

Henn Voolaid (Tartu Ülikool), 2009



Euroopa Liit
Euroopa Sotsiaalfond



Eesti tuleviku heaks

**E-kursuse "Loodusteadusliku mõtlemisviisi kujundamine
koolifüüsikas" materjalid**

Henn Voolaid (Tartu Ülikool), 2009

LOFY.01.070 Loodusteadusliku mõtlemisviisi kujundamine koolifüüsikas

LOFY.01.070 Loodusteadusliku mõtlemisviisi kujundamine koolifüüsikas	1
1. Sissejuhatus.....	1
I. Teoreetilised alused	3
2. Mõtlemisviisid	3
3. Teaduslik mõtlemisviis	5
4. Loodusteadusliku mõtlemisviisi kujundamine	6
5. Füüsikaülesannete lahendamine.....	8
6. Füüsika kasutamine teistes loodusainetes.....	10
Kirjandus.....	11
II. Praktilised rakendused.....	11
7. Kulgemine.....	11
8. Newtoni seadused	15
9. Impulss.....	18
10. Gravitatsioon ja vaba langemine.....	20
11. Pöörlemine	23
12. Töö ja energia	29
13. Soojus.....	34
14. Aine olekud.....	39
15. Võnkumine, lained, heli.....	44
16. Elekter ja magnetism.....	51
17. Valgus	60
18. Mikromaailm.....	68
Kirjandus.....	71
Eksamiküsimuste teemad.....	71

1. Sissejuhatus

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 praegune **õppekava**, kus näiteks füüsikatundide maht on kahekümne aasta tagusega võrreldes vähenenud 40 % võrra, aga aine sisu pole vastavalt vähenenud. Praegu (2009) kavandatakse uut loodusainete kohustuslike tundide vähendamist 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). Irratsionaalsed¹ 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

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

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 oskavad joonistada graafikuid, kuid ei mõista, mida need kujutavad; üliõpilasi, kes lahendavad suurepäraselt füüsika ülesandeid, kuid ei tea, mida tähendab tuletise võtmine; üliõpilasi, kes mäletavad täpselt loengu teksti, kuid aru pole millestki saanud.

Üheks koolifüüsika võõrandumise põhjuseks on kindlasti **õpimotivatsiooni** vähenemine. Õpilased ei saa aru, miks nad peavad füüsikat õppima ja õpetad 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.

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

Õpimotivatsiooni tõstmiseks ja tulemuste parandamiseks kasutatakse füüsikas näiteks probleemõpet, kriitilist mõtlemist, mudelikeskset õpet, uurimusõpet, "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. Tollal oli aga peamiseks eesmärgiks uute füüsikute ettevalmistamine. Kuid sellist õpetamist pole enam vaja. Nüüdisühiskonnale piisab vähestest tippfüüsikuist, 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 visualisatsioonidele, 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, demodega luua uuest mõistest ettekujutus ja lõpetada käsitlus defineerimise ja ühikute sissetoomisega.

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

Füüsikaseaduste tundmist ja kasutamist kvalitatiivsel 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, jõu suurus on võrdeline massidega ning väheneb kiiresti kehadevahelise kauguse suurenedes. Kuid gravitatsiooniseaduse valemit ei pea teadma.

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

Kursuse konkreetseks eesmärgiks on anda ülevaade loodusteaduslikust mõtlemisviisist ja selle kasutamise võimalustest 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 teemade korral, kuidas võiks nende käsitlemist läbi viia 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 *LoTe.01.091 Füüsikaline maailmapilt* tasemel.

Konspekti teoreetilise osa aluseks on suuresti H. Voolaiu hoitud ETF grandil *Eesti kooliõpilase loodusteadusliku mõtlemisviisi kujundamine füüsika ulatuslikul seostamisel teiste loodusainetega* tulemused, mis saadi aastail 1999 - 2001.

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

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. Mõnede 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 loodusseaduste 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**.

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.

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

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** (suurem-väiksem) kirjeldusi, seletusi ja ennustusi. Teoreetilised konstruktsioonid on vaid fenomenoloogilised.

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** toimunud liiga kiiresti ja valemite kasutatakse enne nende mõtte teadvustamist tavakeeles, 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 eesmärgiks ka Eesti koolifüüsikale. Sellest annavad tunnistust põhikooli ja gümnaasiumi füüsikakursustes esitatavad nõuded õpitulemuste kohta. Põhikooli 38-st seosest nõutakse 13 teadmist matemaatilisel kujul ja gümnaasiumis 48-st seosest 47-l juhul (2006.a. andmed).

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

3.2. Loodusteaduslik mõtlemisviis

LTMV kasutab uute nähtuste seletamiseks palju analoogiaid tuntud nähtustega ja piltlikke kujundeid. Kasutatakse ka teadmisi, st. teadmisi, mida ei osata täpselt sõnastada, kuid millest tegevuses juhendatakse. 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,

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

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 kasutamiskust.

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.

Füüsika kasutab loodusnähtuste seletamisel alati **mudeleid** - ligilähedasi koopiaid originaalset, 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 seletusi, see **kirjeldab**. Füüsika kirjeldab mingi ettevõetud 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.

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), 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. Materia 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**. Materia 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, 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 valemitega 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 meeleldi LTMV stiilis kvalitatiivkäsitlusega.

Enamasti soovib õpilane, et probleem (füüsikaülesanne) esitataks talle juba formaliseeritud kujul. See soov avaldub õpilaste suust korduvalt kuulud 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 oponentid meile sageli ette on heitnud). Valem 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. Valem 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.

Kokkuvõtteks võib öelda, et LTMV võiks olla koolifüüsikas normiks, milleni peaksid jõudma kõik õpilased. Loomulikult jääb koolifüüsika sel juhul ka edaspidi tegelema täppisteadusliku mõtlemisviisi kujundamisega, kuid ainult neil õpilastel, kes ilmutavad vastavat huvi ja suutlikkust.

Kui ülaltoodud ideed on haridusüldsusele vastuvõetavad, siis tuleb vastavad muudatused teha ka füüsika riiklikus ainekavas.

5. Füüsikaülesannete lahendamine

Ei ole saladus, et õppurid peavad füüsika üheks kõige ebameeldivamaks osaks **ülesannete lahendamist**. Õpetajad, vastupidi, on reeglina veendunud, et ülesannete lahendamine õpetab kõige paremini oma teadmisi rakendama: kes ülesandeid lahendada ei oska, ei oska ka füüsikat.

Peab meeles pidama, et ülesannete lahendamisel pole eesmärgiks õige vastuse leidmine, vaid lahendustee leidmine. Vastus aitab ainult tulemust kiiremini kontrollida.

Enne kui asume käsitlema füüsikaülesannete lahendamist, tuletame meelde **ristsõnade lahendamist**. Näiteks küsitakse, mis on Tai maakitsuse nimi, kolm tähte? Kes on ristsõnu lahendanud, teavad, et see on Kra. Aga see teadmine ei tähenda, et lahendaja teab, kus asub Tai, mis on maakitsus, kus see Tai riigis asub, kui kitsas see ikkagi on, jne. Aga kui küsitakse kolmetähelist kantonit Šveitsis, siis tuleb kirjutada Uri. Mis see kanton on, kas ka teistes riikides on kantoneid, kus see Šveitsis asub, pole oluline. Tähtis on, et oleme ristsõna "ära lahendanud", st. täitnud ruudud selliste tähtedega nagu koostaja lootis.

Küllaltki sarnaselt käib ka füüsikas ülesannete lahendamine. Näiteks on antud keha mass $m = 10$ kg, küsitakse jõudu F , mis annaks kehale kiirenduse $a = 1$ m/s².

Õpilasele on pähe kulunud, et need kolm tähte tuleb omavahel kokku kirjutada nii:

$F = ma$. Ilma mõtlemata paneb ta tähtede asemele arvud ja arvutab vastuseks 10 N. Seda, et jõu väärtuse järele kirjutatakse N täht, teab ta varasemast kogemusest. Ja ongi "füüsikaline ristsõna" lahendatud. Aga jääb ju selgusetuks, kas õpilane teab, mida kujutab endast kiirendus, kas 1 m/s^2 on suur või väike kiirendus, miks tuleb jõu väärtuse järele kirjutada N, kui suur on jõud 1 njuuton, jne. Aga meie, õpetajad, oleme tulemusega rahul, sest õpilane on ülesande "ära lahendanud".

Kas me tahamegi õpetada õpilasi lahendama "füüsikalisi ristsõnu" või anda oskus lahendada reaalseid ülesandeid? Ilmselt ikka viimast.

Kui tahame näiteks leida oma auto maksimaalsest veojõudu, siis ei ole ette antud mingeid masse ja kiirendusi. Tuleb osata olukorda analüüsida ja leida sobiv meetod eesmärgi saavutamiseks. Veojõu $v \Delta l$ ja $a r v u t a m i n e$ on selle ülesande puhul kõige lihtsam asi.

Osa õpilasi õpib kiiresti "ristsõnu" lahendama ja teenivad õpetajate heakskiidu. Aga teisel osal õpilastest tekib palju küsimusi, millele "ristsõnas" pole vaja tähelepanu pöörata ja nemad ei ole edukad. Nemad ei saa enne kirjutada *Uri*, kui ei ole teada, mis on *kanton*. Aga seda pole aega õpetada.

Füüsikaülesande lahendamise kaks komponenti

Füüsikaülesande lahendamine koosneb kahest osast: füüsikalisest ja matemaatilisest.

Füüsikalises osas tuleb enne lahendamist saada ülevaade olukorrast: mis toimub ja kuidas? Tehakse lihtsustusi, valitakse mudelid, leitakse sobivad valemid, koostatakse vajalikud võrrandid. Võimaluse ja kogemuste olemasolu korral tuleks pärast lahendamist hinnatakse vastuse reaalsust. See on ülesande lahendamise sisuline osa.

Matemaatilises osas teisendatakse valemiteid, lahendatakse võrrandeid, teisendatakse ühikuid, arvutatakse otsitav suurus. See on ülesande lahendamise formaalne osa.

Õpetamisel piiratakse tihti füüsikalises osas ainult valemite väljaotsimise ja võrrandite koostamisega. Olulisemaks peetakse matemaatilist osa, sest seda on lihtsam kontrollida. Kuid füüsika õppimise seisukohalt on olulisem just füüsikaline osa.

Selline formaalne lahendamine on (arvatavasti) tingitud praegu koolis kasutusel olevast ülesannete lahendamise meetodikast, kus kõik algab andmete väljakirjutamisest. Kui andmed on kirjas, valitakse sobivad valemid ja lahendamine läheb lahti. Kuid õpilane valib valemid formaalselt. Andmetest ta näeb, millised "tähed" (füüsikaliste suuruste tähised) on "teada" ja otsib samade tähtedega valemiteid. Tegelikult **tuleks alustada olukorra ettekujutamisest**, selle juures on alati **joonisest** kasu. Joonis aitab olukorda paremini ette kujutada. Joonis ei pea vastama kindlatele reeglitele, see võib spetsialist jaoks vägagi naiivne olla.

Seejärel tuleks valida **sobivad mudelid** olukorra kirjeldamiseks: näiteks ühtlane või mitteühtlane liikumine, taustkeha, hõõrdumise arvestamine jne. Tuleks arutleda selle üle, kas on vaja mingi **võrrand** koostada või ei, näiteks kas saab mingid jõud omavahel võrdseks lugeda vms.

Sageli valmistab õpilastele raskusi **ülesande tingimustest** arusaamine, sest ei mõisteta ülesannetes kasutatavaid termineid, näiteks *kohtumishetk*.

Vaatleme järgmist ülesannet. *Ühel ja samal kellalajal väljuvad Tallinnast ja Helsingist laevad A ning B, mis sõidavad teineteisele vastu. Tallinnast väljunud laeva A kiirus on 20 sõlme, Helsingist väljunud laeva B kiirus on 25 sõlme. Laevad kohtuvad poole tunni pärast. Kumb laev on kohtumishetkel Helsingist kaugemal?*

Autorite kogemus näitab, et enamik õpilastest on veendunud, et kaugemal on Helsingist väljunud laev, sest poole tunniga jõuab see laev läbida suurema vahemaa.

Kuid sellele ei mõelda, et kohtumisel on laevad kõrvuti ja kuidas saab siis üks olla Helsingist kaugemal kui teine?

Kui olukorrast on ülevaade olemas, tuleks mõelda, kuidas otsitavat suurust teada saaks. Näiteks peame leidma kineetilise energia, selleks on vaja teada keha massi ja kiirust. Mass on antud, aga kiirust pole. On aga antud kiirendus ja liikumise aeg. Nendest saab leida kiiruse.

Vilunud lahendajal läheb lihtsate ülesannete korral füüsikalise osaga kiiresti, kulub vaid mõni hetk, kuid kõike eelkirjeldatud ta siiski teeb. Vähemvilunule jääb aga mulje, et polegi muud vaja, kui otsida õiged valemid ja arvud sisse panna.

Nüüd võib andmed kirja panna ja arvutamist (**mitte lahendamist**) alustada.

Õpilasele tuleks sisendada, et ülesannete lahendamine pole valemitega manipuleerimine. Sageli jäävad valemitesse pandavad suurused õpilasele lihtsalt mingiks arvuks. Kas see on suur või väike väärtus, ei huvita lahendajat, sest enamus ülesandeid on nagunii õpilase jaoks võõrad või ebahuvitavad.

Saadud **vastuse reaalsust** tavaliselt ei hinnata või ei osata hinnata. Kuid seda peaks kindlasti tegema, et vältida absurdseid vastuseid.

Siinkohal näide praktikast. Tulevasele põhikooli loodusteaduste õpetajale anti järgmine ülesanne.

Te töötate poolteist tundi elektrilise muruniidukiga, mille võimsus on 500 W. Kui palju tuleb kulutatud elektrienergia eest maksta, kui ühe kilovatttunni hind on 1,05 krooni? Vastuseks sai üliõpilane $2,835 \cdot 10^6$ krooni (ligi kolm miljonit krooni). Kui talt küsiti, kas ta isa on miljardär, oli ta sellisest küsimusest väga üllatunud.

6. Füüsika kasutamine teistes loodusainetes

Selgitamaks, kui palju ja milliseid füüsikateadmisi ning oskusi kasutavad teised Eesti koolis õpetatavad loodusained, analüüsisime 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.

Näiteks ainete sulamise kirjeldamisel ei kasutata keemiaõpikuis aine soojendamiseks kuluva soojushulga avaldist $Q = cm\Delta t$ ja sulamissoojuse avaldist $Q = \lambda m$. Piirdutakse seletusega, et aine soojendamisel osakeste energia kasvab ja nad hakkavad tugevamini võnkuma, kuni kristallvõre hakkab lagunema ja aine hakkab sulama.

Ka geograafiaõpikus ei kasutata näiteks tuulte tekkimise seletamisel ei õhu paisumist kirjeldavat valemit ega rõhu definitsiooni. Seletus antakse kvalitatiivselt: "Soe õhk on kergem kui külm ja sellest tulenevalt on ka õhurõhk erinev. Soojadel aladel tekib harilikult madalrõhkkond ja külmadel kõrgrõhkkond. Õhk hakkab liikuma kõrgema rõhuga aladelt madalama rõhuga ala poole ja nii tekivad tuuled".

Bioloogiaõpikus seletatakse higistamise kehatemperatuuri reguleerivat toimet järgmiselt. "Imetajate nahas on higinäärmed, nende kaudu higi aurustumisel keha pinnalt keha jahtub. Seega higistamine aitab säilitada ja reguleerida

kehatemperatuuri ning väldib ülekuumenemist". Ka siin ei kasutata otseselt aurustumissoojuse mõistet.

Toodud näidetest ehk piisab, et saada ettekujutus füüsika kasutamise tasemest teistes loodusainetes. Valdavalt kasutatakse füüsika **seaduste ja valemite** asemel füüsikaliste suuruste vahelisi **põhjuslikke seoseid** a' la: x suurenedes y väheneb. Sellist füüsikakasutust paraku koolifüüsika ei õpeta ja see süvendab õpilaste veendumust, et füüsikaga pole väljaspool füüsikakabinetti suurt midagi teha.

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

Kirjandus

- A. B. Arons. A Guid to Introductory Physics Teaching. John Wiley & Sons, New York, 1990.
- H. Voolaid, jt. Loodusteaduslik mõtlemisviis koolifüüsikas. Eesti Füüsikaltsi aastaraamat 1999. Tartu, 2000.
- H.Voolaid, K.Tarkpea. *Loodusteadusliku mõtlemise kujundamisest koolifüüsikas.* Õpetajate Leht nr 44, 1998
- 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
- H. Voolaid, K. Tarkpea, K. Timpmann, E. Pärtel, A. Luik. *Loodusteadusliku mõtlemisviisi kujundamine koolifüüsikas.* Konverentsi "Reaalained ja uus õppekava" materjalid, (3 lk), Tartu, 2000
- S. Ganina, H. Voolaid. Füüsikaõppe motivatsioon ja efektiivsus. ÕL nr. 8, 25.02.2005.
- H. Voolaid, S. Ganina. Füüsikaülesannete lahendamine. Loodusainete õpetamisest koolis II osa, REKK, Tallinn, 2005.
- P. Hewitt. Conceptual Physics. Little, Brown and Company, Boston, Toronto, fifth edition, 1999 jt aastakäigud.

II. Praktilised rakendused

7. Kulgemine

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 trajektoorigil võib olla nii sirge kui kõver. Viimasel juhul ei mõju kehale jõud mitte kiiruse sihis , vaid mingi nurga all.

Liikumise 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. Korrapäraste kehade korral langeb massikeske kokku geomeetrilise keskpunktiga. Teistel juhtudel tuleb see katseliselt leida, näiteks **riputusmeetodil**. Selleks tuleb keha nööri abil erinevatest punktidest üles riputada ja joonistada riputuspunktidest vertikaalsed sirged. Sirgete lõikepunkt annabki massikeskme asukoha.

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

Katse: raamatu ja paberilehe vaba langemine (kõrvuti, leht raamatu all ja peal). Sile paberileht ja käärdatud langevad erineva aja.

Ka hõõrdejõude reeglina ei arvestata. Miks? 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 füüsikaeriala 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). Kuid raskem on aru saada kiirusest 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 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:

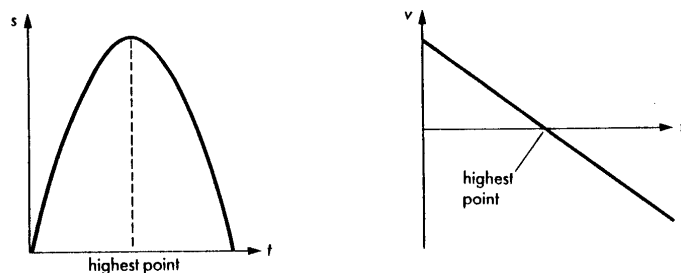
$$\bar{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t}.$$

Kiirendust võib ka jagada keskmiseks kiirenduseks ja hetkkiirenduseks.

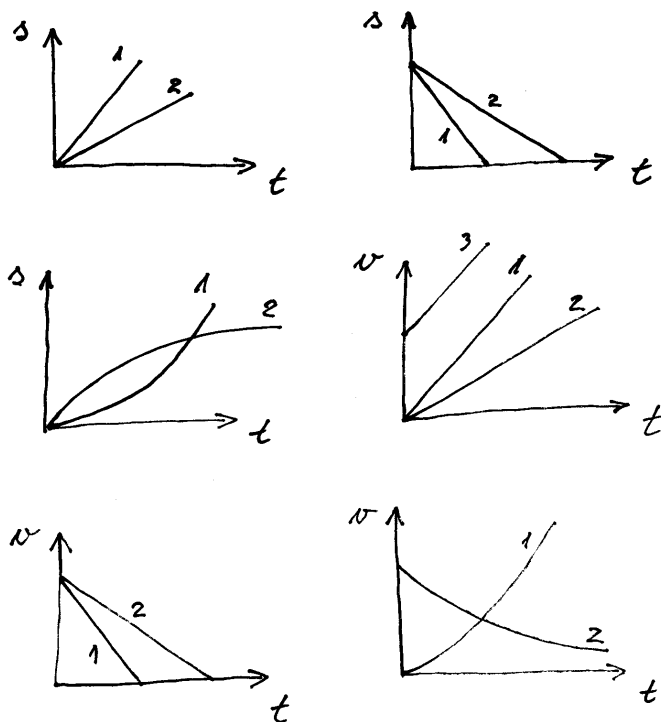
Koolifüüsikas kasutatakse vaikumisi ainult keskmise kiirenduse mõistet. Kiirenduse korral tekitab raskusi selle ühiku mõistmine: m/s^2 . Mida tähendab sekund ruudus? Kiirendus näitab seda kui palju kiirus muutub ajaühikus, seega $\text{m/s} : \text{s} = \text{m/s}^2$. Ja seda loetakse *meetrit sekund ruudus kohta*, mitte *meetrit ruutsekundi kohta*.

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

Ühedimensionaalset liikumist (sirgliikumist) saab kirjeldada vektorite asemel liikumissuunda või kiirust iseloomustavate + ja – märkidega. Näiteks **vertikaalselt ülesvisatud keha liikumise graafikud** on järgmised.



Kirjeldage järgmiste graafikute abil keha liikumist!

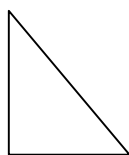


Koduprojekt. Ühtlase paksusega ebakorrapärase keha massikeskme leidmine riputusmeetodil. Kehaks võib olla näiteks hobuseraud, papile kleebitud eesti kontuurkaart, vms.

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

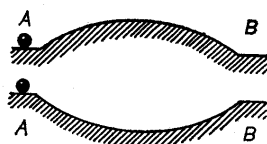


B

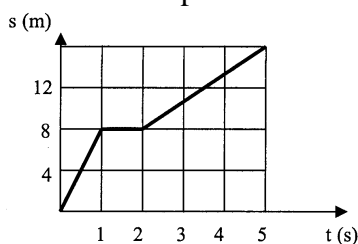


C

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. Autoga sõites võeti iga minuti tagant spidomeetri näit. Kas nende näitude aritmeetiline keskmine annab auto keskmise kiiruse?
8. 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?



9. Antud on keha poolt läbitud teepikkuse sõltuvus ajast.



Mida näitab horisontaalne lõik graafikul?

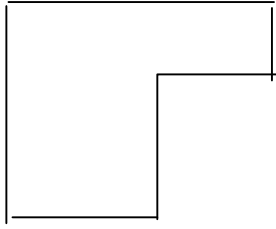
Kui suur ole keha kiirus 1. sekundi jooksul?

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 ?

10. Keha massikeske asub erinevatest riputuspunktidest tõmmatud vertikaalide lõikekohas. Miks?
11. Määrata konstrueerimise teel joonisel toodud plaadi massikeskme asukoht.



12. Auto läbib pool teest kiirusega 15 m/s, teise poole teest kiirusega 25 m/s. Kui suur oli auto keskmine kiirus?
13. Auto sõitis pool sõiduajast kiirusega 15 m/s ja teise poole kiirusega 25 m/s. Kui suur oli auto keskmine kiirus?

Tarkusi

- Õhutakistus on seda suurem, mida suurem on keha pind
- 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

8. 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 inertsit 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 inertsikatsed, 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 mänguautot, millest ühel on koormus peal. Paneme autode vahele vedru või palli, surume autodega vedru või palli kokku ja laseme lahti. Kergem auto veereb sama aja jooksul kaugemale. Järelikult oli tal suurem kiirendus.

Kuidas me aru saame, 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**.

Katse. 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.

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 keha raskusjõuga.

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

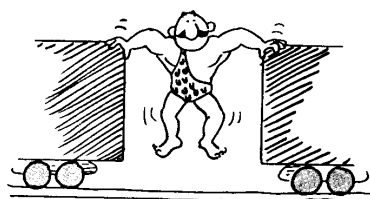
⁴ Jõud avaldub ka deformatsioonil (keha kuju või ruumala muutmine)

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

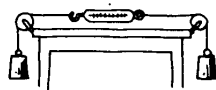
Newtoni III seadust kehade vastastikmõjust saab samuti ilmestada katsetega. Alustada võiks sellest, et näidata oma välja sirutatud sõrmi (peopesa on allapoole) ja püüda sõrmeotsi tõsta üles. See eriti ei õnnestu. Kui aga teise käe sõrmedega sõrmeotstele suruda, siis need painduvad üles. Järelikult teise käe jõud tõstab sõrmeotsi üles. Kui suruda sõrmedega vastu sein, ka siis tõusevad ka 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 toimel 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 vedada?
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?
9. Kujutame ette hõõrdumiseta liikuvat sõidukit (näiteks hõljuk). See pannakse liikuma mingi jääva jõu toimel. Milline on see liikumine? Kui liikumapanev jõud väheneb, kuidas muutub liikumine?

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.

9. Impulss

Impulss on suurus, mida iseloomustab kõige paremini sõna "purustusvõime". Teeme **katse**, milles laseme 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. Järelikult on purustusvõime seda suurem, mida suurem on keha mass või liikumiskiirus. Nii ongi **impulss** defineeritud kui massi ja kiiruse korrutis: $p = mv$.

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

Impulss on suunaga suurus, vektor. Impulsi eestikeelne nimetus on *liikumishulk*. Kui teha katseid kahe nööri otsas rippuva pörkuda võiva kuuliga, millel on ühesugused massid, siis on näha, et süsteemi impulss ei muutu. Kui üks kuul seisab paigal ja teda tabab teine, liikuv kuul, siis pärast põrget hakkab esimene liikuma sama kiirusega kui enne teine. Ja teine kuul jääb paigale. Seda saab demonstreerida ka aurukahuriga. Vette 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 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.

Impulsi muutus ja seda põhjustav jõud on omavahel seotud.

$$\vec{F} = m\vec{a}; \quad \vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t};$$

$$\vec{F} = m \frac{(\vec{v} - \vec{v}_0)}{t} = \frac{m\vec{v} - m\vec{v}_0}{t} = \frac{\Delta m\vec{v}}{t} = \frac{\Delta \vec{p}}{t}.$$

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

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

Impulss avaldub peamiselt **põrgetel**. Neid jaotatakse **elastseteks ja mitteelastseteks põrgeteks**. Elastsel põrkel kehade mehaaniline energia ei muutu teisteks energialiikideks. Mitteelastsel põrkel osa või kogu mehaaniline energia muundub teisteks energialiikideks, näiteks soojuseks.

Ülesanded

1. Kuidas auto kaitseraud, mis on küllalt kerge konstruktsiooniga, kaitseb autot?
2. Õun, mis Newtonile pähe kukkus, kaalus ca 1 N. Kas jõud, millega õun põrgates vastu pead oli ka 1 N? (Mõelge naelal lebava haamri ja lööva haamri peale!)
3. Kui ma panen omale telliskivi pea peale, ei juhtu midagi. Kui see aga kukub teiselt korruselt mulle pähe, on vigastused suured. Miks?
4. 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.
5. Kui viskame toore muna vastu seinale, siis muna läheb kindlasti katki. Kui aga visata muna sama kiirusega seinale ees rippuvasse kardinasse, siis muna jääb ilmselt terveks. Miks?
6. Miks politsei kasutab mässajate vastu kummikuule? Arvestame, et kummikuulid ei tungi läbi riiete, vaid põrkavad kehalt tagasi.
7. Miks judoka enne matile kukkumist seda käega lööb?
8. Mürsu purustusjõud on seda suurem, mida suurem on selle mass. Kas mürsu massil on ka piiranguid?
9. 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.
10. Kui täispuhutud, kuid kinnisidumata õhupall lahti lasta, siis lendab see minema. Miks?
11. Püssist lastud kuul ei purusta akna klaasi kildudeks, vaid teeb sellesse augu. Kui aga visata kiviga aknasse, siis see puruneb. Miks?
12. Kas on võimalik, et kehal on impulss, aga energiat ei ole? Aga vastupidi, kui on energia, kas siis võib impulss puududa (võrduda nulliga)?
13. 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?

14. On kaks paigalseisvat kokkuseotud vankrikest, mille vahel on vedru. Ilmselt on mõlema vankrikese impulss võrdne nulliga. Kui nöör läbi lõigata, hakkavad vankrid liikuma. Järelikult mõlema vankrikese impulsid ei ole enam võrdsed nulliga. Kas on tegemist impulsi jäävise rikkumisega?
15. Püss lööb tulistamisel valusalt õlga, kui püss pole surutud tihedalt õla vastu. Miks?
16. Kui viskan lumepalli vastu majaseina ja pall jääb maja seina külge, kuhu kaob siis palli impulss?

Tarkusi

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

10. Gravitatsioon ja vaba langemine

Gravitatsiooniseadus ütleb, et iga kahe keha vahel mõjub tõmbejõud, mis on võrdeline kehade massidega ja pöördvõrdeline kehadevahelise kauguse ruuduga. Maa tõmbab kõiki kehasid jõuga $F = G \frac{mM}{(R + h)^2}$, kus m on keha mass, M Maa mass, R Maa raadius ja h keha kõrgus maapinnast. Jõu põhjuseks on gravitatsiooniväli. Igal väljal on kindel tugevus. Milline on Maa gravitatsioonivälja tugevus?

Väljatugevus näitab ühikulise massiga kehale mõjuva jõu suurust F/m .

Kuid jõu ja massi jagatis on võrdne kiirendusega. Seega Maa gravitatsioonivälja tugevus on võrdne raskuskiirendusega:

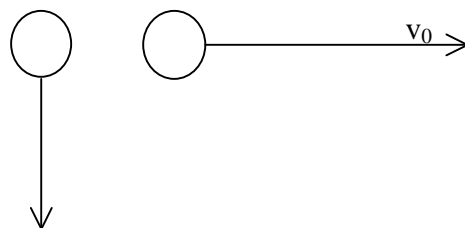
$$g = G \frac{M}{(R + h)^2} \quad \text{ehk} \quad g = G \frac{M}{r^2}, \quad \text{kus } r \text{ on keha kaugus Maa keskpunktist.}$$

Arvutame g väärtuse: $M = 6 \cdot 10^{24}$ kg, $R = 6400$ km, $G = 6,7 \cdot 10^{-11}$ m³/(kg s²)

Miks väli nõrgeneb pöördvõrdeliselt kauguse ruuduga? Valemist on näha, et kõikides punktides, mis on allikast võrdsel kaugusel on väljatugevus ühesugune. See punktide kogum moodustab mingi pinna, täpsemalt kerapinna. Kui kaugus suureneb 2 korda, siis kera pindala suureneb 4 korda. See tähendab, et väli, mis enne "mahtus" kera pinnale $4\pi r^2$, peab nüüd katma pinna $4\pi(2r)^2 = 4 \cdot 4\pi r^2$, ehk 4 korda suurema pinna. Järelikult jääb väli ka 4 korda nõrgemaks.

Vabaks langemiseks nimetatakse keha liikumist ainult raskusjõu toimel. 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 tühisel 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. Katsed näitavad, et kehade langemisajad on võrdsed.

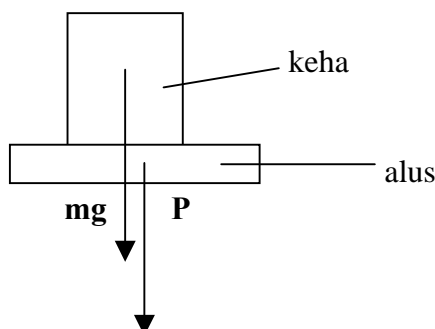


Tihti valmistavad probleeme mõisted **raskus(jõud)**, **kaal** ja **kaalutus**.

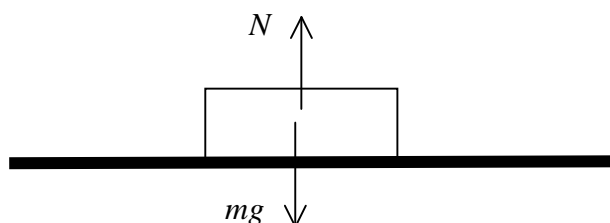
Raskusjõud on jõud, millega Maa tõmbab enda poole temal asuvaid kehi. Seda nähtust nimetatakse **gravitatsiooniks**. Miks esineb selline tõmbumine? Täielikku seletust nähtusele veel pole. Tõmbumist seletatakse gravitatsioonivälja toimega, kuid gravitatsioonivälja vahendajaid, gravitatsioonikvante (gravitone) pole katses suudetud avastada.

Raskusjõu suurus leitakse valemist $\vec{F} = m\vec{g}$. Raskusjõud on vektor, mis on alati suunatud Maa keskpunkti poole.

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. 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.



Joonisel on näidatud kehale mõjuvad jõud: mg on jõud, millega Maa tõmbab keha ja N on jõud, millega alus mõjutab keha (toereaktsioon, elsatsusjõud). Newtoni II seaduse kohaselt

$m\vec{g} + \vec{N} = m\vec{a}$, kuid kaal on võrdne vastupidise märgiga N -ga: $\vec{N} = -\vec{P}$. Seega

$m\vec{g} - \vec{P} = m\vec{a}$. Ühemõõtmelisel juhul saame:
 $P = m(g - a)$.

Kaalutus. Kui keha liigub nii, et selle kiirendus $a = g$, siis $P = 0$, ehk keha kaal on võrdne nulliga. Kiirendus on võrdne raskuskiirendusega aga vabal langemisel. Seega vabal langemisel on keha kaal null! Reaalsuses see päris nii ei ole, sest õhutakistus segab vaba langemist.

Katse kuuli ja vedruga. Kui lasta vedruotsas 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 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.

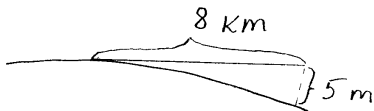
Kui alus hakkaks liikuma kiirendusega 20 m/s^2 kohta, kas keha jõuaks järele? Ei jõuaks. Kui alus hakkaks alla liikuma kiirendusega $9,8 \text{ m/s}^2$ kohta. Kas nüüd jääks keha maha või tahaks ette jõuda? Ei seda ega teist. Kas keha avaldab alusele survet? Ei avalda. Järelikult on nüüd keha kaal null.

Kaalutus kosmoses. Miks on kosmoselaevas kaalutus? Sageli vastatakse, et seal kesktõmbejõud ja kesktõukejõud (tsentrifugaaljõud) tasakaalustavad teineteist. See on VÄÄRARUSAAM.

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 **1 kosmiline kiirus**.

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 alla kukub, läheb kivi järgmisele ringile ja hakkab tiirlema ümber Maa. Kivi kukub Maast "mööda".

On teada, et 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 ca 5 m ($h = gt^2/2$). Sellest jäeldub, et kui keha läbib 8 km kiiremini kui 1 sekund, siis ta ei jõua selle ajaga maha kukkuda ja hakkab keha 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 oksal rippuvat ahvi. Tulistamise hetkel laseb ahv puuksast lahti ja kukub alla. Kas jahimees tabab ahvi?
9. Kui jälgida kosmoseraketi starti, siis on näha, et varsti pärast starti kaldub rakett vertikaalsuunast kõrvale ja hakkab tõusma kaldu maapinnaga. Miks?
10. Miks valitseb kosmosejaamas kaalutus?
11. Räägitakse, et paigalseisva keha tõstmiseks peab rakendama sellele raskusjõuga võrdse, aga ülessuunatud jõu. Kas see on korrektne väide?
12. Üks keha langes vabalt poole kauem kui teine. Võrrelda kehade poolt läbitud teepikkusi ja lõppkiirusi.
13. Kui suure jõuga mõjutab füüsikahoone temast möödijat?
14. Kui visata maja katuselt samal ajal üks pall *alla* kiirusega v_0 ja teine samasugune pall *üles* kiirusega v_0 , siis kumb kukub maha suurema kiirusega?
15. Kuidas liiguks keha Maa diameetrit pidi kulgevas tunnelis? Aga piki kõõlu tehtud tunnelis?
16. Keha liikus kiirenevalt üles 3 sekundit, siis liikus 5 s ühtlaselt üles, peatus 2 s ja liikus kiirenevalt alla 5 s. Kuidas muutus keha kaal. Tulemus esitada graafiliselt.

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 lendab kõige kaugemale, kui viskenurk on 45° .
- Keha langemise aeg ei olene sellest, kas keha liigub horisontaalselt või ei

11. Pöörlemine

Pöörlemine 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 ringorbiidil ümber mingi kehast väljaspool olevat punkti või telje. Näiteks Maa pöörleb ümber oma telje, aga tiirleb ümber Päikese.

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

Küsimus: mille periood 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).

Pöördliikumisel 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 keha punktid ringjoonelisel trajektoorigil. Joonkiirust mõõdetakse ühikuis m/s. Joonkiiruse suund on puutuja suund. Seda võib järeldada käiasädemete või poripritsmete lendamisest ratta küljest. Enne lahtirebenemist liikusid need osakesed joonkiirusega ja nüüd jätkavad inertsist samas suunas. Kas saaks katset seletada tsentrifugaaljõuga? Ei saa, sest siis peaks orbiidilt äralendavad kehad liikuma piki raadiust, sest tsentrifugaaljõud on suunatud vastupidiselt tsentripetaaljõule, aga mitte piki puutujat. Vertikaalse ratta korral tuleb trajektoori kõverdumist seletada raskusjõu toimega.

Mida kaugemal pöörlemisel 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.

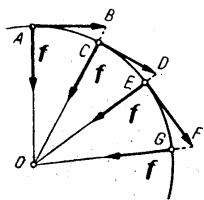
Nurkkiirus on kiirus, millega muutub raadiuse pöördenurk. Nurkkiirust mõõdetakse ühikuis rad/s ja see näitab pöörlemisraadiuse poolt läbitud nurga ja selleks kulunud aja suhet.

Kas nurkkiirusel on ka suund? On ikka, sest pöörlemisel on kaks võimalikku suunda: päripäeva või vastupäeva. Nurkkiiruse vektorit kujutatakse pöörlemisel ja selle suund on määratud kruvireeglga.

Kas joon- ja nurkkiirus on omavahel seotud? On ikka: jääva nurkkiiruse korral on joonkiirus seda suurem, mida kaugemal on vaadeldav punkt pöörlemisel. Seda mõtet väljendab lühidalt valem $v = \omega r$.

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

Miks liikus pall ringjoonel? Sellepärast, et nööri sunnib muutuma keha liikumise suunda. Pall tahaks igal hetkel lennata sirgelt, piki puutujat minema. Aga nööri tõmbab palli kogu aeg pöörlemise keskpunkti poole ja ei lase 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.

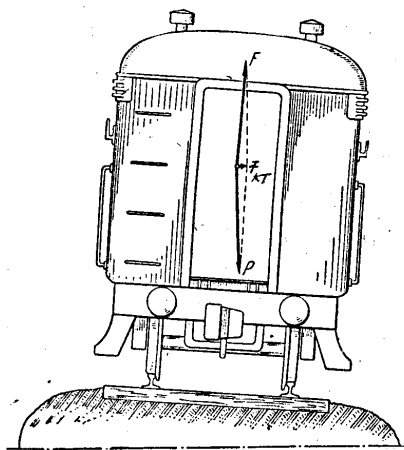
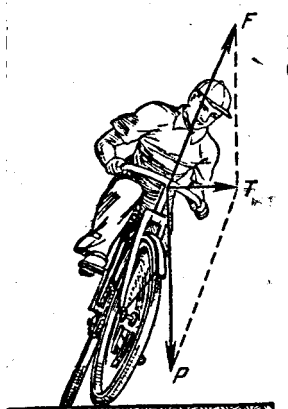
Kui nõõri lahti lasime, siis lendas pall minema, mis näitabki, et kadus pallile mõjuv jõud.

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 ratast kallutades, siis tekib raskusjõu ja toereaktsiooni toimet kesktõmbejõud (vt joonist).

Kesktõmbejõu tekitamiseks tehakse ka autoteede või raudteede kurvid kaldu. Sellepärast pole ka kaldkurvides vaja auto rooli keerata.



Joonistel on P keha raskusjõud, F on jõud, millega Maa mõjub kehale (toereaktsioon) ja F_{kt} on kesktõmbejõud.

Katse veepange keerutamise. Miks vesi välja ei tule?

Sageli põhjendatakse eelmist katset **tsentrifugaaljõuga** (kesktõukejõuga), mis mõjuvat pöörlevalle kehale ja püüdvat seda tiirlemiskeskmeest eemale paisata. See on **väärkujutus**. Tsentrifugaaljõud on küll olemas ja suunatud vastupidiselt **tsentripetaal-** ehk **kesktõmbejõule**. Siit aga järeldub, et tsentrifugaaljõud on radiaalse suunaga. Kuid tsentrifugaaljõud pole rakendatud samale kehale millele tsentripetaaljõud, vaid tiirlemiskeskmele. Vastavalt Newtoni III seadusele ei mõju vastastikmõju korral võrdsed ja vastupidi suunatud jõud ühele ja samale kehale, vaid erinevatele kehadele. Tsentrifugaaljõudu tajume oma käega, kui keerutame pange. Kui meie katses lahtilastud pang lendaks meist eemale raadiuse sihis, siis võiks kahtlustada põhjusena tsentrifugaaljõudu. Kuid pang lendab minema piki puutujat ja seda ei saa kuidagi tsentrifugaaljõud põhjustada. Siin on tegemist ikka **inertsiga**.

Sarnane olukord esineb autosõidul. Kui auto sõidab kurvis ja meid surutakse vastu auto välisseina, siis öeldakse tihti, et see ongi tsentrifugaaljõud, mis meile mõjub. Kuid tegelikult on jällegi inertsijõud see, mis meile mõjub ja 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.

Fakt kehade kaalu vähenemisest ekvaatoril ei ole ka seotud tsentrifugaaljõuga, vaid seletub samuti nagu kaalu vähenemine kehade langemisel, ainult nüüd on kiirenduse a osas kesktõmbekiirendus v^2/r .

Pöörlemisel ilmneb samuti inerts nagu kulgemisel.

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. Nüüd säilitab plaat oma asendi.

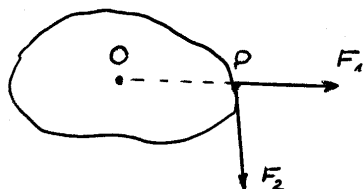
Katse vurriga. Paneme vurri pöörlema ja laseme küljelt sõrmega nipsu vastu vurri telge. Vurr säilitab oma pöörlemisel asendi ka pärast seda. Põhjus peitub selles, et vurri osakesed liiguvad kindlates tasandites. Kui püüda telge kallutada, siis see tähendab osakeste kiiruse muutmist, aga seda takistab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

Nagu kulgliikumise korral oleneb pöörlemise inerts keha massist, aga lisaks sellele ka massi paiknemisest pöörlemisel suhtes. Mida kaugemal mass pöörlemisel 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 pöörlemisel asub mass.

Katsed kaldpinnal veerevate kehadega näitavad, et mida kaugemal pöörlemisel asub keha mass, seda inertsem on keha (seda aeglasemalt kogub kiirust).

Katse risthoorattaga: sama jõu toimel hakkab ratas kiiremini liikuma, kui raskus on koondunud pöörlemisel lähemale.

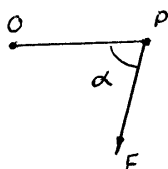
Keha kulgemist põhjustab või muudab jõud, pöörlemist aga iga jõud ei põhjusta. Kumb joonisel näidatud jõududest paneb keha ümber punkti O läbiva telje pöörlema?



Selleks on jõud F_2 , sest jõud F_1 mõjub sihis, mis läbib pöörlemisel ja ei tekita pöördumist. Katsed näitavad, et pöörlemine toimub seda kergemini, mida suurem on mõjuv jõud ja mida kaugemal pöörlemisel 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

$$M = F \cdot l,$$

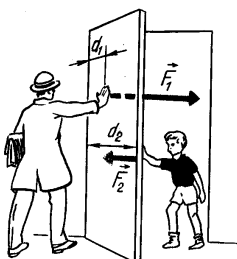
kus M on **jõumoment**, F jõud ja l jõu õlg, kus $l = OP \cdot \sin\alpha$.



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

Kindla jõu korral on jõumoment suurim, kui jõu mõjumise suund on risti rakenduspunktist teljeni tõmmatud sirgega. Sel juhul on jõuõlg võrdne rakenduspunkti kaugusega pöörlemisteljest.

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.

Tasakaalu tingimuseks on:

$$M_1 = M_2.$$

Katse kangi ja riputatavate raskustega; kangiga laua tõstmine (pikast õlast ja lühikeset õlast vajutada).

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.



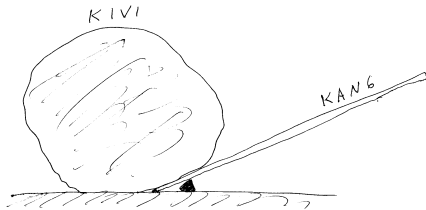
Probleem. Miks ümmargust keha on kergem veeretada kui kandilist?

Koduprojekt

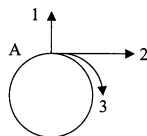
- Mõelda välja ja korraldada katse kangi tasakaalutingimuse kontrollimiseks.
- Mõelda välja ja korraldada katse pöörlemise inerts demonstreerimiseks.
- Proovige hoida haamrit sõrmeotsal tasakaalus. Ükskord varre otsast, teine kord pea poolt. Millisel juhul on tulemus parem ja miks?

Ülesanded

1. Kui suure joonkiirusega me me koos Maakeraga liigume?
2. Kangi kivi all oleva osa pikkus maapinnast toetuskohani on 20 cm ja ülejäänud kangi pikkus 2 m. Kui rasket kivi suudaksite sellise kangiga kergitada?



3. Kas karuselli kõikide punktide joonkiirused on ühesugused? Aga nurkkiirused? Miks?
4. Kas mäest veereb alla kiiremini kera või silinder? Põhjendage vastust ja kontrolliga katseliselt.
5. Miks tuleb raske seljakotiga kõndides ennast ettepoole kallutada?
6. Kolm ühepikkust inimest kannavad õlal ühtlast palki või prussi. Kaks kannavad ottest, kolmas keskelt. Kas kõik kannavad võrdset raskust? Kui ei, siis kellel on kõige raskem? Miks? Kas tulemus sõltub kandjate pikkusest? Kuidas? Miks?
7. Mootorrattur võib sõita tünnis selle vertikaalsel seinal. Kumb jõud, kas kesktõuke- või kesktõmbejõud mõjub mootorrattale? Aga seinal?
8. Kas mandrijää sulamine mõjutab ööpäeva pikkust? Kuidas?
9. Horisontaalne ratas pöörleb päripäeva. Punktis A lendab ratta küljest minema poritükk. Milline on selle trajektoor?



10. Millise jalgratta pedaali asendi korral on jõumoment suurim ja millal väikseim?
11. Kuidas leida keha pöörämisel tehtud tööd?

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 tahad jõus võita, suru kangi pikemale õlale
- Niimitu korda võidad jõus, kui kaotad teepikkuses
- Kui vabalt rippuva süsteemi raskuskese on allpool toetuspunkti, 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

Eespool vaatlesime füüsikalist suurust, mis saadakse jõu ja aja korrutamisel. See oli impulss. Kui jõudu korrutada teepikkusega, saame uue füüsikalise suuruse, mida nimetatakse **tööks**. Peab kohe täpsustama, et kui jõud ei mõju keha liikumise suunas või keha ei liigu jõu mõjumise suunas, siis tuleb arvestada ka nurka liikumissuuna ja jõu vahel. Seda võib nimetada ka jõu liikumissuunalise komponendi leidmiseks ja siis tuleb kasutada korrutist $F \cdot \cos \alpha$.

Probleem. Miks tuleb kasutada suundade erinevuse kirjeldamiseks just koosinust?

Seega saab tööd arvutada valemiga

$$A = F s \cos \alpha,$$

Kus A on töö, F mõjuv jõud, α nurk jõu ja liikumissuuna vahel ning s läbitud teepikkus. Kuna meie vaatleme ainult tööd sirgliikumisel, siis 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 patarei, mis paneb osutid pöörlema, aga ka auto mootor, mis paneb auto sõitma suvalisel trajektoiril.

Töö ühikuks on 1 J (džaul). See on töö, mida teeb jõud 1 N teepikkusel 1m. See pole just tavamõistes suur töö: 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.

Nagu valemist näha, on töö seda suurem, mida pikema tee keha läbib. Aga raskuse tõstmisel pole oluline, millist teed mööda keha tõsteti, 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 viimsit 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:

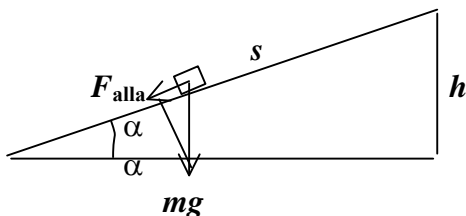
$$F_{\text{üles}} = F_{\text{alla}} = mg \sin \alpha,$$

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.



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 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? Definiitsioonvalemist 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 ühele kalorile⁵ (cal) vastab töö 4,184 J. Kuidas ta seda kindlaks tegi? Segas vett mehaanilise segistiga ja mõõtis vee soojenemist (seda saaks mikseriga kontrollida).

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 ebauhtlane jaotus patareis.

Seda "miskit" nimetatakse **energiaks**. Energia abil saab teha tööd.

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

Probleem. Kas 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.

Energiat jagatakse kaheks. **Potentsiaalne energia** E_p on selline energia, mis on tingitud keha või selle osade asendist (ülestõstetud kirves, 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. Et neil töödel vahet teha, omistatakse neile erinev märk. Kui mõjuv jõud ja nihe on samasuunalised, siis loetakse tööd positiivseks.

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

Kehtib **potentsiaalse energia miinimumi printsiip**: iga keha või kehade süsteem püüab võtta asendi, kus selle potentsiaalne energia on minimaalne. Näiteks pendel või kiik jäävad seisma kõige madalamas asendis.

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). Kujutame ette, et me venitame kummipaela mingi pikkuse l võrra pikemaks. Mõjuv jõud olgu F . Sel juhul kummipaela ots nihkus sama suuruse võrra. Seega tehtud töö $A = Fl$, aga $F = F_{ek}$ (F_{ek} - elastsusjõu keskväärts). $F_{ek} = (0 + F_e)/2 = kl/2$. Saame $A = kl^2/2$. See on ka võrdne vedrus salvestatud energiaga.

Kõik kehade süsteemid püüavad võtta asendi, kus selle potentsiaalne energia on minimaalne: ülestõstetud keha kukub alati alla, väljavenitatud vedru tõmbub alati kokku, jne.

Katse. Surume laual vertikaalse vedru 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 tööd kehaga. 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 nende energiatega 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 III korrusel oleva kivi energia maapinna ja toa põranda suhtes). Kineetilise energia korral oleneb väärtus taustkehast (bussis sõitjal on energia maapinna suhtes, aga pole bussi suhtes).

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

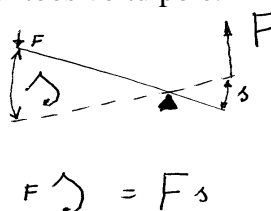
$$E_k + E_p = \text{const.}$$

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 väheneb, sest tekib hõõrdesoojus.

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.



Seda olukorda kirjeldab **mehaanika kuldreegel**: niimitu korda võidame jõus kui kaotame teepikkuses.

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

Kui kallutame kõrvale kaks kooshoitud kuuli ja laseme need põrkuda kuulideraega, mis siis juhtub?

Kui kuuli mass on m ja kiirus v , siis on kuuliderivile antav algimpulss $2mv$. See võib kuulirea teisest otsast 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?

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.

Võimsus on defineeritud kui ajaühikus tehtud töö:

$$N = A/t.$$

Kui 1 s jooksul tehakse tööd 1 J, siis on võimsus 1 W (vatt). Näiteks tõstame ühe sekundi jooksul 100 g massiga keha 1 m kõrgusele.

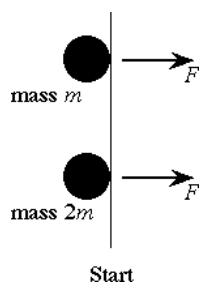
Võimsust saab leida ka seosest $N = Fv$. Siin võib kasutada ka hetkkiirust. Siis on tegu **hetkvõimsusega**. Jäava võimsuse korral on mõjuv jõud seda suurem, mida väiksem on kiirus ja vastupidi. See avaldub ilmekalt autsoidul käike vahetades: madalama käigu korral on kiirus väiksem, aga veojõud suurem.

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. Kui suur on sportlase kineetiline energia veepinnale jõudmisel? Kas see energia suureneb või väheneb, kui ta enne vettehüpet hüppab hoolaulal üles? Sportlase mass on 60 kg.
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. Kui suur raskus tuleks tõsta 1 s jooksul 1 m kõrgusele, et võimsus oleks 1 W?
11. Auto mootor arendab maksimaalset võimsust ("gaas on põhjas"). Kas automootori veojõud on suurem esimese või viienda käiguga sõites?
12. 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?
13. Kas vabalt langeva keha poolt tehtud töö on positiivne või negatiivne?
14. Kumba keha kineetiline energia on finišis suurem, kui liikumine toimub hõõrdumiseta?



15. Kogenud matkaja ei astu kunagi mahalangenud puutüvele, vaid sellest üle. Miks?
16. Miks mägiteed on siksakilised (serpentiinid)?
17. Inimene ujub kiireltvoolavas jões 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?
18. Kui suurt raskust tuleks tõsta ja kui kõrgele, et tõsta 1 liitri vee temperatuuri 1 kraadi võrra?

Tarkusi

- Jõu poolt tehtud töö on võrdne keha kineetilise 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
- Kõik kehad püüavad võtta asendi, kus potentsiaalne energia on minimaalne

13. Soojus

Soojusõpetuse üks põhimõisteid on temperatuur. Inimese jaoks seostub see sooja ja külma aistinguga. Soe ja külm on aga suhtelised mõisted.

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.

Temperatuur on molekulide keskmise kineetilise energia mõõt. Miks me rõhutame, et just keskmise energia mõõt? Sellepärast, et molekulid liiguvad erinevate kiirustega ja omavahelistel põrgetel kiirused muutuvad, kuid **keskmise kiirus**⁶ on püsiv. Siin on mõningane sarnasus autode liikumisega maanteel, kus on ka liikumiskiirused erinevad. Erinevus seisneb selles, et autod jäävad pärast kokkupõrkumist varsti seisma, molekulid mitte.

Temperatuuri mõõtmiseks kasutatakse mitmesuguseid skaalaid. Erinevused nende vahel seisnevad püsipunktide valikus. Meil kasutusel oleva **Celsiuse skaala** korral on nendeks **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:

$T = t + 273,15 \text{ K}$. Ühikuks on Kelvini skaalas 1 K (kelvin): $1 \text{ K} = 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Probleem. Kuidas võis W. Thomson (Kelvin) tulla mõttele absoluutsest nullist aastal 1848, millal polnud madalaid temperatuure veel saadud? Vedelat õhku, mille temperatuur on $-194 \text{ }^\circ\text{C}$ 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

⁶ Molekulide keskmine kiirus erineb mehaanikas tuntud keskmisest kiirusest. Siin leitakse kõikide molekulide kiiruste summa ja jagatakse see molekulide arvuga.

järjest kiiremini võnkuma 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, mis temperatuurist 4° C madalamal paisub temperatuuri langedes.

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 abil⁷. Soojuse hulka ehk **soojushulka** mõõdeti enne SI süsteemi kasutuseletulekut **kalorites**: üks kalor on soojushulk, mida on vaja, et tõsta 1 g vee temperatuuri 1 kraadi võrra.

SI soojushulga ühik on energiaühik 1 J ja seda mõõdetakse temperatuuride vahe abil: $Q = cm\Delta t$, kus Q on soojushulk, c aine erisoojus, m keha mass ja Δt lõpp- ja algtemperatuuride vahe.

Tihti räägitakse **soojusenergiast**, mis pole aga täpselt defineeritud. Füüsikas kasutatakse **siseenergia** mõistet, mis on võrdne molekulide kineetiliste ja potentsiaalsete energiatega summaga. Ideaalse gaasi korral, kus puuduvad molekulide vahelised vastastikmõjud (ja seega ka potentsiaalne energia) on siseenergia võrdeline keha molekulide keskmise kineetilise energiaga. Mida suurem see on, seda suurem on ka siseenergia.

Sisesenergia mõõduks on temperatuur. Siseenergia on võrdeline temperatuuriga. Mida kiiremini molekulid liiguvad, seda kõrgem on keha temperatuur.

Miks ma tunnen kuuma ahju katsudes, et see on kuum? Jätame kõrvale soojuskiirguse ja seletame nähtust molekulide soojusliikumisega. Kuuma ahju molekulid liiguvad (võnguvad) palju kiiremini kui minu käenaha molekulid ja annavad minu molekulidele põrgetel energiat juurde. Selle tulemusena hakkavad minu molekulid ka kiiremini liikuma ja ma tunnen soojust juurdevoolu.

Olete ehk märganud, et näiteks ahjust võetud õunakooki hammustades tundub koogi kate palju kuumemana kui saiast põhi.. Ometi peaks neil olema ühesugune temperatuur! Asi seisneb selles, et kate ja põhi sisaldavad erinevaid siseenergia hulki. Kate on ahjus kogunud endasse rohkem soojusenergiat kui põhi.

Põhjus on selles, et erinevad ained neelavad energiat erineval viisil. Ühtedes hakkavad molekulid kiiremini võnkuma, teistes läheb energia molekulisisese potentsiaalse energia suurendamiseks (pöörlemiseks või koostisosade võnkumiseks). See ei suurenda aga aine siseenergiat.

Siin on analoogne olukord ainete erineva vee imamise võimega. Kui panna samaks ajaks vette puutükk ja pesukäsn, siis veest väljavõttes on käsn vett täis, puutükk aga ainult niiske.

Ainete erinevat soojustalletamise omadust kirjeldab suurus, mida nimetatakse **erisoojuseks**, mis on soojushulk, mida tuleb anda ühikulise massiga kehale, et selle temperatuur tõuseks 1 kraadi võrra. Üks suurima erisoojusega aineid on vesi, st. vesi on hea soojusenergia mahuti.

Kuidas toimub soojus ülekandumine ühelt kehalt teisele?

⁷ Temperatuur ei ole aditiivne suurus. Temperatuuride summal pole füüsikalist sisu, küll aga vahel

Selleks on kolm võimalust: soojusjuhtivus, konvektsioon, 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.

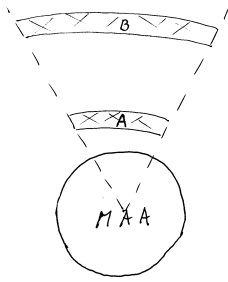
Soojusjuhtivusel üleantav **soojushulk** on seda suurem, mida suurem on kehade temperatuuride vahe, mida suurem on kokkupuute pind, mida lähemal on kehad üksteisele ja mida kauem ülekande kestab. Tulemus oleneb ka keskkonnast, mis on kehade vahel. Seda on igapäev kogenud, kes tuleb külmast sooja ahju äärde ja tahab ennast soojendada. Seda 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 ise üle teise kohta. Selle näiteks on sooja vee liikumine keskküttesüsteemis. Konvektsioon võib olla loomulik või sunnitud (pumba abil tekitatud). Loomulik konvektsioon esineb sellespärast, et soojenedes aine paisub, tihedus väheneb ja tekib **üleslükkejõud**. Seda, et soe õhk tõuseb üles, oleme kõik näinud, sest lõkke suits tõuseb üles just koos sooja õhuga. Sooja õhu ülestõusmist saab seletada ka molekulide tasemel. Olgu meil mingi kogus gaasi jääval temperatuuril. Siis on kõigi molekulide keskmised kiirused ühesugused. Gravitatsiooni tõttu on maale lähemal rohkem molekule kui kõrgemal. Kui sellesse õhku lasta soojemat õhku, siis neil molekulidel on suurem keskmine kiirus. Ja põrgetel teiste molekulidega põrkuvad nad keskmiselt kaugemale kui jaheda õhu molekulid. Kuna allpool on molekule rohkem, siis on alla liikudes ka põrkeid rohkem, mis paiskavad kiiremaid molekule üles.

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 õhk üles tõustes paisub. See tähendab, et gaasi tihedus väheneb, 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 nüüd on molekule 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. Aga miks õhk paisub kõrgemale tõustes? Sest seal on rohkem ruumi. Joonisel on näha, et gaasikogus mis Maa lähedal täidab ruumiosa A täidab kõrgemal palju suurema ruumiosa B.



Kiirgus kannab samuti soojusenergiat. Päikeselt Maale jõuab energia läbi atmosfääri ikka kiirgusena, mitte soojusjuhtivuse teel. Avakosmoses aga puudub isegi põhimõtteline võimalus soojusjuhtivuseks või konveksiooniks.

See kiirgus, mis näiteks Päikeselt energia maale toob või kuumast ahjust meieni kannab on **soojuskiirgus**, mida nimetatakse ka elektromagnetiliseks laineks.

Laine ise ei ole soojus ega energia. Laine kannab endaga soojusenergiat, mis on muutunud laineks ja muutub uuesti soojuseks, kui laine põrkub mingi kehaga. See suurendab keha aatomites olevate elektronide kiirust (sagedust) ja ergastatud elektronid omakorda tekitavad kiirgust

Kõik kehad kiirgavad soojuskiirgust. Mida kõrgem on temperatuur, seda kiiremini elektronid 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 soojust kui heledad. Miks siis 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 määrata ka **entroopia S** abil, sest termodünaamika II seadust sõnastatakse nii: igasuguses iseeneslikus protsessis süsteemi entroopia kasvab. 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.

Valemist on näha, et kui oleku tõenäosus suureneb, siis suureneb ka entroopia, see tähendab, et kui süsteem liigub suurema tõenäosusega olekusse, siis entroopia kasvab. Milline olek on kõige suurema tõenäosusega?

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. Sellele vastab entroopia kasvamine.

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

Koduprojekt

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

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. Kas on olemas maksimaalne võimalik temperatuur? Miks?
2. Võrus on suvel keskmine temperatuur kõrgem kui Pärnus, aga talvel ei ole. Miks?
3. On aineid, milles suur osa juurdeantavast soojusenergiast läheb molekulisisesteks võnkumisteks ja pöörlemiseks. Kas selliste ainete erisoojused on suuremad või väiksemad kui teistel? 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. Miks kuumal saunalaval tundub lavalauas oleva naela pea kõrvetavalt kuum, aga puitosad pole nii kuumad? Ometi peaksid nad ju ühe temperatuuri juures olema.
11. Miks väga külma ilmaga keelega metallesele katsudes keel sinna kinni külmub, aga puutüki külge ei külmu, kuigi selle temperatuur on sama, mis metallil?
12. 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
- Temperatuur ei ole aditiivne (liituv) suurus
- Iseeneslikud protsessid viivad kaoseni

14. Aine olekud

Aine olekuid on neli: tahke, vedel, gaasiline ja plasma. Kui temperatuur on madal, siis 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 aatomi elektronid ennast tuumast vabaks ja tekib **plasma**: segu tuumadest ja elektronidest. Kõrgtemperatuuriline plasma tekib temperatuuridel üle 10^5 K.

Meie piirdume kolme esimese aine oleku käsitlemisega.

Tahkete ainete üheks peamiseks 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 m^3 aine mass kilogrammides. Tihedus on suurim tahkes olekus ja väiksem gaasilises olekus. Erinevused on ca 10^3 korda. See tähendab, et keskmised kaugused molekulide vahel erinevad kümneid kordi.

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 on keedusool (NaCl).

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

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.

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

Van der Waalsi jõud tekivad siis, kui molekulides on positiivse ja negatiivse laengu keskmised 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. Need on nn. *vedelad kristallid*.

Neile on iseloomulik selektiivne peegeldumine, st neile langev valgus valgus peegeldub ainult mõnes spektri piirkonnas, muutudes värviliseks valguseks. See selektiivsus (valikulisus) oleneb näiteks temperatuurist, elektri või magnetväljast, isegi helivaljustest. Vedelad kristallid on ka optiliselt aktiivsed, st nad pööravad

polariseeritud valguse võnketasandit. LCD telerite ekraanid on ka vedelatest kristallidest. Kuna ekraani vedelkristallelemendid on kahe polaroidi vahel, on selliste telerite ekraanidelt tulev valgus polariseeritud.

Vedel olek

Vedelik on voolav, võtab anuma kuju ja pole kokkusurutav.

Katse. Valame vett plastikpudelisse, milles on väikesed augud. Neist kõikidest voolab vett, kusjuures alumistest aukudest pritsib vesi kaugemale.

Mida sellest katsest saab **järeldada**?

Me teame, et pudelis olevale veele mõjub ainult allapoole suunatud raskusjõud. Kuid vesi purskus ka küljepeale. Järelikult raskusjõud mõjub nüüd igas suunas. Nähtust saab seletada järgmiselt. Jagame vee mõttelisteks kihtideks, mis asuvad üksteise peal. Ülemised kihid suruvad oma kaaluga alumisi. Need tahavad eest ära voolata, aga anuma seinad on ees. Mida sügavamal kihid asuvad, seda rohkem on nende kohal vett ja surve on tugevam. Seda survet anuma seintele kirjeldatakse rõhu abil.

Rõhk $p = F/S$, kus F on rõhumisjõud (mis on alati pinnaga risti) ja S on pindala, millele jõud mõjub.

Põhjale lähematest aukudest pritsis vesi kaugemale, ilmselt on seal rõhk ja mõjuv jõud suuremad. Järelikult on rõhk seda suurem, mida sügavamal vaadeldav koht asub.

Katse Pascali pritsiga. Pritsiks võib olla tavaline jalgratta pump, mille otsa on asetatud aukudega kera. Kui pump vett täis tõmmata ja siis tühjaks suruda, pritsib vett aukudest välja. Kuna vesi pritsis kõikidest aukudest igasse külge ühtemoodi, siis võib järeldada, et rõhku antakse vedelikus edasi igas suunas ühtviisi. See on **Pascali seadus**.

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.

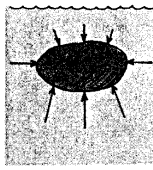
Kuidas see jõud tekib?

Seletame seda mõttelise katse abil. Kujutame ette, et kivi muutuks veeks. Kas siis kivi vajuks põhja? Ei vajuks. Järelikult kivi kaalust see osa, mida kaalub tema ruumalale vastav vesi ei kisu kivi põhja. Seega võib öelda, et kivile mõjuv raskusjõud on vees selle osa võrra väiksem.

Võib ka nii ette kujutada, et tõstisime kivi veest välja ja see koht, kus kivi asus, jäi hetkeks tühjaks. Kuid vedelik on voolav ja kohe voolab see koht kõrvalolevat vett täis. Tegelikuses toimub see kõik pidevalt, mitte etapiti.

Ka siis, kui kivi on vees, tahaks vesi sinna voolata, kus teda ei ole, aga kivi on ees. Kuid tulemuseks on, et kivi muutub kergemaks. Kui kivi asemel oleks õhupall, siis vesi tõstakski palli vee pinnale.

Seda nähtust saab seletada ka rõhkude erinevusega vee erinevatel sügavustel. Altpoolt on rõhk suurem kui ülevalt ja nii tekib üleslükkejõud. Külgedele mõjuvad jõud kompenseeruvad vastastikku.



Kui anum täita ääretasa mingi vedelikuga ja sinna sukeldada mingi keha, siis keha poolt anumast väljatõrjutud (üle ääre voolanud) vedeliku kaalu võrra muutubki keha vedelikus kergemaks. Seda väljendab **Archimedese seadus**: iga vedelikku asetatud keha muutub niipalju kergemaks, kuipalju kaalub tema poolt väljatõrjutud vedelik. Väljatõrjutud vedeliku kaal on seda suurem, mida suurem on vedelikus asuva keha (või selle osa) ruumala ja mida suurem on vedeliku tihedus. Selleks, et keha **ujuks** vedelikus peab $\rho_{\text{keha}} \leq \rho_{\text{vedelik}}$.

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, põrkeid toimub sekundis vähemalt üks miljard (10^9) 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 $\approx 10^5 \text{ Pa} = 10^5 \text{ N/m}^2$. 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 tonnilise keha raskusjõule. Miks see suur jõud meid laiaks 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 **protsessiks**. 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 pörkeid 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 pörgete arv vastu anuma seinu. See viib rõhu tõusmisele. Selleks, et rõhk ei muutuks tuleb ruumala suurendada. Siis jääb molekulide tihedus väiksemaks ja väheneb ka pörgete arv. Seega temperatuuri tõstmine põhjustab nüüd ruumala suurenemist ja vastupidi: ruumala vähendamisel langeb temperatuur.

Protsess, mille käigus ruumala ei muutu on **isohoorne**. Kui temperatuuri tõsta, siis molekulide kiirus kasvab ja pörkeid 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 pörgetele 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 pörgetel jahedama aluspinnaga oma energiat ja tekib vedelik. Öeldakse – aur **kondenseerub**.

Vedeliku soojendamisel esineb paralleelselt kaks protsessi: soojenemine ja jahtumine. Esimene leiab aset tänu soojusallikalt tulevatele energiale, teine leiab aset sellepärast, et vedelikust lahkuvad kõige kiiremini liikuvad molekulid viivad pidevalt energiat ära. Madalamatel temperatuuridel on ülekaalus soojuse äraandmine. 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. Kui me leivaviilu kokku nätsutame, kas siis selle tihedus muutub?
3. Rõhu definitsioonivalemis sisaldub jõud, mis on vektoriaalne suurus. Kas ka rõhk on vektoriaalne suurus? Miks?
4. Kui teha veega täidetud anumasse samale kõrgusele kaks erineva läbimõõduga auku, siis kummas veesi 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. Pistke kokteilikõrs veeklaasi, sulgege sõrmega kõrre ülemine ots ja tõstke kõrs klaasist välja. Vesi ei jookse kõrrest välja. Miks?
7. Kas kehad kaaluvad õhus ja vaakumis ühepalju?
8. Kerge kangi otstes ripuvad täispuhutud õhupallid. Kang on tasakaalus. Kui näiteks vasakpoolne pall nõelaga läbi torgata, mis juhtub kangiga?
9. Miks tehakse katlamajade korstnad kõrged?
10. Kuidas kontrollida, et vedelik aurustumisel tõepoolest jahtub?
11. Kuidas vedeliku aurustumise abil on võimalik tõestada, et vedeliku molekulid liiguvad erinevate kiirustega?
12. Kuidas suhtuda reklaami, mille kohaselt lõhnaõli lõhn säilib kaua, sest see lõhnaõli ei aurustu?
13. Vee jäätumisel eraldub samapalju soojust, kui on vaja sama koguse jää sulatamiseks. Kuidas on siis võimalik, et talvel veekogud siiski jäätvad?
14. Kas vesi hakkab keema kausis, mis ujub keeva veega potis?
15. Kuidas saab saunas väliste tunnuste järgi aru, millises torus on kuum ja millises külma vesi?
16. Miks võib niiske sõrmega ohutult katsuda, kas triikraud on tuline?

Tarkusi

- Gaas täidab alati kogu ruumi
- Vedelik ja gaas annavad rõhku edasi igas suunas ühtviisi
- Rõhumisjõud on alati risti pinnaga

- Keha muutub vedelikus või gaasis kergemaks niipalju, kuipalju kaalub tema poolt välja tõrjutud vedelik või gaas
- Mida suurem on molekulide keskmine kiirus, seda kõrgem on temperatuur (ja vastupidi)
- 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.

Võnkumiste uurimiseks on sobiv kasutada mingit **pendlit**. Selleks võib olla näiteks nõõri otsa riputatud raske keha.

Kui viime pendli tasakaalust välja ja laseme selle lahti, siis hakkab pendel võnkuma. Kui meil on kaks erineva pikkusega pendlit, siis pikema pendli võnkeperiood on suurem.

Tihti tehakse selle seletamisel **viga**, väites, et pikemal pendlil tuleb läbida ühe perioodi jooksul pikem tee, mis võtab rohkem aega. Kui selline seletus oleks õige, siis peaks ju võnkeperiood olenema ka võnkeamplituudist. Paraku seda aga ei esine. Ja sellisel juhul peaks pendli niidi erinevad osad võnkuma erineva kiirusega!

Põhjus on ikkagi pöörlemise inertsuse suurenemises pendli pikkuse kasvades. Pikema pendli inerts on suurem ja sellest ka pikem periood. Siin võiks ju vastu vaielda, et siis peaks periood olenema ka keha massist, sest ka sellest oleneb inerts! Aga suurema massi korral on ka raskusjõud, mis paneb pendli võnkuma, suurem ja kokkuvõttes pendli liikumine jääb samaks.

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 lisandub veel **hälve**, mis näitab pendlikeha kaugust tasakaaluasendist. Hälbe suurus on määratud faasiga. Maksimaalset hälvet (suurimat kaugust tasakaaluasendist) nimetatakse **amplituudiks**. Kui **sumbumist** ei esine, siis amplituud ei muutu. 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.

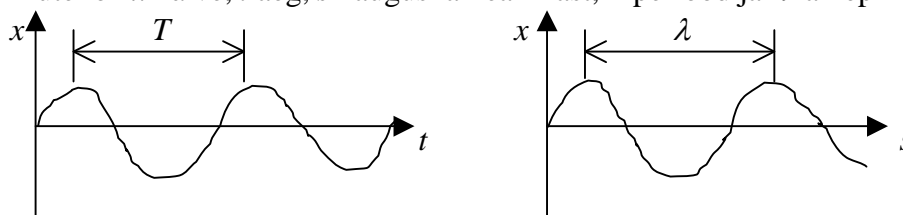
Kodutöö. Leiada harmooniliselt võnkuva punktmassi hälbed x (kaugused tasakaaluasendist), kui $\omega = 10 \text{ rad/s}$ ja võnkeamplituud $x_0 = 2 \text{ cm}$. Väärtused leiame iga 0,1 s järel 2 s kestel.

Katse. Määrata mingi pendli võnkeperioodi (või sagedust) erinevate algamplituudide korral. Järeldus katsest: võnkesagedus ei olene amplituudi suuruselt.

Laine

Katse kummipaela või plastikvedruga (slinky, magic spring, plastic rainbow, võluvedru, jne), kui on lainemasin, siis sellega. Näidata **risti- ja pikilaineid**.

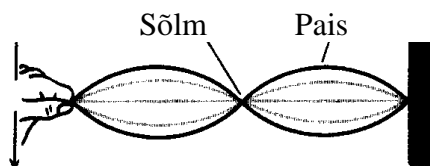
Laine on võnkumise levimine. Laine on perioodiline nii ajas kui ruumis. Toodud graafikutel on x hälve, t aeg, s kaugus laineallikast, T periood ja λ lainepikkus.



Esimest graafikut aitab ette kujutada veelainete mõõtmise 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 esimese graafiku.

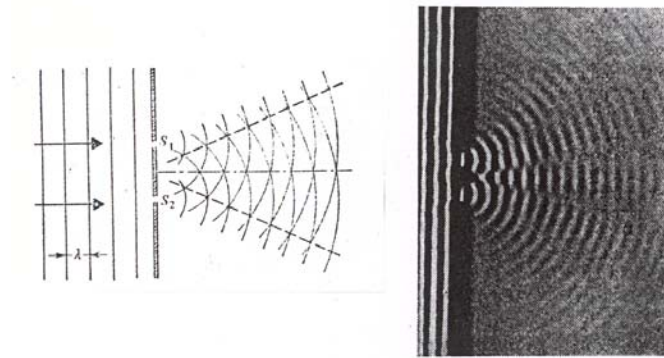
Teise graafiku saaksime, kui pildistaksime küljelt neid samu laineid ja mõõdaksime ära veetaseme kõrgused erinevatel kaugustel mõõtelatist.

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.

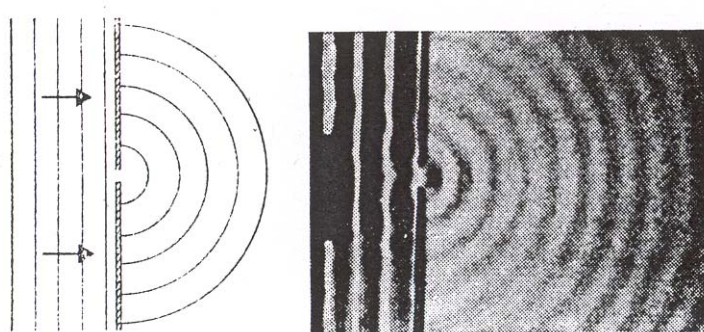


Katse. Tekitada pika (ca 5 – 6 m) kummipaela abil seisulaine ja lasta õpilastel paelast kinni võtta sõlme ja paisu kohalt.

Kulglained võivad kohtudes liituda. Seda saab demonstreerida **lainevanniga**. Lainete liitumist nimetatakse **interferentsiks**. Liitumisel võivad lained üksteist tugevdada või nõrgendada. Kui liituvad **koherentsed lained** (sama sageduse ja muutumatu faasidevahega lained), siis on liitlaine hälve võrdne liituvate lainete hälvete algebralise summaga.



Joonisel on vasakul toodud tasalainete 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. Kulglained võivad kanduda tõkete taha. Seda nähtust nimetatakse **difraktsiooniks**.



Joonisel on vasakul toodud skeem, mis näitab, kuidas lained levivad kahe lähestikku asetseva tõkke taha. Paremal on foto sellest katsest lainevannis. Sellist lainete käitumist saab seletada **Huygeni printsiibiga**, mille kohaselt igat lainepinna punkti võib vaadelda kui uut keralaine allikat. Difraktsioon ja interferents tulkevad 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 põrkuvad omavahel. Mida tihedam on keskkond, seda lähemal on naabermolekulid, mis annavad võnkumisi edasi ja seda suurem on laine kiirus.

Seda saab kontrollida, kui kuulata näiteks läheneva rongi häält pikal sirgel raudteelõigul. Kui on teada rongi lähenemise aeg, siis võib suruda kõrva vastu rööbast

ja kuulda häält palju varem kui see õhust kohale jõuab. Kõige hiljem jõuab kohale rong.

Kui keskkond puudub, siis heli ei levi. Seda saab demonstreerida katseliselt, kui panna näiteks üleskeeratud äratuskell vaakumpumba kupli alla ja kuplist õhk välja pumbata.

Laine kannab edasi energiat, mitte keskkonda. Laine energia (koguenergia $E_k + E_p$) on võrdeline keskkonna tiheduse, amplituudi ruudu ja sageduse ruuduga.

Heli

Terminoloogiline täpsustus **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 oleme näinud.

Katse. Selliseks katseks on vaja ca 30 cm pikkust metalljoonlauda. Hoiame seda ühest otsast ja painutame teise käega teist otsa ning laseme selle lahti. Joonlaud hakkab võnkuma. Nüüd surume joonlaua ühe käega vastu lauda nii, et üle laua ääre jääks ca 10 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 30 cm joonlaua võnkumisel heli?

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

Probleem. Kuidas demonstreerida heli lainelist olemust?

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 veesakesed võnkuma.

Lained võivad levida laineallikast eemale kahel viisil, pannes keskkonna võnkuma kas risti laine levimise suunaga või piki laine levimise suunda.

Kui keskkonna osakesed võnguvad risti laine levimise sihiga, on tegemist **ristilainega**, kui aga laine levimise sihis, siis **pikilainega**. Ristilaine on näiteks laine vee pinnal või elektromagnetiline. Pikilaine on näiteks õhus leviv heli.

Heli põhiiseloostajad on kõrgus, tamber, valjus ja kiirus.

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

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

Kui joonlaua võnkumise osa pikkust muuta, näiteks üha lühendada, siis järjest halvemini on näha võnkuvat joonlaua osa, sest võnkumise sagedus 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.

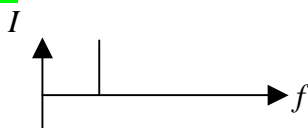
Järelikult tundub heli seda kõrgem, mida suurem on võnkumise sagedus.

Kui on võimalik kasutada monohordi või mõnd keelpilli, siis saab näidata, et heli on seda kõrgem, mida lühem on heli tekitatav pillikeel.

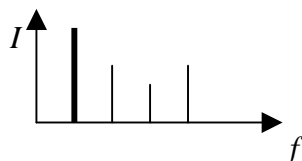
Heli kõrgus oleneb ka keele läbimõõdust ja pingutavast jõust. Jämedamad keeled tekitavad madalamat heli. Pillikeele pingutamine tõstab tekkiva heli sagedust.

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

a) **Toon**, millele vastab ainult üks võnkumise sagedus.



b) Muusikaline heli ehk **kõla**, millele vastab põhitoon (see on kõige intensiivsem) ja ületoonid;



c) **müra**, millele vastab igasuguse sagedusega ja muutuva intensiivsusega helisid.



Erinevaid heli liike saab hästi demonstreerida ostsillograafiga, aga ka klaveri, akordioni, kitarriga vms pilli abil, mis lubab mitut heli korraga tekitada.

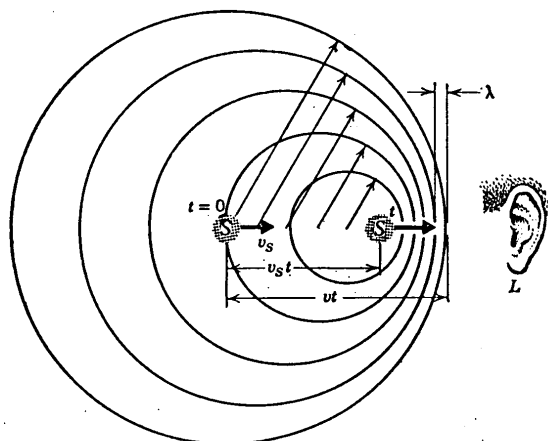
Pillikeel võib võnkuda mitme sagedusega samaaegselt. Kui näiteks pillikeele pikkus on l , siis tekib keeles seisulaine, mille lainepikkus $\lambda = 2l/k$, kus $k = 1, 2, 3, \dots$

Lisaks **põhitoonile** ($k = 1$), esinevad ka võnkumised, mille sagedus on põhitooni omast mingi täisarv korda suurem. Need on nn. **ületoonid**. Põhitoon koos ületoonidega moodustavad helispektri ehk **tämbri**.

Heli kõrgus oleneb ka sellest, kas allikas liigub vastuvõtja suhtes või ei. Allika lähenemisel heli kõrgeneb ja vastupidi, eemaldumisel muutub madalamaks. Seda võib märgata sireeniga sõitvate autode või motovõistluste korral ringrajal. 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**.



Joonisel on kujutatud heliallika poolt tekitatud lainepindu iga perioodi järel. Allikas liigub paremale kiirusega v_s . Jooniselt on näha, et liikumise suunas lainepikkus väheneb (sagedus suureneb) ja vastassuunas lainepikkus kasvab.

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).

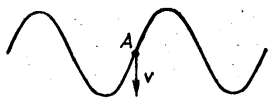
Millest oleneb heli **valjus**? Selles osas on meil vist elukogemused olemas. Kui tahad trummist kõvemalt matsu saada, tuleb kõvemini lüüa, kui tahad, et sinu koputust uksele kuuldakse paremini, tuleb lüüa kõvemini. Mida tähendab füüsika keeles *kõvemini*? See tähendab, et deformatsioon on suurem ehk heliallikas viiakse kaugemale oma tasakaaluasendist. See aga tähendab võnkeamplituudi suurenemist. Heli on seda valjem, mida suurem on amplituud, sest siis on suurem ka laine energia.

Koduprojekt

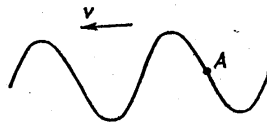
Määrata heli kiirus õhus, kasutades kaja.

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 löömise kohta kaugus 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 seda 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. Heli kiirus õhus 0°C juures on 332 m/s , õhumolekulide keskmine kiirus samal temperatuuril on ca 480 m/s . Kui õhu temperatuuri tõsta, kasvab heli kiirus. Kas heli kiirus võib saada suuremaks molekulide keskmisest kiirusest?
9. Kui kätt lehvitada, paneme ka õhu võnkuma, aga mingit heli me ei kuule. Miks?
10. Miks ma oma toas hõisates ei kuule kaja?
11. Millised kaks viga esinevad ulmefilmides, kus on näha kosmoses toimuvaid plahvatusi ja samal hetkel kuulda ka müra?
12. Kas nii saab lainet muuta nähtavaks, kui pistame heliseva helihargi otsapidi veekaussi ja jälgime veepinnale tekkivsid laineid?

Tarkusi

- Nööri otsas rippuvaid kehi võib kirjeldada matemaatilise pendliga
- Mida pikem matemaatiline pendel, seda pikem võnkeperiood.
- Matemaatilise pendli periood ei olene pendlikeha massist ega algamplituudist
- Difraktsioon ja interferents tulevad seda paremini esile, mida väiksemad on avad või tõkked lainete teel
- Laine levib tihedamas keskkonnas kiiremini
- Ristlaine korral võnguvad keskkonna osakesed risti laine levimise suunaga, pikilaine korral aga piki levimissuunda
- Laine ei kannu keskkonda edasi
- Heli allikaks on võnkuv keha
- Mida pikem pendel, seda pikem võnkeperiood
- Heli levib ainult keskkonnas
- Tihedamas keskkonnas on heli kiirus suurem

- Mida madalam temperatuur, seda väiksem heli kiirus gaasis (vedelikes ja tahkistes temperatuurist ei sõltu)
- Mida suurem sagedus, seda kõrgem heli
- Mida suurem amplituud, seda valjem heli
- Laine energia on seda suurem, mida suurem on amplituud, sagedus ja tihedus.

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 kehadega laadida. Esineb nii silindrite tõmbumist kui tõukumist. Kui on sultaneid ja elektrofoormasin, siis saab neid samadeks demodeks kasutada. Tuleks näidata vastastikmõju olenevust kehade **laengust**, kehadevahelisest kaugusest ja laengu suuruselt.

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

Miks peab kehi elektriseerimiseks hõõruma? 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?

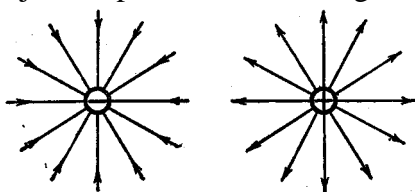
Hõõrdeelektri uurimine. Katseline vastuste otsimine eelmistele küsimustele.

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

Hõõrumisel puutuvad kehad mõnedes kohtades üksteisega väga lähedalt kokku ja osa elektrilaengut võib minna ühelt kehalt teisele. Liikuvateks laenguteks on keha sees **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. Terakesed polariseeruvad elektriväljas ja asetuvad piki välja jõujooni. **Jõujooneks** nimetatakse mõttelist joont, mis näitab elektrivälja asetatud laengule mõjuva jõu suunda. Mida tihedamalt jooned paiknevad, seda tugevam on väli.



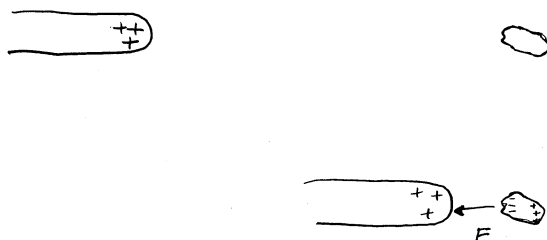
Üksiku **punktlangu** korral on jõujooned radiaalsed sirged. Kindla laengu suuruse korral on joonte arv konstantne. Elektriväli on seda tugevam, mida tihedamalt on jõujooni. Punktlangust kaugemal on jõujooni hõredamalt. Kui arendame analoogilist mõttekäiku gravitatsiooniga, jõuame tulemuseni, et $E \sim 1/r^2$.

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

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

Katse. Laeme õõnsa silindri, mis asub ühe elektrooskoobi otsas ja võtame isoleerkäepidemega 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 elektriväli nihutab laadimata kehas olevad vastasmärgilised laengud pisut endale lähemale. Sellega tekib laadimata keha ja laetud keha vahel tõmbejõud. Tõukejõud ei saa aga kuidagi tekkida.



Sellest laengute nihkumisest elektriväljas tuleb ka **dielektrikute** nimetus, mis algselt oli *dialelektrik* (*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.

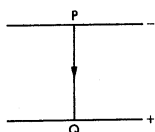
Koduprojekt

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

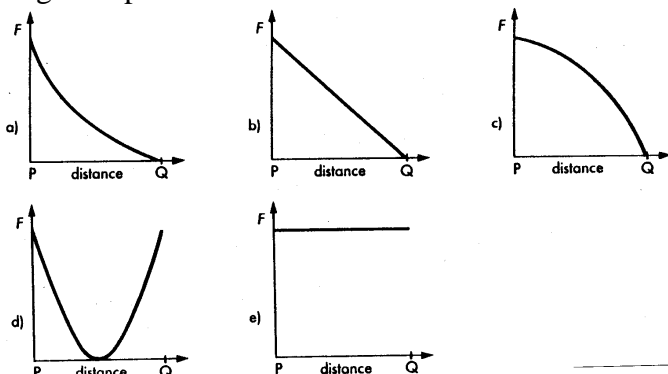
Ülesanded

1. Kui keha omandab positiivse laengu, mis juhtub siis selle massiga? Aga negatiivse laengu korral? NB! Küsimus pole selles, kas muutust on võimalik mõõta.
2. Kuidas laadida mingi keha negatiivselt ainult positiivselt laetud keha abil?
3. Head soojusjuhid on ka head elektrijuhid. Miks?

- Hõõrume täispuhutud õhupalli vastu oma juukseid ja asetame siis palli vastu ust või seina. Pall jääb sinna kinni. Miks?
- Kas on võimalik olukord, kus kahe samanimeliselt laetud keha vahel mõjuv tõukejõud on võrdne nulliga?
- 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?
- Kaldpinnalt allalibisev keha elektriseerus (hõõrdeelekter). Kas see avaldab mõju libisemise kiirusele?
- Elektrivälja jõujooned ei löiku kunagi. Miks?
- Elektrostaatika katsed õnnestuvad hästi kuiva õhuga ruumis. Miks?
- 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?



- Kuidas seletada, et laetud kehad alati tõmbavad laadimata kehasid, aga kunagi ei tõuka?
- 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 vabad laengukandjad võnguvad kindla sagedusega. Mõlemal juhul paneb vabu laengukandjaid liikuma elektriväli.

Alalisvool

Alalisvoolu mudel: tihe rivi mehi üksteise taga. Kui viimasele mehele anda tõuge, siis tõuge antakse piki rivi edasi. Kas see on elektrivoolu analoog? Ei ole, see on hääle mudel. Kui aga anda käsklus "Sammu marss!" ja kõik mehed hakkavad korruga liikuma. See on juba parem elektrivoolu mudel, sest voolu korral levib "käsklus" – elektriväli valguse kiirusega ja jõuab ka kõikide elektronideni praktiliselt korruga. Mudeli puudus: ei ole **soojusliikumist**.

Alalisvoolu analoog: ujuvad jões. Siin esineb nii suunatud liikumine (kõik ujuvad triivivad allavett) kui ka soojusliikumine (ujuvad 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 esilaterna tagasi teisele klemmile? a) vähem kui 1 ms; b) umbes 1 s; c) rohkem kui 15 min.⁸

Voolu tekkimise tingimused: peavad olema elektriväli ja vabad laengukandjad.

Voolutugevus oleneb E-vektori suuruselt, 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.

$\varphi = W_p/q$; 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 patarei negatiivse pooluse lähedal väiksemat potentsiaali kui sellest kaugemal.

Potentsiaalide vahet nimetatakse **pingeks**.

Homogeense välja korral eksisteerib lihtne seos väljatugevuse ja pingega vahel:

$E = U/d$. Teades näiteks kondensaatori plaatidevahelist pinget ja kaugust 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**.

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

Kuidas mõista lauset, et meil on vahelduvpinge väärtus 220 V? Kuidas saab vahelduvat pinget kirjeldada üks arv? Saab küll, sest jutt käib pinge **efektiivväärtusest**. See on pinge, millel on sama toime (efekt) nagu 220 V alalispingel. Millisest toimest käib jutt? Näiteks tehtud tööst või tekitatud soojushulgast.

Vahelduvpinge väärtus ja suund muutuvad ajas perioodiliselt. Meie 220 V vahelduvpinge korral muutub pinge väärtus 0 V kuni ± 380 V.

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

Juhid avaldavad elektrivoolule takistust, ei lase laengukandjatel vabalt suunatult liikuda (kas kulgeda või võnkuda). Juhis **takistus** oleneb juhi ristlõike pindlast 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 ("inimvoolu voolu tugevus") suur. Elektrivoolu korral on samuti voolutugevus pöördvõrdeline takistusega $I \sim R^{-1}$.

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. Jäáva jõu toimel hakkab keha liikuma kiirenevalt. See tähendab, et elektronide kiirus juhis järjest kasvab 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. Madalamal temperatuuril on nende võnkeamplituud väike ja nad jäävad elektronide teele vähem ette. Kõrgemal temperatuuril on võnkeamplituud suurem ja ioonid takistavad rohkem elektronide liikumist.

Analoogia tänava ületamisega keelatud kohas. See on seda rohkem takistatud, mida rohkem autosid ühes või teises suunas kihutab.

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.

Voolutugevuse olenevus temperatuurist on teistsugune **pooljuhtide** korral. Pooljuhtide takistus väheneb temperatuuri tõustes, sest juhtivuselektronide arv

suureneb temperatuuri tõustes. Põhjuseks on valentselektronide 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?
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 on ca $10^8 - 10^3$ m/s. Kuidas on siis võimalik, et lülitile vajutades süttib näiteks taskulamp kohe?
7. Kui Narva elektrijaamas vool sisse lülitatakse, siis jõuab see praktiliselt silmapilkselt Tartusse (levi aeg ca 0,5 ms). Aga hääl jõuaks sealt kohale ca 7,5 minutiga. Kuidas seda seletada?
8. 60 W ja 100 W pirn on kord ühendatud jadamisi, kord rööpselt. Võrrelge voolutugevusi pirnides.
9. Võrrelge pingeid eelmise ülesande korral.
10. Pirnid põlevad läbi tavaliselt voolu sisselülilimisel. Miks?

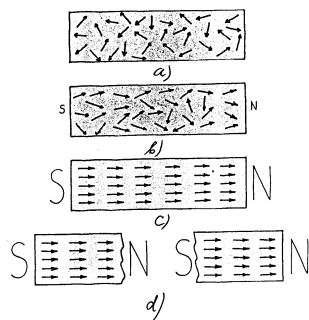
Magnetism ja elektromagnetism

Alustada tuleks katsetest **püsimagnetitega**: nende tõukumine ja tõmbumine. 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?

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 $10^{-4} \dots 10^{-3}$ cm. Selliseid aineid kutsutakse **ferromagneetikuteks**. Niisugused ained on näiteks raud, nikkel, mitmesugused sulamid. Tavaliselt on domeenide magnetväljad orienteeritus üksteise suhtes juhuslikult. Magnetvälja paigutatud ferromagneetikus orienteeruvad domeenide magnetväljad välise välja suunas ja hakkavad üksteist tugevdama: tekib püsimagnet. Kui püsimagnetit kuumutada mingi temperatuurini, siis lõhub soojusliikumine domeenide korrastatuse ja aine magnetväli kaob. Seda temperatuuri nimetatakse **Curie temperatuuriks** (Fe korral on see 768°C).

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



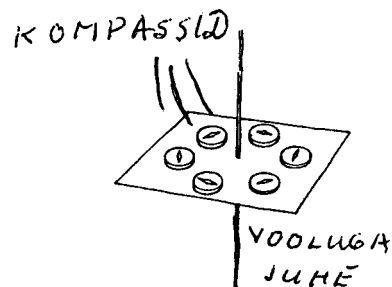
Joonisel on noolekestega kujutatud domeene ferromagnetikus erinevates olekutes: a) –magneetumata; b) –nõrgalt magneetunud; c) tugevalt magneetunud; d) – tugevalt magneetunud ja pooleks rebitud.

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

Lisaks püsomagnetile tekitab magnetvälja ka elektrivool.

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

Katse näitab, et vooluga juhtme ümber tekib magnetväli.



Selgub, et kui vooluga juhe panna magnetvälja, siis selle juhtmele mõjub mingi jõud.

Katse. Kui püsimagneti pooluste vahele panna liikuda saav juhe, milles on alalisvool, siis juhe hakkab liikuma. See näitab, et vooluga juhtmele magnetväljas mõjub jõud. Selle jõu suund on määratav **vasakukäe reeglina**: kui magnetväli on suunatud peopessa ja väljasirutatud sõrmed näitavad voolu suunda, siis väljasirutatud põial näitab mõjuva jõu suunda.

Mõnikord tehakse sellest katsest järeldus, et püsimagneti magnetväli mõjutab vooluga juhtma magnetvälja ja selle kaudu juhet. See pole õige. Üks väli ei muuda 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 induktsiooniks**.

Katse, mis demonstreerib elektromagnetilist induktsiooni: magnetpulk torgata pooli 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 magnetvälja muutumine tekitab elektrivälja.

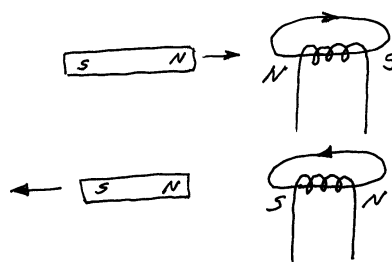
Probleem. Kas elektrivälja muutumine tekitab magnetvälja? Kuidas seda demonstreerida?

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

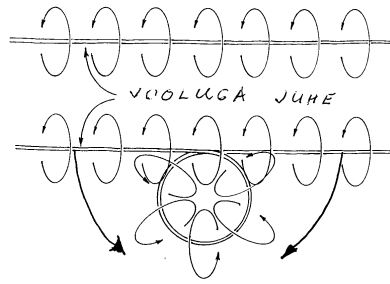
Induktsioonivoolu suuna kohta käib **Lenzi reegel**, mille kohaselt on induktsioonivoolu suund selline, et tema magnetväli takistaks voolu põhjustavat magnetvälja muutumist. Veel lühemalt: **induktsioonivool toimib alati vastupidiselt voolu esile kutsuvale põhjusele**.

Näiteks, kui me lähendame magnetpulka poolile, siis poolis tekitatakse niisuguse suunaga vool, et magnetpulgapoolsesse otsa tekib samanimeline magnetpoolus nagu pulgalgi. See takistab pulga poolile lähenemist. Kui pulka poolist eemale viia, tekib poolis selline magnetväli, mis takistab pulga eemaleviimist.

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 **elektromagnetis**. 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 kindlaks teha, kumb?
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 Maakera punktis nii?
3. Magnetnõela põhjapoolus on suunatud Põhjanaba suunas. Kuid tõmbuvad ju erinimelised magnetpoolused. Kas siin pole vastuolu?
4. Millises kohas Maal näitavad magnetnõela mõlemad otsad lõunasse?
5. Kas paigalseisvat elektrilaengut on võimalik panna liikuma magnetvälja abil? Elektrivälja abil?
6. Hõõgumiseni kuumutatud püsिमagnet kaotab oma magnetilised omadused. Miks?
7. Jalgrattur sõidab vabakäiguga mäest alla. Kas see, kui kaugemale ta veereb, oleneb ka sellest, kas ratta tuled põlevad või ei (ei kasutata patareitoitega lampe)?
8. Mille poolest elektrimootor erineb generaatorist?
9. Vaskrõngas on riputatud vertikaalselt. Kord lükatakse sellesse terasvarras, kord magnetpulk. Kas varda ja magneti liikumine mõjutab rõngast?
10. Paneme eelmises ülesandes kirjeldatud rõnga võnkuma. Võnkumised sumbuvad kiiresti, kui rõngasse torgata magnetpulk. Miks?
11. 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 magnetitevaheline kaugus, seda väiksem on mõjuv jõud
- Väljatugevus on suurem laengute lähedal
- Laetud kehal kogunevad laengud välispinnale
- Hõõrdeelekter seletub elektronide üleminekuga ühelt kehalt teisele

- Elektriväli tekitab induktsioonilaenguid
- Vool on seda suurem, mida suurem on pingeline
- Vool on seda suurem, mida väiksem on takistus
- Takistus on väike, kui juhe on jäme
- Pingeline ei tapa, tapab vool
- Ferromagneetikud koosnevad domeenidest, mille paigutus määrab magneetumuse
- Magnetväli tugevneb ferromagneetikust
- Magnetväli mõjutab ainult liikuvaid laenguid
- Vooluga juhtme ümber on magnetväli
- 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 reaalsete aatomite korral. Bohri aatomi elektroniks valime 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. Kuna elektron saab olla ainult mingitel kindlatel kaugustel tuumast, siis kiirgab aatom ainult kindlate lanepikkustega 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? Tegelikult kiirgavad küll, ainult neid kiirguvaid erivärvilisi valgusi on äärmiselt palju ja tulemuseks on valge valgus. 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 üksikus, "normaalses" aatomis. Teiste aatomite elektronide laengud nihutavad natuke vaadeldava elektroni kaugust tuumast ja see muudab elektroni energiat. Miks? 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 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 cm³ ca 10²³ tükki, siis kiirgub väga palju erineva lainepikkusega valguslaineid, mis annavad pideva spektri. Pidev spekter on omane tahketele ja vedelikele, mis hõõguvad

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 spektriiks 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 osa valgust neeldub aines. Mis on neeldumine? **Neeldumine** on protsess, mille käigus valgusenergia muutub aine siseenergiaks – soojuseks. Ei neeldu seda värvi valgus, millist värvi keha on valges valguses. Need lained peegelduvad tagasi. Sellist peegeldumist 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 valguse E-vektorile. Kui kehale langevas valguses on selliseid laineid, mille sagedus vastab mõne valentselektroni omavõnkesagedusele, siis paneb see elektroni tugevamini võnkuma ja elektron 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 poolt tekitatud elektroni võnkumised sumbuvad (lakkavad) ja see energia muutub siseenergiaks – soojuseks. Samuti võib valgusenergia minna üle võrevõnkumiste tekitamiseks, või vabade elektronide kiiruse muutmiseks jne.

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.

Üldiselt võib öelda, et kui elektronid 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**.

Ka läbipaistvad ained võivad olla värvilised. Näiteks punane klaas laseb läbi ainult punast valgust, kõik teised värvused (neile vastavad lained) neelduvad aines. Värvus on tingitud mingi aine aatomitest, mille valentselektronide omavõnkesagedus langeb kokku antud värvusele vastava valguslaine sagedusega. Need tekitavad jällegi optilise resonantsi, mille tulemusena vastava sagedusega lained levivad aines. Neid aineid nimetatakse värvaineteks.

Teiste sagedustega valguslained aga neelduvad aines, soojendades seda. Eriti hästi neelavad valgust metallid (pole läbipaistvad). Seal paneb valguslaine E vektor vabad elektronid liikuma, tekitades kõrge sagedusega elektrivoolu väikestes ruumiosades. Sellega kaasneb aga soojuse eraldumine nagu ikka elektrivoolu korral.

Ülesanded

1. Ultravalgus põhjustab päevitust, aga nähtav valgus ei põhjusta. Miks?
2. Kas kehad kiirgavad ka toatemperatuuril? Kui kiirgavad, miks me seda ei näe?

3. Kas valgele paberile kirjutatud punast kirja saab lugeda läbi punase klaasi vaadates?
4. Miks on taevas 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 lukuaugud mustad paistavad?

Valguse peegeldumine ja murdumine

Peegeldumist saab **modelleerida** lauatenнисepalli või teraskuuli pörkumise abil, mis oleks valguskvantide analoogiks. Nende abil kontrollime **peegeldumisseaduse** kehtivust.

Tõmbame valgele lehele selle servaga paralleelse 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 paberi "seina" (massiivse, sileda tasase pinnaga keha) ääre alla nii, et paberi servaga paralleelne joon ühtiks seinaga. Veeretame lauatennisse palli või teraskuuli mööda langemistrajektoori ja jälgime, kas pärast pörget toimub liikumine mööda peegeldumistrajektoori.

Kui nõgus- ja kumerpeegli uurimiseks on 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 joonalaua abil. Paneme peegli risti üle joonalaua. Selle mõõtmed peeglis ei muutu. Järelikult suurendus puudub, täpsemalt öeldes: suurendus võrdub ühega.

Peeglis on ka näha, et peeglist kaugemate jaotiste kujutised on ka peeglis 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 oleva kujutis asub silmast kaugemal kui ese, mida me teravalt ei näinud.

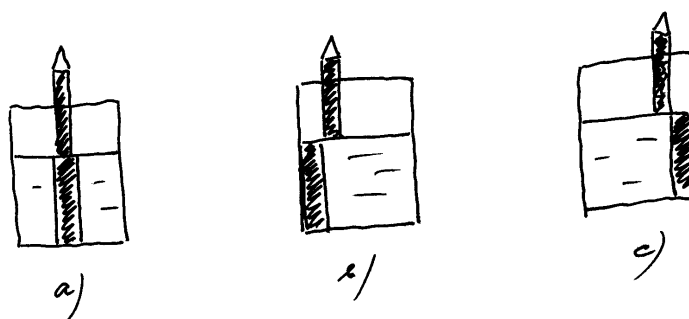
Kujutise asukoha leidmiseks tasapeeglis saab kasutada parallaksi. Parallaks on nähtus, mille korral eseme näiv asukoht sõltub vaataja silma asukoht. Selle demonstreerimiseks sobib hästi katse nn mittepõletava küünlaleegiga.

Katse. Võtame neljakandilise tüki aklaklaasi (mõõtudega vähemalt 30 x 40 cm). Klaasi ette paneme küünla ja täpselt samale kaugusele klaasi taha teise küünla nii, et küünlaid ühendav joon oleks risti klaasi pinnaga. Süütame meiepoolse küünla. Kui tagumine küünal on õiges kohas, siis paistab klaasilt peegeldunud valguses nagu põleks ka tagumine küünal. See illusioon ei olene vaatesuunast. Nüüd võib näidata, et tagumise küünla "leek" ei põleta, sinna võib näiteks julgelt sõrme sisse pista.

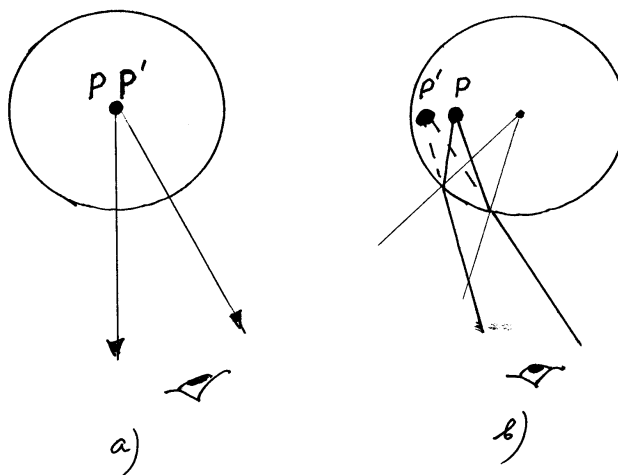
Valguse **murdumist** saab demonstreerida laserpointeriga, suunates selle kiire sogsasse vette.

Valguse murdumist saab demonstreerida ka ilma laserita. Täidame silindrilise klaasanuma poolenisti veega ja asetame selle keskele püstise pliiaatsi. Vaatame pliiaatsit

ristsuunas läbi veega täidetud anumaosa. Pead liigutamata nihutame pliiatsit paremale või vasakule. Kui pliiats on klaasi keskel, siis näeme olukorda, mida on kujutatud joonisel a). Kui pliiats nihutada keskkohast vasakule või paremale näeme olukordi, mis on kujutatud joonistel b) ja c). Pöörame tähelepanu ka pliiatsi kujutiste erinevatele läbimõõtudele.



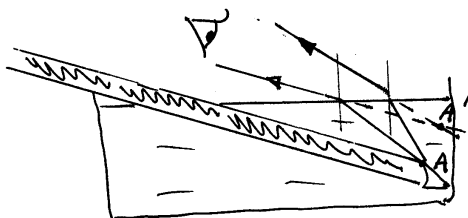
Katse tulemusi saab seletada valguse murdumisega. Arutelu lihtsustamiseks loeme klaasseina paksuse tühiseks ja murdumist seal ei arvesta. Seega vaatleme veest silindrit, mille sees asub pliiats. Kui pliiats asub silindri teljel, siis valguskiired, mis tulevad pliiatsilt vaatleja silma, on alati risti 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).



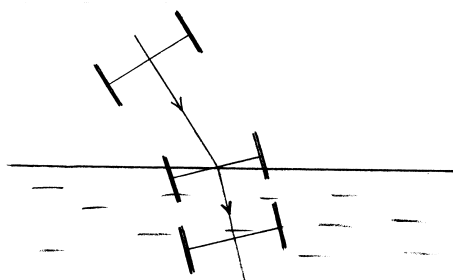
Miks vees olev pliiatsiosa paistab suurendatuna? Sest veesilinder töötab silindrilise läätsena. Selle fookuskaugust saab hinnata kujutise abil, mille tekitab klaasi taha asetatud paberilehele kaugel valgusallikas. Kuna pliiats asub läätses sees, siis on esemekaugus kindlasti väiksem fookuskaugusest ja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

Murdumisnähtust võime vaadelda ka siis, kui asetame pliiatsi veeklaasi kaldu ja vaatame pliiatsit või 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 (punkti A asendis A').



Valguse murdumist võib modelleerida veereva ratastega võlli abil. Võll on laine- frondi analoogiks. Laseme võlli alla veereda kaldpinnast, millest pool on kaetud ainega, mis takistab veeremist. 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 üks ratas liigub juba vähem takistavas keskkonnas, kuid teine liigub ikka veel takistavas keskkonnas. Rataste kiirused pole enam võrdsed ja võll pöörduv (vt. joonist).



Probleem. Klaasi sisenedes valguse kiirus väheneb. Miks aga klaasist väljudes kiirus uuesti kasvab?

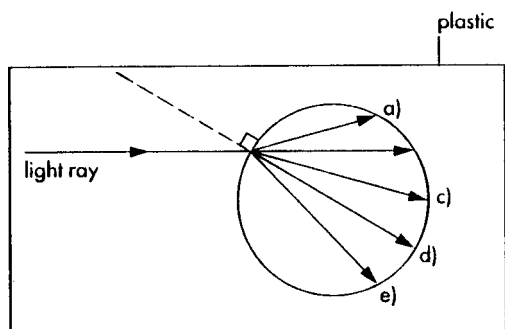
Koduprojekt

Spektri saamine päikesevalgusest veevanni ja peegli abil.

Ülesanded

1. Kaugete majade akendelt peegeldub päikesevalgus ainult hommikuti ja õhtuti. Miks?
2. Kurjategija tahab rikošetiga puruks tulistada lampi, mis asub nurga taga, aga 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 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 tasapeegli tõelise kujutise?
8. Asetage taskupeegel lauale, vaadake sinna, sulgege vasak silm ja asetage münt peeglile nii, et suletud silma ei oleks näha. Muutmata pea asendit, avage vasak silm ja sulgege parem. Nüüd pole näha paremat silma. Miks. Tehke joonis.
9. Miks me näeme lõkke ääres olles teisel pool lõket asuvaid esemeid võnkuvat?
10. Läbipaistva plastikutüki sees on silindriline tühik, nagu näidatud joonisel. Milline on õige valguskiire käik? Punktiir näitab pinnanormaali kiire langemispunktis.



11. Miks tasapeegli seinal tekivad “päikesejänku” on samade mõõtmetega kui peegel?

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 neid 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 2 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 kleeflinti ümber keritud (ca 0,5...1 mm) ja siis teisega kokku teibitud. Nii tekib pliiatsite vahele kiilukujuline pilu. Asetades pilu statiivile ja seda laseriga valgustades, tekib ekraanile (seinale) difraktsioonile iseloomulik täpistik. Laserit piki pliiatseid nihutades saab muuta pilu laiust. Katset saab 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. Suuname 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 – tärnvalatena valguse abil.

Valguse interferentsi võib demostreerida 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, oleneb omakorda liituvate lainete faaside vahest või käiguvahest.

Faasivahe δ näitab liituvate lainete faaside erinevust, mis on määratud käiguvahega 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 võngub ühes kindlas tasandis. On aineid, mis lasevad läbi ainult sellist valgust, mille elektrivektor võngub teatud tasandis. Selle tasandiga ristasandis võnkuva elektrivectoriga 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 vastasmõju saab demostreerida 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

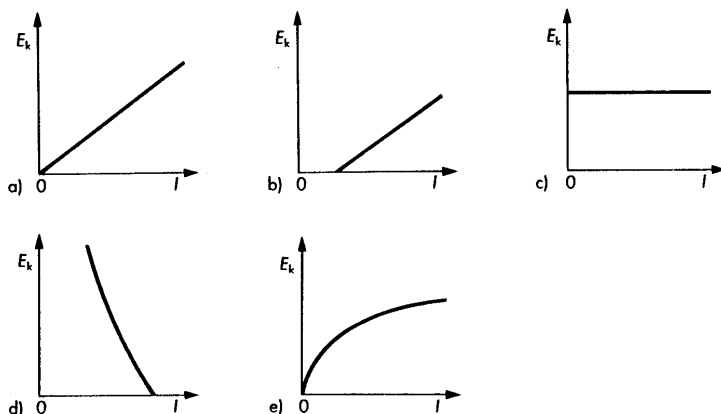
Valguse kvantolemust on raske näitlikuks teha, sest me peame katsest järeldusi tehes **uskuma**, et põhjuseks on kvandid. Näiteks klassikalisi katseid **välisfotoefekti** kohta saab põhimõtteliselt seletada ka valguse laineteooria abil. Fakti, et laineteooria kohaselt võtab ainst elektronid väljalöömine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

Fotoefekt seisneb vabade elektronide ainst väljalöömises valguskvandi toimel. Seda saab näidata elektroskoobiga ühendatud Zn-plaadi valgustamisega. Kui plaat laadida negatiivselt ja seda valgustada Hg-lambi valgusega, siis laeng kaob. Positiivse laengu korral 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, siison 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 sama marki klaasiga tegemist.

Fotoefekti saab ka mehaaniliselt **modelleerime**. Asetame ühest otsast suletud horisontaalsesse renni rea kuule (“vabu elektrone”) ja laseme neile langeda “valguskvandi” (veeretame vastu seisvaid kuule veel ühe kuuli). Kui “kvandi” energia on väike (kerge kuul, väike veeremiskiirus), siis “fotoefekt” ei esine (paigalseisev kuul ei pörku rennis reast välja). Kui “kvandi” energia on suur (raske kuul, suur kiirus), siis esineb “fotoefekt” (kuul lendab reast välja).

Ülesanded

1. Miks on seebimullid värvilised?
2. Miks kuival asfaldil olev õlilaik ei tekita värvilisi laike?
3. Miks raadiolained painduvad majade taha, valguslained mitte?
4. Millised eelised on Polaroid päikesepriididel?
5. Kuidas teha kindlaks ükskiku polaroidi läbilaske tasandit?
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 rohelise valguse kvandist. Kas on mõtet rääkida ka 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 valguslaine ja helilaine on ühesugune sagedus. Kummal on aga suurem lainepikkus?

Tarkusi

- Valgust tekitavad elektronid, mis pärast ergastamist liiguvad madalamatele energiatasemetele.
- Ergastamisel viiakse elektrone tuumast kaugemale
- Soojuskiirguse ergastamiseks antakse energiat juurde kogu ainele
- Lumineestsentsi ergastamiseks antakse energiat juurde ainult elektronidele
- Aine paistab valges 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

- Murdumisel kaldub rohkem kõrvale sinine valgus, difraktsioonil punane
- Mitte igasugune valgus ei tekita fotoefekti

18. Mikromaailm

Mikromaailm on looduse osa, kus kehade mõõtmed on väiksemad **aatomi mõõtmetest**. Seal kehtivad hoopis teistsugused liikumiseeskirjad ja vastastikmõjud kui makromaailmas. Seal pole selget vahel **ainel** ja **väljal** (osakesel ja lainel). Kusjuures eksisteerib kindel seos osakese energia ja talle vastava laine sageduse vahel: $E/f = \text{const}$. Tavaliselt antakse **kvandenergia** kujul: $E = hf$, kus f on vastava laine sagedus ja h Plancki konstant. See seos on kooskõlas faktiga, et suurema sagedusega lainel on rohkem energiat (nagu oli ka mehaanilisel lainel). 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 ruumi piirkonnas aga seda mingi tõenäosusega. Kõike seda on võimatu ette kujutada, sest **makromaailmas**, mida me suudame oma meeltega tajuda, pole midagi sarnast. 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 – kroonidest, 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 potentsiaalse energiaga. Trepiastmete vahepeal aga energia muutub ja kindlat väärtust sellel pole.

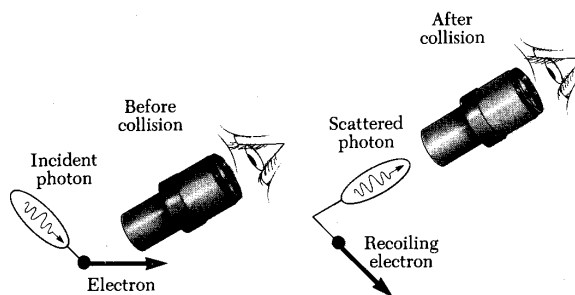
Aatomis on elektronide energiad määratud mingite täisarvudega (erandiks on **spinn**, mida kirjeldavad poolarvulised väärtused). Tähtsaim neist on nn **peakvantarv**, mis võib omada väärtusi 1, 2, 3, .. Oleku energia ongi põhiliselt määratud selle kvantarvu ruuduga. Sellepärast pole ka energiatasemed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

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 illustratsiooniks 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.



Kvantmehaanikas esineb veel palju makromaailmas tundmatuid nähtusi. Näiteks nn. **tunneliefekt**, 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.

Elektroni energia aatomis on seda suurem, mida kaugemal see 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.

Massidefekt seisneb selles, et vabalt eksisteerivate nukleonide masside summa on suurem kui sama arvu nukleonide masside summa tuumaks koondunult. Mass kaoks nagu kuhugi ära. See loomulikult ei kao kuhugi, vaid muutub tuumaks ühinemisel elektromagnetiliseks kiirguseks. Energia kiirgumist aitab mõista analoogia agregaatolekute muutustel esineva soojuse eraldumisega, näiteks aine üleminekul gaasilisest olekust vedelasse või tahkesse olekusse. Mõlemal juhul aatomite liikumisvabadust piiratakse ja osa kineetilisest energiat “jääb üle” ning see antakse soojusena ära. Ka nukleonide korral võib tuumas olevate nukleonide liikumisvabadust lugeda piiratuks ja seetõttu ongi nende energia väiksem.

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 kooslus. Tänu tunneliefektile 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 paardid, mis tants-tantsult võivad muutuda. Peo lõppedes võivad sealt lahkuda paardid, mis on alfa osakeste analoogiks.

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

Gammakiirgus on suure sagedusega elektromagnetiline kiirgus. See tekib siis, kui tütartuumad lähevad põhiolekusse. Energia ülejääk kiiratakse gammakiirgusena välja.

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. Kui Plancki konstant muutuks, kas me saaksime sellest aru?
5. Radioaktiivse isotoobi poolestusaeg on 1 ööpäev. Kuipalju seda isotoopi on alles 1 päeva pärast? Kolme päeva pärast?
6. Kas iidsete kivikirveste vanust saab määrata radioaktiivse süsiniku meetodil? Miks?
7. 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" (prootoni 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. Fizitšeskii feierverk. Moskva. Mir. 1989 (venek.).
5. L. Bloomfield. How Everything works? Wiley. 2008.
6. M. Tultštšinski. Küsimusülesandeid füüsikast. Tallinn. Valgus. 1982.
7. Füüsika koolitarkus. www.fyüsika.ee/opik/

Eksamiküsimuste teemad

Eksamil ei tule enam lahendada ülesandeid peatükkide lõpust

1. Teoreetilised alused

Mõtlemisviisi ja nende liigid. Täppis- ja loodusteadusliku (TTMV ja LTMV) mõtlemisviisi sarnasused ja erinevused. LTMV kujundamise võtted. Füüsikaülesannete lahendamise kaks komponenti. Füüsika kasutamine teistes loodusteadustes.

2. Praktilised rakendused

Kulgmine. Keskmise- ja hetkkiirus. Keskmise- ja hetkkiirendus. Punktmass ja massikese (selle katseline 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 olenevus kehadevahelisest kaugusest. Vaba langemine. Raskusjõud ja kaal. Kaalutus. Esimene kosmiline kiirus.

Pöörlemine. Pöörlemine ja tiirlemine. Periood ja sagedus. Joonkiirus ja nurkkiirus. Kesktõmbe- ja tõukejõud. Pöörlemise inerts. Jõumoment. Keha tasakaalu tingimus.

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

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

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

Võnkumised, lained, heli. Võnkumine ja laine. Lainete liigid. Heli allikas. Heli omadused. Doppleri efekt.

Elekter ja magnetism. Hõrdeelekter. Elektrostaatiline induktsioon. Alalis- ja vahelduvvool. Metalli ja pooljuhi takistuse sõltuvus temperatuurist. Püsिमagnet. Ferromagneetik. Vooluga juhtme ümber olev magnetväli.

Valgus. Valguse kiirgumine. Isoleeritud aatomi ja tahkise kiirgus. Kehade värvus. Peegeldumine ja murdumine. Pliiats veeklaasis. Fotoefekti modelleerimine.

Mikromaailm. Määramatuse relatsioon (täpsuspiirang). Bohri mudel. Massidefekt.

Kõik tarkused ja katsed.

28.11.07.

H. Voolaid