

Eesti Füüsika Selts

Füüsikalise looduskäsitluse alused

õpik gümnaasiumile

autorid:
Indrek Peil
ja
Kalev Tarkpea

Tartu 2012

1. Sissejuhatus füüsikasse	3
1.1. Maailm, loodus ja füüsika	3
1.1.1. Füüsika põhikoolis ja gümnaasiumis	3
1.1.2. Inimene, maailm ja maailmapilt	5
1.1.3. Loodus ja loodusteadused	6
1.1.4. Füüsika kui eriline loodusteadus	8
1.2. Vaatleja kujutlused ja füüsika	12
1.2.1. Vaatleja mõiste	12
1.2.2. Füüsikaline tunnetusprotsess	14
1.2.3. Füüsika kui paljude vaatlejate ühine kujutus	16
1.3. Nähtavushorisonid ja füüsika	16
1.3.1. Nähtavushorisoni mõiste	16
1.3.2. Sisemine ja väline nähtavushorison	17
1.3.3. Makro-, mikro- ja megamaailm	20
2. Füüsika uurimismeetod	22
2.1. Loodusteaduslik meetod ja mõõtmised	22
2.1.1. Loodusteaduslik meetod ja füüsika osa selles	22
2.1.2. Teaduslike teadmiste saamine füüsikas	24
2.1.3. Mõõtmised füüsikalistes loodusteadustes	26
2.2. Mõõtmised ja Mõõteseadus	27
2.2.1. Mõõtmisprotsess ja mõõteseadusandlus	27
2.2.2. Mõõtesuurused, mõõtevahendid ja mõõteriistad	29
2.2.3. Etalonid ja mõõteriistade taatlemine	30
2.3. Rahvusvaheline mõõtühikute süsteem (SI)	32
2.3.1. Erinevad mõõtühikud ja ühikute süsteemid	32
2.3.2. Meeter, sekund ja kilogramm	34
2.3.3. Kelvin, amper, kandela ja mool	35
2.3.4. Mõõtühikute teisendamine	39
2.4. Mõõtmise täpsus	41
2.4.1. Mõõtmise täpsuspiirid ja mõõtemääramatus	41
2.4.2. A- ja B-tüüpi hinnangud mõõtemääramatusele	43
2.4.3. Mõõtemääramatuse praktiline hindamine	46
2.5. Füüsikalised mudelid	48
2.5.1. Loodusteaduslike mudelite liigid	48
2.5.2. Praktiline mudeli loomine	52
3. Füüsika üldmudelid	55
3.1. Füüsikalised objektid ja suurused	55
3.1.1. Mis on füüsika üldmudelid?	55
3.1.2. Füüsikalised objektid	55
3.1.3. Füüsikalised suurused kui looduse üldmudelid	57
3.1.4. Skalaarsed ja vektoriaalsed suurused	58
3.1.5. Füüsika ja matemaatika	60
3.2. Pikkus, kiirus ja aeg	61
3.2.1. Kehade mõõtmed ja pikkus	61
3.2.2. Ruumi mõiste	61
3.2.3. Kehade liikumisolek, kiirus ja absoluutne aeg	62
3.2.4. Liikumiste võrdlemine ja aeg	64
3.3. Liikumise üldmudelid	66
3.3.1. Kulgemine	66
3.3.2. Pöörlemine	66

3.3.3. Kuju muutumine	67
3.3.4. Võnkumine ja laine	68
3.4. Aine ja väli	69
3.4.1. Aine, kehad ja vastastikmõju	69
3.4.2. Väli kui vastastikmõju vahendaja	69
3.4.3. Mõju vastastikusus. Newtoni III seadus.	70
3.4.4. Avatud ja suletud süsteemid	71
3.5. Kehade liikumiseoleku muutumine	72
3.5.1. Kehade inertsus. Newtoni I seadus.	72
3.5.2. Liikumiseoleku muutumine. Kiirendus.	72
3.5.3. Kiirenduse võrdelisus jõuga. Newtoni II seadus.	73
3.6. Protsessid ja olekud	74
3.6.1. Töö kui protsessi kirjeldav suurus	74
3.6.2. Energia kui süsteemi olekut kirjeldav suurus	74
3.6.3. Kineetiline ja potentsiaalne energia	75
3.7. Võimsus ja kasutegur	76
3.7.1. Võimsus kui töö tegemise kiirus	76
3.7.2. Seadme nimivõimsus ja kasutegur	76
4. Füüsika üldprintsüübid	76
4.1. Põhjuslikkus ja juhuslikkus	76
4.1.1. Füüsika ja põhjuslikkus	76
4.1.2. Põhjuslikkuse avaldumine ja põhjuslikkuse liigid	78
4.1.3. Füüsikast tulenevad võimalused ja füüsikaga seotud ohud	81
4.2. Printsüübid füüsikas ja atomistika	83
4.2.1. Füüsikaline printsüüp kui meie teadmiste piir	83
4.2.2. Aksiomid matemaatikas ja printsüübid füüsikas	84
4.2.3. Atomistlik printsüüp	85
4.3. Teised füüsikalised printsüübid	87
4.3.2. Energia miinimumi printsüüp	87
4.3.3. Tõrjutusprintsüüp	87
4.3.4. Superpositsiooniprintsüüp	88
4.4. Absoluutkiiruse printsüüp	89
4.4.1. Absoluutkiirus ja klassikalise füüsika kriis	89
4.4.2. Relativistliku füüsika alused	92
4.4.3. Aja aeglustumine ja pikkuste lühenemine	93
4.4.4. Massi suurenemine	96
4.4.5. Massi ja energia samaväärsus	97
4.5. Terviklik kaasaegne füüsikaline maailmapilt	99

Märkus: Tegemist on õpiku teksti minimaalmahulise versiooniga, mida internetiühenduse olemasolu korral on soovitatav lugeda, tutvudes paralleelselt illustreerivate, sh interaktiivsete materjalidega Indrek Peili FLA veebilehel.

<http://www.syg.edu.ee/~peil/10 fla/>

Neid materjale saab kindlasti kasutatud õpiku lõppvariandi illustreerimisel.

Konkreetne viide on esitatud kujul: Peil 1.2. [see tähendab: klikkida sisukorras punktile 1.2. Sissejuhatus füüsikasse, teine teema] – **interaktiivne füüsikalise tunnetusprotsessi mudel.**

1. Sissejuhatus füüsikasse

1.1. Maailm, loodus ja füüsika

1.1.1. Füüsika põhikoolis ja gümnaasiumis

Õpik, mille äsja üheskoos avasime, eeldab et selle kasutajal on juba olemas mingi kogemus füüsikaga. Kaude puutusime füüsikaga kokku juba 7. klassi *Loodusõpetuse* tundides. 8. ja 9. klassis sai aga läbitud esimene ring süstemaatilist füüsikaõpet. Loodetavasti on sellest meelde jäänud, et **füüsika uurib looduse (kr.k. *physis*) kõige üldisemaid ja põhilisemaid seaduspärasusi**. Põhikooli füüsikakursustes alustasime uut teemat reeglina asjakohaste näidetega tavaelust ja tegime suhteliselt lihtsaid katseid. Seejärel püüdsime tulemusi lühidalt kokku võtta, kasutades juba mõningaid **füüsika keele oskussõnu** ehk füüsikaliste **nähtuste, suuruste** ja nende **mõõtühikute** nimetusi. Saime teada, et füüsikalistel suurustel ja mõõtühikutel on olemas kindlad **tähised**. Nendeks olid reeglina vastavate ladinakeelsete sõnade esitähed. **Suuruste tähiste abil kirja pandud füüsikalise sisuga lauseid** nimetati füüsika **valemiteks**. Neid tuli kasutada füüsikaliste arvutusülesannete lahendamisel. Õnneks esines põhikooli füüsikas valemeid suhteliselt vähe ja muresid nad meile loodetavasti ei põhjustanud.

Põhikooli füüsikaõppe kõige tähtsamaks eripäraks oli **induktiivne** käsitlus. See tähendab, et püüti **liikuda üksikult üldisele**. Uus, laiem kehtivusalaga teadmine saadi üksikfaktide (kitsama kehtivusalaga teadmiste) üldistamise teel. Põhikooli füüsikas tehti järeldusi mõnede üksikute tavaelust tuntud näidete ja õpetaja poolt teostatud lihtsate demokatsete põhjal. Nende järelduste üldisuse aste ei saanud olla väga kõrge. Seda, et mingi üldistus kehtib kogu looduses, tuli enamasti lihtsalt uskuda. Füüsikakabinetis polnud vahendeid kuigi keeruliste katsete teostamiseks. Õpetaja ja õpiku autor pidid oma näidetes reeglina kasutama üpris käegakatsutavaid asju, sest põhikooli õpilaste loodusteaduslikule kujutlusvõimele ei saanud nad väga palju loota. Mis aga kõige tähtsam – väga suure üldistusjõuga järeldustest püüti põhikooli füüsikas sageli lihtsalt hoiduda. Põhikooli füüsikaõppe sihiks oli **anda õpilastele tavaelus toimetulemiseks vajalikke teadmisi ja oskusi**. Seejuures vaadeldi suhteliselt eraldiseisvatena füüsikalise looduskäsitluse üksikuid, suurema praktilise väärtusega fragmente (liikumisõpetus, valgusõpetus, elektriõpetus, soojusõpetus) ning **ei seatud veel eesmärgiks neist tervikpildi kujundamist**.

Gümnaasiumi füüsikaõpe aga ei saa taoliste eesmärkidega piirduda. Gümnaasium valmistab noori ette õpinguteks kõrgkoolis. Gümnaasiumi lõpetajalt oodatakse juba mingilgi määral tervikliku maailmapildi olemasolu. Eeldatakse tema oskust eristada olulist teavet ebaolulisest ja teaduslikku väidet ebateaduslikust. Temalt oodatakse suutlikkust eraldada meid tänapäeval ümbritsevast infomerest just konkreetse probleemi lahendamiseks vajalikku infot. **Seetõttu peavad gümnaasiumi füüsika-kursused andma süsteemse ülevaate kõigest olulisest, mida kaasaegne füüsika looduse kohta üldse väita suudab**. Samas pole aga lootust demonstreerida katseliselt kõigi esitatud väidete kehtivust. Vajalikud katsevahendid oleksid veel palju kallimad ja keerukamad kui põhikooli füüsika katsetes. Meil tuleb harjuda sellega, et gümnaasiumi füüsikaõpe on paratamatult suuresti **deduktiivne**. See tähendab, et **liigutakse üldiselt üksikule**. Juba gümnaasiumi esimeses füüsikakursuses formuleeritakse peamised füüsikalised **printsüübid**, ehk **kõige üldisemad tõdemused looduse kohta**. Printsüüpide tõestamist kohe pärast nende sõnastamist aga eesmärgiks ei seata. **Printsüüpide paikapidavust tõestab asjaolu, et loodust vaadeldes me veendume**

ikka ja jälle nende kehtivuses ning ei näe mitte kusagil erandeid printsiipidest. Nii siis juhitaksegi kogu edaspidises füüsikaõppes pidevalt tähelepanu selle või teise printsiibi ilmumisele.

Eesmärk demonstreerida füüsikatunnis katseliselt kõigi käsitletavate seaduste kehtivust on veelgi kohatum arvestades, et niisugust sihti ei sea endale isegi mitte elukutselised füüsikud. Ka füüsikud pole ise läbi teinud kõiki füüsika põhiprintsiipide aluskatseid. Loodus on liiga mitmekesine selleks, et üks inimene jõuaks kõiki looduseadusi isiklikult uurida. Iga loodusteadlane tegeleb detailselt omaenda kitsa temaatikaga ning lihtsalt usaldab oma kolleege, kes töötavad teistes valdkondades.

Gümnaasiumi füüsikaõppe eripära jätkuval avamisel täheldame, et tegeledes mistahes keeruka ning omavahel seostatud teadmiste süsteemiga, oleme sageli raske küsimuse ees – millest alata? Ühte kindlat loodusnähtust on hea uurida siis, kui teisi sellega seonduvaid nähtusi on juba vaadeldud, vajalikud taustateadmised on olemas. Millestki aga tuleb ometi alustada ning seda tuleb teha suuresti ilma probleemi tausta tundmata. Sellises olukorras valivad õppetekstide autorid sageli ajaloolise lähenemisviisi. Nad kordavad vastava loodusteaduse ajaloos reaalselt kasutatud arutluskäiku, vaatlevad nähtusi nende tundmaõppimise ajaloolises järjestuses. Kahtlemata on see õpetlik, aga olulise info hulga pideva kasvu tingimustes üha raskemini teostatav. Meil pole aega kaasa mängida kõiki inimtunnetuse ajaloolisi eksisamme. Seetõttu alustame füüsika õppimist gümnaasiumis kohe kokkuvõtliku ülevaatega põhifaktidest, millele tugineb kaasaegne füüsikaline maailmapilt. Need on koondatud käesolevasse esimesse kursusesse *Füüsikalise looduskäsitluse alused* (edaspidi kasutame lühendit FLA).

FLA kursuses püüame üheskoos mõista, mis on loodus, millega tegeleb füüsika ja mille poolest eristub füüsika teistest loodusteadustest. Selleks vaatleme lähemalt füüsika olemust, uurimismeetodeid, üldmudeleid ja üldprintsiipe. Füüsikaliste mõistete sisu üritame kõigepealt avada tavakeele sõnadega. Alles ülejäänud neljas kursuses hakkame süstemaatiliselt kasutama füüsika keelt. Neis jätkukursustes uurime kehade liikumist ja väljade toimet, füüsika energeetilisi rakendusi ning kõige lõpuks meeleeelunditega vahetult tajumatut mikro- ja megamaailma füüsikat. Võib väita, et FLA kursuse eesmärgiks ei ole õpetada teid füüsikaga tegelema. FLA kursuses püütakse vaid selgitada, miks on hea looduseadusi tunda ning millist kasu saab ühiskond mõnede oma liikmete füüsika- ja tehnikateadmistest. FLA kursus mõtestab füüsikaga tegelemist. Selleks tegevuseks vajalikke konkreetseid teadmisi ja oskusi pakuvad juba neli ülejäänud füüsikakursust.

Mida öelda selle sissejuhatuse lõpetuseks? Gümnaasiumi füüsikaõpe on olnud edukas, kui me selle lõpul mõistame, et füüsika ei ole kõigest veidrate sõnade ja märkide süsteem. Vastupidi, füüsika on üks tähtsamaid vahendeid selleks, et end meie maailmas koduselt tunda. Kui füüsikaga ei tegeldaks, siis oskaksid inimesed vaid karta neile tundmatuid loodusjõude. Poleks ka olemas kogu kaasaegset tehnoloogiat ning selle poolt loodud hüvesid. Kui Eestis üldse ei tegeldaks füüsikaga, siis ei suudaks mitte ükski Eesti elanik kuuluda nende väga väheste hulka, kes loovad uusi tehnoloogiaid ning kellele ülejäänud osa inimkonnast vastavate hüvede kasutamise eest maksab. Ilma füüsikata Eesti jääks lootusetult vaeseks, rumala ja odava tööjõuga maaks.

1.1.2. Inimene, maailm ja maailmapilt

Juba sünnist peale tutvub inimene mitmesuguste lihtsate asjade ja nähtustega enda ümber. Mõnenädalane laps oskab vaid nutuga märku anda oma külma- või näljatundest. Mõnekuune laps aga tegeleb juba aktiivselt selle maailma uurimisega, kuhu ta on sattunud. Laps asub kompama oma keha, lelusid, voodipiiret ja lutipudelit. Ta püüab end pöörates või roomates **liikuda** – muuta oma keha asukohta, asendit või kuju. Laps ei tea veel, et mingis mõttes on ta juba asunud tegelema füüsikaga. Ümbritseva maailma kohta aistinguid saades püüab laps neis sisalduvat infot süstematiseerida ja luua uusi olukordi, saamaks seni veel kogemata aistinguid. Füüsikas nimetatakse seda viimast tegevust eksperimenteerimiseks.

Esiailgu ei erine väikelapse käitumine kuigivõrd kassipoja või kutsika omast. Mõlemad õpivad oma vigadest. Näiteks puudutades töötava pliidi küttekeha, saavad nii laps kui kassipoeg valuaistingut, mis salvestub mällu ja samalaadse olukorra kordumisel hoiatab taas ohtlikku liigutust tegemast. Bioloogias nimetatakse seda tingrefleksi tekkimiseks. Kui laps õpib rääkima, siis hakkavad temani jõudma vanemate inimeste teadmised ja tekib mõtlemisvõime, mis eelkõige eristab inimlast loomalapsest. Üpris samaaegselt kõne võimega tekib lapsel *mina*-tunnetus. See tähendab, et laps hakkab teadvustama piiri sisemise ja välise, *minu* ja *mitte-minu* vahel.

Kui inimene kasutab iseenda kohta mõistet *mina*, siis **maailma** moodustab kõik tema *mina* piirist väljapoole jääv ehk *mitte-mina*. Vastavalt omab sõna *maailm* väga palju tähendusi. Me hakkame edaspidi nimetama *maailmaks* kõike, mis ümbritseb mistahes konkreetset inimest ehk **indiviidi** samamoodi nagu kõiki teisi inimesi. Seega jäävad vaatluse alt välja inimese *mõttemaailm*, *tundemaailm* ja muud sellised *maailmad*. Valdava osa inimeste usk nii määratletud välismaailma **objektiivsesse** ehk mistahes indiviidist sõltumatusse eksistentsi põhinebki asjaolul, et kõik tervete meeleelunditega inimesed saavad nende elundite abil maailma kohta põhijoontes ühesugust infot. Tähele pane ka, et rangelt võttes on igal inimesel oma maailm ja kõik teised inimesed on ühe konkreetse inimese maailma osad.

Maailmapildiks on kombeks nimetada teadmiste süsteemi, mille abil inimene tunnetab teda ümbritsevat maailma ja suhestab end sellega. Maailmapilt on kogu süstematiseeritud info, mida indiviid maailma kohta omab. Võib rääkida ka suure inimgrupi või inimkonna kui terviku **kollektiivsest maailmapildist**, mis on kõigi antud gruppi kuuluvate inimeste maailmapiltide koondvariant. Kui soovitakse rõhutada maailmapilti moodustava info saamise ühesuguseid ehk **universaalseid** füüsikalisi meetodeid või maailmapildi äärte puudumist, siis kasutatakse sageli *maailmaga* samas tähenduses mõistet *Universum*. Pole midagi füüsikaliselt uuritavat, mis jääks väljapoole Universumit. Rangelt võttes tuleneb inimlik usk ääretusse ja ühesuguste seaduste alusel ehk universaalselt toimivasse Universumisse kuni XX sajandi alguseni ka teaduses õigeks peetud Giordano Bruno printsibiist, mille kohaselt Universumil pole algust ega lõppu ei ruumis ega ajas. Kõnealust printsipi seostatakse küll itaalia filosoofi Giordano Bruno (1548 – 1600) nimega, kuid lõpmatu Universumi idee on formuleeritud juba suure Vana-Kreeka mõtleja Aristotelese (384 – 322 e.m.a) teostes. Kaasajal üldtunnustatud Suure Paugu teooria kohaselt on Universumil siiski olemas algus, aga sellega tutvume lähemalt *Mikro- ja megamaailma füüsika* kursuses.

Kerge on märgata, et Universumis esineb tasemeline struktureeritus. Ühe kindla **struktuuritaseme** moodustavad ligikaudu ühesuguste mõõtmetega ja sarnaselt

käituvad objektid, näiteks inimest tema igapäevaelus ümbritsevad asjad (tool, laud, kapp, uks jne). Igal struktuuritasemel toimuvaid nähtusi võib seletada just sellel tasemel oluliste seaduspärasuste abil ja see ei sõltu kuigivõrd teistele tasemetele iseloomulikest nähtustest. Universumi struktuuritasemetega tutvume lähemalt allpool (p.1.1.3). Praegu aga märgime vaid, et maailma tasemelise struktureerituse ja mitmekesisuse rõhutamisel kasutatakse maailma kohta mõistet *loodus*.

1.1.3. Loodus ja loodusteadused

Sõna *loodus* ongi *maailma* see sünonüüm, mis kõige probleemivabamalt sobib füüsikalisse konteksti. Sõnal *maailm* on ju olemas ka mittefüüsikalised tähendused (*mõttemaailm*, *tundemaailm* jne), sõnaga *Universum* kaasnevatest probleemidest oli aga juba ülalpool juttu. **Loodus** (lad.k. *natura*) on inimest ümbritsev ja inimesest sõltumatult eksisteeriv keskkond. Loodus vastandub selles määratluses inimeste poolt loodud ehk **tehiskeskkonnale**, aga ka inimesi ümbritsevale mentaalset ehk vaimset komponenti (kunsti, muusikat, arhitektuuri, kirjandusteoseid jne) sisaldavale keskkonnale, mida nimetatakse **kultuuriks**. Me ei hakka edaspidi *looduse* sünonüümina kasutama paljudele soveti-süsteemis kasvanud inimestele harjumuslikku sõna *mateeria*, kuna see sõna on tugevasti politiseeritud. Veidi etteruttavalt olgu veel öeldud, et kui me peaksime kaasaegse füüsikalise looduskäsitluse kokku võtma vaid ühteainsasse lausesse, siis oleks see lause järgmine: *Kõik koosneb ainest ja väljast*. **Aine** ja **väli** on kaks põhimõtteliselt erinevalt käituvat looduse alget. Lähemalt tutvume nende erinevustega käesoleva õpiku kolmandas ja neljandas peatükis.

Nagu juba ülalpool öeldud, esineb looduses tasemeline **struktureeritus**. Igal kindlal struktuuritasemel toimuvaid nähtusi võib seletada sellel tasemel oluliste seaduspärasuste abil ja see ei sõltu kuigivõrd teistele struktuuritasemetele iseloomulikest nähtustest. Näiteks seletavad gümnaasiumi *Mehaanika* kursuses õpitavad Newtoni seadused ja gravitatsiooniseadus väga hästi Päikesesüsteemi komponentide (planeetide, asteroidide, komeetide jne) liikumist. Seejuures pole üldse olulised *Elektromagnetismi* kursuses uuritavad elektrijõud, mis makrokehi planeetidel koos hoiavad. Ammugi pole Päikesesüsteemi toimimise mõistmiseks vaja teada näiteks bioloogias kehtivaid pärilikkuse seadusi. Erinevad loodusteadused tegelevad looduse erinevate struktuuritasemetega.

Joonisel 1.1. on esitatud **looduse struktuuritasemete** skeem, mille vasakpoolses ääres suureneb alt üles uuritava loodusobjekti iseloomulik ehk **karakteristlik** mõõde (pikkus või laius), skeemi keskosas on aga toodud näiteid tüüpilisest vaadeldavast objektist. Mõõtmete skaalal on igal ülemisel real paiknevad objektid vastava alumise rea objektidest ligikaudu kümme korda pikemad- laiemad. Kui tegemist on mitte enam järgmise vaid juba ülejärgmise reaga, siis on mõõtmete erinevus juba sajakordne. Nii on näiteks laps ligikaudu 10 korda pikem meriseast, merisiga aga omakorda 100 korda pikem algloomast (ca 1 mm pikkusest amööbist või vetikast). Värvikoodiga (**sinine**, **kollane**, **roheline**, **hall**) on vastavalt näidatud vaadeldava struktuuritasemega kõige rohkem tegelev loodusteadus: **füüsika**, **geograafia**, **bioloogia** või **keemia**. Mõistagi on see *kõige rohkem* üpris tinglik, sest näiteks keemia ning bioloogia piirmiste harude uurimisobjektide mõõde (1 – 100 nm) on ligikaudu ühesugune. Seega on erinevate loodusteaduste tegevusväljad üpris suures kattumises. Näiteks mingi uurimistöö liigitumine kas bioloogiaks või keemiaks sõltub eelkõige sellest, kas kasutatakse bioloogia või keemia spetsiifilist teaduskeelt (mõistetesüsteemi).

Joonis 1.1. Looduse struktuuritasemete skeem. Värvikoodiga (sinine, kollane, roheline või hall) on näidatud vastava struktuuritasemega kõige rohkem tegelev loodusteadus: füüsika, geograafia, bioloogia või keemia. Skeem pakub meile ka hea võimaluse õppida või korrata mõõtühikute eesliidete süsteemi (kilo-, mega-, giga- jne)

Mõõde:

10^{26} m
 10^{25} m
 10^{24} m
 10^{23} m
 10^{22} m
 10^{21} m
 10^{20} m
 10^{19} m
 10^{18} m
 10^{17} m
 10^{16} m = ca 1 va (valgusaasta)
 10^{15} m
 10^{14} m
 10^{13} m = 10 Tm
 10^{12} m = 1 Tm (terameeter)
 10^{11} m = 100 Gm
 10^{10} m
 10^9 m = 1 Gm (gigameeter)
 10^8 m
 10^7 m = 10 Mm
 10^6 m = 1 Mm (megameeter) = 1000 km
 10^5 m = 100 km
 10^4 m = 10 km
 10^3 m = 1000 m = 1 km (kilomeeter)
 10^2 m = 100 m (hektomeeter)
 10^1 m = 10 m (dekameeter)
 10^0 m = 1 meeter
 10^{-1} m = 1 dm (detsimeeter)
 10^{-2} m = 1 cm (sentimeeter)
 10^{-3} m = 1 mm (millimeeter)
 10^{-4} m = 0,1 mm = 100 μ m
 10^{-5} m = 10 μ m
 10^{-6} m = 1 μ m (mikromeeter)
 10^{-7} m = 100 nm = 1000 Å
 10^{-8} m = 10 nm = 100 Å
 10^{-9} m = 1 nm (nanomeeter)
 10^{-10} m = 1 Å (ongström) = 0,1 nm
 10^{-11} m
 10^{-12} m = 1 pm (pikomeeter)
 10^{-13} m
 10^{-14} m
 10^{-15} m = 1 fm (femtomeeter)
 10^{-16} m
 10^{-17} m
 10^{-18} m = 1 am (attomeeter)
 10^{-19} m
 10^{-20} m

Objekt:

Universum tervikuna $\approx 10^{26}$ m
 tehniline piir (teleskoopide vaatlusulatus)
 Galaktikaparvede vahakaugus

Galaktika (Linnutee) läbimõõt $\approx 10^5$ va

kaugus lähima tähe ni $\approx 4,2$ va
 1 va = $9,46 \cdot 10^{15}$ m $\approx 10^{16}$ m

Päikesesüsteem, läbimõõt ≈ 10 Tm

kaugus Maast Päikeseni 150 Gm

Päike, läbimõõt 1,4 Gm = 1400 Mm

Maa, läbimõõt 12,8 Mm = 12 800 km

Euroliit

suur linn

Niagara jõe laius (1039 m)

suur maja

suur loom (vaalhai)

inimene

inimese käelaba

inimese sõrmeküüs

algloom (amööb)

inimese munarakk

imetaja raku tuum

bakter

HIV viirus

tselluloosi molekul

glükoosi molekul

aatom

suure aatomi sisemine elektronkiht

suure aatomi tuum

prootonid ja neutronid

leptonid ja kvargid

tehniline piir (kiirendite tegevusulatus)

Loodusteadused on koondnimetus kõigile teadustele, mis annavad loodusnähtustele teaduslikke kirjeldusi ja seletusi ning ennustavad pädevalt uusi loodusnähtusi. Sõna teaduslik viitab meie poolt juba põhikoolis õpitud **loodusteadusliku meetodi** järjekindlale kasutamisele. Selle kohaselt esmase **vaatluse** (andmete kogumise) järel püstitatakse **hüpotees** (*kuidas asi võiks olla?*), seejärel korraldatakse hüpoteesi kontrollimiseks **eksperiment** (või sihipärane vaatlus), viiakse läbi **andmetöötlus** ja lõpuks tehakse **järeldus** hüpoteesi kehtivuse või mittekehtivuse kohta. Loodusteaduslikust meetodist tuleb lähemalt juttu edaspidi (p.1.2).

Loodusnähtuse **kirjeldus** annab omavahelises loogilises seoses ning sobivat terminoloogiat kasutades edasi antud nähtusele iseloomulikke jooni (vastab küsimusele *kuidas?*). Kirjeldavat käsitlust nimetatakse sageli **fenomenoloogiliseks** (kr.k. *phenomenon* – nähtus). See sõna rõhutab asjaolu, et loodusnähtuse seletamist pole veel eesmärgiks seatud. Loodusnähtuse **seletus** annab edasi selle nähtuse tulenevate üldisemast või sügavamal struktuuritasemel kehtivast seaduspärasusest (vastab küsimusele *miks?*, asetab selle nähtuse “oma kohale”). Seletus on enamasti viide **põhjuslikule seosele**. *Miks*-küsimuste ahelad lõpevad füüsikas reeglina printsipiidega, sest printsipe me ei oska enam seletada. Me nendime, et loodus lihtsalt on selline. Vaadeldava nähtuse algpõhjust otsivat käsitlust nimetatakse **analüütiliseks** (kr.k. *analysis* – liigendamine, osadeks lahutamine). Loodusnähtuse **ennustamine** on väide selle nähtuse toimimise kohta tulevikus ja/või mingis teises kohas. Pädevaks nimetame ennustust, mis täitub (ennustatud loodusnähtus toimubki). Loodusteadusliku ennustamise aluseks on põhjuslike seoste tunnetamine. Loodusteaduste ja põhjuslikkuse seostest tuleb lähemalt juttu käesoleva õpiku 4. peatükis.

Teeme nüüd kiire ülevaate neist loodusteadustest, mida koolis õpitakse omaette aina. See tähendab astronoomia ja kosmoloogia vaatlemist osana füüsikast, geoloogia pidamist üheks osaks geograafiast ning inimeseõpetuse ja ökoloogia käsitlemist osana bioloogiast. **Geograafia** on loodusteadus, mis uurib Maa pinda ja sellel toimuvaid protsesse. Geograafiat huvitavates loodusnähtustes osalevad objektid karakteristliku mõõtmega 1 m (inimene) kuni 1000 km (maailmajaod). **Bioloogia** on loodusteadus, mis käsitleb elusas looduses kehtivaid seaduspärasusi. Bioloogia tegevusvaldkond looduse struktuuritasemetel ulatub bioloogilist infot kandvatest molekulidest (DNA) kuni looma- ja taimeökoloogiliste süsteemideni välja. Skeemil on valitud bioloogia uurimisobjekti mõõtmete tinglikuks vahemikuks 1 μm kuni 10 m, ehkki ökosüsteemid võivad osutada veel palju suuremateks. **Keemia** on loodusteadus, mis uurib ainete omavahelisi muundumisi ja sidet aine aatomite vahel. Keemia tinglik spetsiifiline tegevusala struktuuritasemetel ulatub aatomi läbimõõdust (0,1 nm) kuni suure molekuli mõõtmeni (100 nm).

1.1.4. Füüsika kui e riline loodusteadus

Mõistagi oli kõik eelnev käesoleva õpiku kontekstis vaid taust füüsika kui loodusteaduse määratlemisele. **Füüsika** on loodusteadus, mis uurib looduse põhivormide liikumist ja looduses esinevaid vastastikmõjusid. Füüsika opereerib kõigil looduse struktuuritasemetel, alates alusosakekestest (leptonitest ja kvarkidest) kuni Universumini tervikuna, kuid delegerib probleemi sageli mõnele teisele loodusteadusele, mille uurimismeetodid on antud tasemel sobivad. Kõik loodusteadused püüavad tänapäeval üha rohkem muutuda täppisteadusteks, opereerides eelistatult arvuliste andmetega ning kasutades andmete töötlemisel ja oma mudelite kirjeldamisel **matemaatikat**. Kõige rohkem on see seni õnnestunud füüsikal. Seepärast pole

liialdus öelda, et füüsika uurib looduse põhivorme (ainet ja välja) täppisteaduslike meetoditega. Loodusteaduste vajadus matemaatika järele on erinev, suurenedes liikumisel geograafia ning bioloogia juurest üle keemia kuni füüsikani. Füüsikat eristab teistest loodusteadustest kõigepealt matemaatiliste meetodite kõige ulatuslikum rakendamine.

Füüsika käsitleb füüsikalisi **objekte**. Üldiselt on objekt see ese, nähtus või kujutlus, millega meie (subjektid) parajasti tegeleme. Füüsikalisteks objektideks kitsamas tähenduses on esemed (füüsikas öeldakse – **kehad**) ja kõige üldisemad looduse **nähtused** (sulamine, aurustumine, laetud kehade tõmbumine või tõukumine jne). Kehade vastastikmõjusid (tõmbumist või tõukumist) vahendavad **väljad** on siis mõistagi ka füüsikalisteks objektideks. Laiemas tähenduses võib füüsikalisteks objektideks nimetada ka loodust uuriva inimese (vaatleja) **kujutlusi**, niivõrd kui need kontrollitavalt suhestuvad looduses reaalselt eksisteerivate objektidega. Selles mõttes on füüsikalisteks objektideks näiteks füüsikateooriates esinevad hüpoteetilised osakesed, mille olemasolu pole veel täielikku katselist kinnitust leidnud. Kõige värskem näide sellise piiripealse objekti kohta on ilmselt Higgsi boson.

Füüsika kujundab füüsikaliste objektide kõige üldisemaid **mudeleid**, mida laialdaselt kasutavad ka teised loodusteadused. Loodus on väga mitmekesine, mistõttu uuritava objekti kõigi omaduste samaaegne arvestamine on üldjuhul võimatu ja sageli ka mittevajalik. Füüsikaline mudel rõhutab loodusobjekti neid omadusi, mis on antud kontekstis olulised. Pealiskaudset lugejat tõenäoliselt ärritab väide, et füüsika tegeleb looduse mudelitega. Mudel tundub olevat midagi poolikut ja küündimatut, midagi sellist, mis „pole ehtne“. Selline suhtumine saab alguse neist füüsikaõpikutest, kus püütakse jätta muljet nagu esitaksid füüsika valemid ümberlökkamatut tõe looduse kohta. Niiisugustes õpikutes püütakse saavutada füüsika maksimaalset sarnasust matemaatikaga, kus ülesandel on teatavasti olemas ainult üks tõene vastus. Kui see on leitud, siis võime olla kindlad, et kõik teised vastused on automaatselt väärad.

Füüsika kui loodusteaduse olemust õigesti mõistes tuleb arvestada, et **füüsika ülesanne** on arutus ülesande koostaja poolt ette antud mudeli raames ja mudeli täpsustamisel muutub ka ülesande vastus. Kui me näiteks uurime kahuri laskekaugust, siis on kasutatava mudeli kõige tähtsamaks tingimuseks kiirus, millega mürsk kahuritorust välja lendab. Kindlasti tuleb kõigis vähegi töötavates kahurilasu füüsikalistes mudelites arvestada ka mürsule lennu ajal mõjuvat raskusjõudu. Mürsule õhu poolt mõjuv takistusjõud aga jäetakse kooliülesandes tavaliselt arvestamata. Niiis pole füüsikaline mudel enamasti mitte tegelikkuse vähendatud koopia nagu seda näiteks on laeva-, lennuki- või automudel. Mõõtmelist suurendamist või vähendamist esineb suhteliselt harva. Näitena mõõtmelise vähendamise kohta võib tuua gloobuse kui Maa mudeli. Tegelikust vähendavatest ja suurendavatest füüsikalistest mudelitest tuleb juttu allpool (p.2.5.1). Füüsikalise mudeli muudab mudeliks enamasti siiski see, et uuritavat objekti mõjutavad kuid mudeli looja poolt vähemtähtsaks peetavad objekti omadused on jäetud arvestamata.

Nagu juba öeldud (p.1.1.1), kasutab füüsika erilist keelt, milles esinevad väga kindla tähendusega sõnad ning märgid – füüsikalised **suurused**, nende **mõõtühikud** ja nii suuruste kui mõõtühikute **tähised**. Väga oluline on mõista, et me õpime füüsikaliste suuruste definitsioone lähtuvalt soovist väljendada oma mõtteid lühidalt. Kui me ei kasutaks füüsikalisi suurusi, siis peaksime uuritavat olukorda väga paljusõnaliselt kirjeldama. Sisuliselt tähendaks see füüsikaliste suuruste määratluste paljukordset

väsitavat ümberjutustamist. Näiteks kui me oleme põhikoolis hästi ära õppinud **pinge** mõiste, siis on meie jaoks kohe arusaadav lause *Lambil on pinge 12 volti*. Pinge mõiste kasutamist vältides peaksime sedasama mõtet väljendama lausega *Ühe kuloni suuruse summaarse elektrilaenguga osakeste kogumi läbiviimisel lambist teevad elektrijõud lambis ära töö 12 džauli*. See lause on eelmisest palju pikem ning füüsikalisi suurusi ja ühikuid mitte tundva inimese jaoks üldse mitte selgem, sest oluliselt on suurenenud tundmatute sõnade arv (*kulon, elektrilaeng, töö, džaul*). Füüsikalised suurused ja mõõtühikud moodustavad süsteemi, milles mõned suurused ja ühikud on valitud vastavalt **põhisuurusteks** ja **põhiühikuteks**. Olles aru saanud füüsikaliste põhisuuruste olemusest, võime nendest lähtudes rangelt tuletada kõik teised suurused. Nii tekivad omalaadsed suuruste ja ühikute „puud“, mida me edaspidi (p.3.1) uurime lähemalt.

Füüsikaliste suuruste omavahelise seose kohta kehtivaid lauseid, mis on kirja pandud tähiste abil, tunneme füüsika **valemite**na. Valemite kasutamine võimaldab meil oma mõtteid veelgi lühemalt kirja panna. Nii on kogu eelmises lõigus toodud näide kompaktselt esitatav pinge definitsioonivalemiga

$$U = \frac{A}{q},$$

mis aga on arusaadav vaid inimesele, kes tunneb kasutatud füüsikalisi suurusi ja nende tähiseid. Pahatihti taandatakse füüsika tundmine valemite päheõppimisele ja nende rakendamise oskusele. See oskus on aga väärtusetu, kui puudub sügavam teadmine füüsikaliste suuruste olemuse ja valemite mõtte kohta. Valemite mõtet mitte mõistev inimene lahendab füüsika ülesannet nagu ristsõnamõistatust.

Igatüks, kes on piisavalt palju lahendanud ühe ja sellesama autori ristsõnu, teab hästi, et neis ristsõnades esinevad mõisted korduvad, sest ka autori teadmistel on piir. Kui näiteks ristsõnas esineb küsimus *Maakitsus Tais – 3 tähte*, siis piisavalt palju ristsõnu lahendanud inimene lihtsalt teab, et sinna tuleb kirjutada tähed *KRA*. Ta kirjutab need tähed ja lahendab ristsõna edukalt – absoluutselt teadmata, et Tai on riik Kagu-Aasias ning teadmata, mis asi on maakitsus. Lahendaja on küll mehaaniliselt ära õppinud seose *Maakitsus Tais – Kra*, kuid ta pole mõistnud seose mõtet. Tähe kombinatsioon *Kra* on tema jaoks **pime sümbol** ehk sümbol, mille tähendust ta ei tea. Nii on ka ülalpool toodud kolmetäheline kombinatsioon ehk füüsika valem $A = q U$, pime sümbol inimese jaoks, kes ei tea, mida näitavad töö, laeng ja pinge. Olles valemid mehaaniliselt pähe õppinud, võib inimene küll füüsika ülesande formaalselt edukalt lahendada, asendades valemis tähed arvudega ning seejärel korrutades või jagades. Aga see on **sümbolpime** tegevus ja niisugusena üpris mõttetu. Jõuga pealesunnitud mõttetu tegevus põhjustab negatiivseid emotsioone, tekitab võõrandumistunde. Sel põhjusel ongi gümnaasiumi füüsika ainekavas nüüdseks loobutud valemite peast teadmise nõudest. Gümnaasist peab vaid suutma sobiva valemi teiste hulgast ära tunda.

Ülaltoodu põhjal võib ka väita, et oskus lahendada „õigeid“ valemite kasutades füüsika ülesandeid ei saa kindlasti olla füüsika tundmise kriteeriumiks. Ülesande lahendaja ju vaid sooritab sel juhul etteantud mudeli raames aritmeetilisi tehteid. Füüsika valdamine on suutlikkus teisendada ühes märkidesüsteemis (näiteks sõnaliselt) ära toodud füüsikalise mudeli kirjeldus mingisse muusse semantilisse süsteemi, esitades mudeli näiteks jooniste või matemaatiliste avaldiste abil ja ka vastupidi. Täiesti uue füüsikalise mudeli formuleerimine on aga füüsika kui teadus.

Tasub arvestada, et füüsikalised suurused ning nende mõõtühikud on samuti looduse mudelid. Kui me näiteks mõõdame koolilaua pikkust, siis ei huvita meid parajasti laua laius või kõrgus, rääkimata lauapinna värvusest või materjalist. Nii saame looduse ühe lihtsaima mudelina füüsikalise suuruse nimega *pikkus*, aga põhimõtteliselt samamoodi ka teised füüsikalised suurused. Niisiis erineb füüsika teistest loodusteadustest selle poolest, et ta annab neile füüsikaliste suuruste näol kasutada looduse kõige üldisemad mudelid. Vastupidist me eriti ei tähelda, sest teiste loodusteaduste mudelid ei ole reeglina füüsikale vajalikul määral üldkehtivad.

Füüsika kolmandat peamist erinevust teistest loodusteadustest oleme juba maininud. See on hästi näha looduse struktuuritasemete skeemilt (J.1.1). Kui bioloogia võib struktuuritaseme mõõtme vähenemise käigus oma probleemi edasi suunata keemiale ning keemia omakorda füüsikale, siis füüsikal pole probleemi enam kuhugi suunata. **Bioloogia** ei pea seletama, miks aatomid biomolekulides on seotud just sellel või teisel viisil. Sideme probleemidega tegeleb **keemia**. Samas ei pea keemia seletama, miks aatomid omavad just selliseid mõõtmeid või miks aatomi kõige sisemises elektronihhis ei saa olla üle kahe elektroni. Neile küsimustele vastab **füüsika**. Füüsika seletab ära nii aatomi, selle tuuma kui ka tuumaosakeste (prootonite ja neutronite) sisehituse, kuid peab esialgu tunnistama oma jõuetust „piilumisel“ kvarkide sisemusse.

Analoogiliselt võib **geograafia** probleemi mõõtme suurenemisel pöörduda abi saamiseks füüsika poole. Näiteks nendib geograafia fakti, et inimeste poolt kasutatava ajaarvestuse aluseks on Maa ja Kuu perioodiline liikumine, aga millised need liikumised täpselt on ja kuidas nad kajastuvad kalendris, see on juba **füüsika** teema. Füüsika seletab Päikesesüsteemi komponentide liikumist ja teket, kuid ei suuda hetkel veel anda kõikehõlmavat vastust küsimusele, miks ikkagi Universum tervikuna kiirenevalt paisub. Pole ka olemas ühtegi teist loodusteadust, millele füüsika selle probleemi edasi suunata saaks. Niisiis tegeleb füüsika looduse äärmiste struktuuritasemetega. See eristab füüsikat kõige selgemini teistest loodusteadustest.

Võtame nüüd kokku füüsika peamised erinevused teistest loodusteadustest:

1. Füüsikale on omane **täppisteaduslike** (matemaatiliste) **meetodite** kõige ulatuslikum rakendamine;
2. Füüsika tekitab **looduse kõige üldisemad mudelid** (füüsikalised suurused ja nende mõõtühikud), kõik teised loodusteadused kasutavad neid;
3. Füüsika tegevusala hõlmab loodusobjektide mõõtmete skaalal kaks kõige laiemat vahemikku. Füüsika tegeleb looduse **piirmiste struktuuritasemetega** – kõige suuremate ja ka kõige väiksemate objektidega.

Käesoleva teema lõpetuseks märkigem, et **füüsikaline maailmapilt**, mida me endil gümnaasiumi füüsikaõppe käigus kujundama asume, on kas indiviidi või kogu inimühiskonna arengu mingile kindlale perioodile iseloomulik ette kujutus maailma (looduse) koostisosadest ja nende vahelistest seostest kui füüsikalistest objektidest. Füüsikaline maailmapilt on kontekstuaalne tervik, millesse uued teadmised kas sobituvad või siis sunnivad maailmapilti muutma. Viimane tähelepanek kehtib muide nii üksiku indiviidi kui ka terve inimühiskonna kohta. Maailmapildi terviklikkus aga peegeldab looduse enda terviklikkust ja sisemist kooskõllalisust. Midagi tõeliselt uut suudavad loodusteadustes avastada vaid need, kellel on olemas terviklik maailmapilt. Vaid nemad saavad märgata, et “midagi on vahelt puudu”. Kuid ka tavakodanikule annab kooskõllalise maailmapildi omamine sisemise kindlustunde. Annab näiteks

suutlikkuse läbi näha reklaamikampaaniates pahatihti esinevaid ebateaduslikke väiteid ja järelikult aitab mitte langeda petuskeemide ohvriks.

Küsimusi ja ülesandeid

1. Milline sõna *maailm* sünonüümidest rõhutab maailmas toimivate seaduspärasuste üldkehtivust ehk universaalsust?
2. Tooge veel mõni näide selle kohta, kuidas looduse ühel struktuuritasemel toimuva kirjeldamiseks pole olulised mingil teisel tasemel kehtivad seaduspärasused.
3. Tooge lisaks tekstis sisalduvatele veel mõni näide probleemidest, mille geograafia või keemia suunavad lahendamiseks füüsikale.
4. Kõige esimeses, 19. sajandi lõpul ilmunud eestikeelses füüsikaõpikus nimetati füüsikat *õpetuseks loodud asjade iseviisidest ja vägedest* (kirjaviis on kaasajastatud). Miks nimetati looduse objekte selles õpikus *loodud asjadeks*? Kas see erinevus on füüsika olemuse määratlemise seisukohalt oluline või mitte?
5. Sõnastage kõige esimene eestikeelne füüsika definitsioon kaasaegses eesti keeles.
6. Reklaamikampaanias kõlas väide *Meie poolt pakutav pann on väga väikese soojusjuhtivusega materjalist ning seega kasutajale täiesti ohutu*. Miks see väide on füüsikaliselt ebaadekvaatne? Mida taheti tegelikult öelda?
7. Tooge veel üks näide reklaamimeistrite füüsikaliselt ebaadekvaatsest loomingust.

STOP

1. Maailm on kõigile inimestele ühine keskkond, mis jääb väljapoole konkreetse inimese mina-tunnetuse piire. Maailm on inimese jaoks kogu *mitte-mina*.
2. Loodus on inimest ümbritsev ja inimesest sõltumatult eksisteeriv keskkond. Looduses toimuvaid muutusi nimetatakse loodusnähtusteks. Looduse põhivormideks on aine ja väli.
3. Loodusteadused on koondnimetus kõigile teadustele, mis annavad loodusnähtustele teaduslikke kirjeldusi ja seletusi ning pädevalt ennustavad loodusnähtusi.
4. Füüsika on loodusteadus, mis eelistatult täppisteaduslike meetoditega uurib looduse põhivormide liikumist ja tekitab looduse kõige üldisemad mudelid.

1.2. Vaatleja kujutlused ja füüsika

1.2.1. Vaatleja mõiste

Väga levinud on väärarvamus, et üksiku indiviidi tasandil loodav füüsikaline maailmapilt peab olema objektiivne ehk sõltumatu piirangutest, mis rakenduvad konkreetsele indiviidile. See eksitus saab suuresti alguse Isaac Newtoni poolt kasutusele võetud absoluutse aja ning ruumi mõistetest, millele tugineb põhikoolis õpitav klassikaline füüsika. Absoluutne aeg ja ruum on selles käsitluses kõigile inimestele ühised ja ühesugused. Relativistlikus füüsikas kulgeb aeg aga erinevate vaatlejate jaoks erinevalt ning mingi sündmus võib ühe vaatleja jaoks olla juba toimunud, aga teise vaatleja jaoks veel toimumata. Klassikalise füüsika reeglite kohaselt mõtleb inimene kipub arvama, et kui sündmus on absoluutses ajas toimunud, siis see tegelikult ongi toimunud ja teisele vaatlejale vaid **tundub**, et sündmus on veel toimumata. Relativistlikud efektid näivad Newtoni arusaamades mõtlevale inimesele mingite põrgulike trikkidena, mis “ei saa ju tösi olla”. Nagu ikka trikkide puhul, ootab inimene triki äraseletamist. Ta soovib teada saada, kuidas teda peteti. Ta küsib: “Kuidas on see asi tegelikult?” Täpne vastus aga kõlab: *Igal vaatlejal ongi omaenda tegelikkus*. Just absoluutne aeg ja ruum vaid **tunduvad** vaatlejale eksisteerivat. Kui

me räägime loodusest, kui kõigi vaatlejate jaoks ühesugusest keskkonnast, siis eeldame vaikimisi vaatlejate viibimist ligikaudu ühesugustes tingimustes.

Relativistliku füüsika mõistmine algab tõdemusest, et inimene on looduse vaatleja, kes saab infot looduse kohta oma meeleorganite vahendusel. Kuna inimese peamiseks aistinguliseks infokanaliks on nägemismeele, siis hakkab maailmapildi kujundamist oluliselt mõjutama valguse kiiruse väärtus. Oma aistingute alusel kujundab iga vaatleja maailmast omaenda spetsiifilise pildi ning **relatiivsusprintsipi** kohaselt pole mitte ükski vaatleja eelistatud. Kui kaks vaatlejat on erinevates tingimustes (näiteks liiguvad teineteise suhtes), siis nad saavad erinevaid aistinguid ja maailm ongi nende jaoks erinev, mitte ei tundu erinevana. Meie usk meie kõigi jaoks ühesuguse välismaailma objektiivsusse olemasolusse põhineb faktil, et valguse kiirus on kõigi maapealsete vaatlejate omavaheliste liikumiste kiirustega võrreldes kujuteldamatult suur, mistõttu maapealsed vaatlejad on relativistliku füüsika aspektis üksteise suhtes peaaegu paigal. Nad lähtuvad aja ning ruumi mõistete kujundamisel ühesugustest aistingutest, sest inimese nägemismeele ei suuda tekkivaid erinevusi tuvastada. Seetõttu **tundub** inimestele Maa peal, et aeg ja ruum on nende kõigi jaoks ühesugused. Olgu veel märgitud, et vaatleja määratlemisele taanduvad probleemid tekivad ka kvantfüüsikas, kus on siiani ühese vastuseta küsimus *Kas vaatleja olemasolu mõjutab vaatluse tulemust või mitte?* Kaasaegne füüsikaline maailmapilt ei saa minna ei üle ega ümber vaatleja olemuse mõistmisest.

Vaatleja on inimene, kes saab ja töötleb infot maailma (looduse) kohta. Vaatlejat võib defineerida mitmeti, aga soovitatav on seda teha tunnuste kaudu, mis ühel vaatlejal olema peavad. Vaatleja tunnusteks võiksid olla:

1. **vaba tahe** ehk valikuvabaduse olemasolu;
2. **aistingute** saamise võime, võtmaks maailmast vastu infot;
3. **mälu** ehk võime salvestada infot ja seda hiljem uuesti kasutada ning
4. **mõistus** ehk võime konstrueerida mälus olemasolevast infost süllogisme, tehes nii tõeseid järeldusi maailma kohta ilma vastavat aistingut saamata.

Süllogismiks nimetatakse mõtlemise (või formaalse loogika) elementaartehet, mille üks näide võiks olla järgmine: 1) kõik koerad on neljajalgseid, 2) Muki on koer, seega 3) Muki on neljajalgne. Abstraktsemalt väljendudes: 1) kõik objektid A kuuluvad hulka B (eeldus 1); 2) objekt C osutub objektiks tüüpi A (eeldus 2); 3) objekt C kuulub ka hulka B (järeldus). Nagu näeme, eeldab süllogismide kasutamine kontseptuaalset mõtlemist, sest süllogismi konstrueerija teadvuses peavad eksisteerima kontseptsioonid (terviklikud mõttekujundid) *objekt A* (koerad) ning *objekt B* (neljajalgseid). Kaasaegne loomapsühholoogia on üldiselt seisukohal, et loomadel kontseptuaalne mõtlemine puudub. Loomade kindlaviisilist käitumist juhivad enamasti tingrefleksid. Inimesega võrreldava efektiivsusega süllogisme konstrueerida loomad ei suuda.

Kui vaatlejal puuduks **vaba tahe**, siis jääks mõistetamatuks juba tema otsustus valikute *vaadelda* ja *mitte vaadelda* vahel. Seda enam on vaba tahe vajalik vaatlusviiside ja vaatlusvahendite valikul ning tulemuste usaldatavuse hindamisel. Indiviidi mistahes tegevus eesmärgiga looduse toimimist mõista (aga muuseas ka otsus looduse vastu üldse mitte huvituda) – on tahteline akt. Vaba tahte olemasolu muudabki õigupoolest vaatleja **subjektiks**, kes vaatleb füüsikalisi **objekte**.

Kui vaatleja ei saaks **aistinguid**, siis poleks tal üldse mingit infot maailmapildi kujundamiseks, sest tema enda vahetute loodusvaatluste tulemused on aistingulised ning igasugune info edastamine ühelt inimeselt teisele saab ju ka teoks meelelundite (peamiselt kuulmise ja nägemise) vahendusel.

Kui vaatlejal puuduks **mälu**, siis ei saaks tal üldse tekkida meelelise tunnetuse keerulisemaid vorme (tajusid ja kujutlusi), sest kogu töödeldav info välismaailma kohta ei saabu vaatleja teadvusesse korraga. Mingi osa infost tuleb vältimatult vahepeal salvestada. Ilma mäleta poleks võimalik ka mõtlemine (süllogismide moodustamine), sest süllogisme saab konstrueerida vaid mälus säilitatavatest mõttekujunditest.

Kui vaatlejal puuduks **mõistus** (süllogismide moodustamise võime), siis poleks ta suuteline tekitatud terviklikke mõttekujundeid (kujutlusi) liigitama ega omavahel seostama. Sellisel vaatlejal saaksid olla vaid otseselt aistingutest tulenevad ehk **primaarsed** kujutlused. Ta ei suudaks püstitada hüpoteese ega neid kontrollida.

1.2.2. Füüsikaline tunnetusprotsess

Uurime nüüd detailsemalt füüsikalist käsitlust aistingulise info saamise kohta vaatleja poolt. Füüsikas tavatsetakse nimetada **sündmuseks ükskõik mida, mis toimub maailmas kindlal ajal ja kindlas kohas**. Füüsikutele on kombeks öelda, et iga sündmus omab kindlaid aegruumilisi koordinaate. Lihtsaimad näited sündmustest on terava heli tekkimine noa või kahvli kukkumisel põrandale või siis välklambi sähvatus.

Signaaliks nimetatakse sündmust kirjeldava info jõudmist vaatleja närviraku retseptorini mingi füüsikalise nähtuse vahendusel, milleks äsja toodud näidetes on kas mehaaniline helilaine või elektromagnetiline valguslaineline. Seda protsessi võivad komplitseerida **signaali moonutavad sündmused**, näiteks valguslainete levikusuuna muutumine kahe keskkonna lahtuspinnal, mille tulemusena veeklaasis paiknevas lusikas näib vaatlejale pooleksmurtuna. Reeglina ei suuda vaatleja vaid aistingute abil tuvastada signaali moonutava sündmuse esinemist. Ta on sunnitud rakendama ka mälu ning mõistust. Info toimunud sündmuse kohta läheb **retseptorist** närvirakkude erilise elektrilise seisundi levimise teel ajuni, kus tekib sündmust peegeldav **aisting**. Erinevatest meeleorganitest pärinevate aistingute põhjal tekib ajus sündmusest või sündmuste ahelast terviklik **taju**. Seejärel kasutab aju mälus säilitatavaid varasemaid sellelaadseid aistinguid ja tajusid, rakendab mõistust ning lõpptulemusena tekib vaatleja teadvuses maailma sündmusest või objektist terviklik **kujutlus** ehk visioon. Füüsika koosneb eri indiviidide poolt tekitatud ja omavahel kooskõlastatud kujutlustest. Füüsika on looduse peegeldus vaatleja kujutlustes. See on vist ka lühim võimalik füüsika definitsioon. Lisagem, et eelistame edaspidi sõna *kujutlus* sõnale *visioon*, kuna visiooniks nimetatakse tänapäeval üha sagedamini mingi ettevõtte või organisatsiooni arengukava. Sel pole aga midagi ühist looduse kirjeldamisega.

Järgnevalt nendime, et vaatlejal võib olla mitmesuguseid kujutlusi. Kui vaatlejal on **primaarseid** ehk otseselt aistingutest tulenevaid kujutlusi tekitatud piisavalt palju, siis asub ta mälu ja mõistust appi võttes konstrueerima **sekundaarseid** kujutlusi, millega seonduvaid aistinguid ta veel pole saanud, aga mis süllogistlikult tulenevad primaarkujutlustest. Loodusteadusliku uurimismeetodi kirjeldamisel nimetatakse sellist tegevust **hüpoteesi** loomiseks. Vaatlejal on sageli võimalik hüpoteesi kontrollida. Ta asub maailma kindlaviisiliselt mõjutama, eesmärgiga esile kutsuda

uuritava sekundaarkujutlusele vastav sündmus. Seda nimetatakse katseks ehk **eksperimendiks**. Kui vaateleja nüüd tõepoolest saab piisavalt täpselt sama komplekti aistinguid, mille tekkimist ta prognoosis, siis teeb vaateleja järelduse, et kõnealune sündmus maailmas tõepoolest toimus ja tema hüpotees on saanud eksperimentaalse **kinnituse**. Paraku jääb "piisava täpsuse" kriteerium füüsika ja mistahes muu katselise loodusteaduse igaveseks probleemiks. Ka ühe eksperimendi positiivne või negatiivne tulemus ei tõesta veel midagi, kuna iialgi ei saa välistada viga ühe vaateleja poolt koostatud süllogismide ahelas. Alles paljude erinevate uurijate poolt maailma eri paigus saadud ühesugune eksperimentaalne tulemus muutub pikapeale usaldusväärseks **eksperimentaalseks faktiks**, millele tuginedes on teistel füüsikutel mõtet koostada suuri, veel aistingulise aluseta kujutluste süsteeme ehk füüsikalisi **teooriaid**.

Esineb ka olukordi, kus eksperiment pole võimalik, sest vaateleja ei saa uuritavat loodusnähtust mõjutada. Näiteks ei saa me mõjutada kaugetel taevaladadel toimuvaid protsesse. Me saame neid vaid **sihipäraselt vaadelda**. Sõnaga *sihipärane* tähistame siin näiteks teleskoobi suunamist ühele konkreetsele tähele või selle teleskoobi väljundis paikneva spektraalparaadi häälestamist elektromagnetlainete spektri ühele kindlale piirkonnale. Kuid sihipärase vaatluse positiivse tulemuse tõestuslik jõud ei jää alla eksperimendi omale. Üsna tuntud näiteks eduka sihipärase vaatluse kohta on planeet Neptuuni avastamise taevasfääri just selles piirkonnas, kus uus planeet gravitatsiooniseadusel põhinevate arvutuste põhjal paiknema pidi. Märkigem veel, et kaasajal on loodusteadusliku meetodi tähtsaks osaks ka eksperimentile järgnev **andmetöötlus**.

Ka korduvalt teostatud hoolikas eksperiment või sihipärane vaatlus võivad anda ikka ja jälle täiesti negatiivse tulemuse. Sel juhul peab järeldama, et vaateleja poolt süllogistlikult tekitatud kujutlusele looduses mitte midagi ei vasta – ennustatud loodusnähtust ei esine. Siis tuleb hüpotees kõlbmatuna kõrvale heita ja formuleerida täiesti uus hüpotees. Kui tulemus siiski saadakse, aga see erineb mõnevõrra prognoositust, siis on mõtet sama hüpoteesiga edasi töötada. Sel juhul käsitleb uus hüpotees reeglina erinevuste võimalikke põhjusi, olles vana hüpoteesi täpsustuseks. Sageli viitab uus hüpotees mingile loodusnähtusele, mida seni pole mudeli loomisel arvestatud, kuid mis võib siiski tulemust oluliselt mõjutada.

Me oleme seni kasutanud veidi umbmäärast terminit *aisting*, täpsustamata konkreetset meeletundit, mille vahendusel aisting saadakse. Tegelikult on inimesel ju viis meelt: **nägemine**, **kuulmine**, **haistmine**, **maitsmine** ja **kompimine**. Kuna lõviosa infost füüsikaliste objektide kohta jõuab inimese teadvusesse nägemismeele vahendusel, siis on ülejäänud meelte kirjeldamine FLA kursuse kontekstis üpris kasutu. Nägemise füsioloogia üksikasjade tundmine ei vii meid aga füüsikalise looduskäsitluse üldisel mõistmisel samuti kuigi palju edasi. Silma funktsioneerimisega oleme põhikooli füüsika valgusõpetuse osas juba tutvunud, signaali edastava impulsi levik nägemisnärvis on aga mitte enam füüsika vaid rohkem keemia ja neurofüsioloogia teema.

Lõpetuseks võime loodusteadusliku meetodi kirjelduse kokku võtta jadaga: *esmane vaatlus* → *hüpotees* → *eksperiment* (või *sihipärane vaatlus*) → *andmetöötlus* → *järeldus* → *hüpoteesi täpsustamine* → *uus eksperiment* ja nii ikka edasi.

(Peil 1.2. – interaktiivne füüsikalise tunnetusprotsessi mudel)

1.2.3. Füüsika kui paljude vaatljate ühine kujutus

Täppiseaduslikku füüsikakäsitlust ületähtsustavatel inimestel on kombeks arvata nagu eksisteeriks füüsika või mistahes teine loodusteadus sama objektiivselt nagu loodus ise. Arendades vaatleja mõistest lähtudes edasi ülalpool juba toodud näidet füüsikaliste suuruste seose kohta, võime tõdeda et looduses pole olemas ei pinget ega elektrilaengut. Need ja ka kõik teised füüsikalised suurused ning mõõtühikud on vaatljate kujutlused või veelgi selgemalt – **inimlikud väljamõeldised**. Samas on siiski reaalselt olemas elektromagnetiline vastastikmõju ning on olemas kehad, mis selles mõjus osalevad. Seda, kuivõrd nad osalevad, näitab füüsikaline suurus nimega elektrilaeng. Seda, kui palju tööd teevad elektrijõud ühikulise elektrilaenguga keha viimisel ühest punktist teise, näitab nende punktide vaheline pinge. Selgub, et me võiksime koostada tabeli, mis viib omavahel vastavusse mingi füüsikalise loodusobjekti (looduse nähtuse või omaduse) ja seda objekti kirjeldava füüsikalise suuruse (looduse üldmudeli). Me koostame sellise tabeli käesoleva kursuse lõpul, kui tähtsaimad füüsikalised üldmudelid on juba käsitlemist leidnud. Praegu vaid nendime, et füüsika on paljudele vaatljatele ühine loodust peegeldavate kujutluste süsteem, aga mitte loodus ise. Ilma vaatljata ei oleks ka füüsikat.

Küsimusi ja ülesandeid

1. Miks klassikalises füüsikas ei ole eriti vaja rõhutada vaatleja mõistet?
2. Kas vaatleja saaks kasutada aja mõistet, kui tal puuduks mälu?
3. Tooge veel üks näide signaali moonutava sündmuse kohta.
4. Koostage üks füüsikalise sisuga süllogism.
5. Kas koer või kass on looduse vaatljad? Kui ei, siis miks?
6. Kas veebikaamera ja mikrofoniga varustatud arvuti on vaatlja?

STOP

1. Vaatlja on inimene, kes saab ja töötleb infot maailma (looduse) kohta.
2. Vaatlja tunnusteks on **tahte** vabadus, **aistingute** saamise võime, **mälu** (võime salvestada ja taas kasutada aistingulist infot) ja **mõistus** (võime koostada süllogisme).
3. Füüsika on paljude vaatljate ühine loodust peegeldavate kujutluste süsteem. Ilma vaatljata ei ole füüsikat.

1.3. Nähtavushorisondid ja füüsika

1.3.1. Nähtavushorisoni mõiste

Geograafias oleme juba õppinud mõistet **horisont**. See on joon, mis vaatleja jaoks lahutab taevast maast või merest. Kõige selgemini eristamegi horisonti vaadeldes merd, kuna veepind on raskusjõu mõjul horisontaalne ehk risti vertikaalsihiga. Vertikaalsiht on Maa pinna mistahes punktist suunatud Maa keskpunkti. Maa kerakujulisuse tõttu jäävad horisonidile kõik need punktid, mida merepinnast mingil kindlal kõrgusel viibiv vaatleja veel näeb (kas joonis ka?).

Vaatlejast kaugemal paiknevad punktid jäävad horisoni taha. Vaatlja ei saa neid punkte näha, kuna neist tulev ja õhus kui ühtlases keskkonnas sirgjooneliselt leviv valgus ei jõua enam vaatleja silma. Sellisena tunneb inimkond horisoni mõistet juba väga ammu, sest purjelaevade ajastul oli lihtne märgata läheneva laeva purjesid, mis kõigepealt horisoni tagant nähtavale ilmusid. Alles siis, kui laev oli tervikuna horisonidini jõudnud, oli võimalik näha ka laeva keret ning tekiehitisi. FLA kursuse

kontekstis me ei kasuta mõistet *horisont* selle sõna geograafilises tähenduses, kuna horisondi ristumine vertikaalsihiga pole meie jaoks tähtis. Horisondi meie jaoks oluline tunnus on vaid see, et meil pole veel infot horisondi taha jäävate füüsikaliste objektide kohta. Eristamaks meile vajalikku tähendust puhtgeograafilisest, hakkame kasutama mõistet *nähtavushorisont*. Kahtlemata võiksime öelda ka *tunnetushorisont*, kuid sõna *tunnetus* kuulub liig tugevasti filosoofia töömaile, nägemismeel on aga meie peamine aistinguline vahend füüsikalise info saamisel looduse kohta.

Nähtavushorisondiks nimetame piiri, kuni milleni vaatlejal või inimkonnal tervikuna on olemas eksperimentaalselt kontrollitud teadmised füüsikaliste objektide kohta.

Inimese isikliku nähtavushorisondi taha võivad jääda need loodusobjektid, millega tutvumiseni ta pole oma personaalses arengus veel jõudnud. Võib öelda, et neid objekte pole tema jaoks veel olemas. Inimkonna kui terviku nähtavushorisondi taha jäävad füüsikalised objektid enamasti põhjusel, et pole veel olemas vahendeid kas nii väikeste või nii suurte objektide vaatlemiseks. Seega me kasutame nähtavushorisondi mõistet eelkõige loodusobjektide mõõtmete skaala (J.1.1) kontekstis. Objekt jääb nähtavushorisondi taha mitte lihtsa teadmiste puudumise tõttu (juhtumisi pole seda asja veel uuritud) vaid vaatlusvahendite ebatäiuslikkuse tulemusena. Kuna nii üksiku indiviidi kui ka kogu inimkonna maailmapilt pidevalt areneb, siis on mõlemal juhul nähtavushorisontide asukohad looduse struktuuritasemete skaalal sõltuvad ajast.

1.3.2. Sisemine ja väline nähtavushorisont

Kui me punktis 1.1.2 alustasime inimese ja maailma vahekorra uurimist, siis oli ka juttu sellest, kuidas väikelaps tutvub mitmesuguste lihtsate asjade ja nähtustega enda ümber. Mõnekuune laps asub kompama oma keha, lelusid, voodipiiret ja lutipudelit, saades nii esimesi „päris oma“ aistinguid. Laps raputab oma mänguasja, mispeale selle sisse paigutatud plastkuulikesed toovad kuuldavale erutavat heli. Õige pea teeb laps esimese katse mänguasja purustada, eesmärgiga teada saada, mis see küll on, mis lelu raputamisel nii põnevat häält teeb. Me võime öelda, et laps on asunud liikuma sisemise nähtavushorisondi poole. Ta on esitanud küsimuse: *Mis on need veel väiksemad asjad, millest koosneb minu käes olev ese?*

Põhimõtteliselt sama küsimusega tegeleb terve inimkond kogu oma eksistentsi vältel. Inimkonna peamiseks vahendiks selles tegevuses on **füüsika** koos oma teooriate ja eksperimentaalseadmetega. Kuni suurendusklaaside (luupide) kasutuselevõtuni said katselised kinnitused palja silmaga nähtamatute objektide mõõtmete kohta olla vaid kaudsed. Näiteks oli võimalik õli vähimate osakeste mõõtmeid hinnata selle õlilaigu pindala põhjal, mis veepinnal moodustus õlililga sattumisel vette. Mikroskoobi leiutamine aastal 1590 aga võimaldas hakata vahetult nägema objekte mõõtmetega kümnendik kuni sajandik millimeetrit (10 – 100 µm). 19. sajandi lõpuks oli optilise mikroskoopia areng viinud inimkonna sisemise nähtavushorisondi nähtava valguse keskmise lainepikkuseni (ca 0,5 µm). Enamat polnud võimalik tahta, sest uuritava objekti pinna vähimad kombatavad ebatasasused ei saa ju olla väiksemad kompava vahendi, antud juhul valguslaine – mõõtmetest. Niisiis, **sisemine nähtavushorisont** on konkreetse vaatleja või kogu inimkonna teadmiste piir liikumisel piki mõõtmete skaalat üha väiksemate objektide poole, järjestikusel vastamisel küsimusele *Mis on selle sees?*

Füüsik Ernest Rutherford (1871-1937) soovis samuti midagi purustada – kulla aatomeid nimelt. Ta tegi seda alfaosakeste ehk heeliumi aatomite tuumade abil. Oma

katsete tulemusena tegi Rutherford aastal 1906 koos õpilaste Geigeri ja Marsdeniga kindlaks, et kulla aatom koosneb suhteliselt väikese massiga elektronidest, mis liiguvad ümber mõõtmelalt väga väikese kuid samas väga suure massiga tuuma. Lühidalt öeldes, Rutherford, Geiger ja Marsden avastasid aatomi tuuma. Ernest Rutherford on läinud ajalukku oma lausega *Kogu loodusteadus on kas füüsika või margikogumine*. Olgu see tsitaat siin ära toodud mitte eesmärgiga halvustada teisi loodusteadusi vaid rõhutamaks füüsika erilist, nähtavushorizonte edasi nihutavat rolli loodusteaduste hulgas. Rutherfordi veidi üleolev suhtumine teistesse loodusteadustesse sai karistatud sellega, et Rutherfordile anti aastal 1908 tema avastuse eest Nobeli keemia- aga mitte füüsikapreemia. Muuseas, seda fakti esitatakse meeleldi ka kirjamarkidel. Nobeli keemiapreemiat vastu võttes ütles Rutherford: „Ma olen looduses näinud palju muundumisi, aga mitte kunagi nii kiiret nagu minu muundumine füüsikust keemikuks!“ Lähemalt selle kohta:

<http://scienceworld.wolfram.com/biography/Rutherford.html>

Lisagem veel, et Euroopa rahvaste ühiseks vahendiks üritustes tungida kvarkide kui kaasajal kõige väiksemate teadaolevate objektide sisesse, on Euroopa tuuma-uuringute keskuses CERN (*Centre européen pour la recherche nucléaire*) paiknev suur hadronite põrguti LHC (*Large Hadron Collider*). Kui see osakeste kiirendi saavutab oma projektvõimsuse, siis peaks tema abil olema võimalik „näha“ objekte tüüpilise mõõtmega 10^{-20} meetrit, mis on hetkeseisuga (2012) inimkonna kui terviku sisemiseks nähtavushorisoniks (J.1.2. alumine äär).

Väline nähtavushorizont on vaatleja(te) teadmiste piir liikumisel piki mõõtmete skaalat üha suuremate objektide poole (järjestikusel vastamisel küsimusele *Mis on selle taga?*). Väikelapse väline nähtavushorizont piirdub esialgu selle toa seintega, kus ta viibib. Veidi hiljem näeb laps ka õue, kuhu ta värsket õhku hingama viiakse. Kui laps õpib rääkima, siis asub ta peagi esitama vanematele küsimusi nende asjade kohta, mis on veelgi kaugemal. Ta küsib: *Mis on see veel suurem asi, millesse mulle seni tuntud suured asjad kuuluvad vaid ühe osana?* Laps liigub välise nähtavushorisoni poole.

Inimkonna kui terviku väline nähtavushorizont jõudis juba Vana-Kreeka õpetlaste töödega selleni, et esimeses lähenduses määrati Kuu, Päikese ning lähimate planeetide Merkuuri, Veenuse ja Marsi suurused ning kaugused Maast. Järgmiseks tõsiseks sammuks edasi oli optilise teleskoobi leiutamine 16. sajandi lõpul. See võimaldas avastada planeet Jupiteri kuud ja planeet Saturni rõnga, aga ka seni tundmatu planeet Uraani. 19. sajandi algul hakati tõsiseltvõetava täpsusega määrama tähtede kaugusi Maast ja 20. sajandi algul tehti kindlaks lähimate galaktikate suurused ning kaugused meist. Kaasajal kõige tuntum vaatlusseade, mis on võimaldanud viia inimkonna välise nähtavushorisoni kuni 10^{25} meetrini, on Hubble'i kosmoseteleskoop, vt http://et.wikipedia.org/wiki/Hubble'i_kosmoseteleskoop

Loodetavasti oleme juba mõistnud, mis seos on nähtavushorizontidel füüsikaga. Kui me soovime looduse kohta midagi uut teada saada, siis me enamasti nihutame edasi isikliku maailmapildi nähtavushorizonti. Väga sageli me tegeleme seejuures füüsikaga, mõnikord koguni endale sellest aru andmata. **Füüsika** kui teadus erineb teistest loodusteadustest just selle poolest, et ta määratleb ja nihutab edasi inimkonna kui terviku nähtavushorizonte. Seda ei tee mitte ükski teine loodusteadus. Füüsika formuleerib kõige üldisemaid küsimusi looduse kohta ja ka vastab neile, kui konkreetsel tehnilisel tasemel on üldse võimalik vastata.

Joonis 1.2. Looduse struktuuritasemete skeem rõhuga sisemisele ja välimisele nähtavushorisonidile (SNH ja VNH). Joonisel 1.1. toodud objektide nimetustele on lisatud viited inimkonna nähtavushorizontide paiknemisele mingil ajaloolisel perioodil. Värvikoodiga (sinine, roheline või hall) on näidatud vastavalt mega-, makro- ja mikromaailm.

Mõõde:

10^{26} m
10^{25} m
10^{24} m
10^{23} m
10^{22} m
10^{21} m
10^{20} m
10^{19} m
10^{18} m
10^{17} m
10^{16} m = ca 1 va (valgusaasta)
10^{15} m
10^{14} m
10^{13} m = 10 Tm
10^{12} m = 1 Tm (terameeter)
10^{11} m = 100 Gm
10^{10} m
10^9 m = 1 Gm (gigameeter)
10^8 m
10^7 m = 10 Mm
10^6 m = 1 Mm (megameeter) = 1000 km
10^5 m = 100 km
10^4 m = 10 km
10^3 m = 1000 m = 1 km (kilomeeter)
10^2 m = 100 m (hektomeeter)
10^1 m = 10 m (dekameeter)
10^0 m = 1 meeter
10^{-1} m = 1 dm (detsimeeter)
10^{-2} m = 1 cm (sentimeeter)
10^{-3} m = 1 mm (millimeeter)
10^{-4} m = 0,1 mm = 100 μ m
10^{-5} m = 10 μ m
10^{-6} m = 1 μ m (mikromeeter)
10^{-7} m = 100 nm = 1000 Å
10^{-8} m = 10 nm = 100 Å
10^{-9} m = 1 nm (nanomeeter)
10^{-10} m = 1 Å (ongström) = 0,1 nm
10^{-11} m
10^{-12} m = 1 pm (pikomeeter)
10^{-13} m
10^{-14} m
10^{-15} m = 1 fm (femtomeeter)
10^{-16} m
10^{-17} m
10^{-18} m = 1 am (attomeeter)
10^{-19} m
10^{-20} m

Objekt, VNH, SNH:

Universum tervikuna $\approx 10^{26}$ m
 tehniline piir (teleskoopide vaatlusulatus)
Inimkonna VNH 20. sajandi lõpuks

Galaktika (Linnutee) läbimõõt $\approx 10^5$ va

Inimkonna VNH 20. sajandi algul

kaugus lähima tähe ni $\approx 4,2$ va
 1 va = $9,46 \cdot 10^{15}$ m $\approx 10^{16}$ m

Päikesesüsteem, läbimõõt ≈ 10 Tm
Inimkonna VNH kuni 18. sajandini
 kaugus Maast Päikeseni 150 Gm

Päike, läbimõõt 1,4 Gm = 1400 Mm

Maa, läbimõõt 12,8 Mm = 12 800 km

Euroliit
 Eestimaa
 suur linn
 Niagara jõe laius (1039 m)
 suur maja
 suur loom (vaalhai)
 inimene
 inimese käe laba
 inimese sõrmeküüs
 algloom (amööb)

Inimkonna SNH kuni 16. sajandini

imetaja raku tuum
 bakter
 HIV viirus
 tselluloosi molekul
 glükoosi molekul
 aatom

suure aatomi sisemine elektronkiht

Inimkonna SNH aastaks 1920-1930

leptonid ja kvargid
Inimkonna SNH 20. sajandi lõpuks
 tehniline piir (kiirendite tegevusulatus)

1.3.3. Makro-, mikro- ja megamaailm

Kui me püüame looduse struktuuritasemetel skeemil tekitada mingeid põhjendatud alajaotusi, siis kindlasti eristub otsekohe kõigest muust inimesele lähedaste mõõtmega objektide ehk makrokehade maailm. **Makromaailmas** kehtivaid füüsikaseadusi võime me uurida nägemismeelega vahetult hoomatavate katsete abil. Makrokehi kaasavate katsete korraldamine pole kuigi keeruline ja nende katsete tulemused on kõige veenvamad, kuna hüpoteesist eksperimendini viivad süllogismide ahelad pole kuigi pikad. See vähendab vea esinemise tõenäosust. Niisiis moodustavad makromaailma inimesest mõõtmete poolest mitte väga palju erinevad objektid. Need on objektid tüüpilise mõõtmega l , mis jääb ühe mikromeetri (miljondiku meetri) ja ühe megameetri (miljoni meetri) vahele. Makromaailmas kehtib võrratus $1 \mu\text{m} < l < 1 \text{Mm}$ (roheline ala joonisel 1.2). Kuna inimese keha on tüüpiline makromaailma objekt (paikneb vastava mõõtmete vahemiku keskel), siis on makromaailm inimesele kodune ja harjumuspärane. Makromaailmas kehtivad klassikalise füüsika seadused, mida õppisime põhikoolis. Üleüldse tegeles põhikooli füüsikaõpe peaaegu eranditult makromaailma objektidega.

Gümnaasiumi füüsikakursustes puutume kokku aga ka kahe ülejäänud maailmaga, seda kõige rohkem *Mikro- ja megamaailma füüsika* kursuses. **Mikromaailma** moodustavad inimesest mõõtmete poolest palju väiksemad objektid. Need on objektid tüüpilise mõõtmega l , mis jääb alla ühe mikromeetri (miljondiku meetri). Seega mikromaailma objektidel $l < 1 \mu\text{m}$. **Megamaailma** moodustavad inimesest mõõtmete poolest palju suuremad objektid. Need on objektid tüüpilise mõõtmega l , mis on üle ühe megameetri (miljoni meetri ehk 1000 kilomeetri). Seega mikromaailma objektidel $l > 1 \text{Mm}$. Mikro- ja megamaailmas pole enam rakendatavad kõik klassikalise füüsika seadused. Mikromaailma objektide liikumist tuleb klassikalise (Newtoni) mehaanika asemel kirjeldada **kvantmehaanika** abil. Megamaailma objektide massid võivad olla nii suured, et nende objektide kirjeldamisel tuleb appi võtta **üldrelatiivsusteooria**. Nimelt pole ajal ja ruumil suure massiga objektide läheduses enam makromaailmale iseloomulikke omadusi. Mikro- ja megamaailmale on ühine see, et nende maailmade objektid võivad liikuda absoluutkiirusele (valguse kiirusele vaakumis, vt p. 4.5) lähedaste kiirustega. Sellest tuleneb vajadus kasutada nende objektide kirjeldamisel **relativistlikku füüsikat**, millest meil juba natuke juttu oli (p.1.2.1).

(Peil 1.3. – värvijoonis mikro-, makro- ja megamaailma kohta)

Tekib õigustatud küsimus, kustkohast on võetud objektide tüüpilise mõõtme piirid üks mikromeeter ja üks megameeter, mis on ka vastavatele maailmadele nime andnud. Kahjuks pole sellele küsimusele lihtne vastata. Appi tuleb võtta teadmine, et kõik füüsikalised nähtused taanduvad lõppkokkuvõttes neljale vastastikmõjule: elektromagnetilisele, gravitatsioonilisele, tugevale ja nõrgale.

Gravitatsiooniline vastastikmõju on meie jaoks eelkõige Maa külgetõmbejõu ehk raskusjõu põhjustaja. Ta määrab kehade käitumise oluliselt vaid siis, kui vähemalt üks kehast kuulub megamaailma. **Elektromagnetilise** päritoluga on jõud, millega me oma igapäevases elutegevuses vältimatult kokku puutume. Nendeks on näiteks elastsusjõud, hõõrdejõud ja ka elusorganismide lihasjõud. Elektrijõud hoiavad koos lihtaine aatomeid. Lihtsateks molekulideks (H_2O , CO_2), tahkisteks ja keerulisteks orgaanilisteks ühenditeks liidab aatomeid keemiline side, mis on samuti tingitud elektromagnetilisest vastastikmõjust. **Tugev** ja **nõrk** vastastikmõju tulevad esile vaid mikromaailma protsesside käigus. Näiteks hoiavad tugeva vastastikmõju jõud koos

aatomite tuumi. Nende jõudude toime on ruumiliselt väga piiratud. Tugev vastastikmõju rakendub alles vahekaugustel 10^{-14} m ning nõrk vastastikmõju ei ulatu kaugemale 10^{-18} meetrist.

Mõistagi on igal vastastikmõjul looduse struktuuritasemete skeemil (J.1.2) oma piirkond ehk ala, kus see vastastikmõju on kõige tähtsam. **Elektromagnetilise** mõju tööpiirkond ulatub objektide tüüpilise mõõtme vähenemise suunal kuni pikkusteni 10^{-14} m. See on suure aatomi tuuma mõõde. **Tugev** mõju hoiab tuuma koos, ehkki samanimelise elektrilaenguga prootonite vahel mõjuv elektriline tõukejõud püüab tuuma laiali paisata. Objektide mõõtme kasvu suunal aga ulatub elektromagnetilise mõju tööpiirkond just ligikaudu ühe megameetrini. Kosmilised objektid läbimõõduga üle 1000 km ehk 1 Mm (näiteks Maa ja Kuu) on elektromagnetjõudude kiuste võtnud gravitatsioonijõu toimele kera kuju. Veidi väiksemad objektid tüüpilise mõõtmega 100 km (näiteks mitmed asteroidid) omavad veel kivitükile iseloomulikku nurgelist kuju, mille tagab elektromagnetilise päritoluga keemiline side tahkise aatomite vahel. Seega määrab objekti kuju kuni mõõtmeni 100 km veel makromaaailmas domineeriv **elektromagnetiline** mõju. Alates mõõtme suurusjärgust 1000 km ehk 1 Mm teeb seda aga juba megamaailmas domineeriv **gravitatsiooniline** mõju.

Makro- ja mikromaailmade vahelise tingliku piiri 1 μm määrab Plancki konstandi kui mikromaaailma tähtsaima konstandi arvväärus. Selle juures tuleb arvestada **dualismiprintsiipi** ja **määramatuse printsiipi**. Neist viimasega tutvume alles *Mikro- ja megamaailma füüsika* kursuses. Siinkohal oleks nende printsiipide äraseletamine väga pikk jutt, mistõttu jäägu see praegu rääkimata.

(Peil 1.3. – video suurtest ja väikestest asjadest – veebiõpikusse)

Küsimusi ja ülesandeid

1. Määratlege loodusobjektide mõõtmete skaalal oma sisemise ja välise nähtavushorisoni asukoht 10-aastasena.
2. Määratlege loodusobjektide mõõtmete skaalal inimkonna kui terviku sisemise ja välise nähtavushorisoni ligikaudne asukoht 17. sajandi lõpul, kui äsja olid leiutatud mikroskoop ja teleskoop.
3. Kirjeldage, kuidas on võimalik õli vähimate osakeste mõõtmeid hinnata selle õlilaigu pindala põhjal, mis moodustus veepinnal, kui teadaoleva ruumalaga õlitilk langes vette.

STOP

1. Nähtavushorisoniks nimetatakse piiri, kuni milleni on vaatelejal või inimkonnal tervikuna olemas eksperimentaalselt kontrollitud teadmised füüsikaliste objektide kohta.
2. Sisemine nähtavushorison on vaateja(te) teadmiste piir liikumisel piki mõõtmete skaalat üha väiksemate objektide poole (järjestikusel vastamisel küsimusele *Mis on selle sees?*).
3. Väline nähtavushorison on vaateja(te) teadmiste piir liikumisel piki mõõtmete skaalat üha suuremate objektide poole (järjestikusel vastamisel küsimusele *Mis on selle taga?*).
4. Füüsika määratleb ja nihutab edasi inimkonna kui terviku nähtavushorisonite.
5. Makromaaailma moodustavad inimesest mõõtmete poolest mitte väga palju erinevad objektid. Need on objektid tüüpilise mõõtmega l , mis jääb ühe mikro-

- meetri (miljondiku meetri) ja ühe megameetri (miljoni meetri ehk 1000 km) vahele. Seega kehtib makromaaailma objektide korral võrratus $1 \mu\text{m} < l < 1 \text{ Mm}$.
6. Mikromaaailma moodustavad inimesest mõõtmete poolest palju väiksemad objektid. Need on objektid tüüpilise mõõtmega l , mis jääb alla ühe mikromeetri (miljondiku meetri). Seega mikromaaailma objektidel $l < 1 \mu\text{m}$.
 7. Megamaailma moodustavad inimesest mõõtmete poolest palju suuremad objektid. Need on objektid tüüpilise mõõtmega l , mis on üle ühe megameetri (miljoni meetri ehk 1000 km). Seega megamaailma objektidel $l > 1 \text{ Mm}$.

2. Füüsika uurimismeetod

2.1. Loodusteaduslik meetod ja mõõtmised

2.1.1. Loodusteaduslik meetod ja füüsika osa selles

Eelmises peatükis (p.1.2.2) tegelesime füüsikalise tunnetusprotsessiga, mis polnud midagi muud kui loodusteaduste tüüpilise uurimismeetodi kirjeldus ühe konkreetse vaatleja seisukohalt. Füüsikaline tunnetusprotsess oli esitatav jadana: *sündmus* → *signaal* → *retseptor* → *närviprotsess* → *aisting* → *taju* → *kujutus* → *süllogismide koostamine* → *uus mõttekujund (hüpotees)* → *eksperiment või sihipärane vaatlus (tagasi loodusesse)* → *otsustus hüpoteesi tõesuse kohta*.

Selles skeemis keskenduti looduse kohta info saamise füüsikalistele mehhanismidele ning ei käsitletud veel vaatlejate omavahelist infovahetust ja muid loodusteadusliku meetodi kollektiivseid vorme. Lisagem, et **meetod** on reeglite ja nende rakendamisel kasutatavate võtete kogum, mis võimaldavad saavutada seatud eesmäärke. Sageli nimetatakse loodusteaduslikku meetodit ka lihtsalt teaduse meetodiks. See lähtub inglisekeelse sõna *science* tõlkimisest eesti keelde sõnaga *teadus*, mis aga pole eriti põhjendatud. Eesti sõna *teadus* hõlmab reeglina enam, kui inglise sõna *science*. Korrektne on kasutada eesti keeles *science*'i vastena ikkagi sõna *loodusteadus*, rõhutamaks erinevust humanitaarteadustest (*humanities*).

Kõigepealt kommenteerime veel pisut loodusteadusliku meetodi elemente. Tasub rõhutada, et **aistingu** saamine vaatleja poolt on tegevus, ehkki me tavaliselt mainime vaid selle tegevuse tulemust. Me näeme, et mingi valgus on roheline, me kuuleme, et mingi heli on kõrge. Üksiku aistinguga ei viida reeglina veel vastavusse terviklikku füüsikalist objekti. Kui aistinguid saadakse juba palju ja neid analüüsitakse, siis on tegemist **tajuga**. Tajumine tugineb suuresti **mälus** säilitatavatele eelnevatele teadmistele ja kogemustele. Näiteks me tajume punast tomatit või kollast sidrunit. Aga me võime tomatist ja sidrunist mõelda ka ilma neid vahetult nägemata. Sel juhul räägitakse **kujutlusest**.

Tähelepanekute tegemist looduse kohta meeleeelundite abil nimetatakse **vaatluseks**. Kitsamas mõttes mõistame **vaatluse** all meelelise info kogumist loodusobjekti omaduste kohta objekti ennast mõjutamata. Teatavasti oleme otsustanud pidada loodusteaduse objektideks ka looduses toimuvaid muutusi ehk **loodusnähtusi**. Loodusnähtuse (protsessi) vaatlemine tähendab protsessi kohta info kogumist ise sellesse sekkumata. Niisugune määratlus on vajalik, kui soovime eristada vaatlust **katses** ehk **eksperimendis**, mille puhul loodusnähtus kutsutakse kunstlikult esile, protsess toimub katse korraldaja poolt kontrollitavates tingimustes. Vaatlus on loodusteadusliku uurimistöo esimene etapp. Vaatlusele järgneb tulemuste liigitamine

oluliseks peetavate tunnuste järgi. Seejärel toimub vaatluslike faktide kõrvutamine juba tuntutega. Alles nüüd on võimalik formuleerida teaduslikult sõnastatud küsimus ehk **probleem** ja teha selle lahenduse kohta teaduslikult põhjendatud oletusi, mida nimetatakse **hüpoteesideks**. Järgnevalt formuleeritakse hüpoteesidest tulenevaid konkreetseid **ennustusi** ja kontrollitakse nende täitumist **eksperimenti** abil. Kui hüpotees on osutunud tõeseks, siis sõnastatakse vastav **seaduspärasus**. Seaduspärasuse sõnastamisel tuleb kindlasti nimetada **katse tingimusi**, sest teistsugustes tingimustes ei pruugi katse tulemus enam olla selline.

Illustreerime kõike ülaltoodud konkreetse näitega. Olgu meil **vaatluse** tulemuseks fakt, et puuleht langeb aeglaselt ja lehe langemistee pole isegi täiesti tuuletu ilmaga sirgjoon. Samas aga õun kukub lehest kiiremini ja sirgjooneliselt.

Probleem: Miks puuleht kukub aeglaselt, õun aga kiiresti?

Hüpotees: Keha langemise kiirus võiks sõltuda keha kujust, aga ka keha raskusest. Õun ja puuleht erinevad mõlema omaduse poolest.

Katse: võtame A4 paberipakist kaks uut paberilehte. Paberi tootja on garanteerinud, et nad on ühesugused, sh sama massiga (erinevus ei ületa 1%). Kahel katsekehal on ühesugune raskusjõud, seega erinevus nende käitumises **ei saa** olla põhjustatud raskusest. Kägardame ühe paberilehe võimalikult väikeseks nutsakaks. Laseme kägardamata jäänud lehe ja nutsaka üheaegselt ning samalt kõrguselt langema.

Ennustus: Kui langemise kiirus sõltub keha kujust, siis peavad leht ja nutsakas jõudma pörandani erineva aja jooksul.

Tulemus: Kägardamata leht jõudis pörandani oluliselt hiljem kui nutsakas.

Järeldus: Keha langemise kiirus sõltub keha kujust.

Katse tingimus: Me uurisime kehade langemist õhus.

Seaduspärasus: Õhus langemisel sõltub langemise kiirus keha kujust.

Loodusteadusliku meetodi all mõistetakse niisiis meetodit, mis seisneb vaatluste põhjal hüpoteeside püstitamises, nende põhjal ennustuste tegemises ja ennustuste paikapidavuse kontrollimises katsete (eksperimentide) läbiviimise teel. Esimesena rakendas neid juhiseid järjekindlalt mehaanikateaduse alusepanija Galileo Galilei (1564-1642). Galilei rajas **kinemaatika** kui liikumist kirjeldava õpetuse. Galilei ja Descartes'i (1596-1650) töödest lähtudes formuleeris Isaac Newton (1642-1727) **dünaamika** kolm põhiseadust ja gravitatsiooniseaduse. Newton andis tolleaegsel teadmiste tasemel kõikehõlmava seletuse kehade liikumiseleku muutumise põhjuste kohta. Sellega eraldus loodusteadus filosoofiast, ehkki aastal 1685 ilmunud Newtoni peateos kandis veel pealkirja *Loodusfilosoofia matemaatilised printsüübid* (lad. k. *Philosophiae naturalis principia mathematica*). Samas rõhutas Newton selle pealkirjaga, et tema töö ei ole enam lihtne filosoferimine looduse üle vaid juba **matemaatiline loodusfilosoofia** ehk kaasaegses kõnepruugis – **füüsika**. Nii osutus füüsika esimeseks loodusteaduslikku meetodit rakendavaks teaduseks, teerajajaks teistele loodusteadustele, mis selgesti eristusid füüsikast või filosoofiast alles sadakond aastat hiljem.

Füüsikas näeme kujukalt ka seda, kuidas loodusteaduslikku meetodit võib rakendada erineva rangusega, sõltuvalt konkreetsete loodust uurivate inimeste võimekusest või tasemest. Looduse kohta tehtud avastusi võib selles aspektis jagada seaduspärasusteks ja seadusteks ning kasutatavat üldist käsitus- või mõtlemisviisi loodusteaduslikuks ja täppisteaduslikuks.

Seaduspärasus on loodusnähtuse kohta kehtiv **kvalitatiivne** ehk erijooni rõhutav, mõõdetavust mitte eeldav – üldistus. Seaduspärasuste formuleerimisel kasutavad teiste loodusteaduste esindajad sageli väljendeid, mis füüsika jaoks pole enam piisavalt ranged. Näiteks ütlevad geograafid, et *soe õhk on külmast kergem* (füüsik ütleks: *väiksema tihedusega !*) ja *tõuseb seetõttu ülespoole*. Seaduspärasus ei pea olema esitatav matemaatiliselt rangeelt (valemi või võrrandina).

Seadus on loodusnähtuse kohta kehtiv **kvantitatiivne** ehk mõõdetav ja arvuliselt väljendatav, matemaatiliselt range valemi või võrrandina esitatav üldistus. Eelmises lõigus toodud seaduspärasusele vastab meie poolt põhikoolis õpitud Archimedese seadus (siin rakendatuna gaasi kohta): *kehale mõjub gaasis üleslükkejõud F_u , mis võrdub keha poolt välja tõrjutud gaasi raskusjõuga*. Valemina: $F_u = \rho V g$, kus ρ on gaasi tihedus, V – välja tõrjutud gaasi ruumala ja g – raskuskiirendus. Kui mingi kogus väiksema tihedusega sooja õhku paikneb juhtumisi suurema tihedusega külmas õhus, siis on üleslükkejõud suurem selle õhukoguse enda raskusjõust ning soe õhk hakkab ülespoole tõusma. Füüsikaseaduste formuleerimisel kasutatakse kindlasti füüsikalisi suurusid.

Loodusteaduslik mõtlemisviis on selline maailma tunnetamise viis, mille korral eelistatult kasutatakse kvalitatiivseid hinnanguid (nt. *suurem-väiksem, kõrgem-madalam*). Rakendatakse eelkõige induktiivset meetodit (liikumist üksikult üldisele), otsitakse seaduspärasusi, üldistused pole väga ranged. Põhieesmärgiks on tekitada looduseuurija teadvuses loodusnähtuste olemust peegeldavaid kujutluspilte.

Täppisteaduslik mõtlemisviis on selline maailma tunnetamise viis, mille korral eelistatult kasutatakse kvantitatiivseid (valemi või võrrandina esitatavaid) järeldusi. Rakendatakse eelkõige deduktiivset meetodit, tuletatakse matemaatiliselt rangeid seadusi, püütakse saavutada üldistuste kõikehõlmavust. Põhieesmärgiks on jõuda loodusnähtust kirjeldava valemi või võrrandini.

Füüsikas kasutatakse palju mõlemat käsitusviisi. Normaalne on, et loodusteadusliku mõtlemisviisi omandamine eelneb täppisteadusliku mõtlemisviisi tekitamisele. Põhikooli füüsikas domineeris selgesti loodusteaduslik lähenemine. Käesolev FLA kursus püüab seda joont jätkata, ehkki deduktiivsusest enam täielikult pääsu pole. Gümnaasiumi füüsika ülejäänud neli kursust sisaldavad aga juba päris palju täppisteaduslikku käsitlust. Füüsikas soovitakse kindlasti välja jõuda täppisteadusliku mõtlemisviisini, mistõttu asutakse pahatihti liiga vara opereerima valemite ja võrranditega. Sellega aga kaasneb oht langeda valemlikku sümbolpimedusse – asuda valemite kasutamisele, nende mõtet mõistmata (p.1.1.4).

2.1.2. Teaduslike teadmiste saamine füüsikas

Mistahes loodusteaduslik uurimistöö algab niisiis soovitatavalt erapooletust **vaatlusest**, mida siiski tehakse tavaliselt mingist eelnevast teadmisest või oletusest lähtudes. Seejärel püstitatakse **hüpotees**, mille sisuks on tavaliselt oletus kahe loodusnähtuse omavahelise seose kohta. Deduktiivselt tuletatakse hüpoteesist tulenevaid konkreetseid **ennustusi**. Nende kontrollimiseks viiakse läbi **katseid** või **sihipäraseid vaatlusi** ning võrreldakse tulemusi ennustusega. Katsete puhul on oluline nende nii täpne dokumenteerimine, et katseid oleks võimalik korrata kuskil mujal ja teiste teadlaste poolt. Väga tähtis on ka katsetulemuste võimalikult ühene tõlgendatavus. Vastavalt katsetulemustele leiab aset hüpoteesi kinnitamine või ümberlükkamine. Teadusliku uurimise protsessis võib ummikusse jõudes ka mistahes etapist **tagasi**

pöörduda ja eelmisi modifitseerida. Teadusliku meetodi osaks on kujunenud nõue kasutada vaid **mõisteid** täpselt defineerida ja järjekindlalt kasutada **teaduskeelt**, milles sõnadel on väga kindlad tähendused. Loodusteadustes on need enamasti füüsikaliste suuruste definitsioonid. Teadus on ühiskondlik ehk **sotsiaalne** nähtus ja seda tehakse üldreeglina avalikult. Kõik teadusliku uurimistöö etapid peavad põhimõtteliselt olema jälgitavad ja korratavad, kasutatud allikatele tuleb ettenähtud viisil viidata. Töö tulemused avaldatakse teadusajakirjades ja neid hindavad kõigepealt ajakirjade toimetuste poolt määratavad sõltumatud eksperdid ja hiljem kogu lai teadusüldsus. Mingi eksperimentaalne teadustulemus muutub üldtunnustatud **eksperimentaalseks faktiks** alles pärast seda, kui sama tulemuse on saanud paljud erinevad teadlased erinevates laborites üle kogu maailma. See on tulemuse tunnustamine teadlaskonna avalik ja **konsensuslik** ehk üksmeele otsus.

Kõik eelnev käsitles **eksperimentaalset** loodusteadust, kus hüpoteese oli võimalik kohe katseliselt kontrollida. Kaasajal tehakse aga palju ka puhtalt teoreetilist teadustööd. **Teoreetiline** loodusteadus lähtub üldtunnustatud ja kõigis senistes katsetes kinnitust leidnud faktidest looduse kohta ja enamasti püüab antud looduse nähtuse kirjeldamisel rakendada mingit uut matemaatilist mudelit. Pärast uue teooria tugineb mingile seni mitte kasutatud lähte-eeldusele ehk **postulaadile**. Teooria üksikjäreldused tuletatakse deduktiivselt antud loodusteaduse printsiipidest ja arendatava teooria konkreetsetest postulaatidest. Teoreetilise tulemuse usaldusväärsuse tagab esialgu mitte eksperiment vaid läbiproovitud matemaatiliste võtete korrektne sooritamine ja loogikareeglite täpne järgimine. Teaduslikke teooriaid tunnustab samuti teadlaskonna konsensuslik otsus. Samas võidakse neid aga ka iga hetk vaidlustada või üritada ümber lükata, viidates looduse olulistele omadustele, mida vaadeldav teooria pole arvestanud. Mingit teooriat tunnustatakse lõplikult alles siis, kui sellest teooriast lähtuvad ennustused on saanud eksperimentaalse kinnituse. Näiteks võeti Albert Einsteini poolt aastal 1915 formuleeritud üldrelatiivsusteooria teadusüldsuse poolt omaks pärast seda, kui kaks sõltumatut vaatleja rühma tegid 1919. aasta päikesevarjutuse ajal kindlaks, et Päikesest lähedalt möödunud kaugete tähtede valgus kaldub Päikese gravitatsiooniväljas kõrvale just niipalju, kui seda oli ennustanud üldrelatiivsusteooria. Kaasajal on teoreetiline osakestefüüsika vähemasti 50 aastat eksperimentaalsest ees. Nii palju võtab aega tehniliste võimaluste loomine teoreetikute ühe või teise ennustuse katseliseks kontrollimiseks. Näiteks ennustas itaalia füüsik Enrico Fermi nõrka vastastikmõju vahendavate osakeste olemasolu aastal 1930, need osakesed avastati katseliselt aga alles aastal 1983.

Kõik ülalpool tehtud üldised tähelepanekud loodusteaduste toimimisest kehtivad täielikult ka füüsikas. Enamgi veel, kõige ilmekamad näited selle kohta kuuluvadki reeglina **füüsika** töömaile. Seetõttu vaatleme veel füüsikalisi uurimismeetodeid pisut detailsemalt. Füüsika on **empiiriline** ehk kogemuslik teadus, kuna info looduse kohta saadakse läbi vaatleja aistingute. Seetõttu on **vaatlus** kahtlemata füüsika tähtsaimaks uurimismeetodiks. Samas vaatlusest üksi looduse tundmaõppimiseks ei piisa. Kui me füüsikalisi objekte ja nähtusi neid mõjutamata või sekkumata vaid vaatleme, võib osa infost meil saamata jääda. Looduses ei pruugi vaatluse ajal realiseeruda kõik võimalikud erinevad olukorrad ja tingimused. Mõni nähtus võib olla väga haruldane või looduses iseseisvalt üldse mitte toimuda.

Siin aitabki füüsikuid teine uurimismeetod – **katse** ehk **eksperiment**. Katse käigus võib nähtust ise esile kutsuda ja uuritavaid objekte vastavalt soovile ka ise mõjutada.

Eksperiment tuleb enne läbiviimist alati hästi läbi mõelda ja planeerida. Enamasti tehakse seejuures varasematele teadmistele põhinedes oletused, mida siis läbi katse kontrollitakse. Me teame juba, et selliseid kontrollimist vajavaid teaduslikke oletusi nimetatakse **hüpoteesideks**. Kui hüpoteesid ei leia kinnitust, siis neid muudetakse ja katsetatakse uuesti.

Kolmandaks uurimismeetodiks on **andmetöötlus**. Füüsikas püütakse uuritavaid objekte ja nähtusi maksimaalselt kirjeldada arvude abil. Arvuliste ehk kvantitatiivsete andmete töötlemine matemaatiliste meetodite abil võimaldab uuritavaid paremini mõista ning väärtuslikku lisateavet saada.

Vaatluse ja katse käigus kogutakse infot, mida tuleb talletada ja töödelda. Uuritavad objektid ja nähtused erinevad alati üksteisest mingite omaduste poolest. Näiteks vääriskivid erinevad suuruse, kuju, värvi, kõvaduse ja kauniduse poolest. Osa neist omadustest on arvuliselt kirjeldatavad, teised mitte. Rubiinikristalli pikkust ja isegi kõvadust saame arvude abil kõigile ühtemoodi mõistetavalt kirjeldada, kuid vääriskivi emotsionaalset mõju inimesele mitte. Füüsikalise objekti mingi omaduse sellist kirjeldust, mida saab väljendada arvuliselt, nimetatakse füüsikaliseks suuruseks. Mõnikord öeldakse lihtsalt, et füüsikaline suurus ongi objekti arvuliselt kirjeldatav omadus. Niiviisi füüsikalist suurust defineerides, ei tohi me aga unustada, et füüsikaline objekt ja tema mingi omadus on objektiivselt olemas, füüsikaline suurus on aga inimlik väljamõeldis, vaatejate ühine kokkuleppeline kujutus, loodusobjekti mudel. Füüsikalisteks suurusteks on näiteks keha mass või ruumala, keha liikumise kiirus, keha temperatuur või aine hulk kehas.

Põhjendatud hinnangu andmist füüsikalise suuruse väärtusele nimetatakse selle suuruse mõõtmiseks. Veelgi lihtsam on aga öelda, et **mõõtmine** on füüsikalise suuruse väärtuse võrdlemine mõõtühikuga. Vajadus mõõtmise järele tuleneb asjaolust, et vaateja ei või täielikult usaldada oma meeleeelundeid. Üksikisiku meeleline tajumine on subjektiivne ja vaatlustulemus on eelnevalt kogemusest. Eksituste vältimiseks tuleb kasutada mõõtmisi. Tsiteerigem siin katselise loodusteaduse alusepanijat Galileo Galileid, kes on öelnud: „Mõõta tuleb kõike, mis on mõõdetav ja püüda mõõdetavaks teha, mis seda veel pole.“ Tõeline loodusteadus algab mõõtmistest.

(Peil 2.1. – värvipildid kala pikkuse mõõtmisest ja mõõteriistadest)

2.1.3. Mõõtmised füüsikalistes loodusteadustes

Küsimus nüüd: milles ikkagi seisneb mõõtmine? Kuidas mõõdetava suuruse arvuväärtus kindlaks tehakse? Kõik me teame, et näiteks õuna massi saab määrata kaalumise teel. Selleks asetatakse ühele kaalukaasile õun ja teisele sellises koguses teadaoleva massiga kaaluvihite, et kaal tasakaalu jääks. Me võrdleme kaalude abil õuna ja vihte. Mõõtmine seisneb alati tundmatu suuruse võrdlemises teadaolevaga. Näiteks pliatsi pikkuse mõõtmisel võrdleme seda mõõtjoonlauale kantud jaotise (kriipsude vahe) pikkusega ning määrame, kui mitu joonlaua jaotist mahub pliatsi pikkusesse. Samamoodi võiksime koolilaua pikkust või laust mõõta, võrreldes lauapikkust õpiku pikkusega.

Mõõtmine on mingi füüsikalise suuruse konkreetse väärtuse võrdlemine sama suuruse teise, mõõtühikuks võetud väärtusega. Võrdlemise tulemusena saadud arvu

nimetatakse **mõõtarvuks** ehk mõõdetava suuruse arvväärtuseks. Eelnenud näidetes oli uuritavaks objektiks pliiats või koolilaud. Füüsikaliseks suuruseks oli **pikkus**, suuruse konkreetseks väärtuseks oli vaadeldava pliiatsi pikkus. Mõõtühikuks oli pliiatsi mõõtmisel mõõtjoonlaua jaotise pikkus (1 cm), koolilaua pikkuse mõõtmisel aga õpiku pikkus. **Mõõtühik** on füüsikalise suuruse (nt pikkus) konkreetne väärtus, mida kokkuleppeliselt kasutatakse sama suuruse teiste väärtuste (nt *pliiatsi pikkus*) arvuliseks iseloomustamiseks.

Mõõtmisi saab jagada otsesteks ja kaudseteks. **Otsene** on selline mõõtmine, mille korral meid huvitav füüsikalise suuruse väärtus on vahetult loetav mõõteriista skaalalt. **Kaudne** on mõõtmine, mille korral mõõtetulemus leitakse arvutuste teel otsemõõdetud suuruste kaudu. Näiteks auto kiirust saab otseselt mõõta spidomeetri abil ning leida kaudselt, arvutades selle otseselt mõõdetud teepikkuse ning sõiduaja jagatisena.

Ülalpool tööme mõõtmistega seonduvaid näiteid füüsika vallast, aga põhimõtteliselt samamoodi tehakse mõõtmisi ka teistes loodusteadustes. Pole liigne rõhutada, et mõõteprotseduurid teistes loodusteadustes on enamasti algselt välja töötatud füüsikas. Kasutatakse koguni mõistet *füüsikalised loodusteadused*. Nende teaduste hulka kuuluvad peale füüsika kindlasti ka keemia ja geoloogia. **Füüsikalistele loodusteadustele** on omane füüsika üldmudelite (näiteks füüsikaliste suuruste *pikkus, kiirus, aeg, mass, energia*) ulatuslik kasutamine, füüsikaliste uurimismeetodite rakendamine ja füüsikaliste mõõteprotseduuride järgimine.

Küsimusi ja ülesandeid

1. Milliseid katsetulemusi loetakse piisavalt tõesteks, et neile rajada uusi teooriaid?
2. Miks on loodusteadustes vaja teostada mõõtmisi?
3. Tooge lisaks kiiruse mõõtmisele teepikkuse ja aja kaudu veel üks näide kaudse mõõtmise kohta.
4. Mis annab alust pidada keemiat ja geoloogiat füüsikalisteks loodusteadusteks?

STOP

1. Vaatluseks nimetatakse meelelise info kogumist loodusobjekti omaduste kohta objekti mõjutamata, protsessidesse sekkumata.
2. Hüpootees on katselist kontrollimist vajav teaduslikult põhjendatud oletus.
3. Katse ehk eksperiment on looduse objekti eesmärgipärane mõjutamine või uuritava loodusnähtuse kunstlik esilekutsumine kontrollitavates tingimustes.
4. Mõõtmine on mingi füüsikalise suuruse konkreetse väärtuse võrdlemine sama suuruse teise, mõõtühikuks võetud väärtusega. Lühidalt: mõõtmine on võrdlemine mõõtühikuga.
5. Mõõtühik on füüsikalise suuruse konkreetne väärtus, mida kokkuleppeliselt kasutatakse sama suuruse teiste väärtuste arvuliseks iseloomustamiseks.

2.2. Mõõtmised ja Mõõteseadus

2.2.1. Mõõtmisprotsess ja mõõteseadusandlus

Eelmises punktis (p.2.1.3) oli juttu koolilaua pikkuse mõõtmisest, kasutades mõõtühikuna õpiku pikkust. Kui me näiteks paneme sellise mõõtmise tulemuse kirja kujul *Koolilaua pikkus on viis ja pool õpiku pikkust*, siis tekib meie kirjutise lugejal terve

rida küsimusi. Kõigepealt, millise õpikuga oli tegemist? Miks valiti ühikuks just selle õpiku pikkus? Kas *pikkus* tähendab pikema külje mõõdet? Kuidas tagati ühe ja sellesama õpiku pikkuse viie- või kuuekordne kasutamine, kui polnud võimalik viit õpikut ritta asetada, sest viit ühesugust õpikut lihtsalt polnud? Kas *viis ja pool* tähendab *täpselt* 5,5 või on see mingi väärtus 5,4 ja 5,6 vahel? Või hoopis lihtsalt 5 ja 6 vahel? Mõõtetulemus ilma mõõteprotsessi kirjelduseta on suhteliselt väheväärtuslik, kuna tulemusega tutvuja ei tea, kui tõsiselt ta peaks seda tulemust võtma. Samuti pole kuigi otstarbekas kasutada sellist mõõtühikut, mida on raske üheselt kirjeldada ja teiste mõõtjate poolt samasugusena taastada.

Märkame, et mõõteasjanduses peavad kehtima kindlad kokkulepped, tagamaks mingi mõõtmise korratavust ja vältimaks ülearu pikki mõõtmisprotsessi kirjeldusi. Seda mõisteti juba keskajal, mil iga suurema linna ümbruses kasutati selle linna valitsuse poolt kehtestatud mõõtühikuid. Näiteks olid Vana-Liivimaal mahuühikutena kasutusel Tallinna vakk (44,277 liitrit) ja Riia vakk (66,415 liitrit), Tallinna toop (1,09 liitrit) ja Riia toop (1,32 liitrit). Sõltumatu mõõdusüsteemi omamine oli konkreetse linna kindel erioigus ehk privileeg, osa tema iseolemisest. See süsteem toimis hästi meie poolt ajaloos õpitud **naturaalmajanduse** tingimustes, mil suurem osa elanikkonnast üldse rahaga tegemist ei teinud, äritehinguid sooritati lähima linna turul ja naaberlinnas toimuv polnud kuigi oluline. Kui uusajal tekkisid ühtsed rahvusriigid, siis tuli seoses turgude avardamisega mõõteasjandus ehk **metroloogia** (kr. k. *metron* – mõõt) kogu riigis ühtlustada. Oli ju vaja tagada, et kõik mõõtjad saaksid mõõtmisprotsessist vähemasti selle riigi piires ühtemoodi aru. Samuti soodustas ühesuguste mõõtühikute kasutamine kaubanduse arengut, sest nii kadus vajadus pidevalt mõõtühikuid teisendada. Sai selgeks, et mõõteasjandus tuleb vastavate seadustega ära reguleerida.

Tungiva vajaduse omaette seadusandluse järele mõõteasjanduses tingib tõsiste varaliste vaidluste paratamatu jõudmine kohtusse. Kujutlege me seadust, mis tekiks, kui mingi kaubakoguse ostu-müügi lepingus poleks täpsustatud mõõtühikut, mida tuleb selle kauba mõõtmisel kasutada. Loodetavasti mõistame kõik, et *sada vakka teravilja* keskaegses Tallinna ühikusüsteemis ja Riia süsteemis on sootuks kaks eri asja. Tänapäeval tuleb pea kõigil inimestel maksta kasutatud vee ja elektrienergia eest. Vastavaid korrektseid arveid saab aga esitada ja neid on mõtet tõrkumata tasuda vaid juhul, kui vett või elektrienergiat on mõõdetud kehtivate õigusnormide kohaselt.

Omaette valdkonna moodustavad õigusrikkumised, mida tuvastatakse mõõtmise teel. Tuntuim näide selle kohta on liikluspolitsei poolt autojuhile määratav trahv lubatud kiiruse piirmäära ületamise eest. Kuna seaduses ettenähtud trahvisumma on tugevas sõltuvuses rikkumise ulatusest, siis muutub ülioluliseks politsei poolt teostatud kiirusmõõtmise korrektsus. Me õpime praegu mõõteasjandust mitte niivõrd füüsika vajadustest lähtuvalt vaid eelkõige põhjusel, et kõik kodanikud peavad hästi mõistma lihtsat tõde – ebakorrekse mõõtmise alusel esitatud pretensioon on õigustühine! Näiteks oli mõõteasjandus taasiseseisvunud Eesti Vabariigis esialgu reguleerimata, mistõttu polnud kuigi raske liikluspolitsei poolt tehtud trahviotsuseid kohtus vaidlustada. Metroloogiat tundvad kodanikud võisid end sellega lausa lõbustada, sest vastavat seadusandlust polnud veel olemas.

Tänapäeval reguleerib Eestis kõike mõõtmistega seonduvat 2004. aastal kehtestatud **Mõõteseadus**. Soovi korral saab igaüks Mõõteseadusega täies pikkuses tutvuda elektroonilises Riigi Teatajas. Mõõteseaduse täitmine on kohustuslik kõigile, kelle tegevus on mingilgi viisil mõõtmistega seotud. Piirkiiruse ületamise eest trahvi

määrav politseiametnik on kohustatud tutvustama autojuhile dokumente, mis tõendavad, et auto kiiruse mõõtmine on toimunud täies vastavuses Mõõteseadusega.

Eesti Vabariigi Mõõteseaduse peamised reguleerimisalad on järgmised:

- Rahvusvahelisele mõõtühikute süsteemile (SI) vastavate mõõtühikute (vt p.2.3) kasutamise tagamine Eestis.
Seaduses on öeldud, et rahvusvahelise mõõtühikute süsteemi kasutamine on Eestis kohustuslik majandustegevuses, rahvatervise ja avaliku ohutuse valdkonnas, haldus- ja õppetegevuses.
- Mõõtetulemuste jälgitavuse tõendamine. Seadus nõuab, et juriidiliselt korrektseid mõõtmisi teostaks vastavat tunnistust omav mõõtja, kes kasutab sobivaks tunnistatud mõõtevahendeid.
- Mõõtevahendite kontroll ja taatlemine.
- Mõõtmistegevuse riikliku järelevalve korraldus.

Mõõteseaduses on defineeritud kõik olulised mõõteasjanduslikud ehk metrooloogilised mõisted. Järgmises alapunktis refereerime ja kommenteerime vastavaid määratlusi.

2.2.2. Mõõtesuurused, mõõtevahendid ja mõõteriistad

Mõõtmiste teel määratakse küll enamasti füüsikaliste suuruste väärtusi, kuid korrektset mõõta on vaja ka suurusi, mis kuuluvad rohkem keemia töömaile (nt *vesinikueksponent* ehk *pH*, *lisandi molaarne kontsentratsioon* jne). Seepärast on mõõteseaduses defineeritud üldisem mõiste – *mõõtesuurus*. Mõõteseaduse kohaselt on mõõdetav suurus ehk **mõõtesuurus** nähtuse, keha või aine oluline omadus, mida saab kvalitatiivselt eristada ja kvantitatiivselt määrata. Väljend *kvalitatiivselt eristada* tähendab ühe suuruse (nt. *kiirus*) eristamist teisest suurusest (*pikkus*). *Kvantitatiivselt määrata* tähendab – arväärtust leida. **Kiirus** kui mõõtesuurus on nähtuse omadus, **pikkus** on keha omadus ja **tihedus** on aine omadus. **Mõõtetulemus** on mõõtmise teel saadud mõõtesuuruse väärtus.

Mõõtesuuruse väärtus on konkreetsel suuruse kvantitatiivne (arvuline) määrang, mida tavaliselt väljendatakse arväärtuse ja mõõtühiku korrutisena. Sõna *konkreetsne* rõhutab jällegi kindlat loodusobjekti, mida parajasti mõõdetakse. **Pikkus** on *mõõtesuurus*, aga ühe kindla pliatsi pikkus on juba *konkreetsel mõõtesuuruse väärtus*. Sõna *tavaliselt* tähendab, et suuremal osal mõõtesuurustest on küll mõõtühik olemas, kuid leidub ka suurusi, millel see puudub. Need on suurused, mis näitavad, kui mitu korda üks mõõtühikut omav suurus on suurem teisest, sama ühikuga suurusest. Mõõtühikuta füüsikalisi suurusi (nt *hõõrdetegur* või *murdamisnäitaja*) õpime tundma gümnaasiumi järgnevates füüsikakursustes. See, et mõõtesuuruse väärtust tuleb esitada arväärtuse ja mõõtühiku korrutisena, peaks meile olema teada juba põhikooli füüsikast. Ei ole piisav kirjutada, et *pliatsi pikkus on 14*. Mõõtühikut omava suuruse mõõtmise tulemusel on mõte vaid mõõtühiku äratoomise korral. Seega tuleb kirjutada: *pliatsi pikkus on 14 cm*. Sisuliselt tähendab see kirjutusviis aga seda, et pliatsi pikkuse saamiseks tuleb korrutada mõõtühiku pikkust arvuga 14.

Mistahes mõõtmise läbiviimiseks on kindlasti vaja mõõtevahendit. **Mõõtevahend** on kindlate metrooloogiliste omadustega tehniline vahend, mida saab kasutada mõõtmiste sooritamiseks kas üksi või koos lisaseadmetega. Temperatuuri mõõtmise vahendiks võib olla näiteks mingile alusele keritud pikk vasktraat, kuna selle elektritakistus

sõltub temperatuurist. Ainult traadi abil me aga temperatuuri väärtust määrata ei saa. Me vajame lisaseadmena takistusmõõtjat. Üldiselt on mõõtmiste korral alati tegemist **mõõtesignaali** ehk endas mõõtarvu kandva infoga. Mõõtarv aga ei pruugi olla sellest otsekohe välja loetav. Vasktraadi kui temperatuuri mõõtmise vahendi korral on mõõtesignaali takistusmõõtja näit, aga see ei esine mõõtjale kui vaatlejale vahetult tajutaval kujul. Mõõtevahend (traat) on koos abivahendiga (takistusmõõtja) kasutatav temperatuuri mõõtmiseks alles siis, kui takistusmõõtja näit on kõigi kehtivate reeglite kohaselt viidud vastavusse temperatuuri väärtustega. See vastavusse viimine on tuntud kui mõõtevahendi **kalibreerimine**. Mõõteseaduses nimetatakse kalibreerimiseks „...menetlust, mis fikseeritud tingimustel määrab kindlaks seose mõõtevahendiga saadud väärtuse ja etaloni abil realiseeritud füüsilise suuruse vastava väärtuse vahel“. **Etaloni** mõistest tuleb täpsemalt juttu edaspidi (p.2.2.3).

Mõõtevahendit, mis esitab mõõtesignaali juba vaatlejale vahetult tajutaval kujul, nimetatakse mõõteriistaks. See tähendab, et mõõteriista korral me võime mõõtesuuruse väärtust lugeda mõõteriista skaalalt või numbriliselt tabloolt. Mõõteriistadeks on näiteks joonlaud, sekundkell, termomeeter või ampermeeter. Iga mõõteriista iseloomustab tema skaalale või passi märgitud **piirviga**, mida tuleb mõõtmistel kindlasti arvestada. Sellega tegeleme peagi lähemalt (p.2.4). Kui meil pole usaldusväärset infot piirvea kohta, siis ei ole meil rangelt võttes üldse tegemist mõõteriistaga.

2.2.3. Etalonid ja mõõteriistade taatlemine

Seda teadaolevat mõõtesuuruse väärtust, millega mõõtmise käigus mõõdetavat suurust võrreldakse, nimetatakse teatavasti **mõõtühikuks**. Kuna mistahes füüsikaline suurus kui mõõtesuurus on vaatlejate ühine kujutus (looduse mudel, mitte loodus ise), siis on seda ka vaadeldava suuruse mõõtühik. Mõõtjad peavad kokku leppima selles, millega nad mõõdetavat suurust võrdlevad. Kui aednik soovib ruudukujulise lillepeenra kontuure maha märkida, võib ta kasutada mistahes pikkusega nõorijuppi. Lillepeenart nõori pikkusega võrreldes saab aednik oma lillepeenra kõik küljed ühepikkuseks mõõta. Kui naaberaednik peab kõnealust peenart sedavõrd kauniks, et otsustab oma aias samasuguse lillepeenra rajada, siis ei piisa tal peenra väljamõõtmiseks teadmisest, kui mitu nõorijupi pikkust peenra külge pikk on. Ta peab kas saama kasutada sedasama nõorijuppi või siis teadma, kui mitu sentimeetrit pikk oli algsel mõõtmisel kasutatud mõõdnõör. Erinevad mõõtjad peavad kokku leppima ühesugused mõõtühikud.

Niisiis on mõõtühik kokkuleppeline suurus. Mõõtühikut on võimalik kokku leppida vaid siis, kui kõik mõõtjad saavad oma isikliku mõõtevahendi valmistamisel lähtuda ühest ja samast mõõtühiku näidisest. Mõõtühiku kokkuleppimisel kasutatavat näidist nimetatakse mõõtühiku **etaloniks** (pr.k. *estalon* – ideaalne hobune). Mõõteseadus ütleb põhimõtteliselt sama veidi detailsemalt: „**etalon** on materiaalmõõt, mõõteriist, etalonaine või mõõtesüsteem, mida kasutatakse mõõtühiku või sama liiki suuruse mõnede teiste väärtuste määratlemiseks, realiseerimiseks, säilitamiseks või edastamiseks“. Kes on juba tutvunud rahvusvahelise mõõtühikute süsteemi (SI) põhiühikute definitsioonidega (p.2.3), see mõistab, et **kilogrammi** (1 kg) etalon on **materiaalmõõt**. See on üks kindel keha – plaatina (90%) ja iriidiumi (10%) sulamist valmistatud, ühesuguse läbimõõdu ja kõrgusega (39,17 mm) silinder. **Sekundi** (1 s) etalon on põhimõtteliselt **mõõteriist** – tegemist on aatomkellaga, mis töötab element teesiumi (Cs) isotoobil massiarvuga 133. Elektrivoolu tugevuse SI ühiku **amper**

(1 A) etalon on **mõõtesüsteem**, mida sageli nimetatakse ka amperkaaluks. Kahe paralleelse juhtme vahel mõjuvat jõudu mõõdetakse ülitäpsete kaaludega.

Temperatuuri SI-ühiku **kelvin** (1 K) etaloniks on puhas vesi kui **etalonaine**: 1 K on $1/273,16$ puhta vee kolmikpunkti temperatuurist. Mõõteseadus ütleb: „**etalonaine** on aine, mille mingi omaduse väärtused on piisavalt ühetaolised ja täpselt määratud, et kasutada seda mõõtevahendite kalibreerimisel...“ Niisiis, on kelvini definitsiooni aluseks vee kui aine omadus, mille kohaselt **puhta vee kolmikpunkt** ehk lihtsamalt öeldes jää sulamistemperatuur – on *piisavalt ühetaoliselt ja täpselt määratud*.

Mõõtevahendite ja mõõteriistade omadused võivad ajas muutuda. Seetõttu tuleb õiguslikku aspekti omavatel mõõtmistel kasutada vaid mõõtevahendeid ja mõõteriistu perioodiliselt taadelda. Mõõteseadus ütleb, et „...**taatle mine** on protseduur, mille käigus pädev taatluslabor või teavitatud asutus kontrollib mõõtevahendi vastavust kehtestatud nõuetele ja märgistab nõuetele vastavaks tunnistatud mõõtevahendi taatlusmärgisega. **Taatlusmärgis** on taatluskleebis, taatlusplokk või taatlustempli jäljend. Mõõtevahendil või mõõteriistal peab olema ka tüübikinnitus. See on pädev otsustus, mille kohaselt vaadeldavat tüüpi mõõtevahend vastab õigusaktidega kehtestatud nõuetele ning on kasutatav õiguslikult reguleeritud toimingutes, võimaldades teatud ajavahemiku ehk **taatluskehtivusaaja** jooksul saada usaldatavaid mõõtetulemusi.“ Neis määratlustes korduvalt esinenud sõna *pädev* tähendab, et taatlusprotseduuride läbiviijate teadmisi, oskusi ja nende käsutuses olevaid vahendeid on kontrollitud veelgi kõrgema tasemega ning paremini varustatud taatlejate poolt. Kontrolli tulemustega on jäädud rahule ja konkreetsele taatluslaborile on antud vastav tunnistus.

Mõistagi peavad kõik teaduslikud mõõteriistad olema korrektselt taadeldud. Samas on mõõtmine koolifüüsika laboratoorsetes töodes ju vaid reaalse mõõtmise mäng, kuna laboritöodes tehtavatel mõõtmistel pole õiguslikke tagajärgi. Vastavalt pole kooli füüsikakabinetis kasutatavate mõõteriistade taatlemise nõue väga range. Selleks, et mäng oleks õpetlik, tuleb vaid täita mängu käiku mõjutavaid reegleid. Kõigi füüsikakabinettide varustuse regulaarne taatlemine läheks liiga kalliks.

Mõõteriistade taatlemise temaatikaga võib igaüks praktiliselt tutvuda, uurides oma maja või korteri veemõõtjaid või elektrienergia arvesteid. Kindlasti leiame igalt nimetatud mõõteriistalt kas **taatluskleebise** või **taatlustempli jäljendi**. Näeme ka, et elektrienergia arvestil (ehk rahvapäraselt – *voolumõõtjal*) on kõik ühenduskohad elektrijuhtmetikuga **plommitud** – ühendatavatest detailidest on läbi aetud vasktraat, mille otsad on omakorda kokku pandud pitsarit kandva tinaplokkiga. Samalaadsetel on plommitud veemõõtjate ühendusmutrid. Plommide vigastamatus tõendab, et mõõteriista ei ole kahe kontrollimise vahel omavoliliselt maha monteeritud, mõjutamaks tema näitu mahavõtjale kasulikus suunas.

Mõõteriista taatluskleebisel on ära toodud **taatluskehtivusaeg** – kuupäev, milleni vastav mõõteriist on juriidiliselt korrektselt kasutatav. Selle kuupäeva lähenemisel on soovitatav pöörduda mõõdetavat ressursi (vett, maagaasi või elektrienergiat) tarniva asutuse poole sooviga, et peagi taatluskehtivusaega ületav mõõteriist saaks asendatud äsja taadeldud mõõteriistaga. Mõistagi võib lasta taadelda sedasama mõõteriista, kuid see tähendaks veeta, gaasita või elektrita jäämist seni, kuni mõõteriist viibib taatluslaboris. Kui maja või korteri omanik mõõteriistade taatlemise nõuet ignoreerib, siis võib ressursi tarniv asutus (vee-, gaasi- või elektrifirma) talle esitada põhjendamatu

suuri arveid ja kohtulikult nõuda nende arvete tasumist, sest – taatlemata mõõteriista kasutamine on õiguslikult samaväärne mõõteriista puudumisega. Kui aga näiteks puhta vee tarbijal pole veemõõtjat, siis võib tarnefirma nõuda veetarbijalt kõigi veetrassi võimalikust lekkimisest tingitud kadude kinnimaksmist. Näiteks hakati peale Eesti taasiseseisvumist kõiki ressursse hoolikamalt mõõtma ning tarnefirmad esitasid just ülalkirjeldatud põhimõttel suuri vee- ja gaasiarveid klientidele, kes veel polnud raatsinud endale muretseda vee- või gaasimõõtjat.

Küsimusi ja ülesandeid

1. Kumb on laiem mõiste, kas *mõõtesuurus* või *füüsikaline suurus*?
2. Kumb on laiem mõiste, kas *mõõtevahend* või *mõõteriist*?
3. Tooge lisaks takistustraadile veel näiteid mõõtevahendite kohta.
4. Kas tühja, korgiga suletavat plastikpudelit saaks kasutada temperatuuri mõõtevahendina? Kuidas võiks seda teha?
5. Millised mõõteriistad peavad kindlasti olema korrektselt taadeldud?

STOP

1. Mõõtesuurus on nähtuse, keha või aine oluline omadus, mida saab kvalitatiivselt eristada ja kvantitatiivselt määrata.
2. Mõõtetulemus on mõõtmise teel saadud mõõtesuuruse väärtus.
3. Mõõtesuuruse väärtus on konkreetse suuruse arvuline määran, mida väljendatakse arväärtuse ehk mõõtarvu ja mõõtühiku korrutisena.
4. Mõõtevahend on tehniline vahend, mida kasutatakse mõõtmiseks kas üksi või koos lisaseadmetega.
5. Mõõteriist on mõõtevahend mõõtesignaali saamiseks vaatlejale vahetult tajutaval kujul.
6. Etaloniks nimetatakse mõõtühiku kokkuleppimisel kasutatavat näidist.
7. Taatlemine on protseduur, mille käigus selleks pädev asutus kontrollib mõõtevahendi vastavust kehtestatud nõuetele.

2.3. Rahvusvaheline mõõtühikute süsteem (SI)

2.3.1. Erinevad mõõtühikud ja ühikute süsteemid

Mõtisklused etalonide päritolu üle viivad meid mõõtühikute süsteemi vajalikkuse mõistmiseni. Näiteks omal ajal Inglismaal kehtestatud pikkusühik **jalg** (ingl.k. *foot*) olevat kokku lepitud briti meeste keskmisest jalalaba pikkusest lähtudes. Teise legendi kohaselt olevat see olnud Inglise kuninga Henry I (valitses 1100-1135) jalalaba pikkus. Samas me arvatahvasti nõustume sellega, et ammu surnud kuninga jalalaba pikkus või ka mingi lõpliku arvu inglaste jalalabade keskmine pikkus pole etaloniks kuigi sobiv suurus. Mõõtühikute etalonideks peavad olema looduses muutumatuna püsivad suurused. Samas pole võimalik ega ka vajalik kõikide suuruste mõõtühikute kokkuleppimiseks looduslikke näidiseid leida. Piisab, kui lepitakse kokku vaid mõned väga stabiilse etaloniga ühikud. Kõik ülejäänud saab tuletada nende kaudu. Seetõttu liigitatakse mõõtühikud põhiühikuteks ja tuletatud ühikuteks.

Põhiühikuteks nimetatakse vähast arvu üksteisest sõltumatuid mõõtühikuid, mida saab etalonide abil võimalikult täpselt määratleda. Ülejäänud suuruste mõõtühikud on **tuletatud ühikud**, mis defineeritakse põhiühikute kaudu suurustevaheliste seoste abil. Kokkulepitud põhiühikud ning neist tuletatud ülejäänud mõõtühikud moodustavad kogumi, mida nimetatakse **mõõtühikute süsteemiks**.

Juba siis, kui algelised inimesed kasutasid enda kehaosadega seotud mõõtühikuid, püüdsid nad leida ühikute vahel seoseid. Tuntumad kehaosade mõõtmetest tulenevad ühikud on järgmised:

1 toll – põidla laius;

1 vaks – väljasirutatud põidla ja väikese sõrme vaheline kaugus;

1 jalg – jalalaba pikkus;

1 küünar – käsivarre pikkus väljasirutatud sõrmeotstest kuni küünarnukini;

1 süld – laialisirutatud käte sõrmeotste vahe.

Minevikus oli kombeks arvata, et üks süld võrdub kolme küünra või kuue jalaga.

Praktiline töö: Mõõdame, kui mitu küünart, jalga või vaksa on koolilaua pikkus. Mõistagi me ei roni jalgupidi lauale vaid projekteerime laua pikkuse põrandale. Kuidas on kõige lihtsam seda teha? Võrdleme mõõtmistulemusi pinginaabri omadega. Kasutades mõõtjoonlauda või mõõdulinti, teeme kindlaks, kui mitme sentimeetriga võrdub omaenda käe järgi määratud toll, vaks ja küünar.

Üleriigilised mõõtühikute süsteemid kehtestati 17. - 19. sajandil. Kuna Eesti kuulus kuni aastani 1917 Vene tsaaririigi koosseisu, siis kehtis ka Eestis nimetatud aastani **Vene pikkusmõõtude süsteem**, mille peamised seosed olid järgmised:

1 toll = 2,54 cm;

1 küünar = 12 verssokit = 21 tolli = 53,3 cm;

1 arssin = 16 verssokit = 28 tolli = 71,7 cm;

1 süld = 3 arssinat = 2,13 m;

1 verst = 500 sülda = 1,067 km;

1 penikoorem = 7 versta = 7,468 km.

1824. aastal kehtestati kogu **Briti** impeeriumis ametlik **mõõtude süsteem** (*System of Imperial Units*), mille aluseks oli pikkusühik **jard** (*Imperial yard*, 1 yd = 0,9144 m). Sõna *yard* tähendab inglise keeles algselt aialatti, mis viib meid mõttele, et tegemist oli mingi kindla aia kõrgusega. Eks see vist jälle üks kuninga aed oli. ☺ Kolmandik jardi moodustab **jala** (*foot*, 1 ft = 30,48 cm) ja üks **toll** (*inch*) on $\frac{1}{12}$ jalga (1 in = 2,54 cm). Jardi, jala ja tolli süsteemiga puutume kokku, vaadates Ameerika filme, kuna USA-s, Inglismaal ja Austraalias kehtib imperiaalne mõõtude süsteem väikeste muudatustega argielus veel tänapäevalgi. Pikemaid vahemaid mõõdetakse näiteks miilides (1 mi = 1760 yd = 1,609 km), ruumala pintides (0,568 dm³) ja gallonites (8 pinti = 4,55 liitrit), massi naelades (0,454 kg) ja untsides ($\frac{1}{16}$ naela = 28,4 g). Olgu veel märgitud, et Inglismaal ja Austraalias kasutatakse *imperial gallon*'it (4,55 l), USA-s ja Kanadas aga nn. ameerika gallonit (3,785 l). Nimetet asjaolu teadmine võib osutada oluliseks, kui satume Põhja-Ameerikasse ja läheme oma autot tankima.

19.-20. sajandil võeti enamikus mitte-inglisekeelsetes riikides järk-järgult kasutusele meetermõõdustik. Meetermõõdustikust lähtub ka tänapäevane rahvusvaheline mõõtühikute süsteem (SI), mis aastal 1960. aastal ülemaailmseks eelissüsteemiks tunnistati. Rahvusvaheline mõõtühikute süsteem on alates 1982. aastast kohustuslik ka Eestis. Isegi ülalpool loetletud inglisekeelsetes maades kasutavad teadlased süsteemi SI, kuna teadusajakirjade toimetused ei kipu tänapäeval enam vastu võtma artikleid, mis sisaldavad teiste süsteemide ühikuid.

Rahvusvahelise mõõtühikute süsteemi loomine sai alguse revolutsiooniliselt Prantsusmaalt, kus üks aasta peale *Bastille*'i vallutamist, seega aastal 1790, tehti algust **meetri** defineerimisega (kr. k. *metron* – mõõt). Prantsuse keelest pärineb ka selle süsteemi

lühend SI (*Système International d'unités*). Ülemaailmselt kehtivaid otsuseid süsteemi SI kohta võtab vastu Kaalude ja Mõõtude Peakonverents (pr.k. *Conférence Générale des Poids et Mesures* lühendatult CGPM). Peakonverents on seni käinud Pariisis koos iga nelja kuni kuue aasta tagant. Esindatud on 52 liikmesriiki ja 26 assotsieerunud liiget. Viimane, XXIV peakonverents toimus oktoobris 2011 ja järgmist on oodata aastal 2014.

SI algseteks (1960) **põhiühikuteks** olid pikkuse ühik **meeter**, massi ühik **kilogramm**, aja ühik **sekund**, temperatuuri ühik **kelvin**, elektrivoolu tugevuse ühik **amper** ja valgustugevuse ühik **kandela**. Aastal 1971 lisati neile ka ainehulga ühik **mool**. Tegemist on detsimaalse süsteemiga, st suuremate ja väiksemate ühikute saamiseks kasutatakse kümnendeesliiteid (kümne astmetega korrutamist või jagamist), mitte enam arve 3, 12 või 16, mida võisime leida vanadest Vene ja Inglise süsteemidest.

2.3.2. Meeter, sekund ja kilogramm

On väga oluline mõista, et mõõtühikute süsteemid pidevalt arenevad. Mõõtühiku etalon, mis mingil ajal oli piisavalt hea, osutub mõõtetehnika kõrgema arengutaseme tingimustes sobimatuks ning asendatakse uuega. Seetõttu vaatleme detailselt süsteemi SI tähtsaimate ühikute **meetri**, **sekundi** ja **kilogrammi** määratluste ajaloolist arengut.

Juba aastal 1668 tehti ettepanek, et universaalse pikkusühiku etaloniks võiks võtta kergest ja venimatust nööri ja selle otsas rippuvast väikesest massiivsest kehast koosneva süsteemi ehk **matemaatilise pendli**. Kui sellise pendli omavõnkumiste poolperiood (aeg, mille jooksul pendel liigub ühest äärmisest asendist teise) on üks sekund, siis peab pendli pikkus olema ligikaudu üks meeter. Näiteks Tartus oleks sellise pendli pikkus 99,4 cm. Pendlist kui etalonist siiski loobuti, kuna kehade vaba langemise kiirendus, millest sõltub pendli võnkeperiood, on eri piirkondades erinev. Samas oli just niiviisi asutud otsima praegu tuntud meetrile lähedast pikkusühikut.

Prantsuse Teaduste Akadeemia otsustas 1790. aastal defineerida **meetri** kui ühe kümne miljondiku ($1/10\,000\,000$) Pariisi kohal mööda maapinda mõõdetud kaugusest ekvaatori ja põhjapooluse vahel. Aastatel 1792-1799 mõõdeti ära Pariisi läbiva meridiaani pikkus Dunkerque'i [dökerk] linnast Põhja-Prantsusmaal kuni Barcelonani Hispaanias. Saadud meridiaanitüki pikkuse järgi arvutati kogu veerandmeridiaani pikkus ehk kaugus poolusest ekvaatorini. Nii sai esimeseks meetri etaloniks **Maa**. Järgnevalt valmistati mitmel korral meetri **prototüüpe** ehk metallvardaid, millele graveeritud kriipsude vahe oli 1 meeter. Viimasteks sellisteks olid plaatina (90%) ja iriidiumi (10%) sulamist 1889. aastal valmistatud X-kujulise ristlõikega prototüübid, mis jagati meetermõõdustikuga ühinenud riikidele. Kõige täpsemat nendest hakati nimetama **arhiivimeetriks**. 20. sajandi keskel osutus metallvardale märgitud meeter arenenud mõõtetehnika oludes liiga ebatäpseks. Valguse lainepikkust suudeti mõõta juba palju täpsemini kui kriipsude vahet mingil vardal. Aastal 1960 defineeriti meeter pikkusena, mis on 1650763,73 korda suurem kui väärisgaas krüpton-86 aatomist kahe kindla elektronoleku vahelisel siirdel kiirguva valguse lainepikkus vaakumis.

Peagi polnud ka see meetri määratlus füüsikute jaoks enam piisavalt hea. Praegu kehtiv meetri definitsioon kehtestati Kaalude ja Mõõtude XVII Peakonverentsi otsusega 1983. aastal. **Üks meeter** (1 m) on kaasajal pikkus, mille valgus läbib vaakumis $1/299\,792\,458$ sekundiga. Seega loetakse valguse kiiruse (absoluutkiiruse) väärtust $c = 299\,792\,458$ m/s avalikes rakendustes täpseks. Arvatavasti on suurte riikide sõjalistel uurimislaboritel absoluutkiirus c teada veelgi täpsemini, kuna

kiiruse c kui elektromagnetlainete levimiskiiruse väärtusest sõltub globaalse punktiseire (GPS) süsteemide täpsus. Mõistagi on vastavad andmed aga salastatud.

Aja põhiühiku **sekund** (lad.k. *secundus* – teine, 1s) kõige algsemaks etaloniks on tõenäoliselt terve inimese südame tsükli kestus. Me ju teame hästi, et normaalne pulss on 60 südamelööki minutis ehk täpselt üks löök sekundis. Kuni aastani 1956 oli sekundi ametlikuks etaloniks **Maa** ööpäevane **pöörlemine**. Sekund oli defineeritud kui $\frac{1}{86\,400}$ ööpäevast. Kui selgus, et Maa pöörlemine väga pikkamööda, aga siiski – aeglustub, siis hakati otsima sekundi stabiilsemat etaloni. Praegu pole enam mõtet täpselt kirjeldada nende otsingute vahetulemusi. Sekundi kaasaegse definitsiooni aluseks on kõige raskema leelismetalli tseesiumi (Cs) isotoobil massiarvuga 133 töötav aatomkell. Üks sekund võrdub põhiolekus viibiva tseesium-133 aatomi kõige välimise kihi ainsa elektroni ja aatomi tuuma vastastikmõjust tingitud kiirguse 9 192 631 770 perioodiga.

Massiühik **kilogramm** (1 kg) on SI erandlik mõõtühik. Sellel pole veel looduslikku täpselt taastatavat etaloni. Kilogramm defineeriti algselt kui ühe liitri (1 dm³) puhta vee mass temperatuuril, mil vee tihedus on suurim (4 °C). Esimene kilogrammi etalon, mida praegu nimetatakse **arhiivikilogrammiks**, valmistati aastal 1799 puhtast plaatinast ning seda säilitatakse Prantsuse Riigiarhiivis. Aastal 1889 valmistati plaatina (90%) ja iriidiumi (10%) sulamist mitukümmend silindrikujulist arhiivikilogrammi koopiat, millest täpseimat säilitatakse kilogrammi rahvusvahelise prototüübina Rahvusvahelise Kaalude ja Mõõtude Büroo maa-aluses hoidlas Pariisi lähedal. Lisanditega saastumise vältimiseks asub kilogrammi etalon kolmekordse klaaskupli all puhtas õhus. Prototüüp võetakse nende kuplite alt välja vaid üks kord 40 aasta tagant, et teda võrrelda teiste arhiivikilogrammi koopiatega. Prototüübi juurde pääsemiseks läheb vaja kolme võtit, mida hoitakse kolmes eri kohas.

Niisiis on **kilogrammi rahvusvaheline prototüüp** plaatina (90%) ja iriidiumi (10%) sulamist silinder, mille kõrgus ja läbimõõt on minimaalse välispindala saavutamise eesmärgil võrdsed (39,17 mm). Algselt ei erinenud teiste koopiate massid prototüübi omast rohkem kui kahe miljardiku ($2 \cdot 10^{-9}$) kilogrammi ehk kahe mikrogrammi võrra. Viimasel koopiatega võrdlemisel selgus, et kilogrammi prototüübi mass on koopiate massidest väiksem ning erinevus ületab tunduvalt kahte miljardikku. Kaasajal arvab üha suurem osa füüsikutest-metrooloogidest, et kilogramm tuleb määratleda kui ühe kindla sagedusega elektromagnetvälja kvandi (välja vähima osakese) mass, kasutades energia ja massi relativistlikku samaväärsusseost $E = mc^2$ (p.4.5.5). See tähendaks, et kilogrammi definitsioon hakkab toetuma tseesiumkella kui etaloni töösagedusele 9 192 631 770 Hz ning Plancki konstandi arväärtusele. Plancki konstant h , millega me lähemalt tutvume *Elektromagnetismi* kursuses, on võrdeteguriks kvandi sageduse f ja energia $E = hf$ vahel.

2.3.3. Kelvin, amper, kandela ja mool

Temperatuuri põhiühik **kelvin** (1 K) on saanud oma nime iiri päritoluga briti füüsiku William Thomsoni ehk lord Kelvini järgi. Juba põhikoolis õppisime seda, kuidas rootsi füüsik ja astronoom Anders Celsius (1701-1744) pani aastal 1742 ette jagada normaalrõhul (760 mmHg $\approx 10^5$ Pa) määratava vee keemistemperatuuri ja jää sulamistemperatuuri vahe saajaks temperatuuriühikuks. Seda ühikut hakati nimetama **Celsiuse kraadiks** (°C). Niisiis on Celsiuse skaala järgi jää sulamistemperatuuriks

0 °C ja vee keemistemperatuuriks normaalrõhul 100 °C, ehkki Celsius ise oli skaala suuna algselt määratlenud vastupidiselt (mõõtmaks külma, mitte sooja).

19. sajandil tehti kindlaks, et keha soojusastet näitav füüsikaline suurus temperatuur on aine osakeste kaootilise liikumise keskmise energia mõõduks. Järelikult on temperatuuril olemas loomulik **absoluutne nullpunkt** – temperatuur, mille juures osakeste kaootiline liikumine täielikult peatub. See ongi Kelvini ehk **absoluutse** või **termodünaamilise** temperatuuriskaala nullpunktiks. Temperatuuriühiku pikkus on Celsiuse ja Kelvini skaalades ühesugune ($1 \text{ K} = 1 \text{ }^\circ\text{C}$), erineb vaid nullpunkt.

Kui otsustati kasutada Celsiuse ja Kelvini skaalades sama kraadi pikkust, siis lähtuti absoluutse nulltemperatuuri väärtusest $0 \text{ K} = -273,15 \text{ }^\circ\text{C}$. Vastavalt on vee **kolmikpunkti** temperatuur siis 273,15 kelvinit. See on temperatuur, millel jää sulab ning vesi esineb korraga kõigis kolmes aine olekus: tahkes (jää), vedelas (vesi) ja gaasilises (veeaur). Hilisemad täppismõõtmised näitasid, et jää sulamistemperatuur on siiski 273,16 K. Nüüd lepiti sellega, et skaalade nullpunktide vahe on 273,15 kraadi (K või $^\circ\text{C}$), vee kolmikpunkti temperatuur on aga $0,01 \text{ }^\circ\text{C} = 273,16 \text{ K}$. Olgu veel märgitud, et kuni aastani 1968 nimetati vaadeldavat temperatuuriühikut Kelvini kraadiks ($^\circ\text{K}$), analoogiliselt Celsiuse kraadiga ($^\circ\text{C}$). Võtame kokku: SI põhiühik **kelvin** (1 K) on $\frac{1}{273,16}$ vee kolmikpunkti termodünaamilisest temperatuurist.

Elektromagnetnähtuste kirjeldamisel kasutatakse SI põhiühikuks on volutugevuse ühik **amper** (1 A), mis on saanud oma nime volude magnetilise toime põhiseaduse avastaja, prantsuse füüsiku André Marie Ampère'i [ampäär] (1775-1836) järgi. Amper defineeriti algselt meie poolt põhikoolis õpitud elektrivoolu keemilise toime põhjal kui sellise muutumatu voolu tugevus, mille läbijuhtimisel hõbenitraadi lahusest toimub ühe sekundi jooksul 1,1180 mg hõbeda eraldumine negatiivsel elektroodil. Tänapäeval on ampri definitsiooni aluseks siiski elektrivoolu magnetiline toime. **Üks amper** on sellise muutumatu elektrivoolu tugevus, mis läbides kahte lõpmatult pikka ja paralleelset, teineteisest vaakumis ühe meetri kaugusel asetsevat kaduvväikese ringikujulise ristlõikega sirgjuhet tekitab nende juhtmete vahel iga meetripikkuse lõigu kohta jõu $2 \cdot 10^{-7}$ njuutonit.

Lõpmata pikki juhtmeid tegelikkuses mõistagi olemas ei ole. Seetõttu loetakse ampri etalonkatse teostatuks seda paremini, mida suurem on juhtmete vahekaugus võrreldes nende läbimõõduga ning mida pikemad on omakorda juhtmed võrreldes nende vahekaugusega. Tasub rõhutada, et ampri definitsiooni ülaltoodud sõnastuses varitseb väärtõlgenduse oht. Nimelt kipuvad paljud arvama, et jõuga $2 \cdot 10^{-7} \text{ N}$ mõjutab ühe juhtme meetripikkune lõik teise juhtme meetripikkust lõiku. Nii see ei ole. Nimetatud jõuga mõjutab terve esimene, teoreetiliselt lõpmata pikk juhe teise, esimesest 1 m kaugusel paikneva juhtme 1 m pikkust lõiku. Kuna ampri etalonkatse korrektne realiseerimine on tehniliselt üpris keerukas, siis peavad füüsikud-metrooloogid plaane ka ampri definitsiooni muutmiseks. Suure tõenäosusega teeb seda aastal 2014 toimuv XXV Kaalude ja Mõõtude Peakonverents. Amper kavatakse määratleda meile põhikooli *Elektriõpetusest* tuntud volutugevuse definitsiooni abil kui üks kulon ühes sekundis. Elektrilaengu ühik kulon määratletakse siis kui teatud kindel arv elementaarlaenguid.

Valgustugevuse mõõtühikut **kandela** (1 cd , lad.k. *candela* - küünal) vajab SI valgusmõõtmiste ehk fotomeetriste mõõtmiste põhiühikuna. Nagu ütleb juba selle ühiku nimetus, on algselt tegemist keskmise küünalaleegi valgustugevusega. **Üks kandela** on

niisuguse monokromaatse valgusallika valgustugevus, mis sagedusel $540 \cdot 10^{12}$ Hz kiirgab ühes kindlas sihis ruuminurka 1 steradiaan valguslaineid koguvõimsusega $\frac{1}{683}$ vatti. Kandela definitsiooni on siin pisut modifitseeritud suurema arusaadavuse suunas võrreldes tüüpilise teatmeteostes esineva variandiga, kuid mõte on täielikult sama.

Sõna *monokromaatne* tähendab ühte kindlat värvi, ühe kindla võnkesagedusega valgust. Sagedusel $540 \cdot 10^{12}$ Hz ehk 540 terahertsi paikneb elektromagnetlainete skaalal normaalsele päeva valgusele kohastunud inimsilma tundlikkuse maksimum. Kõnealuse valguse lainepikkus vaakumis on 556 nm, tegemist on kollase valgusega. Möödamannes olgu märgitud, et samal lainepikkusel paikneb Päikese pideva spektri maksimum maapealse vaatleja jaoks. Just seetõttu näemegi keskpäeval Päikest kollasena, et Päikese spektris domineerib kandela definitsioonis nimetatud kollane valgus sagedusega 540 THz, mille registreerimiseks inimese silm on samas ka kõige paremini kohastunud. *Ruuminurgast* ja tema ühikust *steradiaan* tuleb otsekohe allpool juttu. Murdarv $\frac{1}{683}$ kandela definitsioonis väljendab fakti, et inimsilma tundlikkuse maksimumis saame valgusallika poolt ühe steradiaani suurusesse ruuminurka kiiratud valguslainete võimsuse iga vati kohta 683 kandela suuruse valgustugevuse, väljaspool tundlikkuse maksimumi aga vähem. Kui kasutaksime allikat, mis üldse ei kiirga spektri nähtavas osas, siis ei saaks me ühest vatist kiirgusvõimsusest steradiaani kohta mitte ühtegi kandelat. Seega kirjeldab füüsikaline suurus valgustugevus ainult nähtavat valgust. Peaks ka olema selge, et kandela etaloni tehniliseks realiseerimiseks on vaja sagedusel 540 THz töötavat, täpselt mõõdetava valgusvõimsusega laserit. Ainult laserivalgus on vajalikul määral monokromaatne.

Aastal 1971 võeti seitsmenda põhiühikuna rahvusvahelisse mõõtühikute süsteemi **aine hulga** ühik mool. **Üks mool** (1 mol) on aine hulk, mis sisaldab niisama palju eristamatuid struktuurseid ühikuid (aatomeid, molekule jne), kui on aatomeid 0,012 kilogrammis süsiniku isotoobis massiarvuga 12. Kõnealune arv on teadagi Avogadro arv, mille väärtuseks oleme koolifüüsikas harjunud lugema $6,02 \cdot 10^{23}$ osakest moolis ehk mol^{-1} . Moolides väljendatud aine hulga ehk moolide arvu leidmiseks tuleb aine mass m jagada vaadeldava aine molaarmassiga M . Loomulikult peavad mõlemad massid olema esitatud samades massiühikutes (molaarmassil – mooli kohta).

Mooli definitsioon põhjustab pahatihti lahkarvamusi füüsikute ja keemikute vahel. Paljud keemikud on seisukohal, et mool ja Avogadro arv on üks ja seesama asi. Need, kes nii väidavad, ei tähtsusta fakti, et tegemist on kahe erineva füüsikalise suurusega. On olemas füüsikaline suurus *aine hulk* ja tema ühik *mool*. Hoopis teised suurused näitavad aga aine osakeste arvu aine mingis koguses, milleks võib olla ühikulise *massiga* kogus, ühikulise *ruumalaga* kogus aga võib olla ka ühikuline *aine hulk*. Vastavate suuruste SI ühikud on $1/\text{kg}$ ehk kg^{-1} , $1/\text{m}^3$ ehk m^{-3} ja $1/\text{mol}$ ehk mol^{-1} . Avogadro arv on füüsiku jaoks mitte mool ise vaid osakeste arv ühikulise hulga aine koguses – ühes moolis. Avogadro arv on omaette füüsikaline suurus, mille väärtus aga juhtumisi on konstantne.

Vajadus määratleda valgustugevuse ühikut kandela, kasutades seejuures ruuminurga mõistet, tingib kahe **lisaühiku** defineerimise lisaks SI seitsmele põhiühikule. Need on tasanurga ühik radiaan ja ruuminurga ühik steradiaan. Paljude jaoks on nad rohkem matemaatika kui füüsika mõõtühikud. See, kummaks neid pidada, sõltub konkreetse inimese vastusest küsimusele *Kas on olemas loodusest sõltumatut matemaatikat?* Paljud matemaatikud tahaksid vastata jaatavalt, end loodusteadlasena teadvustava

füüsiku vastus on aga eitav. **Nurk** on mõiste, millega looduses kirjeldatakse kahe sihi erinevust (sellest pikemalt p.3.3.2). Matemaatik ütleks: nurk jääb kahe samast punktist väljuva kiire vahele. Kui need kiired väljuvad mingist tasandil paikneva ringjoone keskpunktist, siis eraldavad nad ringjoonest välja mingi pikkusega tüki ehk ringjoone **kaare**. Tasandil moodustuvat nurka nimetatakse **tasanurgaks**. Üks **radiaan** (1 rad) on tasanurk, mille korral nurga tippu ümbritseva ringjoone kaare pikkus võrdub selle ringjoone raadiusega ($s = r$).

Ruumis moodustuvat nurka nimetatakse **ruuminurgaks**. Ruuminurk tekib siis, kui mingist punktist väljuvat kiirt ruumis nihutada, tulles lõpuks alguspunkti tagasi. Kiire asend ei tohi vahepeal ühtida mitte ühegi juba läbitud asendiga. Kiire lõikepunkt kiire alguspunkti ümber paikneva sfääri pinnaga liigub sellisel juhul mööda kinnist joont, mis eraldab sfääri pinnast välja mingi kindla pindalaga pinnatüki. Prožektor sarnaneb prožektorikiire liigutamise pilvises öises taevas, kus prožektori asendi muutmise tagajärjel liigub prožektori valguse osalise pilvedelt tagasipeegeldumise tõttu nähtav laik. **Ruuminurk** eraldab välja tüki sfääri pinnast samamoodi nagu tasanurk eraldab välja tüki ringjoonest tasandil. Üks **steradian** (1 sr) on ruuminurk, mille korral nurga tippu ümbritseva sfääri vastava osa pindala võrdub raadiuse ruuduga ($S = r^2$).

Võtame nüüd alljärgnevas tabelis kokku SI seitse põhisuurust ja põhiühikut.

Suurus	Mõõtühik	Tähis	Hetkel kehtiv etalon
Pikkus	meeter	1 m	Valguse poolt $1/299\,792\,458$ sekundi jooksul vaakumis läbitav vahemaa
Aeg	sekund	1 s	Tseesiumi ^{133}Cs aatomi väliskihi elektroni ja aatomi tuuma vastastikmõjust tingitud kiirguse 9 192 631 770 võnkeperioodi
Mass	kilogramm	1 kg	Plaatina (90%) ja iriidiumi (10%) sulamist valmistatud silindrikujuline keha, mille kõrgus ja läbimõõt on võrdsed (39,17 mm).
Temperatuur	kelvin	1 K	$1/273,16$ vee kolmikpunkti temperatuuri ja absoluutse nulltemperatuuri vahest. Kolmikpunktis ehk jää sulamistemperatuuril on vesi korraga vedel, tahke ja gaasiline.
Voolutugevus	amper	1 A	Voolutugevus, mille läbiminekul kahest paralleelsest väga pikast ($l \gg 1$ m) ja väga peenikesest ($d \ll 1$ m) sirgjuhtmet vahekaugusega 1 m mõjutab üks juhe teise juhtme 1 m pikkust lõiku jõuga 2×10^{-7} N.
Valgustugevus	kandela	1 cd	Valgusallikas, mis kiirgab sagedust 540×10^{12} Hz omava valguslaine võimsusega $1/683$ vatti ruuminurka 1 steradian.
Ainehulk	mool	1 mol	Ainehulk, milles sisalduvate eristamatute struktuuriühikute arv võrdub aatomite arvuga 12 grammis puhtas süsinikus ^{12}C

Põhiühikutele lisaks on defineeritud veel kaks lisaühikut, millel pole etaloni:

Suurus	Mõõtühik	Tähis	Definitsioon
Tasanurk	radiaan	1 rad	Tasanurk, mille korral nurga tippu ümbritseva ringjoone kaare pikkus võrdub raadiusega ($s = r$).
Ruuminurk	steradiaan	1 sr	Ruuminurk, mille korral nurga tippu ümbritseva sfääri osa pindala võrdub raadiuse ruuduga ($S = r^2$).

Arusaamatuste vältimiseks tohib üheskoos kasutada vaid ühe ja sama mõõtühikute süsteemi ühikuid. Siiski on lubatud SI ühikute kõrval kasutada ka selliseid tavaelus juurdunud mittesüsteemseid ühikuid nagu massiühik tonn, ajaühikud ööpäev, tund ja minut, tasanurgaühik kraad, pindalaühik hektar, mahuühik liiter ning energiaühikud elektronvolt ja kilovatt-tund. Teadustöös ja kooliülesannete lahendamisel tuleb aga mittesüsteemsed ühikud kindlasti SI ühikuteks teisendada. Meenutagem, et Mõõteseadus ütleb: „...rahvusvahelise mõõtühikute süsteemi kasutamine on Eestis kohustuslik majandustegevuses, rahvatervise ja avaliku ohutuse valdkonnas, haldus- ja **õppetegevuses**.“

2.3.4. Mõõtühikute teisendamine

Rahvusvaheline mõõtühikute süsteem (SI) on detsimaalne süsteem. Mõõtühikute endiga võrreldes ebamugavalt suurte või väikeste mõõtesuuruse väärtuste väljakirjutamisel kasutatakse **kümnendeesliiteid**. Mõõtühikute kümnend- ehk detsimaalesliited on tähised, mille abil lihtsustatakse ühikute üleskirjutamist kümnendsüsteemis.

SUURENDAVAD EESLIITED			VÄHENDAVALD EESLIITED		
Tähis	Nimetus	Suurusjärk	Tähis	Nimetus	Suurusjärk
T	tera-	$10^{12} = 1\,000\,000\,000\,000$	d	detsi-	$10^{-1} = 0,1$
G	giga-	$10^9 = 1\,000\,000\,000$	c	senti-	$10^{-2} = 0,01$
M	mega-	$10^6 = 1\,000\,000$	m	milli-	$10^{-3} = 0,001$
k	kilo-	$10^3 = 1000$	μ	mikro-	$10^{-6} = 0,000\,001$
h	hekto-	$10^2 = 100$	n	nano-	$10^{-9} = 0,000\,000\,001$
da	deka-	$10^1 = 10$	p	piko-	$10^{-12} = 0,000\,000\,000\,001$

Eesliite kasutamine tähendab sellele vastava arvuga korrutamist:

$$24 \text{ km} = 24 \times 1000 \text{ m} = 24\,000 \text{ m}$$

$$500 \mu\text{s} = 500 \times 0,000\,001 \text{ s} = 0,0005 \text{ s}$$

Kui mõõtühik sisaldab astendajaid, tuleb vastavasse astmesse võtta ka eesliide:

$$2000 \text{ cm}^2 = 2000 \times (10^{-2} \times \text{m})^2 = 2000 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 0,2 \text{ m}^2$$

$$2,7 \text{ g/cm}^3 = 0,0027 \text{ kg}/(10^{-2} \times \text{m})^3 = 0,0027 \text{ kg}/(10^{-6} \text{ m}^3) = 2700 \text{ kg/m}^3$$

Nagu ülalpool öeldud, tohib igapäevaelus kasutada ka mõningaid mõõtühikuid, mis ei kuulu rahvusvahelisse süsteemi.

Nendeks on:

Ühik	Tähis ja väärtus SI-s
------	-----------------------

tund	1 h = 3600 s
minut	1 min = 60 s
hektar	1 ha = 10 000 m ²
liiter	1 l = 0,001 m ³
kilomeetrit tunnis	1 km/h = (1/3,6) m/s
kilovatt-tund	1 kWh = 3 600 000 J

Mittesüsteemsetes ühikutes väljendatud suurusi on kõige lihtsam SI-sse teisendada, asendades kõik neis sisalduvad eesliited ja ühikud vastavate SI väärtustega ja siis arvutada tulemus kokku. Näiteks:

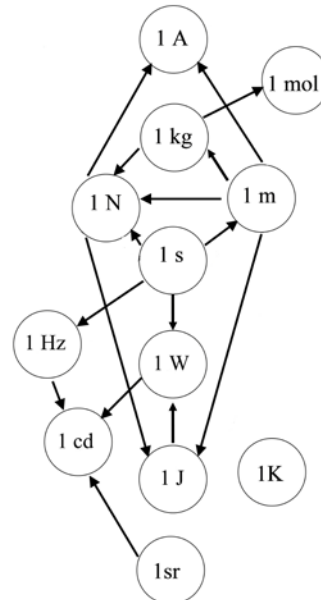
$$72 \text{ km/h} = 72 \times 1000 \text{ m} / 3600 \text{ s} = 72\,000 \text{ m} / 3600 \text{ s} = 20 \text{ m/s};$$

$$47 \text{ kWh} = 47 \times 1000 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 169\,200\,000 \text{ J} = 1,692 \cdot 10^8 \text{ J} = 169,2 \text{ MJ};$$

$$15 \text{ mg/l} = 15 \times 10^{-3} \times 10^{-3} \text{ kg} / 10^{-3} \text{ m}^3 = 15 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3 = 0,015 \text{ kg/m}^3.$$

Seoseid SI põhiühikute ja mõningate tuletatud ühikute vahel väljendab parempoolsel joonisel (J.2.1) toodud skeem. Milline on selle skeemi kohaselt SI üleüldse kõige tähtsam ühik?

Lõpetuseks märgime, et alates aastast 1968 kehtiva kokkuleppe kohaselt kirjutatakse teadlaste nimedest tuletatud mõõtühikute nimetused väikese algustähega, kuid nende mõõtühikute tähised suure tähega. Näiteks kelvin (1 K), amper (1 A), njuuton (1 N), džaul (1 J) ja vatt (1 W). Näeme ka, et mõõtühikute nimetusi on lubatud esitada eesti keelele mugandatud kujul (amper, njuuton, džaul ja vatt), ehkki vastavate teadlaste endi nimesid kirjutame originaalkeele reeglite järgi (Ampère, Newton, Joule, Watt).



Küsimusi ja ülesandeid

1. Miks säilitatakse kilogrammi rahvusvahelist prototüüpi õhus aga mitte vaakumis? Hea vaakum võiks ju olla veelgi puhtam kui õhk.
2. Mis võiks olla selle põhjuseks, et kilogrammi etaloni originaali ja koopiate masside erinevus suurenes?
3. Miks on ajaühiku *sekund* nimetuseks valitud sõna (*secundus*), mis ladina keeles tähendab *teine*? Mis on siis *esimene*?
4. Kui suur on maksimaalne võimalik ruuminurk?

STOP

1. Mõõtühikute süsteem on kogum, mille moodustavad kokku lepitud põhiühikud ning neist tuletatud ülejäänud mõõtühikud.

2. SI põhisuurused on pikkus, aeg, mass, temperatuur, elektrivoolu tugevus, valgustugevus ja aine hulk.
3. SI põhiühikud on vastavalt meeter (1 m), sekund (1 s), kilogramm (1 kg), kelvin (1 K), amper (1 A), kandela (1 cd) ja mool (1 mol).

2.4. Mõõtmise täpsus

2.4.1. Mõõtmise täpsuspiirid ja mõõte määramatus

Mõõtmine on teatavasti mingi füüsilise suuruse konkreetse väärtuse võrdlemine sama suuruse teise, mõõtühikuks võetud väärtusega (p.2.1.3). Võrdlemise protseduur toimub aga alati olukorras, kus mõjuvad erinevad välised tegurid. Mõned neist välistest mõjuteguritest võivad olla **juhusliku** iseloomuga ja mõned **süsteematilised** ehk mõõte väärtust kindlas suunas mõjutavad. Kui me näiteks soovime mõõta, kui kõrgele üles põrkab tagasi mingilt kindlalt kõrguselt vertikaalselt kukkuma lastud lauatennisepall, siis sõltub mõõtetulemus kindlasti sellest, millise osaga pall vastu horisontaalset jääka aluspinda põrkab. Pingpongipallid valmistatakse reeglina kahe plastikust poolsfääri kokkusulutamise teel, Pallikesta omadused liitekohas ja väljaspool seda on kindlasti erinevad. Me ei suuda prognoosida palli asendit pörkehelkel, mistõttu see asend on mõõte väärtuse **juhuslik** mõjur.

Vertikaalselt mõõtjoonlaualt palli kõige ülemise asendi kõrgust lugev katsetaja peab lugemi fikseerimisel vaatama joonlauda horisontaalselt ehk risti joonlaua endaga. Selleks peab lugemist võttev katsetaja kas kummardudes või mingile täiendavale alusele ronides muutma oma pea asukohta. Kui ta seda ei tee ning vaatab joonlauda kogu aeg näiteks kõrgemalt kui vaja, siis ta fikseerib tõusu kõrguse lugemi, mis on tegelikust väärtusest **süsteematiselt** veidi väiksem. Kasutades veidi etteruttavalt mõõtevea mõistet (vt allpool) olgu märgitud, et mõõteveaga, mis tekib juhul, kui mõõtja vaatesuund ei ole risti kasutatava skaalaga, nimetatakse **parallaktiliseks** mõõteveaks.

Üks mõõtmiste täpsust piirav tegur on **mõõtühiku** enda **pikkus**. Kui me kasutame lauatennisepalli tagasipõrke kõrguse määramisel mõõtjoonlauda, millele on kantud kriipsud iga sentimeetri tagant, siis on mõõtühikuks 1 cm. Sentimeetri murdosi me mõõte väärtuses enam usaldusväärset kajastada ei suuda – seda enam, et palli ülemist asendit saame me ju vaadelda vaid hetkeliselt. Me peame otsustama, milline täisarv sentimeetreid on konkreetsel juhul kõige tõenäolisem mõõtarv. Võib küll üritada kasutada väiksemaid mõõtühikuid, aga meil pole ikkagi pääsu mõõtühiku lõplikust pikkusest. Lisaks võivad paljud mõõtmiste täpsust piiravad tegurid olla meile ka täiesti tundmatud.

Kõik seda arvestades oleme sunnitud nentima, et absoluutselt täpne mõõtmine pole põhimõtteliselt võimalik. Erandiks on siin vaid juhud, kui mõõtmine seisneb mingi täisarvu määramises. See võib olla näiteks pendli võngete arv või mingisse kindlasse vahemikku langevate mõõtmistulemuste arv. Järelikult on üldjuhul väga oluline lisaks mõõte väärtuse saamisele hinnata ka mõõtmise täpsust. Tuletagem meelde eespool (p.2.2.1) toodud näidet, kus koolilaua pikkuseks saadi *viis ja pool õpiku pikkust* ning sellise tulemuse lugejal tekkisid küsimused: Kas *viis ja pool* tähendab täpselt 5,5? Või on see mingi väärtus 5,4 ja 5,6 vahel? Või hoopis 5 ja 6 vahel? Korrektnes mõõtetulemus peaks sisaldama endas juba vastust neile küsimustele.

Tähistame mingi konkreetse suuruse (näiteks *koolilaua pikkuse*) mõõtmisel saadud **mõõteväärtuse** tähega x . Kuna absoluutselt täpne mõõtmine pole põhimõtteliselt võimalik, siis see väärtus üpris kindlasti erineb mõõtesuuruse **tõelisest väärtusest** x_0 . Mõõteväärtuse ja suuruse tõelise väärtuse vahet nimetatakse **mõõteveaks**. Suuruse x mõõteviga tähistatakse enamasti sümboliga Δx (loe: väike delta x):

$$\Delta x = x - x_0. \quad (2.1)$$

Mida väiksem on mõõteviga, seda täpsema mõõtmisega on tegemist. Paraku me ei tea ega saagi kunagi teada mõõdetava pidevsuuruse tõelist väärtust x_0 . Seetõttu ei saa me ka kunagi teada konkreetset mõõtmisel tehtavat mõõteviga Δx .

Mõõteviga on vähemasti osaliselt juhuslik suurus. Iga järgmise mõõtmise tulemus võib eelmisest veidi erineda. Seega kaasneb mõõtmisega alati teatav teadmatuse ehk **määramatus**. Mõõtesuuruse tõeline väärtus ja konkreetne mõõteviga jäävad meile küll teadmatuks, kuid me saame mingi tõenäosusega hinnata, milline on kõige suurem võimalik mõõteviga. Me saame anda tõenäosusliku hinnangu väärtuste vahemiku kohta, milles mõõtesuuruse tõeline väärtus asub. Seda mõõtesuuruse väärtuste vahemikku, millesse suuruse tõeline väärtus piisavalt suure tõenäosusega jääb, kirjeldab mõõtemääramatus.

(Peil 2.5. – pilt, millel on näidatud mõõtetulemus, mõõteviga ja mõõtemääramatus)

Suuruse x **mõõtemääramatus** $u(x)$ (ingl.k. *uncertainty* – määramatus) on suurus, mis kuulub mõõtetulemuse juurde ja iseloomustab tõenäosuslikult mõõtesuuruse võimalike väärtuste vahemikku. Mõõtemääramatusel on mitmeid tähistusviise. Neist kahele: $u(x)$ ja $U(x)$ – on väga kindlad tähendused, millest tuleb juttu allpool. Kui räägitakse mõõtemääramatusest kõige üldisemas tähenduses, siis kasutatakse tähist Δx (loe: delta x). Niisiis, mõõtemääramatus Δx on mõõtevea Δx suurim väärtus. Mõõtetulemus x ei tohiks mõõtesuuruse tõelisest väärtusest x_0 erineda rohkem kui mõõtemääramatuse Δx võrra. See tähendab, et suuruse tõeline väärtus x_0 jääb väärtuste $x - \Delta x$ ja $x + \Delta x$ vahele. Matemaatiliselt väljendab seda võrratus

$$x - \Delta x < x_0 < x + \Delta x. \quad (2.2)$$

Paraku pidime eelmises lõigus kasutama tingivat kõneviisi (*ei tohiks*). Nimelt ei ole mitte ükski tõenäosuslik väide ju kunagi saajaprotsendilisel kindel. Tõenäosust selleks, et mitte ükski mõõteviga ei ületa konkreetset mõõtemääramatuse väärtust, nimetatakse mõõtemääramatuse usaldatavuseks või ka **usaldusnivooks**. Kui me soovime, et mõõtemääramatusega antav suurima mõõtevea hinnang oleks kindlasti tõene (et usaldatavus oleks 100%), siis peame kasutama väga suurt Δx väärtust. Siis aga muutuks mõõtetulemus ise üpris mõttetuks. Näiteks pole ju kuigi palju kasu teadmisest, et konkreetse koolilaua pikkus jääb ühe ja üheksa õpiku-pikkuse vahele. On ilmne, et mõõtjal tuleb leida mõistlik kompromiss kahe vastandliku soovi vahel: tõsta usaldatavust ja vähendada mõõtemääramatust. Mõõtemääramatus esitatakse tavaliselt usaldatavusega 95%. Korrektne mõõtetulemus pannakse kirja koos mõõtemääramatusega kujul $(x \pm \Delta x) \times$ **mõõtühik**, kusjuures mõõteväärtuse x ja mõõtemääramatuse Δx mõõtühikud esitatakse sama arvu kümnendkohtadega peale koma. Näiteks on korrektne pliiaatsi pikkuse l mõõtmise tulemus esitatav kujul

$$l = (14,2 \pm 0,3) \text{ cm} \quad \text{või} \quad l = (142 \pm 3) \text{ mm}.$$

See tähendab, et konkreetse pliiaatsi tõeline pikkus jääb 139 mm ja 145 mm vahele tõenäosusega (usaldatavusega) 95%. Kui tegemist on mingi muu usaldatavusega, siis peab selle mõõtetulemuse taga eraldi ära märkima.

Tuleb arvestada, et mõõtesuuruse tõeline väärtus on puhtalt meie kujutlusvõime looming või abikujutus mõõtemääramatuse mõttekujundi tekitamiseks. Kogu reaalsel infot, mida me omame mõõdetava konkreetse füüsilise suuruse (nt *pliiaatsi pikkuse*) kohta, sisaldavad mõõteväärtus, mõõtemääramatus ja usaldatavus. Nad kirjeldavad kolmekesi täielikult looduses tõepoolest eksisteerivat, katselist kinnitust leidvat osa meie kui vaatlejate kujutlusest nimega *selle konkreetse pliiaatsi pikkus*.

Rõhutame veel, et mõõtemääramatus on:

- kahe mistahes võimaliku mõõteväärtuse võimaliku erinevuse kirjeldaja;
- mõõtesuuruse väärtuste piirkond, mille sees iga väärtus on vastuvõetav kui mõõteväärtus, kui lähendus tõelisele väärtusele, sest „täpsemalt me ju ei tea“;
- hinnang olemasoleva info alusel; kui me saame uut infot siis võib muutuda ka mõõtemääramatus.

Mõõtemääramatus iseloomustab mõõtetulemust, mitte mõõtevahendit.

Niisiis kaasneb iga füüsilise pidevsuuruse mõõtmisega alati mõõtemääramatus. Olgu möödaminnes märgitud, et **pidevaks** füüsiliseks suuruseks nimetame suurust, mille mistahes kahe väärtuse vahel võime kujutada veel ühte väärtust. Kui me ei tea, kui suur on mõõtemääramatus, siis ei ole pidevsuuruse mõõtetulemusega õigupoolest mitte midagi mõistlikku peale hakata.

Oletagem näiteks, et me kontrollime katseliselt hüpoteesi, mille kohaselt kaks tundmatut vedelikku on ühesuguse tihedusega. Meil on kasutada kindla ruumalaga mõõduklaas ja kaalud. Me määrame kaalumise teel kummagi vedeliku kindla ruumalaga koguse massi ja arvutame tihedused, jagades massi vastava ruumalaga. Me saame nii kaudmõõtmise teel kaks tiheduse mõõteväärtust, näiteks $0,84 \text{ g/cm}^3$ ja $0,89 \text{ g/cm}^3$, mis küll palju ei erine, kuid mis siiski täpselt kokku ei lange. Kasutamata mõõtemääramatuse mõistet, peaksime nüüd tunnistama hüpoteesi vääraks. Kui me aga oleme piisava usaldatavusega (näiteks 95%) leidnud kummagi vedeliku tiheduse mõõtemääramatused ning kirjutame nüüd korrektsed mõõtetulemused välja kujul $(0,84 \pm 0,7) \text{ g/cm}^3$ ja $(0,89 \pm 0,7) \text{ g/cm}^3$, siis näeme, et esimese vedeliku tiheduse ülempiir $0,91 \text{ g/cm}^3$ on suurem, kui teise vedeliku tiheduse alampiiir $0,82 \text{ g/cm}^3$. Teisisõnu, kummagi vedeliku tiheduse võimalikud väärtused omavad vahemikus $0,82 \text{ g/cm}^3$ kuni $0,91 \text{ g/cm}^3$ – ulatuslikku ühisosa. Seega võivad kummagi vedeliku tiheduse tõelised väärtused selles vahemikus paikneda ja kokku langeda. Hüpotees tuleb tunnistada katseliselt tõestatuks. Põhimõtteliselt võib koguni olla tegemist ühe ja sama vedelikuga.

2.4.2. A- ja B-tüüpi hinnangud mõõtemääramatusele

Nüüd peaks olema selge, miks usaldatav mõõtetulemus tuleb alati esitada koos mõõtemääramatusega. Mõõtemääramatuse hindamiseks on erinevaid meetodeid, kuid üldjoontes eksisteerib kaks põhilist hinnangu tüüpi. Need on **A-tüüpi** ja **B-tüüpi hinnangud**, mida sageli nimetatakse ka A-tüüpi ja B-tüüpi mõõtemääramatusteks. Tuleb rõhutada, et viimane nimetusviis on veidi eksitav, sest mõõtemääramatus on olemuslikult terviklik, erinevad vaid tema hindamise meetodid. A-tüüpi ja B-tüüpi hinnangud on nagu kaks tasapinnalist või kahemõõtmelist kujutist ühtsest kolmemõõtmelisest objektist nimega mõõtemääramatus. Suutmata kolmemõõtmelist

objekti kohe tervikuna hoomata, teeme objektist kahemõõtmelisi fotosid ja püüame nende põhjal saada ettekujutust tervikust. Analooiliselt konstrueerime A-tüüpi ja B-tüüpi mõõtemääramatuste põhjal **kogumääramatuse**.

Kui me kordusmõõtmisi tehes saame kogu aeg veidi erinevaid tulemusi, nii et iga konkreetne mõõteväärtus varem saadutega üldjuhul kokku ei lange, siis peame andma mõõtemääramatusele **A-tüüpi** hinnangu. A-tüüpi mõõtemääramatus on põhjustatud juhuslikest mõjuritest ja see leitakse kordusmõõtmiste tulemustest matemaatilise statistika meetoditega. A-tüüpi määramatust saab mõõtmiste arvu suurendamise ga vähendada.

Järgnevalt vaatleme A-tüüpi mõõtemääramatuse hindamisel kasutatavaid matemaatilise statistika valemeid, mille peast teadmine ja isegi rakendamise oskus käesoleva kursuse läbimiseks vajalikud ei ole, kuna kõik kirjeldatud tehted sooritab tänapäeval arvuti. Kui me oleme saanud konkreetsele mõõtesuurusele kokku n üldjuhul erinevat üksikut mõõteväärtust ehk **mõõdist** $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, siis on parimaks lähenduseks suuruse tõelisele väärtusele mõõdiste **aritmeetiline keskmine** ehk **keskväärtus**. Selle saamiseks liidame mõõdistid kokku ning jagame läbi mõõtmiste arvuga n

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_i x_i. \quad (2.3)$$

Mõõdiste hajumist keskväärtuse ümber iseloomustatakse **dispersiooniga** $D(x)$, mille me saame, töödeldes mõõdiste x_i erinevusi keskväärtusest ehk vahesid $(\bar{x} - x_i)$.

Samas võivad need vahed olla nii positiivsed kui ka negatiivsed, sõltuvalt sellest, kas üksik mõõteväärtus on keskväärtusest väiksem või suurem. Kui me liidaksime lihtsalt vahesid, siis hakkaksid nad vastastikku kompenseeruma ja summa ei sisaldaks enam infot tulemuste hajuvuse kohta. Seetõttu peame liitma vahede ruutusid, mis on alati positiivsed. Saadud summat me ei jaga enam mõõteväärtuste arvuga n vaid sellest ühe võrra väiksema arvuga $n - 1$, sest teades keskväärtust ning kõiki üksiktulemusi peale ühe, on võimalik puuduv viimane tulemus välja arvutada. Info tema kohta sisaldub keskväärtuses. Ühtekokku saame dispersiooni valemi

$$D(x) = \frac{1}{n-1} \sum_i (\bar{x} - x_i)^2. \quad (2.4)$$

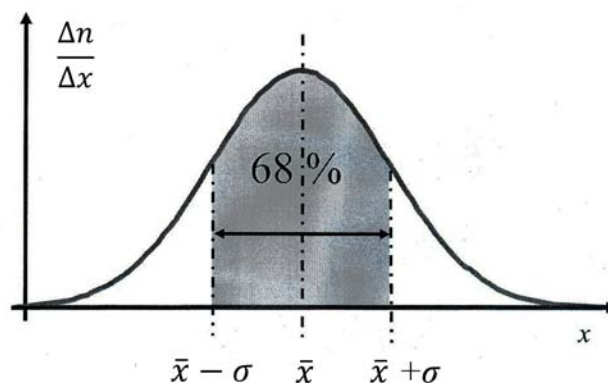
Rangelt võttes iseloomustab dispersioon mitte üksikute mõõteväärtuste ehk mõõdiste hajuvust vaid mõõdiste ruutude hajuvust sest liideti ju vahede ruutusid. Et jõuda mõõdiste endi hajuvust kirjeldava suuruseni, tuleb seega dispersioonist võtta ruutjuur:

$$\sigma = s(x) = \sqrt{D(x)}. \quad (2.5)$$

Nii saadud suurust $s(x)$ nimetatakse mõõdiste eksperimentaalseks standardhälbeks. Pikk nimetus tuleneb asjaolust, et matemaatilises statistikas on lubatud nimetada lihtsalt standardhälbeks vaid lõpmata suure arvu üksiktulemuste töötlemisel saadavat suurust. Meie mõõtmistulemuste arv on kindlasti lõplik. Praktilises metrooloogias aga pole kombeks nii range olla – suurust $s(x)$ nimetatakse lihtsalt üksikmõõtmise **standardhälbeks** ja tähistatakse tavaliselt kreeka tähega σ (sigma). Kaasajal võib standardhälbe lasta arvutada mistahes tabelarvutuste programmpaketil (näiteks MS Excel), kasutades funktsiooni STDEV. Ka enamikul taskukalkulaatoritest on see funktsioon olemas. Vastav klahv kannab tähist σ või STDEV (ingl.k. *standard deviation*).

Standardhälve on suurus, mis kirjeldab üksikute mõõteväärtuste puhtjuhuslikku hajumist keskvärtuse ümber, nii et lõpmata suure arvu mõõtmiste korral annaks mõõtemääramatuse võrdsustamine standardhälbe ga kesk väärtuse usaldatavuseks 68% (joonis 2.2). Standardhälvet mõõdetakse alati samades ühikutes nagu mõõtesuurust ennastki. Tingivat kõneviisi (*annaks*) kasutame standardhälbe definitsioonis põhjusel, et praktikas ei tee me ju kunagi lõpmata suurt arvu mõõtmisi, mistõttu standardhälbe tasemel katseliselt määratud usaldatavus ei pruugi siis olla täpselt 68%. Aga mida suurem on mõõdiste arv, seda lähemal peaks usaldatavus olema väärtusele 68%. See tähendab, et vahemikku otspunktide ga „keskväärtus miinus standardhälve“ kuni „keskväärtus pluss standardhälve“ langeb 68% kõigist mõõdistest.

Sõna *puhtjuhuslik* standardhälbe definitsioonis rõhutab asjaolu, et puhtjuhuslikel põhjustel omavahel erinevad mõõdiste jaotuvad **normaaljaotuse** järgi. See tähendab, et mõõtesuuruse x väärtuste ühikulise laiusega vahemikku langevate mõõtmiste arv $\Delta n / \Delta x$, mis on joonisel 2.2 (kõrval) kantud ordinaatteljele, sõltub suuruselt x joonisel kujutatud viisil, andes kellukesekujulise kõvera. Matemaatikud nimetavad seda Gaussi kõveraks.



Kui me oleme teinud mingi keskmistamiseks piisava arvu üksikmõõtmisi (vähemasti 10), leidnud nende tulemustest kesk väärtuse ja nüüd sama protseduuri kordame, siis märkame, et kaks kesk väärtust erinevad oluliselt vähem kui kaks suvalist üksikut mõõteväärtust. Keskmistamine vähendab väärtuste hajuvust. Matemaatilises statistikas näidatakse, et aritmeetilise keskmise standardhälve on üksikmõõtmise standardhälbest väiksem ruutjuur mõõtmiste arvust korda. Aritmeetilise keskmise standardhälvet võib vaadelda standardse A-tüüpi hinnanguna mõõtemääramatusele. Vastavalt nimetatakse seda **standardmääramatuseks** ja tähistatakse väikese u -tähe ga:

$$u_A(\bar{x}) = s(\bar{x}) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (2.6)$$

Niisiis, piisavalt suure mõõtmiste arvu ja tulemuste normaaljaotuse korral omab standardmääramatus usaldatavuse 68%. Kui me soovime usaldatavust suurendada, siis tuleb standardmääramatust korrutada arvuga, mida nimetatakse **katteteguriks**. Kattetegur sõltub mõõdiste jaotusest kesk väärtuse ümber ja nõutavast usaldusnivoost. Näiteks normaaljaotuse ja soovitava usaldatavuse 95% korral on kattetegur 1,96 ehk ligikaudu 2. Katteteguriga läbikorrutatud standardmääramatust nimetatakse **laiendmääramatuseks** ja tähistatakse suure U -tähe ga. Kui usaldatavus on eraldi ära toodud, siis võib konkreetse suuruse x mõõtemääramatust ikka tähistada Δx -ga, nii nagu me seda ülalpool tegime ning u -sid mitte kasutada.

Oluline on mõista sisulist erinevust üksikmõõtmise (ehk mõõdiste) standardhälbe ja kesk väärtuse standardhälbe vahel. Mõõtmiste arvu n suurendamine ei vähenda üksikmõõtmise standardhälvet. See vaid võimaldab täpsustada tulemuste jaotuskõvera kuju ning järelikult võimaldab üksikmõõtmise standardhälvet täpsemini määrata. Kahe suvalise juba tehtud mõõtmise tulemused ei hakka sellest omavahel vähem

erinema, et me teeme täiendavaid mõõtmisi! Kuid jaotuskõvera kuju täpsustumine tähendab ka kõvera maksimumi asukoha ehk keskväertuse – täpsustumist. Just seetõttu väheneb keskväertuse standardhälve mõõtmiste arvu suurendamisel (valem 2.6).

Võib ka öelda, et üksikmõõtmise standardhälve iseloomustab jaotuskõvera laiust (joonis 2.2) ning ei anna keskväertusele mingeid erilisi eeliseid teiste mõõteväärtuste ees. Valemit 2.2 matkiv kirjutusviis $x - \sigma < x_0 < x + \sigma$, milles mõõtemääramatuse rollis esineb **üksikmõõtmise standardhälve** σ , ütleb vaid seda, et mõõtesuuruse tõeline väärtus x_0 jääb tõenäosusega 68% väärtuste $x - \sigma$ ja $x + \sigma$ vahele. Tõeline väärtus ei erine suvalisest mõõdisest rohkem kui σ võrra. See, et me kasutame tõelise väärtuse parima lähendina keskväertust, ei tohi keskväertust siin meie silmis eriliselt esile tõsta. Keskväertus ei erine ju kuigivõrd jaotuskõvera tipu läheduses paiknevatest teistest mõõtesuuruse väärtustest. Kuid mida suurem on mõõtmiste arv, seda selgemini või usaldusväärsemalt eristub keskväertus oma naaberväärtustest. Keskväertust esile tõstev valemit 2.2. matkiv kirjutusviis

$$\bar{x} - s(\bar{x}) < x_0 < \bar{x} + s(\bar{x}), \quad (2.7)$$

milles mõõtemääramatuse rollis esineb **keskväärtuse standardhälve** $s(\bar{x}) = \sigma / \sqrt{n}$, ütleb juba seda, et keskväertus ja tõeline väärtus x_0 ei erine rohkem kui keskväertuse standardhälbe võrra. Sellega ongi põhjendatud just keskväertuse standardhälbe kasutamine standardmääramatuse hinnanguna (valem 2.6).

Kui kordusmõõtmised annavad alati sama tulemuse, siis ei saa mõõtemääramatust hinnata kordusmõõtmisi tehes. Sellisel juhul peame andma mõõtemääramatusele **B-tüüpi** hinnangu. Sageli öeldakse ka, et tegemist on **B-tüüpi** määramatusega. B-tüüpi hinnang mõõtemääramatusele saadakse mitte enam mõõtja enda poolt rakendatavate statistiliste meetoditega vaid muudest allikatest pärineva info põhjal. Eelkõige kasutab mõõtja mõõteriista tootja poolt antud infot mõõteriista täpsuse kohta. Kõige suurem erinevus A- ja B-hinnangute vahel ongi see, et B-tüüpi määramatuse korral teeb sisulise töö mõõtemääramatuse hindamisel ära mõõtevahendi või mõõteriista valmistaja. Seejuures kasutab mõõteriista tootja mitmesuguseid nii sama tüüpi mõõteriistaga kui ka palju täpsemate mõõteseadmete abil saadud mõõtetulemusi. Kindlasti ta ka töötleb neid statistiliselt. Tootjad märgivad mõõtemääramatuse alase teabe kas otse mõõteriistale või selle passi. Kui aga selline info puudub, siis on üldine tava võtta mõõtemääramatuseks pool väikseimast skaalajaotisest. Enamasti esinevad nii A- kui B-tüüpi määramatus korraga. Kogumääramatus leitakse kui ruutjuur nende ruutude summast. Tähistades suuruse x A-tüüpi määramatuse sümboliga Δ_{Ax} ja B-tüüpi määramatuse sümboliga Δ_{Bx} , võime kogumääramatuse avaldada kujul

$$\Delta x = \sqrt{(\Delta_{Ax})^2 + (\Delta_{Bx})^2}. \quad (2.8)$$

2.4.3. Mõõtemääramatuse praktiline hindamine

Möödame näiteks, kui kõrgele pörkub üles tagasi ühe meetri (100 cm) kõrguselt lauale kukkuv pingpongipall. Pärast paari esialgset proovikatset, mis annavad oluliselt erinevaid tulemusi, veendume et tegemist on A-tüüpi määramatusega.

(Peil 2.6. – foto: poiss ja tüdruk mõõtmis pingpongipalli tagasipörke kõrgust)

Eelmisest punktist teame, et sellisel juhul tuleb statistiliselt töödelda suurt arvu mõõtmisi. Võtame mõõtmiste arvuks $n = 100$. Need mõõtmised on ka reaalselt läbi tehtud ja tulemusteks on saadud järgmised sada arvu, mõõtühikutes cm: 69, 75, 73, 72, 70, 72, 73, 72, 70, 75, 70, 74, 74, 75, 74, 76, 71, 70, 69, 77, 74, 69, 70, 75, 72, 75, 71, 72, 73, 69, 73, 71, 74, 73, 77, 72, 71, 73, 74, 74, 71, 72, 72, 72, 72, 74, 72, 73, 71, 71, 73, 74, 70, 70, 74, 73, 72, 71, 73, 76, 73, 71, 71, 68, 70, 73, 72, 71, 72, 72, 73, 72, 74, 70, 73, 71, 72, 72, 72, 74, 72, 73, 71, 73, 71, 75, 74, 75, 73, 71, 75, 73, 76, 74, 73, 72, 74, 72, 71, 73.

Kui neid arve uurima hakata, siis võib täheldada, et samad mõõtetulemused korduvad aeg-ajalt, kuid mitte ühesuguse sagedusega. Kui 68 cm kõrgusele on pall pörganud vaid ühel ja 77 cm kõrgusele kahel korral, siis 72 cm kõrgusele tervelt 22 korda. Võib oletada, et tulemus, mis sagedamini kordub, on õigem. Matemaatilise statistika teooria kinnitab seda oletust. Juhuslikel põhjustel hajuvate väärtustega suuruse mõõtmisel on mõõtesuuruse tõelise väärtuse parimaks hinnanguks keskvärtus ehk paljude mõõtetulemuste aritmeetiline keskmine (p.2.4.2). Aritmeetiline keskmine leitakse teatavasti kõikide tulemuste summa jagamisel tulemuste arvuga (valem 2.3). Meie saja mõõtetulemuse aritmeetiline keskmine on **72,46 cm**. Näeme, et enamus mõõtetulemustest on tõepoolest selle keskmise lähedal.

(Peil 2.6. – interaktiivne pildiseeria: histogramm, keskmist tähistav joon, sujuv joon jne)

Uurime nüüd, kuidas meie mõõtmiste tulemused on jaotunud. Loeme kokku, kui mitu korda on saadud iga erinevat sentimeetrite arvu ning koostame vastava tulpdiagrammi. Sellist diagrammi nimetatakse mõõtetulemuste jaotumise **histogrammiks**. Näeme, et tulemuste jaotumise histogramm on üsna sümmeetriline. Paigutades histogrammile tulemuste keskmist tähistava joone, näeme, et see jagab histogrammi tõesti keskelt pooleks. Kui mõõtmisi teha väga palju, saaksime tulpdiagrammi asemel **sujuva joone**, mis kirjeldab statistikas tuntud normaaljaotust. Jaotuskõvera laius näitab mõõtemääramatust. Normaaljaotuse laiust iseloomustab teatavasti **üksikmõõtmise standardhälve σ** , mille arvutamise eeskirjaga mõõtetulemuste kaudu tutvusime eelmises punktis. Teatavasti me ei pea oskama ise selle eeskirja järgi arvutada. Me kasutame arvutit. Sisestame vastavasse kalkulaatorisse oma katseandmed ja saame teada, et meie katses **$\sigma = 1,83$ cm**. Veendume selles, et keskvärtusest **ühe** standardhälbe võrra vasakule ja paremale tõmmatud vertikaaljoonte vahele jääb histogrammil ligikaudu 68% kõigist tulemustest (68% kõigi tulpade kogupindalast).

Laiendades selliste vertikaaljoonte vahele jäävat vahemikku kummalegi poole keskvärtust kuni **kahe** standardhälbeni, näeme et vahemikku satub juba ligikaudu 95 % kõigist tulemustest. Keskvärtusest **kolme** standardhälbe võrra kummalegi poole ulatuv vahemik hõlmab aga peaaegu kõik tulemused (99,7 %). Kõigi mõõtmiste keskmistatud tulemuse parimaks hinnanguks võetakse mõõdiste aritmeetiline keskmine ning mõõtemääramatuseks sõltuvalt mõõtmise vastutusrikkusest 2 kuni 3 standardhälvet. Meie konkreetsel juhul tuleb arvestada, et üksikmõõtmised on tehtud täpsusega 1 cm. Seega ei saa lõpptulemus ning tema mõõtemääramatus olla esitatud täpsemini. Ümardame ära keskvärtuse $72,46 \text{ cm} \approx 72 \text{ cm}$ ja tõenäosusega 95% kehtiva mõõtemääramatuse hinnangu $2\sigma = 3,66 \text{ cm} \approx 4 \text{ cm}$. Nüüd võime oma mõõtmise lõpptulemuse välja kirjutada kujul **$h = (72 \pm 4) \text{ cm}$** . See tähendab, et igast sajast katsest pörkab pall 95 korral kõrgusele 68 kuni 76 cm.

Seni oleme oma näites tegelenud ainult A-tüüpi hinnanguga mõõtemääramatusele. Kuna meie mõõtejoonlaua tootja pole skaalal esitanud infot mõõtejoonlaua täpsuse kohta, siis võtame B-tüüpi määramatuseks pool kasutatavast mõõtühikust ehk 0,5 cm. Valemist 2.8 saame kogumääramatuseks

$$\Delta x = \sqrt{(3,66 \text{ cm})^2 + (0,5 \text{ cm})^2} = 3,69 \text{ cm}.$$

Kui me edaspidi satume samalaadsesse olukorda, mil üks määramatuse liikidest on palju väiksem kui teine (meie näites ca 7 korda), siis võime väiksema komponendi lihtsalt arvestamata jätta, sest ümardatud tulemuses erinevus nagnüi ei kajastu. Kuna ka $3,69 \text{ cm} \approx 4 \text{ cm}$, siis jääb kehtima lõpptulemus $h = (72 \pm 4) \text{ cm}$.

Küsimusi ja ülesandeid

1. Miks absoluutselt täpne mõõtmine pole põhimõtteliselt võimalik?
2. Kas mõõtesuuruse tõeline väärtus eksisteerib ka looduses või ainult meie kujutlustes?
3. Mille poolest erinevad üksikmõõtmise standardhälve ja keskväertuse standardhälve?
4. Miks tuleb mõõtmiste lõpptulemus ja mõõtemääramatus ümardada?
5. Valem 2.6 kohaselt oleksime pidanud palli tagasipörke kõrguse mõõtemääramatuse leidmiseks standardmääramatusena jagama üksikmõõtmise standardhälbe läbi ruutjuurega mõõtmiste arvust (100), niisiis kümnega. Miks me ei teinud seda?

STOP

1. Mõõtemääramatus on suurus, mis kuulub mõõtetulemuse juurde ja iseloomustab tõenäosuslikult mõõtesuuruse võimalike väärtuste vahemikku.
2. A-tüüpi mõõtemääramatus on põhjustatud juhuslikest mõjuritest ja seda hindab mõõtja kordusmõõtmiste tulemuste põhjal matemaatilise statistika meetoditega.
3. Standardhälve on suurus, mis kirjeldab üksikute mõõteväärtuste puhtjuhuslikku hajumist keskväertuse ümber, nii et lõpmata suure arvu mõõtmiste korral annaks mõõtemääramatuse võrdsustamine standardhälvega keskväertuse usaldatavuseks 68%.
4. B-tüüpi mõõtemääramatuse hinnangu on teostanud mõõteriista tootja ning mõõtja saab vastava info mõõteriista skaalalt või passist, ise statistilisi meetodeid kasutamata.

2.5. Füüsikalised mudelid

2.5.1. Loodusteaduslike mudelite liigid

Füüsikalistest mudelitest oli meil natuke juba eespool juttu (p.1.1.4). Füüsikaline mudel rõhutab loodusobjekti neid omadusi, mis on antud kontekstis olulised. Siin vaatleme mudeleid lähemalt, alustades mudeli üldisest määratlemisest. Loodusteadustes nimetatakse üldiselt **mudeliks** (lad.k. *modulus* – näidis) loodusobjekti jäljendust, mis asendab originaali selle lihtsamaks mõistmiseks ning uurimiseks. Kuna füüsikalist suurus kui mudelit on esmapilgul raske sobitada selle definitsiooni alla, siis paljud ka ei mõista, et füüsikaline suurus on looduse mudel. Meenutagem

jälle, et käesolevas õpikus liigitatakse loodusobjektide hulka mitte ainult kehad ja väljad vaid ka looduses toimuvad protsessid ehk loodusnähtused (sõna *objekt* lai tähendus), sest vaatleja kui subjekt tegeleb ühteviisi nende kõigiga. Me teame, et füüsilises uurimistöös on tähtsal kohal vaatlus. Vaatleja loob endale uuritavast objektist või nähtusest kujutluse. Seejuures on tal palju abi mudelitest kui lihtsustustest. Mudeli saab luua mistahes makrokehast, vee molekulist, lihtaine aatomist, elektromagnetlainest või koguni Päikesesüsteemist ja tervest meie Galaktikast. Modelleerida saab aga ka füüsilisi nähtusi nagu elektrivool, auto liikumine maanteel või valguse murdumine vihmapiisas.

Kõikidele mudelitele on iseloomulik see, et nad ei jäljenda originaali kunagi täpselt. Originaali omaduste täpne edastamine mudelis pole juba sellepärast võimalik, et vaatleja ei pruugi üldse kõiki üksikasju näha. Pealegi puudub ideaalse täpsuse järele ka vajadus. Mudel edastab vaid originaali kõige olulisemaid tunnuseid ja omadusi. Mudel on lihtsustus, kus jäetakse arvestamata kõik antud kontekstis mitteoluline. Kõige üldisemaid loodusteaduslikke mudeleid, mida loob füüsika ja mida kasutavad kõik loodusteadused, nimetatakse **füüsilisteks mudeliteks**.

Loodusteaduslikke, sealhulgas ka füüsilisi mudeleid, liigitatakse tavaliselt **ainelisteks** ja **abstraktseteks** mudeliteks. Ainelisi mudeleid kasutatakse siis, kui uuritav objekt on palja silmaga vaatlemiseks kas liiga väike või liiga suur. Reeglina kujutab aineeline mudel mikro- või megamaailma objekti. Sellise objekti aineeline mudel aitab meil tekitada kujutlust vahetutele aistingutele kättesaamatust objektist. Vee molekuli suurendav mudel edastab käegakatsutaval viisil keemiliste sidemete vahelist spetsiifilist nurka (105^0) selles molekulis koos hapniku ja vesiniku aatomite suuruste suhtega ning elektronpilve jaotusega. See võimaldab paremini mõista vee ja jää kristallstruktuuri moodustumist. Analoozilisel aitab DNA molekuli mudel mõista geneetilise informatsiooni talletamist selles aines. Neid mudeleid kasutavad palju **keemia** ja **bioloogia**, aga nad on loodud füüsiliste uurimismeetodite abiga ning teiste füüsiliste mudelite baasil. Gloobus kui Maa vähendatud mudel võimaldab paremini aru saada öö ja päeva vaheldumisest. Süsteemi Maa-Kuu-Päike mehaaniline mudel aitab paremini mõista aastaaegade vaheldumist Maal ning kuu- ja päikesevarjutuste teket. Ka need mudelid on algselt loonud füüsika, kuid neid kasutab laialdaselt **geograafia**.

Ainelistel mudelitel spetsiifilise alaliigina võib vaadelda **pildilisi** mudeleid. Nende korral pole modelleeritavast objektist tehtud reaalselt kolmemõõtmelist vähendatud või suurendatud osalist koopiat. Seda koopiat on vaid kujutatud kahemõõtmelisel joonisel, mis rõhutab originaali neid omadusi, mis on mudeli looja jaoks olulised. Tänapäeval kasutatakse üha rohkem ka arvutimudeleid ehk **animatsioone**. Need on järjestikuste piltide seeriad ehk videod, arvuti-eelsel ajastul nimetatud ka filmideks. Loodusteaduslikud arvutimudelid võimaldavad kas ühte ja sedasama loodusobjekti vaadelda erinevates vaadetes ehk rakurssides või siis jälgida loodusnähtuse ehk protsessi arengut läbi protsessi kirjeldavate järjestikuste kujutiste. Arvutite riist- ja tarkvara areng on võimaldanud kaasajal üha rohkem kasutada ka **interaktiivseid arvutimudeleid**, mille korral mudeli kasutaja saab ise mudeli tingimusi varieerida ja seeläbi paremini tunnetada looduses valitsevaid põhjuslikke seoseid.

Juhul, kui loodusobjekti uuritakse ja kirjeldatakse mitte ainelise mudeli, vaid mõttele kujutluste ning neid väljendavate matemaatiliste avaldiste abil, on tegemist **abstraktse** mudeliga (lad.k. *abstractus* – mõtteline). Abstraktne mudel on objekti

mõteline visioon, kontseptsioon objektist mõtleva inimese teadvuses. Vaatleja suudab abstraktseid mudeleid luua vaid seetõttu, et tal on olemas mõistus ehk süllogismide moodustamise võime (p.1.2.1). Füüsika üldmudelid, millega me tegeleme terves järgmises peatükis, on samuti looduse abstraktsed mudelid. Nende hulgas omavad erilist tähtsust füüsikalised suurused. Füüsika üldmudelid on enamasti kehade või väljade omadusi kirjeldavad mudelid, ehk küll leidub ka protsesse kirjeldavaid füüsikalisi suurusi kui mudeleid (nt *küirus*, *küirendus*, *töö* või *võimsus*). Praegu keskendume aga mitte üksikutele füüsikalistele suurustele vaid suuruste vahel valitsevate seoste.

Selleks, et ennustada, millal jõuab rong järgmise jaama, pole vaja kasutada rongi ainelist mudelit ehk laste mängurongi. Me võime tõelist rongi lihtsalt ette kujutada. Seejuures pole üldse tähtis, kui mitmest, kui pikast ning millist värvi vagunist see rong koosneb. Lõppjaama jõudmise aja ennustamisel pole oluline, milline rong välja näeb. Tähtis on vaid see, kus rong asub erinevatel ajahetkedel. On vaja teada rongi asukoha sõltuvust ajast. Sellise ülesande puhul piisab, kui kujutame tervet rongi ette vaid punktina, millel mõõtmised puuduvad. Rongi mõõtmised, kuju ja muud omadused pole hetkel olulised. Oluline on vaid see, kus asub rongi tähistav punkt ja kuidas selle punkti asukoht aja jooksul muutub. Ühe punktina kujuteldav rong, auto või lennuk on tuntud füüsika üldmudelina, millel nimeks **punktmass**. Selle mudeliga tegeleme peagi lähemalt (p.3.1.2). Praegu nendime vaid, et rongi liikumise modelleerimiseks piisab, kui lihtsalt kujutame selle liikumist ette ja esitame matemaatilise valemi, mis võimaldab leida rongi asukoha mistahes ajahetkel.

Rongi liikumise visiooni ehk mõttekujundi abstraktseks mudeliks on **matemaatiline avaldis**, mis lubab liikumisoleku omadusi teades välja arvutada rongi kaugust lähtejaamast mistahes võimalikul ajahetkel. Kui rongi kaugust lähtejaamast (avaldatuna meetrites) tähistada tähega x ja sekundites avaldatud aega, mis on möödunud liikumahakkamisest – tähistada tähega t , siis väljendab selle rongi liikumist näiteks avaldis $x = 20 \cdot t$. See avaldis ongi rongi liikumist kirjeldav matemaatiline mudel.

Matemaatilisele avaldisele tuginevat loodusnähtuse (nt rongi liikumise) kirjeldust nimetatakse **analüütiliseks** mudeliks. Rongi asukoha sõltuvust ajast saab peale matemaatilise valemi väljendada ka graafiku abil. Sel puhul on tegemist loodusnähtuse **graafilise** mudeliga. Olgu veel märgitud, et rongi kaugus lähtejaamast ja rongi poolt läbitud teepikkus on üks ja seesama asi. Teepikkusega s oleme aga juba kokku puutunud põhikooli füüsika mehaanika osas.

(Peil 2.7. – rongisõidu videomudel: aineiline, analüütiline ja graafiline mudel)

Analüütilise mudeli loomine on hea näide **induktiivse** meetodi ehk üksikult üldise poole liikumise rakendamisest. Me alustame mudeli loomist rongi liikumise **sihipärasest vaatlusest**, millega kaasneb **mõõtmine**. Olgu meil näiteks raudteel iga kilomeetriposti juurde paigutatud fotovärv ehk seade, mis fikseerib rongi jõudmise selle konkreetse postini. Fotovärvatest lähevad signaalid mõõtja arvutisse, mille kell fikseerib iga signaali saabumisaja. Moodustub **andmefail**, mis sisaldab lähtejaamast alates loendatud kilomeetripostide järjekorranumbreid, postide kaugusi lähtejaamast ja rongi jõudmiseks vastava kilomeetripostini kulunud aegu. Arvuti võib olla programmeeritud väljastama neid andmeid otsekohe alljärgneva **tabeli kujul**, kus füüsikaliste suuruste tähistel järel on sulgudes toodud mõõtühik:

Kilomeetri- posti number	Posti kaugus lähtejaamast x või s (m)	Kulunud aeg t (s)	Läbitud teepikkuse ja kulunud aja suhe ehk kiirus $v = s/t$ (m/s)
1	1000	50	20
2	2000	100	20
3	3000	150	20
4	4000	200	20
5	5000	250	20

Mõistagi tuleks kõigile mõõteväärtustele lisada mõõtemääramatused. Kaasaegsete arvutipõhiste mõõtesüsteemide kasutamise korral on mõõtemääramatuste hindamine omaette mahukas teema, mistõttu me seda siin praegu arendama ei hakka. Kui me aga teostame mingit samalaadset mõõtmist käepäraste mõõtevahenditega, siis hindame mõõtemääramatuse analoogiliselt ülalpool (p.2.4.3) kirjeldatuga ning kanname mõõteväärtused koos mõõtemääramatustega omajoonistatud tabelisse.

Meie järgmiseks tegevuseks on andmetöötlus. Selleks koostame kõigepealt graafiku, mille horisontaalsele ehk matemaatiliselt väljendudes **abstsissteljele** märgime aja t väärtused. Vertikaalsele ehk **ordinaatteljele** kanname kaugused lähtejaamast x (või läbitud teepikkused s). Näeme, et graafik on tõusev sirge, mis läbib koordinaatide alguspunkti. Matemaatikast teame, et sel juhul on tegemist võrdelise sõltuvusega ehk lineaarfunktsiooniga $y = ax$, kus y on funktsioon ja x – argument. Meie mudelis on argumentiks aeg t ja funktsiooniks läbitud teepikkus s . Seega meie juhul $s = vt$, kuna põhikooli mehaanikast me juba teame, et

$$\frac{s}{t} = v.$$

Tabelist näeme ka, et graafiku mistahes punkti järgi arvutades saame konstantse kiiruse $v = 20$ m/s. Konstantse kiirusega toimuvat liikumist nimetatakse füüsikas **ühtlaseks** liikumiseks. Vaadeldes läbitud teepikkust s kaugusena lähtejaamast x ehk suurusena, mida *Mehaanika* kursuses nimetatakse **koordinaadiks**, olemegi saanud rongi liikumise protsessi analüütilise mudeli, mida *Mehaanika* kursuses nimetatakse **liikumisvõrrandiks**:

$$x \text{ (m)} = 20 \text{ m/s} \cdot t \text{ (s)}.$$

Liikumisvõrrand võtab kõige kompaktsemalt ja üldisemalt kokku meie üksikud katsetulemused. Jääb veel üle küsida – miks me ikkagi nimetame kõike ülaltoodut **mudeliks**? Kas konstantse kiirusega liikuv rong on siis nii keeruline loodusobjekt? Asja üle pisut järele mõeldes peame tõdema, et rongi nii pikaajalist ühtlast liikumist esineb tõepoolest harva. Teeolud on muutlikud ja vastavalt neile muudab vedurijuht tegelikkuses rongi kiirust. Seega on rangelt ühtlaselt liikuv rong tõepoolest idealiseeritud objekt, on looduse mudel.

Tekib ka küsimus, mis meil loodud mudelist kasu on? Oletagem, et meid huvitab, kas uuritav rong võib 15 minuti jooksul jõuda järgmisesse jaama, mis on lähtejaamast 20 km kaugusel. Asendame aja $t = 15 \cdot 60 \text{ s} = 900 \text{ s}$ liikumisvõrrandisse ja saame:

$$x = 20 \text{ m/s} \cdot 900 \text{ s} = 18\,000 \text{ m} = 18 \text{ km}.$$

Seega vastus püstitatud küsimusele on eitav. Rong läbib 15 minuti jooksul 18 km ja ei jõua veel jaama, mis paikneb 20 km kaugusel lähtejaamast.

2.5.2. Praktiline mudeli loomine

Kõik me teame, et kumminöör venib selle tõmbamisel ühest otsast, kui teine ots on paigal. Urime kumminööri venimise nähtust lähemalt katse abil. Selleks vajame kumminööri, mõõtjoolauda ning teadaoleva massiga kehi, mille kaalu saaks kasutada teadaoleva jõuna. Katse käigu kohta koostame protokoll.

(Peil 2.8. – fotod kumminööri venitamise katse kohta)

Praktiline töö: Kumminööri venimise uurimine.

Töövahendid: traadist kinnituskonksudega uuritav kummipael;
mõõtjoolaud 0...30 cm $\pm 0,5$ mm
neli rauast seibi massiga (30 ± 3) g

Töö käik:

Kinnitame kumminööri vertikaalasendisse paigutatud mõõtjoolaua külge rippuma. Märkime üles, millise jaotise kohal asub nööri lõpus olev traadist osuti koormiste puudumisel. Nüüd asume uurima, kuidas kumminööri külge riputatud seibid nööri venitavad. Riputame nööri otsa erineval hulgal seibe ning märkime üles nende arvu n , summaarse massi m ning väljaveninud kumminööri pikkuse l . Hindame katse oludest lähtuvalt kumminööri pikkuse mõõtmise määramatust. Kanname kõik mõõteväärtused tabelisse. Kõige lõpuks mõõdame, kui pikaks venitab kumminööri selle otsa riputatud kohuke.

Arvutame iga koormise ehk seibide arvu jaoks kumminööri pikenevise Δl . Selleks lahutame väljavenitatud kumminööri pikkusest ilma koormiseta mõõdetud algpikkuse.

Katsetulemuste tabel:

Katse käigus selgus, et kuigi mõõtjoolaua skaala vähima jaotise pikkus on 1 mm, tuleb kumminööri pikkuse mõõtemääramatuseks võtta 0,5 cm. Mõõtmise ajal koormis võnkus ja osuti näitu polnud võimalik täpsemini fikseerida.

Nr	Koormiste arv	Mass m (g)	Pikkus l (cm)	Pikenemine Δl (cm)
1	0	0	10,9 $\pm 0,5$	0
2	1	30 ± 3	13,0 $\pm 0,5$	2,1 $\pm 0,5$
3	2	60 ± 6	16,3 $\pm 0,5$	5,4 $\pm 0,5$
4	3	90 ± 9	20,6 $\pm 0,5$	9,7 $\pm 0,5$
5	4	120 ± 12	24,4 $\pm 0,5$	13,5 $\pm 0,5$
6	Kohuke	pole teada	15,1 $\pm 0,5$	4,2 $\pm 0,5$

Mõõtmistulemuste analüüs:

Andmeid vaadates on näha, et mida suurema massiga on koormis, seda rohkem kumminöör pikeneb. Milline see sõltuvus aga täpsemalt on, saame öelda alles graafiku põhjal. Koostame katsetulemuste graafiku. Selleks joonestame esmalt

sobivas mõõtkavas **teljestiku**, mille horisontaalteljele märgime katse käigus muudetud raskuste massi ja püstteljele kumminööri pikene-mise. Seejärel kanname graafikule **katsepunktid**.

(Peil 2.8. – interaktiivne pildiseeria kumminööri venitamise katse kohta: teljestik, katsepunktid jne)

Me ei tohi nüüd katsepunkte otsekohe joonega ühendada. Selline teguviis väljendaks veendumust, et meie mõõtmised olid absoluutselt täpsed. Loodetavasti me aga teame juba, et see pole võimalik. Me peame märkima iga punkti ümber **mõõtemääramatuse piirkonna** ehk „kasti“, mille keskel paikneb katsepunkt ja mille laiuseks ning kõrguseks on vastava mõõtesuuruse kahekordsed mõõtemääramatused. Nüüd joonistame uuritavat sõltuvust kirjeldava graafiku, püüdes selleks valida võimalikult lihtsa joone. See joon ei pea läbima kõiki katsepunkte, vaid ainult katsepunkte ümbritsevaid mõõtemääramatuse piirkondi. Näeme, et meie katses saab graafikuks võtta **sirgjoone**.

Sirget on võimalik väljendada matemaatilise võrrandi abil. Võrrandi tuletamiseks valime joonestatud sirgel välja ühe punkti ning leiame graafikult sellele punktile vastava massi ja pikene-mise. Valime näiteks väärtused $m = 110 \text{ g}$ ja $\Delta l = 11,1 \text{ cm}$. Selle arvupaari põhjal leiame, kui palju venib kumminöör ühikulise massiga koormise mõjul. Jagame valitud pikene-mise vastava massiga. Tulemuseks saame

$$\frac{\Delta l}{m} = \frac{11,1 \text{ cm}}{110 \text{ g}} \approx 0,10 \frac{\text{cm}}{\text{g}} = 0,10 \frac{10^{-2} \text{ m}}{10^{-3} \text{ kg}} = 1,0 \frac{\text{m}}{\text{kg}}. \quad (2.9)$$

Kasutasime seni katses ja tulemuste analüüsis mõõtühikutena sentimeetrit ja grammi, kuna need olid graafiku koostamisel mugavamad kasutada. Lõpptulemuse avaldame siiski ka kujul, mis sisaldab SI ühikuid meeter ja kilogramm.

Kui me soovime ennustada, kui palju venib kumminöör näiteks 50-grammise koormise korral, siis tuleb mass saadud arvuga läbi korrutada. Me saame

$$\Delta l = 0,10 \text{ cm/g} \times 50 \text{ g} = 5,0 \text{ cm}.$$

Sama protseduur sobib ka mistahes muu koormise korral. Pikene-mise leidmiseks tuleb mass korrutada graafikult leitud suurusega $0,10 \text{ cm/g}$. Oleme pikene-mise arvutamiseks saanud valemi:

$$\Delta l = 0,10 \text{ cm/g} \times m \text{ (g)}.$$

Kumminööri pikene-mine on võrdelises sõltuvuses otsariputatud raskuse massist, kuna mass on saadud valemis esimeses astmes. Jällegi on tegemist matemaatikast tuntud lineaarfunktsiooniga $y = ax$, kus y on funktsioon ja x – argument. Meie praegusel juhul on argumentiks koormise mass m ja funktsiooniks kumminööri pikene-mine Δl . Saadud valem on kumminööri venimise analüütiline mudel. Mudeliks on ka meie eespool joonestatud graafik. Kui me katsetaksime mõne teise kumminööri või vedruga, tuleksid arvud küll teised, aga nähtuse olemus jääks samaks – valem ja graafik oleksid meie poolt saadutega sarnased. Seega oleme loonud ühe üpris üldise loodusnähtuse mudeli. Rõhutame veelkord, et sirge, mille me graafikule tõmbasime, ei läbi tegelikult kõiki katsepunkte. Tegemist on lihtsustusega,

mis ei kajasta reaalselt nähtust absoluutselt täpselt. Füüsikaline mudel on alati lihtsustus. Võimalik, et teostades täpsemaid mõõtmisi ja proovides graafikuna mõnd teist joont ja sellele vastavat matemaatilist avaldist, saaksime kumminööri venimise kirjeldamiseks täpsema mudeli.

Mudeli tingimused:

Meenutagem näidet hüpoteesi katselise kontrollimise kohta (p.2.1.1). Nimelt oli tähtis rõhutada katse tingimusi, sest teistsugustes tingimustes ei oleks katse tulemus pruukinud olla selline. Sama probleem tekib mudeli loomisel. Kui näiteks mõõtjoolaua asend ülalkirjeldatud praktilises töös erineb oluliselt vertikaalsest ning kumminööri otsa riputatud seibid on mõõtjoolauaga tugevas kontaktis, siis hakkab koormise raskusjõu mõjul toimuvat kumminööri pikenedamist takistama hõõrdejõud. Me eeldasime ülalpool, et ainsaks kumminöörile mõjuvaks jõuks on koormise raskusjõud. Kui see nii ei ole, siis me ei pruugi enam saada võrdelise sõltuvuse mudelile alluvaid katsetulemusi. Mudel kirjeldab loodust kindlates fikseeritud tingimustes. Nende puudumisel ei tarvitse selline mudel enam kehtida. Niisiis, võrdeline sõltuvus koormise massi m ja kumminööri pikenedamise Δl vahel kui looduse mudel, kehtib eeldusel, et koormisele mõjub ainult kaks jõudu: allapoole suunatud raskusjõud ja kumminööri esialgset pikkust taastada püüdev jõud, mis on suunatud ülespoole. **Muud jõud puuduvad**. See on uuritava mudeli tingimus.

Mudeli rakendamine:

Saime kumminööri venimise mudeli nii graafiliselt kui ka analüütilisel kujul ehk valemina. Mudeli abil võime ennustada, kui palju venib kumminöör siis, kui me riputame tema otsa selliseid kehi, millega me veel katsetanud pole. Lisaks märkame, et uuritav kumminöör on nüüd ise kasutatav **mõõtevahendina**. Me võime tema abil mõõta erinevate esemete masse, kuna valemis 2.9 sisalduva suuruse $0,10 \text{ cm/g}$ leidmisega oleme kumminööri kui mõõtevahendi esimeses lähenduses ära **kalibreerinud**. Katsetulemuste tabeli viimasest reast loeme, et kumminöör pikenes kohukese raskuse toimel $4,2 \text{ cm}$ võrra. Avaldades valemist 2.9 massi, saame et

$$m = \frac{\Delta l}{0,10 \frac{\text{cm}}{\text{g}}} = \frac{4,2 \text{ cm}}{0,10 \frac{\text{cm}}{\text{g}}} = 42 \text{ g} .$$

Järelikult on uuritava kohukese mass 42 grammi . Pole kahtlust, et need, kes on kogu mudeli loomise korralikult kaasa teinud, on selle kohukese ausalt ära teeninud. ☺

Küsimusi ja ülesandeid

1. Mis mõttes on analüütilise mudeli loomine näide induktiivse meetodi kohta?
2. Milliseid eeliseid on valemis 2.9 sisalduva võrdeteguri $0,10$ mõõtühikul 1 cm/g võrreldes SI ühikuga 1 m/kg ?

STOP

1. Loodusteaduslik mudel on loodusobjekti jäljendus, mis asendab originaali selle lihtsamaks mõistmiseks ning uurimiseks.
2. Füüsikalisteks mudeliteks nimetatakse kõige üldisemaid loodusteaduslikke mudeleid, mida loob füüsika ja mida kasutavad kõik loodusteadused. Füüsikaline mudel rõhutab loodusobjekti ainult neid omadusi, mis on antud kontekstis olulised.
3. Füüsikaline mudel kirjeldab loodust kindlates fikseeritud tingimustes, mille puudumisel ei tarvitse selline mudel enam kehtida.

3. Füüsika üldmudelid

3.1. Füüsikalised objektid ja suurused

3.1.1. Mis on füüsika üldmudelid?

Füüsikas kasutatakse looduse kirjeldamisel väga palju mudeleid. Kumminööri venimise nähtust katseliselt uurides, õnnestus meil luua selle nähtuse abstraktne mudel, mille võis esitada graafiku või valemiga (p.2.5.2). See mudel kirjeldab ühe konkreetse kumminööri venimist otsariputatud koormise mõjul. Mudelit saab ka laiemalt kasutada, kuna valem näitab, et tegu on võrdelise sõltuvusega, mis kehtib ka teiste kumminööri puhul. Vaid võrdetegurit väärtus tuleb iga kumminööri jaoks eraldi määrata. Sellegipoolest jääb saadud mudel kirjeldama üpris väikest nähtuste ringi.

Saab aga luua ka selliseid mudeleid, mis sõltumata konkreetsest nähtusest või isegi füüsikaharust on kasutatavad kogu füüsikas. Selliseid mudeleid, mis on kasutatavad kogu füüsikas, nimetatakse **füüsika üldmudeliteks**. Füüsika üldmudeliks on näiteks **keha**. Rääkides füüsikalistest kehadest, peame silmas ükskõik mida, millel on kindlad piirjooned, mõõtmed ja mass. Füüsikaline keha võib olla õun, auto, inimkeha või terve planeet Maa. Füüsikaliste kehade toimivate nähtuste kirjeldamisel puhul pole sageli olulised nende kuju ja mõõtmed. Vaja on teada vaid nende asukohta ja massi. Kui me kujutame keha ette punktikujulisena, saame omakorda keha mudeli, mida nimetatakse punktmassiks. Niisiis on **punktmass** selline keha mudel, mille korral keha massi vaadeldakse koondununa ühte punkti. Iga mudeli kasutamisel peaksime iseendalt küsima, mis on need reaalse loodusobjekti omadused, mis konkreetse mudeli poolt arvestamata jäetakse. Punktmassi korral on selleks keha kuju ja mõõtmed.

Juba korduvalt on juttu olnud ka sellest, et füüsika üldmudeliteks on **füüsikalised suurused**. Kõik suurused kirjeldavad mingite loodusobjektide ühte kindlat omadust. Kui see on väga üldine omadus, siis oleme vastavat suurust käsitlenud käesoleva kursuse 3. osas. Nii näiteks kirjeldab keha liikumisolekut kiirus, liikumisoleku muutumist kiirendus, keha võimet vastu panna liikumisoleku muutumisele – mass.

3.1.2. Füüsikalised objektid

Füüsikaline objekt on mõiste, mida kasutatakse kahes tähenduses. Üks võimalus on nimetada füüsikalisteks objektideks ainult kehi ja väljasid (kitsam tähendus). Teine ja käesolevas õpikus kasutatav variant hõlmab füüsikalise objekti mõiste alla ka loodusnähtused ehk protsessid (lai tähendus). Lai tähendus on eelistatavam, sest inimene kui looduse vaatleja on subjekt, kes uurib nii kehi, väljasid kui nende osalusel toimuvaid protsesse. Need kõik on tema vaatlusobjektid. Laias tähenduses on ka liikumine, liikumisoleku muutumine ja vastastikmõju füüsikalised objektid, mida kirjeldatakse vastavate füüsikaliste suuruste abil. Me usume, et kõik füüsikalised objektid on olemas **objektiivselt**, see tähendab – sõltumatult mistahes vaatlejast või koguni inimkonnast tervikuna. Füüsikalised suurused on aga vaatlejate ühised kujutlused, ühised väljamõeldised. Nad on füüsika üldmudelid, mille abil on mugav füüsikalisi objekte kirjeldada.

Väljad on mitteainelised objektid. Väljade tunnuseks on see, et nad mõjutavad kehi ja omavad energiat. Näiteks Maa gravitatsiooniväli kutsub esile kõigile kehadele mõjuva raskusjõu, elektriväli tekitab elektrivoolu mistahes elektriseadmes ning kindla sagedusega muutuv elektromagnetväli mõjutab silma närvirakke selliselt, et tajume valgust. Elektromagnetvälja mõne võrra väiksema muutumissageduse korral saame aga naha retseptorite kaudu hoopis soojusaistingu. Väljaliste objektide korral ei ole rakendatavad ruumi ja aja mõisted. Väljalisel objektil lihtsalt puuduvad omadused, mille alusel neid kujundada. Lähemalt tuleb selle põhjustest juttu allpool (p.4.5).

Kehad on ainelised objektid. Kehadeks on näiteks vee molekul kui mikrokeha, inimkeha kui makromailma keha või Päike kui megamaailma kuuluv keha. Kehade juures saab uurida nende kuju, värvust, mõõtmeid, koostist aga ka nende omavahelist liikumist ja vastastikmõjusid. Kehade puhul saab kasutada ruumi ja aja mõisteid. Ruumi mõiste kujundab vaateleja kehade omavahelisel mõõtmelisel võrdlemisel (*pikem-lühem, laiem-kitsam, kõrgem-madalam* jne). Aja mõiste kujundab vaateleja kehade omavahelise liikumise võrdlemisel. Selleks on vaja vähemasti kolme keha. Üks neist on taustkeha ehk keha mille suhtes liiguvad kaks ülejäänud keha. Neid kahte liikumist me aja mõiste kujundamisel võrdleme gi. Lähemalt sellest allpool (p.3.2.4).

Nähtused on aineliste ja väljaliste objektidega toimuvad muutused. Füüsikaliseks nähtuseks on näiteks kehade omavaheline liikumine, ahju soojenemine, valguse peegeldumine või neeldumine. Füüsikalist nähtust kirjeldab **nähtuse mudel**, mida saab teatavasti esitada kas: a) tabeli abil, b) graafiku abil või c) valemi abil. Seejuures suureneb selles reas kirjelduse üldisus. **Tabelis** näeme vastavust füüsikaliste suuruste üksikute väärtuste vahel. Meie tähelepanu keskendub üksikule väärtuste paarile. **Graafikul** näeme juba korraga kõiki mõõteväärtusi. Meie tähelepanu keskendub joonele, mis kirjeldab füüsikaliste suuruste omavahelist sõltuvust tervikuna. **Valem** aga võib kirjeldada vaadeldavat sõltuvust mitte ainult konkreetse uurimisobjekti korral vaid mistahes samalaadse objekti uurimisel. Kahe füüsikalise suuruse omavahelise sõltuvuse kui põhjusliku seose korral esineb üks suurus põhjusena ja teine tagajärjena. Matemaatikas nimetatakse esimest **argumendiks** x ja teist **funktsiooniks** $y = f(x)$. Graafiku joonistamisel kantakse põhjusena toimiva suuruse (argumendi) väärtused reeglina rõhtteljele (abstsissiteljele) ning tagajärjeks usutuva suuruse (funktsiooni) väärtused püstteljele (ordinaatteljele). Nii toimisime ka meie kumminööri venimise mudeli loomisel (p.2.5.2)

Kõige sagedamini looduses esinevateks sõltuvusteks füüsikaliste suuruste vahel on **astmefunktsioon** ja **eksponentfunktsioon**. Koolifüüsikas uurime küll peamiselt vaid esimest. Astmesõltuvuse erijuhtudeks on:

- **Võrdeline** sõltuvus, mille korral põhjusena toimiva füüsikalise suuruse (argumendi) astendaja sõltuvust kirjeldavas valemis on +1. Võrdelise sõltuvuse graafik on **sirge**. Võrdeline oli sõltuvus koormise massi m ja kumminööri pikenemise Δl vahel, aga võrdelises sõltuvuses kulunud ajast t on ka näiteks ühtlasel liikumisel ($v = \text{const}$) läbitud teepikkus s .
- **Pöördvõrdeline** sõltuvus, mille korral põhjusena toimiva füüsikalise suuruse astendaja valemis on -1. Pöördvõrdelise sõltuvuse graafik on **hüperbool**. Pöördvõrdeline sõltuvus esines näiteks põhikoolis elektriõpetuses takistuse R ja voolu tugevuse I vahel konstantse pinge rakendamisel (Ohmi seadus). Pöördvõrdelises

sõltuvuses keha massist m on ka keha kiirendus a konstantse jõu F mõjumisel kehale (Newtoni II seadus allpool, p.3.5.3).

- **Ruutsõltuvus**, mille korral põhjusena toimiva füüsikalise suuruse astendaja valemis on +2. Ruutsõltuvuse graafik on **parabool**.
- **Pöördruut-sõltuvus**, mille korral põhjusena toimiva füüsikalise suuruse astendaja valemis on -2. Ruut- ja pöördruut-sõltuvustega puutume kokku gümnaasiumi järgmistes füüsikakursustes.

3.1.3. Füüsikalised suurused kui looduse üldmudelid

Füüsikalised objektid võivad üksteisest erineda mitmesuguste omaduste poolest.

Omadusi jagatakse tavaliselt nelja gruppi:

- **Nimelised omadused** on sellised, mida saame väljendada sõnaliselt, kuid nende järjestamine pole üldjuhul võimalik. Nimelisteks omadusteks on näiteks õpilase sugu (poiss või tüdruk), õpilase silmade värvus (hallid, pruunid või sinised) ja tema poolt manustatava toidu maitse (hapu, magus või mõru). Füüsikalise objekti nimelist omadust ei saa kirjeldada füüsikalise suuruse abil. Me ei suuda sellise omaduse korral defineerida mõõtühikut, seega ei saa me teostada mõõtmisi. Mittemõõdetavate kvaliteetidega füüsika ei tegele.
- **Järjestatavad omadused** on sellised, millele saab omistada järjenumbrilise, kuid need numbrid on vaid kokkuleppelised ega võimalda matemaatilisi operatsioone väärtuste vahel (nt liitmist-lahutamist). Järjestatavateks omadusteks on näiteks juuksevärve tootva firma poolt kasutatava värviskaala parameeter või arstide poolt kasutatavad haiguste raskusastmed (vähi esimene ja teine staadium). Järjestatavaid omadusi mõnikord siiski kirjeldatakse suurustega, mida mõned peavad ka füüsikalisteks (näiteks materjalide kõvaduse skaala, maavärinate tugevuse skaala), kuid rangelt nad siiski füüsikalise suuruse tingimustele ei vasta, kuna matemaatilisi meetodeid me nende puhul rakendada ei saa. 3-palline ja 4-palline maavärin ei anna kokku 7-pallist.
- **Kvantitatiivsed diskreetsed omadused** on sellised, mida saab iseloomustada täpse arvuga, kuid võimalikud on vaid selle teatud kindlad väärtused. Näiteks prootonite arv aatomituumas saab olla 2 või 14, kuid mitte kunagi 2,75. Ka aatomite arv molekulis ei saa olla murdarvuline. Diskreetsed omadused kirjeldab juba füüsikaline suurus, sest matemaatilistele tehetele vastava suuruse väärtuste vahel vastab looduse kindel omadus. Kui me lisame lämmastiku aatomi tuuma seitsmele prootonile kaheksanda, siis me saame juba hapniku aatomi tuuma. Füüsikalise objekti diskreetsed omadused kirjeldab diskreetne füüsikaline suurus. *Mikro- ja megamaailma füüsika* kursuses puutume kokku suurustega, mis makromaailmas ei ole diskreetsed, kuid osutuvad diskreetsedeks mikromaailmas (näiteks elektroni kiirus või aatomi energia).
- **Kvantitatiivsed pidevad omadused** on sellised, mida saab iseloomustada täpse reaalarvulise väärtusega. Seejuures on võimalike väärtuste arv lõpu. See tähendab, et iga kahe väärtuse vahel võib leiduda veel lõpmata palju erinevaid väärtusi. Kvantitatiivseid pidevaid omadusi kirjeldavad pidevad füüsikalised suurused. Näiteks keha inertsuse omadus (kalduvust säilitada oma liikumisolekut) kirjeldab keha **mass**, keha või ainekoguse soojusastet kirjeldab temperatuur, gaasi molekulide kogumõju anuma seina pinnatühikule kirjeldab gaasi rõhk.

(Peil 3.1. – fotod: loodusobjekti nominaalne, järjestatav, pidev ja diskreetne omadus)

Looduse üldisi mudeleid, mis kirjeldavad füüsiliste objektide kvantitatiivseid omadusi, nimetatakse füüsilisteks suurusteks. Füüsilised suurused saab omakorda jagada skalaarseteks ja vektoriaalseteks suurusteks.

3.1.4. Skalaarsed ja vektoriaalsed suurused

Füüsilist suurust, mis on esitatav vaid ühe mõõtarvu ja mõõtühikuga, nimetatakse skalaarseks suuruseks ehk skalaariks (lad.k. *scala* – redel, astmestik). Skalaarsetel suurustel on arvuline väärtus, kuid neil pole suunda. Skalaarsed suurused on näiteks näiteks aeg, pikkus, mass, rõhk, ruumala, energia, temperatuur. Mõnikord võib jääda ekslik mulje, et mõnel skalaaril on siiski suund olemas. Näiteks aeg näib kulgevat ühes suunas ja soojendatava vee temperatuur muutub suurenemise suunas. Nende näidete puhul on tegemist vaid nähtustega, kus toimub suuruse arvulise väärtuse muutumine. Siin pole otseselt tegemist suunaga ruumis. Siiski kujutleme me skalaarse suuruse väärtusi reeglina paiknevatena arvteljel. Sellel teljel on sageli olemas kokkuleppeline nullpunkt, millest ühele poole jäävad skalaarse suuruse positiivsed ja teisele poole negatiivsed väärtused. **Miinusmärk** skalaarse suuruse arväärtuse ees väljendab mõttelist liikumist arvteljel negatiivses suunas ehk siis vastupidiselt kokkuleppelisele positiivsele suunale. Näiteks keha negatiivne kõrgus maapinnast tähendab seda, et keha asub tegelikult maapinnast allpool. Negatiivne aeg tähendab seda, et sündmus leidis aset enne kokkulepitud nullhetke. Negatiivne temperatuurimuutus tähendab seda, et temperatuur mitte ei tõusnud vaid langes.

Skalaarne suurus omab arvulist väärtust ja mõõtühikut. Selline suurus pannakse alati kirja kui arvu ja mõõtühiku korrutis kusjuures korrutusmärki tavaliselt välja ei kirjutata. Näiteid selle kohta sai toodud juba eespool (p.2.2.2 ja 2.4.3).

(Peil 3.2. – värviskeem: suuruse tähis, arvuline väärtus ja mõõtühik)

Skalaarsete suurustega saab sooritada erinevaid matemaatiliseid tehteid. Seejuures ei tohi muidugi unustada mõõtühikuid. Tehe sooritatakse eraldi nii arväärtustega kui mõõtühikutega. Mõned näited:

Skalaarse suuruse korrutamine arvuga:

Kolme 100-grammise vihi mass on kokku $3 \times 100 \text{ g} = 300 \text{ g}$.

Skalaarsete suuruste omavaheline liitmine või lahutamine:

Kui tõstame 1 m kõrguse kasti otsa 75 cm kõrguse kasti, on tekkiva kastivirna kogukõrgus $1 \text{ m} + 0,75 \text{ m} = (1 + 0,75) \text{ m} = 1,75 \text{ m}$. Meenutagem, et omavahel liita ja lahutada saab vaid sama tüüpi suurusi, millel on ühesugune mõõtühik.

Skalaarsete suuruste omavaheline korrutamine või jagamine:

1,5 m kõrguse ja 3 m² põhja pindalaga veepaagi ruumala on $1,5 \text{ m} \times 3 \text{ m}^2 = (1,5 \times 3) \times (\text{m} \times \text{m}^2) = 4,5 \text{ m}^3$.

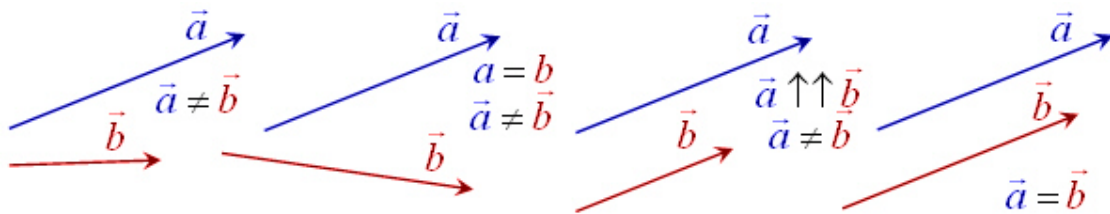
Kui auto sõidab 150 km pikkuse tee ära kahe tunniga, siis on auto kiirus $(150 \text{ km}) / (2 \text{ h}) = (150/2)(\text{km/h}) = 75 \text{ km/h}$.

Me kohtame füüsikas palju ka selliseid suurusi, mida iseloomustab lisaks arvulisele väärtuse **suund**. Näiteks ei saa me ennustada, kuhu teadaoleva kiirusega sammuv matkaja kolme tunni pärast kohale jõuab, kui me ei tea, millises suunas ta liigub. Matemaatikas nimetatakse suunatud sirglõiku **vektoriks** (lad.k. *vector* – kandja,

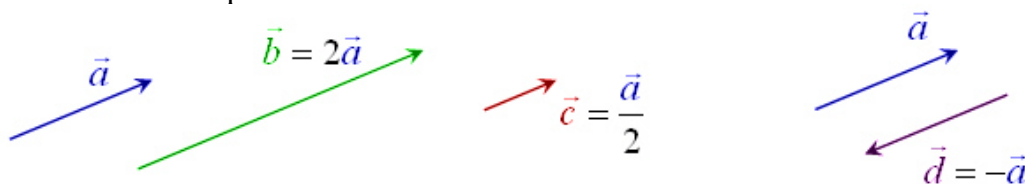
edasiviija). See nimetus on üle võetud ka füüsikasse. Ruumilist suunda omavaid füüsikalisi suurusi nimetatakse vektoriaalseteks suurusteks. Vektoriaalseteks suurusteks on näiteks kiirus, kiirendus ja jõud. Joonistel ja valemities tähistatakse vektoriaalseid suurusi nii, et suuruse tähise kohale märgitakse väike nooleke.

Näiteks kiirusvektori tähis on \vec{v} ja jõuvektori tähis \vec{F} .

Vektori pikkust nimetatakse vektori **mooduliks**. Kiirusvektori pikkus on võrdne kiiruse arvvaartusega ja jõuvektori pikkus on võrdne jõu arvvaartusega. Vektoreid ehk suunaga lõike iseloomustab korraga nii lõigu pikkus kui suund. Kaks vektorit on võrdsed, kui nende pikkused on võrdsed ja nad on samal ajal ka ühesuguse suunaga. Pikkuste **või** suundade võrdsusest veel vektorite võrdsuseks ei piisa. Pikkused **ja** suunad peavad võrdsel tel vektorsuurustel korraga ühesugused olema:

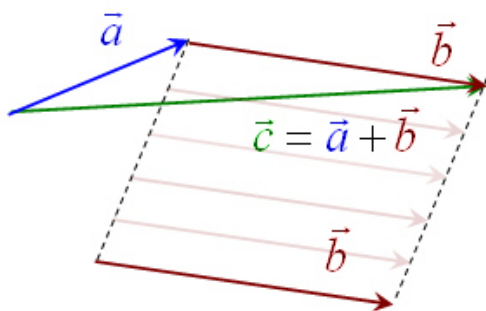


Vaatleme nüüd **tehteid** vektoritega. Vektori korrutamisel või jagamisel arvuga jääb suund samaks, tehe mõjutab vektori pikkust. Miinus ühega korrutamisel ehk vektoriaalse suuruse märgi vastupidiseks muutmisel jääb vektori pikkus samaks, aga suund muutub vastupidiseks. Näiteks:

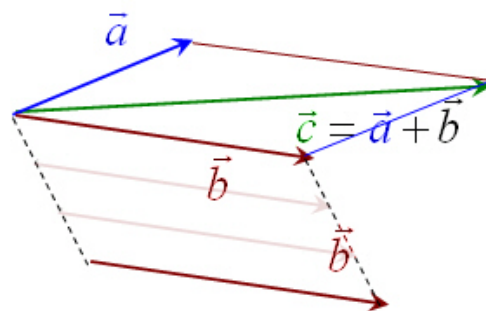


Vektorite liitmiseks on kaks võimalust: kolmnurga reegel ja rööpküliku reegel.

Kolmnurga reegli järgi liitmisel tuleb teist vektorit iseendaga paralleelselt nihutada nii, et teise vektori algus ühtiks esimese vektori lõpuga. Vektorite summaks on esimese vektori algusest teise lõpu suunatud vektor.

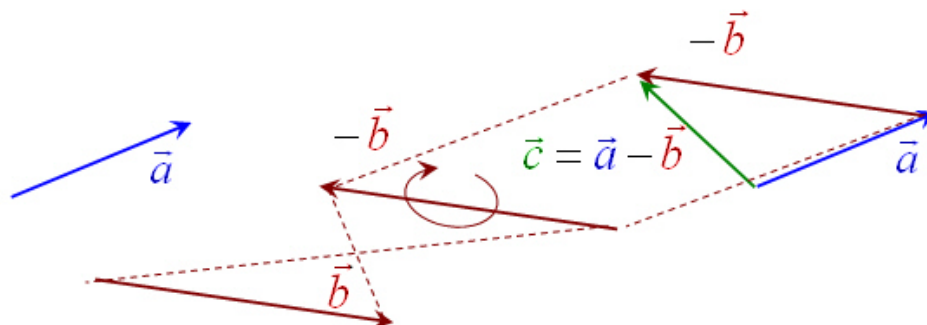


Rööpküliku reegli järgi liitmisel tuleb teist vektorit nihutada nii, et mõlema vektori alguspunktid langeksid kokku. Vektorite summaks on liidetavatest vektoritest moodustuva rööpküliku diagonaali suunaline ja pikkune vektor.



Kui vektorite liitmine on selge, ei tohiks ka lahutamise raskusi valmistada.

Vektori lahutamine teisest pole ju midagi muud, kui vastupidise suunaga vektori liitmine:



3.1.5. Füüsika ja matemaatika

Füüsika olemuse mõistmisel on üpris oluline õigesti teadvustada füüsika suhet matemaatikaga. Ainult täppisteaduslikku lähenemist kasutav või FLA kursust mitte sisaldav koolifüüsika kipub õppurile sisendama väärarvamust, et füüsika ja matemaatika vahel kõneväärset erinevust polegi. Füüsika on lihtsalt mõnevõrra raskem, sest arvutamisel tuleb kasutada mõõtühikuid, mis matemaatikas tavaliselt puuduvad. Samas definitsioonid, valemid, tõestused ja arvutusülesanded on olemas nii füüsikas kui matemaatikas. Siiski on füüsikal ja matemaatikal ka suuri erinevusi.

Matemaatika on teadus meid ümbritseva maailma hulgalistest, geomeetrilistest ja loogilistest omadustest. Matemaatika on rangelt defineeritud tähendusega sümbolite keel. Matemaatika keeles rääkides säilib eelduses sätestatud tõde kogu arutluse vältel. Kui eeldus kehtib ja matemaatilise keele grammatikareegleid on järgitud, siis võime olla kindlad, et kehtib ka järeldus. See kehtib õigupoolest igas keeles, mille sõnade tähendus ja reeglid on piisava täpsusega määratletud. Tavakeele sõnadel ja reeglitel aga matemaatikale omast rangust pole, mistõttu tavakeele abil on raske keerulisemaid füüsikalisi arutlusi teostada. Teadusi, mis kasutavad oma töökeelena matemaatikat, nimetatakse **täppisteadusteks**. Nende hulgas on loomulikult ka füüsika.

Tasub rõhutada fakti, et matemaatika definitsioonis kasutasime sõna *maailm*, mitte sõna *loodus*. Tõepoolest, matemaatikat kasutavad mitte ainult loodusteadused vaid ka mitmed sotsiaalteadused, näiteks majandusteadus või sotsioloogia. Matemaatika on igasuguste kvantitatiivsete ehk arvuliste kirjelduste universaalne keel, füüsika aga on loodusteadus, loodust kirjeldavate kujutluste süsteem. Matemaatika defineerib näiliselt täiesti iseseisvalt oma reeglid ja jälgib piinliku hoolega nende täitmist. Füüsika aga ei tohi kunagi kaotada seost loodusega. Fraas *näiliselt iseseisvalt* tähendab, et täiesti meelevaldselt matemaatika oma reegleid määratleda siiski ei saa. Pole mõtet defineerida reeglit, mis oleks vastuolus loodusseadustega. Selline matemaatika poleks enam loodusteadustes kasutatav. Ta osutuks mittevajalikuks.

STOP

1. Füüsikaline objekt on kas keha, väli või loodusnähtus, mis eksisteerib looduses sõltumatult vaatejast ja tema teadmistest objekti kohta.
2. Füüsikaline suurus on looduse üldine mudel, mis kirjeldab füüsikalise objekti mingeid kvantitatiivseid ehk arvuliselt väljendatavaid omadusi.

3. Skalaarne suurus on füüsikaline suurus, mis on esitatav vaid ühe mõõtarvu ja mõõtühikuga. Skalaarsetel suurustel on arvuline väärtus, kuid neil pole ruumilist suunda.
4. Vektoriaalne suurus on füüsikaline suurus, millel on lisaks arväärtusele olemas ka ruumiline suund.

3.2. Pikkus, kiirus ja aeg

3.2.1. Kehade mõõtmed ja pikkus

Füüsika uurib looduses leiduvaid kehi ja teeb seda kõigepealt vaatluse teel. Vaadeldes erinevaid kehi, võime nende juures leida sarnasusi ja erinevusi. Me saame vaadeldavaid kehi omavahel võrrelda. Võrdleme näiteks harja ja prügikühvli. Eriti sarnased ei tundu olema. Materjal on tõenäoliselt küll sama, kuid värv ja eriti kuju on täiesti erinevad. Raskuse kohta ei oska eemalt vaadeldes midagi öelda. Ometi võib leida ühe omaduse, mis on mõlemal enam-vähem ühesugune. Nimelt, hari ja kühvel tunduvad olevat ühepikkused. (Peil 3.3. – fotod: hari ja prügikühvel)

Pikkus on füüsikas väga oluline ja samas väga üldine suurus. Pikkuse abil saab iseloomustada kõiki kehi ja nende paiknemist üksteise suhtes. Kui ütleksime: pikkus on füüsikaline suurus, mis kirjeldab kehade ruumilist ulatuvust, siis ei tekiks meil veendumust, et oleme selle suuruse nüüd defineerinud. Ausam oleks öelda, et **pikkus on vaateleja kujutus, mis tekib kehade omavahelisel võrdlemisel piki ühte sihti ehk mõõdet**. Pikkuse kui füüsikalise suuruse üldlevinud tähis on l (lad.k. longitudo – pikkus) ja tema mõõtühik on **meeter** (1 m).

Pliiatseid on lihtne omavahel võrrelda. Fotolt on selgesti näha, et ülemine pliiats on alumisest lühem. Soovi korral võime pikkused ära mõõta ning arvutada, mitu korda pikkused erinevad. (Peil 3.3. – fotod: pliiatsid ja värvilised paberilehed)

Paberilehtede võrdlemine pole aga nii lihtne. Kui need on sarnase kujuga, probleemi ei teki. Võime kindlalt väita, et teisel fotol kujutatutest on punane paberileht rohelisest väiksem, sest tema pikkus on väiksem. Kuidas aga omavahel võrrelda punast ja sinist paberilehte? Kumb neist suurem on? Siin ei piisa enam kummagi lehe pikkuse võrdlemisest. Lisaks tuleb võrrelda ka laiuseid. Kui pikkuste ja laiuste kaudu pindalad välja arvutada, osutub, et punane ja sinine paberileht on tegelikult ühesuurused. Näeme, et kehi võib iseloomustada korraga mitu pikkusmõõtu. Laius on ju tegelikult ka pikkus. Seda mõõdetakse lihtsalt teises sihis.

3.2.2. Ruumi mõiste

Pikkuse abil ei saa võrrelda mitte ainult kehi, vaid kirjeldada ka nende asetsemist üksteise suhtes.

(Peil 3.3. – fotod: rebane ja viinamarjad, matrjoškad)

Näiteks võime pikkusi mõõtes leida, kui kaugel puust istub viinamarju ihkav rebane ning kui kõrgel need marjad ripuvad. Me ütleme selle kohta, et rebane ja viinamarjad paiknevad ruumis erinevates kohtades. Seda ruumi, kus kehad asuvad, saab kirjeldada just erinevate pikkusmõõtude abil. Ruum pole vajalik mitte ainult kehade asukoha

kirjeldamiseks. Ka kehad ise võtavad enda alla mingi ruumi. Kehad on ruumilised. Seda kinnitavad suurepäraselt vene käsitöökunstnike poolt treitud ja maalitud matrjoškad, mida üksteise sisse saab mahutada.

Samas on raske täpselt öelda, mis see ruum tegelikult on. Me saame seda vaid ette kujutada. Järelikult on ruum füüsikaline mudel. Ilma ruumi ette kujutamata ei saa me kirjeldada mitte ühtegi füüsikalist objekti ega nähtust. Ruum on füüsika üldmudel, mida saab kirjeldada pikkuste võrdlemise teel. Ruum on geomeetria kui ühe matemaatika haru põhimõiste. Matemaatika tegeleb ruumiga ka ilma liikumist käsitlemata.

Kui me võrdlesime pliiatseid, siis piisas vaid ühest pikkusmõõdust. Samuti piisab vaid ühest mõõtarmust, kui tahame kirjeldada liiklusõnnetuse toimumise paika. Selleks peab teadma vaid lähimale kilomeetripostile kantud numbrit. Olukorra kirjeldamiseks ei pea me ruumi ette kujutama keerulisemana kui **ühemõõtmelisena**. Märkame ka, et toodud näites pole üldse oluline, kas maantee on sirge või kõver. Kirjeldamiseks piisab ikkagi vaid ühest mõõtmest. Paberilehti võrreldes nägime, et siin oli vaja juba kahte mõõdet – pikkust ja laiust. Kui soovime kirjeldada paberil sibava sipelga asukohta, siis on ka selleks vaja kahte mõõtarvu. Seejuures pole tähtis, kas paber on sirge või näiteks rulli keeratud. Mingil kindlal pinnal paiknevate kehade ja nähtuste kirjeldamiseks saab kasutada ruumi **kahemõõtmelist** mudelit. Kõige keerulisem ruum, mida inimesed enda ümber tajuvad, on **kolmemõõtmeline**. Pikkusele ja laiuksusele lisandub veel kõrguse mõõde. Igapäevaselt tajutavate nähtuste kirjeldamisel rohkem mõõtmeid tarvis ei lähe.

Kolmemõõtmeline ruum võib sisaldada vähemamõõtmelisi ruume. Vaatame näiteks ühte traadijuppi, mida mööda sammub sipelgas. (Peil 3.3. – foto: sipelgas traadil) Kuna sipelgas lennata ei oska ja traadilt maha hüpata ei julge, on tema traadi poolt määratud maailm ühemõõtmeline. Kui sipelgas tahab ühest otsast teise jõuda, tuleb tal läbi sammuda kogu traadi pikkus, sõltumatult sellest, kas traat on sirge või kõver. Kui sipelgas suudaks kasvõi natukeseks ajaks ühemõõtmeliselt traadilt väljuda ja kasutada kõrgemat mõõdet, väheneks tema jalavaev märgatavalt. Näeme, et kui vähemamõõtmeline ruum sisaldub kõrgemamõõtmelises ruumis ja kui ruum on kõver, siis saab kõrgemaid mõõtmeid ära kasutades läbitavaid vahemaid lühendada.

3.2.3. Kehade liikumisolek, kiirus ja absoluutne aeg

Üheks esmaseks tähelepanekuks, mille me loodust uurides teeme, on see, et kehad ei ole mitte alati üksteise suhtes paigal – nad **liiguvad**. Liikumine on alati suhteline, ühe keha liikumist saab vaadelda vaid mingi teise keha suhtes. Kuna selle teise keha olemasolu loob tingimused või **tausta** esimese keha liikumise käsitlemiseks, siis me nimetame teist keha **taustkehaks**. Kirjeldades maantee ääres seistes autode liikumist, on väga mugav kasutada taustkehana iseenda keha. Kui aga vaatleme liikuvat autos istudes teist, möödasõitu sooritavat autot, siis hindame möödasõitja liikumist kõigepealt omaenda auto kui taustkeha suhtes.

(Peil 3.5. – video liikumise suhtelisuse kohta – veebiõpikusse)

Nüüd nendime, et mistahes liikumise uurimiseks peab vaatlejal olema **mälu**. Vaatlejal peab olema võimalik korraga töödelda liikuva keha erinevaid asukohti käsitlevat infot. Vaatleja ütleb: “Mulle lähenev keha oli *kõigepealt* minust kaugel, *seejärel*

lähemal ja lõpuks päris minu juures.” Vaatleja järjestab oma mälu pilte, ta järjestab erinevaid sündmusi skaalal *varem-hiljem*. Seega asub vaatleja vältimatult kujundama **aja** mõistet. Samas võime ka väita, et kui liikumist ei esineks või mingeid sündmusi ei toimuks, siis poleks vaatlejal ka mitte mingit alust aja mõiste tekitamiseks. Liikumine ja aeg on lahutamatult seotud mõisted.

Järgnevalt märkame, et kehad võivad liikuda väga erinevalt. Piki maanteed jalutades paneme tähele, et kui meist möödunud jalgrattur on alles ligikaudu saja meetri kaugusel, on jalgratturiga samal hetkel möödunud sõiduauto juba nägemisulatuses väljumas. Nendime, et jalgrattur liigub kiiremini kui jalakäija, aga auto omakorda kiiremini kui jalgrattur. Keha liikumiselekt (või “liikumise ägedust”) kirjeldab füüsikaline suurus, mida me nimetame kiiruseks v (lad.k. *velocitas* – kiirus). Juba põhikoolis õppisime, et kiirus näitab ajaühiku jooksul läbitavat teepikkust. **Kuid mis on aeg?** On ilmne, et aja mõiste kujundamine liikumist käsitlevate mälu piltide alusel sõltub selle keha kiirusest, mille liikumisest me lähtume. Klassikalises füüsikas oleme me siin selgelt nii-öelda **muna-kana probleemi** ees: aja mõiste kujundamine sõltub kiirusest, kiiruse määratlemiseks aga oleks vaja juba kasutada aja mõistet.

Klassikalise mehaanika looja Isaac Newton lahendas ülaltoodud probleemi **absoluutse aja** mõiste kasutuselevõtuga. Ta järjestas sündmused mõtteliselt mingile joonele, mis meenutas ühemõõtmelise ruumi mudelit:

(Peil 3.4. – ajatelg, millel on näidatud sündmused ja ajavahemikud)

Kui sündmused on järjestatud, siis saab neid võrdlema hakata. Enne tuleb muidugi veel kokku leppida, millise sündmusega me kõiki teisi võrdlema hakkame. Näiteks on ajaloosündmuste järjestamisel nullpunktiks võetud päev, mil keskaegsete arusaamade kohaselt sündis Jeesus Kristus. Hiljem on küll leitud, et tegelikult sündis Kristus tõenäoliselt veidi varem. Probleemid Jeesuse sünnipäeva määramisel tulenevad esimesel sajandil valitsenud segadusest kalendriasjanduses. Muuseas huvitas ka Newtonit väga Jeesuse sünni- ja surmakuupäeva täpne määramine. Aja mõiste kujundamisel asus Newton eeldama, et sündmuste toimumishetkede järjestus ülalpool kujutatud ajateljel ning kahe sündmuse vahele jäävate ajavahemike pikkused on kõigi vaatlejate jaoks ühesugused. See ongi absoluutse aja kontseptsioon.

Lühidalt, Newton asus seisukohale, et kiirust v , teepikkust s ja aega t omavahel siduvas üldtuntud valemis

$$v = \frac{s}{t} \quad (3.1)$$

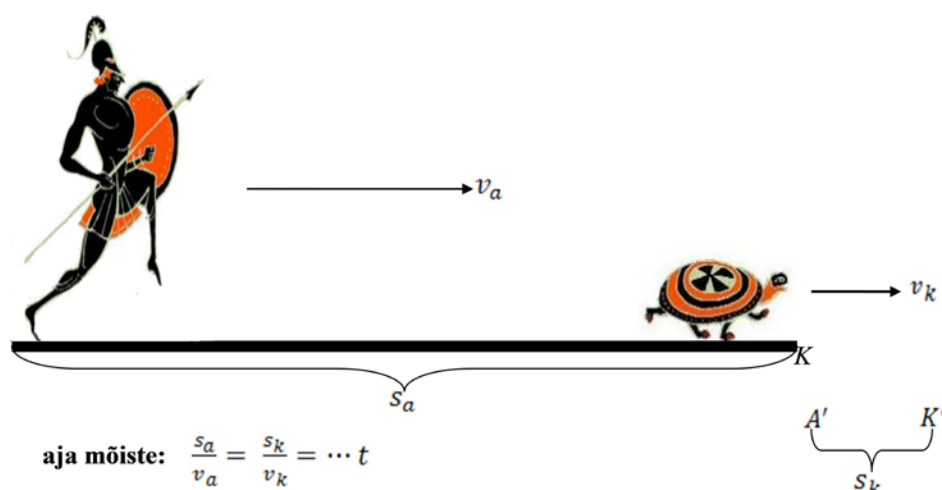
tuleb aega vaadelda absoluutse ning **apriorse** ehk kõrgemalt poolt antud või mitte-defineeritava suurusena. Valem 3.1. osutub siis mõistagi kiiruse definitsiooniks. Jääb aga probleem: *Mille alusel otsustada, kui palju on üks ajavahemik absoluutse aja teljel teisest pikem?*

Siin viitas Newton teadagi võimalusele kasutada **perioodilisi** protsesse ehk nähtusi, millele on omane korduvus. Nendeks on näiteks Päikese näiv liikumine taevas (öö ja päeva vaheldumine) või Kuu faaside vaheldumine (Kuu loomine, noorkuu, täiskuu, vanakuu), samuti mitmesuguste pendlite võnkumine. Ajavahemikku võib võrrelda vastava võnkeperioodiga. Aja mõõtmisel võib võtta võrdluse aluseks ka muutumatu kiirusega kulgevad protsessid, näiteks küünla lühenemise põlemise käigus või liiva voolamise läbi liivakella väikese ava. Kuid mille põhjal me ikkagi otsustame, et nende protsessidega määratav mastaap ajateljel on õige? Kustkohast me teame, et kasutatava

korduva protsessi periood on konstantne või et liiva voolamine liivakellas toimub alati ühesuguse kiirusega? *Kuidas saab vaatleja usaldusväärset infot absoluutse aja kohta?*

3.2.4. Liikumiste võrdlemine ja aeg

Läheme nüüd aja mõiste uurimisel tagasi Vana-Kreekasse, kus liikumise ja aja probleemid erutasid väga **eleaate** ehk Elea filosoofilisse koolkonda kuuluvaid mõtlejaid. Vana-Kreekas oli filosoofiaga tegelemine vabade kodanike privileeg, mistõttu katseline loodusteadus seal veel tekkida ei saanudki. Looduse muutmise ehk raske füüsilise tööga tegelesid orjad. Vabad kodanikud pidid suutma mistahes probleemi lahendada mõtlemise ja arutlemise teel. Tuntuim eleaat Zenon seadis oma eesmärgiks tõestada, et liikumine on vaid meelepete, tegelikult pole seda olemas. Zenon konstrueeris terve rea vastuoluga lõppevaid kirjeldusi ehk **apooriaid**, mis pidid tõestama liikumise võimatust.



Tuntuim Zenoni apooria kannab nime *Achilleus ja kilpkonn*. Kuulsaim kreeka sõjamees, Trooja sõja kangelane Achilleus otsustab kilpkonnaga võidu joosta ning oma võidus ette kindel olles annab kilpkonnale edumaa, mis on allpool toodud joonisel tähistatud s_a -ga. Võidujooksu alguses paikneb Achilleus punktis A ja kilpkonn punktis K. Kui Achilleus on jõudnud sinna, kus kilpkonn oli liikumise alguses (K), siis kilpkonn on juba jõudnud punkti K', olles läbinud pikkuse s_k . Kui Achilleus on jõudnud punkti K', olles läbinud pikkuse $s_a' = s_k$, siis on kilpkonn juba punktis K'', olles läbinud pikkuse s_k' . Ja nii edasi.

Zenon väidab, et Achilleus ei saa kunagi kilpkonna kätte, sest Achilleuse ja kilpkonna vahekaugus ei saa kunagi nulliks. Zenon esitab nii Achilleuse kui kilpkonna poolt läbitavad teepikkused lõikude summadena, võttes arvesse ka kilpkonna algse edumaa s_a , mis allpool toodud võrratuses paikneb võrratusmärgist paremal, kilpkonna poolt läbitavate lõikude summa ees. Ehkki liidetavad on vastavalt võrdsed ($s_a' = s_k, s_a'' = s_k'$ jne), on parempoolses summas alati üks liidetav rohkem (toodud näites on see s_k'''). Seega võrratus

$$s_a + s_a' + s_a'' + s_a''' \dots < s_a + [s_k + s_k' + s_k'' + s_k''' + \dots]$$

kehtib ja kilpkonn on alati natuke Achilleusest eespool. Niimoodi väites Zenon vaikumisi eeldab, et nii Achilleuse kui kilpkonna kiirused kahanevad sujuvalt kuni nullini. Mida lähemale kilpkonnale Achilleus jõuab, seda väiksemaks muutub kiiruste

erinevus. Õigupoolest saabki Zenoni arutlus võimalikuks tänu sellele, et Zenon ei kasuta kiiruse mõistet.

Teades Achilleuse kiirust v_a ja kilpkonna kiirust v_k ning eeldades nende kiiruste konstantsust, pole kuigi raske leida aega, mis tegelikult kulub Achilleusel kilpkonna kinnipüüdmiseks. Jäägu selle ülesande lahendamise asjast huvitatutele. Meie jaoks on hetkel oluline, et Achilleuse ja kilpkonna liikumiste võrdlemine kujundab tegelikult meie jaoks aja mõiste. Üldisemal juhul me vaatleme näiteks tervet hulka samast punktist liikumist alustavaid kehi, millest esimene liigub kiirusega v_1 , teine kiirusega v_2 , kolmas kiirusega v_3 jne. Kui esimene keha läbib pikkuse s_1 , teine pikkuse s_2 , kolmas pikkuse s_3 jne, siis jääb suhe

$$\frac{s_1}{v_1} = \frac{s_2}{v_2} = \frac{s_3}{v_3} = \dots = t \quad (3.2)$$

vaatleja jaoks konstantseks. Seda suhet me nimetamegi ajaks. Niisiis me vajame aja mõiste kujundamiseks vähemasti kolme keha: taustkeha ning veel kahte liikuvat keha, mille liikumisi me omavahel võrdleme. Ülalpool olid nendeks kaheks liikuvaks kehaks Achilleus ja kilpkonn. Tavaelus me võrdleme ühe keha liikumist mingi etalonkeha sees toimuva liikumisega. Seda erilist keha me nimetame kellaks.

(Peil 3.4. – fotoseeria: erinevad kellad)

Esmapilgul näib, et me pole valemit 3.2 konstrueerides mitte midagi võitnud võrreldes Newtoniga. Kui Newton oli sunnitud pidama aega aprioorseks suuruseks, siis meie peame selleks kiirust. Klassikalises füüsikas võiks vaidlema jääda. Kaasaegses füüsikas on meil aga õnneks võimalik kasutada absoluutkiiruse printsiipi, millest detailselt tuleb juttu allpool (p.4.4). Meil on olemas kõigi ainelistele vaatlejate jaoks rangelt ühesugune kiirus – valguse kiirus vaakumis ehk absoluutkiirus c . Kõiki ainelistele objektide omavahelise liikumise kiirusi on võimalik esitada absoluutkiiruse murdosades, kasutamata aja mõistet. Kuna $c = 299\,792\,458 \text{ m/s} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, siis võime näiteks kiirusega $108 \text{ km/h} = 30 \text{ m/s}$ liikuva auto kohta öelda, et selle auto kiirus on $10^{-7} c$ ehk üks kümnemiljondik absoluutkiirusest. Tavaelus me nii ei toimi, sest absoluutkiirus on ebamugavalt suur. Kuid valides valemis 3.2 üheks kiiruseks absoluutkiiruse:

$$\frac{s_1}{v} = \frac{s_2}{c} = \dots = t, \quad (3.3)$$

saame täiesti veatu aja definitsiooni ning võimaluse üheselt määratleda mistahes keha kiirust v keha poolt läbitava pikkuse s_1 ning valguse poolt läbitava pikkuse s_2 kaudu.

Rõhutame veel kord, et aeg kui füüsikaline suurus on selline vaatleja kujutus, mis tekitatakse liikumiste omavahelisel võrdlemisel. Aeg järjestab sündmused omavahel varem või hiljem toimunuteks.

STOP

1. Pikkus kui füüsikaline suurus on selline vaatleja kujutus, mis tekitatakse kehade omavahelisel võrdlemisel piki ühte mõõdet.
2. Liikumisolek on keha omadus, mis seisneb keha asukoha, asendi või kuju muutumises mingi teise keha ehk taustkeha suhtes.
3. Kiirus on keha liikumisolekut kirjeldav füüsikaline suurus, mille alusel saab erinevaid liikumisi võrrelda. Kiiruse loomulikuks etaloniks on absoluutkiirus.

4. Aeg kui füüsikaline suurus on selline vaateja kujutus, mis tekitatakse liikumiste omavahelisel võrdlemisel. Aeg järjestab sündmused omavahel varem või hiljem toimunuteks.
5. Üks meeter sekundis on sellise keha kiirus, mille asukoht muutub ühe meetri võrra ühe sekundi jooksul.

3.3. Liikumise üldmudelid

3.3.1. Kulgemine

Liikumised looduses võivad erineda mitmete tunnuste poolest. Erinevaid liikumisi on väga palju. Siiski piisab kõigi liikumiste kirjeldamiseks lõplikust arvust mudelitest, mida nimetatakse **liikumise üldmudeliteks**. Liikumise üldmudelite arv on iga vaateja enda otsustada. Liikumise üldmudeleid võib olla kuni kuus: kulgemine, pöörlemine, kuju muutumine, mahu muutumine, võnkumine ja laine. Samas võib mahu muutumist vaadelda kuju muutumise ühe alaliigi või piirjuhuna, lainet võnkumise üldistusena või hoopis vastupidi: võnkumist laine piirjuhuna. Iga sellist teguviisi võib põhjendada aga võib ka kritiseerida. Tõe monopoli pole mitte kellelgi. Meenutagem, et füüsika ei ole puhas täppisteadus nagu matemaatika, kus on ainult üks õige vastus. Kui käsitleda lainet võnkumise üldistusena, siis tulevad vaatluse alla neli iseseisvat liikumise üldmudelit: **kulgemine, pöörlemine, kuju muutumine ja võnkumine**.

Kui keha kõik punktid liiguvad ühesuguseid jooni mööda ja ühesuguste kiirustega, siis jääb keha asend ruumis reeglina samaks. Sellist liikumist nimetatakse **kulgemiseks** ehk võõrsõnaga väljendudes **translatsiooniks**. Kulgeval liikumisel muutub keha asukoht. Kulgevalt liiguvad näiteks auto täiesti sirgel teelõigul, rippraudtee vagun ja kandik kelneri käes.

(Peil 3.5. – video kulgemise kohta – veebiõpikusse)

Kui keha kõik punktid liiguvad ühtemoodi, siis võib keha kuju ja mõõtmed arvestamata jätta ning käsitleda vaid ühe punkti liikumist. See tähendab, et me saame keha liikumise kirjeldamisel kasutada **punktmassi** mudelit (p.3.1.1). Kui võime vaadelda keha punktmassina, siis osutuvad kulgevateks väga paljud liikumised. Mõõtmeid omava keha kulgliikumist on siiski kombeks defineerida nii, et kulgemine selgesti eristuks asendi muutumisest ehk pöörlemisest. **Kulgemiseks** nimetatakse siis liikumist, mille korral keha mistahes kahte punkti ühendav lõik jääb kogu liikumise vältel iseendaga paralleelseks.

Sageli peetakse iseseisvaks liikumismudeliks **tiirlemist** ehk liikumist mööda ringjoont. Käesolevas kontekstis osutub tiirlemine aga kulgliikumise alaliigiks. Sirgjoonelise, ringjoonelise ja kõverjoonelise liikumise eristamine on vajalik liikumiste liigitamisel liikumistee ehk trajektoori kuju järgi. Sellega tegeleme lähemalt *Mehaanika* kursuses.

3.3.2. Pöörlemine

Looduses esineb üsna palju liikumisi, mille korral muutub keha asend. Sellist liikumist nimetatakse **pöörlemiseks**. Asendist on mõtet rääkida siis, kui kehas leidub punkte, mis antud kontekstis ise ei liigu. Need punktid moodustavad **pöörlemistelje**. Keha kõik ülejäänud punktid liiguvad ümber pöörlemistelje mööda ringjooni.

Pöörlemisteljega ristuvat lõiku, mis ühendab mistahes muud keha punkti pöörlemisteljega, nimetatakse selle punkti radiaallõiguks ja lõigu pikkust vastava punkti **raadiuseks**. Pöörlevat liikumist vaadeldes tähendame, et mingi kindla punkti radiaallõigu järjestikused asendid on erinevad. Lõigu alguspunkt on paigal, lõpppunkt aga liigub mööda ringjoont. Erinevust radiaallõigu asendites on kombeks kirjeldada mõistega **nurk**. Kui kulgemisel läbitakse ajaühiku jooksul mingi pikkus, siis pöörlemisel läbitakse ajaühiku jooksul mingi nurk. Teljest kaugemal asuvad ehk suurema raadiusega punktid liiguvad mööda suurema raadiusega ringjooni ja nende kiirus on suurem. Teljel asuvad punktid on paigal.

Pöörlemine ehk **rotatsioon** on liikumise liik, mille korral kehas leidub punkte, mis ise ei liigu. Need punktid moodustavad pöörlemistelje. Keha kõik teised punktid liiguvad ümber pöörlemistelje mööda ringjooni. Pöörleval liikumisel muutub keha asend. Pöörlevad näiteks grammofooniplaat, autoratas, Maakera ja kellaosutid.
(Peil 3.5. – video pöörlemise kohta – veebiõpikusse)

3.3.3. Kuju muutumine

Esineb liikumisi, mille korral muutuvad keha punktide omavahelised kaugused. Sellist liikumist nimetatakse keha **kuju muutumiseks** ehk **deformatsiooniks**. Pisikese keeleuuendusena võiks asuda kuju muutumist edaspidi lühendatult nimetama *kujumiseks*, aga otsustagu tulevik, kas see muudatus osutub elujõuliseks. Enamasti muutuvad keha punktide omavahelised kaugused ühel sihil üks ja seesama arv kordi. Kui näiteks keha tervikuna mingi arv kordi pikeneb, siis sama arv kordi pikeneb ka vaid üks pool kehast. Sellisel juhul räägitakse **ühtlasest** deformatsioonist.
(Peil 3.5. – video kuju muutumise kohta – veebiõpikusse)

Deformatsioon tekib reeglina nii, et keha mingi tahk fikseeritakse ja keha teisele tahule rakendatakse jõudu. Kui jõud rakendub risti pinnaga, millele ta mõjub, siis on tegemist kas **surve** või **venitusega**. Kui jõud rakendub mitte ühtlaselt kogu pinnale vaid ainult selle ühele osale, siis tekib **kõverdus**. Kui jõud rakendub samas tasandis pinnaga, milles jõud mõjub, siis tekib deformatsioon, mida nimetatakse **nihkeks**. Kui lisaks eelnevale rakendub jõud ka risti mingisuguse uuritava keha läbiva teljega, siis toimub keha eri osade pöördumine ümber nimetatelje erinevate nurkade võrra ning tekkivat deformatsiooni nimetatakse **väändeks**.

Kui välisjõu mõju lõppemisel keha esialgne kuju taastub, siis nimetatakse deformatsiooni **elastseks**. Kui välisjõu mõju lõppemisel keha esialgne kuju ei taastu, siis nimetatakse deformatsiooni **plastseks**. Deformatsiooni näideteks on kumminööri venitamine, metalljoonlaua painutamine, pesu väänamine või plastiliini voolimine.

Kuju muutumise erijuhuks on keha **mahu muutumine**. Kui keha paisub või tõmbub kokku kõikides suundades ühtviisi, siis jääb selle kuju varasemate kujudega sarnaseks. Tavakeeles pole sel juhul üldse kombeks tunnistada, et on toimunud keha kuju muutus. Tühjenemisel kokku tõmbuv õhupall säilitab ju oma esialgse kerakujulisuse. Füüsikaliselt rangelt võttes kuju siiski muutub, sest muutuvad keha punktide vahekaugused. Mis siis, et vahekaugused keha punktidest moodustatud mistahes paarides muutuvad üks ja seesama arv kordi. Mahu muutumise headeks näideteks on teraskuuli kokkutõmbumine jahtumisel, beseekoogi paisumine küpsetamisel ja tühjeneva õhupalli kokkutõmbumine.

(Peil 3.5. – video mahu muutumise kohta – veebiõpikusse)

3.3.4. Võnkumine ja laine

Looduses esineb palju **perioodilisi** ehk kindla ajavahemiku tagant korduvaid liikumisi. Neid liikumisi nimetatakse **võnkumisteks** ja vastavat ajavahemikku **võnkeperioodiks**. Võnkumise korral liiguvad keha punktid edasi-tagasi sama teed mööda. Võnkumine on keha perioodiline liikumine tasakaaluasendi ümber. Kehale mõjub tasakaaluasendi poole suunatud jõud, mis tasakaaluasendile lähenemisel liikumist kiirendab, sellest asendist kaugenemisel aga pidurdab. Võnguvad näiteks kellapendel, automootori kolb, löögi saanud ämbris loksuv vesi või hüvastijätuks lehvitat käsi.

(Peil 3.5. – video võnkumise kohta – veebiõpikusse)

Laineks nimetatakse enamasti võnkumise edasikandumist ruumis. Kui kala näksib õnge otsa riputatud sööta ja paneb õngekorgi võnkuma, sunnib üles-alla liikuv kork ka lähedalasuvad veeosakesed võnkuma. Veeosakeste võnkumine kandub lainena mööda veepinda järjest kaugemale. Laine oluliseks omaduseks on see, et edasi kandub vaid võnkumine ehk liikumine, mitte aga aine ise. Seda peaks olema lihtne mõista, kui vaadelda näiteks rahvamassi poolt staadionil tekitatavaid laineid.

Laine defineerimine võnkumise kaudu on induktsioon – liikumine lihtsamalt keerulisemale või üksikult üldisele. Aga võib toimida ka deduktiivselt, defineerides võnkumist laine erijuhuna. Laine korral liigub ruumis edasi kehade või väljade kindel paigutus ehk konfiguratsioon. Olukord, mis mingil hetkel valitses ühes ruumi punktis, kordub mingi aja möödumisel naaberpunktis. Laine on võnkumise levimine ruumis. Üldjuhul kaasneb sellega ka energia levik. Arutledes deduktiivselt ehk liikudes üldiselt üksikule, võime aga väita, et võnkumine on laine erijuht, mille korral energia levimist ruumis ei toimu. Lainefüüsika keeles nimetatakse võnkumist seisulaineks. Lähemalt tegeleme sellega *Mehaanika* kursuses.

Laineteks on näiteks merelained, helilained ja laulupeoliste tekitatud inimlained. Laineliselt võib aga levida ka väli. Parim näide selle kohta on elektromagnetlaine. Kuna võnkumine ja laine on niivõrd sarnased, et ühte võib defineerida teise kaudu ja vastupidi, siis on mõtet kasutada mõlema kohta ühist nimetust – võõrsõna **ostsillatsioon**.

(Peil 3.5. – video laine kohta – veebiõpikusse)

STOP

1. Kulgemine on liikumise liik, mille korral kõik keha punktid liiguvad ühesuguse kiirusega piki sama kujuga joont. Kulgeval liikumisel muutub keha asukoht.
2. Pöörlemine on liikumise liik, mille korral kehas leidub punkte, mis ei liigu. Need punktid moodustavad pöörlemistelje. Keha kõik teised punktid liiguvad ümber pöörlemistelje mööda ringjooni. Pöörleval liikumisel muutub keha asend.
3. Kuju muutumine on liikumise liik, mille korral muutuvad keha punktide omavahelised kaugused. Kuju muutumise erijuhuks on mahu muutumine, mille korral vahekaugused keha punktidest moodustatud mistahes paarides muutuvad üks ja seesama arv kordi.
4. Võnkumine ja laine on liikumise liigid, millele on omane perioodilisus ehk korduvus. Mingi kindla aja ehk perioodi möödumisel kordub seesama liikumine.

5. Laine korral liigub ruumis edasi kehade või väljade kindel paigutus ehk konfiguratsioon. Olukord, mis mingil hetkel valitses ühes ruumi punktis, kordub mingi aja möödumisel naaberpunktis. Laine on võnkumise levimine ruumis. Üldjuhul kaasneb sellega ka energia levik.
6. Võnkumine on keha perioodiline liikumine tasakaaluasendi ümber. Samas on võnkumine laine erijuht, mille korral energia levimist ruumis ei toimu. Lainefüüsika keeles nimetatakse seda seisulaineks.

3.4. Aine ja väli

3.4.1. Aine, kehad ja vastastikmõju

Looduses vaadeldavad objektid esinevad kahel peamisel kujul. Näiteks raamat, veekogu, nutitelefoni ja inimkeha on ainelised. Samas valgus, mida me näeme ja kuuma pliidi soojuskiirgus, mida me käega tunneme, on väljalised. Looduse kaks erinevalt käituvat põhivormi on **aine** ja **väli**.

Aine all mõistetakse füüsikas kõike seda, millest koosnevad kehad. Ainelised objektid võtavad alati enda alla mingi ruumi, kuhu teisi samalaadseid objekte asetada ei saa. Aine tõrjub teist ainet. Kui me pistame käe veega täidetud pesukaussi, siis veetase kausis tõuseb, sest käsi tõrjub oma ruumala ulatuses vett tema endisest asendist välja. Me ei saa astuda läbi seina, sest meie aine ei saa olla seina ainega samaaegselt samas ruumiosas. Aineist koosnevad kehad võivad olla nii suured kui väikesed, kuid mitte pisemad kui üksikud aineosakesed. Kehadel on kindlad mõõtmed, väljal neid olla ei pruugi. Aine hulka saab määrata aineosakesi loendades või vastava ainekoguse massi määraates.

Lisaks koosnemisele **ainest** ja **mõõtmete** omamisele on kehade omadusteks veel **liikumine**, kalduvus säilitada oma liikumisoletkut ehk **inertsus** ja võime osaleda **vastastikmõjudes**. Vastastikmõju on see põhjus, mis lõpuks ikkagi muudab kehade liikumisoletkut. Sõna *vastastikune* rõhutab asjaolu, et kui üks keha mõjutab teist, siis teine mõjutab alati ka esimest. Just vajadus kirjeldada vastastikmõjusid viib meid välja mõiste kasutamiseni.

3.4.2. Väli kui vastastikmõju vahendaja

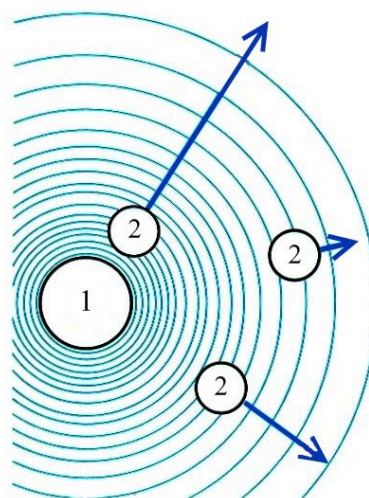
Kui me tahame kelgu liikuma panna, peame me kelgu kas tagant tõukama või eestpoolt nõõri vahendusel tõmbama. Kelgu liikumapanemiseks peame me kas olema kelguga vahetus kokkupuutes või kasutama midagi, mis on meie ja kelgu vahel. Kuidas aga saab Maa enda poole tõmmata kukkuvat kivi, kui ta sellega kokkupuutes pole? Mismoodi saab püsिमagnet tõugata kasvõi läbi tühjuse teist püsिमagnetit? Kuidas saavad kehad üksteist mõjutada ilma kokkupuuteta või teiste kehade vahenduseta? (Peil 3.6. – foto: rõngasmagnetid)

Selle üle juurdlesid füüsikud pikalt, enne kui taipasid, et miski, mis kehade vahelisi vastastikmõjusid vahendab, on siiski realselt olemas. Näiteks lähendades teineteisele püsिमagnetite samanimelisi pooluseid, tunneme lihaspinge kaudu, et miski on magnetite vahel olemas. See miski avaldab üha tugevnevat vastupanu, kui me tõukejõu kiuste püsिमagneteid kokku suruda üritame. Aga see pole aine, vaid aineist sootuks erinev loodusobjekt. Kehade vastastikmõju vahendajat nimetatakse **väljaks**. Välja reaalset olemasolu tõestab fakt, et vastastikmõju levib lõpliku

kiirusega. See, et elektromagnetväli levib ruumis absoluutkiirusega c , on kinnitust leidnud lugematutes katsetes.

Me oleme juba korduvalt kokku puutunud sellega, et mingit kindlat loodusobjekti kirjeldab vaatleja kujutus, mida me nimetame füüsikaliseks suuruseks. Loodusnähtust nimega **vastastikmõju** kirjeldab füüsikaline suurus nimega jõud. **Jõud** F (inglk. *force*) iseloostab vastastikmõju tugevust või ägedust. Jõud on vektoriaalne suurus, mistõttu me peame joonistel alati näitama vastava vektori suunda. Jõud nende kehade vahel, mille mõõtmeid võib mitte arvestada, on kas **tõuke-** või **tõmbejõud**. Kui me võime kehi vaadelda punktidenä, siis jõud mõjub piki neid punkte ühendavat sirget. Jõud mõjub alati mingile kehale. Enamasti me saame ka näidata seda keha, mille poolt jõud teisele kehale mõjub. Kasutades jõu mõistet, võime väita, et väli on jõu tekkimise võimalikkus. Ühe keha poolt tekitatud välja olemasolu saame me kindlaks teha ainult jõu kaudu, mis mõjub teisele kehale.

Meile makromailmast tuntud gravitatsiooni- jõud või elektromagnetjõud nõrgenevad kiiresti vastastikmõjus olevate kehade vahekauguse suurendamisel. Need jõud on pöördvõrdelised kehade vahekauguse ruuduga. Seetõttu võime väita, et ka vastavad väljad nõrgenevad järsult eemaldumisel välja tekitavast kehast. Me võime sellist välja kujutleda nagu nähtamatut gaasipilve, mis välja tekitava keha läheduses on tihe, aga kaugenemisel kehast kiiresti hõreneb. Kõrval toodud joonisel (J.3.1) on näidatud keha 1 poolt tekitatud välja nõrgenemist kaugenemisel kehast 1. Kehale 2 selles väljas mõjuva jõu vektor lüheneb kaugenemisel järsult.



Väljasid pole võimalik näha, kuid mõnel juhul saab neid kaudselt siiski nähtavaks muuta. Näiteks magnetvälja saame visualiseerida rauapuru abil. Meile tavalust tuntud gravitatsiooniväljal või elektromagnetväljal pole kindlaid mõõtmeid, nad võivad ulatuda lõpmata kaugemale. Väljad ei sega üksteist. Mitu välja saavad kehale mõjuda üksteisest sõltumatult. Väljad omavad energiat, millest lähemalt allpool (p.3.6.3). Aine ja väli võivad teatud tingimustel muunduda vastastikku teineteiseks. Sellest tuleb täpsemalt juttu *Mikro- ja megamaailma füüsika* kursuses.

3.4.3. Mõju vastastikusus. Newtoni III seadus.

Lauset Väli on vastastikmõju vahendaja tõlgendatakse sageli valesti. Nimelt kasutatakse sõna *vahendaja* kommertsiaalset tähendust, mille kohaselt vahendaja ostab midagi ühelt äripartnerilt ja müüb teisele edasi – mõistagi vaheltkasuga. Sellise vahendaja jaoks on mõlemad partnerid põhimõtteliselt samaväärsed. Väli aga kuulub kindlalt ühele mõjus osalevatest kehast. Kummalgi vastastikmõjus osaleval kehal on oma väli, mille vahendusel ta mõjutab teist keha.

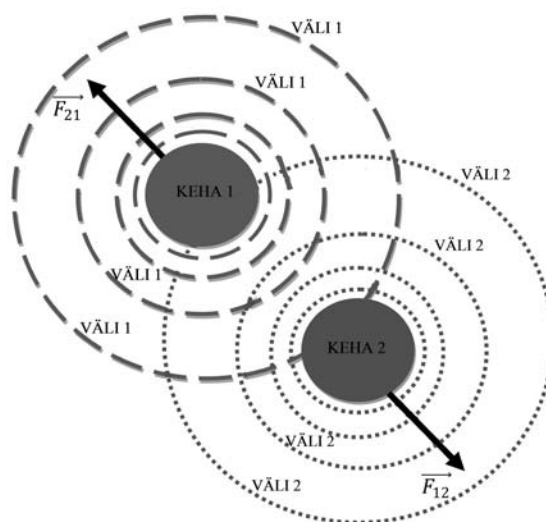
Allpool toodud joonisel on detailselt kujutatud kahe keha vastastikmõju mehhanismi. Keha 1 ümbritseb tema poolt tekitatud väli 1. Selles väljas mõjub kehale 2 tõukejõud F_{12} . Topeltindeksiga rõhutame siin asjaolu, et kõnealune jõud mõjub esimeselt kehalt

teisele kehale. Samas mõjutab keha 2 poolt tekitatud väli 2 omakorda keha 1 tõukejõuga F_{21} . Need jõud mõjuvad piki kehade keskmeid ühendavat sirget ning on võrdsed ja vastassuunalised. Matemaatiliselt võib seda kirja panna kujul $F_{12} = -F_{21}$,

kus miinusmärk rõhutab kahe jõu vastassuunalisust.

Väide et jõud, millega kaks mistahes keha teineteist mõjutavad, on suuruseelt võrdsed ja vastassuunalised, kannab **Newtoni III seaduse** nime. Mistahes mõjuga kaasneb alati sama suur vastumõju. Selles seisnebki mõju vastastikusus.

Joonis 3.2. Vastastikmõju mehhanism →



3.4.4. Avatud ja suletud süsteemid

Vastastikmõjus olevad kehad on üksteisest mõjutatud ning seepärast teatud viisil seotud. Sellised kehad moodustavad ühtse süsteemi. Kehade **süsteemiks** nimetatakse omavahel mingil viisil seotud ehk vastastikmõjus olevate kehade hulka.

Kehade süsteemid võivad olla suletud või avatud. **Suletuks** nimetatakse süsteemi, millesse kuuluvad kehad on vastastikmõjus ainult omavahel ja millel puudub aine- või energiavahetus väliskeskkonnaga. Kui aga süsteemile mõjuvad jõud süsteemiväliste kehade poolt või süsteemil esineb aine- või energiavahetus väliskeskkonnaga, on tegemist **avatud** süsteemiga.

STOP

1. Vastastikmõju on loodusnähtus, mille tulemusena enamasti muutub selles osalevate kehade liikumisolek. Ühe keha liikumisolek võib mitte muutuda vaid juhul, kui mõjud vastastikku kompenseeruvad.
2. Jõud on vastastikmõju tugevust kirjeldav suunda omav füüsikaline suurus. Jõu suunatus tähendab seda, et jõud mõjub alati ühelt kehalt mingile teisele kehale.
3. Aine on looduse põhivorm, millest koosnevad kõik kehad.
4. Väli on looduse põhivorm, mis vahendab vastastikmõjusid kehade vahel.
5. Kehade süsteemiks nimetatakse omavahel vastastikmõjus olevate kehade hulka.
6. Suletuks nimetatakse süsteemi, millesse kuuluvad kehad on vastastikmõjus ainult omavahel ja millel puudub aine- või energiavahetus väliskeskkonnaga.
7. Avatuks nimetatakse süsteemi, millesse kuuluvad kehad on vastastikmõjus ka süsteemi mittekuuluvate kehade ga ja/või süsteemil esineb aine- või energiavahetus väliskeskkonnaga.

3.5. Kehade liikumisoleku muutumine

3.5.1. Kehade inertsus. Newtoni I seadus.

Füüsika uurib kehade liikumist ja vastastikmõju. Teame juba, et erinevaid liikumisolekuid võib olla palju. Seejuures võib keha liikumisolek muutuda. Liikumisolek saab muutuda vastastikmõju toimel. Kui liikumisoleku muutumise põhjuseks on kehade vaheline vastastikmõju, siis on arusaadav, et vastastikmõju puudumisel ei saa muutuda liikumise kiirus ega suund. Järelkult liigub vastastikmõju puudumisel keha ühtlaselt ja sirgjooneliselt. Keha võib aga ka püsivalt paigal seista. On ju paigalseis ka teatud liiki liikumisolek. Paigalseis on liikumine kiirusega, mille väärtus on null.

Samas sellist olukorda, kus mingile kehale teised kehad üldse ei mõju, on pea võimatu leida. Mõjude puudumisega on samaväärne aga olukord, kus vastastikmõjud on kompenseerunud ehk siis nad tasakaalustavad üksteist. Näiteks õngekork seisab tasakaaluasendis, kui allapoole mõjuv raskusjõud on tasakaalus vee poolt tekitatud üleslükkejõuga. Langevarjur laskub muutumatu kiirusega siis, kui Maa poolt mõjuvat raskusjõudu tasakaalustab õhu takistusjõud.

(Peil 3.7. – fotod: õngekork veepinnal ja laskuv langevarjur)

Selliste järeldusteni jõudis juba Galileo Galilei, aga selgesti sõnastas kõnealuse looduseaduse Isaac Newton. Ta tegi seda järgmiselt: kui kehale ei mõju teised kehad või kui teiste kehade mõjud on tasakaalus, siis on keha kas paigal või liigub ühtlaselt ja sirgjooneliselt. Tänapäeval tunneme seda looduseadust **Newtoni I seadusena**.

Oleme kõik kogenud, et mitte ühegi keha liikumist ei saa silmapilkselt ega vaevata muuta. See, et kehad püüavad oma liikumisolekut säilitada, on nende üldine omadus. Nähtust, mis seisneb kehade kalduvuses oma liikumisolekut säilitada, nimetatakse **inertsiks** ja kehade vastavat omadust **inertsuseks**. Newtoni esimeses seaduses ongi tegemist inertsiga. Kui teiste kehade mõju ei ole, siis keha liikumisolek ei muutu. Naljaga pooleks võib öelda, et *iga keha on just täpselt nii laisk kui tal olla lastakse*. Muuseas kehtib see hästi ka inimkehade kohta ☺. Kuna Newtoni esimene seadus käsitleb inertsinähtust, siis nimetatakse teda sageli ka **inertsiseaduseks**.

3.5.2. Liikumisoleku muutumine. Kiirendus.

Vastastikmõju puudumisel keha liikumine ei muutu. Kui aga kehale mõjuvad jõud pole tasakaalus, siis hakkab liikumisolek muutuma. Seejuures ei toimu muutus muidugi silmapilkselt. Iga muutus võtab inertsitõttu aega. Liikumise muutumist saab iseloomustada muutumise kiirusega. Me saame seda iseloomustada suurusega, mis näitab, kui palju muutub liikumiskiirus ühes ajaühikus ehk sekundiga. Liikumisoleku muutumise kiirust iseloomustavat füüsikalist suurust nimetatakse **kiirenduseks**.

Kiirendus on kiiruse muutumise kiirus. Ta näitab, kui palju muutub kiirus ajaühikus. Kiirendust saab arvutada, jagades kiiruse muudu ehk lõppkiiruse v ja algkiiruse v_0 vahe ajaga, mille jooksul kiirus muutus. Kiirenduse tähiseks valemikes on a (lad.k. *acceleratio* – kiirendus). Niisiis,

$$a = \frac{v - v_0}{t}. \quad (3.4)$$

Kiirenduse mõõtühikuks süsteemis SI on järelikult kiiruse ühiku üks meeter sekundis ja aja ühiku sekund – jagatis. See on üks meeter sekundis sekundi kohta või siis lühendatult **üks meeter sekundi ruudu kohta** (1 m/s^2).

3.5.3. Kiirenduse võrdelisus jõuga. Newtoni II seadus.

Kui me asume katseliselt uurima, kuidas erineva tugevusega jõud keha liikumisoletkut muudavad, siis märkame, et suurem jõud jaksab liikumisoletkut kiiremini muuta. Teisisõnu – suurem jõud annab kehale suurema kiirenduse.

Samas on kehad erinevad. Mõne keha liikumist on teistega võrraldes raskem muuta. Sel juhul öeldakse, et vastav keha on suurema inertsusega. Kehade inertsuse mõõduna kasutatakse füüsikalist suurust, mida nimetatakse massiks. **Mass** m (lad.k. *massa*) iseloomustab keha võimet oma liikumisoletkut säilitada. Suurema massiga keha inertsus on suurem ja sama suur jõud suudab sellele anda väiksema kiirenduse.

Katsetele ja ülaltoodud arutlusele tuginedes jõudis Newton järelduseni, et kui kehale mõjub jõud, siis saab ta kiirenduse, mis on võrdeline selle jõuga ning pöördvõrdeline keha massiga:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \quad (3.5)$$

Tegemist on mehaanika põhiseadusega, mis kannab ka **Newtoni II seaduse** nimetust. Seda, et jõud ja kiirendus on mõlemad vektoriaalsed suurused, rõhutame vektori-märkide kasutamise valemis 3.5. Vastavalt vektoriaalsete suuruste käsitlemise eeskirjadele (p.3.1.4) on jõud ja kiirendus vektoritena alati sama suunaga. Jõud põhjustab iseendaga samasuunalise kiirenduse.

Valemit 3.5 võib ka käsitleda massi formaalse definitsioonina. Seega

$$m = \frac{F}{a}, \quad (3.6)$$

keha mass näitab, kui suurt jõudu on vaja selleks, et anda kehale ühikulist kiirendust. Massi ühik süsteemis SI on **kilogramm**, mis on üks süsteemi põhiühikutest ja mille definitsiooniga tegelesime eespool (p. 2.3.2). Jõu ühik süsteemis SI kannab Isaac Newtoni auks nime njuuton ja see defineeritakse valemist 3.6 tuleneva seose $F = m a$ abil. **Üks njuuton** on jõud, mis kehale massiga üks kilogramm annab kiirenduse üks meeter sekundis sekundi kohta (või: üks meeter sekundi ruudu kohta):

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot 1 \text{ m/s}^2.$$

STOP

1. Inertsus on keha omadus säilitada oma liikumisoletkut.
2. Kiirendus on füüsikaline suurus, mis kirjeldab mingi keha liikumisoletku muutumist. Kiirendus näitab, kui palju muutub keha kiirus ajaühikus.
3. Mass on füüsikaline suurus, mis on keha inertsuse mõõduks. Mass on ka suurus, mille abil on võimalik universaalselt mõõta aine kogust.
4. Üks njuuton on jõud, mis kehale massiga üks kilogramm annab kiirenduse üks meeter sekundis sekundi kohta (või: üks meeter sekundi ruudu kohta)

3.6. Protsessid ja olekud

3.6.1. Töö kui protsessi kirjeldav suurus

Füüsika uurib looduses eksisteerivaid ainelisi ja väljalisi objekte. Füüsika objektideks on ka loodusnähtused. Selle juures eristatakse kahte mõistet – seisund ja protsess.

Seisund ehk **olek** iseloomustab objekti või mitmest objektist koosnevat süsteemi ühel kindlal ajahetkel. Seisund on näiteks raamatu lebamine laual, auto liikumine mingi kindla kiirusega, gaasi viibimine mingil konkreetsel rõhul ja temperatuuril. Kui aga olek muutub, siis on tegemist protsessiga. **Protsessiks** nimetatakse ainelise või väljalise objekti üleminekut ühest olekust teise. Kui olek on seotud kindla ajahetkega, siis protsess toimub mingi ajavahemiku kestel.

Kui keha liigub, siis me saame rääkida tema liikumisolekust, mida iseloomustab liikumise suund ning kiirus. Kui aga liikuvale kehale mõjuvad teised kehad, siis vastastikmõju tagajärjel liikumisolek muutub. Vastastikmõju võib muuta nii liikumise suunda, kiirust kui ka keha asendit ning kuju. Iga mehaaniline liikumine on protsess. Seda protsessi kirjeldavat füüsikalist suurust nimetatakse mehaaniliseks tööks.

(Peil 3.8. – foto töö kohta: laps kelku vedamas)

Töö on füüsikaline suurus, mis kirjeldab protsessi – keha või kehade süsteemi üleminekut ühest olekust teise. Töö sõltub muutuse ulatusest, mida näitab keha poolt läbitud teepikkus. Aga töö sõltub ka pingutusest, mida muutuse saavutamiseks oli vaja teha. Pingutust näitab mõjuv jõud. Seetõttu on töö kui füüsikaline suurus jõu ja selle jõu mõjumise sihis läbitud teepikkuse korrutis. Tasub rõhutada, et füüsika mõttes tehakse tööd vaid siis, kui on täidetud mõlemad tingimused: keha liigub ja kehale mõjub jõud. Kui me lihtsalt hoiame käes rasket kohvrit, siis ei tee me vaatamata väsimisele mehaanilist tööd, kuna liikumine puudub. Aga me teeme tööd selle kohvri tassimisel maja esimeselt korrusel teisele. Tööd tähistatakse eestikeelsete füüsikaõpikute valemites tavaliselt tähega A (sks.k. *Arbeit* – töö). Eeltoodu põhjal saab juhu, kui keha liigub jõu mõjumise suunas, tööd arvutada valemist:

$$A = F \cdot s . \quad (3.7)$$

Töö mõõtühikuks on inglise füüsiku James Joule [džaul], (1818-1889) nime järgi **džaul** (1 J). Üks džaul (1 J) on töö, mille teeb jõud üks njuuton, kui mingi keha liigub selle jõu mõjul ühe meetri võrra. Mehaanilise tööga seonduvat õpime lähemalt tundma järgmises, *Mehaanika* kursuses.

3.6.2. Energia kui süsteemi olekut kirjeldav suurus

Töö on protsess, mille käigus keha seisund ehk olek muutub. See tähendab, et reeglina on mingis kindlas olekus viibiv keha võimeline tööd tegema. Näiteks surub haamer tänu liikumisele naela puu sisse ning väljavenitatud vedru lükkab ukse kinni. Kui keha on seisundis, mis annab talle võime tööd teha, siis öeldakse, et keha omab energiat.

Energiaks nimetatakse füüsikalist suurust, mis iseloomustab keha võimet teha tööd. Tööd saab teha ainult siis, kui keha omab energiat, tööd tehakse energia arvel. Töö tegemise käigus energia muutub. Kuna protsess viib keha ühest olekust teise, siis on töö algoleku ja lõppoleku energiatega vahe

$$A = E_1 - E_2. \quad (3.8)$$

Energia on otseselt seotud tehtava tööga, mistõttu tema mõõtühik sama, mis töö. Energia mõõtühikuks on džaul (1 J).

3.6.3. Kineetiline ja potentsiaalne energia

Kehad ja mitmest kehast koosnevad süsteemid võivad energiat omada tänu nende liikumisele teiste kehade suhtes või vastastikmõjule teiste kehadega. Kehade liikumisoleku energiat nimetatakse **kineetiliseks** energiaks (kr.k. *kinetikos* – liikuma panija). Kineetilist energiat omavad näiteks sõitev auto, lendav püssikuul ja pöörlev hooratas. Põhikooli mehaanikas saime juba teada, et kiirusega v liikuval ja massi m omaval kehal on kineetiline energia, mis avaldub valemiga

$$E_k = \frac{mv^2}{2}. \quad (3.9)$$

(Peil 3.8. – fotod energia kohta: püssikuuli lend ja vibulaskja)

Kehade omavahelise vastastikmõju energiat nimetatakse **potentsiaalseks** energiaks (lad.k. *potentia* – võime). Samas me ka teame, et vastastikmõju olemasolu tähendab ühe keha paiknemist teise keha poolt tekitatud väljas. Looduses esineb olukordi, mil me ei oska selgesti näidata välja tekitavat keha ja see pole ka oluline. Kui me näiteks uurime Päikese valguse neeldumist mingis kehas, siis ei huvita meid need Päikese aatomid, mis konkreetse valguslaine tekitasid. Seetõttu võime ka rääkida **välja energiast**, mille all me mõistame potentsiaalset energiat, mida omaks sellesse välja paigutatav keha. Potentsiaalset energiat omavad näiteks ülestõstetud sangpomm, vinnastatud vedru ja tõukuvad magnetid. Sangpommi korral on see tegelikult Maa gravitatsioonivälja ehk raskusvälja energia, vedru või magnetite korral aga mingi elektromagnetvälja energia. Põhikooli füüsikas õppisime juba ka seda, et massi m omav ja kõrgusel h paiknev keha omab raskusväljas potentsiaalset energiat

$$E_p = m g h. \quad (3.10)$$

Suurus g selles valemis näitab ühikulise massiga kehale mõjuvat raskusjõudu ($g = 9,8 \text{ N/kg}$). Peagi õpime gümnaasiumi *Mehaanika* kursuses, et suurus g on tegelikult kehade vaba langemise kiirendus.

STOP

1. Töö on füüsikaline suurus, mis kirjeldab protsessi – keha või kehade süsteemi üleminekut ühest olekust teise. Töö on kehale mõjuva jõu ja keha poolt selle jõu mõjumise sihis läbitud teepikkuse korrutis.
2. Energia on füüsikaline suurus, mis kirjeldab keha või kehade süsteemi ühte kindlat olekut. Energia on keha või jõu võime teha tööd.
3. Keha kineetiline energia on tingitud keha liikumisolekust. Kineetilise energia olemasolu kehal on niisama suhteline kui liikumine ise.
4. Keha potentsiaalne energia on tingitud keha vastastikmõjust teiste kehadega ehk keha paiknemisest teiste kehade väljas.
5. Üks džaul (1 J) on töö, mille teeb jõud üks njuuton, kui mingi keha liigub selle jõu mõjul ühe meetri võrra.

3.7. Võimsus ja kasutegur

3.7.1. Võimsus kui töö tegemise kiirus

Kui autokoormatäis ehituskive on vaja tõsta kolmandal korrusel müüri laduvate töömeeste juurde, tuleb teha tööd. Kui need kivid tassib üles üks töömees, võib selle töö tegemine võtta aega mitu tundi. Kraana abil saab aga sama töö tehtud vaid mõnekümne sekundiga. Kraana on suuteline seda tööd kiiremini tegema. Selle kohta öeldakse, et kraana on töömehest suurema võimsusega.

(Peil 3.8. – fotod võimsuse kohta: kivide vedamine seljas ja tõstmine kraanaga)

Võimsuseks nimetatakse füüsikalist suurust, mis iseloomustab töö tegemise kiirust.

Võimsuse tähiseks valemites on N . Kui mingi töö A tehakse ajavahemiku t jooksul, siis saab võimsuse arvutada valemist

$$N = \frac{A}{t}. \quad (3.11)$$

Võimsuse mõõtühikuks on vatt (1 W). **Üks vatt** (1W) on võimsus juhul, kui üks džaul tööd tehakse ära ühes sekundis. Ka võimsusega seonduvat õpime lähemalt tundma järgmises füüsikakursuses *Mehaanika*.

3.7.2. Seadme nimivõimsus ja kasutegur

Iga konkreetset masinat või seadet võib iseloomustada **nimivõimsusega** ehk võimsusega, mida see seade on suuteline normaalses tööolukorras arendama. Reeglina on seade suuteline lühiajaliselt arendama ka suuremat võimsust, aga nimivõimsuse all mõeldakse võimsust olukorras, mida seade on suuteline pikaajaliselt taluma. Võib rääkida ka elusorganismide võimsusest. Inimese võimsus pikemalt kestvas füüsilises töös on ligikaudu 100 W, automootori nimivõimsus 20 - 200 kW ning lennuki Boeing 737 mootorite nimivõimsus koguni 35 MW.

Mitte kunagi ei õnnestu tööd teha nii, et kogu tehtud töö läheb vajaliku eesmärgi saavutamiseks. Kasulik töö on alati väiksem kogu tööst. Seepärast kasutatakse konkreetse seadme iseloomustamiseks kasutegurit. **Kasutegur** on füüsikaline suurus, mis näitab kasuliku töö ja kogu töö suhet. Ta avaldatakse reeglina protsentides.

STOP

1. Võimsus on füüsikaline suurus, mis näitab, kui kiiresti tööd tehakse. Võimsus on tehtud töö ja selleks kulunud aja suhe.
2. Üks vatt (1W) on võimsus juhul, kui üks džaul tööd tehakse ära ühes sekundis.
3. Kasutegur on füüsikaline suurus, mis näitab kasuliku töö ja kogu töö suhet.

4. Füüsika üldprintsüübid

4.1. Põhjuslikkus ja juhuslikkus

4.1.1. Füüsika ja põhjuslikkus

Füüsika uurib loodusobjektidega toimuvaid nähtusi. Nähtus ehk protsess tähendab millelegi muutumist. Igal muutumisel on aga mingi põhjus ja iga muutus kutsub

omakorda esile uue nähtuse. Nähtuste vahel esineb põhjuslik seos – üks sündmus põhjustab teise sündmuse toimumise. Füüsika uuribki looduse kõige üldisemaid põhjuslikke seoseid. Looduses toimuva mõistmine, looduse tunnetamine saab võimalikuks nähtustevaheliste põhjuslike seoste esiletoomise tulemusena.

Toome mõned näited füüsikalise põhjuslikkuse teel seotud nähtuste ahelatest:

- Õun tuleb oksa küljest lahti → õun langeb allapoole → õun jõuab maapinnale;
- Püssikuul tabab palkseina → kuul peatub seinas → seinasse tekib auk;
- Valgus neeldub kehas → see keha soojeneb → see keha paisub;
- Elektrivool läbib metallkeha → see keha soojeneb → selle keha takistus suureneb.

Füüsika üks olulisi väärtusi avaldub võimes ennustada loodusnähtusi. Vaadeldes konkreetsete objektidega asetleidvaid nähtusi ja avastades nende vahelisi põhjuslikke seoseid, saame ka uutest, veel läbi proovimata olukordades ennustada, mida üks või teine tegevus esile kutsub. Näiteks kui laseme kristallvaasi kivipõranda kohal käest lahti, siis on üpris lihtne ennustada, et vaas kukub peagi maha ja läheb katki. Kui inimesele, kes oskab sellist asjade käiku ennustada, esitada küsimus tema teadmiste päritolu kohta, siis viitab ta tõenäoliselt oma elukogemusele. Tegelikult aga seisneb see kogemus teadmistes füüsikalise põhjuslikkuse kohta. Gravitatsioon põhjustab vaasi järjest kiirema kukkumise ning kohtumisel kivipõrandaga mõjub viimane vaasile lühiajalise ning suure jõuga, mis tekitab omakorda suuri jõude vaasi osade vahel. Tulemusena habras kristallvaas puruneb. Selle ennustamiseks ei pea me olema varem täpselt samasuguse vaasiga samades tingimustes mahakukatamise katsed läbi teinud. Me oskame füüsikaliselt üldistada teiste sarnaste nähtuste vaatlemisel avastatud põhjuslikke seoseid.

Kui me nüüd üritame põhjuslikkust määratleda, siis märkame, et kipume seda tegema **tautoloogiliselt** ehk juba kasutades sõna *põhjus*. Tüüpiliselt leiame teatmeteostest definitsiooni, mille kohaselt kaks sündmust on **põhjuslikult seotud juhul, kui ühe sündmuse ehk põhjuse toimumine toob teatava vältimatusega kaasa teise sündmuse ehk tagajärje**. Käesolevas õpikus aga võime põhjuslikkuse määratlemisel kasutada vaatleja mõistet. Põhjuslikkuse kontseptsioon pole ju midagi muud kui süllogism vaatleja teadvuses. **Põhjuslikult seotuteks võime kahte sündmust nimetada siis, kui vaatleja suudab neile sündmustele vastavate kujutluste vahel tekitada süllogisme.** Ülalpool toodud kristallvaasi näites kõlaks esimene süllogism nii: 1) kõik objektid A (käest lahti lastud kehad) kuuluvad hulka B (raskusjõu mõjul kiirenevalt allapoole liikuvad ja peagi maapinnani jõudvad kehad) [eeldus 1]; 2) objekt C (kristallvaas) osutus objektiks tüüpi A (ta lasti käest lahti) [eeldus 2]; 3) objekt C kuulub ka hulka B [järelendus]. Vaasi järsku pidurdumist kokkupuutel põrandaga käsitleb teine füüsikaline süllogism ja vaasi purunemist omakorda kolmas. Nendime, et sellised põhjuslikud seosed on tegelikult füüsikalise tunnetusprotsessi tulemid ja mida üldisemad nad on, seda kindlamalt võib vaatleja neid ilma vahetu katselise kontrollita usaldada.

Põhjuslikud seosed eksisteerivad kogu looduses ja osadega neist tegelevad teised loodusteadused, kuna nende uurimismeetodid sobivad selleks füüsika meetoditest paremini. Näiteks **bioloogias** kehtivad tuntuimad põhjuslikud seosed on pärilikkuse seadused või siis toitumisahelates kehtivad seadused, mille kohaselt saakloomade arvukus määrab vastavate kiskjate arvukuse. Inimese sekkumine ökoloogilistesse protsessidesse võib tõsiselt rikkuda ökoloogilist tasakaalu. Näiteks on rebaste massiline vaktsineerimine marutaudi vastu põhjustanud Eestis viimastel aastatel

rebaste arvukuse järsu kasvu. Rebased ei sure enam massiliselt marutaudi, metsas ei jätku neile kõigile enam toitu ja nad hulguvad linnatänavatel nagu koerad.

Keemias kehtiva spetsiifilise põhjusliku seose näiteks võib tuua aine lahustuvuse sõltuvuse temperatuurist. Kui mingi vedeliku jahutamisel tekib vedelikus sade, siis võime üpris kindlasti öelda, et see vedelik osutus lahuseks ja sisaldas mingit ainet, mille lahustuvus temperatuuri langetamisel kadus ja see aine sadenes põhja. Heaks põhjusliku seose näiteks on ka keemilise reaktsiooni tasakaalu sõltuvus rõhust. Me teame, et gaseeritud vee pudeli avamisel tekivad selles vees süsihappegaasi mullid, sest rõhu alanemine põhjustab süsihappe H_2CO_3 lagunemise süsihappegaasiks CO_2 ja veeks H_2O .

Geograafias nenditi juba ammu Aafrika lääneranniku ja Lõuna-Ameerika idaranniku rannajoone kuju sarnasust. Hüpootees, et kunagi on need mandrid moodustanud ühtse terviku, viis geograafid kõnealuse sarnasuse põhjuse avastamiseni. Selleks on mandrite triiv kui kaasaegses geograafias üldtunnustatud teaduslik fakt. Maakoore suured tahked osad ehk laamad libisevad väga aeglaselt maakoore-alusel tulisel ja poolvedelal ainel. Seal, kus üks mandrilaam libiseb teise alla, kerkib teise laama äär ülespoole ja tekivad noored mäed. Samas on just seal palju tegevaid vulkaane ja esineb oluliselt rohkem maavärinaid.

Füüsika poolt uuritavad põhjuslikud seosed on reeglina üldisemad põhjuslikest seostest teistes loodusteadustes. Näiteks **keemias** oli tagajärjeks reaktsiooni tasakaalu nihkumine ja selle põhjuseks oli rõhu muutus. Füüsika aga seletab, mis asi on üldse suurus nimega **rõhk**, mille muutumine oli keemia jaoks põhjuseks. Füüsika loob rõhu tekkimise põhjusliku mudeli, mille kohaselt gaasi või vedeliku molekulid põrkuvad anuma seina aatomite või molekulidega ja mõjutavad neid jõuga. Kõikide selliste jõudude summat anuma seina pindala ühiku kohta nimetatakse rõhuks. Rõhu tekkimise põhjuseks on molekulide vahel mõjuvad jõud. Geograafia vaid nendib, et laamade libisemine põhjustab **mandrite triivi**, mis omakorda miljonite aastate jooksul muudab Maa geograafilist kaarti. Füüsika aga seletab, millisest ning kui kõrgel rõhul ja temperatuuril olevast ainest Maa sel või teisel sügavusel tõenäoliselt koosneb. Füüsika näitab, et erinevatel temperatuuridel paiknevate vedelate ainekihtide vahel esineb vältimatult konvektsioon. See tähendab, et Maa sisemuse mingis piirkonnas kerkib kuum aine ülespoole ja selle kõrval toimub jahedama aine laskumine alla. Maakoore all liigub vedel aine tõusu tsoonist laskumise piirkonna suunas ning veab maakoore osi endaga kaasa. Nii tekibki laamade liikumine. Füüsika kasutab geograafias olulise loodusnähtuse seletamisel konvektsiooni mudelit, mis kirjeldab nii aine liikumist maakoore all, merevee liikumist ookeanides, õhumasside liikumist atmosfääris kui ka õhu ringkäiku meie köetavates tubades. Füüsikaline põhjuslik seos on kõige üldisem.

(Peil 4.1. – video põhjuslikkuse kohta – veebiõpikusse)

4.1.2. Põhjuslikkuse avaldumine ja põhjuslikkuse liigid

Füüsikalist põhjuslikkust võib liigitada mitmeti. Üks võimalus seda teha on rakendada füüsika poolt loodud ruumi ja aja mõisteid.

Ruumiliseks võib nimetada sellist põhjuslikkust, mille korral omavahel põhjuslikult seotud sündmused on korraga vaadeldavad. Võib ka öelda, et ruumilise põhjuslikkuse korral puudub alus nende sündmuste järjestamiseks. Nende kirjeldamisel võib alus-

tada ükskõik millisest sündmusest. Ruumiline põhjuslikkus avaldub ühe füüsilise objekti koosnemises teistest objektidest. Näiteks: *Liivahunnik koosneb liivateradest. Liivaterade olemasolu on liivahunniku olemasolu põhjus.* Või siis: *Aatomi tuum koosneb prootonitest ja neutronitest. Prootonite ja neutronite olemasolu on tuuma olemasolu põhjus.* Looduses valitsevat ruumilist põhjuslikkust kirjeldab käesoleva õpiku 1. peatükis uuritud looduse struktuuritasemete skeem. Matemaatikas tegelevad ruumilise põhjuslikkusega **geomeetria** ja **algebra**. Toome näiteks ühe geomeetria väite: *Kolmnurk koosneb kolmest sirglõigust, mille vahel tekib kolm nurka;* või siis algebra väite: *avaldis $a^2 - b^2$ koosneb kahest korrutisest: $(a - b)$ ja $(a + b)$.*

Ajaliseks võib nimetada sellist põhjuslikkust, mille korral omavahel põhjuslikult seotud sündmused ei ole korraga vaadeldavad. Sündmuste vahel on olemas kindel järjestus, mille rikkumine pole looduses võimalik. Ajaline põhjuslikkus avaldub teise sündmuse järgnevuses esimesele. Siin sobib hästi juba uuritud näide: *vaas paikneb kivipõranda kohal õhus ja talle mõjub ainult raskusjõud* (sündmus 1, põhjus); *vaas on jõudnud põrandale* (s. 2, tagajärg). Matemaatikas tegeleb ajalise põhjuslikkusega **funktsioonide teooria** ning veel kõrgemal tasemel teeb seda juba diferentsiaal- ja integraalarvutus. Äsja vaadeldud vaba langemise näite kohta ütleb matemaatika, et seda konkreetset protsessi kirjeldab ruutfunktsioon $y = c - ax^2$, mis on üldisema funktsiooni $y = ax^2 + bx + c$ erijuht. Peagi õpime *Mehaanika* kursuses, et nimetatud ruutfunktsioon $y(x) = c - ax^2$ kirjeldab vaasi põrandast mõõdetud kõrguse h sõltuvust ajast t kujul: $h(t) = h_0 - gt^2/2$. Matemaatika jaoks tähenduseta konstandid c ja a omandavad füüsilikas kindla mõtte, neile hakkab vastama vaatleja mingi kindel kujutlus. Selgub, et matemaatika konstant c on langeva vaasi algkõrgus h_0 ja matemaatika konstant a on füüsilikas pool vaba langemise kiirendusest: $a = g/2$.

Põhjuslikkust saab ka liigitada võimalike tagajärgede arvu järgi. Kui mingi sündmus saab põhjustada vaid ühe kindla tagajärje, on tegemist **fatalistliku** põhjuslikkusega (lad.k. *fatalis* – ette määratud). Klassikalise füüsika mudelid on reeglina fatalistlikud. Näiteks me võime sajabrotsendilisel kindlalt olla, et kiirusega 20 m/s ühtlaselt ja sirgjoonelisel liikuv rong jõuab 5 sekundiga oma esialgsest asukohast 100 meetri kaugusele (näide p. 2.5.1). Muud võimalust lihtsalt pole. Kogu klassikaline füüsika sisendab meisse jõuliselt eksiarvamust, et kõik protsessid looduses ongi fatalistlikud. Kui mehaanikateadus oli 18. sajandi lõpuks klassikalise füüsika esimese suurema valdkonnana välja arenenud, siis asusid mitmed füüsikud propageerima determinismi. See on mõtteviis, mille kohaselt kõik sündmused maailmas on rangete mehaanikaseadustega ette määratud ehk determineeritud. Determinismi äärmuslik väljendus on väide: *Andke mulle kõigi maailmas sisalduvate kehade asukohad, asendid, massid ja kiirused ning ma ennustan teile täpselt mistahes tulevikusündmuse toimumise aega ja kohta.* Kaasaegne füüsika näitab selgesti determinismi paikapidamatust. Fatalistliku mõtteviisi peamine viga seisneb arvamuses, et liikumine põhjuselt tagajärje poole on täpselt korratav. Kui on võimalik täpselt korrata põhjust, siis peame sajabrotsendilise kindlusega saama ka sama tagajärje. Looduses põhjuse täpne kordamine aga võimalik ei ole, mistõttu reaalne ettemääratus ei saa kunagi olla täielik. Seda täheldas juba Vana-Kreeka mõttetark Herakleitos oma kuulsas fraasis *panta rhei* (kr.k. – *kõik voolab*) või siis lauses *Ei ole võimalik kaks korda astuda samasse jõkke, järgmisel korral on juba teine vesi.* Võib öelda, et ettemääratuses on alati olemas mõningane määramatus. Fatalistlik põhjuslikkuse käsitus on vastuvõetav vaid kitsa erijuhuna. Aga kuna fatalistlik põhjuslikkus on ikkagi lihtsaim võimalikest, siis alustatakse füüsikaliste mudelite kujundamist fatalistlikest variantidest.

Niisiis on fatalistliku põhjusliku seose korral võimalik täpne füüsikaline ennustamine. Mitme võimaliku tagajärje korral aga tagajärge täpselt ennustada ei saa ja siis tuleb mängu juhuslikkus. **Juhuslikuks** nimetame põhjuslikkust, mille korral võimalikke tagajärgi on lõplik ja kindel arv ning me saame hinnata ühe või teise tagajärje esinemise tõenäosust. Näiteks ei saa me täringuviske tulemust täpselt ette ennustada, kuid me teame, et tagajärgedeks on kuus erinevat võimalust ja nende esinemise tõenäosused on võrdsed. Realiseerub üks variant kuuest, tõenäosusega $\frac{1}{6} \cdot 100$ ehk 16,7 %. Kui meenutame juhuslike mõõteväärtuste histogrammi moodustamist (p.2.4.3), siis võime öelda, et ka antud katses oli võimalikke tagajärgi lõplik arv. Teoreetiliselt oli neid sada, 1 cm kaupa 1-st kuni 100-ni, sest kasutati 1 m = 100 cm pikkust mõõtjoolauda. Praktiliselt esines aga vaid kümme varianti, kusjuures kõige tõenäosemaks osutus 72 cm (katselise tõenäosusega 22%). Mitte-esinenud variantide tõenäosused osutusid nii väikesteks, et mõõtmiste arv 100 polnud piisav määramaks, **kui** väikesed nad ikkagi olid.

Kaasaegne füüsika erinebki klassikalisest **tõenäosusliku** mõtteviisi laialdase rakendamise poolest. Peamiseks põhjuslikkuse mudeliks on kaasaegses füüsikas, sh eriti statistilises füüsikas ja kvantmehaanikas juhuslik või tõenäosuslik põhjuslikkus. Selle kohaselt pole olemas täiesti kindlaid ega ka täiesti võimatuid sündmusi. Näiteks on kvantmehaaniliselt võimalik, et puu otsast vihmaveerenni kukkuv tammetõru läbib vihmaveerenni seina (just nimelt **läbib**, mitte ei hüppa üle ääre!), kuid sellise protsessi esinemise tõenäosus on vähem kui 10^{-30} (täpne väärtus sõltub valitud tingimustest). Kui oletame, et iga tammetõru kukkumine kestab ühe sekundi ja arvestame, et kogu Universumi vanus on „kõigest“ ca $4 \cdot 10^{17}$ sekundit, siis saab selgeks, et praktikas pole meil lootust olla renniseina läbimise tunnistajaks. Ka Universumi vanusest ei piisa selleks, et „jõuda teostada“ vajalikku arvu katseid.

Toodud näitest selgub, et **makromaailmas** võime me enamasti muretult rakendada fatalistlikku klassikalist põhjuslikkusekäsitlust. **Mikromaailmas** oleks see aga täiesti kohatu, kuna elektroni järjestikused asukohad aatomis on prognoosimatud. Neist ei moodustu tegelikult mitte mingit liikumisteed ehk trajektoori. Me saame vaid analoogiliselt pingpongipalli tagasipörke katsega (p.2.4.3) hinnata, millise tõenäosusega me võime vesiniku aatomi ainsat elektroni leida ühel või teisel kaugusel tuumast. Kvantmehaaniliste arvutuste järgi kõige tõenäosemaks osutuv kaugus $5,3 \cdot 10^{-11}$ meetrit (53 pm) ühtib täielikult kaugusega, millel elektron tiirleb ümber tuuma poolklassikalise Bohri mudeli kohaselt. Tulemus on ootuspärane, kuna mõlemad mudelid lähtuvad ühtedest ja samadest peamistest katsefaktidest. Samas on saadud ka terve rida katsetulemusi, mida Bohri mudel seletada ei suuda, kuid mis on täielikus kooskõlas kvantmehaanilise aatomimudeliga. Tegemist on hea näitega selle kohta, kuidas primitiivsem füüsikaline mudel osutub täiuslikuma mudeli piirjuhaks. Nendime kokkuvõtteks, et loodusseadusi võib jagada fatalistlikust põhjuslikkuse käsitlusest tulenevateks rangeteks seadusteks ja juhusliku põhjuslikkuse kontseptsioonil rajanevateks tõenäosuslikeks ehk **statistilisteks** seadusteks.

Kui võimalike tagajärgede arv pole mitte mingil moel eelnevalt määratav ja mitte ükski realiseerunud tagajärg pole täpselt korratav, siis on tegemist **kaootilise** põhjuslikkusega. Kaootilise põhjuslikkuse näiteks võib tuua õnnevalamise tulemuse või mullide tekkimise vee väljavoolamisel pudelist. Kui põhjaga taevas poole keeratud pudelist vesi välja voolab, siis siseneb õhk pudelisse kaootiliselt. Me ei suuda ennustada, millist pudeli serva mööda õhumull ülespoole kerkib. Kui aga pudelit enne

keerutada, siis saab ennustada keerise teket ja vee kiiremat voolamist. Kaootilise põhjuslikkuse uurimisega tegeleb kaasaegse füüsika ja matemaatika piiriteadus **sünergeetika**.

Loodusteadustes esineb alati oht, et põhjuslike seoste otsimisel avastatakse tõelise põhjuslikkuse asemel näiv põhjuslikkus. **Näiva põhjuslikkuse** korral on tagajärje rollis esinev sündmus tegelikult põhjustatud mitte põhjuseks peetavast sündmusest, vaid mingist muust, esmapilgul märkamata jäänud sündmusest. Kõige tuntumaks näiteks selle kohta on astroloogilised seaduspärasused, näiteks inimese iseloomu sõltuvus tema sünnikuupäevast. Kui see sõltuvus üldse esineb, siis kindlasti ei ole ta põhjustatud Maast väga erineval kaugusel paiknevate tähtede omavahelisest asendist maapealse vaatleja jaoks. Kuid Päikese ja Kuu võimalikku mõju maapealsetele protsessidele ei saa eitada, mistõttu see võib olla nimetatud sõltuvuse tõeline põhjus.

Elektrinähtuste uurimise algaastatel arvati, et kuna säde on sinaka värvusega, siis elekter armastab sinist ja kardab punast värvi. Seepärast kasutati isoleeriva materjalina just punast siidniiti ja katsed kinnitasid sellise valiku õigsust. Punase siidniidi otsa riputatud metallkuulile jäi elektrilaeng püsima aga hõbedane traat juhtis laengu minema. Tollal arvati, et siidniidi käitumine mittejuhina on põhjustatud tema punasest värvusest. Hiljem selgus, et tegelik põhjus peitub hoopis niidi või juhtme materjalis. Siidis puuduvad vabad laetud osakesed ja sellepärast siid ei juhigi elektrit.

Lähtudes vaatleja definitsioonist (p.1.2.1) peame aga kõigile teistele looduses esinevatele põhjuslikkuse liikidele lisama veel ühe. See on **tahteline põhjuslikkus**, mis realiseerub subjekti vaba tahte ilminguna. Püüdke vastata küsimustele *Miks ma just praegu püsti tõusin? Miks ma just praegu kätt liigutasin?* Milline ka poleks vastus neile küsimustele, see vastus ei kipu mahtuma mitte ühegi ülalpool loetletud põhjuslikkuse liigi alla. Me loodetavasti ei kahtle selles, et ka inimkeha on osa loodusest, koosnedes eelkõige kindlaviisiliselt paigutatunud ja vastastikmõjustuvatest süsiniku, vesiniku ja hapniku aatomitest. Seetõttu peaksid ka inimkehas toimuvad protsessid alluma samadele põhjuslikele seostele, mis kehtivad kogu ülejäänud looduses. Kuna me ei oska seletada, millisel looduse struktuuritasemel toimivad need põhjuslikud seosed, mis määravad meie otsuse *midagi teha* või *mitte teha*, siis oleme sunnitud võtma kasutusele erilise põhjuslikkuse liigi – tahtelise põhjuslikkuse. Selle uurimisega peaksid aga käsikäes tegelema loodusteadused, arstiteadus ja psühholoogia. Kindlasti ei ole see ainult füüsika uurimisobjekt.

4.1.3. Füüsikast tulenevad võimalused ja füüsikaga seotud ohud

Loodusnähtuse ennustamine on väide selle nähtuse toimumise kohta tulevikus ja/või mingis teises kohas. Juba korduvalt on juttu olnud sellest, et võimes pädevalt ennustada loodusnähtusi avaldub füüsika prognostiline ehk ennustuslik väärtus. Ennustamise aluseks on põhjuslike seoste tunnetamine. Näiteid selle kohta on kahes eelmises alapunktis juba toodud üksjagu. Rõhutame vaid veel kord, et uurides põhjuslikkuse kõige üldisemaid avaldumise vorme annab füüsika teistele loodusteadustele üldise meetodi looduses esineva põhjuslikkuse käsitlemiseks. Füüsika näitab, kuivõrd saab selle või teise loodusnähtuse lõpptulemus olla ette määratud. **Ettemääratus** on mingi sündmuse kindel esinemine tulevikus, sõltumata sündmustest, mis esmapilgul võiksid antud sündmuse kui tagajärje võimatuks muuta. Füüsikalise ettemääratuse tingib loodusseaduste vältimatu, mistahes inimese tahtest

sõltumatu kehtivus, aga need seadused ei pruugi olla ranged. Nad võivad olla ka statistilised.

Füüsikal kui peamisel tehnilist progressi käivitaval ja toetaval loodusteadusel on kindlasti ka rakenduslik väärtus. Mehaanika väljaarendamine 18. sajandil võimaldas ehitada masinaid, mis oluliselt kergendasid inimtööd. Ehkki masinate kasutuselevõtuga vabrikutes kaasnes küll varem käsitsitöös hõivatud inimeste töötaks jäämine, löid ketrus- ja kudumismasinad, trei- ja freespingid ning stantsid siiski aluse enneolematuks tööviljakuse tõusuks, millega kaasnes arenenud riikide elanikkonna keskmise elujärje tunduv paranemine. Soojusfüüsika saavutused võimaldasid 18. sajandi lõpul luua aurumasina ning 19. sajandi lõpul sisepõlemismootori. Elektromagnetismi põhiseaduste avastamine 19. sajandil tegi võimalikuks telegraafi, telefoni ja raadioside kasutuselevõtu, elektrienergia jõudmine kodudesse suurendas enneolematul viisil olmemugavusi. Füüsika rakenduslikust väärtusest võiksime rääkida veel pikalt, aga selle kohta leidub hulgaliselt infot ka mujal, mitte ainult füüsikaõpikutes.

Kuni Teise Maailmasõjani oli füüsikal ühiskonnas selgelt positiivne kuvand. Füüsika aitas elu paremaks muuta ja temast ei lähtunud veel tõsiseid ohte. Kui aastal 1945 võeti aatomi- ja tuumafüüsika tulemustest lähtudes kasutusele tuumarelv, siis pidi inimkond vist esmakordselt selgesti tõdema, et füüsika arenguga kaasnevad ohud. Kahe tohutu tuumaarsenaliga üleriigi Ameerika Ühendriikide ja Nõukogude Liidu vastasseisu tulemusena elas maailm aastail 1950-1990 pidevas **globaalse tuumasõja** ohus. Tuumasõjale oldi kõige lähemal vist Kariibi kriisi ajal aastal 1961. Vastasseisu ajastu lõpul oli kõigi loodud tuumarelvade summaarne purustusjõud paljukordselt piisav kogu inimkonna hävitamiseks. Samas on ilmselt just tuumakatastroofi tagajärgede füüsikalised prognoosid seni ära hoidnud Kolmanda Maailma sõja puhkemise. Kõik asjatundjad teavad, et globaalses tuumasõjas ei jää lõpuks ellu mitte keegi. Ka neil, kes suudaksid esialgu varjenditesse peituda, tuleks sealt millalgi välja tulla.

Nõukogude Liidu lagunemise tulemusena on otsene tuumasõja oht kaasajal jäänud küll tahaplaanile, kuid seoses tuumaenergia üha laialdasema kasutuselevõtuga on see eest muutunud aktuaalseks mingis **tuumaelektrijaamas** toimuva **avariiga** kaasnev võimalik oht. Esimene tõsine märk sellest ohust oli Tšernobõli katastroof aprillis 1986. Tšernobõli avarii tekkepõhjused on heaks näiteks füüsikalise põhjuslikkuse ja füüsikaliste ennustuste piiride kohta. Nimelt toimus Tšernobõli tuumaelektrijaama reaktorite töö reguleerimine grafiitvarraste abil, mis neelavad tuumareaktsiooni käigus tekkivaid ja uusi tuumareaktsioone vallandavaid vabu neutroneid. Kui reaktsioon muutub liiga intensiivseks, lükatakse seda tüüpi reaktoris grafiitvardaid rohkem reaktorisse sisse, vähendamaks vabade neutronite arvu. Piltlikult öeldes "valatakse tuumatulele pisut vett peale", hoidmaks seda kontrolli all. Paraku ei arvestatud Tšernobõlis aga sellega, et kui temperatuur reaktoris on juba ohtlikult kõrge, siis materjalide omadused muutuvad ja grafiitvarraste nihutamise mehhanismid võivad kinni kiiluda. Nii paraku juhtuski. Ohtlik loodusnähtus (tuumareaktsioon) on ise füüsikaline nähtus, tema ohjamisel kasutatav mehhanism (grafiitvardad) rajanes põhjusliku seose füüsikalisel tunnetamisel, mehhanismi ootamatul ülesütleemisel olid aga samuti füüsikalised põhjused. Katastroof sai teoks füüsikalise põhjusliku seose ignoreerimise tulemusena.

Kaasaegsete tuumaelektrijaamade turvasüsteemid on piisavalt kõrge tasemel, muutmaks Tšernobõli tragöödia kordumise tõenäosust tühiselt väikeseks. Kuid siiski jääb alles prognoosimatust loodusõnnetusest tulenev tuumaaavarii oht. Seda näitas meile selgesti hiljutine avarii Fukushima tuumaelektrijaamas Jaapanis. Avarii põhjustas teatavasti maavärin. Kümned Jaapani tuumaelektrijaamad paiknevad alal, kus maavärinate esinemise tõenäosus on väga kõrge. See on ohtlik, kuid valikut pole, sest energiat on vaja. Paraku on inimkond jõudnud selleni, et ohtlikku tegevust jätkatakse, ehkki kõik on ohust teadlikud. Millele me saame sellises olukorras oma lootuse panna? Ainult füüsika arengule. Tuleb loota, et geofüüsika jõuab peagi niikaugele, et suudab maavärinaid piisava tõenäosusega ette ennustada. Kui maavärinat on oodata, tasub tuumaelektrijaamade võimsust vastavas piirkonnas vähendada ja viia nad üle avariivalmiduse seisundisse.

Küsimusi ja ülesandeid

1. Universumi vanus on kaasaegsete hinnangute kohaselt 13,7 miljardit aastat. Kui mitu sekundit see on?
2. Nimetage veel mõni füüsika tähtis rakendus lisaks neile, mis on ära toodud tekstis.
3. Nimetage veel mõni füüsikaga seotud oht lisaks tuumatehnoloogiast lähtuvatele.

STOP

1. Kaks sündmust on põhjuslikult seotud, kui ühe sündmuse (põhjuse) toimumine kutsub teatava vältimatusega esile teise sündmuse (tagajärje).
2. Loodusnähtuse ennustamine on väide selle nähtuse toimumise kohta tulevikus ja/või mingis teises kohas. Ennustamise aluseks on põhjuslike seoste tunnetamine.
3. Füüsikalise ettemääratuse ehk fatalistliku põhjuslikkusega on tegemist siis, kui mingi sündmus saab põhjustada vaid ühe kindla tagajärje.
4. Juhuslikuks nimetatakse põhjuslikkust, mille korral võimalikke tagajärgi on lõplik ja kindel arv ning me saame hinnata ühe või teise tagajärje esinemise tõenäosust.

4.2. Printsiibid füüsikas ja atomistika

4.2.1. Füüsikaline printsiiip kui meie teadmiste piir

Juba käesoleva kursuse alguses (p.1.1.1) oli juttu sellest, et kõigi vaatleja kujutluste hulgas looduse kohta on erilisel kohal printsiibid. Füüsikaline **printsiiip** (lad.k. *principium* – algus, alus) on looduse vaatlemisel tehtud kõige laiemal kehtivusalal üldistus. Printsiiipide paikapidavust tõestab see, et loodust vaadeldes me veendume ikka ja jälle printsiiipide kehtivuses ning ei näe mitte kusagil erandeid printsiiipidest. Füüsika koosneb vaatluste ja katsete põhjal tehtud üldistustest. Vaatlusi ja katseid ning neist tulenevaid järeldusi saab olla palju erinevaid. Millised neist siis väärivad kõige muu alguse või aluse nimetust?

Kui tahame seletada mingit nähtust, peame ridamisi vastama paljudele üksteisega seotud *miks*-küsimustele. Iga vastus kutsub reeglina esile uue küsimuse. Siiski me saame neile *miks*-küsimustele vastata vaid teatud piirini. Varem või hiljem jõuame olukorraneni, kus me enam *miks*-küsimusele vastata ei oska ja peame piirduma tõdemusega, et **nii lihtsalt on**. Loodus on selline ja me ei oska öelda, miks. Füüsikalised printsiibid on *miks*-küsimuste ahelate lõpud. Nad on looduse kohta käivad kõige üldisemad tõdemused, mis vastavad absoluutselt kõikide eksperimentide tulemustele.

Tuleb kohe märkida, et senistes füüsikaõpikutes kasutatakse sõna *printsiiip* sageli ka kitsamas tähenduses. Näiteks räägitakse mingi konkreetse füüsikateooria, näiteks termodünaamika – *printsiiipidest*. Sel juhul mõeldakse printsiiibi all mingit üldist retsepti teatud kindlat liiki füüsikaprobleemide lahendamiseks. Siiski on sel juhul tegemist probleemidega ühes kindlas loodusnähtuste valdkonnas, mitte looduses tervikuna. Printsiiibid kitsamas tähenduses on reeglina taandatavad mingile printsiiibile käesolevas õpikus kasutatavas laias tähenduses. Nii näiteks on ülalmainitud termodünaamika printsiiibid taandatavad üldisele energia miinimumi printsiiibile, millega me peagi tegeleme lähemalt (p.4.3.2).

On väga oluline mõista, et see, mida pidada printsiiibiks ja mida mitte, on iga vaatleja vaba otsus. Loodus on terviklik ja seetõttu tundub meile ühe või teise printsiiibi käsitlemisel korduvalt, et samalaadsest asjast on juba juttu olnud. Leidub inimesi, kes on valmis kõiki printsiiipe taandama üheaainsale ning kogu oma maailmapilti sellele üles ehitama. Siin peame meeles pidama, et füüsika pole matemaatika, kus on olemas ainult üks õige vastus. Füüsikas peab arvamuste paljusus olema lubatud – seni, kuni arvamused pole vastuolus katsefaktidega.

4.2.2. Aksiomid matemaatikas ja printsiiibid füüsikas

Juba eespool (p.3.1.5) oli juttu matemaatika ja füüsika seostest. Matemaatika on rangelt defineeritud tähendusega sümbolite keel. Matemaatika ja füüsika peamine erinevus seisneb selles, et kui esimene neist uurib loogilisi seoseid ettekujutatavate objektide ja nende omaduste vahel, siis füüsika kirjeldab reaalselt olemasolevat loodust. Tõsi küll, füüsika kasutab väga sageli selleks matemaatika keelt. Matemaatikas ei tehta vaatlusi ega katseid. Tulemused saadakse vaid rangete loogiliste arutluste teel.

Kuna matemaatika ei kirjelda otseselt loodust, siis võib selle teooriate aluseks võtta väiteid, mis ei nõua katselist tõestust, kuid on täielikus vastavuses meie igapäevase kogemusega. Matemaatiliste teooriate aluseks olevaid ilmselgeid ja tõestust mittevajavaid väiteid nimetatakse aksiomideks (kr.k. *aksioma* – kindel, vaieldamatu). Toome mõned näited matemaatika aksiomidest:

- Arv null on väikseim võimalik naturaalarv.
- Läbi kahe erineva punkti saab tõmmata ainult ühe sirge.
- Läbi sirgel mitte asuva punkti saab tõmmata ühe ja ainult ühe antud sirgega paralleelse sirge.
- Paralleelsed sirged ei lõiku.

Kolm viimast aksiomi on näiteks Eukleidese geomeetria alusväideteks. Pole kuigi raske veenduda selles, et nad kehtivad ainult tasandil. Sfäärilisel pinnal, milleks on näiteks gloobuse pind, on kaks erinevat meridiaani ekvaatoril paralleelsed, kuid ometi lõikuvad poolusel.

Aksiomidest tegime siin juttu põhjusel, et füüsikaline printsiiip on matemaatika aksiomi teatavaks analoogiks. Mõlemad on alusväited, mida eraldi ei tõestata ja mille tõesust kinnitab kõige neist tuletatu kehtivus. Samas ei maksa unustada, et füüsika kirjeldab tegelikke loodusobjekte: kehi, välju ja nendega toimuvaid nähtusi. Füüsikateooriate aluseks võib võtta vaid selliseid tõdemusi, mida vaatlused ja katsed alati kinnitavad. Seejuures peab füüsikaliste printsiiipide kehtivus olema absoluutne.

Kui kasvõi üksainus eksperimentitulemus on alusväitega vastuolus, siis pole sellele üles ehitatud füüsikaline teooria usaldusväärne.

4.2.3. Atomistlik printsiip

Võtame tüki juustu, asetame lõikelauale ning lõikame pooleks. Tulemuseks on kaks poole väiksemat juustutükki. Kõik oskavad sellise tegevuse tulemust ette ennustada. Kui jätkame sellist juustupoolitamist, siis saame järjest väiksemaid juustutükke. Isegi siis, kui juustu tükeldamine on kaotanud igasuguse kulinaarse mõtte, poolitame neid juustutükke aina edasi. Kas võime juustu lõputult järjest pisemateks paladeks lõikuda, nii et saadud tükid ikka sama maitsega juustuks jäävad? Juustumeistrite kinnitusel pole see võimalik. Juust pole ühtlane mass, vaid koosneb suurest hulgast mitmete omaduste poolest erinevatest osakekestest. Meile toiduainena tuttav juust on segu erinevatest vee, rasvade, valkude, hapete ja soolade osakekestest. Juustu tükeldamisel jõuame varem või hiljem piirini, mille ületamisel ei või saadud tükikesi enam juustuks nimetada. Rasvade, valkude, soolade ja vee molekulidel on oma kindlad omadused, aga need pole enam juustu omadused. Kehi ei saa lõputult väiksemateks osadeks jagada nii, et saadud osadel säiliksid kõik jagatava terviku omadused.

Jagatavuse piiri olemasolu idee esitas juba aastatuhandeid tagasi Vana-Kreeka filosoof Demokritos. Ta väitis, et ainet ei saa lõputult jagada üha väiksemateks osadeks. Demokritose ettepanekul hakati selliseid vähimaid jagamatuid aineosakesi nimetama aatomiteks (kr.k. *atomos* – jagamatu). Demokritose väide oli õigupoolest hüpotees, mille katseliseks kontrollimiseks puudusid võimalused tema eluajal täielikult. Kaasaegses füüsikas on see aga leidnud korduvalt katselist kinnitust. Kehtib **atomistlik printsiip**, mis väidab, et loodusobjekte pole võimalik lõputult samal viisil jagada endiste omadustega osadeks.

Atomistliku printsiibi kehtivus aine kohta tõestati katseliselt juba 19. sajandil. Nimelt avastati siis lihtainete aatomid kui vähimad kindlate keemiliste omaduste kandjad. 20. sajandi alguses õnnestus Ernest Rutherfordil **keemilist** aatomit siiski osadeks jagada (p.1.3.2). Ta näitas katseliselt, et aatom koosneb tuumast ja elektronidest. Peagi selgus, et tuum koosneb omakorda prootonitest ja neutronitest. Elektroni, prootoni ja neutroni peeti pea 50 aastat **füüsikalisteks** aatomiteks ehk füüsika jaoks vähimateks aine jagamatuteks osakesteks. Seetõttu hakati neid nimetama **elementaarosakesteks**. Samas avastati aga veel kümneid erinevaid elementaarosakesi, mis sundis kahtlema prootoni ja neutroni elementaarsuses. 20. sajandi lõpul tõestatigi katseliselt, et prootonid ja neutronid koosnevad omakorda kolmest veel väiksemast osakesest – kvargist. Kogu kaasaegne katseliselt kontrollitud osakestefüüsika lähtub osakeste Standardmudelist, mille kohaselt aine koosneb kaheteistkümnest **fundamentaali-** ehk **alusosakesest**: kuuest **leptonist** ja kuuest **kvargist**. Need ongi aine füüsikalised aatomid tänapäevases tähenduses.

Tavalise aine ehituskivideks on vaid kaks kõige väiksema massiga kvarki (d- ja u-kvark) ning elektron kui levimuid lepton. Ülejäänud alusosakesi saab tekitada vaid laboris ja nende eluiga on väga lühike. Nagu selgub, saab rääkida vaid **antud teadmiste tasemel** jagamatutest aineosakekestest. Jagatavuse piiri ehk inimkonna sisemist nähtavushorizonti on viimase 150 aasta jooksul kogu aeg edasi nihutatud. Muuseas on ka osakestefüüsikas jäänud kehtima juustulõikamisel ning keemiliste aatomite lõhkumisel ilmnenud seaduspärasus, mille kohaselt jagatavuse piiri ületamisel ei säili enam jagatava objekti endised omadused. Elementaarosakesed

õigupoolest enam **ei jagune** väiksemateks samalaadseteks osakesteks vaid nad **muunduvad** üksteiseks, kui selleks vajalikud tingimused on täidetud.

Eelmise sajandi teisel poolel tõestati atomistliku printsiibi kehtivus ka välja kohta. Tehti kindlaks, et makromaaailmas pidevana tunduv väli osutub mikrotasemel samuti koosnevaks jagamatutest osakestest, mida nimetatakse välja **kvantideks** (lad.k. *quantum* – portsjon). Joonisel 3.2 (p.3.4.3) kujutatud vastastikmõju mehhanism toimib tegelikult ka atomistlikul tasandil. Üks aine algosake „viskab teise suunas“ kvandi ehk väljaosakese nagu palli. See kvant tekitab se energia jäävuse seadust lühiajaliselt rikkudes. Kuna energia jäävuse seadus ei saa jääda rikutuks, siis on teine vastastikmõjus osalev algosake „sunnitud palli püüdma“. Seni, kuni „pall on õhus“, on mõjus osalevad aineosakesed omavahel seotud. Mõlemad aine algosakesed aga on „nii pallide viskajateks kui püüdjateks“. Selles avaldubki mõju vastastikusus mikromaailmas.

Atomistlik printsiip toimib mitte ainult füüsikas ja keemias. Me märkame tema ilminguid ka tavaelus. Näiteks koosnevad kõik mingis keeles kirjutatud sõnad ju **tähtedest**, mida võib vaadelda kirja jagamatute algühikutena. Samas rollis on suulise kõne korral **häälikud**. Atomistikast võime rääkida kõikjal, kus on tegemist mingite osadega, mis moodustavad terviku. Osadel reeglina ei ole enam neid omadusi, mis tervikul. Osa ja terviku probleemi matemaatiline esitus on **hulgateooria**. Hulk koosneb elementidest samamoodi nagu mingi muu tervik koosneb osadest. Elementidel, mis moodustavad ühe kindla hulga, on kõigil mingi tunnus, mis määrab nende kuuluvuse just sellesse hulka.

Kordame veel **atomistlikku printsiipi** täiesti kaasaegses ning detailses sõnastuses: Ei ainet ega välja pole võimalik lõputult jagada samade omadustega osadeks. Mõlemal on olemas antud teadmiste tasemel vähimad osakesed, mida aine korral nimetatakse fundamentaal- või alusosakesteks, välja korral aga kvantideks.

Küsimusi ja ülesandeid

1. Kas füüsikalise maailmapildi konstrueerimisel oleks soovitatav kasutada võimalikult suurt või hoopis võimalikult väikest arvu printsiipe?
2. Kas me võiksime arvusüsteemi põhiarvude (kümnendsüsteemis 1 kuni 10) olemasolu käsitleda atomistliku printsiibi ilminguna, vaadeldes põhiarve kui arvusüsteemi jagamatuid osi?
3. Tooge veel mõni näide atomistliku printsiibi ilmumise kohta tavaelus.
4. Põhikooli *Elektriõpetuses* saime teada, et erinimeliselt laetud kehade või aineosakeste vahel esines tõmbejõud. Vastastikmõju atomistlikus „palliviskamise mudelis“ tähendaks see teise osakese kalduvust „püüda“ esimese osakese poolt visatud „palli“ ehk kvanti. Kuidas aga võiks selgitada tõukejõu tekkimist?

STOP

1. Füüsikaline printsiip on looduse vaatlemisel tehtud kõige laiemal kehtivusalaga üldistus. Printsiibi kehtivust tõestab see, et mitte üheski katses ei ilmne erandeid printsiibist.
2. Aksiom on tõestamist mittevajav alusväide matemaatikas. Aksiomi kehtivust tõestab see, et kõik temast tulenevad üksikväited osutuvad tõesteks.
3. Atomistlik printsiip on väide, et mitte miski looduses pole lõputult ja samal viisil osadeks jagatav. Eksisteerib jagatavuse piir.

4. Alusosake (ehk *fundamentaalosake*) on aine kui looduse põhivormi jagatavuse piir, vähim teadaolev portsjon ainet.
5. Kvant on välja kui looduse põhivormi jagatavuse piir, vähim teadaolev portsjon välja.

4.3. Teised füüsikalised printsiibid

4.3.2. Energia miinimumi printsiip

Kui me peaksime ebatasasel maastikul kaotama palli, siis asume seda ilmselt otsima kõige madalamatest paikadest, mitte künkatippudest. Miks me nii toimime? Me teame, et kõik veerevad kehad jäävad lõpuks pidama paika, mille asukoht on kõigist võimalikest madalaim. Nad jäävad pidama sinna, kus nende energia Maa raskusväljas on kõige väiksem.

Toodud näide väljendab kogu looduses kehtivat **energia miinimumi printsiipi**. See printsiip väidab, et kõik iseeneslikud ehk mitte välismõjust tingitud protsessid kulgevad looduses alati energia kahanemise suunas. Nii üksikul kehal kui kehade süsteemil on kalduvus energiat loovutada või töö tagavara ära kulutada, suundudes minimaalse energiaga olekusse. Võib ka öelda, et kõik loodusobjektid tahavad energiat ära anda, kuid miski peab seda energiat ju ka vastu võtma. Seetõttu toimub loodusobjektide vahel pidev vastastikune „energia kaela määrimine“. Omavahelise vastastikmõju tulemusena lähevad mistahes süsteemi osad lõpuks omavahel energia andmise ja vastuvõtmise tasakaalu, mille määravad konkreetset tingimused. Kui me soovime mingile ühele objektile anda suurt kogust energiat, siis peame energia vahepealse loovutamise talle võimatuks muutama. Nii näiteks mõjutatakse suurte energiatega kiirendatavaid laetud osakesi elektriväljaga, püüdes samal ajal vältida nende osakeste enneaegset kontakti teiste osakestega.

Energia miinimumi printsiibi kehtivuse kohta võib tuua järgmisi näiteid:

- Vihmapiisad langevad maale, ojad voolavad jõkke, jõed omakorda merre.
- Kui me paneme kokku kuuma ja külma keha, siis ilma välismõjuta läheb soojus alati kuumemalt kehalt külmemale, mitte vastupidi.
- Kompassi magnetnõel võtab ruumis kindla asendi põhja-lõuna sihis ja tuleb sellesse asendisse jälle tagasi, kui me oleme ta sealt välja viinud.
- Ained hakkavad kuumutamisel ning elektrivoolu läbiminekul helenduma, sest aatomid kiirgavad teistelt osakestelt põrgetel saadud energia valgusena välja.

4.3.3. Tõrjutusprintsiip

Me teame hästi, et kehi ei saa paigutada teineteise sisse. Kus üks keha on juba ees, sinna me teist panna ei saa. Me saame panna ühe raamatu teise peale või kõrvale, aga mitte teise sisse. Kui pista vett sisaldavasse anumasse mingi keha, siis veetase tõuseb. Vesi ja keha ei saa üheskoos samas ruumiosas paikneda, seepärast tõrjub keha oma asukohast vee välja. Ka kaks veejuga ei saa teineteist segamatult läbida. Kokkupuutekohas veejoad põrkuvad ja tõrjuvad teineteist – vesi pritsib laiali. Kõigis sellistes nähtustes avaldub seaduspärasus, mida on eesti keeles hakatud nimetama **tõrjutusprintsiibiks**. Makromaailmas tähendab tõrjutusprintsiip seda, et kaks ainelist objekti ei saa korraga paikneda samas ruumiosas.

(Peil 4.4. – video kahe veejoaga tõrjutusprintsiibi kohta – veebiõpikusse)

Mikromaailmas on asi veidi keerulisem, sest aatomid ning nende koostisosad käituvad makrokehadest üksjagu erinevalt. Selle gipooldest kehtib tõrjutusprintsiiip ka nende kohta. Mikromaailma jaoks sõnastas tõrjutusprintsiiibi 1925. aastal Austria füüsik Wolfgang Pauli (1900-1958), mistõttu seda sageli nimetatakse ka **Pauli printsiiibiks**. Oma lihtsaimal kujul väidab Pauli printsiiip, et kaks samas aatomis paiknevat elektroni ei saa olla täpselt samas kvantolekus. Kaks elektroni ei saa aatomis käituda täpselt ühtmoodi, omades täpselt ühepalju energiat. Nende seisundid peavad millegi poolest erinema. Elektroni jaoks on aatomis lõplik arv „kortereid“ ja kus üks elektron juba on, sinna teist enam panna ei saa.

Energia miinimumi printsiiip ja tõrjutusprintsiiip määravad kahekesi kogu aine ehituse looduses. Võib ka öelda, et nad on kogu keemia füüsikaliseks aluseks. Keemiliste elementide perioodilisuse süsteem sisaldab kaheksat perioodi põhjusel, et aatomi välises elektronkihis võib olla kuni kaheksa elektroni. Elektronid võivad aatomis perioodiliselt liikuda sümmeetriliselt mingi ruumisuuna suhtes. Seda liikumisviisi nimetavad keemikud **p-orbitaaliks**. Samas võivad elektronid täita ruumi ka ilma eelissuunata, sfäärilise kujuga „pilvena“. Seda nimetavad keemikud **s-orbitaaliks**. Kuna meie ruum on kolmemõõtmeline, siis on elektronidel kokku neli sellist ruumilise käitumise võimalust – kolm „teljelist“ ja üks „ilma teljeta“ variant. Elektronidel on aga lisaks veel sisemine liikumine, mida nimetatakse **spinniks**. Esmalähenduses võib seda kujutada elektroni kui osakese pöörlemisena ümber oma telje. Kaks elektroni võivad täita sama ruumiosa, kui nende sisemine pöörlemine toimub samal teljel vastandlikes suundades, nii et üks elektron pöörleb päripäeva ja teine vastupäeva. Kolmandat võimalust ei ole. Seega võib samal orbitaalil viibida kuni kaks elektroni, aga kolmas tõrjutakse juba välja. Olemegi saanud kokku $4 \times 2 = 8$ erinevat võimalust elektroni paiknemiseks aatomi väliskihis. Kuna sisemistele elektronkihtidele vastavad elektroni energia väärtused on väiksemad, siis energia miinimumi printsiiibi kohaselt täituvad kõigepealt sisemised elektronkihid. Need elektronid, millel tõrjutusprintsiiip ei luba enam viibida mingis sisemises kihis, peavad paigutuma väliskihti. Just aatomite väliskihtide elektronid ehk valents-elektronid aga tekitavad keemilise sideme aatomite vahel. Sellest kõigest tuleb lähemalt juttu *Mikro- ja megamaailma füüsika* kursuses.

4.3.4. Superpositsiooniprintsiiip

Mitteaineliste ehk väljaliste objektide puhul tõrjutusprintsiiip ei kehti. Kõik katsed näitavad, et erinevad väljad võivad üksteist segamata samas paigas asuda. Välja mõju kehale ei sõltu teiste väljade juuresolekust. Näiteks püsimgnet tõmbab raudmutrit magnetjõuga ühtmoodi nii Maa pinnal kui kosmoses teostatud katses. Maa pinnal alati katse tulemust mõjutav Maa gravitatsioonijõud orbitaaljaamas ei avaldu, kuna kõik kehad viibivad kaaluta olekus. Samas tõmbab Maa sedasama raudmutrit maa-pinnal teostatud katses sama gravitatsioonijõuga enda poole sõltumata sellest, kas mutrile magnetjõud mõjub või mitte. Antud näites vaatlesime kahte erineva päritoluga välja, kuid täpselt sama tulemuse saaksime ka samaliigiliste väljade koostoimel.

Kui keha asub korraga mitme välja mõjupiirkonnas, siis mõjud lihtsalt liituvad. Iga väli mõjub kehale sõltumata teiste väljade juuresolekust mingi jõuga. Jõuvektorite liitmisel punktis 3.1.4 toodud reeglite kohaselt saame leida summaarse mõjujõu.

Printsiipi, mille kohaselt väljad üksteist ei sega ja nende mõjud vektoriaalselt liituvad, nimetatakse **superpositsiooniprintsiibiks** (lad.k. *super* – peal; *positio* – asetsemine). Superpositsiooniprintsiibi kehtivust kinnitab näiteks tõik, et erinevalt ainelistest veejugadest saavad kaks valguskiirt kui väljalist objekti teineteisest segamatult läbi minna. Seda on suhteliselt lihtne katses kontrollida. Kui üks valguskiir kohtub teise ga, siis võime näha, et kummagi poolt tekitatud valguslaik selle tagajärjel ei muutu. Mitte mingit vastastikust tõrjumist ei esine.

(Peil 4.4. – video kahe valguskiirega superpositsiooniprintsiibi kohta – veebiõpikusse)

Küsimusi ja ülesandeid

1. Selgitage lähemalt punkti 4.3.1 lõpus toodud näiteid energia miinimumi printsiibi kehtivuse kohta.
2. Kui mitmest perioodist koosneks meie jaoks keemiliste elementide perioodilisuse süsteem siis, kui me oleksime „lapikmaalased“ ehk kahemõõtmelise ruumi elanikud?
3. Meenutades põhikooli *Elektriõpetust*, tooge näide kehast, millele korraga mõjub raskusjõud ja elektrijõud ning need jõud liituvad superpositsiooniprintsiibi kohaselt.

STOP

1. Energia miinimumi printsiip väidab, et kõik iseeneslikud ehk mitte välismõjust tingitud protsessid looduses kulgevad uuritava süsteemi energia vähenemise suunas. *Kõik loodusobjektid tahavad oma energiat ära anda.*
2. Tõrjutusprintsiip väidab, et kaks ainelist objekti ei saa täpselt samal viisil täita ühte ja sedasama ruumiosa. Mistahes ainealine objekt tõrjub teist täpselt samasugust.
3. Superpositsiooniprintsiip väidab, et kuitahes palju väljalisi objekte võib täita üht ja sedasama ruumiosa. Neist väljadest tingitud jõud tuleb vektoriaalselt liita.

4.4. Absoluutkiiruse printsiip

4.4.1. Absoluutkiirus ja klassikalise füüsika kriis

Kõik me oleme äikese ajal tähele pannud, et müristamist kuuleme me tavaliselt mitmeid sekundeid hiljem kui näeme välgsähvatust. Põhjust teame samuti – pikselöögi tagajärjel tekkinud heli kohalejõudmine võtab aega. Heli levimiskiirus õhus on ligikaudu 1/3 kilomeetrit sekundis ning seda teades on lihtne äikesepilve kaugust määrata. Loeme sekundeid välgsähvatuse ja kõuekärgatuse vahel ning iga kolm järgnevat loendatud sekundit tähendavad lisakaugust üks kilomeeter.

Niiviisi arutledes eeldame, et valguse levimine aega ei võta. Kuidas aga tegelikult on? Kas valgus jõuab tõesti igale poole silmapilkselt, kas valguse kiirus on lõpmatult suur? Looduse uurimise algusaegadel just niimoodi arvatigi. Toonased vaatlusoskused muudeks järeldusteks võimalust ei andnud. Vana-Kreeka mõttetark Aristoteles oli veendunud, et valgus jõuab kaugetelt tähtedelt meieni silmapilkselt. Alles sajandeid hiljem hakkas lõpmatu kiiruse võimalikkuses kahtlema Galileo Galilei. Itaalia teadlane pani kirja isegi plaani, kuidas valguse kiirust eksperimentaalselt määrata võiks.

Selle kohaselt peaksid kaks laternatega varustatud meest seisma täielikus pimeduses mingil kaugusel teineteisest ning esialgu oma laternat naabri eest millegagi varjama, näiteks kübaraga. Esimese mehe kõrval seisab kellaga varustatud abiline, kes käivitab oma kella, kui esimene mees eemaldab oma lambilt katte. Kui teine mees näeb esimese katsetaja lambi valgust, siis eemaldab ta katte ka oma lambilt. Kui aega mõõtev abiline näeb teise katsetaja lambi valgust, siis ta fikseerib kella näidu. Lampidega meeste kahekordse vahemaa ja kulunud aja suhe ongi valguse kiirus. Kahjuks polnud tollal veel piisavalt täpseid kelli ning plaan jäi esialgu vaid plaaniks. Tänapäevase tarkusega võiksime öelda, et sellisel viisil saab mõõta vaid teise katsetaja reaktsiooniaega. Kuigi valguse kiirus jäi mõõtmata, uskus Galilei selle lõplikusse.

Juba põhikooli valgusõpetuses saime teada, et valguse kiiruse lõpliku väärtuse arvutas esimesena oma vaatlustulemuste põhjal välja Taani astronoom Olaf (Ole) Rømer [röömer] (1644-1710). Ta jälgis planeet Jupiteri kaaslast ja pani tähele, et viimaste tiirlemisega seonduvad nähtused ei toimunud alati täpselt nendel hetkedel, mil arvutuste järgi pidanuks. Eriti suur oli erinevus pooleaastase vahega sooritatud vaatluste korral. Rømer taipas, et poole aastaga oli Maa Jupiterist ligi 300 miljonit kilomeetrit kaugemale liikunud. Vaadeldav nähtus hilines, kuna valgusel kulus vaatlejani jõudmiseks nüüd rohkem aega. Aastal 1675 sai Rømer nende vaatluste alusel valguse kiiruse väärtuseks 220 000 km/s. Olgu veel ka rõhutatud, et Rømer teostas mitte eksperimenti vaid **sihipärast vaatlust**, aga ta sai siiski teha arvuliselt väljendatava järelduse.

Füüsika arenedes on valguse kiiruse mõõtmise täpsus järjest kasvanud. Tänapäeval on selle väärtus teada juba sedavõrd täpselt, et pikkusühik 1 meeter on defineeritud valguse levimise kaudu. Valguse kiirust tähistatakse valemitega c ja selle väärtus on tänapäeval teada üheksa kümnendkoha täpsusega:
 $c = 299\,792\,458 \text{ m/s} = 299,792458 \text{ Mm/s} \approx 300 \text{ Mm/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Aastal 1877 sooritasid ameerika füüsikud Albert Michelson ja Edward Morley keerulise eksperimendi, mille üheks eesmärgiks oli näidata, et Maa liikumine mõjutab valguse vaatlemise tulemusi. Tollal arvati, et valguslained levivad maailmaruumi täitvas erilises keskkonnas, mida nimetati *maailmaeetrik*s. Michelson ja Morley oletasid, et kui Maa tiirleb suure kiirusega (30 km/s) ümber Päikese, peaksid täpsed katseriistad suutma eristada olukordi, mil Maal asuv vaatleja liigub eetris levivale valguslainele vastu või selle eest ära. Valguse kiirus on Maa orbitaalse liikumise kiirusest küll ligikaudu 10 000 korda suurem, kuid teadlased olid veendunud, et nende täpne eksperiment suudab seda väikest erinevust registreerida. Michelson-Morley katse üksikasjade mõistmine muutub paraku meile võib-olla jõukohaseks alles peale *Elektromagnetismi* kursuse läbimist.

Michelsoni ja Morley üllatus oli aga suur, kui katsete paljukordsel kordamisel ei suutnud nad märgata mitte mingit erinevust valguse levimises Maa liikumisega samas suunas ja vastassuunas. Avastus oli seniste füüsikateadmistega suures vastuolus. Newtoni mehaanika aluseks oli teadmine, et liikumine on suhteline. Liikumine sõltub vaatlejast ja võib erinevate vaatlejate jaoks olla vägagi erinev. Michelson-Morley katse kinnitas aga vastupidist – valguse liikumine on absoluutne. Valguse kiiruse katseline väärtus ei sõltu valgusallika ega vaatleja liikumisest. Valguse kiirus on kõigi vaatlejate jaoks ühesugune. Seda on kinnitanud ka kõik hilisemad katsed. Lisaks on tänapäeval teada, et üldse mitte miski ei saa liikuda kiiremini, kui seda teeb valgus

vaakumis. Tegemist on füüsika üldprintsiibiga, mida nimetatakse absoluutkiiruse printsiibigiks.

Absoluutkiiruse printsiiibi avastamine tõi füüsikasse suure pöörde. Meie kursuse alguses saime teada, et objektide mõõtmete järgi jaotatakse kogu füüsika poolt uuritav maailm mikro-, makro ja megamaailmaks. Makromaailm, mis koosneb inimesega samas suurujärgus mõõtmetega objektidest, on vaatleja poolt tajutav ilma eriliste abivahenditeta. Makromaailm on see, mida me ümberringi näeme ning milles toimuvaid nähtusi uurisime põhikooli füüsikakursuses. Selle maailma kirjeldamisest kogu loodusteadus alguse saigi, kuna mehaanika väljaarendamisel rakendasid Galilei ja Newton esmakordselt loodusteaduslikku meetodit makromaailma nähtustele selle kõigis üksikasjades. Makromaailma kirjeldavat füüsikat, mille aluseks on Newtoni sõnastatud mehaanika seadused, nimetatakse **klassikaliseks füüsikaks** (lad.k. *classicus* – kõrgeimate hulka kuuluv).

19. sajandi lõpukümnenditel tundus mitmetele füüsikutele, et kõik on selgeks saanud ja midagi uut enam välja uurida pole. Selle seisukoha väljaütlemisega sai tuntuks William Thomson ehk lord Kelvin, kelle järgi on nime saanud temperatuuri SI ühik. Füüsika arenes järjest kiirenevas tempos, kuni sajandi viimastel aastatel võimaldasid uued vaatlusmeetodid avastada objekte ja nähtusi, mida klassikaline füüsika enam seletada ei suutnud. Näiteks ei osatud põhjendada hõõguvate kehade poolt kiiritava valguse värvust. Nimelt ei tohiks klassikalise füüsika seaduste kohaselt hõõguva keha kiirgusspektris üldse maksimumi tekkida. Klassikaline füüsika ei osanud ka seletada, miks elektronide väljumine metalli pinnast selles neelduva valguse energia arvel ei sõltu üldse valguse summaarsest energiast, küll aga sõltub see valguse värvusest. Loomulikult ei suudetud kuidagi mõtestada valguse kiiruse absoluutsust. Just siis, kui tekkis arvamus, et füüsika on valmis saanud, tehti ridamisi uusi avastusi, mis senise füüsika raamidest ei mahtunud. Alguse sai **klassikalise füüsika kriis**, mis leidis lahenduse 20. sajandi esimesel veerandil uute füüsikateooriate väljatöötamisega.

Uus, kaasaegne füüsika, asus uurima aatomeid ehk mikromaailma ning kosmilist ruumi ehk megamaailma. Kaasaegne füüsika koosneb nii eelkõige kahest suurest teooriast – mikromaailma kirjeldavast **kvantmehaanikast** ning megamaailma nähtuste mõistmisel olulisest **relatiivsusteooriast** (lad.k. *relativus* – suhteline).

Klassikaline füüsika kirjeldab makromaailma sellisena nagu me seda tavaelus tajume. Liikumine on suhteline, mingi objekti kiirus on erinevate vaatlejate jaoks erinev. Samas aja kulgemine, kaugused ja kehade mõõtmed ning mass on kõikide vaatlejate jaoks ühesugused ega sõltu liikumisest. Aeg, ruum ja mass on klassikalises füüsikas absoluutsed. Aeg on nagu kõigi vaatlejate jaoks ühesugune rong, mille vaguniteks on päevad ja mis ühtemoodi (igavalt?) möödub kõigist vaatlejatest. See vagun, mis parajasti möödub, on tänane päev või **olevik**, äsja „möödunud vagun“ on eilne päev või **minevik**, „järgmine vagun“ või homme päev aga – **tulevik**. Me teame, et rong on olemas ja liigub sõltumatult sellest, kas keegi seda raudtee kõrvalt parajasti vaatleb või mitte. Selle põhjal tekib pettekujutus, et ka aeg on olemas vaatlejatest sõltumatult.

Samalaadne lugu on ruumiga. Klassikaline kujutus käsitleb ruumi kui mingit kingakarpi, mis on olemas ka kingade puudumisel. Kui keegi kasutab oma füüsikalises arutluses väljendeid *täiesti tühi ruum* või *tühja ruumi paisumine*, siis istub tema teadvuses Newtoni kujutus absoluutsest ruumist, ehkki see inimene võib väga hästi

osata lahendada ülesandeid relatiivsusteooria valemite rakendamise peale. Olgu veel märgitud, et eesti keel soodustab kujutlusi ruumist kui kingakarbist ja füüsikalistest kehadest kui kingadest selles karbis. Kui näiteks inglise keeles tähistab ruumi mingis hoones sõna *room* ning maailmaruumi (füüsikalist ruumi) sõna *space*, siis eesti keeles on mõlema kohta kasutusel üks ja seesama sõna *ruum*. Me tajume klassiruumi kui karpi. Tajume kui midagi, millel on servad kui koordinaatteljed ja nurgad kui telgede lõikepunktid. See asjaolu sisendab meile jõuliselt analoogilisi kujutlusi maailmaruumi kohta.

Absoluutkiiruse printsip aga väidab, et valguse kui väljalise objekti jaoks pole liikumine suhteline, vaid vastupidi – absoluutne. Relativistliku füüsika järgi osutuvad suhtelisteks hoopis pikkus, aeg ja mass. Aega kui lõputut ja kõigile ühesugust rongi – pole olemas. Samuti pole olemas ruumi kui kõigile võimalikele kingadele ühesugust kingakarpi. Aeg ja ruum on vaid vaateleja kujutlused. Iga vaateleja tekitab need omaenda aistingute põhjal ja kannab neid endaga kaasas nagu tigu teokarpi. Kui kaks vaatejat saavad erinevaid aistinguid, siis nende vaatejate kujutlused ajast ja ruumist peavadki olema erinevad. Ruum on olemas vaid seda võrd, kui temas on kehi. Aeg on olemas vaid seda võrd, kui temas toimuvad sündmused.

4.4.2. Relativistliku füüsika alused

Kui asusime tutvuma vaateleja mõistega (p.1.2.1), siis oli juba juttu sellest, et relativistlikus füüsikas kulgeb aeg erinevate vaatejate jaoks erinevalt. Mingi sündmus võib ühe vaateleja jaoks olla juba toimunud, aga teise vaateleja jaoks veel toimumata. Meenutagem välgu ja kõuemürina näidet eelmise punkti alguses. Asetsegu samas kohas maapinnal kaks vaatejat, kellest ühel on terve nägemine, teisel aga puudub nägemismeele täielikult – ta on pime. Samas on mõlemal vaatelejal normaalne kuulmine. Kui näiteks vaatelejatele lähenevas äikesepilves toimub neist kolme kilomeetri kaugusel esimene välgulööök, siis terve vaateleja näeb seda ja saab kohe teada lähenevast äikesest. Kuna helilaine läbib iga kilomeetri kolme sekundiga, siis kuulevad mõlemad vaatejad kõuemürinat alles üheksa sekundit peale välgulööki. Nende 9 sekundi jooksul on lähenev äike ja sellega seonduvad võimalikud ohud juba kindel osa esimese vaateleja reaalsustajust või isiklikust looduspildist. Pimeda vaateleja jaoks see aga veel nii ei ole.

Nendime, et mingi sündmus muutub osaks vaateleja looduspildist alles siis, kui teade sellest sündmusest on vaatelejani jõudnud. Kui teade on alles teel, siis on sündmus selle konkreetse vaateleja jaoks veel toimumata. Rangel võttes on välgulööök ka esimese vaateleja jaoks veel toimumata selle kümne mikrosekundi jooksul, mis kulub valgusel 3 km läbimiseks, kuna

$$t = \frac{s}{v} = \frac{s}{c} = \frac{3000 \text{ m}}{300 \frac{\text{Mm}}{\text{s}}} = \frac{3000 \text{ m}}{300 \frac{\text{m}}{\mu\text{s}}} = 10 \mu\text{s} \quad (4.1)$$

Ajaline viivis 10 μs on 10 000 korda väiksem inimese nägemismeele **ajalisest lahtusvõimest** ehk ajavahemikust veel eristatavate sündmuste vahel (ca 0,1 s). Seetõttu võime makromaailmas rahumeeli eeldada, et valgussignaali levik aega ei võta ning klassikalise füüsika seadused on rakendatavad. Samas tuleb valgus

kaugelt tähtedelt Maani meie jaoks miljonite aastate jooksul, mistõttu me gamaailmas tohib kasutada ainult relativistlikku füüsikat.

Relativistlik füüsika on selline aja ja ruumi käsitus, mis lähtub absoluutkiiruse printsiibist. Seni ilmunud füüsikaõpikutes on reeglina kombeks esitada seda printsiipi kahes osas, kuna nõnda toimis ka relativistliku füüsika looja Albert Einstein. Tema 1905. aastal kirjutatud teedrajav artikkel *Liikuvate kehade elektrodünaamikast* põhines kahel lähte-eeldusel ehk postulaadil. Kaasaegses sõnastuses kõlaksid nad nii:

1. Kõik vaatlusandmed on **suhtelised** (relatiivsuspriintiip). Füüsikaliste suuruste väärtused on üksteise suhtes liikuvate vaatlejate jaoks erinevad ning ükski vaatleja pole eelistatud. *Igäihel on oma tõde, mitte ükski tõde pole teisest tõesem.*

2. On olemas suurim võimalik kiirus ehk **absoluutkiirus**, millega levib väli ainelise objekti suhtes (valguse kiirus vaakumis $c = 299\,792\,458$ m/s). See kiirus on kõigi vaatlejate jaoks üks ja sama (absoluutkiiruse konstantsuse printsiip). *Aine ei saa liikuda sama kiiresti kui väli ning väljast kiiremini ammugi mitte.*

Rangelt võttes tuleks siinkohal täpsustada, et absoluutkiirusega liigub nullise seisumassiga objekt nullist erineva seisumassiga objekti suhtes. Objekti **seisumassiks** nimetatakse objekti massi selle objekti suhtes paigal seisva vaatleja jaoks. Väljaosakestest ehk vastastikmõjusid vahendavatest osakestest omavad nulliga võrduvat seisumassi elektromagnetilise mõju vaheosake **footon** (valguskvant, eestipäraselt *valgon*), tugeva mõju vaheosake **gluon** (eestipäraselt: *tugevon*) ning hüpoteetiline gravitatsioonilise mõju vaheosake **graviton** (eestipäraselt: *raskon*). Nõrga mõju vaheosakesel **uikonil** (ingl.k. *weakon*, parim eestikeelne vaste *nõrkon*, teaduslikus kirjanduses nimetatud ka W- või Z-bosoniks) on nullist erinev seisumass ja seetõttu uikon ei liigu absoluutkiirusega. See asjaolu aga meie tavamaailmas mitte kuidagi ei kajastu.

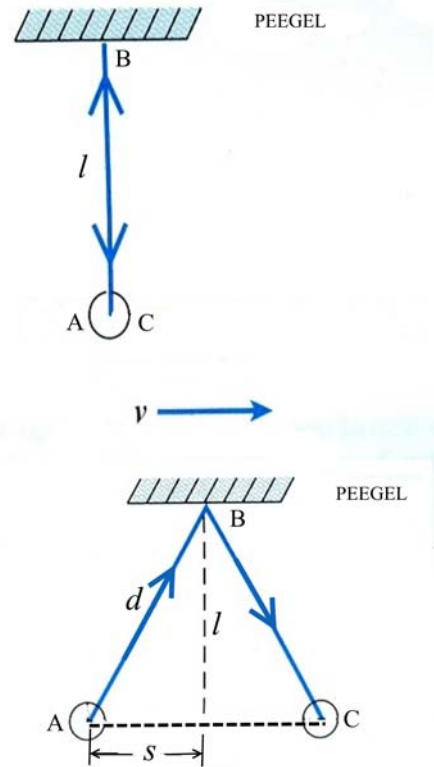
4.4.3. Aja aeglustumine ja pikkuste lühenemine

Juba eespool (p.3.2) oli juttu, et kujutluse ajast tekitab vaatleja kahe liikumise võrdlemise teel. Ta võrdleb uuritavat liikumist selle liikumisega, mis toimub kellas. Neis kellades, mida kasutame tavaelus, on tegemist mingi makroskoopilise keha perioodilise liikumisega. Mehaanilises kellas on see pöörlevalt võnkuv kellaratas, kvartskellas aga perioodiliselt oma mõõtmeid muutev kvartsikristall. Sekundi defineerimisel kasutatav tseesiumkell põhineb juba mikromaaailma protsessil, millest „teate“ meieni toob infravalguseks liigitatav elektromagnetlaineline. Täpsem võimalik kell on selline, milles võrdlusliikumiseks on kasutusel elektromagnetvälja liikumine. See toimub kõigi vaatlejate jaoks ühesuguse kiirusega – absoluutkiirusega c . Niisiis, parim kell on valguskell.

Valguskella töö aluseks on ülalpool (p.4.4.1) kirjeldatud Galileo Galilei idee valguse kiiruse mõõtmiseks, mida teeksid kaks lampidega meest. Valguskellas aga on teine mees lihtsalt asendatud peegli. Punktis A toimub välklambi sähvatus. Kui vastav valgussignaal jõuab sähvatus toimumiskohast kaugusel l asetseva peegli, siis valgussignaal peegeldub tagasi, läbib uuesti vahemaa l ning regist-

reeritakse välklambi vahetus läheduses paikneva seadme abil. Seepeale välklamp sähvatab uuesti ja kogu protsess kordub. Niisuguse valguskella üks ajaühik ehk kasutatava protsessi periood on aja definitiooni (valem 3.3) põhjal $2l/c$. Kui näiteks pikkuseks l on valitud 150 m, siis on valguskella

ajauhikuks ligikaudu üks mikrosekund (v arvutust 4.1). Asume edaspidi nimetama sündmuseks A valguse teeminekut, sündmuseks B valguse jõudmist peegli ja sündmuseks C valguse jõudmist tagasi lähtekohta.



Paiknegu nüüd selline valguskell Maast eemalduvas kosmoselaevas, kusjuures kosmoselaeva kiirus v on juba lähedane absoluutkiirusele c . Kosmonaut liigub Maa suhtes valguskellaga kaasa, tema jaoks on valguskell paigal ning sündmuste A ja B vahel on kosmonaudi maailmapildi kohaselt ajavahemik $t_0 = l/c$, sündmuste A ja C vahel aga ajavahemik $2t_0 = 2l/c$ (valguskella ajauhik). Tähega t_0 hakkame edaspidi tähistama **omaaega** ehk mingi sündmuse (antud juhul B) toimumisaega tegevuspaigal viibiva vaatleja jaoks. Rangelt võttes on meil muidugi tegemist ajavahemikuga Δt_{AB} alghetke ehk sündmuse A toimumise t_A ja sündmuse B toimumishetke t_B vahel, aga lugeses aja väärtust alghetkel nulliks ($t_A = 0$), saame et $\Delta t_{AB} = t_B - t_A = t_0 - 0 = t_0$.

Uurime nüüd, kui pikk on seesama ajavahemik t_{AB} Maal paikneva vaatleja seisukohalt, kelle jaoks valguskell on eemalduv objekt. Maapealse vaatleja jaoks läbib valgus sündmuste A ja B vahel pikema tee, pikkusega d (alumine joonis). Seni kuni valgus liigub välklambist peegli, eemalduv kosmoselaev ja seega ka peegel Maast mingi pikkuse s võrra. Valguse kiirus on aga nii kosmonaudi kui maapealse vaatleja jaoks ühesugune (absoluutkiiruse printsiip). Kui kiirus on sama, siis pikema tee läbimiseks kulub rohkem aega. Järelikult on ajavahemik Δt_{AB} maapealse vaatleja jaoks pikem. Tähistame selle aja edaspidi lihtsalt t -ga. Kui eeldame, et aja arvestuse alghetk (sündmus A) on mõlema vaatleja jaoks sama, siis toimub sündmus B maapealse vaatleja jaoks **hiljem** ($t > t_0$). Asume uurima, kui palju hiljem.

Kosmonaudi jaoks teatavasti $t_0 = l/c$ ja seega $l = c t_0$. Maapealse vaatleja jaoks aga $d = c t$ ja $s = v t$. Jooniselt näeme, et pikkused s ja l on sellise täisnurkse kolmnurga kaatetiteks, mille hüpotenuus on d . Täisnurkse kolmnurga kohta kehtib Pythagorase teoreem: $s^2 + l^2 = d^2$ ehk meie juhul

$$(v t)^2 + (c t_0)^2 = (c t)^2.$$

Et saada seost suuruste t ja t_0 vahel, peame avama sulud ja viima suurust t sisaldavad liikmed samale poole võrdusmärgi:

$$c^2 t_0^2 = c^2 t^2 - v^2 t^2 = (c^2 - v^2) t^2$$

Sellest

$$t^2 = \frac{c^2 t_0^2}{c^2 - v^2}, \quad \text{järelikult} \quad t = \frac{t_0}{\sqrt{\frac{c^2 - v^2}{c^2}}} = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Jõudsime järeldusele, et aeg pole kõigi vaatlejate jaoks ühesugune. Kui sündmuspaik mingi vaatleja suhtes liigub, siis ajavahemik kahe sündmuse vahel selle vaatleja jaoks pikeneb. Aja kulg sõltub liikumiskiirusest. Aja sõltuvust kiirusest väljendab valem

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma t_0, \quad (4.2)$$

kus aeg sündmuskohal viibiva vaatleja jaoks ehk **omaaeg** on t_0 ja aeg sündmuskoha suhtes kiirusega v liikuva vaatleja jaoks on t . Valemist 4.2 on näha, et kui liikumist pole (kiirus $v = 0$) või kiirus v on absoluutkiirusega c võrreldes väike, siis erinevust aegade vahel pole ja $t = t_0$. Valemis 4.2 sisalduvat suurust

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (4.3)$$

nimetatakse **Lorentzi teguriks**. See suurus esineb suuremas osas relativistliku füüsika valemitest ja näitab relativistlike muutuste ulatust. Kiiruse v lähenemisel absoluutkiirusele c kasvab Lorentzi tegur kiiresti: näiteks $\gamma(0,6c) = 1,25$; $\gamma(0,87c) = 2$; $\gamma(0,98c) = 5$ ja $\gamma(0,995c) = 10$. Absoluutkiirusel saab Lorentzi tegur lõpmata suureks.

Kui me suudaksime lennata kiirusega, mis moodustab 99,5 % absoluutkiirusest, siis oleks Lorentzi tegur meie jaoks 10 ja valemi 4.2 kohaselt $t = 10 t_0$. Kui me lendaksime sellise kiirusega täheni, mis paikneb Maast 10 valgusaasta kaugusel, siis kestaks meie reis maapealsete vaatlejate jaoks ligikaudu 10 aastat, sest me liigume peaaegu sama kiirusega kui valgus. Meie endi elus mööduks aga vaid üks aasta. Kohalejõudmist kõigest ühe aasta jooksul on võimalik seletada vaid nii, et vahemaa valitud täheni, mis maapealse vaatleja jaoks on 10 valgusaastat, on meie jaoks vaid üks valgusaasta. Võime järeldada, et kui tegevuspaik mingi vaatleja jaoks liigub, siis vahemaad või pikkused selles paigas lühenevad antud vaatleja jaoks seesama tegur γ korda, mis määrab ajavahemike pikeneduse. Objektide pikkuste kohta kehtib valem

$$l = \frac{l_0}{\gamma} = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \quad (4.4)$$

kus l_0 on objekti **omapikkus** ehk pikkus selle vaatleja jaoks, kes on objekti suhtes paigal, l aga on objekti lühenenud pikkus – vaatleja jaoks, kelle suhtes objekt liigub kiirusega v .

Pikkuste lühenemine on seletatav järgmiselt. Liikuva objekti **tegeliku pikkuse** leiab vaatleja objekti otsapunktidest lähtuvate valgussignaalide ajaliste viiviste arvesta-

misel. Selles mõttes on objekti tegeliku pikkuse leidmine arvutuste tulemus või "tagantjärele-tarkus". Arutus on järgmine: signaali päralejõudmise hetkel on objekti otsapunkt enam mitte seal, kust signaal teele läks (punktis, mis määrab objekti **näiva pikkuse**), vaid signaali teel oleku aja jooksul objekti poolt läbitud pikkuse võrra mujal (kui otsapunkt kaugeneb, siis vaatlejast kaugemal, kui läheneb, siis vaatlejale lähemal). Kaugeneva otsapunkti korral liigub otsapunkt eemale nii oma kujutisest ehk näivast asukohast kui ka vaatlejast. Otsapunkt ja kujutist vaatlejani toov valgus liiguvad vastassuundades. Läheneva otsapunkti korral liigub otsapunkt aga oma kujutisele järele – otsapunkt ja valgus liiguvad samas suunas. Kaugeneva otsapunkti korral on otsapunkti kujutise vaatlejani jõudmiseks kuluv aeg alati lühem ajast, mis kuluks valgusel otsapunkti tegelikust asukohast tulekuks. Läheneva otsapunkti korral on punkti kujutise vaatlejani jõudmise aeg tegelikust asukohast tuleku ajaga võrreldes pikem. Nende kahe aja vahe jooksul jõuab lähenev otsapunkt "täiendavalt läheneda", mistõttu objekti tegelik pikkus ehk objekti otsapunktide arvutuslik vahekaugus nende punktide kujutiste vaatlejani jõudmise hetkel on alati väiksem otsapunktide vahekaugusest objekti suhtes paigal oleva vaatleja jaoks.

Nüüd aga arvutame, kui palju aega kulub kaugelt tähelt tuleval valgusel Maani jõudmiseks valguse enda seisukohalt. Teisisõnu leiame, milline on valguse liikumise omaaeg. Valemist 4.2 saame, et

$$t_0 = t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

millest valguse jaoks ($v = c$) järeldub $t_0 = 0$, valguse jaoks on omaaeg alati null. Kui me saaksime valguse käest küsida, kui palju aega tal kulus kaugelt tähelt Maani jõudmiseks, siis võiks valgus vastata, et tal ei kulunudki aega. Veelgi tõenäolisemalt vastaks valgus aga hoopis küsimusega *Mis asi see aeg on?* Ja nüüd oleme sunnitud nentima, et me ei suuda valgusele seletada, mis on aeg. Valgus on ju „alati kohal“, tema jaoks ei ole olemas erinevate kiirustega liikuvaid objekte. Seega pole mingit võimalust kujundada aja mõistet. Analooogiliselt pole hüpoteetilisel puhtväljalisel vaatlejal mingit võimalust kujundada ruumi mõistet. Võime teha järelduse: puhtalt väljalise ehk absoluutkiirusega liikuva objekti jaoks pole ruumi ja aega olemas. See järeldus on heas kooskõlas tõdemusega, et puhtväljalise objekti jaoks tõrjutusprintsip ei kehti, ajalis-ruumilisi piiranguid ei eksisteeri.

4.4.4. Massi suurene mine

Mass on teatavasti keha inertsuse mõõt. Kui erineva massiga kehi mõjutada sama jõuga, siis kasvab suurema massiga keha kiirus aeglasemalt. Kujutleme, et me lükkame mingit keha pidevalt sama suure jõuga. Keha kiirus hakkab selle tagajärjel kasvama. Kuna jõud ei muutu, siis kasvab keha kiirus ühtlaselt – liikumine toimub konstantse kiirendusega. Kui kiirus kasvab väga suureks ja hakkab absoluutkiirusele lähenema, siis hakkab aeg muutuma. Selle vaatleja jaoks, kelle suhtes keha liigub, muutuvad kehaga seotud ajavaheahemikud pikemaks. Mingi kindla kiiruse kasvu Δv saavutamiseks kulub järjest rohkem aega. Kiiruse kasv muutub järjest aeglasemaks, keha kiirendus üha väheneb. Kiiruse kasvu aeglustumine aga tähendab, et keha muutub inertsemaks. Teisisõnu – keha mass kiiruse suurenemisel kasvab. Niisiis, ka mass pole relativistlikus füüsikas enam absoluutne. Mass sõltub liikumiskiirusest. Erinevus seisva ja liikuva keha masside vahel on samuti määratud Lorentzi teguriga. Kehtib aja aeglustumist kirjeldava valemiga 4.2 analoogiline valem

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma m_0, \quad (4.5)$$

kus m_0 on keha **seisumass** ehk mass selle vaateleja jaoks, kes on keha suhtes paigal. m aga on keha suurenenud mass – vaateleja jaoks, kelle suhtes keha liigub kiirusega v . Kuna ainelise objekti mass kasvab objekti kiiruse lähenemisel absoluutkiirusele valemi 4.5 kohaselt lõpmata suureks, siis ei saa mitte ükski ainekeha liikuda absoluutkiirusega. Puhtväljaline ehk nulliga võrduva seisumassiga objekt, näiteks valguse osake foton – liigub absoluutkiirusel. Lõpmata suure Lorentzi teguri γ ja nulliga võrduva seisumassi m_0 korrutamine valemis 4.5 annab fotonile täiesti lõpliku ja mõõdetava massi, mis on määratud fotonite energiaga.

4.4.5. Massi ja energia samaväärsus

Füüsika uurib ainelisi ja väljalisi objekte ning nende osalusel toimuvaid protsesse ehk nähtusi. Aineliste ja väljaliste objektide kõige üldisem ühine omadus on nende olemasolu. Tutvumisel aine ja välja üldiste omadustega saime ka juba teada, et ainet ja välja võib vastastikku teineteiseks muundada. See viib meid mõttele, et aine ja välja olemasolu kirjeldavad või siis kummagi konkreetset kogust määravad füüsikalised suurused peaksid olema omavahel seotud. „Kui ühte valuutat on võimalik teise vastu vahetada, siis peab ju eksisteerima vahetuskurs“ ütleks rahandusspetsialist. Millise suuruse ühikutes toimub aga arveldamine aine ja välja vastastikustel muundumistel?

Aine tunnuseks on see, ainelistel kehal on kindlad mõõtmed ja nad koosnevad osakestest. Ainelisi kehi iseloomustavateks suurusteks on näiteks mass ja ruumala. Mida suurem on keha, seda rohkem on temas kindla massiga aineosakesi ning seda suurem on keha kui terviku mass. **Mass** on aineliste objektide üldkoguse loomulikuks mõõduks, kõige üldisemaks olemasolu väljendavaks suuruseks. Rangel peaksime siiski ütlema, et aineliste objektide olemasolu, aine mingi kindel kogus avaldub vaateleja aistingutes kõigepealt läbi massiks nimetatava füüsikalise suuruse.

Väljaliste objektide olemasolu ning mingi kindel kogus välja avaldub vaateleja aistingutes aga kõigepealt läbi energiaks nimetatava füüsikalise suuruse. Me teame, et valgus kui kõige tuntum väljaline objekt kannab endas energiat. Valgus neeldub keha sees, mis selle tagajärjel soojenevad. Me ütleme selle kohta, et valguse energia muutus soojuseks. Valguse energiat saab aga päikesepatareide abil muuta ka elektrienergiaks. Kuna nii aineliste kui väljaliste objektide kohta kehtib atomistlik printsiip, siis võib neelduva valguse kogust mõõta valguse osakeste ehk fotonite arvuga. Igal fotonil on aga kindel energia, mis on määratud vastavat liiki valguse võnkesagedusega. Mida rohkem on fotideid, seda rohkem on ka valguse energiat.

Meenutame eelmises punktis arendatud mõttekäiku, mis selgitas keha kiirendamisega kaasnevat massi kasvamist. Kuna keha kiirendamisel mõjub jõud ja toimub liikumine, siis tehakse tööd. Keha kiirendamisel tehtav töö suurendab keha energiat. Liikuva keha energia on kineetiline ja selle hulk on määratud keha massi ja kiirusega. Mida suuremaks saab keha kiirus, seda suurem on ka keha kineetiline energia. Kui aga keha kiirus hakkab lähenema absoluutkiirusele, siis kasvab kiirus vaatamata pidevalt lisatavale energiale järjest vähem. Lõpuks jõuame olukorrani, kus vaatamata energia juurdeandmisele jääb kiirus praktiliselt muutumatuks. Kuhu see energia siis koguneb

kui kiirus enam kasvada ei saa? Vastus on lihtne: kuna suurel kiirusel hakkab kasvama keha mass, siis järelikult salvestub energia lisamassina.

Sama järelduseni jõudis relativistliku füüsika loomise käigus Albert Einstein. Kui energia kasvuga kaasneb massi suurenemine, siis järelikult mass ja energia on samaväärsed ehk võõrsõnaga väljendudes – **ekvivalentsed**. Nad on füüsikalised suurused, mis väljendavad vastavalt aine ja välja tähtsaimat omadust – olemasolu. Nende taga on looduse üks ja seesama omadus, mis avaldub vaatlejale erinevalt. See erinevus on üks tunnustest, mille alusel me teeme vahet aine ja välja vahel. Massi ja energia samaväärsust väljendab kõigi aegade kuulsaim füüsikavalem

$$E = mc^2, \quad (4.6)$$

mida me oleme arvatavasti ammu harjunud nägema kõrvuti selle valemi tuletaja Einsteini pildiga. Valemi 4.6 range tuletamine nõuab kõrgema matemaatika kasutamist, aga esmalähenduses võiks meid valemi 4.6 kehtivuses veenda võrdlus kineetilise energia valemiga $E_k = mv^2/2$. Kineetilise energia valemis tekib murru nimetajasse 2 põhjusel, et kehale kineetilise energia andmiseks peame keha kiirendama paigalseisust ($v = 0$) kuni kiiruse lõppväärtuseeni v . Keha keskmine kiirus selles protsessis on pool algväärtuse ja lõppväärtuse summast: $(0 + v)/2 = v/2$. Valgus aga liigub aineliste objektide suhtes alati absoluutkiirusega, teda kiirendada ei saa. Seetõttu võrdub valguse keskmine kiirus alati absoluutkiirusega, kahega jagamist kineetilise energia valemis ei teki ning valgusosakese ehk footoni kineetilise energia valem võtab kuju 4.6. Kuna valguse olemasolu avaldub vaatlejale ainult läbi liikumise, siis on footoni koguenergia ja kineetiline energia üks ja seesama asi. Ainelise objekti olemasolu aga avaldub vaatlejale eelkõige läbi massi. Seetõttu tuleb ainelise objekti ehk keha summaarne energia leida massi kaudu valemist 4.6.

Kui keha on vaatleja suhtes paigal, siis esineb samaväärsusseoses 4.6 keha seisumass m_0 ja vastavat puhast olemasolu-energiat nimetatakse keha **seisuenergiaks** E_r . Tähistusviis tuleneb ingliskeelsest sõnast *rest* – paigalseis. Niisiis, $E_r = m_0c^2$. Kui me uurime **mitterelativistlikult** ehk absoluutkiirusest palju väiksema kiirusega liikuvat keha, siis võime keha koguenergia E esitada kas seisuenergia E_r , kineetilise energia E_k ja potentsiaalse energia E_p summana või siis väljendada kõiki energiasid korrigeeritud läbi keha massi, mis on kineetilise ja potentsiaalse energia olemasolu tõttu suurem seisumassist. Kui tegemist on näiteks potentsiaalse energiaga raskusväljas, siis konkreetselt

$$E_r + E_k + E_p = m_0c^2 + \frac{m_0v^2}{2} + m_0gh = E = mc^2 \quad (4.7)$$

Kuna massi ja energia samaväärsusseoses 4.6 sisalduv absoluutkiiruse ruut on tohutult suur arv, siis on aines talletuv olemasolu-energia hiiglasuur. Kui ainekogus massiga üks gramm õnnestuks täielikult muuta väljaks, vabaneks sama palju energiat, kui me saaksime 3000 tonni ehk 50 vagunitäie kivisöe täielikul ärapõletamisel. Tegelikuses on nii ulatuslikud muundumised aineliste ja väljaliste objektide vahel vaid osalised. Sellegipoolest on nende mõju muljeta valdav.

Aine osalisel muutmisel väljaks vabanevat energiat nimetatakse **tuumaenergiaks**. Tuumaelektriijaamade reaktorites vabaneb see energia uraanituumade pooldumisel. Osa laguneva uraanituumade massist muutub väljade energiaks. Veel rohkem energiat vabaneb reaktsioonides, mille käigus liituvad vesiniku aatomite tuumad, moodustades

heeliumi tuumasid. Selline reaktsioon toimub meie Päikese ja kõigi teiste tähtede sisemuses ja on kogu maapealse elu olemasolu tagavaks energiaallikaks. Lähemalt uurime tuumareaktsioone *Mikro- ja megamaailma füüsika* kursuses.

Küsimusi ja ülesandeid

1. Oletagem, et me soovime oma kosmoselaeva kiirendada Maa suhtes kiiruseni $0,87 c$. Et tagada laevas maapealsetele lähedasi tingimusi, valime konstantse kiirenduse 10 m/s^2 , mis teatavasti on peaaegu võrdne raskuskiirendusega. Kui kaua kestaks kiiruse $0,87 c$ saavutamine?
2. Kas me tunneksime endid kiirusel $0,87 c$ ebamugavalt? Meie kehade massid on ju valemi 4.5 kohaselt kahekordistunud ja tundub, et meie jalgadel on vaja kanda endisest kaks korda raskemat keha.
3. Kui kaua võiks 100 W nimivõimsusega elektrilamp järjest põleda selle energia arvel, mis saadakse ühe milligrammi aine täielikul muundumisel energiaks?

STOP

1. Absoluutkiiruse printsiip väidab, et looduses eksisteerib suurim võimalik kiirus ehk absoluutkiirus. Puhtalt väljalise objekti liikumine aine suhtes on absoluutne, aineliste objektide omavaheline liikumine aga suhteline.
2. Absoluutkiirus c on kiirus, millega puhtväljaline ehk ilma seisumassita objekt liigub mistahes ainelise objekti suhtes. Absoluutkiirust nimetatakse enamasti valguse kiiruseks vaakumis, kuna valgus on inimestele kõige tuntum puhtväljaline objekt.
3. Klassikaline füüsika eeldab absoluutkiiruse lõpmatust (piirangu puudumist), relativistlik füüsika arvestab absoluutkiiruse lõplikkust (piirangu olemasolu) ja uurib liikumist absoluutkiirusele lähedastel kiirustel.

4.5. Terviklik kaasaegne füüsikaline maailmapilt

Oleme lõpetamas oma esimest tutvumisretke läbi kaasaegse füüsika. Oleme saanud teada, et füüsika uurib looduse kahte põhivormi – **ainet** ja **välja**.

Ainest koosnevad kehad, vastastikmõjusid kehade vahel vahendavad väljad.

Põhivastastikmõjusid on neli: gravitatsiooniline, elektromagnetiline, nõrk ja tugev. Selles reas üldiselt väheneb mõju ulatus, aga suureneb mõju tugevus (joonis 4.2)

liikumisolekut kirjeldab **kiirus** (v), liikumiste võrdlemine tekitab suuruse nimega **aeg** (t). Aeg on defineeritav teepikkuse ja kiiruse suhtena ($t = s/v$). Keha kiiruse muutumist ajas näitab **kiirendus** (a). Kehadevahelise vastastikmõju tugevust näitab jõud (F). Kehade inertsuse omadust kirjeldab **mass** (m), mis on määratletav jõu ja kiirenduse suhtena ($m = F/a$). Protsesse kirjeldab **töö** (A), mis on jõu F ja teepikkuse s korrutis. Olekuid kirjeldab **energia** (E). Kuna protsess viib keha ühest olekust teise, siis on töö algoleku ja lõppoleku energiatega vahe ($A = E_1 - E_2$). Kõike ülalöeldut kujutabki kaasaegse füüsikalise maailmapildi seoste üldskeem. Suutlikkus seda skeemi mõttekalt kommenteerida ongi füüsika tundmine – käesoleva FLA kursuse tasemel. Sestap on soovitatav FLA kursuse materjali ülekordamiseks vaadata ikka ja jälle skeemi ning mõtiskleda selle üle. Väga kasulik on ka üritada skeemi täiendada. Edu kõigile selles!