primer (glej sliko 16), se rentgenska svetloba uklanja na vsakem atomu. Delni žarki, ki izhajajo od vsakega atoma, se ojačajo v smereh v katerih se dva sosednja prispevka premaknjena za cel mnogokratnik valovne dolžine. Ta zahteva nas pripelje do enačbe

$$2a \cos \theta = N \lambda. \quad (*)$$

Če torej poznamo valovno dolžino svetlobe in če izmerimo kot  $\theta$ , smo s tem določili razmak med kristalnimi ravninami - določili smo mrežno konstanto kristalne strukture. V kristalu kuhinjske soli sta samo dva različna atoma in je z določitvijo mrežne konstante struktura kristala popolnoma določena. Današnje tehnike rentgenske difrakcije omogočajo veliko bolj zahtevne podvige, saj so določili že strukturo zelo kompleksnih bioloških makromolekul (proteinov in nukleinskih kislin) z več tisoč atomi.

### Sinhrotroni

Med največje in najdražje naprave, ki so namenjene določanju lastnosti snovi, sodijo sinhrotroni. V Evropi je le nekaj takšnih naprav, najbližja je na slovenskem ozemlju v

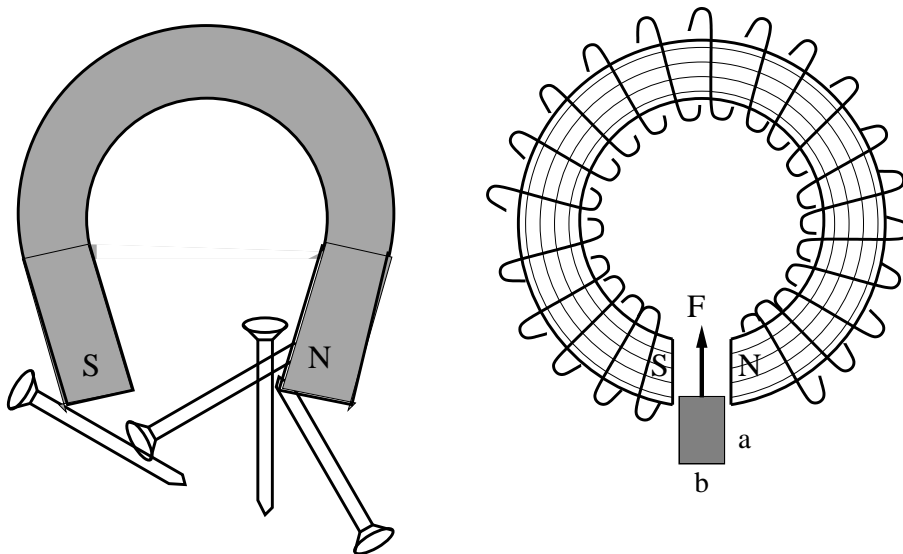


Slika 16: Difrakcija rentgenskih žarkov na kristalu kuhinjske soli



Slika 17: Sinhrotron na slovenskem ozemlju v Padričah pri Trstu. Okrogla stavba, v kateri so žarkovne linije, ima premer 60 m.

Padričah pri Trstu. Glavni sestavni del sinhrotrona je več kot sto metrov, ali več kot kilometer dolga kovinska cev v obliki mnogokotnega svitka. Vzdolž cevi krožijo elektroni ali njihovi antidelci pozitroni s hitrostmi, ki so zelo blizu svetlobni hitrosti. V cevi mora vladati popoln vakuum, ob cevi pa so nameščeni izvori električnega in magnetnega polja, ki pospešujejo in usmerjajo krožece delce, da ne udarijo ob kovinsko steno. Na vsakem zakrivljenem delu cevi, kjer se zaradi prisotnosti magnetnega polja pot nabitih delcev krivi, delci sevajo širok spekter elektromagnetnega valovanja, ki sega od vidne svetlobe, preko ultravijolične svetlobe, preko mehkih do trdih visokoenergijskih rentgenskih žarkov. Vsako od takšnih zakrivljenih mest ima posebej prirejen izhod za omenjene žarke in tja lahko uporabniki namestijo dodatne naprave, ki preoblikujejo spekter izhodne svetlobe za različne namene. Poleg različnih vrst rentgenskih difraktometrov lahko oskrbuje sinhrotron še različne vrste drugih naprav in inštrumentov, ki so namenjeni študiju strukture in dinamike atomov in molekul v trdni snovi, v tekočinah, v bioloških vzorcih in v novih materialih, ki se bodo uporabljali v strojogradnji, gradbeništvu in elektrotehniki.



Slika 18: Magnetni privlak feromagnetnih snovi

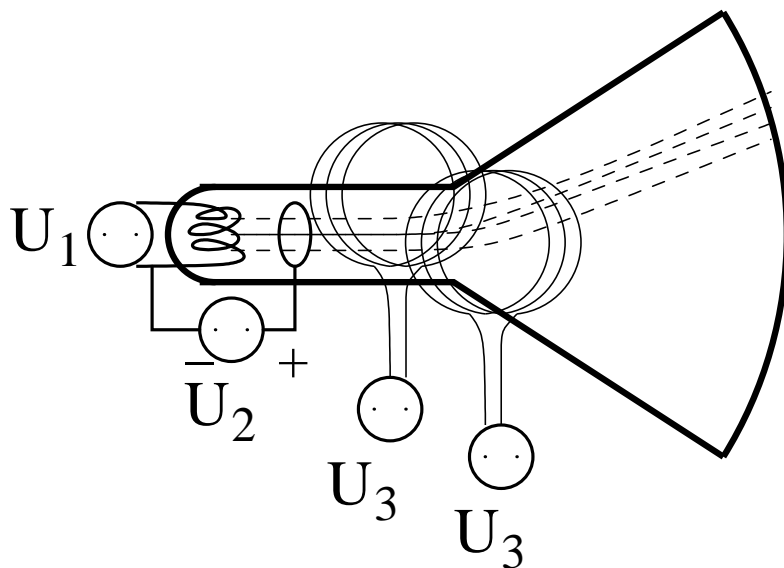
## FIZIKA V TEHNIKI

### Uporaba električnih in magnetnih sil in navorov

Statična elektrika nam v vsakdanjem življenju pogosto dela preglavice. Pri hoji po plastičnih tkanih oblogah se naše telo pogosto naelektri in ko se dotaknemo ozemljenega kovinskega predmeta, kot je na primer radiator ali vodovodna pipa, preskoči iskra, strese nas električni sunek in se razelektrimo. Tudi trenje avtomobilskih gum ob cestišče povzroča ločevanje električnih nabojev. Avtomobil se električno nabije in ko izstopimo, preskoči iskra in zaznamo električni sunek. Naboja, ki preskoči pri razelektritvi, je malo. Če si predstavljamo, da je človeško telo ena plošča kondenzatorja, tla pod nogami pa druga plošča, bi bila kapaciteta takšnega kondenzatorja kakšen pikofarad. Kljub temu, da lahko doseže napetost med človeškim telesom in zemljo več kilovoltov, se pri razelektritvi sprosti manj kot en milijoule energije ( $CU^2/2 = 5 \times 10^{-5} J$  za  $U = 10000V$  in  $C = 1pF$ ). Mehanski ekvivalent ravnokar omenjene energije ustreza energiji grahovega zrna, ki pade z višine nekaj centimetrov. Pri udarih strele in bliskih, ki spremljajo nevihte, mehanizmi nastanka napetosti in razelektritve so pa podobni, se sprosti dosti več energije, ki jo merimo v megajoulih ali celo gigajoulih.

**Električne sile** se pogosto uporabljajo v tehniki. Poglejmo si vlogo električnega polja in elektrostatskih sil v laserskih tiskalnikih. Srce tiskalnika je valjasti boben, ki ga naelektrijo, tako da se obda z električnim poljem. Z laserskim žarkom osvetljuje tista mesta na bobnu, ki naj sprejmejo barvilo in ga prenesejo na list papirja. Svetloba izbija s površine bobna elektrone in spremeni sliko električnega polja tako, da se barvilo v obliki zelo drobnih prašnih delcev prilepi le na tista mesta na bobnu, ki jih je dosegla laserska svetloba. Na mestu, kjer se boben približa papirju, ustvarijo električno polje, ki premaga privlak med delci barvila in bobnom in potisne delce barvila na papir. V zadnji fazi tiskanja se barvilo zapeče na papir.

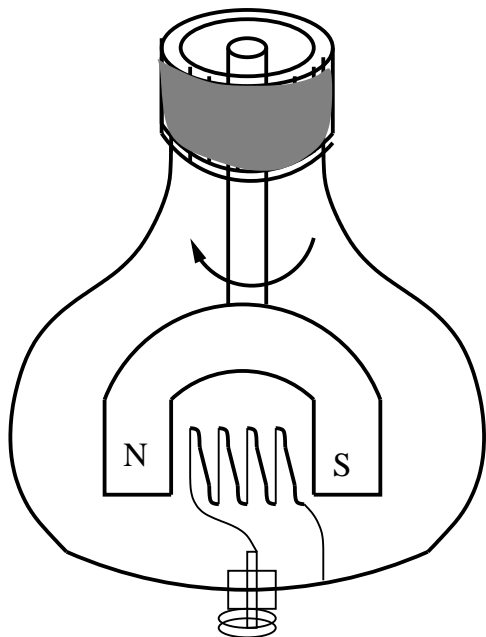
**Magnetne sile** lahko izzovemo na dva načina. Pojavijo se, kadar se nahajajo električni vodniki v magnetnem polju in kadar se znajdejo feromagnetni materiali v nehomogenem magnetnem polju - torej na meji dveh področij z različno gostoto magnetnih polj. Ilustri-



Slika 19: Magnetno uklanjanje curka nabitih delcev

rajam najprej silo na feromagnet v nehomogenem magnetnem polju. Na sliki 18 vidimo trajni magnet v obliki podkve, ki je pritegnil nase železne žeblice. Težko bi izračunali, kakšno silo bi potrebovali, da bi odtrgali žeblice z magneta. Preučimo raje desni primer na isti sliki, kjer imamo namesto trajnega magneta elektromagnet v obliki svitka, namesto žeblicev pa kos železa dimenzij  $a \times a \times b$ , ki lahko zdrсне v režo med pola elektromagneta. Zakon o magnetnem pretoku zagotavlja, da se gostota magnetnega polja, če je reža dovolj ozka, ne spreminja vzdolž obsega toroidne tuljave. Torej je gostota magnetnega polja v reži, ko je reža prazna ravno takšna, kot takrat, ko je reža zapolnjena z železom. Za jakost magnetnega polja pa to ne velja. Ko je reža prazna, velja  $B = \mu_0 H$ , kadar je zapolnjena z železom, pa  $B = \mu \mu_0 H$ . Permeabilnost železa  $\mu$  je med 1000 in 10 000. Torej se potem, ko zapolnimo režo z železom, zmanjša jakost magnetnega polja za faktor  $\mu$ . Za enak faktor se zmanjša tudi magnetna energija, saj je gostota energije v reži enaka  $BH/2$ . Ker težijo fizikalni sistemi k stanju z nižjo energijo, bo tudi sistem na sliki 18 težil k temu, da se bo reža zapolnila. Silo  $F$ , s katero vleče magnet kos železa v režo, lahko izračunamo, če zapišemo, da je delo, ki ga opravi ta sila na poti  $a$ , enako zmanjšanju magnetne energije:  $Fa = a^2 b B^2 (1 - 1/\mu) / (2\mu_0)$ . Če smo v svitkastem elektromagnetu ustvarili gostoto magnetnega polja 1T in ima železni kvader obliko kocke s stranico 1 cm, bo sila  $F$  enaka 40 N. Tako močno silo bi lahko dosegli tudi s stalnim magnetom. Vemo namreč, da se v številnih napravah (avtomobilski strešni prtlačniki za smuči, naprave za dviganje železnih predmetov v livarnah in železarnah) uporabljajo zgoraj opisane magnetne sile, ki lahko dosega jo tudi zelo visoke vrednosti, na primer več kilonewtonov.

Druge vrste magnetnih sil so sile na tokovodnike v magnetnem polju (glej sliko E3 in enačbo (E40)). Izkoriščajo se v elektromotorjih, ampermeterih, voltmetrih, električnih števcih, stikalih, katodnih ceveh in še kje drugje. Poglejmo si, kako se uklanjajo nabiti delci v katodnih ceveh, masnih spektrometrih in pospeševalnikih delcev. Na sliki 19 je skicirana katodna cev. To je steklena elektronka, iz katere je izsesan zrak. Napetost  $U_1$  napaja grelno žico, iz katere izparevajo elektroni. Napetost  $U_2$  pospešuje elektrone, ki so



Slika 20: Dinamo za kolo je generator izmenične napetosti. Vrtenje magneta povzroča spreminjanje magnetnega pretoka skozi tuljavo in s tem inducirano napetost z amplitudno vrednostjo  $U_{0i} = NSB\omega$ . Če se peljemo s hitrostjo 5 m/s in ima kolesček na dinamu obseg 5 cm, se bo magnet zavrtel stokrat v sekundi - torej se bo vrtel s kotno hitrostjo  $\omega = 628s^{-1}$ . Če ima tuljava 100 ovojev in je njen presek enak  $1\text{ cm}^2$ , gostota magnetnega polja podkvastega magneta pa je 0,1 T, bo amplituda inducirane napetosti enaka  $U_{0i} = 6,26V$ .

izstopili iz kovine in jih usmerja proti zaslonu na desni. Izvora napetosti  $U_3$  vzdržujeta električni tok skozi obe tuljavi in ustvarjata magnetno polje B, ki deluje na elektrone s silo  $F = evB$ , tako da se znotraj magnetnega polja gibljejo po krožnici. Ko izstopijo iz magnetnega polja, nadaljujejo pot po premici do zaslona. S spreminjanjem napetosti  $U_3$  lahko torej krmilimo elektronski žarek, tako da zadene katero koli višino na zaslonu. Če dodamo na sliki 19 še dve tuljavi, ki bosta ustvarjali navpično magnetno polje, lahko z njima odklanjamo žarek elektronov tudi v vodoravni smeri.

Električna napetost, ki jo uporabljamo za razsvetljavo in za napajanje vseh vrst gospodinjskih aparatov in naprav, kot so na primer osebni računalniki, izvira iz generatorjev v elektrarnah. Tudi dinamo, ki ga uporabljamo za osvetljevanje ceste, ko se vozimo s kolesom, deluje podobno, kot veliki generatorji v elektrarnah. Delovanje dinamama je predstavljeno na sliki 20.

## ENERGETIKA

Človeško telo porablja v mirovanju približno 100 wattov energije. Z rastočo fizično in umsko obremenitvijo se porabljena moč večja in doseže 200 do 300 wattov pri zmernih fizičnih aktivnostih, močnejše obremenitve pa za kratek čas lahko dvignejo energijsko porabo do pol kilowatta, ali še čez. Porabljeno energijo nadomešča človek z zaužito hrano. Hrana je lahko rastlinskega ali živalskega izvora, toda ker se tudi živali hranijo le z rastlinami ali drugimi živalmi, ima energija, na kateri temelji presnova v človeškem



telesu rastlinski izvor. Vprašamo se, od kod dobivajo rastline potrebno energijo za rast. Odgovor je videti enostaven: rastline vpijajo sončno svetlobo in s pomočjo fotosinteze ustvarjajo ogljikove hidrate, maščobe in beljakovine. Če računamo, da je letni hektarski pridelek poljščin nekaj tisoč kilogramov in da je njihova kalorična vredost nekaj MJ/kg, ugotovimo, da zadostuje pridelek, ki zraste na enem hektaru za dve do štiri osebe. Ocena, ki smo jo pravkar napravili, velja za družbe, ki še ne dosega standardov tehničnega razvoja današnje zahodne civilizacije. Razviti svet je bolj potraten, saj potrebuje na osebo večje pridelovalne površine, ker se hrani z mesom živali, ki porabijo za svoj obstoj dosti več energije, kot jo je v mesu, ki se predela v človeško hrano. V razvitem delu sveta se porablja energija tudi za industrijsko proizvodnjo, za ogrevanje stanovanjskih in delovnih prostorov, za transport in za aktivnosti, ki jih ljudje izvajajo v prostem času. Celotna poraba je dosti večja, kot jo dajejo obnovljivi viri, zato se izkorišča energija fosilnih goriv in jedrska energija. Poglejmo si fizikalne aspekte obnovljivih in neobnovljivih energijskih virov in energijskih pretvorb.

Pridelava hrane poteka deloma v obnovljivem režimu, deloma pa temelji na fosilnih gorivih. Kmetijsko mehanizacijo še vedno poganja iz zemeljskih globin načrpana nafta, le del goriva za traktorje pridelajo na poljih. Tudi transport in priprava umetnih gnojil temeljita na nafti. Energijsko najbolj potraten način pridelave hrane poteka v ogrevanih rastlinjakih, kjer je celo energija svetlobe, ki omogoča fotosintezo, fosilnega izvora.

Transport ljudi in industrijskih proizvodov temelji skoraj v celoti na fosilnih gorivih. Podobno velja v razvitem delu sveta tudi za ogrevanje in industrijsko proizvodnjo.

Neposreden in najbolj očiten vpliv sončnega sevanja je vzdrževanje življenju primerne temperature na zemeljskem površju in v ozračju ter napajanje rastlin s svetlobnim tokom, kar omogoča fotosintezo. Z razvojem tehnične kulture po industrijski revoluciji so človekove potrebe po energijskih virih začele presegati obseg sončne energije, ki jo je človek znal izkoristiti. Začelo se je izkoriščanje fosilnih zalog, najprej premoga, potem nafte. Danes smo v točki, ko se zavedamo, da bodo premog, nafta in zemeljski plin pošli in človeštvo se mora odločiti za eno od naslednjih dveh izbir: zmanjšati energijske potrebe ali nadomeščati (rastoče) potrebe po energiji fosilnega izvora z obnovljivimi energijskimi viri.

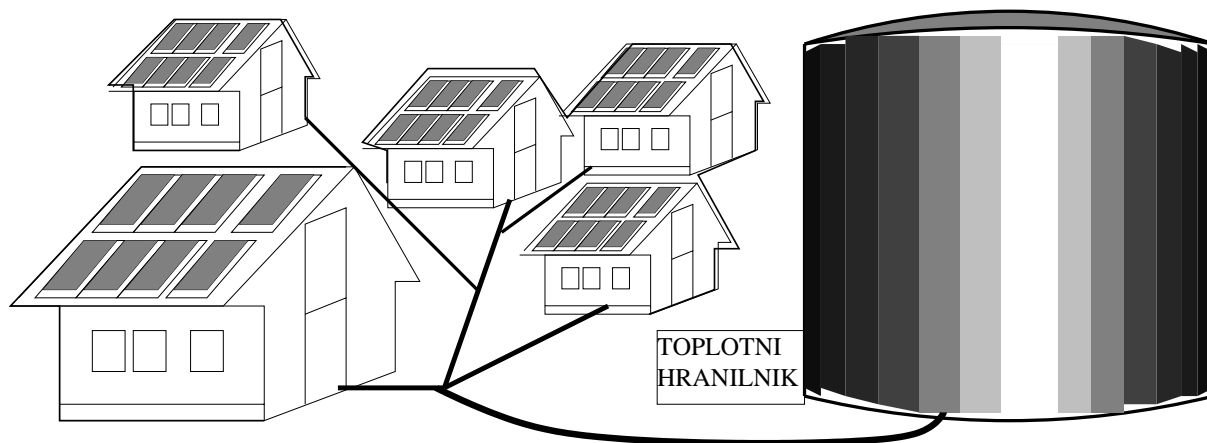
### **Izkoriščanje sončne toplote - fototermika**

Neposredna izraba sončnega sevanja je gotovo ena od poti za razrešitev zgoraj omenjenih dilem. Za ogrevanje delovnih in bivalnih prostorov v zimskem času bi lahko spravili poletno sončno toploto za zimski čas, ko se običajno grejemo s fosilnimi gorivi. Na načelni ravni ni zadržkov za takšno ravnanje, pri praktični izvedbi pa lahko nastopijo težave. Zamislimo si, da zgradimo pod enostanovanjsko hišo hranilnik za toplo vodo, ki jo segrejemo s strešnimi zbiralniki sončne toplote. Običajna enostanovanjska hiša potrebuje za zimsko ogrevanje tri do štiri tisoč litrov kurilnega olja, ki vsebuje približno 100 gigajoulov sežigne toplote. Če hočemo spraviti toliko toplote v hranilnik s toplo vodo, ki jo segrejemo na  $95\text{ }^{\circ}\text{C}$  in jo bomo pozimi ohladili na  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mora imeti hranilnik prostornino  $V=430\text{ m}^3$ , kar pomeni tri metre visok hranilnik pod hišo s tlorisno površino  $143\text{ m}^2$ . Izračunajmo še kvadraturu sončnih toplotnih zbiralnikov, ki bodo v poletni sezoni segreli vodo v toplo-

tnem hranilniku. Vzemimo, da se bo voda grela 100 dni, po osem ur na dan, kvadratni meter zbiralnika pa bo srejemal povprečni toplotni tok  $j = 700\text{W}/\text{m}^2$ . Račun na osnovi enačbe  $Q = jSt$  nam da površino  $S = 50\text{m}^2$ . Račun moramo dopolniti še z oceno količine toplote, ki se iz hranilnika tekom jeseni izgubi. Izgube so obratno sorazmerne z debelino izolacijske plasti, v katero je potrebno obleči zbiralnik - torej so izgube lahko poljubno majhne. Finančna ocena zgoraj omenjene rešitve pokaže, da je pri današnji ceni goriv hranilnik tople vode za enodružinsko hišo negospodarna naložba. Gospodarnost pa se poveča, če se zgradi stokat večji hranilnik. Takšen hranilnik tople vode s prostornino več deset tisoč kubičnih metrov vidimo v ljubljanski toplarni v Mostah, kjer hranijo poleti pridobljeno odpadno toploto termoelektrarne za porabo v zimskem času. Po svetu je zgrajenih že nekaj sosesk, kjer velik hranilnik tople vode ogreva celotno sosesko vso kurilno sezono (glej sliko 21).

### Sončne elektrarne

Drug neposreden način izrabe sončne svetlobe so sončne elektrarne. Obstojata dve vrsti sončnih elektrarn - takšne, ki sončno svetlobo najprej pretvorijo v toploto in nato v mehansko delo in končno v električno energijo in takšne, ki sončno svetlobo neposredno pretvorijo v enosmerno električno napetost. Slednji način je priročen, saj ga lahko izvajamo v poljubno velikem obsegu - od enega watta do več deset megawattov. Osnovo predstavljajo polprevodniške sončne fotovoltaične celice, ki so običajno izdelane iz kristalnega silicija, ki je polprevodnik. Sončna svetloba, ki prileti na silicijev kristal, preda elektronom v najvišje ležečih energijskih stanjih energijo in jih vzbudi v višje ležeča stanja. Vzbujeni elektroni lahko opravijo koristno delo, preden se vrnejo v osnovno stanje - torej deluje silicijeva ploščica, na katero pade svetloba, kot izvor enosmerne napetosti. Napetost takšnega vira je malo več kot en volt. Z zaporedno vezavo večjega števila sončnih celic lahko pridobimo poljubno visoko napetost. Napetost lahko vodimo na napravo, ki ji pravimo napetostni razsmernik, ki pretvarja enosmerno napetost v izmenično napetost. Razsmernik lahko priključimo na javno omrežje in tako postane električna energija pridobljena iz sončne svetlobe dostopna vsem uporabnikom. Izkoristek polprevodniških sončnih celic je slab - med deset in dvajset odstotki. To pomeni, da bomo potrebovali, kadar je sončna svetloba najmočnejša, za kilowatt električne moči približno  $6\text{ m}^2$  silicijevih sončnih celic. Gostota energijskega toka, ki ga nosi s sabo sončna svetloba, je tik nad zemeljskim ozračjem enaka približno  $1370\text{ W}/\text{m}^2$ . Pri prehodu skozi ozračje se energijski tok oslabi, tako da doseže pri pravokotnem vpadu zemeljsko površje približno  $1\text{ kW}/\text{m}^2$ . Slovenija leži na 46. vzporedniku in opoldanski sončni žarki so od navpičnice odklonjeni poleti za  $23^\circ$ , pozimi pa kar za  $67^\circ$ . Tekom dopoldneva in popoldneva pa je odklon sončnih žarkov od navpičnice še večji in dolžina poti skozi atmosfero še daljša, kot opoldne in vse to zmanjšuje količino sončnih žarkov, ki jih ujamejo sončne celice tekom leta. Količino energije, ki jo ulovijo sončne celice, zmanjšujejo tudi oblaki. V Ljubljani, na primer, je sonce nad horizontom 4380 ur na leto, toda letno število ur sončnega obsevanja niha med 1700 in 2300. Ta podatek določa tudi količino energije, ki jo ulovi v enem letu en kvadratni meter sončnih celic. Ob najugodnejših pogojih, ko je nebo jasno in sonce najbližje navpičnici, ulovi sončni kolektor s površino  $1\text{ m}^2$  0,15 do 0,2 kWh energije v eni uri. V vsem letu pa ujame 1200 krat več energije, če je usmerjen proti jugu in nagnjen za  $30^\circ$  glede na vodoravnico. Če pa je takšen kolektor gibljivo vpet, tako da ves čas sledi soncu v orientaciji, ki je pravokotna na sončne žarke, se poveča izkoristek za 20%.



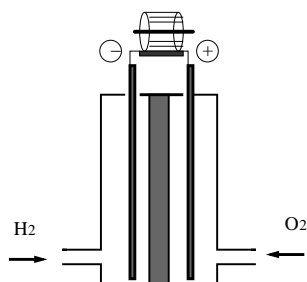
Slika 21: Energijsko samostojno naselje. Vsa južna krila streh na stanovanjskih hišah imajo vgrajene sončne toplotne zbiralnike. Če je površina zbiralnikov  $100 \text{ m}^2$  na hišo, bo količina ujete toplote tekom celega leta med  $70\,000$  in  $80\,000 \text{ kWh}$ , kar ustreza sežigni toploti pet do šest ton kurilnega olja. Ta količina pokrije letne potrebe ene družine za segrevanje sanitarne vode in za ogrevanje bivalnih prostorov. Težava je le v tem, da zajamejo sončni zbiralniki v času kurilne sezone od oktobra do aprila le četrtnino letoletne količine toplote in se je torej potrebno greti v času kurilne sezone s toploto, ki se ujame od aprila do septembra. Hramba toplote za zimsko porabo je zahteven projekt in izkaže se, da ga ni mogoče izvesti na ekonomsko upravičen način v okviru posameznih družinskih hiš, ampak je potrebno postaviti osrednji hranilnik toplote, kamor se steka poletna toplota z nekaj sto domov. Za popolno energijsko samostojnost bi morali strešni kolektorji pretvarjati del sončne svetlobe tudi v električno energijo.

V procesu razvoja so fotovoltaične sončne celice, ki bodo izdelane iz organskih materialov. Imele bodo obliko tanke polprozorne folije, ki jo bo mogoče nalepiti na okenske šipe. Videti je, da bo izkoristek takšnih celic še nižji, kot izkoristek silicijevih celic, vendar bo takšne celice lažje uporabiti, ker jih bo mogoče nalepiti na zunanje gradbene elemente.

Sončne elektrarne, ki najprej pretvorijo sončno svetlobo v toploto, nato v mehansko delo in končno v električno energijo, ne morejo uporabljati običajnih nizkotemperaturnih zbiralnikov sončne toplote, ki vode nikoli ne segrejejo do vrelišča, ampak je standardni postopek takšen, da z velikim številom zrcal usmerijo sončno svetlobo na en sam kotel, v katerem voda zavre, izpari in se pretvori v vodno paro pri visokem tlaku. Vodna para poganja parno turbino, na katero je pripeta os električnega generatorja. Na ta način lahko pretvorijo več kot  $40\%$  sončnega sevanja v električno energijo. Takšne elektrarne je smiselno graditi le tam, kjer je sonca dovolj - to je dovolj blizu ekvatorju - pod  $40^\circ$  vzporednikom.

### Toplotni stroji

Najpomembnejša naloga konstruktorjev modernih toplotnih strojev je doseganje visokih izkoristkov in zmanjševanje obremenjevanja okolja. Izkoristek toplotnega stroja pove, koliko toplote pretvori toplotni stroj v delo. Običajne vrednosti izkoristkov toplotnih strojev so med  $30\%$  in  $50\%$ . V prihodnosti lahko pričakujemo številne manjše izboljšave toplotnih



Slika 22: Gorivna celica. V sredini je za protone prepustna membrana, na levi strani je negativna, na desni strani pa pozitivna elektroda, ki oskrbujeta porabnika (na sliki je narisana elektromotor) z električno napetostjo.

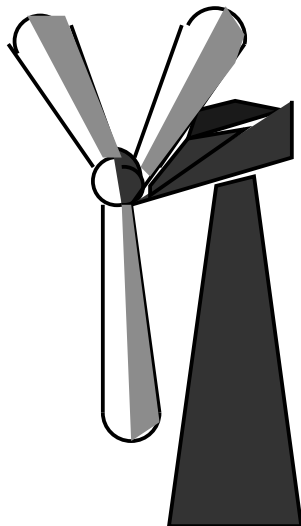
strojev. Na področju batnih motorjev z notranjim izgorevanjem gre razvoj v smeri, ki bo pripeljala do motorja, ki bo združeval prednosti Ottojevega in Dieslovega motorja. Še naprej se bo razvijal tudi hibridni pogon. Avtomobili na hibridni pogon imajo poleg batnega motorja na bencinski pogon še elektromotor. Kadar bencinski motor ni dovolj obremenjen s poganjanjem koles, polni električni akumulator, ko pa avtomobil potrebuje večjo moč, kot jo lahko zagotavlja bencinski motor, mu pomaga elektromotor. Razvijali se bodo tudi agregati, ki neposredno ustvarjajo navor. To so turbine in Wanklovi bencinski motorji. Pričakujemo lahko, da se bodo toplotni stroji prilagajali novim energijskim virom. Zaradi kvarnega vpliva ogljikovega dioksida, ki je eden od krivcev za globalno segrevanje ozračja, je za pričakovati, da se bo večal delež zemeljskega plina, ki je manj bogat z ogljikom, kot naftni derivati, druga vrsta sprememb pa bo rezultat težnje, da naj se povečuje delež energentov, ki izhajajo iz obnovljivih virov. Gorivo te vrste je biodizel, bioplin in energenti, ki bodo nastali s predelavo biomase.

### Gorivne celice

Vodik je energent, ki je okolju najbolj prijazen. Pri izgorevanju vodika se sprošča toplota, snovni produkt je pa voda, ki nima kvarnega vpliva na okolje. Obstoja pa tudi možnost, da izvedemo spajanje vodika in kisika tako, da pridobimo sežigno energijo v obliki električnega dela. Proces, ki nam to omogoča, je obraten proces elektrolize vode in poteka v gorivnih celicah. Osrednji sestavni del gorivne celice je za protone prepustna membrana. Vodikova molekula, ki pride do membrane disociira, kar pomeni, da se elektroni ločijo od jeder - to je protonov. Protoni gredo skozi membrano na drugo stran, da se bodo spojili s kisikom. Elektrone, ki ne morejo skozi membrano, pobere elektroda, nato nadaljujejo pot skozi porabnik (običajno je to elektromotor), nato pa skozi drugo elektrodo, ki jih pripelje do mesta, kjer se zopet združijo s protonom in končno tudi z atomom kisika, tako da nastane končni produkt - to je molekula vode. Gorivna celica deluje kot izvor napetosti. Elektroda, ki je na strani, kjer priteka vodik je negativna elektroda (katoda), na drugi strani je pa pozitivna elektroda (anoda) (glej sliko 22).

### Energija vetra

Nekaj držav na svetu je že začelo izkoriščati energijo vetrov. Na sliki 23 je skicirano delovanje veterne elektrarne. Kraki veterne upočasnijo zračni tok in mu odvzamejo kinetično energijo. Račun moči, ki jo veter predaja veternici, ocenimo tako, da najprej izračunamo, koliko kinetične energije je v valju zraka s premerom, ki je enak dolžini



Slika 23: Veternica izkorišča energijo vetra

krakov  $R$  veternice in višino  $vt$ , kjer je  $v$  hitrost gibajočega se zraka. Vzemimo, da se polovica kinetične energije pretvori v delo, polovico pa zrak odnese naprej, ko z z manjšo hitrostjo in povečanim presekom nadaljuje pot. V času  $t$  pretvori veternica v mehansko delo  $\rho\pi R^2vtv^2/4$  kinetične energije zraka. S črko  $\rho$  smo označili gostoto zraka. Moč, ki jo daje veternica, dobimo tako, da zmanjšanje kinetične energije delimo s časom in dobimo

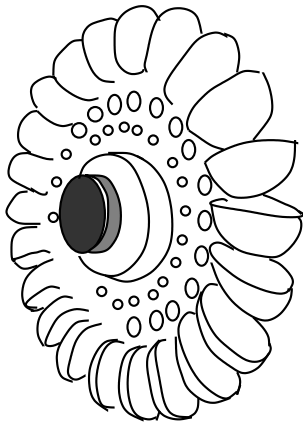
$$P = (1/4)\rho Sv^3. \quad (*)$$

Vidimo, da mora imeti veternica, če naj obratuje z močjo enega megawatta približno 40 m dolge krake. Veternice je smiselno postavljati le tam, kjer so vetrovi dovolj stalni in pravšnje jakosti. Vrteče se elise veternice poganjajo električne generatorje, ki so priključeni na javno daljnovidno omrežje.

### Vodna energija

Sončno sevanje povzroča izparevanje vode iz oceanov, jezer, rek in iz vlažnih kopenskih tal. Kroženje zraka dvigne vodno paro v višje dele ozračja. Ker se pri dviganju zrak ohlaja, se vodna para zopet kondenzira in se v obliki padavin vrača na zemeljsko površje. Tam se zbira v vodotoke in odteka proti morju. Pri pretakanju vode vzdolž strug se manjša potencialna energija vode. Hidroelektrarne pretvarjajo potencialno energijo tekoče vode v električno energijo. Moč hidroelektrarne lahko izrazimo kot spremembo potencialne energije  $E_{pot} = mgh$  v časovni enoti:  $P = \Phi_m gh$ . Masni pretok skozi hidrocentralo smo označili s črko  $\Phi_m$ , vodni padec pa smo označili s  $h$ . V primeru, da ima reka pretok 100 ton vode v sekundi in da je vodni padec enak 10 m, je moč, ki jo ima na voljo elektrarna enaka 10 MW. Vidimo, da je potrebnih 60 takšnih hidrocentral, da pridobijo toliko moči, kot jo pridobi nuklearna elektrarna v Krškem.

V hidroelektrarnah pretvarjajo vodno energijo v mehansko delo turbine. S fizikalnega vidika je najlažje razumeti Peltonovo turbino. Uporabna je za velike vodne padce in majhne pretoke vode - torej v hribovitih področjih. Pri Peltonovi turbini brizga vodni curek na lopatičasto kolo. Lopatice preusmerijo vodni curek v nasprotno smer (glej sliko 24).



Slika 24: Peltonova turbina

Sila vodnega curka na lopatico je enaka zmnožku masnega pretoka in spremembe hitrosti curka. Priporočljivo je, da se vrtijo lopatice Peltonove turbine z obodno hitrostjo, ki je enaka polovični hitrosti vodnega curka. V tem primeru odvzame turbina vodnemu curku vso kinetično energijo.

### Jedrska energija

Jedrska energija ne spada med obnovljive energijske vire, si pa zasluži posebno obravnavo. Zaloge urana še niso izrabljene do takšne mere, kot so izrabljene zaloge nafte, premoga in zemeljskega plina. Iz kilograma urana pridobimo deset tisoč krat več energije, kot iz kilograma nafte ali premoga. Ko bodo razviti samooplodni reaktorji, pa se bo to razmerje poboljšalo v korist urana še približno stokrat. Ko bo razvita tehnologija fuzijskih reaktorjev, ki bodo delovali na zlivanje težkih vodikovih jeder v helijeva jedra, si glede zalog goriva za tovrstne reaktorje ne bo potrebno več beliti glave, kajti v vsakem kubičnem metru vode je 111 kilogramov vodika in od tega je 17 gramov devterija.

## VREMENSKI POJAVI

### Energijski pretoki na zemeljskem površju

Gostota sončnega sevanja, ki zadane vrhnje sloje zemeljskega ozračja je  $j_{0S} = 1366 \text{ W/m}^2$ . Večina energije prihaja v obliki vidne svetlobe, preostanek pa v obliki infrardečega sevanja in ultravijoličnega sevanja. Ozon, ki je v vrhnjih plasteh ozračja, vpije dobršen del ultravijoličnih žarkov, usoda preostalega dela spektra pa je odvisna od vremenskih razmer. Skozi oblake prodre le manjši del sevanja. Na vodnih kapljicah, ki sestavljajo oblake, se sončno sevanje sipa in velik del se ga preusmeri nazaj v vesoljska prostranstva, del pa ga prodre do zemeljskega površja. Ob sončnem vremenu pride do zemeljskega površja približno  $1000 \text{ W/m}^2$ . V smeri proti zemeljskemu površju priteka tudi toplotni tok iz globin razžarjene zemeljske notranjosti. Enostaven račun na osnovi enačbe  $j = \lambda \Delta T / H$ , kamor postavimo za debelino zemeljske skorje ( $H$ ) nekaj sto kilometrov in za  $\Delta T$  1000 K, pokaže, da priteka iz zemeljskih globin le nekaj miliwattov toplote na kvadratni meter, kar je sto tisočkrat manj, kot s Sonca na Zemljo.

Energijsko bilanco zemeljskega površja lahko sestavimo iz dotoka v obliki sončnega sevanja, ki se absorbira v ozračju in na zemeljskem površju, za energijske izgube pa je

odgovorno predvsem toplotno sevanje, ki ga oddajata ozračje in zemeljsko površje. Za črno površino, na katero padajo sončni žarki pravokotno, lahko zapišemo

$$j_S = \sigma T^4. \quad *$$

S tem smo zapisali, da je gostota energijskega toka, ki ga površina prejme od Sonca enaka izsevani gostoti energijskega toka po Stefanovem zakonu. Če postavimo za  $j_S$  vrednost  $1000 \text{ W/m}^2$ , in upoštevamo, da je vrednost Stefanove konstante  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4)$ , sledi iz enačbe (\*) temperatura, ki je malo pod vreliščem vode. To ustreza našim izkušnjam, saj vemo, da so v sončnih poletnih dneh nekateri predmeti zelo vroči. Natančne vrednosti ravnovesnih temperatur s soncem obsijanih površin so odvisne od tega, kako črne so površine v področju valovnih dolžin sončnih žarkov, ki jih površine sprejemajo in v področju valovnih dolžin toplotnega sevanja, ki ga površine oddajajo. Enačba (\*) velja za površine, ki so črne vzdolž celotnega spektra. Sončni zbiralniki svetlobe so običajno prevlečeni s spektralno selektivnimi premazi, ki jih naredi črne v področju sončnega sevanja in svetle v področju valovnih dolžin, ki jih oddajajo. Zato se sončni zbiralniki, če jim ne odvajamo toplote, segrejejo nad temperaturo vrelišča vode. Vremenoslovci izvajajo zelo obsežne in natančne račune na zmogljivih računalnikih in z njimi reproducirajo razmere za katerokoli točko na zemeljskem površju. Takšni računi, ki jih je potrebno dopolniti tudi z računi, ki napovedujejo gibanje zračnih mas, omogočajo napovedovanje vremena.

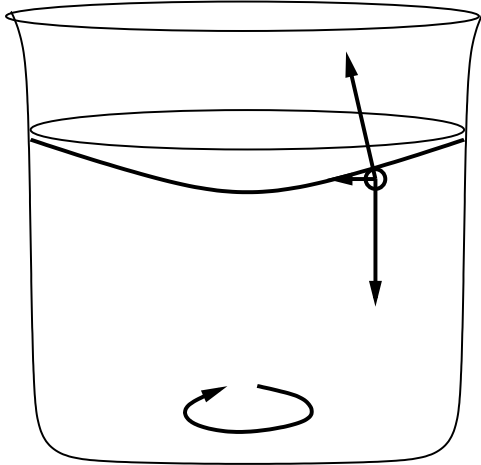
### Gibanje zračnih mas

Sončno sevanje je gonilo vsega dogajanja na zemeljskem površju. Sončna toplota, ki jo vpijeta ozračje in zemlja, povzroča razpenjanje zraka. Tople zračne gmote se dvigajo, na njihovo mesto pa prihaja bolj hladen zrak, ki je bolj gost. Ker padajo na področja blizu ekvatorja sončni žarki bolj navpično, kot na polarna področja, je za pričakovati, da bo topel zrak v tropskih področjih, ki se dviga v višine, nadaljeval pot proti tečajema, hladen zrak pa se bo iz polarnih področij gibal proti ekvatorju. Pri takšnem gibanju postane pomembna Coriolisova sila, ki je posledica vrtenja Zemlje. Coriolisova sila povzroči, da na severni polobli zrak, ki teče proti polu, zavija proti vzhodu, medtem ko zavija zrak, ki teče od severa proti jugu, proti zahodu. Tako nastanejo zračni vrtinci velikega obsega, s premerom več tisoč kilometrov, ki jim pravimo cikloni in so bistveni igralci v vremenski areni. Na severni polobli je smer vrtenja v ciklonih nasprotna smeri vrtenja urinih kazalcev, na južni polobli je pa obratno. Sredi ciklonov je znižan zračni tlak. To je lahko razumeti, saj vemo, da če zavrtimo vodo v vedru, bo imela površina obliko rotacijskega paraboloida. Zapišimo Newtonov zakon za kapljico vode na vbočeni, vrteči se vodni površini. Celotna sila, ki deluje na kapljico, mora biti enaka radialnemu pospešku. Rezultanta sil na kapljico je vsota sile teže, ki deluje navpično navzdol in sile vzgona, ki deluje pravokotno na vodno površino. Navpični komponenti se uničita, za vodoravno smer pa zapišemo:

$$mg dy/dr = m\omega^2 r. \quad *1$$

Na levi strani je zapisana, kakor je razvidno iz slike 25, vodoravna komponenta sile vzgona, ki deluje na kapljico. Zapis  $dy/dr$  predstavlja namreč tangens kota med vodoravnico in silo podlage,  $\omega^2 r$  je pa radialni pospešek. Enačbo (\*1) delimo z maso kapljice, pomnožimo z  $r$ , integriramo ter dobimo

$$y = \omega^2 r^2 / (2g). \quad *2$$



Slika 25: Na namišljeno kapljico vode na vodni površini v vrtečem se loncu delujeta dve sili: sila teže v smeri navpično navzdol in sila vzgona v smeri, ki je pravokotna na podlago. Rezultanta je vodoravna sila, ki kaže navznoter in je po Newtonovem zakonu enaka zmnožku mase kapljice in radialnega pospeška.

S tem smo pokazali, da ima površina tekočinskega vrtinca obliko rotacijskega paraboloida. Na dnu posode je tlak najmanjši na sredini, v osi vrtinca, nato pa narašča proti robu s kvadratom razdalje od osi.

$$p = p_0 + \rho\omega^2 r^2 / 2. \quad *3$$

Gibanje zračnih mas v ciklonih se razlikuje od gibanja vode v vrtečem se vedru v več ozirih - obstajajo pa tudi podobnosti. Razlike so v tem, da je zrak stisljiv, da nima ostre površine in da kotna hitrost vrtenja ni enaka pri vseh razdaljah od osi vrtenja. Enačba (\*3) pa je kljub temu uporabna, saj nam lahko služi za oceno, kako narašča tlak, ko se pomikamo od sredine ciklona proti obrobju.

Cikloni so skoraj vedno povezani s slabim vremenom, saj pomeni gibanje zračnih mas vetrovno vreme. Povedali pa smo že, da botruje nastanku ciklona kolizija toplih in hladnih zračnih gmot. Topel zrak je praviloma tudi vlažen, je lažji od hladnega in ko se v vrtincu nariva na klin hladnega zraka, prihaja do kondenzacije vodne pare v zraku - torej do oblačnosti in padavin.

V središčih področij z lepim vremenom je praviloma visok tlak, tam se zračne mase v povprečju počasneje gibljejo. Navpična komponenta hitrosti je v povprečju negativna. Zrak, ki se spušča, je podvržen izentropni spremembi, pri kateri se višata tlak in temperatura. Oblaki ne morejo nastajati, ker vodne kapljice v rastoči temperaturi izparevajo. Takšna področja imenujemo anticikloni.

### Statična elektrika v atmosferi

V poletnih mesecih so prehodi vremenskih front pogosto povezani z atmosferskimi razelektrizacijami v obliki bliskov in strel. Očitno obstoja pri pogojih slabega vremena v ozračju nek mehanizem, ki ločuje negativne in pozitivne električne naboje in generira statično atmosfersko elektriko. V laboratoriju lahko generiramo statično elektriko na ta način, da





Slika 26: Satelitski posnetek tropskega ciklona. Oblaki tvorijo spiralaste tvorbe, v sredini je oko ciklona, kjer je zračni tlak na zemeljski površini do 20 odstotkov nižji od normalnega zračnega tlaka.

taremo dve snovi drugo ob drugo in s tem ločujemo naboj. Tudi vožnja z avtomobilom, ko se pnevmatike tarejo ob cesto, povzroča, da se avtomobil naelektri. V atmosferi prihaja do podobnega pojava v nevihtnih oblakih, kjer zmrzujejo dežne kapljice, ki jih močan vzgornik nosi v višje in bolj hladne zračne plasti. Najprej zmrzne zunanji del kapljice. Ko napreduje zmrzovanje proti sredini, ki je ujeta v ledeni oklep, se na račun večje gostote vode od gostote ledu močno poveča tlak v notranjosti kapljice. Ledeni oklep končno počí, tekoča voda brizgne ven, trenje povzroči razdelitev pozitivnega in negativnega naboja med izbrizgano vodo in preostankom deloma zmrznjene kapljice. Slednji se zaradi večje teže lažje upirajo dvižnim zračnim tokovom, drobni delci izbrizgane tekočine pa hitreje nadaljujejo pot navzgor. Ko je razdeljenega naboja dovolj, postane električno polje dovolj močno, da doseže prebojno jakost. Sledijo razelektritve v obliki bliskov in strel.

### Prebojna jakost električnega polja

V vsaki snovi je del molekul ali atomov ioniziran. V kovinah, na primer, oddajo praktično vsi atomi zunanje valenčne elektrone in ustvarijo morje prostih elektronov, ki napravijo kovino dober prevodnik. Elektroliti so nekoliko slabši električni prevodniki, saj ne premorejo prostih elektronov, ampak anione in katione atomskih ali molekulskih razsežnosti, ki so manj gibljivi, kot elektroni v kovinah. V tekočinah, katerih molekule ne disociirajo, je le malo ionov. Čista voda, na primer, premore le  $10^{-7}$  molov na liter ionov vrste  $\text{H}_3\text{O}^+$  in  $\text{OH}^-$ . V prisotnosti električnega polja se gibljejo ioni enakomerno pospešeno. Ko pretečejo razdaljo  $l$ , pridobijo kinetično energijo  $Ne_0El$ , kjer je  $N$  število elementarnih električnih nabojev ( $e_0$ ). Če ta energija zadostuje za razbitje atoma, molekule, ali iona, ob trku s katerim se je pospeševani ion zaustavil, pride do verižne reakcije, ki rojeva vedno več ionov, temu pa pravimo električni preboj. V tekočinah je prosta pot električno nabitega iona dokaj kratka, saj so molekule gosto zložene v neurejene strukture, zato je verjetnost za električni preboj majhna. Plini so pri normalnih pogojih (pri sobni temperaturi in tlaku enega bara) približno tisočkrat bolj redki, kot tekočine, zato opazamo

v zraku v nevihtnem vremenu številne razelektritve v obliki bliskov in strel. Naredimo oceno za jakost električnega polja, pri kateri nastane električni preboj. Povprečna prosta pot ( $l$ ) molekul v zraku je približno tisoč molekulskih premerov - to je malo manj kot en mikrometer. Ion, ki preteče to pot in pridobi energijo  $Ne_0El$  bo ioniziral molekulo, v katero bo trčil, če ji preda več energije, kot je njen ionizacijski potencial. V tabelah preberemo, da sta ionizacijska potenciala dušika in kisika  $I_{ionN_2} = 14.5V$  in  $I_{ionO_2} = 13.6V$ , torej bo električna poljska jakost, pri kateri bo prišlo do preboja, enaka  $E_{max} = I_{ion} = /l$ , kar je nekaj milijonov voltov na meter. Električno polje je v zraku skoraj vedno prisotno. Običajne vrednosti so 100 V/m do 200 V/m - torej za štiri velikostne rede manjše od vrednosti v nevihtnih oblakih, kjer se rojevajo bliski in strele.

## VESOLJE

### Enote v astronomiji

Vesolje se že od svojega rojstva ob velikem puku (v angleški terminologiji uporabljajo izraz *Big Bang*) kar naprej razpenja in je do danes pridobilo takšne razsežnosti, da bi potreboval potnik, ki bi potoval s hitrostjo svetlobe več kot petnajst milijard let, da bi prečil vesoljske širjave. Za merjenje tako velikih razdalj je meter premajhna enota in se zato uporabljajo tri veliko večje enote:

**Astronomska enota (a. e.)** je povprečna razdalja med Soncem in Zemljo - a. e. = 149,6 milijonov kilometrov.

**Parsek** je dolžina ene od daljših stranic enakokrakega trikotnika, v katerem je dolžina krajše stranice enaka eni astronomski enoti, kot nasproti tej stranici pa je enak eni ločni sekundi. Z drugimi besedami povedano: Če bi opazovali naš Sončni sistem z razdalje enega parseka, bi bil kot med polkrakoma, od katerih je eden usmerjen proti Zemlji, drugi pa proti Soncu, enak eni ločni sekundi, kadar bi bila zveznica med Zemljo in Soncem pravokotna na smer opazovanja. Kratek račun na osnovi enačbe  $1\text{ parsek} \times \varphi = 1\text{ a.e.}$ , kjer je  $\varphi$  kot ene ločne sekunde, nam pokaže, da je parsek, če ga izrazimo v metrih, enak  $3,086 \times 10^{16}m$ .

**Svetlobno leto** je razdalja, ki jo prepotuje svetloba v enem letu ( $9,461 \times 10^{15}m$ ). Vidimo, da je en parsek 3,26 svetlobnega leta.

**Ločljivost teleskopov** približno podaja enačba  $\Delta\varphi = 0,61\lambda/R$ , kjer je  $\lambda$  valovna dolžina svetlobe,  $R$  pa polmer objektiva ali vbočenega krožnega zrcala teleskopa. Največji optični teleskopi imajo zrcala s premerom 8 metrov, torej lahko pričakujemo, da bo imel takšen teleskop približno tisočkrat boljšo kotno ločljivost kot golo oko - to je 0.02 ločne sekunde. Infrardeče svetlobe in mikrovalov z zelo kratkimi valovnimi dolžinami ozračje ne prepušča, prepušča pa mikrovalove, ki so daljši od enega centimetra in radijske valove, Astronomi gradijo teleskope, ki ustvarijo sliko neba, kot jo zariše svetloba s centimeter-skimi, decimeterskimi in meterskimi valovnimi dolžinami. Takšni, pravijo jim radijski teleskopi, nimajo leč, ampak zbirajo svetlobo z vbočenimi zrcali, ki imajo najpogosteje premer 25 m. Izjema je teleskop v Arecibu v Portoriku, katerega zrcalo ima premer 305 m in deluje pri valovnih dolžinah od 3 cm do 6 m. Njegova kotna ločljivost ne presega ločljivosti velikih optičnih teleskopov, saj je imenovalca v izrazu  $\lambda/R$  sicer stokrat večji od imenovalca v primeru velikega optičnega teleskopa, vendar je vrednost števca, če je slika posneta s polmetersko valovno dolžino, milijonkrat večja kot pri optičnem teleskopu. Prednost teleskopa v Arecibu je v tem, da zajame signal na zelo veliki površini (skoraj

70.000 m<sup>2</sup> in zato zazna zelo šibke signale oddaljenih tvorb globoko v vesolju.

Naj omenimo še način, kako je mogoče z radijskimi teleskopi doseči zelo visoko kotno ločljivost. Med sabo so povezali 10 teleskopov s premerom 25m. Teleskopi so razporejeni vzdolž 9000 km dolge črte, ki se razteza od vzhodne obale Združenih držav do sredine Pacifika in tako so dosegli razmerje med valovno dolžino in razsežnostjo sprejemnika, ki je boljše, kot pri največjih optičnih teleskopih.

### **Novo odkriti planetni sistemi**

Najbližja zvezda v naši galaksiji, ki jo imenujemo Rimska cesta, je Proxima Centauri in je od nas oddaljena nekoliko več kot štiri svetlobna leta, kar je malo več kot en parsek. Vprašajmo se, ali bi z Zemlje z najzmogljivejšimi teleskopi opazili, ali ima ta zvezda planetni sistem, tako kot naše Sonce. Da bi planete opazili, bi morala biti izpolnjena dva pogoja. Teleskop bi moral imeti dovolj veliko kotno ločljivost in planeti bo morali oddajati dovolj svetlobe. Drugi pogoj bi bil težko izpolnjen, saj planeti oddajajo le odbito svetlobo matične zvezde. Lahko pa zakrijejo zvezdo, ki je daleč za njimi. Če bi okrog Proxime Centauri krožil planet na enaki razdalji, kot kroži Zemlja okrog Sonca, bi moral imeti naš teleskop ločljivost, ki bi omogočala, da razločimo dve telesi, ki sta med sabo oddaljeni eno astronomsko enoto, od nas pa štiri svetlobna leta - to pomeni, da bi bila zahtevana ločljivost enaka približno tri četrtine ločne sekunde. V poglavju o ločljivosti teleskopov smo pokazali, da so najboljše ločljivosti nekaj stotink ločne sekunde - torej bi v njenem sosedstvu lahko videli planete, če bi jih zvezda imela - pa jih niso opazili. Tudi na ostalih sončevih sosedah ki so dovolj blizu, da bi bili planeti opazljivi, jih niso opazili. Pred nekaj desetletji, ko so astronomska opazovanja dovolj napredovala, so osvojili posredne metode, ki omogočajo zaznavo planetnih sistemov na zelo oddaljenih zvezdah, če je le njihova svetloba dovolj močna, da je mogoče dovolj natančno preiskati njen spekter. Z analizo Dopplerjevega premika spektralnih črt svetlobe, ki jo zvezde oddajajo, izmerijo hitrost, s katero se zvezda približuje Zemlji, ali se od ne oddaljuje. Ko narišejo časovni diagram tako izmerjene hitrosti, ugotovijo, da se nekatere zvezde periodično približujejo in oddaljujejo od Zemlje. Iz teh meritev potegnejo zaključek, da je to gibanje dokaz za obstoj planetnega sistema. Ker mora težišče sistema mirovati, se mora zvezda oddaljevati/približevati, kadar se nam njen planet približuje/oddaljuje. Če uspejo iz zvezdine svetilnosti določiti maso zvezde, lahko določijo tudi maso in oddaljenost planetov ter njihovo število. Doslej so na ta način odkrili že več deset planetnih sistemov s planeti primerljivih velikosti kot v našem planetnem sistemu.

## **PRENOS PODATKOV, TELEFONIJA IN RADIO**

### **Prenos podatkov**

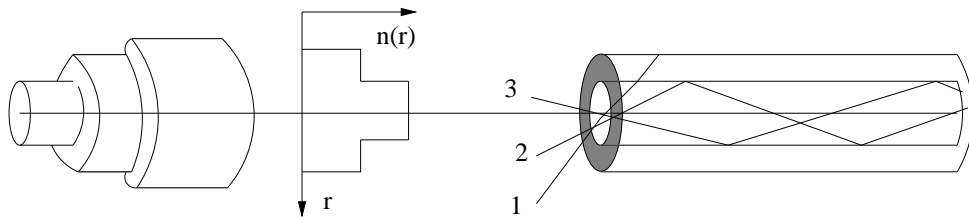
Vsi zapisi, ki naj jih prepoznajo in obdelajo elektronski računalniki, morajo biti zapisani v dvojiškem (binarnem) sistemu - to je v obliki ničel in enic. Torej imajo tudi vsi prenosi podatkov iz enega računalnika v drugega obliko pretoka signalov, ki nosijo ničle in enice. Prenosi potekajo lahko skozi žice ali brezžično, s pomočjo elektromagnetnih ali zvočnih valov. Prenos po žici je videti enostaven: v enakomernih časovnih presledkih odpošiljamo napetostne ali tokovne sunke, kadar odpošiljamo ničlo, je višina sunka enaka nič, kadar pa odpošiljamo enico, je višina enaka neki poljubni izbrani vrednosti. Signali so vgrajeni v okvir kontrolnih znakov, da je mogoče zaznati napake. Ta recept deluje, če nismo

prezahtevni in če ne skrajšamo preveč intervala, v katerih si sledijo zaporedni znaki in če so razdalje prenosa dovolj majhne. Zavedati se moramo namreč, da ima vsaka žica določeno vrednost kapacitete in induktivnosti in enačbi (E61) kažeta, da je impedanca v določenih primerih, ko zrasteta  $L$  in  $C$  čez določeno mejo, lahko tako velika, da ni mogoče poslati signala skozi žico. Izkaže se, da se začnejo težave pojavljati, ko presežemo neko mejo pri hitrosti prenosa znakov. To je razumljivo, saj spominja signal, ki ga sestavlja zaporedje ničel in enic, na izmenični tok, katerega frekvenca je definirana z želeno hitrostjo prenosa signala. Navadna fiksna telefonska napeljava omogoča prenose podatkov le z nekaj kilobajti v sekundi.

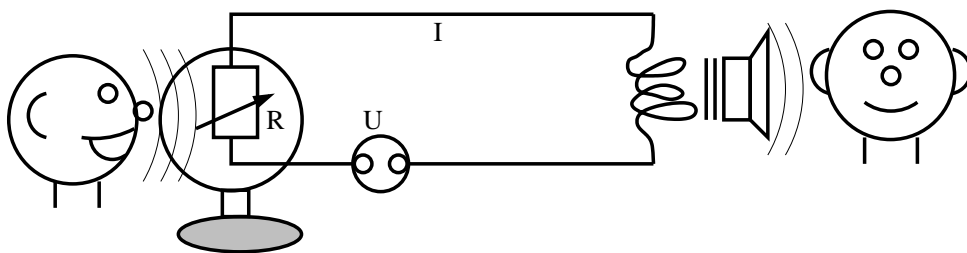
Najhitrejši prenos signalov na velike razdalje omogočajo optična vlakna. Če hočemo razumeti delovanje prenosa podatkov skozi optična vlakna, moramo poznati nekaj fizikalnih zakonitosti. Svetloba se širi skozi steklo dokaj nemoteno (to pomeni, da je dušenje majhno) s hitrostjo  $c = c_0/n$ , kjer sta  $c_0$  in  $n$  hitrost svetlobe v vakuumu ( $3 \times 10^8 m/s$ ) in lomni količnik stekla, ki ima vrednost približno 1,5. Binarno zaporedje znakov prenašamo skozi optično vlakno tako, da razsekamo žarek na segmente z dolžino  $l$  in vsak segment napolnimo z normalno intenziteto, kadar prenašamo enico in s temnim poljem, kadar prenašamo ničlo. Na osnovi tega opisa in slike 27 lahko hitro zaključimo, kje so omejitve glede hitrosti prenosa znakov. Osnovna zahteva je: dolžina paketa, ki ustreza enemu znaku ne more biti krajša od valovne dolžine svetlobe - paket mora vsebovati vsaj nekaj valovnih dolžin, da se bosta ničla in enka z gotovostjo razlikovali. Upoštevati je treba namreč dejstvo, da postajajo zaradi pojava disperzije z napredovanjem signala vzdolž optičnega vlakna paketi vse bolj razmazani. Vsekakor pa že groba ocena pokaže, da je prenos signalov skozi optično vlakno zelo zmogljiv. Valovne dolžine optične svetlobe v steklu z lomnim količnikom  $n = 1,5$  so približno eno tretjino mikrona (pozor: pri vstopu svetlobnega žarka v dielektrik se frekvenca ne spremeni, ker pa mora veljati zveza  $c = \lambda\nu$ , se mora pri zmanjšanju hitrosti zmanjšati za isti faktor tudi valovna dolžina). Če porabimo za en znak 1000 valovnih dolžin dolgo valovno potezo in enako dolg presledek, bo signal vseboval tisoč petsto znakov na meter dolžine, na dolžini 200.000 km valovanja, kolikor ga oddajnik odda in sprejemnik sprejme v eni sekundi, pa bo binarnih znankov še za faktor 200 milijonov več, kar bi pomenilo 300 gigabitov ali 38,5 gigabajtov v sekundi. Ocenimo, koliko časa bo trajalo, da prenesemo z ravnokar omenjeno hitrostjo prenosa z nekega internetnega naslova na svoj računalnik celovečerni film. Prenesti moramo dvajset slik za vsako sekundo trajanja filma. Film, ki traja 5000 sekund, vsebuje 100.000 slik. Vsako sliko sestavlja približno milijon svetlobnih točk, in za osvetlitev vsake točke je potrebnih kakšnih deset bajtov informacij - to je skupaj  $10^{12}$  bajtov, ali 1000 gigabajtov. Računalniški programi za zgoščanje zapisa zmanjšajo obseg informacij za faktor 10 do 100 in tako moramo penesti samo nekaj deset gigabajtov, kar bi trajalo manj kot eno sekundo. Ker običajno najemamo pri podjetjih, ki skrbijo za prenos podatkov, le dostope do medmrežja z dosti nižjimi hitrostmi, kot je zgoraj omenjena, traja tudi prenos filmov temu primerno dlje.

## Telefonija

V zgodnji dobi razvoja telefonije so bili v enoten tokokrog zaporedno povezani mikrofoni, kot sprejemnik zvoka, slušalka, kot oddajnik zvoka in izvor napetosti, ki je poganjal električni tok (glej sliko 28). Nihanje zračnega tlaka je spreminjalo vrednost električnega upora



Slika 27: Optično vlakno in prenos svetlobnih žarkov skozenj. Narisan je profil lomnega količnika, ki je v sredini večji, v zunanem delu pa manjši. Žarek 1, ki vstopa v optično vlakno pod prevelikim kotom, ne doživi na meji med sredico in zunanjim delom totalnega odboja in je izgubljen. Žarka 2 in 3 sta ujeta v sredico, vendar opravita zaradi različnega kota, pod katerim vstopata v vlakno, različno dolgo pot in bi se lahko zgodilo, da dohiti žarek, ki gre bolj naravnost, žarke, ki pripadajo predhodnemu svetlobnemu pulzu. Zato si morajo svetlobni pulzi, ki nosijo sporočilo, slediti z dovolj velikim časovnim zamikom. Približno oceno za zgornjo mejo hitrosi prenosa signalov dobimo, če predpostavimo, da morata optični pulz in presledek med dvema zaporednima pulzoma trajati tisoč nihajnih časov svetlobnega valovanja. Če privzamemo za valovno dolžino vrednost  $\lambda = 0,5\mu$ , je pripadajoča frekvenca  $c/\lambda = 6 \times 10^{14} s^{-1}$ , hitrost prenosa pa dva tisočkrat manjša - torej 300 gigabitov v sekundi. Današnje hitrosti prenosov redko presegajo vrednost desetih gigabitov v sekundi.

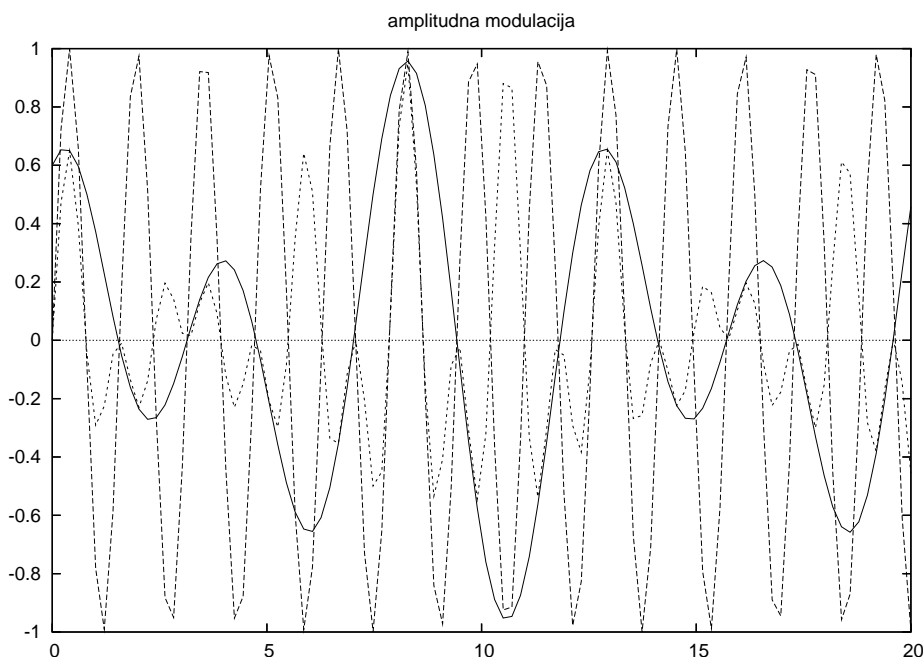


Slika 28: Delovanje najenostavnejše izvedbe telefona

v mikrofону. Posledica je spreminjajoč se električni tok skozi tuljavo v slušalki, ki povzroča spreminjajoče se magnetno polje. V slušalki je feromagnetna opna, na katero deluje spreminjajoča se magnetna sila. Posledica je nihanje zraka, ki ga zazna uho poslušalca. Moderna telefonija uporablja veliko različnih tehničnih rešitev. Od prvotnih komponent sta ostala le mikrofön in zvočnik, oziroma slušalka, vmes pa doživi signal številne pretvorbe. Zelo pogosto je zakodiran v digitalno obliko in potuje po žicah, optičnih vlaknih, skozi zrak, ali skozi prazen prostor nad ozračjem, če so vmesne postaje na umetnih satelitih. Kmalu bo telefonija le del globalnih komunikacij skupaj z radiom, televizijo in računalniškim svetovnim spletom.

## Radio

Za prenos radijskih signalov je na voljo elektromagnetno valovanje z valovnimi dolžinami od nekaj metrov, do nekaj kilometrov. Pripadajoče frekvence podaja enačba  $\nu = c/\lambda$ . Celotno območje valovnih dolžin razdelimo na štiri področja, ki jih imenujemo področja dolgih radijskih valov ( $10km > \lambda > 1km$ ), srednjih ( $1000m > \lambda > 100m$ ), kratkih ( $100m > \lambda > 10m$ ) in ultrakratkih ( $10m > \lambda > 1m$ ) radijskih valov. Zvočni signal je običajno zakodiran v radijskih signalih na enega od dveh načinov: z amplitudno modula-



Slika 29: Amplitudna modulacija radijskega signala. Narisana je nemodulirana časovna odvisnost signala, akustični signal in njun produkt

cijo (AM) ali s frekvenčno modulacijo (FM). Prva se uporablja za dolge srednje in kratke valove, druga pa za področje ultrakratkih valov. Prednost srednjih in dolgih valov je v tem, da jim uklon omogoča, da dosežejo manj izpostavljene porabnike radijskih signalov. Elektromagnetna valovanja se namreč odklanjajo od premočrtne poti kvečjemu za nekaj valovnih dolžin, kar pomeni pri valovanju, ki je frekvenčno modulirano, le nekaj metrov, pri srednjih in dolgih valovih pa več sto metrov. To pomeni, da radijski signal, ki ga prenašajo srednji in dolgi radijski valovi, doseže tudi porabnike, ki jih zakrivajo hribi ali druge ovire. Poglejmo, kako je zakodiran čisti akustični ton z akustično frekvenco  $\omega_{ak}$ . Zapisali bomo jakost električnega polja v elektromagnetnem valovanju, ki pri frekvenci  $\omega_{EM}$  prenaša omenjeni akustični signal. V primeru amplitudne modulacije pomnožimo izraz, ki opisuje čisti elektromagnetni val z izrazom, ki predstavlja akustično nihanje

$$E = E_0(\sin\omega_{ak}t)(\sin(\omega_{EM}t - kx)), \quad (*)$$

kjer je  $k$  valovni vektor EM valovanja  $k = 2\pi/\lambda$ . Na sliki 29 sta narisana oba faktorja, ki nastopata v enačbi (\*) in njun produkt. Naloga električnega vezja v radijskem oddajniku je, da na analogen način izvede množenje, ki ga zapoveduje enačba (\*) in da odpošlje elektromagnetni signal preko oddajne antene v prostor. Radijski sprejemnik mora elektromagnetni signal demodulirati in rekonstruirati akustični signal. Demodulacija poteka preko dveh stopenj: usmerjanja in glajenja. Usmerniško vezje zavrže negativno polovico signala, glajenje pa izloči komponento nihanja, ki pripada nosilni frekvenci elektromagnetnega valovanja.

V primeru frekvenčne modulacije vstopi akustična frekvenca v argument sinusne funkcije elektromagnetnega vala

$$E = E_0\sin([\omega_{EM0} + \Delta\omega\sin(\omega_{ak}t)]t - x/c). \quad (**)$$

Vidimo, da niha signal pri frekvenčni modulaciji ves čas z enako amplitudo - tudi takrat, ko kodira šibek akustični signal. Demodulacija poteka na osnovi resonančne krivulje. Signal, katerega frekvenca se močno spreminja, povzroči močno nihanje membrane zvočnika, ki je nameščen v radijskem sprejemniku, če pa je nihanje frekvence šibko, je tudi zvok šibek.

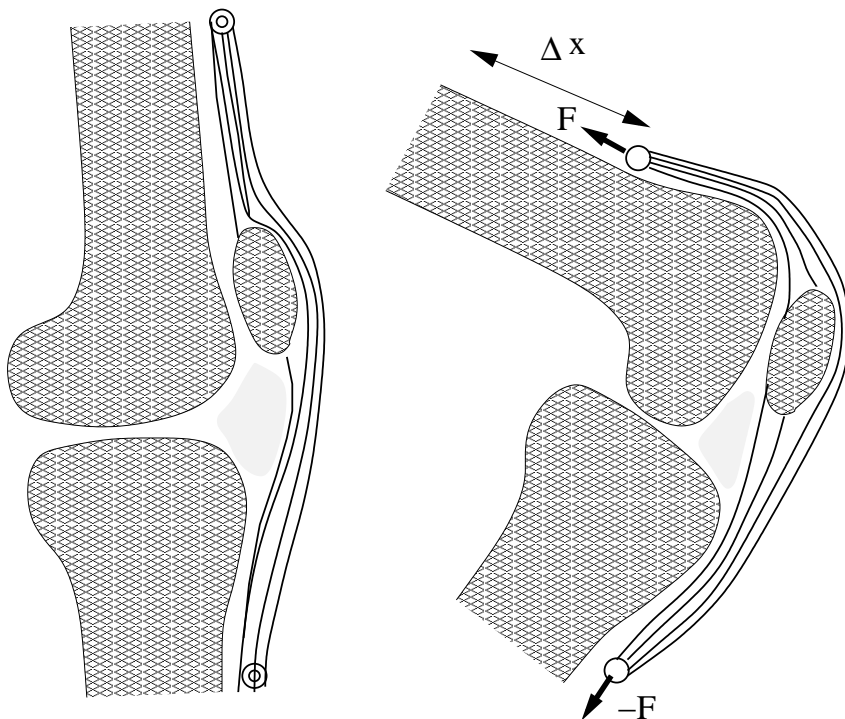
## ČLOVEŠKO TELO

### Mehanika človeškega telesa

Človeško telo se mora pokoravati zakonom statike in dinamike. Težo telesa prenaša okostje. Ko je telo v mirujočem stoječem položaju, so hrbtenica, medenica, stegnenica in golenica obremenjene na tlak, da uravnesijo silo teže. Mišice v pretežni meri počivajo, saj morajo skrbeti le za ravnovesje. Mišice so obremenjene, kadar se gibljemo. Izračunajmo silo, s katero morajo zadržati noge padalca ali akrobata, ki doskočita na trda tla z navpično navzdol usmerjeno hitrostjo 7 m/s. Pri enakomernem zaustavljanju vzdolž poti z dolžino  $s$  izračunamo pospešek na osnovi enačbe  $a = v^2/2s$ . Pot zaustavljanja je razlika med dolžino stegnjenih in skrčenih nog, kar je pri človeku srednje postave približno enako 60 cm. Za vrednost pospeška dobimo  $42 \text{ m/s}^2$ , kar je malo več, kot štirikratnik zemeljskega težnega pospeška. Sila, s katero so obremenjene noge, je torej enaka  $4,2mg$ , temu pa moramo prišteti še silo teže - torej je celotna obremenitev več kot petkratna sila teže. Vsaka noga posebej je obremenjena z dve in pol kratno silo teže telesa. Natančnejša analiza obremenitev posameznih kosti, vezi in mišic pokaže, da se na določenih mestih v skeletu - v kolenskem sklepu, na primer, pojavljajo še dosti večje sile kot  $F = 2,5mg$ . Silo, s katero je napeta vez, ki povezuje stegnenico in golenico preko pogačice, ocenimo na osnovi predpostavke, da je delo, ki ga prejme stegenska mišica pri doskoku, enako kinetični energiji - ali pri časovno obrnjenem dogodku, to je pri odzivu: delo, ki ga opravita stegenski mišici leve in desne noge je enako povečanju kinetične energije. Torej lahko zapišemo  $2F\Delta x = mv^2/2$ . Z  $\Delta x$  smo označili skrček četveroglave stegenske mišice, ki ga lahko ocenimo na  $\Delta x = 10 \text{ cm}$  (glej sliko 30). Kinetična energija pri zgoraj obravnavanem seskoku je enaka razliki potencialne energije pri višini  $h = v^2/2g = 2,5 \text{ m}$ , torej je sila, s katero je napeta kolenska vez na levi ali desni nogi, enaka  $F = mg(h/2\Delta x)$ . Pri  $h = 2,5 \text{ m}$  in  $\Delta x = 10 \text{ cm}$  je to 12,5 kratna sila teže, kar znese pri 70 kg težkem človeku malo manj kot 9000 N.

### Ostrina vida

Svetloba vstopa v oko skozi odprtino šarenice, katere premer se prilagaja svetlobnim razmeram. Na močni svetlobi se odprtina zmanjša, v temi pa razširi. Zožena zenica ima za posledico veliko globinsko ostrino, kar pomeni, da vidimo pri močni svetlobi ostro bližnje in daljne predmete. Cena, ki jo plačamo za povečano globinsko ostrino je splošno zmanjšanje ostrine vida. Enačba  $\Delta\varphi = 0,61\lambda/R$ , ki smo jo utemeljili v poglavju o optiki, lahko uporabimo tudi za človeško oko. Pri največji odprtini šarenice, ko doseže premer kakšnih 5 mm napoveduje ravnokar zapisana enačba za rumeno svetlobo ločljivost  $\Delta\varphi = 0,61 \times 0,5\mu/2500\mu$ , kar znese  $1,22 \times 10^{-4}$  radianov ali 0,42 ločnih minut. To je približno 12 krat višja ločljivost, kot zahtevajo okulistični standardi za normalno ostrino vida in približno dvakrat višja ločljivost, kot jo izmerijo pri ljudeh z najbolj ostrim vidom. Proizvajalci dobrih pisarniških tiskalnikov, na primer, morajo poskrbeti, da na tekstih in slikah ne bo opaziti, da so sestavljene iz točk - torej mora biti velikost pikic na meji ločljivosti zdravega človeškega očesa. Dobri tiskalniki tiskajo z natančnostjo 600 točk na



Slika 30: Kolenski sklep v iztegnjenem in skrčenem položaju. Narisane so tri kosti (stegnenica (zgoraj), pogačica in golenica) ter sprednja kolenska vez, ki jo napenja četveroglava stegenska mišica.

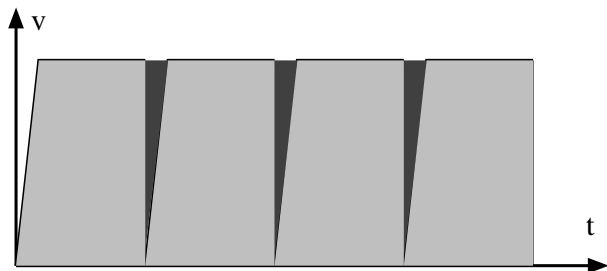
dolžino enega palca (=dots per inch = dpi). Posamezni točki ustreza zorni kot, ki je enak velikosti točke, iz katerih so sestavljene črke ali slike ( $2,54\text{cm}/600=0,0423\text{mm}$ ) deljeno s standardno razdaljo od oči do papirja (25 cm)  $\Delta\varphi = 0,00017$  radiana, kar je malo manj kot 0,6 ločnih minut. Ta kot je manjši od ločljivosti ljudi z najbolj ostrim vidom in zato so tudi poševni robovi črk videti gladki, čeprav so sestavljeni iz kvadratnih točk.

## Sluh

Človeško uho je izredno občutljiv organ, ki zaznava zvočne valove in določa višino (t.j. frekvenco) dominantnih tonov, celotno intenziteto zvoka in prisotnost spremljajočih frekvenčnih komponent z nižjimi intenzitetami. Seveda je uho sposobno zaznavati tudi vse vrste šumov - to so zvoki, ki nimajo prevladujočih frekvenc, ampak so ves čas prisotne skoraj vse frekvence s spreminjajočimi se intenzitetami. Stična točka slušnega sistema z zunanjim svetom je bobnič, ki ima obliko tanke opne, ki se upogiba pod vplivom nadtlaka v zgoščinah zraka, ki predstavljajo zvočne valove. Premiki bobniča se prenesejo naprej preko dveh koščic (kladivca in nakovalca) v polžasto zavito kanal, napolnjen s tekočino. V tekočino segajo dlačice, ki so v stiku z živčnimi končiči. Zvočni signali tako v končni fazi povzročajo živčne dražljaje, ki prenesejo v možgane podatke o frekvencah in intenzitetah posameznih zvočnih komponent.

Ilustrirajmo robustnost in občutljivost ušesa z dvema primeroma mejnih obremenitev in občutljivosti ušesa. Najprej si predstavljajmo, da imamo zvočnik z močjo 200 W, ki oddaja zvok s frekvenco 1000 Hz v vse smeri enakomerno. V razdalji 10 m od zvočnika bo





Slika 31: Diagram časovne odvisnosti hitrosti za štiri tekmovalce, ki si podajajo štafeto in štiri tekmovalce, ki tečejo vzporedno, vendar vsak od njih začne teči iz mirujočega nizkega štarta. Pot, ki jo pretečejo štafetni tekmovalci je enaka celotni senčeni površini, pot preostalih štirih tekmovalcev pa le svetlo senčeni površini. Iz razlike povprečnih hitrosti lahko določimo pospešek pri štartu.

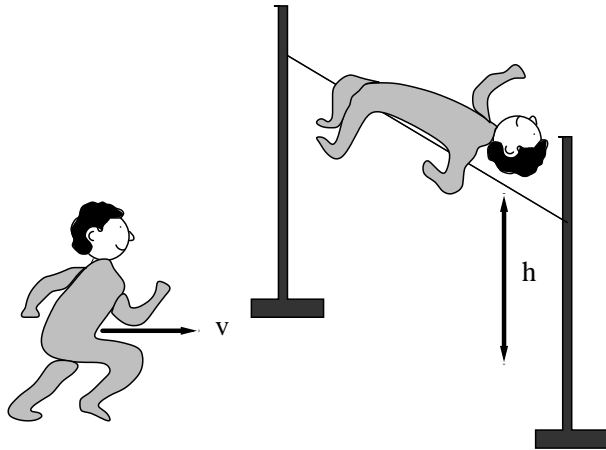
gostota energijskega toka zvočnega valovanja enaka moči, ki jo oddaja zvočnik, deljeni s površino krogle z radijem 10 m:  $j=200\text{W}/(4\pi 100\text{ m}^2)=0,16\text{W}/\text{m}^2$ . V drugem primeru pa vzemimo črička, ki ga v nočni tihoti slišimo kilometer daleč. Čriček tehta nekaj gramov in če upoštevamo, da živa bitja proizvajajo približno 1 W moči na kilogram mase, lahko zaključimo, da čriček ne more gosti z večjo močjo kot je tisočinka watta. Na razdalji en kilometer je gostota zvočnega energijskega toka enaka  $j=32\times 10^{-11}\text{W}/\text{m}^2$ . Vidimo da je razmerje gostot obeh zgoraj izračunanih energijskih tokov dve milijardi proti 1. To je spoštovanja vredno razmerje, saj so običajni razponi fizikalnih merilnikov, ki jih izdelava človek, milijonkrat manjši.

## ŠPORT IN PROSTI ČAS

### Atletika

Atlet razvije pri teku hitrost, ki lahko preseže vrednost 10 m/s. O tem se prepričamo, če primerjamo rezultate teka na 100 m z rezultati štafete 4x100m. Primerjava ni popolnoma na mestu, ker tečejo tekači pri štafeti del poti po krožni stezi. Na sliki 31 je narisana časovna odvisnost hitrosti za tekače, ki si podajajo štafeto in za štiri druge tekače, ki drug drugega čakajo v mirujočem nizkem štartu in se poženejo v tek, ko njihov predhodnik priteče do njih. Na sliki vidimo, da teče prvi par tekačev ves čas vstric, saj se njuni hitrosti pokrivata. Trije enaki prispevki k zaostanku tekačevna 100 m (temna ploščina na diagramu) nastanejo na račun štartov preostalih treh tekačev na 100 m. Vsak štart doda zaostanku prispevek  $vT/2$ , kjer je  $T$  čas pospeševanja od mirovanja do končne hitrosti in lahko zapišemo  $3vT/2 = v(4t_{100} - t_{400})$ . Od tod izračunamo čas pospeševanja  $T = 2(4t_{100} - t_{400})/3$ . Račun zaključimo z obravnavo teka na 100m, saj lahko zapišemo enačbi  $100\text{m} = aT^2/2 + (t_{100} - T)v$  in  $v = aT$ . Rešitev teh dveh enačb sta pospešek in končna enakomerna hitrost  $v$  tekačev. Za podatke  $t_{100} = 9,9\text{s}$  in  $t_{400} = 38\text{s}$  dobimo  $v = 10,07\text{m}/\text{s}$  in  $a = 10\text{m}/\text{s}^2$ .

Zanimiva je tudi poenostavljena obravnava skoka v višino in skoka v daljino. Na sliki 32 je ilustriran skok v višino. Skakalec, ki bi pri zaletu razvil polno hitrost  $v = 10\text{m}/\text{s}$ , bi skočil 5 m visoko, če bi na dolžini enega koraka ( $l = 1,5\text{m}$ ) v času  $\Delta t = l/v$  preusmeril vodoravno hitrost navpično navzgor. To seveda ni mogoče, saj bi bil za to potreben pospešek  $a = v^2\sqrt{2}/l$ , ki je malo manj kot desetkratnik težnega pospeška. Pri obravnavi



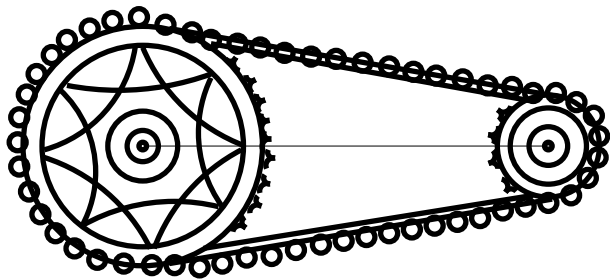
Slika 32: Atlet, ki pridobi pri zaletu hitrost  $v$ , bi, če bi uspel preusmeriti hitrost iz vodoravne v navpično smer, dosegel višino  $h = v^2/(2g)$ . To bi zneslo 5 metrov.

teka na kratke proge smo videli, da se zmore atlet pospeševati kvečjemu s pospeškom, ki je enak zemeljskemu težnemu pospešku  $g$ .

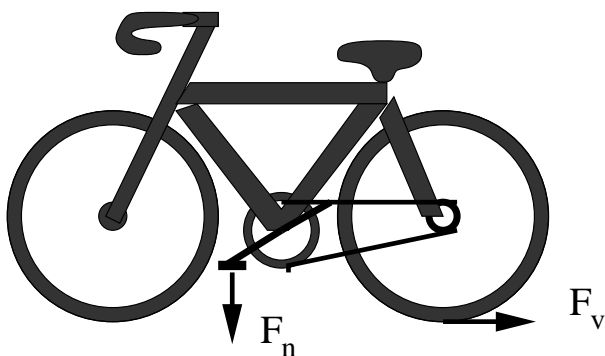
Nekoliko bolj realističen rezultat dobimo, če na poenostavljen način obravnavamo skok v daljino. Če bi se skakalec uspel odgnati pri polni hitrosti  $v = 10\text{m/s}$  pod kotom  $45^\circ$  v smeri navzgor, bi poletel 10 m daleč. Toliko napoveduje izraz za domet pri poševnem metu pod kotom  $45^\circ$ . V tem primeru bi bila sprememba hitrosti enaka  $2v\sin(\pi/8)$ . Vemo, da svetovni rekord v skoku v daljino ni dosti manj, kot je izračunana vrednost. Skakalci se sicer ne odrinejo pod kotom  $45^\circ$ , do velike daljave pa jim pripomore dejstvo, da parabola njihovega leta ni simetrična, saj je njihovo težišče pri odskoku skoraj meter nad tlemi, pri doskoku pa skoraj na tleh.

## Kolesarstvo

Kolo poganjamo s pritiskom na pedale. S tem povzročamo navor, ki se z velikega zobnika, ki ima  $n_v$  zob, preko verige prenaša na mali zobnik z  $n_m$  zobmi. Kolo se odriva od ceste in s tem kolesar premaguje silo upora, se pospešuje in premaguje dinamično komponento sile teže, če pelje po klancu navkreber. Povprečno silo odriva najenostavneje izračunamo tako, da izenačimo količino dela, ki jo opravi kolesar, ko potisne pedal navzdol za dvakratno dolžino ročke ( $L$ ), na kateri je nasajen pedal - z delom, ki ga opravi sila  $F_v$ , s katero se odriva kolo, ko preteče po cesti pot z dolžino  $x$ :  $2Lmg = F_v x$ . Pretečeno pot izračunamo tako, da najprej izračunamo, da se je zadnje kolo zavrtelo za kot  $\varphi = \pi n_v/n_m$ , pri tem, ko smo os na kateri so nasajeni pedali, zavrteli za pol obrata - to je za kot  $\pi$ . Pot  $x$  je zmnožek polmera zadnjega kolesa  $R$  z njegovim kotom zavrtitve. Torej je sila  $F_v$  enaka  $F_v = (2/\pi)mg(n_v/n_m)(L/R)$ . Povprečno vrednost pospeška pa dobimo na osnovi Newtonovega zakona  $F = (m + m_{kolo})a$ . Pri enakomernem vzpenjanju v klanec z naklonom  $\alpha$  mora premagovati odziv zadnjega kolesa dinamično komponento sile teže kolesarja in kolesa  $(m + m_{kolo})g\sin\alpha$ . Pri enakomerni vožnji navzdol brez poganjanja sta približno izenačeni dinamična komponenta sile teže in sila zračnega upora. Izkušnja kaže, da pridobi kolesar na klancu z nagibom  $\alpha = 5^\circ$  hitrost  $v = 70\text{km/h}$ . Izračunajmo, kakšen je koeficient upora v takšnem primeru! Uporabimo izraz za upor po kvadratnem zakonu  $F = C_u S \rho v^2/z$ . Če



Slika 33: Veriga prenaša silo z enega zobčnika na drugega. Navora sta v razmerju števila zob na zobatih kolesih.



Slika 34: Navpična sila  $F_n$ , s katero pritiskamo na pedal, povzroča vodoravno odzivno silo  $F_v$ , ki nam omogoča pospeševanje

tehta kolesar s kolesom 80 kg, bo dinamična komponenta sile teže enaka  $mg\sin(5^\circ) = 68.5N$ . Z izenačenjem obeh izrazov dobimo za koeficient upora vrednost  $C_u = 0.57$ .

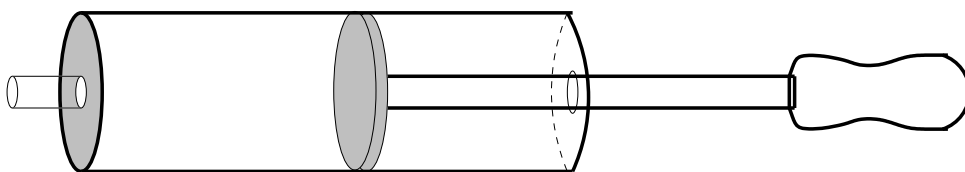
### Navtika

Najlažje napovemo hitrost plovbe jadrnice, ki pluje v smeri vetra. Vzemimo dve toni težko, deset metrov dolgo jadrnico, ki pluje v smeri vetra in ima razpeto jadro s površino  $50\text{ m}^2$ . Presek tistega dela trupa, ki sega v vodo naj bo  $3\text{ m}^2$ , pripadajoči koeficient uporanej bo  $C_u(\text{trup}) = 0,2$ , koeficient upora jadra pa  $C_u(\text{jadro}) = 1,2$ . Hitrost plovbe določimo z rešitvijo enačbe, ki pravi, da sta sili upora jadra v zraku in trupa v vodi nasprotno enaki:

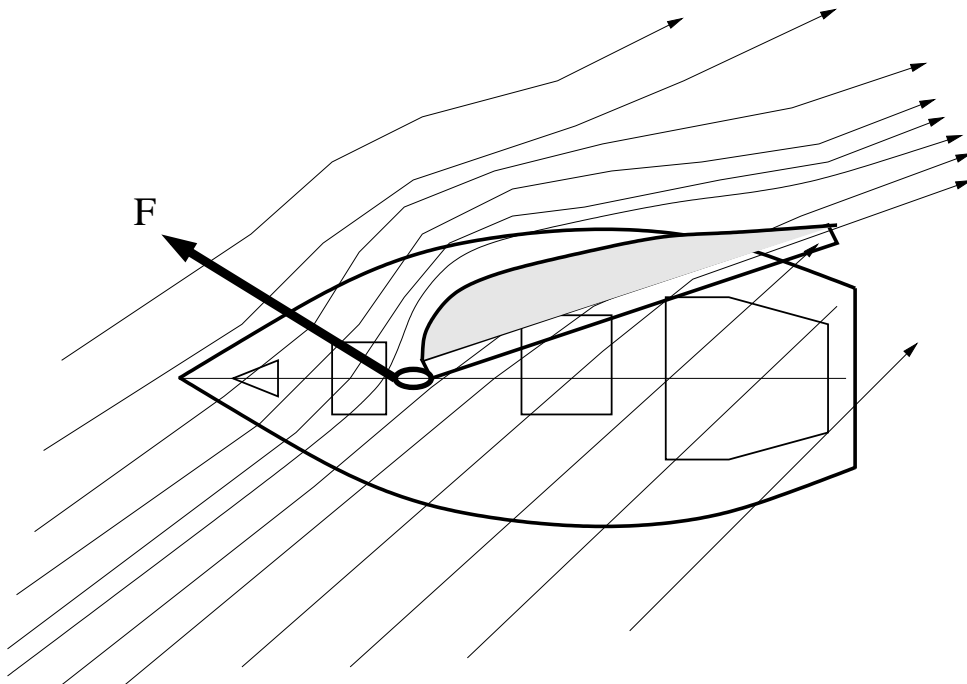
$$C_u(\text{jadro})S(\text{jadro})\rho(\text{zrak})(V - v)^2 = C_u(\text{trup})S(\text{trup})\rho(\text{voda})v^2$$

S črko  $V$  smo označili hitrost vetra z  $v$  pa hitrost plovbe. Rešitev kvadratne enačbe za neznanko  $v$  je naslednja

$$v = V(A - 1)/(A^2 - 1).$$



Slika 35: Z zračno tlačilko lahko izvedemo poljubno spremembo idealnega plina - v tem primeru je to zrak.

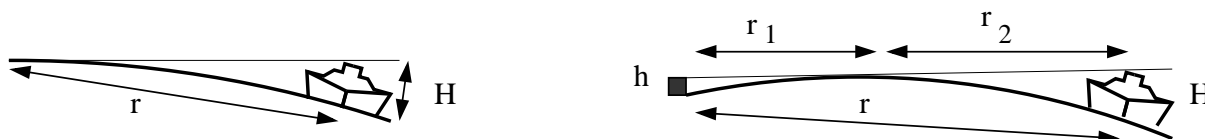


Slika 36: Jadrnica lahko pluje tudi v smeri proti vetru. Prepovedan je le interval smeri, ki oklepajo s smerjo, ki je vetru nasprotna, kot, ki je ostrejši od  $20^\circ$  do  $30^\circ$ . Na sliki je prikazano, da žene jadrnico sila, ki nastane na račun podtlaka v področju, kjer je jadro najbolj izbočeno in je zaradi podaljšane poti zraka hitrost vetra povečana, tlak pa zmanjšan.

Pomen črke  $A$  je naslednji:  $A^2 = C_u(trup)S(trup)\rho(voda)/(C_u(jadro)S(jadro)\rho(zrak))$ . V našem primeru ima  $A$  vrednost 2,89, kar pomeni, da bo jadrnica plula s četrtinsko hitrostjo vetra. Račun velja samo približno in še to samo v primeru, da hitrost vetra ni prevelika. Izkušnje kažejo, da jadrnica težko preseže hitrost, izraženo v vozlih, ki je enaka dolžini jadrnice, izražene v metrih. V našem primeru bi bila mejna hitrost 18 km/h, ki bi jo jadrnica dosegla pri hitrosti vetra okrog 70 km/h.

Jadralci si le poredko izbirajo smer plovbe natančno v smeri hitrosti vetra. Jadrnico lahko krmarijo v kateri koli smeri razen v majhen interval smeri, od koder piha veter. Jadrnice dosegajo največje hitrosti, kadar piha veter v bok. Računska obravnava plovbe pa je v takšnih primerih zelo zapletena.

Za jadralce na morju je pomembno vprašanje, kaj je dosegljivo njihovim očem. Če smo zelo blizu vodne gladine, so našim očem dostopne le točke, ki so nad ravnino, ki se dotika zemeljske krogle v našem stojišču. Kar je pod to ravnino, je očem skrito. Zanima pa nas, kako visok ( $H$ ) je prostor nad morskó gladino, ki v razdalji  $r$  očem ni dosegljiv - drugače povedano: kako visok del kopnega ali spodnjega dela ladje se skriva pod vodno gladino (glej sliko 37!). Do odgovora na to vprašanje pridemo z rešitvijo ne preveč zapletene geometrijske naloge. Obstojá tudi bližnjica, ki nam omogoči na osnovi enostavnega fizikalnega premisleka iz vrednotiti  $H(r)$ . Če s krova jadrnice vržemo v vodoravni smeri s hitrostjo  $v$  nek predmet, bo letel po paraboli, katere zapis je v



Slika 37: Zaradi ukrivljenosti morske gladine ostanejo na razdalji  $r$  objekti z višino  $H$  skriti pod obzorjem.

parametrični obliki naslednji:

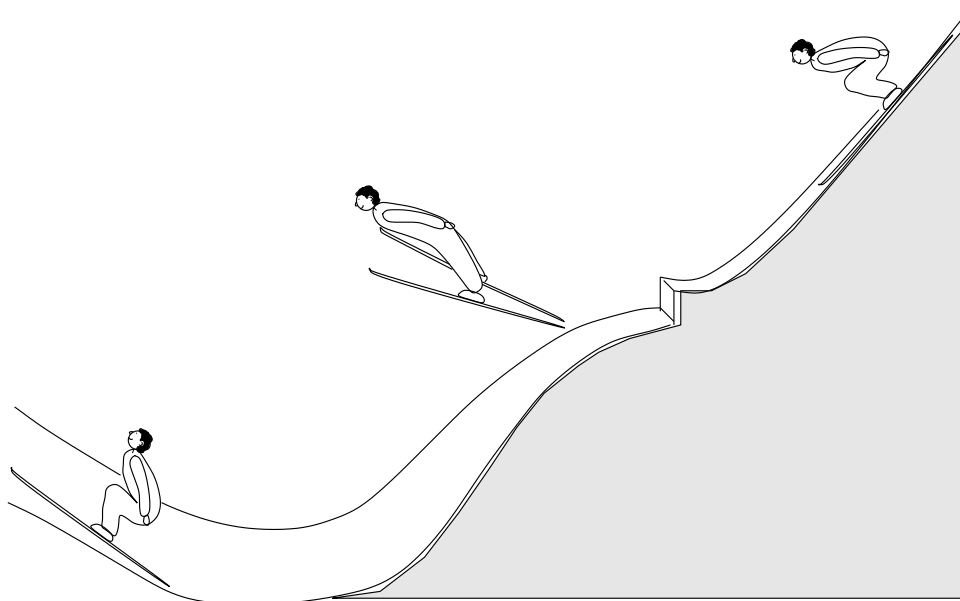
$$x = v t; \quad z = -gt^2/2 \quad (*)$$

Za nas je zanimiv primer, ko postavimo za  $v$  vrednost prve kozmične hitrosti  $v = 7,9 \text{ km/s}$ . V tem primeru bi imela dejanska trajektorija obliko krožne orbite s središčem v središču Zemlje. Ta krožnica - njena ukrivljenost je enaka ukrivljenosti morske gladine - se prilega paraboli, ki jo predstavlja enačba (\*). Razhajanje obeh krivulj preseže en meter šele pri razdaljah  $r$ , ki so večje kot 200 km. Torej je recept za račun višine ladje ali kopnega, ki je skrita pod obzorjem, naslednji: Ko si izberemo razdaljo  $r$ , na primer 16 km, izračunamo, koliko časa bi do tam potoval izstrelek s hitrostjo 7,9 km/s - to bi bilo približno dve sekundi, nato izračunamo, kako globoko bi ga v tem času potegnila težnost - v našem primeru  $H = gt^2/2 = 20 \text{ m}$ .

Račun postane nekoliko bolj zapleten, če ne zremo z morske gladine, ampak z višine  $h$ . (glej sliko 37!) V tem primeru moramo najprej ugotoviti, kako daleč na morju je obzorje. To razdaljo označimo z  $r_1$ . Če zremo z višine 5 m, je rešitev enačbe  $gt^2/2 = 5 \text{ m}$  enaka  $t = 1 \text{ s}$ , torej  $r_1 \approx 8 \text{ km}$ . Če je celotna razdalja  $r = r_1 + r_2 = 24 \text{ km}$ , nam preostane za določitev višine  $h$  enak račun, kot smo ga zgoraj že naredili:  $r_2 = 24 \text{ km} - 8 \text{ km} = 16 \text{ km}$ . Tej razdalji ustreza čas 2 s in višina  $H = 20 \text{ m}$ .

### Na smučeh

Smučarji izkoriščajo nizek koeficient trenja med smučko in snežno podlago. Iz izkušenj vemo, da že rahel nagib smučišča ( $2^\circ < \alpha < 3^\circ$ ) zadostuje, da drsimo, ne da bi se poganjali. To pomeni, da je koeficient trenja ( $k_t = \tan \alpha$ ) med 0,03 in 0,05. Pri spustu po strmeh pobočju lahko zato doseže smučar visoke hitrosti. Površna ocena na osnovi enačbe, ki izenačuje dinamično komponento sile teže s silo upora po kvadratnem zakonu, potrди, da dosežejo tekmovalci v smuku hitrosti več kot 150 km/h. Hitrost smukača določajo štiri okoliščine: višinska razlika od startnega mesta do točke, kjer se trenutno nahaja, telesna teža, naklon smučišča in drža telesa. Višinska razlika  $h$  vstopa v izraz za hitrost v obliki  $v = \sqrt{2gh}$ . Ta enačba temelji na predpostavki, da se je vsa potencialna energija pretvorila v kinetično energijo. Dejansko se že od vsega začetka energija troši za premagovanje zračnega upora, in drsnega trenja, smučar pa z odripi palic in smučmi opravlja delo in s tem povečuje svojo hitrost. Kljub temu lahko zaključimo, da smukač ne more doseči največje hitrosti, ki je okrog 40 m/s, dokler se ne spusti vsaj 80 višinskih metrov pod startno ravnino. Pod to koto se smukač približa režimu, ko ne more več neposredno pretvarjati potencialne energije v povečevanje kinetične energije, ker je v režimu stacionarne hitrosti, ko mu drsno trenje in zračni upos sproti porabljata vso spremembo potencialne energije. Hitrost določa enačba  $mgs \sin \alpha = C_u S \rho v^2/2$  (\*). Naklonski kot  $\alpha$ , ki določa strmino



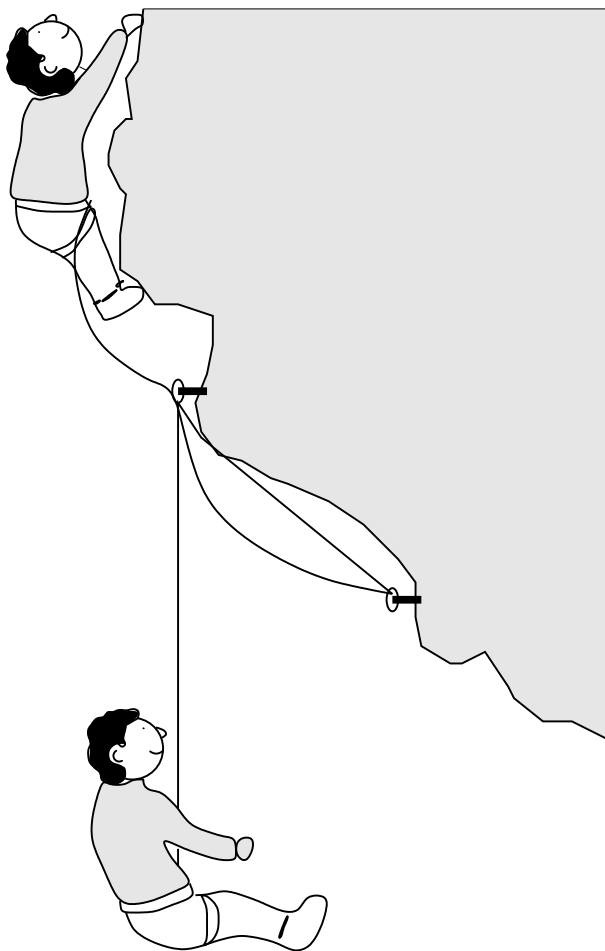
Slika 38: Skakalec pridobi hitrost na zaletišču. Po odskoku se zravna, razširi smučke in jadra s približno enakomerno hitrostjo.

proge, določajo načrtovalci proge in tekmovalci mora konfiguracijo zemljišča obrniti sebi v prid. Iz enačbe je razvidno, da so težji tekmovalci v prednosti, saj jim večja teža pripomore, da dosežejo večjo stacionarno hitrost. Tekmovalci lahko s kontrolirano držo telesa vpliva na ključna faktorja v enačbi (\*) - to je na koeficient upora  $C_u$  in na čelni presek  $S$  svoje figure. Vsako odročenje in prehod v bolj vzravnano držo povečuje oba faktorja in zmanjšuje hitrost.

Zgornja razmišljanja veljajo tudi za smučarske skoke in polete. Pri zaletu dosežejo skakalci hitrost, ki nekoliko presega 30 m/s. Po odzivu se zravnavajo in razširijo smuč. S tem se nekoliko upočasnijo, poskušajo pa pridobiti delno komponento aerodinamičnega vzgona, ki ga enačba (\*) ne zajame, skakalcu pa omogoči podaljšati trajektorijo svojega leta in doseči boljši rezultat.

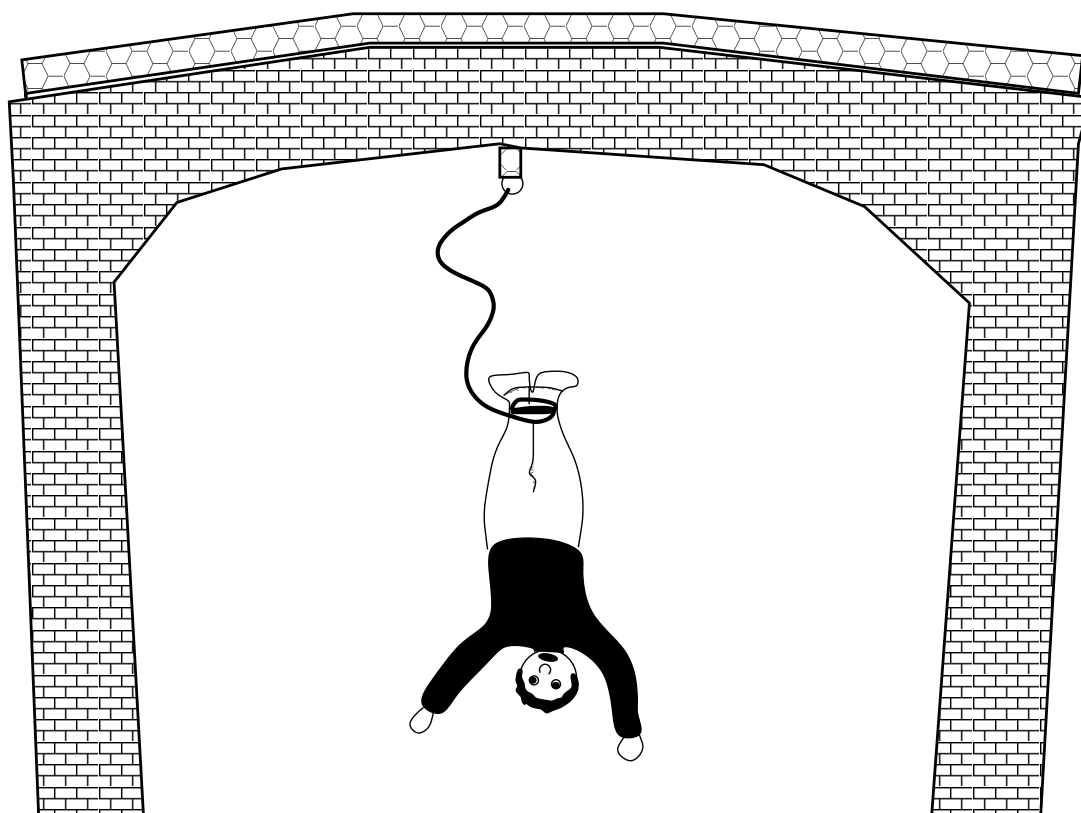
### Na vrveh

Alpinizem je obremenjen z največjim tveganjem, saj plezalci - vsaj pri prvenstvenih vzponih - ne vedo, v kaj se podajajo. Varujejo jih le vrvi, ki so vpete v kline, ki so jih zabili v steno in se potem dvignili nad nje. Pri zdrsu se vrv napne šele potem, ko so že pridobili hitrost, ki ustreza padcu z višine, ki je enaka dvojnemu raztežaju vrvi do najvišje zabitega klina. Če bi vrv ne bila elastična, bi že manjši zdrs lahko povzročil hude poškodbe. Sila, s katero zaustavlja vrv padajočega alpinista, je odvisna od tega, kako je vrv pletena. Poglejmo si tri mejne primere. Najboljša bi bila vrv, ki bi bila pletena tako, da bi se pri obremenitvi, ki je enaka, na primer, dvojni teži alpinista začela raztezati. Takšna vrv bi padajočega alpinista potem, ko bi se napela, zaustavila, ko bi pretvorila v delo notranjega trenja vso potencialno energijo, ki se sprosti pri padcu. To bi se zgodilo potem, ko bi se vrv raztegnila za dolžino, ki je enaka višini prostega pada alpinista, preden se je vrv napela. Kot drugi primer omenimo neraztegljivo vrv. V tem primeru bi se morala vsa potencialna



Slika 39: Vrvi, ki jih uporabljajo alpinisti, so prožne in lahko absorbirajo padec, ki je enak dvojnemu raztežaju kosa vrvi, ki sega od najvišjega klina do plezalca.

energija, ki se sprosti pri padcu, izničiti pri deformacijah v telesu alpinista, kar bi imelo lahko pogubne posledice. Kot tretji primer omenimo elastično vrv. Približno takšne vrvi uporabljajo načrtovalci *bungee* skokov. Pri takšnem skoku izračunamo največjo globino  $H$ , ki jo telo doseže, z rešitvijo enačbe  $mgH = kx^2/2$ . V tem izrazu je  $x$  raztezek vrvi, ki se pokorava enačbi  $F = kx$ .



Slika 40: Vrvi, s katerimi je pripet skakalec pri bungee skokih, so dosti bolj elastične, kot vrvi, ki jih uporabljajo alpinisti.