

# 1. SISSEJUHATUS

## 1.1. Füüsika aine

No one really knows something unless they can teach it (J. Logsten, statistician, UK, Scientific Computing World, May/June 2005, p.42.)

Mis on füüsika ja tema aine? Ranget definitsiooni on selle kohta raske anda. Füüsikud ise naljatavad, et füüsika on see, millega füüsikud tegelevad hilja õhtul. Aatomituuma avastaja **Rutherford** olevat kunagi öelnud, et *füüsika on ainuke teadus, ülejäänud on paremal juhul margikogumine*. See on muidugi tugev liialdus, nagu kõik sedasorti ütlemised, ehkki toleaeget konteksti arvestades võis tal ju mõnevõrra õiguski olla. Kuigi me esitet küsimusele lühidalt ja ammendatavalt siinkohal vastata ei suuda, võiksime siiski proovida analüüsida, milliste küsimustega tänapäeva füüsika tegeleb ja millistega mitte (kindlasti on ka selliseid küsimusi, nt mis on õnn?).

Me ei tea loodusest paljusid asju. Me näiteks ei tea, kas ja kuidas universum tekkis ja kas ta kunagi ka otsa saab ja kui saab, siis kuidas saab. Ja kui tekkis siis, miks ta tekkis? Nende küsimustega tegeleb füüsika haru nimega kosmoloogia.

Me ei tea ka miks ja kuidas täpselt tekkis elu. Mõned teadlased räägivad elu kosmilist päritolust, mõned aga, et elu on unikaalne ainult maaga seotud nähtus. Nende küsimustega tegeleb füüsikaga lähedalt seotud kosmosebioloogia.

Me ei tea isegi seda, kas meile seda kõike vaja teada on. Kas meie elu muutub sellest paremaks, et me rohkem teame või mitte? Kas ürgnimene, kes ei lugenud ajalehte ja ei vaadanud televiisorit ning seetõttu kahtlemata oli vähem informeeritud sellest, mis toimus kaugemal ruumis ja ajas, kui oli vahetult tema meeltega tunnetatav, oli vähem õnnelik kui tänane keskkoolilõpetaja? Ei tea! Tavaliselt me neid küsimusi endale ei esita. Me lihtsalt oleme sellised uudishimulikud olevused, kes ei lepi sellega mida me täna teame ja püüdleme kogu aeg uue poole. Küllap on ka see üks looduse seadusi, mille olemust me veel hästi ei mõista. Ja kuigi üks füüsika olulisemaid ülesandeid on ümbritseva maailma **üldistatud tunnetamine**, kindlaks tegemine, **milliste seaduste järgi ta toimib**, need viimased küsimused kohe kindlasti ei kuulu füüsika valda, vähemasti mitte selle kursuse lugejale teadaolevalt.

Niisiis, füüsika, nagu ka teiste teaduste, olulisemaid ülesandeid on ümbritseva maailma **üldistatud tunnetamine**, kindlaks tegemine, **milliste seaduste järgi ta toimib**. **Milleks meile need üldistused ja seadused?** Aga sellepärast, et vastasel korral me ei suudaks igapäevases infotulvas enam millestki aru saada. Meie aju oleks igasugustest faktidest küllastunud nagu Guinnessi rekordite raamat, kuid me ei suudaks neid fakte omavahel seostada, ega nendest vajalikke järeldusi teha. Ei näeks puude taga metsa.

Näiteks, juba **Galilei** katsetest ja nende **Newtoni** poolt tehtud üldistustest mitu sajandit tagasi me teame, et kõik kehad Maa raskusväljas maapinna

lähedal liiguvad kiirendusega  $g$ . Kui me seda ei teaks, siis iga uue aine puhul, mida keemikud või bioloogid sünteesivad peaksime Galilei katseid kordama.

Selle üldistatud tunnetamise vajadusega kaasneb ka see, et füüsika aine e see, millega füüsikud tegelevad, pidevalt areneb. Ühe uued faktid (teaduslikult tõesed, mitte seltskonnakroonika) nõuavad lahtimõtestamist.

Meie kursusega seoses on huvitav märkida, et elusloodus oli kaua aega füüsikute huvifäärast täiesti väljas. Vaatamata sellele, et just Bologna Ülikooli anatoomiaprofessori **Luigi Galvani** katsed elusorganismidega (avaldatud 1791; katseid kinnitas ja interpreteeris Pavia Ülikooli füüsikaproffessor **Alessandro Volta** 1793) äratasid esmakordselt laialdase huvi elektrinähtuste vastu. Ja samuti vaatamata sellele, et füüsika ühe alusseaduse, energia jäävuse seaduse, formuleeris esmakordselt Saksa arst **Julius R. von Mayer** (1814-1878). Tema teenete mittetunnustamine võis hiljem põhjustada mehe vaimuhaiglasse sattumise. Füüsikute ja bioloogide/arstide vaheliste suhete elavnemine langeb ajaliselt kokku molekulaarbioloogia tekkega läinud sajandi 50. aastatel. Siis vist sai suhteliselt enesekesksetele füüsikutele selgeks, et bioloogia on ootamatult tõsiseltvõetavaks teaduseks arenenud.

## 1.2. Teaduslik meetod

**Kuidas neid seadusi ja üldistusi siis kindlaks tehakse?** Selleks on ajapikku välja kujunenud teatud **süsteem**, mis sai alguse **Ticho Brahest**, **Joann Keplerist**, Galileo Galileist ja Isaac Newtonist (kõik tänapäeva mõistes (astro)füüsikud) ja mida nimetatakse **teaduslikuks meetodiks**. Süsteemi elementideks on:

- **vaatlus ja katse**  
(teadlased tavatsevad öelda **eksperiment**)
- **analüüs ja hüpotees**
- **udel ja teooria**
- **ennustus ja kontroll.**

### Vaatlus ja katse

Me saame oma teadmised loodusest vaatluste ja katsete (eksperimentide) tulemustena. **Vaatlused**, näiteks astronoomilised, ilmavaatlus või ökoloogilised, on looduses iseenesest toimivate protsesside **passiivne** registreerimine, jälgimine. **Eksperiment/katse** on **aktiivne** vahelesegamine looduslikesse protsessidesse, tahtlikult muutes nende toimumise tingimusi. Eksperiment ja vaatlus annab meile **teadmise**, mis toimub teatud objektidega antud tingimustes. Näiteks saame teada, et teatud täht kiirgab mingi intensiivsusega ja mingi spektraaljaotusega valgust, või et bakterirakk kasvab mingi kiirusega. Need on **faktid**, mis iseloomustavad seda – ja ainult seda – **konkreetses situatsiooni milles katse või vaatlus tehti**. Kui aga on tarvis teada, millal see täht (nt Päike) plahvatab supernoovana või kui kiiresti bakterid poolduvad, siis nendest katsetest vastust ei saa. Kuigi bakterite paljunemise kohta saaks ju teha ka vastava katse, siis Päikese plahvatuse

puhul oleks seda hilja vaadelda. Kui me oleme tõepoolest mõistnud tähe evolutsiooni ja raku elutsükli, siis peaksime olema võimelised *teoreetiliselt* ette ennustama nii pooldumist kui plahvatust. Ennustada saab teooria baasil, ekstrapoleerides või ka interpoleerides seda mudeli abil. **Teooria ongi tegelikult loodusliku protsessi peegeldus, loodusliku protsessi mudel meie mõtlemises.** Teooria on tunnetuse, *mõistmise* täiuslikem etapp.

Vaatlus ja katse annavad **teadmise**, mudel ja teooria annavad **mõistmise**. Vaatluse- ja katsetulemuste võrreldavuse huvide tuleb kokku leppida **mõõtmisühikutes. Mõõtmine on tegelikult ühikuga võrdlemine.** Vanasti olid lokaalsed ühikud (nt jalg ja küünar), kuid teadmiste levides oli tarvis ühikuid ühtlustada.

### **Analüüs ja hüpotees**

Kuidas aga tekib teooria meie käsutuses olevate katse- ja vaatlustulemuste kaudu? Vaatlused ja eksperimendid esitavad tulemustena teatud fakte, mis on tõesed nendes olukordades, milles need katsed tehti. Peaks tegema lõpmatu palju katseid, et saada vastused kõigi võimalike olukordade kohta, ja ikka jääks veel lõpmatu palju olukordi, mille kohta katset tehtud ei ole.

Näiteks küsimusele kui kaugele jõuab antud kiirusega liikuv auto vastates tuleks niisuguse empiirilise (katselise) lähenemise korral mõõta auto asukoht igal ajahetkel, sest ilma adekvaatse teooriata/mudelita ei või ju kuidagi teada, kus ta saab asuma järgmise sekundi, kümnendiku, sajandiku jne pärast. Kui meil on aga teooria, et auto liigub ühtlaselt ja sirgjooneliselt kiirusega 50 km/h, siis saame ette ennustada, kus ta saab asuma näiteks 3.6 sekundi pärast.

Kuidas tekkis aga ühtlase ja sirgjoonelise liikumise teoreetiline ettekujutus, kas selleks tehti lõpmatu palju mõõtmisi iga ajahetke jaoks? Ei, oli vaja mõõta keha asukoht ja aeg ainult kolmes punktis ja avastada seaduspärasus, et võrdsete teepikkuste läbimiseks kulus võrdne aeg. Ühtlase sirgjoonelise liikumise üldist seaduspärasust aga mõõtmistulemused meile ette ei ütle, see tuleb endal avastada tulemusi analüüsides, hüpoteese püstitades ning neid uutes katsetes kontrollides. **Katse ja eksimise meetod** aitab terad sõkaldest eraldada.

Mudeli ja teooria jaoks on seega vajalik andmete loogiline analüüs ja süstematiseerimine. Näiteks võiks olla Mendelejevi keemiliste elementide tabel või Linne liikide süstematiseerimine. Selles mõttes on ka Guinnessi rekordite raamatus teaduse elemente: faktid on eluvaldkondade järgi juba süstematiseeritud.

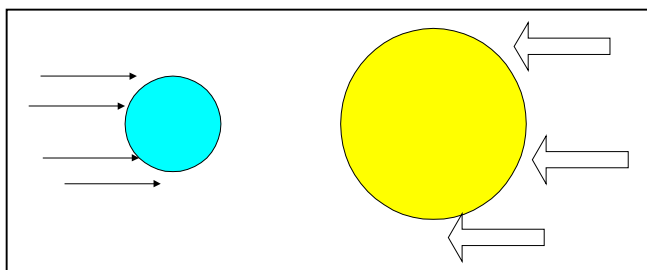
### **Mudel ja teooria**

**Teooria on niisugune loogiline (või matemaatiline) nähtuste mudel/üldistus, mis on kooskõlas kõigi olemasolevate katsetulemustega.** Tuleb rõhutada eksperimentaalse ja teoreetilise teadusliku tunnetuse dialektikat: ühelt poolt baseerub teooria eksperimentide tulemustel, teiselt poolt *ei ole olemas reeglit ega seaduspära, mille järgi eksperimentide tulemuste põhjal luua teooria.* Teooriat võib luua ka siis, kui on olemas kas või üksainus katse, aga tavaliselt ei ole see teooria siis võimeline rahuldama teise katse tulemust (ei lange sellega kokku). Teooria, mis rahuldab paljude

eksperimentide tulemusi, iseenesest ei tulene aga nendest eksperimentidest, vaid on omaette sõltumatu loogiline mudel, mis sünnib mõttetöö tulemusena. Tavaliselt arvatakse, et teadlastel on mingi eriline intuitsioon, mis aitab neil leida õiget teooriat. Näiteks, kuidas küll Mendelejev taipas, et elemendid grupeeruvad perioodiliselt kaheksa kaupa? Darwin nägi ainult liikide lõputut mitmekesisust, kuid kuidas ta seletas seda loodusliku valiku tulemusena? Tegelikult ei ole olemas mingit erilist intuitsiooni, vaid visa pingeline mõttetöö. Muidugi, nii nagu malemängugi puhul head mängijad ei vaagi kaugeltki kõiki võimalikke käike vaid valivad kiiresti kõige perspektiivikamad, sellega kompuutermaletajast erinedes, niisamuti head teadlased ei vaagi kaugeltki mitte kõiki võimalikke teooria variante vaid valivad kiiresti perspektiivikamad. Selles ehk väljendubki “intuitsioon”, mis tegelikult on kogemus ja laiad teadmised.

### Ennustus ja kontroll

Mida rohkem on eksperimente, mida antud teooria rahuldab, seda tõenäosem on, et ta rahuldab ka uusi, veel tegemata eksperimente, ja on seega võimeline tulemusi õigesti ette ennustama. Tuleb läbi mõelda ja loogiliselt käivitada palju erinevaid mudeleid, millest suurem osa ei rahulda mõnda eksperimenti ja tuleb seega kõrvale heita, kuni leitakse üks või isegi mitu mudelit, mis rahuldavad kõiki teadaolevaid eksperimente.



Näide gravitatsiooniseaduse seletamise kohta hüpoteetiliste nähtamatute osakeste rõhuga (R.P. Feynman *The Character of Physical Law*. Cox and Wyman 1965 (Tõlge vene k, Mir 1968), lk 38), mis on väär,

sest osakesed takistaksid ka taevakeha liikumist orbiidil, mida pole täheldatud. Veelgi varem arvati, et taevakehade tõmbumist põhjustavad inglid, mis nende taga tiibasid liigutavad. Ingleid pole samuti siiani leitud.

**Teooriate testimine/kontroll ei lõpe kunagi.** Kui leidub kasvõi üks tõsikindel fakt, mis ei ole teooriaga kooskõlas on teooria audis. Muide, mõne teooria loomise puhul on juhtunud, et üks või paar eksperimenti kangekaelselt ei sobi sellesse, sel ajal kui ülejäänud kõik sobivad. Siis võib tõsta ka küsimuse nende eksperimentide korrektsuse kohta. Siit tuleneb veel üks dialektiline seos eksperimenti ja teooria vahel: **katse kontrollib küll teooriat, kuid hea teooria võib kontrollida ka eksperimenti korrektsust.**

Näide Uraani liikumise iseärasuste seletamisest tollal mitte teadaoleva Neptuni mõjuga, mille tulemusel viimane ka avastati (Feynman, lk 20). Kõrgete energiatega füüsika eksperiment järgib põhiliselt teooria juhtnööre.

Oluline on ka **mõõtmiste täpsus**. Näide: Ühtlane sirgjooneline liikumine. Kolm venda käekellaga ja Uskumatu Toomas stopperiga. Füüsika on täppismõõtmiste teadus. Matemaatika aga võimaldab kompaktselt mõõtmise tulemusi analüüsida ja kirja panna. Suur osa füüsika progressist ongi seotud mõõtmiste täpsuse suurendamisega. Mõned näited: teravikmikroskoop, mis võimaldab aine pinda “näha” kuni 10000 korda parema lahutusega võrreldes tavalise valgusmikroskoobiga; atmosfääriväline astronoomia, uued võimsamad

osakeste kiirendid, füüsikainstituudis avastatud spektraalse augusätkamise efekt, mis soodsatel tingimustel võimaldab kuni 100000-kordselt paremat lahutuse võrreldes varasemate meetoditega jne. Vahest nähakse täpsuse suurendamise nimel aastaid "asjatult" vaeva. Sobiv näide selle kohta on gravitatsioonilainete detektorid, mida on laineid endid registreerimata juba umbes pool sajandit arendatud ning selle kohta ka hulgaliselt väitekirju kaitstud.

Siiski ei ole mõõtmistäpsust võimalik lõpmatult suurendada. Kvantmehaanika näitas, et **mõõtmistäpsusel on piirid** (Heisenbergi relatsioon impulsi ja asukoha määramatuse kohta).

### **Teooriate rakenduspiirid**

Reeglina on teooria katsete/vaatluste üldistus. Igasugune üldistus aga ka paratamatult lihtsustab. Seda isegi juhul, kui mõõtmised on tehtud maksimaalselt võimaliku täpsusega. Näiteks Newtoni kinemaatika reeglid "töötavad" tavapärasel kiirustel väga hästi, kui annavad valesid tulemusi väga suurte nn relativistlikel kiirustel. Sama võib öelda väga väikeste osakeste liikumise kohta, mida kirjeldab hästi kvantmehaanika, kuid mitte klassikaline Newtoni mehaanika. Nagu ükski inimene, pole ka ükski inimese poolt loodud mudel täiuslik, kõigil neil on oma kindlad rakenduspiirid, mida vahel on aga üsna keeruline kindlaks määrata.

### **"Kaine mõistus" ja teaduslik teadmine.**

*Einstein: Kaine mõistus on need eelarvamused, mis kujunevad välja enne 18. eluaastat.*

(i) Newtoni gravitatsiooniseadus. Kuni 20. saj. alguseni kõikidele kontrollidele vastu pidanud, kuid mikromaailmas täiesti kõlbmatu.

(ii) Kiiruste liitmine  $3+3=6$  km/s, aga  $300000$  km/s+ $300000$  km/s= $300000$  km/s.

Relativistlik kiiruste liitmise valem  $v = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}}$ , millest tuleneb, et kui

üks kiirus on  $c$ , siis  $v_i + c = c$ .

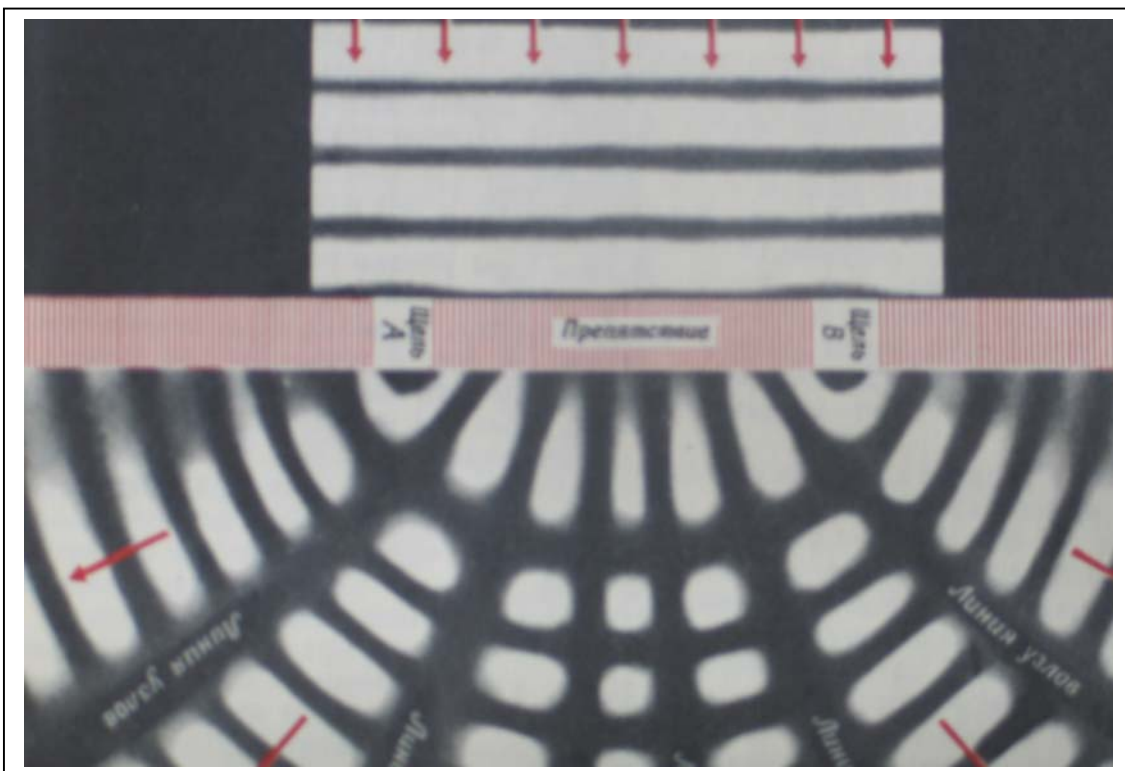
Samuti kasvavad kiiruse suurenedes relativistliku osakese mass ja tema impulss e liikumishulk:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

$$p = mv$$

(iii) Elektronide difraktsioon (vt joonist):  $2+2=0-8$ , kui leiutõenäosuse amplituud on ruutjuur 2. Elektron on osake. Iga mõõtmine annab täiesti konkreetse asukoha. Aga leiutõenäosus lainetab. See on klassikalise füüsika paradigma muutus. Heisenbergi relatsioon. Igale küsimusele ei saa täpset ja korduvat vastust nagu klassikalises füüsikas.

(iv) Gödeli ebatäielikkuse teoreem (1931) matemaatika/teooria ebatäielikkuse kohta. Mistahes formaalses süsteemis jääb alati probleeme, mida ei saa süsteemi aksioomide põhjal ei tõestada ega ka ümber lükata.



**Gödeli teoreem, Heisenbergi määramatuse printsiip ja tegelik võimatus jälgida isegi deterministliku süsteemi arengut, kui ta muutub kaootiliseks, moodustavad teaduslike teadmiste põhipiirangute kogumi.**

**Mis on seadused?** Väga üldised **seaduspärasused**, mis on kausa aega vastu pidanud kõikidele testidele on tõstetud **seaduse** ausse: energia jäävuse seadus jt. jäävusseadused, Newtoni seadused jne. Seadustegi hulgas on rohkem ja vähem üldiseid: vrd energia jäävuse seadust ja Ohmi seadust.

### 1.3 Sellest kursusest

Füüsika on suur ja lai hõlmates nii mikro- kui makrokosmose. Meie käsutuses olev aeg lubab käsitleda ainult murdosa kogu füüsikast. Põhiliselt me kontsentreerume sellele, mida võiks nimetada **aine ehituseks**. Pole tähtis kas see aine on orgaanilist või anorgaanilist päritolu. Ikka ta koosneb aatomitest ja/või molekulidest, mis teatud viisil interakteerudes moodustavad silmaga nähtava ja käega katsutava tavaaine. Käsitleme nende ainete omadusi erinevates agregaatolekutes: gaasilises, vedelas ja tahkes.

Ainel nagu teadmistelgi on kihiline struktuur. **Molekulid** koosnevad **aatomitest** ja need omakorda **elektronidest** ja **tuumadest**. Tuumad koosnevad **nukleonidest**, milleks on elektriliselt neutraalsed **neutronid** ja positiivselt laetud **prootonid**. Elektronid on nukleonidest ~2000 korda kergemad, seega peaaegu kogu aatomi mass on tema tuuma koondunud.

Nukleonid koosnevad omakorda murdarvulise elektrilaenguga **kvarkidest**.

Key:

Electric Charge	in units of the fundamental charge, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
Symbol	
Name	
Mass	in kg. See notes (1) and (2)

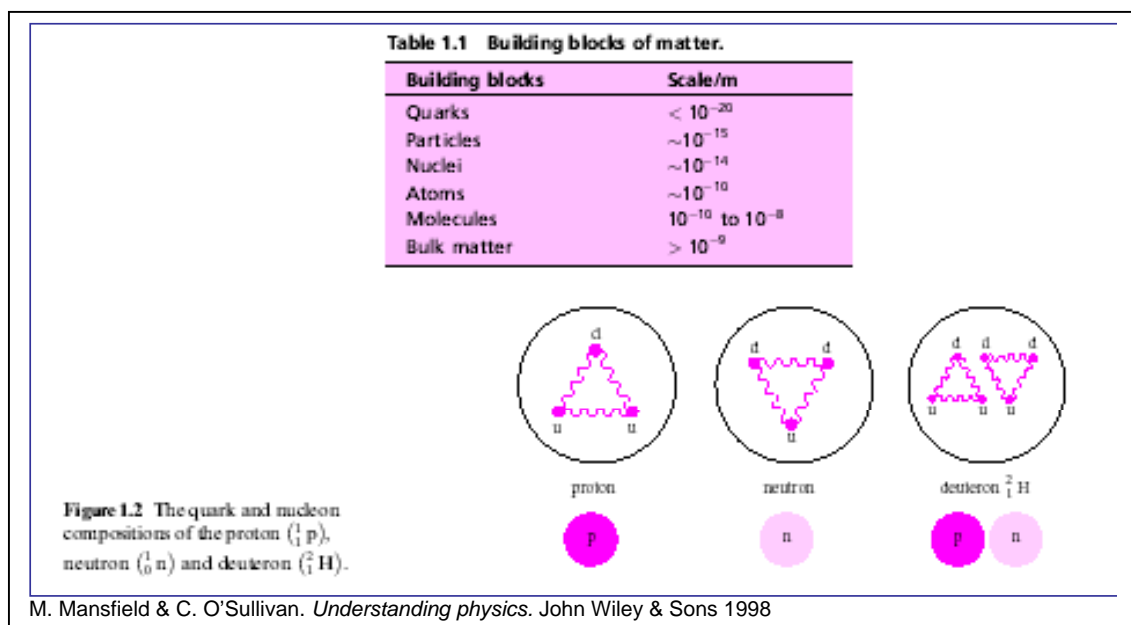
Quarks		Generation	Leptons	
$+\frac{2}{3}$ <b>u</b> Up $-9 \times 10^{-30}$	$-\frac{1}{3}$ <b>d</b> Down $-1 \times 10^{-29}$	First	$-1$ <b>e</b> Electron $9.1 \times 10^{-31}$	$0$ <b><math>\nu_e</math></b> electron-neutrino $< 2 \times 10^{-35}$
$+\frac{2}{3}$ <b>c</b> Charm $-3 \times 10^{-27}$	$+\frac{1}{3}$ <b>s</b> Strange $-3 \times 10^{-28}$	Second	$-1$ <b><math>\mu</math></b> Muon $1.9 \times 10^{-28}$	$0$ <b><math>\nu_\mu</math></b> Muon-neutrino $< 4 \times 10^{-31}$
$+\frac{2}{3}$ <b>t</b> Top $-3 \times 10^{-28}$	$-\frac{1}{3}$ <b>b</b> Bottom $-8 \times 10^{-27}$	Third	$-1$ <b><math>\tau</math></b> Tauon $3.2 \times 10^{-27}$	$0$ <b><math>\nu_\tau</math></b> Tau-neutrino $< 6 \times 10^{-29}$

(1) quark masses cannot be determined directly so that the values given here are theoretical estimates, known as current masses. Note that the total mass of the three quarks (uud) which make up the proton is substantially less than the measured mass of the proton ( $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ). The 'missing mass' will be accounted for when we study relativity in Section 9.15.

(2) the neutrino masses may in fact be zero.

Kvargid eksisteerivad vaid nukleonide sees, mitte vabalt. Nad on seotud tugevate jõududega, mille iseärasuseks on see, et kvarkidevahelised tõmbejõud üha kasvavad kauguse suurenedes (vaatamata tugevate tuumajõudude üldiselt väikesele mõjuraadiusele). Seega on endiselt kehtiv väide, et väikseim vabalt esinev elektrilaeng on elektroni laeng.

Kvargid (mida on kokku 6), ja elektron, müüon ja tauon ning 3 neutriinot (neid 6 osakest nimetatakse **leptoniteks**) kuuluvad nn. **alusosakeste**



(*fundamental particles*) hulka. Neid on siis kokku 12, koos vastavate antiosakestega aga 24. Alusosakesed teadaolevalt sisestruktuuri ei oma. See seisukoht võib aga edaspidi muutuda. Teie õppejõu ülikoolis käimise ajal peeti ka prootonit ja neutronit alusosakesteks. Kvargid tulid mängu alles hiljem. See on üldiselt ka aine mikrostruktuuri tase, millega me käesolevas kursuses piirdume.

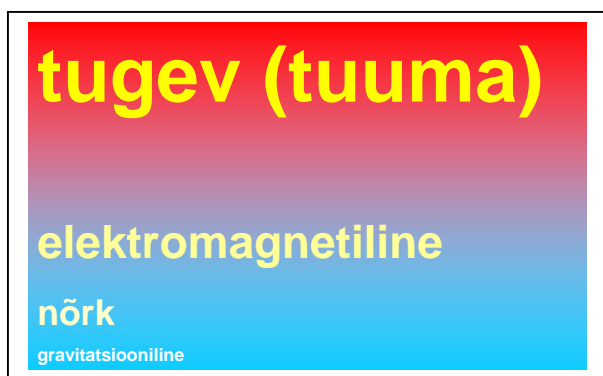
Paneme tähele, et **aine on tegelikult väga hõre**, peaaegu sama hõre kui meid ümbritsev maailmaruum! Tõepoolest, ülalpool nimetasime, et peaaegu kogu aatomi mass on koondunud tema tuuma. Aatom on aga tuumast peaaegu ~10000 korda suurem. Päikesesüsteemi raadius on ~ $5.9 \cdot 10^9$  km ja Päikese raadius ~ $7 \cdot 10^5$  km. Nii, et suhe on võrreldav. Kui joonistame tahvlile ringi (märklaua) läbimõõduga 1 m, siis oleks tuuma läbimõõduks vaid 0.1 mm (juuksekarva ots). Aatomituuma ülesleidmine (Rutherford) oli seepärast tõeline kangelas tegu ja võrreldav nõela otsimisega heinakuhjast. Ruumalate suhte saamiseks tuleb see arv veel kuupi tõsta, mis annab vastuseks 1 koos 12 nulliga.

Järgnevalt tutvume **jõududega**, mis mõjuvad aine osakeste või kehade vahel neid koos või ka lahus hoides ja mõjustavad nende liikumisolekut.

Füüsikas eristatakse **nelja fundamentaalset vastastikmõju**:

- **tugev** (mõjub kvarkide vahel)
- **elektromagnetiline** (mõjub elektriliselt laetud osakeste vahel)
- **nõrk** (mõjub leptonite vahel, sellega on seotud nt tuumade beeta lagunemine)
- **gravitatsiooniline** (mõjub kõikide kehade vahel, ainuke jõud, mis alati põhjustab tõmbumist).

Mõjud on esitatud tugevuse kahanemise järjekorras, mis hõlmab rohkem kui 40 suurusjärku. Tegelikult sõltub interaktsioonide suhteline tugevus ka osakeste energiast. Oodatakse, et ülisuurtel energiatel (nt  $10^{19}$  GeV, mida nimetatakse Plancki energiaks) peaksid kõik jõud samastuma.



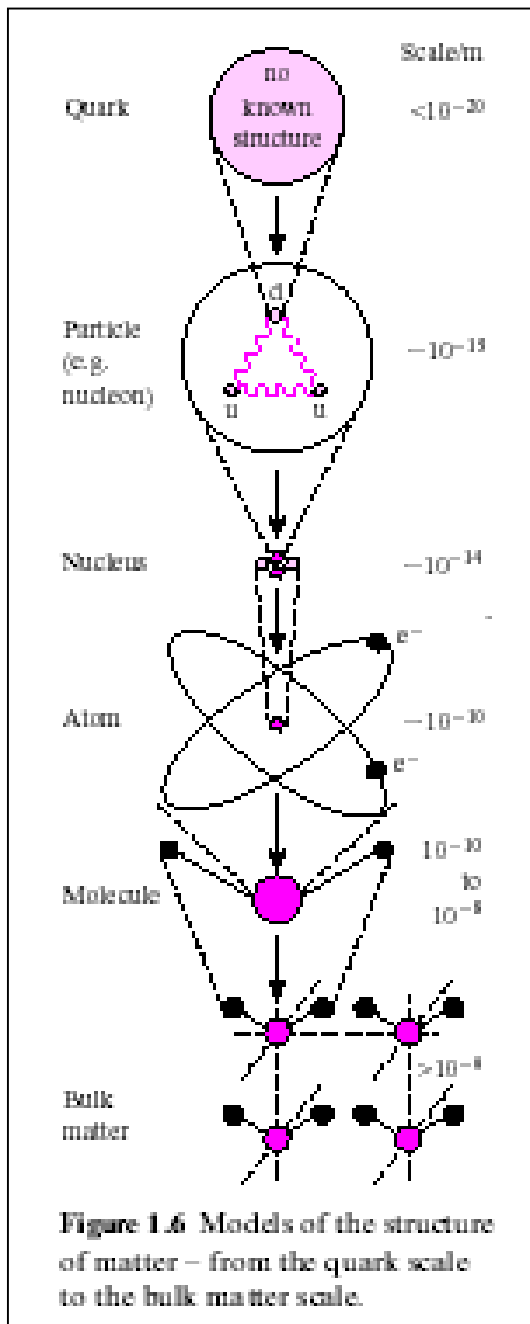
Nendest vastastikmõjudest käsitleme selles kursuses vaid teist ja neljandat, st **elektromagnetilist** ja **gravitatsioonilist** jõudu, mis mõlemad on kaugmõjud erinevalt ülejäänutest, mis mõjuraadiuselt on võrreldavad aatomituuma läbimõõduga nagu tugev

interaktsioon või on sellest isegi kuni 100 korda väiksem (nõrk).

Igapäevaelust võib jääda ekslik mulje, et gravitatsioonijõud on tugevad ja elektrijõud nõrgad, vastupidiselt sellele, mida me ülalpool väitsime. Kõik on siiski õige! Gravitatsioonijõud on võrreldes elektriliste jõududega väga nõrgad. Näiteks prootoni ja elektroni vaheline gravitatsioonijõud on ~ $10^{39}$  korda nõrgem



nendevahelisest elektrilisest külgetõmbejõust. Asjaolu, et me elektrilisi jõude ei tunneta või tunnetame vähe on tingitud sellest, et materjalid, millega me igapäevaselt kokku puutume on peaaegu alati elektriliselt neutraalsed, nad sisaldavad võrdsel arvul elektrone ja prootoneid. Kui see nii ei oleks, siis oleks elu lausa põrgu! Kujutame ette kahte umbes poolekilost raudmuna, kust kõik elektronid on mingi nipiga ära koristatud. Keegi on välja rehkendanud, et olles üksteisest 30 cm kaugusel tõukuksid nad siis üksteisest tohutu jõuga  $7 \cdot 10^{18}$  tonni.



### Kuidas kaasaegne füüsika seletab kehadevahelist vastastikmõju?

Kõigepealt tuleb endale selgelt aru anda, et kehad ei eksisteeri tühjuses. Neid ümbritsevad alati väljad.

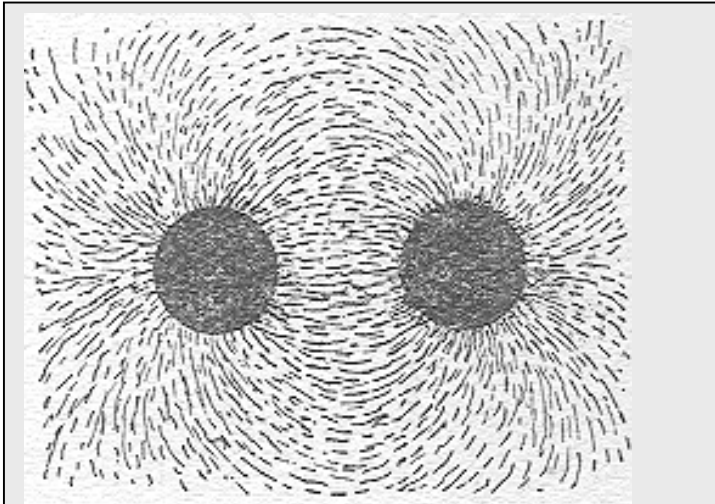
**Keha** tunneme ära sellest, et tal on olemas **mass**, mis samaaegselt väljendub nii liikumise **inertsis** kui ka keha ümbritsevas **gravitatsiooniväljas**. Kehal võib olla ka **elektrilaeng**, mis tekitab teda ümbritseva **elektro-magnetvälja**. Igasugust välja iseloomustab välja energia, täpsemini potentsiaal, mis üldjuhul ruumis muutub.

**Vastastikmõju tekib, kui uuritav keha satub antud keha ümbritsevasse välja.** Näiteks Kuu Maa gravitatsioonivälja või elektron prootoni elektrivälja.

See mõju on seda suurem, ehk kehale avalduv jõud on seda tugevam, mida kiiremini muutub välja energia/potentsiaal antud ruumpunktis.

Jõud mõjub alati suunas, mis viib energia/potentsiaali vähenemisele. Näiteks kivi kukub Maa poole (ülevaalt alla) sellepärast, et tema potentsiaalne energia väheneb selles suunas.

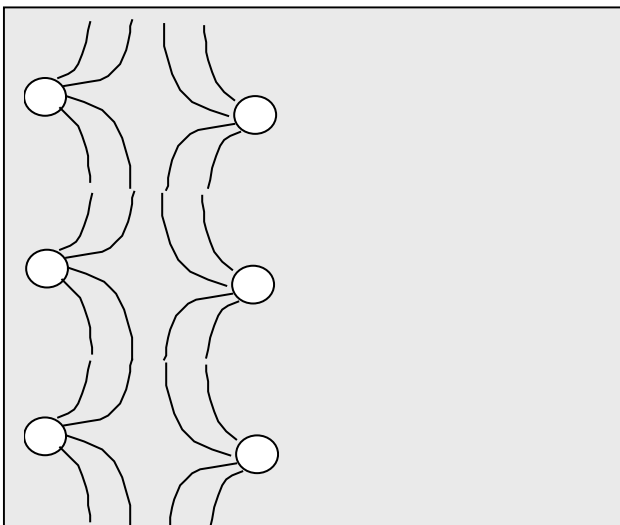
Seega, kehade vastastikmõju avaldub **jõuväljana** ruumis, millel on nii



Kehasid ümbritsevad väljad, elektriväli ja gravitatsiooniväli, mida võib kujutada jõujoontena. Jõuväljad põhjustavad muutusi kehade liikumises, nt. vastastikust tõmmet.

suurus kui suund (tegemist on vektorväljaga). Joonis kujutab kahte (N ja S) magnetpoolust ümbritsevat jõuvälja, mida visualiseerib paberile raputatud rauapulber. Kehad mõjutavad üksteist vaid kaugelt, jõuväljade kaudu. Gravitatsiooniline kaugmõju on silmaga nähtav universumi ehituses, elektromagnetiline kaugmõju aga domineerib aatomite ja molekulide vahel, ka siis kui kehad "silmnähtavalt" kokku

puutuvad. Kehade "kokkupuudet" selle sõna otseses tähenduses looduses ei toimu. Maksimaalses läheduses aatomite välised elektronkihid satuvad lähestikku ja negatiivsed laengud tõukuvad üksteise jõuväljas, takistades kehade edasist lähenemist (vt joonist). Kui see siiski peaks aset leidma nii, et aatomite elektronkihid kattuvad (nt kõrge temperatuuri mõjul), takistab edasist lähenemist positiivselt laetud tuumade tõukumine.



Kehade maksimaalsel lähenemisel kokkupuudet ei toimu, vaid pinnakihi aatomid tõukuvad nende elektronkatete elektriväljade vastastikmõju tõttu

Veel üks oluline aspekt. Kehad mitte ainult tekitavad välju, vaid ka tekivad väljadest. Üheks näiteks on nn suur pauk 14-15 miljardit aastat tagasi. Väli ja aine on materia eksisteerimise kaks võrdväärset vormi. Välja kvantidel näiteks fotonil on samuti mass, mida väljendab tema energia. Kaugete tähtede valgus kaldub Päikesest möödudes Päikese poole sarnaselt komeetidele. Selles väljendub massi ja energia ekvivalentsus, mida esmakordselt (1916) näitas Einstein. Neid aspekte kirjeldavad kvantväljateooriad, mida me selles kursuses ei

käsitله, kuid seda on hea teada.

Tasuks võib-olla samuti teada, et kui elektromagnetilise välja kvandid ehk **footonid** vahendavad elektromagnetilist vastastikmõju, siis tugevat mõju

vahendavad **glüoonid**, ja nõrka vastastikmõju nn. **vahebosonid**. Sama väljateoreetilise idealoogia kohaselt peaks gravitatsioonilist vastastikmõju vahendama **gravitonid**, mida pole siiski veel katseliselt avastatud.

Kogu looduse struktuur alates aatomitest ja lõpetades universumiga, kaasa arvatud eluslooduse struktuur, saab palju mõistetavamaks kui tunneme füüsikaseadusi, mis määravad liikuvate kehade käitumise üksteise jõuväljades. Suhteliselt väike arv põhilisi füüsikaseadusi määrab elektronide paigutuse aatomis, aatomite paigutuse molekulis, molekulide paigutuse aines. Selge, et struktuuri keerukamaks muutudes, elektronide/aatomite/molekulide arvu suurenedes, ei ole lihtne nende vastastikust mõju täpselt analüüsida.

**Füüsika on võimeline täpselt kirjeldama ainult suhteliselt lihtsaid struktuure.** Näiteks kvantmehaaniliselt on täpselt lahenduv vaid kahe keha vastastikmõju probleem. Kolme või rohkema keha puhul tuleb juba kasutada mitmesuguseid lähendusvõtteid.

Mis põhjust on meil siis veel rääkida **bioloogilisest füüsikast**? Rakkudes on ju suurusjärk  $10^{10}$  või rohkemgi molekuli. Nendel keerukamatel juhtudel tuleb rakendada loogilise ekstrapolatsiooni meetodit, püüdes ette kujutada kuidas lihtsaid struktuure valitsevad seadused kombineeruvad keerukamates struktuurides. See ongi mõtlemine, mida teilt oodatakse, kui asute omal erialal käesolevas kursuses omandatut rakendama. Käesoleva kursuse üks kaugemaleulatuvaid eesmärke on mõista, missugused molekulides ja rakkudes toimuvad liikumised on aluseks eluprotsessidele. Seepärast enne kui jõuame bioenergeetikani, peame tutvuma lihtsate kehade, sh aatomite ja molekulide füüsikaliste omadustega ja õppima kirjeldama nende liikumist. Samal ajal võib suur omavahel seotud elementide (aatomite, molekulide) arv põhjustada täiesti uusi nähtusi ja seaduspärasusi, mis üksikute elementide tasemel ei esine.

Füüsika mõistmiseks ei tohi mitte valemeid ega konspektilehtedel asetsevaid lauseid endale vaimusilma ette manada, vaid tuleb kujutleda protsesse, kehasid ja nende liikumisi. Ei ole suur häda, kui te aatomit või molekuli kujutlete teistsugusena kui ta tegelikult on, suurem on häda kui te neid üldse ette ei kujuta. Tõesti, suure hulga aatomite-molekulide liikumise ettekujutamine võib olla raske, aga veel raskem oleks nende matemaatiline kirjeldamine. Niisiis, *asjade mõistmiseks tuleb just neidsamu asju modelleerida, ette kujutada, mitte aga meelde tuletada valemeid või lauseid, mis nende kohta käivad.* Selles väljendubki erinevus mõistete "tean" ja "mõistan" vahel. "Teatakse" fakte. Tüüpiline näide on siin mälumängurite kiired vastused Kuldvillaku turniiril. Mnemoturniiril aga antakse aega ja ilus on pealt kuulata, kuidas loogilise arutelu, mõtlemise teel jõutakse õige vastuseni ka siis, kui seda mitte ükski osavõtja alguses ei tea. Vastus, mida ei teata, mõeldakse välja. Õige vastuse, õige käitumise väljamõtlemine igal elujuhtumil ongi asjade mõistmine. Füüsikas on heaks mõistmise kontrolliks ülesannete lahendamine. Ilma ülesandeid lahendamata ei ole te seda füüsikakursust kindlasti mitte mõistnud. Samad sõnad käivad praktikumitööde kohta.

### **Bioloogiline füüsika – kas füüsika või bioloogia?**

## Otsad kokku

Füüsika aine; Teaduslik meetod; See kursus

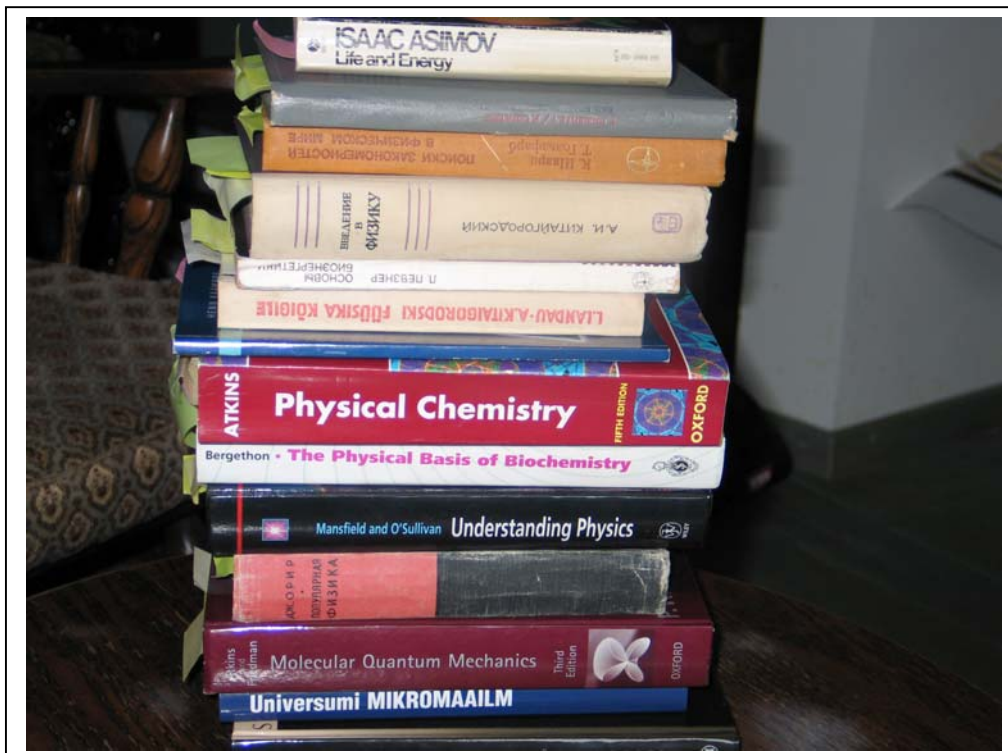
Vastame lõpuks ka küsimusele füüsika aine kohta: Traditsiooniliselt loetakse füüsika uurimisvaldadeks

- Mehaanikat
- Termodünaamikat
- Elektrit ja magnetismi
- Optikat
- Aatomfüüsikat
- Tuumafüüsikat
- Osakeste füüsikat
- Kondenseeritud aine füüsikat
- Astrofüüsikat
- Biofüüsika?

Üritame selle pika jutu lõpuks analüüsida ühte näiliselt lihtsat katset. Ma usun, et ka kõige lihtsamat bioloogilist protsessi on sellest katsest tuhandeid kordi keerulisem analüüsida. See katse illustreerib asjaolu, et igasugune mudel või teooria, olgu ta nii täiuslik kui tahes, on ikkagi vaid tegeliku olukorra idealiseering/lihtsustus. Samuti aitab ta mõista, mis suunas toimuvad loomulikud/iseeneslikud/spontaansed muutused vähegi keerulistes süsteemides.

## 1.4. Soovituslik lugemisvara

järjestatud väljalaskeaasta järgi; [sinisega](#) on tähistatud eesti k kättesaadavad materjalid



<http://plantphys.ut.ee/kursused/fyysika.html>

## Üld

- W. T. Griffith. *The Physics of Everyday Phenomena. A Conceptual Introduction to Physics*. Mc Graw Hill 2004
- M. Mansfield & C. O'Sullivan. *Understanding physics*. John Wiley & Sons 1998
- C.E. Swartz, T.D. Goldfarb. *The Search for Order in the Physical Universe*. W.H. Freeman & Co. 1974 (tõlge vene k Mir 1977)
- A.I. Kitaigorodski. *Sissejuhatus füüsikasse*. Nauka 1973. (vene k)
- [M. Volkenshtein. \*Teaduse ristteedel\*. Nauka 1972 \(Tõlge eesti k, Valgus 1975\)](#)
- F.A. Kaempffer. *The Elements of Physics*. Braisdall Publishing Co. ((tõlge vene k Mir 1972))
- [L. Landau, A. Kitaigorodski. \*Füüsika kõigile\*. Valgus 1968](#)
- J. Orear. *Fundamental physics*. John Wiley 1967 (Tõlge vene k, Mir 1969)
- R.P. Feynman *The Character of Physical Law*. Cox and Wyman 1965 (Tõlge vene k, Mir 1968)

- R.P. Feynman et al. *The Feynman lectures in Physics*, v.1-9. Addison-Wesley 1963 (Tõlge vene k, Mir 1976)

## Eri

- A.Freiberg. *Kõige tähtsam energeetika*. **Horisont**, September 2005
- J. Lõhmus, R. Veskimäe. *Universumi mikromaailm*. Tallinn 2003.
- R. E. Chapman. *Physics for Geologists*. Routledge 2002
- S. Hawking. *Universum Pähklikoores*. A Bantam Book 2001 (Tõlge eesti k, Eesti Entsüklopeediakirjastus 2002)
- H. Käämbre. *Füüsika XII klassile: Aatom, molekul, kristall*. Koolibri 1998
- R. Veskimäe. *Universum*. Tallinn 1998.
- Rosen. *Mathematics Recovered for the Natural and Medical Sciences*. Chapman & Hall 1992
- P. W. Atkins. *The Second Law*. Scientific American Books 1984 (Tõlge vene k, 1987)
- P. W. Atkins, R.S. Friedman. *Molecular Quantum Mechanics*. Oxford Uni Press 1997
- I.Asimov. *Seal, kus lõpeb maa*. Weybright and Talley, 1975 (tõlge eesti k, Valgus 1982)
- L. Peusner. *Concepts in Bioenergetics*. Prentice-Hall 1974 (tõlge vene k, 1977)
- J. A. Campbell. *Why do chemical reactions occur?* Englewood Cliffs, NY 1965 (tõlge vene k, 1967)
- I.Asimov. *Life and energy*. Avon Books 1962

## Tõsisemale huvilisele/edasijõudnule **bioloogilise füüsika** alal

- M. Daune. *Molecular Biophysics. Structures in Motion*. Oxford Uni Press 2004
- J.A.Tuszynski, M. Kurzynski. *Introduction to Molecular Biophysics*. CRC Press 2003
- D. T. Haynie. *Biological Thermodynamics*. Cambridge University Press 2003.
- K. Eerme. *Muutumatu kliima tähendaks ajaloo lõppu*. **Akadeemia** 15 (2003) 2051.
- I.Tinoco, K. Sauer, J. C. Wang, J. D. Puglisi. *Physical Chemistry. Principles and Applications in Biological Sciences*. Prentice-Hall 2002

- R.E. Blankenship. *Molecular Mechanisms of Photosynthesis*. Blackwell Science 2002
- K. Bogdanov. *Biology in Physics. Is Life Matter?* Academic Press 2000
- R. M. Alexander. *Energy for Animal Life*. Oxford Uni Press 1999
- P.R. Bergethon. *The physical basis of biochemistry: The foundations of molecular biophysics*. Springer 1998
- J. Wigglesworth. *Energy and Life*. Taylor & Francis 1997.
- P. Bak. *How Nature Works*. Springer 1996
- **Physics Today** Feb. 1994 (Special Issue: Physics and biology)
- J.S. Richardson et al. *Looking at proteins: representation, folding, packing, and design*. **Biophysical Journal** 63 (1992) 1186-1209 (koos demonstratsioonikettaga)
- **Scientific American** March 1991 (Special Issue: Self-organized criticality)
- A.B. Rubin. *Biofizika*. Võshaja Shkola T.1-2, 1987 (vene k)
- I.D. Campbell & R.A. Dwek. *Biological Spectroscopy*. Benjamin/Cummings 1987A.C. Davõdov. *Solitonõ v bioenergetike*. Naukovo Dumka 1986 (vene k)
- **Scientific American** Oct. 1985 (Special Issue: Molecules of life)
- M.V. Volkenshtein. *Biofizika*. Nauka 1981 (vene k)Cantor &Schimmel. *Biophysical Chemistry*. Freeman Publication 1980K. [Rebane](#). *Energia, entroopia, elukeskkond*. Valgus 1980.
- R.K. Clayton. *Photosynthesis. Physical Mechanisms and Chemical patterns*. Cambridge University Press 1980 (Tõlge vene k, 1984)
- A.S. Davõdov. *Biologija i Kvantovaja Mehanika*. Haykovo Dumka 1979 (vene k)H. Haken. *Synergetics*. Springer 1978 (Tõlge vene k 1980)
- F. J. Dyson. *Energy in the Universe*. **Scientific American**, Sept. 1971, 51