

14 ÄÄNIOPPI

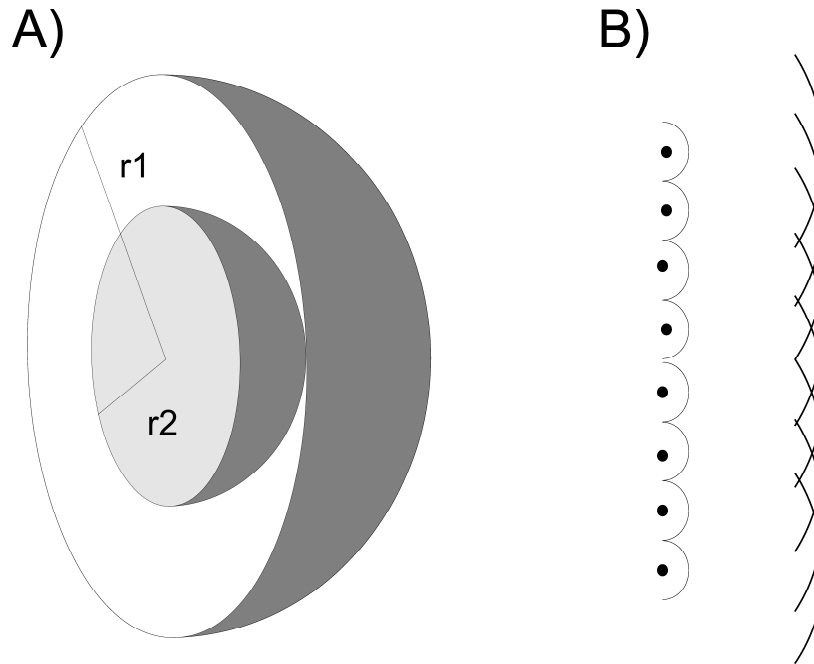
Ääni on atomien tai molekyylien liikettä toistensa suhteen. Tämän vuoksi *ääni tarvitsee aina edetäkseen väliaineen*. Ääni ei etene esimerkiksi avaruudessa (tähtien välisessä tilassa), koska siellä ei ole väliainetta. Äänen nopeus riippuu väliaineesta, jossa se etenee. Ääni koostuu aalloista, joissa samat vaiheet toistuvat tietyin väliajoin. Ajattele veteen tiputettua kiveä, joka saa aikaan aaltoja veden pinnalla. Ääniaallot ovat kuten veden veden pinnalla etenevät aallot. Ne etenevät äänilähteestä (vedessä kiven ja pinnan kohtaamispisteestä) kaikkiin suuntiin samalla nopeudella muodostaen samankeskisiä aaltorintamia. Veden pinnalla etenevä aalto eroaa ääniaalloista kahdellakin tavalla; veden pinta-aalto etenee vain tasossa kun taas ääniaalto etenee koko avaruudessa, ja veden pinta-aalto on poikittaista aaltoliikettä ääniaallon ollessa pitkittäistä. Näistä lisää hieman edempänä.

Aivan kuten veden pinta-aalto, ääniaallotkin vaimenee edetessään kauemmaksi lähtöpisteestä. Jollakin tietyllä ajanhetkellä, tietyllä etäisyydellä äänilähteestä, äänen energia on jakautunut pallon muotoiselle pinnalle. Hetkeä myöhemmin sama energia on jakautuneena uudelle pallonmuotoiselle pinnalle, jonka pinta-ala on suurempi. Koska pallon pinta-ala on verrannollinen pallon säteen neliöön, *äänen intensiteetti on kääntäen verrannollinen säteen neliöön*.

14.1 Pitkittäiset ja poikittaiset aallot

Ääniaallot voivat olla sekä **pitkittäisiä** että **poikittaisia**. *Poikittaisessa aallossa hiukkasten värähtely tapahtuu kohtisuoraan aallon etenemissuuntaa vastaan. Pitkittäisessä aallossa taas hiukkasten värähtely tapahtuu aallon etenemissuunnassa*. Ilmassa ääni etenee pitkittäisenä aaltoliikkeenä. Tämä tarkoittaa sitä, että joissakin kohti ilmamolekyylit ovat lähempänä toisiaan. Mitä lähempänä ilmamolekyylit ovat toisiaan, sitä suurempi on ilman tiheys ja paine. *Ääni on siis ilmanpaineen vaihteluja ajassa*. Kahden aineen rajapinnassa ääni etenee usein myös poikittaisena aaltoliikkeenä.

Äänirintaman muodostaa samassa vaiheessa olevan ääniaallon muodostama pinta. Jos äänilähde on pistemäinen ja etäisyys lähteestä on pieni, äänirintaman muoto on pallomainen (Kuva 14.1A). Tällöin sanotaan aallon olevan **palloaalto**. Jos taas pistemäisiä äänilähteitä on useita rinnan (Kuva 14.1B), tai ollaan suurella etäisyydellä yhdestä pistemäisestä lähteestä, äänirintama muodostaa **tasoaallon**.



Kuva 14.1 Yhden pistemäisen änilähteen muodostama palloaalto (A). Useiden pistelähteiden muodostama tasoaalto (B).

14.2 Äänen intensiteettitaso

Ääni on mekaanista aaltoliikettä ja välittää näin mekaanista energiaa. Äänen **intensiteetti (I)** määritellään *ääniaallon kuljettamana tehona pinta-alaa kohti*. Sen yksikkö on W/m^2 . Pienin intensiteetti, jonka ihmiskorva kykenee havaitsemaan, on $2,5 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$. Tätä kutsutaan ihmisen **kuulokynnykseksi**. Korvan havaitsemalla äänen intensiteetillä ei ole ylärajaa, mutta 1 W/m^2 ylittävä äänen intensiteetti alkaa tuottaa kipuaistimuksia korvassa.

Usein äänen intensiteetti esitetään logaritmisella asteikolla, jolloin siitä käytetään nimitystä äänen **intensiteettitaso**. Intensiteettitason yksikkö on **desibeli (dB)** ja se on dimensioton suure. Intensiteettitason laskemista varten on määritelty standardi äänen lähtötaso tai referenssitaso. Tämän suuruus on $0,937 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$. Laskemalla äänen lähtötason ja halutun intensiteetin välinen suhde ja ottamalla siitä 10-kantainen logaritmi, voidaan äänen intensiteettitaso ilmaista belin avulla. Tämän kymmenesosa on desibeli. Matemaattisesti laskentakaava näyttää tältä

$$(14.1) \quad [I_{\text{taso}}(\text{dB})] = (10\text{dB}) \times \log \left(\frac{I(\text{W} / \text{m}^2)}{0,937 \times 10^{-12} \text{ W} / \text{m}^2} \right)$$

Aina intensiteetin kasvaessa 10-kertaiseksi, intensiteettitaso kasvaa 10 desibeliä. Näin ollen intensiteetin lisääntyminen 1000-kertaiseksi, tarkoittaa 30 desibelin kasvua intensiteettitasossa. Logaritminen asteikko vastaa havaitsemaamme aistimusta; äänen intensiteetin kasvaessa 100-kertaiseksi meistä ei tunnu siltä. Korvamme pyrkivät aliarvioimaan suuria äänenvoimakkuuksia.

Taulukko 14.1 Joitakin äänen intensiteettejä

Ääni	Intensiteetti W/m^2	Intensiteettitaso dB
Voimakkain laboratoriossa saavutettu ääni	10^9	210
Tärykalvon repeämä	10^4	160
Suihkumoottori (30 m)	10	130
Kipukynnys	1	120
Ukkonen	10^{-1}	110
Kova liikennemelu	10^{-5}	70
Tavallinen keskustelu	10^{-6}	60
Kuiskaus	10^{-10}	20
Kuulokynnys	2.5×10^{-12}	4

Koska ilmassa etenevän ääniaallon lähteenä yleensä on pistelähde, muodostuu aallosta palloaalto. Äänen energia jakautuu näin ollen pinta-alalle, jonka suuruus on $4\pi r^2$. Homogeenisessä väliaineessa, jossa väliaine ei absorboi (ime itseensä) äänienergiaa, intensiteetin ja pinta-alan tulo on vakio

$$(14.2) \quad I_1 4\pi r_1^2 = I_2 4\pi r_2^2$$

josta saadaan äänen intensiteetin laskemiselle kaava

$$(14.3) \quad I_2 = \frac{r_1^2}{r_2^2} I_1$$

14.3 Äänen eteneminen ja heijastuminen väliaineessa

Ääni on hiukkasten vuorovaikutusta aineessa. Siksi myös sen eteneminen riippuu siitä, kuinka hiukkaset ovat sitoutuneet toisiinsa. Ääni etenee kiinteissä aineissa nopeammin kuin kaasuissa ja nesteissä, koska kiinteän aineen hiukkaset ovat vahvemmassa vuorovaikutuksessa keskenään. Kiinteässä aineessa etenemisnopeus v on

$$(14.4) \quad v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

missä E on aineen kimmokerroin ja ρ tiheys.

Kaasuissa ja nesteissä etenemisnopeus on

$$(14.5) \quad v = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

missä K on aineen puristuvuuskerroin.

Taulukko 14.2 Äänen etenemisnopeuksia sekä aineen tiheyksiä eri väliaineissa

Aine	v (m/s)	ρ (kg/m ³)
ilma (20 °C)	343	1,2
vesi (20 °C)	1483	$9,98 \times 10^2$
rasva	1470	$9,70 \times 10^2$
aivot	1530	$1,02 \times 10^3$
lihas	1568	$1,04 \times 10^3$
luuydin	1700	$9,70 \times 10^2$
tiivis luu	3600	$1,70 \times 10^3$

Äänen nopeuden v , taajuuden f ja aallonpituuden λ välillä on yhteys

$$(14.6) \quad v = \lambda f$$

Esim. 14.1 Ultraäänen aallonpituus kudoksessa ja ilmassa

Tasoaallon äänen intensiteetti voidaan lausua myös **paineaallon amplitudin** $\hat{p}$ ja akustisen ominaisimpedanssin Z_s avulla

$$(14.7) \quad I = \frac{1}{2} \frac{\hat{p}^2}{Z_s}$$

Akustinen ominaisimpedanssi voidaan laskea äänen nopeuden v ja väliaineen tiheyden ρ avulla

$$(14.8) \quad Z_s = \rho v$$

Esim. 14.2 Kuulo- ja kipukynnystä vastaava paineamplitudi ja tehollinen äänenpaine

Äänen osuessa kahden aineen rajapintaan, sen heijastumisen määräävät aineiden akustiset impedanssit. Heijastuneen äänen intensiteetin suhde tulevan äänen intensiteettiin on

$$(14.9) \quad \frac{I}{I_0} = \left(\frac{Z_s - Z'_s}{Z_s + Z'_s} \right)^2$$

Jos aineiden akustiset impedanssit ovat yhtä suuret, ei heijastumista tapahdu. Haluttaessa saada mahdollisimmin paljon äänienergiaa siirtymään kahden väliaineen rajapinnan yli ovat akustiset impedanssit sovitettava lähelle toisiaan. Tätä kutsutaan *impedanssisovittamiseksi*.

Väliaineessa kulkiessaan ääni vaimenee eksponentiaalisesti. Jos I_0 on äänen intensiteetti sen osuessa väliaineeseen, matkan x kuljettuaan sen intensiteetti saadaan yhtälöstä

$$(14.10) \quad I = I_0 e^{-2\alpha x}$$

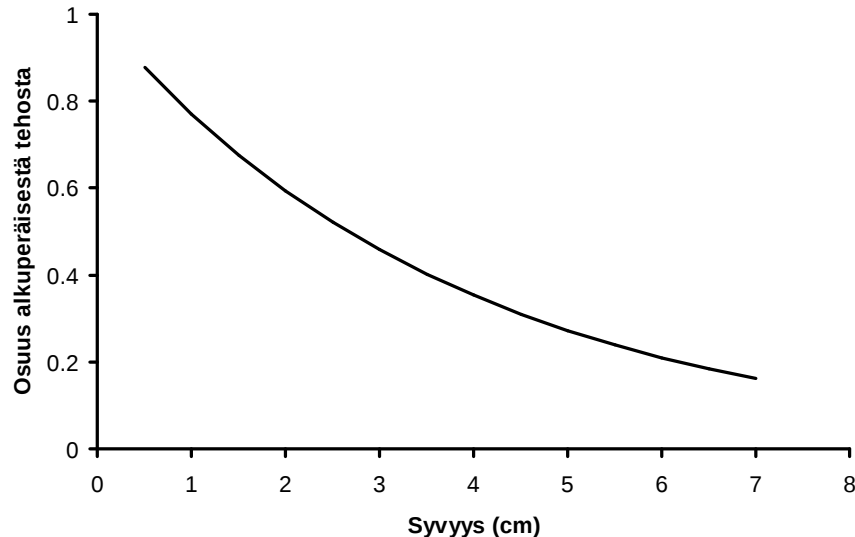
missä α on **matkavaimennuskerroin** (tai heikennyskerroin). Vaimennuskerroin riippuu äänen taajuudesta.

Äänen intensiteetti putoaa puoleen alkuperäisestä, kun ääni on kulkenut väliaineessa matkan

$$(14.11) \quad d_{1/2} = \frac{\ln(1/2)}{-2\alpha} = \frac{\ln 2}{2\alpha}$$

Paksuutta $d_{1/2}$ kutsutaan **puoliintumispaksuudeksi**.

Esim. 14.3 Ultraäänien puoliintumispaksuus lihaksessa ja vedessä



Kuva 14.2 1MHz:n taajuisen ultraäänien vaimeneminen lihaskudoksessa. 50%:a alkuperäisestä äänestä on vaimentunut, kun kudoksessa on edetty 2,7 cm:n syvyyteen.

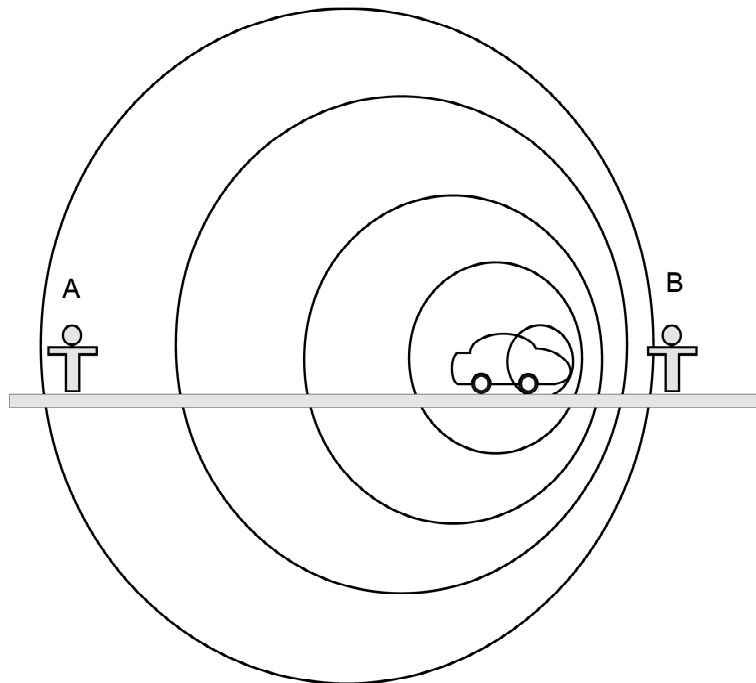
14.4 Dopplerin ilmiö

Dopplerin ilmiössä vastaanottajan havaitsema äänen taajuus riippuu vastaanottajan liikkeestä äänilähteen suhteen. Helpoin tilanne on ajatella autoa, joka toimii äänilähteenä ja lähestyy vastaanottajaa (henkilö B Kuva 14.3). Vastaanottaja havaitsee suuremman (korkeamman) äänen taajuuden kuin auto lähettää. Sitä vastoin vastaanottaja, joka on sijoittuneena niin, että äänilähde liikkuu hänestä poispäin, havaitsee pienemmän (matalamman) äänen taajuuden.

Olkoon äänilähteen lähettämä taajuus f ja äänilähteen nopeus V_L . Tällöin **vastaanottajan havaitsema taajuus äänilähteen liikuessa on**

$$(14.12) \quad f' = f \left(\frac{1}{1 \mp V_L / v} \right)$$

missä v on äänen nopeus, $-$ on lähestyvälle äänilähteelle ja $+$ loittonevalle äänilähteelle.



Kuva 14.3 Äänilähteen liikkeessa poispäin, vastaanottaja A havaitsee taajuuden pienentyneen. Vastaanottaja B havaitsee äänen taajuuden kasvaneen, koska äänilähde liikkuu kohti.

Dopplerin ilmiö havaitaan myös, jos vastaanottaja liikkuu ja äänilähde on paikallaan. Merkitään nyt vastaanottajan nopeutta V_v :llä. **Liikkuvan vastaanottajan havaitseman äänen taajuus on**

$$(14.13) \quad f' = f(1 \pm V_v / v)$$

missä + on lähestyvälle vastaanottajalle ja – loittonevalle vastaanottajalle.

15 LÄMPÖENERGIA JA TERMODYNAMIIKKA

Lämpö on liikettä. Kun kosketamme kuumaa astian pintaa, se minkä tunnemme lämpönä, on itse asiassa pienten molekyylien liikkeestä syntyvää pommitusta ihoamme vasten. Liikkeestä johtuen atomeilla ja molekyyileillä on liike-energiaa. Kun lämmitämme ainetta, sen atomien ja molekyylien liike-energia kasvaa. Samoin kasvaa myös aineen hiukkasten potentiaalienergia. Käytämme tästä hiukkasten satunnaisesti jakautuneesta liike- ja potentiaalienergiasta nimitystä lämpöenergia. Lämpöenergian muutokseen liittyy myös lämpötilan muutos.

15.1 Lämpö energian olomuotona

Lämpöenergia on aineen mikroskooppista liike- ja potentiaalienergiaa. Lämpöenergian yksikkönä käytetään usein kaloria, joka on tarvittavan lämpöenergian määrä, kun yksi gramma vettä lämpenee yhden asteen. Lämpöenergian ja lämpötilan välillä on siis yhteys. Tämä yhteys on muotoa

$$(15.1) \quad \Delta Q = mc\Delta T$$

missä ΔQ on lämpöenergian muutos, m aineen massa, c ominaislämpökapasiteetti ja $T\Delta$ lämpötilan muutos. **Ominaislämpökapasiteetti** on materiaalille ominainen suure, joka kertoo *kuinka paljon lämpöenergiaa tarvitaan nostamaan yhden kilogramman lämpötilaa yhden asteen*. Veden ominaislämpökapasiteetti on

$$c_{\text{vesi}} = 1 \text{ kcal}/(\text{kg}\cdot\text{K})$$

Lämpöenergiaa voidaan muuntaa mihin tahansa muuhun energian olomuotoon. Tällöin on usein tarpeellista muuntaa yksikkö kaloreista Jouleiksi.

$$1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J}$$

Esim. 15.1 Kehon lämpötila ja lämpöenergia (luennolla).

15.2 Lämmön siirtyminen

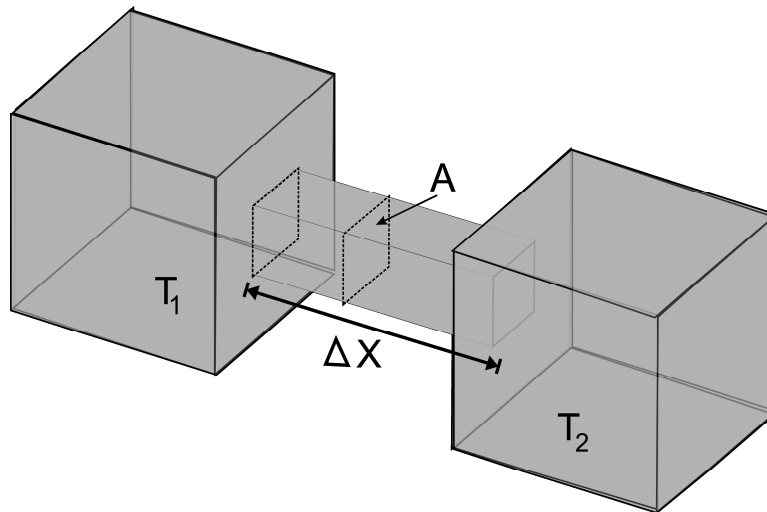
Lämpöenergia voi siirtyä paikasta toiseen kolmella tavalla: 1) johtumalla, 2) säteilemällä ja 3) väliaineen mukana kulkeutumalla. Lämpö johtuu materiaalissa atomien ja molekyylien värähtelyn siirtyessä aina viereisiin hiukkasiin. Lämpösäteilyn synnyssä aineen hiukkaset luovuttavat energiaansa sähkö- ja magneettikentille. Väliaineen mukana lämpö kulkeutuu siirtymällä nestemäiseen väliaineeseen, joka sitten virtaa pois lämpölähteen luota vieden näin lämpöä mukanaan. Huomautettakoon tässä että monissa biologian oppikirjoissa mainitaan neljäs lämmön siirtymisen muoto, hikoilu. Tämä on kuitenkin väärin, sillä hikoilu on vain väliaineen mukana tapahtuvaa lämmön kulkeutumista.

Lämmön siirtyminen johtumalla

Kuvitellaan kaksi lämpövarastoa, joiden lämpötilat ovat T_1 ja T_2 (Kuva 15.1). Ne on yhdistetty kiinteästä aineesta koostuvalla johtimella, jonka pituus on Δx ja poikkileikkauksen pinta-ala A . Siirtyneen lämpöenergian määrä ΔQ ajassa Δt on

$$(15.2) \quad \frac{\Delta Q}{\Delta t} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad \text{lämpövirta}$$

missä ΔT on lämpötilojen T_1 ja T_2 erotus ja k on materiaalille ominainen **lämmönjohtavuus**. Suuretta $\Delta Q / \Delta t$ kutsutaan myös **lämpövirraksi**.



Kuva 15.1 Lämmön johtuminen lämpövarastosta T_1 lämpövarastoon T_2

Hyvä lämmöneriste on sellainen kiinteä aine, jolla on pieni lämmönjohtavuus. Hyviä eristeitä ovat mm. lasikuitu ja styrokso. Huonoja eristeitä ja hyviä lämmönjohteita puolestaan ovat mm. metallit.

Taulukko 15.1 Eräiden aineiden lämmönjohtavuuksia^a

Materiaali	k
Kupari	205 W/(m·K)
Teräs	46
Ihmiskeho	0,5
Tiivis lumi (0 °C)	0,21
Untuva	0,019
Styrokso	0,008

^a Kaikki arvot huoneenlämmössä ellei toisin mainita

Kuten yhtälöstä (15.2) nähdään, kehon sisäosien jäähtymisnopeus riippuu ytimen ja kuoren välisestä lämpötilaerosta. Kylmällä se on suurimmillaan, mutta kuumalla ilmalla tai kovassa työssä, jolloin jäähtytystä tarvittaisiin, lämmön siirtyminen on vähäistä pienen lämpötilaeron takia. Onneksi kehollamme on muitakin jäähtytysmekanismeja.

Esim. 15.2 Kehon lämmönjohtuminen (luennolla)

Lämmön siirtyminen väliaineen mukana

Kuten edellä näimme, kehon passiivinen lämmön siirto johtumalla on vähäistä kuumalla ilmalla. Onneksi lämpöä voi siirtyä myös väliaineen, tässä tapauksessa veren, mukana. Lämmön kuljettaminen väliaineen mukana on aktiivinen menetelmä, mikä tarkoittaa, että sen ylläpitämiseen kuluu energiaa. Toki tehon, joka kuluu lämpövirran ylläpitämiseen aktiivisella menetelmällä, on oltava pienempi kuin itse lämpövirran, jotta menetelmästä olisi hyötyä. Kehon aktiivisessa

lämmönkuljetuksessa veren tilavuusvirta kasvaa ja kapillaarien sulkijat avautuvat mahdollistaen veren virtauksen myös pintakerrokseen. Vertailtaessa passiivista (johtumalla) ja aktiivista (verenkierron välityksellä tapahtuvaa) lämmön siirtymistä havaitaan, että erityisesti lämpimissä olosuhteissa aktiivinen on ylivoimainen. Kylmällä ilmalla passiivisen lämmönjohtumisen lämpövirta on n. 100 W, mutta kuumalla ilmalla vain n. 10 wattia (vertaa Esim. 15.2). Kokeellisesti on pystytty osoittamaan, että lämpimässä huoneessa aktiivinen menetelmä pystyy poistamaan ylimääräistä lämpöä teholla 100 - 200 W ennen kuin kehon lämpötila alkaa nousta.

Lämpösäteily

Perehdymme vielä myöhemmissä luvuissa tarkemmin sähkömagneettiseen säteilyyn, mutta seuraavassa erittäin lyhyt esittely. *Lämpösäteily on sähkömagneettista säteilyä* (SM-säteily), aivan kuten esim. röntgensäteily, radioaallot tai näkyvä valo. Näitä erottelee toisistaan vain niiden aallonpituus. Kaikki SM-säteily syntyy samalla tavalla; Varattu hiukkanen siirtää osan energiastaan säteilyksi. Mikä tahansa kappale, joka sisältää varattuja hiukkasia, voi synnyttää SM-säteilyä tai vastaanottaa sitä. Kun kappale synnyttää SM-säteilyä, se lähettää eli **emittoi** energiaa. Vastaanottaessaan säteilyä kappale imee itseensä eli **absorboi** energiaa.

Mustan kappaleen säteilemä lämpövirta on verrannollinen sen pinta-alaan ja lämpötilan neljanteen potenssiin.

$$(15.3) \quad \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \sigma A T^4$$

missä verrannollisuuskertoimen σ (sigma) on Stefanin-Boltzmannin vakio, ja sen arvo on

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4\text{)}$$

Yhtälö (15.3) on voimassa vain ns. mustalle kappaleelle, joka absorboi kaiken siihen osuvan säteilyn. Muille kappaleille säteilemällä siirtyvä lämpövirta on

$$(15.4) \quad \frac{\Delta Q}{\Delta t} = K \sigma A T^4$$

missä kerroin K (< 1) riippuu pinnan laadusta ja säteilyn aallonpituudesta. Mustalle kappaleelle $K = 1$ kaikilla aallonpituuksilla.

Koska kappale sekä emittoi että absorboi säteilyä kaiken aikaa, kokonaislämpövirtaa laskettaessa on otettava huomioon kappaleen ja ympäristön lämpötilojen erotus

$$(15.5) \quad \frac{\Delta Q}{\Delta t} = K \sigma A (T_1^4 - T_2^4)$$

missä T_1 on kappaleen lämpötila ja T_2 ympäristön lämpötila. Jos lämpövirran arvo on positiivinen, lämpöä siirtyy kappaleesta ympäristöön, ja jos arvo on negatiivinen, siirtyy lämpöä ympäristöstä kappaleeseen.

Esim. 15.3 Kehon lämpövirta ympäristöön säteilemällä (luennolla).

15.3 Tilanmuutokset

Aineen absorboima energia ei ainoastaan johda lämpötilan nousuun, vaan myös siihen, että aine saattaa muuttaa olomuotoaan kiinteästä nesteeksi tai nesteestä höyryksi, jos sulamis- tai

kiehumispiste ylitetään. Sulamis- tai kiehumispisteessä kappaleen atomeiden lämpöliike kasvaa niin suureksi, että molekyylien väliset sidokset rikkoontuvat ja kappale muuttaa muotoaan kiinteästä nesteeksi tai nesteestä kaasuksi. Vaikka kappale absorboi energiaa, sen lämpötila ei kasva, koska kaikki energia kuluu kemiallisten sidosten rikkomiseen. Lämpöenergian määrää, joka kuluu aineen olomuodon muuttamiseksi, kutsutaan **muodonmuutoslämmöksi** tai täsmällisemmin, **sulamis-** ja **höyrystyslämmöksi**. Molempien yksikkö on kJ/kg. Veden sulamispiste on 0 °C ja sulamislämpö

$$c_s = 334 \text{ kJ/kg}$$

ja kiehumispiste 100 °C ja höyrystyslämpö

$$c_k = 2,26 \text{ MJ/kg}$$

15.4 Termodynamiikan ensimmäinen pääsääntö

Ajatellaan esimerkiksi kaasua ja merkitään sen sisäenergian muutosta ΔE , siihen siirrettyä lämpöä ΔQ ja kaasun tekemää työtä ΔW . Nyt termodynamiikan ensimmäinen sääntö kuuluu:

Kun käynnistämme tapahtumien sarjan, johon sisältyy lämpöä ja tehtyä työtä, ja jossa systeemin tila muuttuu alkuperäisestä makroskooppisten muuttujien kuvaamasta tilasta uusien makroskooppisten muuttujien kuvaamaan tilaan, on sisäenergian muutoksen

$$(15.6) \quad \Delta E = \Delta Q - \Delta W$$

suuruus riippumaton tapahtumien järjestyksestä.

Termodynamiikan ensimmäinen pääsääntö kertoo, että energia säilyy, ja että energian muutoksen suuruus voidaan laskea pelkästään makroskooppisten muuttujien avulla. Seuraava esimerkki havainnollistaa kuinka termodynamiikan ensimmäistä sääntöä voidaan käyttää hyväksi määritettäessä nestemäisen aineen tilanmuutoksiin tarvittavaa energiaa.

Esim. 15.4 Kehon nesteen höyrystymiseen tarvittava energia (luennolla).

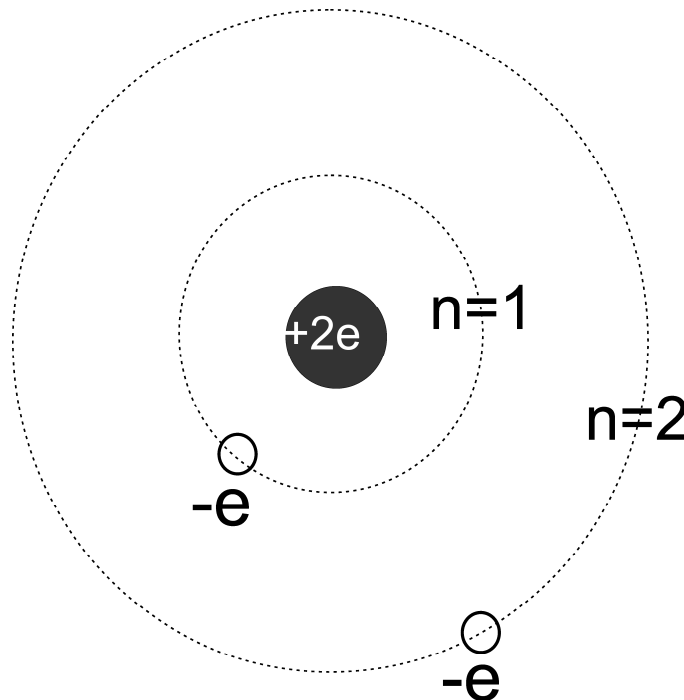
16 ATOMI- JA MOLEKYYLIFYSIIKKA

Aiemmin luvussa 10 olemme nähneet, että informaatio on energiaa. Emme voi kerätä tietoa ihmiskehosta ilman energian vuorovaikutusta. Tässä luvussa tarkastelemme atomin rakennetta sekä erityisesti kahden hiukkasen, elektronin ja fotonin, vuorovaikutusta. Atomin rakenteella, ja ennen kaikkea sen elektronien sijainnilla, on merkittävä vaikutus kaikkiin luonnonilmiöihin. Elektronien sijainti atomissa määrää kuinka atomit sitoutuvat keskenään ja muodostavat molekyylejä. Molekyylien rakenne taas määrää kuinka, yksinkertaiset rakenteet muodostavat monimutkaisia toiminnallisia yksiköitä ja eläviä kudoksia.

Kaikki tiedämme, että kehomme koostuu atomeista. Nämä atomitkin koostuvat vielä alkeishiukkasista, joita on monia erilaisia ja niillä on erilaisia ominaisuuksia kuten massa tai sähkövaraus. Tällä kurssilla mielenkiinnon kohteena on neljä alkeishiukkasta: elektroni, protoni, neutroni ja foton. Näistä elektronilla, protonilla ja neutronilla on massa, mutta vain elektronilla ja protonilla sähkövaraus. Fotonilla ei ole kumpaakaan – sen ominaisuus on taajuus. Neutronit, protonit ja elektronit muodostavat materiaa, ja fotonit on sähkömagneettisten kenttien vuorovaikutuksen välittäjä.

16.1 Bohrin atomimalli ja atomien energiatasot

Bohrin atomimalli on nykyisten atomimallien esi-isä. Vaikkei se enää täysin vastaakaan sitä kuvaa, jolla nykyisin atomia kuvataan, se on ymmärrettävä, ja sisältää nykyisten mallien tärkeimmän ominaisuuden: **energian kvantittumisen**. Bohrin atomimallissa on äärimmäisen raskas positiivisesti varautunut ydin, jota kiertää negatiivisesti varautuneiden **elektronien** joukko (Kuva 16.1). Ydin sisältää positiivisesti varautuneita **protoneita** ja varauksettomia **neutroneja**. Ytimen kokonaisvaraus on $+Ze$ ja elektronien $-Ze$, jossa Z on samanmerkkisesti varautuneiden hiukkasten kokonaislukumäärä ja e elektronin alkeisvaraus. Elektronit kiertävät ydintä kukin omalla kiertoradallaan, ja positiivisten ja negatiivisten hiukkasten välinen vetovoima estää niitä karkaamasta. Negatiivisesti ja positiivisesti varautuneiden hiukkasten lukumäärä on yhtä suuri.



Kuva 16.1 Bohrin atomimalli Heliumista. Keskellä on tiivis positiivisesti varautunut ydin (varaus $+2e$), jota kiertävät omilla radoillaan elektronit (2 kpl joilla molemmilla varaus $-e$). Pääkvanttilukua $n = 1$ vastaa energia E_1 ja pääkvanttilukua $n = 2$ energia E_2 .

Jos tulemme pois atomitasolta makroskooppiseen maailmaan, havaitsemme, että negatiivisesti ja positiivisesti varautuneet hiukkaset ovat tasaisesti jakautuneet materiassa. On meidän onnemme, että näin on; sähköisesti erimerkkisesti varautuneiden hiukkasten välillä vallitsee valtava vetovoima, joka äkkiä lytistäisi kasaan kaikki kappaleet, jos varaukset olisivat erillään.

Energian kvantittuminen tarkoittaa sitä, että energia voi esiintyä vain tietyin kokoisina paketteina - kvanteina. Jos atomien energian kvantittumiselle haluaisi etsiä biologista analogiaa, sellainen voisi olla vaikka lihaksen voimantuotto, jossa lihaksen tuottama voima voi lisääntyä vain yhden motorisen yksikön tuottaman voiman verran. (Motorinen yksikkö sisältää yhden liikehermosolun ja kaikki siihen kiinnitetyt lihassolut. Se on siis lihaksen pienin yksikkö, jota voidaan ohjata.)

Lihassoiman kvantti olisi siis yksi motorinen yksikkö. *Atomissa jokaiselle elektronin kiertoradalle on oma pääkvanttilukunsa n ja sitä vastaava energia E_n .* Pääkvanttiluku on kokonaisluku. Emme anna yhtälöä, joka liittyy pääkvanttiluvun ja energian toisiinsa, koska emme ole kiinnostuneet kiertoratojen absoluuttisesta energiasta. Sen sijaan olemme kiinnostuneet mitä tapahtuu, kun elektroni vaihtaa kiertorataansa ja samalla kvanttilukuaan ja energiaansa.

Nykyään vallitseva atomimalli on hieman monimutkaisempi, ja kvanttilukuja on kaiken kaikkiaan neljä: 1) pääkvanttiluku n ; 2) sivukvanttiluku l ; 3) magneettinen kvanttiluku m ; ja 4) spinkvanttiluku m_s . Tällä kurssilla meidän ei tarvitse välittää näistä kvanttiluvuista, vaan riittää, että tiedämme atomin elektronien energian olevan kvantittunut; energia voi saada vain määrättyjä arvoja.

16.2 Fotonin ja elektronin vuorovaikutus

Vaihtaessaan kiertorataansa elektroni joka saa tai menettää energiaa, riippuen siitä siirtyykö se korkeammalle vai matalammalle energiatasolle. Jos elektroni menettää energiaa, on tämä energia siirrettävä jollekin. Se jokin on **fotoni**, joka on sähkömagneettisen säteilyn hiukkanen. Siirtyessään

ylemmältä energiatasolta E_2 alemmalle energiatasolle E_1 elektroni emittoi fotonin, jonka energia on näiden kahden energiatason erotus

$$(16.1) \quad E_{\text{fotoni}} = \Delta E = E_2 - E_1$$

Aikaisemmin mainitsimme, ettei fotonilla ole massaa eikä sähkövarausta. **Fotonin energian määrää puhtaasti fotonin taajuus f .** Energian ja taajuuden välillä on yhteys

$$(16.2) \quad \Delta E = hf \quad \text{fotonin energia}$$

Tästä nähdään suoraan, että elektronin energiatasojen erotuksen ollessa ΔE , emittoitun fotonin taajuus on

$$(16.3) \quad f = \frac{\Delta E}{h}$$

missä kerroin h on **Planckin vakio**, jonka arvo on

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Atomitasojen energioita laskettaessa on usein mielekkäämpää käyttää energian yksikkönä **elektronivoltteja (eV)**, jolloin Planckin vakio saa arvon

$$h = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eVs} \quad \text{Planckin vakio}$$

Elektronivoltin ja Joulen välinen yhteys on

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Fotonin nopeus on yhtä kuin valon nopeus c ja sen aallonpituus voidaan laskea yhtälöstä

$$(16.4) \quad c = f\lambda$$

jossa **valon nopeus c** on vakio ja sen suuruus on

$$(16.5) \quad c = 3,00 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{valon nopeus}$$

Edellä käytimme esimerkkinä energiatasojen E_2 ja E_1 välistä erotusta. Mitään rajoitusta energiatasojen siirtymien välillä ei kuitenkaan ole, vaan *elektroni voi siirtyä minkä tahansa kahden energiatason välillä.*

Elektroni voi myös vastaanottaa eli absorboida fotonin, jolloin se luonnollisesti saa lisää energiaa ja siirtyy alemmalta energiatasolta ylemmälle. Fotonin energia törmäyksen jälkeen on törmäystä edeltäneen energian ja elektronille luovutetun energian välinen erotus. Jos fotonin energia on riittävän suuri, se voi aiheuttaa elektronin karkaamisen ytimen vaikutuskentästä. Energiaa, joka vaaditaan elektronin irrottamiseksi atomista, kutsutaan **elektronin sidosenergiaksi**. Elektronin karatessa atomilta, muodostuu positiivisesti varautunut atomi. Tällaista atomia, jonka kokonaisvaraus on eri kuin nolla, kutsutaan **ioniksi**. Fotonin ja elektronin vuorovaikutusta, jossa elektroni irtoaa atomilta, nimitetään **valosähköiseksi ilmiöksi**.

Fotonilla on myös muita vuorovaikutustapoja elektronien kanssa. **Comptonin siroonnasta** on kyse silloin, kun fotonin energia on paljon suurempi kuin elektronin sidosenergia. Tällöin siroonseen fotonin energiaa ei voida enää yksinkertaisesti laskea fotonin energian ja elektronin sidosenergian erotuksena. Fotoni voi myös törmätä atomin ytimeen. Emme kuitenkaan tarkastele näitä vuorovaikutuksia lähemmin. Valosähköinen ilmiö on vallitseva vuorovaikutustapa vedessä (ihmiskehosta suurin osa on vettä), kun fotonin energia on alle 30 keV. Energia vastaa lähes kaikkea SM-säteilyä. Ainoastaan äärimmäisen suurienergiset gamma-fotonit omaavat suuremman energian.

16.3 Ytimen radioaktiivisuus

Protonien määrä atomin ytimessä määrää mikä alkuaine on kyseessä. Protonit ovat sähkövaraukseltaan samanmerkkisiä ja pyrkivät siksi pakenemaan toistensa luota. Ytimen vakauttamiseksi ytimessä on myös neutroneja. **Neutronit** ovat hiukkasia, joilla on protonin massa mutta ei sähkövarausta. Ytimen eri kombinaatioita, joissa protoneiden määrä pysyy mutta neutronien määrä vaihtelee, kutsutaan **isotoopeiksi**. Joillakin kombinaatioilla ydin ei ole vakaa, vaan hajoaa spontaanisti pienemmiksi hiukkasiksi tai muuttaa **viritystilaansa** korkeammalta energiatasolta matalammalle energiatasolle. Tätä kutsutaan **radioaktiiviseksi hajoamiseksi** ja aineen sanotaan olevan radioaktiivinen. Radioaktiivisessa hajoamisessa syntyy ionisoivia hiukkasia, jonka vuoksi se on vaarallista. Tavallisesti yksi kombinaatio on pysyvin ja sitä kutsutaan itse alkuaineeksi.

Esimerkiksi happiatomilla on ytimessään kahdeksan protonia, mutta neutronien määrä voi vaihdella kahdeksasta kymmeneen, ja silti atomi on vakaa. On myös muita mahdollisia neutronien lukumääriä, mutta tällöin happiatomi ei ole vakaa vaan hajoaa pienempiin osiin sekunnin murto-osissa.

Radioaktiivisen aineen aktiivisuus A ilmoittaa hajoavien ytimien määrän aikayksikössä. Se on

$$(16.6) \quad A = A_0 e^{-\lambda t}$$

missä A_0 on aineen aktiivisuus alussa, λ hajoamisvakio ($[\lambda] = 1\text{s}^{-1}$) ja t aika. Aktiivisuuden yksikkö on becquerel (Bq). Yksi becquerel vastaa yhtä hajoamista sekunnissa $1\text{ Bq} = 1\text{ s}^{-1}$. Radioaktiivisen aineen pitkäikäisyyden mittarina käytetään **puoliintumisaikaa**, eli aikaa jolloin aineen aktiivisuus on vähentynyt puoleen. Puoliintumisaika on

$$(16.7) \quad T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad \text{puoliintumisaika}$$

Puoliintumisajalla on merkitystä mm. lääketieteellisissä kuvauksissa tai hoidoissa. Toisaalta puoliintumisaika ei saisi olla liian lyhyt, jotta aine ehditään annostella kohteeseensa, muttei liian pitkä, jottei potilas käsiteltyä jälkeen säteilisi ympäristöönsä.

16.4 Skalaarikentän gradientti

Skalaarikentässä suurella on jokin arvo kaikissa kentän pisteissä. Jos kenttä on homogeeninen, on suureen arvo täysin sama kaikissa kentän pisteissä. Sen sijaan jos kenttä vaihtelee, myös suureen arvo muuttuu. Skalaarikenttää merkitään tavallisesti $f(x,y,z)$, jossa f on funktio, jonka mukaan kentän arvo määräytyy, ja x , y ja z kentän paikkakoordinaatit. Esimerkkinä skalaarikentästä voi olla vaikka kenttä, joka antaa kaasun tiheyden kaikissa astian pisteissä, ja sitä merkittäisiin silloin esim. $\rho(x,y,z)$. Jos haluamme kuvata mihin suuntaan kenttä muuttuu ja millä voimakkuudella, tarvitsemme

tähän vektorin. Skalaarikentän $f(x,y,z)$ muutoksen suunnan ja voimakkuuden osoittaa vektori, jota kutsumme **skalaarikentän gradientiksi**. Matemaattisesti kirjoitettuna se on

$$(16.8) \quad \text{grad}(f) = \frac{\partial f}{\partial x} \hat{x} + \frac{\partial f}{\partial y} \hat{y} + \frac{\partial f}{\partial z} \hat{z}$$

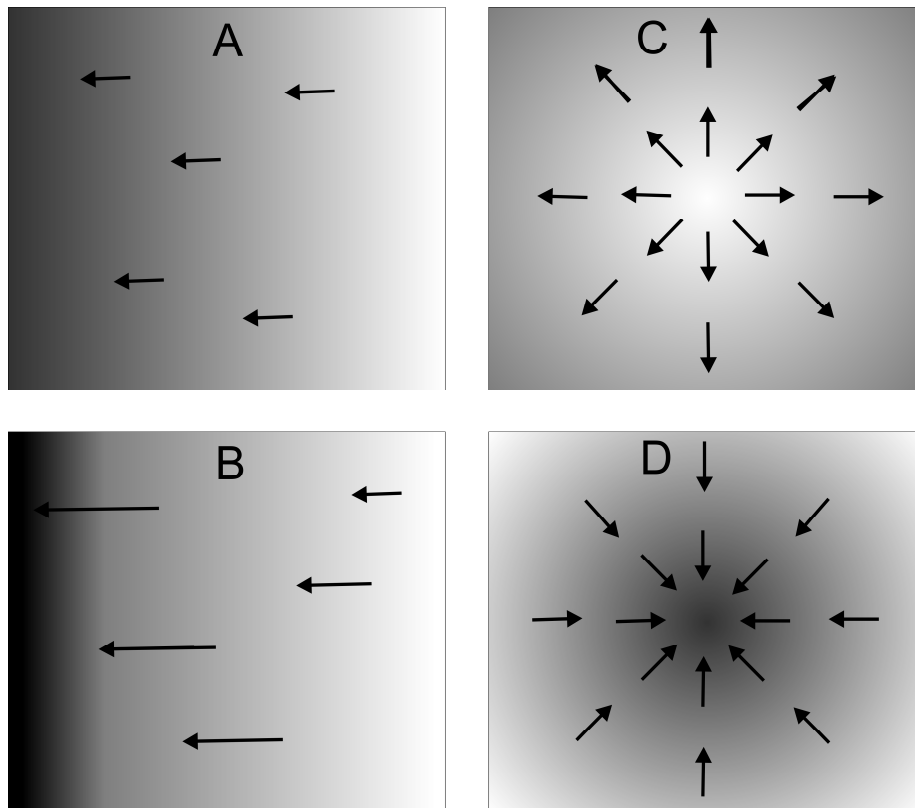
Merkintätapoihin liittyvä huomautus: Erityisesti fyysikoilla ja insinööreillä on tapana määritellä differentiaalioperaattori

$$(16.9) \quad \nabla = \frac{\partial}{\partial x} \hat{x} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{y} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{z}$$

(joka luetaan **nabla**) ja kirjoittaa

$$(16.10) \quad \text{grad}(f) = \nabla f = \frac{\partial f}{\partial x} \hat{x} + \frac{\partial f}{\partial y} \hat{y} + \frac{\partial f}{\partial z} \hat{z}$$

Alla oleva kuva antaa graafisen esityksen muuttuvasta skalaarikentästä ja sen gradienttivektorista kentän eri pisteissä. Kuva 16.2A, B, C ja D skalaarikentän voimakkuutta kuvataan harmaan eri intensiteeteillä siten, että tummempi väritys edustaa suurempaa kentän voimakkuutta. Nuolten suunta kuvaa kentän kasvun suuntaa ja pituus kasvun suuruutta. Ainostaan kuvassa B kentän muutos vaihtelee, jolloin myös gradienttivektorin pituus muuttuu.



Kuva 16.2 Gradienttivektorit tasaisesti oikealta vasemmalle muuttuvassa kentässä (A) ja kentässä, jonka muutos suurenee oikealta vasemmalle (B). Säteen suuntaiset gradienttivektorit tasaisesti muuttuvassa kentässä (C ja D). Tummempi alue kuvaa suurempaa kentän voimakkuutta.

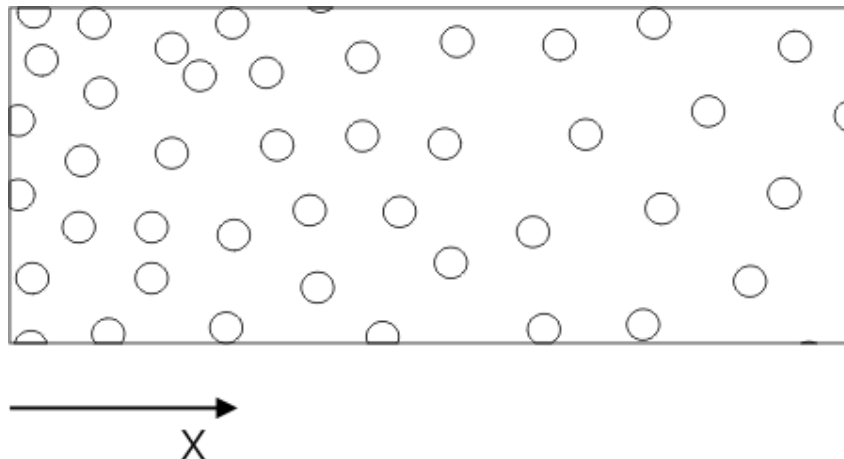
Esim. 16.1 Skalaarikentän $f(x, y, z) = 2x + yz - 3y^2$ gradientin laskeminen (luennolla).

16.5 Mooli ja ainemäärä

Yksi **mooli** ainetta on määritelty niin, että siinä on aina $6,02214 \cdot 10^{23}$ hiukkasta. Lukua kutsutaan myös **Avogadron vakioksi**. Aineen määrä voidaan ilmoittaa massan lisäksi myös **ainemäärän** avulla. Ainemäärän yksikkö on mooli (mol). Alkuaineen yhden moolin massa, **moolimassa**, voidaan lukea suoraan alkuaineiden jaksollisesta järjestelmästä. Minkä tahansa seoksen moolimassa puolestaan saadaan laskemalla yhteen kaikkien sen alkuaineiden moolimassat.

16.6 Konsentraatio ja molekyyliden diffuusio

Konsentraatio ilmoittaa hiukkasten lukumäärän tilavuusyksikössä. Konsentraation yksikkö on mol/l tai mol/dm³. Kuvitellaan nyt nestettä tai kaasua, jonka konsentraatio ei ole tasainen (Kuva 16.3). Silloin ajan mittaa hiukkaset liikkuvat pienemmästä konsentraatiosta suurempaan ja konsentraatioerot tasoittuvat. Tätä ilmiötä kutsutaan **diffuusioksi**.



Kuva 16.3 Aineen hiukkaset liikkuvat suuremmasta konsentraatiosta pienempään.

Tarkastellaan Kuva 16.3 tilannetta, jossa konsentraatioeroista johtuvan molekyylivirran J_d suunta on oikealta vasemmalle. Molekyylivirran arvo saadaan yhtälöstä

$$(16.11) \quad J_d = -D \frac{dc}{dx}$$

missä D on molekyyliden diffuusiokerroin ja dc/dx konsentraation muutos x -akselin suunnassa. Diffuusiokertoimen yksikkö $[D] = \text{m}^2/\text{s}$ ja molekyylivirran yksikkö $[J_d] = \text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$. Molekyylivirta siis ilmoittaa hiukkasten määrän sekunnissa pinta-alaa kohti. Miinusmerkki yhtälön (16.11) oikealla puolella ilmoittaa, että molekyylivirran suunta on päinvastainen konsentraation kasvun kanssa.

Konsentraatio voi toki muuttua muussakin kuin vain x -akselin suunnassa. Olkoon $c(x, y, z)$ skalaarikenttä, joka antaa konsentraation arvon muuttujilla x, y ja z . Molekyylivirran suunta ja suuruus saadaan konsentraatiokentän gradientista seuraavasti

$$(16.12) \quad \vec{J}_d = -D \cdot \text{grad}(c) = -D \cdot \nabla c = -D \cdot \left(\frac{\partial c}{\partial x} \hat{x} + \frac{\partial c}{\partial y} \hat{y} + \frac{\partial c}{\partial z} \hat{z} \right)$$