

# 17 Lämpötila ja -määrä

---

17-1 Lämpötila ja terminen tasapaino

17-2 Lämpötila-asteikot

17-3 Kelvin-asteikko ja kaasulämpömittari

17-4 Lämpölaajeneminen

17-5 Lämpömäärä

17-6 Kalorimetria ja faasitransitiot

17-7 Lämmön siirtymisen mekanismit

---

# Johdanto

---

*Termodynamiikka* (thermodynamics) on klassisen fysiikan osa-alue, joka tutkii energian, työn ja *lämpömäärän* (heat) suhteita erilaisissa systeemeissä.

Tässä luvussa käsitellään makroskooppisen objektin *lämpötilaa* (temperature) ja -määrää. Luvussa 18 tarkastellaan näiden käsitteiden suhdetta aineen mikroskooppisten osasten (atomien ja molekyylien) liikkeeseen.

---

# Lämpötila

---

Tiedetään, että kappaleen lämpötila perustuu jollain tavalla sen hiukkasten lämpöliikkeen määrään, joten ongelmaksi jää kuinka lämpötilan suure määritellään ja kuinka se voidaan mitata. Lämpötila ja lämpömäärä ovat makroskooppisia suureita, kun taas molekyylien liike-energia on mikroskooppinen suure.

Käytännön *lämpömittarit* (thermometer) perustuvat yleensä aineen makroskooppisiin ominaisuuksiin, esim. *lämpölaajenemiseen* (thermal expansion).

---

## Terminen tasapaino

---

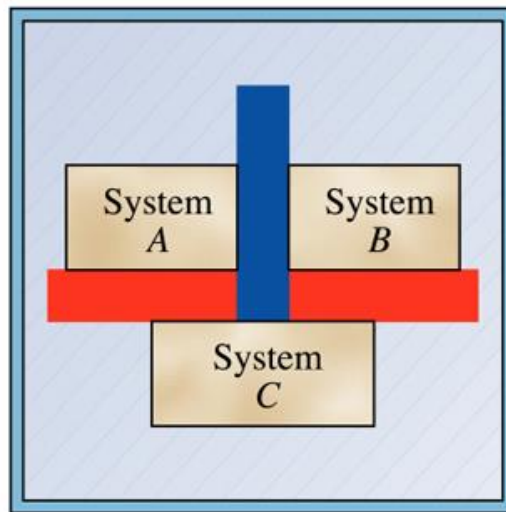
Kahden kappaleen sanotaan olevan *termisessä tasapainossa* (thermal equilibrium) keskenään, jos kappaleiden välinen vuorovaikutus ei aiheuta muutosta systeemin tilassa.

Esimerkiksi, jos kaksi kappaletta on yhdistetty hyvällä *lämmönjohteella* (conductor) toisiinsa, niin kappaleiden välinen lämpötilaero tasoittuu ja systeemi saavuttaa termisen tasapainon nopeasti. Jos taas kappaleet on eristetty toisistaan *lämmöneristeellä* (insulator), niin termisen tasapainon saavuttaminen kestää kauan. Jotta lämpömittari näyttäisi oikeaa lukemaa, tulee sen yleensä olla termisessä tasapainossa mitattavan kohteen kanssa.

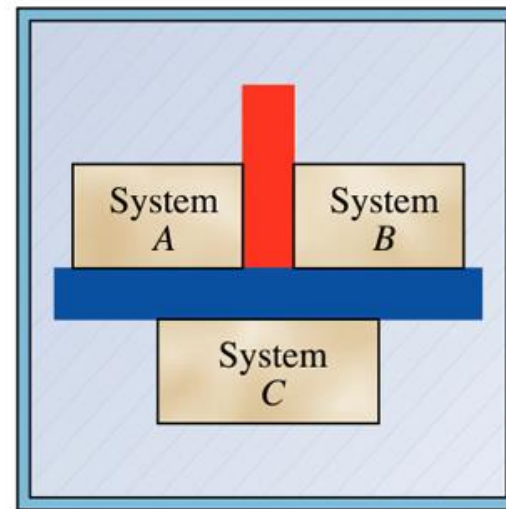
---

# Nollas pääsääntö

*Termodynamiikan nollas pääsääntö* (zeroth law of thermodynamics): jos kappaleet A ja C sekä B ja C ovat keskenään termisessä tasapainossa, niin silloin myös A ja B ovat termisessä tasapainossa keskenään.



(a)



(b)

## Nollas pääsääntö

---

Toisin sanoen terminen tasapaino tarkoittaa, että kappaleet ovat samassa lämpötilassa keskenään. Lämpömittarin tulee olla termisessä tasapainossa mitattavan kohteen kanssa, koska todellisuudessa lämpömittari mittaa omaa lämpötilaansa ja ainoastaan termisessä tasapainossa se on sama kuin mitattavan kohteen lämpötila.

---

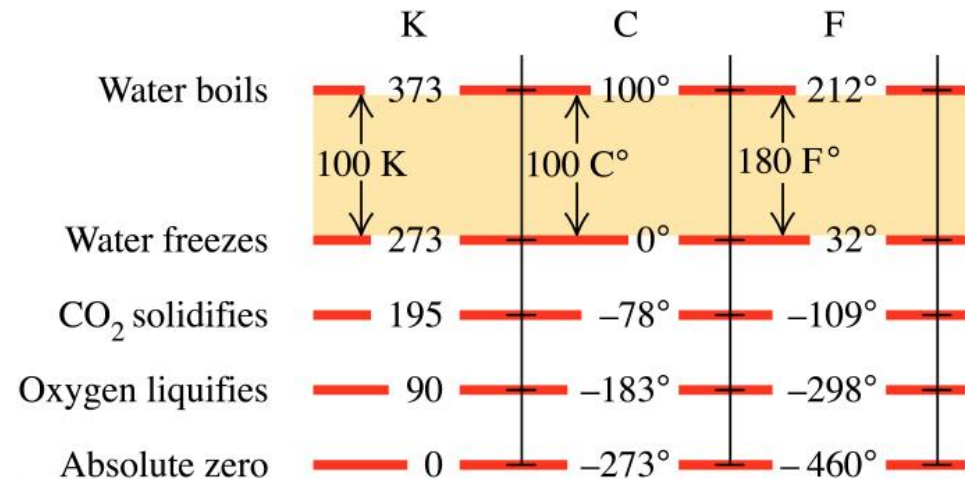
# Lämpötila-asteikot

Lämpötilaa mitattaessa *lämpötila-asteikko* (temperature scale) voidaan valita mielivaltaisesti. Eräs yleisimmistä asteikoista on Celsius-asteikko, jonka määrittelee veden sulamispisteen lämpötila  $0^{\circ}\text{C}$  ja kiehumispisteen  $100^{\circ}\text{C}$ . Fahrenheit-asteikossa vastaavat arvot ovat  $212^{\circ}\text{F}$  (kiehumispiste) ja  $32^{\circ}\text{F}$  (sulamispiste). Muuntoyhtälöt asteikkojen välillä ovat

$$T_F = \frac{9}{5}T_C + 32^{\circ}$$

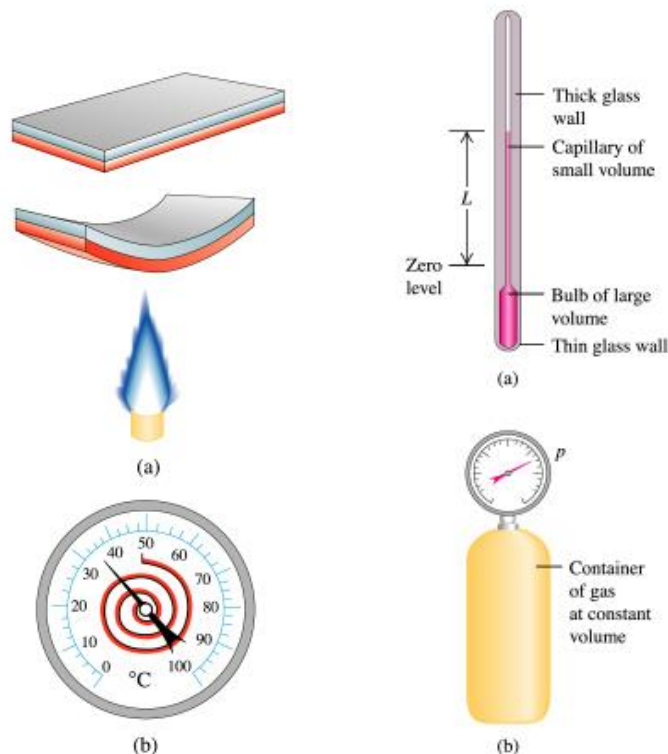
ja

$$T_C = \frac{5}{9}(T_F - 32^{\circ})$$



# Lämpötilan mittaus

Lämpötila voidaan määrittää esimerkiksi mittaamalla nestepinnan korkeutta putkessa, kaksoimetalliliuskan taipumiskulmaa, resistanssia ohuessa metallilangassa tai puolijohdepalassa (tarkka). Korkeita lämpötiloja voidaan mitata tarkkailemalla kappaleen lähettämän lämpösäteilyn intensiteettiä optisellä pyrometrillä (ei tarvitse kontaktia).



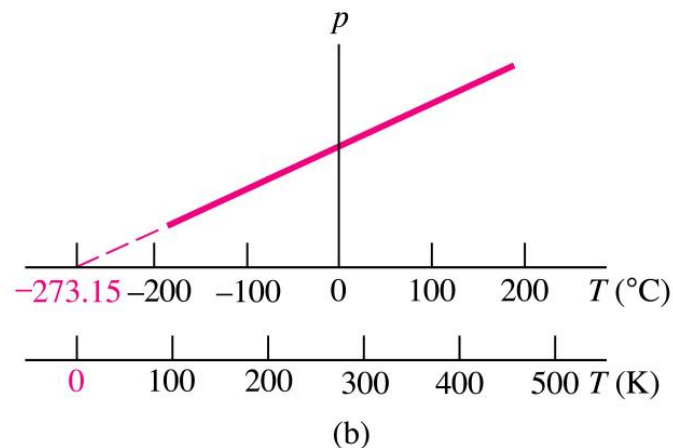


## Kelvin-asteikko

Useat lämpötilan mittaussmenetelmät eivät ole lineaarisia. Sen sijaan kaasulämpömittari, joka mittaa vakio-tilavuudessa olevan kaasun painetta, on hyvin lähellä lineaarista. Jos kaasun paine mitataan veden sulamis- ja kiehumis-pisteissä ja ekstrapoloidaan siitä kaasun nollapaineen lämpötila, saadaan tulokseksi useimmille kaasuille  $-273,15\text{ °C}$ . Tämä on perustana Kelvin-asteikolle, joka saadaan Celsius-asteista muunnoskaavaa

$$T_K = T_C + 273,15$$

käyttäen. Kelvin-asteikon yksikkö on K.



## Veden kolmoispiste

Virallinen määritelmä Kelvin-asteikolle on veden kolmoispisteen lämpötila, joka on  $T_{tr} = 273,16$  K. Veden *kolmoispiste* (triple point) on tila, jossa vesi esiintyy yhtä aikaa kaikissa kolmessa olomuodossa (paineessa  $p_{tr} = 610$  Pa ja lämpötilassa  $T_{tr} = 0,01^\circ\text{C}$ ). Kelvin-asteikon määrittämiseen riittää yksi ainoa lämpötilapiste, koska vakiotilavuudessa olevan kaasumäärän lämpötila on

$$T = T_{tr} \frac{p}{p_{tr}} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{T_1}{T_2} = \frac{p_1}{p_2}.$$

# Absoluuttinen nollapiste

---

Kelvin-asteikko on absoluuttinen lämpötila-asteikko, koska sen lämpötilan nollapiste  $T = 0 \text{ K}$  on ns. *absoluuttinen nollapiste* (absolute zero). Absoluuttisessa nollapisteessä molekyylien/atomien systeemi on tilassa, jossa sen kokonaisenergia on pienin mahdollinen. Kuitenkaan ei voida sanoa, että molekyylien liike lakkaa kokonaan.

---

# Lämpölaajeneminen

Useimmat materiaalit laajenevat lämmitessään. Tarkastellaan sauvaa, jonka pituus on  $L_0$  lämpötilassa  $T_0$ . Kun lämpötila nousee  $\Delta T$ :n verran, sauvan pituuden muutos on

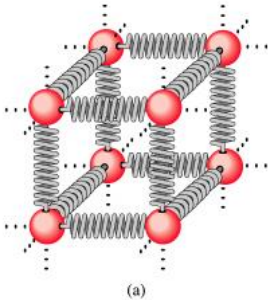
$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T ,$$

joten pituus lämpötilassa  $T_0 + \Delta T$  on

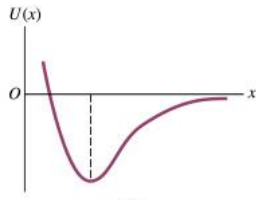
$$L = L_0 + \Delta L = L_0 (1 + \alpha \Delta T) .$$

Vakio  $\alpha$  on *pituuden lämpölaajenemiskerroin* (coefficient of linear expansion). Yhtälö on approksimaatio, eikä päde suurilla lämpötilaväleillä  $\Delta T$  eikä välttämättä kaikilla lämpötilan alkuarvoilla  $T_0$ .

# Lämpölaajenemisen syy



(a)

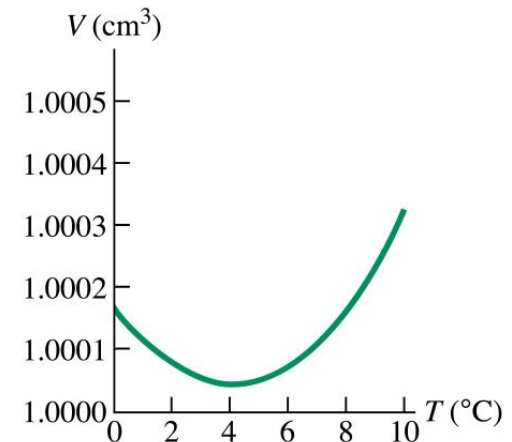


(b)

Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Lämpölaajenemisen syy on se, että yleensä molekyylien välinen potentiaalienergiakäyrä ei ole symmetrinen tasapainoaseman ympärillä, vaan nousee loivemmin suuremmilla etäisyyksillä. Siksi systeemin kokonaisenergian (lämpötilan) noustessa molekyylien etäisyys toisistaan kasvaa.

Poikkeuksellinen materiaali on mm. vesi, jonka tiheys on suurimmillaan, kun  $T = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , joten se laajenee jäähtyessään tämän lämpötilan alapuolella.



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

## Tilavuuden lämpölaajeneminen

Esimerkiksi kuution muotoisen kappaleen tilavuus kasvaa lineaarisesti lämpötilan funktiona

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T ,$$

missä  $\beta$  on tilavuuden lämpölaajenemiskerroin. Toisaalta kuution tilavuus lämpötilassa  $T_0$  voidaan lausua sivun pituuden  $L_0$  avulla  $V_0 = L_0^3$ . Kun lämpötila nousee  $dT$ :n verran, on tilavuuden muutos

$$dV = \frac{dV}{dL} dL = 3L^2 dL = 3\alpha L_0^3 dT = 3\alpha V_0 dT ,$$

koska pituuden lämpölaajeneminen on  $dL = \alpha L_0 dT$ . Tästä voidaan päätellä, että  $\beta = 3\alpha$ .

## Esimerkki 17-1

YF Ex. 17-4. Lasiastia, jonka tilavuus on  $200 \text{ cm}^3$ , on täytetty elohopealla aivan täyteen. Kuinka paljon elohopeaa valuu astian reunojen yli, jos astian lämpötila nostetaan  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ :sta  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ :een. Elohopean tilavuuden lämpölaajenemiskerroin on  $18 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  ja lasin lineaarinen lämpölaajenemiskerroin on  $0,4 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ .

Elohopean tilavuuden muutos on  $\Delta V = \beta V_0 \Delta T$   
( $\beta = 18 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ,  $\Delta T = 80 \text{ K}$ ,  $V_0 = 200 \text{ cm}^3$ ) ja

lasiastian  $\Delta V_L = \beta_L V_0 \Delta T = 3\alpha_L V_0 \Delta T$ .

Yli valuu  $\Delta V - \Delta V_L = (\beta - 3\alpha_L) V_0 \Delta T = 2,7 \text{ cm}^3$ .

## Terminen jännitys

Jos kappale ei voi laajeta lämpötilan noustessa, kehittyy kappaleeseen *terminen jännitys* (thermal stress). Määritetään ensin, kuinka paljon kappale laajentuisi, ja mikä jännitys vaadittaisiin puristamaan se takaisin alkuperäiseen pituuteensa. Esimerkiksi sauvan (pituus  $L_0$ ) pituuden muutos lämpötilan noustessa olisi

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_{th} = \left( \frac{\Delta L}{L_0} \right)_{th} = \alpha \Delta T .$$

Hooken lain mukaan jännitys, joka tarvitaan suhteellisen venymän  $\varepsilon$  tuottamiseen on  $\sigma = Y\varepsilon$ , joten

$$\varepsilon = \left( \frac{\Delta L}{L_0} \right)_{str} = \frac{\sigma}{Y} .$$



## Yhteisvaikutus

Yhteensä lämpölaajenemisen ja jännityksen aiheuttaman suhteellisen pituuden muutoksen täytyy olla nolla

$$\left(\frac{\Delta L}{L_0}\right)_{th} + \left(\frac{\Delta L}{L_0}\right)_{str} = \alpha \Delta T + \frac{\sigma}{Y} = 0 ,$$

joten lämpötilan muutosta vastaava jännitys on

$$\sigma = -Y \alpha \Delta T .$$

Kun kappaleen lämpötila nousee, on jännitys  $\sigma$  negatiivista eli puristusjännitystä.

## Esimerkki 17-2

---

YF Ex. 17-5. Alumiinisylinteri, jonka pituus on 10 cm ja poikkipinta-ala  $20 \text{ cm}^2$ , erottaa toisistaan kaksi teräseinämää. Lämpötilassa  $17,2 \text{ }^\circ\text{C}$  se sopii juuri seinämien väliin. Mikä on jännitys alumiinisylinterissä ja minkä voiman se seinämiin kohdistaa, jos lämpötila on  $22,3 \text{ }^\circ\text{C}$ . Teräseinämät ovat täysin paikoillaan ja säilyttävät muotonsa. Alumiinin kimmokerroin on  $7,0 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$  ja pituuden lämpölaajenemiskerroin  $2,4 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ .

---

## Esimerkki 17-2 jatkuu

---

Merkitään  $L_0 = 10 \text{ cm}$ ,  $\Delta T = 5,1 \text{ K}$ ,  $A = 20 \text{ cm}^2$ ,  
 $Y = 7,0 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$ ,  $\alpha = 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1} \Rightarrow$   
Jännitys  $\sigma = -Y\varepsilon = -Y\alpha \Delta T = -8,6 \cdot 10^6 \text{ Pa}$ .

Kumpaankin seinämään kohdistuu voima  
 $|F| = |\sigma A| = 17 \text{ 000 N}$ .

---

# Lämpömäärä

---

Kun kylmempi ja lämpimämpi kappale ovat kontaktissa toistensa kanssa hyvän lämmönjohteen välityksellä, lämpimämpi kappale jäähtyy ja kylmempi lämpenee. Lämpimämmästä kappaleesta siirtyy kylmempään lämpöenergiaa, jota kutsutaan *lämmöksi* tai *lämpömääräksi* (heat) ja sitä merkitään symbolilla  $Q$ . Kokeellisesti on havaittu, että lämpötilan nousu on lineaarisesti verrannollinen systeemiin tehtävään työhön (eli siihen tuotuun energiaan).

---

# Ominaislämpökapasiteetti

---

Kappaleen lämmittämiseen tarvittava lämpömäärä on

$$Q = m c \Delta T ,$$

missä suuretta  $c$  kutsutaan materiaalin *ominaislämpökapasiteetiksi* (specific heat capacity).

Differentiaalimuodossa yhtälö on

$$dQ = m c dT ,$$

jolloin

$$c = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT} .$$

---

## Esimerkki 17-3

YF Ex. 17-7. Elektronisen piirielementin läpi kulkee sähkövirta, joka lämmittää sitä teholla 7,4 mW. Jos lämpö ei pääse johtumaan elementistä pois, niin mikä on elementin lämpötilan nousunopeus? Elementin massa on 23 g ja se on valmistettu piistä. Piin ominaislämpökapasiteetti on  $705 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .

Lämpö, joka kerääntyy elementtiin lyhyessä ajassa  $dt$  on  $dQ = mc dT$ .

Lämpötilan nousunopeus on tällöin

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{mc} \frac{dQ}{dt} = \frac{P}{mc} = 0,46 \text{ K s}^{-1}.$$

# Molaarinen ominaislämpökapasiteetti

---

Materiaalin lämmittämiseen tarvittava lämpömäärä voidaan ilmaista myös ainemäärän avulla (yksikkö mooli)

$$n = m/M ,$$

missä  $M$  on aineen *moolimassa* (molecular mass).

Vastaavaa ominaislämpökapasiteettia  $C$  yhtälössä

$$Q = m c \Delta T = n M c \Delta T = n C \Delta T$$

kutsutaan molaariseksi ominaislämpökapasiteetiksi (molar heat capacity). Sen määritelmä on

$$C = M c = \frac{1}{n} \frac{dQ}{dT} .$$

---

## Dulongin ja Petit'n sääntö

---

Ominaislämpökapasiteetti voidaan mitata joko vakio-paineessa, jolloin systeemin tilavuus voi muuttua (ja se tekee työtä), tai vakiotilavuudessa, jolloin systeemin paine voi muuttua. Vastaavia ominaislämpökapasiteetteja merkitään  $C_p$  ja  $C_V$ , ja ne ovat yleensä erisuuret.

*Dulongin ja Petit'n säännöksi* sanotaan havaintoa, että lähes kaikille yksiatomisille kiinteille aineille molaa-rinen ominaislämpökapasiteetti vakiotilavuudessa  $C_V$  on noin 25 kJ/(mol K).

---



# Kalorimetria ja faasitransitiot

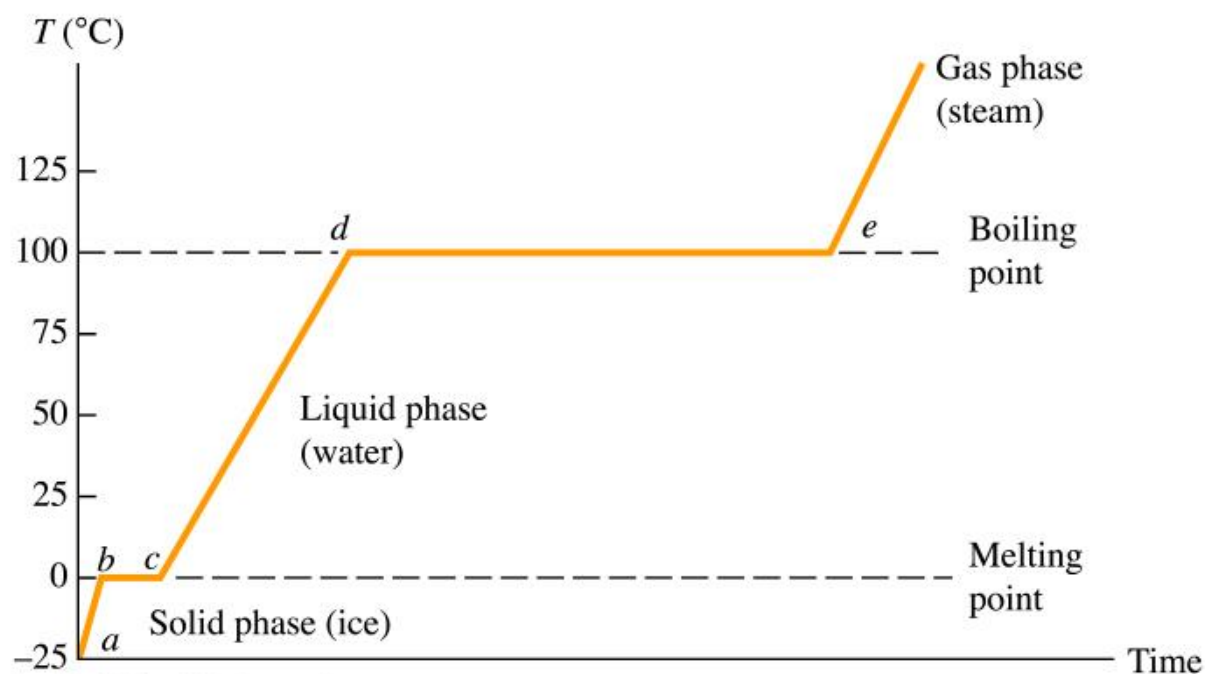
---

Kalorimetria tarkoittaa lämmön mittaamista. Lämpötilan muutoksen lisäksi lämpö vaikuttaa materiaalin *olomuodon* eli *faasin* (phase) muutokseen. Esimerkiksi yhdisteen  $\text{H}_2\text{O}$  *kiinteä olomuoto* (solid phase) on jää, *nestemäinen olomuoto* (liquid phase) on vesi ja *kaasumainen olomuoto* (gaseous phase) on vesihöyry.

---

# Kalorimetria ja faasitransitiot

Aineen siirtyminen eli transitio olomuodosta toiseen on nimeltään *olomuodon muutos* eli *faasitransitio* (phase change/transition). Vakiopaineessa faasitransitio tapahtuu tietyssä lämpötilassa ja usein siihen liittyy aineen tilavuuden ja tiheyden muutos.



# Latenttilämpö

Faasitransitiossa lämpöä absorboituu (+-merkki, esim. sulaminen) tai emittoituu yhtälön

$$Q = \pm m L$$

mukaisesti, missä  $L$  on kyseisen faasitransition *latenttilämpö* (heat of fusion), esim. sulamislämpö  $L_f$ , höyrystymislämpö  $L_v$ , sublimaatiolämpö  $L_s$ , jne.

Kun aine on tilassa, jossa esiintyy kaksi olomuotoa, niin aine on *faasitasapainossa* (phase equilibrium). Hyvin puhdas aine voi olla alijäähtynyt tai ylikuumentunut, jolloin häiriö saa aikaan faasitransition alkamisen.

## Esimerkki 17-4

YF Ex. 17-10. Kuparikattila, jonka massa on 2,0 kg, on 150°C lämpötilassa. Sen sisään kaadetaan 0,10 kg vettä, jonka lämpötila on 25°C, ja kansi suljetaan nopeasti. Mikä on systeemin lopputila, kun se on termisessä tasapainossa? Oletetaan, että lämpöä ei siirry ulos systeemistä. Kuparin ominaislämpökapasiteetti on  $390 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  ja veden  $4190 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .

Kuparin luovuttama lämpömäärä on sama kuin veden vastaanottama eli  $Q_v + Q_k = 0 \Rightarrow$   
 $Q_v + Q_k = m_v c_v (T - T_v) + m_k c_k (T - T_k) = 0 \Rightarrow$

## Esimerkki 17-4 jatkuu

$$\Rightarrow T = \frac{m_v c_v T_v + m_k c_k T_k}{m_v c_v + m_k c_k} = 106^\circ\text{C}.$$

Tämä on suurempi kuin veden höyrystymislämpötila, joten osa  $x$  vedestä höyrystyy. Tällöin

lopullinen lämpötila on  $100^\circ\text{C} \Rightarrow Q_v + Q_k = 0 \Rightarrow$

$$m_v c_v (100^\circ\text{C} - T_v) + x m_v L_v + m_k c_k (100^\circ\text{C} - T_k) = 0$$

$$\Rightarrow x = \frac{m_v c_v \cdot 75\text{K} - m_k c_k \cdot 50\text{K}}{m_v L_v} = 0,034.$$

Jos  $x$  olisi ollut yli 1, niin olisi pitänyt olettaa, että vesi lämpenee  $100^\circ\text{C}$ :een, höyrystyy kokonaan ja sen jälkeen vielä vesihöyry lämpenee.

# Lämmön johtuminen

---

Lämpö voi siirtyä paikasta toiseen johtumalla, konvektiolla tai lämpösäteilyn avulla.

Tarkastellaan *lämmönjohtumista* (heat conduction) kiinteässä aineessa. Lämpöä voi johtua kahdella hyvin erityyppisellä mekanismilla. Kuumemman alueen atomien suurempi kineettinen energia voi siirtyä naapuriatomiin sähköisen vuorovaikutuksen kautta (atomit eivät vaihda paikkaa). Tämä mekanismi on tietysti olemassa kaikissa aineissa.

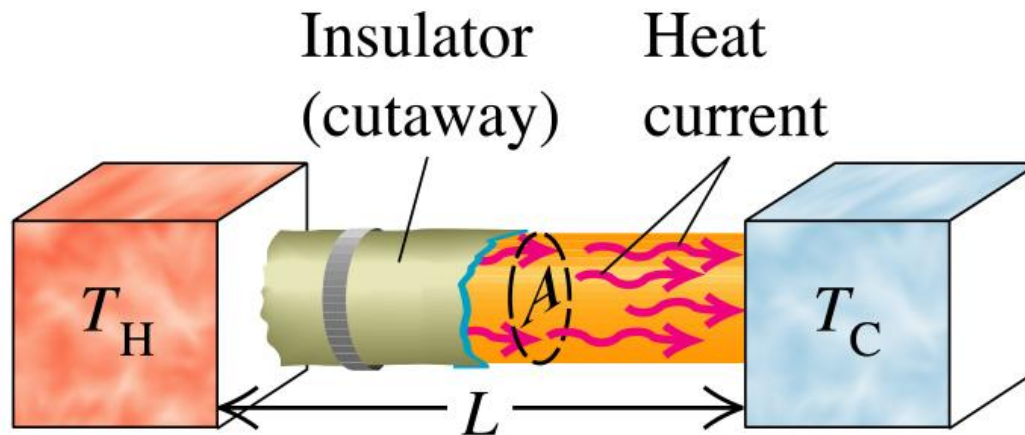
Toisentyyppinen mekanismi perustuu aineen vapaisiin elektroneihin (esim. metallit), jotka pystyvät liikkumaan koko kiteen alueella. Elektronit pystyvät kuljettamaan lämpöä (eli liike-energiaansa) tehokkaasti toiseen paikkaan.

---

# Lämpövirta

Tarkastellaan tasapaksua tankoa, jonka toinen pää on lämpötilassa  $T_H$  ja toinen lämpötilassa  $T_C < T_H$ . Määritellään suure *lämpövirta* (heat current) tangon läpi kulkevaksi lämmöksi aikayksikköä kohden eli

$$H = \frac{dQ}{dt} .$$

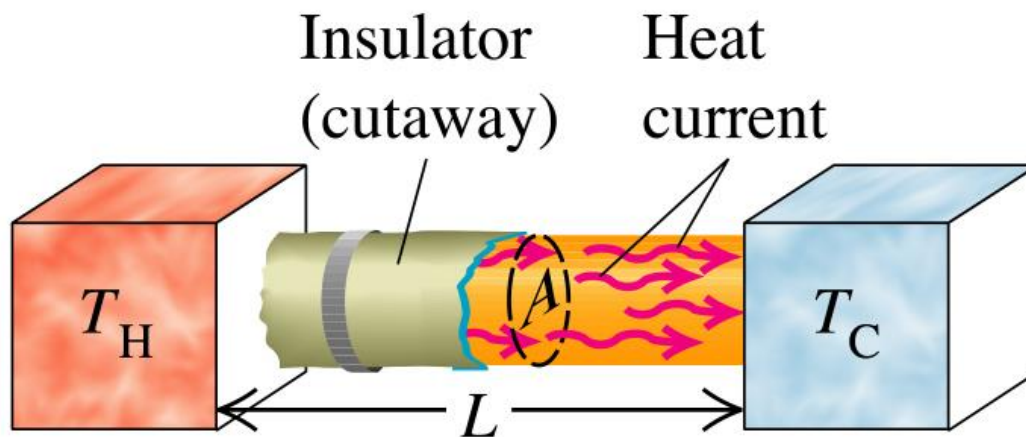


# Lämpövirta

Kokeet ovat osoittaneet, että lämpövirta on tässä tilanteessa

$$H = \frac{dQ}{dt} = k A \frac{T_H - T_C}{L},$$

missä verrannollisuuskerroin  $k$  on materiaalin lämmönjohtavuus (thermal conductivity).





# Fourierin laki

---

Jos tarkastellaan infinitesimaalisen lyhyttä osaa tangosta, voidaan lämpövirta lausua *lämpötilagradientin* (temperature gradient) avulla

$$H = -k A \frac{dT}{dx},$$

mikä tunnetaan *Fourierin lakina* (Fourier's law). Tämä yhtälö pätee silloinkin, kun lämpötila ei muutu tasaisesti tangon päästä päähän.

---

## Terminen resistanssi

---

Joskus (varsinkin teknisissä teksteissä) lämpövirta lausutaan *termisen resistanssin* (thermal resistance)  $R$  avulla. Termien resistanssi määritellään

$$R = \frac{L}{k} ,$$

jolloin lämpövirta on

$$H = \frac{A \Delta T}{R} .$$

---

# Konvektio

---

Lämpö voi siirtyä nesteessä ja kaasussa *konvektion* (convection) avulla. Konvektio on seurausta neste- tai kaasumolekyylien virtauksesta, jolloin kuumempaa väliainetta siirtyy paikasta toiseen ja lämpöä sen mukana. Konvektio voi olla luonnollista (esim. kuuman ilman nouseminen) tai pakotettua (esim. tuuletin). Konvektiota ei voida analysoida millään yksinkertaisella yhtälöllä.

---

# Lämpösäteily

---

Lämpöä voi siirtyä myös *säteilemällä* (radiation), koska kaikki kappaleet lähettävät sähkömagneettista säteilyä Planckin lain mukaisesti. Ideaalisen kappaleen lämpösäteilyä kutsutaan *mustan kappaleen säteilyksi* (blackbody radiation), jolla on aivan tietty spektri.

Huoneenlämpötilassa olevan kappaleen lämpösäteily osuu infrapuna-alueelle, joten ihmissilmä ei sitä havaitse. Sen sijaan, kun kappaleen lämpötila on n.  $700^{\circ}\text{C}$ , se hehkuu silminnähtävästi punaisena, ja n.  $3\,000^{\circ}\text{C}$ :ssa valkoisena.

---

## Mustan kappaleen säteily

Kun mustan kappaleen lämpösäteily summataan yli kaikkien aallonpituuksien, saadaan mustan kappaleen emittoima lämpövirta (ns. Stefan-Boltzmannin laki)

$$H = A \sigma T^4 ,$$

missä  $\sigma$  on Stefan–Boltzmann-vakio.

Jos kappale on termisessä tasapainossa ympäristönsä kanssa, niin kappaleen emittoiman ja sen absorboiman lämpösäteilyn lämpövirrat ovat yhtä suuret. Jos kappaleen lämpötila  $T$  ei ole sama kuin ympäristön  $T_S$  , on nettolämpövirta, jonka kappale säteilee

$$H = H_{em} - H_{abs} = A \sigma (T^4 - T_S^4) .$$

## Emissiviteetti

Todellisen kappaleen lämpösäteilyn lämpövirta poikkeaa mustan kappaleen säteilystä ja se on

$$H_{em} = A \varepsilon \sigma T^4 ,$$

missä  $\varepsilon$  on kappaleen *emissiviteetti* (emissivity). Emissiviteetti riippuu lähinnä kappaleen pinnasta (väri, materiaali, jne.) ja sen lukuarvo on tyypillisesti 0,1–1,0. Vastaavasti nettolämpövirta ympäristöön on

$$H = H_{em} - H_{abs} = A \varepsilon \sigma (T^4 - T_S^4)$$

## Esimerkki 17-5

YF Ex. 17-12. Styrox-laatikkoon on pakattu juomia ja jäätä, jotka ovat lämpötilassa  $0^{\circ}\text{C}$ . Laatikon pinta-ala on  $0,80\text{ m}^2$  ja seinämän paksuus on  $2,0\text{ cm}$ . a) Mikä on lämpövirta laatikosta ympäristöön, jos ulkoilman lämpötila on  $30^{\circ}\text{C}$ . b) Kuinka paljon jäätä sulaa  $8,0$  tunnissa? Styroxin lämmönjohtavuus on  $0,010\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$ .

a) Lämpövirta  $H = k A \frac{T - T_v}{L} = 12\text{ W}$  ja

b) kokonaislämpö  $Q = H t = 0,346\text{ MJ}$  ja sulanut jäämassa  $m = \frac{Q}{L_f} = 1,0\text{ kg}$  ( $L_f = 334\ 000\text{ J kg}^{-1}$ )