TALLINNA POLÜTEHNILINE INSTITUUT
Füüsika kateeder

FÜÜSIKA MÕISTEID, SEADUSI, VALEMEID

Mehaanika, relatiivsusteooria, molekulaarfüüsika, termodünaamika

Metoodiline materjal

Tallinn 1985

Heaks kiidetud TPI nõukogus
20. 03. 1984, protokoll nr. 9

Käesolev materjal on mõeldud füüsika kursuse kordamiseks eelkõige neile üliõpilastele, kes on auditoorsest õppetööst kaua eemal olnud. Abimaterjalina on ta kasutatav kõigile üliõpilastele. Seejuures ei asenda ta loenguid ega õpikut, kuna puuduvad täielikult tuletused ja pikemad arutlused. Ülesehituselt ja loogikalt vastab materjal tehniliste kõrgkoolide füüsikaprogrammile.

Таллинский политехнический институт.
Кафедра физики.
ПОНЯТИЯ, ЗАКОНЫ, ФОРМУЛЫ ФИЗИКИ.
Механика, теория относительности, молекулярная физика, термодинамика.
Составил Э. Рузалеп.
На эстонском языке.

Koostanud E. Rusalep.
Vastutav toimetaja R.-K. Loide.

Trükkida antud 13. 02. 1985.
Formaat 60x84/16.
Trükip. [illegible] 4,25.
Tingtrükip. 4,05.
Trükiarv [illegible]
Tellimuse nr. 83
Tasuta.
Tallinna Polütehniline Instituut, 200026 Tallinn, [illegible]
TPI rotaprint, 200006 Tallinn, Koskla 2/9.
ISBN 9789949483082 (pdf)

K L A S S I K A L I S E   M E H A A N I K A

F Ü Ü S I K A L I S E D   A L U S E D

KINEMAATIKA

Taustsüsteem

Keha, mille suhtes vaadeldakse teiste kehade liikumist, nimetatakse taustsüsteemiks. Keha asendi määramiseks taustsüsteemis seotakse temaga liikumatult koordinaadistik.

Raadiusvektor

Raadiusvektor määrab keha (masspunkti) asukoha taustsüsteemis. Raadiusvektor tõmmatakse koordinaadistiku alguspunktist vaadeldava keha (masspunkti) asukohta. Raadiusvektori pikkus on ristkoordinaadistiku korral seotud keha (masspunkti) koordinaatidega järgmiselt:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}. \qquad (1)$$

Masspunkt

Keha, millel on mass, kuid puuduvad mõõtmed, nimetatakse masspunktiks. Masspunktina võib vaadelda iga keha, mille mõõtmed on väikesed võrreldes kaugusega vaatlejani, s.o. koordinaadistiku alguspunktini ja teiste kehadeni.

Süsteem

Mehaaniline süsteem on vaatluseks välja valitud kehade (masspunktide) kogum.

Liikumisseadus

Liikumisseadus määrab keha (masspunkti) asendi igal ajahetkel. Kuna keha asend taustsüsteemis on määratud koordinaatidega, siis keha asendi määramiseks peame teadma koordinaate aja funktsioonidena:

$$\begin{cases} x = f_1(t) \\ y = f_2(t) \\ z = f_3(t) \end{cases} \qquad (2)$$

Trajektoor

Trajektoor on joon, millel paiknevad kõik punktid, mida keha (masspunkt) oma liikumisel läbib.

Teepikkus

Teepikkus on kaugus keha (masspunkti) alg- ja lõppasendi vahel, mõõdetuna mööda trajektoori. Määratlus kehtib, kui keha liikumise suund ei muutu.

Nihe

Nihe on vektor, mis on tõmmatud keha (masspunkti) algasendist lõppasendisse.

Ühtlane liikumine

Ühtlasel liikumisel läbib keha (masspunkt) mis tahes võrdsetes ajavahemikes võrdsed teepikkused.

Kiirus

Kiirus on ajaühikus läbitud teepikkus. Ühtlasel liikumisel

$$v = \frac{s}{t}. \qquad (3)$$

Ühtlasel liikumisel on kiirus ajas jääv suurus.

Keskmine kiirus

Mitteühtlase liikumise keskmine kiirus on niisuguse ühtlase liikumise kiirus, mille korral masspunkt läbib sama teepikkuse sama aja jooksul, kui antud mitteühtlasel liikumisel.

$$v_k = \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1}, \qquad (4)$$

kus s_1 on masspunkti poolt ajahetkeks t_1 läbitud teepikkus;

s_2 - ajahetkeks t_2 läbitud teepikkus. Keskmise kiiruse väärtus oleneb alghetkest t_1 ja ajavahemikust $t_2 - t_1$.

Hetkkiirus

Hetkkiirus on teepikkuse esimene tuletis aja järgi:

$$v = \lim_{t_2 \to t_1} \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt}. \qquad (5)$$

M ä r k u s. Ka sel juhul jääb kiiruse sisuks: kiirus on ajaühikus läbitud teepikkus. Mõista tuleb seda nii: kui keha antud hetkest alates liiguks ühtlaselt (jääva kiirusega), läbiks ta ajaühiku jooksul kiirusega suuruselt võrdse teepikkuse. Analoogiliselt tuleks mõista ka edaspidi muutuvaid suurusi.

Eespool toodud avaldised annavad kiiruse suuruse.

Kiirus vektorina

Kiirus on raadiusvektori esimene tuletis aja järgi:

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \left(\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}, \frac{dz}{dt}\right) = (v_x, v_y, v_z). \qquad (6)$$

Sel juhul kiiruse suurus

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}. \qquad (7)$$

Kiirusvektor sirgliikumisel on trajektoori sihiline, kõverjoonelisel liikumisel - trajektoori puutuja sihiline.

Ühtlaselt muutuv liikumine

Ühtlasel muutuval liikumisel muutub kiirus mis tahes võrdsetes ajavahemikes võrdse suuruse võrra.

Kiirendus

Kiirendus on kiiruse muutus ajaühikus. Ühtlasel muutuval liikumisel

$$a = \frac{v - v_o}{t}, \qquad (8)$$

kus v on kiiruse suurus ajahetkel t;

v_o - ajahetkel $t = 0$.

Ühtlaselt muutuval liikumisel on kiirendus ajas muutumatu.

Keskmine kiirendus

$$a_k = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}, \qquad (9)$$

kus v_1 on kiiruse suurus ajahetkel t_1;

v_2 - ajahetkel t_2.

Keskmise kiirenduse väärtus sõltub alghetkest t_1 ja ajavahemikust $t_2 - t_1$.

Hetkkiirendus

Hetkkiirendus on kiiruse esimene tuletis aja järgi ehk teepikkuse teine tuletis aja järgi:

$$a = \lim_{t_2 \to t_1} \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 s}{dt^2}. \qquad (10)$$

Eeltoodud avaldistes iseloomustab kiirendus kiiruse suuruse muutust. Kõverjoonelisel liikumisel nimetatakse sellist kiirendust tangentsiaalkiirenduseks.

Kiirendus vektorina

Kiirendus on kiirusvektori esimene tuletis aja järgi ehk raadiusvektori teine tuletis aja järgi:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2}. \qquad (11)$$

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \left(\frac{dv_x}{dt}, \frac{dv_y}{dt}, \frac{dv_z}{dt}\right). \qquad (12)$$

$$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = \left(\frac{d^2x}{dt^2}, \frac{d^2y}{dt^2}, \frac{d^2z}{dt^2}\right). \qquad (13)$$

Sirgliikumisel on kiirendusvektor trajektoori sihiline. Kõverjoonelisel liikumisel lahutatakse kiirendusvektor kaheks komponendiks – tangentsiaal- ja normaalkiirenduseks. Kiirendust ennast nimetatakse sel juhul kogukiirenduseks.

Tangentsiaalkiirendus

Tangentsiaalkiirendus näitab kiiruse suuruse muutust ajaühikus. Tema suunaks on trajektoori puutuja suund antud punktis.

$$a_\tau = \frac{d\,|\vec{v}|}{dt} = \frac{dv}{dt}. \tag{14}$$

Normaalkiirendus

Normaalkiirendus iseloomustab kiiruse suuna muutust ajas. Normaalkiirenduse suund on risti trajektoori puutuja suunaga antud punktis, ta on suunatud trajektoori kõverustsentrisse antud punktis.

$$a_n = \frac{v^2}{r}, \tag{15}$$

kus r on trajektoori kõverusraadius antud punktis.

Kogukiirenduse suurus

$$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}. \tag{16}$$

Teepikkus mis tahes liikumisel

$$s = \int_0^t v\,dt. \tag{17}$$

Juhul kui liikumise suund muutub, annab valem (17) keha kauguse algpunktist mõõdetuna piki trajektoori.

Erijuhud.

Kui $v = \text{const}$ (ühtlane liikumine):

$$s = vt, \tag{18}$$

kui $v = v_0 + at$ (v_0 ja a on ajas jäävad; ühtlaselt muutuv liikumine):

$$s = v_0 t + \frac{at^2}{2}. \tag{19}$$

Kõverjoonelisel liikumisel tuleb valemis (19) a asemel võtta a_τ.

Keha

Keha vaadeldakse mehaanikas masspunktide süsteemina.

Jäik keha

Jäik keha on masspunktide süsteem, milles punktidevahelised kaugused on muutumatud.

Masskese

Masspunktide süsteemi masskese on punkt, mille raadiusvektor on määratud avaldisega

$$\vec{r}_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{n} m_i \vec{r}_i, \tag{20}$$

kus m on süsteemi mass;

n – süsteemi moodustavate masspunktide arv;

m_i – i-nda masspunkti mass;

$\vec{r}_i$ – i-nda masspunkti raadiusvektor.

Keha kulgev liikumine

Keha liigub kulgevalt, kui kõigi tema punktide trajektoorid on ühesugused, s.t. neid võib nihutamisega ühtima panna. Seejuures iga sirge, mis ühendab keha kahte meelevaldset punkti, jääb iseendaga paralleelseks.

DÜNAAMIKA

Newtoni I seadus

Iga keha püsib kas paigal või ühtlases sirgjoonelises liikumises seni, kuni teiste kehade mõju ei sunni teda seda olekut muutma.

Vaba keha

Vaba keha on keha, mis on eemaldatud teistest kehadest sellisele kaugusele, et teiste kehade mõju võib mitte arvestada.

Inerts

Inerts on kehade omadus säilitada oma liikumise olekut, s.o. kiirust nii suunalt kui suuruselt muutumatuna ja avaldada vastupanu selle oleku muutmisele. Keha inertsi mõõduks on tema mass.

Inertsiaalne taustsüsteem

Inertsiaalne taustsüsteem on taustsüsteem, kus kehtib Newtoni I seadus.

Heliotsentriline taustsüsteem

Heliotsentriline taustsüsteem on taustsüsteem, mille koordinaatide alguspunkt asub Päikese keskpunktis, koordinaatteljed aga on suunatud teistele tähtedele.

Galaktiline taustsüsteem

Galaktiline taustsüsteem on taustsüsteem, mille koordinaatide alguspunkt on meie Galaktika, s.o. Linnutee keskpunktis, koordinaatteljed aga on suunatud teistele galaktikatele.

Jõud

Jõuks nimetatakse vektoriaalset suurust, mis on kehale teiste kehade või väljade poolt avaldatava mõju mõõduks.

Jõu mõjusirge

Sirget, mida mööda on suunatud jõu vektor, nimetatakse jõu mõjusirgeks.

Sisejõud

Sisejõud on jõud, mis mõjuvad antud süsteemi kuuluvate kehade (masspunktide) vahel.

Välisjõud

Välisjõud on jõud, mis mõjuvad antud süsteemi kuuluvate kehade (masspunktide) ja süsteemi mittekuuluvate kehade vahel.

Isoleeritud süsteem

Isoleeritud süsteem on süsteem, kus mõjuvad ainult sisejõud (välisjõud ei mõju).

Newtoni II seadus

Kiirendus, millega keha liigub, on võrdeline kehale mõjuva jõuga, pöördvõrdeline keha massiga ja on suunatud jõuga samas suunas.

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \tag{21}$$

Sellisel kujul kehtib seadus masspunkti jaoks ja keha jaoks kulgeval liikumisel.

Masspunktide süsteemi jaoks

$$\vec{a}_c = \frac{\sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i}{m}, \tag{22}$$

kus $\vec{a}_c$ on süsteemi masskeskme kiirendus;
$\vec{F}_i$ – i-ndale masspunktile mõjuv välisjõud;
m – süsteemi mass.

Masspunktide süsteemi liikumise põhivõrrand

$$\frac{d^2\vec{r}_c}{dt^2} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i}{m}, \tag{23}$$

kus $\vec{r}_c$ on süsteemi masskeskme raadiusvektor.

Newtoni III seadus

Jõud, millega kehad teineteist mõjutavad, on suuruselt võrdsed, kuid suunalt vastupidised.

Jõu impulss

Jõu impulss on suurus, mille avaldiseks on jõu ja jõu mõjumise aja korrutis.

$$\vec{J} = \vec{F}t. \tag{24}$$

Valem (24) kehtib, kui jõud on nii suunalt kui suuruselt ajas jääv. Üldjuhul

$$\vec{J} = \int_0^t \vec{F}dt. \tag{25}$$

Impulss

Keha (masspunkti) impulss on suurus, mille avaldiseks on massi ja kiiruse korrutis.

$$\vec{p} = m\vec{v}. \tag{26}$$

Jõu impulss võrdub impulsi muutusega:

$$\vec{J} = \vec{p}_2 - \vec{p}_1 = \Delta\vec{p}. \tag{27}$$

Jõud võrdub impulsi muutumise kiirusega. Jääva jõu korral

$$\vec{F} = \frac{\Delta\vec{p}}{t}. \tag{28}$$

Üldjuhul

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}. \tag{29}$$

Avaldis (29) on ühtlasi Newtoni II seadus üldisemal kujul.

Süsteemi impulss

Süsteemi impulss on kõigi süsteemi kuuluvate kehade (masspunktide) impulsside vektorsumma.

$$\vec{p} = \sum_{i=1}^{n} \vec{p}_i = m\vec{v}_c, \tag{30}$$

kus $\vec{p}_i$ on i-nda keha (masspunkti) impulss;
m - süsteemi mass;
$\vec{v}_c$ - süsteemi masskeskme kiirus.

Impulsi jäävuse seadus

Isoleeritud süsteemi impulss on ajas jääv.

Mitteinertsiaalne taustsüsteem

Mitteinertsiaalne taustsüsteem on taustsüsteem, mis liigub inertsiaalse taustsüsteemi suhtes kiirendusega.

Inertsiaaljõud

Inertsiaaljõud on jõud, mis mõjuvad mitteinertsiaalses taustsüsteemis olevatele kehadele, selle süsteemi kiireneva liikumise tõttu inertsiaalse taustsüsteemi suhtes.

Seosejõud

Seosejõud on jõud, mis tasakaalustavad inertsiaaljõud.

TÖÖ JA ENERGIA

Töö

Töö on skalaarne suurus, mille avaldiseks on jõu rakenduspunkti poolt läbitud teepikkuse ja jõu liikumisesuunalise komponendi korrutis.

$$A = F\, s\, \cos\alpha = \vec{F}\,\vec{s}, \qquad (31)$$

kus α on nurk jõu mõjumise suuna ja liikumise suuna vahel. Avaldis (31) kehtib, kui jõud on nii suunalt kui suuruselt ajas jääv ja tee on sirge.

Töö avaldis üldjuhul, s.t. kui jõud võib nii suuruselt kui suunalt muutuda ja tee olla mis tahes kujuline:

$$A = \int_1^2 \vec{F}\, d\vec{s}. \qquad (32)$$

Rajad on siin tähistatud tinglikult. Integreerida tuleb mööda trajektoori punktist 1 punktini 2.

Võimsus

Võimsus on ajaühiku jooksul sooritatud töö.

$$N = \frac{A}{t}. \tag{33}$$

Valem (33) kehtib, kui tööd tehakse ühtlaselt. Üldjuhul

$$N = \frac{dA}{dt} = \vec{F}\,\vec{v}. \tag{34}$$

Energia

Energia on keha võime teha tööd (töö varu).

Mehaanikas tuntakse kahte liiki energiat: kineetilist ja potentsiaalset.

Kineetiline energia

Kineetiline energia ehk liikumisenergia on energia, mis on määratud keha kiirusega.

$$E_k = \frac{mv^2}{2}. \tag{35}$$

Kui jõud teeb tööd keha kiiruse muutmiseks, siis jõu töö võrdub keha kineetilise energia muutusega.

$$A = E_{k_2} - E_{k_1} = \Delta E_k \tag{36}$$

Masspunktide süsteemi kineetiline energia:

$$E_k = \sum_{i=1}^{n} \frac{m_i v_i^2}{2}. \tag{37}$$

Kui süsteemis mõjuvad nii sise- kui välisjõud, siis läheb nii sise- kui välisjõudude töö süsteemi kineetilise energia muutuseks.

Potentsiaalne energia

Potentsiaalne energia on energia, mis sõltub keha asendist. Potentsiaalset energiat omavad jõuväljades asuvad kehad.

Keha potentsiaalne energia raskusjõu väljas

$$E_p = mgh, \tag{38}$$

kus g on raskuskiirendus;
h – kõrgus valitud nullnivoost.

Nullnivoo valik mehaanikas pole oluline, kuna mehaanilistes protsessides huvitab meid potentsiaalse energia muutus.

Valem (38) on kasutatav ainult väikeste kõrguste korral, nii et g võiksime lugeda sõltumatuks kõrgusest.

Konservatiivsed jõud

Konservatiivsed jõud on jõud, mille töö ei sõltu tee kujust, vaid ainult alg- ja lõppasendist. Konservatiivse jõu töö liikumisel mööda kinnist kõverat (mingist punktist samasse punkti tagasi) võrdub nulliga. Raskusjõud on konservatiivne jõud.

Konservatiivne süsteem

Konservatiivne süsteem on süsteem, kus mõjuvad ainult konservatiivsed jõud.

Mehaaniline energia

Keha mehaaniline energia on tema kineetilise ja potentsiaalse energia summa.

Energia jäävuse seadus mehaanikas

Konservatiivses süsteemis on keha mehaaniline energia jääv suurus.

Dissipatiivne süsteem

Dissipatiivne süsteem on süsteem, milles mehaaniline energia hõõrdumise või teiste protsesside tagajärjel muundub siseenergiaks.

Energia jäävuse ja muundumise seadus

Energia ei teki ega kao. Ta vaid muundub ühest liigist teise.

Energia ühest liigist teise muundumise viisiks ja mõõduks on töö.

PÕRKED

Põrkejoon

Põrkejoon on sirge, mis läbib kehade kokkupuutepunkti ja on risti kokkupuutepinnaga.

Tsentraalne põrge

Kahe keha põrge on tsentraalne, kui põrkejoon läbib põrkuvate kehade masskeskmeid.

Mitteelastne põrge

Põrkel läheb osa kineetilist energiat üle siseenergiaks. Mitteelastsel põrkel liiguvad kehad pärast põrget koos (ühesuguse kiirusega).

Lõppkiirus pärast mitteelastset tsentraalset põrget

$$v = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}, \tag{39}$$

kus m_1 ja v_1 on esimese keha mass ja kiirus enne põrget;
m_2 ja v_2 – teise keha mass ja kiirus enne põrget.

Elastne põrge

Elastsel põrkel on põrkuvate kehade kineetiliste energiate summa jääv. Põrke esimeses faasis läheb osa kineetilist energiat üle potentsiaalseks elastsusenergiaks, teises faasis (taastumise faasis) muundub potentsiaalne elastsusenergia täielikult kineetiliseks energiaks.

Põrkuvate kehade kiirused pärast elastset tsentraalset põrget:

$$v_1' = \frac{2m_2 v_2 + (m_1 - m_2)v_1}{m_1 + m_2}, \tag{40}$$

$$v_2' = \frac{2m_1v_1 + (m_2 - m_1)v_2}{m_1 + m_2}. \tag{41}$$

GRAVITATSIOONIVÄLI

Füüsikaline jõuväli

Füüsikaline jõuväli on ruumipiirkond, kus kehadele mõjuvad jõud.

Mateeria võib eksisteerida aine või välja vormis, kusjuures ta võib üle minna ühest vormist teise. Eriti sagedased on niisugused üleminekud elementaarosakeste maailmas.

Kui kehad pole kontaktis, siis toimub kehade vastastikune mõjutamine alati väljade kaudu: üks keha tekitab enda ümber välja, selles väljas mõjub teisele kehale jõud.

Kõik väljad levivad lõpliku kiirusega $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.

Tsentraaljõudude väli

Tsentraaljõudude väljas on täidetud kaks tingimust: 1) kõigile väljas asuvatele kehadele mõjuvate jõudude mõjusirged läbivad ühte punkti - välja tekitava keha keskpunkti (välja tsentrit); 2) väljas asuvale kehale mõjuva jõu suurus sõltub ainult kaugusest välja tsentrini.

Gravitatsiooniväli ja punktlaengu elektriväli on tsentraalsed väljad.

Gravitatsioonivälja tekitajaks on keha mass.

Potentsiaalne väli

Potentsiaalseks nimetatakse konservatiivsete ehk potentsiaalsete jõudude välja.

Gravitatsiooniväli on potentsiaalne väli.

Keha potentsiaalne energia gravitatsiooniväljas

Keha potentsiaalset energiat gravitatsiooniväljas mõõdetakse tööga, mida teevad väljajõud keha väljaviimisel väljast (lõpmata kaugesse punkti).

Keha potentsiaalne energia gravitatsiooniväljas on negatiivne, maksimaalset väärtust (null) omab ta lõpmata kaugel välja tekitavast kehast.

$$E_p = -\gamma \frac{mm'}{r}, \qquad (42)$$

kus γ on gravitatsioonikonstant;

m ja m' – välja tekitava ja väljas asuva keha mass;

r – kaugus välja tsentrist (välja tekitavast kehast) väljas asuva kehani.

Väljajõudude töö keha liikumisel potentsiaalses jõuväljas ühest punktist teise võrdub keha potentsiaalse energia vastasmärgilise muutusega:

$$A = E_{p_1} - E_{p_2} = -\Delta E_p. \qquad (43)$$

Vastastikuses mõjutuses olevate masspunktide süsteemi potentsiaalne energia

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_{i \neq k} E_{ik}, \qquad (44)$$

kus E_{ik} on i-nda ja k-nda masspunkti vastastikuse mõju potentsiaalne energia.

Jõu ja potentsiaalse energia vaheline seos potentsiaalses jõuväljas

$$\vec{F} = -\operatorname{grad} E_p = -\left(\frac{\partial E_p}{\partial x}, \frac{\partial E_p}{\partial y}, \frac{\partial E_p}{\partial z}\right). \qquad (45)$$

Jõud võrdub potentsiaalse energia vastasmärgilise gradiendiga.

Gradient

Gradient näitab suuruse muutust pikkusühiku kohta (ruumilise muutumise kiirust) suunas, kus selle muutumise kiirus on maksimaalne.

Potentsiaali auk

Keha asub potentsiaali augus, kui tema mehaaniline energia on negatiivne. Potentsiaali augus asuv keha saab liikuda väljas vaid teatava kauguseni välja tsentrist (kus tema kineetiline energia saab võrdseks nulliga ning mehaaniline energia võrdseks potentsiaalsega). Keha võib liikuda vaid piirkonnas, kus $E_k \geqslant 0$ ja mehaaniline energia $E \geqslant E_p$. Selleks et keha saaks väljuda potentsiaali august, tuleb talle kineetilist energiat juurde vähemalt nii palju, et tema mehaaniline energia saaks võrdseks nulliga.

PÖÖRDLIIKUMINE

Pöörlemisperiood

Pöörlemisperiood on ühe täispöörde tegemiseks kulunud aeg.

Pöörlemissagedus

Pöörlemissagedus on ajaühiku jooksul sooritatud täispöörete arv.

Seos pöörlemissageduse ja perioodi vahel

$$f = \frac{1}{T}. \tag{46}$$

Seos joonkiiruse, perioodi ja sageduse vahel

$$v = \frac{2\pi r}{T} = 2\pi r f, \tag{47}$$

kus r on pöörlemisraadius.

Nurkkiirus

Nurkkiirus on pöörlemistsentrit pöörleva kehaga (masspunktiga) ühendava raadiusvektori poolt ajaühikus sooritatud pöördenurk.

Ühtlasel pöörlemisel

$$\omega = \frac{\alpha}{t}. \tag{48}$$

Mitteühtlasel pöörlemisel

$$\omega = \frac{d\alpha}{dt}. \tag{49}$$

<u>Nurkkiirus vektorina</u>

Nurkkiiruse vektori siht on risti pöörlemistasandiga, suund seotakse pöörlemise suunaga parema käe kruvi reegli abil.

<u>Seos joonkiiruse ja nurkkiiruse vahel</u>

Suuruste vahel:

$$v = \omega r. \tag{50}$$

Vektorite vahel:

$$\vec{v} = \vec{\omega} \times \vec{r}. \tag{51}$$

<u>Nurkkiirendus</u>

Nurkkiirendus on nurkkiiruse muutus ajaühikus.
Ühtlaselt muutuval pöörlemisel

$$\varepsilon = \frac{\omega - \omega_0}{t}, \tag{52}$$

kus ω_0 on nurkkiirus ajahetkel $t = 0$;
ω – ajahetkel t.

Üldjuhul

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}. \tag{53}$$

<u>Nurkkii~~ruse~~enduse vektori suund</u>

Kiireneval pöörlemisel on nurkkiirenduse vektor samasuunaline nurkkiiruse vektoriga, aeglustuval pöörlemisel – vastassuunaline.

<u>Seos tangentsiaalkiirenduse ja nurkkiirenduse vahel</u>

Suuruste vahel:

$$a_\tau = \varepsilon r. \tag{54}$$

Vektorite vahel:

$$\vec{a}_\tau = \vec{\varepsilon} \times \vec{r}. \qquad (55)$$

Absoluutselt jäiga keha pöörlemine ümber liikumatu telje

Kui kõigi keha punktide trajektoorid on ringid, mille keskpunktid asuvad ühel sirgel, siis keha pöörleb. Seda sirget nimetatakse pöörlemisteljeks. Jäiga keha kõikide masspunktide nurkkiirused samal hetkel on ühesugused.

Jõumoment

Jõumoment on jõu ja jõu õla korrutis. Jõu õlg on kaugus pöörlemisteljest jõu mõjusirgeni.

$$M = F\, l. \qquad (56)$$

Vektorina

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}, \qquad (57)$$

kus $\vec{r}$ on pöörlemisteljest risti teljega jõu rakenduspunktini tõmmatud vektor.

Inertsimoment

Inertsimoment on keha inertsi mõõduks pöördliikumisel.

$$I = \sum_{i=1}^{n} m_i r_i^2, \qquad (58)$$

kus r_i on i-nda masspunkti pöörlemisraadius;
m_i – selle masspunkti mass;
n – keha moodustavate masspunktide arv.

Keha inertsimoment oleneb pöörlemistelje asendist keha suhtes, keha massist ja selle jaotusest.

Pöörleva keha kineetiline energia

$$E_k = \frac{I\omega^2}{2}. \qquad (59)$$

Dünaamika II seadus pöördliikumisel

$$\vec{M} = I\vec{\varepsilon}. \tag{60}$$

Impulsimoment

Masspunkti jaoks:

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}, \tag{61}$$

kur $\vec{r}$ on pöörlemisteljest risti teljega masspunktini tõmmatud raadiusvektor;

$\vec{p}$ - masspunkti impulss.

Nii masspunkti kui keha jaoks:

$$\vec{L} = I\vec{\omega}, \tag{62}$$

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}. \tag{63}$$

Impulsimomendi jäävuse seadus

Isoleeritud süsteemi impulsimoment on ajas jääv.

Kulgevat liikumist ja pöördliikumist iseloomustavate suuruste ja valemite analoogia

Kulgev liikumine		Pöörd-liikumine	
Teepikkus	s	Poordenurk	α
Mass	m	Inertsimoment	I
Kiirus	$\vec{v}$	Nurkkiirus	$\vec{\omega}$
Kiirendus	$\vec{a}$	Nurkkiirendus	$\vec{\varepsilon}$
Jõud	$\vec{F}$	Jõu moment	$\vec{M}$
Impulss	$\vec{p} = m\vec{v}$	Impulsimoment	$\vec{L} = I\vec{\omega}$
Dünaamika II seadus	$\vec{F} = m\vec{a}$		$\vec{M} = I\vec{\varepsilon}$
Kineetiline energia	$E_k = \frac{mv^2}{2}$		$E_k = \frac{I\omega^2}{2}$
Teepikkus ühtlasel liikumisel	$s = vt$	Pöördenurk ühtlasel pöörlemisel	$\alpha = \omega t$

Kiirus ühtlaselt muutuval liikumisel $v = v_0 + at$	Nurkkiirus ühtlaselt muutuval pöörlemisel $\omega = \omega_0 + \varepsilon t$
Teepikkus ühtlaselt muutuval liikumisel $s = v_0 t + \frac{at^2}{2}$	Pöördenurk ühtlaselt muutuval pöörlemisel $\alpha = \omega_0 t + \frac{\varepsilon t^2}{2}$
Töö (lihtsaimal erijuhul) $A = F s$	$A = M \alpha$
Võimsus $N = \vec{F}\,\vec{v}$	$N = \vec{M}\,\vec{\omega}$

VEDELIKE JA GAASIDE MEHAANIKA

Rõhk

Rõhk on pinnaühikule risti pinnaga mõjuv jõud.

Rõhk paigalolevas vedelikus (gaasis)

$$p_0 = p + \rho g h, \tag{64}$$

kus p on välisrõhk;
ρ - vedeliku tihedus;
h - sügavus.

Kokkusurumatu vedeliku (gaasi) voolamise pidevuse võrrand

$$v\,S = \text{const}, \tag{65}$$

kus v ja S on voolu kiirus ja voolutoru ristlõikepindala toru mis tahes kohas.

Voolujooned

Voolujooned on kujuteldavad jooned, mida kasutatakse voolamise graafiliseks kujutamiseks. Voolujooned ehitatakse välja nii, et nende pildiga oleks antud voolu kiirus igas vooluruumi punktis. Kiiruse suurus võrdub voolujoonte tihedusega. Voolujoonte tihedus on voolujoonte arv läbi pindala ühiku, mis on risti voolujoontega. Kiiruse suund ühtib voolujoone puutuja suunaga antud punktis.

Statsionaarne voolamine

Statsionaarsel voolamisel on voolujoonte pilt ajas jääv. Sisuliselt tähendab see, et mis tahes kindlas vooluruumi punktis voolu kiirus ei sõltu ajast.

Ideaalne vedelik

Ideaalne vedelik on selline vedelik, millel puudub sisehõõrdumine ja mis on kokkusurumatu.

Rõhu potentsiaalne energia

$$E_p = pV, \tag{66}$$

kus p on vedelikule mõjuv välisrõhk (hüdrostaatiline rõhk);
V - vedeliku ruumala.

Bernoulli võrrand

$$p_o = \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh + p = \text{const}, \tag{67}$$

kus p_o on koguröhk antud kohas; koguröhk mõjub voolu suunas;
ρ - vedeliku tihedus;
v - voolu kiirus antud kohas;
$\frac{1}{2}\rho v^2$ - hüdrodünaamiline rõhk; mõjub voolu suunas;
h - kõrgus vabalt valitud nullnivoost;
ρgh - kõrgusest tingitud rõhk; mõjub igas suunas;
p - hüdrostaatiline rõhk, tingitud välissurvest; mõjub kõigis suundades.

Bernoulli võrrandi sisu: koguröhk ideaalse vedeliku voolamisel on kõigis vooluruumi punktides ühesugune.

Erijuht: horisontaalne voolutoru.

$$p_o = \frac{1}{2}\rho v^2 + p = \text{const}, \tag{68}$$

millest järeldub, et voolu kiiruse kasvades hüdrostaatiline rõhk väheneb ja vastupidi.

Torricelli valem annab ideaalse vedeliku väljavoolukiiruse väikesest (võrreldes anuma ristlõikega) avast anuma seinas või põhjas:

$$v = \sqrt{2gh}, \qquad (69)$$

kus h on ava sügavus vedeliku pinnast.

Sisehõõrdejõud

Sisehõõrdejõud on jõud, mis takistab kokkupuutuvate vedelikukihtide nihkumist teineteise suhtes. Sisehõõrdejõu annab Newtoni valem:

$$F = \eta S \frac{dv}{dx}, \qquad (70)$$

kus η on antud vedeliku sisehõõrdetegur (viskoossus);

S - kokkupuutuvate vedelikukihtide pindala;

$\frac{dv}{dx}$ - voolu kiiruse gradient, kiiruse muutus pikkusühiku kohta voolu suunaga ristiolevas suunas.

Sisehõõrdetegur (viskoossus)

Sisehõõrdetegur võrdub sisehõõrdejõuga, mis mõjub hõõrduvate vedeliku kihtide pindalaühikule, kui pikkusühiku kaugusel asuvate kihtide kiirused erinevad kiiruse ühiku võrra.

VÕNKUMISED JA LAINED

Võnkumised

Võnkumised on perioodiline protsess, võnkumistel muutub alati mingisugune suurus ajas perioodiliselt. Võnkumistele on iseloomulik tasakaaluasendi olemasolu. Võnkuv keha läbib perioodiliselt tasakaaluasendit. Võnkuv keha asub potentsiaali augus.

Vabad võnkumised

Vabad võnkumised on võnkumised, mis toimuvad süsteemides, mis on jäetud omaette pärast seda, kui süsteem on saanud tõuke või viidud tasakaaluasendist välja.

Harmoonilised võnkumised

Harmoonilised võnkumised on võnkumised, mille korral võnkuv suurus sõltub ajast sinusoidaalselt või koosinusoidaalselt.

Kvaasielastsusjõud

Kvaasielastsusjõud on jõud, mille suurus on võrdeline keha kaugusega tasakaaluasendist ja mis on alati suunatud tasakaaluasendi poole.

$$f = -kx, \qquad (71)$$

kus k on võrdetegur (vedrupendli korral - vedru jäikus, näitab, millist jõudu on vaja, et deformeerida vedru pikkusühiku võrra);

x - kaugus tasakaaluasendist.

Harmooniliste võnkumiste diferentsiaalvõrrand

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_o^2 x = 0, \qquad (72)$$

kus t on aeg;

$\omega_o^2 = \frac{k}{m}$ (m on võnkuva keha mass).

Selle võrrandi lahend annab hälbe (kauguse tasakaaluasendist) sõltuvuse ajast:

$$x = a \cos(\omega_o t + \alpha), \qquad (73)$$

kus a on amplituud - maksimaalne hälve;

$\omega_o t + \alpha$ - võnkefaas;

α - algfaas - faas ajahetkel $t = 0$.

Periood

Periood on ajavahemik ühe täisvõnke sooritamiseks.

Sagedus

Sagedus on täisvõngete arv ajaühikus.

Seos sageduse ja perioodi vahel

$$\nu = \frac{1}{T}. \tag{74}$$

Ring- ehk nurksagedus

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}. \tag{75}$$

Omavõnkesagedus

Omavõnkesagedus on süsteemi vabade võnkumiste sagedus, juhul kui takistusjõud puuduvad. Valemis (72) on ω_0 süsteemi omavõnkeringsagedus.

Harmooniliselt võnkuva keha kiirus

$$v = \frac{dx}{dt} = -a\omega_0 \sin(\omega_0 t + \alpha) = a\omega_0 \cos(\omega_0 t + \alpha + \frac{\pi}{2}). \tag{76}$$

Kiirus on faasilt hälbest $\frac{\pi}{2}$ võrra ees.

Harmooniliselt võnkuva keha kiirendus

$$w = \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{dv}{dt} = -a\omega_0^2\cos(\omega_0 t + \alpha) = a\omega_0^2\cos(\omega_0 t + \alpha + \pi). \tag{77}$$

Kiirendus on faasilt hälbest π ja kiirusest $\frac{\pi}{2}$ võrra ees.

Amplituud ja algfaas valemis (72) on määratud algtingimustega:

$$a = \sqrt{x_0^2 + \frac{v_0^2}{\omega_0^2}}, \tag{78}$$

$$\tan \alpha = -\frac{v_0}{x_0\omega_0}, \tag{79}$$

kus x_0 on alghälve, hälve ajahetkel $t = 0$;
v_0 – algkiirus.

Harmoonilise võnkliikumise energia

Harmooniliselt võnkuv keha omab nii potentsiaalset kui ka kineetilist energiat.

Potentsiaalne energia

$$E_p = \frac{kx^2}{2} = \frac{ka^2}{2}\cos^2(\omega_0 t + \alpha). \tag{80}$$

Kineetiline energia

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{ma^2\omega_0^2}{2}\sin^2(\omega_0 t + \alpha). \tag{81}$$

Kogu mehaaniline energia

$$E = E_p + E_k = \frac{ka^2}{2} = \frac{ma^2\omega_0^2}{2}. \tag{82}$$

Kineetiline ja potentsiaalne energia muutuvad ringsagedusega $2\omega_0$.

Matemaatiline pendel

Matemaatiline pendel on kaalutu ja venimatu niidi otsa riputatud masspunkt. Reaalselt võib matemaatiliseks pendliks lugeda pika peenikese niidi otsa riputatud väikest (võrreldes niidi pikkusega) rasket (suure erikaaluga) keha.

Matemaatilise pendli väikesed (väikese amplituudiga) vabad võnkumised on harmoonilised. Nende võnkumiste omavõnkeperiood

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}, \tag{83}$$

kus l on pendli pikkus;
g – raskuskiirendus.

Füüsikaline pendel

Füüsikaline pendel on mis tahes keha, mis on kinnitatud ühes punktis ja võib selle punkti ümber võnkuda (kinnituspunkt ei tohi ühtida masskeskmega).

Ka füüsikalise pendli väikesed võnkumised on harmoonilised võnkumised. Nende võnkumiste omavõnkeperiood

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{mgl}}, \tag{84}$$

kus I on inertsimoment kinnituspunkti läbiva telje suhtes, mis on risti võnketasandiga;

m – pendli mass;

l – kaugus kinnituspunkti ja pendli masskeskme vahel.

<u>Füüsikalise pendli taandatud pikkus</u>

Füüsikalise pendli taandatud pikkus on niisuguse matemaatilise pendli pikkus, mille võnkeperiood ühtib antud füüsikalise pendli võnkeperioodiga.

$$l' = \frac{I}{ml}. \qquad (85)$$

Füüsikalise pendli võnkeperiood taandatud pikkuse kaudu:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l'}{g}}. \qquad (86)$$

<u>Kahe samasihilise ühesuguse sagedusega harmoonilise võnkumise</u>

$$x_1 = a_1 \cos(\omega t + \alpha_1), \qquad (87)$$

$$x_2 = a_2 \cos(\omega t + \alpha_2)$$

<u>liitmisel</u> saame tulemuseks sama sagedusega harmoonilised võnkumised:

$$x = a \cos(\omega t + \alpha), \qquad (88)$$

kus $a = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1)}$, (89)

$$\tan\alpha = \frac{a_1\sin\alpha_1 + a_2 \sin\alpha_2}{a_1\cos\alpha_1 + a_2 \cos\alpha_2}. \qquad (90)$$

Erijuhud:

1) $\alpha_2 - \alpha_1 = 2\pi k, \qquad k = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots,$

sel juhul $a = a_1 + a_2$, s.t. võnkumised tugevdavad teineteist maksimaalselt;

2) $\alpha_2 - \alpha_1 = \pi(2k + 1), \ k = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots,$

sel juhul $a = |a_1 - a_2|$, s.t. võnkumised nõrgendavad teineteist maksimaalselt (kui $a_1 = a_2$, siis $a = 0$).

Kahe samasihilise erineva sagedusega võnkumise liitmisel on tulemuseks mitteharmoonilised võnkumised.

Igasugust võnkumist võib vaadelda harmooniliste võnkumiste summana.

Tuiklemine

Tuiklemine tekib kahe samasihilise harmoonilise võnkumise

$$x_1 = a \cos \omega t, \qquad (91)$$
$$x_2 = a \cos(\omega + \Delta\omega)t$$

liitmisel, mille sagedused erinevad vähe ($\Delta\omega << \omega$). Tulemuseks on võnkumised:

$$x = (2a \cos \frac{\Delta\omega}{2} t) \cos \omega t. \qquad (92)$$

Neid võnkumisi võib vaadelda harmooniliste võnkumistena, mille amplituud $|2a \cos \frac{\Delta\omega}{2} t|$ muutub ajas sagedusega $\frac{\Delta\omega}{2}$.

Kahest ristsihilisest sama sagedusega harmoonilisest võnkumisest

$$x = a \cos \omega t, \qquad (93)$$
$$y = b \cos(\omega t + \alpha)$$

osa võttev punkt liigub mööda ellipsit:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{2xy}{ab} \cos \alpha = \sin^2 \alpha. \qquad (94)$$

Erijuhud:

1) $\alpha = 0$, trajektooriks on sirge

$$y = \frac{b}{a} x, \qquad (95)$$

mida mööda punkt võngub harmooniliselt ringsagedusega ω;

2) $\alpha = \pm \pi$, trajektooriks on sirge

$$y = -\frac{b}{a} x; \qquad (96)$$

3) $\alpha = \pm \frac{\pi}{2}$, trajektooriks on ellips, mille teljed ühtivad koordinaattelgedega

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1. \tag{97}$$

Kui $a = b$, on trajektooriks ring. Seega – ringliikumine on esitatav kahe ristsihilise võnkumise summana.

Kui liituvad kaks ristsihilist harmoonilist võnkumist, mille sagedused erinevad vähe, on tulemuseks ajas aeglaselt deformeeruv ellips.

Lissajous' kujundid

Lissajous' kujundid tekivad kahe ristsihilise erineva sagedusega harmoonilise võnkumise liitumisel. Üldjuhul on Lissajous' kujundid üsna keerukad kõverad. Kui suhe $\frac{\omega_1}{\omega_2}$ on ratsionaalne murd, saame x- ja y-telje suhtes sümmeetrilised kõverad. Kõverad on seda keerukamad, mida lähedasem on $\frac{\omega_1}{\omega_2}$ ühele.

Sumbuvad võnkumised

Sumbuvad võnkumised on reaalsete võnkesüsteemide vabad võnkumised. Takistusjõudude tõttu võnkeamplituud ajas väheneb ja võnkumised sumbuvad.

Sumbuvate võnkumiste diferentsiaalvõrrand

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta\frac{dx}{dt} + \omega_o^2 x = 0, \tag{98}$$

kus β on sumbetegur;
ω_o – süsteemi omavõnkesagedus.

Selle võrrandi lahend, juhul kui $\omega_o > \beta$, on järgmine:

$$x = a_o e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha), \tag{99}$$

kus a_0 on amplituud, taandatuna alghetkele;

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}. \qquad (100)$$

Neid võnkumisi võib vaadelda harmooniliste võnkumistena, mille amplituud kahaneb ajas eksponentsiaalselt:

$$a = a_0 e^{-\beta t}. \qquad (101)$$

Logaritmiline sumbedekrement

Logaritmiline sumbedekrement on kahe teineteisele järgneva amplituudi (mida ajaliselt lahutab periood) suhte naturaallogaritm:

$$\lambda = \ln \frac{a_0 e^{-\beta t}}{a_0 e^{-\beta(t + T)}} = \beta T. \qquad (102)$$

Sundvõnkumised

Sundvõnkumised toimuvad võnkesüsteemides välise perioodiliselt muutuva jõu mõjul.

Kui sundiv jõud muutub harmooniliselt

$$f = F_0 \cos \omega t, \qquad (103)$$

siis on sundvõnkumiste diferentsiaalvõrrand

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta\frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = f_0 \cos \omega t, \qquad (104)$$

kus $f_0 = \frac{F_0}{m}$.

Selle võrrandi erilahend, mis esitab nn. korraldunud võnkumisi, on järgmine:

$$x = a \cos (\omega t + \alpha), \qquad (105)$$

kus $$a = \frac{f_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}}, \qquad (106)$$

$$\tan \alpha = - \frac{2 \beta \omega}{\omega_0^2 - \omega^2} . \qquad (107)$$

Seega sundvõnkumised on harmoonilised võnkumised (kui sundiv jõud muutub harmooniliselt), mis toimuvad sundiva jõu sagedusega.

Resonants

Resonantsi nähtus seisneb selles, et sundiva jõu sageduse muutumisel sundvõnkumiste amplituud saavutab teatava sageduse, nn. resonantssageduse korral maksimaalse väärtuse.

Resonantssagedus on antud võnkesüsteemi iseloomustav suurus:

$$\omega_{res} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2} . \qquad (108)$$

Resonantsi korral mõjub sundiv jõud alati liikumise suunas, seega on tema töö maksimaalne ja süsteem saab väljastpoolt maksimaalset energiat.

Laine

Laineks nimetatakse võnkumiste levimist keskkonnas.

Võnkumiste levimiseks keskkonnas on määravad kaks tingimust: 1) keskkonna osakeste omavaheline seos (elastsusjõud), 2) osakeste inerts, mille tõttu iga järgnev osake jääb eelmisest faasilt maha.

Pikilained

Pikilained on lained, milles osakeste võnkumine toimub laine levimise sihis. Pikilained võivad levida nn. ruumelastsetes keskkondades, s.t. keskkondades, mis avaldavad vastupanu ruumala muutusele. Ruumelastsed on kõik keskkonnad, seega võivad pikilained levida nii gaasilistes, vedelates kui tahketes keskkondades. Pikilaines levivad keskkonna tihendused ja hõrendused.

Ristlained

Ristlained on lained, milles osakeste võnkumine toimub risti laine levimise suunaga. Ristlained võivad levida nn. kujuelastsetes keskkondades, s.t. keskkondades, mis avaldavad vastupanu kuju muutusele. Kujuelastne on ainult tahke keskkond. Ristlaines levivad laine harjad ja põhjad.

Lainepikkus

Lainepikkus on vähim kaugus keha samas faasis võnkuva osakese vahel.

Perioodi vältel levib jääv faas edasi lainepikkuse võrra.

Faasikiirus

Faasikiirus on kiirus, millega levib laines jääv faas.

Seos faasikiiruse, lainepikkuse ja perioodi (sageduse) vahel:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda\nu \, . \qquad (109)$$

Laine front

Laine front on nende punktide geomeetriline koht, milleni on võnkumised jõudnud antud hetkeks. Laine front on lahutuspinnaks lainetuse poolt haaratud keskkonna osa ja selle osa vahel, kus laineid veel ei ole.

Lainepind

Lainepind on ühesuguses faasis võnkuvate osakeste geomeetriline koht. Lainepinna võib panna läbi iga punkti, kus on lainetus. Seega on lainepindu lõpmata palju (laine fronte on üks).

Tasalaine

Tasalaine on laine, mille lainepinnad on omavähel paralleelsed tasandid.

Keralaine

Keralaine on laine, mille lainepinnad on kontsentrilised kerapinnad. Nende kerapindade keskpunktis asub laine-allikas. Keralainetena võib vaadelda mis tahes allika poolt kiiratud laineid kaugusel, mis on palju suurem allika mõõtmetest.

Lainevõrrand

Lainevõrrand on avaldis, mis annab võnkuva osakese hälbe funktsioonina koordinaatidest ja ajast:

$$h = f(x, y, z, t).$$

Funktsioon peab olema perioodiline nii ajas kui ruumis, sest laine on protsess, mis on perioodiline nii ajas kui ruumis. Laine ruumiliseks "perioodiks" on lainepikkus.

x-telje positiivses suunas leviva tasalaine võrrand

$$h = a \cos \omega \left(t - \frac{x}{v}\right) = a \cos(\omega t - kx), \qquad (110)$$

kus a on amplituud;
ω – ringsagedus;
v – lainete faasikiirus;
k – lainearv, $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{vT} = \frac{\omega}{v}$.

x-telje negatiivses suunas leviva tasalaine võrrand

$$h = a \cos \omega \left(t + \frac{x}{v}\right) = a \cos(\omega t + kx). \qquad (111)$$

Meelevaldses suunas leviva tasalaine võrrand

$$h = a \cos(\omega t - \vec{k}\,\vec{r}), \qquad (112)$$

kus $\vec{k}$ on lainevektor, tema suuruseks on lainearv, suunaks – laine levimise suund;
$\vec{r}$ – vaadeldava punkti raadiusvektor.

Keralaine võrrand

$$h = \frac{a}{r} \cos \omega \left(t - \frac{r}{v}\right) = \frac{a}{r} \cos(\omega t - kr), \qquad (113)$$

kus a on amplituud pikkusühiku kaugusel laineallikast;

r – vaadeldava punkti kaugus laineallikast.

Võrrand kehtib laineallikast küllalt kaugel asuva punkti jaoks, sest kui $r \to 0$, siis $h \to \infty$.

Lainete diferentsiaalvõrrand

Iga lainevõrrand (mis sisuliselt on funktsioon) on mingi diferentsiaalvõrrandi lahend. Seda diferentsiaalvõrrandit nimetatakse ka lainete diferentsiaalvõrrandiks. Lainete diferentsiaalvõrrand:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 h}{\partial t^2} . \qquad (114)$$

Iga funktsioon, mis rahuldab seda võrrandit, kirjeldab mingit lainet. Olenevalt lisatingimustest, saame ühe või teise konkreetse laine.

Superpositsiooni printsiip

Kui keskkonnas levib mitu lainet, siis keskkonna osakeste võnkumisi võib vaadelda nende võnkumiste summana, mida sooritaksid osakesed, kui iga laine leviks eraldi. Lühidalt: lained kohtudes lihtsalt liituvad, häirimata teineteist. Superpositsiooniprintsiip kehtib ainult harmooniliste lainete jaoks.

Koherentsed laineallikad

Koherentsed on laineallikad, mis võnguvad ühesuguse sagedusega, ühes ja samas sihis ja samas faasis või jääva faaside vahega. Koherentsed laineallikad väljastavad koherentseid laineid. Kahe koherentse laine kohtumisel on lainete faasivahe kindlas punktis ajas jääv.

Interferents

Interferentsi nähtus tekib koherentsete lainete liitumisel, ta seisneb selles, et ühtedes punktides lained liitumisel tugevdavad üksteist maksimaalselt (interferentsi maksimumid), teistes punktides nõrgendavad maksimaalselt (interferentsi miinimumid). Erinevalt mittekoherentsete lainete liitumisest on koherentsete lainete liitumisel tekkinud maksimumide ja miinimumide pilt ajas jääv.

Maksimumide ja miinimumide tingimus interferentsil

Interferentsi maksimumid tekivad punktides, kus kohtuvate lainete faasivahe

$$\Delta\varphi = \pm 2\pi n, \tag{115}$$

kus $n = 0, 1, 2, \ldots$,
ehk käiguvahe (kauguste erinevus laineallikatest vaadeldava punktini)

$$\Delta = \pm n\lambda . \tag{116}$$

Miinimumid tekivad punktides, kus

$$\Delta\varphi = \pm \pi(2n + 1) \tag{117}$$

ehk

$$\Delta = \pm(2n + 1)\frac{\lambda}{2}. \tag{118}$$

Difraktsioon

Difraktsioon on lainete paindumine tõkete taha (nn. geomeetrilise varju piirkonda). Difraktsioon on kõigi lainete üldine omadus.

Difraktsioon on seda täielikum, mida väiksemad on tõkke (ava)mõõtmed.

Huygensi printsiip

Huygensi printsiip võimaldab leida lainefrondi ajahetkel $t + \Delta t$, kui on teada lainefront ajahetkel t. Huygensi printsiibi järgi võib iga lainefrondi punkti vaadelda uute keralainete (isotroopse homogeense keskkonna korral) allikana. Uus lainefront on nende keralainete frontide mähispind.

Kui ava mõõtmed on lainepikkusest väiksemad, võib ava vaadata ühe keralainete allikana, s.t. difraktsioon on sel juhul täielik.

Seisvad lained

Seisvad lained on interferentsi erijuht. Nad tekivad, kui kohtuvad kaks vastassuunas levivat sama amplituudiga ja lainepikkusega lainet.

Seisva laine võrrand (kui lained levivad x-telje sihis)

$$h = (2a \cos 2\pi\frac{x}{\lambda})\cos\omega t. \qquad (119)$$

Amplituud seisva laine antud punktis:

$$A = |2a \cos 2\pi\frac{x}{\lambda}|. \qquad (120)$$

Seisva laine hari

Seisva laine hari on punkt, kus seisva laine amplituud on maksimaalne ($A = 2a$), harjade koordinaadid

$$x_h = \pm n \frac{\lambda}{2} (n = 0,1,2, \ldots). \qquad (121)$$

Seisva laine sõlm

Seisva laine sõlm on punkt, kus amplituud on null, sõlmede koordinaadid

$$x_s = \pm(2n + 1) \frac{\lambda}{2} \ (n = 0,1,2, \ldots). \qquad (122)$$

Naaberharjade vaheline kaugus on $\lambda/2$, naabersõlmede vaheline kaugus on samuti $\lambda/2$, sõlme ja harja vaheline vähim kaugus on $\lambda/4$.

Naabersõlmede vahelised punktid võnguvad samas faasis, sõlmest läbi minnes muutub faas vastupidiseks (faasi muutus on π).

Praktiliselt tekivad seisvad lained kahe erineva keskkonna lahutuspinnale langenud laine ja sellelt lahutuspinnalt peegeldunud laine interfereerumisel. Kui laine peegeldub tihedamalt keskkonnalt, tekib peegeldumispunktis sõlm (peegeldumisel muutub faas π võrra ehk peegeldumine toimub pool-laine kaotusega). Laine peegeldumisel hõredamalt (väiksema tihedusega) keskkonnalt tekib peegelduspunktis hari (faasimuutust ja poollaine kaotust ei esine).

Grupikiirus

Reaalsed lained pole kunagi täpselt harmoonilised, kuid iga reaalset lainet võib vaadelda harmooniliste lainete summana (nii nagu igasugust võnkumist saab esitada harmooniliste võnkumiste summana). Grupikiirus on kiirus, millega levib nende harmooniliste lainete liitumisel tekkinud maksimum (see on reaalse laine amplituud). Grupikiirusega kandub laines edasi energia.

Grupikiirus

$$u = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}, \tag{123}$$

kus v on faasikiirus antud lainepikkuse λ korral.

Dispersioon

Dispersioon on lainete faasikiiruse sõltuvus lainepikkusest. Kui keskkonnas dispersioon puudub, siis $u = v$.

Normaalne dispersioon

Normaalse dispersiooni korral $\frac{dv}{d\lambda} > 0$, s.t. pikemad lained levivad suurema kiirusega, sel juhul $u < v$.

Anomaalne dispersioon

Anomaalse dispersiooni korral $\frac{dv}{d\lambda} < 0$, s.t. pikemad lained levivad väiksema kiirusega, sel juhul $u > v$.

ERIRELATIIVSUSTEOORIA ELEMENTE

Inertsiaalne taustsüsteem

Inertsiaalne taustsüsteem on taustsüsteem, mis liigub galaktilise taustsüsteemi suhtes ühtlaselt ja sirgjooneliselt, s.o. liigub inertsi tõttu.

Kiiruste liitmine klassikalises mehaanikas

$$\vec{u} = \vec{v} + \vec{u}', \tag{124}$$

kus $\vec{u}$ on keha kiirus esimeses inertsiaalses taustsüsteemis;
$\vec{u}'$ – kiirus teises inertsiaalses taustsüsteemis;
$\vec{v}$ – teise taustsüsteemi kiirus esimese suhtes.

Galilei teisendused

Galilei teisendused on koordinaatide teisenduseeskirjad üleminekul ühest inertsiaalsest taustsüsteemist teise. Juhul kui teine süsteem (x',y',z') liigub esimese (x,y,z) suhtes x-telje positiivses suunas kiirusega v ning ajahetkel t = 0 langesid mõlema süsteemi koordinaatteljed ühte, siis esimese süsteemi koordinaadid

$$\begin{cases} x = x' + vt, \\ y = y' \quad , \\ z = z' \; . \end{cases} \tag{125}$$

Klassikalise mehaanika relatiivsuse printsiip

Mehaanika seadused kehtivad ühteviisi kõigis inertsiaalsetes taustsüsteemides. See tähendab, et mehaanikas on võimatu niisugune katse, mis võimaldaks kindlaks teha, kas süsteem liigub (ühtlaselt ja sirgjooneliselt) või on paigal galaktilise taustsüsteemi suhtes. Teisiti: pole olemas absoluutset liikumist ega absoluutset paigalseisu. Kõik inertsiaalsed taustsüsteemid on samaväärsed.

Sama n.ö. matemaatilises keeles: mehaanika seadused on invariantsed (kujult muutumatud) Galilei teisenduste suhtes.

Keha kiirendus on Galilei teisenduste suhtes invariant (muutumatu suurus).

Erirelatiivsusteooria postulaadid

1. Kõik loodusseadused kehtivad ühteviisi kõigis inertsiaalsetes taustsüsteemides.

Sama n.ö. matemaatilises keeles: võrrandid, mis väljendavad loodusseadusi, on invariantsed koordinaatide ja aja teisenduste suhtes üleminekul ühest inertsiaalsest taustsüsteemist teise.

2. Valguse kiirus vaakumis on ühesugune kõigis inertsiaalsetes taustsüsteemides ning ta ei sõltu allika ja vastuvõtja liikumisest.

Lorentzi teisendused

Lorentzi teisendused on koordinaatide ja aja teisenduseeskirjad üleminekul ühest inertsiaalsest taustsüsteemist teise, mis tulenevad erirelatiivsusteooria postulaatidest.

Kui teine taustsüsteem liigub esimese suhtes x-telje positiivses suunas kiirusega v ning aja alghetkel langesid koordinaatteljed ühte, siis avalduvad teise süsteemi koordinaadid ja aeg esimese süsteemi koordinaatide ja aja kaudu:

$$\begin{cases} x' = \dfrac{x - vt}{\sqrt{1-\beta^2}}, \\ y' = y, \\ z' = z, \\ t' = \dfrac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1-\beta^2}}, \end{cases} \tag{126}$$

kus $\beta = \frac{v}{c}$ (c on valguse kiirus vaakumis).

Esimese süsteemi koordinaadid ja aeg teise süsteemi koordinaatide ja aja kaudu:

$$\begin{cases} x = \dfrac{x' + vt'}{\sqrt{1-\beta^2}}, \\ y = y', \\ z = z', \\ t = \dfrac{t' + \frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1-\beta^2}}. \end{cases} \tag{127}$$

Aeg-ruumi koordinaadid

Iga sündmust võib iseloomustada kohaga, kus ta toimub (koordinaatidega x,y,z), ja toimumise ajahetkega t. Nende suuruste nelikut x, y, z, t nimetatakse sündmuse aeg-ruumi koordinaatideks.

Intervall

Kui ühes ja samas taustsüsteemis toimuvad kaks sündmust aeg-ruumi koordinaatidega x_1, y_1, z_1, t_1 ja x_2, y_2, z_2, t_2, siis nende sündmuste vaheliseks intervalliks nimetatakse suurust

$$s_{12} = \sqrt{c^2(t_2-t_1)^2 - (x_2-x_1)^2 - (y_2 - y_1)^2 - (z_2 - z_1)^2}. \tag{128}$$

Intervall jääb üleminekul ühest inertsiaalsest taustsüsteemist teise muutumatuks:

$$s_{12}' = s_{12}. \tag{129}$$

Ruumisarnane intervall

Intervall on ruumisarnane, kui

$$s_{12}^2 < 0. \tag{130}$$

Kui kahe sündmuse vaheline intervall on ruumisarnane, siis sündmuste vahel on võimatu põhjuslik seos. Niisuguste sündmuste ajaline järjekord oleneb süsteemist. Kui ühes süsteemis toimub esimene sündmus varem kui teises, siis võib leida süsteemi, kus teine sündmus toimub varem kui esimene.

Ajasarnane intervall

Intervall on ajasarnane, kui

$$s_{12}^2 > 0. \tag{131}$$

Kui kahe sündmuse vaheline intervall on ajasarnane, siis nende sündmuste vahel on võimalik põhjuslik seos. Niisuguste sündmuste ajaline järjekord ei olene süsteemist.

Kehade pikkus

Kehade liikumise sihiline pikkus oleneb keha liikumise kiirusest taustsüsteemi suhtes:

$$l' = l\sqrt{1 - \beta^2}, \tag{132}$$

kus l' on keha pikkus süsteemis, mille suhtes ta liigub kiirusega v ($\beta = \frac{v}{c}$);

l – keha pikkus süsteemis, mille suhtes ta on paigal.

Seega keha pikkus on maksimaalne süsteemis, kus ta on paigal.

Sündmuste kestus

Sündmuste kestus oleneb sündmuse toimumise koha liikumise kiirusest taustsüsteemi suhtes:

$$\tau' = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \tag{133}$$

kus τ' on sündmuse kestus süsteemis, mille suhtes sündmuse toimumise koht liigub kiirusega v;

τ – sündmuse kestus süsteemis, kus sündmus toimub ühes ja samas kohas.

Seega sündmuse kestus on minimaalne süsteemis, kus ta toimub ühes ja samas kohas.

Relativistlik kiiruste liitmise eeskiri

Keha kiirus esimeses taustsüsteemis u on seotud kiirusega teises taustsüsteemis u':

$$\begin{cases} u_x = \dfrac{u_x' + v}{1 + u_x' \dfrac{v}{c^2}}, \\ u_y = \dfrac{u_y' \sqrt{1 - \beta^2}}{1 + u_x' \dfrac{v}{c^2}}, \\ u_z = \dfrac{u_z' \sqrt{1 - \beta^2}}{1 + u_x' \dfrac{v}{c^2}}. \end{cases} \tag{134}$$

Massi sõltuvus kiirusest

$$m = \frac{m_o}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \tag{135}$$

kus m on keha mass süsteemis, mille suhtes ta liigub kiirusega v (relativistlik mass);
m_o - keha mass süsteemis, kus ta on paigal (seisumass).

Relativistliku dünaamika II seadus

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{m_o}{\sqrt{1 - \beta^2}} \vec{v}\right) = \vec{F}, \tag{136}$$

kus $\vec{v}$ on keha kiirus taustsüsteemi suhtes ($\beta = \frac{v}{c}$).

Relativistlik impulss

$$\vec{p} = m\vec{v} = \frac{m_o\vec{v}}{\sqrt{1 - \beta^2}}. \tag{137}$$

Seos energia ja massi vahel

$$E = m\,c^2, \tag{138}$$

kus E on keha nn. koguenergia;
m – keha relativistlik mass.

Seisuenergia

Seisuenergia on keha energia süsteemis, kus ta on paigal:

$$E_o = m_o c^2. \tag{139}$$

Koguenergia

Keha koguenergia on tema seisuenergia ja kineetilise energia summa:

$$E = E_o + E_k. \tag{140}$$

Kineetiline energia

$$E_k = E - E_o = \frac{m_o c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} - m_o c^2 = m_o c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1\right). \tag{141}$$

Avaldistes (138) ... (141) ei sisaldu keha energia välises jõuväljas.

Seos koguenergia ja impulsi vahel

$$E = c\sqrt{p^2 + m_o^2 c^2}. \tag{142}$$

Süsteemi seoseenergia

Süsteemi seoseenergia on energia, mis vabaneb seotud osakeste süsteemi moodustumisel vabadest osakestest.

$$E = \left(\sum_{i=1}^{n} m_{oi} - M_o\right) c^2, \tag{143}$$

kus m_{oi} on i-nda vaba osakese seisumass;
n – süsteemi moodustavate osakeste arv;
M_o – süsteemi seisumass.

Mass

Mass on keha inertsi ja gravitatsiooniliste omaduste mõõt.

Ekvivalentsusprintsiip

Ei ole mingit kriteeriumi, mille abil võiks eristada inertsiaaljõude gravitatsioonijõududest.

Üldrelatiivsusprintsiip

Kõik loodusseadused kehtivad üheviisi kõigis taustsüsteemides.

M O L E K U L A A R F Ü Ü S I K A J A T E R M O D Ü N A A M I K A

Molekulaarkineetilise teooria põhiseisukohad

1) iga keha koosneb suurest arvust ülivāikestest osakestest - molekulidest (aatomitest);

2) iga keha molekulid on pidevas korrapäratus (kaootilises) liikumises (soojusliikumises), sellel liikumisel puuduvad eelistatud suunad;

3) soojusliikumise intensiivsus sõltub temperatuurist, ta kasvab temperatuuri tõusuga.

Statistiline uurimismeetod

Statistilise uurimismeetodi korral ei huvita meid üksiku molekuli käitumine, vaid niisugused keskmised suurused, mis iseloomustavad tohutu suuri molekulide kollektiive. Statistiliste seaduspärasuste kehtivus on äärmiselt tõenäone, kuid mitte absoluutne. Nende seaduspärasuste kehtivus on seda tõenäosem, mida suurem on molekulide arv.

Termodünaamiline uurimismeetod

Termodünaamilise uurimismeetodi korral uuritakse kehade makroskoopilisi omadusi, tundmata huvi nende mikroskoopilise ehituse vastu. Ei võeta vaatluse alla molekule. Termodünaamika aluseks on mõned põhiseadused, nn. termodünaamika printsiibid.

Termodünaamilised parameetrid

Kehade mitmesuguste omaduste hulgas võib eristada kolme tähtsamat omadust ehk parameetrit. Need on rõhk (p), ruumala (V), temperatuur (T). Kui jätta kõrvale elektromagnetilised väljad ja piirduda lihtsamate süsteemidega - gaaside, vedelike ja isotroopsete tahkete kehadega, siis osutub, et need 3 parameetrit määravad täielikult süsteemi oleku.

Olekuvõrrand

Olekuvõrrand on võrrand, mis seob süsteemi kolme parameetrit. Olekuvõrrand konkreetse süsteemi jaoks leitakse alati katseliselt.

Tasakaaluolek

Süsteemi tasakaaluolekuks nimetatakse sellist olekut, mille korral süsteemi kõik parameetrid on ühesugused kõigis süsteemi punktides, s.t. süsteemi parameetritel on kindlad väärtused, mis muutumatute välistingimuste korral püsivad konstantsetena kui tahes kaua.

Tasakaaluline protsess

Tasakaaluliseks nimetatakse protsessi, mis koosneb tasakaaluolekute pidevast reast. Reaalselt võib tasakaaluliseks pidada väga aeglaselt toimuvat protsessi.

Relaksatsioon. Relaksatsiooni aeg

Süsteemi üleminekut mittetasakaalulisest olekust tasakaalulisse nimetatakse relaksatsiooniks.

Niisuguse ülemineku aega nimetatakse relaksatsiooni ajaks.

Täpsemini mõistetakse relaksatsiooni aja all aega, mille vältel mingi suuruse esialgne kõrvalekalle tasakaalulisest väärtusest väheneb e (naturaallogaritmide alus) korda.

Igal süsteemi parameetril on oma relaksatsiooni aeg. Suurim neist on süsteemi relaksatsiooni aeg.

MOLEKULAARKINEETILISE TEOORIA FÜÜSIKALISED ALUSED

Ideaalne gaas

Ideaalne gaas on gaas, mille molekulid on masspunktid ning molekulidevahelised põrked absoluutselt elastsed. Seega jäetakse ideaalse gaasi korral arvestamata 1) molekulide mõõtmed, 2) molekulidevahelised jõud (taandatakse need absoluutselt elastsetele põrgetele).

Reaalne gaas käitub seda täpsemini ideaalsena, mida kõrgem on temperatuur ja mida madalam on rõhk.

Ideaalse gaasi olekuvõrrand (Clapeyron-Mendelejevi võrrand)

$$pV = zRT, \tag{144}$$

kus p on gaasi rõhk;
V – ruumala;
z – moolide arv;
R – gaaside universaalne konstant;
T – absoluutne temperatuur.

$$z = \frac{M}{\mu}, \tag{145}$$

kus M – gaasi mass;
μ – ühe mooli mass.

Mool

Mool on aine hulk, mis sisaldab sama palju molekule (aatomeid), kui neid sisaldub süsinikus C^{12} massiga 0,012kg.

Erijuhud ideaalse gaasi olekuvõrrandist.

1. Isotermiline protsess (T = const), Boyle-Mariotte'i seadus:

$$pV = \text{const}. \tag{146}$$

2. Isokooriline protsess ($V = const$), Charley seadus:

$$\frac{p}{T} = const. \qquad (147)$$

3. Isobaariline protsess ($p = const$), Gay-Lussac'i seadus:

$$\frac{V}{T} = const. \qquad (148)$$

Seos absoluutse temperatuuri (T) ja Celsiuse temperatuuri vahel:

$$T = t + 273{,}15. \qquad (149)$$

Molekulaarkineetilise teooria põhiseos

$$p = \frac{1}{3}\, mn\overline{v^2}\,, \qquad (150)$$

kus m on ühe molekuli mass;

n - molekulide arv gaasis;

$\overline{v^2}$ - nn. ruutkeskmise kiiruse ruut.

Ruutkeskmine kiirus

Ruutkeskmine kiirus on ruutjuur üksikute molekulide kiiruste ruutude summast, mis on jagatud molekulide arvuga:

$$\sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{v_i^2}{n}}. \qquad (151)$$

$$\sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}, \qquad (152)$$

kus k on Boltzmanni konstant.

$$k = \frac{R}{N_A}, \qquad (153)$$

kus N_A on Avogadro arv.

Avogadro arv

Avogadro arv on aine ühes moolis sisalduvate molekulide arv. See arv on ühesugune kõigi ainete jaoks.

Molekuli keskmine kineetiline energia (üheaatomilise gaasi jaoks)

$$\overline{E}_k = \frac{3}{2}kT. \tag{154}$$

Temperatuuri absoluutse nulli füüsikaline sisu

Temperatuuri absoluutne null on niisugune kujuteldav temperatuur, mille korral lakkaks molekulide soojusliikumine. Kujuteldav - seetõttu, et paigalolevat molekuli võime ainult ette kujutada, reaalselt teda ei eksisteeri, liikumine on molekuli niisugune omadus, mida temast lahutada ei saa. Seetõttu pole absoluutne null reaalselt kunagi täpselt saavutatav.

Vabadusastmete arv

Vabadusastmete arv on süsteemi sõltumatult muutuvate koordinaatide arv. Üldisem määratlus: süsteemi vabadusastmete arv on sõltumatute suuruste arv, mille abil on võimalik määrata süsteemi olekut.

Üheaatomilisel gaasil $i = 3$, kaheaatomilisel - $i = 5$, kolme- ja enama-aatomilisel - $i = 6$. (Viimasel kahel juhul on eeldatud, et seosed aatomite vahel molekulis on jäigad.)

Mitmeaatomilise gaasi molekuli keskmine kineetiline energia

$$\overline{E}_k = \frac{i}{2}kT. \tag{155}$$

See koosneb kulgeva liikumise energiast ($\frac{3}{2}kT$) ja pöördliikumise energiast ($\frac{i-3}{2}kT$). Kulgliikumise vabadusastmete arv $i_k = 3$, pöördliikumise vabadusastme arv $i_p = i - 3$.

Energia jaotus vabadusastmete järgi

Energia jaguneb vabadusastmete järgi ühtlaselt. Igale vabadusastmele tuleb keskmiselt ühesugune energia (1/2 kT). See seadus kehtib klassikalises statistilises füüsikas.

Molekulide tõenäoseim kiirus

Enamik molekule liigub kiirustega, mis palju ei erine tõenäoseimast.

Molekuli suhteline kiirus

$$u = \frac{v}{v_t}, \tag{156}$$

kus v on antud molekuli kiirus;
v_t - tõenäoseim kiirus antud temperatuuril.

Molekulide jaotus kiiruste järgi (Maxwelli kiiruste jaotus)

Maxwelli kiiruste jaotus annab nende molekulide arvu Δn, mille suhtelised kiirused asuvad vahemikus $u \ldots u + \Delta u$ (vahemikus laiusega Δu). Eeldusel, et Δu on väike,

$$\Delta n = \frac{4}{\sqrt{\pi}} n e^{-u^2} u^2 \Delta u. \tag{157}$$

Maxwelli jaotusest saab määrata tõenäoseima kiiruse:

$$v_t = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}. \tag{158}$$

Molekulide aritmeetiline keskmine kiirus

$$\bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^{n} v_i}{n}, \tag{159}$$

kus v_i on i-nda molekuli kiirus;
n - molekulide arv.

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}. \qquad (160)$$

Antud temperatuuril

$$\sqrt{\overline{v^2}} > \bar{v} > v_t. \qquad (161)$$

Molekulide jaotus kineetiliste energiate järgi

Molekulide arv, mille kulgeva liikumise kineetilised energiad asuvad vahemikus $E_k \ldots E_k + \Delta E_k$,

$$\Delta n = \frac{2}{\sqrt{\pi}} n \frac{1}{(kT)^{3/2}} e^{-\frac{E_k}{kT}} \sqrt{E_k}\, \Delta E_k. \qquad (162)$$

Baromeetriline valem

Baromeetriline valem annab õhurõhu sõltuvuse kõrgusest maapinnast:

$$p = p_o e^{-\frac{\mu gh}{RT}}, \qquad (163)$$

kus p on rõhk kõrgusel h;
p_o – kõrgusel $h = 0$;
μ – õhu keskmine moolmass;

valem kehtib eeldusel, et raskuskiirendus g ja temperatuur T ei sõltu kõrgusest.

Molekulide arv ruumalaühikus, sõltuvalt kõrgusest

$$n_o = n_{oo}\, e^{-\frac{\mu gh}{RT}} = n_{oo}\, e^{\frac{mgh}{kT}}, \qquad (164)$$

kus n_o on molekulide arv ruumalaühikus kõrgusel h;
n_{oo} – kõrgusel $h = 0$;
m – molekuli mass.

Boltzmanni jaotus

Boltzmanni jaotus annab molekulide jaotuse potentsiaalsete energiate järgi potentsiaalses jõuväljas. Molekulide arv ruumalaühikus, mille potentsiaalne energia on E_p

$$n_o = n_{oo}\, e^{-\frac{E_p}{kT}}, \qquad (165)$$

kus n_{oo} on nende molekulide arv ruumalaühikus, mille potentsiaalne energia on 0.

Molekulide keskmine põrgete arv ajaühikus

$$\bar{z} = 4\sqrt{2}\pi r^2\, \bar{v}\, n_o, \qquad (166)$$

kus r on molekuli nn. efektiivne raadius;
$\bar{v}$ – aritmeetiline keskmine kiirus;
n_o – molekulide arv ruumalaühikus.

Molekuli vaba tee

Molekuli vaba tee on vahemaa, mille molekul läbib põrkest põrkeni.

Molekuli keskmine vaba tee

$$\bar{\lambda} = \frac{\bar{v}}{\bar{z}} = \frac{1}{4\sqrt{2}\pi r^2 n_o} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n_o} = \frac{1}{4\sqrt{2}\sigma n_o}, \qquad (167)$$

kus d on molekuli efektiivne diameeter ($d = 2\,r$);
σ – efektiivne ristlõige ($\sigma = \pi r^2$).

Molekulide efektiivsed mõõtmed

Valemid (166), (167) on tuletatud eeldusel, et molekulid on absoluutsed elastsed kerad raadiusega r. Seega on molekulaarjõudude küllalt keerukas mehhanism (molekulidevahelise kauguse vähenedes hakkavad algul kasvama tõmbejõud, saavutavad maksimumi, seejärel hakkavad vähenema, muutuvad nulliks ning kauguse edasisel vähenemisel hakkavad järsult kasvama tõukejõud) taandatud absoluutselt elastsetele põrgetele. Praktikas kasutatakse valemit (167) molekulide mõõtmete arvutamiseks (mõõtes katseliselt $\bar{\lambda}$). Niiviisi määratud molekulide mõõtmeid nimetataksegi efektiivseteks mõõtmeteks. Seega näiteks molekuli efektiivne diameeter oleks molekuli diameeter, kui ta oleks absoluutselt elastne kera.

Sisehõõrdumine gaasides

Sisehõõrdejõud gaasides allub samale eksperimentaalsele seadusele kui sisehõõrdejõud vedelikes [vt. valem (70)]:

$$F = \eta \frac{du}{dx} S. \tag{168}$$

Molekulaarkineetiline teooria annab sisehõõrdeteguri jaoks avaldise

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \bar{v} \bar{\lambda} , \tag{169}$$

kus ρ on gaasi tihedus.

Soojusjuhtivus

Kui keskkonnas x-telje sihis temperatuur muutub, siis selles sihis läbib pinda S soojuse voog:

$$q = -\varkappa \frac{dT}{dx} S, \tag{170}$$

kus $\varkappa$ on antud keskkonna soojusjuhtivustegur;

$\frac{dT}{dx}$ - temperatuuri gradient.

Soojusvoog

Soojusvoog on soojushulk, mis ajaühiku jooksul läbib pinda, mis on risti soojuse leviku suunaga.

$$\varkappa = \frac{1}{3} \frac{\rho \bar{v} \bar{\lambda}}{\mu} \frac{i}{2} R = \frac{\eta}{\mu} \frac{i}{2} R, \tag{171}$$

kus i on molekuli vabadusastmete arv.

Difusioon

Kui gaas koosneb mitmest komponendist, mille kontsentratsioon erinevates ruumipunktides on erinev, siis soojusliikumise tõttu kontsentratsioonid ühtlustuvad, millega kaasneb iga komponendi kandumine kontsentratsiooni vähenemise suunas. Sellist protsessi nimetatakse difusiooniks.

Kui gaas koosneb kahest komponendist, siis pinda S läbib risti pinnaga ajaühikus esimene gaasikomponent massiga

$$M_1 = - D \frac{dc_1}{dx} S, \tag{172}$$

kus D on difusioonitegur;

$\frac{dc_1}{dx}$ - esimese gaasi kontsentratsiooni gradient.

Analoogiliselt teise komponendi jaoks:

$$M_2 = - D \frac{dc_2}{dx} S. \tag{173}$$

Kontsentratsioon

Antud komponendi kontsentratsioon on selle komponendi molekulide mass ruumalaühikus.

Omadifusioon

Omadifusioon on mingi gaasi difusioon sama gaasi molekulide keskkonnas.

Omadifusioonitegur

$$D = \frac{1}{3} \bar{v} \bar{\lambda}. \tag{174}$$

Siseenergia

Süsteemi siseenergia on korrapäratult liikuvate molekulide kineetiliste energiate ja molekulidevahelistest jõududest tingitud potentsiaalsete energiate summa.

Ideaalsel gaasil potentsiaalne energia puudub, sest puuduvad molekulidevahelised jõud, seetõttu siseenergia sõltub ainult temperatuurist.

Reaalsel gaasil on siseenergia gaasi parameetrite temperatuuri ja ruumala funktsioon.

$$U = f(T,V). \tag{175}$$

Olekufunktsioon

Olekufunktsioon on funktsioon, mis sõltub gaasi parameetritest.

Siseenergia on üks gaasi olekufunktsioone.

Ideaalse gaasi siseenergia

$$U = z\,\frac{i}{2}RT, \tag{176}$$

kus z on moolide arv;

i – molekuli vabadusastmete arv.

Siseenergiat võib muuta kahel viisil: 1) tehes gaasiga tööd (või lastes gaasil teha tööd), 2) andes gaasile väljastpoolt soojust (või võttes ära).

Soojus

Soojus (nagu töögi) on siseenergia ühelt kehalt teisele ülekande viisiks ja mõõduks.

Termodünaamika esimene alus

Süsteemi siseenergia juurdekasv võrdub süsteemile juurdeantava soojushulga ja süsteemiga teostatava töö summaga.

$$\Delta U = Q + A, \tag{177}$$

kus $+Q$ on süsteemile väljastpoolt antav soojushulk ($-Q$ on soojushulk, mida süsteem ära annab);

$+A$ – süsteemiga väljastpoolt tehtav töö, kokkusurumise töö ($-A$ on süsteemi poolt tehtud töö, paisumise töö).

Teisiti: süsteemile väljastpoolt antav soojushulk võib minna süsteemi siseenergia täiendamiseks või süsteemi poolt tehtavaks tööks.

$$Q = \Delta U - A. \qquad (178)$$

Gaasi paisumise töö isobaarilisel protsessil

$$-A = Q - \Delta U = p\Delta V = zR\Delta T, \qquad (179)$$

kus ΔV on gaasi ruumala muutus.

Gaasi paisumise töö mis tahes protsessil

$$-A = \int_{V_1}^{V_2} p dV. \qquad (180)$$

Gaasi paisumise töö isotermilisel protsessil

$$-A = Q = zRT\ln\frac{V_2}{V_1} = zRT\ln\frac{p_1}{p_2}. \qquad (181)$$

Isotermilisel paisumisel teeb gaas tööd juurdesaadud soojuse arvel.

Gaasi paisumise töö isokoorilisel protsessil

$$-A = 0. \qquad (182)$$

Moolsoojus

Moolsoojus on soojushulk, mida on vaja anda antud aine 1 moolile, et tõsta tema temperatuuri 1 K võrra.

Erisoojus

Erisoojus on soojushulk, mida on vaja anda antud aine massiühikule, et tõsta tema temperatuuri 1 K võrra.

$$c = \frac{C}{\mu}, \qquad (183)$$

kus c on antud aine erisoojus;
C - moolsoojus;
μ - moolmass.

Gaasi moolsoojus jääval ruumalal

$$C_V = \frac{dU_m}{dT} = \frac{i}{2} R, \qquad (184)$$

kus U_m on 1 mooli antud aine siseenergia.

Temperatuuri tõusul jääval ruumalal läheb kogu juurdeantav soojus siseenergia täiendamiseks.

Gaasi moolsoojus jääval rõhul

$$C_p = C_V + R = \frac{i + 2}{2} R. \qquad (185)$$

Temperatuuri tõusul jääval ruumalal läheb juurdeantav soojus gaasi siseenergia täiendamiseks ja gaasi paisumise tööks.

Gaaside universaalse konstandi füüsikaline sisu

Gaaside universaalne konstant R võrdub tööga, mida teeb 1 mool ideaalset gaasi paisudes jääval rõhul, kui tema temperatuur tõuseb 1 K võrra.

$$R = p \frac{dV_m}{dT} = C_p - C_V, \qquad (186)$$

kus V_m on 1 mooli antud gaasi ruumala.

Moolsoojuste suhe

$$\varkappa = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i + 2}{i}. \tag{187}$$

Molekuli vabadusastmete arv, arvestades aatomite võnkliikumise vabadusastmeid

$$i = i_k + i_p + 2i_v, \tag{188}$$

kus i_k on kulgliikumise vabadusastmete arv (i_k=3);

i_p - molekuli pöörlemise vabadusastmete arv;

i_v - aatomite võnkliikumise vabadusastmete arv molekulis.

Üheaatomilistel gaasidel

$$i_v = 0. \tag{189}$$

Kaheaatomilistel gaasidel

$$i_v = 1. \tag{190}$$

Kolme- ja enama-aatomilistel gaasidel

$$i_v = 3n - 6, \tag{191}$$

kus n on aatomite arv molekulis.

Dulong-Petit' seadus

Tahkete kehade moolsoojus

$$C = C_v = 3R. \tag{192}$$

Adiabaatiline protsess

Adiabaatiline protsess on niisugune protsess, mille korral ei toimu soojusvahetust süsteemi ja väliskeskkonna vahel.

Praktiliselt võib adiabaatiliseks lugeda väga kiiresti toimuvaid protsesse, kuna sel juhul ei toimu märgatavat soojusvahetust süsteemi ja väliskeskkonna vahel.

Adiabaatilisel protsessil

$$zC_V\, dT = pdV, \tag{193}$$

s.t. kui $dV > 0$, siis $dT < 0$ (adiabaatilisel paisumisel gaasi temperatuur langeb); kui $dV < 0$, siis $dT > 0$ (adiabaatilisel kokkusurumisel gaasi temperatuur tõuseb).

Poissoni seadus

Adiabaatiline protsess allub Poissoni seadusele:

$$pV^{\varkappa} = \text{const} \tag{194}$$

või

$$TV^{\varkappa-1} = \text{const}, \tag{195}$$

kus

$$\varkappa = \frac{C_p}{C_V}.$$

Polütroopne protsess

Polütroopseks nimetatakse protsessi, mis allub seadusele

$$pV^n = \text{const}, \tag{196}$$

kus n on nn. polütroobi astmenäitaja. Kõik senivaadeldud protsessid on polütroopse protsessi erijuhud.

Isobaarilisel protsessil $n = 0$,
isotermilisel - $n = 1$,
adiabaatilisel - $n = \varkappa$,
isokoorilisel - $n = \pm\infty$.

Gaasi paisumise töö adiabaatilisel protsessil

$$-A = -\Delta U = zC_V(T_1 - T_2) = zC_VT_1\left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\varkappa-1}\right]. \tag{197}$$

Adiabaatilisel paisumisel teeb gaas tööd oma siseenergia arvel.

Ringprotsess

Kui pärast protsessi süsteemi lõppoleku parameetrid ühtivad tema algoleku parameetritega, siis oleme süsteemiga teostanud ring- ehk tsüklilise protsessi.

Pööratav protsess

Protsess on pööratav, kui on olemas mingi teine protsess, mis viib süsteemi lõppolekust tagasi algolekusse ning pärast protsessi pole väliskeskkonnas mingeid muutusi.

Teisiti: pööratav on protsess, mida saab teostada vastupidises suunas, nii et süsteem läbib kõik samad olekud mis pärisuunas, ainult vastupidises järjekorras. Pööratav saab olla ainult tasakaaluline protsess.

Kõik reaalsed protsessid on pöördumatud. Pööratavaid protsesse reaalselt ei eksisteeri.

Soojusmasin

Soojusmasin on perioodiliselt töötav seade, mis teeb tööd väljastpoolt saadava soojushulga arvel. Soojusmasin teostab korduvalt mingit ringprotsessi. Iga soojusmasin koosneb põhimõtteliselt kolmest osast: 1) soojendi, 2) töötav keha, 3) jahuti. Seejuures $T_1 > T_2$ (T_1 - soojendi temperatuur, T_2 - jahuti temperatuur). Soojusmasina töötsükkel koosneb järgnevast: töötav keha saab soojendilt soojushulga, mille arvel ta teeb tööd, seejärel viiakse töötav keha tagasi algolekusse, seejuures osutub paratamatuks osa saadud soojuse äraandmine jahutile.

Soojusmasina kasutegur

Soojusmasina kasutegur näitab, milline osa soojendilt saadud soojusest läheb kasulikuks tööks:

$$\eta = \frac{-A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}, \tag{198}$$

kus $-A$ on töötava keha poolt tsükli vältel tehtud summaarne töö;

Q_1 - soojendilt saadud soojushulk;

Q_2 - jahutile äraantud soojushulk.

Erinevalt eelnevast oleme siin tähistanud töötava keha poolt äraantud soojushulka $+Q_2$-ga.

Külmutusmasin

Külmutusmasin võtab soojust külmemalt kehalt (näiteks külmutuskapist) ja kannab seda üle soojemale kehale. Niisugune soojuse ülekanne ei saa toimuda iseenesest, vaid selleks on vaja väljastpoolt teha tööd. Seejuures on soojemale kehale ülekantud soojushulk väljastpoolt tehtava töö võrra suurem külmemalt kehalt võetavast soojushulgast. Põhimõtteliselt võib iga soojusmasina muuta külmutusmasinaks, muutes kõigi protsesside suunad vastupidisteks.

Külmutustegur

Külmutustegur on külmemalt kehalt võetava soojushulga ja väljastpoolt tehtava töö suhe.

$$K = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}, \qquad (199)$$

kus Q_1 on soojemale kehale ülekantav soojushulk.

Mida suurem on K, seda kasulikumalt töötab külmutusmasin.

Carnot' ideaalne soojusmasin

Carnot' soojusmasin on ideaalne seetõttu, et ta töötab pööratava tsükliga. Töötavaks kehaks Carnot' masinas on ideaalne gaas. Tsükkel koosneb järgmistest protsessidest.

1. Gaas paisub isotermiliselt, kusjuures gaasi ja soojendi temperatuur (T_1) on ühesugune. Selle protsessi vältel saab gaas soojendilt soojushulga Q_1.

2. Gaas paisub adiabaatiliselt, seejuures tema temperatuur langeb kuni jahuti temperatuurini T_2.

3. Gaas surutakse isotermiliselt kokku, kusjuures gaasi ja jahuti temperatuurid on võrdsed. Gaas annab jahutile ära soojushulga Q_2.

4. Gaas surutakse adiabaatiliselt kokku, kuni tema temperatuur tõuseb soojendi temperatuurini T_1.

Carnot' soojusmasina kasutegur

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \tag{200}$$

Kasutegur ei olene töötava keha ainest.

Reaalse masina kasutegur

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} < \frac{T_1 - T_2}{T_1} . \tag{201}$$

Protsessi taandatud soojus

Protsessi taandatud soojus on protsessi vältel süsteemile antud soojus jagatud selle keha temperatuuriga, millelt soojust saadi (pöörataval protsessil on süsteemi temperatuur sellega võrdne). Kui protsess toimub isotermiliselt, siis taandatud soojus on $\frac{Q}{T}$, muudel juhtudel, kuna temperatuur muutub, võime taandatud soojuse leida elementaarprotsessil: $\frac{dQ}{T}$ (lõplikul protsessil $\int \frac{dQ}{T}$). Kui protsessil saadi soojust juurde, on taandatud soojus > 0, kui anti ära, on taandatud soojus < 0.

Clausiuse võrratus

Ringprotsessil taandatud soojuste algebraline summa

$$\oint \frac{dQ}{T} \leq 0. \tag{202}$$

Integraal tuleb võtta üle kogu tsükli. Märk $<$ kehtib mittepööratavatel ringprotsessidel, võrdusmärk pööratavatel ringprotsessidel. Seega pole niisugust ringprotsessi, mille korral taandatud soojuste algebraline summa oleks > 0.

Entroopia

Mis tahes pööratava protsessi korral, mis viib süsteemi mingist olekust 1 olekusse 2, ei sõltu taandatud soojuste summa protsessist, vaid ainult alg- ja lõppolekust. See annab alust väita, et taandatud soojuste summa on mingi olekufunktsiooni muutus. Seda olekufunktsiooni nimetatakse-gi süsteemi entroopiaks.

$$\int_1^2 \frac{dQ}{T} = S_2 - S_1 = \Delta S. \tag{203}$$

Mittepööratava protsessi korral

$$\int_1^2 \frac{dQ}{T} < S_2 - S_1 = \Delta S. \tag{204}$$

T on selle keha temperatuur, millelt soojust saadi.

Kui protsess toimub isoleeritud süsteemis, s.t. puudub soojusvahetus väliskeskkonnaga, siis

$$S_2 - S_1 = \Delta S \geqslant 0. \tag{205}$$

Seega saab isoleeritud süsteemi entroopia ainult kasvada (mittepööratav protsess) või jääda muutumatuks (pööratav protsess).

Entroopia ise:

$$S = \int \frac{dQ}{T} + C, \tag{206}$$

kus C on määramatu konstant.

Ideaalse gaasi entroopia

$$S = z(C_V \ln T + R \ln V_m + S_m) \tag{207}$$

või

$$S = z(C_p \ln T - R \ln p + S_m') \tag{208}$$

või

$$S = z(C_V \ln p + C_p \ln V_m + S_m''), \tag{209}$$

kus S_m, S_m' ja S_m'' on integreerimiskonstandid.

Seos entroopia ja tõenäosuse vahel

$$S = k \ln W, \tag{210}$$

kus k on Boltzmanni konstant;

W - süsteemi oleku termodünaamiline tõenäosus.

Süsteemi oleku termodünaamiline tõenäosus

Süsteemi oleku termodünaamiline tõenäosus on mikroolekute arv, mille kaudu on realiseeritav antud makroolek.

Üks ja sama makroolek (p, V, T) võib teostuda paljude mikroolekute kaudu, s.t. mitmesuguste molekulide jaotuste kaudu ruumis ja mitmesuguste kiiruste jaotuste kaudu molekulide vahel. Kui näiteks süsteem koosneb ainult kahest molekulist, siis kindel makroolek on määratud nende molekulide kindlate asukohtadega (kui jätta vaatluse alt välja molekulide kiirused). Vahetades molekulid jääb makroolek samaks, kuid mikroolek on erinev. Seega on mikroolekute arv, mille kaudu on realiseeritav antud makroolek, võrdne kahega. Arusaadavalt kasvab termodünaamiline tõenäosus järsult molekulide arvu kasvades.

Termodünaamika teine alus

Soojus ei lähe iseenesest üle külmemalt kehalt soojemale.

Seesama rangemas formuleeringus: niisugused protsessid, mille ainsaks tulemuseks on soojuse üleminek külmemalt kehalt soojemale, on võimatud.

Teisiti:

Ringprotsess, mille ainsaks tulemuseks oleks soojuse muundamine tööks, on võimatu.

Või:

Perioodiliselt töötav soojusmasin, mille tegevuse ainsaks tulemuseks oleks soojuse muundamine tööks, on võimatu.

Van der Waalsi võrrand

Van der Waalsi võrrand on reaalse gaasi olekuvõrrand.

$$(p + \frac{z^2a}{V^2})(\frac{V}{z} - b) = RT, \qquad (211)$$

kus z on moolide arv;

a ja b - nn. Van der Waalsi konstandid.

Van der Waalsi konstandid on igale ainele iseloomulikud suurused. Rõhu parandusliige (võrreldes ideaalse gaasi olekuvõrrandiga) $\frac{z^2a}{V^2}$ arvestab molekulaarsetest tõmbejõududest tingitud lisarõhku, nn. siserõhku (p on väljastpoolt gaasile avaldatav rõhk, gaasi rõhk anuma seintele).

Ruumala parandusliige b arvestab seda, et molekulidel endil on mõõtmed, mistõttu molekulid ei saa liikuda kogu anuma ruumalas. See parandusliige võrdub neljakordse kõigi molekulide endi ruumalaga.

Reaalse gaasi siseenergia

$$U = z(C_V T - \frac{a}{V_m}). \qquad (212)$$

Kriitiline temperatuur

Kriitiline temperatuur on temperatuur, mille puhul kaob erinevus gaasilise ja vedela oleku vahel, gaasi (auru) ja vedeliku tihedused saavad võrdseks. Kõrgemal temperatuuril kui kriitiline võib aine olla ainult gaasilises olekus. Seega selleks et gaasi veeldada, tuleb tema temperatuur viia allapoole kriitilist. Kriitilisel temperatuuril saab molekuli kineetiline energia nii suureks, et molekulidevahelised tõmbejõud ei suuda molekule koos hoida, ning vedelik muutub gaasiks sõltumata rõhust ja ruumalast. Tinglikult nimetatakse gaasi madalamal temperatuuril kui kriitiline auruks.

Küllastunud aur

Küllastunud aur on aur, mis on tasakaalus oma vedelikuga. Küllastunud auru rõhk ei sõltu auru ruumalast, vaid ainult temperatuurist, kasvab koos temperatuuriga.

Üleküllastunud aur

Üleküllastunud aur on aur, mille rõhk on kõrgem küllastunud auru rõhust antud temperatuuril.

Ülekuumenenud vedelik

Ülekuumenenud vedelik on vedelik, mille rõhk on madalam küllastunud auru rõhust antud temperatuuril.

Vedel olek

Vedelale olekule on iseloomulik nn. lähikord, s.t. iga osakese (aatomi, molekuli) suhtes paiknevad tema naaberosakesed korrapäraselt, kuid osakesest eemaldumisel korrapära kahaneb ning küllalt kiiresti kaob täielikult. Vedelikus seisneb soojusliikumine selles, et iga osake võngub teatud aja mingi kindla tasakaaluasendi ümber, kuna ta on oma naaberosakestega seotud molekulaarjõududega. Aeg-ajalt läheb osake hüppega üle uude tasakaaluasendisse, hüppe ulatus on sama suurusjärku molekuli mõõtmetega. Võnkumiste keskmine kestus on suurem üleminekü kestusest. Temperatuuri tõusuga võnkumiste kestus kindla tasakaaluasendi ümber lüheneb, ning üleminekud sagenevad. Vedel olek on gaasilise ja tahke oleku vahepealne.

Tahke olek

Enamik tahkeid kehi on kristallilise ehitusega. Kristallilises olekus paiknevad aine osakesed korrapäraselt, kusjuures osakeste korrapärane asetus mis tahes osakese suhtes esineb suure ruumiosa ulatuses. Lühidalt - kristallides leiab aset kaugkord. Korrapäraselt paiknevad osakesed moodustavad geomeetriliselt korrapärase ruumvõre. Osakeste soojusliikumine kristallilises kehas seisneb nende võnkumises tasakaaluasendi (ruumvõre sõlme) ümber. Iga osake on naaberosakestega tugevalt seotud, asub potentsiaali augus. Kristallilise oleku iseloomulikuks jooneks on anisotroopsus - omaduste sõltuvus sihist.

Kristallilised kehad esinevad harilikult polükristallidena. Polükristall koosneb suurest hulgast korrapäratult orienteeritud kristallikestest. Kui kaugkord esineb kogu kristalli ulatuses, on tegemist monokristalliga.

<u>Faas</u>

Faas on süsteemi homogeensete ja ühesuguste omadustega osade kogum.

<u>Faasisiire</u>

Faasisiire on aine üleminek ühest faasist teise.

<u>Esimest liiki faasisiire</u>

Esimest liiki faasisiire on aine üleminek ühest faasist teise, mille korral eraldub või neeldub soojust. Enamik faasisiirdeid on esimest liiki.

<u>Teist liiki faasisiire</u>

Teist liiki faasisiire on aine üleminek ühest faasist teise, mis pole seotud soojuse eraldumise või neeldumisega. Teist liiki faasisiirded esinevad aine üleminekul ühest kristallilisest modifikatsioonist teise.

S I S U K O R D