

Põhivara aines LOFY.01.002 Füüsikaline maailmapilt

Maailm on keskkond, mis jääb väljapoole inimese *mina*-tunnetuse piire. **Maailmapilt** on teadmiste süsteem, mille abil inimene tunnetab ümbritsevat maailma ja suhestab end sellega. Kuna maailm toimib kõikjal kehtivate ehk *universaalsete* printsiipide alusel, siis kasutatakse loodusteaduslikes tekstides sageli *maailmaga* samas tähenduses mõistet **Universum**.

Loodus (lad *natura*) on inimest ümbritsev ja inimesest sõltumatult eksisteeriv keskkond. Loodus vastandub selles määratluses inimeste poolt loodud ehk **tehiskeskkonnale**, aga ka inimesi ümbritsevale mentaalset komponenti (kunsti, muusikat jne) sisaldavale keskkonnale, mida nimetatakse **kultuuriks**. Looduses toimuvaid muutusi nimetatakse **loodusnähtusteks**.

Loodusteadus (ingl *science*) on koondnimetus õpetustele, mis annavad loodusnähtustele teaduslikke kirjeldusi ja seletusi ning pädevalt ennustavad loodusnähtusi.

Looduse tasemeline struktureeritus seisneb selles, et igal kindlal struktuuritasemel toimuvaid nähtusi võib kirjeldada sellel tasemel oluliste looduseaduste abil ja see ei sõltu kuigivõrd teistele tasemetele omastest nähtustest. Erinevad loodusteadused tegelevad looduse erinevate struktuuritasemetega. Füüsika tegeleb kõigi tasemetega.

Füüsika (kr *physikos* – loomulik) on loodusteadus, mis uurib täppisteaduslike meetoditega looduse kahte põhivormi – **ainet** ja **välja**. Füüsika käsitleb looduse kõige üldisemaid ilminguid ehk **füüsikalisi objekte**. Objekt on see keha (ese), nähtus või kujutus, millele meie tegevus on parajasti suunatud. Füüsika tekitab looduse kõige üldisemad mudelid, mida kasutavad kõik teised loodusteadused.

Aine on see, millest koosnevad füüsikalised **kehad**. Makroskoopilise keha tähtsaim tunnus on pealispind, mis eraldab keha ainet muust aimest. **Ainega** toimuvad loodusnähtused millalgi ja kuskil (ajas ja ruumis), **väljaga** toimuvad nähtused alati ja kõikjal (aja ning ruumi mõisted pole rakendatavad).

Väli on aktiivne keskkond, mille vahendusel üks keha mõjutab teist. Väli on jõu tekkimise võimalikkus. Aine ja väli võivad neis sisalduva energia ulatuses teineteiseks muunduda. Erinevad aineosakesed samas ruumiosas olla ei saa (ei mahu), erinevad väljad aga saavad küll. Aineosakestel on enamasti kindlad mõõtmed, väljal neid reeglina ei ole.

Vaatleja on indiviid (inimene), kes kogub ja töötleb infot maailma (looduse) kohta. Vaatleja tunnusteks on **tahe** (valikuvabaduse olemasolu), **aistingute** (maailmast tulevate signaalide) vastuvõtmine, **mälu** (salvestatud aistingute) kasutamine ja **mõistuse** (mõttekujundite) rakendamine. Füüsika on paljude vaatlejate ühine loodust peegeldavate kujutluste süsteem. Ilma vaatlejata ei saa olla füüsikat.

Aistingulise info saamine: maailmas leiab aset **sündmus**; vaatleja närviraku ehk **retseptorini** jõuab mingi füüsikalise nähtuse vahendusel **signaal** selle kohta; signaali infot kande närvimpulss läheb **ajusse**, kus tekib sündmust peegeldav aisting. Erinevatest meeleorganitest pärinevate erinevate aistingute põhjal tekib ajus sündmusest terviklik **taju**. Seejärel kasutab aju **mälu** säilitatavaid varasemaid sellelaadseid aistinguid ja tajusid, rakendab **mõistust** (süllogisme) ning lõpptulemusena tekib sündmusest või objektist terviklik **kujutus** ehk **visioon**. Füüsika koosneb eri vaatlejate poolt tekitatud ja omavahel kooskõlastatud kujutlustest.

Süllogism (kr *syllogismos* – järeldus) ehk mõttekujund on tõese järelduse tegemine maailma kohta vaid mõistuse abil, ilma vastavat aistingut saamata. Näiteks: kui $a = b$ ja $b = c$, siis ka $a = c$.

Maailmapildi aluseks on vaatleja **usk** tema poolt maailma tunnetamisel kasutatava meetodi õigsusesse.

Füüsikalise maailmapildi aluseks on usk loodusteaduslikku meetodisse. See meetod toimib alljärgnevalt. Vaatleja, kel on **primaarseid** ehk otseselt aistingutest tulenevaid kujutlusi tekitatud piisavalt palju, asub mälu ja mõistuse abil konstrueerima **sekundaarseid** kujutlusi, millega seonduvaid aistinguid ta veel pole saanud, kuid mis süllogistlikult tulenevad primaarsetest. Sellist tegevust nimetatakse **hüpoteesi** loomiseks. Nüüd asub vaatleja maailma mõjutama eesmärgiga esile kutsuda uuritavale sekundaarkujutlusele vastav sündmus. Seda nimetatakse **eksperimentiks**. Kui vaatleja tõepoolest saab piisavalt täpselt sama aistingut, mille tekkimist ta prognoosis, siis teeb vaatleja **järelduse**, et oodatav sündmus maailmas tõepoolest toimus ja hüpotees on saanud eksperimentaalse **kinnituse**. Kui vaatleja oodatud aistingut ei saa, tuleb hüpoteesi kas täiustada või see kõlbmatuna kõrvale heita. Sageli ei saa vaatleja uuritavat loodusnähtust mõjutada. Ta saab seda vaid **sihipäraselt vaadelda**. Kuid sihipärase vaatluse positiivse tulemuse tõestuslik jõud ei jää alla eksperimendi omale. Võime loodusteadusliku meetodi kirjelduse kokku võtta sõnadega: vaatlus → hüpotees → eksperiment (või sihipärane vaatlus) → andmetöötlus → järeldus → hüpoteesi täpsustamine → uus eksperiment jne.

- Mütoloogilise** maailmapildi aluseks on usk autoriteetidesse. Maailmapildi konstrueerimisel loetakse tõsikindlaks infoks mõnede, antud valdkonnas kõigutamatult autoriteetsete inimeste väited, neid eksperimentaalselt või vaatluslikult kontrollimata. Selliste väidete (vähemasti osaliselt) kooskõlaline süsteem moodustab **müüdi**. Loodusteaduslik ja mütoloogiline maailmapilt välistavad teineteist.
- Inimene** kui vaatleja koosneb ka ise looduse objektidest (aine ja välja osakekestest) ning **infost** nende objektide paigutuse ja omavahelise vastastikmõju viiside kohta. Selle info põhiliike nimetatakse religioossetes tekstides hingeaks ja vaimuks.
- Hing** on inimeses sisalduva info see osa, mis on omane kõigile indiviididele (laiemas tähenduses – kõigile elusolenditele). Hinge olemasolu tähendab organismi osalemist ainevahetuses omaette subjektina, tähendab organismi funktsioneerimiseks vajalike tagasiside-ahelate toimimist, tähendab näiteks *hingamist* (hapniku ümbertöötlemist süsihappegaasiks), millest tulenebki sõna *hing*. Hing on organismi **liigi-info**. Selles tähenduses on hing olemas ka loomadel.
- Vaim** on inimeses sisalduva info see osa, mis on omane vaid antud indiviidile. Vaimu olemasolust tuleneb inimese vajadus maailmapildi järele. Samas on konkreetse indiviidi maailmapilt tema vaimu osa. Vaim on inimese **indiviidi-info**.
- Religioosse maailmapildi** aluseks on usk sellesse, et maailma mitmekesisus ning korrapära tulenevad inimesest kõrgemal seisvast tahtelisest infoallikast. Seda maailma struktureerivaid programme käivitavad (ja usutavasti ka kontrollivad) infoallikad nimetatakse religioossetes tekstides **Jumalaks**.
- Ateistliku maailmapildi** aluseks on usk sellesse, et maailma mitmekesisus ja korrapära on isetekkelised ning neid tagavat kesket infoallikat ei ole olemas. Religioosne ja ateistlik maailmapilt välistavad teineteist, kuid mitte kumbki neist ei välista loodusteaduslikku ega ka mütoloogilist maailmapilti.
- Nähtavushorisondiks** nimetame piiri, kuni milleni ühel vaatlejal või inimkonnal tervikuna on olemas eksperimenti või sihipärase vaatluse teel kontrollitud teadmised füüsikaliste objektide kohta. Inimkonna kui terviku nähtavushorisondi taha jäävad füüsikalised objektid enamasti põhjusel, et pole veel olemas vahendeid selliste objektide vaatlemiseks. **Füüsika** on ainus loodusteadus, mis määratleb ja nihutab edasi inimkonna nähtavushorisonte.
- Sisemine nähtavushorisont** on vaatleja(te) teadmiste piir liikumisel piki mõõtmete skaalat üha väiksemate objektide poole (järjestikuse vastamisel küsimusele *Mis on selle sees?*).
- Väline nähtavushorisont** on vaatleja(te) teadmiste piir liikumisel piki mõõtmete skaalat üha suuremate objektide poole (järjestikuse vastamisel küsimusele *Mis on selle taga?*).
- Makromaailma** moodustavad inimesest mõõtmete poolest mitte väga palju erinevad objektid. Need on objektid tüüpilise mõõtmega, mis jääb ühe mikromeetri (miljondiku meetri) ja ühe megameetri (miljoni meetri) vahele. Makromaailmas kehtivaid füüsikaseadusi võime me uurida nägemismeelega vahetult hoomatavate katsete abil, vajamata lisavahendeid.
- Mikromaailma** moodustavad inimesest mõõtmete poolest palju väiksemad objektid. Need on objektid tüüpilise mõõtmega, mis jääb alla ühe mikromeetri (miljondiku meetri).
- Megamaailma** moodustavad inimesest mõõtmete poolest palju suuremad objektid. Need on objektid tüüpilise mõõtmega, mis on üle ühe megameetri (miljoni meetri ehk 1000 kilomeetri).
- Loodusnähtuse kirjeldus** annab omavahelises loogilises seoses ning vastavat terminoloogiat (füüsikalisi suurusi ja mõõtühikuid kasutades) edasi antud nähtuse iseloomulikke jooni (vastab küsimusele *kuidas?*). Kirjeldavat teooriat (käsitlust) nimetatakse **fenomenoloogiliseks** (nähtus ehk *fenomen*).
- Loodusnähtuse seletus** annab edasi selle nähtuse tulenemise üldisemast või sügavamal struktuuritasemel kehtivast seaduspärasusest (vastab küsimusele *miks?*, asetab selle nähtuse “oma kohale”). Võimes anda loodusnähtustele pädevaid seletusi avaldub füüsika **heuristiline** (avastuslik) väärtus. Seletus on enamasti viide põhjuslikule seosele.
- Loodusnähtuse ennustamine** on väide selle nähtuse toimumise kohta tulevikus või mingis teises kohas. Võimes pädevalt ennustada loodusnähtusi avaldub füüsika **prognostiline** (ennustuslik) väärtus. Ennustamise aluseks on põhjuslike seoste tunnetamine.
- Põhjuslikult seotuteks** nimetatakse kahte sündmust siis, kui vaatleja suudab sündmustele vastavate kujutluste vahel luua süllogistliku seose. Füüsika on õpetus tähtsaimatest põhjuslikest seostest looduses.
- Ruumiliseks** nimetatakse sellist põhjuslikkust, mille korral põhjuslikult seotud sündmused on korraga esinevad või vaadeldavad. Ruumiline põhjuslikkus avaldub ühe füüsikalise objekti koosnemises teistest objektidest (nt *Liivahunnik koosneb liivateradest. Liivaterade olemasolu on liivahunniku olemasolu põhjus*). Matemaatikas tegelevad ruumilise põhjuslikkusega geomeetria ja algebra.

- Ajaliseks** nimetatakse sellist põhjuslikkust, mille korral põhjuslikult seotud sündmused ei ole korraga vaadeldavad. Ajaline põhjuslikkus avaldub ühe sündmuse järgnevuses teisele. Näiteks: *raamat paikneb laua kohal õhus ja talle mõjub raskusjõud* (sündmus 1, põhjus); *raamat on jõudnud laua pinnale* (sündmus 2, tagajärg). Matemaatikas tegeleb ajalise põhjuslikkusega funktsioonide teooria (kõrgtasemel teeb seda matemaatiline analüüs), põhimeetoditeks on diferentsiaal- ja integraalarvutus.
- Põhjuslikkus** on liigitatav võimalike tagajärgede arvu järgi. **Fatalistliku** põhjuslikkuse korral tundub olevat võimalik ainult üks tagajärg. **Juhusliku** põhjuslikkuse korral on võimalikke tagajärgi üle ühe, kuid siiski lõplik arv ning me saame hinnata ühe või teise tagajärje esinemise tõenäosust (nt *täringuvise*). **Kaootilise** põhjuslikkuse korral on võimalikke tagajärgi lõpmatu arv (nt *“õnnevalamine”*). **Tahtelise** põhjuslikkuse korral realiseerub kellegi tahte rakendumise tulemusena üks kindel tagajärg. **Näiva** põhjuslikkuse korral on nii põhjuse kui tagajärjena vaadeldav sündmus tegelikult põhjustatud mingist kolmandast, esialgu märkamatuks jäänud sündmusest.
- Ettemääratus** on mingi sündmuse esinemine tulevikus, sõltumata teistest sündmustest, mis esmapilgul võiksid antud sündmuse kui tagajärje võimatuks muuta. Füüsikaline ettemääratus on tingitud loodusseaduste vältimatust kehtivusest. Info mittefüüsikalise ettemääratuse kohta on reeglina ilmutuslik info. See on info, mille omaja (ilmutuse saaja) on kindlalt veendunud info tõesuses, kuid ei oska selgitada, millisest ja mil viisil töödeldud aistingust see pärineb. Füüsika ei tegele ilmutusliku infoga.
- Loodusnähtuse füüsikaline mudel** esitab kompaktselt füüsikalise objekti kohta olemasoleva info, sidudes objekti abstraktsed (meeltega mittetajutavad) omadused millegi vahetult tajutavaga ning tuues esile aspektid, milles objekt erineb teistest omataolistest. Füüsika tegeleb mudelitega põhjusel, et loodusnähtuse kõigi omaduste samaaegne arvestamine on liiga keerukas ja sageli ka mittevajalik.
- Füüsikaline suurus** on füüsikalise objekti mõõdetav iseloomustaja (karakteristik). Füüsikaline objekt (loodusnähtus) on olemas ka ilma inimeseta. Füüsikaline suurus on inimlik vahend objekti kirjeldamiseks. Suuruse mõõtmine on tema väärtuse võrdlemine mõõtühikuga.
- Rahvusvaheline mõõtühikute süsteem SI** kasutab 7 füüsikalist suurust põhisuurustena. Nende suuruste mõõtühikud on põhiühikud. Kõik teised suurused ja ühikud on määratud vastavalt põhisuuruste ning põhiühikute kaudu. Põhisuurused on: pikkus, aeg, mass, aine hulk, temperatuur, voolutugevus ja valgustugevus. Nende ühikud on vastavalt: meeter, sekund, kilogramm, mool, kelvin, amper ja kandela.
- Skalaarne suurus** on esitatav vaid ühe mõõtarvuga, millele lisandub mõõtühik. Skalaarsed suurused on ilma suunata (näit. aeg, pikkus, rõhk, ruumala, energia, temperatuur).
- Vektoriaalne suurus** on kolmemõõtmelises ruumis esitatav kolme arvuga (+ mõõtühik). Need on vektori koordinaadid. Vektoriaalsetel suurustel on suund olemas (näit. kiirus, kiirendus, jõud).
- Füüsika keeles** tuleb (erinevalt tavakeelest) kasutada korrektselt füüsikaliste suuruste ning mõõtühikute nimetusi ja tähiseid. Suuruste tähised esitatakse kaldkirjas (*l, t, m, ...*), ühikute omad püstkirjas (cm, s, kg...). Suuruse tähis on reeglina vastava ladinakeelse sõna esitäh (longitudo, tempus, massa...)
- Valem** on lühidalt (tähiste abil) kirja pandud lause. Nt. valem $v = s/t$ tähendab, et kiiruse (*velocitas*) leidmiseks tuleb keha poolt läbitud teepikkus (*spatium*) jagada kulunud ajaga (*tempus*). Füüsikaliste suuruste tähised esitatakse kaldkirjas (*italic*), ühikute tähised aga püstkirjas. Vektorsuuruse tähis kaldkirjas tähendab vastava vektori pikkust. Negatiivne pikkus tähendab seda, et vastav vektor on suunatud vastupidiselt kokkuleppelisele positiivsele suunale. Kui on oluline rõhutada mingi suuruse vektoriaalsust, siis on selle suuruse tähis valemis toodud rasvases püstkirjas (**bold**).
- Induktiivne meetod** (induktsioon) on liikumine üksikult üldisele. Uus, laiema kehtivusalaga teadmine saadakse üksikfaktide (kitsama kehtivusalaga teadmiste) üldistamise teel. Alustatakse kõige lihtsamast looduse mudelist ja sammhaaval "lisatakse keerukust".
- Deduktiivne meetod** (deduktsioon) on liikumine üldiselt üksikule. Deduktiivse (aksiomaatilise) teooria ülesehitamisel formuleeritakse kõigepealt **aksioomid** (üldeeldused, füüsikas: **printsübid**) ja neist tuletatakse loogiliselt kõik teised väited. Üksikjärgeldusteni jõutakse, rakendades üldist printsipi antud erijuhul. Printsipide tõesust kinnitab teooria üksikjärgelduste kooskõla katsefaktidega.
- Seaduspärasus** on loodusnähtuse kohta kehtiv **kvalitatiivne** (erijooni rõhutav, mõõdetavust mitte eeldav) üldistus (nt. *mida massiivsem on keha, seda raskem on muuta tema liikumisolekut*). Seaduspärasus ei pea olema esitatav matemaatiliselt rangelt (valemi või võrrandina).
- Seadus** on loodusnähtuse kohta kehtiv **kvantitatiivne** (mõõdetavust eeldav), matemaatiliselt range valemi või võrrandina esitatav üldistus (vrd.: *keha kiirendus on pöördvõrdeline keha massiga, $a = F/m$*). Füüsikaseaduse formuleerimisel kasutatakse kindlasti **füüsikalisi suurusi**.

Fatalistlik on mõtlemisviis, mille kohaselt on võimalik ainult üks tõde ja kui see on kindlaks tehtud, siis kõik teised väited on automaatselt valed. See on füüsika ekslik taandamine matemaatikale.

Liikumiseks võib nimetada igasugust olukorra muutumist. Kui muutub keha asukoht, asend või kuju, siis räägitakse mehaanilisest liikumisest. Liikumise mõiste tuleneb vajadusest kirjeldada ajalist põhjuslikkust. Liikumisest võib rääkida ainult tänu sellele, et vaatlejal on olemas mälu.

Liikumise liikideks on **kulgemine** (translatsioon), **pöörlemine** (rotatsioon), **kuju muutumine** ehk *kujumine* (deformatsioon) ja **võnkumine** (ostsillatsioon). Kulgliikumisel muutub keha asukoht. Pöördliikumisel muutub keha asend. Deformatsioonil muutub keha kuju. Võnkumisel muutub millegi asend või kuju perioodiliselt (korduvalt). Võnkeseisundi kulgemine on **laine**. Liikumisest on mõtet rääkida vaid vähemasti kahe keha (objekti) korral. Keha, mille suhtes liikumine toimub, nimetatakse **taustkehaks**.

Vastastikmõju on põhjus, mis muudab kehade liikumisolekut (kiirust). Vastastikmõju intensiivsust kirjeldav füüsikaline suurus on **jõud**. Sõnaga *vastastikune* rõhutatakse asjaolu, et kui üks keha mõjutab teist, siis teine mõjutab ka esimest. Mõju võrdub vastumõjuga (Newtoni III seadus). Vastastikmõju käigus toimub aine ja välja ajutine muundumine teineteiseks. Vastastikmõju põhiliigid tugevuse suurenemise järjestuses on: **gravitatsiooniline, nõrk, elektromagnetiline** ja **tugev**.

Laeng on füüsikaline suurus, mis kirjeldab keha omadust osaleda mingis vastastikmõjus. Elektromagnetilises mõjus osalevad vaid kehad või osakesed, millel on **elektrilaeng**. Nõrgas mõjus osalevaid, aga tugevas mõjus mitteosalevaid osakesi nimetatakse **leptoniteks**. Neil on **leptonlaeng**. Tugevas mõjus osalevaid osakesi nimetatakse **kvarkideks**. Neil on tugeva vastastikmõju laeng ehk **värvus**. Kõik kehad või osakesed osalevad gravitatsioonilises mõjus, mille laengut nimetatakse **raskeks massiks**.

Looduse laenguline sümmeetria seisneb selles, et igal laengul on olemas vastupidine laeng ehk **antilaeng**. Elektri- ja leptonlaengu korral nimetatakse laengut kokkuleppeliselt positiivseks ja antilaengut negatiivseks (+ ja –). Värvilaenguid on kolm (R – *red*, punane; G – *green*, roheline ja B – *blue*, sinine). Igal alusosakesel on olemas **antiosake**, millel kõik laengud on vastupidised.

Spinn on osakese olemuslik sisemine liikumine, mis kuulub lahutamatu osakese juurde. **Aineosakese** korral on spinn tõlgendatav osakese pöörlemisena ümber oma telje (ingl *to spin* – pöörlema). Seda pöörlemist ei saa peatada. Võib vaid muuta pöörlemistelje asendit ruumis, mida nimetatakse **spinni suunaks**. Kaks vastassuunaliste spinnidega aineosakest võivad paikneda samas ruumpiirkonnas (teineteise “sees”). Nad pöörlevad ühel ja samal teljel vastandlikes suundades. **Väljaosakese** spinn on tingitud tema kulgevast liikumisest (enamasti absoluutkiirusega c).

Füüsika üldprintsüübid on meie kõige üldisemad tõdemused looduse kohta. Printsüübid on meie *miks?*-küsimuste ahelate lõpud. Me ei oska enam vastata, miks see või teine printsüüp kehtib. Me nendime, et loodus lihtsalt on selline. Kõiki teisi väiteid looduse kohta peale printsüüpide endi saab põhjendada printsüüpidega. Igale looduskäsitlusele on omane kasutatavate printsüüpide kindel valik.

Aistingute primaarsuse printsüüp väidab, et maailmapildi kujundamisel tuleb lugeda primaarseteks neid füüsikalisi suursi, mille tähendus (looduse nähtus või omadus) on meeleeelunditega tajutav. Näiteks **pikkus** või **kiirus** – nägemise abil, **jõud** – lihaspinge vahendusel. Samas osutuvad **aeg** ja **mass** sekundaarseteks (tuletatud) suurusteks, sest aja või massi meelelisi aistinguid me ei saa.

Atomistlik printsüüp väidab, et nii aine kui väli ei ole lõputult osadeks jagatavad. Mõlemal on olemas vähimad portsjonid, mida aine korral nimetatakse **fundamentaali-** või **alusosakesteks**, välja korral aga **kvantideks**. **NB!** Õigem sõna on *portsjon* (energiat, massi, impulssi vm), mitte *osake*. Sõna *osake* tekitab kujutluse “kuulikesest”, millel on olemas “pealispind”. See kujutlus on täiesti vale.

Tõrjutusprintsüüp (ehk Pauli printsüüp, *Pauli exclusion principle*) väidab, et ühe alusosakese mõõtmega määratud ruumpiirkonnas võib paikneda maksimaalselt kaks vastandlike spinnidega aineosakest. Ülejäänud tõrjutakse välja. Aineosakesed ehk **fermionid** alluvad tõrjutusprintsüübile, väljaosakesed ehk **bosonid** aga mitte. Fermionide ja bosonite range eristamine toimub **spinni** alusel. Fermionid on poolarvulise, bosonid aga täisarvulise spinniga osakesed. Alusfermionide (leptonite ja kvarkide) spinn on $\frac{1}{2}$. See tähendab, et nende sisemise liikumise kui pöörlemise impulsimoment $L_S = \frac{1}{2} \hbar$, kus $\hbar$ on **Plancki nurkkonstant**.

Plancki konstant $h = 6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ näitab: 1) lainepartsjoni energiat (kui sekundis tehakse üks võnge, siis lainepartsjoni energia on ca $6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J}$); 2) osakese- ja lainemudeli vahet dualismi printsüübis ($\lambda = h/p$, kui objekti impulss on 1 kg m/s , siis tema leiulaine pikkus on ca $6,6 \cdot 10^{-34} \text{ m}$); 3) lõtku suurust ettemääratutes (kui objekti x -koordinaat on teada täpsusega 1 m , siis võib objekti impulss saada x -telje suunalise prognoosimatu juurdekasvu suurusjärgus $6,6 \cdot 10^{-34} \text{ kg m/s}$).

Plancki nurkkonstant $\hbar = h/2\pi \approx 1,054 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ (loe tähist: *h*-rist, ingl *h*-bar, *reduced Planck constant*) eeldab nurga ühikuna radiaani, kui tavaline Plancki konstant eeldab nurga ühikuna täispööret. Eesti-keelses füüsikakirjanduses on levinud otsetõlge *taandatud Plancki konstant*, kuid sellest ei selgu, milles õigupoolest seisneb *taandamine*. Plancki nurkkonstant määrab liikumise ja energia vähimate võimalike portsjonite suuruse mikromaailmas.

Töö *A* on füüsikaline suurus, mis kirjeldab protsessi. Töö kirjeldab nii olukorra muutumist kui selleks vajalikku pingutust. Sestap on töö defineeritud **jõu** *F* kui pingutust kirjeldava suuruse ning selle jõu suunas liikumisel läbitud tee **pikkuse** *s* kui muutust kirjeldava suuruse – korrutisena: $A = F \cdot s$. Mehaanilise töö korral on tegemist kehade omavahelise liikumisega.

Energia on füüsikaline suurus, mis kirjeldab olukorda. Energia on keha või välja võime teha tööd. Kui see võime on tingitud keha liikumisest teiste kehade suhtes, siis on tegemist **kineetilise energiaga** E_k . Kui see võime on tingitud keha asendist teiste kehade suhtes, siis räägitakse **potentsiaalsest energiast** E_p . Kuna töö on protsess, mis viib ühest olukorrast teise, siis tööga kaasneb energia muutumine.

Keha seisuenergia E_r (ingl *rest* – paigalseis) on tingitud üksnes keha olemasolust. Aine ja väli on neis sisalduva energia ulatuses teineteiseks muundatavad. Seisuenergia E_r ja seisumass m_0 on omavahel seotud Einsteini valemiga $E_r = m_0 c^2$, kus *c* on absoluutkiirus (nn *valguse kiirus vaakumis*).

Energia miinimumi printsiip väidab, et kõik iseeneslikud (mitte välismõjust tingitud) protsessid kulgevad kehade süsteemi energia kahanemise suunas. Süsteemil on kalduvus energiat loovutada (töö tagavara ära kulutada), liikuda minimaalse energiaga olekusse. Kui me soovime osakestele anda väga suuri energiasid, siis peame energia loovutamise nende jaoks võimatuks muutma. Energia miinimumi printsiip avaldub ka süsteemide (aatomite, tuumade, nukleonide jms) moodustumises. Süsteemi tekkimisel **seoseenergia** vabaneb (antakse ära). Süsteemi lõhkumiseks tuleb aga seesama energia süsteemile väljastpoolt juurde anda. See asjaolu tagab süsteemide stabiilsuse looduses.

Absoluutkiiruse printsiip väidab, et puhtalt väljalise ehk nulliga võrduvat seisumassi omava objekti liikumine on absoluutne. See liikumine toimub kõikide aineliste vaatlejate jaoks ühesuguse kiirusega ehk absoluutkiirusega $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$. Aineliste objektide omavaheline liikumine on suhteline. Absoluutkiirust *c* nimetatakse sageli ka *valguse kiiruseks vaakumis*, kuna valgus on kõige tuntum näide puhtväljalise objekti kohta. Absoluutse piirkiiruse olemasolu fakt on aga ise palju tähtsam kui valgus, kuna piirkiirus tekitab meie adekvaatsed kujutlused ajast ja ruumist. Aastal 2017 on saadud esimesed vaatluslikud tõendid selle kohta, et ka gravitatsiooniväli levib absoluutkiirusega.

Dualismiprintsiip (*wave-particle duality*) väidab, et nii ainel kui väljal on nii laine- kui ka portsjoni-omadused. Laineomadused tulevad ilmsiks osakeste liikumisel. Välja osakeste (kvantide) korral seisneb laine vastava välja võnkumiste levikus. Aineosakestega kaasnev laine on **leiulaine**. Suuruseks, mis muutub selles laines, on tõenäosus osakese olemasoluks vastavas ruumiosas (täpsemalt – tõenäosuse tihedus).

Lõtkuprintsiip (ka Heisenbergi **määramatuse printsiip**, *Heisenberg uncertainty principle*) väidab, et mitte ükski sündmus pole täiesti kindel ega ka täiesti võimatu (fatalistlike protsesse tegelikkuses ei ole). Kõik sündmused toimuvad mingi tõenäosusega, mis võimatuks peetaval sündmusel on aga väga väike (peaaegu null). Ettemääratutes on alati **lõtk** (eksisteerib füüsikalise suuruse võimalike väärtuste vahemik). Füüsikalise objekti olevik ja tulevik ei saa olla üheaegselt määratud. Kui me teame täpselt, kus objekt asub praegu, siis me ei oska absoluutselt prognoosida tema käitumist tulevikus. Kui objekti tulevane käitumine on täielikult ettearvatav, siis me ei tea mitte midagi objekti praegusest asukohast. Aineosakeste laineomadused ja tõenäosuslik käitumine tulevad esile vaid väga väikeste mõõtmete juures. Märkus: lõtk on vahe masina kahe omavahel liikuva detaili vahel. Kui lõtk täielikult puuduks, siis masin "kiiluks kinni". Sõna *lõtk* tuleks eelistada ka põhjusel, et sõna *uncertainty* korrektne tõlge eesti keelde on *ebakindlus*, mitte *määramatus*.

Mehaaniline maailmapilt kujunes välja 18. sajandi lõpuks. Selles peetakse oluliseks vaid kehi, nende liikumist ja vahetul kontaktil ilmnevat vastastikmõju. Vastastikmõju vahendajat ei tähtsustata.

Elektromagnetiline maailmapilt kujunes välja 19. sajandi lõpuks Faraday ja Maxwelli tööde tulemusena. Erinevalt mehaanilisest maailmapildist tähtsustatakse selles ka vastastikmõju vahendajat (välja).

Relativistlik maailmapilt kujunes välja aastail 1905-1919 Einsteini tööde tulemusena. Varasemale lisandus absoluutkiiruse printsiip. Selgus, et aeg ja ruum on vaid ainelise vaatleja mõttekonstruktsioonid. Ilmnes, et füüsikalise objekti olemasolu väljendavad suurused: energia *E* ja mass *m* on samaväärsed ehk ekvivalentsed: $E = m c^2$ (Einsteini valem).

Kvantmehaaniline maailmapilt kujunes välja aastail 1900-1928. Varasemale lisandusid dualismiprintsiip ja määramatuse printsiip (lõtkuprintsiip). Tekkis võimalus kirjeldada aatomeid, nende tuumi ja tuumades sisalduvaid osakesi.

Terviklik kaasaegne maailmapilt kujunes välja 20. sajandi teisel poolel spinni jõudmisega statistilisse füüsikasse (fermionide ja bosonite eristamine), tugeva ja nõrga vastastikmõju avastamisega, atomistliku printsiibi laiendamisega väljale (kvantväljateooria) ning osakeste **standardmudeli** loomisega.

Standardmudeli kohaselt koosnevad kõik aineosakesed 12 alusfermionist. Need on 6 **leptonit** (elektron, müüon, tauon ja 3 vastavat neutriinot) ning 6 **kvarki** (*down, up, strange, charm, bottom, top*). Võivad eksisteerida ka 12 vastavat antiosakest. Vastastikmõjude vahendajateks (välja osakesteks) on alusbosonid. Elektromagnetilist mõju vahendavad **footonid** (*photo* – valgus), tugevat mõju **gluonid** (*glue* – liim), nõrka mõju **uikonid** (*weak* – nõrk, teaduskirjanduses nimetatakse neid enamasti **W- või Z-bosoniteks**). Aastal 2013 otsustati lugeda avastatuks ka **Higgsi** bosonid, millest koosneb Higgsi väli. See väli põhjustab kehade inertsust (kalduvust säilitada oma liikumisolekut). Gravitatsioonilise mõju hüpoteetilised vahebosonid **gravitonid** on seni katseliselt avastamata.

Ruum on vaatleja kujutlus, mis tekib kehade omavahelisel võrdlemisel. Ruumi ja aega objektiivselt olemas ei ole. Neil mõistetel on mõtet vaid sedavõrd, kui võrd on olemas kehad ja need kehad liiguvad.

Pikkus *l* (*longitudo*) on füüsikaline suurus, mis iseloomustab kehade mõõtmeid (omadust erineva üksteisest suuruse poolest). Pikkuse ühikuks valitakse mingi kõigile tuntud keha (**etalonkeha**) pikkus (jalg, küünar, vaks). Liikumise korral kasutatakse mõistet **teepikkus** (tähis *s* – lad *spatium* – ruum, ulatus)

Meeter (1 m) on pikkuse põhiühik, mille korral etalonkehaks on algselt valitud Maa. 1 m on 1/40 000 000 Maa ümbermõõdust (täpsemalt – Pariisi meridiaani pikkusest). Kaasaegse definitsiooni kohaselt on üks meeter pikkus, mille valgus läbib vaakumis 1/299 792 458 sekundi jooksul.

Aeg on vaatleja kujutlus, mis tekib liikumiste võrdlemisel. Aeg *t* kui füüsikaline suurus (lad *tempus*) järjestab sündmused varem või hiljem toimuvateks. Aja kaudu me võrdleme ühe keha kiirust teise keha (etalonkeha) kiirusega. Kui näiteks keha A, liikudes kiirusega v_A läbib teepikkuse s_A ja keha B, liikudes kiirusega v_B läbib samas teepikkuse s_B , siis suhe $s_A / v_A = s_B / v_B = \dots$ jääb meie kujutlustes kõikide selliste kehade jaoks konstantseks (rangelt võttes kehtib see vaid makrokehade jaoks ning absoluutkiirusest tunduvalt väiksematel kiirustel). Seda suhet nimetatakse **ajaks** *t*. Mõnikord tähistatakse *t* abil ka **ajahetke**, mil toimub mingi ülilühikese kestusega sündmus. **Ajavahemiku** (protsessi kestuse) tähistamiseks on siis Δt . Sümboliga Δ (delta) tähistatakse vastava füüsikalise suuruse **muutu** (lõppväärtuse ja algväärtuse vahet).

Aja mõõtmisel kasutatakse enamasti mingit perioodilist liikumist. **Perioodiliseks** nimetatakse liikumist, millele on omane korduvus. Teatud kindla teepikkuse läbimisel (ajavahemiku möödumisel) algab kõik otsast peale. Seda ajavahemikku nimetatakse **perioodiks**. Aja ühikuks valitakse kas periood ise või mingi arv perioode.

Sekund (1 s) on aja põhiühik, mille korral etalonkehaks on algselt samuti Maa. Üks sekund on 1/86400 ööpäevast. Kaasaegse definitsiooni kohaselt on üks sekund võrdne tseesiumi (^{133}Cs) aatomi elektronide ja tuuma vastastikmõjust tingitud elektromagnetkiirguse 9 192 631 770 perioodiga.

Kiirus *v* (lad *velocitas*) on füüsikaline suurus, mis kirjeldab keha liikumisolekut. Kiirus näitab, kui pika tee läbib keha ajaühikus. Kiirus = teepikkus : aeg, $v = s / t$. See on kiiruse **kaudne määratlus** (aja mõiste eeldab ju ise kiiruse mõistet). Kiiruse põhiühik on üks meeter sekundis (1 m/s). Praktikas kasutatakse sageli kiiruse ühikut üks kilomeeter tunnis (1 km/h), kusjuures 1 m/s = 3,6 km/h.

Kiiruse otsene määratlus tähendab mingi kindla kiiruse valimist etaloniks. Selleks sobib näiteks absoluutne piirkiirus $c = 299\,792\,458$ m/s ehk ligikaudu $3 \cdot 10^8$ m/s. Siis näiteks 108 km/h = 30 m/s = $10^{-7} c$.

Klassikaline füüsika tegeleb kehade, liikumise, vastastikmõju ja väljaga, rakendades atomistlikku printsiipi vaid kehadele, uurib makromaailma nähtusi, mikro- ja megamaailma kirjeldada ei suuda.

Klassikaline füüsika on reduktsionistlik ja kasutab fatalistlikku mõtlemisviisi.

Reduktsionism (lad *reductio* – taandama) on lähenemisviis, mis püüab mõista tervikut osade parema tundmaõppimise kaudu (taandab terviku osadeks), uurib loodust lokaalselt (mingis väljavalitud kohas), vaatleb primaarsena objekti ennast ja sekundaarsena objekti seoseid teiste objektidega.

Kaasaegne füüsika rakendab atomistlikku printsiipi ka väljale, arvestab spinni (sh. selle seost tõrjutusprintsiibiga), absoluutkiiruse printsiipi, dualismiprintsiipi ja lõtkuprintsiipi, uurib ka mikromaailma (kvantmehaanika) ja megamaailma (kosmoloogia). Kaasaegne füüsika on rohkem või vähem holistlik. Kaasaegne füüsika uurib põhjuslikkuse mittefatalistlikke esinemisviise.

Holism (ingl *whole* – kõik, kogu) on lähenemisviis, mis püüab mõista tervikut selles toimivate seoste parema tundmaõppimise kaudu (ei taanda tervikut osadeks), uurib loodust võimalikult suures ulatuses (mittelokaalselt), arvestab kõikvõimalikke arenguteid ja püüab hinnata nende realiseerumise tõenäosusi, vaatleb primaarsena objekti seoseid teiste objektidega ja sekundaarsena objekti ennast.

Mehaanika on füüsika osa, mis uurib liikumist.

Taustsüsteem määrab tingimused, milles liikumist vaadeldakse. Taustsüsteem koosneb **taustkehast** (kehast, mille suhtes liikumine toimub), koordinaadistikust ja ajamõõtjast (kellast).

Koordinaat on arv, mis näitab vaadeldava keha asukohta taustkeha suhtes (asendit taustsihi suhtes, kuju taustkuju suhtes). Sõltumatute koordinaatide arv määrab ruumi mõõtmete arvu.

Ruumi mõõtmete (ehk dimensioonide) arv näitab, kui mitut koordinaati on üldjuhul vaja keha asukoha määramiseks selles ruumis. Meie ruum on kolmemõõtmeline, sõltumatuid koordinaate on kolm.

Kujutlused kõrgdimensionaalsetest ruumidest luuakse induktiivselt, liites kaks madalamamõõtmelist objekti. Näiteks ühedimensionaalse (1D) objekti (lõigu) saamiseks ühendame kaks 0D objekti (punkti) nende vahele jäävate punktidega. 2D-objekti (ruudu või ristküliku) saamiseks ühendame kaks omavahel ristuvat lõiku ehk 1D-objekti, millel on üks ühine punkt (0D-objekt). Üldiselt kehtib reegel: n D-objekti saame, liites kaks $(n - 1)$ D-objekti, millel on üks ühine $(n - 2)$ D-objekt.

Kinemaatika on mehaanika osa, mis kirjeldab liikumist, tundmata huvi selle põhjuste vastu. Kinemaatika püüab vastata vaid küsimusele Kuidas keha liigub?

Punktmass on keha, mille mõõtmel võib antud ülesande juures arvestamata jätta. Sel juhul võib vaadelda keha massi koondununa ühte punkti. Punktmass - see on keha udel.

Trajektoor on keha kui punktmassi liikumistee. Trajektoori kuju järgi eristatakse sirgjoonelist, ringjoonelist ja kõverjoonelist liikumist. Kõverjooneline liikumine taandub ringjoonelisele. Trajektoori mõistel on mõtet ainult klassikalises füüsikas. Rääkida näiteks elektroni trajektooriga aatomis on täielik mõttetus.

Kulgliikumise korral liiguvad keha kõik punktid ühtemoodi (lähivad sama aja jooksul sama teepikkuse).

Pöördliikumise korral leidub punkte, mis ise ei liigu. Need punktid moodustavad pöörlemistelje.

Pöörlemistelje ümber liiguvad keha kõik teised punktid mööda ringjooni.

Pöördliikumist kirjeldavad vektorsuurused (nurkkiirus, nurkiirendus, impulsimoment jne) on kokkuleppeliselt suunatud piki pöörlemistelge. Vektori suuna määrab **parema käe rusika reegel**: Kui rusikasse tõmmatud parema käe neli kõverdatud sõrme näitavad pöörlemise suunda, siis väljasirutatud põial näitab pöörlemist kirjeldava vektori suunda.

Võnkumine on perioodiline ehk korduv liikumine, mille korral impulsi (liikumishulga) ja energia levikut ei toimu. Võnkuvale kehale mõjub alati tasakaaluasendi poole suunatud (nn. taastav) jõud.

Laine on perioodiline (korduv) liikumine, mille korral toimub impulsi (liikumishulga) ja energia levik suurte vahemaade taha. Laine on aineosakeste või välja liikuv konfiguratsioon (paigutus). Laines osalevad objektid liiguvad vähe, laine ise liigub palju. Võnkumine on vaadeldav laine erijuhuna (seisulaine).

Ühtlaseks nimetatakse keha niisugust liikumist, mille korral keha läbib mistahes võrdsete ajavahemike jooksul ühesugused teepikkused. Ühtlasel liikumisel on kiirus konstantne.

Mitteühtlaseks nimetatakse keha niisugust liikumist, mille korral keha läbib mistahes võrdsete ajavahemike jooksul erinevad teepikkused.

Kiirendus iseloomustab keha liikumisoleku muutumist kulgeval liikumisel. Kiirendus näitab, kui palju muutub keha kiirus ajaühiku jooksul. Kiirendus $a = (\text{kiirus lõpul} - \text{kiirus algul}) : \text{aeg, mille jooksul muutus toimus}$. $a = (v - v_0) / t$. Kiirenduse SI-ühik on üks meeter sekundi ruudu kohta (1 m/s^2).

Ühtlaselt kiireneval või aeglustuval liikumisel on kiirendus konstantne. Ühtlaselt kiireneval liikumisel $a > 0$, ühtlaselt aeglustuval liikumisel $a < 0$. Kiirus muutub sel juhul ajas seaduse $v = v_0 + a t$ järgi. Läbitud teepikkus on leitav seosest $s = v_0 t + a t^2 / 2$.

Kui aeg ei ole teada, võib algkiiruse v_0 , lõppkiiruse v või teepikkuse s leida seosest $v^2 - v_0^2 = 2 a s$, mis saadakse aja t elimineerimisel võrrandisüsteemist $s = v_0 t + a t^2 / 2$ ja $a = (v - v_0) / t$.

Mehaanika põhiülesandeks on liikumisvõrrandi $x = x(t)$ määramine. Reeglina liidetakse mehaanika põhiülesande lahendamisel vektoriaalselt kehale mõjuvad jõud ning formuleeritakse Newtoni II seadus kui diferentsiaalvõrrand, arvestades, et kiirendus on koordinaadi teine ajaline tuletis $a = d^2x/dt^2$. Selle diferentsiaalvõrrandi lahendamine (integreerimine) annabki meile liikumisvõrrandi $x = x(t)$.

Operaatoriks nimetatakse eeskirja toiminguteks, mis tuleb teostada operaatori järel tuleva avaldisega. Seda nimetatakse operaatori **rakendamiseks**.

Ajalise tuletise operaator d/dt on nende toimingute loetelu, mida tuleb teostada koordinaadi rollis esineva suurusega, selleks et saada uuritava suuruse muutumise kiirust. Näiteks $dx/dt = \lim (\Delta x / \Delta t)$ tähendab, et tuleb leida koordinaadi lõpp- ja algväärtuse vahe $x - x_0 = \Delta x$ ning samasugune aja väärtuste vahe $t - t_0 = \Delta t$. Seejärel tuleb need vahed omavahel jagada ning leida tekkinud suhte piirväärtus vaadel-dava ajavahemiku lähenemisel nullile ($t \rightarrow t_0$ või $\Delta t \rightarrow 0$). Lühidalt: **Diferentseerimine** (ehk **tuletise leidmine**) = **lahutamine** + **jagamine**. Koordinaadi tuletis on hetkkiirus $dx/dt = v(t)$.

Ajalise integraali operaator $\int v(t) dt$ on nende toimingute loetelu, mida tuleb teostada kiiruse rollis esineva suurusega v , selleks et saada suurst, mille muutumise kiirusest on jutt. **Integreerimine** on vajalik juhul, kui meil tuleb kahte füüsikalist suurst omavahel korrutada, aga vähemasti üks suurstest (näi- teks kiirus v) muutub uuritava protsessi käigus ja me ei tea, millist tema väärtust kasutada. Ajalisel integreerimisel võtame vaatluse alla niivõrd lühikese ajavahemiku, et kiirus v selle aja jooksul oluli- selt muutuda ei jõua. Me leiame ülilühikeste ajavahemike Δt jooksul läbitavad teepikkused $v \Delta t$ ja liidame nad kokku. Piirväärtust sellisest summast ajavahemiku pikkuse lähenemisel nullile ($\Delta t \rightarrow 0$) nimetatakse ajaliseks **integraaliks**. Lühidalt: **integreerimine** = **korrutamine** + **liitmine**. Hetkkiiruse integraal üle aja on lõpp- ja algkoordinaadi vahe ehk liikumisel läbitud teepikkus $\int v(t) dt = x - x_0$.

Ringliikumises olevat keha (punktmassi) ja ringjoone keskpunkti ühendav lõik r (trajektoori raadius) pöörduv aja t jooksul mingi nurga φ võrra. Seda nurka nimetatakse pöördenurgaks. Pöördenurga SI ühikuks on radiaan (1 rad).

Üks radiaan on nurk, mille korral ringjoone kaare pikkus s võrdub raadiusega r . Sellest $\varphi = s / r$ ja $s = \varphi r$. Nurga mõõtmisel radiaanides on võrdeteguriks kaare pikkuse ja pöördenurga vahel raadius.

Nurkkiirus ω näitab, kui suur pöördenurk läbitakse ajaühikus. $\omega = \varphi / t$. Nurkkiiruse SI-ühik on üks radiaan sekundis (1 rad / s). Seda ühikut esitatakse lühidalt kujul 1 s^{-1} .

Perioodiks T nimetatakse aega, mille jooksul piki ringjoont liikuv keha teeb ühe ringi (jõuab tagasi lähtepunkti). Pöördliikumisel nimetatakse perioodiks aega, mille jooksul pöörlev keha teeb ühe täispöörde (läbib pöördenurga 2π rad). Seega nurkkiirus $\omega = 2\pi / T$.

Joonkiirus ringliikumisel = ringjoone pikkus : periood. $v = 2\pi r / T$. Seega $v = \omega r$. Joonkiirus on suunatud piki ringjoone puutujat.

Keskõmbekiirendus (normaalkiirendus) väljendab ringliikumisel kiiruse suuna muutumist ajas. Keskõmbekiirendus on kiirusega alati risti ning vektorina suunatud ringjoone keskpunkti.

Keskõmbekiirendus avaldub kujul $a_k = v^2 / r$ ehk $a_k = \omega^2 r$. Kiiruse suuruse muutumist näitab tangentsiaalkiirendus a_t . Kuna $v = \omega r$, siis $a_t = \alpha r$, kus α on nurkkiirendus.

Nurkkiirendus α näitab, kui palju muutub nurkkiirus ajaühiku jooksul. $\alpha = (\omega - \omega_0) / t$. Nurkkiirenduse SI-ühik on üks radiaan sekundi ruudu kohta (1 rad / s² ehk 1 s^{-2}). Nurkkiirendus näitab keha liikumisoleku muutumist pöörleval liikumisel.

Ühtlaselt kiireneval või aeglustuval ringliikumisel või pöördliikumisel on nurkkiirendus konstantne.

Ühtlaselt kiireneval ring- või pöördliikumisel $\alpha > 0$, ühtlaselt aeglustuval $\alpha < 0$. Nurkkiirus muutub sel juhul ajas seaduse $\omega = \omega_0 + \alpha t$ järgi. Läbitud pöördenurk on leitav seosest $\varphi = \omega_0 t + \alpha t^2 / 2$. Nurkkiiruse algväärtus ω_0 , lõppväärtus ω ja liikumisel läbitud pöördenurk φ on omavahel seotud kujul $\omega^2 - \omega_0^2 = 2 \alpha \varphi$.

Dünaamika on mehaanika osa, mis uurib liikumise põhjust. Dünaamika püüab vastata küsimusele Miks keha liigub? Dünaamika tegeleb jõududega. **Jõud** F on füüsikaline suurus, mis kirjeldab kehadevahelise vastastikmõju tugevust. Dünaamika aluseks on 3 Newtoni seadust:

Newtoni I seadus (inertsiseadus) väidab, et iga keha liigub ühtlaselt ja sirgjooneliselt seni, kuni vastastik- mõju teiste kehadelega tema sellist olekut ei muuda. Keha inertsuse (laiskuse) mõõduks on suurus, mida nimetatakse inertseks massiks, enamasti aga lihtsalt **massiks** m .

Mass iseloomustab keha omadust säilitada oma liikumisolekut kulgeval liikumisel (inertsuse omadust).

Massi SI-ühikuks on **kilogramm** (1 kg). Ruumalaühiku kohta tulevat massi nimetatakse **tiheduseks** $\rho = m/V$. Mass iseloomustab keha, tihedus aga ainet, millest see keha koosneb.

Newtoni II seadus väidab, et keha kiirendus on võrdeline jõuga, $a = F / m$ (või $F = m a$). Jõud on see põhjus, mis muudab keha liikumisolekut. Ehk kasutades impulsi mõistet: Keha impulsi muutu- mise kiirus on võrdne kehale mõjuva jõuga. $F = dp/dt$ (N II s. üldkuju). Jõu SI-ühikuks on üks **njuuton** (1 N). See on jõud, mis annab kehale massiga 1 kg kiirenduse 1 m/s^2 . $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot 1 \text{ m/s}^2$.

Newtoni III seadus väidab, et kaks keha mõjutavad alati teineteist suuruselt võrdsete kuid vastandlikult suunatud jõududega, $F_{12} = -F_{21}$. Mõju ja vastumõju on võrdsed.

Keha impulsiks nimetatakse keha massi ja kiiruse korrutist $\mathbf{p} = m \mathbf{v}$. Impulss näitab kulgevalt liikuva keha suutlikkust teisi kehi liikuma panna. Suletud süsteemis on kehade summaarne impulss jääv (impulsi jäävuse seadus). Impulsi jäävuse seadus on samaväärne Newtoni seadustega. Impulsi ühikuks SI-süsteemis on üks kilogramm korda meetri sekundis ($1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$).

Raskusjõud on Maa poolt kehale mõjuv gravitatsioonijõud. Kehale massiga m mõjub raskusjõud $F_r = m g$.

Kaal on jõud, millega keha mõjub oma alusele või pingutab riputusvahendit (nööri, trossi vms.)

Rõhk p (ingl *pressure*) on pinnale mõjuva jõu ja selle pinna pindala suhe: $p = F/S$. Rõhu SI ühikuks on paskal ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$). Sageli mõõdetakse rõhku vedelikusamba kõrguse h kaudu, kasutades valemit $p = \rho g h$, kus ρ on vedeliku tihedus ja $g = 9,8 \text{ N/kg}$ on raskusjõu tegur (raskuskiirendus). Normaalne õhurõhk on 760 mm Hg (ehk Tor) $= 10,3 \text{ m H}_2\text{O} \approx 10^5 \text{ Pa}$. Vihmase ilmaga on õhurõhk sellest madalam, ilusa ilmaga kõrgem. Kasutatakse ka ühikuid $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$ ja $1 \text{ mbar} = 100 \text{ Pa}$.

Üleslükkejõud $F_{\text{ü}}$ mõjub vertikaalselt üles vedelas või gaasilises aines paiknevatele kehadele ja võrdub keha poolt välja tõrjutud aine raskusjõuga: $F_{\text{ü}} = \rho g V_a$, kus V_a on uuritava keha vedeliku pinnast allapoole jääva osa ruumala. Mida sügavamal ujuv keha paikneb, seda suurem on üleslükkejõud.

Toereaktsioon on jõud, millega alus või riputusvahend mõjutab keha. Toereaktsioon mõjub alati risti aluspinnaga (pinna normaali suunas) või siis piki riputusvahendit.

Hõõrdeegur μ näitab, kui suure osa moodustab pindade vahel toimiv hõõrdejõud F_h pindu omavahel kokku suruvast (normaalisuunalisest) jõust (kaalust või toereaktsioonist) $\mu = F_h / F_n$.

Inertsjõud (ingl *fictional force*) on näiv jõud, mis mõjub kiirendusega liikuvale kehale, kui me vaatleme seda keha paigalseisvana. Tuntuim inertsjõud on tsentrifugaaljõud.

Tsentrifugaaljõud mõjub ringjooneliselt liikuvale kehale, mida me parajasti vaatleme paigalseisvana.

Vahend (nöör, tross vms), mis hoiab keha ringjoonelisel trajektooriga, mõjutab keha kesktõmbejõuga (tsentripetaaljõuga). Kesktõmbejõud annab kehale kesktõmbekiirenduse $a_k = v^2 / r$. Vaadeldava kehaga seotud taustsüsteemis tasakaalustavad tsentrifugaaljõud ja kesktõmbejõud teineteist.

Mehaaniliseks tööks A nimetatakse jõu F ja tema mõjumise sihis sooritatud nihke s (keha poolt läbitud teepikkuse) korrutist. Üldjuhul $A = F s \cos \theta$, kus θ on nurk jõu mõjumise suuna ja nihke suuna vahel. Töö on matemaatiliselt esitatav jõuvektori $\mathbf{F}$ ja nihkevektori $\mathbf{s}$ skalaarkorrutisena: $A = \mathbf{F} \cdot \mathbf{s}$. Töö ja energia ühikuks SI-süsteemis on džaul (1 J , *James Joule*). $1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot 1 \text{ m}$. Üks džaul on töö, mida teeb jõud üks njuuton, nihutades mingit keha oma mõjumise suunas ühe meetri võrra.

Võimsus (N või P) näitab ajaühikus tehtud tööd. *Võimsus on töö tegemise kiirus*. $P = A / t$. Võimsuse SI-ühikuks on vatt (1 W). Võimsus on üks vatt, kui 1 sekundis tehakse üks džaul tööd. $1 \text{ W} = 1 \text{ J} / 1 \text{ s}$. Kui kiirus muutub, siis muutub ka liikumiseks vajalik võimsus. **Hetkvõimsus** $P(t) = F \cdot v(t)$

Kineetiline energia on tingitud keha liikumisest ning avaldub massi ja kiiruse kaudu kujul $E_k = m v^2 / 2$.

Kineetiline energia on võrdne keha kiirendamisel tehtud tööga. Pidurdudes teeb seda tööd keha ise.

Potentsiaalne energia on tingitud keha asendist teiste kehade suhtes (vastastikmõjust teiste kehadega).

Mehaanilise energia jäävuse seadus väidab, et keha kineetilise ja potentsiaalse energia summa on jääv.

Konservatiivseteks (mehaanilist energiat säilitavateks) nimetatakse jõude, mille mõjumisel mehaanilise energia jäävuse seadus kehtib. **Dissipatiivseteks** (energiat hajutavateks) nimetatakse jõude, mille mõjumisel see seadus ei kehti. Dissipatiivne jõud on näiteks hõõrdejõud.

Keskkonna takistusjõud F_t on jõud, millega keskkonna osakesed mõjuvad selles keskkonnas liikuvale kehale. Liikuv keha peab keskkonna osakesed enda ees liikuma panema – andma neile sama suure lisakiiruse v , kui on liikuv kehal endal. Selleks peab liikuv keha Newtoni II seaduse kohaselt muutma keskkonna osakeste impulssi (ajavahemiku dt jooksul dp võrra), mõjutades iga osakest liikumissuunalise jõuga $\mathbf{F}_1 = d\mathbf{p}/dt$. Osakesed mõjutavad keha sama suure ja liikumisele vastasuunalise jõuga (Newtoni III seadus). Neist jõududest summeerubki keskkonna takistusjõud. Takistusjõud sõltub liikuva keha kiirusest (mida suurem see on, seda rohkem on vaja muuta impulssi p).

Takistusjõu moodul sõltub keha kiirusest v üldjuhul astmefunktsiooni järgi: $F_t = bv + cv^2 + \dots$, kus keha kujust sõltuvad kordajad b , c , .. rahuldavad samas ühikusüsteemis võrratust $b \gg c \gg \dots$ jne. Seetõttu loetakse takistusjõudu väikesel kiirusel ($v < 1 \text{ m/s}$) enamasti kiirusega võrdeliseks ($F_t = bv$), jättes astmerea kõrgemad liikmed arvestamata. Kui soovime rõhutada takistusjõu ja kiiruse vastasuunalisust, siis kasutame valemis vektorkuju ning miinusmärki: $\mathbf{F}_t = -b \mathbf{v}$.

Jõumoment M kirjeldab vastastikmõju toimet keha pöörlemisele. Jõumoment on jõu ja tema õla korrutis.

Jõu õlaks nimetatakse jõu mõjumise sihi kaugust pöörlemisteljest. Jõumomendi SI-ühikuks on üks njuuton korda meeter ($1 \text{ N} \cdot \text{m}$). Jõumoment kui vektor on esitatav jõu rakenduspunkti kohavektori $\mathbf{r}$ (pöörlemistelje suhtes) ja jõuvektori $\mathbf{F}$ vektorkorrutisena $\mathbf{M} = \mathbf{r} \times \mathbf{F}$ ning on suunatud parema käe rusikareegli kohaselt piki pöörlemistelge.

Inertsimoment I näitab keha omadust säilitada oma pöörlemisolekut. Samas näitab ta ka pöörleva keha osade massi jaotust pöörlemistelje suhtes. Keha element (pisike osa) massiga m , asudes kaugusel r pöörlemisteljest, omab inertsimomenti $I = m r^2$. Keha kui terviku inertsimoment leitakse keha osade inertsimomentide liitmise (integreerimise) teel. Inertsimomendi SI-ühikuks on üks kilogramm korda meeter ruudus ($1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$). Mass kulgliikumisel = inertsimoment pöördliikumisel.

Impulsimoment (ehk pöörlemishulk) L näitab pöörleva keha osade impulsside mõju pöörlemisele või siis pöörleva keha suutlikkust teisi kehi liikuma panna. Kui pöörleva keha osa massiga m liigub joonkiirusega v piki ringjoont kaugusel r pöörlemisteljest, siis tema impulsimoment on kauguse r ja impulsi $p = m v$ korrutis: $L = m v r$. Impulss kulgliikumisel = impulsimoment pöördliikumisel. Impulsimoment kui vektor: $\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p}$, kus $\mathbf{p}$ on keha (või selle mingi osa) impulss ja $\mathbf{r}$ - keha (või selle osa) kohavektor pöörlemistelje suhtes.

Impulsimomendi jäävuse seadus väidab, et suletud süsteemi impulsimoment on jääv suurus.

Impulsimoment on inertsimomendi ja nurkkiiruse korrutis. $L = m v r = (m r^2) \cdot (v/r)$ ja seega $L = I \cdot \omega$. See kehtib ka pöörleva keha kui terviku kohta. Impulsimomendi SI-ühikuks on üks kilogramm korda meeter ruudus sekundi kohta ($1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$).

NB! Millegi *moment* füüsikas = see suurus ise $\times$ mingi pikkus.

Pöördliikumise dünaamika põhivõrrand on Newtoni II seadus pöördliikumise kohta. Ta väidab, et impulsimomendi tuletis aja järgi võrdub jõumomendiga: $dL/dt = \mathbf{M}$. Ehk teisiti – *jõumoment on see põhjus, mis muudab keha impulsimomenti*.

Mehaaniline töö pöördliikumisel on esitatav jõumomendi ja pöördenurga korrutisena $A = M \cdot \varphi$.

Nurkkiirusega ω pöörleval ja inertsimomenti I omaval kehal on pöördliikumise kineetiline energia, mis avaldub kujul $E_k = I \omega^2/2$

Keha massikeskmeks nimetatakse punkti, mille suhtes keha osade raskusjõudude momentide summa on alati null (jõumomendid on tasakaalus, keha raskusjõudude mõjul ei pöördu).

Kepleri seadused kirjeldavad planeetide liikumist, gravitatsiooniseadus seletab seda (näitab ära põhjuse).

I seadus: Planeedid liiguvad mööda ellipseid, mille ühes fookuses asub Päike.

II seadus: Päikese ja planeedi ühenduslõik katab liikudes ühesuguste ajavahemike jooksul võrdsed pindalad.

III seadus: Planeedi tiirlemisperioodi (planeedi aasta) ruut on võrdeline orbiidi pikema pooltelje kuubiga.

Gravitatsiooniseadus väidab, et mistahes kaks keha mõjutavad teineteist gravitatsioonijõuga, mis on võrdeline kummagi keha gravitatsioonilaengu ehk **raske massiga** ja pöördvõrdeline kehadevahelise kauguse ruuduga. $F = G m_1 m_2 / r^2$. Võrdetegurit $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$ nimetatakse **gravitatsioonikonstandiks**. Kuna kõik senised eksperimendid on selgesti näidanud inertse ja raske massi võrdelisust, siis loetakse inertset ja rasket massi ühikusüsteemide konstrueerimisel võrdseteks. Üldrelatiivsusteoorias on inertse ja raske massi samaväärsus teooria põhipostulaadiks. Kuna kehale massiga m mõjuv raskusjõud $F_r = m g = G M m / R^2$, kus M on Maa mass ja R tema raadius, siis raskuskiirendus $g = G M / R^2$. Arvuliselt Tartus $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

Keha potentsiaalne energia raskusväljas avaldub kujul $E_p = m g h$, kus g on raskuskiirendus ja h - keha kaugus energia nulltasemest (kõrgus maast).

Deformatsiooniks nimetatakse keha kuju muutumist jõu mõjul. Kui jõu mõju lakkamisel deformatsioon kaob, siis nimetatakse deformatsiooni (ja ka vastavat keha) **elastseks**. Kui jõu mõju lakkamisel deformatsioon (vähemalt osaliselt) jääb alles, siis nimetatakse deformatsiooni (ja ka vastavat keha) **mitteelastseks** ehk **plastseks**. Elastse deformatsiooni liigid on venitus, kõverdus, nihe ja vääne. Kehas tekkivat jõudu, mis püüab taastada keha esialgsel kujul, nimetatakse elastsusjõuks.

Hooke'i seadus väidab, et kehas tekkiv elastsusjõud F_e on võrdeline keha pikkuse muutusega (pikene-misega) x : $F_e = -k x$. Miinusmärk Hooke'i seaduses näitab, et elastsusjõud on deformeeriva jõu suhtes vastassuunaline. Võrdetegurit k nimetatakse jäikusteguriks. Jäikustegur iseloomustab keha. Ta näitab, kui suur elastsusjõud tekib keha pikkuse ühikulisel muutmisel. Ühikuks on 1 N/m .

Elastsusjõu (deformeeritud keha) **potentsiaalne energia** avaldub kujul $E_p = k x^2 / 2$.

- Mehaaniline pinge** σ näitab, kui suur jõud mõjub kehas lõikepinna ühiku kohta, $\sigma = F / S$. Mehaaniline pinge sarnaneb rõhuga ja teda mõõdetakse rõhu ühikutes (Pa ehk N/m^2). Kui jõud on pinnaga risti, on tegemist normaalpingega σ_n . Kui aga jõud mõjub piki pinda, on tegemist tangentsiaalpingega σ_t .
- Suhteline pikenemine** ε näitab venituse pikenemise Δl ja algpikkuse l suhet, $\varepsilon = \Delta l / l$. Kokkusurumisel on suhteline pikenemine negatiivne.
- Elastsusmoodul** E näitab, kui suur normaalpinge tekib aines ühikulise suhtelise pikenemise korral. Elastsusmoodul iseloomustab ainet, millest keha koosneb. Elastsusmooduleid mõõdetakse mehaanilise pingega samades ühikutes (Pa ehk N/m^2). Hooke'i seadus venitusele on elastsusmooduli abil esitatav kujul: $\sigma_n = E \varepsilon$. **Ruumelastsusmoodul** B näitab analoogiliselt, kui suur normaalpinge (rõhk) tekib aines ühikulise suhtelise ruumalamuutuse korral.
- Võnkumine** on keha perioodiline liikumine tasakaaluasendi ümber. Võnkumisel mõjub kehale tasakaaluasendi poole suunatud jõud, mis tasakaaluasendile lähenemisel liikumist kiirendab, sellest asendist kaugenemisel aga pidurdab. Võnkumine on ringjoonelise liikumise projektsioon ühele sihile.
- Harmoonilise võnkumise** korral muutub keha hälve (kõrvalekalle) tasakaaluasendist x ajas siinus- või koosinusseaduse kohaselt: $x = A \sin \omega t$ või $x = A \cos \omega t$. Siinusega on tegemist juhul, kui aja arvustus algab tasakaaluasendist. Koosinus esineb juhul, kui aja arvustus algab maksimaalse hälbe asendist. Suurus A on maksimaalne hälve, mida nimetatakse **amplituudiks**. Suurust ωt nimetatakse **faasiks**. Faasi SI-ühikuks on radiaan.
- Faas** näitab, millises seisundis võnkuv keha parajasti on. Faasi mõõtmine nurga kaudu põhineb sarnasusel võnkumise ja ringliikumise (pöörlemise) vahel. Faas muutub ajas lineaarselt, niisamuti nagu pöördenurk ühtlasel ringliikumisel. Faasi muutumise kiirust ω nimetatakse **ring-** või **nurksageduseks**. Nurksagedus on identne nurkkiirusega ringliikumisel, mille periood ühtib võnkumiste perioodiga. Suurust φ liikumisseaduses $x = A \cos(\omega t + \varphi)$ nimetatakse **algfaasiks** (faasiks hetkel $t = 0$).
- Perioodiks** T nimetatakse võnkumiste kirjeldamisel aega, mille jooksul tehakse üks võnge. Ringsagedus ja periood on omavahel seotud niisamuti nagu ringliikumisel: $\omega = 2\pi / T$.
- Sagedus** f näitab võngete arvu ajaühikus. Sageduse SI-ühikuks on herts (1 Hz). Üks herts on üks võnge sekundis. Sagedus ja periood on teineteise pöördväärtused: $f = 1 / T$. Kui sagedus on võngete arv sekundis, siis nurksagedus on võngete arv 2π sekundis (radianide arv sekundis). Järelikult $\omega = 2\pi f$.
- Harmooniliste võnkumiste energia** on võrdeline amplituudi ruuduga: $E = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2$. Kui harmooniliselt võnkuva süsteemi **hälve** muutub ajas seaduse $x = A \cos \omega t$ järgi, siis **kiirus** muutub seaduse $v = -\omega A \sin \omega t$ järgi ja **kiirendus** seaduse $a = -\omega^2 A \cos \omega t$ järgi.
- Omavõnkesagedus** ω_0 on määratud võnkuva süsteemi omadustega. Vedrupendli korral $\omega_0^2 = k / m$, kus k on vedru jäikustegur ja m koormise mass. Matemaatilise pendli korral $\omega_0^2 = g / l$, kus g on raskuskiirendus ja l pendli pikkus. Vastavalt omavõnkeperioodid: $T = 2\pi (m / k)^{1/2}$ ja $T = 2\pi (l / g)^{1/2}$.
- Sumbuvate võnkumiste** korral kahaneb amplituud ajas seaduse $A = A_0 e^{-\beta t}$ järgi, sest võnkumiste energia hajub (muutub soojuseks). Ringsagedus avaldub kujul $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$, kus suurust β nimetatakse sumbeteguriks. Ta näitab naturaallogaritmilises skaalas, mitu korda kahaneb võnkumiste amplituud ajaühikus. Seega $\beta = [\ln(A_0 / A)] / t$. Sumbeteguri SI-ühikuks on pöördsekund (1 s^{-1}).
- Eksponentsiaalne sõltuvus** kahe füüsikalise suuruse vahel (nt. $A(t) = A_0 e^{-\beta t} = A_0 e^{-t/\tau}$) tekib siis, kui taga-järje rollis esineva suuruse (funktsiooni) muutus (siin dA) on võrdeline põhjuse (argumendi) muutusega (siin dt) ja võrdetegur sisaldab funktsiooni algväärtust A (diferentsiaalvõrrand $dA = -\beta A dt$). Lühidalt: eksponentsiaalne sõltuvus tekib siis, kui muutus on võrdeline algkogusega. Protsessi kiirust kirjeldav suurus (siin sumbetegur β) on ajateguri τ pöördväärtus: $\beta = 1/\tau$.
- Ajategur** τ on aeg, mille jooksul ajas eksponentsiaalselt kahanev suurus muutub arv $e = 2,7183..$ korda või siis aeg, mille jooksul protsess lõpeks, kui esialgne lineaarne muutus jätkuks.
- Sumbumise logaritmiline dekrement** δ näitab naturaallogaritmilises skaalas, mitu korda kahaneb võnkumiste amplituud ühe perioodi jooksul. $\delta = \beta T = T / \tau$ ja $\delta = \ln[A(t) / A(t+T)]$. Dekrement on perioodi T ja ajateguri τ (kahe ajavahemiku) suhe, seega lihtsalt arv ning tal ei ole ühikut.
- Kompleksarve** $\tilde{A} = a + i b$, kus imaginaarühik $i = (-1)^{1/2}$, kasutatakse füüsikas selleks, et: 1) kiiresti tuletada üks reaalarvuline suurus teise põhjal, s.t. minna liikumise kiirendamiseks ajutiselt arvude imaginaarsesse (mittereaaalsesse) piirkonda; 2) esitada omavahel seotud kujul (kompleksselt) kaks suurust, mis mõlemad kirjeldavad ühte ja sedasama loodusnähtust.

- Kompleksmeetod** võnkumiste või lainete kirjeldamiseks esitab perioodiliselt muutuva suuruse eksponent-kujulise kompleksarvuna $\tilde{A} = A e^{i\omega t}$, mille moodul A on selle suuruse amplituud, argument ωt on faas ja reaalsos $A \cos \omega t$ on hälve. Kompleksmeetodi juures kasutatakse ära asjaolu, et kompleksarv $e^{i\varphi}$ kirjeldab pöörat nurga φ võrra. Faasinurk aga sõltub võnkumistel lineaarselt ajast: $\varphi = \omega t$.
- Sundvõnkumiste** korral mõjub võnkuvale süsteemile perioodiline välisjõud. Amplituud sõltub selle jõu ringsagedusest ω . Välisjõu mingil kindlal sagedusel muutub amplituud väga suureks, sest välisjõud toimib süsteemi omavõnkumistega samas taktis (lükkab igal võnkel takka). Sellist olukorda nimetatakse **resonantsiks**. Resonants tekib välisjõu ringsagedusel $\omega_r = (\omega_0^2 - 2\beta^2)^{1/2}$, mida nimetatakse resonantssageduseks.
- Põhitooniks** nimetatakse omavõnkesagedusega (siin ω_0) toimuvat võnkumist, **ülemtooniks** (kõrgemaks harmooniliselt) aga võnkumist põhitooni sagedusest täisarv n korda suurema sagedusega ω_n .
- Võnkumiste** (või lainete) sageduste **spekter** näitab, kui tugevasti on liitvõnkumises esindatud üks või teine ülemtoon. Spekter on amplituudi sõltuvus ülemtooni numbrist n või selle sagedusest ω_n (või f_n).
- Harmooniline (Fourier') analüüs** tegeleb spektri $A = A(\omega_n)$ leidmisega liitvõnkumise hälbe ajalise sõltuvuse $x = x(t)$ abil või vastupidi.
- Laineteks** nimetatakse võnkumiste levimist ruumis. Kui võnkumised toimuvad laine levimise sihis, on tegemist pikilainetega. Kui aga võnkumised toimuvad laine levimise suunaga ristivas sihis, on tegemist ristlainetega.
- Lainepikkus** λ on kahe lähima laineharja vahekaugus. Lainete levimiskiirus $v = \lambda / T = \lambda f$.
- Lainefront** on niisuguste ruumi punktide hulk, milleni võnkumine on antud hetkeks jõudnud. Lainefronkti kuju järgi eristatakse eelkõige tasalaineid ja keralaineid.
- Lainete levimiskiirus** on määratud levimiskeskonna omadustega. Pikilainetel tahkises (pinguletõmmatud nööris või traadis) $v = (F / \rho S)^{1/2}$ (F - pingutusjõud, ρ - tihedus, S - ristlõikepindala). Ristlainetel tahkises $v = (E / \rho)^{1/2}$ (E - elastsusmoodul, ρ - tihedus). Pikilainetel gaasis $v = (\kappa p / \rho)^{1/2}$ (κ - moolsoojuste suhe, p - rõhk, ρ - tihedus).
- Lainefunktsioon** määrab lainetusel levivate võnkumiste hälbe y või u sõltuvalt koordinaatidest ja ajast. Piki x -telge leviva tasalaine korral lainefunktsioon $y(x, t) = A \cos(\omega t - kx)$, kus suurust k nimetatakse lainearvuks. **Radiaan-lainearv** $k = 2\pi / \lambda$ näitab, kui mitu lainepikkust mahub 2π meetrisse või siis seda, kui mitme radiaani võrra muutub faas kx laine edasiliikumisel x meetri võrra.
- Huygens'i printsiip**: Lainefronkti iga punkti võib vaadelda uute lainete allikana.
- Lainete interferents** on lainete liitumine. Interferents tekib tavaliselt siis, kui ühe ja sellesama laine kaks osa läbivad uuritavasse punkti jõudmisel erineva teepikkuse. Osalainete poolt läbitud teepikkuste vahet nimetatakse **käiguvaheks** Δ . Käiguvahele Δ vastab **faasivahe** $\varphi = k \Delta$, kus k on lainearv.
- Liitlaine amplituud** on maksimaalne, kui $\varphi = 2\pi n$ ja $\Delta = n \lambda$, kus n on täisarv. Liitlaine amplituud on minimaalne, kui $\varphi = 2\pi(n + 1/2)$ ja $\Delta = (n + 1/2) \lambda$.
- Lainete difraktsioon** on lainete kõrvalekalle sirgjoonelisest levimisest (levik varju piirkonda). Difraktsioon on hästi jälgitav, kui tõkke või ava mõõtmed on lainepikkusega samas suurusjärgus.
- Seisulaine** on laine, mille korral võnkumiste energia levikut ei toimu. Seisulaine tekib juhul, kui keha otsale lähenev laine ning otsalt tagasi peegeldunud laine tugevdavad teineteist interferentsil.
- Seisulaine** iga punkt võngub kindla amplituudiga. Punkte, kus amplituud on maksimaalne, nimetatakse seisulaine **paisudeks**. Punkte, mis ei võngu (amplituud on null) nimetatakse seisulaine **sõlmedeks**. Laineid juhtiva keha otstel paikneb alati seisulaine sõlm. Seetõttu peab keha pikkusele L mahtuma täisarv n (kvantarv) poollainepikkusi: $L = (\lambda/2) n$, millest $\lambda_n = 2L / n$ ja $f_n = (v/2L) n$ (siin v on lainete kiirus). Kui $n = 1$, on tegemist põhitooniga, kui $n > 1$, siis vastava ülemtooniga (kõrgema harmoonilisega). *Seisulaine on laine füüsika keeles kirjeldatud võnkumine.*
- Heli** on elastsuslaine (gaasis või vedelikus - pikilaine, tahkises - ka ristlaine). Heli **kõrguse** määrab põhitooni sagedus, **tämbri** määrab sageduste spekter ning **valjuse** lainete intensiivsus.
- Lainete intensiivsus** näitab, kui palju energiat kannab laine ajaühikus läbi levimissuunaga ristuva ühikulise pinna. Intensiivsuse SI-ühikuks on 1 W/m^2 . Heli intensiivsuse nulltasemeks (kuuldeläveks) loetakse $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$. Heli valjus detsibellides (dB) on määratud valemiga $10 \log(I/I_0)$, kus I on vaadeldava helilaine intensiivsus.
- Doppleri efekt** seisneb selles, et kui laineallikas ja vastuvõtja teineteise suhtes liiguvad, siis vastuvõtja poolt registreeritav sagedus erineb allika võnkesagedusest.

Doppleri nihked: Kui allikas ja vastuvõtja teineteisele lähenevad, siis on registreeritav sagedus suurem. Kui allikas ja vastuvõtja teineteisest kaugenevad, siis on registreeritav sagedus väiksem. Kaugetelt tähtedelt pärineva valguse sageduse vähenemine (nn. punanihe) annab tunnistust Universumi paisumisest. Punanihet võib aga tõlgendada ka kui footoni lainepikkuse suurenemist, mis on tingitud kõigi vahemaade pidevast suurenemisest Universumi paisumise käigus.

Relativistlik füüsika on selline aja ja ruumi käsitus, mis lähtub absoluutkiiruse printsiibist.

Relativistliku füüsika põhiidee: Olemas on vaid see, mille mõju on kohale jõudnud. Kui teade sündmusest on alles teel, siis see sündmus on antud vaatleja jaoks veel toimumata. Ruum on olemas vaid sedavõrd, kui temas on kehi. Aeg on olemas vaid sedavõrd, kui temas toimuvad sündmused.

Absoluutkiiruse printsiipi on õpikutes kombeks esitada kahes osas:

1. Kõik vaatlusandmed on suhtelised (relatiivsusprintsiip). Füüsikaliste suuruste väärtused on üksteise suhtes liikuvate vaatlejate jaoks erinevad ning ükski vaatleja pole eelistatud.
2. On olemas suurim võimalik kiirus – kiirus, millega levib väli ainelise objekti suhtes (valguse kiirus vaakumis $c = 299\,792\,458$ m/s). See kiirus on kõigi vaatlejate jaoks üks ja sama (absoluutse kiiruse konstantsuse printsiip). *Aine ei saa järele jõuda väljale.*

Relativistlik kiiruste liitumisseadus rahuldab piirkiiruse saavutamatus nõuet: kiiruste v_1 ja v_2 summa $u = (v_1 + v_2) / (1 + v_1 v_2 / c^2)$, millest $v_1 = c$ korral ka $u = c$.

Kui tegevuspaik vaatleja suhtes liigub, siis selle vaatleja jaoks:

Ajavahemikud pikenevad: $\Delta t = \Delta t_0 \gamma$, kus Δt_0 on omaaeg (aeg paigaloleva kella järgi).

Pikkused lühenevad: $l = l_0 / \gamma$, kus l_0 on omapikkus (pikkus eseme enda taustsüsteemis).

Mass suureneb: $m = m_0 \gamma$, kus m_0 on seisumass (keha mass keha endaga seotud taustsüsteemis).

Nende muutuste ulatust näitav **Lorentzi tegur** $\gamma = 1 / \sqrt{1 - (v^2 / c^2)}$ suureneb kiiruse suurenemisel.

Erirelatiivsusteooria (ERT) vaatleb vaid ühtlaselt liikuvaid (ehk inertsiaalseid) taustsüsteeme.

Üldrelatiivsusteooria (ÜRT) vaatleb lisaks ka mitteühtlaselt (kiirendusega) liikuvaid taustsüsteeme. Üldrelatiivsusteoorias kasutatakse **ekvivalentsprintsiipt**: gravitatsioon ja inerts on samaväärsed (ekvivalentsed). Vaatleja, kes tajub jõu olemasolu, ei saa ainult jõuaistingu põhjal kindlaks teha, kas jõud on põhjustatud kiirendusega liikumisest (inertsist) või gravitatsioonist. On vaja teisi aistinguid.

Relatiivsusteooria tähtsaim järeldus: mass ja energia kui kaks peamist füüsikalise objekti olemasolu väljendavat suurust – on samaväärsed (ekvivalentsed): $E = m c^2$. Aine olemasolu avaldub vaatlejale eelkõige läbi massi, välja olemasolu aga eelkõige läbi energia. Paigaloleva keha korral esineb samaväärsusseoses seisumass m_0 ning vastavat energiat nimetatakse keha seisue energiaks E_r . Seisue energia on energia, mis on kehal juba üksnes tema olemasolu tõttu.

4-mõõtmelises aegruumis lisandub kolmele ruumiteljele (x , y , z) nende kõigiga ristuv, ajaga võrdelise pikkuse telg (ict), mis on kokkuleppeliselt imaginaarne. 4-mõõtmelises aegruumis on kahe sündmuse ajalis-ruumiline vahekaugus (intervall) kõigi vaatlejate jaoks sama. Üldrelatiivsusteooria kohaselt ei ole olemas jõude – vaatleja jaoks, kes tajub jõudu, on vaid aegruum lokaalselt kõver.

Aegruumi juhtlause: Füüsikalised objektid "ütleavad" aegruumile, kuidas kõverduda, kõver aegruum aga teistele füüsikalistele objektidele, kuidas selles ruumis liikuda.

Elektrilaeng (q või Q) näitab, kui tugevasti keha osaleb elektromagnetilises vastastikmõjus. Looduses leidub kahte liiki elektrilaenguid, mida kokkuleppeliselt nimetatakse **positiivseteks** ja **negatiivseteks**. Samamärgiliselt laetud kehade vahel mõjub tõukejõud, erimärgiliselt laetud kehade korral aga tõmbejõud. Elektrilaengu SI-ühikuks on **üks kulon** (1 C).

Elementaarlaenguks e nimetatakse vähimat laengu väärtust. $1 e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C. Prootonil on laeng $+e$, elektronil $-e$, neutronil laeng puudub. d - ja b -kvarkidel on elektrilaeng $-1/3 e$; u -, c - ja t -kvarkidel aga $+2/3 e$. Aatomeid hoiab koos prootonite ja elektronide vahel mõjuv elektriline tõmbejõud.

Elektrilaengu jäävuse seadus väidab, et elektriliselt isoleeritud süsteemi kogulaeng on jääv suurus. Laeng võib tekkida ja kaduda vaid paarikaupa ($+q$ ja $-q$ üheskoos).

Vabad laengukandjad on laetud osakesed, mis saavad liikuda kogu vaadeldava keha või ainekoguse piires.

Elektrivool on laengukandjate suunatud liikumine. **Voolu** (kokkuleppeliseks) **suunaks** on positiivsete laengukandjate liikumise suund (vooluringis plussilt miinusele).

Voolutugevus näitab, kui suur laeng läbib ajaühikus juhi ristlõiget, $I = q / t$ ja $q = I t$. Voolutugevuse ühikuks on üks **amper** (1 A). **Üks kulon** on laeng, mis läbib ühe sekundi jooksul sellise juhi ristlõiget, milles kulgeb vool tugevusega üks amper. Kuna $q = I t$, siis $1 C = 1 A \cdot 1 s$.

- Punktlaenguteks** nimetatakse laetud kehi, mille mõõtmed on tühiselt väikesed võrreldes nende vahekaugusega. *Punktlaeng on keha, mille elektrilaengut võib vaadelda koondununa ühte punkti.*
- Coulomb'i seadus:** Kaks punktlaengut mõjutavad teineteist jõuga, mis on võrdeline nende laengute korrutisega ja pöördvõrdeline laengutevahelise kauguse ruuduga $F = k q_1 q_2 / r^2$. Jõud on suunatud piki laetud kehi ühendavat sirget ja sõltub ainest, milles nad asuvad. Vaakumis võrdetegur $k = 1/(4\pi\epsilon_0)$, kus suurust ϵ_0 nimetatakse **elektrikonstandiks**; $k = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$. See tähendab, et kahe punktlaengu 1 C vahel mõjub vaakumis vahekaugusel 1 m jõud $9 \cdot 10^9 \text{ N}$.
- Coulomb'i seadus** on analoogiline **gravitatsiooniseadusega**, elektrilaeng raske massiga, Coulomb'i võrdetegur k gravitatsioonikonstandiga G . Mõlema jõu pöördvõrdeline sõltuvus kauguse ruudust on tingitud vastava välja ühtlasest jaotumisest üle pinna, mille punktides väli eksisteerib.
- Elektrivälja tugevus** E näitab, kui suur jõud mõjub selles väljas ühikulise positiivse laenguga kehale. *Väljatugevus = jõud : selle keha laeng, millele jõud mõjub*, $E = F/q$. Elektrivälja tugevust võib lühidalt nimetada **E-vektoriks**. E-vektor on kokkuleppeliselt suunatud positiivselt laetud kehast eemale ja negatiivselt laetud keha poole (plussilt miinusele). Punktlaeng Q tekitab endast kaugusel r väljatugevuse $E = k Q / r^2$ (k - võrdetegur Coulomb'i seaduses).
- Gravitatsioonivälja tugevuse** rolli täidab Maa gravitatsioonivälja korral raskuskiirendus g . Punktlaengu Q väljatugevuse valemi $E = k Q / r^2$ analoogiks on valem $g = G M / r^2$ (M – Maa mass).
- Superpositsiooni printsiip** (liitumise põhimõte): kehade süsteemi väljatugevuse leidmiseks tuleb üksikute kehade väljatugevuse vektoreid liita. Superpositsiooni printsiip tuleneb välja omadusest mitte segada teist välja (väljaosakesel ei ole vajadust personaalse ruumi järele).
- Välja jõujoon** on mõtteline joon, mille igas punktis on väljavektor selle joone puutuja sihiline. Jõujoone suund ühtib väljavektori suunaga. Seal, kus väli on tugevam, paiknevad jõujooned tihedamalt.
- Aine dielektriline läbitavus** ϵ näitab, kui mitu korda on elektrijõud vaakumis (F_0) suurem jõust antud aines (F). Seega $\epsilon = F_0 / F$ ning $F = F_0 / \epsilon$, jõud on pöördvõrdeline aine dielektrilise läbitavusega.
- Elektrinihe** D iseloomustab keskkonnast sõltumatult keha võimet tekitada elektrivälja (nihutada teisi laetud kehi). Kui laetud keha tekitab aines välja tugevusega E , siis elektrinihe D näitab, millise väljatugevuse (ϵE) tekitab seesama keha vaakumis. Üldiselt $D = \epsilon_0 \epsilon E$ (ühik $1 \text{ C} / \text{m}^2$).
- Voog** Φ on füüsikaline suurus, mis näitab, kuivõrd välja jõujooned läbivad mingit pinda. Voo arvutamisel tuleb välja kirjeldav suurus (D , E vms.) korrutada selle pinna pindalaga S ning koosinusega nurgast β pinna normaali ja välja suuna vahel. Näiteks elektrinihke voog $\Phi_D = D S \cos \beta$.
- Gaussi seadus elektrivälja kohta:** Elektrinihke voog läbi kinnise pinna võrdub selle pinna poolt piiratud laengute algebralise summaga. Üldiselt: *kõik kinnise pinnaga piiratud ruumis paiknevad laengud võtavad osa välja tekitamisest pinnal*.
- Homogeenseks** nimetatakse välja, mille tugevuse vektor on kõigis ruumi punktides ühesugune nii pikkuselt kui suunalt. Homogeense elektrivälja tugevus kahe erinimeliselt laetud tasase metallplaadi vahel avaldub kujul $E = q / \epsilon_0 \epsilon S$, kus q on ühe plaadi laeng ja S - selle pindala.
- Väljatugevus kirjeldab** välja jõu kaudu, **potentsiaal** ja **pinge** aga töö kaudu, mida vastav jõud võib ära teha, seejuures sõltumatult töö tegemise viisist (trajektoori kujust). Välja, milles tehtud töö ei sõltu trajektoori (liikumistee) kujust, nimetatakse **potentsiaalseks väljaks**. Gravitatsiooniväli ja elektrostaatiline (paigalseisvatest laetud kehade põhjustatud) väli on potentsiaalsed.
- Punktlaengu q potentsiaalne energia** homogeenses elektriväljas tugevusega E on esitatav kujul $E_p = q E l$ või $E_p = q E d$, kus l (või d) on punktlaengu kaugus energia nulltasemest. Homogeenses gravitatsiooniväljas (raskusväljas) vastab sellele punktmassi m potentsiaalse energia valem $E_p = m g h$.
- Ühe punktlaengu q potentsiaalne energia** teise punktlaengu Q (mittehomogeenses) elektriväljas tugevusega E on esitatav kujul $E_p = q E r = k q Q / r$, kus r on laengute vahekaugus. Gravitatsiooniväljas $E_p = m g r = G m M / r$, kus $g(r) = G M / r^2$.
- Välja potentsiaal** ϕ näitab, kui suur on vaadeldavas punktis ühikulise positiivse laenguga keha potentsiaalne energia $\phi = E_p / q$. Punktlaeng Q tekitab endast kaugusel r elektrivälja, mille potentsiaal $\phi = k Q / r$ (k - Coulomb'i võrdetegur). Gravitatsiooniväljas $\phi = G M / r$, kus M on välja tekitava keha mass.
- Ekvipotentsiaalpinnaks** nimetatakse ühesugust potentsiaali omavate väljapunktide hulka. Ekvipotentsiaalpinnad ja jõujooned on omavahel alati risti.

Elektriline pinge U on kahe väljapunkti potentsiaalide vahe, potentsiaal aga on pinge mingi kokkuleppelise nulltaseme suhtes. Pinge kirjeldab olukorda, milles välja jõud tööd teevad. Pinge on suur seal, kus töö on pingeline (seda tööd on raske teha).

Kahe punkti vaheline pinge näitab, kui suure töö teeb väli positiivset ühikulist laengut omava keha viimisel ühest punktist teise: $U = A / q$. Potentsiaali ja pinge ühikuks on üks volt.

Üks volt (1 V) on pinge elektrivälja kahe punkti vahel siis, kui laengu 1 C viimisel ühest punktist teise teeb elektriväli töö 1 J: $1 \text{ V} = 1 \text{ J} / 1 \text{ C}$. Raskusväljas $1 \text{ V} = 1 \text{ J} / 1 \text{ kg}$ (aga seda reeglina ei kasutata).

Pinge ja väljatugevuse seos: väljatugevus kahe ekvipotentsiaalpinna vahel on leitav nende pindade vahelise pinge jagamisel pindade vahekaugusega: $E = U / l$.

Üks volt meetri kohta (1 V/m) on sellise elektrivälja tugevus, milles potentsiaal muutub piki jõujoont igal meetril ühe voldi võrra: $1 \text{ V/m} = 1 \text{ N/C}$. Kuju 1 V/m kasutatakse rohkem.

Üks elektronvolt (1 eV) on töö, mida teeb elektriväli ühe elementaarlaenguga osakese (elektroni) viimisel ühest punktist teise, kui nende punktide vaheline pinge on üks volt: $1 \text{ eV} = 1 e \cdot 1 \text{ V}$.

Energeetiline seosekonstant mikro- ja makromailma vahel: $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} / e$ ehk J / eV .

Magnetvälja tekitab elektrivool (laengukandjate liikumisega kaasnev elektrivälja muutumine). Magnetvälja tekitavad aga ka aineosakesed, millel on olemas spinn. See on osakeste **omamagnetväli**.

Püsimagnet on magnetiliselt aktiivne keha. Püsimagneti magnetväli on tema osakeste omamagnetväljade summa. Tinglikult eristatakse püsimagneti **põhja- ja lõunapoolust** (N ja S). Kahe püsimagneti erinev nimelised poolused tõmbuvad, samanimelised aga tõukuvad. Magnetvälja kokkuleppelist suunda näitab selles väljas orienteerunud magnetnõela põhjapoolus.

Vooluga juhtme magnetväljas pöörduv magnetnõel juhtmega ristuvasse asendisse (Oerstedi katse). Kui ühisel keskristsirgel paiknevates paralleelsetes juhtmetes kulgevad samasuunalised voolud, siis mõjub juhtmete vahel tõmbejõud. Vastassuunaliste voolude korral mõjub tõukejõud. Ristuvate juhtmete vahel jõudu ei mõju.

Kahe ühepikkuse ja paralleelse juhtmelõigu vahel mõjuv jõud on võrdeline juhtmelõikude pikkusega l ning voolutugevustega juhtmetes (I_1 ja I_2). See jõud on ka pöördvõrdeline juhtmelõikude vahekaugusega r . Ühtekokku: $F = K I_1 I_2 l / r$. Vaakumi korral võrdetegur $K = 2 \cdot 10^{-7} \text{ N} / \text{A}^2$. SI-süsteemis esitatakse ta kujul $K = \mu_0 / 2\pi$, kus suurust $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N} / \text{A}^2$ nimetatakse **magnetkonstandiks**.

Ühik 1 A: Kui kahe paralleelse, lõpmata pika ja lõpmata peenikese sirgjuhtme vahel, milles voolab ühesuguse tugevusega vool ja mille vahekaugus on 1 m, mõjub juhtmete pikkuse iga meetri kohta jõud $2 \cdot 10^{-7} \text{ N}$, siis voolutugevus juhtmetes on **üks amper**.

Ampère'i seadus: Vooluga juhtmelõigule mõjuv jõud F on võrdeline juheta läbiva voolu tugevusega I , juhtmelõigu pikkusega l ja siinusega nurgast α voolu suuna ja magnetvälja suuna vahel: $F = B I l \sin \alpha$.

Vasaku käe reegel: Kui vasaku käe 4 väljasirutatud sõrme osutavad voolu suunda ja magnetväli on suunatud peopessa, siis väljasirutatud põial näitab juhtmelõigule mõjuva magnetjõu suunda. Magnetjõud on alati risti nii voolu kui ka magnetvälja suunaga.

Magnetinduktsioon B näitab jõudu, mis mõjub ühikulise vooluga ja ühikulise pikkusega juhtmelõigule selle juhtmega ristuv magnetväljas: $B = F / (I l)$. Magnetinduktsioon on vektoriaalne suurus ja teda võib nimetada ka **B-vektori**ks. B -vektori kokkuleppelist suunda näitab magnetväljas orienteerunud magnetnõela põhjapoolus. Magnetinduktsiooni SI-ühikuks on tesla (1 T). Magnetinduktsioon kirjeldab magnetvälja samamoodi nagu väljatugevus E kirjeldab elektrivälja.

Üks tesla (1 T) on sellise magnetvälja induktsioon, milles välja suunaga ristuvale juhtmele pikkusega 1 m ja vooluga 1 A mõjub välja poolt jõud 1 N: $1 \text{ T} = 1 \text{ N} / (1 \text{ A} \cdot 1 \text{ m})$.

“Parema käe rusika” reegel: Kui rusikasse tõmmatud parema käe väljasirutatud põial näitab voolu suunda, siis neli kõverdatud sõrme näitavad selle voolu magnetvälja suunda.

Aine magnetiline läbitavus μ näitab, kui mitu korda on magnetjõud selles aines (F) suurem jõust vaakumis (F_0). $\mu = F / F_0$, seega $F = \mu F_0$, magnetjõud on võrdeline aine magnetilise läbitavusega. Kuna magnetinduktsioon on määratud jõu kaudu, siis ka $\mu = B / B_0$, ning $B = \mu B_0$, $B_0 = B / \mu$.

Magnetvälja tugevus H iseloomustab keskkonnast sõltumatult voolu võimet tekitada magnetvälja. Kui vool tekitab aines magnetinduktsiooni B , siis magnetvälja tugevus H näitab, millise magnetinduktsiooni ($B_0 = B / \mu$) tekitaks seesama vool vaakumis. Üldiselt $H = B / (\mu_0 \mu)$ ja $B = \mu_0 \mu H$. Magnetvälja tugevuse SI süsteemi ühikuks on amper meetri kohta (1 A/m).

Magnetvälja jõujoon on mõtteline joon, mille igas punktis on B -vektor suunatud piki selle joone puutujat.

Väljaspool püsimagnetit kulgevad jõujooned põhjapooluselt lõunapoolusele (N→S). Magnetvälja jõujooned on kinnised jooned ehk pöörised. Magnetväli on **solenoidaalne** väli ehk **pöörisväli**.

Sirgjuhe, milles kulgeb vool I , tekitab endast kaugusel r magnetinduktsiooni $B = K I / r$. SI-süsteemis $B = (\mu_0 \mu / 2\pi) I / r$, kus μ on ümbritseva keskkonna magnetiline läbitavus.

Ringjuhe läbimõõduga d ja vooluga I , tekitab oma tsentris magnetinduktsiooni $B = \mu_0 \mu I / d$ ja seega magnetvälja tugevuse $H = I / d$.

Üks amper meetri kohta on sellise magnetvälja tugevus, mida tekitab oma tsentris ringjuhe läbimõõduga 1 m, kui temas kulgeb vool 1 A.

Solenoid (pikk ja kitsas juhtmePOOL), milles kulgeb vool tugevusega I , tekitab oma teljel magnetinduktsiooni $B = (\mu_0 \mu N / l) I$. Siin N - solenoidi keerdude arv ja l - solenoidi pikkus. Magnetinduktsioon on alati võrdeline teda tekitava vooluga.

Magnetilise pinge U_m leidmiseks mingil suunatud lõigul tuleb magnetvälja tugevuse projektsioon lõigu suunale (H_l) korrutada lõigu pikkusega l .

Kogu voolu seadus: magnetiline pinge kinnisel joonel (ka: *magneetimisergutus* ehk *magnetomotoorjõud*) on võrdne kogu vooluga, mis läbib selle joonega piiratud pinda. Kõik pinda läbivad voolud või *elektrivälja muutused pinnal võtavad osa magnetvälja tekitamisest pinna piirjoonel.*

Lorentzi jõud F_L , mis mõjub laengut q omavale ja kiirusega v liikuvale osakesele magnetväljas induktiooniga B , avaldub kujul $F_L = q v B \sin \alpha$, kus α on nurk osakese liikumissuuna ja magnetvälja suuna vahel. Juhtmelõigule mõjuv magnetjõud, mis on määratud Ampère'i seadusega $F = B I l \sin \alpha$, summeerub liikuvatele laengukandjatele mõjuvatest Lorentzi magnetjõududest.

Elektromotoorjõud $\mathcal{E}$ näitab kõrvaljõudude tööd positiivse ühiklaengu ühekordsel läbiviimisel kogu vooluringist. Elektromotoorjõud on suurim pinge, mida antud vooluallikas on üldse suuteline tekitama (*allikapinge*) ehk siis kõigi vooluringis esinevate pingete summa.

Elektromagnetism käsitleb laetud osakeste mitteühtlast liikumist ning elektri- ja magnetnähtuste omavahelisi seoseid.

Elektromagnetilise induktsiooni nähtuseks nimetatakse elektrivälja tekkimist magnetvälja muutumisel.

Seda elektrivälja nimetatakse **pööriselektriväljaks**, kuna tema jõujooned on kinnised jooned ehk pöörised (väli on solenoidaalne). Kui juhe lõikab liikumisel magnetvälja jõujooni, siis toimib juhtmes **induktsiooni elektromotoorjõud**. Kui juhe on vooluringi osa, siis tekib selles induktsioonivool. Induktsioonivoolu tekitamiseks juhtmes teeb tööd jõud, mis liigutab juhet magnetväljas. See jõud ongi induktsiooni elektromotoorjõudu määravaks kõrvaljõuks. Magnetväljas liikuva juhtmelõigu kineetiline energia muundub pööriselektrivälja energiaks (see põhjustab täiendava pidurduse).

“Tavalise” magnetjõu tekkimine: magnetväli + elektrivool → magnetjõud → juhtme liikumine.

Elektromagnetiline induktsioon: magnetväli + juhtme liikumine → magnetjõud → elektrivool.

Magnetväljas liikuva juhtmelõigu otstel tekkiv pinge U (induktsiooni elektromotoorjõud $\mathcal{E}$) avaldub kujul

$U = v l B \sin \alpha$, kus v on liikumise kiirus, B – magnetinduktsioon, l – juhtmelõigu pikkus ja α – nurk liikumise suuna ning magnetvälja suuna vahel (sama nurk α , mis Lorentzi jõu valemis)

Magnetvoog näitab, millisel määral läbivad magnetvälja jõujooned vaadeldavat pinda. Magnetvoog avaldub kujul $\Phi = B S \cos \beta$, kus B on magnetinduktsioon pinnal, S - pinna pindala ning β - nurk pinna normaali ja magnetvälja suuna vahel. Magnetvoo ühikuks on üks veeber.

Üks veeber (1 Wb) on magnetvoog, mis läbib pinda pindalaga 1 m² selle pinnaga ristuvast magnetväljas, kui välja magnetinduktsioon on 1 T. 1 Wb = 1 T · 1 m².

Elektromagnetilise induktsiooni seadus: Kontuuris tekkiv induktsiooni elektromotoorjõud on võrdeline magnetvoo muutumise kiirusega kontuuris. SI-süsteemi korral on võrdeteguriks valitud 1, seega

$\mathcal{E}_i = - d\Phi / dt$. Miinusmärk väljendab Lenzi reeglit.

Lenzi reegel: Induktsioonivoolu suund on selline, et tema magnetväli takistaks voolu põhjustavat magnetvoo muutumist. Induktsioonivool toimib alati vastupidiselt voolu esile kutsuvale põhjusele. Lenzi reegel on samaväärne mehaanikast tuntud faktiga, et hõõrdejõud toimib alati liikumapanevale jõule vastupidiselt (takistab liikumist). Matemaatiliselt: algse magnetvälja muutus ΔB ja induktsioonivoolu magnetväli B_i on alati vastassuunalised.

Gaussi seadus magnetvälja kohta: magnetvoog läbi kinnise pinna võrdub nulliga. Magnetvälja jõujooned on kinnised jooned ehk pöörised. Magnetväli on **pöörisväli**. Magnetvälja jõujoon kas paikneb tervikuna mingi kinnise pinna sees või kui ta pinnast väljub, siis peab ta kuskil ka sisenema. Väljudes põhjustab ta positiivset magnetvoogu, sisenemisel aga sama suurt negatiivset voogu. Summa on null.

Elektromagnetväli on elektromagnetilist vastastikmõju vahendav ühtne väli, mis võib avalduda kas elektri- või magnetväljana. Elektromagnetväli levib ruumis **elektromagnetlainena**, milles elektri- ja magnetväli muutuvad perioodiliselt teineteiseks (muutuv elektriväli tekitab muutuva magnetvälja, see aga jälle muutuva elektrivälja). Elektromagnetvälja kirjeldavad **Maxwelli võrrandid**: Gaussi seadus (*Gauss law*) elektrivälja kohta, Gaussi seadus magnetvälja kohta, kogu voolu seadus (*Ampere-Maxwell law*) ja elektromagnetilise induktsiooni seadus (*Faraday-Maxwell law*).

Alalisvooluks nimetatakse elektrivoolu, mille tugevus ja suund ajas ei muutu.

Laengukandjate kontsentratsiooniks n nimetatakse vabade laengukandjate arvu aine ruumalaühiku kohta: $n = N/V$. Sellest $N = nV$, laengukandjate arv on kontsentratsiooni ja ruumala korrutis.

Voolutugevus I on esitatav ühe laengukandja laengu q , laengukandjate kontsentratsiooni n , suunatud liikumise kiiruse v ja juhtme ristlõikepindala S korrutisena $I = q n v S$.

Ohmi seadus: Voolutugevus juhis on võrdeline juhi otstele rakendatud pingega: $I = G U = U/R$. Võrdetegurit G nimetatakse juhtivuseks, tema pöördväärtust R aga juhi takistuseks.

Juhi takistus näitab, kui suure pinge rakendamisel juhi otstele tekib selles juhis ühikulise tugevusega vool: $R = U/I$. Takistuse mõõtühikuks on üks oom (1Ω).

Üks oom on sellise juhi takistus, mille otstele rakendatud pinge 1 V tekitab juhis voolu 1 A.

Juhi takistus on võrdeline tema pikkusega ja pöördvõrdeline ristlõikepindalaga. Võrdeteguriks on aine eritakistus ρ : $R = \rho l/S$. Metallide takistust põhjustab laengukandjate vastastikmõju võnkuvate ioonidega. Mida kõrgem on temperatuur, seda rohkem ioonid võnguvad ja seda suurem on metallkeha takistus. Metallkeha takistus on reeglina võrdeline temperatuuriga.

Takistiteks nimetatakse kindlat takistust omavaid juhte. Takisti takistus on reeglina palju suurem ühendusjuhtmete takistusest. Takistite **jadaühenduse** kogutakistuse leidmisel takistusi liidetakse. **Rööpühenduse** kogutakistuse leidmisel liidetakse takistuste pöördväärtusi.

Aine eritakistus ρ näitab, kui suur on sellest ainest valmistatud ühikulise pikkuse ja ühikulise ristlõikepindalaga keha takistus. $\rho = R S/l$. Aine eritakistuse ühikuks on üks **oom korda meeter**. $1 \Omega \cdot m$ on sellise aine eritakistus, mille tükk pikkusega 1 m ja ristlõikepindalaga $1 m^2$ omab takistust 1Ω . Aine eritakistus on esitatav kujul $\rho = b/q^2 n$, kus b on liikumise takistustegur laengukandjate suunatud liikumisel, q – ühe laengukandja laeng ja n – laengukandjate kontsentratsioon.

Takistuse (eritakistuse) temperatuuritegur α näitab, kui suur on antud aine eritakistuse suhteline muutus $0^\circ C$ juures temperatuuri tõusmisel ühe kraadi võrra. $\alpha = (\rho - \rho_0)/\rho_0$ t. Sellest $\rho = \rho_0 (1 + \alpha t)$. Takistuse temperatuuriteguri ühikuks on pöördkraad $(^\circ C)^{-1}$.

Ülijuhtivas olekus aine eritakistus on praktiliselt null. Ülijuhtivus on võimalik vaid allpool kriitilist temperatuuri T_k .

Joule'i-Lenzi seadus: Elektrivoolu toimel juhis eralduv soojushulk Q on võrdeline voolutugevuse I ruuduga, juhi takistusega R ja voolu kestusega t : $Q = I^2 R t$.

Juhis tehtav töö on võrdeline voolutugevusega I , pingega U juhi otstel ja ajaga t : $A = I U t$.

Elektriseadme võimsuse saab esitada voolutugevuse ja pinge korrutisena $P = I U$. Kütteseadme või lambi **takistus tööolukorras** on leitav nimivõimsuse N ja nimipinge U kaudu valemist $R = U^2/P$.

Üks kilovatt-tund ($1 kW \cdot h$) on energia, mis ühe tunni jooksul eraldub seadmes võimsusega üks kilovatt. $1 kW \cdot h = 3,6 MJ$

Vooluallikaks nimetatakse seadet, mis muundab mitteelektrilist energiat elektrienergiaks. Vooluallikas rakenduvad mitteelektrilised jõud ehk kõrvaljõud.

Ohmi seadus kogu vooluringi kohta: $I = \mathcal{E}/(R + r)$ või $\mathcal{E} = I R + I r$, voolutugevus ahelas on võrdeline elektromotoorjõuga ja pöördvõrdeline kogutakistusega (r on vooluallika **sisetakistus**).

Sisetakistus iseloomustab vooluallika sees laengukandjate suunatud liikumist pidurdavate jõudude toimet. Pinge sisetakistusel $U_s = I r$ on mitte elektrijõu vaid just kõrvaljõu poolt tehtud töö ühikulise laengu läbiviimiseks vooluallikast.

Kahe keha omavaheline mahtuvus C näitab, kui suure laengu viimisel ühelt kehalt teisele tekib kehade vahel ühikuline pinge: $C = q/U$.

Keha mahtuvus näitab, kui suure laengu andmisel kehale tekib potentsiaali ühikuline muutus: $C = q / \Delta\varphi$.

Ühe keha mahtuvusest räägitakse siis, kui teine asjaosaline keha on väga kaugel.

Üks farad (1 F) on sellise keha mahtuvus, millele tuleb anda laeng üks kulon, selleks et muuta tema potentsiaali ühe voldi võrra: $1 \text{ F} = 1 \text{ C} / 1 \text{ V}$.

Kondensaatoriks nimetatakse kehade süsteemi, mis on loodud mingi kindla mahtuvuse saamiseks. Kondensaator koosneb kahest juhtivast plaadist ehk kattest, mille vahel paikneb dielektriku kiht.

Kondensaatori mahtuvus C on tema katete omavaheline mahtuvus. Plaatkondensaatori mahtuvus on võrdeline katete pindalaga S , katetevahelise aine dielektrilise läbitavusega ε ja pöördvõrdeline katete vahekaugusega l : $C = \varepsilon_0 \varepsilon S / l$.

Elektrivälja energia kondensaatoris avaldub kujul $E_e = C U^2 / 2$, kus C on kondensaatori mahtuvus ja U - tema pinge. Kuna $U = E l$, siis on elektrivälja energia võrdeline väljatugevuse ruuduga. See on analoogiline deformeeritud keha potentsiaalse energiaga $E_p = k x^2 / 2$.

Endainduktsiooni nähtus esineb juhul, kui juhis induktsiooni elektromotoorjõudu põhjustav magnetvoo muutus on tingitud voolu muutumisest juhis endas.

Juhi induktiivsus L näitab, kui suur endainduktsiooni elektromotoorjõud tekib selles juhis voolu ühikulisel muutumisel ajaühiku jooksul, $L = - \mathcal{E}_e / (\Delta i / \Delta t)$ või $L = - \mathcal{E}_e / (di / dt)$. Sellest $\mathcal{E}_e = - L di / dt$.

Ühe juhtmekeeru korral näitab induktiivsus magnetvoo muutust $\Delta\Phi$, mille tekitab selles keerus ühikuline voolu muutus Δi : $L = \Delta\Phi / \Delta i$. Induktiivsuse ühikuks on üks henri (1 H).

Induktiivsus kirjeldab inertsia laengukandjate liikumisel vaadeldavas juhis (nagu mass mehaanikas).

Üks henri (1 H) on sellise juhi induktiivsus, milles voolu muutumine kiirusega üks amper ühes sekundis kutsub esile endainduktsiooni elektromotoorjõu üks volt: $1 \text{ H} = 1 \text{ V} / (1 \text{ A} / 1 \text{ s}) = 1 \text{ Wb} / 1 \text{ A}$.

Magnetvälja energia juhtme poolis induktiivsusega L ja vooluga I avaldub kujul $E_m = L I^2 / 2$. See on analoogiline kineetilise energiaga $E_k = m v^2 / 2$, mida omab liikuv keha massiga m ja kiirusega v .

Elektromagnetvõnkumiste käigus muutub laetud kondensaatori elektrivälja energia voolu magnetvälja energiaks juhtme poolis ja vastupidi. Need muutused on perioodilised, kusjuures sumbumise puudumisel omavõnkeperiood $T = 2\pi(LC)^{1/2}$ ning omavõnkesagedus $\omega_0 = 1 / (LC)^{1/2}$. Sumbuvate elektromagnetvõnkumiste ringsagedus $\omega = (\omega_0^2 - \beta^2)^{1/2}$, kus sumbetegur $\beta = R / (2L)$.

Kvantväljateooria väidab, et igasugust välja edastavad osakesed. Välja olemus on täielikult määratud osakekestega, mis seda välja edasi kannavad. Aineosakese olemust määrab omakorda viis, kuidas see osake seostub väljadega (millistes vastastikmõjudes ta osaleb).

Välja jõudude mõjuulatus on määratud vastavat mõju vahendavate osakeste keskmise elueaga. Kuna foton ja graviton on stabiilsed (eluiga lõpmatu), siis ulatub elektromagnetilise ja gravitatsioonilise välja mõju välja tekitavast kehast teoreetiliselt kuitahes kaugemale. Välja nõrgenemine pöördvõrdeliselt kauguse ruuduga on tingitud sellest, et mida suurem on välja tekitavat keha ümbritseva mõttelise sfääri pindala ($4\pi r^2$), seda väiksem on tõenäosus vaheosakese jõudmiseks sfääri just sellesse punkti.

Aatomi planetaarmudeli kohaselt sarnaneb aatom Päikesesüsteemiga. Päikese rollis on aatomi **tuum**, planeetide osa täidavad tuuma ümber tiirlevad **elektronid**. Aatomi mõõtmed on suurusjärgus 10^{-10} m ehk 1 Å (1 ongström), tuuma omad aga suurusjärgus $10^{-15} \text{ m} = 1 \text{ fm}$ (1 fermi). Planetaarmudel on mitteametlik, sest elektroni liikumine aatomis ei ole tiirlemine, see on tegelikult võnkumine (seisulaine).

Tuuma moodustavad **prootonid** ja **neutronid**. Prootoni elektrilaeng on $+e$ ja neutronil laeng puudub. Prootoni mass ületab ca 1836,1 korda ja neutroni mass 1838,7 korda elektroni massi ($9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$). *Aatomi mass koosneb peaaegu täielikult vaid tuuma massist.*

Bohri aatomimudel eeldab, et planetaarne aatom omab kindla energiaga **statsionaarseid** ehk ajas muutumatuid olekuid. Bohri aatomimudeli katseline alus on aatomi kiirgusspektri joonte paiknemine seeriatena.

Kvantarvudeks nimetatakse arve, mis määravad mikroobjekti (aatomit, elektroni vms) kirjeldavate füüsikaliste suuruste väärtusi.

Balmer-Rydbergi valem määrab vesiniku aatomi kiirgusjoonte lainepikkused λ või kvandi energiad hf kujul $1/\lambda = R' \{ (1/n_l^2) - (1/n_a^2) \}$ või $hf = R \{ (1/n_l^2) - (1/n_a^2) \}$, kus suurust $R' = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$ nimetatakse **Rydbergi konstandiks** ja sellele vastavat energiat $R = 13,6 \text{ eV}$.

Rydbergi energiaks. n_l ja n_a on täisarvud. Arv n_l (lõppoleku kvantarv) määrab konkreetse seeria (näiteks Lymani seerial $n_l = 1$, Balmeri seerial $n_l = 2$ jne). Arv n_a (algoleku kvantarv) määrab antud joone seeria piires, kusjuures alati $n_a > n_l$. Seeria lühilainelisele piirile vastab $n_a = \infty$.

- Elektroni impulsimoment** $L_n = m v_n r_n$ on Bohri mudelis Plancki nurkkonstandi $\hbar = h/(2\pi) = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ täisarv-kordne: $L_n = n \hbar$. See fakt on kogu Bohri mudeli aluseks.
- Aatomi energia** on pöördvõrdeline kvantarvu n ruuduga $E_n = -R/n^2$, kus R on Rydbergi energia.
- Elektroni orbiidi raadius** on võrdeline kvantarvu n ruuduga: $r_n = r_1 n^2$, kus r_1 on vesiniku aatomi põhioleku orbiidi raadius ehk **Bohri raadius**, $r_1 = 5,29 \cdot 10^{-11} \text{ m} \approx 0,529 \text{ \AA}$. Elektronorbiitidel on kindlad raadiused, sest elektronidel on **laineomadused**. Impulsiga p liikuval elektronil on lainepikkus $\lambda = h/p$ (de Broglie valem). Elektronilaine ei tohi iseennast interferentsil kustutada, s.t. orbiidi pikkus $2\pi r$ peab olema täisarv n lainepikkusi λ_n .
- Elektroni kiirus kujuteldaval ringorbiidil** on pöördvõrdeline kvantarvuga n : $v_n = v_1/n$, kus v_1 on elektroni kiirus põhiolekus, $v_1 = 2,188 \cdot 10^6 \text{ m/s} = 2188 \text{ km/s}$.
- Elektroni kujuteldava tiirlemise nurkkiirus:** $\omega_n = v_n/r_n = (v_1/n)(r_1/n^2)^{-1} = (v_1/r_1)/n^3 = \omega_1/n^3$. Kuna $\omega = 2\pi f$, siis ka selle tiirlemise sagedus f_n on pöördvõrdeline kvantarvu n kuubiga: $f_n = f_1/n^3$.
- Siirdel** ühest aatomi kvantolekust teise kiirgub või neeldub elektromagnetvälja kvant energiaga $E_{em} = hf$ või $E_{em} = \hbar \omega$. Selle kvandi sagedus f_{em} on samas suurusjärgus elektroni kujuteldava tiirlemissagedusega.
- Mitmeelektronilise aatomi** korral iseloomustatakse elektroni kvantarvudega n, l, m_l ja s .
- Peakvantarv** n määrab elektroni keskmise kauguse tuumast.
- Orbitaalkvantarvu** (ehk kõrvalkvantarvu) l poolest erinevad elektroni leiulained, mis on kindlaviisiliselt sulustatud tuuma läbivale teljele. Kvantarv l määrab elektroni orbitaalse impulsimomendi vektori pikkuse: $|L| = \hbar [l(l+1)]^{1/2}$
- Orbitaals** nimetatakse elektroni leiulaine kindlat kuju aatomis. Kvantarvu l suurenemise järjekorras tähistatakse orbitaale väikeste tähtedega s ($l=0$), p ($l=1$), d ($l=2$), f ($l=3$) jne. Orbitaali tüübi järgi räägitakse s -, p -, d - jne. elektronidest (tähe ees paikneb kvantarv n , näiteks $2p$ - või $3d$ - elektron).
- Magnetkvantarv** m_l määrab orbitaali telje või siis elektroni impulsimomendi vektori asendi ruumis magnetvälja suuna suhtes antud lainetüübi jaoks. Magnetkvantarv näitab, kui suur on elektroni orbitaalse impulsimomendi vektori L projektsioon l_z aatomile mõjuva magnetvälja suunale z . Selle projektsiooni pikkus (z -teljele) $l_z = m_l \hbar$.
- Kvantarvude võimalikud väärtused** on järgmised: $n = 1, 2, 3, \dots$; $l = 0, 1, \dots, n-1$ (täisarvud 0 ja $n-1$ vahel); $m_l = -l, \dots, +l$ (täisarvud $-l$ ja $+l$ vahel).
- Spinnkvantarvu** s võimalikud väärtused on $-1/2$ ja $+1/2$. Need väljendavad elektroni spinni kahte võimalikku asendit magnetväljas (vastassuunaline ning samasuunaline).
- Elektroni energia** aatomis määrab eelkõige tema peakvantarv (keskmine kaugus tuumast). Orbitaalkvantarvu mõju on nõrgem ning magnet- ja spinnkvantarvu oma veelgi nõrgem.
- Elektroni oleku** (seisundi) määrab kvantarvude n, l, m_l ja s kindel kombinatsioon.
- Olekute kidumiseks** nimetatakse olukorda, mil erinevates olekutes elektronidel on sama energia. Aatomile mõjuv elektri- või magnetväli kaotab kidumise.
- Tõrjutusprintsip** väidab aatomi kohta, et ühes ja samas aatomis ei saa olla kaht elektroni, mille kõik neli kvantarvu (n, l, m_l ja s) langeksid kokku. Iga kindla arvukombinatsiooniga määratud "korterisse" (personaalsesse ruumi) mahub ainult üks elektron. Kolme esimese kvantarvuga (n, l, m_l) määratud ruumi (teeneteise sisse) mahub kaks elektroni, mille spinnid seejuures on vastandlike suundadega.
- Kihiline elektronkate** kujuneb elektronide lisandumisel elektronkattesse nii, et nende energia oleks minimaalne ja tõrjutusprintsipi nõue oleks täidetud. Kihi numbriks (tuuma poolt lugedes) on peakvantarv n , alakih (orbitaali kuju) määrab kõrvalkvantarv l . Ühte elektronikihti saab kuuluda maksimaalselt $2n^2$ elektroni.
- Alakihtidest** täitub enne see, millel summa $n+l$ on väiksem. Kui $n+l$ on võrdne, siis täitub enne see alakiht, millel n on väiksem ($1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 4s, 3d, 4p, 5s, 4d, 5p, 6s, \dots$)
- Valikureeglid** määravad aatomi kvantarvude muutumise siirdel. Nad väljendavad impulsi jäävuse seadust. Valikureeglid on: $\Delta L = \pm 1, \Delta J = \pm 1, 0$ v.a. $0 \rightarrow 0, \Delta S = 0$ (vähem range).
- Aatomi orbitaalse impulsimomendi** $|L| = \hbar [L(L+1)]^{1/2}$ määrab aatomi orbitaalkvantarv L , mille võimalikud väärtused kahe elektroni korral paiknevad $l_1 + l_2$ ja $|l_1 - l_2|$ vahel. Suurema arvu elektronide korral rakendatakse L väärtuste leidmisel korduvalt sama põhimõtet. Analooiliselt on leitav aatomi spinnkvantarv S ja nii L kui S põhjal aatomi koguimpulsimomendi $J = L + S$ kvantarv J .

Röntgenkiirgus on kas 1) pidurdus-, e. pärsskiirgus või 2) karakteristlik kiirgus. Pärsskiirguse spekter on pidev, karakteristlikul kiirusel aga diskreetne (kindlate sagedustega). Pärsskiirgus tekib kiirete elektronide järsul pidurdumisel metallkehas (röntgenitoru anoodis).

Karakteristlik kiirgus tekib siis, kui röntgenitoru anoodi tabavad kiired elektronid löövad anoodi aatomite sisekihtidest omakorda välja elektrone. Tekkivad augud täidetakse välimistest kihtidest pärinevate elektronidega, vabaneva energia viib ära röntgenikvant.

Moseley seadus väidab, et karakteristliku röntgenkiirguse sagedused on võrdelised anoodi materjali laengu arvu Z (järjekorranumbri) ruuduga. Kõige intensiivsema, $K\alpha$ -joone kvandi energia avaldub valemiga $hf = 3/4 R (Z - 1)^2$, kus R on Rydbergi energia (13,6 eV).

Tuum on kerataoline suure tihedusega keha aatomi keskmis. Nukleone (prootoneid ja neutroneid) seovad tervikuks **tuumajõud**. Need jõud on tingitud tugevast vastastikmõjust, mis on suuteline ületama prootonite elektrostaatilist tõukumist.

Tuuma seoseenergiaks E_s nimetatakse energiat, mis tuleb tuumale anda selleks, et tuuma lõhkuda üksikuteks nukleonideks. Seoseenergiat mõõdetakse megaelektronvoltides (MeV). Seoseenergia on seotud massidefektiga ΔM kujul $E_s = \Delta M c^2$.

Massidefekt ΔM on nukleonide masside summa ja tuuma massi vahe. Massidefektile vastav energia (seoseenergia) vabaneb tuuma "kokkupanekul" üksikutest nukleonidest.

Tuuma eriseoseenergiaks nimetatakse seoseenergiat ühe nukleoni kohta. Suurim eriseoseenergia on keskmise massiga tuumadel (massiarvuga 50 kuni 100). Seetõttu on energeetiliselt kasulikke tuumareaktsioone kahte liiki: a) raskete tuumade lõhustumine (nn. "harilik" tuumareaktsioon) ja b) kergete tuumade süntees (termotuumareaktsioon).

Radioaktiivsuseks nimetatakse mingit liiki osakeste iseeneslikku kiirgumist tuumadest. Radioaktiivsuse põhilikeks on **α -kiirgus** (koosneb heeliumi tuumadest), **β -kiirgus** (koosneb kiiretest elektronidest) ja **γ -kiirgus** (koosneb ülisuure energiaga foononitest).

Radioaktiivse lagunemise seadus: $N = N_0 \exp(-p t) = N = N_0 \exp(-t/\tau) = N = N_0 2^{-t/T}$, kus N_0 on radioaktiivsete tuumade esialgne arv (ajahetkel $t = 0$), N – tuumade arv hetkel t , p – vaadeldava tuuma lagunemise tõenäosus ajaühikus, $\tau = 1/p$ – nukliidi keskmine eluiga (aeg, mille jooksul tuumade arv väheneb e korda) ja T – poolestusaeg. $\tau = T / \ln 2$.

Poolestusajaks nimetatakse aega, mille jooksul vaadeldavate radioaktiivsete tuumade arv väheneb kaks korda (pooleni esialgsest).

Radioaktiivse preparaadi aktiivsus näitab selles preparaadis ajaühiku jooksul lagunevate tuumade arvu. Aktiivsuse SI-ühik on **bekrell** (1 Bq) – üks lagunemine sekundis.

Kiirguse doosiks D nimetatakse kiirgusenergiat, mis neeldub aine massiühikus $D = E/m$.

Üks grei (1 Gy) on doos, mille korral 1 kg aines neeldub kiirgusenergia 1 J. 1 Gy = 1 J / 1 kg.

Biodoos (ekvivalentne kiiritusdoos) näitab kiirguse bioloogilist toimet. Biodoosi ühikuks on **siivert** (1 Sv). Röntgen-, γ - ja β - kiirguse korral vastab neeldumisdooile 1 Gy biodoos 1 Sv. Neutron- ja α -kiirguse korral vastab aga neeldumisdooile 1 Gy biodoos 3-10 Sv. Surmavaks biodoosiks loetakse 5 Sv.

Doosi võimsus P_D näitab ajaühiku jooksul saadavat doosi. $P_D = D/t$. Loodusliku foonina saab inimene pidevalt kiirgust biodoosi võimsusega ligikaudu 0,1 μ Sv/h. Eesti elaniku jaoks põhjustab suurema osa looduslikust foonist radioaktiivne raske gaas **radoon**, mis koguneb lohkudesse maapinnal.

Optika on füüsika osa, mis uurib valguse tekkimist (ehk kiirgumist), levimist ja kadumist (ehk neeldumist). Inimlik ettekujutus valgusest on siiani **dualistlik** (kahene): kiirgumisel ja neeldumisel käitub valgus nagu **osakeste** (kvantide) **voog**, levimisel aga nagu **laine** (elektromagnetlaine).

Elektromagnetlainete skaalal paiknevad sageduse suurenemise (laine pikkuse kahanemise) järjekorras raadiolained, infravalgus, nähtav valgus, ultravalgus, röntgenikiirgus ja gammakiirgus. Optika uurib seda osa elektromagnetlainete skaalast, mille korral tuleb arvestada nii laine- kui ka osakese-omadusi (infr-, nähtav ja ultravalgus ning röntgenikiirgus).

Valguse spektraalparameetrid on lainepikkus (vaakumis) λ , sagedus f ($f = c/\lambda$), spektroskoopiline lainearv k' ($k' = 1/\lambda$, levinuim ühik 1 cm^{-1}) ja kvandi energia hf (ühik 1 eV). Lainepikkus ja kvandi energia on seotud valemiga λ (nm) = 1240 (nm · eV) / hf (eV). Samas λ (μm) = 1240 ($\mu\text{m} \cdot \text{meV}$) / hf (meV); λ (pm) = 1240 (pm · keV) / hf (keV) jne. Sagedus f (THz) = (300 Mm/s) / λ (μm).

Geomeetiline optika ehk kiirteoptika on optika osa, mis tugineb ettekujutusele valguskiirtest. Geomeetiline optika on laineoptika selline piirjuht, mille korral lainepikkust võib lugeda nulliks.

- Valguse peegeldumisseadus** väidab, et kahe keskkonna lahutuspinnale langev kiir, sellelt peegeldunud kiir ja langemispunktist tõmmatud pinnanormaal paiknevad ühes ja samas tasandis. Peegeldumisenurk β võrdub langemisenurgaga α . Füüsikas mõõdetakse langemis- ja peegeldumisenurka alati pinnanormaali suhtes (mitte pinna enda suhtes!)
- Valguse murdumisseadus** väidab, et langev kiir, murdunud kiir ja pinnanormaal langemispunktis paiknevad ühes ja samas tasandis. Langemisenurga α ja murdumisenurga γ siinuste suhe on konstant, mida nimetatakse teise keskkonna **murdumisnäitajaks** esimese suhtes (n_{21}). Seega $\sin \alpha / \sin \gamma = n_{21}$. Aine murdumisnäitajat vaakumi suhtes nimetatakse selle aine **absoluutseks murdumisnäitajaks** n .
- Valguse murdumist** põhjustab valguse levimiskiiruse muutus üleminekul ühest keskkonnast teise. Murdumisnäitaja on tegelikult valguse levimiskiiruste suhe $n_{21} = v_1/v_2$, kus v_1 on valguse kiirus esimeses ja v_2 - teises keskkonnas. Absoluutne murdumisnäitaja $n = c/v$. Kehtib ka $n_{21} = n_2/n_1$, kus n_1 ja n_2 on vastavate keskkondade absoluutsed murdumisnäitajad.
- Maxwelli valem** väidab, et aine absoluutne murdumisnäitaja n on võrdne ruutjuurega selle aine dielektrilisest läbitavusest ϵ : $n = \epsilon^{1/2}$. Aine optilised omadused on määratud elektrilistega.
- Täieliku peegelduse** korral valgus ei lähegi teise keskkonda. Täielik peegeldus toimub langemisenurkade korral, mis on suuremad nn. piirnurgast $\alpha_p = \arcsin n_{21}$. Kui teiseks keskkonnaks on õhk või vaakum, siis $\alpha_p = \arcsin (1/n)$, kus n on esimese keskkonna murdumisnäitaja.
- Fermat' printsiip** väidab, et valgus levib ühest punktist teise piki sellist teed, mille läbimiseks kuluv aeg t on minimaalne. Kuna $t = s/v$ ja $v = c/n$, siis $t = ns/c$, kus s on valguse poolt läbitav teepikkus. Korrutist ns nimetatakse **optiliseks teepikkuseks**. See on vahemaa, mille valgus läbib vaakumis, kui ta läbib aines tegelikult pikkuse s .
- Laineoptyka** uurib nähtusi, mille korral valgus käitub lainetusena. Need on eelkõige interferents, difraktsioon ja polarisatsioon.
- Valguse interferents** on valguslainete liitumine, mille tulemusena toimub lainete energia ümberjaotumine ruumis. Seal, kus langevad kokku kahe laine harjad, tugevdavad lained vastastikku teineteist (tekib interferentsi **maksimum**, energiat on keskmisest rohkem). Kus aga langevad kokku ühe laine hari ja teise nõgu, kustutavad lained teineteist (tekib interferentsi **miinimum**, energiat on keskmisest vähem). Selektiivselt (kindla lõpptulemusega) võivad interfereeruda vaid **koherentsed** lained.
- Koherentseteks** nimetatakse laineid, mille faasivahe ei muutu. Kaks lainejada on koherentsed, kui 1) neil on sama sagedus või lainepikkus (monokromaatsuse nõue) ja 2) neis ei esine kooskõlatuid katkestusi (pidevuse nõue).
- Valguse difraktsioon** on valguslainete kõrvalekalle sirgjoonelisest levimisest (levik geomeetrilise varju piirkonda, tõkke või ava ääre taha). Difraktsioon on hästi jälgitav, kui tõkke või ava mõõtmed on lainepikkusega samas suurusjärgus.
- Tasalaine difraktsioonil** ühelt pilult tekib esimene miinimum kaldenurga φ korral, mis rahuldab tingimust $\sin \varphi = \lambda / b$, kus λ on kasutatava valguse lainepikkus ja b - pilu laius.
- Difraktsioonivõre** on ühesugustest korrapäraselt paiknevatest piludest koosnev süsteem. Naaberpilude vastavate ärte vahekaugust nimetatakse **võrekonstandiks** d . $d = a + b$, kus b on pilu laius ja a - piludevahelise ala laius. Nurk φ , mille võrra difraktsioonivõret läbiv valgus oma esialgselt suunast kõrvale kaldub, on määratud selle valguse lainepikkusega: $d \sin \varphi = n \lambda$, kus n on täisarv (spektri järk). Seetõttu kasutatakse difraktsioonivõret dispergeeriva (valgust spektriks lahutava) seadmena.
- Röntgenstruktuuranalüüs** on meetod aatomite ruumilise paigutuse ning nende omavaheliste kauguste määramiseks tahkise kristallvõres, mis toimib pealelangeva röntgenkiirguse suhtes difraktsioonivõrena. Aatomtasandite vahekaugused määratakse röntgenkiirguse lainepikkusega võrdlemise teel.
- Valguse polarisatsioon** on E - või B -vektori võnketasandi kindel paigutus valguslaines.
- Polarisaator** on seade, mis laseb läbi vaid kindlaviisiliselt polariseeritud valgust.
- Lineaarselt polariseeritud** valguse korral võngub E -vektor valguslaines ühes kindlas tasandis.
- Ringpolariseeritud** valguse korral pöörduv väljavektor igal võnkel täisringi võrra. Vaadates piki valguse levimissuunda näib väljavektori lõpupunkt liikuvat piki ringjoont.
- Elliptiliselt polariseeritud** valguse korral muutub perioodiliselt mitte ainult väljavektori asend vaid ka pikkus. Väljavektori lõpupunkt näib liikuvat piki ellipsit.

Valgus polariseerub tavaliselt kas a) peegeldumisel ja murdumisel või b) kaksikmurdumisel. Valguse peegeldumisel dielektriku pinnalt on murdunud valgus polariseeritud eelistatult langemistasandis, peegeldunud valgus aga sellega ristuvates tasandis.

Kaksikmurdumine on nähtus, mille korral valguse üleminekul ühest keskkonnast teise tekib kaks erinevat valguslainet, mis levivad erinevate kiirustega. Need on nn. tavaline (ordinaarne) valguslaine kiirusega v_0 ja murdumisnäitajaga $n_0 = c/v_0$ ja ebatavaline (ekstraordinaarne) laine (v_e ja n_e). Tavaline ja ebatavaline valguslaine on polariseeritud omavahel ristuvates tasandites. Kaksikmurdumist põhjustab murdva aine **anisotroopia** – elektriliste ja optiliste omaduste sõltuvus suunast.

Polarimeetria on meetod aine molekulide struktuuri määramiseks ainet läbiva (või sellelt peegeldunud) valguse polarisatsiooniomaduste muutumise põhjal.

Polarisatsioonitasandi pöördumine on nähtus, mille korral lineaarselt polariseeritud valguslaine kaks komponenti (üks vasakule ja teine paremale ringpolariseeritud) levivad aines veidi erinevate kiirustega (esineb nende kaksikmurdumine). Selle tulemusena valguse polarisatsioonitasand pöördu kiiremini leviva komponendi suunas. Aineid, mis pööravad valguse polarisatsioonitasandit, nimetatakse **optiliselt aktiivseteks**.

Valguse dispersiooniks antud aines nimetatakse selle aine murdumisnäitaja sõltuvust valguse lainepikkusest või sagedusest. Dispersioon on põhjustatud elektromagnetlainete vastastikmõjust aines võnkuvate laetud osakestega. Elektromagnetlaine toimib selle võnkumise suhtes sundiva jõuna (esineb resonants). Kuna $n = \varepsilon^{1/2}$ ja kehtib seos $\varepsilon = \varepsilon(0) \omega_r^2 / (\omega_r^2 - \omega^2)$ siis on aine dielektriline läbitavus ε ja murdumisnäitaja n resonantssagedusel ω_r määramatud. Laetud osakesed võivad võnkuda kui: 1) vabad laengukandjad (juhtivuselektronid), 2) seotud laengukandjad (valentsielektronid), 3) ioonid ionokristallis. Vastavad resonantssagedused määravad dispersioonikõvera $n = n(\lambda)$ kuju.

Valguse neeldumine on valguse intensiivsuse vähenemine aines kiirgusenergia üleminekul teisteks energia-liikideks.

Bouguer'i seadus väidab, et neeldumisel väheneb valguse intensiivsus aines eksponentsiaalselt $I = I_0 e^{-\kappa l}$ kus I on valguse intensiivsus kaugusel l pinnast. I_0 on pinnale langeva valguse intensiivsus ja κ - neeldumistegur (neeldumiskoefitsient).

Aine neeldumistegur κ näitab naturaallogaritmilises skaalas, kui mitu korda väheneb valguse intensiivsus selle aine ühikulise paksusega kihi läbimisel. Aine neeldumistegur on 1 cm^{-1} , kui selle aine 1 cm paksuse kihi läbimisel väheneb valguse intensiivsus arv e (2,7183) korda.

Aine värvuse määrab aine neeldumisspekter. Selle valguse värvus, mida aine ei neela vaid peegeldab, hajutab või laseb läbi, ongi antud aine värvus.

Fotoefektiks nimetatakse vabade laengukandjate tekkimist valguse toimel. Fotoefekt esineb vaid juhul, kui valguse footoni (kvandi) energia hf on piisavalt suur laengukandja vabastamiseks.

Välisfotoefekti korral lööb valgus metalli pinnast välja elektrone. Välisfotoefekti kirjeldab Einsteini valem $hf = A_v + mv^2/2$, mille kohaselt footoni energia hf läheb elektroni väljumistöö (A_v) tegemiseks ja elektronile kineetilise energia ($mv^2/2$) andmiseks.

Sisefotoefekti korral tekib footoni energia arvel pooljuhis elektron-auk-paar. Pooljuhi elektrijuhtivus seeläbi suureneb. Elektron väljub vaid keemilisest sidemest, aga mitte kehast.

Auguks nimetatakse elektroni puudumist pooljuhi keemilises sidemes.

Keelutsoon on selline elektroni energia väärtuste piirkond, millele vastavad elektronolekud pole stabiilsed, sest vastav elektronilaine hakkaks iseennast kustutama.

Keelutsooni laius on minimaalne elektron-auk paari tekitamiseks (ühe keemilise sideme katkestamiseks) vajalik energia (minimaalne energia, millega saab ühe sidemeelektroni muuta juhtivuselektroniks).

pn-siirdeks nimetatakse pooljuhi piirkonda, milles üks juhtivustüüp asendub teisega. n-piirkonnas on enamus-laengukandjateks elektronid, p-piirkonnas augud.

Ventiil-fotoefekti korral tekivad elektron-auk-paarid pooljuhis pn-siirde alas. Siirde elektriväli viib elektroni ja augu lahku, mistõttu pooljuhitüki otste vahel tekib pinge. Siire hakkab toimima vooluallikana, mis muundab valgusenergiat elektrienergiaks.

Optoelektronika tegeleb optilise ja elektrilise energia vastastikuse muundamisega. Levinumad optoelektronikaseadmed on **valgusdiodid** (päripingestatud pn-siire, mis elektrienergia arvel kiirgab valgust), **pooljuhtlaser** (laserina töötav valgusdiod) ja **fotorakk** (pn-siire, mis ventiil-fotoefektil muundab valgusenergiat elektrienergiaks).

Soojuskiirguseks nimetatakse optilist kiirgust, mis tekib soojusliikumise energia arvelt. Kui keha temperatuur on väliskeskkonna omast kõrgem, siis see keha kiirgab, vastupidisel juhul aga neelab soojuskiirgust. Soojuskiirgus on tasakaaluline (suurema energiaga taseme hõivatus on alati väiksem).

Kirchhoffi seadus väidab, et keha soojusliku kiirgamis- ja neelamisvõime suhe on kindlal lainepikkusel ja temperatuuril konstantne. Seda konstanti nimetatakse absoluutselt musta keha kiirgusvõimeks.

Absoluutselt must keha ehk **mustkiirgur** on keha, mille neelamisvõime on 1 (neelab kogu langenud valguse). Absoluutselt musta keha kiirgusvõime ületab antud temperatuuril kõigi teiste kehade kiirgusvõimet. *Mida rohkem keha suudab neelata, seda rohkem ta suudab ka kiirata.*

Keha kiirgusvõime ehk **kiirgavus** K näitab, kui palju mistahes sagedusega elektromagnetlainete energiat E_{eml} kiirgab selle keha ühikulise pindalaga osa ajaühikus kõigis suundades: $K = E_{\text{eml}} / (S \cdot \Delta t)$. Seega kiirgavuse SI-ühik on sama, mis intensiivsusel: 1 W/m^2 .

Stefan-Boltzmanni seadus väidab, et mustkiirguri integraalne ehk kõikvõimalike sagedustega valguse liikide jaoks summaarne kiirgavus on võrdeline selle keha absoluutse temperatuuri neljanda astmega: $K = \sigma T^4$. Suurus σ on Stefan-Boltzmanni konstant $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \text{ K}^4)$.

Keha spektraalne kiirgavus $dK/d\lambda$ näitab keha kiirgavust ühikulisel spektraalparameetri (näiteks lainepikkuse λ) väärtuste vahemikus antud konkreetse väärtuse läheduses. Spektraalse kiirgavuse sõltuvust spektraalparameetrist näitab keha kiirgusspekter $dK/d\lambda$ (λ) või dK/df (f). Integraalne kiirgavus K on spektraalse kiirgavuse integraal üle spektraalparameetri kõigi väärtuste.

Wieni nihkeseadus väidab, et mustkiirguri kiirgusspektri $dK/d\lambda$ maksimumi lainepikkus on pöördvõrdeline absoluutse temperatuuriga: $\lambda_m = b/T$. Suurus b on Wieni konstant $b = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K} \approx 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$. Mida kõrgem on keha temperatuur, seda lühilainelisem ehk seda suurema sagedusega f või kvandi energiaga hf on keha soojuskiirgus.

Luminestsents on mittetasakaaluline ja külm kiirgus (kõrgema energiataseme asustatus võib olla suurem madalama taseme omast ning kiirguse tekkeks vajalik energia ei tule soojusliikumisest).

Luminestsentsi ergastamiseks nimetatakse energia andmist luminestseeruvale kehale. Energia mittekiirguslikku eraldumist enne ja pärast kiirgusprotsessi nimetatakse **relaksatsiooniks**. Relaksatsiooni kestuse järgi jaguneb luminestsents **fluorestsentsiks** (relaksatsiooniaeg lühike, ca 10 ns) ja **fosforestsentsiks** (relaksatsiooniaeg pikk).

Pöördhõive on olukord kvantsüsteemis, mil ülemise energiataseme asustatus on alumise taseme asustatusest suurem (on palju kiirgamiseks valmis aatomeid).

Optiline resonator koosneb kahest peeglist, millest üks on osaliselt läbilaskev. Korduvalt peegeldudes läbib valgus resonatorit palju kordi ja stimuleeritud kiirguse tekkimise tõenäosus suureneb. Peeglite vahed kaugus tingib vajaliku lainepikkusega seisulaine tekke.

Laser on seade stimuleeritud kiirguse saamiseks. Laseri korral tekitatakse pöördhõive optilisse resonatorisse paigutatud aines. LASER: **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation – valguse võimendamine stimuleeritud kiirguse kaudu. Laserikiirgusele on enamasti omane: 1) ülikõrge monokromaatsus, 2) kiirte üliväike lahknevus ja 3) väga suur võimsus.

Lainejada väljendab ettekujutust üksikust footonist. Lainejada veidi erinevate sagedustega komponendid interfereeruvad, moodustades **lainepaketi**.

Valguse faasikiirus v_f on kiirus, millega liigub laines mingit kindlat faasi omav punkt. Faasikiirust on eespool nimetatud lihtsalt lainete kiiruseks $v_f = \lambda / T = \lambda f = 2\pi f / (2\pi / \lambda) = \omega / k$.

Valguse rühmakiirus (grupikiirus) v_r on kiirus, millega levib rühm kõige intensiivsemaid laineid lainepaketi keskkohas. Rühmakiirus on leitav dispersiooniseose $\omega = \omega(k)$ diferentseerimisel: $v_r = d\omega / dk$.

Kvantmehaanika (QM – *Quantum Mechanics*) on õpetus mikroobjektide liikumisest, mis toimub ühevõrra nii osakese kui laine liikumisena. Kvantmehaanika arvestab, et: 1) aineosakestel on laineomadused (osake käitub **de Broglie lainena**, millel $\lambda = h/p$) ja 2) osakeste käitumine on tõenäosuslik.

Määramatuse seosed: 1) $\Delta p_x \cdot \Delta x \approx \hbar$, osakese impulss ja koordinaat ei ole üheaegselt määratud ja 2) $\Delta E \cdot \Delta t \approx \hbar$, oleku energia ja eluiga ei ole üheaegselt määratud. Määramatusseos kujul $\Delta p_x \cdot \Delta x \geq \hbar$ tähendab väidet, et ühe pilu difraktsiooni katses ei saa elektronidele “keelata” sattumist kõrvalmaksimumidesse. Antud konkreetse pilu laiuse Δx korral loetakse kõik peamaksimumidesse sattuvad elektronid veel otse liikuvateks ($\Delta p_x \cdot \Delta x$ on neile väiksem, kui $\hbar$ ja vaid kõrvalmaksimumidesse sattuvatel elektronidel on see $\hbar$ -st suurem). Kui määramatusseoses esineb Plancki nurkkonstant $\hbar$, siis on otse liikumises nii lubatud kõrvalekalle 2π korda väiksem.

Suuruseks, mis muutub osakese-laines, on tõenäosus osakese asetsemiseks antud ruumiosas. Laine amplituudi A ruut võrdub **tõenäosuse tihedusega**, mille saame, jagades tõenäosuse ΔP osakese paiknemiseks ruumi mingis osas selle osa ruumalaga ΔV $A^2 = \Delta P / \Delta V$ või koguni $A^2 = dP/dV$. Seetõttu võib mikroosakese liikumisega kaasnevaid laineid nimetada **leiulaineteks**.

Määramatuse seos impulsi ja koordinaadi vahel väljendab mikroobjekti osakese- ja lainemudeli vahet. Kui objekti impulss ja lainepikkus on täpselt teada ($\Delta p_x = 0$, laine piirjuht), siis ei saa rääkida asukohast ($\Delta x = \infty$, kogu ruum on lainet "täis"). Kui aga objekti asukoht on täpselt teada (osakese piirjuht), siis ei saa määrata lainepikkust ega impulssi (objekti edaspidine saatus on prognoosimatu).

Määramatuse seos energia ja aja vahel väljendab energiatasemete lõplikku laiust. Kiirguva kvandi energia on täpselt määratud ($\Delta E = 0$) vaid siis, kui kiirgumine kestab kuitahes kaua ($\Delta t = \infty$). Energia jäävuse seadus võib aja Δt jooksul olla $\Delta E \approx \hbar / \Delta t$ võrra rikutud.

Kui mikroosake allub tugevale ruumilisele piirangule, siis osake käitub seisulainena ning omab kindlaid (diskreetseid) lainepikkuse, sageduse ja energia väärtusi, mis on määratud kvantarvudega. Sel juhul võtab määramatuse seos kuju $\Delta p_x \cdot \Delta x \geq \hbar / 2$, mis on ka enamasti kasutusel kvantmehaanika õpikutes.

Dispersiooniseos on osakese-mudelil objekti energia E sõltuvus tema impulsi p . Lainemudelil on see aga laine nurksageduse ω sõltuvus lainearvust k . Kuna $E = \hbar \omega$ ja $p = \hbar k$ siis väljendub dispersiooniseoses selgesti dualismiprintsiip. Dispersiooniseose tuletis määrab objekti kiiruse v .

Lainefunktsiooniks nimetatakse mikroosakese leiulainet kirjeldavat funktsiooni. Piki x -telge liikuva osakese korral: $\Psi(x, t) = A \cos(\omega t - kx)$ või komplekskujul $\Psi(x, t) = A \exp[i(\omega t - kx)]$. Lainefunktsioon (LF) on Schrödingeri võrrandi lahendiks. Kvantmehaanika õpikutes esineb ajast sõltuv LF enamasti kujul $\Psi(x, t) = A \exp[i(kx - \omega t)]$ ja ajast sõltumatu LF kujul $\psi(x) = A(x) \exp(ikx)$.

Schrödingeri võrrand kirjeldab kvantmehaanikas mikroosakese liikumist (nagu seda klassikalises mehaanikas teevad Newtoni seadused). Schrödingeri võrrand on energia jäävuse seadus: $E_{\Sigma} = E_k + E_p$ ehk kvantmehaanikas levinud tähistusviisi kohaselt $E = T + U$ ehk $\hbar \omega = \hbar^2 k^2 / (2m) + U$.

Kineetiline energia esitatakse kvantmehaanikas impulsi p või lainearvu k kaudu kujul $E_k = m^2 v^2 / (2m) = p^2 / (2m) = \hbar^2 k^2 / (2m)$. Osakese impulss on võrdeline lainearvuga: $p = \hbar / \lambda = (\hbar / 2\pi) (2\pi / \lambda) = \hbar k$.

Schrödingeri võrrand piki x -telge liikuva osakese jaoks: $i\hbar (\partial \Psi / \partial t) = (-\hbar^2 / 2m) (\partial^2 \Psi / \partial x^2) + U \Psi$, kusjuures eeldatakse, et $\Psi(x, t) = A \exp[i(kx - \omega t)]$. Aatomis paiknev elektron käitub seisulainena ja Schrödingeri võrrand ei sõltu ajast: $\{(-\hbar^2 / 2m) \Delta + U\} \psi = E \psi$. Seejuures $\Delta = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 + \partial^2 / \partial z^2$. Avaldist $\{(-\hbar^2 / 2m) \Delta + U\}$ nimetatakse Hamiltoni operaatoriks ehk **hamiltoniaaniks** (tähis $\hat{H}$).

Operaatoriks nimetatakse eeskirja toiminguteks, mis tuleb teostada operaatori järel tuleva avaldisega (seda nimetatakse operaatori **rakendamiseks**). Näiteks ajalise tuletise operaatori $(\partial / \partial t)$ rakendamisel lainefunktsioonile $\Psi(x, t)$ saame seose $(\partial / \partial t) \Psi = -i\omega \Psi$, mida nimetatakse **omaväärtusvõrrandiks**. Selle paremas pooles lainefunktsiooni ees seisvat suurust $(-i\omega)$ nimetatakse kasutatava operaatori **omaväärtuseks**. Omaväärtusvõrrandit rahuldavat lainefunktsiooni nimetatakse **omafunktsiooniks**.

Omaväärtusvõrrandi koostamine ja lahendamine sarnaneb fotografeerimisega. „Fotoaparaadiks“ on operaator, „fotoks“ (kujutiseks) on omaväärtus. Kui uuritav lainefunktsioon ei ole kasutatava operaatori omafunktsiooniks, siis me mingit kujutist ei saagi („foto on hägune“). Nii nagu me kogu infot kolmemõõtmelise objekti kohta ei saa kunagi kahemõõtmelise foto peale, nii ei saa ka mingi omaväärtus kunagi sisaldada kogu infot objekti kohta.

Osakest ühemõõtmelises potentsiaalikaevus kirjeldav Schrödingeri võrrand $\{(-\hbar^2 / 2m) (\partial^2 / \partial x^2) + U\} \psi = E \psi$ on teisendatav kujule $(\partial^2 / \partial x^2) \psi + \{2m(E - U) / \hbar^2\} \psi = 0$, mis juhul $U = 0$ (potentsiaalikaevu sees) kirjeldab seisulainet lainearvuga $k = (2mE)^{1/2} / \hbar$. Barjääri alas (seal, kus osakese energia E on väiksem barjääri ületamiseks vajalikust potentsiaalsest energiast U), on suurus $\{2m(E - U) / \hbar^2\}$ negatiivne ja võrrand kirjeldab osakese leiulaine amplituudi kahanemist neeldumisteguriga $\kappa = \{2m(U - E)\}^{1/2} / \hbar$ seaduse $A = A_0 e^{-\kappa x}$ järgi (analoogiliselt valguse neeldumisseadusega, x - kaugus barjääri servast).

Elektronmikroskoop on seade esemest kujutise saamiseks elektronilainete abil, mille lainepikkust λ saab kiirenduspinge U tõstmise teel vähendada, sest $\lambda = h / (2meU)^{1/2}$. Relativistlikult $\lambda = hc / (E - E_r)^{1/2}$.

Rastermikroskoobis (*Scanning Electron Microscope*, SEM) teravustatakse elektronkiir objekti pinnale mikrotäpiks ja seda täppi nihutatakse rida-realt üle uuritava pinna. Sellist protseduuri nimetatakse skaneerimiseks. Kujutise saamine toimub seega mitte objekti osadest samaaegselt vaid järgemööda.

Tunneleffektiks nimetatakse mikroosakese läbimineku potentsiaalibarjäärist. Potentsiaalibarjäär on makro-keha jaoks läbimatu sein, milles toimub osakese leiulaine amplituudi A eksponentsiaalne kahanemine. Kui sein on piisavalt õhuke, siis võib laine amplituud seinas mitte langeda nullini. See aga tähendab, et laine läheb mingi tõenäosusega seinast läbi.

Tunnelmikroskoobis (*Scanning Tunneling Microscope*, STM) skaneeritakse objekti selle pinna ligidal hoitava ülipeene teravikuga. Elektronid lähevad tunneleffekti vahendusel pinnalt teravikule. Seda üleminekut registreeritakse kui elektrivoolu (nn. tunnelvoolu). Teraviku üles-alla liikumine kordab pinna profiili, mille kujutis jõuab niimoodi kuvari ekraanile.

Kvantmehaanika tõlgendused on erinevad vastused küsimusele: *Millisel viisil realiseerub kvantmehaaniline juhuslikkus?* Ehk teisiti: *Millisel hetkel saab kvantmehaanilise tõenäosusega lubatud võimalikkus tegelikkuseks?* On kaks peamist rühma tõlgendusi:

Einsteini kontseptsioon väidab, et juhuslikkust polegi. Kvantmehaanika on lihtsalt halb teooria (võimetu ennustama tulevikku). Einstein: *Jumal ei mängi täringuid! (God does not play dice!)*

Bohri kontseptsioon ehk **Kopenhaageni tõlgendus** – füüsikalise reaalsuse moodustumisel osaleb ka vaatleja ise. Võimalikkus saab tegelikkuseks vaatluse hetkel. Seni, kuni vaatlust (eksperimenti) pole teostatud, on veel kõik võimalik. Kui aga katse on andnud mingi kindla tulemuse, siis on sellele vastupidine tulemus muutunud võimatuks.

Schrödingeri kass on Schrödingeri poolt kvantmehaanilise juhuslikkuse kritiseerimisel esitatud arutlus: Kass on kinnisesse kasti pandud koos põrgumasinaga (seadmega, mis tapab kassi). Põrgumasina käivitumine on kvantmehaaniliselt juhuslik. Tõenäosus, et põrgumasin käivitub mingi kindla aja (näiteks ühe tunni) jooksul, on 50 %. Millisel hetkel sureb kass?

Einstein vastab: see hetk on kindel, aga inimene ei suuda seda ära arvata. Kassi saatus otsustati hetkel, mil ta pandi kasti (anti tundmatu ohtliku loodusjõu mõjuvalda).

Bohr vastab: Kassi saatus otsustatakse hetkel, mil kast avatakse. Kasti avaja on otsustamisel osaline (mingitpidi süüdlane kassi surmas). Enne kasti avamist on veel kõik võimalik.

Einsteini-Podolsky-Roseni paradoks on Einsteini poolt kvantmehaanilise juhuslikkuse kritiseerimisel esitatud arutlus: Kaks osakest, mis on põimolekus (*entangled state*) ehk siis moodustavad ühtse kvantsüsteemi, viiakse ruumis lahku. Olgu süsteemi summaarne spinn null. Kui ühe osakesega teostatud katsest näiteks selgub, et tema spinn on $\frac{1}{2}$, siis peab teise osakese spinn olema automaatselt $-\frac{1}{2}$. Seega ühe osakesega teostatav katse määrab teise, võib-olla väga kaugel paikneva osakese omadused. Osakeste vahel eksisteerib õudne kaugmõju (*spooky interaction*), mida absoluutkiiruse printsiibi põhjal nagu ei tohiks olemas olla. Katsed selliste osakestega on aga üha selgemini näidanud, et füüsikalised objektid võivad olla terviklikud hoolimata objekti osade suurtest vahekaugustest. Oluline on märkida, et objekti osad ja nende vahel toimuva infovahetuse oleme me ise välja mõelnud. Välja mõeldud objektiosad ei peagi alluma absoluutkiiruse printsiibile. Seega: maailm on holistlik.

Kvantarvuti on arvuti, mis erinevalt tavalisest (pooljuhtseadmetel funktsioneerivast) arvutist töötleb kvantbittides (*qubit*) esitatud infot. Tavaline arvuti töötleb bittide, millel on ainult kaks võimalikku seisundit – millegi olemasolu (1) ja puudumine (0). Kvantbitt on aga reeglina põimolekus mis sisaldab teatud tõenäosustega mõlemat piirmist olekut. Kvantarvuti oluliselt suurem jõudlus tuleneb sellest, et ei seata eesmärgiks arvestada kõiki variante ning otsida saajaprotsendiliselt tõest vastust vaid eelistatakse tõenäoseimaid variante ja otsitakse tõenäoseimat vastust.

Kvantkrüptograafia on turvalise infoedastuse meetod, mis põhineb kvantfüüsika seadustel. Kvantkrüptograafias kodeeritakse info elektromagnetkiirguse footonite kindlatesse omadustesse. Infot edastatakse pakettidena, mis sisaldavad kindlat arvu footoneid. Kuna üks footon saab neelduda ainult ühe korra, siis kinnitab paketi kohalejõudmine rikkumatul kujul seda, et info lekkimist ei ole toimunud.

Temperatuur T on füüsikaline suurus, mis iseloomustab keha (süsteemi) soojusastet. Soojematel kehal on kõrgem temperatuur. Temperatuuri SI-ühikuks on kelvin (1 K). Kraadi pikkus Celsiuse ja Kelvini temperatuuriskaalades on sama, erineb vaid nullpunkt: $0^{\circ}\text{C} = 273,15\text{ K}$. Absoluutsele temperatuurile $T = 0\text{ K}$ vastab klassikalises füüsikas soojusliikumise peatumine (kvantmehaaniliselt pole see aga üldse võimalik). Temperatuurile vastav mikroparameeter on ühe osakese keskmine kineetiline energia.

Gaas, vedelik ja tahkis erinevad molekulide omavahelise kauguse ja liikumisvabaduse poolest. Gaasis on molekulide keskmised vahekaugused tunduvalt suuremad molekulide mõõtmetest. Vedelikus ja tahkises on molekulide vahekaugused mõõtmetega samas suurusjärgus.

Vedelikus on molekulide liikumisvabadus gaasiga võrreldes väiksem (suvaline molekul ei saa vedelikust lahkuda) ja tahkises veelgi väiksem (aatom või ioon ei saa lahkuda kristallvõre sõlmest).

Soojus on energia liik. Kui see energia läheb ühelt kehalt teisele, siis räägitakse ülekantavast soojushulgast Q . Soojushulga ühikud: 1 cal (kalor) = 4,186 J.

Soojusvahetus kehade vahel võib toimuda kas 1) vahetult soojusülekandel (molekulipõrgete vahendusel), 2) konvektsiooni teel (nii, et soe gaas tõuseb ülespoole ja külm laskub raskusjõu mõjul alla) või 3) elektromagnetilise soojuskiirguse (sisuliselt – välja) vahendusel (üldiselt efektiivseim variant).

Keha soojusmahtuvus C näitab, kui suur soojushulk tuleb sellele kehale anda, et tõsta tema temperatuuri ühe kraadi võrra. $C = Q / \Delta T$. Soojusmahtuvuse SI-ühikuks on J / K.

Aine erisoojus c näitab, kui suur soojushulk tuleb anda selle aine ühikulise massiga kogusele, et tõsta tema temperatuuri ühe kraadi võrra. $c = Q / (m \Delta T)$. Erisoojuse SI-ühikuks on J / (kg K). Seega ülekantav soojushulk $Q = c m \Delta T$ ja keha soojusmahtuvus $C = c m$.

Aine moolsoojus on ühe mooli selle aine soojusmahtuvus.

Gaasi töö paisumisel avaldub kujul $A = p \Delta V$. Diferentsiaalselt väike töö $dA = p dV$. Süsteemi poolt tehtavat tööd loetakse paisumisel positiivseks ja kokkusurumisel negatiivseks (positiivset tööd teeb süsteemi kokku suruv välisjõud).

Termodünaamika (TD) uurib soojusnähtusi, tundmata huvi nende põhjuse vastu mikrotasemel. Ta uurib eelkõige tingimusi, millel soojus võib minna ühelt kehalt teisele. Kaks keha (ainekogust) on **termodünaamilises tasakaalus**, kui soojus ühelt teisele ei lähe (ehkki võiks minna). Kui kaks keha on TD tasakaalus, siis on neil sama temperatuur.

Keha või ainekoguse (TD süsteemi) **siseenergia** U on tema osakeste summaarne energia nende vastastikusel liikumisel ja mõjustusel. Ideaalgaasi siseenergia on võrdeline tema temperatuuriga: $U = \text{const} \cdot T$. Näiteks ühe mooli ideaalgaasi siseenergia $U = N_A E_k = N_A (i/2) k T = (i/2) R T$, kus i on gaasimolekuli vabadusastmete arv.

Universaalne gaasikonstant $R = 8,31 \text{ J / (K mol)}$ näitab tööd, mida teeb üks mool ideaalgaasi, paisudes isobaariliselt nii palju, et tema temperatuur tõuseb ühe kraadi (1 K) võrra. Ideaalgaasi olekuvõrrandist tulenevalt on universaalne gaasikonstant ühe mooli ideaalgaasi rõhk korda ruumala jagatud absoluutse temperatuuriga: $R = p V_m / T$ (V_m tähistab ühe mooli gaasi ruumala).

Termodünaamika I printsiip (füüsikaline formuleering): kehal või ainekogusel olemasoleva soojushulga Q kasv ΔQ (juurde antud soojushulk) põhjustab siseenergia kasvu ΔU ja võimaldab paisumisel teha tööd $A = p \Delta V$. Seega $\Delta Q = \Delta U + p \Delta V$, diferentsiaalkujul $dQ = dU + p dV$. TD I printsiip on oma olemuselt energia jäävuse seadus. Töö tegemiseks peab kulutama energiat (kas soojust või siseenergiat). Keemias loetakse positiivseks välisjõudude tööd: $\Delta Q = \Delta U - p \Delta V$, seega saab siseenergia suurened ($\Delta U > 0$) kas juurde saadud soojuse arvel (ΔQ) või töö tulemusena: $\Delta U = \Delta Q + p \Delta V$.

Entroopia S on termodünaamilise süsteemi olekuparameeter, mis kirjeldab energia pöördumatut hajumist soojusnähtustel. Entroopia nulltase on meelevaldne, oluline on vaid muutus. Entroopia diferentsiaalne muutus avaldub kujul $dS = dQ / T$. Entroopia ühikuks on 1 J/K. *Entroopia on süsteemi korrastamuse mõõt*. Kuna $dQ = T dS$, siis suurendab süsteemile mingi soojushulga andmine alati süsteemi kuuluvate osakeste liikumise või paigutuse kaootilisust (entroopiat).

Osakeste paigutuse termodünaamiline tõenäosus w on entroopiale vastav mikroparameeter. Seejuures kehtib seos $S = k \ln w$. Kui osakeste paigutuse korrastatus on kõrge, siis tõenäosus w sellise seisundi juhuslikuks tekkimiseks on väike ning ka entroopia on väike.

Termodünaamika (TD) II printsiip: soojust ei ole kunagi võimalik muuta täielikult tööks. TD II printsiipi nimetatakse ka entroopia kasvu seaduseks. *Välisjõudude puudumisel võib mistahes süsteemi entroopia ainult kasvada* (piirjuhul – olla konstantne). Soojus ei saa minna külmemalt kehalt soojemale, ilma et välisjõud seejuures tööd teeks. *Soojus ei saa iseenesest minna külmemalt kehalt soojemale*.

Soojuspaisumisel muutub keha joonmõõde (pikkus) l või ruumala V (enamasti) võrdeliselt temperatuuriga T . Pikkuse (või ruumala) muut avaldub kujul: $\Delta l = \alpha l \Delta T$ (või $\Delta V = \beta V \Delta T$), kus α on joonpaisumistegur, β - ruumpaisumistegur, ΔT - temperatuuri muut.

Aine joonpaisumistegur α näitab, kui suur on sellest ainest valmistatud keha suhteline pikenemine temperatuuri ühikulise kasvu korral (suurenemisel 1 K võrra). $\alpha = \Delta l / (l \Delta T)$.

Ideaalgaas on reaalse gaasi mudel, mille korral jäetakse arvestamata: 1) molekulide mõõtmised ja 2) molekulide vahel mõjuvad jõud. Ideaalgaasi molekulid pörkuvad omavahel nagu tühisväikeste mõõtmatega elastsed kuulikesed.

Olekuparameetrid kirjeldavad soojuslikes protsessides mingi gaasikogusega toimuvaid muutusi.

Makroskoopilisteks (gaasikogust tervikuna kirjeldavateks) olekuparameetriteks on gaasi rõhk p , ruumala V , temperatuur T ja entroopia S . Vastavateks mikroskoopilisteks (ühe molekuli keskmist käitumist kirjeldavateks) parameetriteks on ühe molekuli poolt pörkel keskmiselt anuma seinale mõjuv jõud F_1 , ühe molekuli personaalne ruumala V_1 (või selle pöördväärtus – molekulkontsentratsioon n), ühe molekuli keskmine kineetiline energia E_{kk} ja molekulide paigutuse termodünaamiline tõenäosus w .

Isotermiliseks nimetatakse protsessi, mille käigus ei muutu gaasi temperatuur ja seega ka siseenergia. TD I printsiibi $dQ = dU + p dV$ kohaselt on paisumine positiivse töö tegemisega ($p dV > 0$) siis võimalik vaid väljastpoolt saadava soojuse arvel ($dQ > 0$). Isotermilisel protsessil kehtib Boyle' - Mariotte'i seadus: kui $T = \text{const}$, siis $p V = \text{const}$.

Isobaariliseks nimetatakse protsessi, mille käigus ei muutu gaasi rõhk. Isobaarilisel protsessil kehtib Gay-Lussac'i seadus: kui $p = \text{const}$, siis $V / T = \text{const}$. Väljastpoolt saadav soojus dQ läheb nii siseenergia suurendamiseks kui tööks paisumisel.

Isokooriliseks nimetatakse protsessi, mille käigus gaasi ruumala ei muutu. Isokoorilisel protsessil kehtib Charles'i seadus: kui $V = \text{const}$, siis $p / T = \text{const}$. Väljastpoolt saadav soojus dQ läheb ainult siseenergia suurendamiseks (paisumist ei ole, $dV = 0$)

Adiabaatiliseks nimetatakse protsessi, mille käigus ei toimu gaasi soojusvahetust väliskeskkonnaga. See tähendab, et adiabaatilisel protsessil ei muutu entroopia ($S = \text{const}$). Adiabaatilist protsessi kirjeldab Poissoni võrrand: $p V^\kappa = \text{const}$ või $T V^{\kappa-1} = \text{const}$, kus κ on gaasi moolsoojuste suhe. Kui soojusvahetust ei ole ($dQ = 0$), siis on töö tegemine ($p dV > 0$) võimalik vaid siseenergia kahanemise arvelt ($dU < 0$).

Moolsoojuste suhe $\kappa = C_p / C_V$ on määratud gaasi molekuli vabadusastmete arvuga i kujul: $\kappa = (i+2) / i$. Gaasi moolsoojus isobaarilisel protsessil C_p on suurem moolsoojusest isokoorilisel protsessil C_V , sest isobaarilise protsessi käigus tuleb gaasi paisumisel teha tööd. Lühidalt: $C_p = C_V + R$.

Mehaanilise süsteemi vabadusastmete arv i nimetatakse süsteemi liikumist kirjeldavate sõltumatute koordinaatide arvu. Sõltumatu on selline koordinaat, mida ei saa esitada teiste koordinaatide kaudu. Üheaatomilisel molekulil on vaid 3 kulgliikumise vabadusastet. Kaheaatomilisel molekulil on 3 kulg- ja 2 pöördliikumise vabadusastet (kokku 5). Kolme- (ja rohkem) -aatomilisel mittelineaarsel molekulil on 3 kulg- ja 3 pöördliikumise vabadusastet (kokku 6).

Ideaalgaasi olekuvõrrand (Clapeyroni - Mendeleejevi võrrand) seob omavahel gaasi olekuparameetreid: rõhku p , ruumala V ja temperatuuri T kujul: $p V = z R T$, kus z on gaasi moolide arv (gaasikoguse mass jagatud molaarmassiga) ja R - universaalne gaasikonstant.

Molekulaarkineetilise teooria põhivõrrand väidab, et gaasi rõhk sõltub gaasimolekulide kontsentratsioonist $n = N / V$ (arvust ruumalaühikus) ja ühe molekuli keskmisest kineetilisest energiast E_{kk} järgmiselt: $p = 2/3 n E_{kk}$. Sellest järeldub, et $E_{kk} = 3/2 k T$ ja $p = n k T$, kus k on Boltzmanni konstant. Üldisemal juhul $E_{kk} = (i/2) k T$, kus i on gaasimolekuli vabadusastmete arv.

Daltoni seadus väidab, et gaaside segu rõhk võrdub komponentide osarõhkude summaga. **Osarõhk** on rõhk, mida avaldaks vaadeldav gaas teiste gaaside puudumisel segus.

Gaasimolekuli ruutkeskmine kiirus (kiiruste ruutude keskmistamisel ja järgneval ruutjuure võtmisel saadud kiiruse väärtus) avaldub kujul $v_r = (3 k T / m_0)^{1/2} = (3 R T / M)^{1/2}$, kus m_0 on ühe gaasimolekuli mass ja M molaarmass.

Boltzmanni konstant k on universaalse gaasikonstandi R ja Avogadro arvu suhe (gaasikonstant ideaalgaasi ühe molekuli kohta) $k = R / N_A$. $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$.

Reaalgaas erineb ideaalgaasist selle poolest, et tema molekulidel on mõõtmised olemas ja molekulide vahel mõjuvad jõud. Reaalgaasi kirjeldab van der Waalsi võrrand: $(p + z^2 a / V^2) (V - z b) = z R T$, kus a ja b on van der Waalsi konstandid. Rõhule liidetav suurus $z^2 a / V^2$ on molekulaarsetest tõmbejõududest tingitud lisarõhk (tõmbejõu mõjul saavad molekulid enne omavahelist pörget impulsi juurdekasvu, mis põhjustab tugevama pörke ja seega suurema rõhu). Gaasi ruumalast lahutatav suurus $z b$ on molekulide endi ruumala (sinna, kus üks molekul juba on, teine enam minna ei saa).

Kriitiliseks nimetatakse temperatuuri, millest kõrgemal võib aine olla vaid gaasilises olekus.

Faasidiagrammil vastab sellele kriitiline punkt. Siin tähendab *faas* aine agregaatolekut (gaas, vedelik või kindla struktuuriga tahkis). Jooned faasidiagrammil lahutavad eri faase.

Kolmikpunktiks nimetatakse olekut (punkti faasidiagrammil), milles aine kolm faasi (tahke, vedel ja gaasiline) on tasakaalus. Faasidiagrammil lõikuvad kolmikpunktis neid faase eraldavad jooned.

Küllastunud auruks nimetatakse aine olekut, milles vedel ja gaasiline faas on tasakaalus (aurustumine ja kondenseerumine tasakaalustavad teineteist). Igale ainele on omane tema küllastunud auru rõhu kindel monotoonne sõltuvus temperatuurist.

Vedelik keeb, kui tema küllastunud auru rõhk on temperatuuri tõstmisel saanud võrdseks välisrõhuga.

Keemise tunnuseks on mullide tekkimine vedeliku kogu ruumalas ning mullide jõudmine pinnale.

Siirdesoojuseks (sulamis-, aurustumis- vm. soojuseks) nimetatakse soojushulka, mis on vajalik vaadeldava faasisiirde teostamiseks aine massiühikuga. Siirdesoojuse SI-ühikuks on 1 J/kg. Siirdel suurema siseenergiaga olekusse siirdesoojus neeldub aines, siirdel väiksema siseenergiaga olekusse – eraldub.

Pindpinevusjõud on pinnal asetsevate vedeliku molekulide omavaheline tõmbejõud. Pindpinevusjõu mõjul püüab vedelikupiisk võtta vähima pindalaga (sfäärilist) kuju.

Vedeliku pindpinevustegur α näitab, kui suur pindpinevusjõud mõjub selles vedelikus pinna katkirebimisjoone ühikulise pikkuse kohta $\alpha = F_p / l$ (ühik njuuton meetri kohta 1 N/m).

Vaba tee pikkus on vahemaa, mille gaasimolekul keskmiselt läbib kahe põrke vahel. Ta on määratud molekuli efektiivdiameetriga d ja molekulide kontsentratsiooniga n : $\Lambda = 1 / (2^{1/2} \pi d^2 n)$.

Jaotusseadus näitab, millise tõenäosusega saavad teoks võrreldavad tõenäosuslikud sündmused või siis kui suur osa vaadeldavatest osakestest omab mingit parameetri (kiiruse, energia jne) väärtust selle suuruse ühikulisel vahemikus antud väärtuse ümbruses. Jaotusseadusi uurib **statistiline füüsika**.

Maxwelli kiirusjaotus $f(v) = dn / (n dv)$ näitab, kui suur osa (dn) kõigist ruumalaühikus sisalduvatest gaasimolekulidest (n) liigub kiirusega, mille väärtus jääb v ja $v + dv$ vahele.

Termodünaamika põhivõrrand $dU = T dS - p dV$ on sisuliselt TD I printsiip. Ta väidab, et entroopia kasvuga kaasneb süsteemi siseenergia kasv, süsteemi paisumine ($dV > 0$) viib aga siseenergia kahanemisele ($dU < 0$), kui süsteem väljastpoolt soojust juurde ei saa ($T dS = 0$).

Soojusmasin on seade, mis muundab soojust tööks. Soojusmasin võtab kuumalt kehalt ehk soojendilt soojushulga Q_1 , muudab osa sellest mehaaniliseks tööks A ning annab ülejäänud osa Q_2 ära külmemale kehale ehk jahutile. Soojusmasina kasutegur $\eta = A / Q_1 = (Q_1 - Q_2) / Q_1$ ja selle maksimaalne võimalik väärtus $\eta_m = (T_1 - T_2) / T_1$, kus T_1 ja T_2 on vastavalt soojendi ja jahuti temperatuurid.

Termodünaamilised potentsiaalid on TD süsteemi kindlaviisiliselt defineeritud energiad.

Termodünaamilised potentsiaalid on siseenergia U , vaba energia $F = U - TS$, Gibbsi vaba energia (Gibbsi potentsiaal) $G = pV + F$ ja entalpia $H = pV + F + TS$

Vaba energia $F = U - TS$ on “tark” (tööks muundatav) osa süsteemi siseenergiast U . Korrutis TS seevastu on “rumal” (kaootiline, korrapäratu, tööks mitte muundatav) osa siseenergiast.

Entalpia $H = U + pV = pV + F + TS$ võrdub kogu soojushulgaga, mis tuleb süsteemile anda selleks, et viia teda singulaarsest olekust ($p = 0, V = 0, T = 0, S = 0$) antud olekusse.

Kaasaegsele füüsikalisele maailmapildile on omane: 1) fermionide ja bosonite eristamine spinni alusel, 2) atomistliku printsiibi rakendamine väljale (kvantväljateooria) ja 3) Standardmudeli kasutamine.

Fermionid on poolarvulise spinniga osakesed. Nad on **aine** ehituskivid. Alusfermionide spinn on $1/2$. See tähendab, et nende sisemist liikumist kui pöörlemist saab iseloomustada impulsimomendiga, mille arv väärtus on $1/2$ Plancki nurkkonstanti ($\hbar$). Spinnkvantarvu muutumine väärtuselt $+1/2$ kuni väärtuseni $-1/2$ tähendab pöörlemise suuna (impulsimomendi vektori suuna) muutumist vastupidiseks. Samas tähendab see ka fermioni poolt tekitatava omamagnetvälja (spinn-magnetvälja) suuna muutumist fermionile väljastpoolt mõjuva magnetvälja suuna suhtes vastupidiseks. Fermionid jagunevad **kvarkideks** ja **leptoniteks**. Fermionid alluvad tõrjutusprintsipiile ja seega ka ajalis-ruumilistele piirangutele.

Bosonid on täisarvulise spinniga osakesed. Enamasti on nad **välja** algosakesed. Bosonina võivad aga käituda ka kahest vastandlike spinnidega fermionist koosnevad terviklikud süsteemid. Vastastikmõjusid vahendavaid bosoneid (footon, gluon, uikon ja graviton) nimetatakse sageli ka **vaheosakesteks**. Footoni, gluoni ja uikoni spinn on 1. See tähendab, et lainena liikudes kannavad nad edasi impulssi, mis on leitav bosoni lainearvu korrutamisel ühe Plancki nurkkonstandiga. Bosoni tekkimisel või kadumisel muutub mõne protsessis osaleva fermioni impulsimoment esialgselt vastupidiseks. Bosonid ei allu tõrjutusprintsipiile ja seega ka vastavatele ajalis-ruumilistele piirangutele.

- Kvargid** (d , s ja b elektrilaenguga $-1/3 e$ ning u , c ja t elektrilaenguga $+2/3 e$) osalevad kõigis vastastikmõjudes. Elektrilaengut ($-1e$) omavad **leptonid** (elektron, müoon ja tauon) ei osale tugevas mõjus. Elektrilaenguta **leptonid** (elektron-, müü- ja tauneutriino) osalevad vaid nõrgas ja gravitatsioonilises mõjus. Leptonite seisumassid on oluliselt väiksemad kvarkide omadest (kreeka k. *lepton* – väike münt).
- Kvarkidest koosnevad osakesed** on alati valged. See tähendab, et nende värvilaeng on tasakaalus. Erinevad värvilaengud tõmbuvad (nii nagu ka erimärgilised elektrilaengud). Stabiilne seisund võib tekkida kahel viisil: 1) värvus esineb koos antivärvusega. Nii tekkivaid liitosakesi nimetatakse **mesoniteks**; 2) esineb segu kolmest värvusest või siis kolmest antivärvusest. Nii tekivad vastavalt kas siis **barüonid** või **anti-barüonid**. Ka meie tavalise aine osakesed prooton ja neutron on barüonid.
- Osakese ja antiosakese kohtumisel** nad lähevad üle vaakumolekusse. Seda protsessi nimetatakse annihilatsiooniks. Aineosakeste energia arvel tekivad vastava mõju bosonid. On võimalik ka vastupidine protsess – suure energiaga vahebosonite muundumine osakese ja antiosakese paariks.
- Neutriinod** on väga väikese seisumassiga elektriliselt neutraalsed fermionid, mis tagavad leptonlaengu jäävuse nõrga vastastikmõju protsessides ja üldise arvamuse kohaselt moodustavad suure osa Universumi varjatud (teleskoopide abil mittevaadeldavast) massist.
- Gluonid** omavad ise värvilaengut (samaaegselt nii mingit värvust kui ka antivärvust). See eristab neid teistest vahebosonitest, millel vastava interaktsiooni laengut ei ole. Suure energiaga gluonid võivad oma energia arvelt muunduda kvark-antikvark paarideks. See on ka põhjus, miks kvarke vabas olekus ei esine (eksisteerib **kvarkvangistus**). Kui mingi kvark lüüakse välja liitosakesest, siis ei suuda kvark vabaneda “oma” gluonitest, mis liiguvad talle järele kiirusega c . Gluonid muunduvad kvark-antikvark paarideks ning üks uutest kvarkidest asendab liitosakesest lahkunud kvargi. Ülejäänud kvargid ühinevad tugeva mõju liitosakesteks ehk **hadroniteks** (mesoniteks või barüonideks) ja värvustasakaal on taastunud. Nii realiseerubki **tugev** vastastikmõju (*hard* – ingl *tugev*).
- Nõrk vastastikmõju** teisendab ühtesid fermione teisteks. Näiteks neutroni β -lagunemisel muutub üks d -kvark u -kvargiks, tekivad elektron ja elektron-antineutriino. Protsessi vahendab W^- -boson ehk uikon. Nõrk vastastikmõju on saanud sellise nime põhjusel, et uikonitel on märkimisväärne seisumass. Seetõttu on tõenäosus uikoni tekkimiseks virtuaalosakesena väga väike, mis viib alla ka nõrga mõju protsessi üldise esinemistõenäosuse. *Vaid nõrk mõju suudab muuta ühtesid kvarke teisteks.*
- Virtuaalseks** nimetatakse osakest, mis tekib vastastikmõju protsessides energia jäävuse seaduse ajutise rikkumise arvel (määramatusseosega lubatud ajavahemiku $\Delta E \approx \hbar / \Delta t$ jooksul). Jõud kahe vastastikmõjus oleva fermioni vahel tekib põhjusel, et virtuaalboson on neile ühine. Kaks fermioni ei saa lahku minna, sest energia jäävuse seadus ei saa jäädagi rikutuks. Üks fermion kiirgab teise fermioni poole virtuaalbosoni ning tõmbejõu korral liigub teine fermion vahebosonile vastu (“püüab” visatud palli). Tõukejõu korral üritab teine fermion vahebosoni eest põgeneda (palli “mitte püüda”).
- Tuumajõudude** mehhanism: Prootonid ja neutronid koosnevad kvarkidest, aga kuna nad on “valged” (neil puudub summaarne värvilaeng), siis nad ei saa vahetada omavahel gluoneid. Nukleonide vahelist jõudu vahendav osake peab ise olema samuti värvilaenguta, kuid koosnema siiski kvarkidest, millel on värvilaeng. Selline osake on **meson**. Näiteks võib prooton (uud) tekitada d -kvargi ja d -antikvargi paari. Loodud paarist jääb d -kvark paigale ning üks prootoni u -kvarkidest moodustab d -antikvargiga **piioni** ehk π^+ -mesoni. Prooton ise muutub selle tagajärjel neutroniks (udd). Tekkinud virtuaalne meson neelatakse mõne kõrvalasuva neutroni (udd) poolt. Neutronis olev d -kvark annihileerub d -antikvargiga “tagastades” kvargi/antikvargi paari loomiseks “laenatud” energia. Piionis olnud u -kvark jääb neutroni sisse, mis muutub prootoniks (uud).
- Plancki parameetrid** on kolmest tähtsaimast fundamentaalkonstandist (gravitatsioonikonstandist G , Plancki nurkkonstandist $\hbar$ ja absoluutkiirusest c) moodustatud suurused. Näiteks **Plancki pikkuseks** nimetatakse pikkuse dimensiooniga suurust $r_p = (G \hbar / c^3)^{1/2} = 1,6 \cdot 10^{-35}$ m. Plancki pikkus on vähim pikkus, millel meile tuntud füüsikas on veel mõtet. Kera, mille raadius võrdub Plancki pikkusega, võngub määramatusseoste tagajärjel olemise ja olematuse vahel.
- Must auk** on väga väike ja väga suure massiga keha. Ta on nii tugeva gravitatsioonivälja allikas, et valgus ei pääse sellest enam välja. Mustade aukude olemasolu Universumis on tuvastatav häirete järgi nende läheduses paiknevate objektide liikumises.
- Universumile** on (meie vaatluste ulatuses) omane nii materia paiknemise üldine keskmine ühtlus kui ka selle lokaalne ebahomogeenne (rea struktuursete tasandite olemasolu). Universum **paisub** (galaktikad eemalduvad üksteisest nii nagu laigud täispuhutaval õhupallil). Seda tõestab Hubble’i seaduse kehtivus.

Hubble'i seadus väidab, et mida kaugema kosmilise objektiga on tegemist, seda suurema kiirusega see meist näib eemalduvat: $v = H r$. Kauguse r ja spektrijoonte punanihke põhjal määratud eemaldumiskiiruse v suhe ehk Hubble'i konstant H võimaldab hinnata Universumi paisumise alguse (nn. Suure Paugu) toimumisaega. Valguse lainepikkus kaugete galaktikate spektrites on suurenenud põhjusel, et selle valguse välja kiiranud aatomite kaugus meist on mitmeid kordi suurenenud valguse teel-oleku aja jooksul (Universum on vahepeal paisunud).

Hubble'i konstant on parimate kaasaegsete hinnangute kohaselt ca $70 \text{ km}/(\text{s} \cdot \text{Mpc}) = 2,3 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1}$. Hubble'i konstandi pöördväärtus on aeg, mille jooksul on juba meist eemaldunud kõige kaugemad, peaaegu absoluutkiirusega meist eemalduvad kosmilised objektid. Järelikult see aeg, $4,3 \cdot 10^{17} \text{ s}$ ehk $1,38 \cdot 10^{10}$ aastat – on **Universumi vanus**. Selle aja ning absoluutkiiruse korrutis $1,3 \cdot 10^{26} \text{ m}$ on kõige suurem meie jaoks mõtet omav pikkus – **Universumi teoreetiline raadius**.

Suur Pauk on ca 13,8 miljardit aastat tagasi toimunud hiigelpahvatus, milles sai alguse Universum. Infot selle kohta annab **kosmiline taustkiirgus** ehk reliktfoon. See on soojuskiirgus, mille spektraalne koostis vastab kiirgava keha absoluutsele temperatuurile 2,8 K (maksimumi lainepikkus ca 1 mm). Sellise temperatuurini on paisumise käigus jahtunud Universum. Universumi algsele (nn. singulaarsele) olekule oli üldtunnustatult omane vastastikmõjude eristamatus, mateeria esinemine bosonkujul ja (energia ülikõrgest kontsentreeritusest tingitud) aegruumi ülim kõverus (sõlmseisund).

Kosmiline taustkiirgus ehk **reliktkiirgus** tekkis hinnanguliselt 380 000 aastat pärast Suurt Pauku, mil Universumis algas temperatuuri langemise tõttu aatomite moodustumine. Varasem mateeria oli aatomite tekkeks liiga kuum, temperatuuriga suurusjärgus üle 10^9 K , ning oli enamasti plasmaolekus. Kiirgus oli ainega soojuslikus tasakaalus. Tekkinud "külmad" aatomid ei suutnud enam kiirgust neelata, seetõttu hakkasid kiirguse footonid ilmaruumis laiali levima. Reliktkiirgus toob meieni teate Universumi väga varajasest noorusest. Ta ütleb meile, et Universumi suuremastaabilise struktuuri algmed olid juba siis olemas.

Süsteemi sümmeetria iseeneslik (spontaanne) vähenemine ilmneb mistahes füüsikalise süsteemi (sh. Universumi) arenguprotsessis. Areng tähendab süsteemi mitmekesisuse suurenemist. Selle käigus ilmnevad süsteemi uued omadused ja väheneb süsteemi sümmeetria.

Globaalsete faasisiirete teooria jagab Universumi arengu Plancki ajastuks (esimesed 10^{-43} s = Plancki aeg), kiirgusdominantseks ajastuks (Plancki ajastule järgnev sekund) ja ainedominantseks ajastuks (ülejäanu kuni lähiminevikuni). Praeguseks oleme jõudnud tumeda energia domineerimise ajastusse.

Tume energia on energia, mis põhjustab Universumi (usutavasti kiirenevat) paisumist, hoolimata gravitatsioonilisest tõmbejõust, mis ju peaks paisumist takistama. Tumeda energia päritolu pole teada.

Tume aine on aine, mis ei kiirga mitte mingeid elektromagnetlaineid, kuid mõjutab gravitatsioonijõuga meile nähtavat (EM laineid kiirgavat) ainet. Universumi koguenergiast või massist (valemi $E = m c^2$ kohaselt on nad ju samaväärsed!), moodustab ca 70 % tume energia, 25 % tume aine ja vaid ca 4 % moodustab meile tuntud (nähtav) aine. Seda küll eeldusel, et Universumi paisumine on ühtlane.

Universumi aegruumi kuju on seotud **tihedusparameetriga** Ω , mis on defineeritud kui aine keskmine tihedus Universumis jagatuna selle tiheduse kriitilise väärtusega, mille korral aegruum osutub tasaseks. Oluline on tumeenergia kogus ning tumeenergia tiheduse käitumine paisuvas Universumis. Tihedusparameetritele $\Omega > 1$ vastab positiivse kõverusega aegruum, sarnaselt sfääri pinnaga. Tihedusparameetritele $\Omega < 1$ vastab negatiivse kõverusega aegruum, sarnaselt sadulaga. Selline mudel kujutab lõpmatult paisuvat Universumit. Tumeenergia põhjustab kiirendusega paisumist. Tihedusparameetritele $\Omega = 1$ vastab aegruumi tasasus (eukleidiline geomeetria). Selline mudel kirjeldab aeglustuvalt paisuvat Universumit, kus paisumine lõpuks seiskuks. Tumeenergia lisamine põhjustab aga kiireneva paisumise. Vaatlusandmed näitavad, et Universumi paisumine tõepoolest kiireneb, vastavalt avatud Universumi teooriale. Reliktkiirguse analüüsist aga tuleneb, et aegruum on peaaegu tasane (lapik).