

LOFY.01.108 Füüsika kui loodusteadus (2 EAP)

1. Sissejuhatus	1
I. Teoreetilised alused	4
2. Mõtlemisviisid	4
3. Teaduslik mõtlemisviis	5
4. Loodusteadusliku mõtlemisviisi kujundamine	6
Kirjandus	9
II. Praktilised rakendused	9
5. Mõõtmine ja mõõtemääramatus	9
6. Kulgemine	13
7. Newtoni seadused	17
8. Impulss	20
9. Gravitatsioon	23
10. Rõhk	26
11. Pöörlemine	30
12. Töö ja energia	35
13. Soojus	41
14. Aine olekud	45
15. Võnkumine, lained, heli	51
16. Elekter ja magnetism	59
17. Valgus	68
18. Mikromaailm	76
Kirjandus	79
Eksamiküsimuste teemad	80

1. Sissejuhatus

Täppisteadused ehk reaalteadused on sellised teadused, kus matemaatika osatähtsus on suur, näiteks on selliseks teaduseks füüsika. Mõnikord nimetatakse selliseid teadusi ka füüsika-matemaatika teadusteks. Teisalt kuulub füüsika loodusteaduste hulka, kuhu ta kuulub uuritavate materia liikumisvormide kaudu. Loodusteadused annavad võimaluse tunnetada loodusseadusi.

Üldteada on fakt, et täppis- ja loodusteaduste populaarsus langeb nii Eestis kui ka mujal maailmas. Koos sellega kahaneb ka õpilaste huvi vastavate õppeainete vastu. Huvi langust toetab ka Eesti koolide **õppekava**, kus näiteks füüsikatundide maht on kahekümne viie aasta tagusega (ENSV) võrreldes vähenenud 40% võrra, aga aine sisu pole vastavalt vähenenud. Aastal 2011 vastu võetud uus koolide õppekava vähendas veelgi loodusainete kohustuslikke tunde gümnaasiumis. See aga muudab füüsikaõppe formaalseks, sest lühema ajaga tuleb rohkem ära õppida.

Üha tugevamat konkurentsi pakuvad loodusteadustele ka **parateadused**, mida kaubanduslikel kaalutlustel propageerib massikommunikatsioon (astroloogianurgad päevalehtedes, horoskoopide ettelugemine riigiraadios ja eratelevisioonis, selgeltnägijate tuleproovid televisioonis, imeravitsejad jms.). Irratsionaalsed¹

¹ *Rationalis* – ld keeles *mõistuslik*, irratsionaalne – mõistusega mittehaaratav

õpetused kasutavad loodusteaduslikke mõisteid (näiteks *energia* või *väli*) ja teevad seda palju emotsionaalsemalt kui loodusteadused ise. Samade mõistete ratsionaalne käsitlemine jääb seetõttu paljudele õpilastele kuivaks ja eluvõõraks.

Loodusteaduste õpetamist raskendav faktor on ilmselt ka noorte üha tugevam orienteeritus kiirele rikkaks saamisele. Isegi kui õpilane jääb uskuma, et ka loodusteaduste vallas omandatud teadmistel on turuväärtus, mõistab ta ometigi, et kiiret rikastumist need ei tööta.

Ülalkirjeldatud nähtused aitavad kokkuvõtlikult kaasa koolifüüsika **võõrandumisele**. Võõrandumiseks nimetatakse protsessi, milles inimtegevus ja selle tulemused irduvad inimesest ja muutuvad talle olemuslikult võõraks. Koolifüüsika võõrandumine on aktuaalne ka mujal Euroopas ja Ameerikas.

Võõrandumise tendentsid ilmnevad juba ka ülikooli füüsikaõppes. Järjest rohkem võib kohata ka üliõpilasi, kes ei oska graafikuid joonistada või ülesandeid lahendada, kui algandmeid on rohkem kui vaja. Õppimismeetoditest on levinuim päheõppimine, kusjuures arusaamine pole oluline, jne.

Üheks koolifüüsika võõrandumise põhjuseks on kindlasti **õpimotivatsiooni** vähenemine. Õpilased ei saa aru, miks nad peavad füüsikat õppima ja õpetaja ei oska neile seda ka selgitada.

Suurendamiseks õpimotivatsiooni, kasutavad paljud õpetajad mitmesuguseid **aktiiv- ja konstruktiivõppe meetodeid**, kuna traditsiooniline õpetamine olevat ennast ammendanud. Kuigi on ka vastupidiseid arvamusi, näiteks Suurbritannia haridusametkondade juhid näevad väljapääsu kujunenud olukorrast, mis ei puuduta ainult füüsikat, just tagasipöördumises vanade traditsiooniliste õppemeetodite juurde (Õpetajate Leht 26.03.1999. K. Trasberg, Uued koolireeglid Suurbritannias).

Eesti füüsikaõpetajad on üldiselt veendunud, et ainet nad valdavad hästi ning on vaja ainult omandada mingi uus salapärane õppemeetod, mis lahendaks kõik raskused. Miks ma nii võin väita? Sest TÜ Avatud Ülikoolis õpetajatele pakutavatest kursustest võetakse osa peamiselt neist, mis puudutavad õpetamise meetodikat. Erialaseid oskusi süvendavatest kursustest reeglina loobutakse.

Õpimotivatsiooni tõstmiseks ja tulemuste parandamiseks kasutatakse füüsikas näiteks probleemõpet, kriitilist mõtlemist, mudelikeskset õpet, avastusõpet, "Käed külge!" õpet, "Näita, ära räägi!" õpet jt. Kõik need õppemeetodid aitavad õpilasel paremini mõista ja omandada füüsika seadusi ja nende rakendamist praktikas. Nende lähenemiste lõppeesmärk on aga enamasti ühesugune: jõuda valemieni, mis kirjeldab füüsikaseadust. Sellist käsitlust põhjustab fakt, et suur osa füüsikuid ja füüsikaõpetajaid peab arvutamist ja valemite kasutamist "tõeliseks" füüsikaks, uskudes, et kui õpilane suudab lahendada arvutusülesandeid, siis on ta probleemist lõplikult aru saanud. Paraku väga sageli see nii ei ole. Õigem oleks öelda, et õpilane on omandanud **valemitega manipuleerimise oskuse**, aga mitte nähtuse füüsikalise sisu.

Suur osa õpetajaid õpetab oma ainet nii nagu talle õpetati. Teiste sõnadega: füüsikaõpetajad kasutavad samu vahendeid, mida tema õpetamisel kasutati. Vanemate õpetajate õpetamise ajal oli aga peamiseks eesmärgiks uute füüsikute ettevalmistamine. Kuid sellist õpetamist pole enam vaja. Nüüdisühiskonnale piisab vähestest füüsikuist, aga on tarvis palju loodusteaduslikult taiplikke inimesi.

Meie püstitatud hüpoteesi järgi seisneb võõrandumise oluline põhjus **mõtlemisviisis**, mida Eesti koolifüüsika kujundab. Praegune füüsikaõpe Eesti koolis vastab teadusliku mõtlemise teisele faasile, kus kasutatakse füüsikaseadusi põhiliselt nende kvantitatiivsel, rangelt matemaatilisel kujul. Sellise õpetamise eesmärgiks on kujundada õpilastel **täppisteaduslik mõtlemisviis**. Paraku on selline mõtlemine enamikule õpilastele arusaamatu ning raskesti mõistetav, sest reeglina jäetakse vahele teadusliku mõtlemise esimene faas, mis tugineb katsetele, näidetele, analoogiatele ja kvalitatiivsetele seostele. Teadusliku mõtlemise korral on selle faasi läbimine aga tingimata tarvilik. Kvalitatiivse faasi olulisust füüsikaõppes on rõhutanud ka tunnustatud füüsikadidaktikud nagu USA professor **A. Arons** ja Soome professor **K. Kurki-Suonio**.

Aronsi üks teese on "Enne mõiste, siis termin!" Äraseletatult tähendab see, et uute mõistete sissetoomist ei tohi alustada definitsioonist. Algul tuleb katsete, näidete, rakendustega luua uuest mõistest ettekujutus ja lõpetada käsitlus mõiste ja seda kirjeldavate ühikute defineerimisega.

Kurki – Suoniole kuulub lause: "Kes ei oska füüsikat õpetada ilma valemiteta, ei oska üldse füüsikat õpetada!" See ei tähenda valemite eitamist, kuid rõhutab seoste olemusliku mõistmise eelistamist formaalsetele matemaatilistele avaldistele.

Füüsikaseaduste tundmist ja kasutamist kvalitatiivsel, ilma valemiteta tasemel nõuab näiteks **USA haridusstandardi** baasil töötav **Everyday Learning Corporation** oma keskkooli loodusteadusi käsitlevas kursuses. Eelnimetatud kursuse õppe-eesmärkide kohaselt peab õpilane näiteks teadma, et gravitatsioonijõud on tõmbejõud kahe teatud massiga keha vahel, kusjuures jõu suurus on võrdeline massidega ning väheneb kiiresti kehadevahelise kauguse suurenedes. Kuid gravitatsiooniseaduse valemit ei pea teadma.

Käesolev kursus ongi pühendatud füüsika kvalitatiivsele küljele ja sellega kujundatavale mõtlemisviisile, mida meie nimetame **loodusteaduslikuks mõtlemisviisiks (LTMV)**.

Kursuse konkreetseks eesmärgiks on anda ülevaade loodusteaduslikust mõtlemisviisist ja selle kasutamisevõimalustest füüsika õpetamisel nii põhikoolis kui gümnaasiumis. **Kaudsem eesmärk** on edaspidi muuta koolifüüsikas normiks loodusteaduslik mõtlemisviis praegu valitseva täppisteadusliku asemel.

Käesolevas konspektis pole toodud süstemaatilist füüsikakursust, vaid on näidatud põhiliste koolifüüsika temade korral, kuidas võiks nende käsitlemist läbi viia **gümnaasiumis** lähtudes LTMV printsiipidest. Sellepärast pole pööratud suurt tähelepanu valemitele ja ühikutele, sest neid leiab igast füüsika õpikust. Ei ole ka kõiki mõisteid seletatud, sest materjali esitus eeldab õppijalt füüsikateadmisi vähemalt kursuse *LOFY.01.091 Füüsikaline maailmapilt* tasemel.

Konspekti teoreetilise osa aluseks on suuresti H. Voolaiu hoitud ETF grandil *Eesti kooliõpilase loodusteadusliku mõtlemisviisi kujundamine füüsika ulatuslikumal seostamisel teiste loodusainetega* tulemused.

Täiendavat materjali, eriti praktilise õppetöö jaoks leiab Eesti füüsika portaalist: www.fyysika.ee/opik/

NB! Osa teksti on esitatud sinises kirjas. See on täiendav materjal, mille omandatust eksamil ei kontrollita.

1. Teoreetilised alused

2. Mõtlemisviisid

Mõtlemisviise võib piiritleda eelkõige indiviidi tegutsemismotiivide või eesmärkide põhjal, laskumata mõtlemispsühholoogia üksikasjadesse. Siin ja edaspidi mõistame **mõtlemisviisi** all indiviidile omast info töötlemise meetodit ning **meetodi** all korrastatud tegevust mingi eesmärgi saavutamiseks. Mõtlemisviise võib jaotada kolmeks: **teaduslik, mütoloogiline ja pragmaatiline**². Loomulikult ei esine ükski mõtlemisviis tegelikkuses puhtal kujul ja reaalseste õpilaste mõtlemisviis on enamasti eklektiline segu neist kolmest.

Teaduslikku mõtlemisviisi on defineeritud mitmeti ja ühest definitsiooni pole õnnestunud leida. Mudelikeskse füüsikaõppe pooldajad väidavad, et teaduslik mõtlemine on mentaalsete mudelite konstrueerimine ja kasutamine. Mentaalne mudel on tegelikkust peegeldav konstrukt meie teadvuses, mis sisaldab nii kvalitatiivset kui kvantitatiivset komponenti. Teiste autorite järgi on teaduslik mõtlemine üks arutluse ehk argumentatsiooni liik, kus argumentidena kasutatakse teaduslikke kirjeldusi, seletusi ja ennustusi.

Meie nimetame teaduslikuks mõtlemisviisi, mille korral *info töötlemine tugineb teaduse meetodile eesmärgiga luua põhjuslike seoste süsteem*. Seda süsteemi rakendatakse loodusnähtuste seletamisel ja uute teadmiste saamisel. Teaduse meetodi olulisteks tunnusteks on: eelnevast kogemusest lähtuv küsimuse püstitus (probleem), võimalik vastusevariant (hüpotees), hüpoteesi eksperimentaalne, vaatluslik, vms. kontroll ja järelduse tegemine hüpoteesi õigsuse kohta. Teaduslik mõtlemisviis eeldab **looduse** kirjeldamise, seletamise ja ennustamise võimalikkust teatava piirini ja katsetele tugineva põhjendatud usu tekkimist looduseaduste vääraratusse. Teaduslikule mõtlemisviisile on omane teadmine, et loodusnähtusi pole põhimõtteliselt võimalik lõpuni mõista.

Mütoloogilise mõtlemisviisi korral *tugineb info töötlemine eksperimentaalselt (teaduslikult) põhjendamata usule eesmärgiga luua seoste süsteem, mille elemendid ei pea olema põhjuslikult seotud*. Seda süsteemi rakendatakse uute teadmiste saamisel. Mütoloogilise mõtlemisviisi kohaselt võib sündmuste käik maailmas alluda mingitele kõrgematele jõududele. Infot selle kohta võib saada nende jõududega suhtlevatelt autoriteetidelt, kaasa arvatud meediumid, astroloogid ja imearstid. Mütoloogiline mõtlemisviis on sageli inimkeskem ja emotsionaalsem kui teaduslik. Sellega on seletatav ka tema laialdane levik teadusega mitte kokku puutuvate inimeste hulgas. See mõtteviis lubab loodust kirjeldada, seletada ja ennustada, kuid tõestusvahendiks pole eksperiment, vaid põhjendamata usk. Mütoloogilise mõtteviisi korral on võimalik jõuda nähtuste lõplike algpõhjusteni, st. **Loojani**.

² H. Voolaid, K. Tarkpea, O. Krikmann, A. Luik, E. Pärtel, J. Susi, M. Seeba, U. Tamm, K. Timpmann, E. Ööpik. *Loodusteaduslik mõtlemisviis koolifüüsikas*. EFS aastaraamat 1999, 99 – 108, Tartu, 2000

Pragmaatilise mõtlemisviisi korral *toimub info töötlemine vaid indiviidi isikliku heaolu tagamise nimel, seadmata eesmärgiks ulatuslikemate põhjuslike seoste otsimist*. Piltlikult öeldes huvitab pragmaatikut vaid see, milliste aktsiate hind lähiajal tõuseb. Ta ei tunne huvi põhjuste vastu, mis tingivad ühtede aktsiate hinna tõusu ja teiste hinna langemist. Pragmaatilise mõtlemisviisi kohaselt on süvaseoste otsimine kasutu ajaraiskamine ("... oskate küll seda füüsikat või keemiat, aga palka saate ikkagi vähe"). Pragmaatiline mõtlemisviis ei tegele teadmiste süsteemi loomisega, vaid keskendub taktikalistele eesmärkidele ja peab üldiste, sealhulgas looduse seaduspärasustega tegelemist kasutuks.

3. Teaduslik mõtlemisviis

Piirdume oma arutlustes ainult **loodusteadustes** kasutatava mõtlemisviisiga. Loodusteadustes kasutatavat mõtlemisviisi võib jagada kaheks: täppisteaduslikuks ja loodusteaduslikuks³.

Loodusteaduslik mõtlemisviis (LTMV) on teadusliku mõtlemisviisi liik, mille korral argumentatsiooniks kasutatakse peamiselt eksperimentaalse päritoluga **kvalitatiivseid** (sõnalisi) kirjeldusi, seletusi ja ennustusi. Teoreetilised konstruktsioonid on vaid fenomenoloogilised, nähtuste kirjeldamisele tuginevad.

Täppisteaduslik mõtlemisviis (TTMV) on teadusliku mõtlemisviisi liik, mille korral argumentatsiooniks kasutatakse peamiselt matemaatikale ja loogikale tuginevaid (teoreetilisi) **kvantitatiivseid** (valemi või võrrandina esitatavaid) kirjeldusi, seletusi ja ennustusi. Teoreetilised konstruktsioonid võivad olla **aksiomaatilised-deduktiivsed**.

Lihtsustatult öeldes on LTMV looduse seletamine ilma valemitega, TTMV aga valemitega.

Esitatud määratlused võivad pealiskaudsel vaatlusel tunduda eksperimendi ja teooria vastandamisena. Tegelikult siin mingit vastandlikkust ei ole. Loodusteadustes ja ka nende õpetamisel kasutatakse pidevalt mõlemat lähenemisviisi, kusjuures LTMV rakendamine on iseloomulik uuritava nähtusega tutvumise algetapil. Kõrgemal tasemel suureneb üha TTMV osa. Kui aga nähtuste seletamisel on **formaliseerimine** (mudelite rakendamine) toimunud liiga kiiresti ja valemite kasutatakse enne nende mõtte tavakeeles teadvustamist, siis tekivad materjali mõistmisel probleemid, mis olulisel määral pärsivad õpimotivatsiooni ja kahandavad õppeprotsessi efektiivsust.

3.1. Täppisteaduslik mõtlemisviis

TTMV kujundab õppuris veendumuse, et täppis- või tehnikateadustes on kõik täpne. Kui midagi on vaja määrata, tuleb leida valem, mis kindlasti on olemas, panna sellesse lähteandmed, mis samuti kusagil leiduvad ja kui arvutamisel viga ei teki, siis tulemus on õige ning vaidlustamisele ei kuulu. Paraku praktika näitab muud, sest valemid on tuletatud ideaalsete objektide jaoks, aga neid rakendatakse reaalsele objektidele. Ja see vähendab oluliselt usku täppisteaduslikku meetodisse.

TTMV kujundamine on olnud eesmärgiks ka Eesti koolifüüsikale. Sellest annavad tunnistust põhikooli ja gümnaasiumi füüsikakursustes esitatavad nõuded õpitulemuste

³ Viimane termin on meie poolt kasutusele võetud 1999.a. ja ei pruugi olla üldtunnustatud.

kohta. Põhikooli 53-st seosest nõutakse 21 teadmist matemaatilisel kujul ja gümnaasiumis 73-st seosest 63-l juhul (2012.a. andmed).

Sarnaseid eesmärke püstitavad ka mõnede teiste maade koolifüüsika standardid, näiteks Põhja-Iirimaa, Šotimaa, Walesi, Kanada.

3.2. Loodusteaduslik mõtlemisviis

LTMV kasutab uute nähtuste seletamiseks palju katseid ja analoogiaid juba tuntud nähtustega ning piltlikke kujundeid. Kasutatakse ka teadmisi, st. teadmisi, mida ei osata täpselt sõnastada, kuid millest tegevuses juhindutakse. LTMV võib vaadelda kui TTMV eelastet. On kindlaks tehtud, et kvalitatiivsed, kujundlikud mudelid, mis eelnevad kvantitatiivsetele, matemaatilistele mudelitele, soodustavad nähtustest arusaamist. Ka füüsikast tõsiselt huvitatud õpilased, kes tahavad ja suudavad jõuda TTMV-ni, vajavad samuti lihtsat ettekujutust nähtustest, mehaanilist piltlikku mudelit, mille alusel kujundada abstraktsemaid mudeleid.

LTMV füüsikas oleme mõnikord nimetanud ka valemite füüsikaks. See ei tähenda, et LTMV oleks põhimõtteliselt valemite vaenulik. Vastupidi, seoste meeldejätmisel on valemid väga ratsionaalsed. Aga valemi "väliskuju" mäletamine pole piisav, kui sellega ei kaasne suutlikkus sõnastada valemi mõtet emakeeles. Valemi pole tegelikkuse peegeldus, vaid kasutatava mudeli matemaatiline kirjeldus. Seega võib öelda, et LTMV ei ole mitte valemite vastu, vaid arvamuse vastu nagu füüsikas oleks valemid ja nende teisendamine kõige tähtsam.

LTMV ei seisne aga siiski mitte ainult kvalitatiivse käsitluse eelistamises kvantitatiivsele. LTMV rõhutab ka füüsikas kasutatavate suuruste ja mõistete kokkuleppelisust, looduse lõpliku seletamise võimatuse tunnetamist, eksperimendi eelistamist teooriale, induktiivse käsitluse eelistamist deduktiivsele, jne. LTMV kasutab samuti kui TTMV-gi ideaalsete objektide korral leitud seaduspärasusi reaalsete nähtuste kirjeldamiseks ja seletamiseks. Aga nüüd me teadvustame endale oma arvutuste või järelduste ligikaudsust.

LTMV kujundamine on näiteks USA koolihariduses eesmärgiks, kuigi seal seda nii ei sõnastata, kuid füüsikale esitatavad nõuded on suures osas kvalitatiivsed ja sisaldavad vaid paari valemi kasutamisoskust.

4. Loodusteadusliku mõtlemisviisi kujundamine

LTMV kujundamine peaks algama sellest, et inimene võtaks omaks, et loodus ja loodusteadused on kaks ise asja. Kõik loodusteadused on inimlooming, mis on tehtud inimeste poolt ja nende jaoks. See on inimtegevuse tulemus, mis vastab inimese küsimustele looduse kohta.

Mis on **loodus**?

Loodus on objektiivne reaalsus, mis eksisteerib väljaspool teadvust ja sellest sõltumatult. Mis on aga objektiivne reaalsus? See on sama, mis **mateeria**. Teadvus ei kuulu loodusesse, aga inimene? Inimene kui bioloogiline objekt kuulub, samuti ka nn noosfäär, so. valdkond, mille inimene on oma tegevusega tekitanud: ehitised, rajatised (kaevandus, kanal, raudtee), seadmed, tehismaterjalid, keemilised tehiselemendid, kosmoseaparaadid, saasteained jne. Kuid muu inimtegevusega seotu, nagu poliitika, kunst, sõjandus, religioon, psüühika, sotsiaalsed protsessid, jne. ei kuulu loodusesse.

Millest loodus koosneb? Nagu eespool öeldud on loodus sama, mis mateeriagi. Mateeria põhivormid on aga **aine** ja **väli**. Aine on see, millest kõik kehad koosnevad. Väli on see, mille abil üks keha teist mõjutab. Et mõju saab avalduda ainult siis kui on rohkem kui üks keha, siis kasutataksegi mõistet **vastastikmõju**. Mateeria

põhiomaduseks on liikumine ehk muutumine. Siia kuulub nii mehaaniline liikumine (asukoha muutus ruumis ja ajas) kui ka keemilised reaktsioonid, rakkude teke ja surm, elusorganismide evolutsioon, jne.

Kuidas loodus toimib?

Loodus toimib vastavalt **loodusseadustele**. Loodusseadusi uurivad **loodusteadused** : füüsika, keemia, bioloogia, geograafia (geoloogia) ja nende kombinatsioonid, näiteks biofüüsika, geokeemias, jne.

Eluta looduse seaduste väljaselgitamine ja inimesele arusaadavasse keelde "tõlkimine" ongi füüsika ülesanne. Tihti kasutatakse tõlkimiseks matemaatika abi.

Kuidas saadakse teada loodusseadusi ?

Selleks kasutab iga loodusteadus talle omaseid uurimismeetodeid, kuid kõik need taanduvad ühele meetodile – **teaduse meetodile**, mille aluseks on katse. Katse on küsimus loodusele. Looduse vastusest arusaamiseks tuleb püstitada **hüpotees** ehk varasemale teadmisele tuginev oletus võimalikust looduse vastusest (katse tulemusest). Katse kas kinnitab hüpoteesi või lükkab selle ümber. Saadud tulemus lubab teha parandusi hüpoteesi kohta ja jätkata uurimist.

Füüsika kasutab loodusnähtuste seletamisel alati **mudeleid** - ligilähedasi koopiaid originaalist, kus on säilitatud kõik olulised tunnused ja ebaolulised kõrvale jäetud. Oluliste tunnuste väljaselgitamine on küllalt keeruline. Mida lugeda oluliseks tunnuseks? Seda, mis on omane kõigile samasse liiki kuuluvatele nähtustele ja mida on võimalikult lihtne mõõta.

Füüsikateadus ei anna nähtusele seletust, ta **kirjeldab** nähtust. Füüsika kirjeldab mingi ettevõtetud mudeli raamides, kuidas loodus töötab. Kõik füüsika valemid käivad mudelite kohta, mitte looduse kohta.

Mudeli kehtivust kontrollitakse katsetega ja seda täiendatakse seni, kuni mõõtmisvigade piires lähevad mudelist tulenevad ennustused kokku katsetulemustega. See lubab välistada kõik väärtõlgendused, aga ei luba jõuda absoluutse tõeni. Ikka jääb midagi saladuseks. Inimene ei ole kunagi suuteline lõpuni mõistma looduse funktsioneerimist. Kuid see ei takista selle poole püüdlemist ja saadud tulemuste kasutamist oma elu korraldamiseks.

Füüsika, mida mõnedes käsitlustes loodusteaduseks ei peetagi, on loodusteadusliku ja täppisteadusliku mõtlemisviisi vahekorra kujundamisel erilises seisundis. Mis mõttes? Selles mõttes, et füüsikas saab kasutada täies ilus nii kvalitatiivset kui kvantitatiivset käsitlust.

Füüsikaõppes (nii üldharidus- kui ülikoolis) pühendatakse kvalitatiivsetele seletustele ja ülesannetele vähe tähelepanu või jäetakse need üldse ära. Põhjusi on vähemalt kaks. Esiteks napib alati aega, sest programmid on suured. Teiseks pole õpetajad ise sellist õpet saanud ja ei oskagi probleeme ilma valemiteta lahendada.

Paraku osutub üleminek täppisteaduslikule käsitlusele ilma loodusteadusliku etapi läbimiseta suuremale osale õpilastest üle jõu käivaks ja **põhjustab loobumist teaduslikust mõtlemisviisist üldse**. Meie poolt läbi viidud uurimuse tulemuste kohaselt pooldab vaid ca 15 % õpilastest füüsikaprobleemi formaliseerimist (esitamist valemite keeles). Need on õpilased, kelle jaoks täppisteaduslik lähenemine on loomulik. Ülejäänud õpilased piirdusid aga meeeldi LTMV stiilis kvalitatiivkäsitlusega.

Enamasti soovib õpilane, et probleem (füüsikaülesanne) esitataks talle juba formaliseeritud kujul. See soov avaldub õpilaste suust korduvalt kuulnud küsimuses "Millise valemiga ma seda ülesannet pean lahendama?". Aga tunnistagem, et kui ülesande lahendamiseks on jõutud valemite kirjapanekuni, on füüsika praktiliselt lõppenud ning edasine on suures osas juba matemaatika. Sageli leiab õpilane puhtjuhuslikult "õige" valemi ning jõuab "õige" vastuseni, suutmata põhjendada, miks ta just seda valemit rakendas.

Ei tohi unustada, et füüsika on fundamentaalteadus, mille tulemusi kasutavad teised loodusteadused. Mida abstraktsemal ja formaliseeritumal kujul need tulemused esitatakse, seda raskem on neid rakendada vähem täppisteaduslikus valdkonnas. Loodusteaduste õpetamisel on ülemaailmselt prioriteetseks arengusuunaks üha tihedam integratsioon. Füüsika jõukohasus teiste loodusteadustega tegelejatele (või "sobivus" teiste loodusteaduste tasemega) on selle integratsiooni edukuse jaoks esmajärgulise tähtsusega. Ka see näitab loodusteadusliku mõtlemisviisi kujundamise tähtsust füüsika õpetamisel.

LTMV vajalikkus tuleneb ka asjaolust, et õpilaste matemaatika-alaste oskustega pole kaugeltki kõik korras. Seda näitavad kujukalt matemaatika riigieksami tulemused. Õpilased ei tohiks ju füüsika mõistmisest ilma jääda põhjusel, et füüsikas on kõik matematiseeritud. Kui aga matemaatiline formuleering lisada füüsikanähtuse seletusele alles siis, kui piltlik ettekujutus nähtusest on juba olemas, peaksid õpilased paremini mõistma ka matemaatika rolli tegelikkuse kvantitatiivsel kirjeldamisel.

Loodusteaduslikku mõtlemisviisi võiks nimetada ka **kujundlikuks lähenemiseks** füüsikaprobleemidele. Abstraktne ja meeltega vahetult mitte tajutav nähtus seostatakse millegi käegakatsutavaga, näiteks elektrivool veevooluga, elektromagnetvõnkumine pendli võnkumisega või valguslaine veepinnal leviva lainega. Kui TTMV püüab jõuda uuritavat nähtust kirjeldava valemuni, siis LTMV põhieesmärgiks on mõttekujundi (konstrukti) loomine uuritavast nähtusest. LTMV **ei välista** valemite kasutamist füüsikaõppes (mida oponendid meile sageli ette on heitnud). Valemi on aga kohane alles siis, kui nähtuse olemus on n-ö. "näppude abil" selgeks tehtud. Füüsikaõppe eesmärgiks ei tohi olla valemitega manipuleerimise oskuste omandamine, vaid maailma fundamentaalsete seaduspärasuste mõistmine. Tuleb teadvustada, et valem pole tegelikkuse peegeldus, vaid kasutatava mudeli matemaatiline kirjeldus. Valemi võib küll mudelit täpselt kirjeldada, kuid mudel ise ei pruugi olla adekvaatses vastavuses tegelikkusega. Füüsika-alaste teadmiste sügavust näitab aga eelkõige suutlikkus hinnata mudelite rakendatavuspiire.

Selgitamaks, kui palju ja milliseid füüsikateadmisi ning oskusi kasutavad teised Eesti koolis õpetatavad loodusained, analüüsisime 2008.a. bioloogia, geograafia ja keemia riiklikke ainekavasid ja neile vastavaid õpikuid.

Tegime kindlaks õpikuis kasutatavad **mõisted, seadused ja rakendused**, mis on seotud otseselt või kaudselt füüsikaga. Bioloogias leidsime neid 111, geograafias 78 ja keemias 72. Nendest ainult keemiakursuses kasutati üht füüsikast teadaolevat valemit ($\rho = m / V$). Ülejäänud juhtudel kasutati kvalitatiivseid seoseid suuruste vahel või fenomenoloogilisi ettekujutusi füüsikalise suuruse või mõiste kohta.

Ehk kasutades eelpool sissetoodud terminoloogiat võib öelda: **füüsikatunnis õpetatakse TTMV-d, aga mujal läheb vaja LTMV-d.**

Kokkuvõtteks võib öelda, et enne kui hakata füüsikas valemite kasutamist, peame nähtusest aru saama: mõistma, mis toimub ja kuidas toimub.

Järgnevalt vaatleme, kuidas on võimalik koolifüüsikat õpetada LTMV alusel.

Kirjandus

1. H. Voolaid, K. Tarkpea, O. Krikmann, A. Luik, E. Pärtel, J. Susi, M. Seeba, U. Tamm, K. Timpmann, E. Ööpik. *Loodusteaduslik mõtlemisviis koolifüüsikas*. EFS aastaraamat 1999, 99 – 108, Tartu, 2000
2. A. B. Arons. *A Guid to Introductory Physics Teaching*. John Wiley & Sons, New York, 1990.
3. H. Voolaid. *Koolifüüsika võõrandumine*. Haridus nr. 4, 22 – 26, 2001

II. Praktilised rakendused

5. Mõõtmine ja mõõtemääramatus

Mõõtmine

Mõõtmine on füüsikalise suuruse väärtuse kindlakstegemine mõõdetava suuruse ja teise, ühikuks võetud samaliigilise suuruse suhtena (arvväärtusena). Mõõtetulemus on saadud arvväärtuse ja mõõtühiku korrutis.

Teiste sõnadega: mõõtmisel teeme kindlaks, mitu korda suurem või väiksem on antud suurus mõõtühikust.

Mõõtmisi jaotatakse kaheks liigiks: otsemõõtmine ja kaudmõõtmine.

Otsemõõtmise korral saadakse tulemus vahetult mõõteriista skaalalt. Näiteks pikkuse mõõtmine mõõdulindiga või pinge mõõtmine voltmeetriga.

Kaudmõõtmise korral saadakse tulemus otsemõõdetud tulemustest arvutuste abil. Näiteks kiiruse mõõtmiseks tuleb mõõta teepikkus ja selle läbimiseks kulunud aeg ning arvutada kiirus $v = s/t$.

Mõõtemääramatus

Praktika näitab, et ühtki mõõtmist pole võimalik teha absoluutselt täpselt. Iga mõõtmisega kaasneb alati **mõõtemääramatus**. See ei tähenda, et me mõõdame valesti, vaid põhimõtteliselt pole ühtki mõõtmist võimalik teha absoluutselt täpselt.

Ebatäpsustel on kolm allikat: **mõõteriist**, **mõõtmisprotseduur** ja **mõõdetav objekt**.

Mõõteriist põhjustab määramatust, sest selle skaala jaotised pole ühtlased; osuti ja skaalakriips on lõpliku paksusega; andurid on muutlikud (vedru väsib, temperatuur mõjub); numbrilises riistas toimub näidu ümardamine; jne.

Mõõtmisprotseduur põhjustab määramatust, sest tuleb silma järgi hinnata skaalajaotise kümnendkohti; mõõtja ei arvesta parallaksi; mõõteriist on kohas, kus selle tööd segavad välised elektriväljad või vibratsioon, väline valgus, vms; kaudse mõõtmise korral kasutatavate konstantide ümardamine ($g \approx 10 \text{ m/s}^2$); jne.

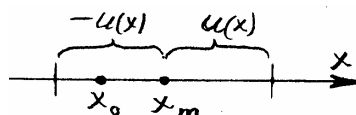
Mõõdetav objekt põhjustab määramatust sellega, et on ise muutlik: ruumala muutub soojuspaisumise tõttu; elektritakistus temperatuuri või valgustatuse tõttu; mass vee aurumise tõttu; jne.

Probleem. Määra oma pikkus ja selle määramatus.

Kuigi absoluutselt täpne mõõtmine ei ole võimalik, on võimalik alati hinnata **mõõtemääramatust**, mis määrab ära vahemiku, milles suuruse tõeline väärtus asub.

Tõeliseks väärtuseks nimetatakse kujuteldavat mõõtetulemust, mille saaksime, kui oleks võimalik mõõta absoluutselt täpselt.

Mõõdetud suuruse x mõõtemääramatust kirjeldatakse suurusega $u(x)$ (tuleneb ingliskeelsest sõnast *uncertainty*), mis määrab ära vahemiku mõõtetulemuse x_m ümber, kus tõeline väärtus x_0 asub. See jääb vahemikku $x - u(x)$ kuni $x + u(x)$. Matemaatiliselt väljendab seda võrratus: $x - u(x) < x_m < x + u(x)$.



Seda vahemikku $u(x)$ pole võimalik täpselt määrata, küll aga teatud tõenäosuse ehk **usaldatavusega** kindlaks teha.

Kui me mõõtsime näiteks suurst x ja saime mõõtmistulemuseks x_m , siis otsitava suuruse väärtus kirjutatakse üles nii $x = x_m \pm u(x)$. Kuna alati pole võimalik kindlaks teha, kas mõõtmise käigus saime tõelisest väärtusest suurema või väiksema tulemuse, siis lisatakse määramatus mõõdetud tulemusele märgiga \pm .

Määramatust $u(x)$ nimetatakse ka **absoluutseks määramatuseks**, millel on sama mõõtühik nagu suurusel x . Mõõtmise kvaliteeti näitab **suhteline määramatus**. See on suurus, mis näitab kui suure osa mõõdetud suurus moodustab absoluutne määramatus. Suhteline määramatus leitakse seosest $u\% = \frac{u(x)}{x_m} \cdot 100\%$. Mida väiksem

on suhteline määramatus, seda täpsem on olnud mõõtmine.

Mõõtemääramatuse hindamine on mõneti sarnane kadunud asja otsimisega, kusjuures selleks kadunud asjaks on mõõdetava suuruse tõeline väärtus. Oletame näiteks, et mul on kadunud garaaživõti. Siis on hea, kui ma oskan hinnata, kuhu ma võisin selle jätta. Kui mul pole üldse aimu sellest, kus võti võiks olla, siis on see sarnane olukorraga, kus puudub igasugune info mõõtmise täpsuse ehk mõõtemääramatuse kohta. Kui olen kindel, et see jäi koju, siis on see juba üks määratletud piirkond, kuigi mitte eriti täpne. Kui suudan meenutada, et võti võis jääda mu teiste pükste taskusse, mis on kodus riidekapis, siis see on juba palju täpsem hinnang võtme võimalikust asukohast. Nii on ka mõõdetud suuruse kohta võimalik anda erineva täpsusega määratlusi ehk mõõtemääramatusi.

Varem kasutati mõõtemääramatuse asemel terminit mõõteviga. Kuna see tekitas kujutlusi vigasest või valest mõõtmisest, siis püüti sellest terminist vabaneda. Kuid ka tänapäevases mõõtmismääramatuse teoorias on kasutusel termin **mõõteviga**, mis on mõõtetulemuse ja tõelise väärtuse vahe. Kuna tõeline väärtus ei ole teada, siis pole ka viga võimalik leida.

A ja B tüüpi määramatus

Mõõtmistulemuse usaldusväärsuse suurendamiseks soovitatakse võimaluse korral teha korduvaid mõõtmisi. Kui kordusmõõtmisi tehes saame kogu aeg veidi erinevaid tulemusi, siis loetakse kõige tõenäosemaks mõõtetulemuseks kõikide tulemuste aritmeetiline keskmine. Mõõtemääramatuseks võetakse sel juhul **aritmeetilise**

keskmise standardhälve $\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n(n-1)}}$, kus \bar{x} on tulemuste aritmeetiline

keskmine, x_i üksiku mõõtmise tulemus ja n mõõtmiste arv. Standardhälve on absoluutne määramatus. Standardhälbe leidmiseks on enamikel kalkulaatoritel ja arvutitel vastav funktsioon olemas.

Standardhälbe abil hinnatud määramatust nimetatakse **A tüüpi määramatuseks** $u_A(x)$, mis loetakse võrdseks standardhälbega.

Kui kordusmõõtmised annavad alati sama tulemuse, ei saa määramatust hinnata kordusmõõtmisi tehes. Sellisel juhul on tegemist nn **B-tüüpi määramatusega**, mille tähiseks on $u_B(x)$. B-tüüpi määramatus saadakse muudest allikatest pärineva info põhjal, näiteks kasutades mõõteriista tootja poolt antud mõõteriista täpsuse hinnangut ehk **riistaviga Δ** . Tungimata mõõtemääramatuse teooriasse võetakse koolifüüsikas B tüüpi määramatuseks kas pool riistaveast $\Delta/2$ või täpsemalt $\frac{\Delta}{\sqrt{3}}$.

Nii saab talitada ainult otsemõõtmiste korral.

Kaudmõõtmiste korral on B tüüpi määramatuse leidmine keerulisem ja selleks kasutatakse mitmesuguseid valemeid, milledest lihtsaimad on tuletaud nn **halvima olukorra meetodil**. Näiteks summa ja vahe korral liituvad komponentide absoluutsed määramatused, aga korrutise või jagatise korral liituvad suhtelised määramatused.

Kui ei ole vaja väga korrektset määramatuse hindamist, siis võib piirduda B tüüpi määramatuse korral ainult kõige suurema suhtelise määramatusega hinnatud otsemõõdetud suuruse määramatusega.

Mõõtemääramatuse korrektseks hindamiseks tuleb arvestada nii A kui B tüüpi määramatuse. Sellist määramatust nimetatakse **liitmääramatuseks** $u_C(x)$ (combined uncertainty). Selle väärtus leitakse ruuteeskirja järgi

$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$. Ei ole väga vale ka lihtsalt määramatused liita: $u_C = u_A + u_B$. Sel juhul saame suurema määramatuse väärtuse kui ruuteeskirja järgi talitades. Igal juhul tuleb aga märkida, kuidas on liitmääramatus leitud.

Praktilised nõuanded

- Kordusmõõtmiste tegemiseks tuleb kogu mõõtmisprotseduuri korrata, mitte mõõteriista näitu korduvalt vaadata.
- Kui on määramatuse väärtus lõplikult kindlaks tehtud, siis tuleb see ümardada.
- Arvude ümardamisel kasutatakse reeglit: numbrid 1, 2, 3 ja 4 ümardatakse alla, teised üles.
- ISO standardi kohaselt esitatakse määramatus ühe tüvenumbriga (tähendusega kohaga), ainult täppismõõtmiste korral antakse määramatus kahe tüvenumbriga.
- Tüvenumbriks, ehk tähendusega kohaks nimetatakse numbreid alates esimesest numbrist, mis erineb nullist ja lõpetades viimase usaldatava numbriga.
- Mõõtmistulemus esitatakse alati määramatuse viimase koha täpsusega.
- Määramatus kirjutatakse mõõtmistulemuse lõppu ümarsulgudesse. Näiteks, kui oleme arvutanud $\bar{x} = 32,546378 \text{ cm}^2$ ja $u_C = 0,041223 \text{ cm}^2$, siis ümardame määramatuse $u_C = 0,04 \text{ cm}^2$ ja lõpptulemuseks on $\bar{x} = 32,55(4) \text{ cm}^2$.

- Kaudmõõtmiste määramatuse hindamisel annab iga otsemõõdetud tulemus oma panuse liitmääramatusesse. Kuna liitmääramatuses liidetakse osamääramatuste ruudud, siis võib seal arvestamata jätta kõik osamääramatused, mis on vähemalt 3 korda väiksemad kui kõige suurem osamääramatus, sest need annavad lõpptulemusse umbes 10 korda väiksema panuse kui suurim liige.
- Mõnikord võivad mõned mõõtetulemused erineda oluliselt teistest. Kui ei õnnestu erinevuse põhjust välja selgitada, tuleb need tulemused tunnistada ekseteks ja andmetööstusest kõrvale jätta. Ekseks võib pidada kõiki mõõtetulemusi, mis erinevad aritmeetilise keskmisest rohkem kui $3\sigma_{\bar{x}}$ võrra. Pärast eksete väljaarvamist leitakse uus aritmeetilise keskmise ja hinnatakse määramatus uuesti.

Ülesanded

1. Kas auto kiiruse määramine spidomeetri järgi on otsene või kaudne mõõtmine?
2. Kas on suurusi, mille tõeline väärtus on teada?
3. Laua pikkuseks mõõdeti 1,82 m. Kui suur on mõõtmise absoluutne määramatus, kui suhteline määramatus on 0,5 %?
4. Mida tähendab *halvima olukorra meetod*?
5. Kui suur on joonisel oleva joonlaua riistaviga?



6. Liitmääramatuse korral tuleb arvestada nii A kui B tüüpi määramatust. Kui üks neist arvestamata jätta, kas see tõstab mõõtmistäpsust? Miks?
7. Kuidas toimida, et mõõta nihikuga paberilehe täpsus maksimaalse täpsusega?
8. Arvutus andis suhteliseks määramatuseks 0,2657 % ja $\bar{x} = 4,43980$ Pa. Esitage tulemus koos määramatusega.
9. Mitu tüvenumbrit on arvudes: 20600; 20600,00; $20,6 \cdot 10^2$; $195 \approx 200$.

Tarkusi

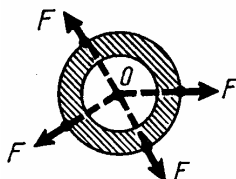
- Mõõtmisega teeme kindlaks, mitu korda erineb mõõdetav suurus mõõtühikust.
- Otsemõõtmisel saadakse tulemus mõõteriistalt, kaudmõõtmise korral saadakse tulemus otsemõõdetud tulemustest arvutamise teel.
- Mõõtemääramatus määrab ära vahemiku, milles suuruse tõeline väärtus asub.
- Mõõtemääramatusel on kolm allikat: mõõteriist, mõõtmisprotseduur ja mõõdetav objekt.
- A tüüpi määramatus kirjeldab ainult kordusmõõtmisi ja on võrdne standardhälbega
- B tüüpi määramatuse määrab riistaviga.
- Liitmääramatus summeerib nii A kui B tüüpi määramatused kas ruuteskirja järgi või otseselt.

6. Kulgemine

Kulgemist kirjeldavad mõisted ja suurused

Kulgemine ehk kulgliikumine ehk translatsioon on **jäiga keha** liikumine, mille korral kõikide keha punktide **trajektoorid** on ühe kujuga ja ühepikkused. Iga kaht keha punkti ühendav sirge jääb sellisel liikumisel iseendaga alati paralleelseks. Näiteks keha liikumine sirgel trajektoorigil (sirgliikumine) on kulgemine, aga kulgemine on ka helikopteri lend, kui tiivik jääb kogu aeg horisontaalseks. Kulgemise trajektoori võib olla nii sirge kui kõver. Viimasel juhul ei mõju kehale jõud mitte kiiruse sihis, vaid mingi nurga all.

Keha kulgemise kirjeldamisel kasutatakse tavaliselt **punktmassi** mõistet. Punktmass on keha mudel, millel pole mõõtmeid, kuid on reaalse keha massiga võrdne mass ja see asub reaalse keha **massikeskmes**. Massikeske on selline punkt, kuhu toetatult jääb keha tasakaalu. Keha kulgeb, kui talle mõjuva resultantjõu siht läbib massikeset. Korrapärase kehade korral langeb massikeske kokku geomeetrilise keskpunktiga. Teistel juhtudel tuleb see katseliselt leida, näiteks **riputusmeetodil**. Selleks tuleb keha nõõri abil erinevatest punktides üles riputada ja joonistada riputuspunktidest vertikaalsed sirged. Sirgete lõikepunkt annabki massikeskme asukoha. Kuid kus on rõnga massikeske? Seal pole punkti, kuhu toetatult keha jääks tasakaalu. Sellepärast on massikeskme ka teine definitsioon, mis ei sisalda *toetuspunkti* mõistet: **massikeskme**ks nimetatakse selliste jõudude mõjusirgete lõikepunkti, mis kutsuvad esile keha kulgemise (ei tekita pöörlemist).



Kui kasutatakse punktmassi, siis võib jätta arvestamata õhutakistuse, sest punktile ei jää liikumisel õhku ette. Samuti võib tihti jätta õhutakistuse arvestamata ka reaalse keha liikumisel. Miks? Sellepärast, et õhutakistus on tavaliselt väike võrreldes liikumapanevate jõududega.

Katse: raamatu ja paberilehe vaba langemine. Sile paberileht ja kägardatud langevad erineva aja.

Ka hõõrdejõude reeglina ei arvestata. Miks? Nende arvestamine teeb asja keerulisemaks, aga täpsustus on väike, eriti veerehõõrde korral.

Liikumise **kiirusest** teab iga õpilane, et kiirus $v = s/t$. Ja kui küsida, kuidas sõltub kiirus teepikkusest ja ajast, on tüüpiline vastus, et kiirus on võrdeline läbitud teepikkusega ja pöördvõrdeline ajaga. Selles on veendunud ka paljud füüsika eriala üliõpilased. Kuid sellisel juhul peaks ju kiirus kasvama läbitud teepikkuse kasvades! Ja vastupidi, kiirus peaks vähenema aja kuludes! Õige on ikka väide, et teepikkus on võrdeline liikumise ajaga ja **võrdeteguriks** on kiirus. Selline väide on muidugi õige ainult ühtlase liikumise korral.

Liikumise kirjeldamisel on kaks põhimõistet kiirus ja kiirendus. Kiirust jaotatakse keskmiseks kiiruseks ja hetkkiiruseks. **Keskmise kiiruse** korral peab rõhutama, et liikumise aja sisse tuleb arvestada ka teel tehtud peatuste aeg.

Kui keskmise kiirusega on tavaliselt vähe probleeme, siis rohkem probleeme tekib **hetkkiirusega**. Raskused algavad juba hetkkiiruse defineerimisest. See, et igal hetkel võib keha kiirusel olla erinev suund ja väärtus on üldiselt hästi ettekujutatav (autosõit

ja spidomeetri näit). Kuid kuidas määrata kiirust mingil ajahetkel? Õpilane arutleb tavaliselt järgmiselt: “Kiirus on määratud ajaühikus läbitud teepikkusega, aga hetke kestus on ju 0 sekundit. Selle ajaga keha ei nihkugi ja läbitud teepikkus on 0 m.

Kiiruseks saame $\frac{0}{0}$ m/s. Aga see on ju absurd!” Mida teha?

Peame teepikkuse määrama mingi ajavahemiku jooksul, mille kestel võib liikumist pidada ühtlaseks (kiirus ei muutu). Pidevalt muutuva kiiruse korral peab see ajavahemik olema väga-väga lühike. Seega hetkkiirus on keskmine kiirus ülilühikese ajavahemiku jooksul.

Kõike seda arutelu saab kirjutada üles matemaatiliselt:

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t}.$$

Kiirendust võib ka jagada keskmiseks kiirenduseks ja hetkkiirenduseks.

Koolifüüsikas kasutatakse vaikumisi ainult keskmise kiirenduse mõistet. Kiirenduse korral tekitab raskusi selle ühiku mõistmine: m/s^2 . Mida tähendab sekund ruudus?

Kiirendus näitab seda kui palju kiirus muutub ajaühikus, seega $\frac{m/s}{s} = \frac{m}{s^2}$. Ja seda

loetakse *meetrit sekund ruudus kohta*, mitte *meetrit ruutsekundi kohta*.

Siin me kasutasime mõistet “ajaühikus”. Selline mõiste on ka õpilastele esiti võõras.

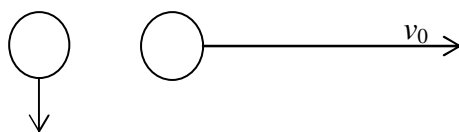
Ajaühik on 1 sekund, järelikult näitab kiirendus, kuipalju muutub kiirus 1 sekundis.

Aga miks selle leidmiseks tuleb kiirus jagada kogu kiireneva liikumise ajaga? Miks me nii saame tulemuse ühe sekundi kohta? Seda tuleb kindlasti seletada ja kasulik on tuua näide raha jagamisest. Kuidas leida, mitu eurot üks inimene saab, kui kamba peale antud raha ühtlaselt ära jagada?

Küsimus: Kas inimene tajub liikumise kiirust või kiirendust? Miks?

Ühedimensionaalset liikumist (sirgliikumist) saab kirjeldada vektorite asemel liikumissuunda või kiirust iseloomustavate + ja – märkidega.

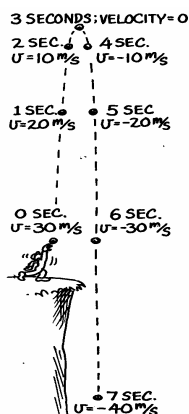
Üheks näiteks ühtlaselt kiirenevast kulgliikumisest on **vaba langemine**, milleks nimetatakse keha liikumist ainult raskusjõu toimel. Vabal langemisel kehtivad kõik kiireneva liikumise valemid, kui kiirendus a asendada vaba langemise kiirendusega g . Laialt levinud on väärarusaam, et vaba langemine toimub ainult siis, kui ülestõstetud keha lastakse vabaks. Aga kui me viskame palli õhku, siis millised jõud sellel mõjuvad? Raskusjõud, õhutakistus, õhu üleslükkejõud. Kaks viimast on tavaliselt tühised võrreldes raskusjõuga ja sellepärast võibki öelda, et kehale mõjub ainult raskusjõud ehk pall langeb vabalt. Järelikult ka **visatud keha langeb vabalt**. Sageli arvatakse, et keha langemisaeg oleneb sellest, kas keha liigub samal ajal ka horisontaalselt või ei. Seda saab kontrollida katseseadmega, kus on võimalik samaaegselt samalt kõrguselt lasta üks keha otse alla kukkuda, teisele aga anda mingi horisontaalne kiirus v_0 . Katsed näitavad, et kehade langemisajad on võrdsed.



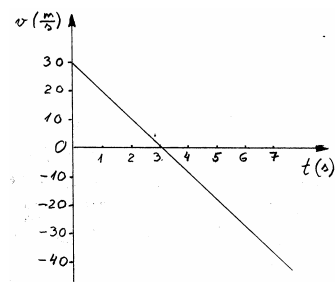
Joonisel on mõlemad kehad ühel kõrgusel maapinnast.

Kulgemise graafiline kirjeldamine

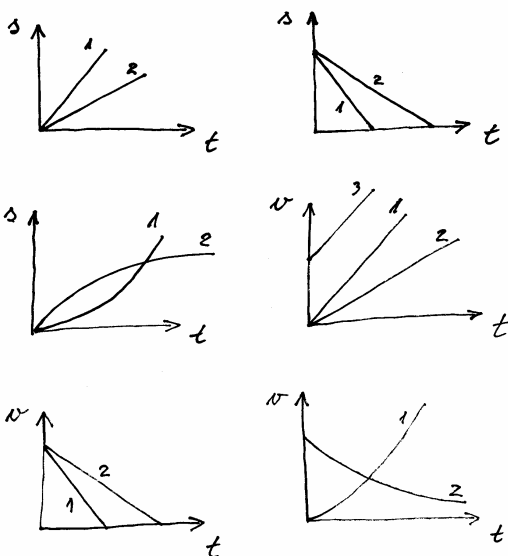
Järgneval **joonisel** on näidatud vertikaalselt üles visatud keha asendid ja kiirused iga sekundi järel. Selleks, et asendeid eristada, pole joonisel keha liikumine päris vertikaalne. Keha kiirus muutub iga sekundi vältel 10 m/s võrra. Tõustes kiirus väheneb, langedes kasvab. Põhjus on selles, et lisaks algkiirusele langeb keha ka kogu aeg vabalt maa poole. Ja kuna vaba langemise kiirendus on 10 m/s^2 , siis ühes sekundis kiirus muutubki 10 m/s võrra.



Kui seda liikumist kirjeldada graafikuga, kus vertikaalteljel on kiirus ja horisontaalteljel aeg, siis graafik näeks välja selline.



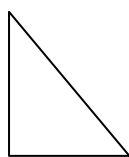
Kirjeldage järgmiste graafikute abil keha liikumist!



Koduprojekt. Ühtlase paksusega ebakorrapärase keha massikeskme leidmine riputusmeetodil. Kehaks võib olla näiteks hobuseraud, papile kleebitud Eesti kontuurkaart, vms.

Ülesanded

1. Tooge näiteid liikumistest, kus kiirus ja kiirendus on samasuunalised. Aga vastassuunalised?
2. Veeregu kuul alla kolmest nõlvakust. Millisel juhul kiirus kasvab, aga kiirendus väheneb?



A

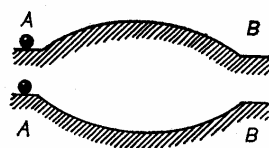


B

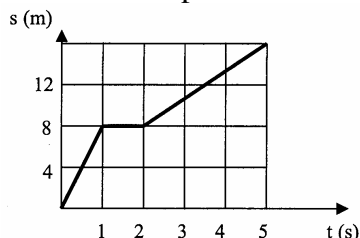


C

3. Kas on mõeldav liikumine, mille korral kiirus ei muutu, aga muutub kiirendus?
4. Auto kiirus kasvas 5 sekundiga 80 km/h kuni 90 km/h ja jalgratta kiirus sama aja jooksul 0 km/h kuni 10 km/h. Võrrelge kiirendusi. Aga kui ratta kiirus kasvab 10 sekundiga 0 km/h kuni 20 km/h?
5. Kui vabalt langeval kehal oleks spidomeeter, siis kui palju selle näit suureneb iga sekundi jooksul? Kui suur on kiirus 5. sekundi lõpuks? 10. sekundi lõpuks?
6. Kui vabalt langeval kehal oleks hodomeeter (riist läbitud vahemaa mõõtmiseks), kas siis selle näidud iga sekundi jooksul on ühesugused või erinevad?
7. Kaks kuulikest alustasid samaaegselt ja võrdsete kiirustega liikumist joonisel näidatud pindu pidi. Loeme liikumise hõrdevabaks. Kumb kuulike jõuab enne punkti B? Miks? Milline on kiiruste vahekord punktis B?



8. Antud on keha poolt läbitud teepikkuse sõltuvus ajast.



Mida näitab horisontaalne lõik graafikul?

Kui suur ole keha kiirus 1. sekundi jooksul?

Kui suur oli keha kiirus 2. – 5. sekundil?

Kui suur oli kogu liikumise keskmine kiirus?

Kas kiiruste v_1 ja v_2 keskmine võrdub keskmise kiirusega v_k ?

9. Keha massikeske asub erinevatest riputuspunktidest tõmmatud vertikaalide lõikekohas. Miks?
10. Auto läbib pool teest kiirusega 15 m/s, teise poole teest kiirusega 25 m/s. Kui suur oli auto keskmine kiirus?
11. Auto sõitis pool sõiduajast kiirusega 15 m/s ja teise poole kiirusega 25 m/s. Kui suur oli auto keskmine kiirus?
12. Kui auto saavutab kiiruse 100 km/h nelja sekundiga, kas siis 8 sekundiga saavutab kiiruse 200 km/h, sest $v = at$?

Tarkusi

- Õhutakistus on seda suurem, mida suurem on keha pindala ja kiirus.
- Hetkkiirusel on suund, keskmisel kiirusel ei ole.
- Kui läbitud vahemaa on palju suurem keha mõõtmetest, võib keha lugeda punktmassiks.
- Keha asendamisel punktmassiga asub mass massikeskmes.
- Massikeskmesse toetatud keha jääb püsivasse tasakaalu.
- Ühtlasel liikumisel on teepikkus võrdeline ajaga, võrdeteguriks on kiirus.
- Kiirus ja kiirendus ei pruugi alati olla samasuunalised.

7. Newtoni seadused

Newtoni I seaduse olemust saab demonstreerida järgmiselt. Võtame kabenupu ja paneme selle lauale lapiti. Ja nupp muudkui seisab ja seisab, sest talle mõjuvate jõudude summa on null (raskusjõud ja laua toereaktsioon on võrdsed ning vastassuunalised). Kui nuppu lükata, siis see liigub natuke ja jääb seisma, sest liikumise sihis mõjus hõõrdejõud. Kui panna nupp serviti ja lükata veerema, siis see veereb palju kaugemale kui enne libises, sest veerehõõre on väiksem kui liugehõõre. Võib järeldada, et kui hõõrdumist üldse poleks, jääkski nupp veerema. Nähtust, mis seisneb kehade liikumiskiiruse jäävuses välisjõudude puudumisel nimetatakse **inertsiks**. Jõudude puudumist reaalsuses ei esine, aga samaväärne on olukord, kui resultantjõud on võrdne nulliga.

Resultantjõud on kõikide kehale mõjuvate jõudude vektorsumma. Tihti unustatakse kehale mõjuvate jõudude korral ära kehale aluse või riputusvahendi poolt avaldatav elastsusjõud ehk **toereaktsioon**. Kui seda jõudu ei oleks, siis ei saaks ükski keha laual püsida, vaid kõik vajuksid raskusjõu toimel läbi laua.

Sageli aetakse inertsiga segamini inertsusega, aga seda ei tohi teha, sest **inerts on nähtus, aga inertsus keha omadus**.

Inertsus on kõikide kehade omadus, mis seisneb selles, et keha kiiruse muutmiseks antud suuruse võrra peab teda mõjutama mingi jõuga teatud aja jooksul. Mida suurem on see aeg, seda inertsem on keha. Inertsuse mõõduks on keha mass.

Inertsust saab demonstreerida katsega, kus raske keha ripub niidi otsas ja keha all ripub veel niit. Kui tõmmata keha all rippuvast niidist väga järsku, siis katkeb alumine niit. Kui tõmmata aeglaselt, siis katkeb ülemine niit. Sobivad ka muud katsed, näiteks liniku tõmbamine lillevaasi alt, jms.



Küsimus: Auto sõidab jääva kiirusega 72 km/h tunnis läände. Kui suur on talle mõjuv resultantjõud?

Newtoni teise seaduse demonstreerimiseks võib teha järgmise katse. Võtame kaks ühesugust vankrikest või mänguauto, millest ühel on koormus peal. Paneme autode vahele vedru või kummipalli, surume autodega vedru või palli kokku ja laseme lahti. Kergem auto veereb sama aja jooksul kaugemale. Järelikult oli tal suurem kiirendus. Kuidas me teame, et kiirendus oli suurem? Mida suurem on liikumise algkiirus, seda kaugemale keha liigub. Sellise järelduse saab teha hoota ja hooga kaugushüppe või suusahüpete põhjal. Meie katses veeres kergem auto kaugemale. Kui eeldada, et rattad veerevad mõlemal autol ühtviisi, siis pidi kergem auto saama suurema kiiruse. Kuna algul olid mõlemad autod paigal, siis selle auto kiirendus, mis saavutas suurema kiiruse pidi olema suurem.

Mõõtmised näitavad, et kiirendus on pöördvõrdeline massiga: $a \sim 1/m$.

Kui vedru või palli tugevamini kokku suruda, siis veerevad autod kaugemale, sellest järeldub, et kiirendus on seda suurem, mida suurem on mõjuv jõud. Täpsemalt $a \sim F$. Kokkuvõtvalt võib öelda, et

$$a = F/m.$$

Newtoni II seaduse kontrollimiseks kasutatakse tavaliselt suhteliselt keerulisi seadmeid, kus on hõõrdejõud viidud minimaalseks (Atwoodi masin, õhkpadjaga relsid jne). Kuid seda saab teha ka palju odavamalt. Selleks on vaja kaht oluliselt erineva massiga väikest keha, näiteks 100 g ja 1 kg kaaluvihti.

Enne katset teeme läbi arutluse ja püstitame **hüpoteesi**.

Kui meie katsekehad lasta ühesuguselt kõrguselt kukkuda, siis hakkavad nad liikuma **raskusjõu** toimel (õhu takistusjõu võib raskete ja väikeste kehade korral jätta arvestamata). Raskusjõud on suurem suurema massiga kehal. Järelikult 1 kg vihile mõjub suurem jõud ja see peaks Newtoni II seaduse kohaselt hakkama liikuma kiiremini (suurema kiirendusega). Kuid 1 kg vihil on ka suurem mass ja seega peaks see vastavalt Newtoni II seadusele hakkama liikuma aeglasemalt. Kuna raskusjõud on võrdne mg , on kukkumisel mõjuva jõu ja keha massi suhe võrdne $mg/m = g$, mis on konstantne suurus. Järelikult peaksid kehad hakkama liikuma ühesuguse kiirendusega ja samalt kõrguselt kukkudes jõudma aluseni sama aja jooksul.

Hüpotees: 100 g ja 1 kg kaaluviht jõuavad samalt kõrguselt kukkudes aluseni samaaegselt.

Katse. Kontrollime hüpoteesi katseliselt ja teeme järelduse

Kiirenduse põhjuseks on **jõud**⁴. Newtoni II seaduse abil defineeritakse ka **jõu ühik** 1 njuuton. Ühe njuutoni suurust tuleks õpilasel kindlasti teadvustada: see võrdub 100 g massiga keha raskusjõuga.

Jõud avaldub alati vastastakimõjus. Ühel kehal pole jõudu. Näiteks auto mootor ei saa rakendada oma veojõudu, kui "vastuhakkavat" keha pole olemas (pinnas jääne või

⁴ Jõud avaldub ka deformatsioonil (keha kuju või ruumala muutmine)

muidu libe). Ka sportlane ei saa demonstreerida oma jõudu ilma teiste kehadeta (tõstekang, teine maadleja).

Probleem. *Igapäevaelu kogemus ütleb, et kui kehale mõjub jääv jõud, liigub keha ühtlaselt, näiteks autosõit ühtlase gaasiga sirgel ja tasasel teel.*

Füüsika aga ütleb, et jääva jõu korral keha hakkab liikuma kiirenevalt, sest $a = F/m$. Milles on asi?

Newtoni III seadust kehade vastastikmõjust saab samuti ilmestada katsetega.

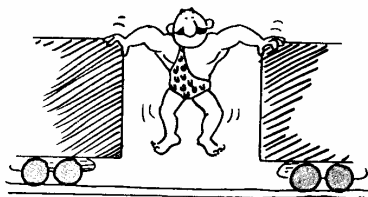
Alustada võiks sellest, et näidata oma välja sirutatud sõrmi (peopesa on allapoole) ja püüda sõrmeotsi üles tõsta. See eriti ei õnnestu. Kui aga teise käe sõrmedega sõrmeotstele suruda, siis need painduvad üles. Järelikult ühe käe lükkamise jõud tõstab teise käe sõrmeotsi üles. Kui suruda sõrmedega vastu sein, ka siis tõusevad sõrmeotsad üles. Järelikult sein lükkab meid!

Seda võib kontrollida ka nii, et minna sein äärde ja asetada varbad vastu sein. Kui nüüd lükata kätega vastu sein, tunneme, kuidas sein meid vastu lükkab.

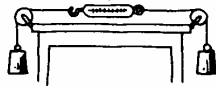
Newtoni III seadusega kirjelduvad võrdsed ja vastupidi suunatud jõud ei mõju ühele kehale ja ei **tasakaalusta** teineteist.

Ülesanded

1. Laual on linik ja sellel vaas. Kiirel tõmbel tuleb linik vaasi alt ära ja vaas jääb paigale. Aeglasel tõmbel aga hakkab vaas koos linikuga liikuma. Kuidas katseid seletada?
2. Kui inimene seisab põrandal, kas põrand mõjub mingi jõuga inimesele? Mis suunas see jõud on suunatud? Kui suur see jõud on? Miks inimene selle jõu toimele ei hakka liikuma?
3. Jõumees lükkab ühesuguseid vaguneid laiali nagu joonisel näidatud. Tema parem käsi on tugevam kui vasak. Kas selle tulemusena hakkab üks vagun kiiremini liikuma kui teine?



4. Dünamomeetri otstele on kinnitatud vihid, mis tekitavad kumbki raskusjõu 20 N. Kas dünamomeetri näit on 0 N, 20 N või 40 N?



5. Kui hobune tõmbab vankrit sama jõuga nagu vanker hobust, kuidas on siis võimalik, et hobusel õnnestub vankrit liikuma panna?
6. Kõieveo korral sikutavad võistkonnad Newtoni III seaduse järgi teineteist võrdsete, aga vastassuunaliste jõududega. Ometi üks võistkond võidab võistluse. Kuidas seda seletada?
7. Sirgel horisontaalsel teel liigub rong jääva kiirusega. Järelikult on veduri veojõud võrdne hõõrdejõuga, kui jätta õhutakistus arvestamata. Miks rong liigub, kui talle mõjuvate jõudude summa on null?
8. Miks kukuvad õunad puust maha, kui puud raputada?

Tarkusi

- Kui keha liigub, siis see "tahab" liikuda, kui keha seisab, siis see "tahab" seista.
- Mida raskem keha, seda kauem võtab aega selle liikuma panemine või seisma jätmine.
- Kui keha seisab paigal, on talle mõjuvate jõudude summa (resultantjõud) null.
- Kui keha liigub ühtlaselt ja sirgjooneliselt, on talle mõjuvate jõudude summa null.
- Kiiremini liikuv keha liigub kaugemale.
- *Kiiresti* tähendab nii *suurt kiirust* kui ka *lühikest aega*.
- Et keha kiiresti liikuma panna või seisma jätta, tuleb rakendada suurt jõudu.
- Jõud avaldub vastastikmõjus, ühel kehal pole jõudu.
- N III seaduses esinevad jõud ei tasakaalusta teineteist, sest mõjuvad erinevatele kehadele.

8. Impulss

Impulss on suurus, mida iseloomustab kõige paremini sõna "purustusvõime". Teeme **katse**, milles laseme erinevatel kuulidel kukkuda paberiga kaetud topsi. Kui erineva massiga kuulid kukuvad samalt kõrguselt, siis paber puruneb raskema kuuli korral. Selleks, et kergem kuul paberi purustaks, tuleb seda lasta kukkuda kõrgemalt, siis on ta kiirus suurem. Järelikult on purustusvõime seda suurem, mida suurem on keha mass või liikumiskiirus. Nii ongi **impulss** defineeritud kui massi ja kiiruse korrutis: $p = mv$.

Impulss on suunaga suurus, vektor. Impulsi eestikeelne nimetus on **liikumishulk**.

Probleem. *Miks kasutatakse impulsina massi ja kiiruse korrutist, aga mitte summat? Ka nende summa peaks olema seda suurem, mida suurem on mass või kiirus.*

Kui teha **katseid** kahe nööri otsas rippuva pörkuda võiva kuuliga, millel on ühesugused massid, siis on näha, et süsteemi impulss pörkel ei muutu. Kui üks kuul seisab paigal ja teda tabab teine, liikuv kuul, siis pärast pörget hakkab esimene liikuma sama kiirusega kui enne teine. Ja teine kuul jääb paigale.

Impulsi jäävust saab demonstreerida ka aurukahuriga. Vett sisaldav silinder koos korgiga on katse algul paigal, st $v = 0$, seega ka süsteemi algimpulss on võrdne nulliga. Kui silindrit kuumutada ja kuuma auru toimel kork ära lendab, siis silinder lendab korgile vastassuunas, kuid palju lähemale kui kork. Silinder lendab vähem, sest ta mass on korgi omast suurem. Impulsid on silindril ja korgil võrdsed, aga vastassuunalised. Järelikult nende summa on null nagu oli süsteemil ka enne katset.

Need katsed näitavad **impulsi jäävuse seaduse** kehtivust: **isoleeritud süsteemi** koguimpulss on muutumatu suurus.

Koguimpulss on süsteemi kuuluvate kehade impulsside vektoriaalne summa.

Isoleeritud süsteemiks nimetatakse kehade kogumit, mis on vastastikmõjus ainult omavahel. Välisjõud, näiteks hõõre aluspinnaga, puuduvad või on tühised.

Kahe rippuva kuuliga tehtud katse korral ei säilinud kummagi kuuli impulss, aga säilis impulsside summa.

Keha impulsi muutus oleneb kehale mõjuvast jõust, sest ainult jõu rakendamisel saame muuta keha kiirust ja sellega ka impulssi. Mida suurem jõud kehale mõjub, seda rohkem muutub keha impulss. Näiteks kui sa üksinda ei jõua mingit rasket kappi paigalt nihutada, siis kutsud kellegi appi lükkama ja kapp hakkab liikuma.

Impulsi muutus oleneb ka jõu mõjumise ajast: mida kauem jõud mõjub, seda rohkem muutub keha kiirus ja ka impulss. Näiteks mida kauem autot pidurdada, seda väiksemaks jääb kiirus.

Tuleb välja, et keha impulsi muut, kehale mõjuva jõu suurus ja jõu mõjumise aeg on omavahel seotud.

Teeme **mõttelise katse**. *Viskame toorest kanamuna vastu seinu, mille ees ripub tekk. Ühel korral on tekk tihedalt vastu seinu, teisel korral on ta seinast kümme sentimeetri kaugusel. Mõlemal juhul on muna algkiirus ühesugune. Kummal juhul muna pörkel puruneb? Ja miks?*

Püüame leida vastust. Mõlemal juhul oli muna algimpulss ühesugune, sest munad on võrdse massi ja kiirusega. Ka lõppimpulssid on ühesugused, sest muna jääb seisma, st impulss saab võrdseks nulliga. Seega impulsi muutused on mõlemal juhul ühesugused. Kuid esimesel viskel läks muna katki, järelikult pidi talle mõjuma suurem jõud. Erinevus kahe olukorra vahel seisneb selles, et esimesel juhul toimus kiiruse muutus järsku, väga lühikese aja jooksul. Teisel juhul kestis pidurdumine aga kauem, sest tekk oli seinast eemal, liikus koos munaga kaasa ja pidurdas muna pikkamööda. Järelikult on oluline impulsi muutumise aeg: mida lühem see on, seda suurem jõud mõjub.

Kõike seda saab kirjeldada ka matemaatiliselt, kui lähtuda Newtoni II seadusest.

$$F = ma; \quad a = \frac{v - v_0}{t};$$

$$F = m \frac{(v - v_0)}{t} = \frac{mv - mv_0}{t} = \frac{\Delta mv}{t} = \frac{\Delta p}{t}.$$

Siit saame, et impulsi muut $\Delta p = F \cdot t$, seega mida lühema aja jooksul impulss muutub, seda suurem jõud peab kehale mõjuma. Sellepärast kasutatakse löökide pehmendamiseks pakse kokkusurutavaid materjale, et pikendada impulsi muutumise aega ja seega vähendada mõjuvat jõudu.

Katse. *Kaks ülestikku asetatud palli lastakse kukkuda. Ülemine, väike pall pörkab ootamatult kõrgele. Miks?*

Impulss avaldub peamiselt **põrgetel**. Neid jaotatakse **elastseteks** ja **mitteelastseteks põrgeteks**. Elastisel pörkel kehade mehaaniline energia ei muutu teisteks energialiikideks. Mitteelastisel pörkel muundub osa või kogu mehaaniline energia teisteks energialiikideks, peamiselt soojuseks.

Probleem. *Üksteise kõrval ripuvad kokkupuutes palju ühesuguseid metallkuule. Kui üks äärmine kuul kallutatakse kõrvale ja lasta pörkuda kuulide reaga, siis põrgetel antakse impulss edasi ja tulemusena pörkub rea teisest otsast eemale üks kuul sama kiirusega nagu oli esimesel kuulil. See toimub täpselt nii ainult siis, kui pörked on absoluutselt elastsed. Aga eeldamegi sellist olukorda.*

Kui kallutame kõrvale kaks kooshoitud kuuli ja laseme need pörkuda kuulideraeaga, mis siis juhtub?

Kui kuuli mass on m ja kiirus v , siis on kuuliderivile antav algimpulss $2mv$. See võib kuulirea teises otsas realiseeruda kahel viisil: kas sealt põrkub üks kuul kiirusega $2v$ või kaks kuuli mõlemad kiirusega v .

Kumb variant realiseerub? Kas nii juhtub alati või on see juhuslik valik?

Ülesanded

1. Kuidas auto kaitseraud, mis on küllalt kerge konstruktsiooniga, kaitseb autot?
2. Kui ma panen omale telliskivi pea peale, ei juhtu midagi. Kui see aga kukub teiselt korruselt mulle pähe, on vigastused suured. Miks?
3. Ühesuguse massiga pall ja plastiliinitükk visatakse ühesuguse kiirusega vastu seinale. Pall põrkub sama kiirusega tagasi, plastiliin jääb seinale külge kinni. Kumb keha mõjus seinale suurema jõuga? Impulsi muutumise ajad loeme võrdseks.
4. Miks politsei kasutab mässajate vastu kummikuule? Arvestame, et kummikuulid ei tungi läbi riiete, vaid põrkavad kehalt tagasi.
5. Miks judoka enne matile kukkumist seda käega lööb?
6. Mürsu purustusjõud on seda suurem, mida suurem on selle mass. Kas mürsu massil on ka piiranguid?
7. Auto sõidab otse vastu seinale. Kas auto kahjustused on suuremad siis, kui auto jääb vastu seinale või siis, kui ta põrkub tagasi? Põrke ajad loeme võrdseteks.
8. Kui täispuhutud, kuid kinnisidumata õhupall lahti lasta, siis lendab see minema. Miks?
9. Püssist lastud kuul ei purusta akn klaasi kildudeks, vaid teeb sellesse augu. Kui aga visata kiviga aknasse, siis see puruneb. Miks?
10. Kas on võimalik, et kehal on impulss, aga energiat ei ole? Aga vastupidi, kui on energia, kas siis võib impulss puududa (võrduda nulliga)?
11. Füüsikas väidetakse, et süsteemi impulss on jääv suurus. Seega muutumatu massiga keha korral selle liikumisel kiirus ei tohiks muutuda. Kogemused näitavad aga, et kõik liikumapandud kehad jäävad kunagi seisma. Kas siis impulsi jäävus ikkagi ei kehti?
12. On kaks paigalseisvat kokkuseotud vankriket, mille vahel on vedru. Ilmselt on mõlema vankrikese impulss võrdne nulliga. Kui nöörläbi löigata, hakkavad vankrid liikuma. Järelikult mõlema vankrikese impulsid ei ole enam võrdsed nulliga. Kas on tegemist impulsi jäävuse rikkumisega?
13. Püss lööb tulistamisel valusalt õlga, kui püss pole surutud tihedalt õlga vastu. Miks?
14. Laskmisel saavad nii püss kui kuul ühesuguse impulsi. Kuul tapab, aga püss mitte. Miks?

Tarkusi

1. Impulssi iseloomustab purustusvõime.
2. Mida suurem on liikuva keha mass ja kiirus, seda rohkem võib keha põrkelt purustada.
3. Mida kiiremini (lühema ajaga) põrge toimub, seda suurem on mõjuv jõud.
4. Elastne põrge on õnnetuse korral alati ohtlikum kui mitteelastne.

9. Gravitatsioon

Gravitatsiooniväli

Kõik me teame, et käest lahtilastud asjad kukuvad maha, kui nad just õhust kergemad pole. Aga **miks?** Tihti vastatakse (ka õpetajad), et põhuseks on gravitatsioon. Kuid see pole ju seletus! Lihtsalt seda nähtust, et asjad maha kukuvad ehk Maa neid külge tõmbab nimetatakse gravitatsiooniks. Kuid nimetus pole seletus. Seletus peab välja tooma nähtuse põhjuse.

Gravitatsiooni termin on pärit juba Aristoteelse aegadest, mil valitsev filosoofiline vool oli *teleoloogia* ehk õpetus loodusnähtuste otstarbekusest ehk eesmärgipärasusest. Tollal arvati, et kogu maailm koosneb neljast elemendist: maa, vesi, õhk ja tuli. Rasked elemendid (maa ja vesi) tahavad jõuda Maa keskpunkti ja sellepärast liiguvad võimalusel allapoole. Seda nähtust nimetatigi *gravitatsiooniks* (lad.k. *gravis* – raske). Kerged elemendid (õhk ja tuli) tahavad aga Maast eemale lennata. Seda nähtust nimetati *levitatsiooniks* (lad.k. *levitas* - kerge).

Kehade mahakukkumise põhjus on selles, et kõikide kehade vahel mõjub nende massist tingitud vastastikmõju ehk jõud. See on oma olemuselt ainult tõmbejõud. Miks selline jõud esineb, ei teata. Igatahes on kindel, et seda jõudu vahendab üks väli, mida nimetatakse **gravitatsiooniväljaks**, kuid gravitatsioonivälja vahendajaid, gravitatsioonikvante (gravitone) pole katsetes suudetud avastada.

On kindlaks tehtud, et kõik kehad tõmbuvad üksteise poole jõuga, mis on seda suurem, mida suuremad on kehade massid ja mida lähemal nad üksteisele on. Aga see jõud on tavaliste kehade korral nii väike, et me seda ei märka. Ainult ülisuurte kehade korral nagu on Maaker, omandab see jõud märgatava väärtuse. Kuigi iga keha Maa läheduses tõmbab ka Maad enda poole, on Maa inertsus tänu oma suurele massile nii suur, et liikuma hakkab ainult kergem, Maal või selle lähedal olev keha.

On kindlaks tehtud ka **gravitatsiooniseadus**, mis ütleb, et iga kahe keha vahel mõjub tõmbejõud, mis on võrdeline kehade massidega ja pöördvõrdeline kehadevahelise kauguse ruuduga.

Nagu öeldud, on tõmbejõu põhjuseks gravitatsiooniväli. Igat välja kirjeldab mingi suurus, mis näitab välja tugevust. See on defineeritud kui jõud, mis mõjub väljaga vastastikmõjus olevale ühikulise suurusega objektile. Näiteks elektrivälja korral mõjub elektriväli elektrilaengutele ja elektrivälja tugevust kirjeldab suurus F/q , kus q on elektriväljas asuva keha elektrilaengu suurus ja F sellele mõjuv jõud. Sarnaselt on defineeritud ka **gravitatsioonivälja tugevus**, ainult nüüd on laengu asemel keha mass: F/m .

Milline on Maa gravitatsioonivälja tugevus? Sellele küsimusele on suhteliselt lihtne vastata, sest definitsioonist on näha, et kehale mõjuva jõu ja keha massi suhe ei saa olla muud kui kehale antav kiirendus (Newtoni II seadus). Seega Maa gravitatsioonivälja tugevus on võrdne raskuskiirendusega g .

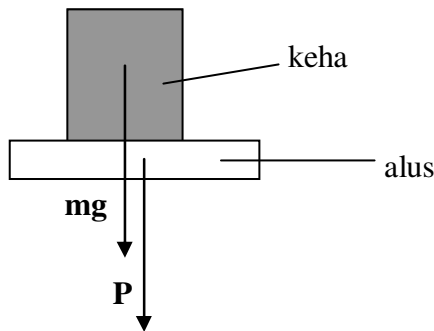
Miks gravitatsiooniväli nõrgeneb pöördvõrdeliselt kauguse ruuduga? Kõikides punktides, mis on gravitatsioonivälja allikast võrdsel kaugusel on väljatugevus ühesugune, sest siis on ühesugune ka gravitatsioonijõud. Selline punktide kogum moodustab kerapinna. Milline on väljatugevus aga siis, kui kaugus vaadeldava väljapunktini kasvab näiteks 2 korda? Siis peab väli, mis enne "mahtus" kera pinnale $4\pi r^2$, nüüd katma pinna $4\pi(2r)^2 = 4 \cdot 4\pi r^2$, ehk 4 korda suurema pinna. Järelikult jääb väli ka 4 (ehk 2 ruudus) korda nõrgemaks. See aga tähendab, et ka vastastikmõju jõud väheneb 4 korda.

Rakusjõud, kaal ja kaalutus

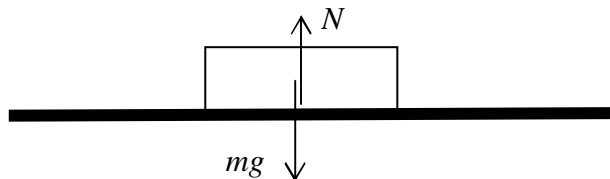
Tihti valmistavad probleeme mõisted **raskus(jõud)**, **kaal** ja **kaalutus**.

Raskusjõud on jõud, millega Maa tõmbab enda poole temal asuvaid kehi. Seda nähtust nimetatakse **gravitatsiooniks**. **Raskusjõu** suurus leitakse valemist $F = mg$.

Kaal näitab jõudu, millega keha rõhub alusele või venitab riputusvahendit. Kaalu tähis on P . Paigalseisu korral on kaal arvuliselt võrdne raskusjõuga: $P = mg$. Erinevus seisneb selles, et **raskusjõud mõjub kehale, kaal mõjutab teisi kehi**.



Nagu öeldud, on keha kaal võrdne jõuga, millega keha surub alusele või venitab riputusvahendit. Kuid see jõud on sellest, kas näiteks alus seisab paigal või liigub. Näiteks lifti startimisel ülespoole surutakse meid suurema jõuga vastu põrandat kui enne starti või siis, kui lift sõidab ühtlase kiirusega. Justkui muutuksime raskemaks. Ja kui lift hakkab alla sõitma, siis tunneme end muutuvat kergemaks. Nähtuse põhjus on selles, et paigalseisev lift peab liikuma hakates saavutama mingi kiiruse. Selleks tuleb rakendada jõudu, et anda liftile kiirendus. Kui lift hakkab liikuma üles, siis meie kaalule lisandub veel lifti ülesliikumist põhjustav jõud. Laskumise algul aga läheb lifti põrand meil "alt ära" ja surve põrandale väheneb. Seega väheneb ka kaal. Tavaliselt kirjeldatakse sellist kaalu muutumist kiirendustega. Kui keha seisab paigal või liigub ühtlaselt ja sirgjooneliselt, siis $P = mg$. Kiirendusega liikumisel $P = m(g \pm a)$, kus + märgile vastab tõusmine ja - märgile langemine. Füüsikaliselt korrektne seletus on toodud allpool.



Joonisel on näidatud kehale mõjuvad jõud: mg on jõud, millega Maa tõmbab keha ja N on jõud, millega alus mõjutab keha (toereaktsioon, elastsusjõud). Liikugu keha koos alusega kas üles või alla kiirendusega a .

Newtoni II seaduse kohaselt on resultantjõud võrdne massi ja kiirenduse korrutisega:

$mg + N = ma$, kuid kaal on võrdne vastupidise märgiga N -ga: $N = -P$. Seega

$mg - P = ma$.

Siit saame: $P = m(g - a)$.

Kaalutus. Kui keha liigub nii, et selle kiirendus $a = g$, siis just tuletatud valemist on näha, et $P = 0$, ehk keha kaal on võrdne nulliga. Kiirendus on võrdne raskuskiirendusega aga vabal langemisel. Seega vabal langemisel on keha kaal null

ehk keha on kaalutus olekus. Reaalsuses see päris nii ei ole, sest õhutakistus segab natuke vaba langemist.

Katse. Kui lasta vedru otsas rippuv kuul koos vedruga lahti, siis vedru tõmbub kokku.

Asja paremaks mõistmiseks teeme **mõttelise katse**. Hakaku keha alus liikuma alla kiirendusega 1 m/s^2 kohta. Kas keha jõuab alusele järele? Jõuab, sest keha kiirendus on $9,8 \text{ m/s}^2$. Kas tahaks ettegi jõuda? Tahaks jah, aga alus jääb jalgu ning keha hakkab seda jälle suruma. See aga tähendab, et kehal on kaal.

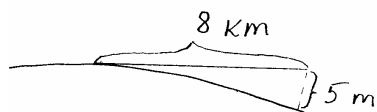
Kui alus hakkaks alla liikuma aga kiirendusega $9,8 \text{ m/s}^2$ kohta. Kas nüüd jääks alus kehale jalgu? Ei jääks, sest nad liiguvad ühesuguse kiirenduse ja ka kiirusega. Kas keha avaldab alusele survet? Ei avalda. Järelikult on nüüd keha kaal null.

Kaalutus kosmoses. Miks on kosmoselaevas kaalutus? Sageli vastatakse, et seal kesktõmbejõud ja kesktõukejõud (tsentrifugaaljõud) tasakaalustavad teineteist. See on VÄÄRARUSAAM. Kui see nii oleks, siis peaks ju vastavalt Newtoni III seadusele kosmoselaev liikuma ühtlaselt ja sirgjooneliselt, kuid tegelikult tiirleb kosmoselaev ümber Maa. Tiirlemine on tingitud kahe jõu koosmõjust: inertsitõttu liiguks laev orbiidi puutuja sihis ja gravitatsiooni tõttu langeks vabalt Maa keskpunkti poole. Nende kahe jõu koosmõjuna liigubki kosmoselaev ringjoonelisel orbiidil.

Kosmoselaevas on kaalutuse põhjuseks see, et laev koos sisustusega on vaba langemise olekus. See on saavutatud tänu suurele algkiirusele, mis ei lase laeva Maale kukkuda. Piisavaks kiiruseks on **I kosmiline kiirus** (ca 8 km/s).

Esimese kosmilise kiiruse mõistet saab seletada tornist kivi viskamise näitega. Mida suurema kiirusega kivi tornist visata (horisontaalselt), seda kaugemale see tornist kukub. Kui anda kivile selline kiirus, et see jõuab enne teha tiiru ümber Maa, kui maha kukub, läheb kivi järgmisele ringile ja hakkab tiirlema ümber Maa. Kivi kukub Maast "mööda".

Maa kumerus on selline, et iga 8 km horisontaalse nihke kohta Maa pind langeb ca 5 m . Kui keha lasta vabalt kukkuma, siis esimese sekundiga läbib see ka ca 5 m ($h = gt^2/2$). Sellest järeldub, et kui keha läbib 8 km kiiremini kui 1 sekundiga, siis ta ei jõua selle aja maha kukkuda ja hakkab tiirlema ümber Maa.



Ülesanded

1. Raskusjõud on võrdeline keha massiga. Mida suurem on keha mass, seda suurema jõuga tõmbab teda Maa oma poole. Miks aga raskem keha ei lange kiiremini kergemast?
2. Kui suurel kõrgusel maapinnast on raskusjõud nõrgenenud 4 korda?
3. Kas on võimalik kasu saada, ostes ja müües kaalukaupa erinevatel laiuskraadidel? Erinevatel pikkuskraadidel?
4. Kui Maa ja Kuu tõmbuvad, siis miks Kuu ei kuku Maale?

5. On teada, et tõususid – mõõnasid tekitab Kuu. Ka Päike tekitab neid. Kumma mõju on suurem?
6. Kas meie kaal muutub, kui me laskume sügavasse kaevandusse? Kuidas?
7. Kas meie kaal muutub, kui siseneme pilvelõhkuja vestibüüli?
8. Jahimees sihib puu oksast kinnihoidvat ahvi. Tulistamise hetkel laseb ahv puuoksast lahti ja kukub alla. Kas jahimees tabab ahvi?
9. Miks valitseb kosmosejaamas kaalutus?
10. Räägitakse, et paigalseisva keha tõstmiseks peab rakendama sellele raskusjõuga võrdse, aga ülessuunatud jõu. Kas see on korrektne väide?
11. Üks keha langes vabalt poole kauem kui teine. Võrrelda kehade poolt läbitud teepikkusi ja lõppkiirusi.
12. Kui suure jõuga mõjutab füüsikahoone temast möödujat?
13. Kui visata maja katuselt samal ajal üks pall *alla* kiirusega v_0 ja teine samasugune pall *üles* kiirusega v_0 , siis kumb kukub maapinnale suurema kiirusega?
14. Kuidas liiguks keha Maa diameetrit pidi kulgevas tunnelis? Aga piki kõõlu tehtud tunnelis?
15. Kui kahel kehal on ühesugused kiirendused, kas neil on siis ka ühesugused kiirused? Miks?

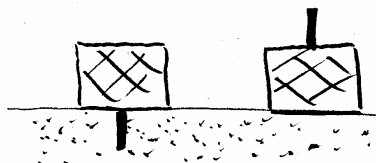
Tarkusi

- Raske keha ja kerge keha langevad vabalt ühtviisi.
- Vabalt langev keha on kaalutu (kui ei arvesta õhutakistust).
- Kiirendusega üles liikuva keha kaal suureneb, kiirendusega alla liikudes kaal väheneb.
- Keha ülesviskamise algkiirus ja allakukkumise lõppkiirused on võrdsed.
- Keha langemise aeg ei olene sellest, kas keha liigub samal ajal horisontaalselt või ei.

10. Rõhk

Kõik me teame, et suusad takistavad lumest läbivajumist sellepärast, et nad vähendavad rõhku. Samuti teame, et kui autorehvis on rõhk väike, siis rehvi vajub lössi. Aga mis see rõhk ikkagi on?

Teeme **katse**. Võtame ühe neljakandilise puitklotsi, mille ühest tahust ulatub välja peenike metallvarras. Kui asetame klotsi liivahunnikule vardaga allapoole, siis vajub varras liiva sisse. Kui asetame klotsi liivale mõnd teist tahku pidi, siis klots ei vaju liiva sisse. Miks see nii on, sest mõlemal juhul oli ju liivale mõjuv jõud ühesugune ja võrdne klotsi kaaluga?



Tavaline vastus on, et esimesel juhul on rõhk suurem. Õige! Aga mida see tähendab? Analüüsime olukorda. Kui klots toetus vardaga liivale, siis jäi vardale ette näiteks 10 liivateri. Kui aga klots oli liival terve tahuga, siis jäi tahu alla palju rohkem liivateri,

sest tahu pindala on palju suurem kui varda otsa pindala. Ilmselt klotsi kaalust piisas, et 10 liivatera kõrvale lükata ja varras liivasse vajutada. Aga kui liivateri on ees rohkem, siis klotsi kaalust selleks enam ei piisanud. Tulemus olenes sellest, kui suurele pinnale jõudu rakendati.

Selliste arutelude põhjal ongi kasutusel võetud füüsikaline ruurus **rõhk** $p = F/S$, kus F on pinnaga rist mõjuva jõu suurus ja S selle pinna pindala.

Rõhu definitsioonvalemist on näha, et valemi paremal poolel on jõud, mis on vektoriaalne suurus. Siis peaks ka vasak pool ehk rõhk olema vektoriaalne suurus. Kuid mitte ükski füüsika õpik ega muu raamat ei omista rõhule suunda. Isegi on olemas **Pascali seadus**, mis ütleb, et vedelikes ja gaasides antakse rõhk edasi igas suunas ühtviisi. Seega pole rõhul kindlat suunda.

Küsimus: *Miks rõhk ei ole vektor?*

Pascali seadus käib vedelike ja gaaside kohta. Ilmselt siis tahked kehad ei anna rõhku edasi kõikides suundades ühtviisi. Kas see ikka on ka nii?

Kontrollimiseks võime teha mõne **katse**. Näiteks puhume õhupalli täis. Me puhume õhku palli otse suust eemale, aga pall paisub igas suunas, mitte ainult puhumise suunas. Või täidame plasttopsi veega ja torkame sellesse külje pealt augu. Seal hakkab kohe vett välja jooksuma, kuigi veele mõjub raskusjõud ülevalt alla. Järelikult nii gaas kui vedelik annab rõhku edasi igas suunas.

Kontrollime, kuidas tahke keha annab rõhku edasi. Selleks teeme **mõttelise katse**.

Olgu meil silindriline klaasanum ja silindriline puitklots, mis mahub täpselt sellesse anumasse. Paneme klotsi anumasse ja lööme sellele haamriga. Mis juhtub? Puruneb ainult silindri põhi, aga mitte küljed. Järelikult tahke keha (klots) ei anna rõhku edasi kõigis suundades, vaid ainult jõu mõjumise suunas..

Miks? Põhjus on selles, et gaasides ja vedelikes liiguvad nende koostisosad (molekulid) vabalt kõikides suundades (soojusliikumine). Ja kui neile mõjutaksegi jõuga ühes kindlas suunas, siis omavahelistes põrgetes kaob see kindel suund ära ja mõju kandub edasi igas suunas. Tahketes kehtades ei saa osakesed vabalt ringi liikuda ja jõu mõjumise suunda hajutada.

Vedelik või gaas liigub alati suurema rõhuga piirkonnast väiksema rõhuga piirkonda. Näiteks selleks, et panna õhk liikuma jalgratta pumbast rattarehvi, peab rõhk pumbas olema suurem kui rehvis. See on ka mõistetav, sest rõhumisjõud on võrdeline rõhuga. Mida suurem rõhk, seda suurem rõhumisjõud ja see määrabki ära resultantjõu suuna: pumbast rehvi. Siin oleme vaikimisi eeldanud pindalade võrdsust.

On hästi teada fakt, et sügaval meres on rõhk nii suur, et sinna ilma tuukriülikonnata sukeldumine on ohtlik. Aga kuidas üldse saab määrata **rõhku vedelikus**? Ilmselt on rõhk ka seal määratud mõjuva jõu ja pindala suhtega. Kuid milline on see vee raskusjõud, mis mõjub tuukrile? Kuidas leida tuukri pindala? Need on väga keerulised ülesanded ja sellepärast on füüsikas leitud palju lihtsam moodus rõhu leidmiseks vedelikus.

Vaatame algul anumasse oleva vedeliku rõhku selle anuma põhjale. See on definitsiooni kohaselt võrdne vedeliku kaalu ja põhjapindala jagatisega. Kuid vedeliku kaalu saame asendada selle tiheduse ja ruumala korrutisega. Kuid ruumala omakorda on võrdne pindala ja anumasse oleva vedeliku sügavuse korrutisega. Saame:

$$p = \frac{mg}{S} = \frac{\rho Vg}{S} = \frac{\rho Shg}{S} = \rho gh. \text{ Järelikult on anuma põhjale avaldatava rõhu}$$

leidmiseks vaja teada vedeliku tihedust ja sügavust. Kuna sügavuse mõõtmine on

joonlaua abil lihtne, on lihtne mõõta ka rõhku anuma põhjale. Samal viisil saame leida ka rõhu vedelikus mistahes sügavusel. Ja samasuurt rõhku avaldab vedelik ühel sügavusel igas suunas, mitte ainult anuma või veekogu põhjale.

Seda saab kontrollida **katsega**. Võtame plastpudeli, teeme sellesse erinevatele kõrgustele väikesed ühesuurused augud ja kallame pudelisse vett. Näeme, et tehtud aukudest purskub vesi välja. Kusjuures alumistest aukudest pritsib vesi kaugemale kui ülemistest. **Miks?**



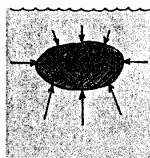
Uurime, mis juhtub vedelikus olevate kehade kaaluga.

Katse. *Vedru otsa riputatud keha, näiteks kivi sukeldatakse vette. Selle tulemusena vedru lüheneb. Kas kivi muutus kergemaks? Jah, sest kaal (riputusvahendile mõjuv jõud) vähenes.*

Kuidas nähtust seletada? Ilmselt peab vees kivile mõjuma mingi jõud, mis on suunatud ülespoole. Seda jõudu nimetatakse **üleslükkejõuks**.

Üleslükkejõudu saab ka ise lihtsalt tajuda, kui püüda näiteks tühja pange põhi ees vette suruda. Seda on raske teha, sest vesi lükkab pange ülespoole.

Kui mingi keha on vedelikus, siis avaldab see kehale rõhku igast küljest.



Rõhumisjõud keha külgedele tasakaalustavad üksteist. Aga rõhk keha alumisele, sügavamal asuvale pinnale on alati suurem kui rõhk ülemisele pinnale. Sellepärast hakkab vedelik keha ülespoole suruma. Kui keha tihedus on väiksem kui vedelikul, siis tõuseb keha pinnale ja öeldakse, et keha **ujub** vedelikus. Kui keha ja vedeliku tihedused on võrdsed, siis keha ei tõuse pinnale ega vaju põhja ning öeldakse, et keha **heljub**. Kui keha tihedus on suurem kui vedelikul, siis vajub keha põhja ja öeldakse, et keha **upub**.

Üleslükkejõud on võrdne sellise vedeliku hulga kaaluga, mis mahuks keha ruumalasse. Tihti öeldakse ka nii, et vedelikus olev keha kaotab oma kaalust nii palju, kui palju kaalub keha poolt väljatõrjutud vedelik. Järelikult, mida suurem on vedeliku tihedus ja keha ruumala, seda suurem on üleslükkejõud.

Õpilastel tekib sageli arusaamatusi terminiga *väljatõrjutud*. Kuskohast seda vedelikku välja tõrjutakse? Sellest kohast, kus asub vaadeldav keha: enne oli seal vedelik, aga nüüd on sealt keha vedeliku eemale tõrjunud. Väljatõrjutud vedeliku ruumala on võrdne keha ruumalaga.

Üleslükkejõud mõjub ka gaasides, aga kuna gaaside tihedused on palju väiksemad kui vedelike omad, siis on üleslükkejõud gaasis ka palju väiksem.

Ülesanded

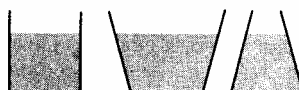
1. Miks pidi Torricelli oma katses õhurõhu kohta asetama elavhõbedaga täidetud toru lahtise otsa elavhõbedaga täidetud anumasse? Mis juhtunuks siis, kui ta

oleks asetanud toru otsapidi vette? Miks ei takista õhus ümberpööratud toru korral õhurõhk elavhõbedat välja jooksmast?

2. Jõevoolu tõkestavad tammid ehitatakse altpoolt paksemad. Miks?
3. Miks terav nuga lõikab paremini kui nüri nuga?
4. Kui teha veega täidetud anumasse samale kõrgusele kaks erineva läbimõõduga auku, siis kummast vesi kaugemale pritsib? Miks?
5. Joonisel kujutatud vett täis vagoneti parempoolse seina pindala on suurem kui vasakpoolisel. Vedeliku poolt avaldatav rõhumisjõud on seda suurem, mida suurem on pindala ($F = pS$). Järelikult paremale seinale peaks mõjuma suurem jõud ning vagonett peaks hakkama liikuma paremale. Kas arutlus on õige?



6. Missuguses asendis on järve kukkunud kirves?
7. Miks pliitsi teritatud otsaga saab paberist läbi torgata, aga teritamata otsaga ei saa?
8. Sügaval vees on alati rõhk suurem kui madalas vees. Ja on teada, et suurem rõhk tekitab suurema rõhumisjõu. Siis peaks ju kogu vesi sügavamalt merest või järvest voolama madalamasse piirkonda. Aga nii ei juhtu. Miks?
9. Kui panna tükk plastiliini vette, siis see upub. Kui vormida samast plastiliinitükist laevuke, siis see ujub. Miks?
10. Kõigis anumates on üks ja sama vedelik. Vedelikusamba kõrgused on kõigis anumates võrdsed, seega ka rõhud anumate põhjadele on võrdsed. Kuid vedeliku hulgad on anumates erinevad, seega peaks olema erinevad ka raskusjõud, mis mõjuvad põhjadele. Kuid põhjapindalad on kõikidel juhtudel ühesugused ja siis peaksid olema rõhud põhjadele erinevad. Kuidas vastuolu seletada?



11. Kas kehad kaaluvad õhus ja vaakumis ühepalju?
12. Kerge kangi otstes ripuvad täispuhutud õhupallid. Kang on tasakaalus. Kui näiteks vasakpoolne pall nõelaga läbi torgata, mis juhtub kangiga?
13. Asetame veega ääreni täidetud anumasse ükskord pliiist (Pb) keha massiga 1kg ja teine kord alumiiniumist (Al) keha samuti massiga 1kg. Kummal juhul voolab anumast rohkem vett välja? Miks?

Tarkused

1. Rõhk on seda suurem, mida väiksem on pindala, millele jõud mõjub.
2. Vedelikud ja gaasid annavad rõhku edasi igas suunas ühtviisi, tahked ained aga ainult jõu mõjumise suunas.
3. Vedelik või gaas liigub alati suurema rõhuga piirkonnast väiksema rõhuga piirkonda.
4. Rõhk vedelikus on seda suurem, mida sügavamal vaadeldav koht on.
5. Igale vedelikus või gaasis olevale kehale mõjub üleslükkejõud, mis on võrdeline keha ruumala ja vedeliku või gaasi tihedusega.

6. Kui keha tihedus on suurem kui vedeliku oma, siis keha upub, kui aga keha tihedus on väiksem, siis keha ujub.

11. Pöörlemine

Pöörlemist kirjeldavad mõisted ja suurused

Pöörlemine ehk pöörliikumine on selline liikumine, mille korral keha kõikide punktide trajektooriks on ringjooned. Nende ringjoonte keskpunktid asuvad ühel sirgel, mida nimetatakse **pöörlemisteljeks**. Pöörlemisega väga sarnane liikumine on **tiirlemine**. See on keha liikumine mööda kinnist trajektoori ehk **orbiiti** ümber mingit teise keha või antud kehast väljaspool olevat punkti või telge. Näiteks Maa pöörleb ümber oma telje, aga tiirleb ümber Päikese.

Tiirlemisel võib orbiit olla kas ringjoon, ellips või mõni muu kinnine kontuur. Koolifüüsika vaatleb ainult juhtumeid, kui orbiidiks on ringjoon.

Pöörlemist ja tiirlemist kirjeldatakse kahe aega iseloomustava suurusega: **periood** ja **sagedus**. Miks kahte suurust vaja on? Näitlikkuse tõttu.

Küsimus: *Mille sagedus on $1,15 \cdot 10^{-5}$ Hz? Aga mille periood on 24 h?*

Näiteks on raske ette kujutada, kui kaua võtab Kuul aega ühe tiiru tegemine ümber Maa, kui on teada, et selle liikumise sagedus on $0,4 \mu\text{Hz}$ või kui kiiresti ikka koolibri tiibu lehvitab, kui on teada, et ühe tiivalöögi kestus lehvitamise periood kestab 5 millisekundit. Hoopis näitlikum on, kui öeldakse, et Kuu teeb tiiru ümber Maa 28 ööpäevaga (periood) ja koolibri teeb 200 tiivalööki sekundis (sagedus).

Pöörliikumisel kasutatakse kaht kiiruse mõistet: joonkiirus ja nurkkiirus. Mõlema korral võib rääkida keskmisest ja hetkkiirusest. Koolifüüsikas piirduakse keskmiste kiirustega, kuigi seda tavaliselt ei mainita.

Joonkiirus on kiirus, millega liiguvad pöörleva või tiirleva keha punktid ringjoonelisel trajektoorigil. Joonkiirust mõõdetakse ühikuis m/s. Joonkiirus on vektoriaalne suurus ja selle suund on ringjoone puutuja suunas. Seda võib järeltada käiasädemete või poripritsmete lendamisest käiaketta või ratta küljest. Enne lahtirebenemist liikusid need osakesed ketta või ratta joonkiirusega ja pärast lahtitulekut jätkavad inertsist samas suunas.

Mida kaugemal pöörlemisteljest keha punkt asub, seda suurem on selle joonkiirus (jääva nurkkiiruse korral).

Katse täpilise kettaga: *kaugem täpp liigub kiiremini, sest peab sama ajaga läbima pikema kaare.*

Nurkkiirus on kiirus, millega muutub raadiuse pöördenurk. Nurkkiirust mõõdetakse ühikuis rad/s ja see näitab pöörlemisraadiuse poolt läbitud nurga ja selleks kulunud aja suhet.

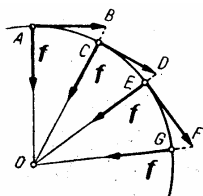
Kas nurkkiirusel on ka suund? On ikka, sest pöörlemisel on kaks võimalikku suunda: päripäeva või vastupäeva. Nurkkiiruse vektorit kujutatakse pöörlemisteljel ja selle suund on määratud kruvireeglga: kruvi pea pöördumise suunale vastab keha pöördumise suund ja kruvi liikumise suunale nurkkiiruse vektori suund.

Kas joon- ja nurkkiirus on omavahel seotud? On kindlasti: jääva nurkkiiruse korral on joonkiirus seda suurem, mida kaugemal on vaadeldav punkt pöörlemisteljest. Seose mõistmiseks tuletame meelde katset täpilise kettaga, kus teljest kaugemal asuv punkt pidi sama aja jooksul läbima pikema teepikkuse kui pöörlemisteljele lähemal olev punkt. Seda mõtet väljendab lühidalt valem $v = \omega r$, kus v on joonkiirus, ω nurkkiirus ja r pöörlemisraadius.

Aga ükski keha ei hakka ise pöörlema, teda tuleb selleks sundida ehk füüsika keeles öelduna: selleks tuleb kehale rakendada jõudu. Miks? Vastuse annab Newtoni esimene seadus, mis ütleb, et keha võib ilma välise jõu mõjuta liikuda ainult sirgjooneliselt. Järelikult kõvera trajektoori korral peab kehale mõjuma mingi väline jõud.

Katse nööri otsas keerutatava palliga. Kui nöör lahti lasta, siis lendab pall puutuja suunas minema.

Miks liikus pall ringjoonel? Sellepärast, et nöör sunnib muutuma keha liikumise suunda. Pall tahaks igal hetkel lennata sirgelt, piki puutujat minema. Aga nöör tõmbab palli kogu aeg pöörlemise keskpunkti poole ja ei lase sellel minema lennata. Palli ringjoonel liikumahoidmiseks on vaja talle nööri kaudu jõudu rakendada. Seda jõudu nimetatakse **kesktõmbejõuks** ja see on suunatud raadiuse sihis tiirlemiskeskpunkti poole (vt joonist). Kesktõmbejõud on risti joonkiirusega, sest ringi raadius on alati risti puutujaga..



Joonisel näitavad vektorid AB, CD ja EF joonkiiruse suundi ja f näitab kesktõmbejõu suunda.

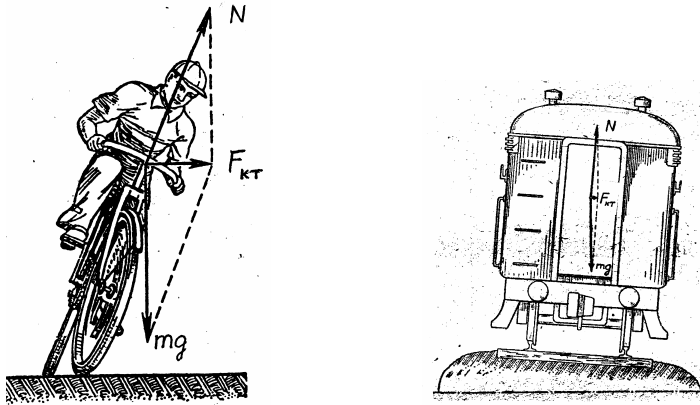
Kui nööri lahti lasime, siis lendas pall minema, mis näitabki, et kadus pallile mõjuv jõud f .

Kesktõmbejõud pole mingi jõu eriliik, selleks võib olla näiteks nii elastsusjõud (katses niidi otsas oleva palliga), aga ka gravitatsioonijõud (Maa liikumine ümber Päikese).

Kõik, kes on sõitnud jalg- või mootorrattaga teavad, et pööramiseks ei pea üldse keerama juhtrauda, vaid piisab ratta **kallutamisest**.

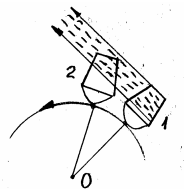
Seda nähtust saab seletada kesktõmbejõu abil. Me teame juba, et ringjoonel liikudes mõjub kehale kesktõmbejõud, mis on risti joonkiirusega. Järelikult on õige ka vastupidine väide, et kui kehale mõjub liikumissuunaga ristsuunaline jõud, siis liikumistee kõverdub. Sellise jõu saab tekitada ratas kallutades, siis tekib raskusjõu mg ja toereaktsiooni N toimel kesktõmbejõud F_{KT} (vt joonist).

Kesktõmbejõu tekitamiseks tehakse ka autoteede või raudteede kurvid kaldu ja sellepärast pole kaldkurvides vaja auto rooli või rongi rattaid keerata.



Joonis 11.1. Kesktõmbejõu tekkimine: mg on keha raskusjõud, N on jõud, millega Maa mõjub kehale (toereaktsioon) ja F_{KT} on kesktõmbejõud.

Katse veepange keerutamise kohta vertikaaltasandis. Miks vesi pangest välja ei tule?
 Püüame küsimusele vastust leida mõttelise katsega, mida on kujutatud joonisel 11.2. Kujutame ette, et pang pöörleb vastupäeva ja asendis 1 kaob pang vee ümbert ära. Siis liiguks vesi inertsist tõttu piki ringjoone puutuja suunda edasi. Vett on joonisel kujutatud kriipsukestega alana. Kui asendis 2 tekiks pang tagasi, siis oleks selles vee pind pange põhja suhtes kaldu ja vee poolt hõivatud ruumala oleks esilagsest väiksem. See aga tähendaks vee kokkusurumist. Kuna vesi pole kokkusurutav, siis jääb tegelikult vee ruumala muutumatuks, aga see hakkab avaldama rõhku pange vees olevale osale. Vee pind muutuks aga ka tegelikkuses viltuseks. Tekkiv rõhk, mis on tingitud vee inertsist surubki vee vastu pange põhja ega lase sellel välja voolata.



Joonis 11.2. Veepange keerutamine ümber punkti O.

Sageli põhjendatakse seda pange keerutamise katset **tsentrifugaaljõuga** (kesktõukejõuga), mis mõjuvat pöörlevale kehale ja püüdvat seda tiirlemiskeskmeest eemale paisata.

See on **väärkujutus**. Tsentrifugaaljõud on küll olemas ja on suunatud vastupidiselt **tsentripetaaljõule** ehk kesktõmbejõule, kuid vastavalt Newtoni III seadusele ei mõju vastastikmõju korral võrdsed ja vastupidi suunatud jõud ühele ja samale kehale, vaid erinevatele kehadele. Sellepärast pole tsentrifugaaljõud rakendatud samale kehale millele tsentripetaaljõud, vaid tiirlemiskeskmele. Tsentrifugaaljõudu tajume oma käega, kui keerutame pange. Kui me katses pange lahti laseks ja see lendaks meist eemale raadiuse sihis, siis võiks kahtlustada põhjusena tsentrifugaaljõudu. Kuid pang lendab minema piki puutuajat ja seda ei saa kuidagi tsentrifugaaljõud põhjustada. Fakt kehade kaalu vähenemisest ekvaatoril võrreldes kaaluga poolusel ei ole ka seotud tsentrifugaaljõuga. Nähtuse seletus on sama nagu kaalu vähenemine kehade langemisel, ainult nüüd on kiirenduse a osas kesktõmbekiirendus v^2/r .

Veepange keerutamise sarnane olukord esineb ka autosõidul. Kui auto sõidab kurvis ja meid surutakse vastu auto välisseina, siis mõjub meile inertsijõud, mis püüab meid puutuja sihis liikuma panna. Kuid autole mõjub kesktõmbejõud, mis sunnib autot pöörama. Kahe jõu koosmõjul surutakse meid vastu auto väliskülge. Mis päritolu on auto pööramisel tekkiv kesktõmbejõud? See on hõõrdejõud, mis hoiab autot kurvis õigel teel.

Pöörlemise inerts

Kulgliikumisel esineb inertsinähtus, mis seisneb keha kiiruse ja liikumissuuna jäävuses väliste mõjude puudumisel. Analoogiline nähtus esineb ka kehade pöörlemisel. See tähendab, et keha, mis pöörleb, püüab jätkata pöörlemist, säilitades oma pöörlemistelje asendi. Ja mittepöörlev keha püüab säilitada oma mittepöörlemist.

Katsed nõõri otsas rippuva LP-ga. Kinnitame vana LP heliplaadi tsentrisse plastiliiniga niidi. Laseme plaadi niidi otsas rippu ja võngutame seda. Plaat loperdab niid otsas. Kordame katset, aga selle vahega, et enne paneme teise käega plaadi pöörlema. Niid säilitab plaat oma asendi.

Katse vurriga. Paneme vurri pöörlema ja laseme küljelt sõrmega nipsu vastu vurri telge. Vurr säilitab oma pöörlemistelje asendi ka pärast seda. Põhjus peitub selles, et vurri osakesed liiguvad kindlates tasandites. Kui püüda telge kallutada, siis see tähendab osakeste kiiruse muutmist, täpsemalt kiiruse suuna muutmist. Aga igasugust kiiruse muutust takistab inerts.

Nagu kulgliikumise korral oleneb pöörlemise inerts keha massist, aga lisaks sellele ka massi paiknemisest pöörlemistelje suhtes. Mida kaugemal mass pöörlemisteljest paikneb, seda suurem on pöörlemise inerts. Massi asemel kasutataksegi pöörlemise korral füüsikalist suurust **inertsimoment**, mis on seda suurem, mida suurem on keha mass ja mida kaugemal pöörlemisteljest asub mass. Kui mingi punktmass m tiirleb ümber telje kaugusel r sellest, siis sel juhul on punktmassi inertsimoment $I = mr^2$.

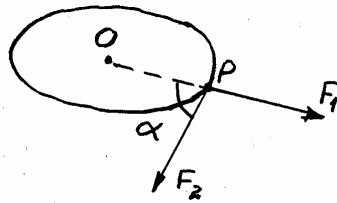
Õhukese rõnga (sõrmuse) $I = mr^2$, kera korral $I = \frac{2}{5}mr^2$.

Katsed kaldpinnal veerevate kehadega näitavad, et mida kaugemal pöörlemisteljest asub keha mass, seda inertsem on keha, seda aeglasemalt keha kiirus kasvab.

Jõumoment⁵

Keha kulgemist põhjustab või muudab iga jõud, pöörlemist aga iga jõud ei põhjusta. Kumb **joonisel** näidatud jõududest paneb keha ümber punkti O läbivat telge pöörlema?

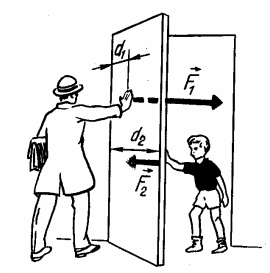
⁵ *Moment* selles terminis pole seotud ajahetkega, vaid tuleneb ladinakeelsest sõnast *movimentum* – liikumapanev võime.



Selleks on jõud F_2 , sest jõud F_1 mõjub sihis, mis läbib pöörlemistelge ja ei tekita pöörlemist. Katsed näitavad, et pöörlemine toimub seda kergemini, mida suurem on mõjuv jõud ja mida kaugemal pöörlemisteljest asub jõu rakenduspunkt P, aga ka sellest, mida rohkem on jõu mõjumise siht risti rakenduspunktist teljeni tõmmatud sirgega (PO). Seda mõtet saab kirjeldada lühidalt valemiga $M = F \cdot l$, kus M on **jõumoment**, F jõud ja l **jõu õlg**, kusjuures $l = OP \cdot \sin\alpha$. Kindla jõu ja selle rakenduspunkti kauguse korral on jõumoment suurim, kui jõu mõjumise suund on risti rakenduspunktist teljeni tõmmatud sirgega.

Jõumomendi mõõtühikuks on $N \cdot m$ (njuuton korda meeter). See on samasugune ühik nagu töö, aga ainult väliselt. Jõumomenti ei mõõdeta džaulides!

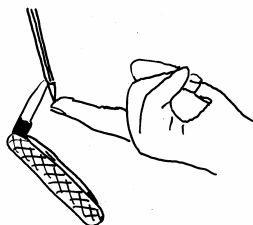
Mis juhtub siis, kui ühele kehale mõjub mitu jõumomenti? Näiteks kui ust suruvad teine teiselt poolt mees ja poiss.



Mis juhtub uksega? Uks pöörduv sinnapoole, kuhupoole pöörav moment on suurem. Uks jääb paigale ehk tasakaalu, kui mõlemas suunas pööravad momendid on võrdsed.

Pöörduda võiva keha tasakaalu tingimuseks on: $M_1 = M_2$.

Tasakaalukatsed. Kui vabalt rippuva süsteemi raskuskese on allpool toetuspunkti, siis süsteem on **püsivas tasakaalus**. Tasakaalu nimetatakse püsivaks, kui tasakaaluasendist väljaviidud süsteem pöörduv sellesse asendisse tagasi.



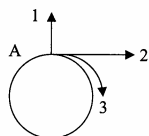
Probleem. Miks joonisel toodud katses püsib pliiats sõrmeotsal tasakaalus?

Koduprojekt

- Mõelda välja ja korraldada katse pöörlemise inertsi demonstreerimiseks.
- Proovige hoida haamrit sõrmeotsal tasakaalus. Ükskord varre otsast, teine kord pea poolt. Millisel juhul on tulemus parem ja miks?

Ülesanded

1. Kui suur on Maa pöörlemise joonkiirus? Miks me seda ei märka?
2. Mis juhtuks, kui Maa lõpetaks hetkeliselt pöörlemise?
3. Kas karuselli kõikide punktide joonkiirused on ühesugused? Aga nurkkiirused? Miks?
4. Kas mäest veereb alla kiiremini kera või rõngas? Kas tulemus oleneb kehade massidest või raadiustest? Põhjendage vastust ja kontrolliga katseliselt.
5. Miks kallutatakse raske seljakotiga kõndides ennast ettepoole?
6. Mootorrattur võib sõita tünnis selle vertikaalsel seinal. Kumb jõud, kas kesktõuke- või kesktõmbejõud mõjub mootorrattale? Aga seinale?
7. Kas mandrijää sulamine mõjutab ööpäeva pikkust? Kuidas?
8. Horisontaalne ratas pöörleb päripäeva. Punktist A lendab ratta küljest minema poritükk. Milline on selle trajektoor?



9. Millisel juhul on jõu õlg võrdne jõu rakenduspunkti kaugusega pöörlemisteljest?
10. Millise jalgratta pedaali asendi korral on jõumoment suurim ja millal väikseim?
11. Kuidas leida keha pööramisel tehtud tööd? Eeldame, et jõud mõjub puutuja sihis.
12. Kooguga kaevudel on pangepoolne koogu osa pikem kui inimesepoolne. Nii on ju vaja rakendada suuremat jõudu, kui oleks vastupidiste pikkuste korral. Miks siiski nii on tehtud?
13. Tooge näide, kus kehale mõjuvate jõudude summa on võrdne nulliga, aga keha ei ole tasakaalus.
14. Mille nurkkiirus on suurem, kas Maa või kella tunniosuti? Mitu korda?

Tarkusi

- Mida suurem on kaugus pöörlemisteljest, seda suurem on joonkiirus
- Tiirlev keha lendab ringjoonelt minema puutuja suunas
- Keha lendab ringjoonelt minema siis, kui kesktõmbe jõud kaob
- Kui vabalt rippuva süsteemi raskuskese on otse toetuspunkti all, siis on süsteem tasakaalus
- Pöörlev keha püüab säilitada oma olekut (telje asendit, pöörlemiskiirust).
- Mida kaugemal pöörlemisteljest asub keha mass, seda inertsem on keha

12. Töö ja energia

Töö

Eespool (vt. p.8) vaatlesime füüsikalist suurust, mis saadakse jõu ja aja korrutamisel. See oli impulss. Kui jõudu korrutada teepikkusega, saame uue füüsikalise suuruse,

mida nimetatakse **tööks**. Selliselt defineeritud tööd, kus midagi nihkub jõu toimel nimetatakse täpsemalt **mehaaniliseks tööks**.

Juhul, kui jõud ei mõju keha liikumise suunas või keha ei liigu jõu mõjumise suunas, siis tuleb arvestada jõu liikumissuunalist komponenti, mis on $F \cdot \cos \alpha$, kus α on nurk jõu suuna ja liikumissuuna vahel.

Probleem. Miks tuleb jõu liikumissuunalise komponendi avaldises kasutada just koosinust?

Seega saab tööd arvutada valemiga $A = F \cos \alpha$, kus A on töö, F mõjuv jõud, α nurk jõu ja liikumissuuna vahel ning s läbitud teepikkus.

Probleem. Töö on võrdeline jõuga, mis on vektor. Kas ka töö on vektor (suunaga suurus)?

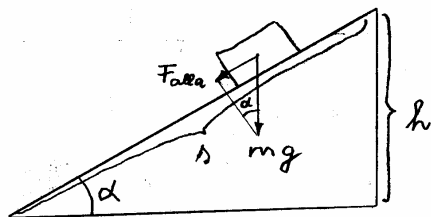
Meie vaatleme ainult tööd sirgliikumisel, sellepärast kasutame valemis Eesti kooli traditsioonide kohaselt tähte s . Eelöeldust ei või teha järeldust, et töö ongi seotud ainult sirgliikumisega. Hoopiski mitte! Tööd teeb ka kellavedru või patareid, mis paneb osutid pöörlema, aga ka auto mootor, mis paneb auto sõitma suvalisel trajektoorigil. **Töö ühikuks** on 1 J (džaul). See on töö, mida teeb jõud 1 N teepikkusel 1 m. See pole just tavamõistes suur töö, selle tegemiseks tuleb 100 g keha tõsta 1 m kõrgusele.

Tööd liigitatakse **positiivseks ja negatiivseks** (muidugi mitte selle järgi, et mõnest tööst on rohkem kasu kui teisest!). Tööd loetakse positiivseks, kui jõud ja liikumine on samasuunalised, vastasel juhul on töö negatiivne. Vahet saab teha ka nurga α suuruse järgi: kui α on teravnurk (alla 90°), siis on töö positiivne, kui nürinurk (üle 90°), siis on töö negatiivne.

Küsimus. Milline on töö siis, kui $\alpha = 90^\circ$?

Nagu valemist näha, on töö seda suurem, mida pikema tee keha läbib. Aga raskuse tõstmisel pole oluline, millist teed mööda keha tõstetakse, kas otse või kaldpinda mööda, tööd tuleb teha ühepalju. Selliseid jõude, mille korral tehtud töö ei olene teest, nimetatakse **konservatiivseteks jõududeks**. Raskusjõud ongi konservatiivne jõud. Vaatleme mingi keha viimist kõrgusele h . Ühel juhul seda keha lohistatakse mööda kaldpinda, teisel juhul tõstetakse.

Kaldpinna korral eeldame, et hõõrdejõud puudub ja keha veetakse üles ühtlase kiirusega. Siis võib lugeda ülesvedava jõu võrdseks jõuga, mis kisub keha allapoole:



$$F_{\text{üles}} = F_{\text{alla}} = mg \sin \alpha,$$

kuid $\sin \alpha = h/s$ ning saame, et $F_{\text{üles}} = mgh/s$.

Siit saame ülesvedamiseks tehtava töö (kui hõõret ei arvesta):

$$A = F_{\text{üles}} s = mgh.$$

See on samasuur töö, nagu tuleb teha keha tõstmiseks kõrgusele h .

Kui keha pärast ülestõstmist langeb tagasi algasendisse, siis on kogu töö võrdne nulliga. Raskusjõu töö kinnisel teel on võrdne nulliga. Sageli tehakse sellest väitest vale järeldus nagu mingit raskust kandes ja ringi tehes samasse kohta tagasi tulles ei tulekski tööd teha! Kui me kanname mingit raskust, siis me ei tee tööd raskusjõu ületamiseks, vaid hõõrdejõu ületamiseks. Natuke teeme siiski ka tööd raskusjõu vastu, sest igal sammul me tõstame sutike oma keha koos kantava raskusega.

Kas tehtud töö hulk oleneb ajast? Valemist paistab, et ei olene. Kuid elukogemus ütleb, et mida kauem sa tööd teed, seda rohkem saab tehtud. Milles asi?

Kaudselt oleneb töö ikkagi ajast, sest $s = vt$, seega $A = Fvt$.

Ka elektri voolu töö avaldises on aeg sees: $A = IUt$. Voolu töö on defineeritud kui $A = qU$, aga praktikas on elektrilaengut palju keerulisem mõõta kui voolutugevust või aega ja sellepärast ongi arvutusvalemis laeng asendatud voolutugevuse ning aja korrutisega: $q = It$.

Kas iga jõud võib tööd teha? Definitsioonivalemist on näha, et kui jõud ja liikumissuund on omavahel risti, siis $\cos 90^\circ = 0$ ja tehtud töö on ka null. Selliseks jõuks on näiteks kesktõmbejõud, mis ei tee tööd, sest see ei pane keha liikuma, vaid muudab ainult liikumissuunda.

Töö ja soojuse ekvivalentsus.

James Joule (õllepruul) tegi 1849.a. kindlaks, et soojushulgale üks kalor⁶ (cal) vastab töö 4,2 J. Kuidas ta seda kindlaks tegi? Segas vett mehaanilise segistiga ja mõõtis vee soojenemist (seda saaks mikseriga kontrollida). Seega saab tööd muuta soojuseks ja ka vastupidi – soojust tööks, näiteks soojusmasinas. Sellest võib järeldada, et töö ja soojus on võrdväärsed ehk ekvivalentsed suurused.

Energia

Töö tegemiseks on midagi või kedagi vaja. Kui tööd teeb keegi, siis peab ikka "miski" mingit olukorda muutma. Tööd võib teha ülestõstetud kirves puulõhkumisel, vedru aatomite nihkumine oma tavaasendist või elektrilaengute ebäühtlane jaotus patareis.

Seda "miskit", mis tööd teeb nimetatakse **energiaks**. Energia abil saab teha tööd. Tihti defineeritaksegi energiat kui töö tegemise võimet.

Mille poolest töö ja energia on sarnased? Näiteks mõlemad mõõdetakse džaulides.

Probleem. *Miks töö ja energia mõõtühikud on ühesugused?*

Milles on aga töö ja energia **erinevus**? Lühidalt öeldes: energia on varjatud töö, keha võime tööd teha. Kehal on energia, aga tööd ei ole. Energia arvel võib keha tööd teha ja töö arvel võib keha energia muutuda.

Energia jagatakse kaheks.

⁶ 1 cal on võrdne soojushulgaga, mida tuleb anda 1g veele, et tõsta selle temperatuuri 1 °C võrra.

Potentsiaalne energia E_p on selline energia, mis on tingitud keha või selle osade asendist (ülestõstetud keha, kokkusurutud vedru). Kütuse keemiline energia on ka potentsiaalne energia, mis vabaneb kui elektrilaengud molekulides või molekulide vahel ümber paiknevad.

Kõige lihtsam on mõõta maapinnalt üles tõstetud keha potentsiaalset energiat:

$E_p = mgh$, kus m on keha mass, g raskuskiirendus ja h kõrgus maapinnast. See energia on võrdne tööga, mida tuleb keha tõstmisel teha raskusjõu vastu. Samapalju tööd võib keha teha kukkumisel. Vahe seisneb selles, et esimesel juhul on töö negatiivne, teisel juhul positiivne.

Kehtib **potentsiaalse energia miinimumi printsiip**: iga keha või kehade süsteem püüab võtta asendi, kus selle potentsiaalne energia on minimaalne. Näiteks pendel või kiik jäävad alati seisma kõige madalamas asendis (h ja ühtlasi ka E_p on siis minimaalsed).

Või näiteks aatomis lähevad elektronid omatahtsi alati tuumale lähemale, niipea kui selleks avaneb võimalus. Sellele vastab ka potentsiaalse energia vähenemine.

Potentsiaalne energia ja töö on omavahel kindlas seoses. Näiteks raskusjõu töö võrdub potentsiaalse energia muudu vastandväärtusega.

$$A = - \Delta E_p.$$

Miinusmärk potentsiaalse energia muudu ees näitab, et kui raskusjõud teeb positiivset tööd (keha liigub alla), siis keha potentsiaalne energia väheneb. Kui keha liigub üles, siis potentsiaalne energia suureneb.

Kas on ka teistsugust potentsiaalset energiat olemas kui raskusjõu oma? On küll. Elektriväljal on, magnetväljal on. Ka deformeeritud kehal on energia (kokkusurutud vedru).

Elastsujõu tööd leidmiseks kasutame kummipaela venitamise näidet. Kujutame ette, et me venitame kummipaela mingi pikkuse l võrra pikemaks. Mõjuv jõud olgu F . Seega tehtud töö $A = Fl$, aga $F = F_{ek}$ (F_{ek} - elastsujõu keskväertus). Elastsujõu keskmise väärtuse leiame kummi pikkusele l vastava elastsujõu abil: $F_e = kl$, kus k on kummi jäikustegur. Keskmise väärtuse leidmiseks liidame kokku jõu algväärtuse ja lõppväärtuse ning jagame pooleks: $F_{ek} = (0 + F_e)/2 = kl/2$. Nii saame töö jaoks avaldise $A = kl^2/2$. See on ka võrdne kummipaelas salvestatud energiaga.

Katse. Surume laual vertikaalse vedru (pastapliiatsist) kokku ja laseme lahti. Mis juhtub? Miks?

Teine energia liik on **kineetiline energia** $E_k = mv^2/2$. Seda nimetatakse eesti keeles ka **hoog**.

Kui rakendame kehale jõudu, siis keha võib hakata liikuma. Kui takistusjõude mitte arvestada, siis jõu poolt tehtud töö on võrdne kineetilise energia muuduga.

Kui keha kiirus kasvab, siis tehakse kehaga tööd. Kui kiirus väheneb, siis teeb keha ise tööd (energia muutub tööks). Niisugustel juhtudel on töö võrdne kineetilise energia muuduga:

$$A = \Delta E_k$$

Probleem. Miks on kineetilise energia avaldises kordaja 1/2? Palju lihtsam oleks ju valem ilma selleta.

Üks oluline erinevus kahe energia liigi vahel on selles, et kineetilist energiat võib omada ka üks keha, aga potentsiaalset energiat ühel kehal pole. See on vastastikmõju energia.

Energia on **suhteline**. Potentsiaalse energia korral oleneb selle väärtus nullnivoost (näiteks võrrelda III korrusel oleva kivi energiat maapinna ja toa põranda suhtes). Kineetilise energia korral oleneb väärtus taustkehast (bussis sõitjal on kineetiline energia maapinna suhtes, aga pole bussi suhtes).

Energial on omadus säilida, ta ei teki ega kao, vaid muudab liiki. Mehaanikas kehtib **mehaanilise energia jäävus**:

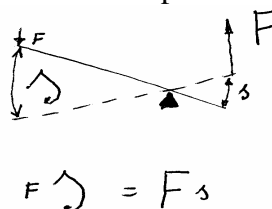
$$E_k + E_p = \text{const.}$$

See kehtib juhul, kui ei esine mehaanilise energia muutumist soojuseks (näiteks puudub hõõre ja õhutakistus). Niisugusel juhul on tegemist **suletud** ehk **isoleeritud süsteemiga**. Reaalsuses mehaaniline energia ikkagi väheneb, sest alati muutub osa energiat hõõrdumise tõttu soojuseks.

Probleem. Laseme ülestõstetud pallil kukkuda. Pall ei põrku pärast allakukkumist enam algkõrguseni tagasi. Kuhu jääb osa potentsiaalsest energiast? Kas on võimalik leida, kui palju potentsiaalsest energiast muutub soojuseks?

Energia jäävusega saab seletada ka **kangi** tööd. Kogu energia, mis kulub kangi ühe otsa liigutamiseks kantakse üle kangi teisele otsale.

Kangi kasutamisel saame tööd teha väiksema jõukuluga, kuid selle eest suureneb läbitud teepikkus. Aga energias või töös võitu pole.



Joonisel toodut kirjeldab lause: väike jõud korda suur teepikkus on sama, mis suur jõud korda väike teepikkus. See on otsene järeldus pöörduda võiva keha tasakaalu tingimusest.

Kui on vaja teha mingi hulk mehaanilist tööd, siis see tähendab, et $A = \text{const.}$ Lihtsuse mõttes eeldame, et jõud ja nihkumine on samasuunalised, sel juhul $A = F \cdot s$. Seda võib ka kirja panna kujul $F_1 s_1 = F_2 s_2$ või

$\frac{F_1}{F_2} = \frac{s_2}{s_1}$. Nii olemegi jõudnud **mehaanika kuldreeglini**, mis ütleb, et niipalju kui võidame jõus, kaotame teepikkuses.

Võimsus

Tööd võib teha erineva kiirusega. Mida kiiremini (lühema aja jooksul) töö tehtud saab, seda suurem on arendatud **võimsus**. Sellepärast nimetatakse töö tegemise kiirust

võimsuseks. Täpsemalt keskmiseks võimsuseks, sest erinevatel ajavahemikel võib tehtud töö olla erinev.

Võimus on defineeritud kui ajaühikus tehtud töö:

$$N = A/t.$$

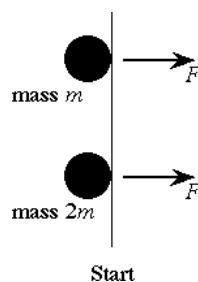
Kuna töö $A = Fs$ ja teepikkuse saab avaldada kiiruse ja aja kaudu $s = vt$, siis saab võimsust leida ka seosest $N = Fv$. Siin võib kasutada hetkkiirust. Siis on tegu **hetkvõimsusega**. Jääva võimsuse korral peab olema mõjuv jõud seda suurem, mida väiksem on kiirus ja vastupidi. See avaldub ilmekalt aut sõidul käike vahetades: madalama käigu korral on kiirus väiksem, aga veojõud suurem.

Koduprojekt

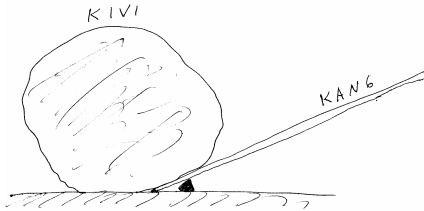
Hinnake oma maksimaalset võimsust. Vihje: selleks võib kasutada trepist tõusmist kõrgematele korrustele.

Ülesanded

1. Potentsiaalne energia võib olla nii positiivne kui negatiivne. See oleneb kõrguse nullnivoo valikust. Kas ka kineetiline energia võib olla nii positiivne kui negatiivne? Miks?
2. Kaks noolt lastakse vibust heinapalli. Ühe noole kiirus on teise omast kaks korda suurem. Kumb nool tungib sügavamale ja kuipalju rohkem? Eeldada, et takistusjõud on mõlemal juhul ühesugune.
3. Auto liigub kiirusega 50 km/h. Pidurdamisel blokeerunud ratastega kuni seiskumiseni läbib auto 15 m. Kui pikk on pidurdusteed, kui auto kiirus on 100 km/h?
4. Kaugelaske kahuritel on pikad torud. Miks?
5. Vettehüppaja astub üle 3 m kõrgusel asuva hoolaua ääre ja langeb basseini. Kas see energia suureneb või väheneb, kui ta enne vettehüpet hüppab hoolaulal üles?
6. Maja katuselt visatakse pall ükskord alla kiirusega v_0 ja teinekord üles sama kiirusega. Kummal juhul on mahakukkuva palli energia suurem?
7. Kui õhutakistus puuduks, siis millise kiirusega kukuksid vihmapiisad Maale? Kas oleks valus, kui nad meile pähe kukuksid?
8. Kui pange kartulitega raputada, siis tulevad suuremad mugulad peale? Miks?
9. Teisel korrusel on puusületäie potentsiaalne energia suurem kui esimesel korrusel. Kas nende puude põlemisel vabaneb rohkem soojust?
10. Auto mootor arendab maksimaalset võimsust ("gaas on põhjas"). Kas automootori veojõud on suurem esimese või viienda käiguga sõites?
11. Auto sõidab ühtlase kiirusega. Järelikult on kiirendus null. Siis on aga nii jõud kui ka tehtav töö võrdsed nulliga. Ometi auto mootor töötab ja kütus kulub. Milleks kulub kütuse põlemisel vabanev energia?
12. Kas vabalt langeva keha poolt tehtud töö on positiivne või negatiivne?
13. Kumba keha kineetiline energia on finišis suurem, kui liikumine toimub hõõrdumiseta?



14. Kogenud matkaja ei astu kunagi mahalangenud puutüvele, vaid sellest üle.
Miks?
15. Miks mägiteed on siksakilised (serpentiinid)?
16. Kangi kivi all oleva osa pikkus maapinnast toetuskohani on 20 cm ja ülejäänud kangi pikkus 2 m. Kui rasket kivi suudaksite sellise kangiga kergitada?



17. Inimene ujub kiireltvoolavas jões vastuvoolu nii, et püsib kalda suhtes paigal. Kas ujuja teeb tööd, sest nihe on ju null. Aga kui laseb end kanda voolul allavett, kas siis teeb tööd?

Tarkusi

- Jõu poolt tehtud töö on võrdne keha energia muuduga
- Ühel kehal pole potentsiaalset energiat
- Energia jäävus kehtib suletud süsteemis
- Kineetilise energia korral on kiirus määravam kui mass
- Töö tegemisel saab võita jõus, kuid siis kaotame teepikkuses
- Kui tahad jõus võita, suru kangi pikemale õlale
- Kõik kehad püüavad võtta asendi, kus potentsiaalne energia on minimaalne

13. Soojus

Temperatuur ja soojushulk

Soojusõpetuse üks põhimõisteid on temperatuur. Inimese jaoks seostub see sooja ja külma aistinguga. Eesti keeles on mitmeid sõnu iseloomustamaks kehade soojusastet: kõrvetav, tuline, palav, soe, leige, jahe külm. Aga kõik need mõisted on subjektiivsed (isiklikule arvamusele tuginevad) ja suhtelised.

Selle väite kinnitamiseks teeme **katse**. Võtame kolm kaussi: üks kuuma, teine külma ja kolmas leige veega. Hoiame natuke aega üht kätt kuuma veega kausis ja teist külma veega kausis. Paneme siis mõlemad käed leige veega kaussi. Ja me tunneme, et kuuma veega kausist võetud käel on külm, aga külma veega kausist võetud käel on soe, kuigi mõlemad on ühesuguse temperatuuriga vees. Põhjus on selles, et soojus läheb alati soojemalt kehalt külmemale. Sellepärast annab soojast veest võetud käsi, mis on soojem kui leige vesi, soojust leigele veele ja meil tekib külma aisting. Teise käe korral saab käsi soojust leigest veest juurde ja tekib sooja aisting.

See, kui soe või külm on keha, on määratud keha molekulide soojusliikumisega: mida kiiremini molekulid liiguvad, seda soojem keha on. Vältimaks subjektiivsust soojusastme hindamisel, on kasutusele võetud temperatuuri mõiste.

Temperatuur on molekulide soojusliikumise keskmise kineetilise energia mõõt, täpsemalt: temperatuur on võrdeline molekulide keskmise kineetilise energiaga. Miks me rõhutame, et just keskmise energia mõõt? Sellepärast, et molekulid liiguvad

erinevate kiirustega ja omavahelistel põrgetel kiirused muutuvad, kuid **keskmine kiirus**⁷ on püsiv.

Näiteks ideaalse gaasi korral on selle absoluutne temperatuur $T = \frac{2\bar{E}_k}{3k}$, kus \bar{E}_k on molekulide keskmine kineetiline energia ja k on Boltzmanni konstant.

Temperatuuri **mõõtmiseks** kasutatakse mitmesuguseid skaalasisid. Erinevused nende vahel seisnevad püsipunktide valikus. Meil kasutusel oleva **Celsiuse skaala** korral on püsipunktideks **jää sulamise** ja **vee keemise** temperatuurid. **Kelvini skaala** kasutab ühikuna Celsiuse kraadi, ainult nullpunktiks on valitud **absoluutne null**, st selline temperatuur, mille korral molekulide kineetiline energia on null (molekulid seisavad paigal). Katsed näitavad, et selline temperatuur on 273,15 kraadi allpool Celsiuse skaala nulli. Kehtib seos:

$T = t + 273,15$ K. Ühikuks on Kelvini skaalas 1 K (kelvin): 1 K = 1 °C.

Probleem. *Kuidas võis W. Thomson (Kelvin) tulla mõttele absoluutsest nullist aastal 1848, millal polnud tänapäeva mõistes madalaid temperatuure veel saadud? Vedelat õhku, mille temperatuur on -194 °C sai Carl Linne alles 1876.a.*

Kõik ained reeglina paisuvad, kui neid soojendada, olenemata sellest, kas olek on tahke, vedel või gaasiline. Kui aine temperatuur tõuseb, siis hakkavad selle molekulid järjest kiiremini liikuma ja naabritega põrkudes kaugemale lendama kui varem. See suurendab keskmist molekulidevahelist kaugust, mis kajastub selles, et vaadeldava keha mõõtmed suurenevad – keha **paisub**. Soojuspaisumine on reeglina seda suurem, mida kõrgemale temperatuur tõuseb. Erandiks on vesi, mille ruumala hoopis suureneb jahtudes alla 4°C ja jää on suurem ruumala, kui samal veekogusel.

Mis on aga **soojus**? Soojuseks nimetatakse soojusenergiat, mis kandub ühelt kehalt teisele, kui kehade temperatuurid on erinevad. Siit järeldub, et soojust saab mõõta temperatuuride vahe abil. Soojuse hulga mõõtmiseks kasutataksegi suurust, mille nimi on **soojushulk**: $Q = cm\Delta t$, kus c on ainet iseloomustav erisoojus, m keha mass ja Δt soojust andva ja soojust saava keha temperatuuride vahe. Tuleb meeles pidada, et temperatuuride vahel on füüsikas tähtsus, aga temperatuuride summamal pole mingit tähendust. See on nii ka spordis: tähtis on väravate või korvide vahe, aga nende summamal pole mingit tähendust.

Soojushulka mõõdetakse nagu energiat ja töödkki džaulides, sest soojust saab muuta nii energiaks kui tööks ja vastupidi. Enne SI süsteemi kasutuseletulekut mõõdeti soojushulka **kalorites**: üks kalor on soojushulk, mida on vaja, et tõsta 1 g vee temperatuuri 1 kraadi võrra.

Tihti räägitakse **soojusenergiast**, mis pole aga täpselt defineeritud. Füüsikas kasutatakse sellepärast **siseenergia** mõistet, mis on võrdne kõikide molekulide kineetiliste ja potentsiaalsete energiatega ning molekulisiseste energiatega summaga. Viimast tihti ei arvestata ja seega tulevad arvesse ainult molekulide kineetilised ja potentsiaalsed energiad.

⁷ Molekulide keskmine kiirus erineb mehaanikas tuntud keskmisest kiirusest. Siin leitakse kõikide molekulide kiiruste summa ja jagatakse see molekulide arvuga.

Ideaalse gaasi korral, kus puuduvad molekulidevahelised vastastikmõjud (ja seega ka potentsiaalne energia) on siseenergia $U = n\bar{E}_k$, kus n on molekulide arv ja \bar{E}_k keskmine molekuli kineetiline energia. Sisesenergia mõõduks on temperatuur. Siseenergia on võrdeline temperatuuriga.

Soojusülekanne

Kuidas toimub soojuse ülekandumine ühelt kehalt teisele?

Selleks on kolm võimalust: soojusjuhtivus, konvektsioon ja kiirgus.

Soojusjuhtivuse korral on kehad omavahel kontaktis ja ühe keha molekulide või ka vabade elektronide **põrked** teise keha osakestega annavad energiat ühelt kehalt teisele. Eriti head soojusjuhid on metallid, sest neis on palju **vabu elektrone**. Nende kiirused on väga suured, ca 100 km/s ja seetõttu nad põrkuvad väga tihti teiste osakestega ja annavad soojusenergiat üle. Halvad soojusjuhid on gaasid, sest neis on molekule hõredalt ja põrkeid toimub suhteliselt harva. Kõik poorsed ained on halvad soojusjuhid, kuna need sisaldavad õhku.

Soojusjuhtivusel üleantav soojushulk on seda suurem, mida suurem on kehade temperatuuride vahe, mida suurem on kokkupuute pind, mida lähemal on kehad üksteisele ja mida kauem ülekanne kestab. Tulemus oleneb ka keskkonnast, mis on kehade vahel. Selliseid seoseid on igapäev kogenud, kes on tulnud külmast sooja ahju äärde ja tahab ennast soojendada. Niisugust mõttekäiku väljendab lühidalt valem

$$Q = \text{const} \frac{\Delta T \cdot S \cdot t}{d},$$
 kus Q on üleantav soojushulk, ΔT - kehade temperatuuride

vahe, S – kokkupuute pindala, t – aeg, d – kehadevaheline kaugus.

Konvektsiooni korral kantakse soojem keskkond üle teise kohta. Selle näiteks on sooja vee liikumine keskküttesüsteemis. Konvektsioon võib olla loomulik või sunnitud (pumba abil tekitatud). Loomulik konvektsioon esineb sellepärast, et soojenedes aine paisub, tihedus väheneb ja tekib **üleslükkejõud**.

Probleem. *Kui soe õhk tõuseb üles, siis peaks Maast kõrgemal olema õhk soojem ehk kõrgel mägedes võiks olla troopiline kuumus. Tegelikult on aga kõrgel mägedes külm ja igilumi. Miks?*

Põhjus on selles, et õhu tihedus väheneb kõrguse kasvades. Põhjuseks on Maa külgetõmme. Tiheduse vähenemine tähendab, et molekulide arv ruumalaühikus väheneb. Sellega kaasneb iga kuupmeetri õhu siseenergia vähenemine, sest siseenergia on ju molekulide kineetiliste energiatega summa. Nüüd on summa väiksem vaatamata sellele, et iga molekuli energia on endine, aga molekule on vähem. Kui aga väheneb siseenergia, siis langeb ka temperatuur. Olukord on sarnane raha saamisega emalt-isalt. Iga kord, kui neid kohtad, saad kindla summa, aga mida vähem kohtumisi, seda vähem raha.

Kiirgus kannab samuti soojusenergiat. Päikeselt Maale jõuab energia läbi atmosfääri ikka kiirgusena, mitte soojusjuhtivuse teel. Avakosmoses aga puudub isegi põhimõtteline võimalus soojusjuhtivuseks või konvektsiooniks. See kiirgus, mis näiteks Päikeselt energia maale toob või kuumast ahjust meieni kannab on **soojuskiirgus**, mis on oma olemuselt elektromagnetiline laine. Laine ise ei ole soojus ega energia. Laine on energia edasikandumise viis.

Soojuskiirguse nimi tuleb sellest, et kiirguse tekkimiseks vajalik ergastusenergia saadakse soojusliikumisel esinevatest molekulide pörgetest.

Laialt levinud on VÄÄRARUSAAM, et soojuskiirguseks nimetatakse sellist elektromagnetilist kiirgust, mis soojendab. Soojendada võib ka laserkiirgus, mis ei ole soojuskiirgus.

Kõik kehad kiirgavad soojuskiirgust. Mida kõrgem on temperatuur, seda kiiremini elektronid aatomeis võnguvad ja seda suurema sagedusega kiirgust kiiratakse. Kui kiirgaja temperatuur on üle 800° C, siis muutub kiirgus inimsilmale nähtavaks kiirguseks – **valguseks**. Kõrgemal temperatuuril suureneb ka kiirgavate elektronide arv.

Tekkinud soojuskiirguse energia on võrdeline temperatuuri neljanda astmega. Seega, kui keha temperatuur tõuseb 2 korda, siis kiiratud energia suureneb 16 korda.

Praktika näitab, et tumedad kehad neelavad paremini kiirgust kui heledad.

Küsimus. *Miks on must keha hea kiirguse neelaja?*

Täpne vastus oleks: sellepärast, et ta on must. Must ju seda tähendabki, et kogu pealelangev kiirgus jääb kehasse, mitte midagi tagasi ei peegeldu. Must keha on ka hea kiirgaja. Hele keha seevastu on hea peegeldaja ja halb kiirgaja.

Kui see nii ei oleks, peaks näiteks toas kõik tumedad kehad olema soojemad kui heledad, sest nad neelavad kiirgust paremini kui heledad kehad. Aga toas on nii heledad kui tumedad kehad ühesuguse temperatuuriga. Järelikult tumedad kehad on ka paremad kiirgajad kui heledad kehad.

Soojusülekanne toimub alati soojemalt kehalt külmemale, st. temperatuurid püüavad ühtlustuda: soojem keha jahtub ja külmem soojeneb.

Soojusülekanne suunda saab aga määrata ka looduses kehtiva printsipi järgi, mille kohaselt igasugune iseeneslik protsess kulgeb süsteemis kaose (korrapäratuse) kasvu suunas.

Vaatleme **näiteks** kaht olukorda: ühel juhul on kõik gaasi molekulid koondunud näiteks poolde gaasi ruumalast, teisel juhul on pooled molekulid ühes ruumi pooles, teine pool teises pooles. Kumb variant on tõenäosem? Ilmselt teine. Kõige suurema tõenäosusega on olek, kus molekulid täidavad ühtlaselt kogu ruumi. Süsteem liigub iseenesest sellise oleku poole, kus süsteemis puudub igasugune kord (mingi jaotuse eelistus). Ehk teisti öeldes: iseeneslikud protsessid viivad kaose suurenemisele.

Füüsikas väljendab soojusülekanne suunda **termodünaamika II seadus**, mis on esitatud **entroopia S** abil: igasuguses iseeneslikus protsessis süsteemi entroopia kasvab. Iseeneslik protsess on võimalik ainult **isoleeritud süsteemis**.

Valemina kirjutatakse see väide üles selliselt:

$$\Delta S = k \ln w,$$

kus k on Boltzmanni konstant ja w termodünaamiline tõenäosus.

See tõenäosus on võrdne arvuga, mis näitab, mitmel erineval viisil võivad osakesed süsteemis paikneda. See arv on maksimaalne täieliku kaose korral ja on võrdne 2^n , kus n on molekulide koguarv. Aga molekule on palju, juba 1 liitris õhus on ca 10^{22} molekuli.

Entroopia valemist on näha, et kui oleku tõenäosus suureneb, siis suureneb ka entroopia, see tähendab, et kui süsteem liigub suurema korrapäratusega olekusse, siis entroopia kasvab.

Olukorda, kus igas ruumi piirkonnas on aine tihedus, rõhk ja temperatuur ühesugune nimetatakse **termodünaamiliseks** ehk **soojuslikuks tasakaaluks**. Sellises olekus ei toimu mingeid protsesse (difusioon, soojusjuhtivus, konvektsioon, agregaatoleku

muutus, vms.). Termodünaamika II seadust sõnastatakse ka nii: iga isoleeritud süsteem liigub termodünaamilise tasakaalu poole.

Koduprojekt

Pange sügavkülmikusse kaks ühesugust anumat ühesuguse koguse veega. Ühes anumas olgu kuum vesi, teises külm. Kontrollige aegajalt, kumb vesi külmub kiiremini. Miks?

Vihje: Mpemba efekt.

Probleem

Kui ühe keha temperatuur on 10° C ja teisel 20° C, kas siis on õige öelda, et teise keha temperatuur on kaks korda kõrgem?

Ülesanded

1. Miks on jääl väiksem tihedus kui veel?
2. Kas on olemas maksimaalne võimalik temperatuur? Miks?
3. Võrus on suvel keskmine temperatuur kõrgem kui Pärnus, aga talvel ei ole. Miks?
4. Kõrbeliiva päevaste ja öiste temperatuuride erinevus on suur (ca 50 – 60 kraadi). Mida võib sellest järeldada kõrbeliiva erisoojuse kohta?
5. Kes võidab, kas gaasikontor või teie, kui gaasi enne mõõtjasse juhtimist soojendatakse?
6. Metallist seibi kuumutatakse. Kas seibi ava läbimõõt jääb endiseks, suureneb või väheneb?
7. Kui võtta pihku nael ja torgata see teise otsaga vastu jääd, siis varsti tunneme, et nael läheb külmaks. Kas külm tuli mööda naela meieni?
8. Kui me õhku soojendame, siis see paisub. Kas on õige ka vastupidine väide, et õhu paisumine soojendab õhku?
9. Kui pista käsi tühja termoskotti, siis hakkab sellel seal soe. Kas termoskotis on soojem õhk kui väljas?
10. Põhjendage termos pudeli ehitust.
11. Miks kuumal saunalaval tundub lavalauas oleva naela pea kõrvetavalt kuum, aga puitosad pole nii kuumad? Ometi peaksid nad ju ühe temperatuuri juures olema.
12. Miks väga külma ilmaga keelega metallesele katsudes keel sinna kinni külmub, aga puutüki külge ei külmu, kuigi selle temperatuur on sama, mis metallil?
13. Kui iga keha kiirgab soojuskiirgust, miks siis kehad maha ei jahtu?

Tarkusi

- Siseenergia on seda suurem, mida kiiremini molekulid liiguvad, st mida kõrgem on temperatuur.
- Aine ei sisalda soojust, vaid energiat.
- Soojusülekanne on üleantav soojushulk võrdeline temperatuuride vahetusega ΔT .
- Kõik omaette jäetud süsteemid püüdlevad termodünaamilise tasakaalu poole.
- Iseeneslikud protsessid suurendavad süsteemis korrapäratust.

14. Aine olekud

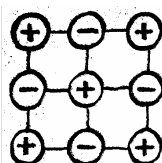
Aine olekuid on neli: tahke, vedel, gaasiline ja plasma. Kui temperatuur on madal, siis aine on tahkes olekus ja aine molekulid ei võta osa kulgliikumisest, vaid võnguvad tasakaaluasendi ümber. Temperatuuri tõustes (energiat juurde saades) rebivad molekulid end kindlatest kohtadest lahti ja saavad hakata liikuma. Tekib vedelik, mis võtab anuma kuju. Edasisel temperatuuri tõusul rebivad molekulid end üksteise küljest lahti ja tekib gaas, mis täidab terve anuma. Veel kõrgemal temperatuuril rebivad ka elektronid ennast aatomitest vabaks ja tekib **plasma**⁸: segu ioonidest ja elektronidest.

Ainete üheks kirjeldajaks on **tihedus**: $\rho = m/V$, kus m on ainekoguse mass ja V ruumala. Tihedus näitab aine ruumalaühiku massi, ehk seda kui suur on näiteks 1 m³ aine mass kilogrammides. Tihedus on suurim tahkes olekus ja väiksem gaasilises olekus. Erinevused on ca 10³ korda. See tähendab, et keskmised kaugused molekulide vahel on tahkes olekus umbes kümme korda väiksemad kui gaasilises olekus.

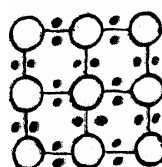
Tahke olek

Tahkes olekus on aine kas kristall (tahkis) või amorfne aine. Tahkisel on kindel struktuur, amorfisel ainel pole. Kristalle on erineva ehitusega.

Ioonkristallid koosnevad erinimelistest ioonidest, mis paiknevad vaheldumisi. Kristalli hoiavad koos elektrilised tõmbejõud erinimeliste aatomite vahel. Klassikaline näide näide on keedusool (NaCl).

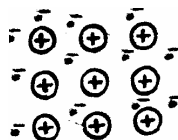


Kovalentsed kristallid (homöopolaarsed kristallid) moodustuvad siis, kui naaberaatomitel on tekkinud ühised valentselektronid, mis liiguvad ümber mõlema aatomi. See hoiabki aatomeid koos. Täpsemat seletust selle kohta klassikaline füüsika ei anna. Niisugune kristall on näiteks teemant.



Joonisel on ringid aatomid ja täpid valentselektronid.

Metallilised kristallid on sarnased kovalentsetele kristallidele, ainult seal on kõikide aatomite valentselektronid lahkunud oma "koduatomist" ja kihutavad vabalt ringi ioonide vahel (toatemperatuuril $v_k \approx 10^5$ m/s). See negatiivse laenguga elektrongaas hoiab koos positiivseid ioone.

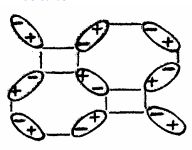


Joonisel on punktikesed miinusmärkidega vabad elektronid ehk elektrongaas.

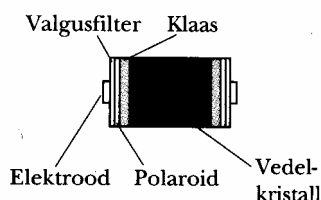
Molekulaarsed kristallid püsivad koos tänu Van der Waalsi jõududele, mis mõjuvad polaarsete molekulide vahel. Tüüpiline näide on jää.

⁸ Plasmat me ei käsitle, kuna see ei kuulu koolifüüsika ainekavasse.

Van der Waalsi jõud tekivad siis, kui molekulides on positiivse ja negatiivse laengu keskmel nihkunud (tekkinud dipoolid). Kui selliste molekulide vahekaugust suurendada, siis ilmnevad tõmbejõud: $F_{\text{tõmbe}} \sim 1/d^7$, kus d on molekulide vahekaugus. Lähendamisel ilmnevad tõukejõud: $F_{\text{tõuke}} \sim 1/d^{13}$.



Kristallilised omadused on ka mõnedel vedelikel, mida nimetatakse **vedelateks kristallideks**. Neile on iseloomulik selektiivne peegeldumine, st neile langev valge valgus peegeldub ainult mõnes spektri piirkonnas, muutudes värviliseks valguseks. See selektiivsus (valikulisus) oleneb näiteks temperatuurist, elektri või magnetväljast, isegi helivaljust. Vedelad kristallid on ka optiliselt aktiivsed, st nad pööravad polariseeritud valguse võnketasandit. LCD telerite ekraanid koosnevad pikslitest, mis on vedela kristalliga täidetud toruke, mille otstes on elektroodid, polaroidid ja valgusfiltrid. Kuna ekraani vedelkristallelemendid on kahe polaroidi vahel, on selliste telerite ekraanidelt tulev valgus polariseeritud.



Joonis 14.1. LCD ekraanis kasutatav piksel.

Vedel olek

Vedelas olekus aine ehk vedelik on voolav, võtab anuma kuju ja pole kokkusurutav.

Probleem. *Liiv on voolav, võtab anuma kuju ja pole kokkusurutav. Miks liiv pole vedelik?*

Nagu juba eespool öeldud (vt. p. 10) annab vedelik rõhku edasi igas suunas ühtviisi. Seda saab näidata **Pascali pritsiga**.

Katse. *Pritsiks võib olla tavaline jalgratta pump, mille otsa on asetatud aukudega kera või plastikpudel. Kui pump vett täis tõmmata ja siis tühjaks suruda, pritsib vett aukudest välja igas suunas.*

Vaatleme teisi vedelike omadusi.

Katse. *Asetame peenikesest traadist rõnga ettevaatlikult veepinnale ja see jääb ujuma. Kui tilgutada rõngasse pesuvahendit, siis rõngas upub.*

Katse seletamiseks peame tundma nähtust nimega **pindpinevus**. Tegemist on pinnanähtusega, kus vedeliku pind käitub elastse kilena. Vedeliku pinnamolekulid mõjustavad üksteist tõmbejõududega, mis on suunatud piki pinda. Sellest tingituna püüab vaba vedeliku pind võtta minimaalset suurust.

Kui panime veepinnale traatrõnga, siis traat vajutas oma raskusega veepinna enda all lohku. Kuid veepind püüdis võtta endist, väiksema pindalaga tasast kuju ja surus rõngast ülespoole.

Mitmesugused ained aga vähendavad vedelike pindpinevusjõude. Selliseid aineid nimetatakse **pindaktiivseteks aineteks**, milleks on ka kõik pesuvahendid.

Pesuvahend vähendas meie katses vee pindpinevusjõude ja nendest ei piisanud enam rõnga raskusjõu tasakaalustamiseks.

Eelpoolkirjeldatud katse tuleb välja ainult selliste materjalidega, mida vedelik ei **märga**. Kui teeksime traatrõnga enne kokku pesuvahendiga, siis meil katse ei õnnestu, sest pesuvahend märgab traati paremini kui vesi.

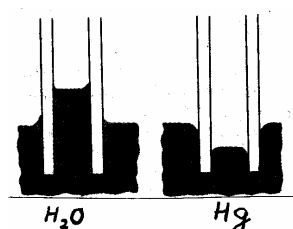
Kindlasti oleme tähele pannud, et erinevad vedelikud on erineva voolavusega. Näiteks vesi voolab kiiresti purgist välja, aga mesi aeglaselt. Vedelike voolavust kirjeldab **sisehõõre**. See väljendub vedelike omaduses avaldada takistust vedelikukihtide nihkumisele üksteise suhtes. Põhjuseks on molekulidevahelised tõmbejõud ja molekulide üleminekud erineva kiirusega liikuvate vedelikukihtide vahel. Temperatuuri tõustes molekulidevahelised kaugused suurenevad ja sisehõõre väheneb.

Vedelikel on veel üks omadus, mis seisneb selles, et vedelik võib tungida peenikestesse torudesse, kapillaaridesse. Sellest ka nähtuse nimetus – **kapillaarsus**.

Katse. Asetame peenikese ($d \approx 1\text{mm}$) klaastoru otsapidi ükskord vette ja teine kord elavhõbedasse. Vees kerkib veetase toru ümbritsevast nivoost kõrgemale, elavhõbedas vajub madalamale

Seletust tuleb otsida klaasi- ja vedelikumolekulide vaheliste jõudude vahekorra. Kui vedeliku molekulid tõmbuvad kapillaari seina molekulidega tugevamini kui omavahel, siis vedelik märgab toru ja ronib toru seinu mööda üles. Vastupidisel juhul jääb tase torus madalamaks ümbritsevast tasemest.

Ilmselt siis on tõmbejõud vee- ja klaasimolekulide vahel tugevamad kui veemolekulide vahel. Seda võib öelda ka lühemalt: vesi märgab klaasi. Ja sellepärast tungib vesi klaasist kapillaari. Elavhõbe aga ei märga klaasi ja esineb vastupidine efekt.



Gaasiline olek

Gaasides asuvad molekulid üksteisest kaugel, nii et nad pole praktiliselt vastastikmõjus. Molekulid saavad seetõttu vabalt liikuda, ainult aegajalt põrkudes. Seepärast gaas täidab alati kogu anuma.

Muidugi see väljend “aegajalt põrkudes” jätab tegelikkusest petliku mulje.

Normaalingimustel on õhumolekulide keskmine kiirus umbes 500 m/s, üks molekul põrkub teistega sekundis vähemalt üks miljard (10^9) korda ja teepikkus, mille molekul saab läbida ilma põrkumata on keskmiselt $10^{-7} - 10^{-8}$ m.

Ainet gaasilises olekus nimetatakse **gaasiks**, kui aine sellel temperatuuril ei saa olla vedelas olekus. Kui aine saab antud temperatuuril olla nii vedelas kui gaasilises olekus, kasutatakse **auru** mõistet.

Katse. Surume WC vaakumpumba seina külge ja laseme selle lahti.

Miks pump alla ei kuku? Sellepärast, et me surusime pumbast osa õhku välja ja väline õhurõhk surus pumba vastu seina.

Kuigi õhu tihedus on väike ($\rho = 1,29 \text{ kg/m}^3$), avaldab see siiski märkimisväärset rõhku. Põhjus on selles, et õhukiht ümber Maakera on paks, mitukümmend kilomeetrit.

Normaalseks õhurõhuks peetakse 760 mmHg ehk $\approx 10^5 \text{ Pa} = 10^5 \text{ N/m}^2$.

Küsimus. *Kui suure jõuga atmosfäär meie keha surub?*

Rõhumisjõu saame leida rõhu definitsioonivalemist $F = pS$. Jõu arvutamiseks peame teadma inimkeha pindala. Täiskasvanud inimese kehapindala on 1,5 ... 2 m². Lihtne arvutus annab minimaalseks tulemuseks $1,5 \cdot 10^5 \text{ N}$. See vastab 15 tonnise keha raskusjõule.

Probleem. *Maa atmosfäär avaldab meile rõhku, mille jõud vastab ca 15 tonnise keha raskusjõule. Miks see suur jõud meid laia ei litsu?*

Gaase iseloomustatakse peamiselt kolme suurusega: temperatuur, rõhk ja ruumala.

Temperatuur on määratud molekulide liikumiskiirusega: mida suurem kiirus, seda kõrgem temperatuur.

Rõhk on määratud ajaühikus (ühes sekundis) toimunud põrgete arvuga vastu mingit kindla suurusega pinda. Mida suurem on see põrgete arv, seda suurem on rõhk. Gaasi rõhu analoogiks on näiteks vastu akent sadav vihm.

Ruumala on see ruumiosa, milles molekulid saavad liikuda.

Kui vähemalt üks neist suurustest (parameetritest) muutub, peab muutuma ka vähemalt üks teine parameeter, aga võib muutuda ka kaks. Selliseid muutusi nimetatakse **protsessideks**. Vaatleme kolme liiki protsesse.

Protsess, mille käigus temperatuur ei muutu on **isotermne**. Sellisel juhul ei muutu molekulide keskmine kiirus. Kui sellisel juhul vähendada ruumala, siis hakkab põrkeid vastu anuma seinu toimuma rohkem (molekulidele jääb vähem liikumisruumi). See tõstab rõhku. Ja vastupidi, kui ruumala suurendada, siis rõhk langeb.

Protsess, mille käigus rõhk ei muutu on **isobaarne**. Kui tõsta gaasi temperatuuri, siis suureneb molekulide kiirus ja ka põrgete arv vastu anuma seinu. See viib rõhu tõusmisele. Selleks, et rõhk ei muutuks tuleb ruumala suurendada. Siis jääb molekulide tihedus väiksemaks ja väheneb ka põrgete arv. Seega temperatuuri tõstmine põhjustab nüüd ruumala suurenemist ja vastupidi: temperatuuri langetamine põhjustab ruumala vähenemist.

Protsess, mille käigus ruumala ei muutu on **isohoorne**. Kui temperatuuri tõsta, siis molekulide kiirus kasvab ja põrkeid toimub rohkem. See viib rõhu tõusule. Ja vastupidi, temperatuuri langus vähendab rõhku.

Aine olekute muutused

Üks aine olek võib teiseks üle minna. Kui näiteks vedelikule soojusenergiat juurde anda, siis hakkavad vedeliku molekulid kiiremini liikuma. Mõnede molekulide kiirus võib kasvada nii suureks, et naabermolekulide tõmbejõust jääb väheseks selle kinnihoidmiseks ja molekul lendab vedelikust välja. Öeldakse – vedelik **aurustub**. See võib juhtuda ka ilma välist energiat juurde saamata, sest tänu omavahelistele põrgetele on vedelikus väga erineva kiirusega molekule. Need, mille kiirus on palju suurem keskmisest kiirusest, lendavad vedelikust välja. Kui kiiremad molekulid lahkuvad, siis selle tulemusena vedelik jahtub. Edasiseks aurustumiseks peab kuskilt soojusenergiat juurde saama. Seda võetakse ümbritsevatelt kehadelt.

Aurustumise pöördnähtuse korral kaotavad gaasimolekulid põrgetel jahedama aluspinnaga oma energiat ja tekib vedelik. Öeldakse – aur **kondenseerub**. Vedeliku soojendamisel esineb paralleelselt kaks protsessi: soojenemine ja jahtumine. Esimene leiab aset tänu soojusallikalt tulevale energiale, teine leiab aset sellepärast, et vedelikust lahkuvad kõige kiiremini liikuvad molekulid viivad pidevalt energiat ära. Madalamatel temperatuuridel on ülekaalus soojenemine. Kui saabub tasakaal nende protsesside vahel, siis vedelik hakkab keema.

Keemisel vedelik aurustub ka oma pinna all, seal tekivad mullid, mis liiguvad vedeliku pinna poole. Mull jõuab pinnale siis, kui temas oleva gaasi rõhk on suurem kui välisõhurõhk pluss mulli kohal oleva vedelikusamba rõhk. Kui mullid jõuavad vedeliku pinnale, siis vedelik keeb. Seda soojust, mis tuleb vedelikule juurde anda aurumullide tekitamiseks keemistemperatuuril, nimetatakse **keemissoojuseks**.

Keemisel eralduvad keskkonnast kõige kiiremad molekulid. Keemise säilitamiseks tuleb vedelikule pidevalt soojust juurde anda. Keemistemperatuuril on soojuse äravool ja juurdevool tasakaalus ja temperatuur ei muutu.

On veel teisi olekumuutusi. Üleminekut tahkest olekust vedelasse nimetatakse **sulamiseks**, aga üleminekut vedelast olekust tahkesse – **tahkestumiseks**. Üleminekut tahkest olekust gaasilisse nimetatakse **sublimatsiooniks**, aga üleminekut gaasilisest olekust tahkesse – **härmatumiseks**.

Sulamisel, aurustumisel ja sublimatsioonil tuleb ainele soojust juurde anda.

Tahkestumisel, kondenseerumisel ja härmatumisel eraldub ainele soojust. See on ka arusaadav, sest esimese muutuste rühma korral peavad molekulid hakkama kiiremini liikuma, et minna teise olekusse. See eeldab energia (soojuse) juurdesaamist. Teise rühma korral molekulide keskmine kiirus väheneb ja ülejääv energia eraldub soojusena.

Probleemid

Vedelikus valitsevat rõhku seletatakse ülemiste vedelikukihtide pealesurumisega alumistele ja kehtib seos $p = \rho gh$. Kas gaasi rõhk ei olene gaasisamba kõrgusest? Gaaside korral räägitakse molekulide põrgetest anuma seinaga ja nii avaldatavast jõust. Kas vedeliku molekulid ei põrku anuma seinaga ja ei avalda anuma seinale rõhku?

Ülesanded

1. Aine tihedus $\rho = m/V$. Kas on õige öelda, et tihedus on võrdeline massiga ja pöördvõrdeline ruumalaga?
2. Aine tihedus on tahkes olekus 1000 korda suurem kui gaasilises olekus. Kuidas võib sellest järeldada, et gaasilises olekus on molekulide vahelised kaugused 10 korda suuremad kui tahkes olekus?
3. Miks tehakse katlamajade korstnad kõrged?
4. Kuidas kontrollida, et vedelik aurustumisel tõepoolest jahtub?
5. Kuidas vedeliku aurustumise abil on võimalik tõestada, et vedeliku molekulid liiguvad erinevate kiirustega?
6. Kuidas suhtuda reklaami, mille kohaselt lõhnaõli lõhn säilib kaua, sest see lõhnaõli ei aurustu?
7. Vee jäätumisel eraldub samapalju soojust, kui on vaja sama koguse jää sulatamiseks. Kuidas on siis võimalik, et talvel veekogud siiski jäätuvad?
8. Kas vesi hakkab keema kausis, mis ujub keeva veega potis?

9. Kuidas saab saunas väliste tunnuste järgi aru, millises torus on kuum ja millises külma vesi?
10. Miks võib niiske sõrmega ohutult katsuda, kas triikraud on tuline?
11. Puhume kõrre otsa seebimulli. Kui puhumise lõpetame, hakkab seebimull kokku tõmbuma. Miks?
12. Mispärast käterätte ei tehta villasest riidest?
13. Kas on õige öelda, et vee tungimine peenikesse torusse on põhjustatud kapillaarsusest?

Tarkusi

- Gaas täidab alati kogu ruumi.
- Vedelik ja gaas annavad rõhku edasi igas suunas ühtviisi.
- Mida suurem on molekulide keskmine kiirus, seda kõrgem on temperatuur (ja vastupidi).
- Vaba vedeliku pind püüab alati võtta minimaalse suuruse.
- Märgrav vedelik tungib kapillaari, mittemärgrav ei tungi.
- Kui oleku muutusel molekulide keskmine energia suureneb, siis soojus neeldub (ja vastupidi).

15. Võnkumine, lained, heli

Võnkumine

Mis on **võnkumine**? See on korrapärane edasi-tagasi liikumine ühe punkti ümber piki kindlat trajektoori.

Probleem. *Ka ekspressbuss liigub korrapäraselt ümber liini keskpunkti edasi-tagasi piki kindlat trajektoori. Kas liinibuss võngub?*

Võnkumiste uurimiseks on sobiv kasutada mingit **pendlit**. Selleks võib olla näiteks niidi otsa riputatud raske keha. Kui niit on pikk ja väheveniv, keha aga väike ja raske, siis oleme valmistanud **matemaatilise pendli** mudeli.

Kui viime pendli tasakaalust välja ja laseme selle lahti, siis hakkab pendel võnkuma. Raskusjõud püüab pendlikeha viia Maa keskpunktile võimalikult lähedale, kus oleks selle potentsiaalne energia minimaalne. Selline olukord vastab pendli vertikaalsele asendile. Kuid sinna jõudes on pendlil suur kiirus ja ta kihutab inertsitõttu sellest asendist läbi ning tõuseb teisel pool peaaegu samale kõrgusele kui oli alguses. Pärast täpselt samale kõrgusele ta muidugi ei tõuse, sest õhutamise ületamiseks tuleb teha tööd ehk kulutada energiat. Mingi arvu võngete järel jääb pendel siiski vertikaalselt rippu ja seda asendit nimetatakse pendli **tasakaalu asendiks**.

Võnkumise perioodilisust kirjeldatakse samade suurustega nagu pöörlemist: aega, mis kulub pendlil ühe täisvõnke tegemiseks (liikumiseks “sinna ja tagasi”) nimetatakse **perioodiks**, selle pöördväärtust aga **sageduseks**.

Neile suurustele lisanduvad veel **hälve, amplituud ja faas**.

Võnkumisi kirjeldab võnkumiste võrrand. Meie vaatleme ainult selliseid võnkumisi, kus hälve muutub ajas siinus- või koosinusfunktsiooni kohaselt. Selliseid võnkumisi nimetatakse **harmoonilisteks võnkumisteks**:

$$x = x_0 \sin(2\pi ft) = x_0 \sin \omega t.$$

Hälve x näitab võnkumise keha kaugust tasakaaluasendist. Hälbe suurus on määratud faasiga (siinusfunktsiooni argument).

Maksimaalset hälvet x_0 (suurimat kaugust tasakaaluasendist) nimetatakse **amplituudiks**. Kui võnkumiste amplituud ei muutu, siis öeldakse, et võnkumised ei **sumbu**. Tuleb kindlasti rõhutada, et hälve muutub kogu aeg, aga amplituud võib olla ka muutumatu (või selleks lugeda, kui sumbumine on väike).

Faasi mõiste on füüsikas üks raskemini omandatavaid mõisteid. Ja sellel on vähemalt kaks põhjust. Esiteks ei saa faasi otseselt mõõta nagu amplituudi või hälvet. Seda tuleb arvutada, näiteks nurksageduse ja aja järgi (ωt). Faas on harmoonilise funktsiooni (siinus- või koosinusfunktsiooni) argument ja seda mõõdetakse radiaanides. Kui võnkumise mudeliks on ühtlaselt ringjoonel liikuva masspunkti variprojektsioon, siis on faas võrdne aja t jooksul raadiuse poolt läbitud nurgaga. Teiseks on raske ette kujutada, et ühtlaselt kasvav suurus ωt kirjeldab perioodilist liikumist.

Selleks, et kujundada faasi mõistet ja näidata, kuidas ühtlaselt kasvav suurus ωt kirjeldab perioodilist liikumist, on soovitatav teha läbi vastav arvutus koos graafiku konstrueerimisega.

Kodutöö. Leiada harmooniliselt võnkumise punktmassi hälbed x (kaugused tasakaaluasendist), kui $\omega = 10 \text{ rad/s}$ ja võnkeamplituud $x_0 = 2 \text{ cm}$. Väärtused leiame iga $0,1 \text{ s}$ järel 2 s kestel. Tulemus esitada graafiliselt.

Küsimus: Millest oleneb matemaatilise pendli võnkeperiood?

See võiks oleneda pendli **pikkusest**, pendlikeha **massist** ja **võnkeamplituudist**, sest muud pole pendli võnkumise korral võimalik muuta. Vastuse leidmiseks korraldame **katse**.

Tulemuseks saame:

- 1) Pikema pendli võnkeperiood on suurem. Kui pendel on pikem, siis peab pendlikeha läbima edasi-tagasi liikudes pikema tee kui lühema pendli korral. See aga võtab rohkem aega.
- 2) Pendli võnkeperiood ei olene pendlikeha massist. Kuigi suurema massi korral on kehale mõjuv raskusjõud suurem, ei suurene sellepärast veel keha kiirendus, sest see on määratud raskusjõu ja massi suhtega.
- 3) Pendli võnkeperiood ei sõltu oluliselt amplituudist, kuigi mõnikord õnnestub mõõta teatavat kasvu algamplituudi suurenedes. Teoreetiliselt on välja arvatud, et perioodi sõltuvus nurkhälbest α on keeruline funktsioon:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left\{ 1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4}\right)^2 \sin^4 \frac{\alpha}{2} + \dots \right\}.$$

Praktikas kasutatakse ka **vedrupendlit**, milleks on vedru otsas rippuv keha.

Vedrupendli võnkeperiood sõltub pendlikeha massist ja on seda suurem, mida suurem on pendlikeha mass. Põhjus seisneb selles, et nüüd pole pendlikeha liikumapanevaks jõuks mitte raskusjõud, vaid elastsusjõud.

Laine

Vaatleme ainult **mehaanilisi laineid**, mis on mingi keskkonna võnkumiste edasikandumine ruumis. Kui panna mingi elastse keskkonna osake võnkuma, siis paneb see endaga kaasa võnkuma ka oma naaberosekesed, mis on temaga elastsusjõudude kaudu seotud. Need panevad omakorda võnkuma oma naabrid ja nii hakkabki võnkumine keskkonnas levima. Laine ei kannu endaga keskkonna osakesi kaasa, need võnguvad ühes kindlas piirkonnas. Seda saab jälgida, kui tekitada veepinnal laineid ja visates lainetesse puulehe, siis see õõtsub üles-alla, aga lainega kaasa ei liigu.

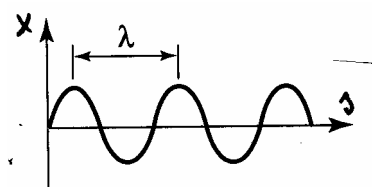
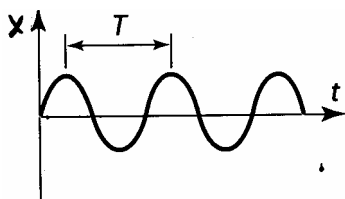
Kas siis laine liikumisega midagi ruumis edasi ei kandugi? Kandub küll: lained kannavad edasi energiat. Kust see energia tuleb? Laineallika võnkuma panemiseks tuleb teha tööd: nihutada keskkonna osakesi. Tehtud töö paneb osakesed liikuma, andes neile kineetilist energiat, mis kandubki koos lainega ruumis edasi. Lainete energiast annab tunnistust mereleinete purustav toime kaldakindlustustele või pankrannikule.

Mehaaniline laine saab levida ainult keskkonnas, kas gaasis, vedelikus või sellel pinnal ning tahkes aines. Vaakumis elastsuslaine ei levi, sest seal pole osakesi, mille vahel mõjuksid elastsusjõud.

Katse. *Kuulata äratuskella tirinat vaakumpumba kupli all siis kui kuplis on õhk ja siis, kui õhk on välja pumbatud.*

Võnkumised saavad levida kahel erineval viisil. Ühel juhul võnguvad osakesed risti laine levimise suunaga. Siis on tegemist **ristlaine**ga. Teisel juhul võnguvad osakesed piki laine levimise suunda. Sel juhul tegemist **pikilaine**ga.

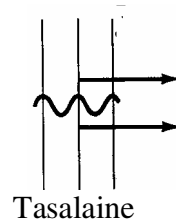
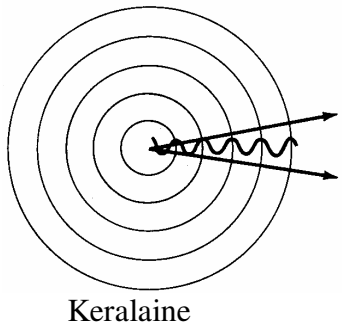
Laine on perioodiline nii ajas kui ruumis. Toodud **graafikutel** on x hälve, t aeg, s kaugus laineallikast, T periood ja λ lainepikkus.



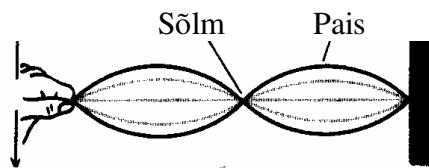
Vasakpoolset graafikut aitab ette kujutada veelainete mõõtmine mõõdulati abil. Toetame mõõdulati veekogu (näiteks mere või järve) põhja ja mõõdame kindlate ajavahemike järel veetaseme kõrguse x nullnivoo suhtes, milleks on veetase siis, kui veepind ei laineta. Kui tulemused graafikuna esitame, saamegi toodud graafiku.

Parempoolse graafiku saaksime, kui pildistaksime küljelt neid samu laineid ja mõõdaksime ära veetaseme kõrgused erinevatel kaugustel mõõtelatist.

Laineid liigitatakse ka nende lainepinna kuju järgi. **Lainepinnaks** nimetatakse pinda, mille punktid on kõik levinud ühesuguse aja ja mis võnguvad samas faasis. Pinna kuju järgi räägitakse **keralainetest** (lainepinnaks on sfäär ehk kerapind) ja **tasalainetest** (lainepinnaks on tasand). Kuna joonistel ei saa kujutada kerapinda ega joonisega ristiolevat tasandit, siis kasutatakse nende tähistamiseks ringjoont või sirget kriipsu. Lainepindade kaugus üksteisest on võrdne lainepikkusega λ . Lainepinna normaali nimetatakse **kiireks**.

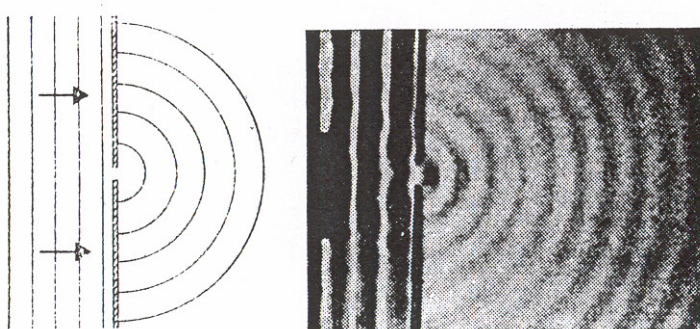


Laineid võib jagada ka kulgevateks ja seisvateks. Kui **laine kuju** liigub ruumis, on tegemist **kulglainega**, kui laine kuju püsib ruumis paigal, on tegemist **seisulainega**. Seisulainet saab tekitada näiteks kummipaela võngutamisel, kui paela teine ots on kinnitatud jäiga seina külge. Sel juhul peegeldub laine kinnituskohalt tagasi. Minev ja tulev laine liituvad ning selle tulemusel tekib liitlaine, milles on maksimaalse amplituudiga võnkuvad kohad (**paisud**) ja paigalseisvad kohad (**sõlmed**). Selliselt võnguvad ka pillikeeled.



Katse. Tekitada pika (ca 5 – 6 m) kummipaela abil seisulaine ja lasta õpilastel paelast kinni võtta sõlme ja paisu kohalt.

Kulglained võivad kanduda tõkete taha. Seda nähtust nimetatakse **difraktsiooniks**.

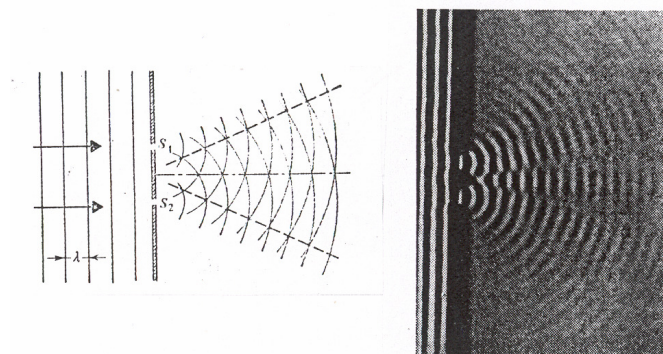


Joonisel on vasakul toodud katse skeem, mis näitab, kuidas tasalaine levib pärast ava läbimist keralainena, mis on kandunud ava servade taha. Paremal on foto sellest katsest lainevannis.

Sellist lainete käitumist saab seletada **Huygensi printsiibiga**, mille kohaselt igat lainepinna punkti võib vaadelda kui uut keralaine allikat.

Kulglained võivad kohtudes liituda. Lainete liitumist nimetatakse **interferentsiks**. Liitumisel võivad lained üksteist tugevdada või nõrgendada. Tulemus oleneb lainete faaside vahest: kui liituvad lained on samas faasis, siis nad tugevdavad teineteist, kui

nad on aga vastandfaasis, siis nõrgendavad. Kui liituvad **koherentsed lained** (sama sageduse ja muutumatu faasidevahega lained), siis on liitlaine hälve võrdne liituvate lainete hälvete algebralise summaga.



Joonisel on vasakul toodud tasalaienete liitumise skeem kahest avast läbi minnes. Paremal on foto lainete liitumisest lainevannis. Pöörake tähelepanu aladele, mis asuvad selgelt eristuvate lainete vahel. Need on kohad, kus lained üksteist kustutavad. Difraktsioon ja interferents tulevad seda paremini esile, mida väiksemad on avad või tõkked lainete teel.

Lainet iseloomustavad kõik samad suurused, mis võnkumistki. Neile lisanduvad **lainepikkus** ja võnkumise levimise kiirus ehk **laine kiirus**.

Lainepikkus on piki laine levimise suunda mõõdetud kaugus kahe samas võnkeolekus oleva naaberpunkti vahel. Näiteks kaugus kahe naabermaksimumi vahel.

Kuidas leida laine levimise **kiirust**? Kiirus on võrdne keha poolt ajaühikus läbitud teepikkusega. Aga laine on ju pidev, kus seal keha on? Polegi. Mõõtmiseks tuleks lainele “märk külge panna” ja mõõta selle märgi liikumise kiirust. Tegelikult ongi lainel märgid küljes: need on iseäralikud punktid, näiteks laine hari või põhi. Kui lainehari läbi s meetrit t sekundiga, siis on kiirus $v = s/t$.

Kui $t = T$, siis $s = \lambda$ ja $v = \lambda T$.

Võnkumised levivad keskkonnas sellepärast, et keskkonna molekulid on omavahel seotud. Mida tihedam on keskkond, seda lähemal on naabermolekulid, mis annavad võnkumisi edasi ja seda suurem on laine kiirus.

Heli

Alustame terminoloogilise täpsustusega **heli** ja **hääle** kohta: inimesele kuuldavat heli nimetatakse hääleks.

Heli tekib mitmeti. Seda võib tekitada näiteks inimene, pillikeel, õlitamata uksehing, automootor. Kuid mis on nende nähtuste korral ühine, mis määrab ära heli tekkimise? Sellele küsimusele polegi lihtne vastata, sest heli me kuuleme, aga ei näe mis toimub. Sellepärast tuleks teha mingi selline **katse**, kus me teeme midagi niisugust, mille tulemusena tekib heli ja millel on üks kindel põhjus, mida me näeme.

Selliseks katseks on vaja ca 30 cm pikkust joonlauda, soovitatavalt metallist. Hoiame seda ühest otsast ja painutame teist otsa ning laseme selle lahti. Joonlaud hakkab võnkuma, aga heli me ei kuule. Nüüd surume joonlauri ühe käega vastu lauda nii, et üle laua ääre jääks ca 10 .. 15 cm joonlauast. Painutame nüüd joonlauda ja laseme lahti. Joonlaud hakkab jälle võnkuma, kuigi seda on juba raskem märgata, aga me kuuleme ka heli. Järelikult heli tekitab võnkumine.

Probleem. Miks me ei kuulnud käes hoitud joonlaua võnkumisel heli?

Heli allikas võngub, aga kuidas heli allikast meie kõrva jõuab? Ehk teisiti: kuidas võnkumised ruumis levivad? On kindlaks tehtud, et heli levib lainena. Selle näitamiseks tuleks teha jälle **katse**. Aga missugune? Sageli arvatakse, et kui mikrofoni abil manada ostsilloskoobi ekraanile laineline joon, siis see ongi helilaine kujutis. See on aga väärarvamus. Ekraanil näeme mikrofoni membraani võnkumise "jälge". See ütleb, et ka mikrofoni membraan võngub nagu heli allikas, aga kuidas võnkumised ruumis edasi kandusid, ei tea! Võib ainult arvata, et see pidi ka mingi perioodiline protsess olema.

Heli levib peamiselt pikilainena ja selle katseline demonstreerimine pole sugugi lihtne.

Heli lainelist olemust saab tõestada kaudselt, kasutades katsetulemusi ja loogikat. Kuna heli korral esineb nii difraktsioon kui interferents, siis peab heli korral olema tegemist lainetega. Kaudne tõend on ka vees sõrme üles-alla võngutamine, mis tekitab laineid ja paneb ka eemal veosakesed võnkuma.

Probleem. Kuidas demonstreerida heli lainelist olemust?

Uurime, millest oleneb **heli kõrgus**. Selleks on meil kaks võimalust: kas muuta heli allika sagedust või amplituudi.

Kordame katset metalljoonlauaga. Hoiame joonlaua võnkumise osa pikkuse muutumatuna ja ükskord paneme selle võnkuma suure amplituudiga ja teinekord väikese amplituudiga. Mõlemal korral kuuleme ühesuguse kõrgusega heli. Järelikult heli kõrgus ei olene võnkeamplituudist.

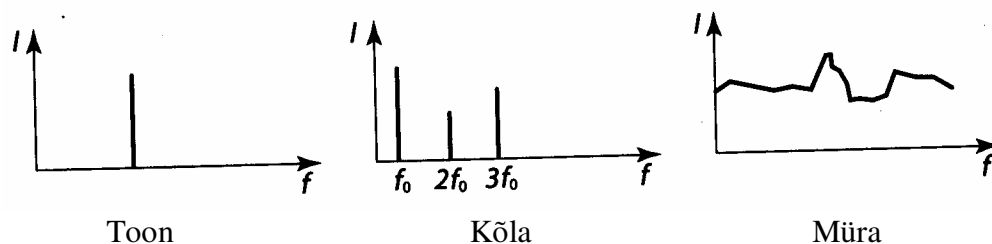
Kui joonlaua võnkumise osa pikkust muuta, näiteks üha lühendada, siis järjest halvemini on näha võnkuvat joonlaua osa, sest võnkesagedus suureneb. Sellega kaasneb ka heli kõrguse tõus. Sama seaduspärasust võib täheldada ka automootori korral, kui tõsta tuure (seda näitab tahhomeeter), siis muutub ka mootori hääl kõrgemaks.

Järelikult tundub heli seda kõrgem, mida suurem on võnkesagedus.

Kui on võimalik kasutada monohordi või mõnd keelpilli, siis saab näidata, et heli on seda kõrgem, mida lühem ja peenem on heli tekitatav pillikeel. Sel juhul on keel kerge, inertsus väike ja sagedus suur. Pikkadel ja jämedatel keeltel on suurem mass ja inertsus ning vastvalt ka võnkesagedus väiksem.

Heli kõrgus oleneb ka keelt pingutatavast jõust. Pillikeele pingutamine tõstab tekkiva heli sagedust.

Sageduste alusel jaotatakse helisid kolmeks: **toon**, **kõla** ja **müra**. Allpool on toodud nende helide spektrid. **Joonistel** on I heli intensiivsus (ajajuhikus pinnajuhikut läbinud helienergia hulk) ja f heli sagedus.



Toonile vastab ainult üks võnkesagedus.

Kõla on muusikaline heli, millele vastab mitu võnkesagedust, mis kõik on põhisageduse f_0 täisarv kordsed ehk **ülemtoonid**.

Müra on heli, millele vastab igasuguse sagedusega ja muutuva intensiivsusega helisid.

Pillikeel või võnkuv õhusammas, mis tekitab kõla, võngub mitme sagedusega samaaegselt. Kui võnkuva keha pikkus on l , siis on tekkivad sagedused määratud seosega:

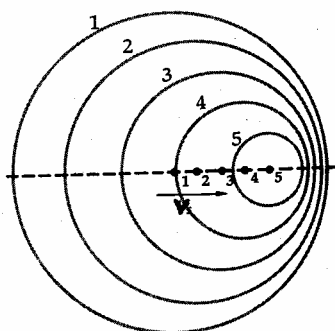
$$f_k = k \frac{v}{2l}, \text{ kus } k = 1, 2, 3, \dots \text{ ja } v \text{ on heli kiirus võnkivas kehas. Kui } k=1, \text{ siis}$$

räägitakse **põhitoonist**, teised helid on **ülemtoonid**. Põhitoon koos ülemtoonidega moodustavad helispektri ehk **tämbri**.

Heli kõrgus oleneb ka sellest, kas allikas liigub vastuvõtja suhtes või ei. Allika lähenemisel vastuvõtjale on heli kõrgem ja eemaldumisel muutub madalamaks. Seda võib märgata näiteks sireeniga sõitva kiirabi auto möödumisel.

Nähtuse mõistmiseks kujutame ette, et heliallikas saadab välja lühikesi perioodilisi heliimpulsse. Kui allikas läheneb, siis impulsside vaheaeg lüheneb, sest kahe impulsi vahepeal liigub allikas vastuvõtjale lähemale. Perioodi lühenemisele vastab sageduse suurenemine ja heli kõrgenemine. Mida suurem on kiirus, seda kõrgemaks muutub heli.

Heli kõrguse olenevuse allika liikumisest avastas Christian Doppler 1842.a. ja seda nähtust nimetatakse **Doppleri efektiks**. Nähtust aitab mõista järgnev **joonis**.



Joonisel on kujutatud heliallika asukoht ja lainepinnad iga perioodi järel. Allikas liigub paremale kiirusega v . Jooniselt on näha, et liikumise suunas lainepikkus (kaugus lainepindade vahel) väheneb ja vastassuunas lainepikkus kasvab. See tähendab, et liikumise suunas heli sagedus kasvab ja sellega koos ka heli kõrgus, sest sagedus $f = v/\lambda$.

Helil on omadus panna kaasa helisema teisi heliallikaid, mis tekitaksid sama sagedusega heli. Seda saab demonstreerida kahe helihargi abil. Asetame kaks ühesugust heliharki üksteise lähedale. Paneme ühe hargi helisema ja seejärel summutame selle heli käega harki puudutades. Kuid kuuleme heli ikka edasi, sest teine hark on ka võnkuma hakanud. Kui ka seda harki puudutada, siis heli kaob. Kaasahelisemise põhjuseks on **resonants**. See seisneb keha võnkeamplituudi suurenemises, kui sundiva jõu sagedus langeb kokku kehale omase omavõnkesagedusega (sagedus, millega keha hakkab võnkuma, kui see tasakaalust välja viia ja siis vabaks lasta).

Heli kiirus õhus on umbes 340 m/s. Kiirus oleneb õhu temperatuurist. Mida madalam on temperatuur, seda väiksem on heli kiirus. Absoluutse nulli korral on heli kiirus ka null, sest molekulid ei liigu ja ei anna võnkumisi edasi. Heli kiirust saab ise määrata **kaja** abil. Kaja on heli peegeldumine kaugelt suurelt tõkkelt (mets, mägi).

Millest oleneb heli **valjus**? Selles osas on meil vist elukogemused olemas. Kui tahad trummist kõvemalt matsu saada, tuleb kõvemini lüüa, kui tahad, et sinu koputust uksele kuulda paremini, tuleb lüüa kõvemini. Mida tähendab füüsika keeles *kõvemini*? See tähendab, et tekitatakse suurem deformatsioon, millega kaasneb suurem võnkeamplituud.

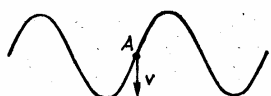
Heli on seda valjem, mida suurem on amplituud, sest siis on suurem ka laine energia.

Koduprojekt

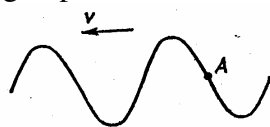
Määrata heli kiirus õhus, kasutades kaja.

Ülesanded

1. Äikese korral saab lihtsalt määrata, kui kaugel välku lööb. Selleks tuleb mõõta aeg välgu nägemise ja müristamise alguse vahel. Seda võib teha ka sekundite lugemise teel. Saadud sekundite arv jagatakse kolmega ja saadakse välgu löömisekaugus kilomeetrites. Põhjendage meetodit.
2. Asetame äratuskella vaakumpumba kupli alla. Kui sealt õhk välja pumbata, siis me enam kelle tirinat ei kuule, aga näeme kella endiselt. Mida see ütleb heli ja valguse levimise kohta?
3. Soojemas õhus on heli kiirus suurem kui külmemas õhus. Miks?
4. Kaja on alati nõrgem kui seda tekitav heli. Miks?
5. Võnkuvat heliharki käes hoides on heli alati nõrgem kui selle jalga vastu lauda surudes. Miks? Kas sellest oleneb ka helisemise kestus?
6. Millises suunas liigub laine?



7. Millises suunas liigub punkt A, kui laine liigub vasakule?



8. Kui kätt lehvitada, paneme ka õhu võnkuma, aga mingit heli me ei kuule. Miks?
9. Miks ma oma toas hõisates ei kuule kaja?
10. Millised kaks viga esinevad ulmefilmides, kus on näha kosmoses toimuvaid plahvatusi millega kaasneb müra?
11. Kas nii saab lainet muuta nähtavaks, kui pistame heliseva helihargi otsapidi veekaussi ja jälgime veepinnale tekkivaid laineid?
12. Kui suur on kella sekundi-, minuti- ja tunniosuti sagedus?
13. Doppleri efekt muudab heli kõrgust olenevalt kiirusest ja liikumissuunast. Kas: a) efekt esineb ka siis, kui me ei asu heliallika liikumissuunal? b) Kui heliallikas seisab ja meie liigume allika poole?

14. Kui me kuuleme heli kõrguse pidevat tõusu heliallika lähenemisel, siis mida võib öelda allika liikumiskiiruse kohta?
15. Miks heli liigub raudtee rööpas kaugemale kui õhus?

Tarkusi

- Ripuvad keha võib vaadelda matemaatilise pendlina.
- Mida pikem matemaatiline pendel, seda pikem võnkeperiood.
- Matemaatilise pendli periood ei olene pendlikeha massist ega algamplituudist.
- Laine levib tihedamas keskkonnas kiiremini.
- Laine ei kannu keskkonda edasi.
- Heli allikaks on võnkuv keha.
- Heli levib ainult keskkonnas.
- Tihedamas keskkonnas on heli kiirus suurem.
- Mida madalam temperatuur, seda väiksem on heli kiirus gaasis; vedelikes ja tahkistes heli kiirus temperatuurist ei sõltu.
- Mida suurem sagedus, seda kõrgem heli.
- Mida suurem amplituud, seda valjem heli.

16. Elekter ja magnetism

Elektrostaatika

Elektrinähtustega tutvumist alustame hõõrdeelektrist, näidates laetud kehade vahelisi mõjusid.

Katse. *Statiivide küljes ripuvad niitide otsas alumiiniumfooliumist silindrid, mida saab elektriseeritud kehade laadida. Esineb nii silindrite tõmbumist kui tõukumist. Kui on sultaneid ja elektrofoormasin, siis saab neid samadeks demodeks kasutada. Tuleks näidata vastastikmõju olenevust kehade laengu märgist, kehadevahelisest kaugusest ja laengu suurusest.*

Probleem. *Kuidas me teame, et on olemas ainult kahte liiki laenguid?*

Küsimused. *Miks peab kehi elektriseerimiseks hõõruda? Kas hõõrumisel laaduvad mõlemad kehad? Kui laaduvad, kas siis sama- või erimärgiliselt? Kas ühesugusest materjalist kehade hõõrdumisel ka kehad elektriseeruvad?*

Kuidas leida neile küsimustele vastused? Tuleks teha katseid, aga milliseid?

Hõõrdeelektri uurimine. *Katseline vastuste otsimine eelmistele küsimustele.*

Kui katsed läbi teha, siis selgub, et mõlemad kehad laaduvad ja sealjuures erimärgiliselt. Samast materjalist kehade hõõrdumine ei põhjusta elektriseerumist.

Miks tuleb kehasid elektriseerimiseks hõõruda?

Hõõrumisel puutuvad kehad mõnedes kohtades üksteisega väga lähedalt kokku ja osa laetud osakesi võib minna ühelt kehalt teisele. Liikuvateks laenguga osakesteks on kehas **elektronid**, mis kannavad negatiivset elektrilaengut. Positiivset laengut

kandvad osakesed, **prootonid** on aatomite tuumades kinni ja neid sealt lihtsalt kätte ei saa.

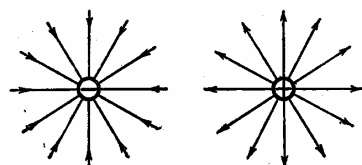
Kuidas üks laetud keha “saab aru”, et tema lähedal on teine laetud keha? Elektrivälja vahendusel.

Elektrivälja saab teha “nähtavaks” elektrofoormasina ja õlis oleva manna abil.

Elektrivälja polariseerib mannaterakesi ja need asetuvad piki välja jõujooni.

Polariseerimine tähendab siin, et mannaterakeses olevad polaarsed molekulid (dipoolid) pööravad ennast piki elektrivälja sihti.

Jõujooneks nimetatakse mõttelist joont, mis näitab elektrivälja asetatud laengule mõjuva jõu suunda.



Punktläengute jõujooned

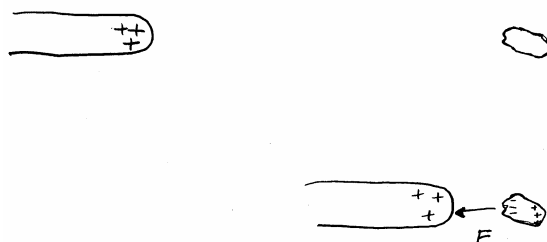
Üksiku **punktläengu** korral on jõujooned radiaalsed sirged. Kindla laengu suuruse korral on joonte arv konstantne. Elektrivälja on seda tugevam, mida tihedamalt on jõujooni. Punktläengust kaugemal on jõujooni hõredamalt. Kui arendame analoogilist mõttekäiku gravitatsiooniga (vt. p.9), jõuame tulemuseni, et punktläengu elektrivälja tugevus $E \sim 1/r^2$.

See tähendab, et väli nõrgeneb välja allikast kaugenedes pöördvõrdeliselt kauguse ruuduga.

Kuna samanimelised laengud tõukuvad, siis peaks laetud keha korral laengud kogunema kehade välispinnale, sest siis on nad üksteisest maksimaalsel võimalikul kaugusel. Kas see nii on, kontrollime katse abil.

Katse. Laeme õõnsa silindri, mis asub ühe elektrooskobi otsas ja võtame isoleerkäepidemest metallpulgaga laengut kord silindri seest, kord väljast ja kanname teisele elektrooskoobile üle. See õnnestub ainult välispinnalt laengut võttes.

Elektriseeritud keha tõmbab ligi ka laadimata kehasid, näiteks paberitükikesi. Seda seletatakse **elektrostaatilise induktsiooni** nähtusega. Laetud keha elektrivälja nihutab laadimata kehas olevad vastasmärgilised laengud pisut endale lähemale (vt **joonist**) ja samamärgilised kaugenemale. Sellega tekib laadimata keha ja laetud keha vahel tõmbejõud. Tõukejõud ei saa aga kuidagi tekkida.



Sellest erimärgiliste laengute vastassuunalisest nihkumisest elektriväljas tuleb ka **dielektrikute** nimetus, mis algselt oli *diaelektrik* (*dia* kr. k. – eemale, lahku).

Katse. Ühendame laetud ja laadimata elektrooskoobi üks kord metallpulgaga ja teine kord puupulgaga.

Ükskord läheb laeng üle, teinekord mitte. Ilmselt on ainetel erinevad elektrilised omadused. Ühed ained juhvivad elektrit, teised mitte. Esimesi nimetataksegi **juhtideks** (näiteks metallid), teisi nimetatakse **isolaatoriteks** (näiteks puit). Erinevad omadused tulenevad ainete ehitusest: metallides on palju vabu elektrone (iga aatomi valentselektronid on muutunud vabadeks elektronideks). Näiteks 1 cm^3 metalli sisaldab ca $10^{23} \dots 10^{24}$ vaba elektroni.

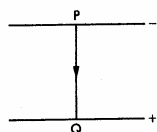
Isolaatorites (dielektrikutes) on aga vabu laengukandjaid võrreldes metallidega väga vähe. Erinevused on rohkem kui miljardikordsed (10^9).

Koduprojekt

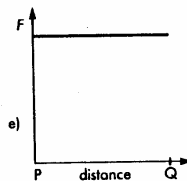
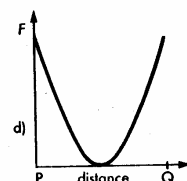
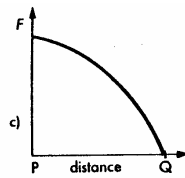
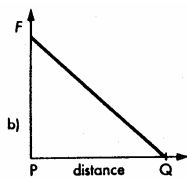
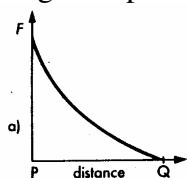
Uurida, kuidas mõjutab kraanist vaikselt nirisevat veejuga selle lähedusse viidud laetud keha (näiteks elektriseeritud kamm). Anda nähtustele seletus.

Ülesanded

1. Kui keha omandab positiivse laengu, mis juhtub siis keha massiga? Aga negatiivse laengu korral? NB! Küsimus pole selles, kas muutust on võimalik mõõta.
2. Head soojusjuhid on ka head elektrijuhid. Miks?
3. Hõõrume täispuhutud õhupalli vastu oma kuivi ja puhtaid juukseid ning asetame siis palli vastu ust või seina. Pall jääb sinna kinni. Miks?
4. Kas on võimalik olukord, kus kahe samanimeliselt laetud keha vahel mõjuv tõukejõud on võrdne nulliga?
5. Kaks võrdse suurusega laengut asuvad teineteisest teatud kaugusel. Kummal juhul on väljatugevus neid ühendava sirge keskpunktis suurem – kas siis kui laengud on erinimelised või siis, kui nad on samanimelised?
6. Kaldpinnalt allalibisev keha elektriseerus (hõõrdeelekter). Kas see avaldab mõju libisemise kiirusele?
7. Elektrivälja jõujooned ei löiku kunagi. Miks?
8. Elektrostaatika katsed õnnestuvad hästi kuiva õhuga ruumis. Miks?
9. Negatiivselt laetud osake viiakse negatiivselt laetud plaadilt punkti P positiivselt laetud plaadile punkti Q (vt. joonist).



Milline järgmistest **graafikutest** kirjeldab laengule mõjuva jõu sõltuvust olenevalt kaugusest punktist P?



11. Kuidas seletada, et laetud kehad alati tõmbavad laadimata kehasid, aga kunagi ei tõuka?
12. Mille poolest on gravitatsiooniväli ja elektriväli sarnased, mille poolest erinevad?

Elektrivool

Elektrivooluks nimetatakse laengute korrapärasest liikumist. Sellepärast pole õige öelda, et “elektrivool voolab juhtmes”. Vool ei voola, vaid voolab see, mis liigub (näiteks vesi, elektriliselt laetud osakesed) ja seda liikumist võib nimetada vooluks. Elektrivoolu liigitatakse **alalisvooluks** ja **vahelduvvooluks**. Alalisvoolu korral liiguvad **vabad laengukandjad** lisaks soojusliikumisele ka kindlas suunas (triivivad). Vahelduvvoolu korral võnguvad vabad laengukandjad lisaks soojusliikumisele kindla sagedusega. Mõlemal juhul paneb vabu laengukandjaid liikuma elektriväli.

Alalisvool

Püüame alalisvoolu ette kujutada. Selleks kasutame mudelit, kus laetud osakesteks on ujujad jões. Siin esineb nii suunatud liikumine (kõik ujujad triivivad allavett) kui ka soojusliikumine (ujujad ujuvad juhuslikes suundades).

Voolutugevus: analoogia vee voolamisega jões. Veevoolu tugevus on seda suurem, mida rohkem vett ajaühikus jõe ristlõikest läbi läheb ehk mida kiiremini vesi voolab. Elektrivoolu korral on voolutugevus suurus, mis näitab ajaühikus juhtme ristlõiget läbinud laengu hulka. See on seda suurem, mida suurem on laengukandjate triivikiirus (suunatud liikumise kiirus).

Küsimus: *kui kaua võtab elektronil aega, et jõuda auto aku ühelt klemmilt läbi esilaternaga tagasi teisele klemmile? a) vähem kui 1 ms; b) umbes 1 s; c) rohkem kui 15 min.⁹*

Voolu tekkimise tingimused: peavad olema elektriväli ja vabad laengukandjad.

Voolutugevus oleneb E -vektori suurusest, sest mida tugevam elektriväli, seda suurem jõud mõjub laengukandjatele ja seda kiiremini need liiguvad. Kuid E -vektor pole hea suurus voolu kirjeldamiseks, sest tal on suund, mida pole voolu tugevuse korral vaja. Voolu suuna määrab ära juhe ja laengu märk. Sellepärast kasutatakse voolu kirjeldamiseks **potentsiaali** mõistet: potentsiaal = energia/laeng. Valemina avaldub potentsiaal φ kujul

$$\varphi = W_p/q,$$

kus W_p on laengu potentsiaalne energia ($W_p = qEd$, kus E on väljatugevus ja d laengu kaugus energia nulltasemest). Siin on suur analoogia raskusväljas oleva keha potentsiaalse energia avaldisega $E_p = mgh$.

Raskusväljas on keha võime tööd teha seda suurem, mida kõrgemal Maa pinnast keha asub. See on kergesti ettekujutatav, sest mida kõrgemale Maast keha tuleb tõsta, seda rohkem peame vaeva nägema (füüsika keeles: tööd tegema). Sellega suurendame keha potentsiaalset energiat, sest vabanedes teeb see keha just samapalju tööd, kui me ta ülestõstmiseks tegime. Võib ka öelda, et vabaks lastud keha hakkab liikuma väiksema potentsiaaliga asendi poole.

Ka elektriväljas oleneb potentsiaal laengu asukohast. Näiteks positiivne laeng omab patareil negatiivse pooluse lähedal väiksemat potentsiaali kui sellest kaugemal. Potentsiaalide vahet nimetatakse **pingeks**.

⁹ Vihje: Kasutage järgmisi lähteandmeid: $I = 5 \text{ A}$, $d = 3 \text{ mm}$, $n = 8 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$, $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, $I = enSv$.

Homogeense välja korral eksisteerib lihtne seos väljatugevuse ja pingega vahel: $E = U/d$. Teades näiteks kondensaatori plaatidevahelist pinget ja kaugust plaatide vahel, saame leida väljatugevuse. Või vastupidi, teades väljatugevust ja punktide vahelist kaugust, saame leida pinget nende punktide vahel.

Milleks seda vaja teada on?

Näiteks **elektrivoolu töö** arvutamiseks, aga see on juba praktiline ülesanne.

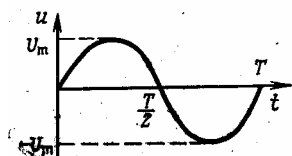
Teatavasti töö on defineeritud kui $A = Fs$. Nii on ka elektrivälja korral. Laengule väljas mõjuva jõu saame leida kui $F = qE$ (väljatugevuse definitsiooni kohaselt).

Nüüd saame, et $A = qEs$, kuid Es on eespoolräägitud alusel võrdne pingega kahe punkti vahel, mis asuvad üksteisest kaugusel s . Saame: $A = qU$. Kuid kuna laengut on tüliskas mõõta, asendame selle seosest $q = It$ ja saame lihtsalt mõõdetavatest suurustest koosneva avaldise voolu töö jaoks:

$$A = IUt.$$

Vahelduvvool

Räägitakse küll vahelduvvoolust, aga seda tekitab ikkagi **vahelduvpinge**.



Joonisel on näidatud vahelduvpinge üks periood T . Märgitud on ka pinget maksimaalsed ehk amplituudväärtused U_m ja $-U_m$.

Vahelduvpinge väärtus ja suund muutuvad ajas perioodiliselt. Meie 220 V vahelduvpinge korral muutub pinget väärtus $-U_m = -310$ V kuni $U_m = 310$ V.

Kuidas mõista seda, et me räägime vahelduvpingest väärtusega 220 V? Kuidas saab muutuvat suurust kirjeldada üks arv?

Saab küll, sest jutt käib pinget **efektiivväärtusest**. See on pinget, millel on sama toime (efekt) nagu 220 V alalispingel. Millisest toimest käib jutt? Näiteks tehtud tööst või tekitatud soojushulgast.

Pinget efektiivväärtus U_{ef} ja maksimumväärtus U_m on seotud omavahel järgmiselt:

$$U_{ef} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

Vahelduvpinget tekitab vahelduvvoolu. Vahelduvvoolu korral laengukandjad ei kulge juhile, vaid võnguvad. Ka seda võib pidada suunatud liikumiseks, mille suund muutub. Meil on pinget võnkesagedus 50 Hz, aga näiteks USA-s 60 Hz.

Takistus

Juhid avaldavad elektrivoolule takistust, ei lase laengukandjatel vabalt suunatud liikuda (kas kulgeda või võnkuda). Juhi **takistus** oleneb juhi ristlõike pindalast S , pikkusest l ja materjalist. Ühe materjali korral on takistus $R \sim l/S$.

Takistuse mehaaniliseks analoogiks on tunnel rahvavoolu teel. Kui tunnel on kitsas ja pikk, siis on liikumine tugevalt takistatud (suur takistus) ja inimeste arv, kes pääsevad ühes sekundis läbi tunneli ("inimvoolu tugevus") on väike. Kui tunnel on lai ja lühike (takistus väike), siis on läbi tunneli pääsev inimeste arv suur. Elektrivoolu

korral on samuti voolutugevus I pöördvõrdeline takistusega: $I \propto \frac{1}{R}$.

Takistuse olenevust materjalist kirjeldab **eritakistus** ρ , mille väärtus oleneb peamiselt vabade elektronide kontsentratsioonist, aga ka metalli ionide mõõtmetest ja nende võnkumisest.

Probleem. Vabale elektronile mõjub juhis elektrivälja jõuga $F = qE$. Kui pinge juhi otstel on konstantne, siis on konstantne ka elektrivälja tugevus juhis ja seega ka jõud, mis mõjub laengule. Jääva jõu toimel hakkab keha liikuma kiirenevalt. See tähendab, et elektronide kiirus juhis peaks järjest kasvama ning sama aja jooksul peaks juhi erinevaid ristlõikeid läbima erinev laenguhulk. See aga tähendaks juhi eri osades erinevaid voolutugevusi. Kas ongi nii?

Metalli takistus suureneb temperatuuri tõustes. Vabade elektronide liikumist elektrivälja toimel metallis takistavad võresõlmedes olevad ioonid, mis võnguvad oma tasakaaluasendi ümber. Madalamal temperatuuril on nende võnkeamplituud väike ja nad jäävad elektronide teele vähem ette. Kõrgemal temperatuuril on võnkumise kiirus ja amplituud suuremad ja ioonid takistavad rohkem elektronide liikumist.

Absoluutse nulltemperatuuri lähedal (allpool 4 K) muutub kõikide metallide või nende sulamite takistus nulliks. Mõnedel ainetel on selline omadus leitud ka kõrgematel temperatuuridel. Seda nähtust kutsutakse **ülijuhtivuseks** ja seletatakse elektronpaaride tekkimisega, mis ei ole võresõlmedes olevate ionidega vastastikmõjus. Kui ülijuhtivus ilmneb kõrgematel temperatuuridel kui vedela lämmastiku temperatuur (77 K), siis räägitakse **kõrgtemperatuurilisest ülijuhtivusest**. Selle nähtuse seletamiseks peab kasutama kvantmehaanikat, sellepärast meie seda ei tee.

Voolutugevuse olenevus temperatuurist on teistsugune **pooljuhtide** korral. Pooljuhtide takistus väheneb temperatuuri tõustes, sest juhtivuselektronide arv suureneb temperatuuri tõustes. Põhjuseks on valentsielektronide võnkeenergia kasv temperatuuri tõustes, mis võib osutada piisavaks, et vabaneda oma “koduatomist”. Sama toimet avaldab ka valgus. Kui juhtivuselektronide arv suureneb, siis muutub pooljuht juhiks, mis tähendab takistuse vähenemist.

Ülesanded

1. Öeldakes, et patarei või aku on vooluallikas. Kas see tähendab, et vool tuleb patareist nagu vesi kraanist?
2. Kas 100 W pirni takistus on suurem või väiksem kui 60 W pirnil?
3. Miks ei või vooluga juhet palja käega katsuda? Kas vooluga juhe on laetud?
4. Teada on, et inimesele on ohtlik voolu toime. Miks on siis kasutusel hoiatussildid ETTEVAATUST! KÕRGE PINGE! aga mitte ETTEVAATUST! TUGEV VOOL?
5. Miks linnud võivad ohutult istuda kõrgepingeliinidel?
6. Elektronide triivikiirus metallides on ca $10^{-8} - 10^{-3}$ m/s. Kuidas on siis võimalik, et lülitile vajutades süttib näiteks taskulamp kohe?
7. 60 W ja 100 W pirn on vahelduvvoolu võrku lülitatud üks kord jadamisi, teine kord rööpselt. Kummal juhul on voolutugevus 100 W pirnis suurem?
8. Kummal juhul on eelmise ülesande korral suurem pinge 60 W pirnil?
9. Pirnid põlevad läbi tavaliselt voolu sisselülimisel. Miks?

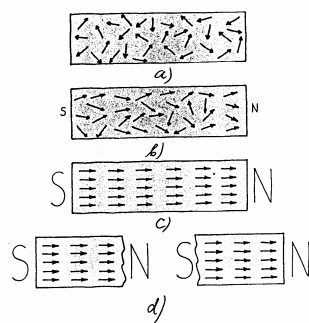
Magnetism ja elektromagnetism

Magnetismiga tutvumist tuleks alustada katsetest **püsimagnetitega**, uurida nende tõukumist ja tõmbumist. Ka püsimagnetitevaheline jõud on pöördvõrdeline kauguse ruuduga nagu elektrilaengute vaheline jõudki. Magnetite pooluseid on hakatud kompassi järgi nimetama põhja- ja lõunapoolusteks.

Küsimus. *Kus asub Maa magnetiline põhjapoolus?*

Probleem: *Kui püsimagnet keskelt pooleks teha, kas tekib kaks ühepooluselise magnetit ehk **magnetmonopoli**?*

Püsimagnetite omadusi seletatakse sellega, et elektronidel on olemas oma magnetväli, mis on tingitud elektronide loomulikust omaliikumisest (pöörlemisest), mida kirjeldab kvantarv **spinn**. On olemas metalle, mis koosnevad piirkondadest, kus elektronide spinnid on omavahel rangelt paralleelsed. Sellist aineosa nimetatakse **domeeniks**. Domeenide mõõtmed on keskmiselt ca 0,01 mm. Aineid, mis koosnevad domeenidest kutsutakse **ferromagneetikuteks**. Niisugused ained on näiteks raud, nikkel ja mitmesugused sulamid. Tavaliselt on domeenide magnetväljad orienteeritud üksteise suhtes juhuslikult. Välisesse magnetvälja paigutatud ferromagneetikus orienteeruvad domeenide magnetväljad välise välja suunas ja sellega tugevdavad üksteise mõju: tekib püsimagnet. Kui püsimagnetit kuumutada, siis alates mingist temperatuurist lõhub soojusliikumine domeenide korrastatuse ja aine magnetväli kaob. Seda temperatuuri nimetatakse **Curie temperatuuriks** (Fe korral on see 768°C).



Joonistel on noolekestega kujutatud domeene ferromagneetiku pulga erinevates olekutes: a) magneetumata; b) nõrgalt magneetunud; c) tugevalt magneetunud; d) tugevalt magneetunud ja pulk pooleks rebitud.

Magnetvälja kirjeldatakse samuti jõujoontega nagu elektrivälja. **Magnetvälja jõujooni** saab näidata rauapuru abil, kui seda puistata püsimagnetile asetatud õhukesele papile või klaasile. Kui puru ei asetu piki jõujooni, siis tuleb alust õrnalt raputada (koputada).

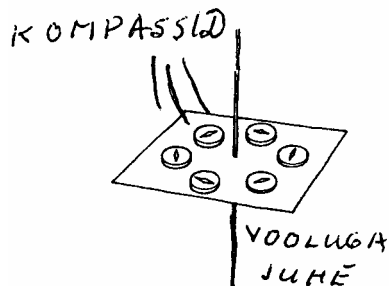
Magnetvälja jõujoonte ja ka välja suunaks loetakse suunda põhjapooluselt lõunapoolusele.

Probleem. *Mille poolest erinevad magnetvälja jõujooned elektrivälja jõujoontest?*

Lisaks püsimagnetile tekitab magnetvälja ka elektrivool.

Katse. Kui juhtme lähedusse paigutada magnetnõelad (kompassid) ja juhtmes tekitada alalisvool, siis kõik magnetnõelad pöörduvad juhtmega risti. Magnetnõelad näitavad magnetvälja suunda.

Katse näitab, et vooluga juhtme ümber tekib magnetväli.



Kui vooluga juhe panna magnetvälja, siis sellele juhtmele mõjub alati mingi jõud.

Katse. Kui püsिमagneti pooluste vahele panna liikuda saav juhe, milles on alalisvool, siis juhe hakkab liikuma.

Vooluga juhtmele magnetväljas mõjuva jõu suund on määratav **vasaku käe reeglina**: kui magnetväli on suunatud vasaku käe peopessa ja väljasirutatud sõrmed näitavad voolu suunda, siis väljasirutatud põial näitab juhtmele mõjuva jõu suunda.

Mõnikord tehakse sellest katsest järeldus, et püsिमagneti magnetväli mõjutab vooluga juhtme magnetvälja ja selle kaudu juhet. See pole õige. Üks väli ei mõjuta teist välja.

Juhtmele mõjuv jõud on põhjustatud magnetväljas liikuvatele laengutele mõjuvast jõust, nn **Lorentzi jõust**, mis on seda suurem, mida suurem on laengute suunatud liikumise kiirus.

Probleem. Kuidas kontrollida, et magnetväli ei mõju seisvatele laengutele?

Kui elektrivool tekitab magnetvälja, siis võiks arvata, et esineb ka vastupidine nähtus: magnetväli tekitab elektrivoolu (elektrivälja). Nii ongi, sellist nähtust nimetatakse **elektromagnetiliseks induksiooniks**.

Katse. Torkame magnetpulga traatpooli ja seal tekib elektrivool.

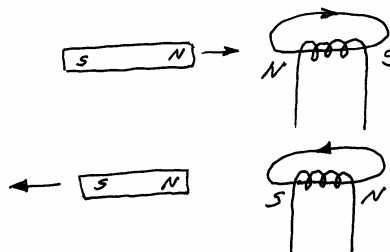
Miks tekkis vool? Magnetväli ju ei mõju otse elektronidele. Aga magnetväli mõjub liikuvatele elektronidele. Seda näitas katse, kus ilmnes magnetvälja mõju vooluga juhtmele (liikuvatele laengutele). Laengute liikumist magnetvälja suhtes võib saavutada ka nii, et panna väli liikuma laengute suhtes: liigutada magnetpulka pooli suhtes. Siis mõjub laengutele jõud ja need hakkavad liikuma. See on aga elektrivool. Kui välja liikumine (muutumine) lakkab, lakkab ka vool, mis tähendab, et just **magnetvälja muutumine tekitab elektrivälja**.

Probleem. Kas elektrivälja muutumine tekitab magnetvälja? Kuidas seda demonstreerida?

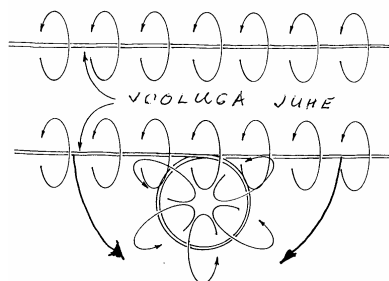
Mida kiiremini muutub magnetväli, seda suurem pinge või vool juhtmes tekitatakse (indutseeritakse). Nähtuse avastas 1831.a. Michael Faraday.

Induksioonivoolu suuna kohta käib **Lenzi reegel**, mille kohaselt on induksioonivoolu suund selline, et tema magnetväli takistaks voolu põhjustavat magnetvälja muutmist. Veel lühemalt: **induksioonivool toimib alati vastupidiselt voolu esile kutsuvale põhjusele**.

Näiteks, kui me lähendame magnetpulka poolile, siis poolis tekitatakse niisuguse suunaga vool, et magnetpulgapoolsesse pooli otsa tekib samanimeline magnetpoolus nagu pulgalgi. See takistab pulga poolile lähenemist. Kui pulka poolist eemale viia, tekib poolis selline magnetväli, mis takistab pulga eemaleviimist (vt **joonist**). Selline tulemus on kooskõlas energia jäävusega. Selleks, et poolis tekiks vool, tuleb juhtmes olevad vabad laengud suunatult liikuma panna, kuid selleks on vaja teha tööd.



Elektrivoolu omadust tekitada magnetvälja kasutatakse mitmeti, näiteks **elektromagneteis**. Nendeks on ferromagneetikust südamikuga traatpoolid. Kui poolis tekitada elektrivool, siis juhtme ümber tekib magnetväli, mida **ferromagneetik** tugevdab. Ferromagneetiku toime seletub **domeenide** orienteerimisega. Aga miks on vaja kasutada **pooli**? Sirge juhtme korral tekkiv magnetväli hajub kiiresti ruumis laiali. Pooliks keritud traadi korral aga üks osa tekkivast magnetväljast kontsentreeritakse pooli sisse. Seal suureneb magnetvälja jõujoonte tihedus, seega ka magnetvälja tugevus (vt **joonist**).



Elektromagnetid on paljude tehniliste seadmete töö aluseks. Näiteks elektrimootorid, generaatorid, kraanad, hõljukrongid jne.

Ülesanded

1. On kaks raudpulka, millest üks on magneetunud. Kuidas ilma abivahenditeta kindlaks teha, kumb pulk on magneetunud?
2. Osutub, et keskkütte radiaatorid ja terasüksed on magneetunud, kusjuures lõunapoolus asub neil alati ülaservas ja põhjapoolus alaservas. Seda on kerge kontrollida kompassiga. Miks see nii on? Kas see on igas kohas Maakeral nii?
3. Magnetnõela põhjapoolus on suunatud Põhjanaba suunas. Kuid tõmbuvad ju erinimelised magnetpoolused. Kas siin pole vastuolu?
4. Vahelduvvooluga juhe ei avalda mõju oma läheduses olevale magnetnõelale. Miks?
5. Millises kohas Maal näitavad magnetnõela mõlemad otsad lõunasse?

6. Kas paigalseisvat elektrilaengut on võimalik panna liikuma magnetvälja abil? Elektrivälja abil?
7. Hõõgumiseni kuumutatud püsिमagnet kaotab oma magnetilised omadused. Miks?
8. Jalgrattur sõidab vabakäiguga mäest alla. Kas see, kui kaugemale ta veereb, oleneb ka sellest, kas ratta tuled põlevad või ei (ei kasutata patareitoitega lampe)?
9. Mille poolest elektrimootor erineb generaatorist?
10. Millisel järgmistest juhtudest mõjub osakesele homogeenses magnetväljas jõud:
 - 1) neutron liigub risti jõujoontega
 - 2) elektron seisab paigal
 - 3) prooton liigub piki jõujooni
 - a) ainult 1)
 - b) ainult 2) ja 3)
 - c) kõigil juhtudel
 - d) mitte ühelgi juhul

Tarkusi

- Mida suurem on laengute- või magneti poolustevaheline kaugus, seda väiksem on nendevaheline jõud
- Väljatugevus on suurem laengute lähedal
- Laetud kehal kogunevad laengud välispinnale
- Hõõrdeelekter seletub elektronide üleminekuga ühelt kehalt teisele
- Elektrivälja tekitab induksioonilaenguid
- Vool on seda suurem, mida suurem on pingeline
- Vool on seda suurem, mida väiksem on takistus
- Takistus on väike, kui juhe on jäme ja lühike
- Pingeline ei tapa, tapab vool
- Ferromagneetikud koosnevad domeenidest, mille paigutus määrab magneetumuse
- Magnetvälja tugevneb ferromagneetikas
- Magnetvälja mõjutab ainult liikuvaid laenguid
- Vooluga juhtme ümber on magnetvälja
- Magnetvälja muutumine tekitab muutuvat elektrivälja ja vastupidi

17. Valgus

Valguse tekkimine ja värvused

Valguse tekkimist on kõige lihtsam ette kujutada üksikus aatomis **Bohri mudeli** abil. Bohri mudel annab kiirguse tekkimisest kvalitatiivselt õige pildi ka reaalse aatomi korral. Sel juhul valime aatomi mudelis elektroniks mõne valentselektroni (väliskatte elektroni) ja tuumaks on kogu ülejäänud positiivne ioon.

Sellist mudelit võib kasutada näiteks gaaside korral, kus aatomid on üksteisest kaugel ja ei mõjuta üksteist. Vaatleme, kuidas saab panna gaasi valgust kiirgama.

Näiteks Na-lambis (kollane tänavalatern) tekib valgus sellepärast, et aatomid saavad energiat põrgetel elektrivoolu tekitavalt vabalt elektronidelt ja ioonidelt. Selle

tulemusena aatomid **ergastuvad** (valentselektronid viiakse tuumast kaugemale). Valgus tekib siis, kui elektron tuleb tagasi tuumale lähemale ja ergastusenergia vabaneb.

Kuna elektron saab olla ainult mingitel kindlatel kaugustel tuumast, siis saab aatom kiirata ainult kindlate lainepikkustega valgust. Kui vaadata sellist valgust läbi spektroskoobi, näeme ainult mingite kindlate värvustega jooni. Hõõguvad gaasid annavad **joonspektri**.

Hõõguvad tahked ained annavad aga **pideva spektri**. Miks nüüd ei kiirga aatomid kindla värvusega valgusi? Kas näiteks hõõglambi hõõgniidis olevad volframi aatomid ei kiirga volframile iseloomuliku koostisega valgust? Selgub, et ei kiirga. Põhjus on selles, et nüüd pole aatomid isoleeritud, st pole üksteisest sõltumatud. Mida see tähendab? See tähendab, et elektronide energianivood ei ole igas aatomis täpselt sellised nagu nad on üksikus, "normaalses" aatomis. Teiste aatomite elektronide laengud nihutavad natuke vaadeldava elektroni kaugust tuumast ja see muudab elektroni energiat. Miks elektroni kaugus tuumast muutub? Sest elektronid on laetud osakesed. Me teame, et kui laetud kehale lähendada teine sama laenguga keha, siis tekib nende vahel tõukejõud ja kehad nihkuvad teineteisest kaugemale. Nii on ka elektronidega aatomis: nende kaugus tuumast muutub teiste aatomite elektronkatete toimel. Kui aga muutub kaugus tuumast, muutub ka elektroni energia. Asja teeb veel keerulisemaks soojusliikumine: naaberaatomid lähenevad ja kaugenevad juhuslikult ja kogu aeg! Ja elektron võib ergastatud olekus minna üle hoopis teisele aatomile. Ja kuna aatomeid on metalli 1 cm^3 ca 10^{23} tükki, siis kiirgub väga palju erineva lainepikkusega valguslaineid, mis annavad pideva spektri. Pidev spekter on omane hõõguvatele tahkistele ja vedelikele.

Gaasi ja tahkise kiirguse erinevusi võib **näitlikustada** kellukeste abil. Üksik kelluke tekitab ilusat kindla kõrgusega heli (joonspekter). Kui panna palju kellukesti karpi ning seda raputada, tekib korrapäratu lärm (pidev spekter).

Katse. *Hõõglambi ja Hg-lambi spektri vaatamine CD abil. Miks CD valguse spektri jaoks jaotab, pole siin üldse oluline.*

Miks on kehad **värvilised**? Kas punane paber on alati punane?

Katse: *pideva spektri erinevatesse kohtadesse paneme punase paberi. Mujal paistab paber mustana, ainult punases piirkonnas on paber punane. Miks?*

Sellepärast, et punast värvi valguse lained peegelduvad paberilt, teistele värvustele vastavad lained aga neelduvad. Mis on neeldumine? **Neeldumine** on protsess, mille käigus valgusenergia muutub aine siseenergiaks – soojuseks. Eriti hästi neelavad valgust metallid. Seal paneb valguslaine E - vektor vabad elektronid liikuma, tekitades väikestes ruumiosades kõrge sagedusega elektrivoolu. Sellega kaasneb aga soojuse eraldumine nagu ikka elektrivoolu korral.

See, millist värvi valgus neeldub või peegeldub, oleneb aine keemilisest koostisest ja struktuurist. Niisugust peegeldumist, kus mitte iga värvi valguse lained ei peegeldu ainult nimetatakse valikuliseks ehk **selektiivseks peegeldumiseks**.

Kuidas tekib selektiivne peegeldumine? Jälle tuleb põhjust otsida valentselektronides, mis on kõige nõrgemini seotud tuumaga ja seetõttu reageerivad kõige paremini valguslaine E -vektorile. Kui kehale langevas valguses on selliseid laineid, mille sagedus vastab mõne valentselektroni omavõnkesagedusele, siis see elektron ergastub

ja aatom kiirgab sama sagedusega valgust. Nii tekibki peegeldunud valgus: keha neelab teatud sagedusega valgust ja kiirgab sama sagedusega valgust, tegemist on **optilise resonantsiga**.

Teiste sagedustega valguslainete energia läheb võrevõnkumiste suurendamiseks ja vabade elektronide kiiruse muutmiseks, lühidalt: muutub keha siseenergiaks – soojuseks.

Katse akustilisest resonantsist. Võtta 2 ühesugust heliharki, üks panna helisema ja siis summutada. Teine helihark heliseb edasi. Üks helihark paneb teise helisema (see on peegeldunud valguse analoog). Kui helihargid on erinevad, ei teki teise hargi helinat.

Kokkuvõtvalt võib öelda, et **keha on seda värvi, millist värvi valgust ta peegeldab**. Ka **läbipaistvad ained** võivad olla värvilised. Näiteks punane klaas laseb läbi ja ka peegeldab ainult punast valgust, kõik teist värvi valgused neelduvad aines. Üldiselt võib öelda, et kui valentselektronid saavad sooritada sundvõnkeid igasuguse nähtavasse piirkonda kuuluva sagedusega, siis on keha **valge**. Kui elektronid ei saa sooritada sundvõnkeid mitte ühegi nähtavasse piirkonda kuuluva sagedusega, siis on keha **must**.

Kõiki värvusi on võimalik saada, kui liita erinevas vahekorras kahte või kolme põhivärvust. **Põhivärvused on punane (R), roheline (G) ja sinine (B)**. Neid värvusi kasutatakse ka televiisori või arvuti ekraanil pildi tekitamiseks.

Värvuste liitmiseks tuleb erinevat värvi valgused näiteks juhtida valgelt ekraanil ühte kohta. Televiisori või arvuti kuvaril on põhivärvustele vastavad helenduvad täpikesed (pikslid) ekraanil üksteisele aga nii lähedal, et meie silm ei suuda neid eristada ja neilt tulevad valgused liituvad meie silmas iseenesest.

Värvuste liitmist ei tohi segi ajada värvide liitmise ehk segamisega. Kui segada punast, rohelist ja sinist värvi (värvainet), saame tulemuseks mingi tumeda värvi, pruunikas - musta.

Ülesanded

1. Ultravalgus põhjustab päevitust, aga nähtav valgus ei põhjusta. Miks?
2. Kas kehad kiirgavad ka toatemperatuuril? Kui kiirgavad, miks me seda kiirgust ei näe?
3. Kas valgele paberile kirjutatud punast kirja saab lugeda läbi punase klaasi vaadates?
4. Miks on taevast sinine? Vihje: õhumolekulide elektronide omavõnkesagedused asuvad spektri sinakas-violetses piirkonnas.
5. Miks Päike on tõustes ja loojudes punakas-oranž?
6. Kas lumi on valge?
7. Miks suvel kantakse heledaid rõivaid?
8. Miks lukuaukud paistavad mustadena?

Valguse peegeldumine ja murdumine

Peegeldumist saab **modelleerida** lauatenisepalli või teraskuuli pörkamise abil, mis oleks valguskvandi analoogiks. Nende abil kontrollime **peegeldumisseaduse** kehtivust.

Tõmbame valgele paberilehele sirge joone. Selle keskpunktist tõmbame joonele ristsirge (normaali). Normaalist kahele poole kanname kuuli langemistrajektoori ja peegeldumistrajektoori kirjeldavad sirged nii, et langemisnurk oleks alati võrdne peegeldumisnurgaga. Asetame paberile massiivse, sileda tasase pinnaga keha nii, et selle pind asuks täpselt paberile tõmmatud joonel.

Veeretame lauatenise palli või teraskuuli mööda langemistrajektoori ja jälgime, kas pärast põrget toimub liikumine mööda peegeldumistrajektoori.

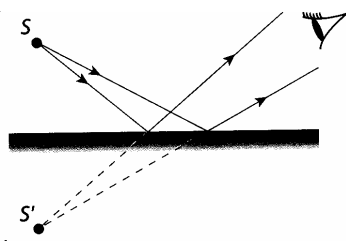
Kui nõgus- ja kumerpeegli uurimiseks on koolis mitmeid praktilisi töid, siis **tasapeeglit** tavaliselt ei uurita. Aga kuidas leida kujutise asukohta tasapeeglis või kuidas tõestada, et tasapeegel ei suurenda ega vähenda kujutist?

Suurenduse puudumist saame kontrollida joonlaua abil. Paneme peegli risti üle joonlaua. Selle mõõtmed peeglis ei muutu. Järelikult suurendus puudub, täpsemalt öeldes: suurendus võrdub ühega.

Peeglis on ka näha, et joonlaua peeglist kaugemate jaotiste kujutised on ka peeglis näha kaugemal. See näitab, et kujutis asub peegli taga.

Fakti, et kujutis asub tagapeegli taga saab kontrollida ka nii: toome mingi eseme silmadele nii lähedale, et enam seda selgelt ei näe. Nüüd paneme samale kaugusele silmast peegli ja näeme seal oma nägu selgelt. Järelikult peeglis olev kujutis asub silmast kaugemal kui ese, mida me teravalt ei näinud.

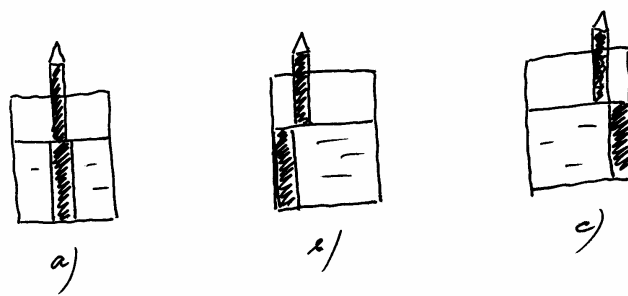
Tasapeegel tekitab **näiva kujutise**. See tähendab, et pärast peegeldumist ei löiku mitte kiired, vaid nende pikendused. Kujutise asukoha leidmiseks võtame esemest kaks suvalist kiirt, mis langevad peeglile. Arvestades peegeldumisseadust leiame kiirte suunad pärast peegeldumist ning näeme, et kiired on hajuvad. Lõikuvad aga nende pikendused ja me näemegi just selles kohas eseme kujutist.



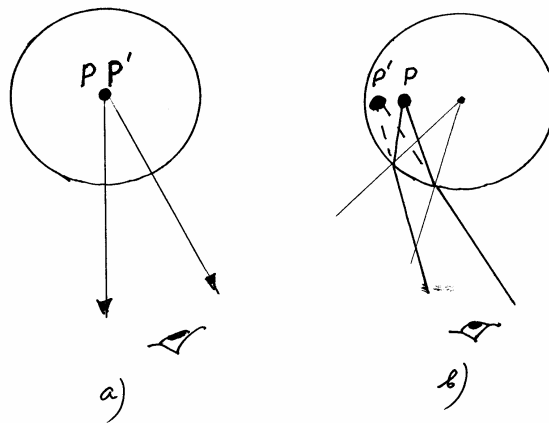
Probleem. Tõestada katseliselt, et tasapeegel annab näiva kujutise. Kasutada on kiiinäl ja tasapeegel.

Valguse **murdamist** saab demonstreerida laserpointeriga, suunates selle kiire sogsasse vette.

Valguse murdamist saab demonstreerida ka ilma laserita. Täidame silindrilise klaasanuma poolenisti veega ja asetame selle keskele püstise pliitsi. Vaatame pliitsit ristsuunas läbi anuma. Pead liigutamata nihutame pliitsit paremale või vasakule. Kui pliits on klaasi keskel, siis näeme olukorda, mida on kujutatud **joonisel a)**. Kui pliits nihutada keskkohast vasakule või paremale näeme olukordi, mis on kujutatud **joonistel b) ja c)**. Pöörame tähelepanu ka pliitsi kujutiste erinevatele läbimõõtudele.

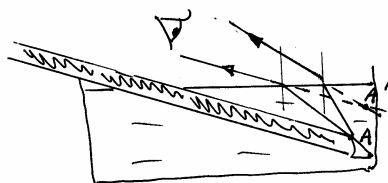


Katse tulemusi saab seletada valguse murdumisega. Arutelu lihtsustamiseks loeme klaasseina paksuse tühiseks ja murdumist seal ei arvesta. Seega vaatleme veest silindrit, mille sees asub pliiats. Kui pliiats asub silindri teljel, siis valguskiired, mis tulevad pliiatsilt vaatleja silma, on alati risti silindri pinnaga ja pliiatsi näiv kujutis P' tekib täpselt sinna kus asub ka pliiats P (pealtvaade esitatud joonisel a). Kui pliiats asub aga tsentrist näiteks vasakul, punktis P , siis näiv kujutis P' nihkub pliiatsist vasakule, sest veest õhku minnes on murdumisnurk suurem kui langemisnurk (pealtvaade esitatud **joonisel b**).

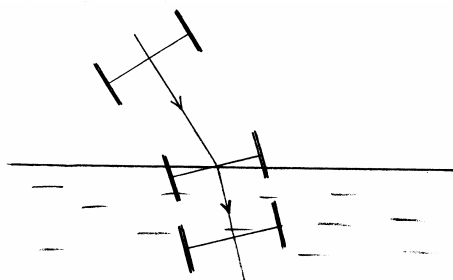


Miks vees olev pliiatsiosa paistab suurendatuna? Sest veesilinder töötab silindrilise läätsena. Selle fookuskaugust saab hinnata kujutise abil, mille tekitab klaasi taha asetatud paberilehele kaugel valgusallikas. Kuna pliiats asub läätses sees, siis on esemekaugus kindlasti väiksem fookuskaugusest ja lääts töötab luubina. Veesilindrit ei saa vaadelda kui õhukest lääts ja seepärast pole võimalik nähtust täpsemalt seletada, kuna siis tuleks kasutada paksu lääts teooriat, mida me ei tunna ja mis pole sugugi lihtne.

Murdumisnähtust võime vaadelda ka siis, kui asetame pliiatsi veeklaasi kaldu ja vaatame pliiatsit natuke kõrvalt, aga läbi vedeliku ülemise pinna. Näeme, et vees olev pliiatsi osa oleks nagu tõusnud natuke kõrgemale, veepinnale lähemale. Sellised vaatepildid tekitavad sageli väärkujutlusi, et vees valgus murdub pinnanormaalist eemale. Milles on siis asi? Põhjus on selles, et katses näeme valgust, mis tuleb veest välja, aga joonisel kujutatakse vette minevat valgust. Pliiats pole valguskiir, vaid keha, millelt peegeldunud valgus satub meie silma ja tekitab seal kujutise. Olukorda kirjeldab **joonis**, kus on esitatud vaade kõrvalt. Kuna veest väljuva valguse korral on murdumisnurk suurem kui langemisnurk, näeme pliiatsi vee all olevat osa kõrgemal selle tegelikust asendist. Näiteks punkt A näib olevat asendis A' .



Valguse murdumist võib modelleerida veerevate ratastega võlli abil. Võll on lainepinna analoogiks (tasalaine). Laseme võlli alla veereda kaldpinnast, mille alumine pool on kaetud ainega, mis takistab veeremist, näiteks pehme riidega. Joon kaldpinnal, mis eraldab erinevaid pinnakatteid, on kahe keskkonna lahutuspiiri analoogiks. Kui laseme võlli veereda kaldpinnast alla nii, et liikumissuund ei ole risti lahutuspiiriga, siis üleminekul sellest muudab võll oma liikumissuunda (valgus murdub). Põhjus on selles, et vasakpoolne ratas jõuab enne parempoolset ratast riide peale, kus veeremiskiirus on väiksem ja rataste erinevad kiirused tingivadki võlli pöördumise (vt. **joonist**).



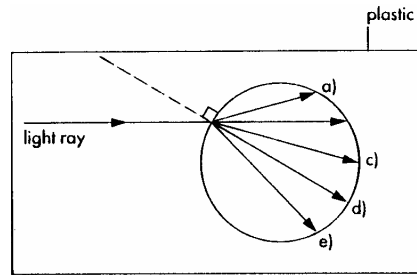
Probleem. *Klaasi sisenedes valguse kiirus väheneb. Klaasist väljudes kiirus uuesti kasvab? Miks?*

Koduprojekt

Spektri saamine päikesevalgusest veevanni ja peegli abil.

Ülesanded

1. Kaugele majade akendelt on näha peegeldunud päikesevalgust ainult hommikuti ja õhtuti. Miks?
2. Kurjategija tahab rikošetiga puruks tulistada lampi, mis asub nurga taga ja mille kujutist ta näeb nurga lähedal paiknevas metallpeeglis. Kuhu tuleks tal sihtida?
3. Päeval toas olles on õues toimuv hästi näha. Aga õuest tuppa ei näe? Miks?
4. Kuidas tuleks kiirabi auto ninale kirjutada sõna KIIRABI, et eessõitva auto juht saaks tahavaate peeglist lugeda sõna õigesti?
5. Vihmasel ööl on maantee juhile autotuledes halvasti näha. Miks?
6. Järve kaldal seisev inimene näeb veepinnal Päikese kujutist. Kuidas nihkub see kujutis, kui inimene läheneb veepiirile?
7. Millisel juhul võib saada tasapeegliga tõelise kujutise?
8. Miks me näeme lõkke ääres olles teisel pool lõket asuvaid esemeid võnkuvat?
9. Läbipaistva plastikutüki sees on silindriline tühik, nagu näidatud joonisel. Milline on õige valguskiire käik? Punktiir näitab pinnanormaali kiire langemispunkti.



10. Miks tasapeeglija seinale tekitatud “päikesejänku” on samade mõõtmetega kui peegel?
11. Kõik veekogud, mille põhi paistab näivad madalamad kui nad tegelikult on. Miks?

Valguslained ja kvandid

Mingi protsessi lainelise olemuse tõenduseks on interferents ja difraktsioon. Seda on hea demonstreerida lainevanni katsetega, kus veelained liituvad või kalduvad tõkete taha. Kui näidata, et valguse korral võib toimuda midagi analoogset, võib järeldada, et ka valgus on mingi laine.

Kui vastavaid katseid teha ei saa, siis tuleks otsida internetist demosid või videosid. Aga veelainete difraktsiooni peab nägema, muidu on kogu järgnev jutt kaunis mõttetu.

Valguse difraktsiooni saab demonstreerida mitmeti.

Valguse difraktsiooni on hea näidata, kui lasta laseri (pointeri) kiir läbi kitsa pilu ekraanile. Pilu mõõtmete muutmisel on näha, et kitsama pilu korral kandub laserivalgus rohkem varju piirkonda, kui laia pilu korral. Kui pilu laius on ca 1 või rohkem millimeetrit, siis tekib ekraanile samasugune valgustäpp nagu pilu puudumisel.

Kui sobivat pilu pole, saab seda asendada kahe ümmarguse pliiatsiga, millest ühele on ühe otsa lähedale kleeplinti ümber keritud (ca 0,5 – 1 mm) ja siis teisega kokku teibitud. Nii tekib pliiatsite vahele kiilukujuline pilu. Asetades pliiatsid statiivile ja seda laseriga valgustades, tekib ekraanile (seinale) difraktsioonile iseloomulik täpistik. Laserit piki pliiatseid nihutades saab muuta pilu laiust. Katset võib teha ka nihiku või mikromeetri haarade vahele jääva piluga, aga ka laserikiire suhtes kaldu asetatud kammiga.

Difraktsioonivõrena töötab CD või DVD plaat. Seda saab demonstreerida laserpointeriga. Suunake laserivalguse plaadile nii, et sealt valgus peegelduks seinale või ekraanile. Hämaras või pimedas toas on näha seinale tekkiv täpistik. CD plaati võib kasutada ka spektraalanalüüsi demonstreerimiseks, näiteks Hg – tänavalaterna valguse abil.

Valguse interferentsi võib demonstreerida kaksikpilu katsega. Kaksikpilu valmistamine on tülikas ja seepärast on lihtsam see osta (Eestis on seda võimalik teha Phywe kaudu) või kasutada arvuti simulatsioone.

Katses tekivad varju piirkonnas heledad ja tumedad ribad. Nende tekkimist seletatakse Huygens-Fresneli printsiibiga, mis täpsustab valguse intensiivsuse jaotust lainefrondis. Intensiivsus on määratud elementaarlainete liitumise tulemusega, mis on oleneb omakorda liituvate lainete faaside vahest või käiguvahest.

Faasivahe δ näitab liituvate lainete faaside erinevust, mille määrab käiguvahe Δ . **Käiguvahe** on võrdne lainete poolt kohtumispunktini läbitud teepikkuste vahega.

Kehtib seos: $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta$.

Valguse lainelist olemust tõestab ka **polarisatsioon**. Valgust nimetatakse polariseerituks, kui selle elektrivektor (*E*-vektor) võngub ühes kindlas tasandis. On aineid, mis lasevad läbi ainult sellist valgust, mille elektrivektor võngub teatud tasandis. Selle tasandiga risttasandis võnkuva elektrivektoriga valgust see aine läbi ei lase, valgus **neeldub** aines täielikult. Vahepealsete olukordade korral valgus neeldub osaliselt. Seda aine omadust saab kasutada valguse polariseerimiseks ja polarisatsiooni analüüsimiseks. Esimesel juhul räägitakse **polarisaatorist**, teisel **analüsaatorist**.

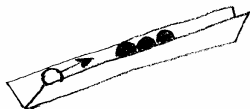
Polariseeritud valguse ja analüsaatori vastastikmõju saab demonstreerida mehaanilise mudeli abil. Polariseeritud valguse osas on mingi pendel, mis võngub kindlas tasandis. Analüsaatoriks on mingi paarisentimeetri laiune pilu, näiteks kaks paralleelset joonlauda kahe laua vahel või kaks kõrvutiasetsevat raamatut, mis on laual serviti. Tekitame "polariseeritud valguse" (paneme pendli võnkuma) ja laseme selle langeda "analüsaatorile". Kui pendli võnketasand on paralleelne piluga, saab pendel pilust läbi. Kui võnketasand on piluga risti – ei saa.

Polariseeritud valguse demonstratsiooniks sobivad LCD ekraanid ja Polaroid päikeseprillid.

Valguse kvandid

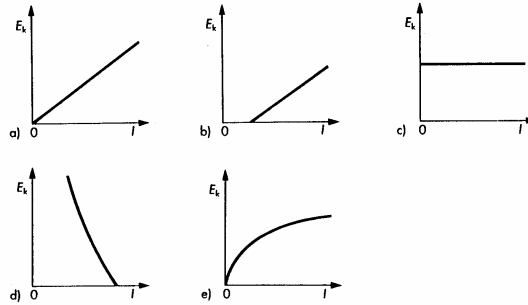
Valguse kvantolemust on raske näitlikuks teha, sest me peame katsest järeldusi tehes **uskuma**, et põhjuseks on kvandid. Näiteks klassikalisi katseid **välisfotoefekti** kohta saab põhimõtteliselt seletada ka valguse laineteooria abil. Fakti, et laineteooria kohaselt võtab ainst elektronid väljalöömine valguslaine poolt aega peaaegu tunni, peame samuti lihtsalt uskuma.

Fotoefekt seisneb vabade elektronide ainst väljalöömises valguskvandi toimel. Seda saab näidata elektrooskoobiga ühendatud Zn-plaadi valgustamisega. Kui plaat laadida negatiivselt ja seda valgustada Hg-lambi valgusega, siis laeng kaob. Plaadi positiivse laengu korral laeng ei kao. See fakt tõestab, et välja lüüakse negatiivse laenguga osakesi, milleks saavad olla ainult elektronid. Kui valguse teele asetada klaasitükk, siis fotoefekti ei esine. Järelikult valgus kaotab klaasist läbi minnes mingi omaduse. Kui teada klaasi läbilaskvusspektrit, siis on näha, et klaas ei lase Hg – lambist tulevat ultravalgust läbi ja ilmselt see just ongi põhjus, miks fotoefekt kadus. Zn-plaati võib valgustada ka taskulambiga või tavalise hõõglambiga, ikka ei esine fotoefekti. Järelikult saab fotoefekt esineda ainult siis, kui valguse kvantidel on piisavalt energiat. Rõhutan, see on ainult kaudne järeldus, mis ei tule katsest otse välja: meil puudub info klaasi läbilaskvuse kohta. Isegi kui näidata mingi klaasi läbilaskvusspektrit, ei või kunagi kindel olla, et meil on tegemist sama marki klaasiga. Fotoefekti saab ka mehaaniliselt **modellida**. Asetame horisontaalsesse renni rea metallkuule, mis on "vabad elektronid" (joonisel mustad kerad) ja laseme neile langeda "valguskvandi" - veeretame vastu seisvaid kuule veel ühe kuuli (joonisel valge). Kui "kvandi" energia on väike (kerge kuul, väike veeremiskiirus), siis "fotoefekti" ei esine: seisvate kuulide reast ei pörku ükski kuul eemale. Kui "kvandi" energia on suur (raske kuul, suur kiirus), siis esineb "fotoefekt": kõige kaugem kuul pörkub reast välja.



Ülesanded

1. Miks on seebimullid värvilised?
2. Miks kuival asfaldil olev õlilaik ei paista värvilisena?
3. Miks raadiolained painduvad majade taha, valguslained mitte?
4. Millised eelised on Polaroid päikeseprillidel võrreldes tavaliste päikeseprillidega?
5. Kuidas teha kindlaks ükskiku polaroidi läbilasketasandit?
6. Kui laseri (pointeri) valgus suunata läbi polaroidi ja polaroidi pöörata ümber kiire, siis kiire intensiivsus muutub. Miks?
7. Me räägime punase valguse kvandist või roheline valguse kvandist. Miks ei räägita kunagi valge valguse kvandist?
8. Kui me hakkame näiteks metallitükki kuumutama, siis läheb see esiti punaseks, hiljem juba oranžiks jne. Miks?
9. Muutuva intensiivsusega I monokromaatne valgus langeb metallplaadile. Milline järgmistest graafikutest kujutab õigesti fotoelektroni kineetilise energia sõltuvust valguse intensiivsusest?



10. Oletame, et valguslained ja helilained on ühesugune sagedus. Kummal on aga suurem lainepikkus?

Tarkusi

- Valgust tekitavad aatomis olevad elektronid, mis pärast ergastamist liiguvad madalamatele energiatasemetele.
- Ergastamisel viiakse elektron tuumast kaugemale.
- Aine paistab valguses seda värvi, millist värvi valgust ta peegeldab.
- Tasapeeglis on kujutis peegli taga ja sama suur kui ese.
- Murdumine on tingitud valguse kiiruse erinevusest erinevates keskkondades.
- Mitte igasugune valgus ei tekita fotoefekti.

18. Mikromaailm

Mikromaailm on looduse osa, kus kehade mõõtmed on väiksemad **aatomi mõõtmetest**. Aatomi läbimõõt on suurusjärgus 10^{-10} m ehk 1 Å (ongström). Mikromaailmas kehtivad hoopis teistsugused liikumiseeskirjad ja vastastikmõjud kui makromaailmas. Seal pole selget vahet **ainel** ja **väljal** (osakesel ja lainel). Kusjuures eksisteerib kindel seos osakese energia E ja talle vastava laine sageduse f vahel:

$$\frac{E}{f} = \text{const.} \quad \text{Tavaliselt antakse kvandienergia kujul: } E = hf, \text{ kus } f \text{ on vastava laine}$$

sagedus ja h Plancki konstant. See seos on kooskõlas faktiga, et suurema sagedusega lainel on rohkem energiat (nagu ka elastsuslainel).

Kuid mikromaailmas on palju sellist, mida on raske ette kujutada või mõista. Näiteks osakese asukohta ei saa kunagi täpselt määrata. Mitte sellepärast, et meil pole sobivaid mõõtevahendeid, vaid sellepärast, et see on põhimõtteliselt võimatu.

On veelgi tavamõistuse jaoks veidraid asju. Näiteks aatomis ei saa elektronid olla suvaliste energiatega ehk asuda suvalistel kaugustel tuumast, sest energia väärtused on kvantiseeritud (jaotatud portsjoniteks). Ka puudub osakestel trajektoor, neid võib leida igas ruumipiirkonnas aga seda mingi tõenäosusega.

Kõike seda on võimatu ette kujutada, sest **makromaailmas**, mida me suudame oma meeltega tajuda, pole midagi sarnast. Mikromaailma kirjeldamisel tuleb leppida abstraktsete kujutluste, analoogiate ja matemaatiliste avaldistega.

Sellepärast pole mikromaailmas suurt LTMV-ga peale hakata.

Mõnda asja saab siiski ka ette kujutada. Näiteks kvandid pole midagi mikromaailmale ainuomast: müür koosneb ka kvantidest – tellistest, raha koosneb kvantidest – eurodest, elanikkond koosneb kvantidest – inimestest, laeng koosneb kvantidest – elementaarlaengutest, jne.

Samuti on makromaailmas olukordi, kus keha ei saa stabiilselt olla suvalise energiaga olekus. Näiteks inimene trepil. Igal trepiastmel on tal kindel energia maapinna suhtes, mis on võrdne tema potentsiaalse energiaga. Trepiastmete vahepeal aga energia muutub ja kindlat väärtust sellel pole. Analoogiline on olukord ka nootidega noodijoontel. Ka seal pole igasuguse kõrgusega helid lubatud, vaid ainult sellised, mis vastavad kindlatele kohtadele noodijoonestikus.

Aatomis on elektronide energiad määratud mingite täisarvudega (erandiks on **spinn**, mida kirjeldavad poolarvulised väärtused). Tähtsaim neist on nn **peakvantarv**, mis võib omada väärtusi 1, 2, 3, .. Oleku energia ongi põhiliselt määratud selle kvantarvu ruuduga. Sellepärast pole ka energiatasemed aatomites ühtlaste vahedega.

Elektroni energia aatomis on seda suurem, mida kaugemal elektron tuumast asub. Olukord on sarnane Maa raskusväljas olevate kehadega. Nende ülestõstmiseks (vastab ergastamisele) peame tegema tööd. Selle arvel keha energia suureneb. Ja kui keha langeb alla, siis ta energia väheneb (vastab kiirgumisele).

Bohri teooriast arvatud orbiitide raadiused vastavad elektronide kõige tõenäosematele kaugustele vesiniku aatomis.

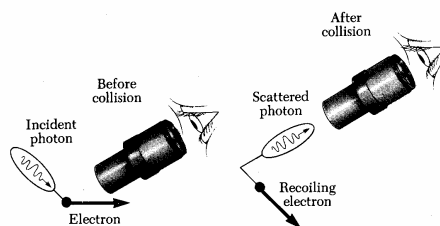
Kvantmehaanikas toimivad teatud reeglid, mida kutsutakse **määramatuse seosteks** (Heisenbergi määramatuse relatsioon). Viimasel ajal kasutatakse rohkem nimetust **täpsuspiirang**.

Näiteks $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h$.

Siin on x osakese koordinaat x -teljel ja p_x osakese impulss x -telje sihis. Suurused Δx ja Δp_x on koordinaadi ja impulsi määramatused, st väärtuste vahemikud, mille sees pole võimalik üksikuid asendeid või kiirusi eristada. Kui me viime ühe määramatuse nulliks, näiteks saame teada osakese täpse asukoha ($\Delta x = 0$), siis muutub impulsi määramatus lõpmata suureks, st sellel võivad olla mistahes väärtused. Kuna osakese mass ei muutu, võib muutuda kiiruse väärtus ja suund ükskõik milliseks. See aga tähendab, et järgmisel hetkel me ei tea enam üldse, kus osake asub.

Selle illustatsiooniks kujutame ette, et me tahame määrata näiteks vaba elektroni asukohta ja tema impulssi (kiirust). Oletame, et vaatame elektroni läbi ülivõimsa

mikroskoobi. Selleks, et elektroni näha, peab vähemalt üks foton pörkuma elektronilt ja tulema läbi mikroskoobi meie silma. Kuid selle juures annab foton oma impulsist osa elektronile ja see võib liikuda ei tea kuhu ning olla järgmisel hetkel mikroskoobi vaateväljast kadunud (vt **joonist**).



Kvantmehaanikas esineb veel palju makromaailmas tundmatuid nähtusi. Näiteks nn. **tunneleffekt**, mis seisneb selles, et osake võib minna ühest olekust teise ka siis, kui tal selleks piisavalt energiat ei ole. Seda efekti kasutatakse tänapäeval suure lahutusvõimega mikroskoopides – tunnelmikroskoopides.

Mikromaailmas on kõik protsessid **tõenäosuslikud**. Mida see tähendab? Aga seda, et kunagi ei või kindel olla, et mingi protsess kulgeb just selliselt nagu eelmine samalaadne. Kui makromaailmas oleks sündmused tõenäosuslikud, siis ütleme näiteks, et 100-st juhust 60-l kukub käest lahtilastud kivi maha, aga 40 juhul lendab üles.

Massidefekt seisneb selles, et vabalt eksisteerivate nukleonide masside summa on suurem kui sama arvu nukleonide masside summa tuumaks koondunult. Mass kaoks nagu kuhugi ära. Mass loomulikult ei kao kuhugi, vaid muutub tuumaks ühinemisel elektromagnetiliseks kiirguseks.

Energia kiirgumist tuuma tekkimisel aitab mõista analoogia agregaatolekute muutustel esineva soojuse eraldumisega, näiteks aine üleminekul gaasilisest olekust vedelasse või tahkese olekusse. Mõlemal juhul aatomite liikumisvabadust piiratakse ja osa kineetilise energiast “jääd üle” ning see antakse soojusena ära. Ka nukleonide korral võib tuumas olevate nukleonide liikumisvabadust lugeda piiratuks ja seetõttu ongi nende energia väiksem kui vabas olekus.

Massidefekti aitab paremini mõista energia ja massi ekvivalentsus: $E = mc^2$.

Radioaktiivse lagunemise korral peaks rõhutama, et poolestusaeg ei ole aeg, mis kulub tuuma lagunemisele, vaid on aeg, mille jooksul lagunevad pooled allesolevaist tuumadest.

Alfa-, beeta- ja gammakiirguse tekkimist saab seletada suhteliselt lihtsalt, aga jälle peab kasutama uskumist.

Alfakiirgus on alfaosakeste voog. Alfaosake on sama koostisega, mis on He aatomi tuumal. Seda ei maksaks väga rõhutada, sest see võib viia **väärarusaamani**, nagu oleks He aatomi tuumad raskemates tuumades olemas, järelikult võivad raskemates tuumades olla ka kergemate aatomite tuumi. AGA NII EI OLE.

Tegelikult tekib radioaktiivse aine tuumas virtuaalseid moodustisi, mis koosnevad kahest prootonist ja kahest neutronist. Sellise moodustise eluiga on ca 10^{-21} s. Seejärel ta laguneb ja tekib mingi uus sarnane kooslus. Tänu tunnelelektile võib selline

moodustis tuumast väljuda. Kui see juhtub, laguneb tuum ja tekkinud alfaosake hakkab eksisteerima iseseisva osakesena.

Olukorda võib mõneti võrrelda tantsuõhtuga, kus tekivad aegajalt tantsijate paarid, mis tants-tantsult võivad muutuda. Peo lõppedes võivad sealt lahkuda paarid, mis on alfaosakeste analoogiks.

Beetakiirgus on elektronide voog (või ka positronide). Elektron tekib, kui mõni tuumas olev neutron muutub iseenesest prootoniks. Laengu jäävuse kohaselt peab siis tekkima ka mõni negatiivse laenguga osake, antud juhul tekib elektron.

Gammakiirgus on suure sagedusega elektromagnetiline kiirgus. Selle tekkimise põhjuseks on asjaolu, et radioaktiivse lagunemise käigus tekkivad uued tuumad, nn **tütartuumad** on algselt ergastatud olekus. Põhiolekusse üleminekuga kaasneb energia eraldumine elektromagnetilise kiirgusena.

Termotuuma reaktsiooni demonstratsioon.

Ülesanded

1. Aatomite kiirgusspektrit nimetatakse "aine sõrmejäljeks"? Miks
2. Vesiniku aatomi spektris on palju jooni. Kuidas on see võimalik, sest H-aatomis on ju ainult üks elektron?
3. Mitu korda muutub vesinikuaatomi energia elektroni üleminekul esimeselt nivoolt kolmandale? Neljandalt teisele?
4. Radioaktiivse isotoobi poolestusaeg on 1 ööpäev. Kuipalju seda isotoopi on alles 1 ööpäeva pärast? Kolme ööpäeva pärast?
5. Kas iidsete kivikirveste vanust saab määrata radioaktiivse süsiniku meetodil? Miks?
6. Raadiumi poolestusaeg on 1590 aastat. Selle aja möödudes on alles pool praegu maailmas olemasolevatest raadiumi tuumadest. Kas veel 1590 aasta möödudes on raadium maailmast kadunud?

Tarkusi

- Elektroni energiatase aatomis on määratud peakvantarvu (1, 2, 3, ...) ruuduga: mida suurem arv, seda suurem energia.
- Üheaegselt pole võimalik määrata elementaarosakese asukohta ja kiirust.
- Mida kaugemal tuumast elektron on, seda suurem on energia.
- "Vabade nukleonide" (protoni ja neutroni) massid on suuremad kui tuumas olevail.

Kirjandus

1. P. Hewitt. Conceptual Physics. Addison-Wesley. 2002 (või teised aastad).
2. P.G. Hewitt, J. Suchocki, L.A. Hewitt. Conceptual Physical Science – Explorations. Addison – Wesley. 2003.
3. J. Walker. The Flying Circus of Physics. John Wiley and Sons. 1975 või 2006.
4. Dž.Uoker. Fizitšeskiĭ feiĕrverk. Moskva. Mir. 1989 (vene k.).
5. L. Bloomfield. How Everything works? Wiley. 2008.
6. M. Tultštšinski. Küsimusülesandeid füüsikast. Tallinn. Valgus. 1982.
7. Füüsika koolitarkus. www.fyysika.ee/opik/
8. H. Voolaid. Kas sina tead? Tartu. Atlex.2014.

Eksamiküsimuste teemad

Eksamil ei tule enam lahendada ülesandeid peatükkide lõpust.

1. Teoreetilised alused

Mõtlemisviiside liigitus: teaduslik, mütoloogiline, pragmaatiline. Täppis- ja loodusteadusliku (TTMV ja LTMV) mõtlemisviisi sarnasused ja erinevused. LTMV kujundamise võtted. Looduse- ja füüsikaseadused.

2. Praktilised rakendused

Mõõtmine ja mõõtemääramatus. Mõõtmise liigid. Mõõtemääramatuse mõiste. A ja B tüüpi määramatused. Määramatuse ja mõõtetulemuse esitamine.

Kulgumine. Keskmine- ja hetkkiirus. Keskmine- ja hetkkiirendus. Punktmass ja massikese (selle leidmine). Liikumise graafiline kirjeldamine (s, t ja v, t graafikud).

Newtoni seadused. Inerts ja inertsus. Resultantjõud. Newtoni II seaduse demonstreerimine. Jõud. Newtoni III seadus ja kolmas keha.

Impulss. Impulsi kui "purustusvõime" demonstreerimine. Impulsi jäävus ja isoleeritud süsteem. Põrked ja "pehmuse probleem".

Gravitatsioon ja vaba langemine. Gravitatsioonivälja olemus kehadevahelisest kaugusest. Vaba langemine. Raskusjõud ja kaal. Kaalutus. Esimene kosmiline kiirus.

Rõhk. Pascali seadus. Vedelikusamba rõhk anuma põhjale. Üleslükkejõud ja Archimedese seadus. Ujumise tingimus.

Pöörlemine. Pöörlemine ja tiirlemine. Periood ja sagedus. Joonkiirus ja nurkkiirus. Kesktõmbejõud ja kesktõukejõud. Pöörlemise inerts. Jõumoment. Keha tasakaalu tingimus.

Töö ja energia. Töö. Konservatiivsed jõud. Energia. Potentsiaalne ja kineetiline energia. Potentsiaalse energia miinimumi printsiip. Mehaanilise energia jäävus. Võimsus. Mehaanika kuldreegel.

Soojus. Soojus, soojusenergia, siseenergia. Temperatuur ja molekulide keskmine kiirus. Soojushulk. Soojusjuhtivus. Konvektsioon. Soojuskiirgus. Entroopia.

Aine olekud. Tahke, vedel ja gaasiline olek. Tihedus, rõhk, üleslükkejõud. Gaaside isoprotsessid. Agregaatolekute muutused.

Võnkumised, lained, heli. Võnkumine ja laine. Lainete liigid: kulg- ja seisulaine, piki- ja ristlaine. Elastsulainete difraktsioon ja interferents. Heli allikas. Heli omadused. Doppleri efekt. Kaja.

Elekter ja magnetism. Hõõrdelekter. Elektrostaatiline induktsioon. Alalis- ja vahelduvvool. Metall ja pooljuhi takistuse sõltuvus temperatuurist. Püsimagnet. Ferromagneetik. Vooluga juhtme ümber olev magnetväli. Elektromagnetväli. Lenzi reegel.

Valgus. Valguse kiirgumine. Isoleeritud aatomi ja tahkise kiirgus. Kehade värvus. Peegeldumine ja murdumine. Valguse difraktsioon ja interferents. Kvantnähtused.

Mikromaailm. Kvandienergia. Määramatuse relatsioon (täpsuspiirang). Bohri mudel. Tunneleffekt. Massidefekt. Radioaktiivne kiirgus.

Kõik tarkused ja katsed.

15.05.2014.

H. Voolaid