

Voda



97,2% pozemské vody je v oceánech

2,15% sních a led

0,64% kapalná sladká voda

0,001% atmosféra



18 izotopových forem vody:

^1H , ^2H (D), ^3H (T)



^{16}O , ^{17}O , ^{18}O

výskyt v přírodě:

D – deuterium – stabilní izotop

T – tritium – radioaktivní izotop (12,3 r)

O – vše stabilní izotopy

H – ^{16}O – H

H – ^{16}O – D

D – ^{16}O – D

H – ^{16}O – T

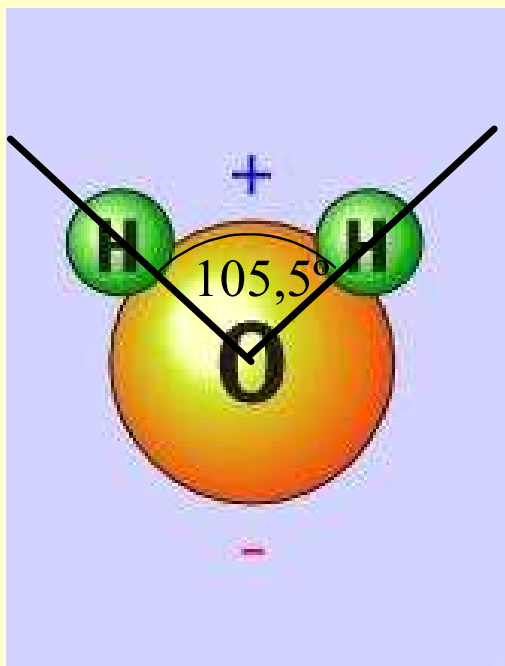
T – ^{16}O – T

D – ^{16}O – T

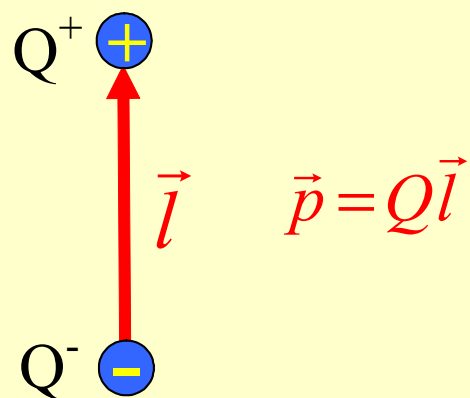
+ ^{17}O , ^{18}O

H_2^{16}O	99.7317 %	18.01056 g mol ⁻¹
H_2^{17}O	0.0372 %	19.01478 g mol ⁻¹
H_2^{18}O	0.199983 %	20.01481 g mol ⁻¹
HD^{16}O	0.031069 %	19.01684 g mol ⁻¹
HD^{17}O	0.0000116 %	20.02106 g mol ⁻¹
HD^{18}O	0.0000623 %	21.02109 g mol ⁻¹
D_2^{16}O	0.0000026 %	20.02312 g mol ⁻¹
HT^{16}O	stopy	20.01879 g mol ⁻¹
T_2^{16}O	0 %	22.02701 g mol ⁻¹

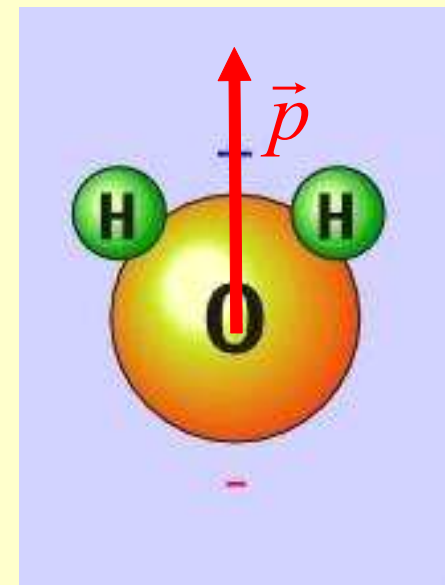
Molekula vody



elektrický dipól



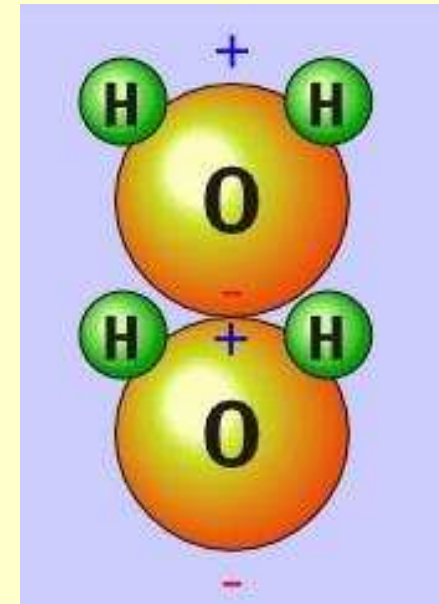
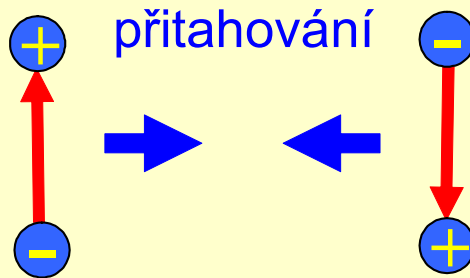
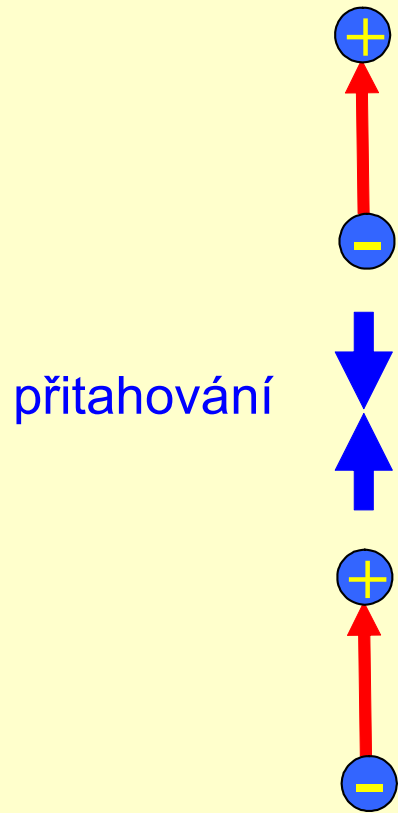
elektrický dipólový moment



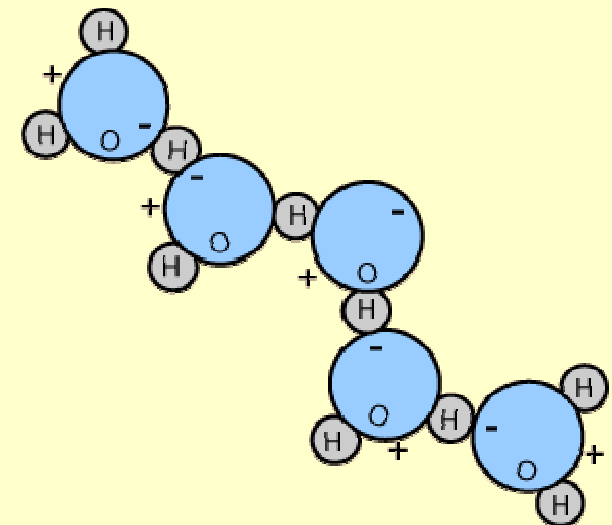
délka vazby H – O 0,991Å

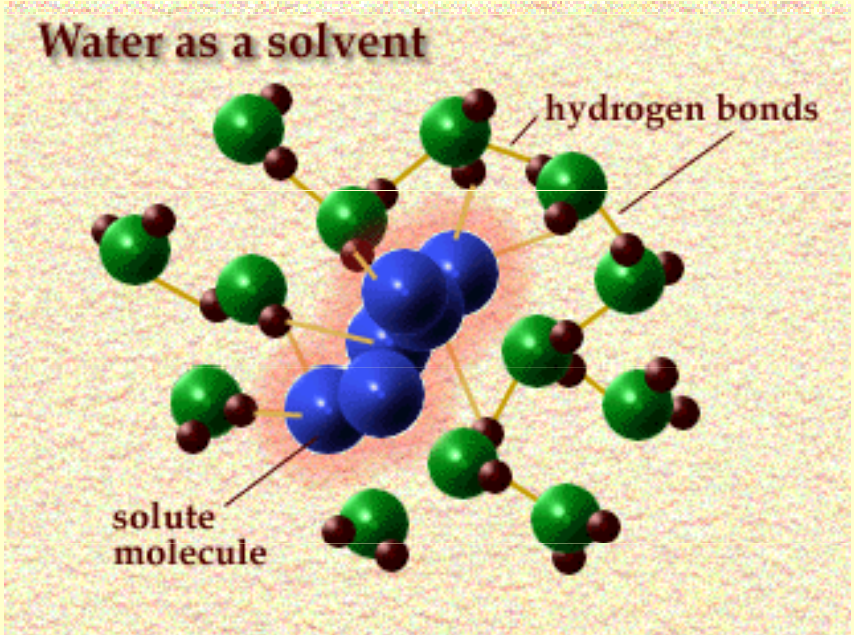
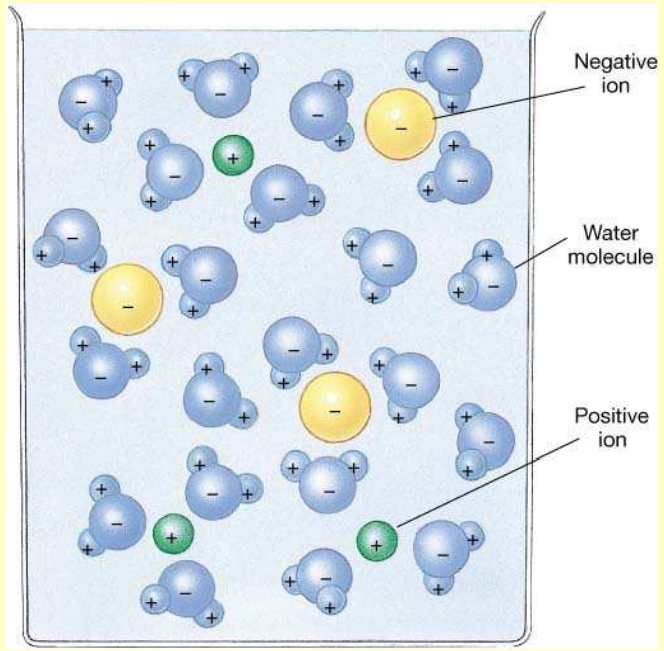
vazebná energie vazby H – O 492 kJ/mol

Silná molekulární interakce van der Waalsovy síly (vodíková vazba)



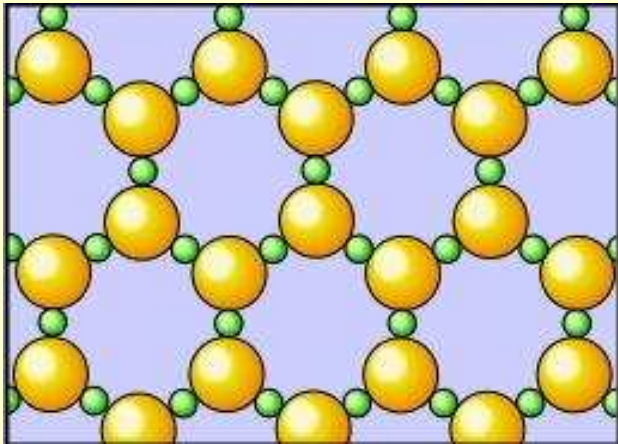
- anomálie vody
- vysoké povrchové napětí
- vysoké měrné teplo
- rozpouštědlo



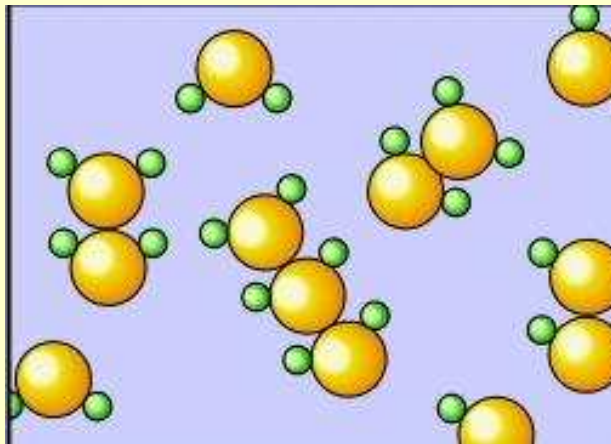


Skupenství vody

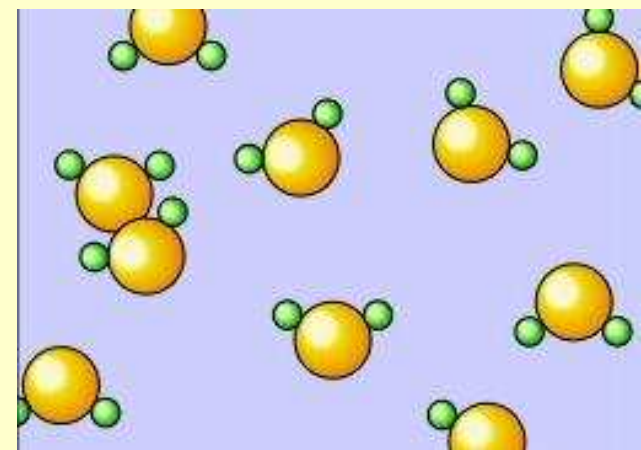
led



kapalina



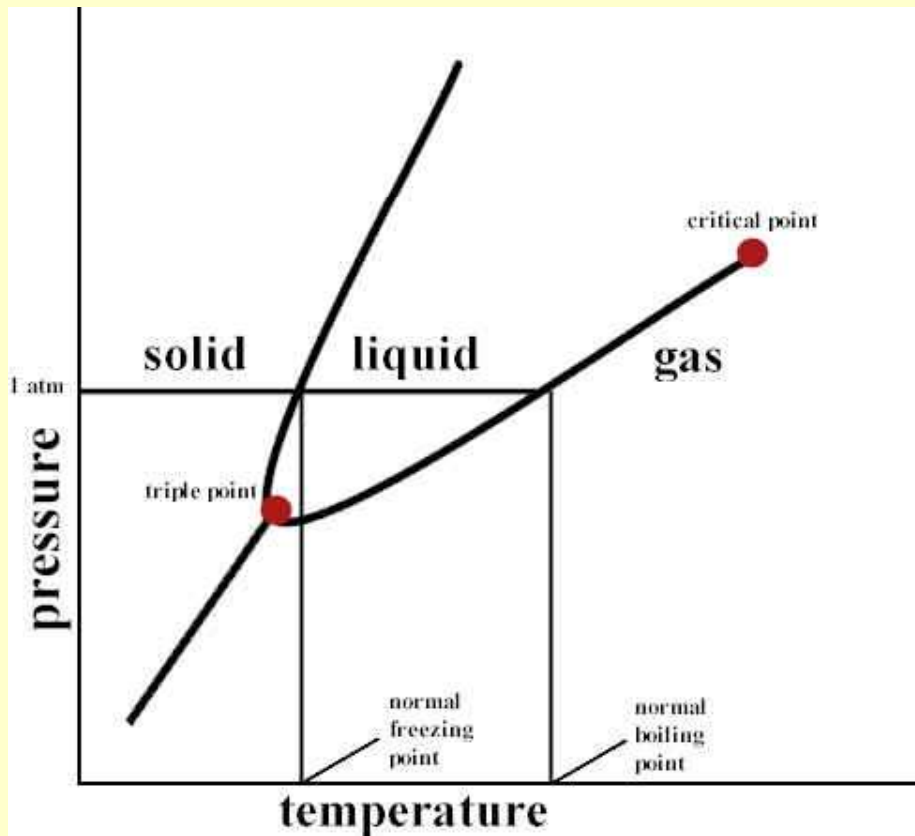
pára



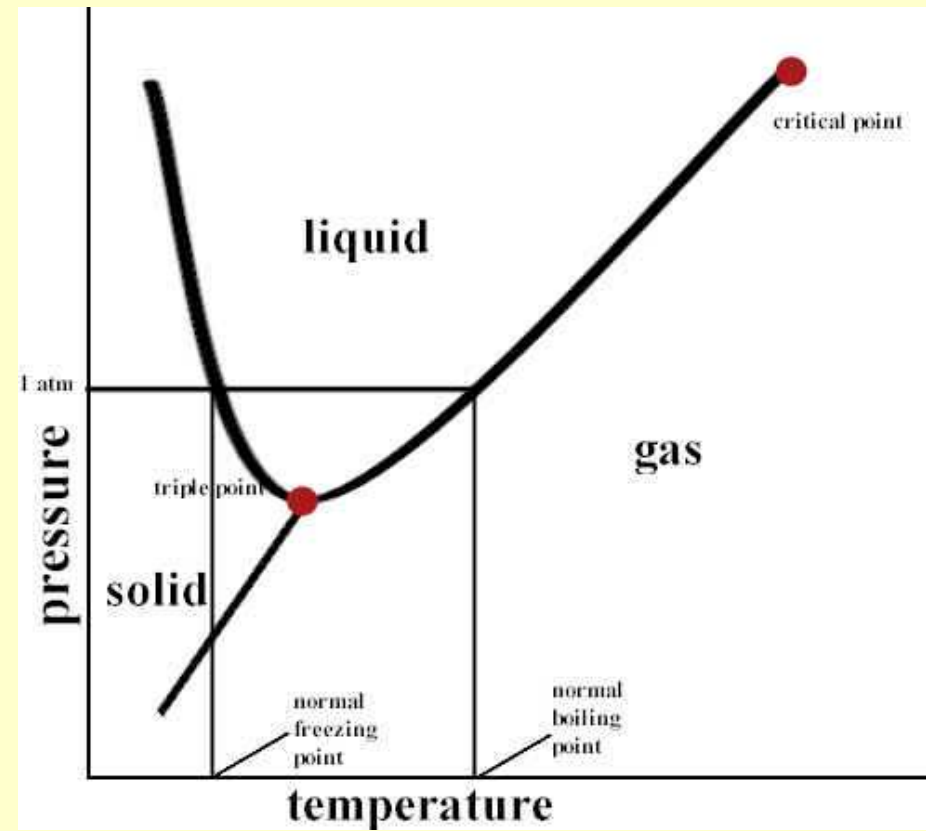
voda je jediná látka, která se na Zemi vyskytuje současně ve všech třech skupenstvích

Změny skupenství, fázový (pT) diagram

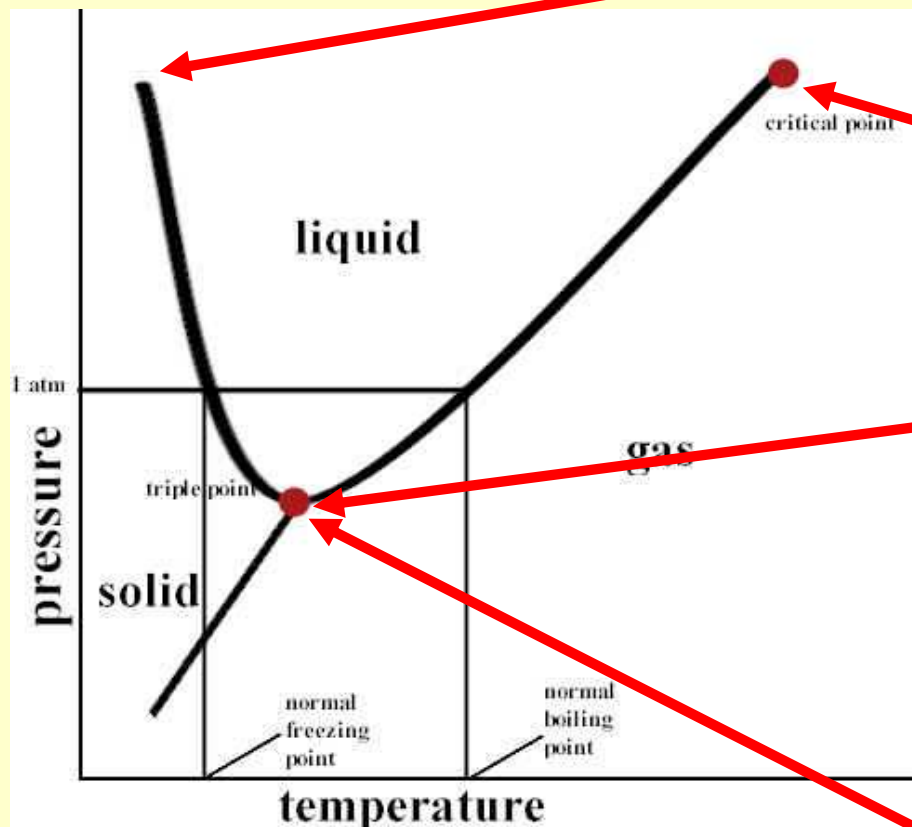
obvyklá látka



voda



Změny skupenství, fázový (pT) diagram



nejnižší teplota kapalně vody
 -22°C při 207.5 MPa

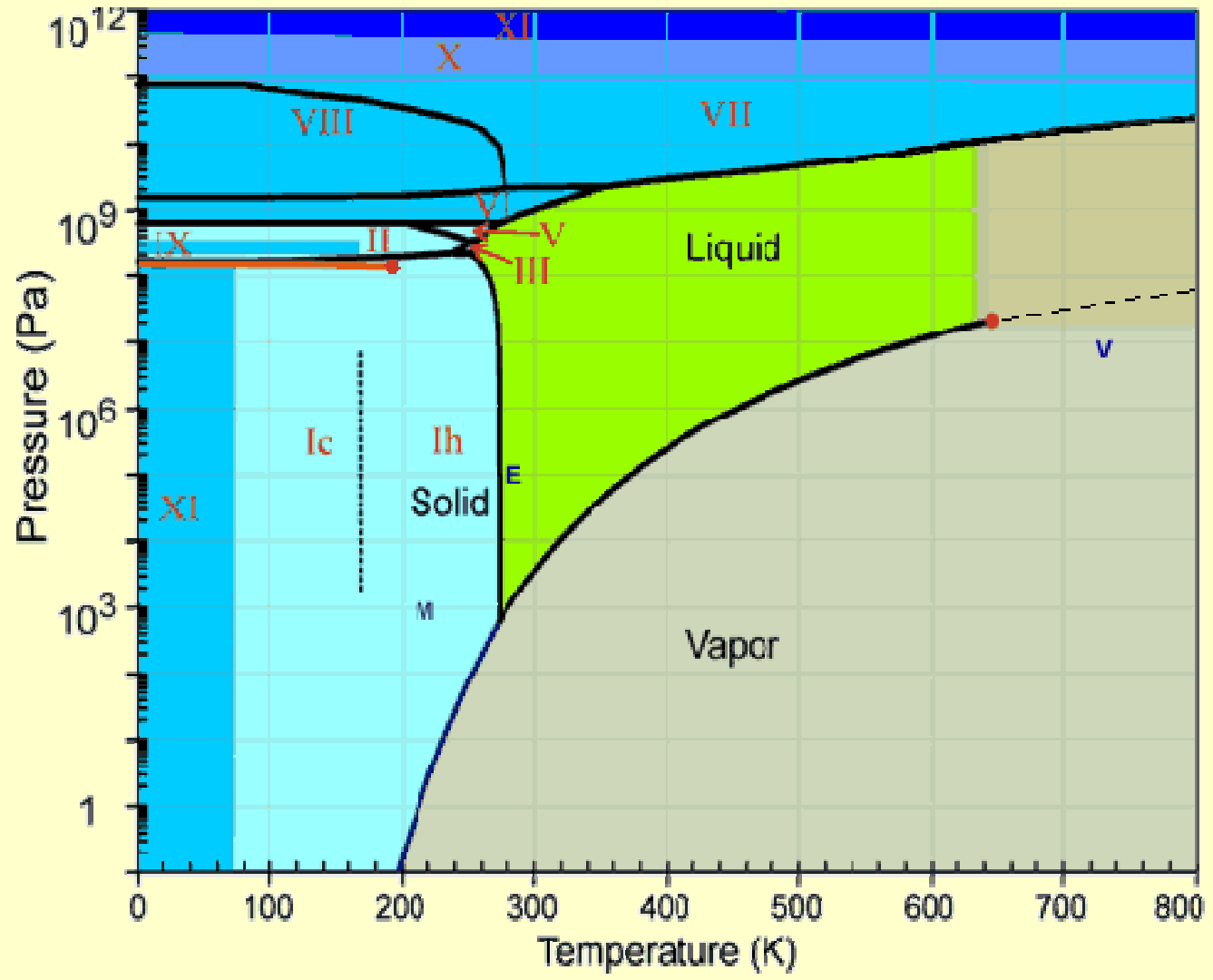
nejvyšší teplota kapalně vody
 373.946°C , >22.064 MPa

nejnižší tlak kapalně vody
611.657 Pa při 0.01°C

nejvyšší tlak kapalně vody
 ~ 12 GPa při 373.946°C

trojný bod vody 0.01°C (273.16 K
přesně definitivně), 611.657 Pa,

kritický bod 647.096 K, 22.064
MPa, 322 kg m^{-3}



anomálie vody

led má menší hustotu než kapalná voda

hustota ledu při 0 °C: 916,7 kg/m³

voda má největší hustotu pro teplotu 4°C

hustota vody při 3,984 °C: 999,972 kg/m³

kondenzované fáze vody s největší a nejmenší hustotou jsou od sebe vzdáleny 4°C

v oblasti 0 – 4°C má voda záporný koeficient teplotní roztažnosti, pro T= 4°C je koef. teplotní roztažnosti nulový

zvyšování tlaku **snižuje** bod tání – regelace ledu

vysoké měrné teplo

$$c_{\text{voda}} = 4\,189 \text{ J/kgK}$$

jiné příklady:

železo: 452 J/kgK

vzduch: 1000 J/kgK

cihla: 900 J/kgK

stabilizace teploty na Zemi, přenos tepla na velkou vzdálenost
– mořské proudy, ústřední topení

Za jak dlouho by člověk „vychladnul“ o 1°C?

$$c_{\text{tělo}} = 3500 \text{ J/kgK}$$

$$mc\Delta T = Pt \quad \Rightarrow \quad t = \frac{mc\Delta T}{P}$$

$$t = \frac{80 \cdot 3500 \cdot 1}{80} = 3500 \text{ s}$$

Příklad: akumulace tepla

Jaké množství vody 80°C teplé by uschovalo energii potřebnou na celoroční vytápění rodinného domu?

běžný dům cca 10 000kWh/rok = 36GJ

pasivní dům cca 2 000kWh/rok = 7,2GJ

$$Q = mc\Delta T \quad \Rightarrow \quad m = \frac{Q}{c\Delta T}$$

$$m = \frac{36 \cdot 10^9}{4200 \cdot 50} = 170\text{m}^3, \quad 5,5 \times 5,5 \times 5,5\text{m}$$

pasivní dům 15kWh/m² rok

vysoká měrná tepla skupenských přeměn

tání: $3,3 \times 10^5$ J/kg

vypařování: $2,50 \times 10^6$ J/kg

sublimace: $2,83 \times 10^6$ J/kg

měrné teplo

$c = 4\,189$ J/kgK

1 kg ledu 0°C + 1 kg vody 80°C = 2 kg vody 0°C

Příklad: pocení maratónce

kolik vypoť maratónec za jeden závod?

Předpoklady:

- rovnovážný výkon 80W (tepelný výkon v klidu je roven chlazení)
- mechanický výkon při běhu = 300W
- účinnost svalové práce = 20 – 25%

$$Q = \frac{P \cdot t}{\eta} = m \cdot l_{\text{vyp}} \quad \Rightarrow \quad m = \frac{P \cdot t}{\eta \cdot l_{\text{vyp}}}$$

$$m = \frac{300 \cdot 3600 \cdot 2,25}{0,2 \cdot 2,5 \cdot 10^6} = 5\text{kg}$$

udávaná hodnota 4 – 6 litrů

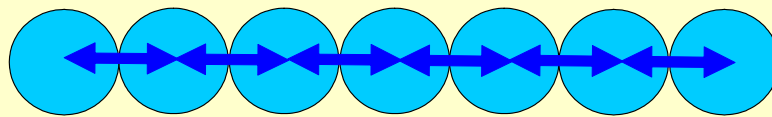
Povrchové napětí



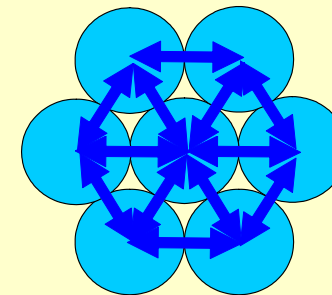
povrchové napětí

příčina vzniku: interakce mezi molekulami

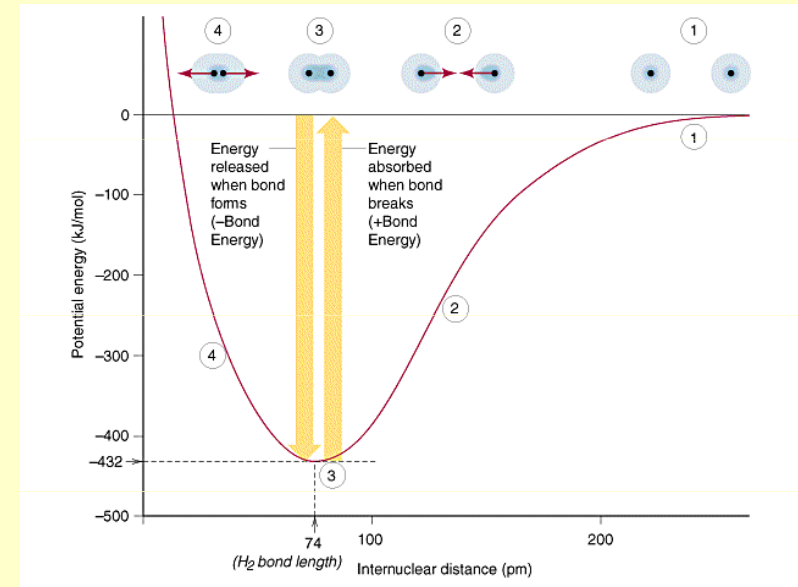
vytvoření každé vazby – snížení energie



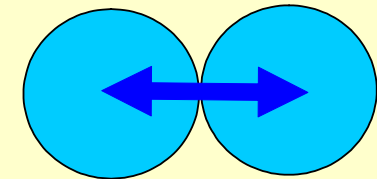
výhodnější konfigurace



vazebná energie

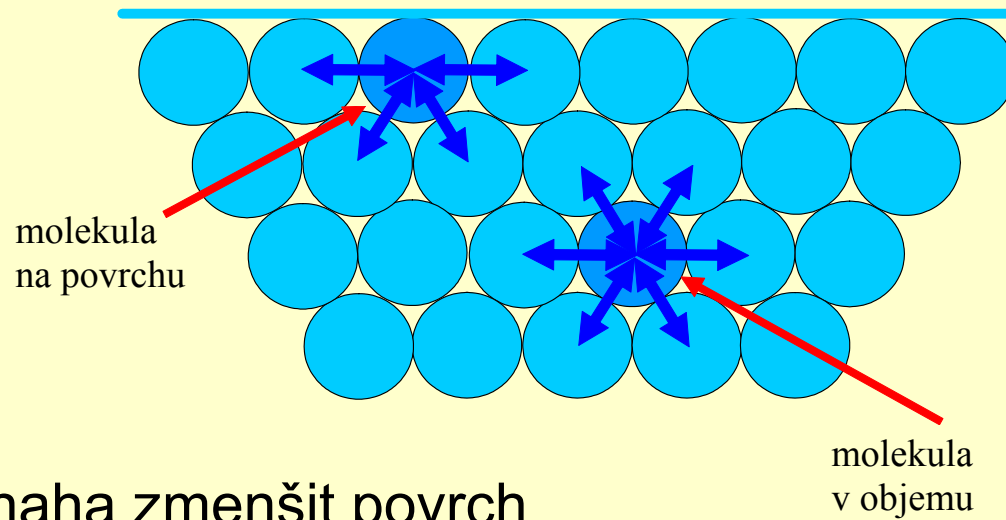


vazba



povrch kapaliny

rozhraní kapalina – stěna nádoby



snaha zmenšit energii = snaha zmenšit povrch

povrchové napětí => povrchová energie

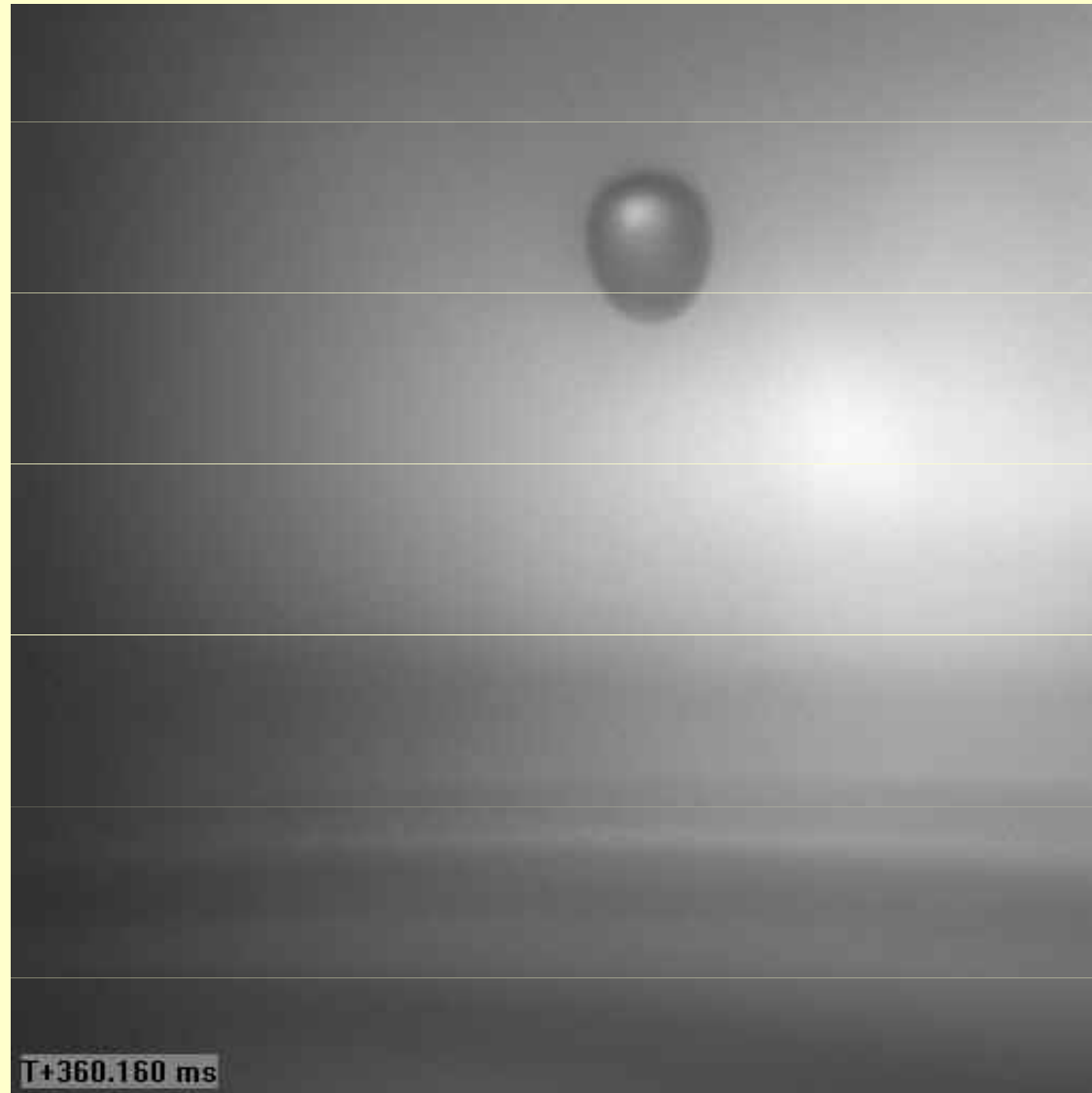
$$E_p = \sigma \cdot S$$

látka	σ [J/m ²]
voda	$76 \cdot 10^{-3}$
etanol	$22 \cdot 10^{-3}$
rtuť	$476 \cdot 10^{-3}$

tvar vodní kapky?

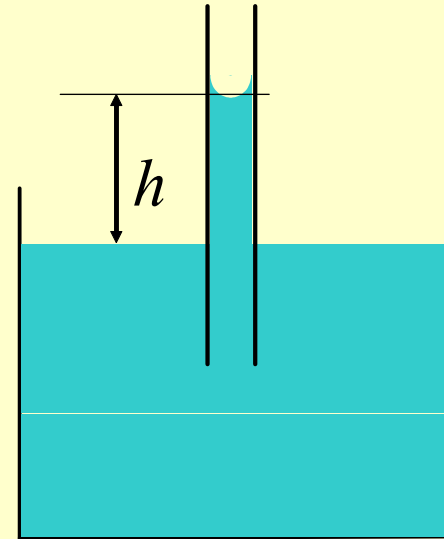






kapilární elevace

$$h = \frac{2\sigma}{r\rho g}$$



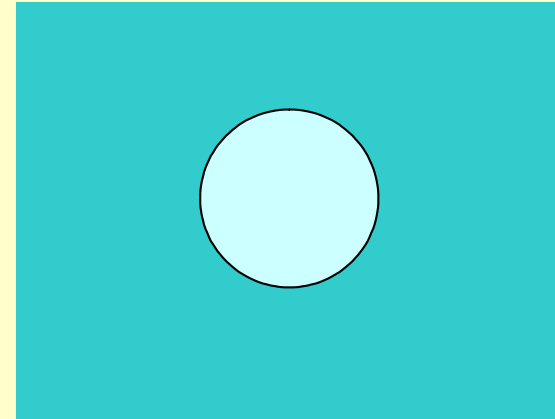
příklad

$$r = 0,5\text{mm} \Rightarrow h = \frac{2 \cdot 76 \cdot 10^{-3}}{0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 \cdot 10} = 3\text{cm}$$

$$r = 0,5\mu\text{m} \Rightarrow h = \frac{2 \cdot 76 \cdot 10^{-3}}{0,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 \cdot 10} = 30\text{m}$$

nukleace

- počátek tuhnutí
- počátek varu



- vznik zárodku =
- vznik objemu nové fáze
termodynamicky výhodné, vznik nových vazeb – snížení energie
 - vznik rozhraní dvou fází
termodynamicky nevýhodné, vznik povrchu s povrchovou energií

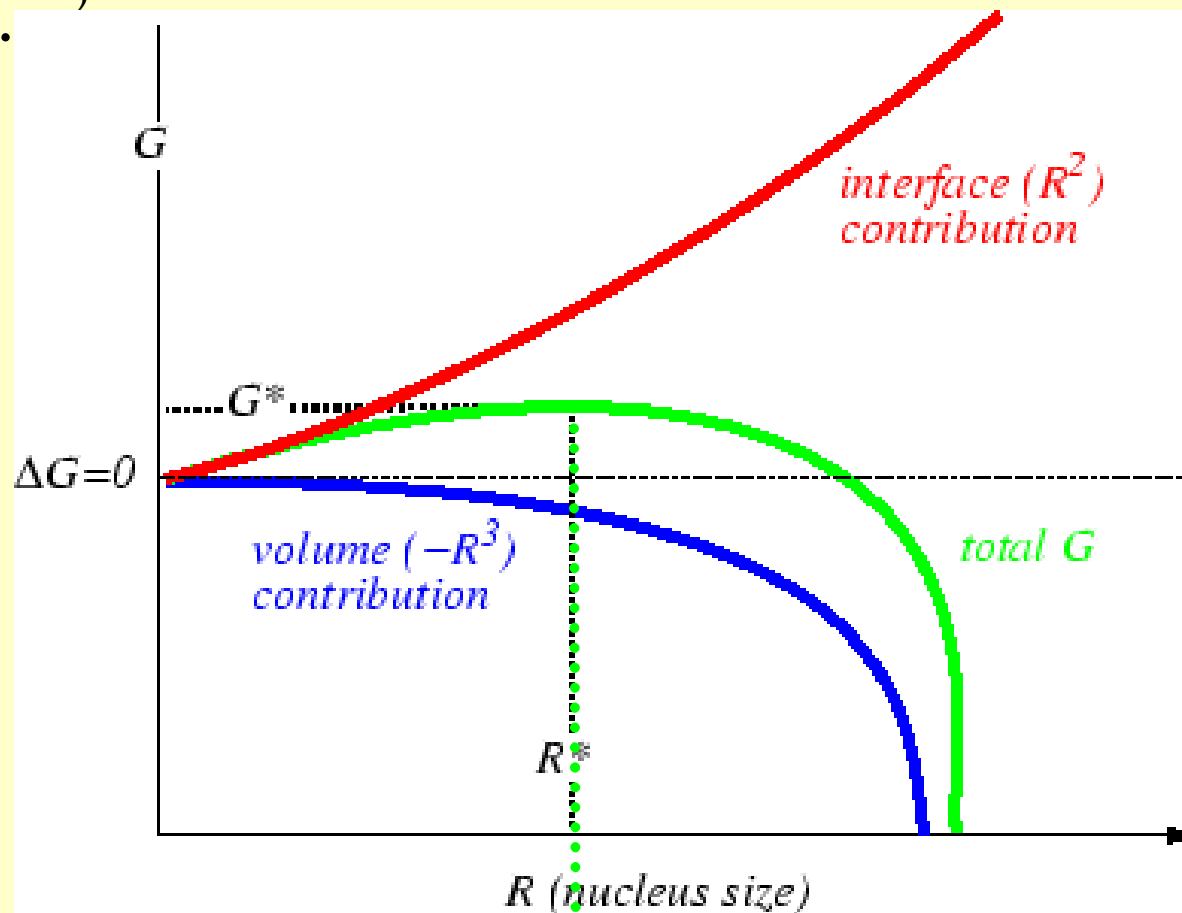
Gibbsova energie (konstantní tlak a teplota)

$$\Delta G_{\text{celk}} = \Delta G_{\text{objem}} + \Delta G_{\text{povrch}}$$

$$\Delta G_{\text{celk}} = -A \cdot r^3 + B \cdot r^2$$

podchlazená voda

přehřátá voda (utajený var)



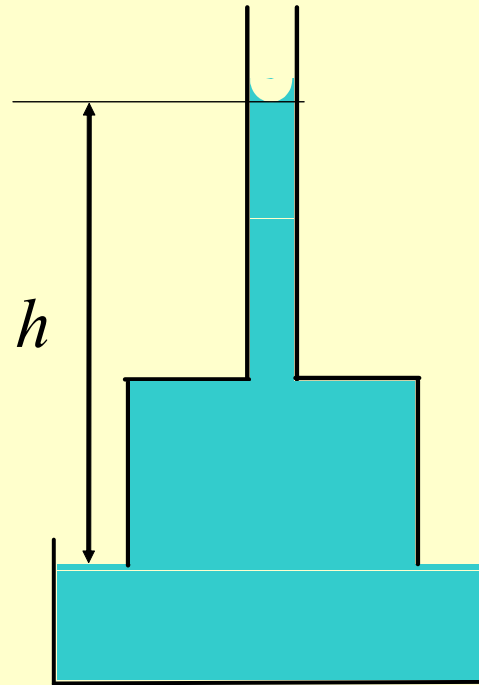
← zárodek se rozpouští

→ zárodek roste

Jak se dostane voda na vrchol 100m stromu?

kapilární elevace

$$h = \frac{2\sigma}{r\rho g}$$



$$r = 0,15\mu\text{m} \Rightarrow h = \frac{2 \cdot 76 \cdot 10^{-3}}{0,15 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 \cdot 10} = 100\text{m}$$

Hydrostatický tlak uvnitř kmene

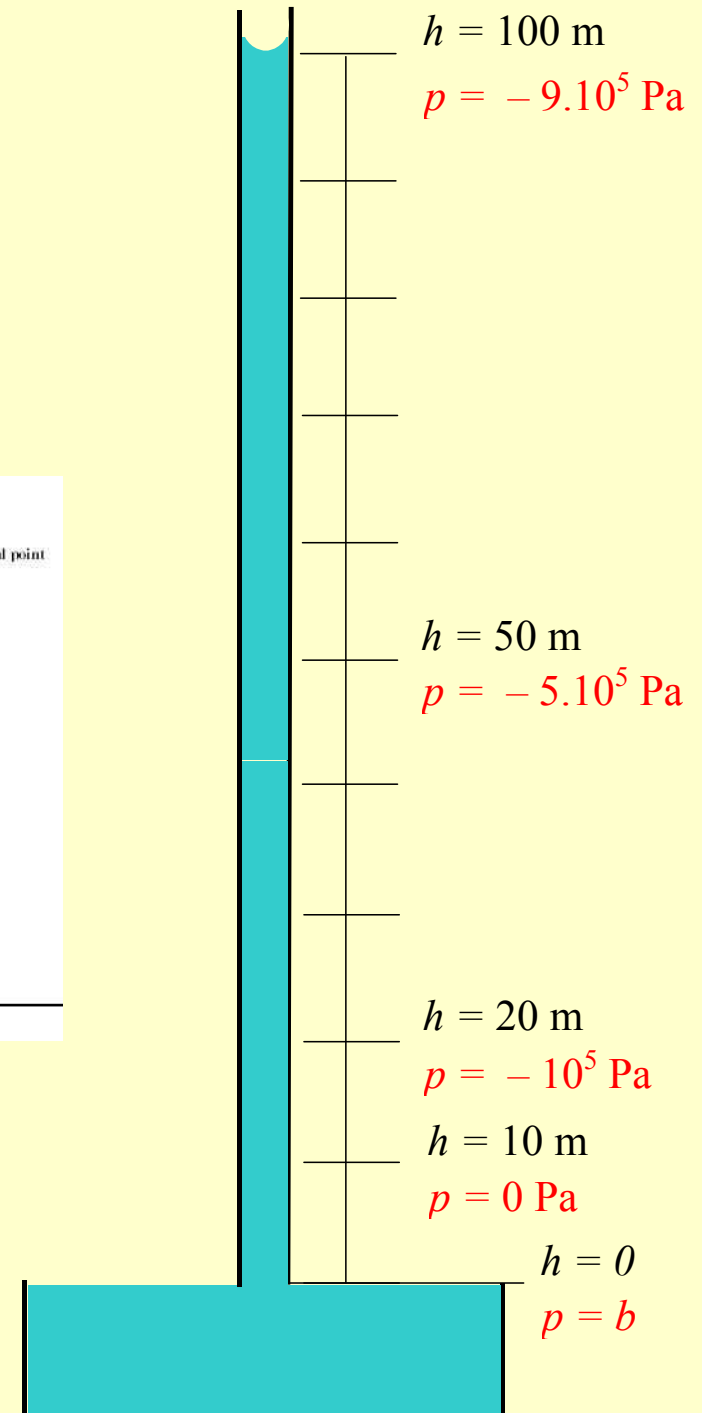
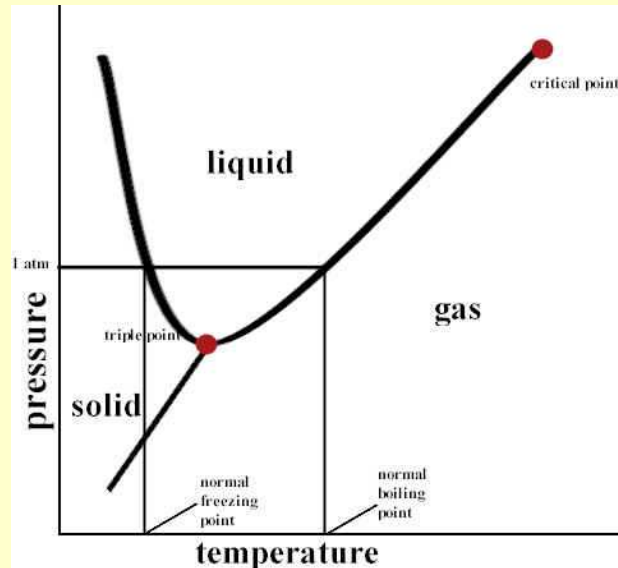
Záporný tlak kapaliny?

Co se stane s kapalinou, když snížíme tlak?

začne vřít!

var = „roztržení“
kapaliny

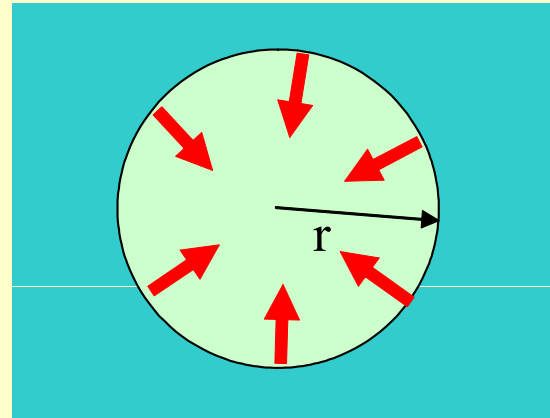
pokud zabráníme vzniku varu, kapalina
snese i záporný tlak.



přehřátá voda

povrchové napětí se snaží zmenšit
plochu rozhraní kapalina – pára

tedy zmenšit velikost bubliny



síla povrchového napětí stlačuje páru uvnitř bubliny

$$E_p = \sigma \cdot S = \sigma \cdot 4\pi r^2$$

$$\Delta E_p = F \cdot \Delta r$$

$$dE_p = p \cdot S \cdot dr = p \cdot 4\pi r^2 dr$$

$$\frac{dE_p}{dr} = \sigma \cdot 4\pi \cdot 2r$$

$$p = \frac{1}{4\pi r^2} \frac{dE_p}{dr}$$

$$p = \frac{1}{4\pi r^2} \sigma \cdot 4\pi \cdot 2r = \frac{2 \cdot \sigma}{r}$$

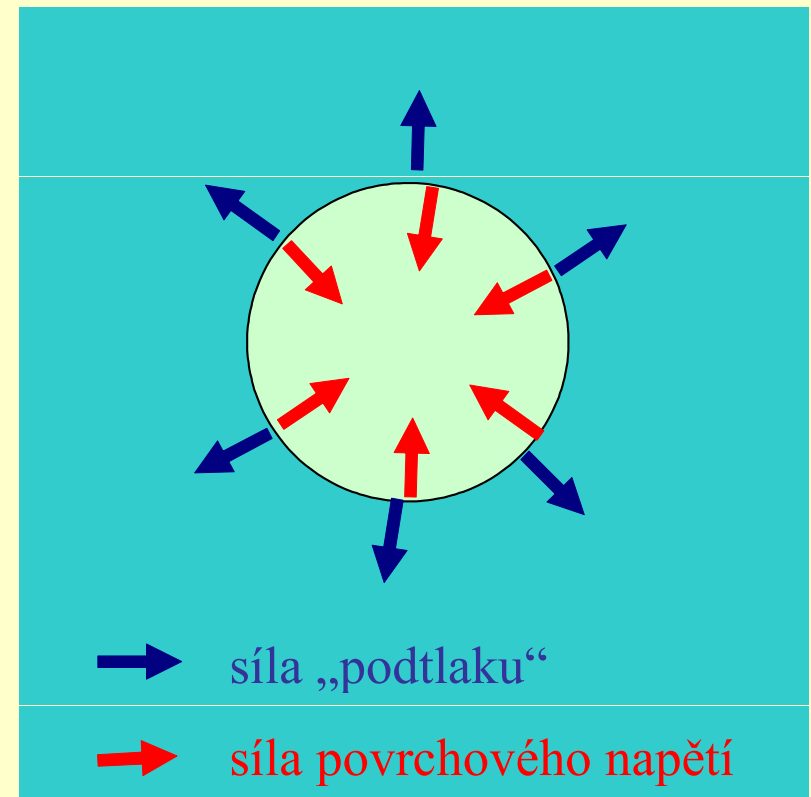
Příklad: $r = 0,15\mu\text{m}$

$$p = \frac{2 \cdot 76 \cdot 10^{-3}}{0,15 \cdot 10^{-6}} = 10 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

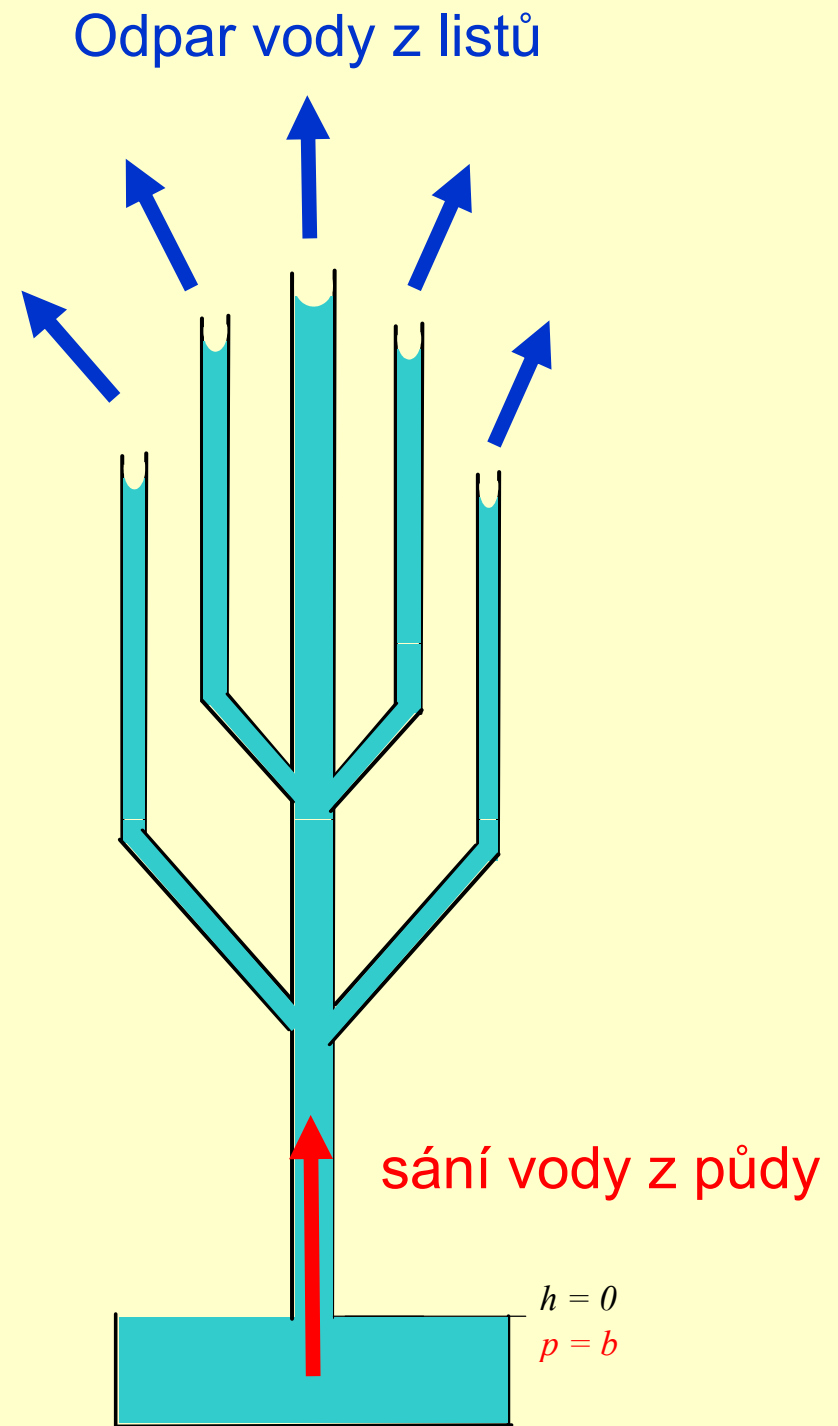
hydrostatický tlak 100m sloupce vody

Povrchové napětí zajišťuje sání vody dvěma způsoby:

- kapilární vztlak zvedá vodu vzhůru
- povrchová energie zabraňuje vzniku varu (v tenkých kapilárách nemůže vzniknout bublinka nadkritické velikosti)



Proudění vody:



$$\sigma_{\text{solid-vapor}} \approx 109 \text{ mJ/m}^2$$

$$\sigma_{\text{liquid-vapor}} = 76 \text{ mJ/m}^2$$

$$\sigma_{\text{solid-liquid}} \approx 33 \text{ mJ/m}^2$$

[Note these satisfy Antonow's equation: $\sigma_{\text{solid-vapor}} \approx \sigma_{\text{liquid-vapor}} + \sigma_{\text{solid-liquid}}$]

Zvuk

Zvuk – mechanické vlnění látkového prostředí

plyn – podélné vlnění

kapalina – podélné vlnění

pevná látka – podélné i příčné vlnění

rychlost zvuku

$$c_{\text{plyn}} < c_{\text{kapalina}} < c_{\text{pevná látka}}$$

látka	c [m/s]
vzduch	340
voda	1500
led	3250
ocel (podélná)	5100
ocel (příčná)	3300

Vlastnosti zvuku:

- intenzita (hlasitost)
- výška
- barva

1) Intenzita

Weberův – Fechnerův zákon:

Změna počítku je úměrná relativní změně podnětu

a - počíttek

b - podnět

$$\Delta a = \frac{\Delta b}{b}$$

$$da = \frac{db}{b}$$

diferenciální rovnice pro funkci $a(b)$

Řešení:

$$\int da = \int \frac{db}{b}$$

$$a = \ln b + C$$

$$a = \log \frac{b}{b_0}$$

jednotka hlasitosti: bel [B]

1 bel = zdesetinásobení intenzity

častěji používaný 1dB – decibel = 1,26 x intenzita

$$a = 10 \cdot \log \frac{b}{b_0} \quad [\text{dB}]$$

podnět – fyzikální intenzita [W/m^2]

$b_0 = 10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$ – prahová intenzita

práh bolesti: $10 \text{ W}/\text{m}^2 = 130\text{dB}$

Dynamický rozsah sluchu – 13 řádů!

20dB odlehlý les, tichá jeskyně

35dB intenzita hluku v tiché místnosti (knihovna)

65dB rušná kancelář , psací stroj

80dB v bytě již může vydráždit sousedy k agresivnímu jednání

90dB těžký automobil, sekačka na trávu

100 až 105dB diskotéka

105dB pneumatické kladivo, hlasité silniční práce

120 až 130dB startující letadlo i raketoplán

nad 130dB bolest

Weberův – Fechnerův zákon platí jen přibližně

používá se také tzv. Stevensův zákon

$$a = k \cdot b^y$$

k, y – konstanty, různé pro jiné vjemy

Umíme si představit, jaké vibrace odpovídají prahové intenzitě 10^{-12} Wm^{-2} ?

$$I \approx A^2$$

A - amplituda

$$I = \frac{1}{2} \rho v \omega^2 A^2$$

ladička

$$A = \sqrt{\frac{2I}{\rho v \omega^2}}$$

těsně po
úderu

$$a = 100 \text{ dB} \quad A = 0,3 \text{ mm}$$

$$A = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-12}}{1,3 \cdot 340 \cdot 1000^2}} \\ = 0,7 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

na prahu slyšitelnosti

$$a_o = 0 \text{ dB} \quad A_o = ?$$

$$a = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_o}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{A^2}{A_o^2}\right) \quad \Rightarrow \quad A = 3 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 3 \text{ nm}$$

2) výška

výška je dána frekvencí

oktáva – zdvojnásobení frekvence, poměr 2:1

kvinta – poměr 3:2

kvarta – poměr 4:3

velká tercie – poměr 5:4

3) barva

složený tón:

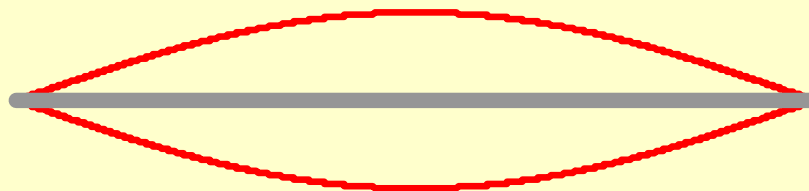
komorní a: $440\text{Hz} + 880\text{Hz} + 1320\text{Hz} + \dots\dots\dots$

Proč existují složené tóny z násobných frekvencí?

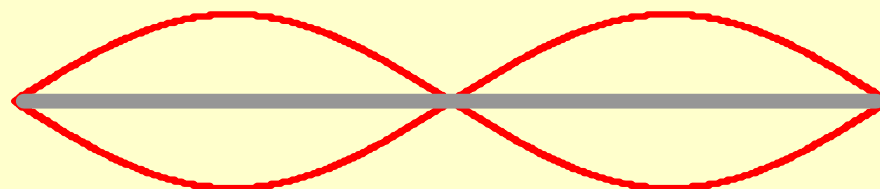
protože právě tak kmitají zdroje zvuku!

Kmity struny

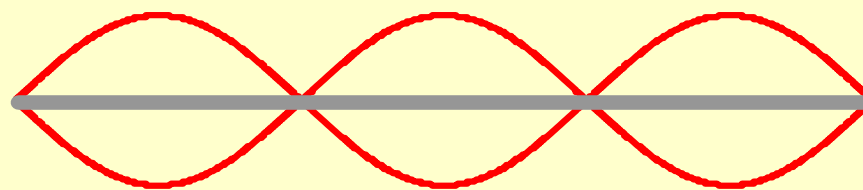
1. mód



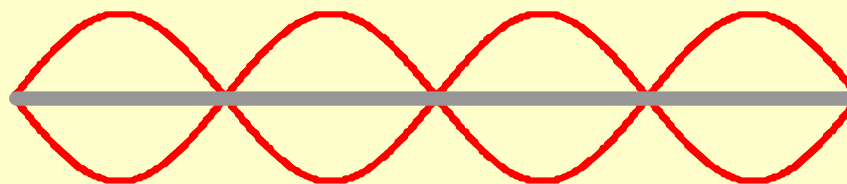
2. mód



3. mód

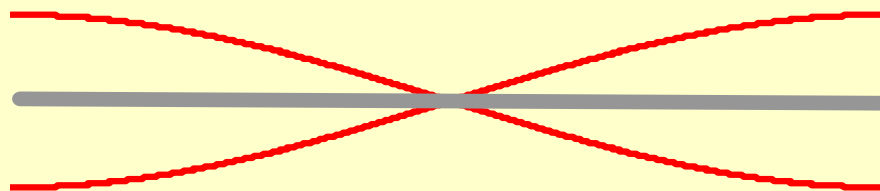


4. mód

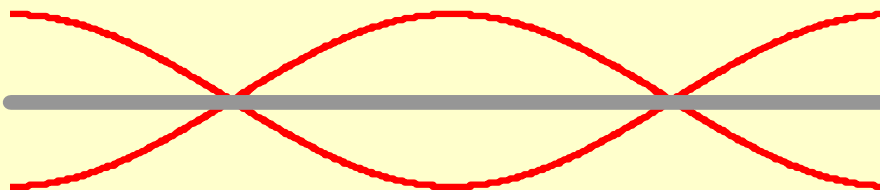


Kmity tyče

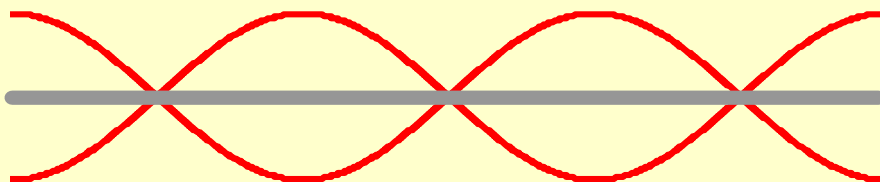
1. mód



2. mód

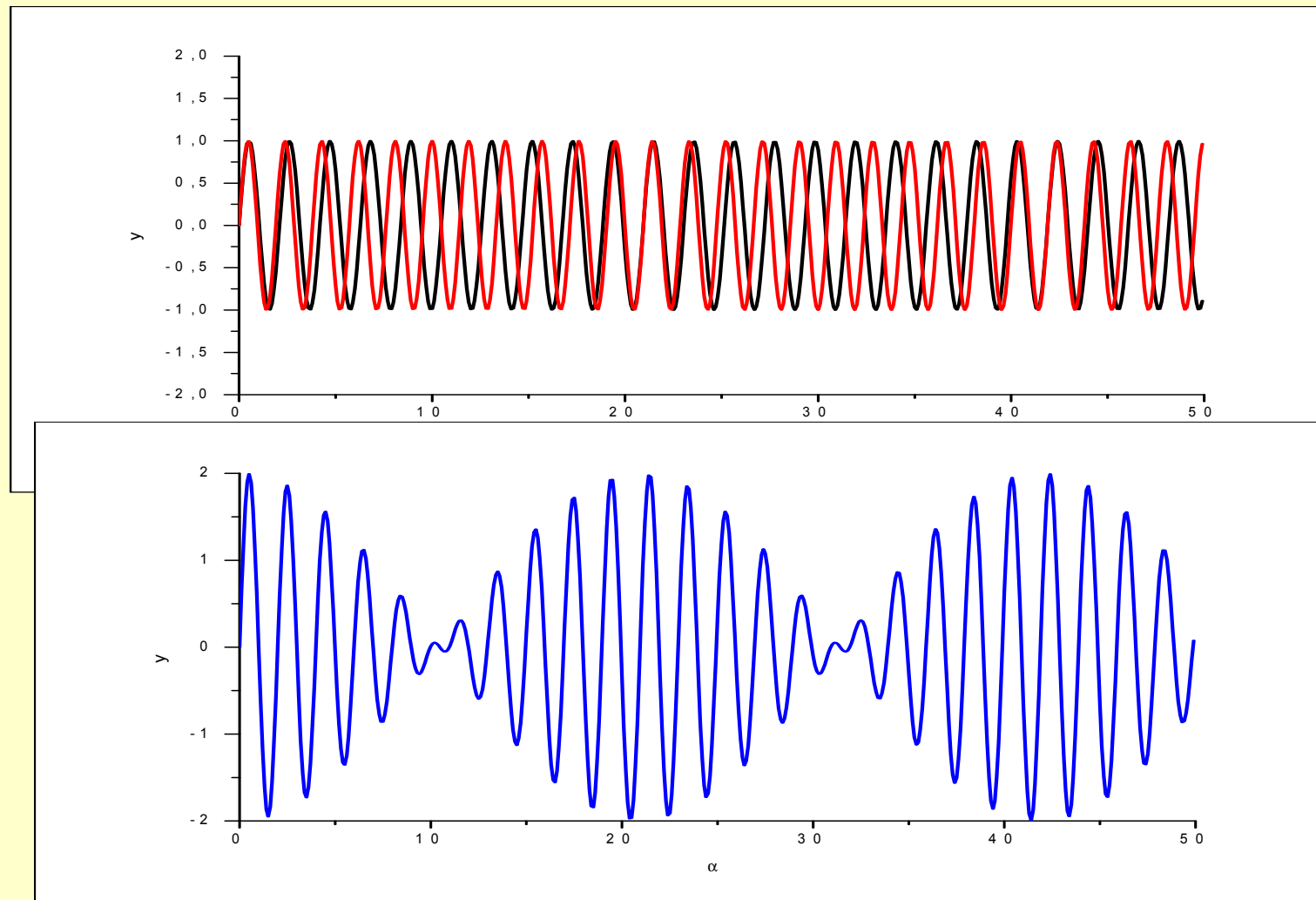


3. mód

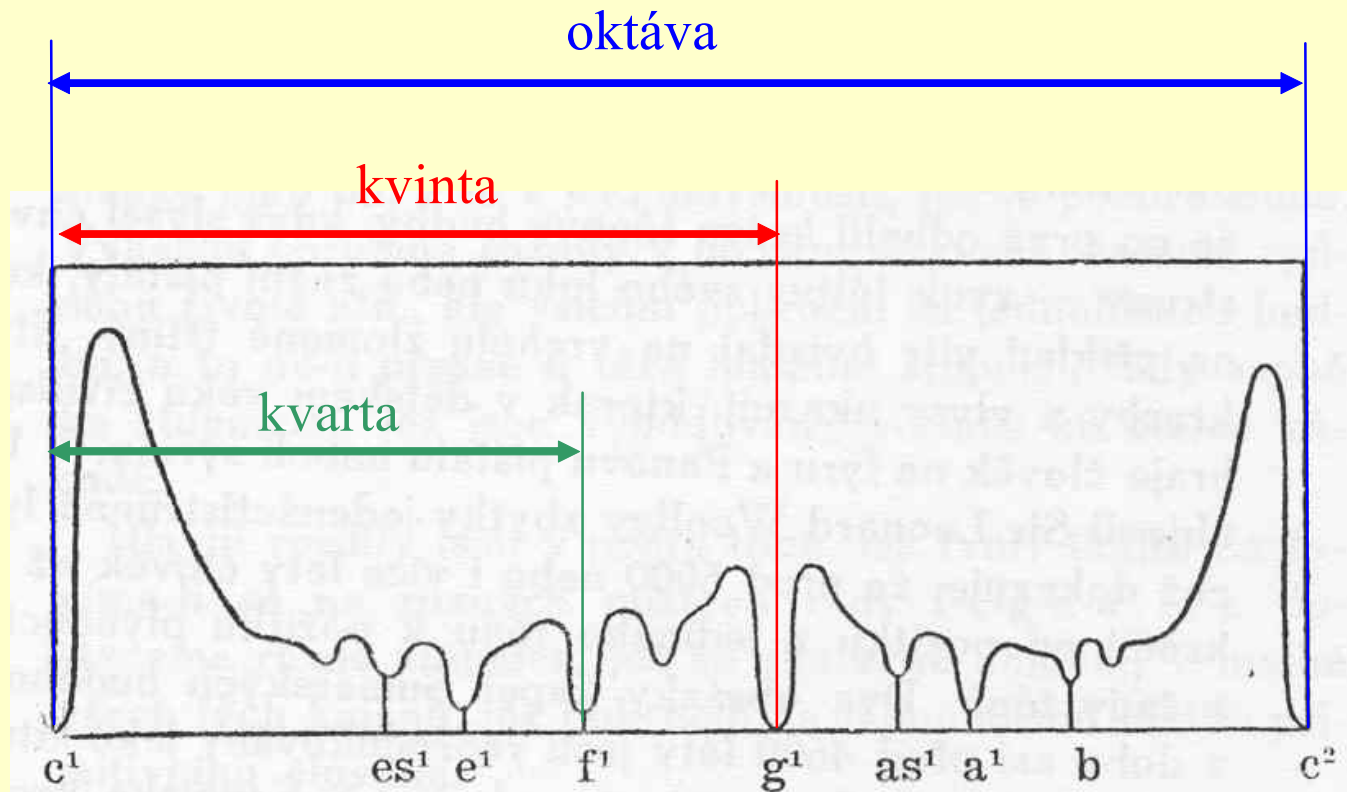


Helmholtzova teorie souzvuku

skládání kmitů blízké frekvence - rázy



Helmholtzova teorie souzvuku



Obr. 53. Stupeň disonance, vypočítaný Helmholtzem, u dvou tónů houslí znějících společně. Dolejší tón c^1 zní nepřetržitě, kdežto hořejší tón se pohybuje postupně od c^1 k c^2 .

Sluch

oko a ucho – detektory vlnění

vlnění se šíří „nekonečnou“ rychlostí

$$c_{zvuku} = 340 \text{ m/s}$$

$$c_{světla} = 300\,000\,000 \text{ m/s}$$

nemusí dojít k mechanickému kontaktu
detektoru a zdroje rozruchu

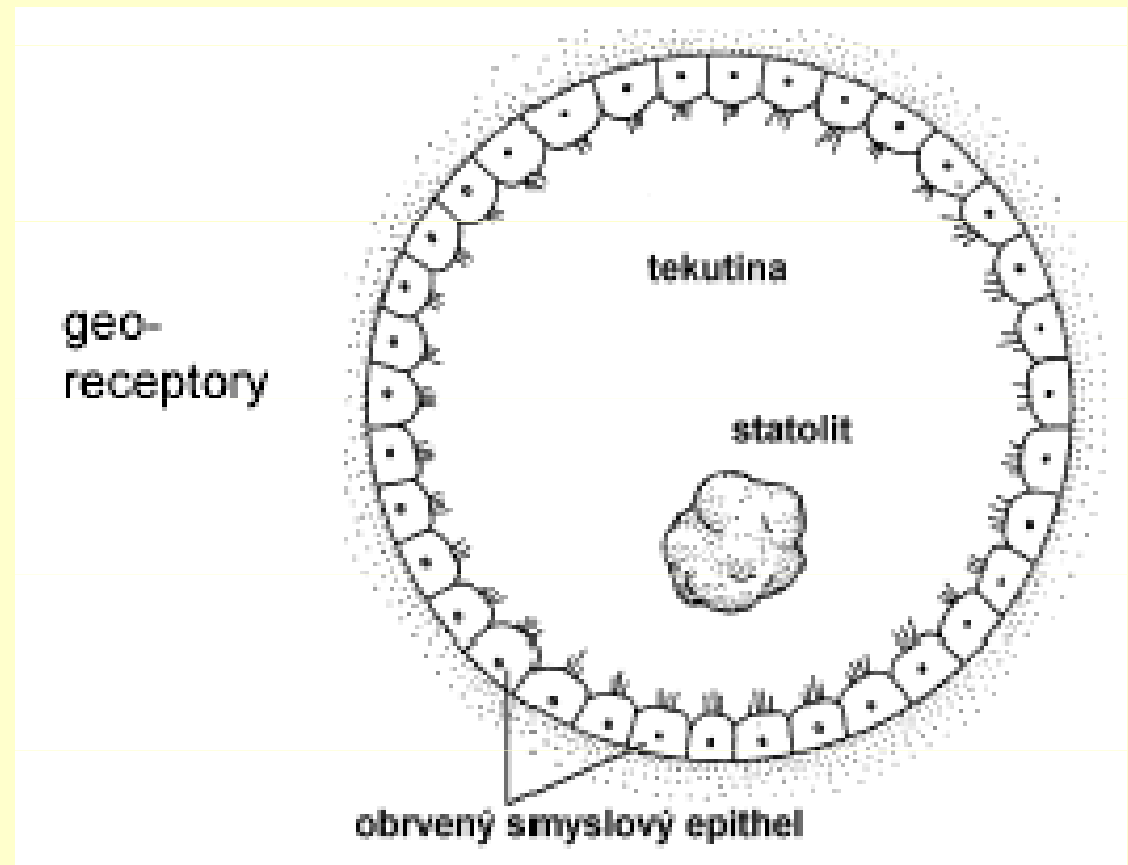
není vázán na transport látky (vítr nevadí)

Sluch a ucho

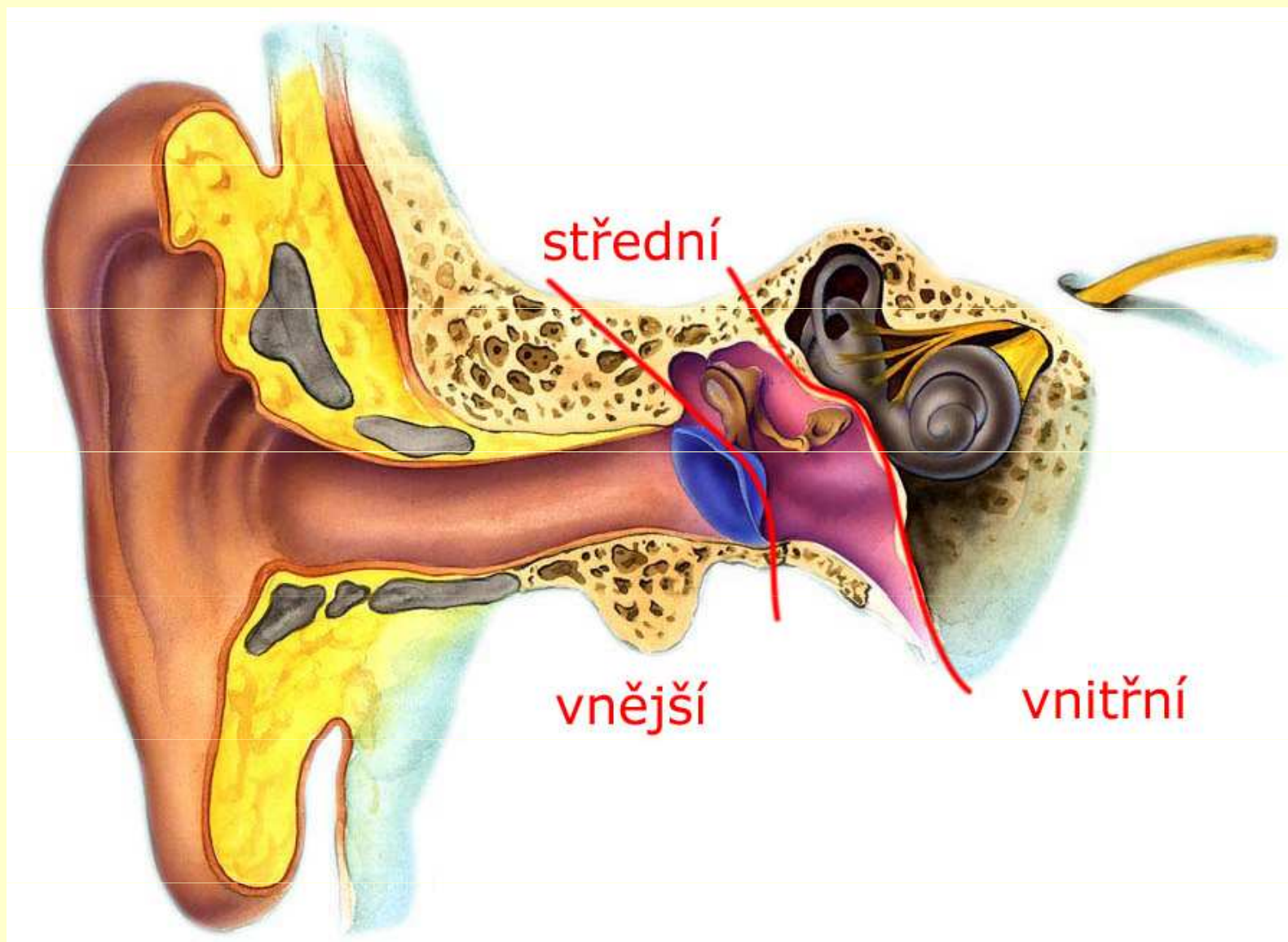
Pokus – detekce zvuku hmatem – chvění papíru

mechanický
detektor - hmat

spolu s detektorem polohy



Lidské ucho



vlastní detekce zvuku – chvění ve vnitřním uchu

dva základní problémy

- jak chvění přenést do vnitřního ucha
- jak chvění detekovat

jak chvění přenést do vnitřního ucha

okolí ucha - plyn

vnitřní ucho - kapalina

rozhraní plyn – kapalina = problém

- zvuk v plynu – velká amplituda výchylky, malá amplituda tlaku
- zvuk v kapalině – velká amplituda tlaku, malá amplituda výchylky

Rayleighovy vztahy
(pro kolmý dopad)

$$R = \frac{I_R}{I_o} = \frac{(1-m)^2}{(1+m)^2}$$

$$T = \frac{I_T}{I_o} = \frac{4m}{(1+m)^2}$$

kde

$$m = \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2}$$

Příklad

vzduch: $c = 340 \text{ m/s}$, $\rho = 1.3 \text{ kg/m}^3$

voda: $c = 1500 \text{ m/s}$, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

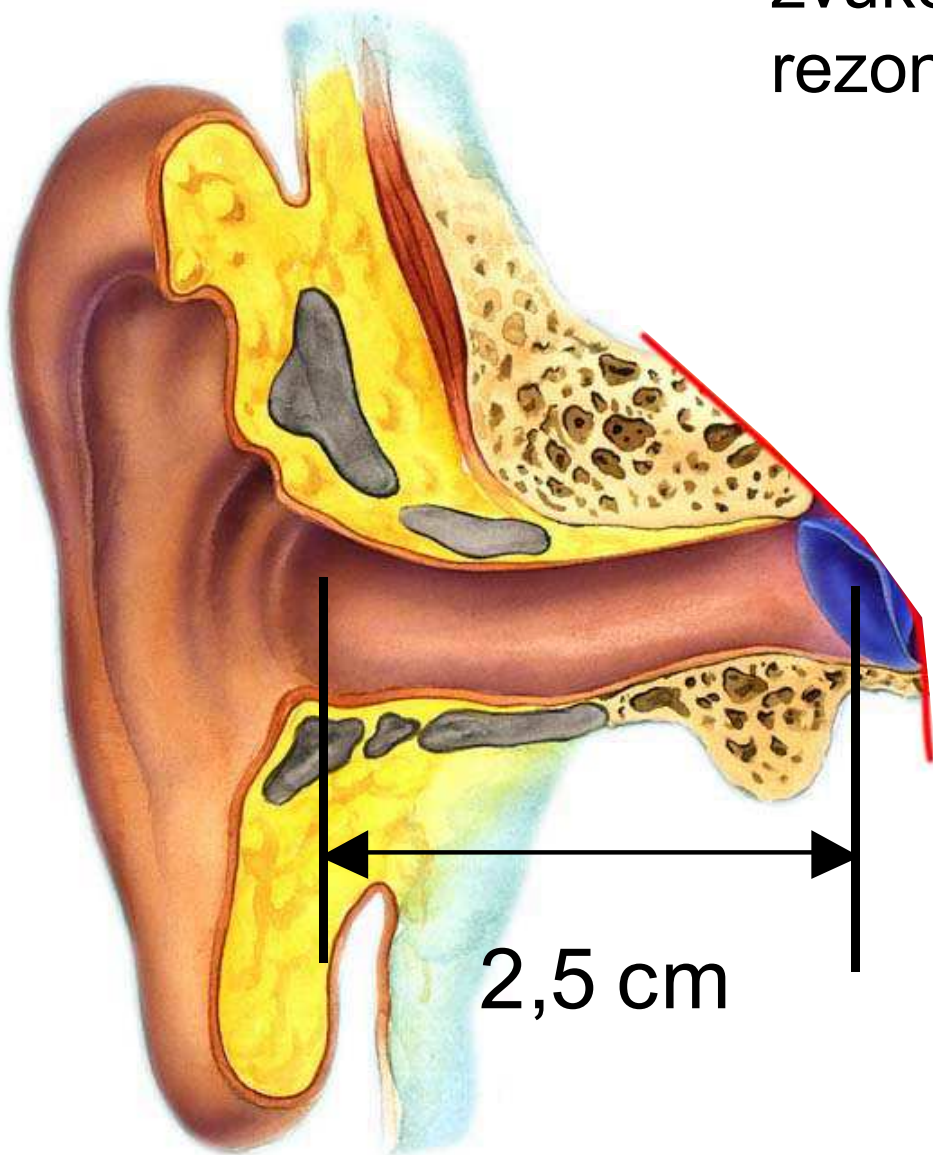
$m = 3 \cdot 10^{-4}$ nebo 3400

vzduch →	$R = 0,9994,$	voda →	$R = 0,9988,$
→ voda	$T = 0.0006$	→ vzduch	$T = 0.0012$

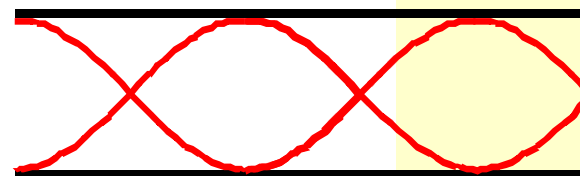
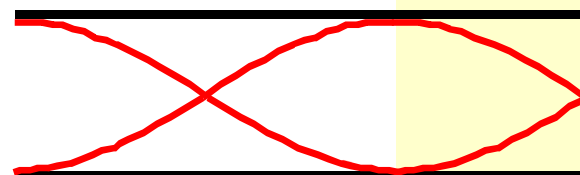
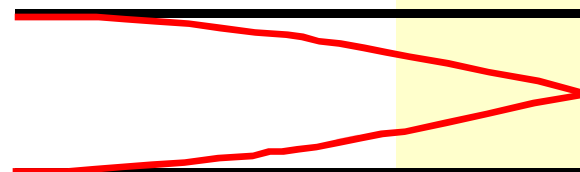
vnější ucho

boltec - zrcadlo

zvukovod - čtvrtvlnný
rezonátor



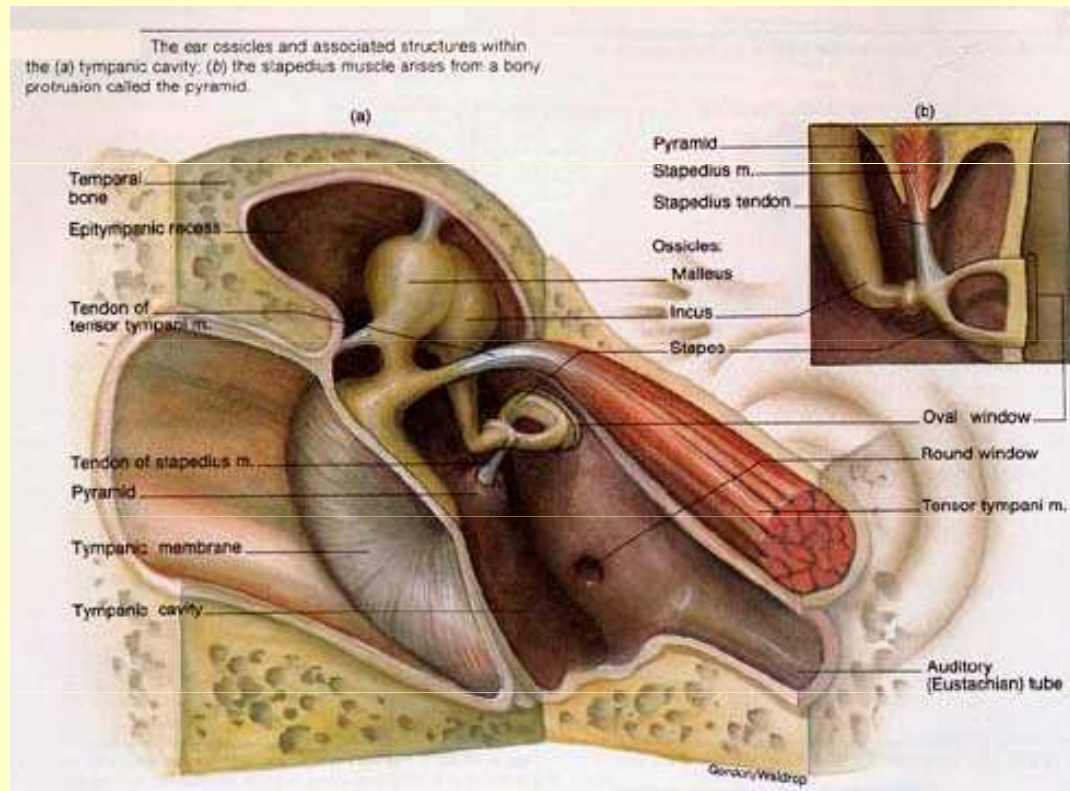
2,5 cm



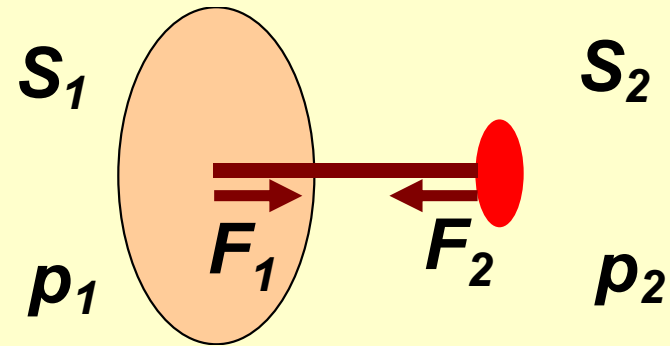
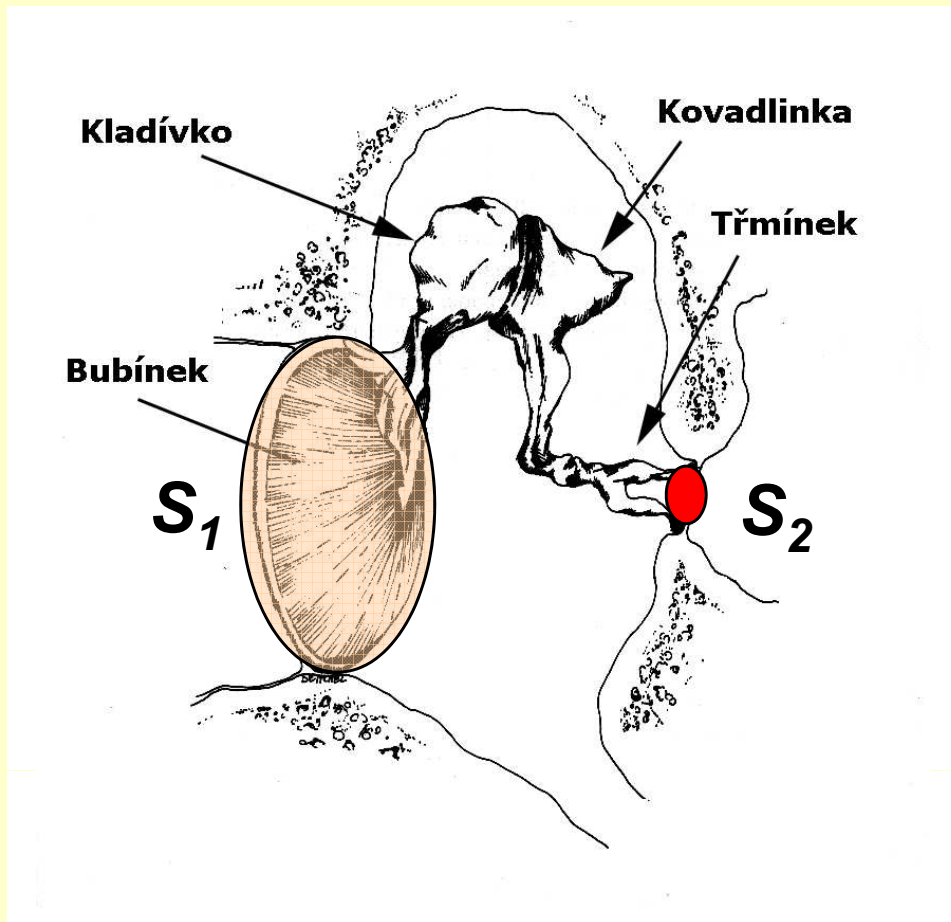
$$f = \frac{c_{zvuku}}{\lambda} = \frac{340}{0,1} = 3400\text{Hz}$$

střední ucho

řešení problému přenosu zvuku z plynu do kapaliny



střední ucho – násobič síly a zesilovač tlaku



$$F_1 = F_2$$

$$p_1 S_1 = p_2 S_2$$

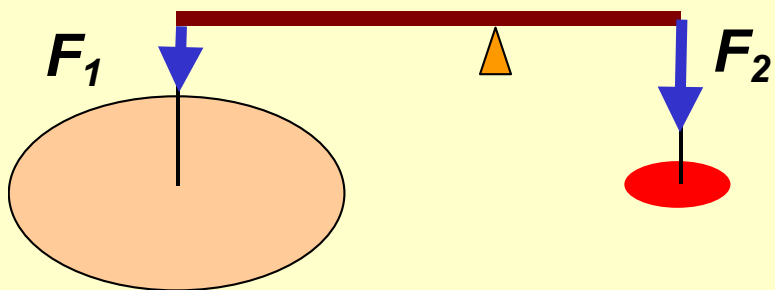
$$p_2 = \frac{p_1 S_1}{S_2}$$

$$S_1 = 60 \text{ mm}^2$$

$$S_2 = 3 \text{ mm}^2$$

$$p_2 = p_1 \cdot 20$$

kladívko, kovadlinka, třmínek



$$F_2 = 1,5 \cdot F_1$$

$$p_2 = p_1 \cdot 30$$

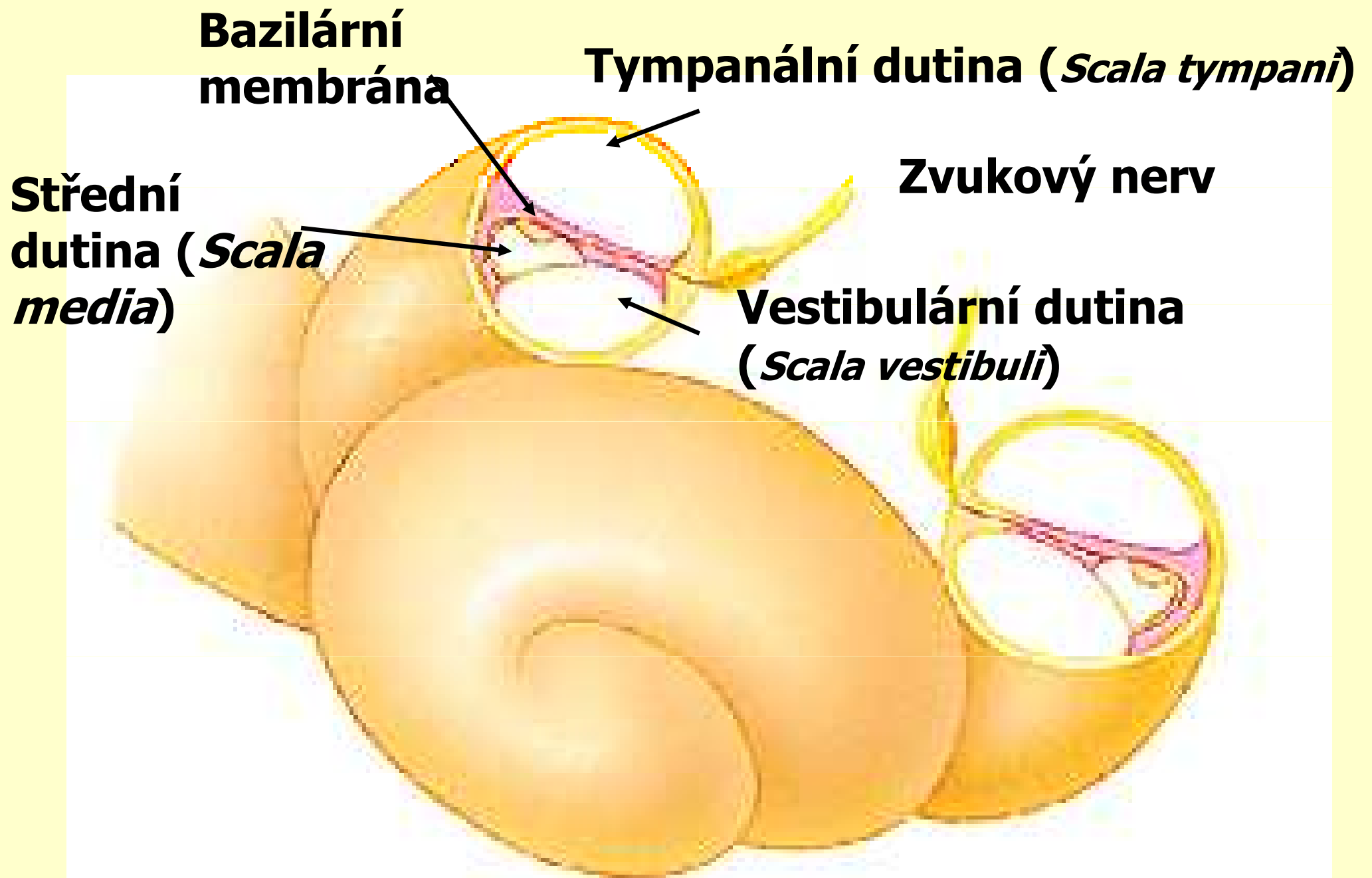
střední ucho zesiluje **amplitudu** tlaku 30x

intenzita je úměrná druhé mocnině amplitudy

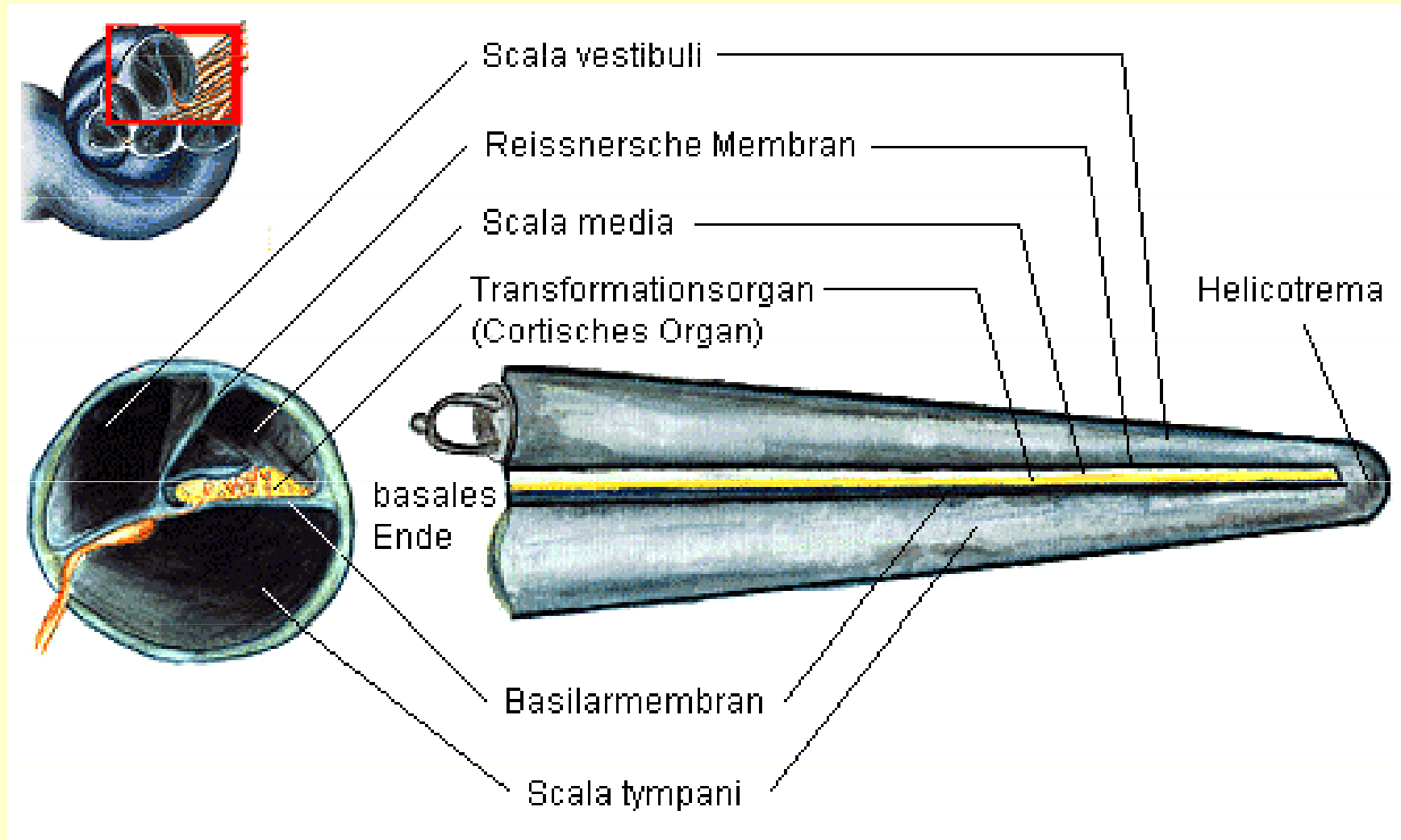
$$I \approx p^2$$

střední ucho zesiluje **intenzitu** 1000x – o 30 dB

vnitřní ucho



rozvinutý hlemýžď



Reissnerova membrána

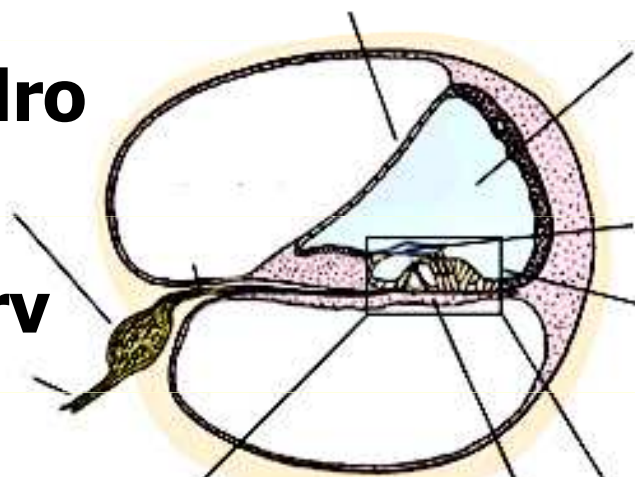
Střední dutina

Spirální jádro

Tektoriální membrána

Zvukový nerv

Cortiho orgán



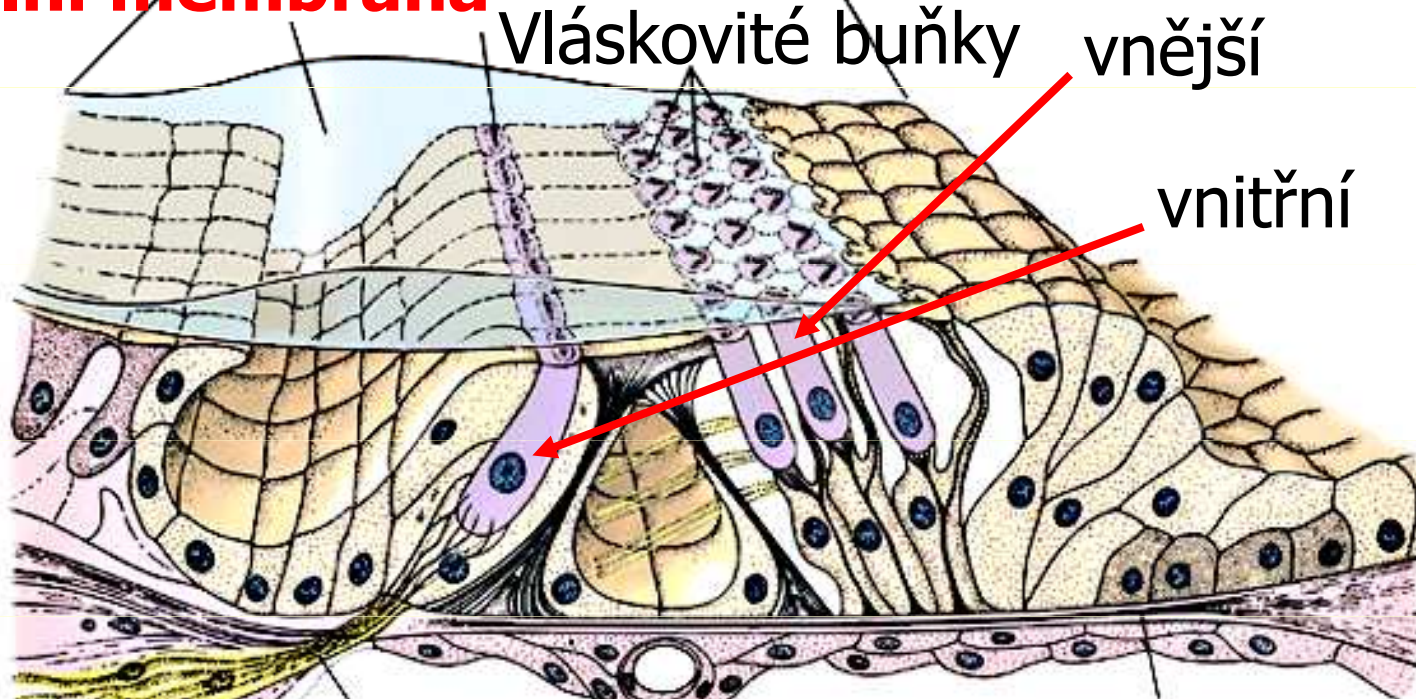
Kost

Bazilární membrána

Tektoriální membrána

Vláskovité buňky vnější

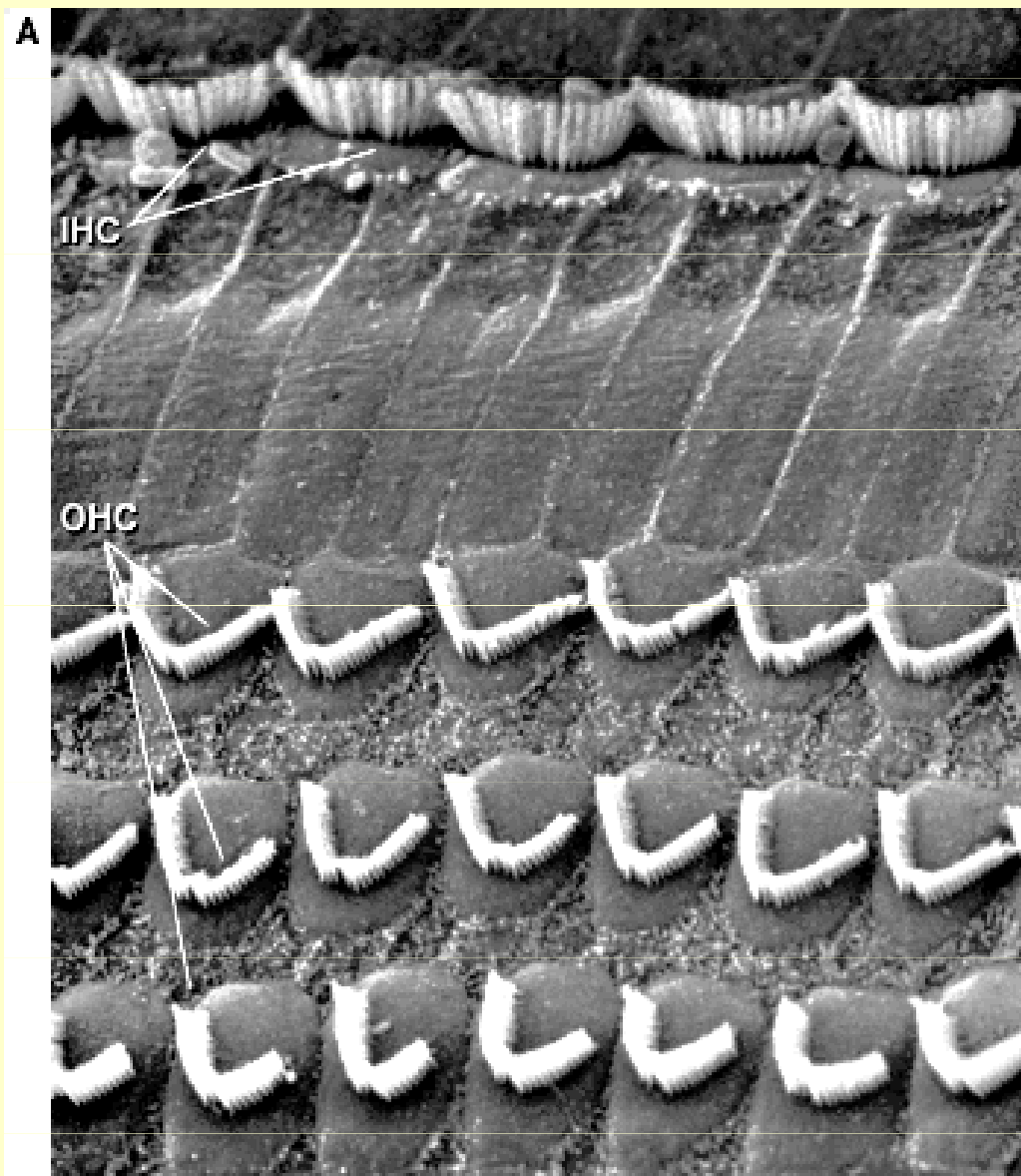
vnitřní



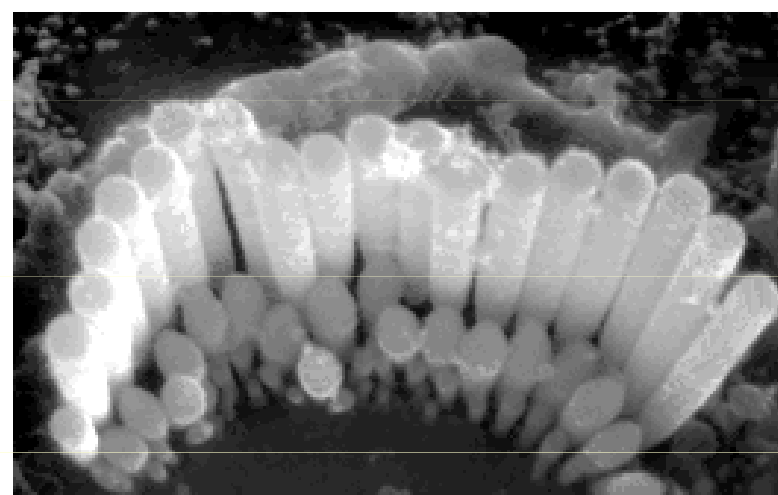
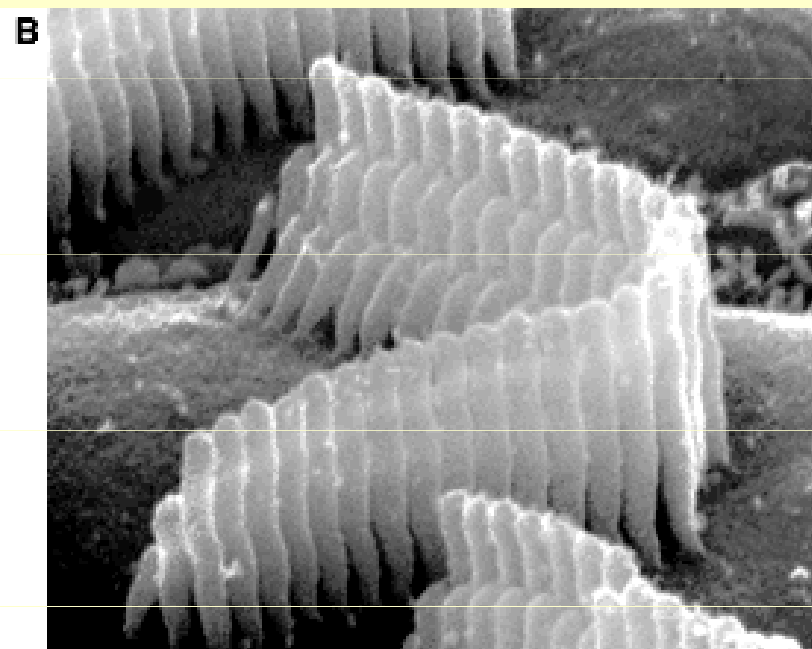
Nervová vlákna

Bazilární membrána

SEM vláskovitých buněk Cortiho orgánu

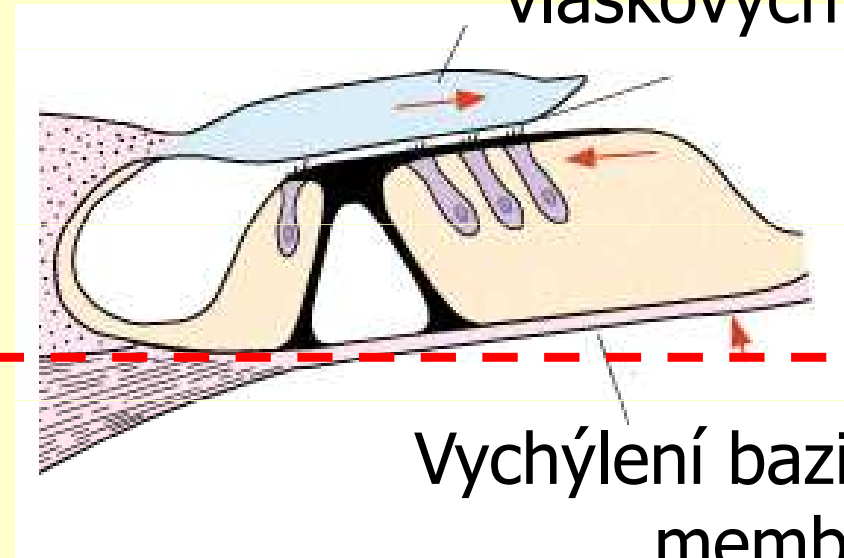
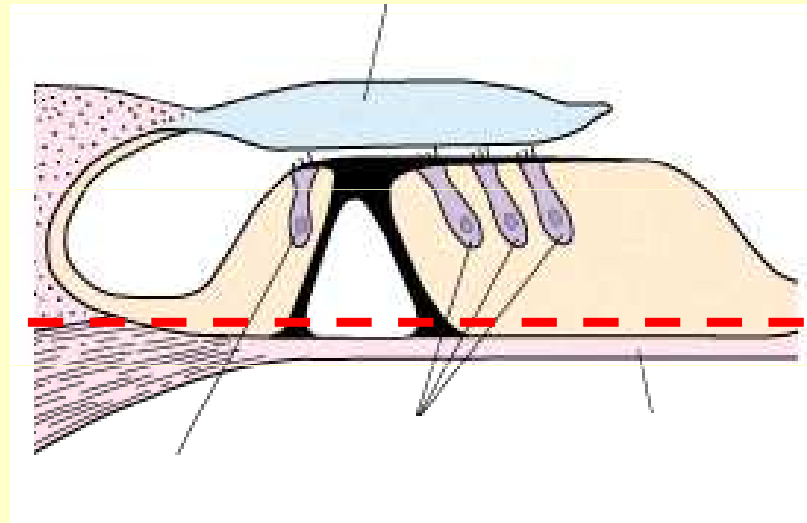


vnější - V



vnitřní

Pohyb tektoriální membrány vyvolaný zvukovou vlnou

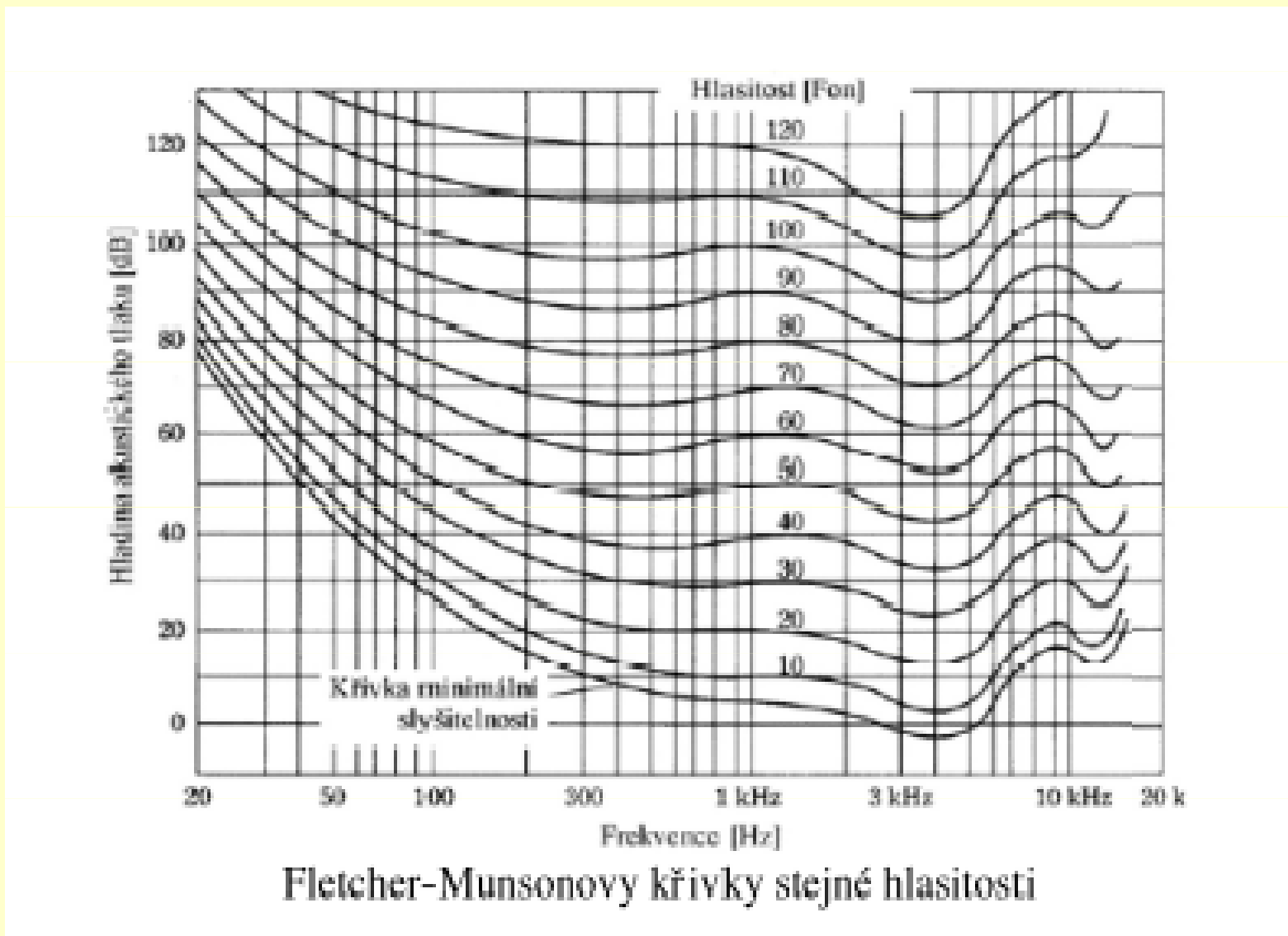


Deformace
vláskových buněk

Vychýlení bazilární
membrány

registrují vychýlení vlásku o
vzdálenost rovnou průměru atomu

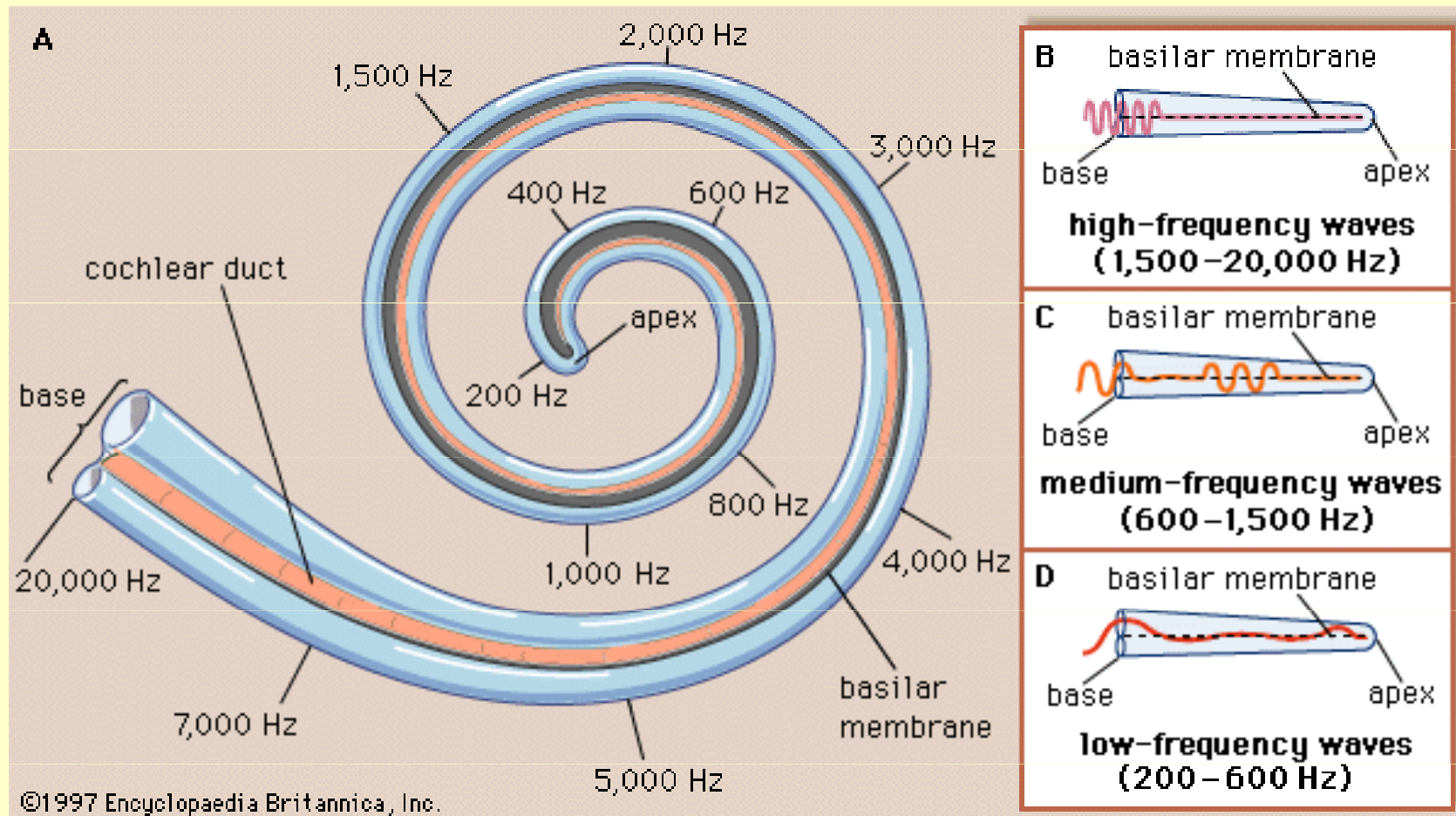
Citlivost ucha



vnímání frekvence

absorpce vlny v různých částech hlemýždě

dosud ne zcela jasné



Ohmův akustický zákon

ucho vnímá jednotlivé harmonické tóny odděleně,
nikoliv jejich součet

demonstrace z praktika

Prostorové slyšení

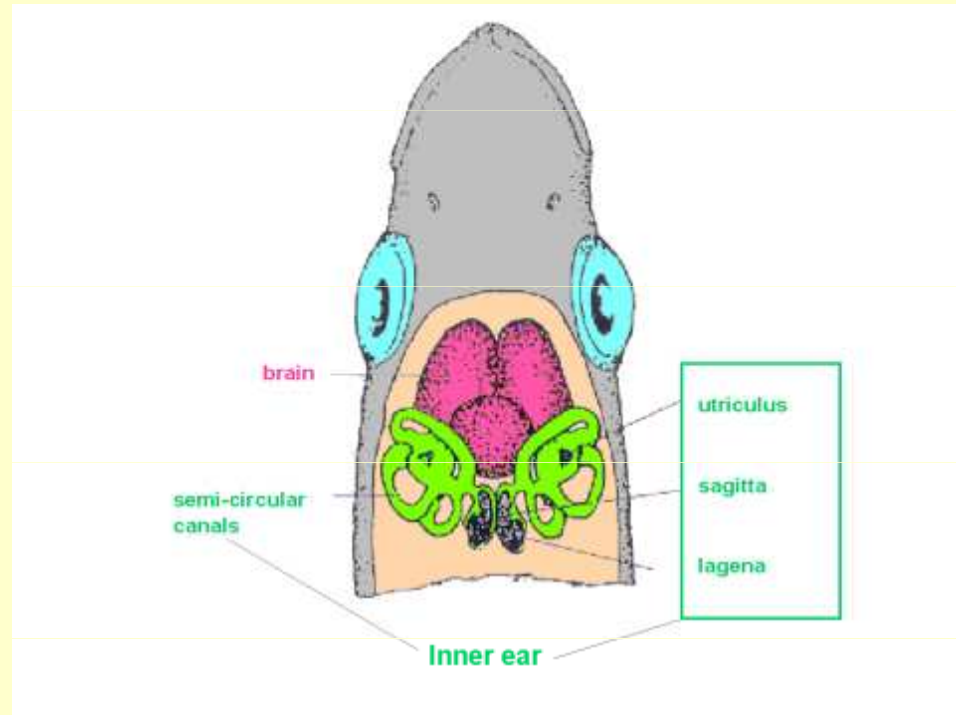
- zpoždění signálu z levého a pravého ucha (CNS dokáže zaznamenat zpoždění asi o $3 \cdot 10^{-5}$ s)
- zeslabení intenzity odvráceného ucha – vyšší frekvence

Uši ryb

ryby nemají

vnější ucho

střední ucho



zvuk přichází přímo do vnitřního ucha přes tkáň

nemusí projít rozhraním , vzduch – voda

vnitřní a střední ucho nepotřebují!

