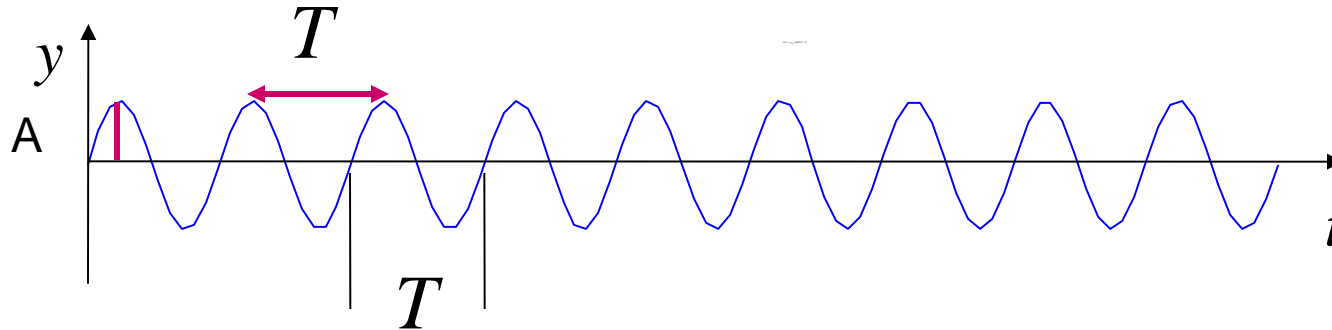


Aaltoliike

- Aaltoliike on etenevää värähtelyä
- Värähdysliikkeen jaksonaika T on yhteen värähdykseen kuluva aika
- Värähtelyn taajuus on sekunnissa tapahtuvien värähdysten lukumäärä
- Taajuuden f yksikkö Hz (hertsi, värähdys))
- Aaltoliikkeen etenemisnopeus

Aaltoliike ajan suhteen:

Aallon poikkeama y yhdessä pisteessä ($x=0$)



T = jakson aika (s)

f = värähtelyn taajuus (yksikkö Hz eli $1/s = 1$ värähdys sekunnissa)

v = aallon etenemisnopeus (m/s)

λ = aallonpituus (m)

y = poikkeama tasapainoasemasta (m)

A = amplitudi (m)

$$\text{Taajuus: } f = \frac{1}{T}$$

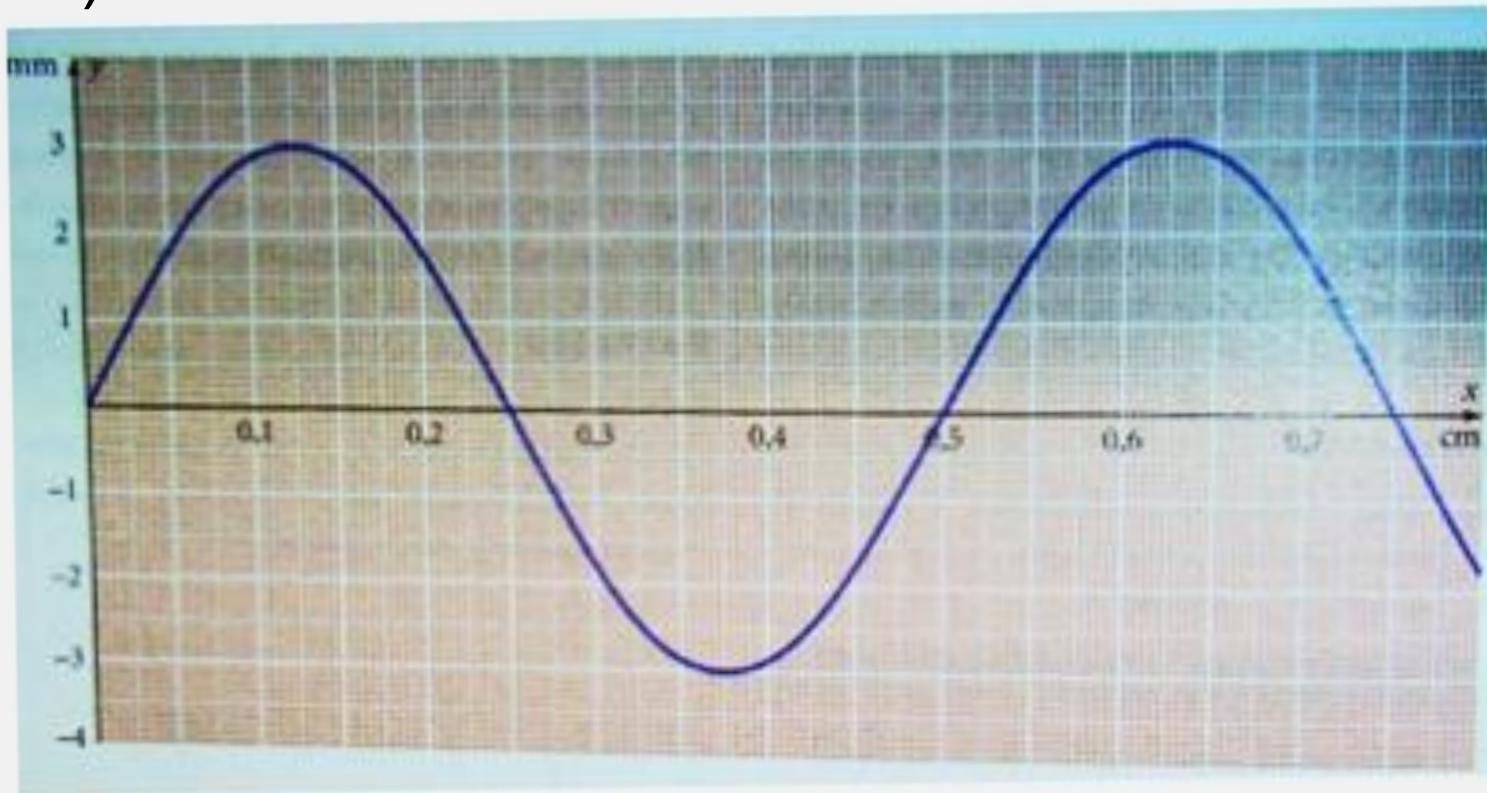
$$\text{Nopeus } v = f \cdot \lambda$$

Seisova aaltoliike:



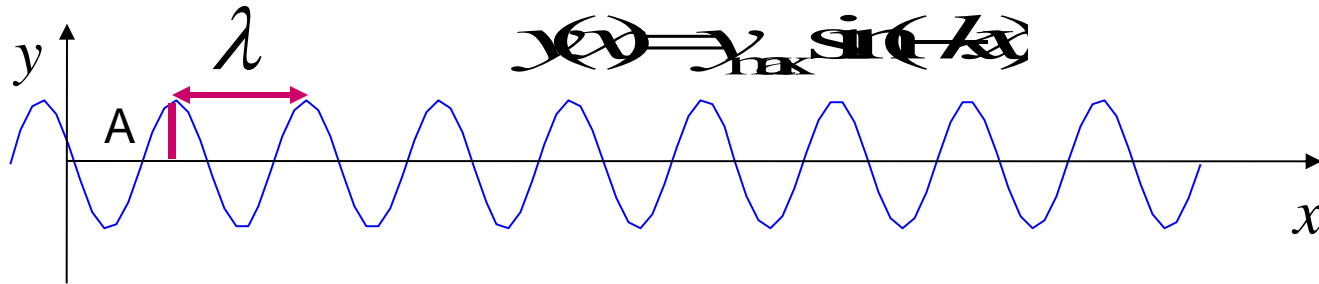
Kuvaaja esittää aaltoa. Jonka etenemisnopeus on $0,75 \text{ m/s}$. Nääritä aallon

- a) Amplitudi A b) aallonpituus c) taajuus
d) Jaksonaika



Aallon nopeus

Aallon poikkeama y yhdellä ajanhetkellä ($t=0$)



T = jakson pituus

f = värähtelyn taajuus (yksikkö Hz eli $1/s = 1$ värähdys sekunnissa)

v = aallon enetemisnopeus

λ = aallonpituus

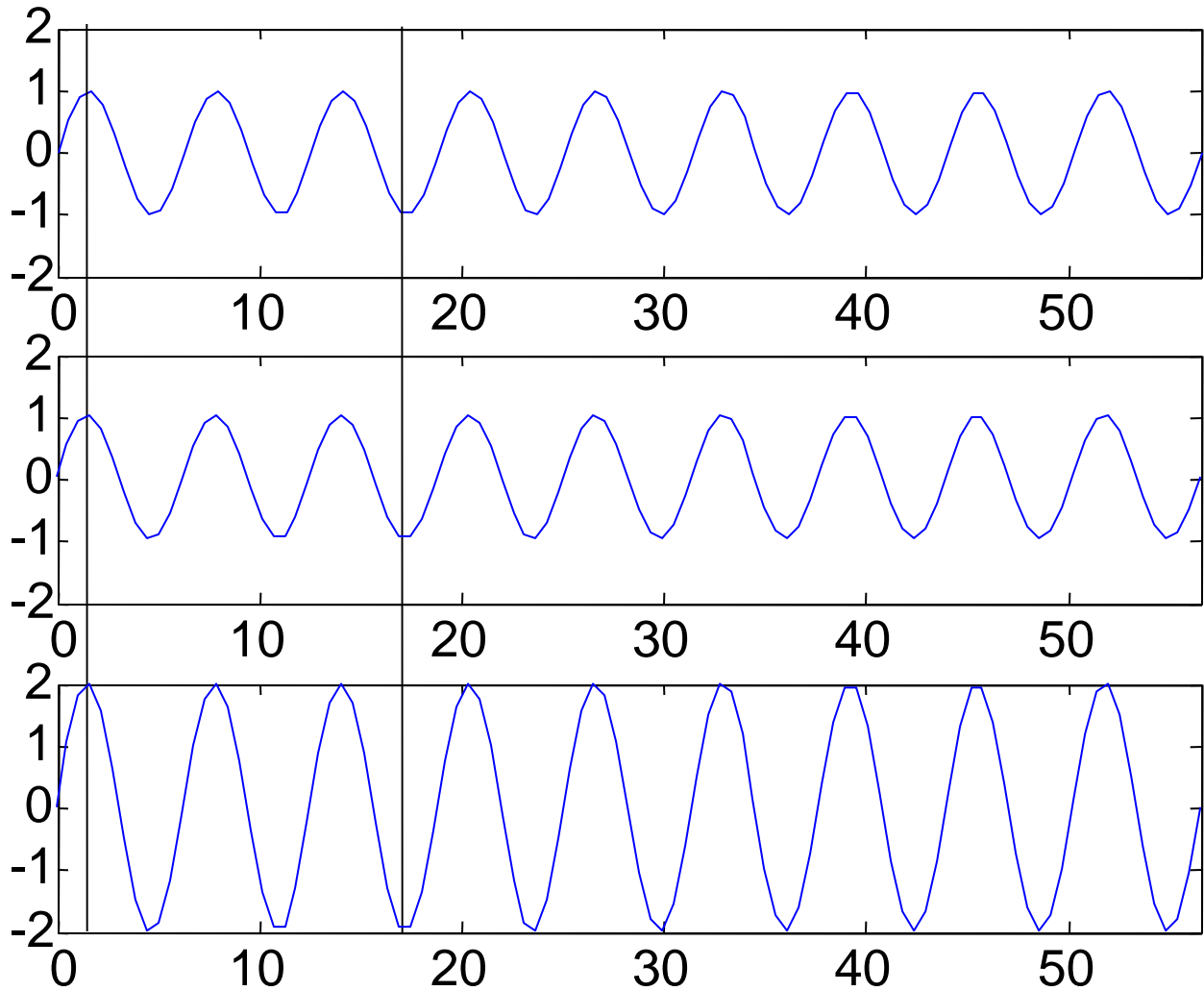
y = poikkeama tasapainoasemasta

A = amplitudi

$$T = \frac{1}{f} \text{ ja } f = \frac{1}{T}$$

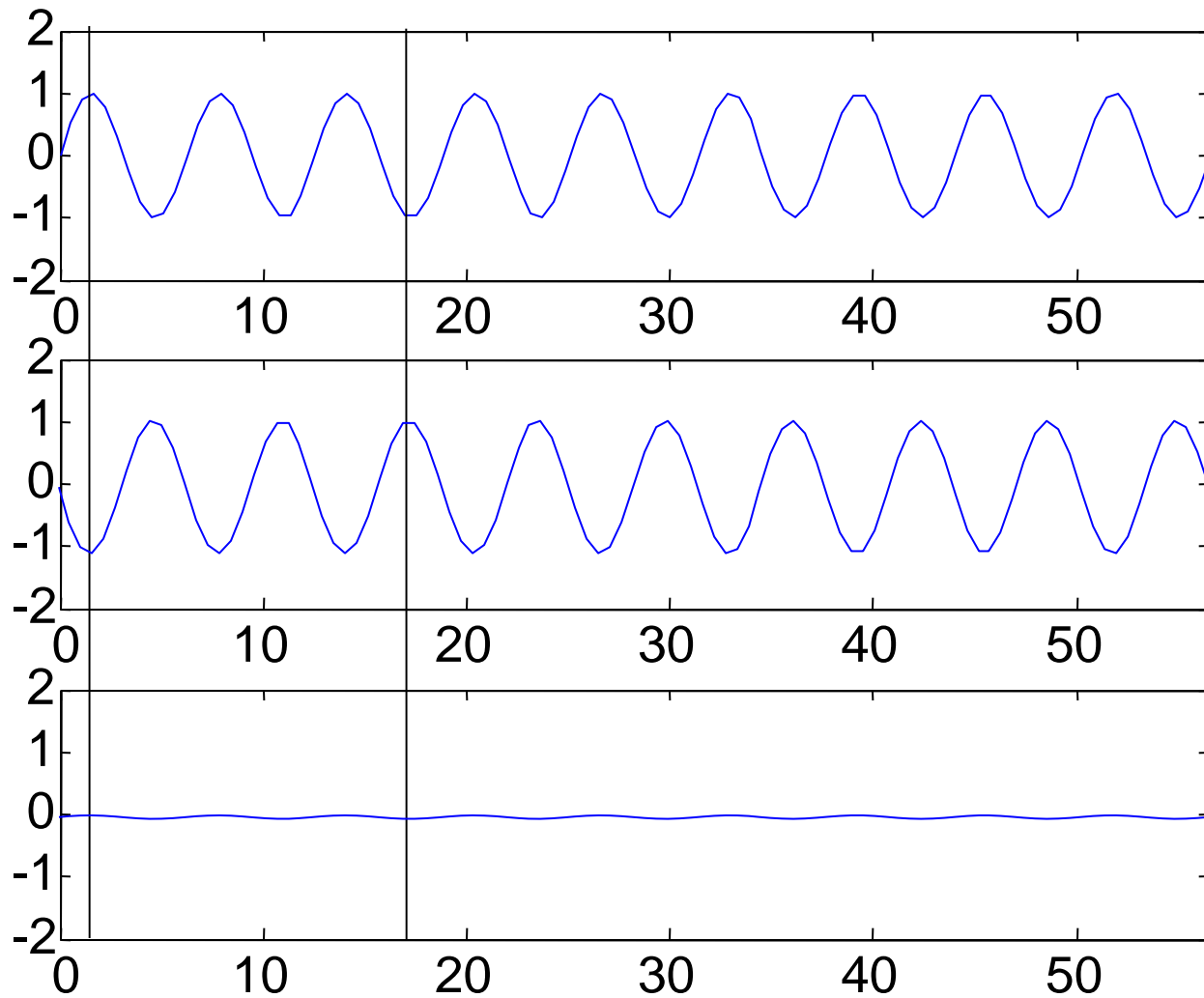
$$v = f \cdot \lambda$$

Interferenssi (vahvistava): samanvaiheiset aallot



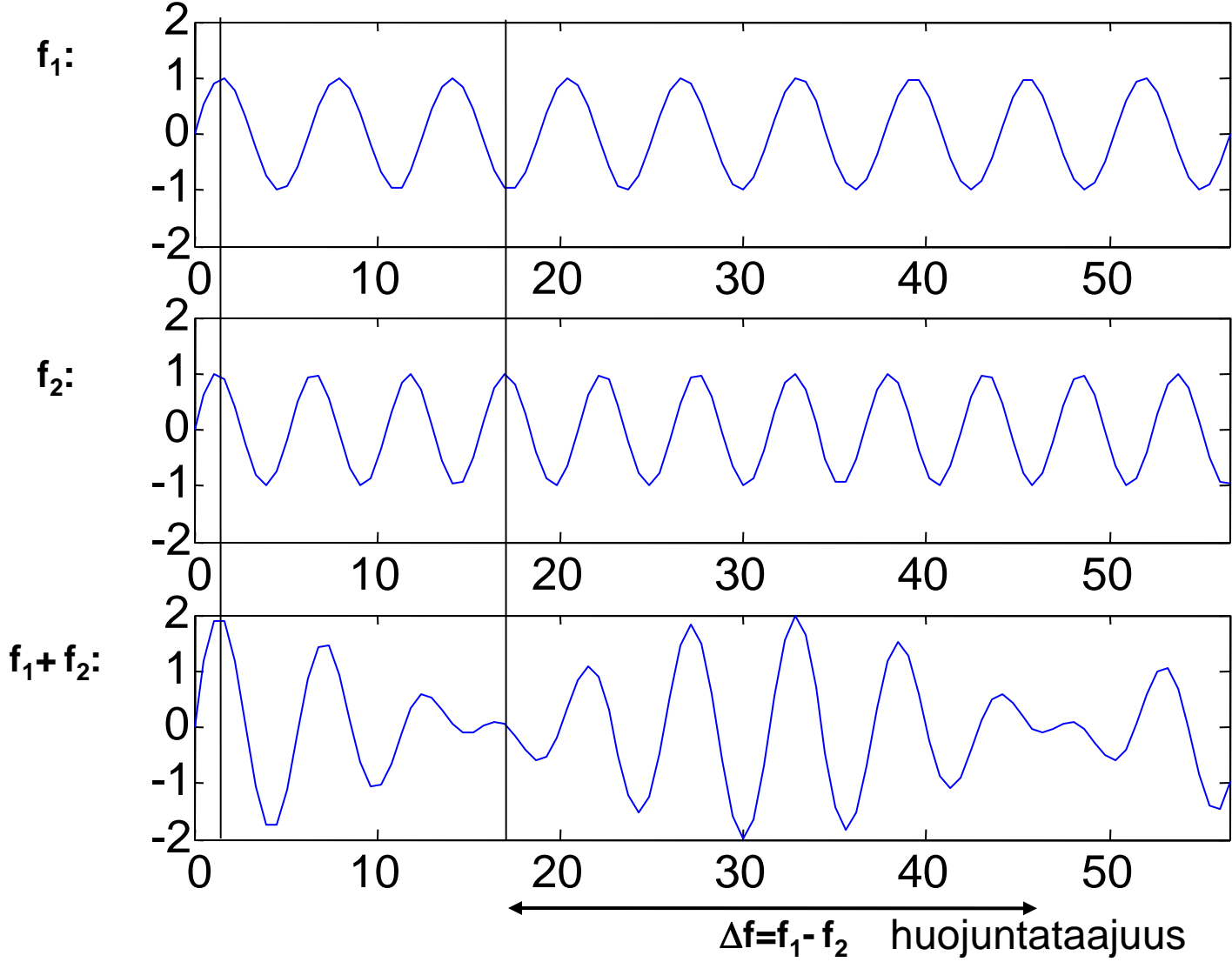
**Summa
aalto:**

Interferenssi (heikentävä): vastakkaisvaiheiset aallot

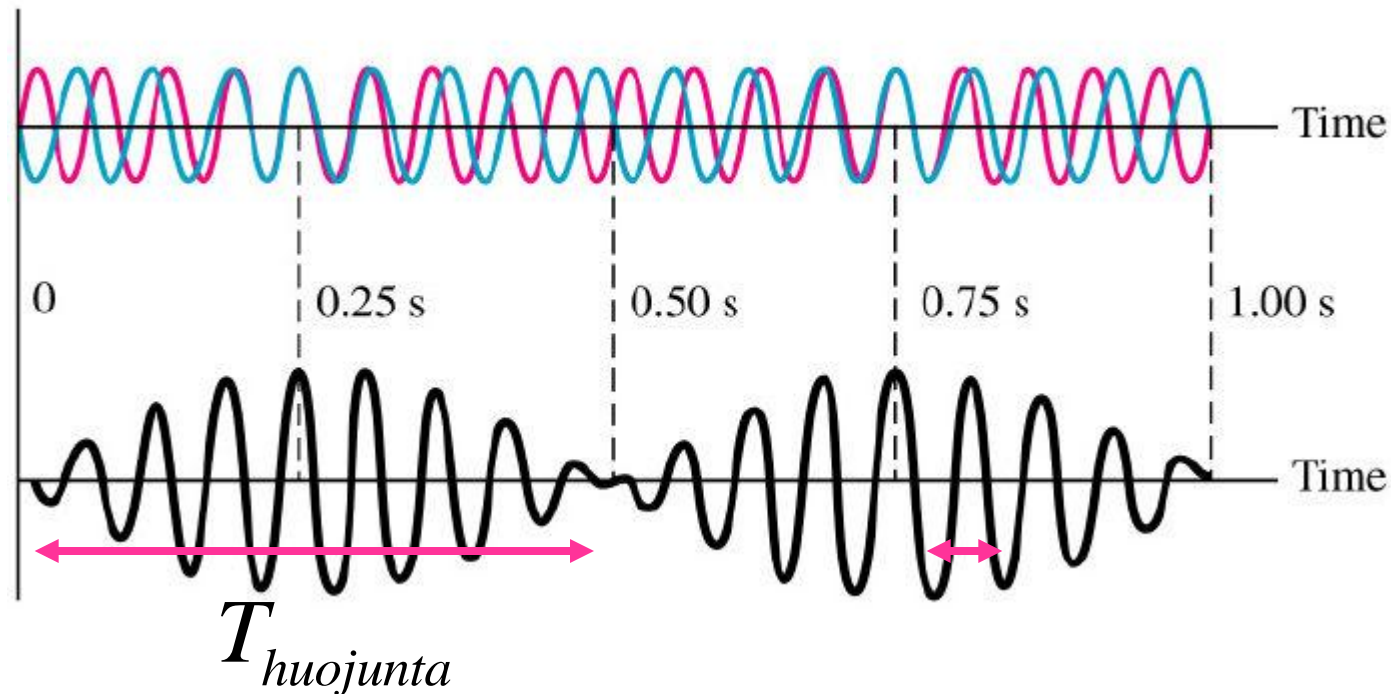


**Summa
aalto:**

Äänen huojunta: hieman eri taajuuden omaavat aallot



Huojunta: kahden hieman eri taajuudella soivan äänen interferenssi



huojuntataajuus $\Delta f = f_2 - f_1$

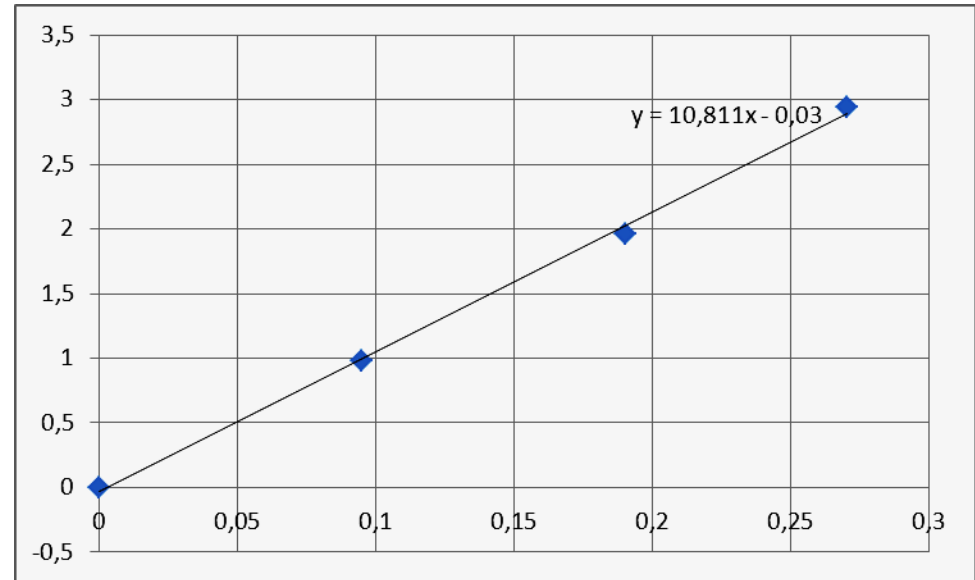
$$\Delta f = \frac{1}{T_{huojunta}}$$

interferenssitaajuus $f = \frac{f_1 + f_2}{2}$

Jousivakion määrittäminen: voimat 0,1 kg 0,2 kg ja 0,3 kg punnuksista → voimat. Mitataan jousen venymät

Venymä x (m)	Voima F (N)
0	0
0,095	0,98
0,19	1,96
0,27	2,94

F (N)



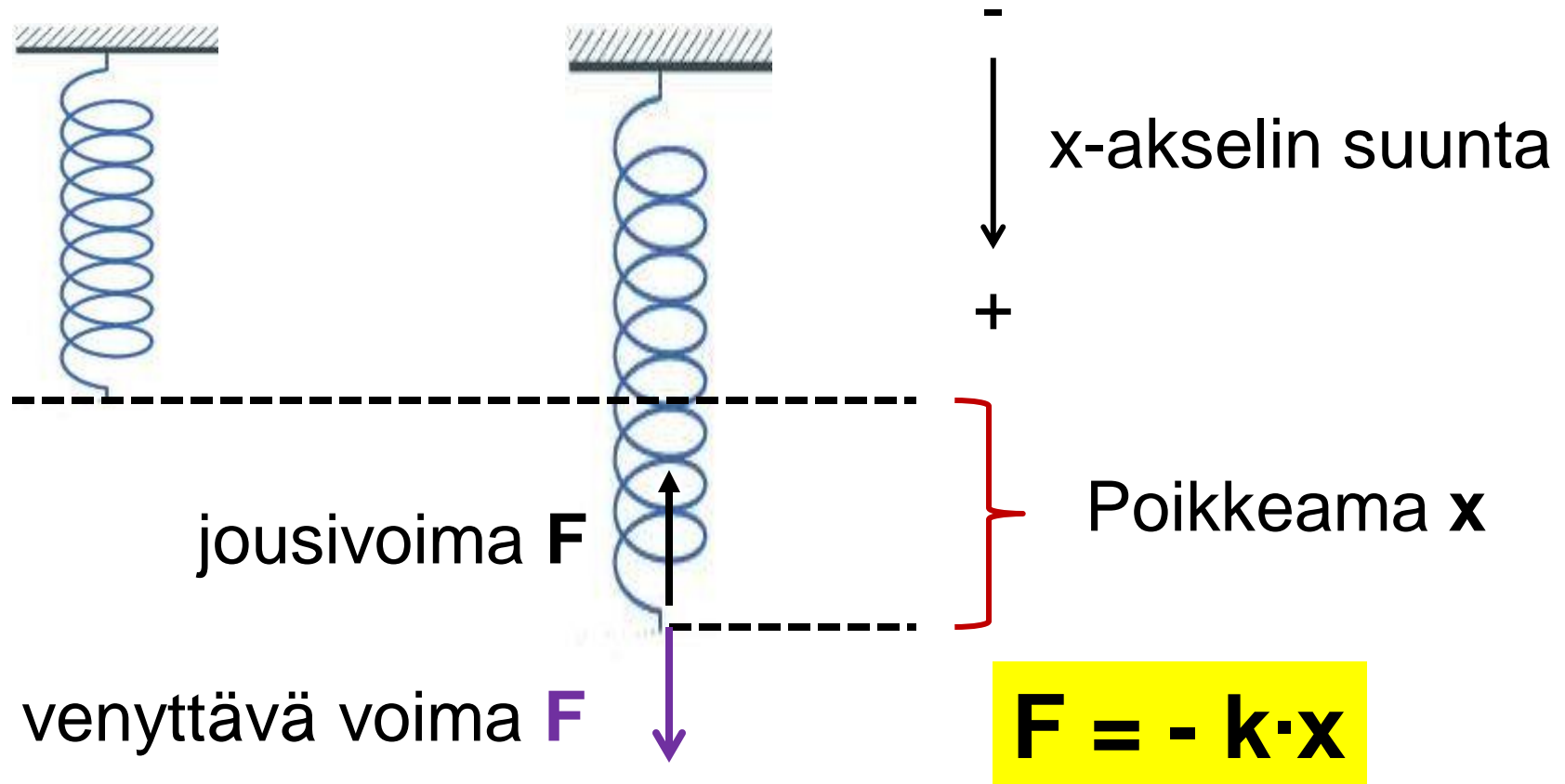
Voima suoraan verrannollinen venymään

Venymä x (m)

$$F = k \cdot x$$

Jousivakio k = kulmakerroin = 10,8 N/m

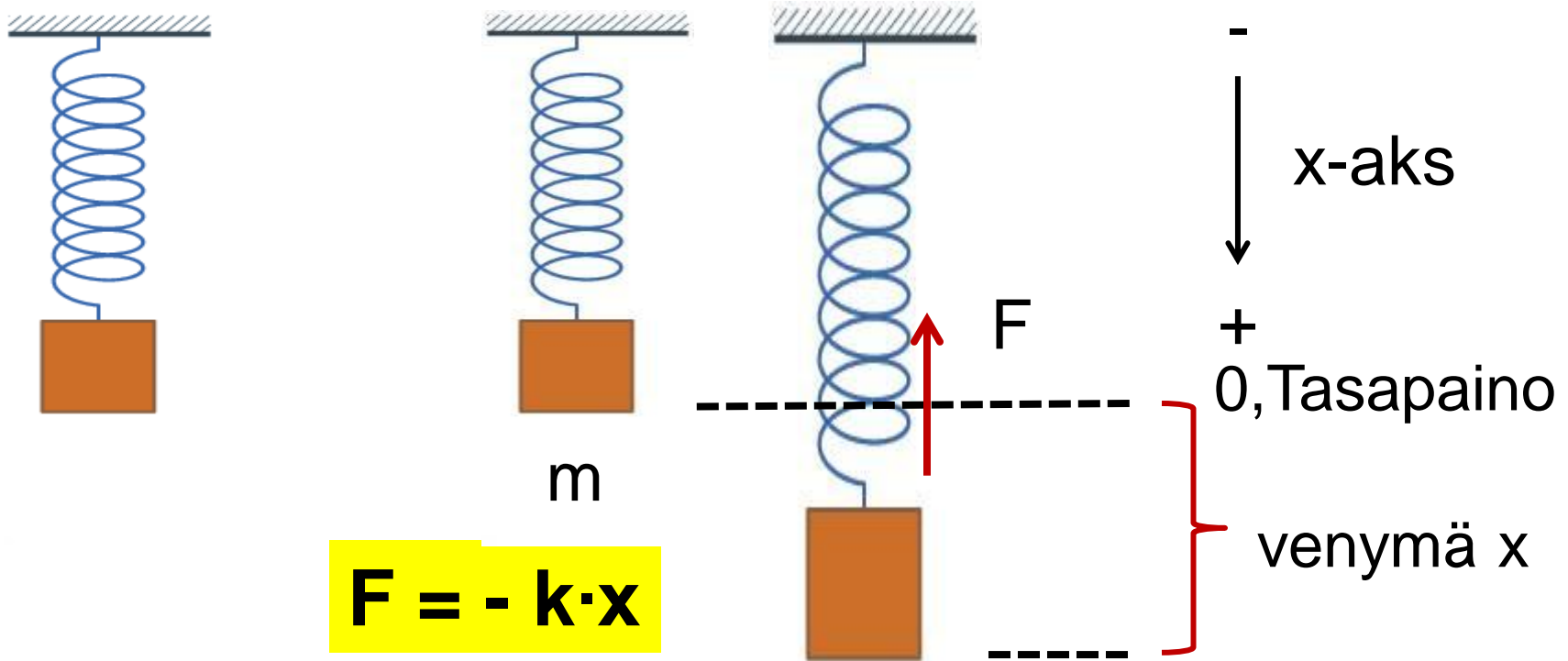
Harmoninen voima (jousivoima)



x = poikkeama tasapainoasemasta

k = jousen jousivakio

Värähtelevä jousi



$$F = -k \cdot x$$

F = voima, jolla jousi vetää itseensä m

x = poikkeama tasapainoasemasta

k = jousen jousivakio

m = punnuksen massa

T = jousen värähdysaika

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

DCHO

P1

$$\text{Taajuus } f = \frac{1}{T} = \frac{1}{1,5s} = 0,67 \text{ Hz}$$

T = 1.5 s



D(FT)

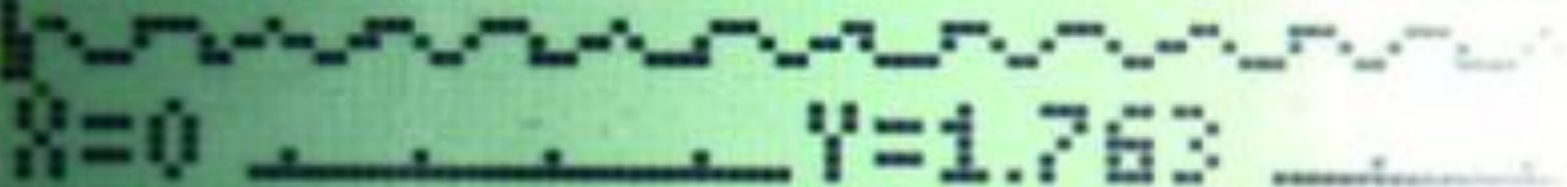
F1:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,83s} = 1,2 \text{ Hz}$$

$$4T = 3,3 \text{ s} \rightarrow T = 0,83 \text{ s}$$



T(5)



Antavatko mittaus ja kaava saman tuloksen?

$$m = 0,150 \text{ kg}$$

$$\text{venymä } x = 0,17 \text{ m}$$

$$F = k \cdot x$$

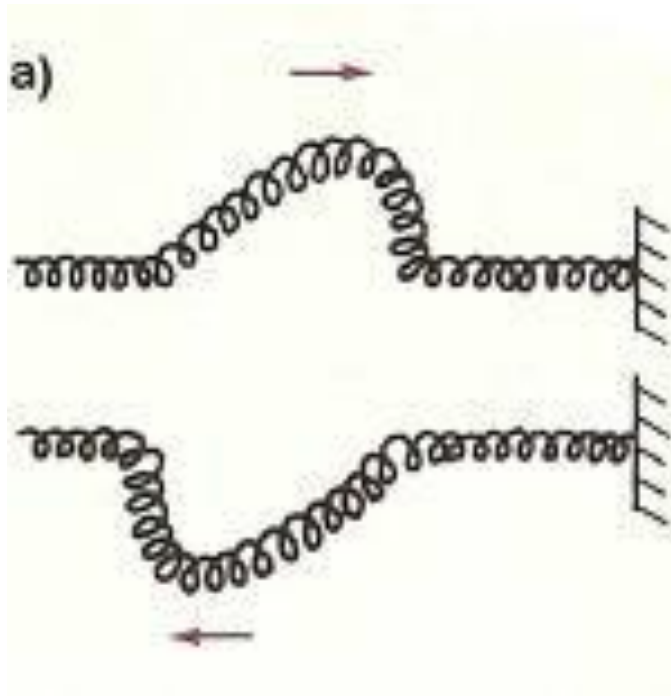
$$k = \frac{F}{x} = \frac{mg}{x} = \frac{0,150\text{kg} \cdot 9,81\text{m} / \text{s}^2}{0,17\text{m}} = 8,647 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi \sqrt{\frac{0,150\text{kg}}{8,647\text{N} / \text{m}}} \approx 0,8275\dots\text{s}$$

Mittaus antoi $T = 0,83 \text{ s}$

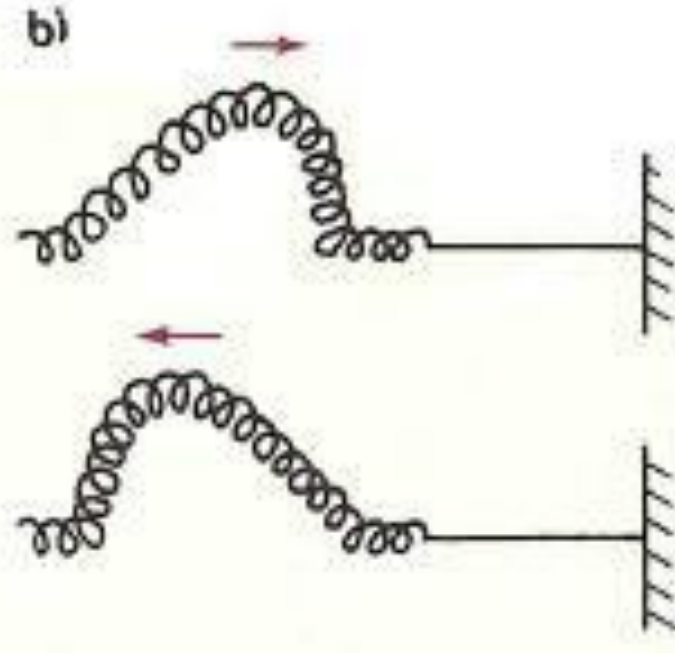
Aaltoliikkeen heijastuminen

a) Kiinteästä seinästä



a) Vaihe muuttuu vastakkaiseksi

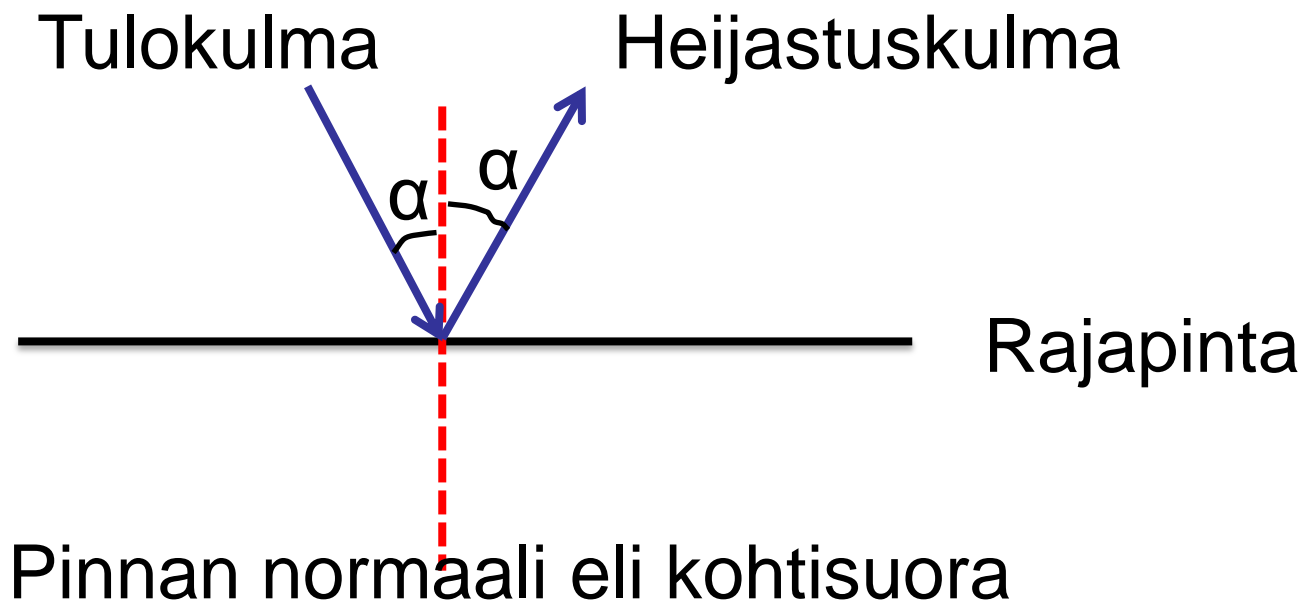
b) Ohuesta narusta (harvemmassa)



b) Vaihe ei muutu

Heijastuminen

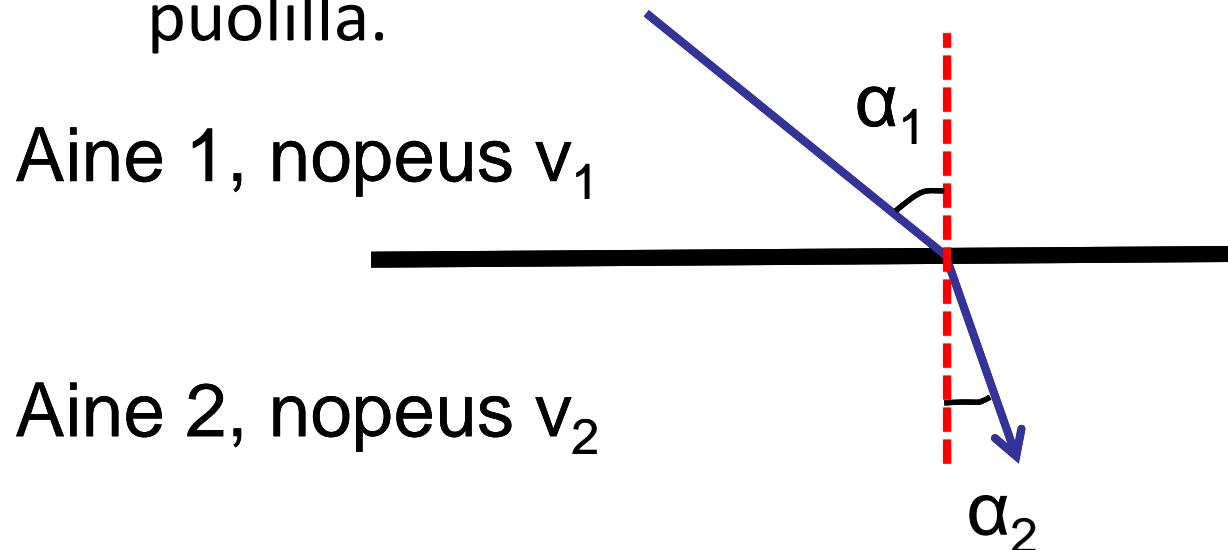
Kun aaltoliike kohtaa rajapinnan, se heijastuu siitä (lähtökulma eli heijastuskulma on yhtä suuri kuin tulokulma) Kulmat mitataan pinnan normaalista eli kohtisuorasta. Nopeus ja taajuus eivät muutu



Taittuminen

Kun aaltorintama kohta kahden väliaineen Rajapinnan ja pääsee pinnasta **läpi** muuttaen **suuntaansa**, on kyseessä **taittuminen**

Taittuminen johtuu siitä, että aaltoliikkeen **etenemisnopeus** on erilainen rajapinnan eri puolilla.

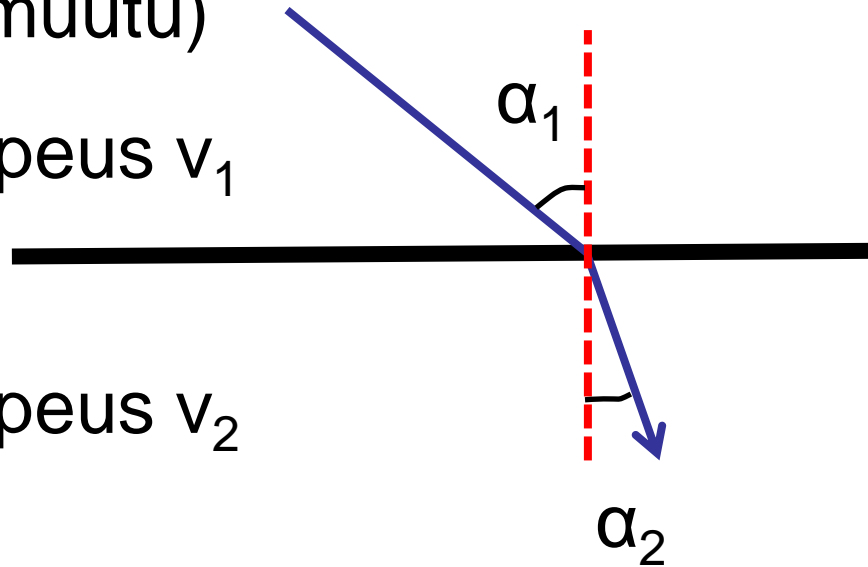


Taaittumislaki

(Taajuus ei muutu)

Aine 1, nopeus v_1

Aine 2, nopeus v_2



$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{v_1}{v_2} = n_{12} = \text{taitesuhde}$$

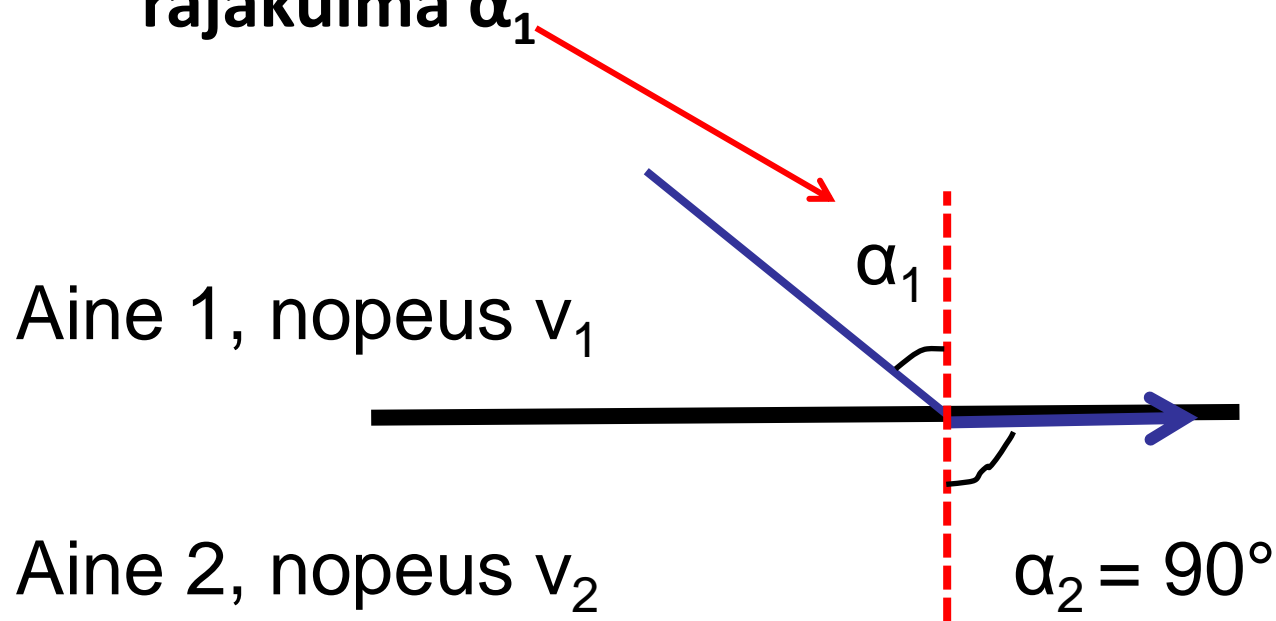
(aaltoliikkeen taajuus pysyy samana)

Kokonaisheijastuminen

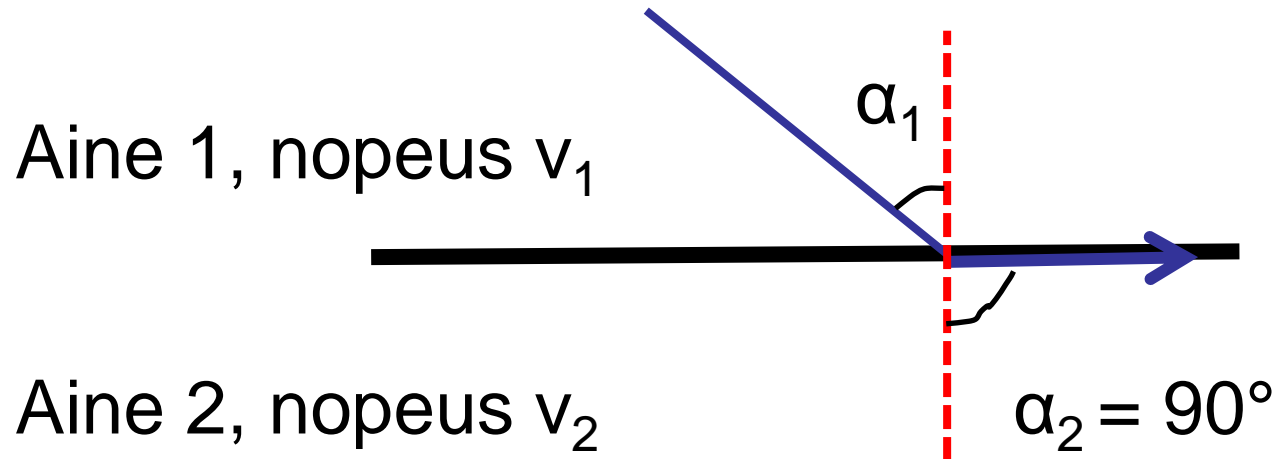
Kun **taittumiskulma** on 90° , niin aaltorinta ei pääsekään rajapinnan läpi.

Tällöin aalto voi ainoastaan **heijastua**.

Vastaava tulokulma α_1 on kokonaisheijastumisen **rajakulma** α_1



Kokonaisheijastumisen rajakulma



$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{v_1}{v_2} = n_{12} = \text{taitesuhde}$$

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin 90} = \frac{v_1}{v_2} \rightarrow \sin \alpha_1 = \frac{v_1}{v_2}$$

$\alpha_1 =$ kokonaisheijastuksen rajakulma

Ääni

- Interferenssi
- Doppler
- Huojunta
- Intensiteetti
- Resonanssi
- Pitkittäistä aaltoliikettä

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}$$

Äänen nopeus v , riippuu lämpötilasta T

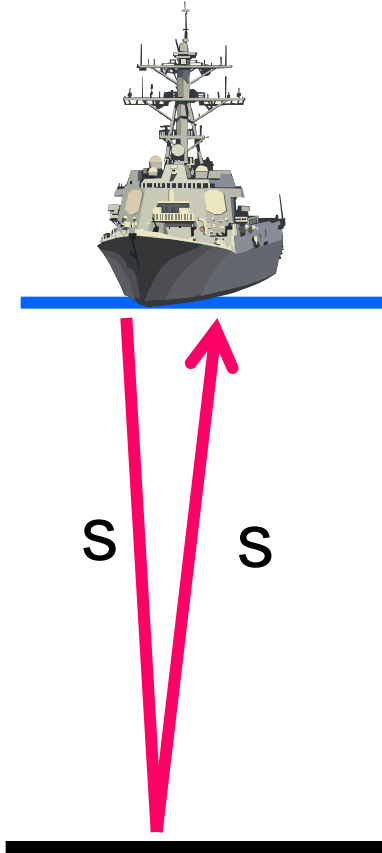
aallonpituus

taajuus

$$v = \lambda \cdot f$$

Ilmassa etenemisnopeus noin 340 m/s,
vedessä noin 1500 m/s.

Kaikuluotaimesta lähtevä ääni palasi 0,90 s kuluttua. Mikä on pohjan syvyys, kun äänen etenemisnopeus on 1500 m/s



$$C = 1500 \text{ m/s}$$

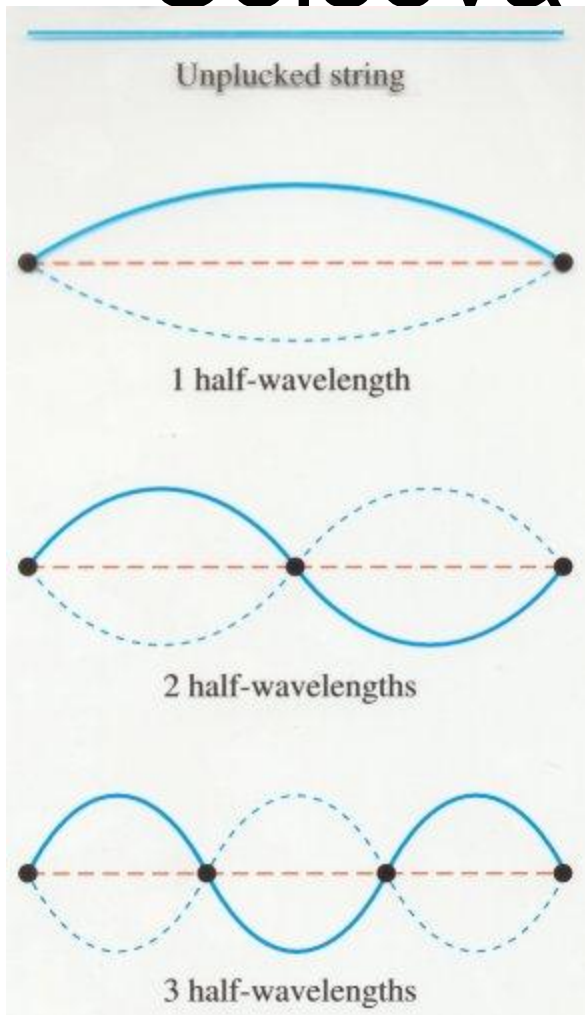
$$T = 0,90 \text{ s}$$

$$2s = ct$$

$$s = \frac{ct}{2} = \frac{1500 \frac{m}{s} \cdot 0,90s}{2} \approx 680m$$

$$V: 680 \text{ m}$$

Seisova aaltoliike ja soittimet



$$\frac{\lambda}{2} = L \rightarrow \lambda = 2L$$

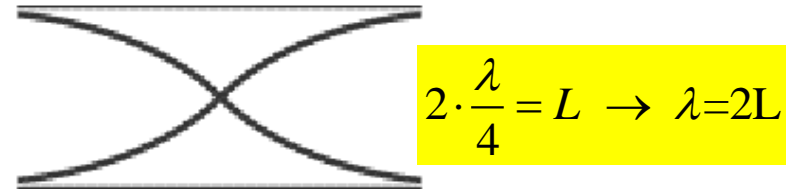
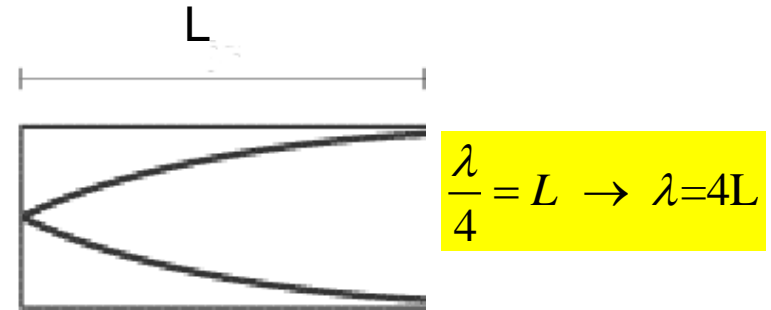
$$2 \cdot \frac{\lambda}{2} = L \rightarrow \lambda = L$$

$$3 \cdot \frac{\lambda}{2} = L \rightarrow \lambda = \frac{2L}{3}$$

Huom! v on **jousessa** etenevä nopeus

$$v = \lambda \cdot f$$

Puoliavoin putki, ääni



Avoin putki

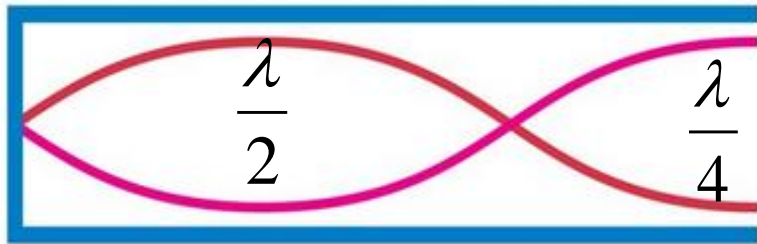
Huom! $v = 340$ m/s **ilmassa** etenevälle äänelle

Puoliavoimoin putki, ääni



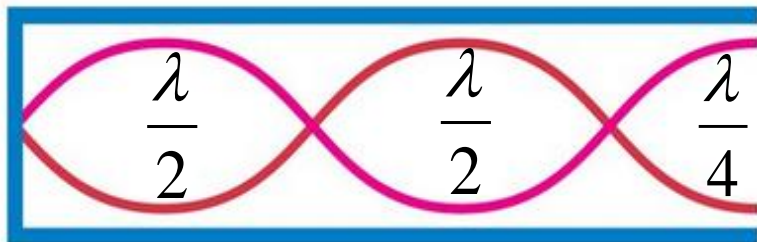
$$\frac{\lambda}{4} = L \rightarrow \lambda = 4L$$

Perus



$$\frac{3\lambda}{4} = L \rightarrow \lambda = \frac{4L}{3}$$

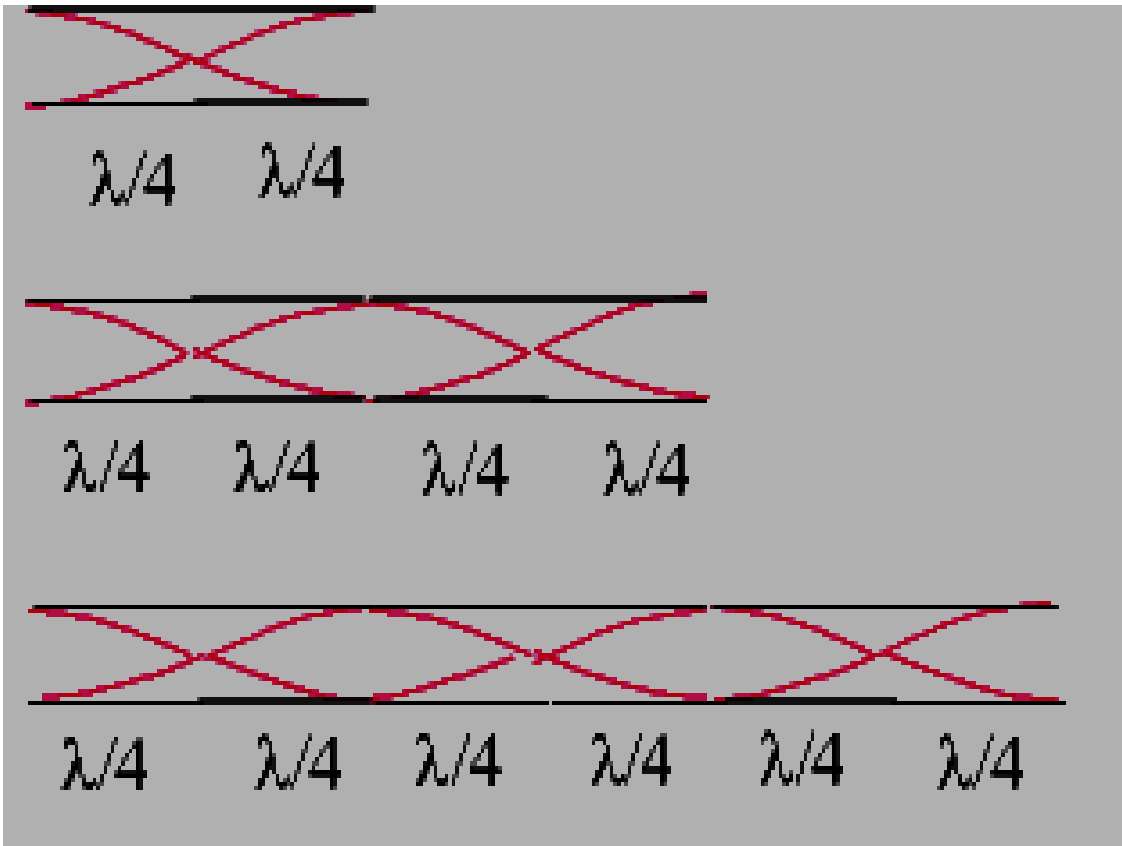
1. Ylä



$$\frac{5\lambda}{4} = L \rightarrow \lambda = \frac{4L}{5}$$

2. Ylä

Avoim putki, ääni



$$2 \cdot \frac{\lambda}{4} = L \rightarrow \lambda = 2L$$

$$4 \cdot \frac{\lambda}{4} = L \rightarrow \lambda = L$$

$$6 \cdot \frac{\lambda}{4} = L \rightarrow \lambda = \frac{2L}{3}$$

$$v = \lambda \cdot f$$

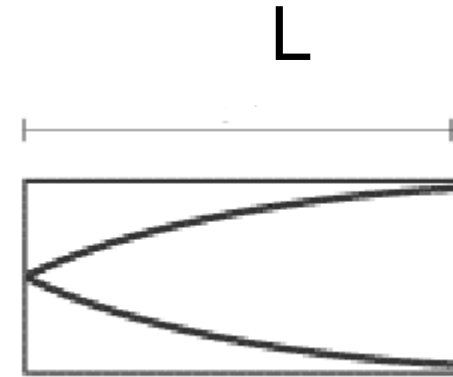
$\lambda, v=340 \text{ m/s} \rightarrow$ taajuus f

30 cm putkeen puhalletaan

a) ilmaa

b) heliumia.

Laske syntyvien äänten
taajuus.



Seisova aaltoliike:

$$\frac{\lambda}{4} = L \rightarrow \lambda = 4L$$

$$c = f \lambda \quad \text{joten} \quad f = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{4L}$$

Äänen nopeudet:

$$c_{helium} = 965 \frac{m}{s}$$

$$c_{ilma} = 343 \frac{m}{s}$$

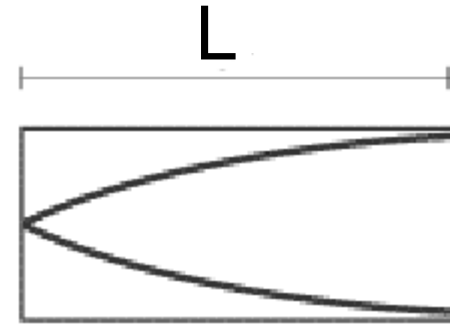
$$f_{helium} = \frac{965 m/s}{4 \cdot 0,30 m} \approx 804 Hz$$

$$f_{ilma} = \frac{343 m/s}{4 \cdot 0,30 m} \approx 286 Hz$$

Täysikasvuisella miehellä äänikanavan pituus on noin 17 cm. Se vastaa toisesta päästään avointa puhallinsoitinta

Laske syntyvien äänten 3 alinta taajuutta,

Seisova aaltoliike, alin taajuus eli pisin aallonpituus:



$$\frac{\lambda}{4} = L \rightarrow \lambda = 4L$$

Seuraavat aallonpituudet $\lambda = \frac{4L}{3}$ $\lambda = \frac{4L}{5}$ jne

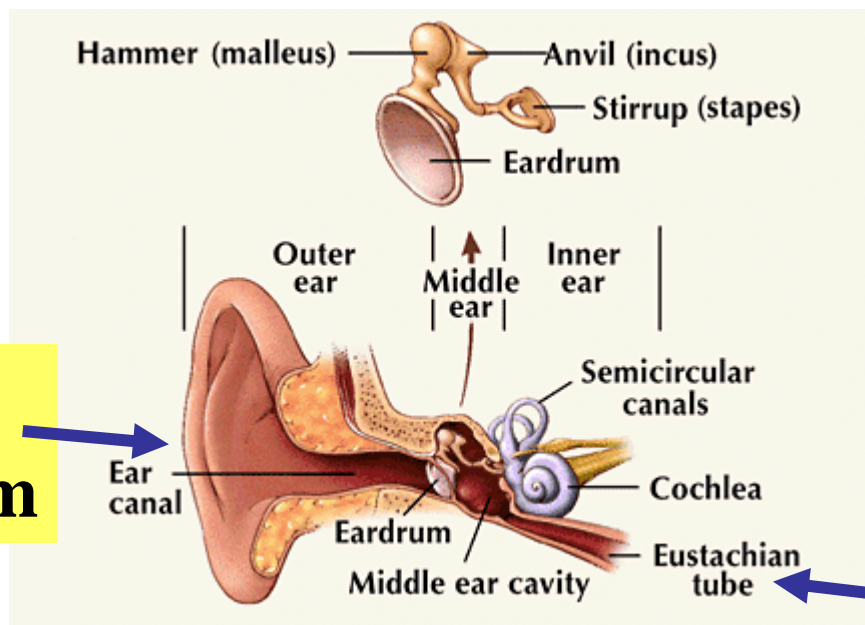
$$c = f\lambda \quad \text{joten} \quad f = \frac{c}{\lambda}$$

$$c = 343 \frac{m}{s}$$

V: alin taajuus 500 Hz, seuraavat 1500 Hz ja 2500 Hz

Miksi kuulo on herkimmillään 3000 Hz alueella?

Korvakäytävä
Pituus $L=2,5$ cm



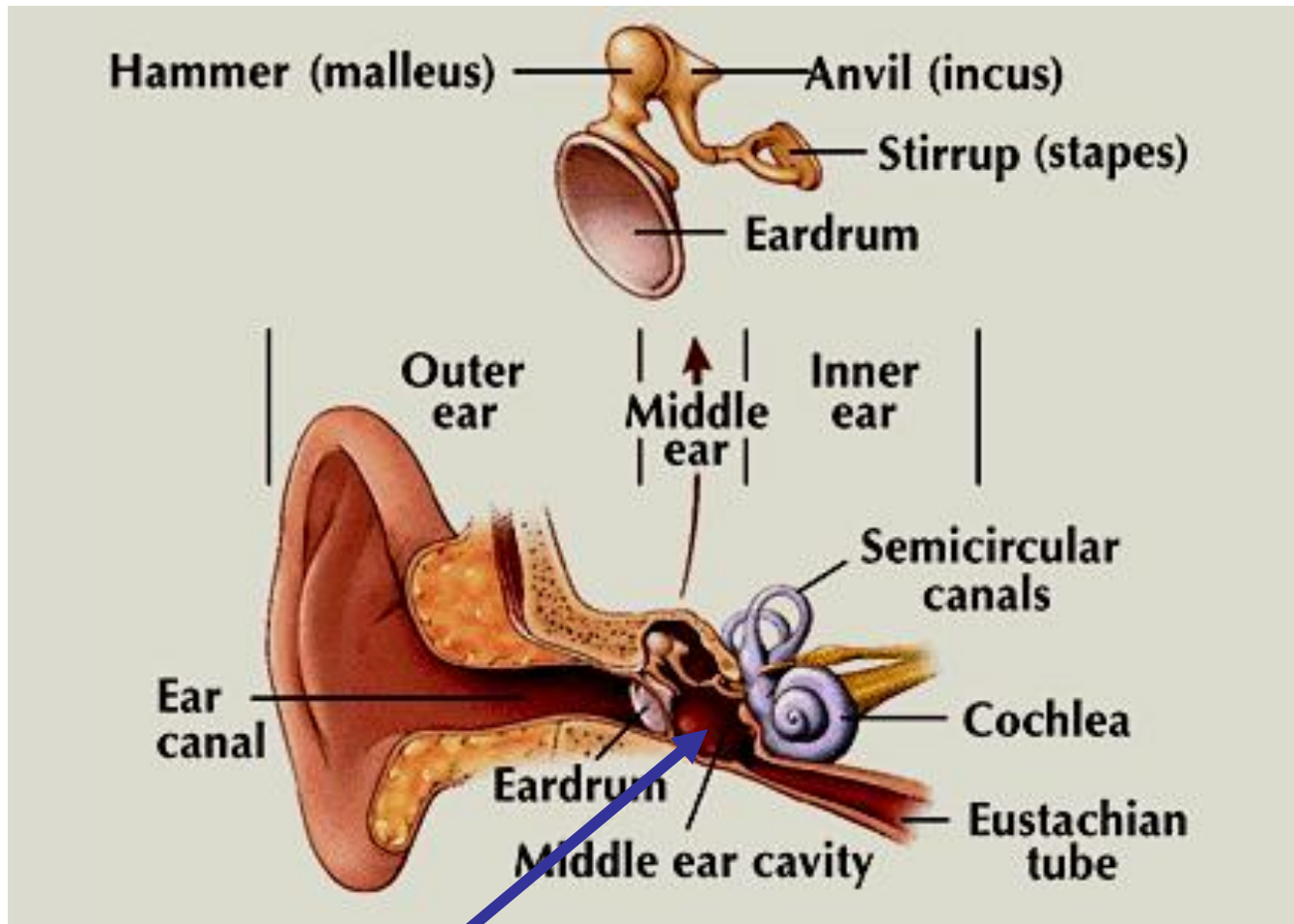
Korvatorvi
(nenään)

Ulkokorvan korvakäytävä muodostaa **puoliavoimen putken**, johon syntyy seisova aaltoliike. Resonanssitaajuus on perustaajuus:

$$\frac{\lambda}{4} = L \rightarrow \lambda = 4L$$
$$v = f \cdot \lambda \rightarrow f = \frac{v}{\lambda}$$

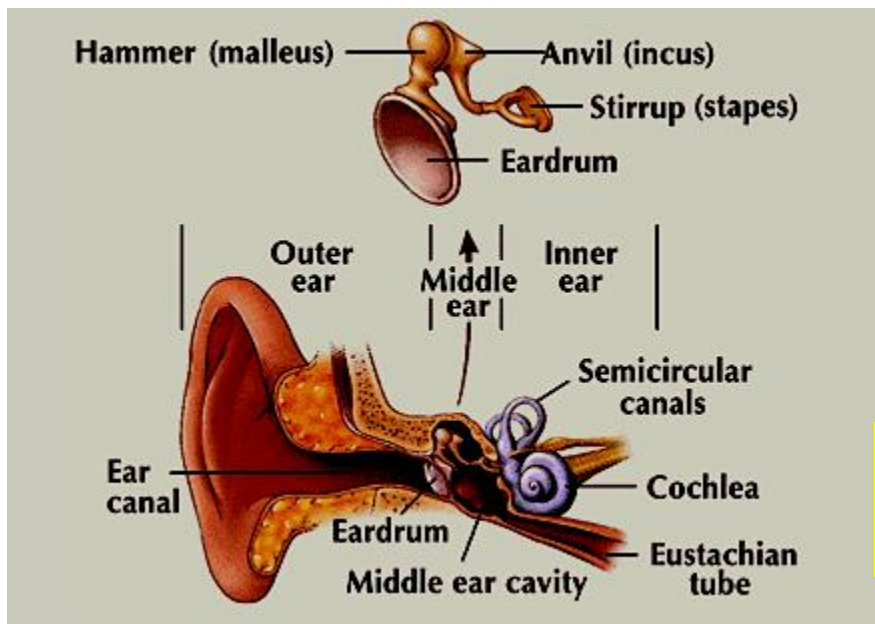
$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{4L} = \frac{343 \frac{m}{s}}{4 \cdot 0,025m} = 3430 \text{ Hz}$$

Mikä merkitys on välikorvalla ja sen kuuloluilla ?
(vasara, alasin jalustin)



Välikorva

Välikorva ja sen kuuloluut **siirtävät** ulkokorvassa vaikuttavat **painevaihtelut** sisäkorvaan ja **vahvistavat ne 22-kertaisiksi**



Tärykalvon pinta-ala 55 mm^2
Eteisikkunan ala $3,2 \text{ mm}^2$

$$\text{Vahvistus} \frac{55 \text{ mm}^2}{3,2 \text{ mm}^2} = 17 - \text{kertaiseksi}$$

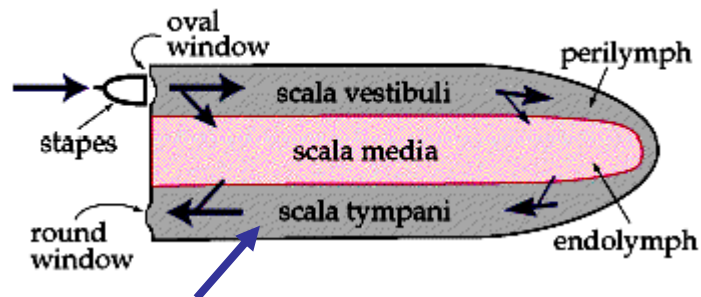
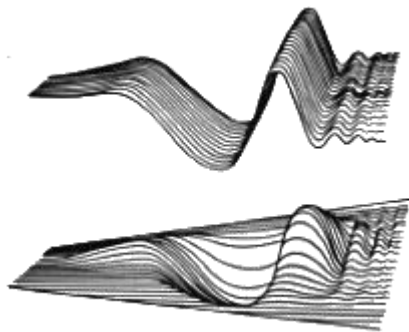
Kuuloluiden vipuvaikutus
vääntömomenttien avulla: 1,3-kertaiseksi

Painevaihteluiden kokonaisvaikutus $17 \cdot 1,3 = 22$ -kertainen

$$I \text{ verrannollinen Paine}^2 \rightarrow \\ (I \propto P^2)$$

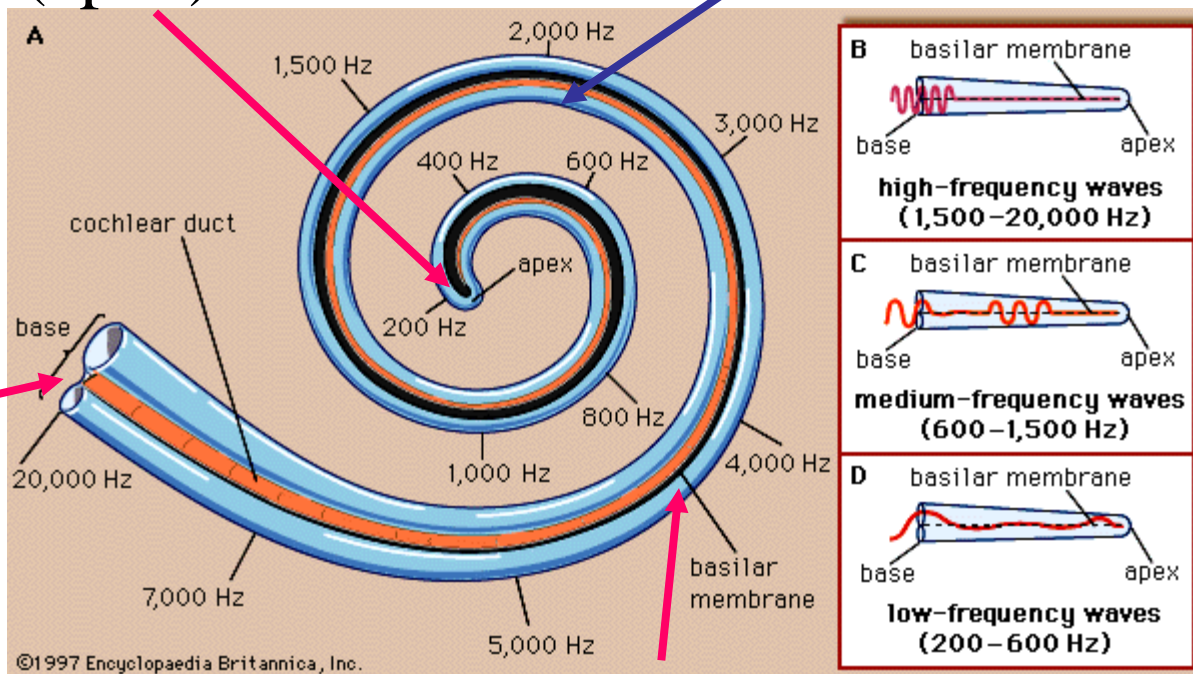
$$\text{desibeleinä} = 10 \cdot \lg(22^2) = 27 \text{ dB}$$

Tyvikalvon värähtelyt: Korkeat alkupäässä, matalat lopussa



kuulokäytävä

Loppu (apex)



Alku

Tyvikalvo

Intensiteetti I :

energia teho

$$I = \frac{E / t}{A} = \frac{P}{A}$$

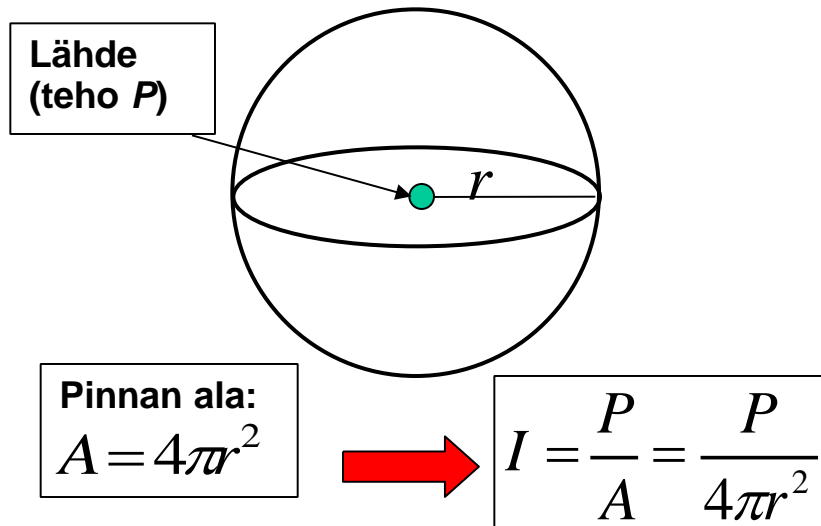
pinta-ala

aikayksikkö

(wattia neliometriä kohti)

- ääni
- säteily (esim. röntgen)
- valo

Pallomaisen säteilyn intensiteetti (joka suuntaan sama säteily):



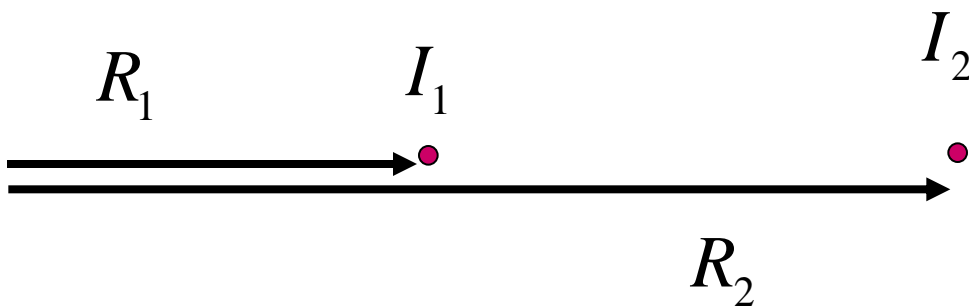
Tällöin säteily ei juurikaan imeydy väliaineeseen. Toimii valolle puhtaassa ilmassa. Äänelle **lyhyillä** etäisyyksillä.

Äänen intensiteetti

Intensiteetti tarkoittaa tehoa pintayksikköä kohti yksikkö on siis wattia neliometriä kohti

$$\frac{W}{m^2}$$

$$I = \frac{\text{teho}}{\text{ala}} = \frac{P}{A}$$



Intensiteetti on kääntäen verrannollinen etäisyyden neliöön

$$\frac{I_2}{I_1} = \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2$$

Ääni on painevaihteluita (pitkittäistä aaltoliikettä)

Äänen intensiteetin yksikkö on kaavan
(teho pinta-alayksikköä kohti) mukaisesti W/m^2

$$I = \frac{P}{A}$$

Yleisesti käytetään logaritmista intensiteettiasteikkoa
(desibeliä dB), **intensiteettitaso**. Se vastaa parhaiten
ihmisten aistien
antamia tunteuksia.

Intensiteettitaso desibeleinä:

$$\beta = 10 \cdot \lg \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

(laskimessa $\lg = \log = 10$ -kantainen logaritmi)

$$I_0 = 1 \cdot 10^{-12} \frac{W}{m^2} = \text{"kuulokynnys, heikoin kuultava ääni"}$$

Aistit ja logaritmit

Ihmisen aistit toimivat ”logaritmisesti”:

Aistivat suhteellisia eroja, mutta eivät niinkään absoluuttisia eroja.

Esimerkiksi 10 g ja 20 g ero havaitaan helposti mutta 1000 g ja 1010 g eroa ei juuri havaita, Vaikka absoluuttinen ero 10 g on yhtä suuri.

Jos mitattavasta suureesta otetaan logaritmi, saadaan ihmisen aistimusta vastaava vertailukelpoinen suure.

Logaritmit ja merkinnät

Laskin	Matematiikka	Mitä tarkoittaa
log	lg	10-kantainen logaritmi
ln	ln	e-kantainen eli luonnollinen logaritmi

10-kantaistet logaritmit

Logaritmi ja 10:n potenssiin korottaminen ovat toisilleen **vastakkaisia** operaatioita

$$\lg(x) = 2,5$$

Huom!

$$10^{\lg(x)} = 10^{2,5}$$
$$x = 10^{2,5} = 316,2277\dots \approx 320$$

Tulon logaritmi → yhteenlasku

$$\lg(a \cdot b) = \lg(a) + \lg(b)$$

Tällöin esimerkiksi intensiteetin 5-kertaistaminen:

$$\begin{aligned} 10 \cdot \lg\left(\frac{5 \cdot I}{I_0}\right) &= 10 \cdot (\lg(5) + \lg\left(\frac{I}{I_0}\right)) \\ &= 10 \cdot \lg(5) + 10 \cdot \lg\left(\frac{I}{I_0}\right) \\ &= 7 \text{ dB} + 10 \cdot \lg\left(\frac{I}{I_0}\right) = 7 \text{ dB} + \text{alkuperäinen taso} \end{aligned}$$

Lisää äänen intensiteettitasoa noin 7 desibeliä

Millainen intensiteetti on 85 dB

Intensiteetin nollassa $I_0 = 10^{-12} \frac{W}{m^2}$ on juuri ja juuri kuultavissa. Se vastaa ihmisen keskimääräistä kuulokynnystä

$$\beta = 85 \text{ dB}$$

$$I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

$$I = ?$$

$$\beta = 10 \cdot \lg\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

$$10 \cdot \lg\left(\frac{I}{I_0}\right) = 85$$

$$\lg\left(\frac{I}{I_0}\right) = 8,5$$

$$\frac{I}{I_0} = 10^{8,5} \rightarrow I = 10^{8,5} \cdot 10^{-12} \frac{W}{m^2} =$$
$$I \approx 3,2 \cdot 10^{-4} \frac{W}{m^2}$$

85 dB ääni on intensiteetiltään 320 miljoonaa kertaa voimakkaampi kuin heikoin kuultava ääni

Eräessä opiskelijaravintona huutokilpailussa yksi kilpailija huusi 100 dB äänellä, kun taas voittaja ylsi 105 desibeliin. Kuinka paljon suurempi oli voittajan äänen intensiteetti?

$$I_0 = 10^{-12} \frac{W}{m^2} \quad dB_1 = 100dB \quad dB_2 = 105dB \quad \frac{I_{105}}{I_{100}} = ?$$

$$dB = 10 \cdot \lg \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

Huutokilpailu: 100 dB vastaan 105 dB

$$100 = 10 \cdot \lg \left(\frac{I_{100}}{I_0} \right)$$

$$\lg \left(\frac{I_{100}}{I_0} \right) = 10$$

$$\frac{I_{100}}{I_0} = 10^{10}$$

$$I_{100} = I_0 \cdot 10^{10}$$

$$105 = 10 \cdot \lg \left(\frac{I_{105}}{I_0} \right)$$

$$\lg \left(\frac{I_{105}}{I_0} \right) = 10,5$$

$$\frac{I_{105}}{I_0} = 10^{10,5}$$

$$I_{105} = I_0 \cdot 10^{10,5}$$

$$\frac{I_{105}}{I_{100}} = \frac{I_0 \cdot 10^{10,5}}{I_0 \cdot 10^{10}} = 10^{0,5} \approx 3,2$$

Siis 5 dB lisä
on 3,2-kertainen
intensiteetti

Yksi huutaja saa aikaan intensiteettitasoltaan 80 dB äänen. Kuinka monta desibeliä lähtee 20 yhtä voimakkaasta huutajasta?

$$\beta = 10 \cdot \lg\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

Jossa $\beta = 80$ dB

Jos intensiteetti on $20I$

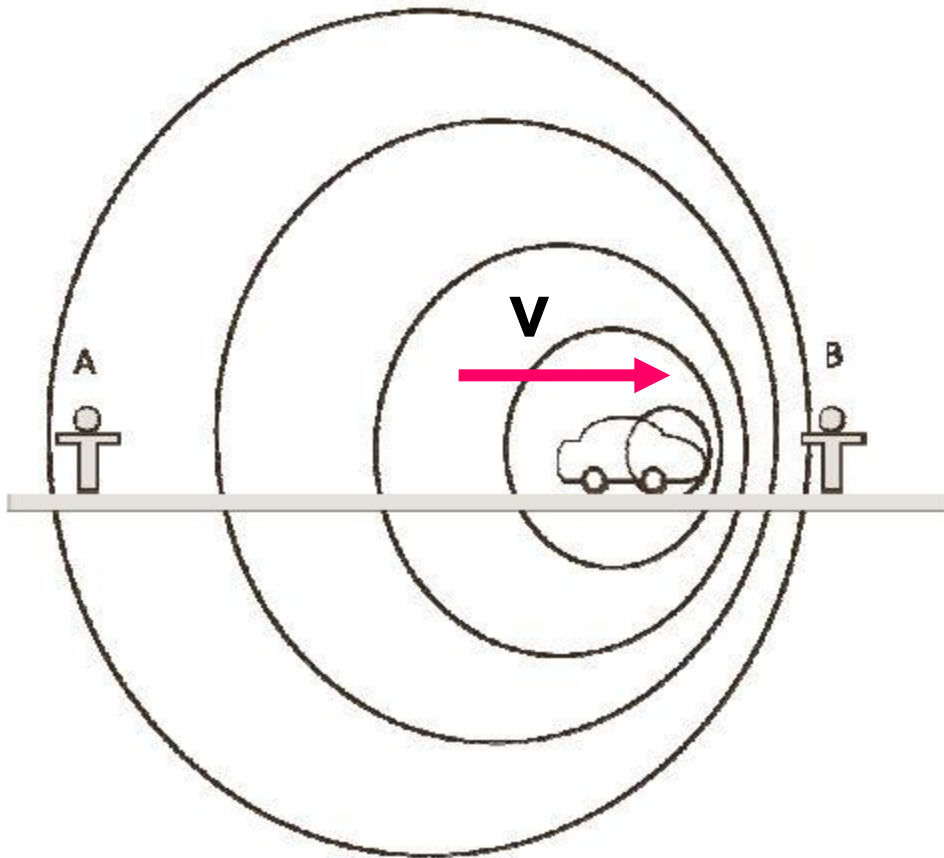
$$\beta_{20} = 10 \cdot \lg\left(\frac{20I}{I_0}\right) = ?$$

V: Intensiteetin 20-kertaistus lisää 13 dB, siis intensiteettitaso on $80 \text{ dB} + 13 \text{ dB} = 93 \text{ dB}$

Doppler: Tulevan taajuus kasvaa, loittonevan alenee

Auto **loittonee** A:sta → A kuulee äänen **alempana**

Auto **tulee kohti** B:ä → B kuulee äänen **korkeamana**
(äänilähteenä on auto)



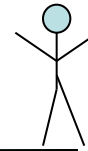
$$f_{\text{havaittu}} = f_{\text{lähde}} \frac{c}{c \pm v_{\text{lähde}}}$$

Havaittu taajuus
(lähde liikkuu):

$$v_{\text{lähde}} = - \textit{tulevalle}$$

$$v_{\text{lähde}} = + \textit{loittonevalle}$$

Lääk 1998:



Lähestyvä ääni, $v = 78,0 \text{ km/h} = 21,666 \text{ m/s}$

Äänen taajuus kuuluu korkeampana, joten jakajassa miinus

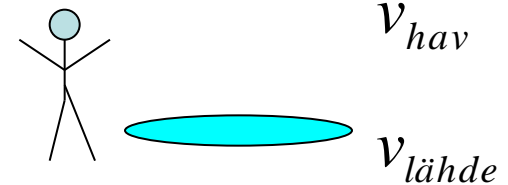
$$f = f_0 \frac{c}{c - v} = 455 \text{ Hz} \frac{340 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s} - 21,666 \text{ m/s}} \approx 486 \text{ Hz}$$

V: Ääni kuuluu 486 Hz taajuisena.

Doppler-ilmio

Doppler siirtymä äänelle: liikkuvan lähteen edessä aaltorintamat ovat tiheämmässä ja takana harvemmassa kuin paikallaan pysyvän lähteen lähettämät aaltorintamat

- **Kohti** tuleva ääni kuuluu **korkeamana** (taajuus suurempi)
- **loittoneva** matalamana (taajuus alempi)



havaintsija lähteellä: havaintsija ylhäällä, lähde alhaalla

$$f_{hav} = f_{lahde} \frac{c}{c \pm v_{lahde}}$$

Havaittu taajuus
(lähde liikkuu):

$$f_{hav} = f_{lahde} \frac{c \pm v_{hav}}{c}$$

Havaittu taajuus
(havaintsija liikkuu):

$$f_h = f_l \frac{c \pm v_{hav}}{c \pm v_{lahde}}$$

Havaittu taajuus
(lähde ja havaintsija
liikkuvat):

Uuno seisoj pysäkillä. Auto tuli kohti nopeudella 108 km/h ja poistui nopeudella 120 km/h. Autosta soitettiin sinimuotoista ääntä taajuudella 600 Hz. Millä korkeudella Uuno kuuli lähestyvän ja loittonevan äänen?

+/- Muistisääntö: lähestyvän ääni korkea
loittonevan matala

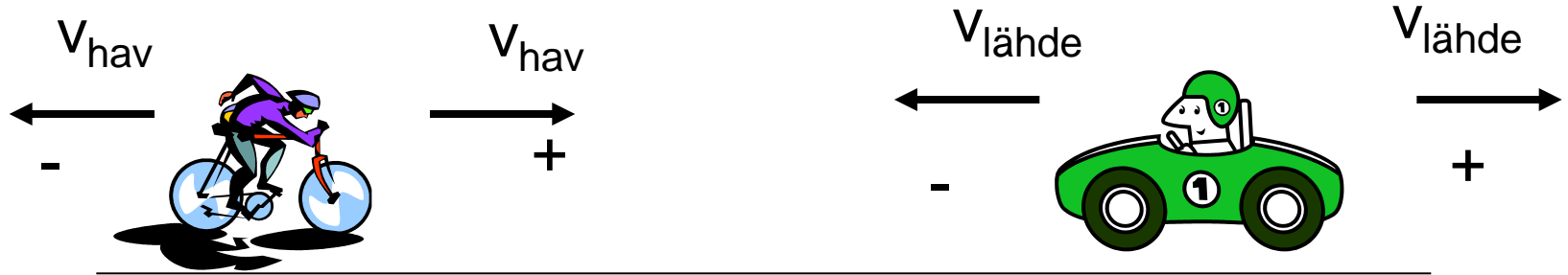
Lähestyvä ääni, $v = 108 \text{ km/h} = 30 \text{ m/s}$

$$f = f_0 \frac{c}{c - v} = 600 \text{ Hz} \frac{340 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s} - 30 \text{ m/s}} \approx 660 \text{ Hz}$$

Loittoneva ääni, $v = 120 \text{ km/h} = 33,3 \text{ m/s}$

$$f = f_0 \frac{c}{c + v} = 600 \text{ Hz} \frac{340 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s} + 33,3 \text{ m/s}} \approx 550 \text{ Hz}$$

Doppler



$$f_{hav} = f_{lähde} \frac{c}{c \pm v_{lähde}}$$

Havaittu taajuus
(lähde liikkuu):

$$f_{hav} = f_{lähde} \frac{c \pm v_{hav}}{c}$$

Havaittu taajuus
(havaintsija liikkuu):

$$f_h = f_l \frac{c \pm v_h}{c \pm v_l}$$

Havaittu taajuus
(lähde ja havaintsija
liikkuvat):

v :n etumerkki voidaan hoidella järkeilemällä
nouseeko vai laskeeko äänen taajuus

**Ääneen, aaltoliikkeeseen ja linsseihin
liittyviä internetin appletteja:**

<http://www.oph.fi/etalukio/opiskelumodulit/fysiikka/kurssi3/>