



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



Dílo podléhá licenci Creative Commons 4.0 Česko
Uveďte původ - Zachovejte licenci

**Pohodlně se usadte,
přednáška co nevidět začne!**

Impedanční spektroskopie

Fyzika III

- Využití impedanční spektroskopie
- Základní principy impedanční spektroskopie
- Ohmův zákon v komplexním tvaru
- Způsob zobrazení dat
- Dielektrická spektroskopie
- Příklady ekvivalentních obvodů
- Jednotlivé prvky ekvivalentního obvodu

- Oblíbený analytický nástroj v materiálovém výzkumu
 - Studium koroze
 - Vodivé polymery
 - Senzorové systémy
 - Baterie, palivové články
 - Studium elektrochemické kinetiky
 - ...
- Umožňuje zaznamenat jak rychlé (přenos náboje), tak pomalé (difuzní) děje
- Hlavní nevýhodou je nejednoznačnost při interpretaci naměřených dat
- Neinvazivní

- Na měřený systém přivedeme sinusový napěťový signál o malé amplitudě – měříme proudovou odezvu – sinusový signál fázově posunutý
- Signál může být superponovaný na konstantním napětí
- Postupujeme zpravidla od vyšších frekvencí k nižším (důvodem je omezená stabilita)
- Frekvence obvykle v rozmezí od 1 MHz do 0,1 mHz
- Z tvaru impedančního spektra odvodíme vhodný elektrický obvod
- Jednotlivým prvkům obvodu přiřadíme fyz. význam

$$u(t) = U_A \sin(\omega t)$$
$$i(t) = I_A \sin(\omega t - \varphi)$$

$$e^{j\varphi} = \cos \varphi + j \sin \varphi$$

$$\hat{U} = U_A e^{j\omega t}$$
$$\hat{I} = I_A e^{j\omega t - j\varphi}$$

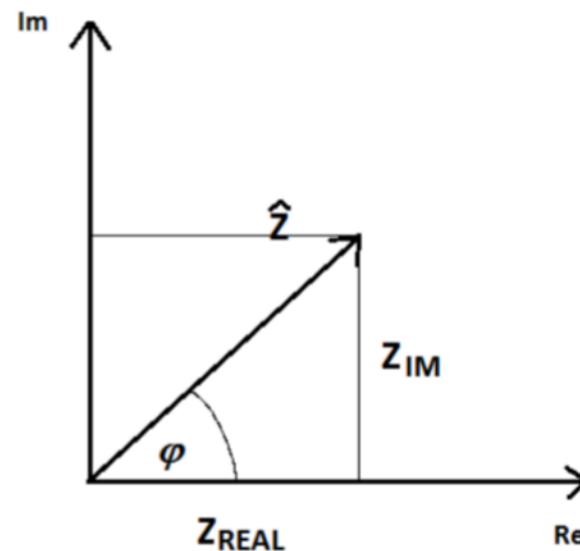
$$\hat{Z} = \frac{\hat{U}}{\hat{I}} = Z_A e^{j\varphi} = Z_A (\cos \varphi + j \sin \varphi) = Z_{REAL} + jZ_{IM}$$

$$|\hat{Z}| = \sqrt{Z_{REAL}^2 + Z_{IM}^2}$$

$$\tan \varphi = \frac{Z_{IM}}{Z_{REAL}}$$

$$Z_{REAL} = |\hat{Z}| \cos \varphi$$

$$Z_{IM} = |\hat{Z}| \sin \varphi$$

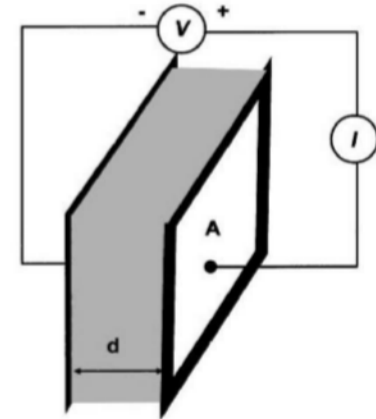


- Ideální rezistor
 - Impedance není závislá na frekvenci
 - Impedance má pouze reálnou složku
 - Proud je vždy ve fázi s napětím
- Ideální kondenzátor
 - Impedance je závislá na frekvenci
 - Impedance má pouze imaginární složku
 - Proud předbíhá před napětím o 90°
- Ideální indukčnost
 - Impedance je závislá na frekvenci
 - Impedance má pouze imaginární složku
 - Proud se opoždí za napětím o 90°

- Ideální rezistor

$$\hat{Z} = R$$

$R = \rho \frac{d}{A}$, $\sigma = \frac{1}{\rho}$...měrná vodivost, charakterizuje schopnost materiálu vést el. proud

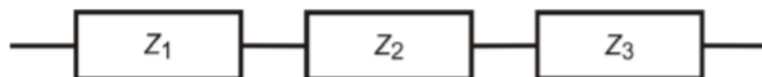


- Ideální kondenzátor

$$\hat{Z} = \frac{1}{j\omega C} = -\frac{j}{\omega C}$$

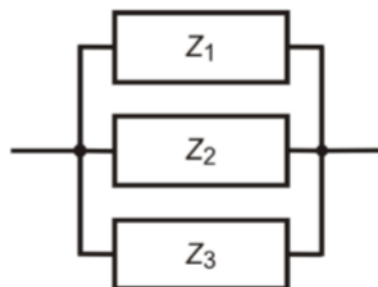
$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d}$ ε_r ...relativní permitivita, charakterizuje schopnost materiálu uchovávat el. energii

- Sériové zapojení



$$\hat{Z} = \hat{Z}_1 + \hat{Z}_2 + \hat{Z}_3$$

- Paralelní zapojení

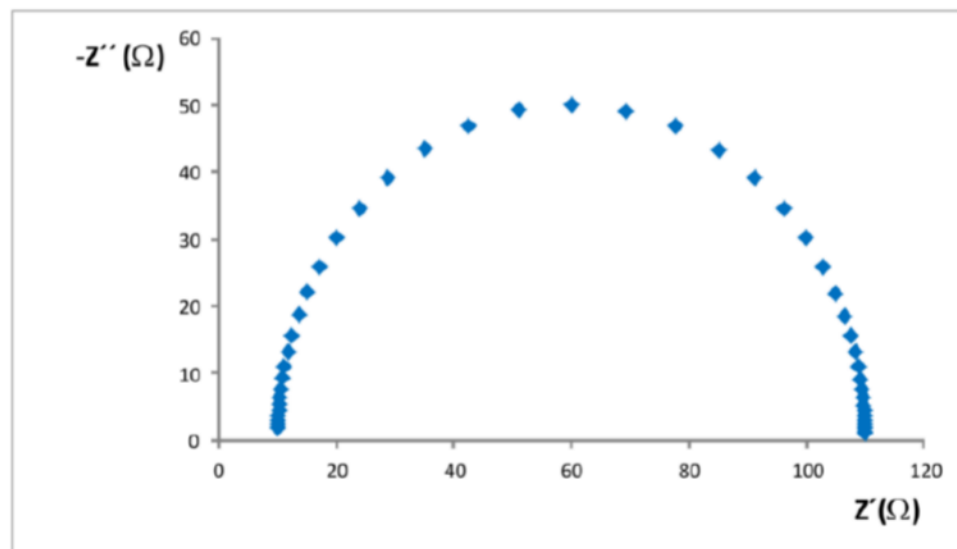


- $$\frac{1}{\hat{Z}} = \frac{1}{\hat{Z}_1} + \frac{1}{\hat{Z}_2} + \frac{1}{\hat{Z}_3}$$

- Reálný systém s různými chemickými, fyzikálními, elektrickými a mechanickými vlastnostmi aproximujeme ekvivalentním obvodem s čistě elektrickými prvky
- Často můžeme použít ideální prvky, někdy musíme ideální prvky nahradit „distribuovanými“ prvky
 - Prvek s konstantní fází
 - Warburgova difuzní impedance

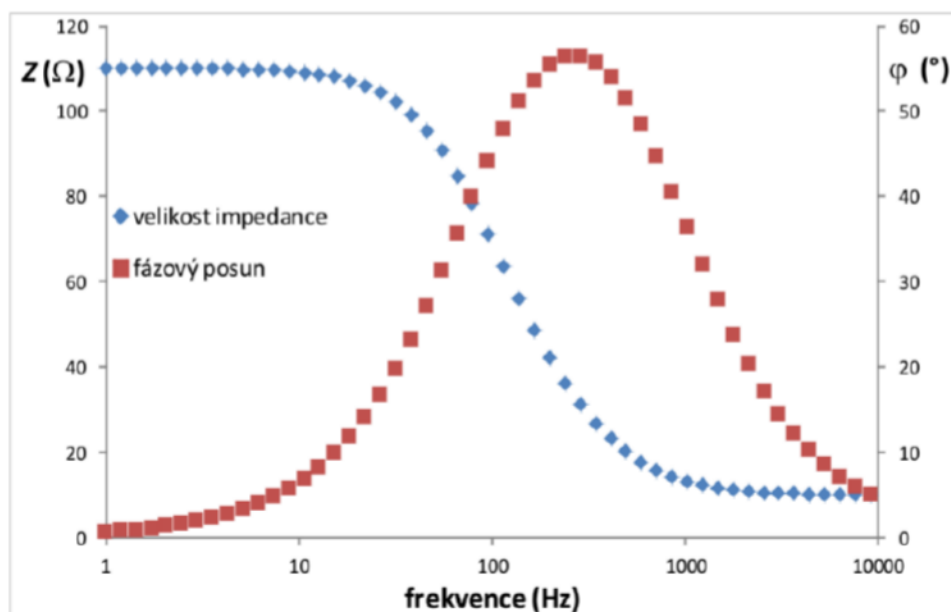


- **Nyquistův** diagram – vynášíme imaginární složku impedance proti reálné složce



- **Bodeho** diagram – vynášíme absolutní hodnotu impedance a fázový posun proti frekvenci

(případně můžeme i vynášet reálnou a imaginární část impedance proti frekvenci)

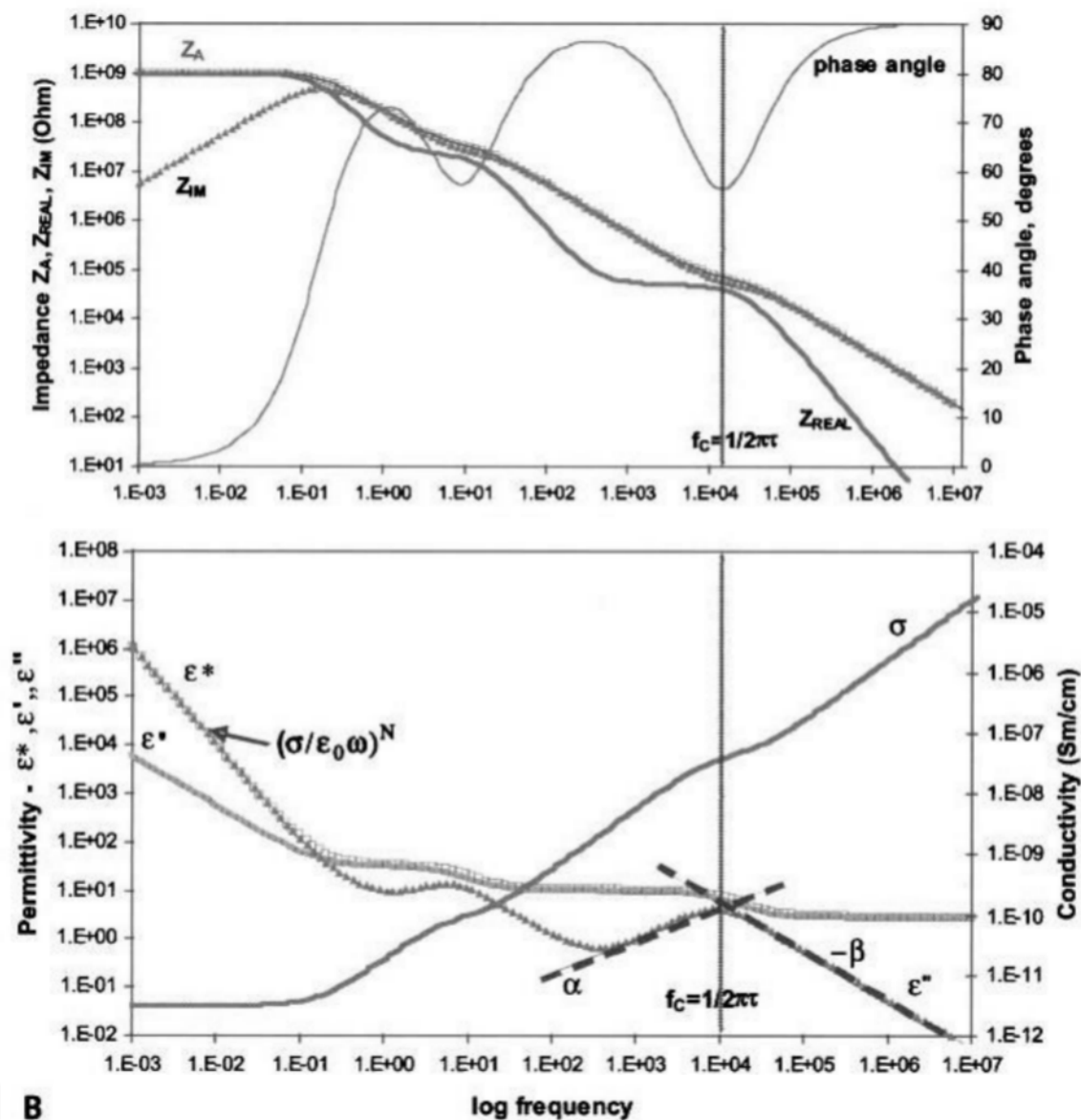


- Analogie impedanční spektroskopie pro systémy s vysokou impedancí
- Zjišťuje se permitivita a vodivost (příp. rezistivita)
 - Vodivost charakterizuje schopnost přenášet el. proud
 - Permitivita charakterizuje schopnost uchovávat el. energii

- Komplexní permitivita

$$\hat{\varepsilon} = \varepsilon' - j\varepsilon''$$

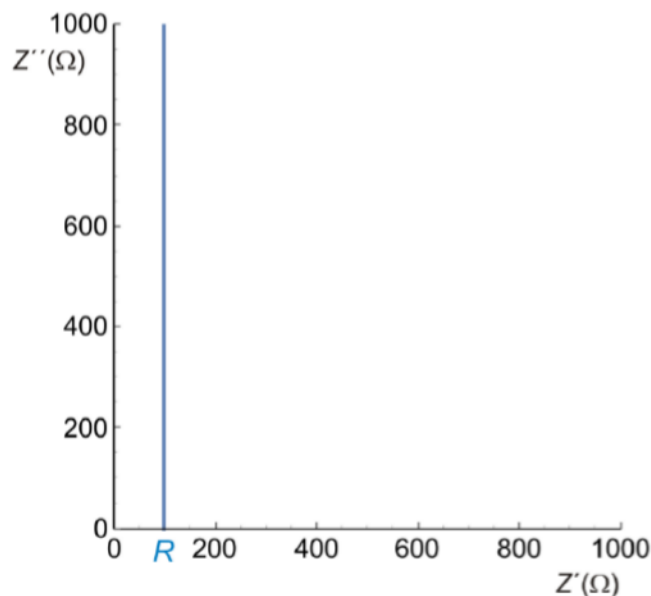
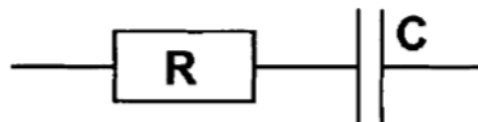
- $\varepsilon' = \frac{Cd}{\varepsilon_0 A}$ reprezentuje uspořádání dipólů (inverzní ekvivalent Z_{IM})
- $\varepsilon'' = \frac{d}{RA\omega\varepsilon_0} = \frac{1}{\rho\omega\varepsilon_0}$ reprezentuje iontovou vodivost (inverzní ekvivalent Z_{REAL})



- Mechanismy polarizace
 - Elektronová (translační posunutí el. oblaku, rychlá (THz)
 - Rotací dipólů polárních látek (kHz – MHz)
 - Migrační (posun volných nosičů náboje, Hz – kHz)
- Při nejnižších frekvencích přispívají k reálné složce permitivity všechny uvažované druhy polarizací. S rostoucí frekvencí nejprve ustává migrační polarizace a poté ustávají další polarizace tak, jak klesá schopnost částic sledovat změny vnějšího střídavého elektrického pole.
- Relaxační doba $\tau = \frac{1}{2\pi f_C}$
- f_Ckritická relaxační frekvence

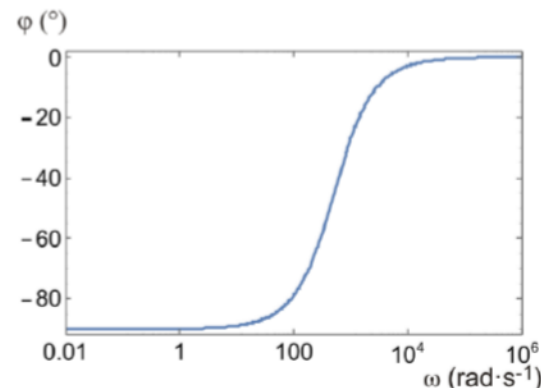
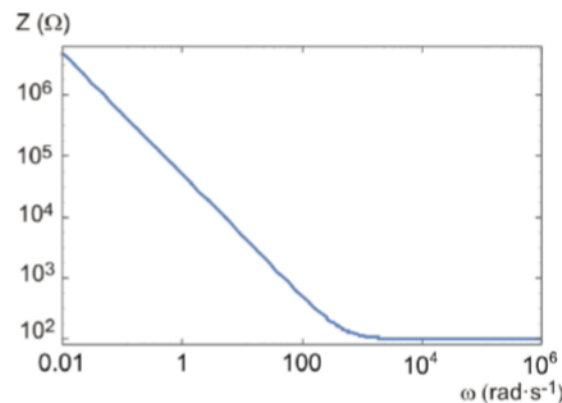
- Sériový R-C obvod

$$\hat{Z} = R + \frac{1}{j\omega C} = R - \frac{j}{\omega C}$$



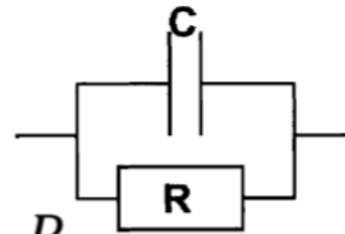
$$R = 100 \, \Omega, C = 20 \, \mu\text{F}$$

$$\tau = RC$$

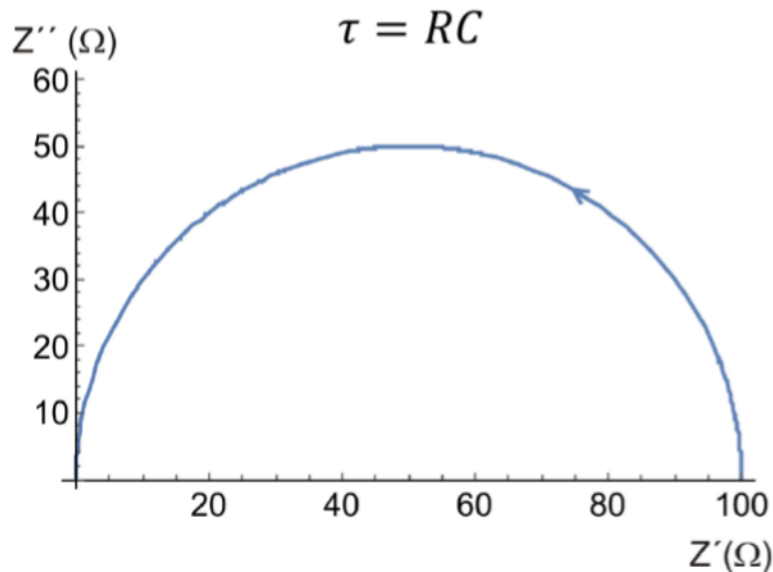


Nejčastější ekvivalentní obvody

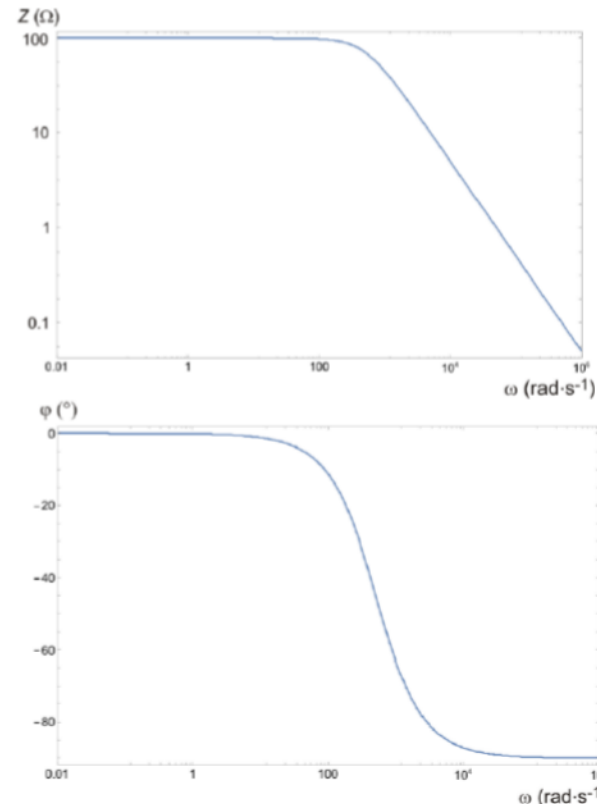
- Paralelní R | C obvod



$$\hat{Z} = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C} = \frac{R}{1 + j\omega RC} = \frac{R}{1 + \omega^2 R^2 C^2} - \frac{j\omega R^2 C}{1 + \omega^2 R^2 C^2}$$



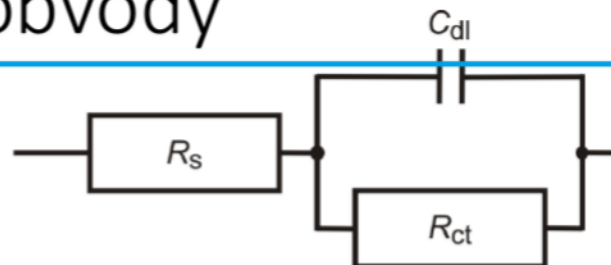
$R = 100 \, \Omega, C = 20 \, \mu\text{F}$



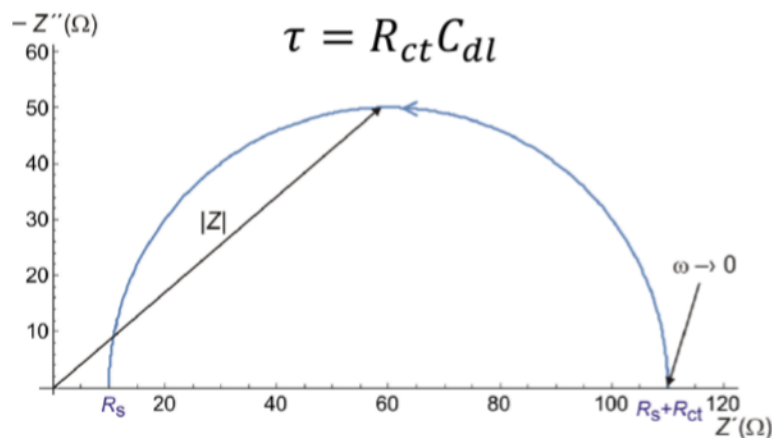
Nejčastější ekvivalentní obvody

- Sériově paralelní obvod

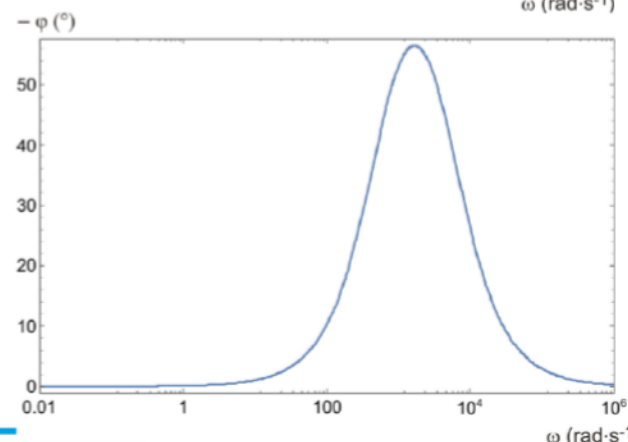
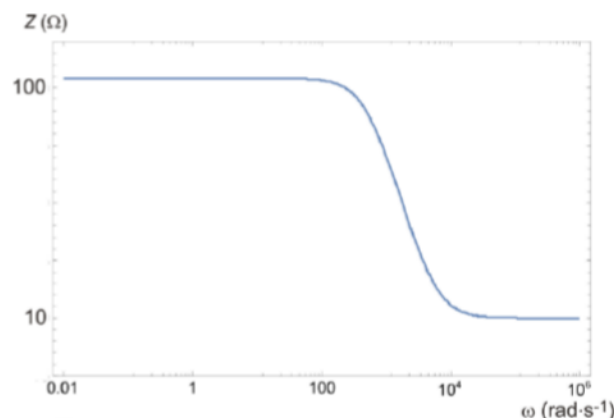
- $R_S - R_{ct} | C_{dl}$



$$\hat{Z} = R_S + \frac{1}{\frac{1}{R_{ct}} + j\omega C_{dl}} = R_S + \frac{R_{ct}}{1 + \omega^2 R_{ct}^2 C_{dl}^2} - \frac{j\omega R_{ct}^2 C_{dl}}{1 + \omega^2 R_{ct}^2 C_{dl}^2}$$

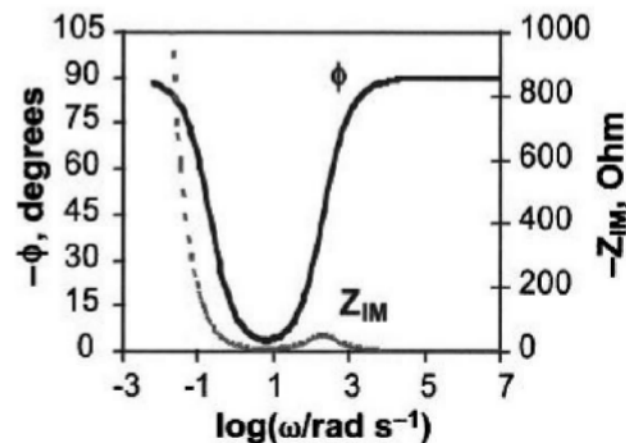
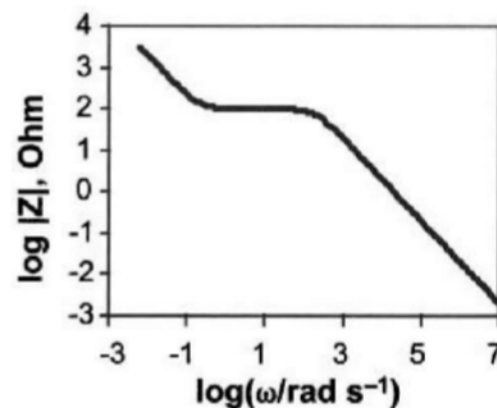
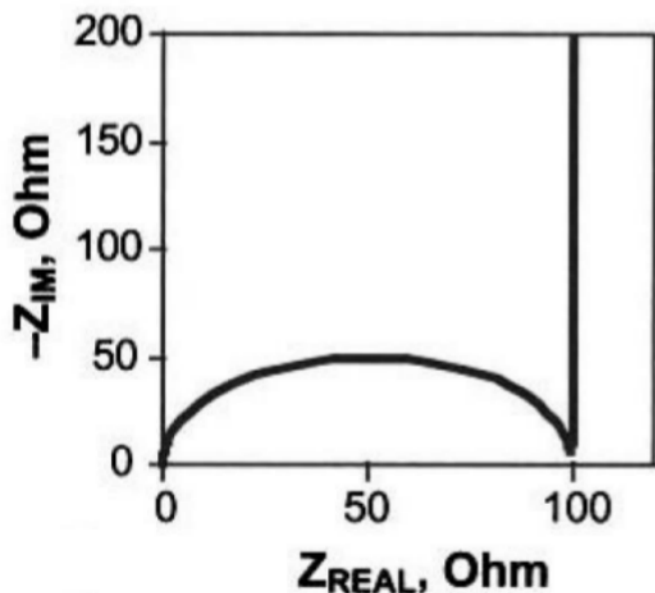
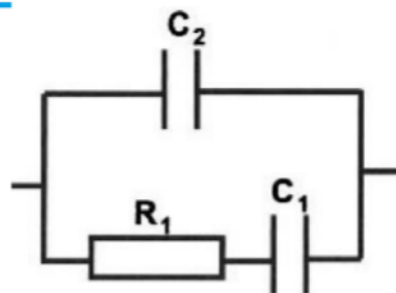


$$R_{ct} = 100 \, \Omega, C_{dl} = 20 \, \mu\text{F}, R_S = 10 \, \Omega$$



Nejčastější ekvivalentní obvody

- Sériově paralelní obvod
- $(R_1 - C_1) | C_2$



- Odpor elektrolytu R_S (solution resistance)
 - Objemové vlastnosti dobře vodivých látek mohou být zpravidla aproximovány rezistorem
 - Náboj je v objemu transportován převážně migrací iontů (např. polární kapaliny) nebo elektronů a iontů (např. vodivé polymery)

$$R = \rho \frac{d}{A} = \frac{1}{\sigma} \frac{d}{A} = \frac{d}{AF} \frac{1}{\sum z_i \mu_i C_i}$$

- Pohyblivost iontů či nabitých částic závisí na permitivitě, zeta potenciálu a viskozitě

- Možné komplikace

- Vliv nehomogenního rozložení proudové hustoty

$$R_S \rightarrow Z_{CPE}$$

- Může se projevovat paralelní kapacita

- $R_S | C_{BULK}$

$$\tau = R_S C_{BULK}$$

Pro vysoce vodivé roztoky je relaxační doba $\approx 10^{-7}$ s
(10 MHz – není běžně měřitelné) – obvykle nemusíme vliv kapacity uvažovat

- Kapacita dvojvrstvy C_{dl} (double layer capacitance)
- Na rozhraní mezi elektrodou a elektrolytem se vytváří elektrická dvojvrstva
- Jednu část tvoří nabitý povrch elektrody, druhou adsorbované a elektrostatickými silami přitahované ionty roztoku
- Vzdálenost nábojů je velmi malá ≈ 1 nm
- Vytváří kondenzátor s kapacitou C_{dl} , případně prvek s konstantním fázovým posunem CPE_{dl} (vliv nehomogenit, porozity elektrod,...)
- Kapacita závisí na potenciálu elektrody, na typu elektrody, na adsorbovaných nečistotách na povrchu elektrody, na existenci vrstev oxidu, na teplotě, na vlastnostech roztoku ...

- Kapacita dvojvrstvy se skládá z několika příspěvků

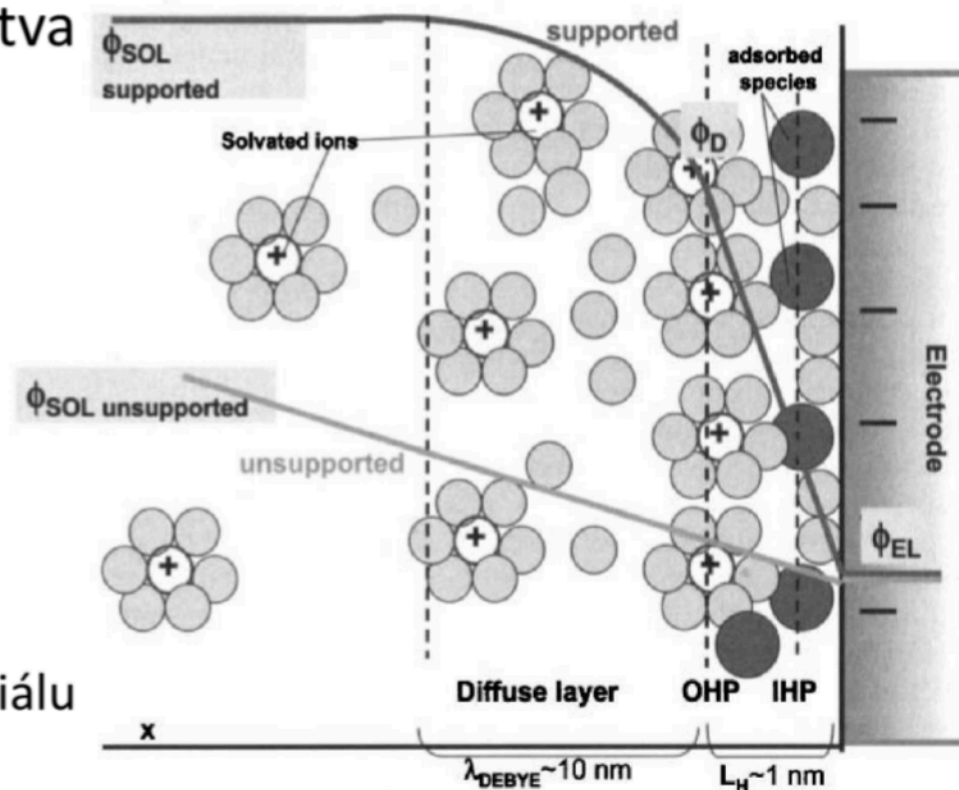
- Vnitřní Helmholtzova vrstva
- Vnější Helmholtzova vrstva
- Difuzní vrstva (gradient koncentrace)

$$\frac{1}{C_{dl}} = \frac{1}{C_H} + \frac{1}{C_{diff}}$$

- $C_H = \frac{\epsilon \epsilon_0}{L_H} \text{ [F/cm}^2\text{]}$

- Kapacita difuzní vrstvy

Závisí na elektrochemickém potenciálu
a koncentraci elektrolytu



wikipedia.org

- Odpor k přenosu náboje R_{ct} (charge transfer resistance)
- Souvisí s přenosem náboje mezi elektrodou a elektrolytem
 - tunelování přes 1-2 nm vzdálenost oddělující nabitě částice od rozhraní
 - závisí na koncentraci nabitých částic, typu reakce, aplikovaném el. poli, teplotě, tlaku, ploše elektrod
 - Dominuje v celkové impedanci v oblasti mHz – Hz frekvencí

$$R_{ct} = \frac{RT}{nFi_0}$$

- Prvek s konstantním fázovým posunem CPE
(constant phase element)
 - fázový posun je frekvenčně nezávislý

$$Z_{CPE} = \frac{1}{Q(j\omega)^\alpha} = \frac{1}{Q\omega^\alpha} \left[\cos\left(\alpha \frac{\pi}{2}\right) - j \sin\left(\alpha \frac{\pi}{2}\right) \right]$$

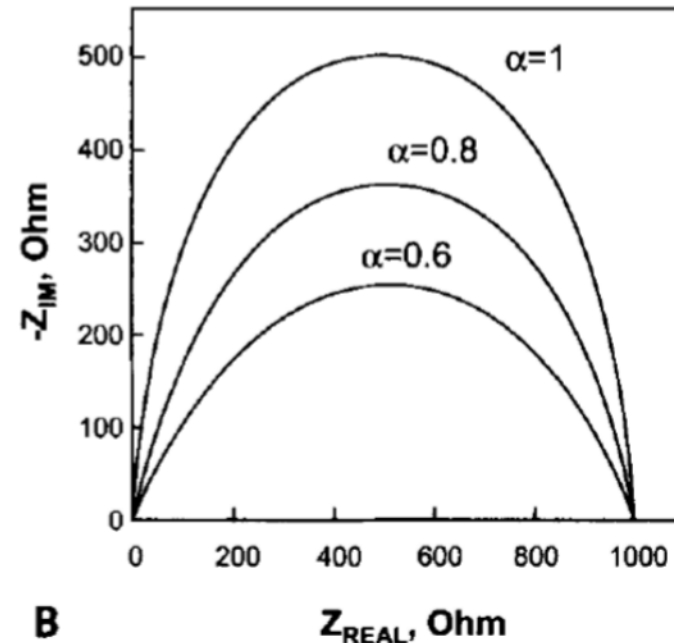
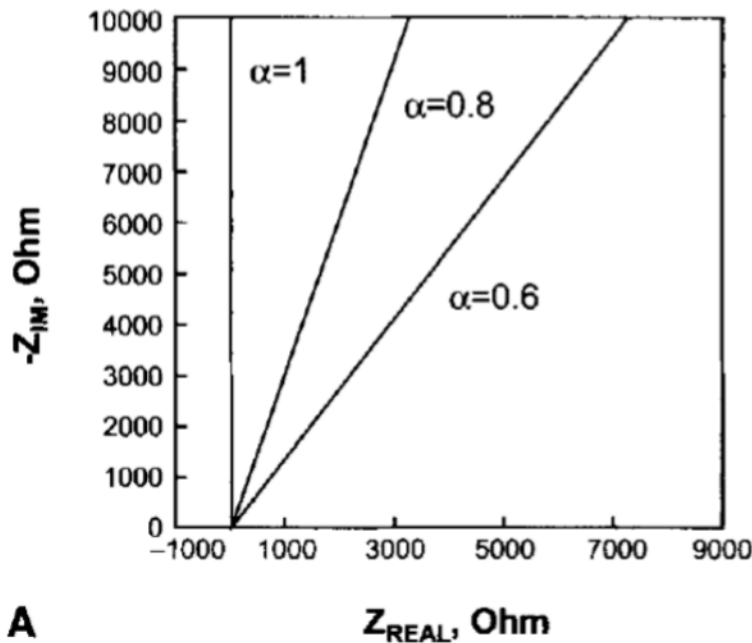
Pro ideální kondenzátor $Q = C, \alpha = 1$

Pro ideální rezistor $Q = 1/R, \alpha = 0$

α se dá určit ze sklonu závislosti $\log Z_{IM} = f(\log f)$

- pro ideální kondenzátor 1, pro CPE element <1

- Nyquistův diagram pro CPE element – přímka pod úhlem $\alpha \cdot 90^\circ$
- Pro rezistor paralelně s CPE elementem – zdeformovaná půlkružnice



- Příčiny neideálního chování
 - Nehomogenní a nerovné elektrody
 - Porozita elektrod
 - Rozdíly v tloušťce a vodivosti povrchových vrstev
 - Pomalé nerovnoměrné adsorpční děje
 - Nerovnoměrné rozložení potenciálu na povrchu
 - ...



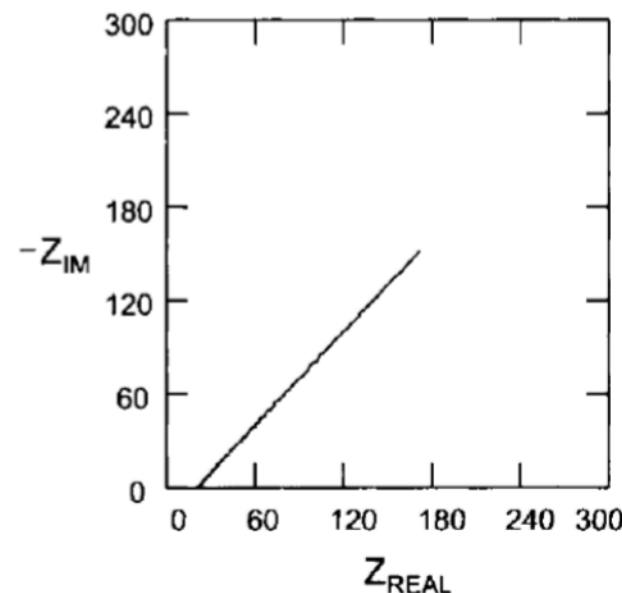
- Warburgova impedance Z_W

= prvek s konstantním fázovým posunem s $\alpha = 0,5$

- Reálná a imaginární část impedance jsou si při všech frekvencích rovny
- V Nyquistově diagramu se projeví jako přímka se sklonem 45°

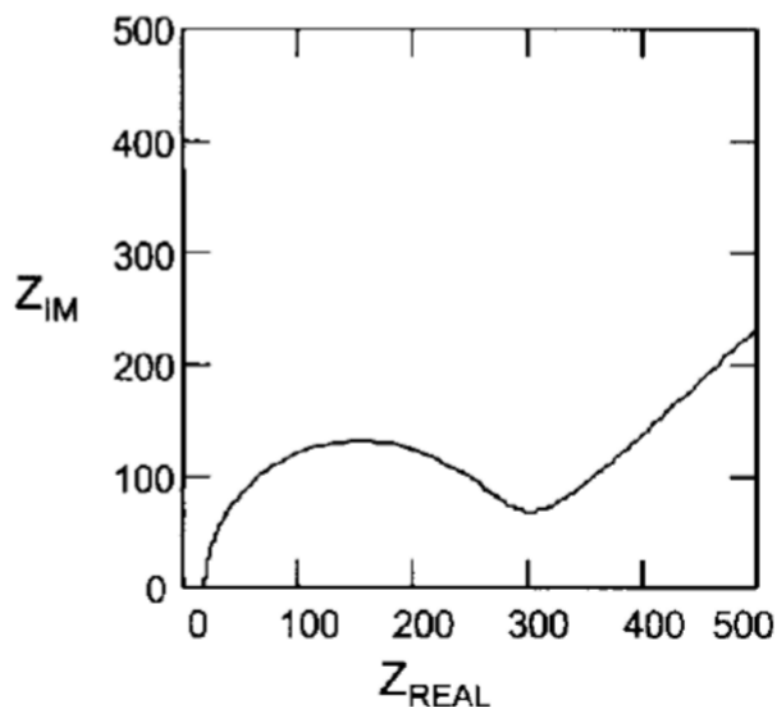
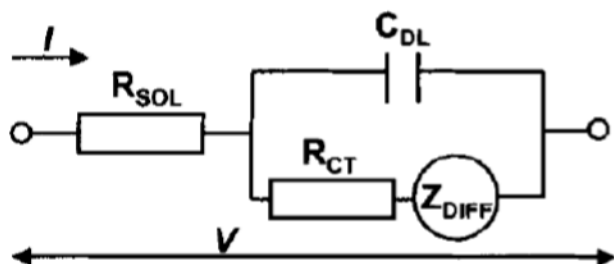
$$Z_W = \frac{R_W}{\sqrt{j\omega}}$$

- Souvisí s difuzním přenosem hmoty

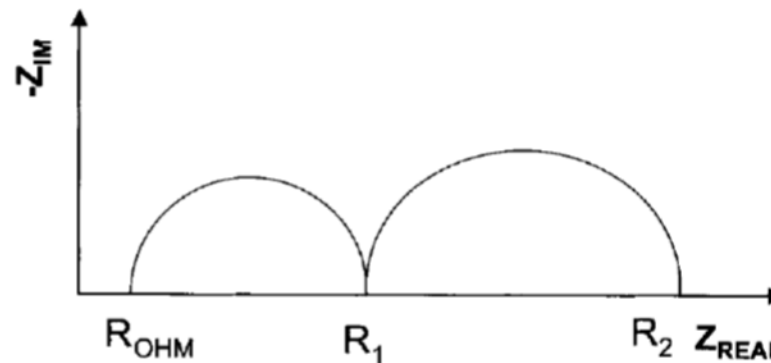
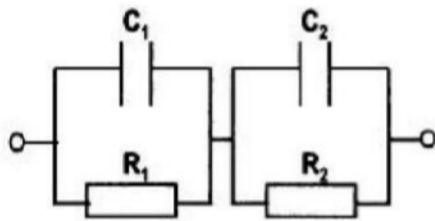


- Randlesův obvod

- Charakterizuje typickou elektrochemickou celu
- Vychází ze seriově paralelního zapojení doplněného o difúzní člen

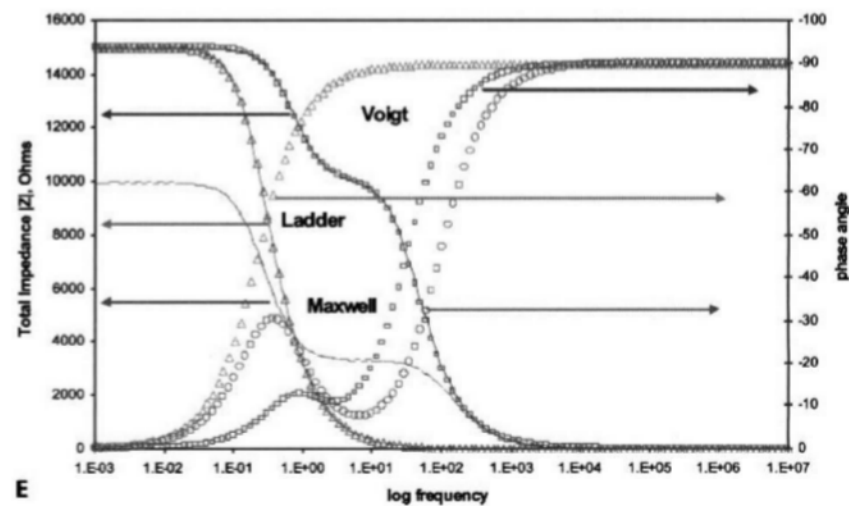
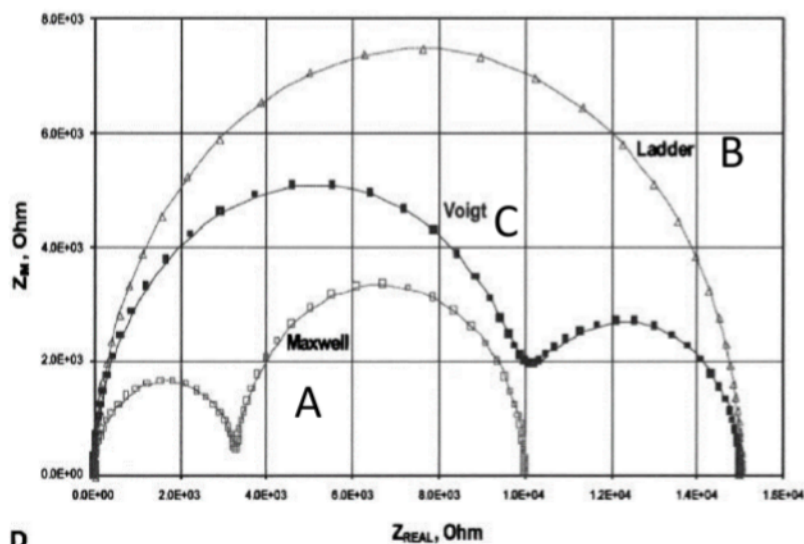
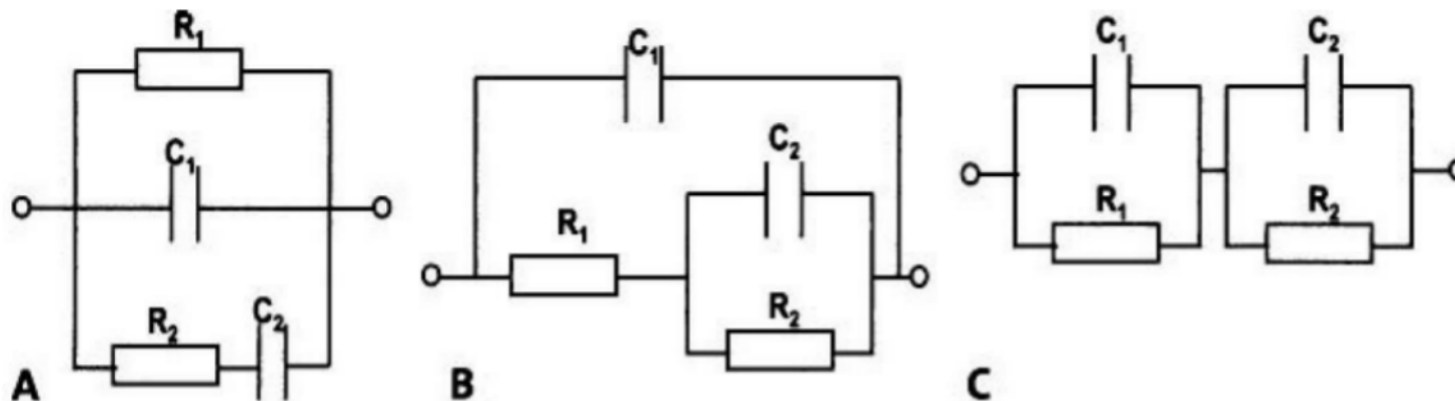


- Model pro systémy s dvěma a více časovými konstantami
 - Sériová kombinace dvou paralelních R | C obvodů



$$\hat{Z} = \hat{Z}_1 + \hat{Z}_2 = \frac{R_1}{1 + (\omega R_1 C_1)^2} + \frac{R_2}{1 + (\omega R_2 C_2)^2} - j \left[\frac{\omega R_1^2 C_1}{1 + (\omega R_1 C_1)^2} + \frac{\omega R_2^2 C_2}{1 + (\omega R_2 C_2)^2} \right]$$

$$\tau_1 = R_1 C_1, \tau_2 = R_2 C_2$$



A to je bohužel dnes všechno!

Tak zase příště

Impedanční spektroskopie

Fyzika III

Autorská práva/copyright

Uveřejněné materiály jsou určeny studentům Vysoké školy chemicko-technologické v Praze jako studijní materiál. Některá textová i obrazová data v nich obsažená jsou převzata z veřejných zdrojů. V případě nedostatečných citací nebylo cílem autora/ů záměrně poškodit event. autora/y původního díla. S eventuálními výhradami se prosím obračejte na autora/y konkrétního výukového materiálu, aby bylo možné zjednat nápravu.

The published materials are intended for students of the University of Chemistry and Technology, Prague as a study material. Some text and image data contained therein are taken from public sources. In the case of insufficient quotations, the author's intention was not to intentionally infringe the possible author(s) rights to the original work. If you have any reservations, please contact the author(s) of the specific teaching material in order to remedy the situation.



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



Dílo podléhá licenci Creative Commons 4.0 Česko
Uveďte původ - Zachovejte licenci

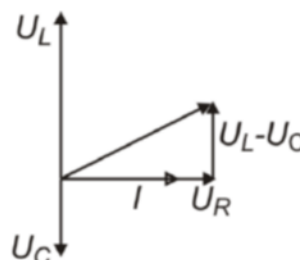
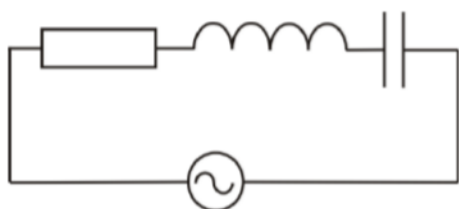
**Pohodlně se usadte,
seminář co nevidět začne!**

Impedanční spektroskopie - seminář

Fyzika III

Příklad 1

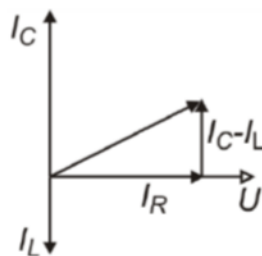
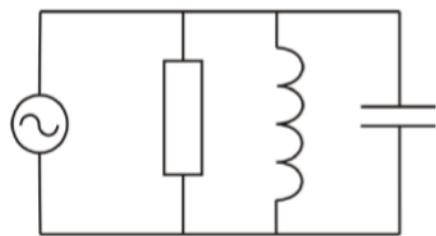
V sériovém zapojení RLC je odpor ideálního rezistoru $R = 160 \, \Omega$, indukčnost ideální cívky $L = 0,94 \, \text{H}$ a kapacita ideálního kondenzátoru $C = 40 \, \mu\text{F}$. Stanovte napětí na jednotlivých prvcích, napětí zdroje a úhel fázového posuvu. Proud procházející obvodem je $I = 0,65 \, \text{A}$ při frekvenci $f = 50 \, \text{Hz}$.



$$U_R = 104 \, \text{V}, U_L = 192 \, \text{V}, U_C = 52 \, \text{V}$$

$$U = 175 \, \text{V} \quad \varphi = 53,5^\circ$$

Ke zdroji střídavého napětí $U = 24 \text{ V}$ s frekvencí $f = 200 \text{ Hz}$ je připojen paralelní obvod tvořený ideálním rezistorem, ideální cívkou a ideálním kondenzátorem. Odpor ideálního rezistoru je $R = 50 \Omega$, indukčnost ideální cívky $L = 48 \text{ mH}$ a kapacita ideálního kondenzátoru je $C = 40 \mu\text{F}$. Vypočítejte proudy všemi prvky i celkový proud, dále admitanci a impedanci obvodu a fázový posun mezi celkovým proudem a napětím.



$$I_R = 0,48 \text{ A}, I_L = 0,4 \text{ A}, I_C = 1,2 \text{ A}$$
$$I = 0,93 \text{ A}$$

$$Y = 39 \cdot 10^{-3} \text{ S}$$
$$Z = 25,7 \Omega$$

$$\varphi = 59,1^\circ$$

Nakreslete Nyquistův diagram pro sériový RC obvod s $R = 500 \, \Omega$ a $C = 10 \, \mu\text{F}$. (Návod: vypočtete reálnou a imaginární složku impedance pro několik frekvencí - např. $\omega = 100, 200$ a $400 \, \text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$.)

$$Z' = R$$
$$Z'' = -\frac{1}{\omega C}$$

$\omega \, (\text{s}^{-1})$	$Z' \, (\Omega)$	$Z'' \, (\Omega)$
0	500	$-\infty$
100	500	-1000
200	500	-500
400	500	-250
∞	500	0

Nakreslete Nyquistův diagram pro paralelní RC obvod s $R = 500 \, \Omega$ a $C = 10 \, \mu\text{F}$. (Návod: vypočtete reálnou a imaginární složku impedance pro několik frekvencí - např. $\omega = 100, 200$ a $400 \, \text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$.)

$$Z' = \frac{R}{1 + \omega^2 R^2 C^2}$$

$$Z'' = - \frac{\omega R^2 C}{1 + \omega^2 R^2 C^2}$$

$\omega \, (\text{s}^{-1})$	$Z' \, (\Omega)$	$Z'' \, (\Omega)$
0	500	0
100	400	-200
200	250	-250
400	100	-200
∞	0	0

Nakreslete Nyquistův diagram pro sériově paralelní RC obvod s $R = 500 \, \Omega$, $C = 10 \, \mu\text{F}$ a $R_s = 200 \, \Omega$. (Návod: vypočtete reálnou a imaginární složku impedance pro několik frekvencí - např. $\omega = 100$, 200 a $400 \, \text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$.)

$$Z' = R_s + \frac{R}{1 + \omega^2 R^2 C^2}$$

$$Z'' = - \frac{\omega R^2 C}{1 + \omega^2 R^2 C^2}$$

$\omega \, (\text{s}^{-1})$	$Z' \, (\Omega)$	$Z'' \, (\Omega)$
0	700	0
100	600	-200
200	450	-250
400	300	-200
∞	200	0

A to je bohužel dnes všechno!

Tak zase příště

Impedanční spektroskopie

Fyzika III

Autorská práva/copyright

Uveřejněné materiály jsou určeny studentům Vysoké školy chemicko-technologické v Praze jako studijní materiál. Některá textová i obrazová data v nich obsažená jsou převzata z veřejných zdrojů. V případě nedostatečných citací nebylo cílem autora/ů záměrně poškodit event. autora/y původního díla. S eventuálními výhradami se prosím obračejte na autora/y konkrétního výukového materiálu, aby bylo možné zjednat nápravu.

The published materials are intended for students of the University of Chemistry and Technology, Prague as a study material. Some text and image data contained therein are taken from public sources. In the case of insufficient quotations, the author's intention was not to intentionally infringe the possible author(s) rights to the original work. If you have any reservations, please contact the author(s) of the specific teaching material in order to remedy the situation.

Akustika

Fyzika III



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



Ústav fyziky a měřicí techniky



Dílo podléhá licenci Creative Commons 4.0 Česko
Uvedte původ - Zachovejte licenci



Zvuk ve vzduchu

- Z Fyziky I si pamatujeme

- $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$

- jedno z možných řešení
 $u(x, t) = U \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right)$
-

- Zvuk je podélné vlnění vzduchu

- $pV^\kappa = \text{konst}$

- $F = ma = pS$

- $\frac{\partial p}{\partial t} = -\rho \operatorname{div} v$

- Zvuk je podélné vlnění vzduchu

- $\rho \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \kappa p_0 \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$

- $\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho \frac{\partial v_x}{\partial t}$

- $\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{\rho}{\kappa p_0} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$ a $c^2 = \frac{\kappa p_0}{\rho}$

Zvuk ve vzduchu

- $\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{\rho}{\rho_0} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$
- pro rovinnou vlnu postupující ve směru osy x
 rovnice tlaku $p(x, t) = p_{\max} \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right)$
 akustická rychlost $v(x, t) = \frac{1}{\rho c} p_{\max} \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right)$
 výchylka elementární vrstvy plynu $\xi(x, t) = -\frac{1}{\rho c \omega} p_{\max} \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right)$
- pro rovinnou vlnu postupující proti směru osy x
 rovnice tlaku $p(x, t) = p_{\max} \sin \omega \left(t + \frac{x}{c} \right)$
 akustická rychlost $v(x, t) = -\frac{1}{\rho c} p_{\max} \sin \omega \left(t + \frac{x}{c} \right)$
 výchylka elementární vrstvy plynu $\xi(x, t) = \frac{1}{\rho c \omega} p_{\max} \cos \omega \left(t + \frac{x}{c} \right)$

Odraz vlnění a akustická impedance

- Předpokládejme vlnění ve směru osy x a rozhraní ve bodě $x = 0$
- $v(x, t) = v \sin \omega \left(t - \frac{x}{c_1} \right) + v_R \sin \omega \left(t + \frac{x}{c_1} \right)$ pro $x < 0$
- $v(x, t) = v_T \sin \omega \left(t - \frac{x}{c_2} \right)$ pro $x > 0$
- v i p musí být spojité a $v = \frac{p}{\rho c}$
- zavedeme akustickou charakteristickou impedanci $Z_c = \rho c$,
pak $p = Z_c v$
- akustická rychlost odražené vlny
$$v_R = \frac{Z_{c1} - Z_{c2}}{Z_{c1} + Z_{c2}} v$$
- akustická rychlost postupující vlny
$$v_T = \frac{2Z_{c1}}{Z_{c1} + Z_{c2}} v$$

Zvuk v jiných prostředích

- Zvuk v kapalinách
(K – modul objemové pružnosti)

- $K = -V \frac{\partial p}{\partial V}$
- $c^2 = \frac{K}{\rho}$

- Zvuk v pevných látkách
(E – Youngův modul pružnosti)

- $\sigma = E\varepsilon = E \frac{\partial u}{\partial x}$
- $c^2 = \frac{E}{\rho}$

- Zvuk ve struně
(F – napnutí struny)

- $c^2 = \frac{F}{S\rho}$

Rychlost zvuku v látkách

- Rychlost zvuku v plynech

$$c = \sqrt{\kappa \frac{p_0}{\rho_0}} (1 + \alpha \Delta T)$$

- Rychlost ve vzduchu

$$c = (331,8 + 0,6 \Delta T) \text{ m/s}$$

Látka	Rychlost šíření [m/s]
Vzduch 0 °C	332
Vzduch 20 °C	343
Dusík 0 °C	334
Helium 0 °C	971
Vodík 0 °C	1286
Voda 0 °C	1402
Voda 20 °C	1482
Aceton 20 °C	1190
Rtuť 20 °C	1451
Glycerin 20 °C	1923
Ocel	5750
Beton	3100
Sklo	5270
Diamant	15 000

- Intenzita vlnění z Fyziky I

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

- Intenzita zvuku je analogicky

$$I = \frac{p_{ef}^2}{\rho c} = \frac{p_{max}^2}{2\rho c}$$

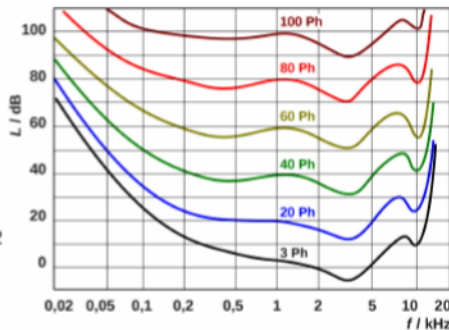
- Akustická intenzita [dB]

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_r}, \text{ kde } I_r = 10^{-12} \text{ Wm}^{-2}$$

- Akustický výkon [dB]

$$L_P = 10 \log \frac{P}{P_r}, \text{ kde } P_r = 10^{-12} \text{ W}$$

- Subjektivní intenzita [Ph] – fón



Parametry zvuku

- Akustická intenzita [dB]: $L_I = 10 \log \frac{I}{I_r}$, kde $I_r = 10^{-12} \text{ Wm}^{-2}$

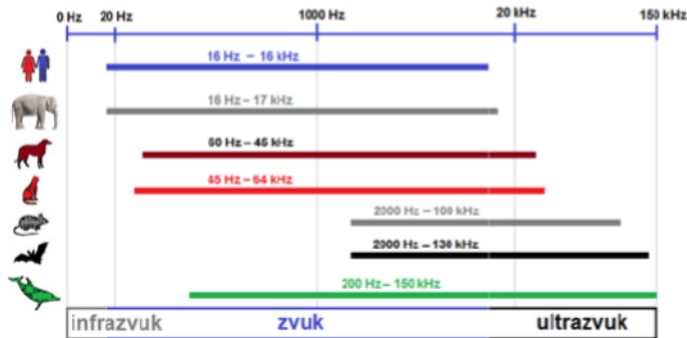
L		I
0 dB	Práh slyšení	
30 dB	Velmi tichý pokoj (např. ložnice)	
60 dB	Hlasité bavení se mezi sebou	
80 dB	Křik	
80 dB	Vysavač	
130 dB	Start tryskového letadla	
130 dB	Práh bolestivosti, hrozí poškození sluchu	
dvojnásobná intenzita		3 dB
Hifi – odstup signál šum		90 dB

- Fyzikální hranice ve vzduchu: $p_{\max} = p_{\text{atm}}$, $I = \frac{p_{\text{ef}}^2}{\rho c} = \frac{p_{\max}^2}{2\rho c}$

- Huygensův princip

<http://www.falstad.com/ripple/>

- odraz
- ohyb
- rozlišovací schopnost
 - netopýr ve vzduchu ($v = 343 \text{ ms}^{-1}$) při frekvenci 100 kHz?
 - USG v lidském těle (vodě, $v = 1480 \text{ ms}^{-1}$) s frekvencí 2,5 MHz?



- Pasivní ($I \lesssim 50 \text{ Wcm}^{-2}$)

- Nevznikají kavitace
- Zobrazování, defektoskopie



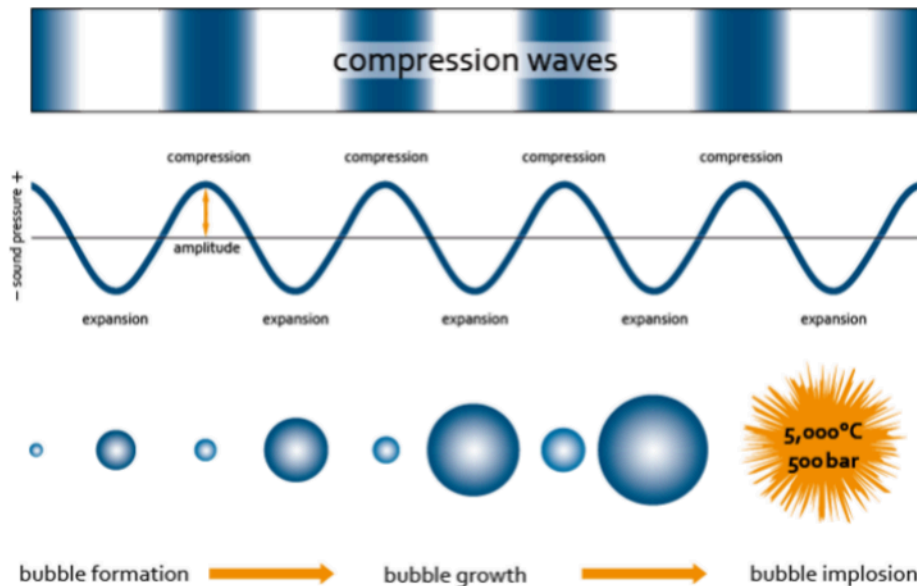
- Ultrazvuk se projevuje pouze jako vlnění

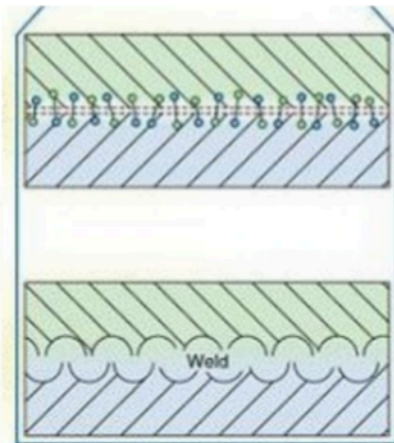
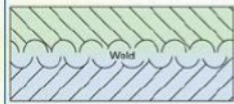
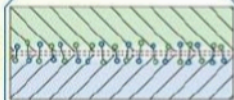
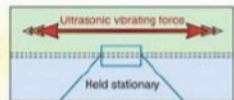
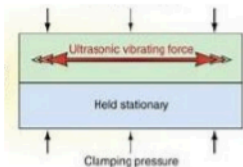
- Aktivní ($I \gtrsim 50 \text{ Wcm}^{-2}$)

- Vznikají kavitace
- Chemické a mechanické účinky

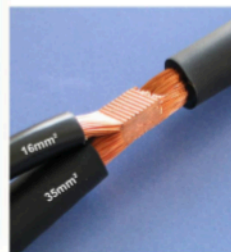


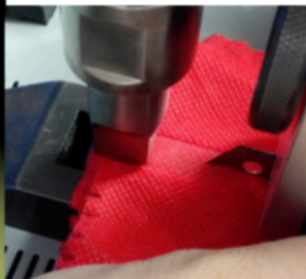
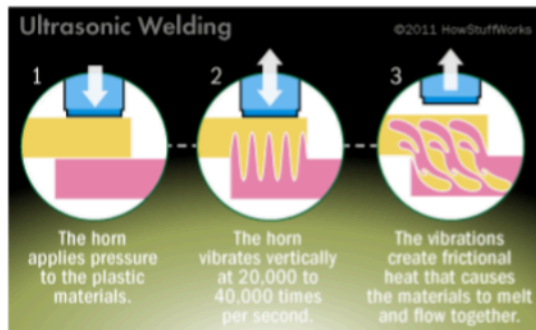
- Vypuzování plynů z kapalin
- Rozptýlení
 - drobných částecek v kapalině
 - částecek kapaliny v jiné kapalině
 - částecek kapaliny v plynu
- Čištění
- Svařování





wikipedia.org

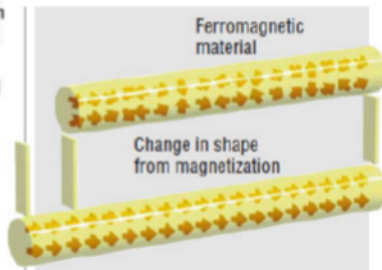
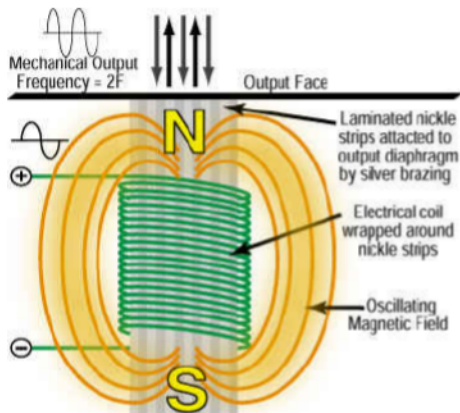


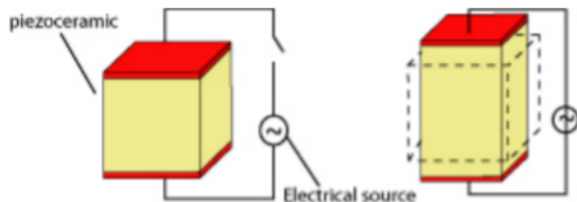


wikipedia.org

- Mechanické generátory

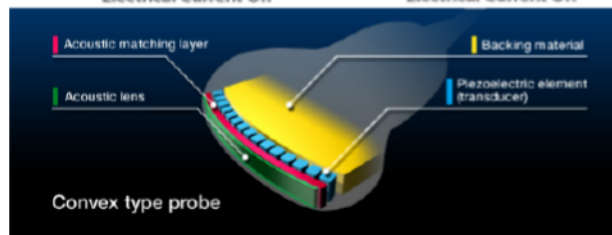
- Speciální píšťaly a sirény
- Magnetostrikční generátory
 - feromagnetické materiály (Fe, Ni, Co) mění svou délku podle vnitřní magnetizace
 - vysoký výkon
 - omezení do asi 60 kHz.
 - použití např. v zubním lékařství při odstraňování zubního kamene
- Piezoelektrické generátory
 - keramické materiály, např. $\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$, BaTi
 - použitelné až do desítek megahertzů





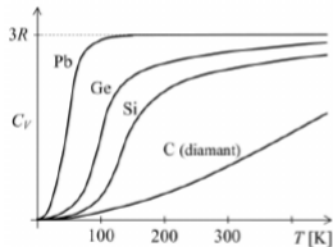
Electrical Current Off

Electrical Current On



Fonony – tepelné kmity mřížky

- v klasické fyzice molární tepelná kapacita nezávisí na teplotě $C_V = 3R$
- experimentální závislosti se dají vysvětlit pouze pomocí fononů

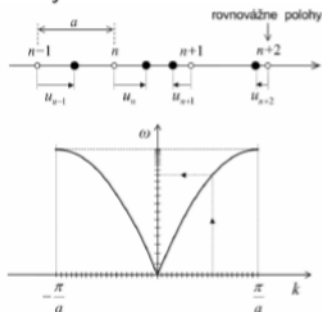


- $E_n = \hbar\omega\left(n + \frac{1}{2}\right)$

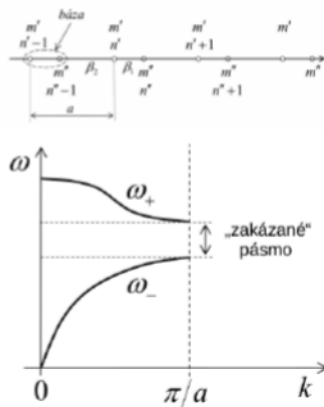


Fonony – tepelné kmity mřížky

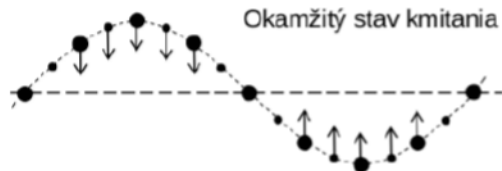
- Jednorozměrný krytal – stejné atomy



- Jednorozměrný krytal – dva druhy atomů



- Akustický mod



- Optický mod



Autorská práva/copyright

Uveřejněné materiály jsou určeny studentům Vysoké školy chemicko-technologické v Praze jako studijní materiál. Některá textová i obrazová data v nich obsažená jsou převzata z veřejných zdrojů. V případě nedostatečných citací nebylo cílem autora/ů záměrně poškodit event. autora/y původního díla. S eventuálními výhradami se prosím obračejte na autora/y konkrétního výukového materiálu, aby bylo možné zjednat nápravu.

The published materials are intended for students of the University of Chemistry and Technology, Prague as a study material. Some text and image data contained therein are taken from public sources. In the case of insufficient quotations, the author's intention was not to intentionally infringe the possible author(s) rights to the original work. If you have any reservations, please contact the author(s) of the specific teaching material in order to remedy the situation.



Návod pro laboratorní úlohu – Ultrazvuková sonografie

(Předmět – Fyzika III)

Abstrakt:

Laboratorní cvičení svou tematikou navazuje na sekci Aplikovaná akustika, která je součástí výběrové přednášky Fyzika III. V rámci tohoto cvičení si studenti pomocí přenosného zařízení pro lékařskou ultrazvukovou diagnostiku ověří pravidla pro šíření akustických vln v různých prostředích a na jejich rozhraních a provedou interpretaci naměřených dat.



Obrázek 1. Přenosné zařízení pro lékařskou ultrazvukovou diagnostiku Quirumed WED2000.

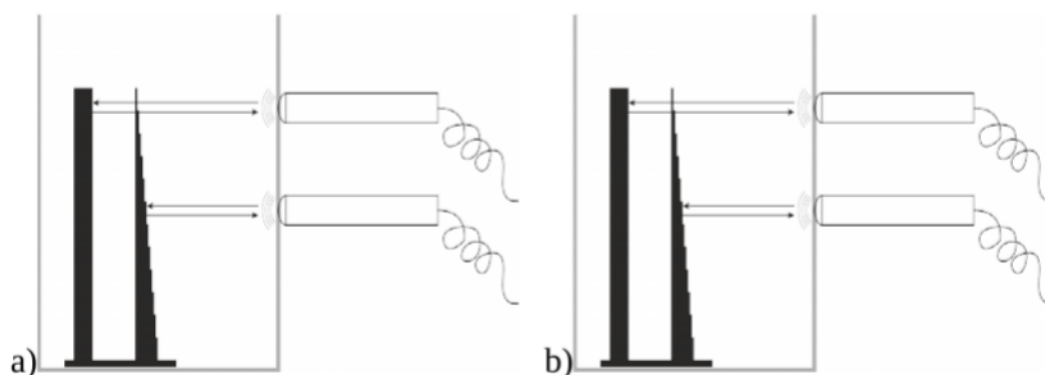
Pracovní úkoly:

1. Seznamte se se zařízením Quirumed WED2000 a jeho obsluhou. K připravené prázdné měřicí cele přikládejte ultrazvukovou sondu, na displeji pozorujte zobrazené zpětně odražené vlnění a interpretujte jej.
2. Do měřicí cely vkládejte předměty z různých materiálů, různých tvarů a rozměrů a pozorujte zobrazovaný odražený signál.
3. Použitím přístroje zmapujte obsah cely s neznámým obsahem.

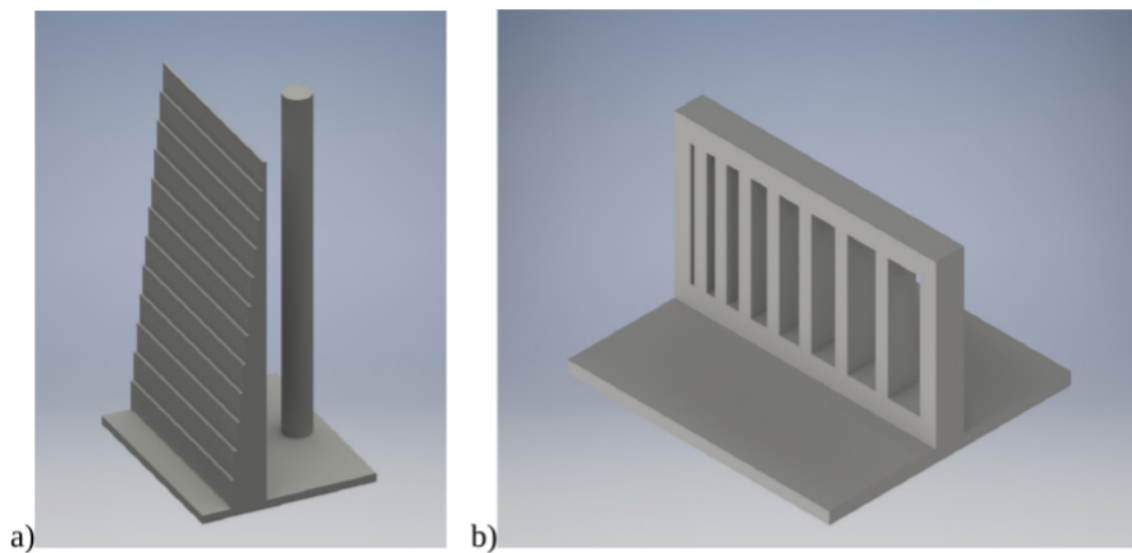
Postup práce:

Po zapnutí zařízení nastavte režim zobrazování „single B“, na obrazovce se zobrazí signál snímáný sondou. Měřicí sondu přikládejte k vnějším stěnám měřicí cely a pozorujte odezvu na obrazovce. V tomto případě se na obrazovce neobjeví žádný signál z cely. Důvodem je odraz vlnění na rozhraní sonda vzduch ještě před jeho vniknutím do cely. Z toho důvodu je nutné na povrch cely nanést vrstvu gelu, který tvoří impedanční přizpůsobení prostředí. Po následném přiložení k cele již vlnění proniká do cely a na obrazovce se objeví signál odpovídající prostředí uvnitř cely (obr. 2a). Zatím je cela prázdná, takže v prostoru cely by nemělo docházet k odrazu vlnění, což se na obrazovce zobrazuje jako tmavý prostor. Signál se odráží pouze od druhé stěny cely a zobrazuje se na obrazovce jako bílá čára. Přikládáme-li sondu ke stěnám cely v různých místech a pod různými úhly, může uvnitř cely dojít i k vícenásobným odrazům a tomu odpovídající změně zobrazovaného signálu na obrazovce. Proveďte několik měření při různých polohách a zaznamenejte do protokolu.

V následujících krocích vkládejte do cely připravené předměty různých tvarů a z různých materiálů (obr. 2b). Pro měření koeficientu odrazu vložte předmět č. 1 (viz obr. 3a) plochou kolmo ke směru šíření vln ze sondy a pozorujte obraz. Z jasu na obrazovce odhadněte poměr prošlého a odraženého signálu v závislosti na tloušťce předmětu. Zaznamenejte do protokolu. Pro měření rozlišovací schopnosti při dané frekvenci vlnění použijte předměty č. 2 a 3 (obr. 3b a 3c). Předměty opět vložte plochou kolmo ke směru šíření vln ze sondy a ze zobrazeného signálu určete minimální velikost objektu, který je možné rozlišit. Obraz zastavte tlačítkem „freeze“ a následně se přepněte do módu M/3. Posunováním kurzorem označte část plochy obrazovky a odečtěte rozměry označených objektů. Naměřené údaje porovnejte s reálnými rozměry objektu a zaznamenejte do protokolu.



Obrázek 2. Přenosné zařízení pro lékařskou ultrazvukovou diagnostiku Quirumed WED2000.



Obrázek 3. Předměty pro analýzu ultrazvukem.

Použitím již známých metod zjistíte obsah měřicí cely s neznámým obsahem. Načrtněte tvary a rozměry objektů uvnitř cely, poté celu otevřete a porovnejte naměřené údaje se skutečností. Zaznamenejte do protokolu.

Protokol z laboratorní úlohy **Ultrazvuková sonografie**

Student:

Datum:

Pracovní úkoly:

1. Seznamte se se zařízením Quirumed WED2000 a jeho obsluhou. K připravené prázdné měřicí cely přikládejte ultrazvukovou sondu, na displeji pozorujte zobrazené zpětně odražené vlnění a interpretujte jej.
2. Do měřicí cely vkládejte předměty z různých materiálů, tvarů a rozměrů a pozorujte zobrazovaný odražený signál.
3. Použitím přístroje zmapujte obsah cely s neznámým obsahem.

Záznam měření:

Záznam z měření prázdné cely:

Záznam z měření předmětu č. 1:

Záznam z měření předmětu č. 2:

Záznam z měření předmětu č. 3:

Náčrt neznámého obsahu měřicí cely:

Autorská práva/copyright

Uveřejněné materiály jsou určeny studentům Vysoké školy chemicko-technologické v Praze jako studijní materiál. Některá textová i obrazová data v nich obsažená jsou převzata z veřejných zdrojů. V případě nedostatečných citací nebylo cílem autora/ů záměrně poškodit event. autora/y původního díla. S eventuálními výhradami se prosím obračejte na autora/y konkrétního výukového materiálu, aby bylo možné zjednat nápravu.

The published materials are intended for students of the University of Chemistry and Technology, Prague as a study material. Some text and image data contained therein are taken from public sources. In the case of insufficient quotations, the author's intention was not to intentionally infringe the possible author(s) rights to the original work.

If you have any reservations, please contact the author(s) of the specific teaching material in order to remedy the situation.

Optika I

Fyzika III



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



Ústav fyziky a měřicí techniky



Dílo podléhá licenci Creative Commons 4.0 Česko
Uveďte původ - Zachovejte licenci



Elektromagnetické záření – Maxwellovy rovnice

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

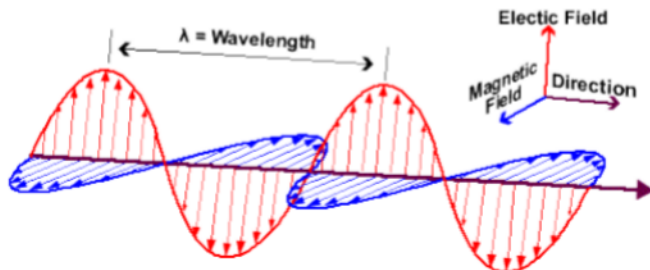
$$\oiint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

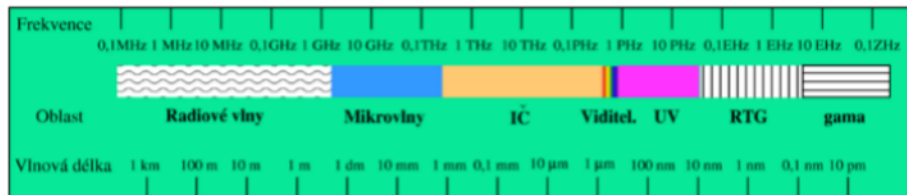
$$\oiint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t}$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \mathbf{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \iint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S}$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0, \quad \text{kde } c^2 = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0}$$





- Pouze IČ – UV část elektromagnetického záření
- Paprsková optika
 - vlnová délka světla je mnohem větší než okolní objekty
- Vlnová optika
 - příčné vlnění E a B jsou nahrazeny podélným vlněním jako v akustice
 - vysvětlení interference a ohybu vlnění
 - příčné vlnění E a B není zanedbáno
 - vysvětlení polarizačních jevů a pod.
- Kvantová optika – nevyplývá z Maxwellových rovnic

Paprsková optika – postuláty

- Postuláty paprskové optiky

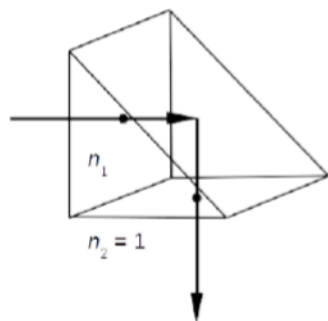
- 1 Světlo se šíří ve formě paprsků. Paprsky jsou emitovány zdroji světla a mohou být pozorovány, když dosáhnou optického detektoru.
- 2 Rychlost šíření paprsku v optickém prostředí je charakterizována jedinou veličinou nazývanou index lomu prostředí n , definovanou jako $n = c/v$, kde c je rychlost světla ve vakuu a v je rychlost světla v daném prostředí. Tímto parametrem je dán směr šíření paprsku a jeho lom na rozhraních.
- 3 Optický paprsek se šíří z bodu A do bodu B po takové dráze, aby doba šíření paprsku byla extrémální. Ve většině běžných situací je extrémem doba minimální. Tento postulát se nazývá Fermatův princip.

- Z toho vyplývá Snellův zákon lomu: $n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$

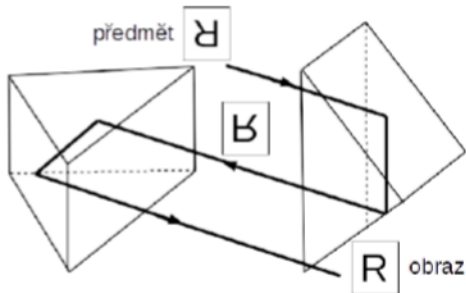


Paprsková optika – úplný odraz

- Mezní úhel $n_1 \sin \alpha_m = n_2$
- Využití např. na převrácení obrazu v triedrech



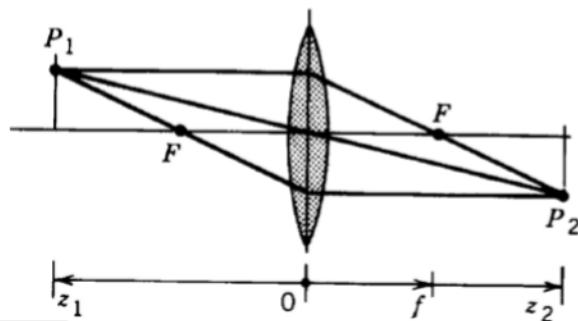
$$n_h = \frac{1}{\sin 45^\circ} \doteq 1,41, \quad n_{\text{sklo}} \geq 1,5$$





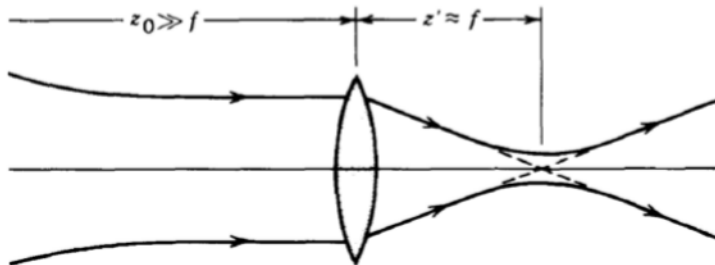
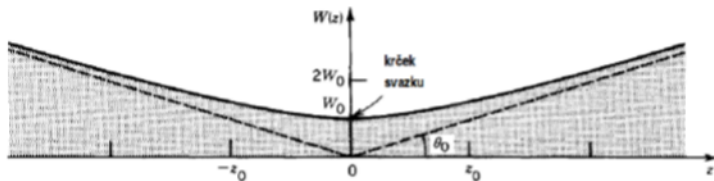
Paprsková optika – čočky

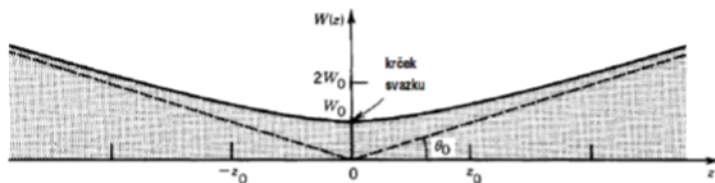
- Paprsek procházející středem čočky se nelomí.
- Paprsek šířící se rovnoběžně s optickou osou se na spojce láme tak, aby na druhé straně čočky procházel ohniskem.
- U rozptylky se paprsek láme tak, aby se zdálo, že vychází z ohniska.
- Zobrazovací rovnice čočky: $\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} = \frac{1}{f}$



Vlnová optika – optický svazek

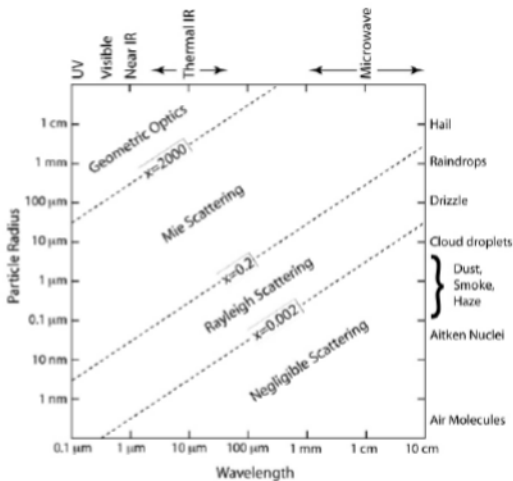
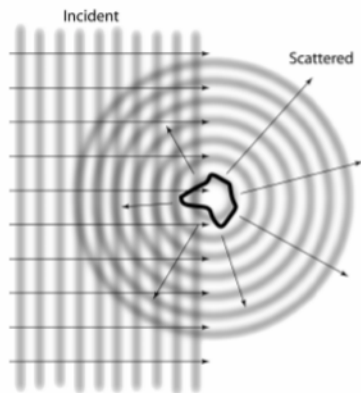
$$\frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = 0, \quad \text{kde } c = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0}, \quad \theta_0 W_0 = \frac{\lambda}{\pi}$$



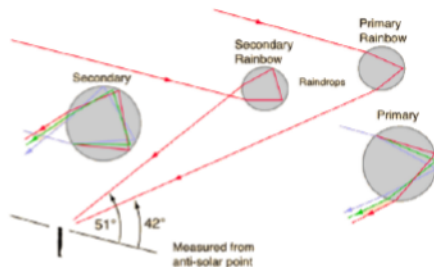


$$\theta_0 W_0 = \frac{\lambda}{\pi}$$

- zlepšení kolimace dosáhneme kratší vlnovou délkou a větším středovým poloměrem svazku
- zlepšení fokusace dosáhneme zvýšením rozbíhavosti svazku



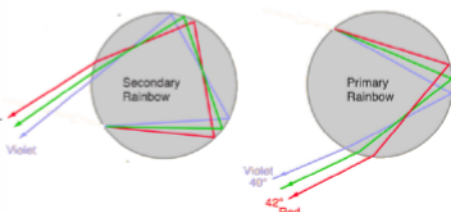
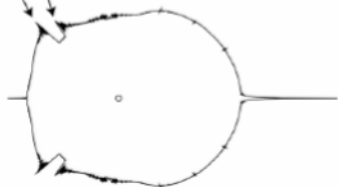
$$x = \frac{2\pi r}{\lambda}$$

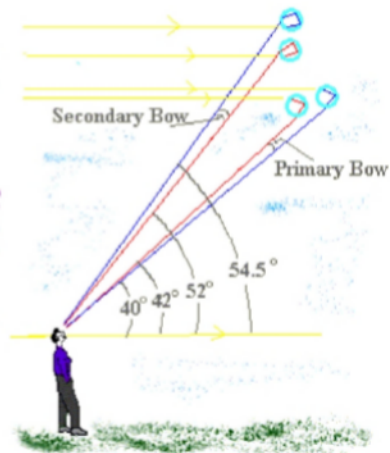
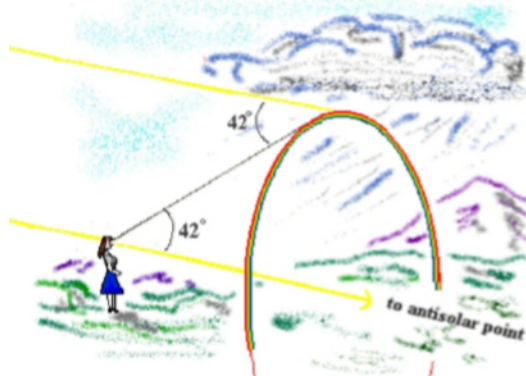


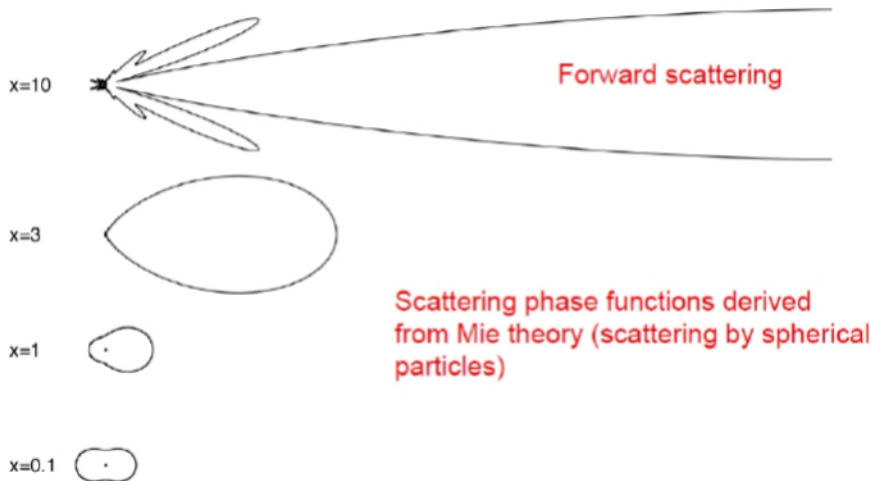
Secondary Rainbow

Primary Rainbow

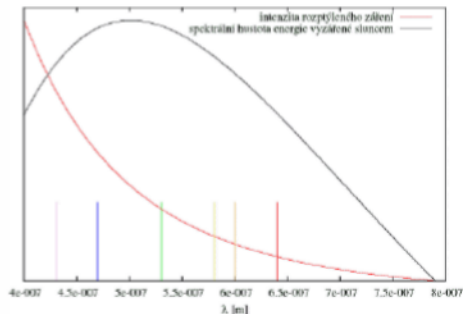
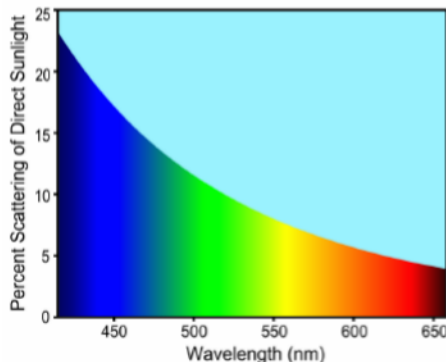
Note: these phase function plots are logarithmic





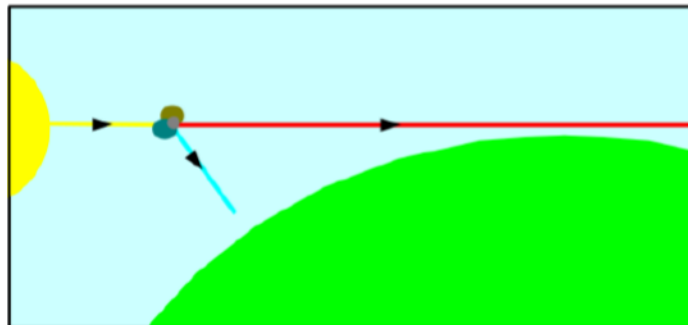


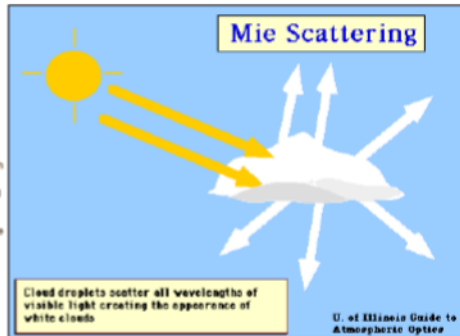
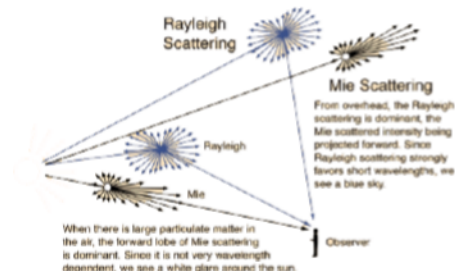
$$I = I_0 \frac{1 + \cos^2 \alpha}{2R^2} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \left(\frac{d}{2} \right)^6$$



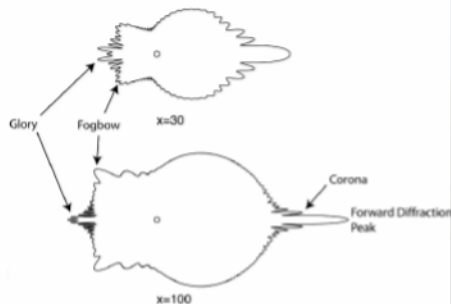


$$I = I_0 \frac{1 + \cos^2 \alpha}{2R^2} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \left(\frac{d}{2} \right)^6$$





Gloriola, mlhová duha, korona



Glory





Gloriola, 22. září 2006, Gerlachovský štít. Foto Martin Podžorný.

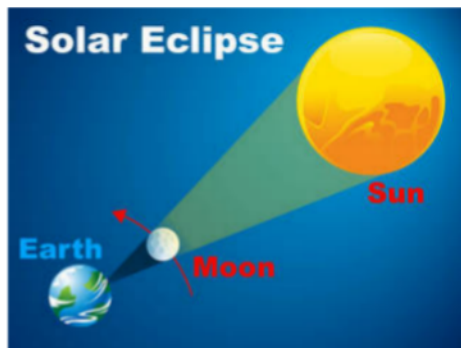
Fogbow



Lunar corona







- velikost několik milionů km
- teplota $1 - 4 \times 10^6$ K
- hustota $10^9 - 10^{10}$ částic na cm^3
- teplota fotosféry 4 000 – 6 000 K
- ze Země pozorovatelná pouze při zatmění Slunce





Čas expozice 1/1000 s



Čas expozice 1/500 s



Čas expozice 1/60 s



Čas expozice 1/8 s



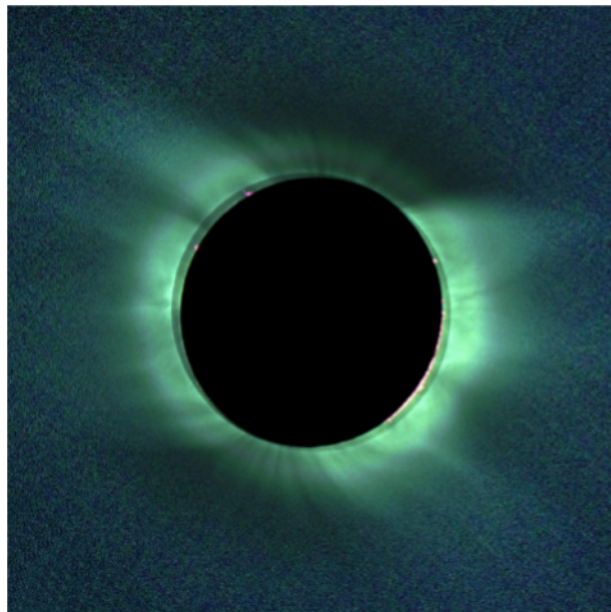
Čas expozice 1 s

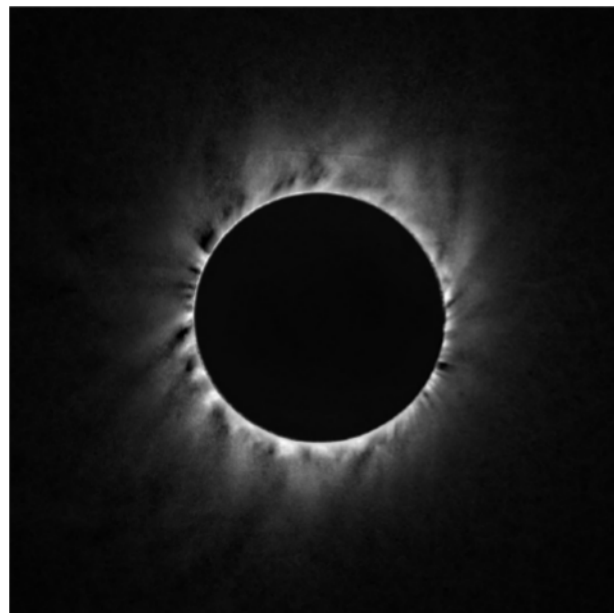


Získaná maska

© ZAMBIA ECLIPSE EXPEDITION 2001







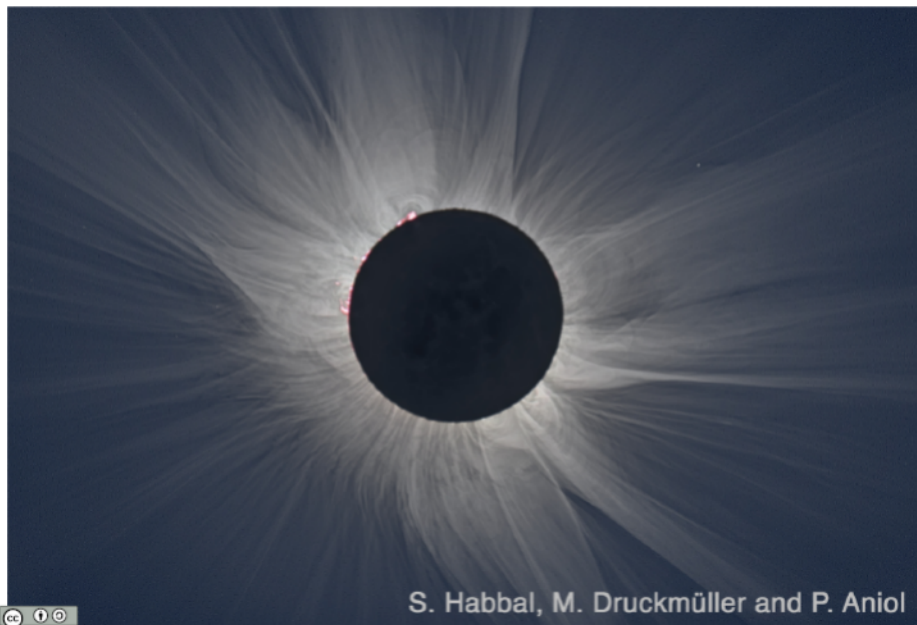
Total Solar Eclipse 2017

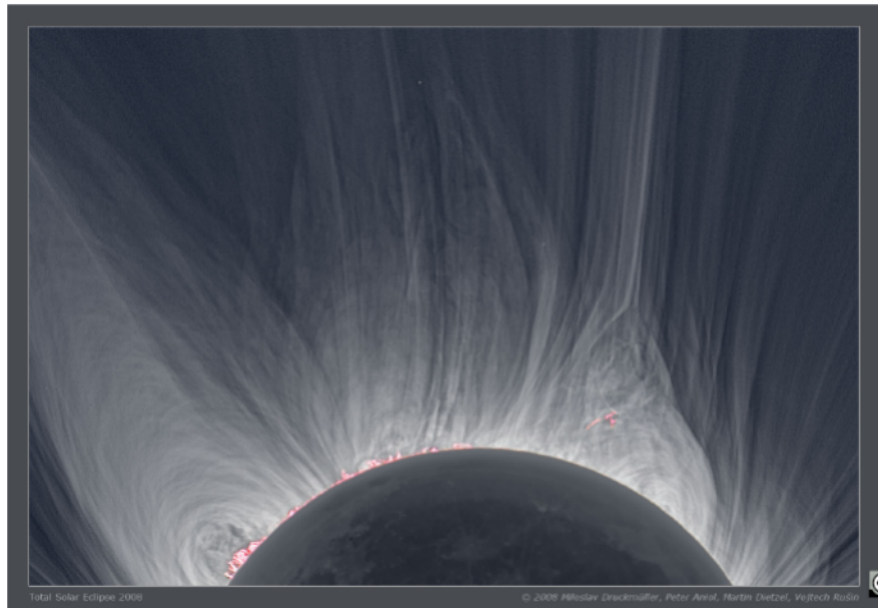


Total Solar Eclipse 2008



© 2008 Miroslav Druckmüller, Peter Aniol, Vojtech Ružin





Total Solar Eclipse 2009

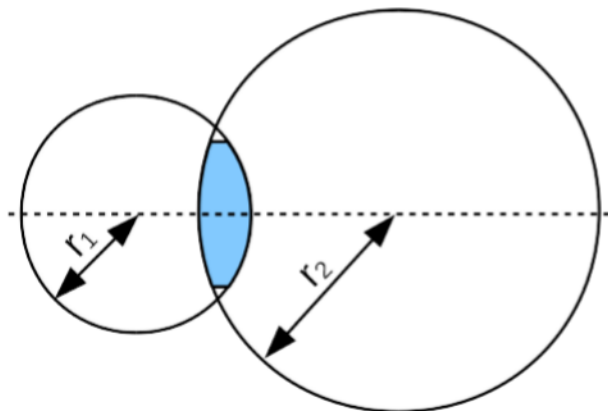
© 2009 Miroslav Druckmüller, Peter Aniol, Martin Dietzel, Vojtěch Rošin

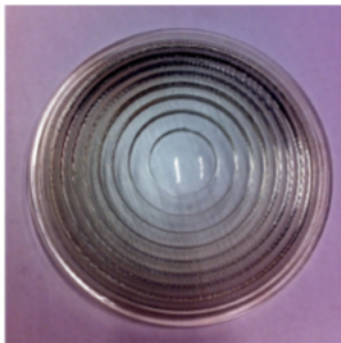
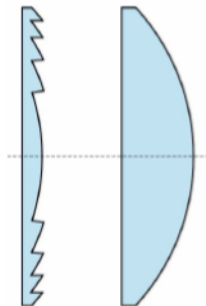


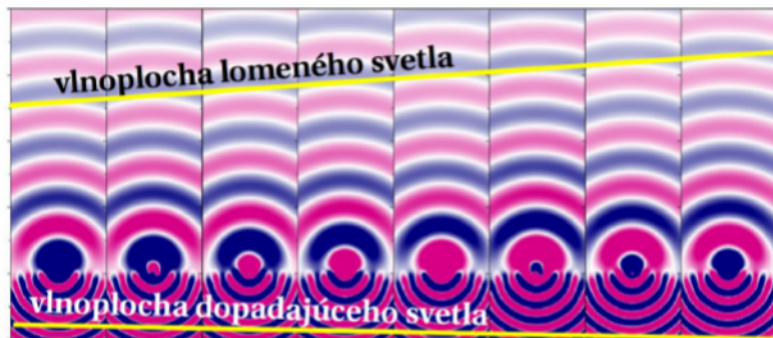


31. 8. 2012 výtrysk filamentu do sluneční atmosféry, sonda Solar Dynamics Observatory. NASA

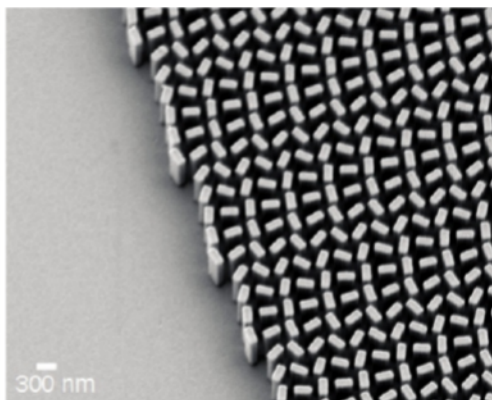
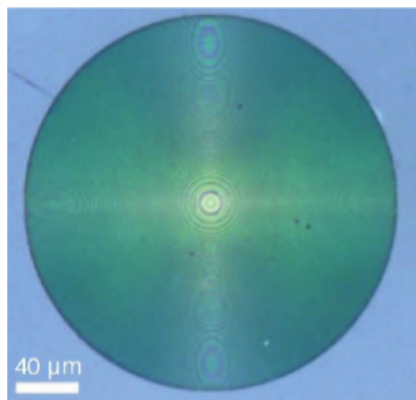
- Konstrukce čočky: $D = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$



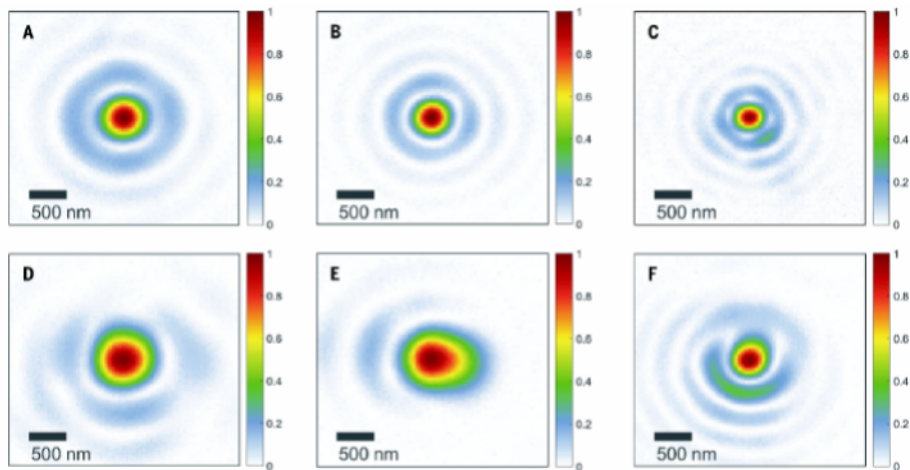




Lom světla na soustavě zlatých plazmonických antén. Rezonátory vlevo zdrží světlo na delší dobu než ty vpravo, světlo se pak šíří pod jiným úhlem než dopadlo.



Celkový pohled na metačočku a detail nanostruktury TiO_2 zobrazenou SEM.



Porovnání zobrazení bodu metačočkami a klasickým kvalitním objektivem Nikon CFI 60. (A až C) zobrazení bodů metačočkami navrženými pro konkrétní vlnové délky $\lambda = 660$ nm, $\lambda = 532$ nm, $\lambda = 405$ nm; (D až F) zobrazení objektivem Nikon.



Autorská práva/copyright

Uveřejněné materiály jsou určeny studentům Vysoké školy chemicko-technologické v Praze jako studijní materiál. Některá textová i obrazová data v nich obsažená jsou převzata z veřejných zdrojů. V případě nedostatečných citací nebylo cílem autora/ů záměrně poškodit event. autora/y původního díla. S eventuálními výhradami se prosím obraťte na autora/y konkrétního výukového materiálu, aby bylo možné zjednat nápravu.

The published materials are intended for students of the University of Chemistry and Technology, Prague as a study material. Some text and image data contained therein are taken from public sources. In the case of insufficient quotations, the author's intention was not to intentionally infringe the possible author(s) rights to the original work. If you have any reservations, please contact the author(s) of the specific teaching material in order to remedy the situation.

Optika II — Aplikace

Fyzika III



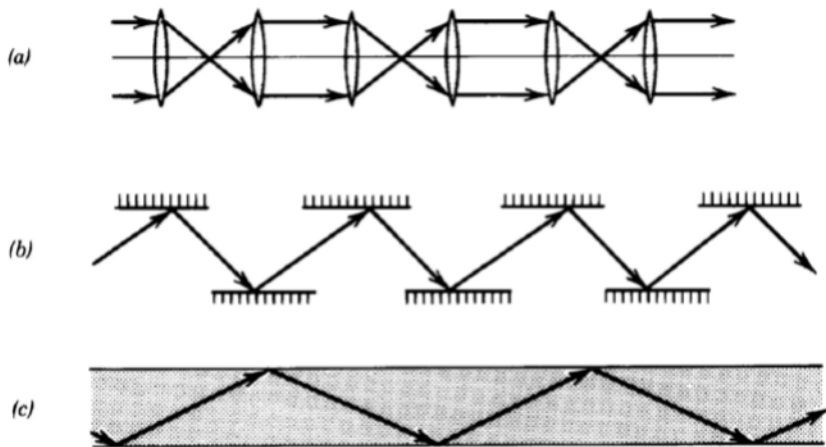
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



Ústav fyziky a měřicí techniky

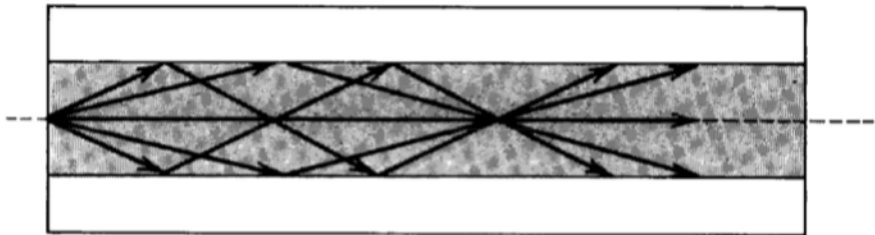


Dílo podléhá licenci Creative Commons 4.0 Česko
Uveďte původ - Zachovejte licenci

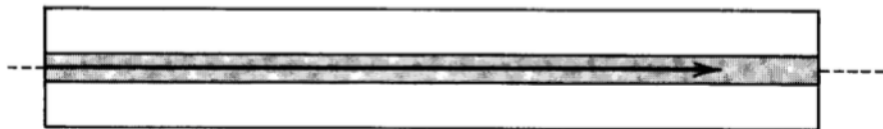


a) soustava čoček, b) soustava zrcadel, c) optická vlákna

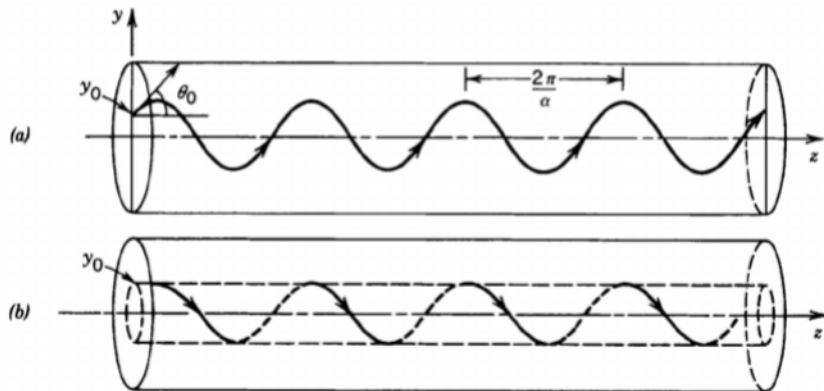
- multimodální

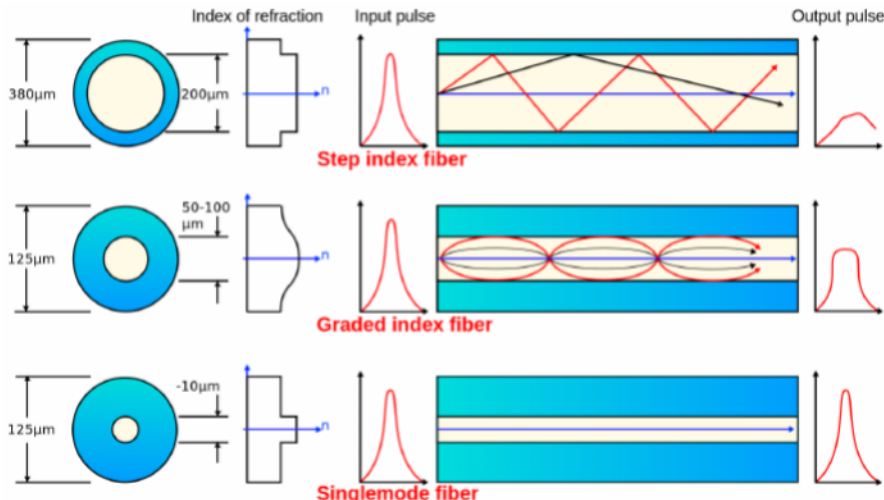


- unimodální

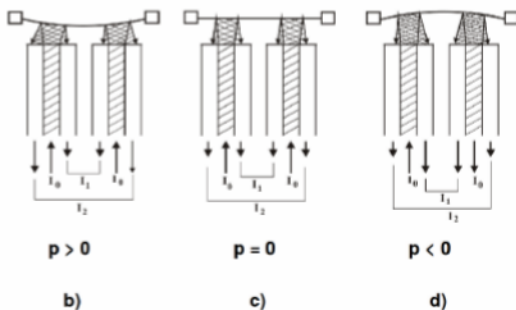
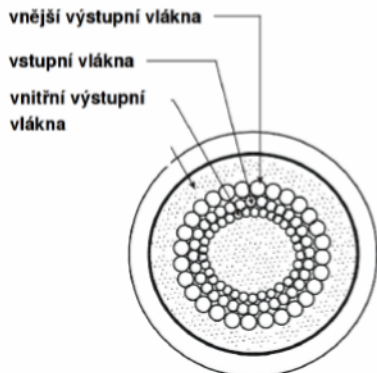
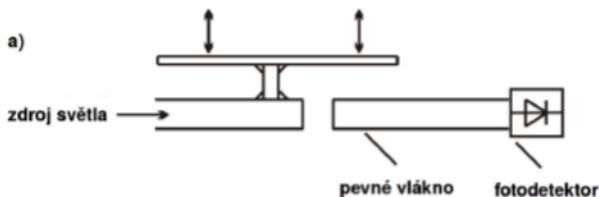


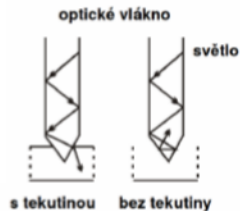
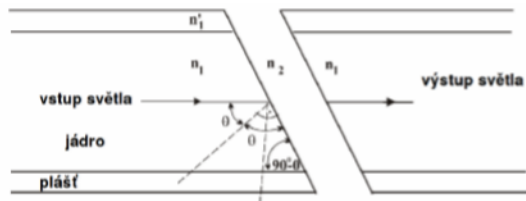
- index lomu se mění postupně



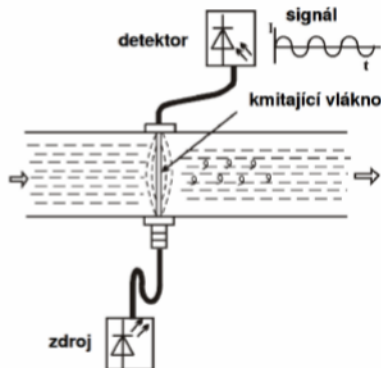
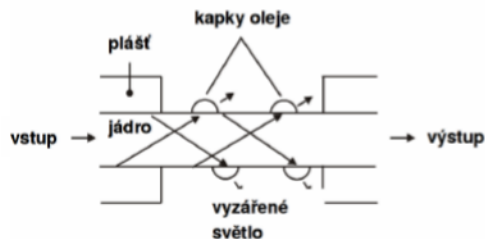


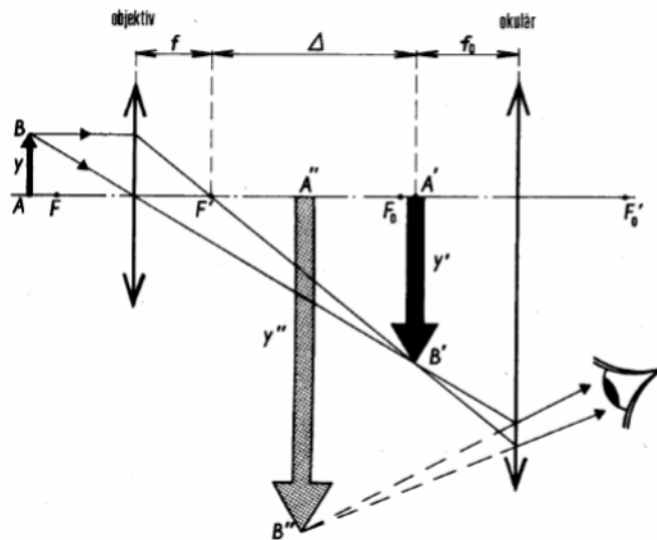
Využití optických vláken – detekce posunutí a ohybu



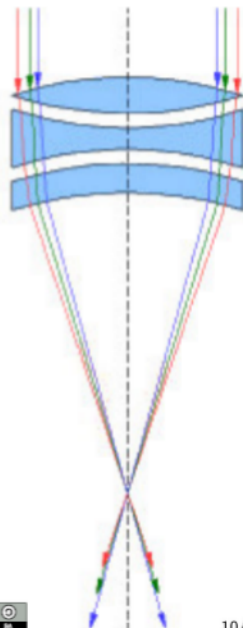
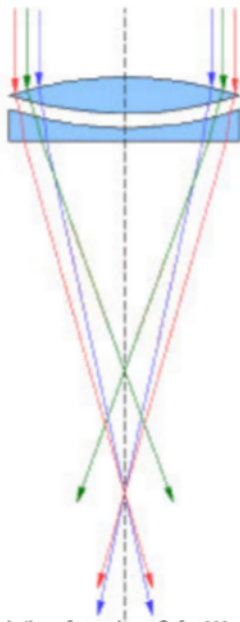
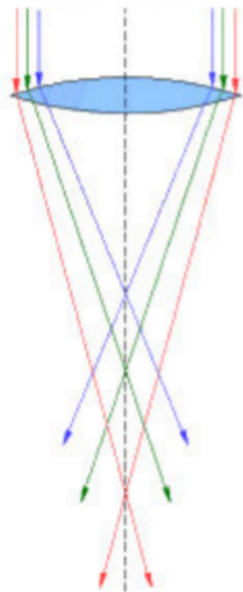


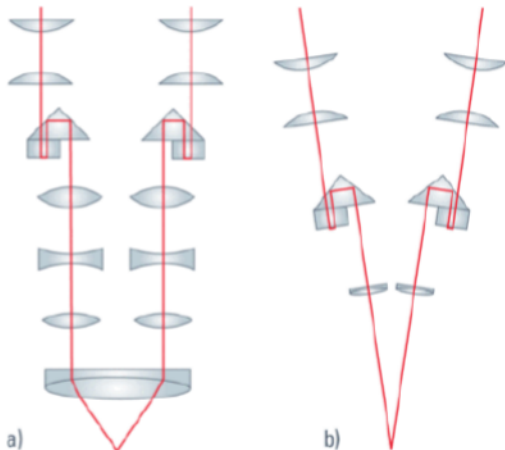
Využití optických vláken – detekce chemických a fyzikálních veličin

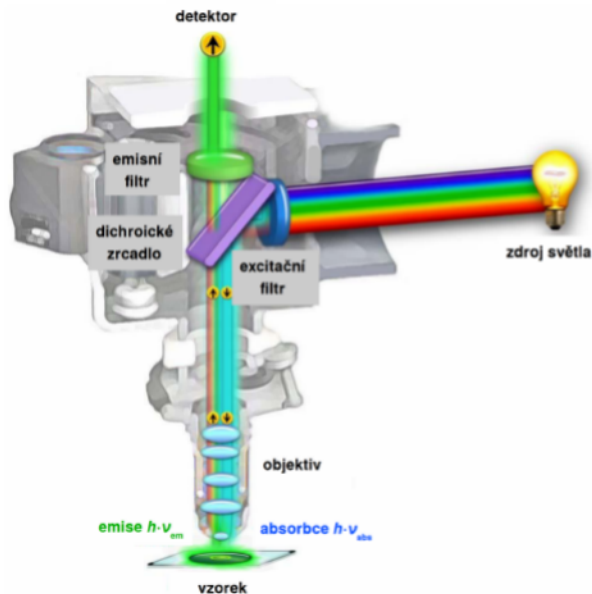


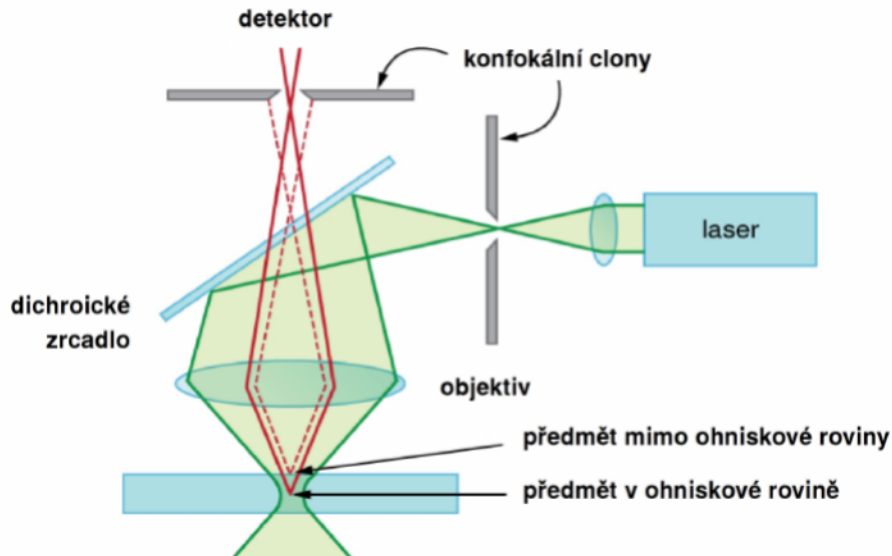


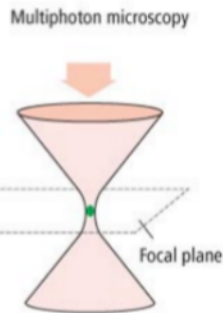
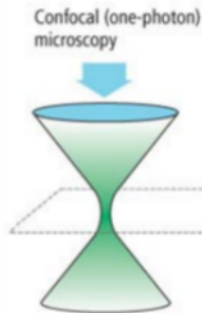
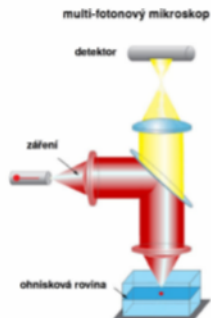
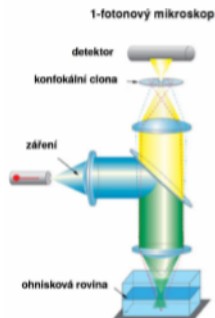
princip pouze teoretický, praktické zvětšení tak $10\times$

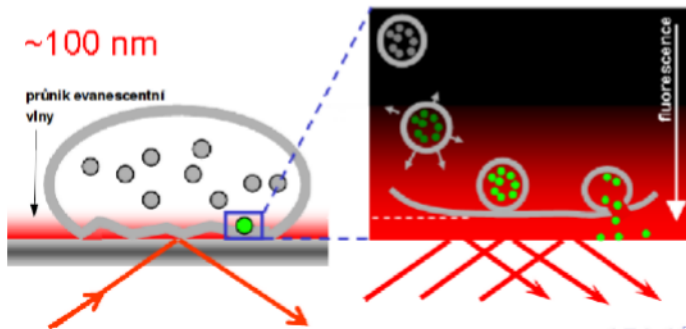
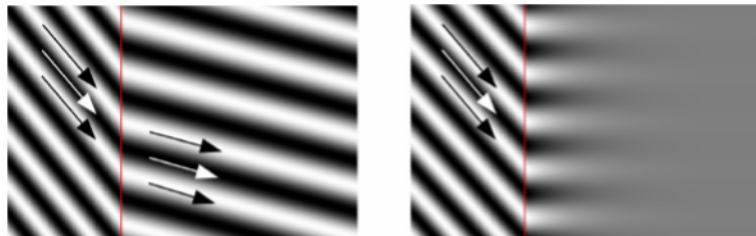


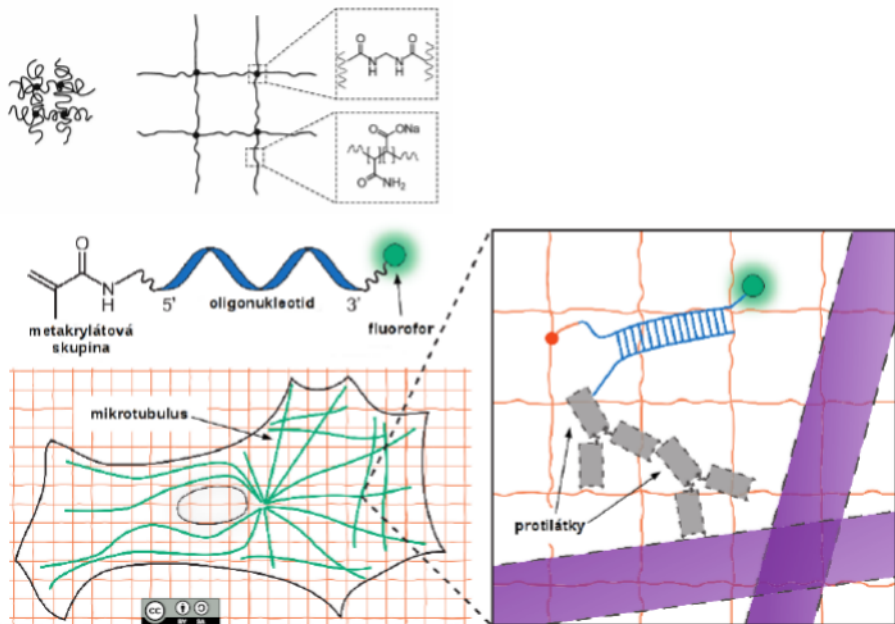




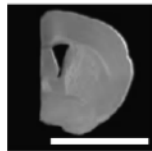
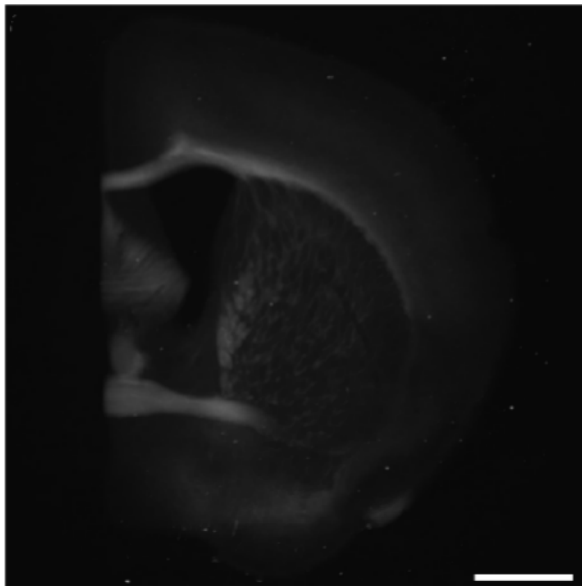


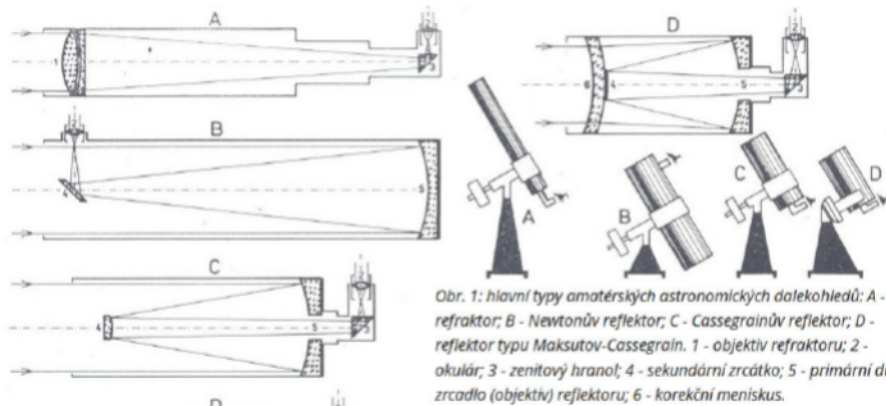


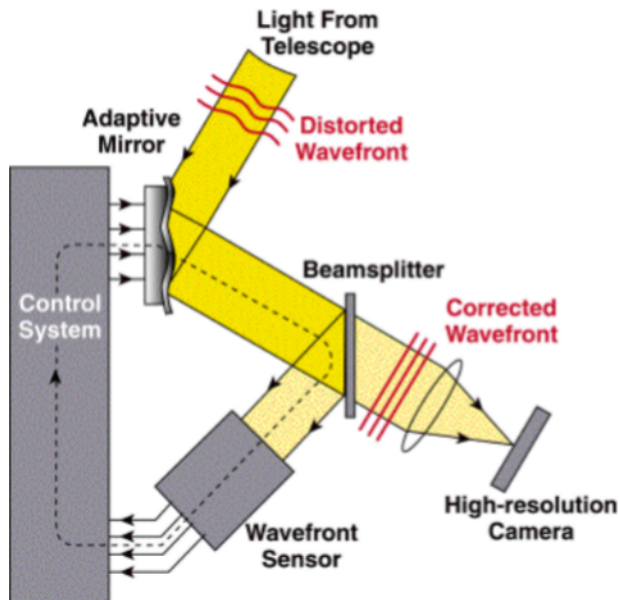




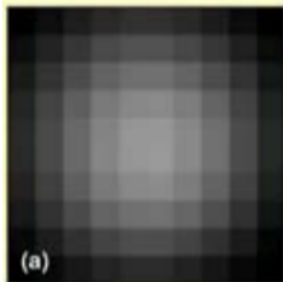
Preparát myšího mozku



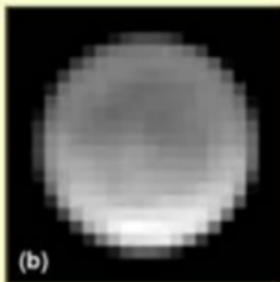




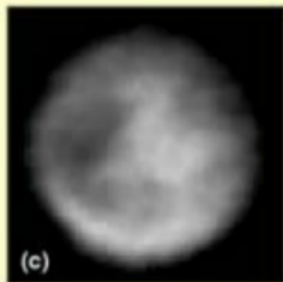
Titan (Saturn's Largest Moon)



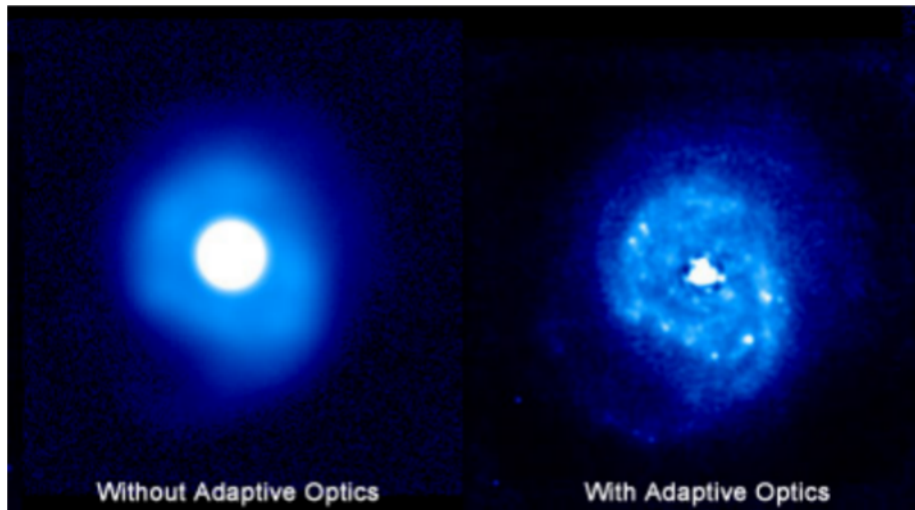
Conventional Telescope



Hubble Space Telescope



Keck Telescope with AO



galaxy NGC 7469 bez AO a s AO (Canada France Hawaii Telescope)





Autorská práva/copyright

Uveřejněné materiály jsou určeny studentům Vysoké školy chemicko-technologické v Praze jako studijní materiál. Některá textová i obrazová data v nich obsažená jsou převzata z veřejných zdrojů. V případě nedostatečných citací nebylo cílem autora/ů záměrně poškodit event. autora/y původního díla. S eventuálními výhradami se prosím obraťte na autora/y konkrétního výukového materiálu, aby bylo možné zjednat nápravu.

The published materials are intended for students of the University of Chemistry and Technology, Prague as a study material. Some text and image data contained therein are taken from public sources. In the case of insufficient quotations, the author's intention was not to intentionally infringe the possible author(s) rights to the original work. If you have any reservations, please contact the author(s) of the specific teaching material in order to remedy the situation.



Fyzika III

Pohodlně se usad'te

Přednáška co nevidět začne!

Fotonika



Klasifikace optických přiblížení (aproximací)



- **Paprsková optika** – velké překážky, pasivní interakce s látkou (zobrazování atd.)
- **Vlnová optika** – malé překážky, pasivní interakce s látkou (interference, ohyb atd.)



Klasická optika (elektromagnetická optika)

- Vychází z Maxwellových rovnic
- Nedovede vysvětlit interakci světla s hmotou na mikroskopické úrovni (luminiscence, absorpce, atd.)

Málo obsáhlé



Kvantová optika

- Nejobecnější optická teorie.

Moc složité



Fotonika

- Spojení klasické teorie a základních důsledků kvantové optiky.

Used friendly teorie pro vysvětlení většiny běžných jevů!



Fotonika

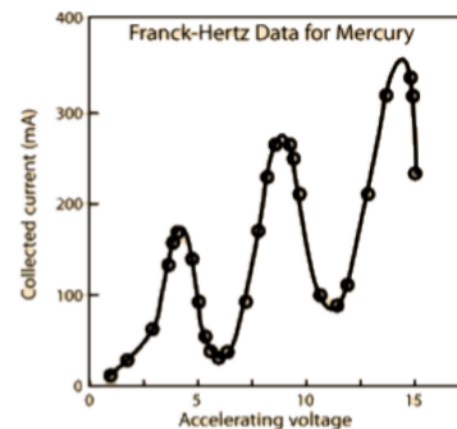
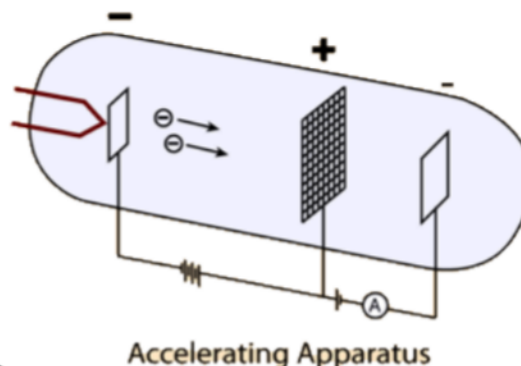
- Klasická teorie   Světlo je složeno z fotonů
 Interakce světla s hmotou probíhá jako výměna fotonů

Foton

- Kvazičástice vykazující vlnové-korpuskulární dualizmus (na hranici mezi vlnou a částicí)
- Vlnové vlastnosti: vlnová délka, interference, nese polarizaci
 - Částicové vlastnosti: interakce s jednou částicí, hybnost, spin
- Energie fotonu: $E = h\nu = \hbar\omega$, kde $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Js, $\hbar = \frac{h}{2\pi}$
- Hybnost fotonu: $\mathbf{p} = \hbar\mathbf{k}$, kde $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c}$, k je vlnový vektor
- Spin fotonu: $S_x = \pm\hbar$, celočíselný spin = boson

Franck – Hertz experiment (1914, NP 1925)

- Potvrzení Bohrova modelu atomu
- Diskrétní přenos energie látka/světlo



Poctivě ukradeno z

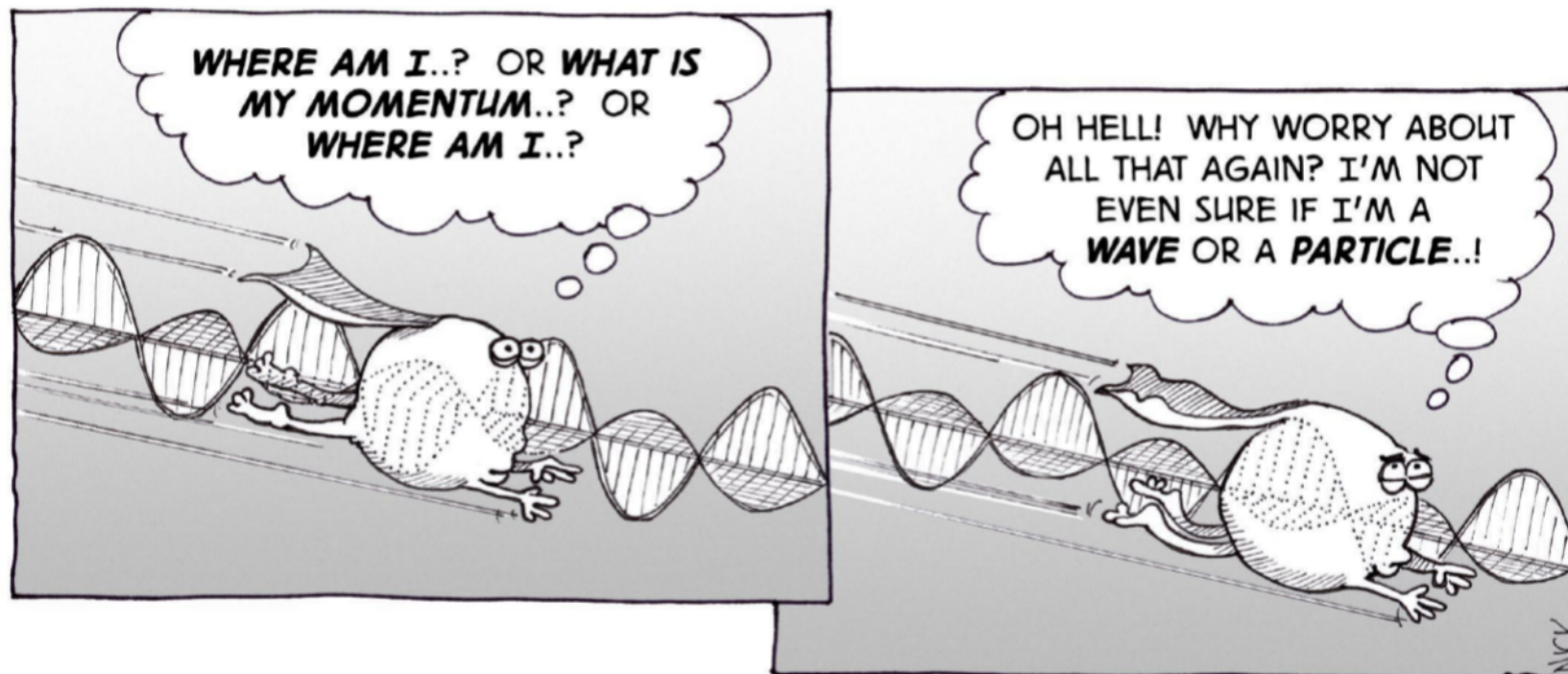
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/FrHz.html>

Heisenbergova teorie neurčitosti

- Některé parametry nemohou být současně změřeny naprosto přesně.
- Neurčitost v poloze a hybnosti: $\Delta p \Delta x \geq \frac{\hbar}{2}$ (fokusace svazku)
- Neurčitost v energii a času: $\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$ (spektrální šířka pulzů)



Těžký život fotonu



Photon self-identity issues

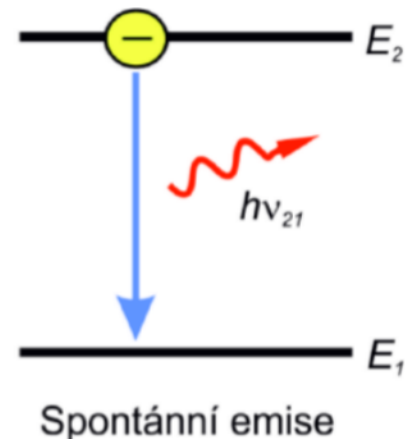
Poctivě ukradeno z <http://newsletter.oapt.ca/files/Uncertainty-Experiment.html>

Mechanismy interakce světla a látky:

- Absorpce, spontánní a stimulovaná emise světla (Einstein od 1905)

1. Spontánní emise světla (luminiscence)

- Zářivý přechod: $\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu_{21}$ (foton)
- Nezářivý přechod: $\Delta E = E_2 - E_1$ (fonony atd.)



Popis:

$$\frac{dN_2}{dt} = -AN_2$$

$$N_2(t) = N_2(0) \exp\left(-\frac{t}{\tau_r}\right)$$

- A je Einsteinův koeficient spontánní emise
- N_2 je populace hladiny o energii E_2
- τ_r je zářivá doba života excit. stav. a $A = 1/\tau_r$

Započítání nezářivých přechodů:

$$N_2(t) = N_2(0) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \text{ kde } \frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}}$$

- τ_{nr} je nezářivá doba života excit. stavů
- τ je celková doba života excit. stavů

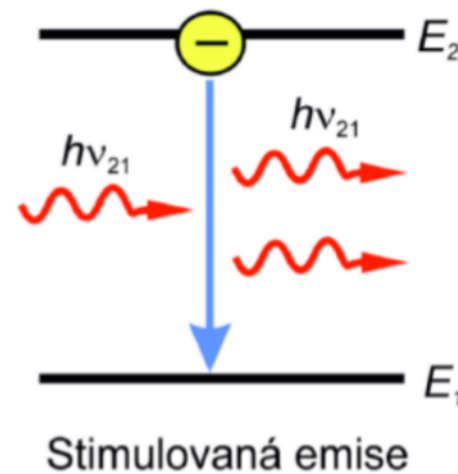
2. Stimulovaná emise světla

- Generace fotonu po interakci fotonu s excit. stavem

Popis:

$$\frac{dN_2}{dt} = -B_{21}\rho(\nu)N_2$$

- B_{21} je Einsteinův koeficient stimulované emise
- $\rho(\nu)$ je spektrální hustota energie ($\Delta E/\Delta V\Delta\nu$)



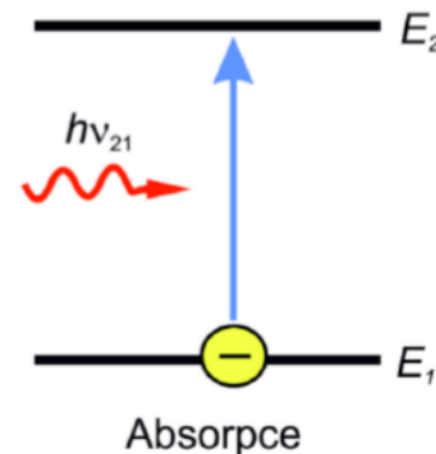
3. Absorpce

- Zvyšování populace excitovaného stavu absorpcí fotonu

Popis:

$$\frac{dN_1}{dt} = -B_{12}\rho(\nu)N_1$$

- B_{12} je Einsteinův koeficient absorpce
- N_1 je populace základního stavu



- Intenzita světla I : $I = c\rho(\nu)\Delta\nu$, kde $\Delta\nu$ je spektrální šířka svazku

- Změna intenzity světla při průchodu látkou:

$$\frac{dI}{dz} = B_{21}(N_2 - N_1)\rho(\nu)h\nu$$

$$I(z) = I(0)\exp\left[B_{21}(N_2 - N_1)\frac{h\nu}{c\Delta\nu}z\right]$$

Při odvození jsme využili toho, že $B_{21} = B_{12}$ pro látky s nedegenerovaným základním stavem a zanedbali vliv spontánní emise (všesměrová, pomalá).

- Za běžných podmínek $N_2/N_1 = 10^{-44}$
(Zanedbatelná stimulovaná emise) ➡ Lambertův-Beerův zákon
- S přidaným zdrojem energie $N_2/N_1 > 1$ ➡ LASER

- Jakýkoliv děj, při kterém je vyzařovaná energie ve formě fotonů mimo Planckova vyzařovacího zákona $I = \varepsilon \sigma T^4$
- Jde o přirozený proces v látce ➡ návrat do rovnovážného stavu. Látka tedy musí být nejprve excitována.
- Typy luminiscence dle zdroje excitace:
 1. Fotoluminiscence – excitace světlem
 2. Elektroluminiscence – excitace injekcí nosičů náboje
 3. Chemiluminiscence – excitace energií z chemické reakce
 4. Katodoluminiscence – excitace dopadem elektronu
- Účinnost konverze dodané energie na světlo = kvantový výtěžek η (Quantum yield, QY)

$$\eta = \frac{\text{Vyzářená energie}}{\text{Dodaná energie}} = \frac{\tau}{\tau_r}$$

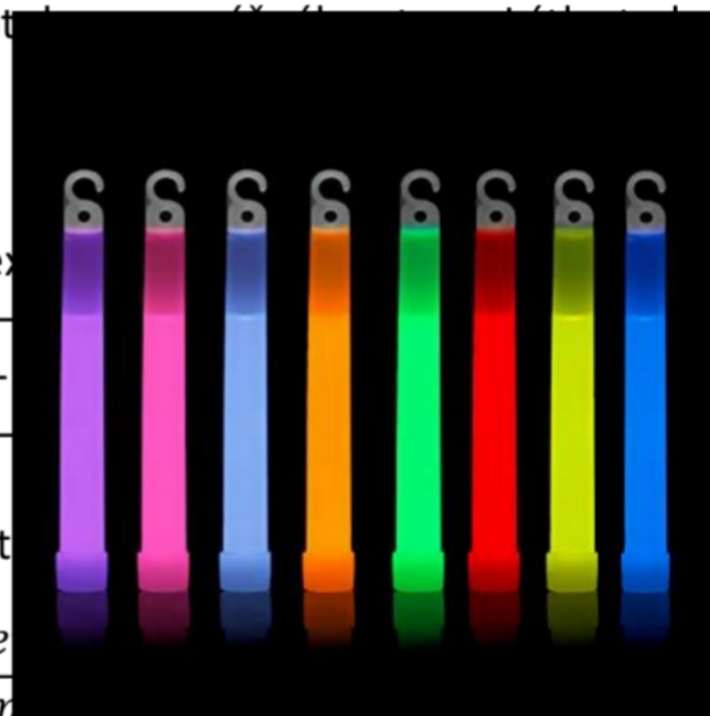
$\eta \sim 1$ Teoretická hodnota. Kvantové tečky, materiály pro LED

$\eta \sim 0,1$ Silně luminiskující látky

- Jakýkoliv děj, při kterém je vyzařovaná energie ve formě fotonů mimo Planckova vyzařovacího zákona $I = \varepsilon \sigma T^4$
- Jde o přirozený proces v látce ➡ návrat do základního stavu (relaxace) musí být nejprve excitována.
- Typy luminiscence dle zdroje excitace:
 1. Fotoluminiscence – excitace světlem
 2. Elektroluminiscence – excitace elektrickým proudem
 3. Chemiluminiscence – excitace chemickou reakcí
 4. Katodoluminiscence – excitace elektrickým polem
- Účinnost konverze dodané energie na světlo (quantum yield, QY)

$$\eta = \frac{\text{Vyzářená energie}}{\text{Dodaná energie}} = QY$$

- $\eta \sim 1$ Teoretická hodnota. Kvantové tečky, materiály pro LED
- $\eta \sim 0,1$ Silně luminiskující látky



- Jakýkoliv děj, při kterém je vyzařovaná energie ve formě fotonů mimo Planckova vyzařovacího zákona $I = \varepsilon \sigma T^4$
- Jde o přirozený proces v látce ➡ návrat do rovnovážného stavu. Látka tedy musí být nejprve excitována.
- Typy luminiscence dle zdroje excitace:
 1. Fotoluminiscence – excitace světlem
 2. Elektroluminiscence – excitace injekcí nosičů náboje
 3. Chemiluminiscence – excitace energií z chemické reakce
 4. Katodoluminiscence – excitace dopadem elektronu
- Účinnost konverze dodané energie na světlo = kvantový výtěžek η (Quantum yield, QY)

$$\eta = \frac{\text{Vyzářená energie}}{\text{Dodaná energie}} = \frac{\tau}{\tau_r}$$

$\eta \sim 1$ Teoretická hodnota. Kvantové tečky, materiály pro LED

$\eta \sim 0,1$ Silně luminiskující látky



Pravidla pro zářivé přechody

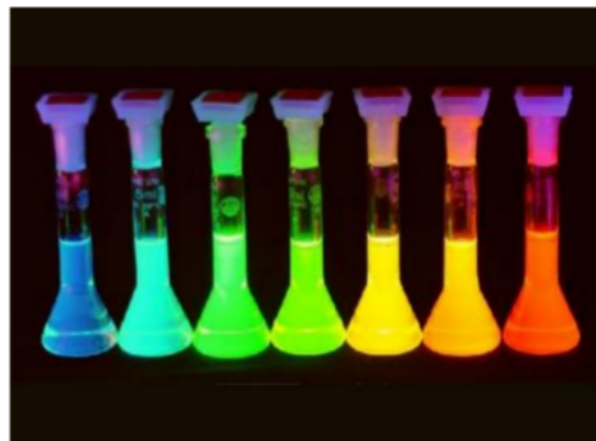
- Při přechodech excitovaných nosičů na nižší hladiny se musí být splněn zákon zachování energie, ale i dalších veličin, např. momentu hybnosti (spinu)
- Vztahy, které definují, mezí kterými hladinami může elektron rekombinovat udávají tzv. **Výběrová pravidla**. Ty dělí přechody na **povolené** a **zakázané**.

Povolené přechody (fluorescence)

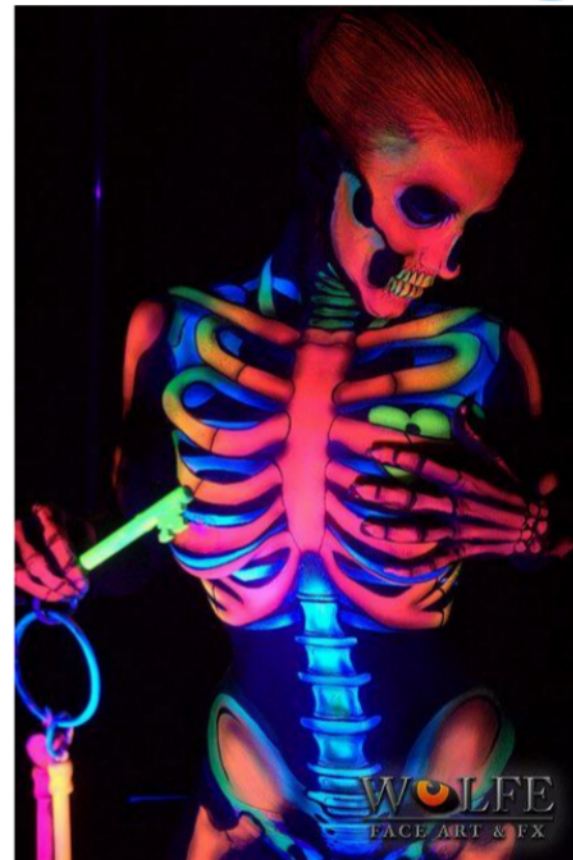
- Vše se zachovává
- $\tau \sim \text{ns}$

Zakázané přechody (fosforescence)

- Některá veličina se nezachovává
- Probíhají pomalu $\tau \sim \text{ms až min}$
- Jsou možné jen z důvodů neideálnosti systému nebo interakcí s okolím

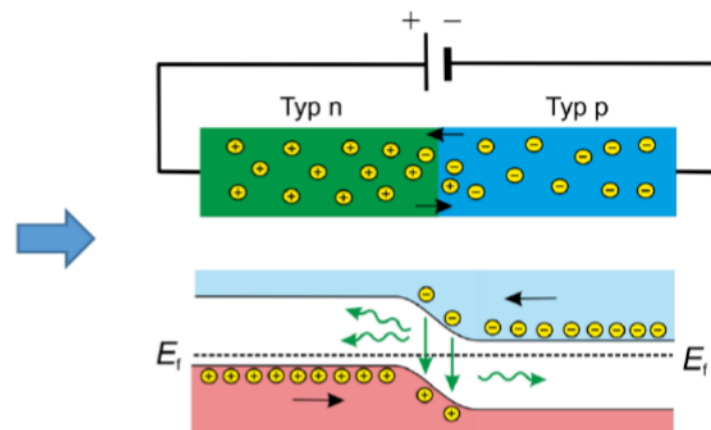


Příklady fosforescenčních látek

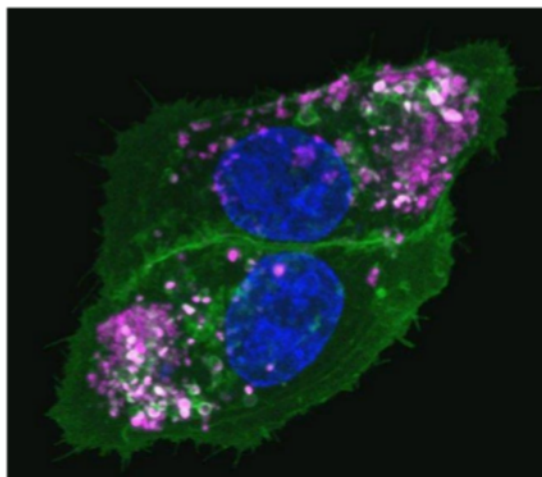


Zdroje světla

- LED diody



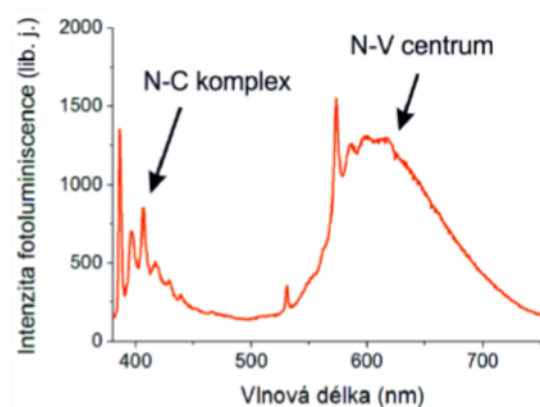
- Mikroskopické zobrazování
a medicína



Analýza elementárního a strukturního složení látek a jejich morfologie

- Spektrální průběh luminiscence je typická pro každou látku a strukturu. Využití v luminiscenční spektroskopii

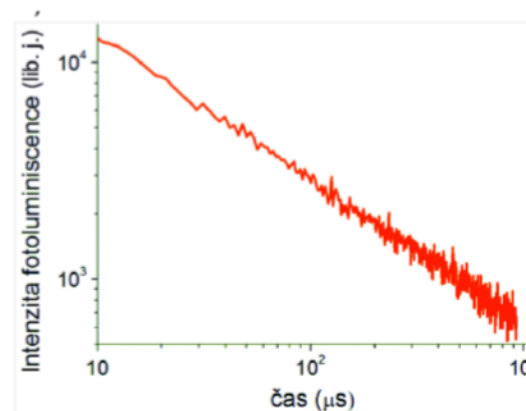
Charakteristická spektra defektů diamantu. Zbytkové koncentrace až do 10^{12} cm^{-3}



Studium rekombinačních, relaxačních a transportních vlastností nosičů náboje

- Studium časového doznívání luminiscence lze určit procesy, které vedly k doznívání luminiscence

Doznívání PL povrchových stavů nanokrystalického diamantu - tunelování nosičů



A opravdová přednáška může začít!

Děkuji za pozornost

Autorská práva/copyright

Uveřejněné materiály jsou určeny studentům Vysoké školy chemicko-technologické v Praze jako studijní materiál. Některá textová i obrazová data v nich obsažená jsou převzata z veřejných zdrojů. V případě nedostatečných citací nebylo cílem autora/ů záměrně poškodit event. autora/y původního díla. S eventuálními výhradami se prosím obraťte na autora/y konkrétního výukového materiálu, aby bylo možné zjednat nápravu.

The published materials are intended for students of the University of Chemistry and Technology, Prague as a study material. Some text and image data contained therein are taken from public sources. In the case of insufficient quotations, the author's intention was not to intentionally infringe the possible author(s) rights to the original work. If you have any reservations, please contact the author(s) of the specific teaching material in order to remedy the situation.