

Rozptyl elastický, kvazielastický a Brillouinův

Šárka Gregorová, 2013

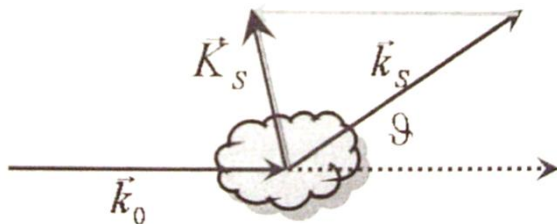
Optický rozptyl

je fyzikální jev, při němž optické záření mění směr svého šíření v důsledku interakce s látkou v jejím objemu (nikoliv na povrchu – to by byl odraz, lom...). Jedná se o dvoufotonový proces.

Průchod světla látkou – dopadající světlo rozkmitá elektrony v látce, ty vytvářejí sekundární vlny, které se v případě homogenní látky (= nehomogenity lze vůči vlnové délce světla zanedbat) interferenčně odečtou ve všech směrech kromě původního. V případě, že jsou v látce nehomogenity, tak se vlny nevyruší zcela a pozorujeme rozptyl. Můžeme tedy říci, že k rozptylu dochází na nehomogenitách v látce.

Nehomogenity jsou v každé látce za teploty vyšší než 0 K (fluktuace hustoty, poruchy krystalové mřížky apod.)

Popis rozptylu



Obrázek je ze Štěpánkova studijního textu k přednášce *Metody optické spektroskopie v BF*

k_0, k_s – vlnový vektor dopadajícího a rozptýleného fotonu; $K_s = k_s - k_0$ – rozptylový vektor; θ – rozptylový úhel (mezi k_0 a k_s); **rovina rozptylu** je daná vektory k_0 a k_s ; **horizontální polarizace** (index h) – polarizace v rovině rozptylu, **vertikální polarizace** (index v) – polarizace kolmá na rovinu rozptylu.

Elastický rozptyl

nemění se vnitřní energie rozptylujícího objektu (může se měnit „vnější“ energie – např. kinetická). Závisí na velikosti, tvaru a rozložení nehomogenit v látce. Důležitou veličinou je

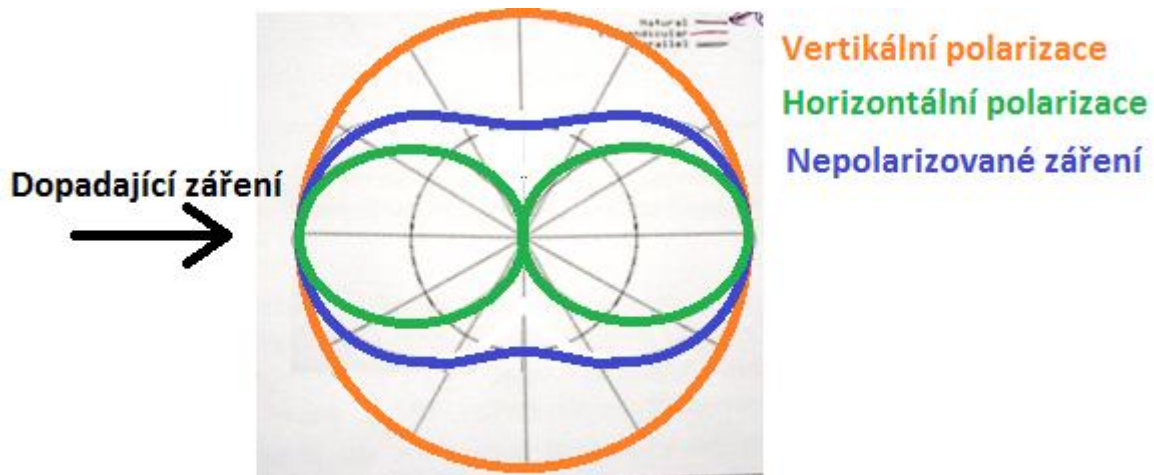
$$\alpha = \frac{2\pi r n_0}{\lambda_0},$$

kde r je střední poloměr nehomogenity, n_0 je index lomu okolí a λ_0 je vakuová vlnová dopadajícího záření. Podle α rozlišujeme **Rayleighův**, **Rayleighův-Gansův** a **Mieův** rozptyl.

Rayleighův rozptyl – $\alpha \leq 0,3$ až $0,4$.

Pro malé hustoty nehomogenit platí (I_0 je intenzita dopadajícího záření, ν jeho frekvence, η hustota nehomogenit):

$$I_w \approx I_0 \nu^4 \eta, \quad I_{hh} \approx I_0 \nu^4 \eta \cos^2 \theta, \quad I_{vh} = I_{hv} = 0$$



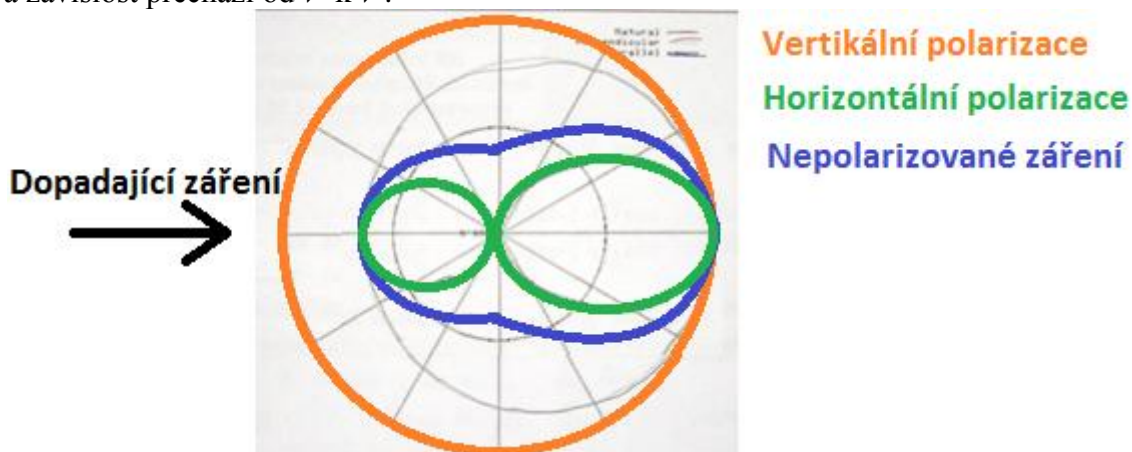
Pozn.: jistě chápete, že ty závislosti jsem podle obrázku obkreslila barvičkami pouze schématicky.

Kvůli závislosti na v^4 (a kvůli citlivosti oka na různé barvy a vyzařování slunce) je obloha modrá.

Rayleighův-Gansův (Rayleighův-Debyeův) **rozptyl** – $\alpha < 0,25/(n - n_0)$, kde n a n_0 je index lomu nehomogenity a okolí, pro biomolekuly cca 0,8. Je třeba uvážit interference sekundárních vln různých částí nehomogenity.

$$I_w \approx I_0 v^4 \eta P(\vartheta), \quad I_{hh} \approx I_0 v^4 \eta \cos^2 \vartheta P(\vartheta), \quad I_{vh} = I_{hv} = 0,$$

kde $P(\vartheta)$ je úhlový faktor závislý na tvaru nehomogenity. Pro eliptické nehomogenity je rozptyl na obrázku, pro složitější a nesymetrické nehomogenity mizí symetrie pro ϑ a $360^\circ - \vartheta$ a závislost přechází od v^4 k v^2 .

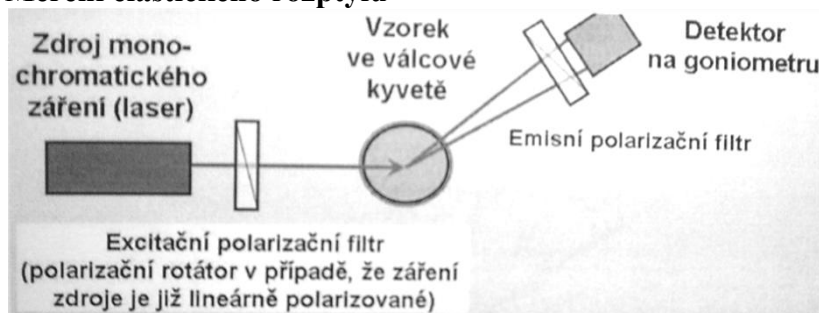


Mieův rozptyl – pro velké kulové nehomogenity. Komplikovaná úhlová závislost, mnoho maxim a minim, s preferovaným přímým a zpětným rozptylem, závislost je úměrná přibližně v^2 . Odpovídá například rozptylu v mracích, mlze (šedavé rozptýlené světlo).

Přední mlhovky v autě jsou umístěny nízko, takže je rozptylový úhel světla, které by řidiče oslňovalo, menší, než kdyby byly vysoko (kdyby byly ve výši jeho očí, byl by 180° , to je zpětný rozptyl – lokální maximum). Zadní mlhovky jsou červené a mají odfiltrované krátké vlnové délky – světlo z nich se méně rozptyluje.

Pro velké nekulové nehomogenity nebyla vytvořena teorie.

Měření elastického rozptylu



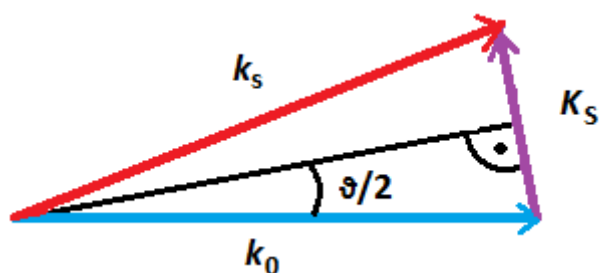
Využití elastického rozptylu – určování velikosti nehomogenit a jejich počtu (např. sedimentace, flokulace kvasinek)

Dynamický (kvazi-elastický) rozptyl

jedná se stále o elastický rozptyl, ale nehomogenity se pohybují, dochází k Dopplerově posuvu frekvence, $\Delta\nu \cong \pm u n \nu / c = \pm \vec{u} \cdot \vec{k} / 2\pi$, kde u je relativní rychlost příjemce vůči zdroji, plus když se přibližují, minus když se vzdalují. Jestliže se nehomogenita vzdaluje od zdroje, tak se přibližuje k detektoru a naopak. Nehomogenita cítí záření posunuté o $-\vec{u} \cdot \vec{k}_0 / 2\pi$ vůči frekvenci zdroje a detektor záření posunuté o $-\vec{u} \cdot \vec{k}_s / 2\pi$ vůči frekvenci jakou vydává nehomogenita.

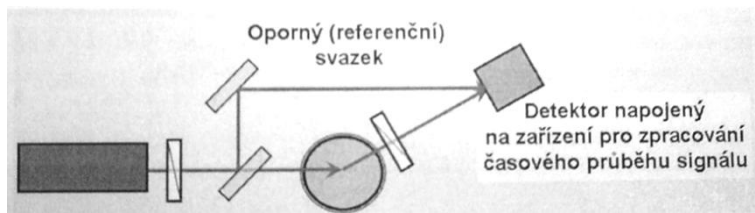
Protože je rozdíl k_0 a k_s malý, můžeme ho zanedbat. Pak je K_S základnou rovnoramenného trojúhelníku (viz obrázek) a lze ho vyjádřit jako $2k_0 \sin(\vartheta/2)$. Použijeme vztah pro vlnovou délku světla v prostředí o indexu lomu n , $\lambda = c/\nu n$. Změna frekvence je pak (ν_k je průmět rychlosti nehomogenity do směru K_S).

$$\Delta\nu = \frac{\vec{v} \cdot (\vec{k}_s - \vec{k}_0)}{2\pi} = \frac{\vec{v} \cdot (K_S)}{2\pi} = \frac{2\nu_k k_0 \sin(\vartheta/2)}{2\pi} = \frac{2\nu_k n \nu}{c} \sin(\vartheta/2)$$

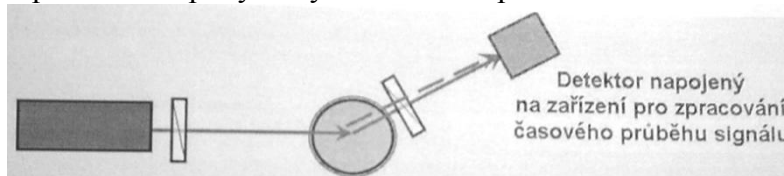


Měření dynamického rozptylu – protože jde pouze o nepatrné změny ve frekvencích, nelze měřit klasicky pomocí mřížky. Využívá se interference svazků s blízkými frekvencemi a převod do Fourierova obrazu.

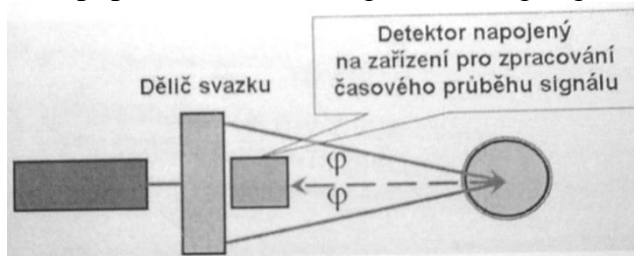
V případě **heterodynního** uspořádání interferuje rozptýlené záření se zářením odpovídajícím dopadajícimu. Po interferenci těchto dvou svazků je výsledná intenzita modulována v čase. Pomocí fourierovského obrazu dostaneme distribuci rychlostí nehomogenit.



V případě **homodynního** uspořádání nemáme referenční svazek, ale rozptýlené záření interferuje samo se sebou – to funguje jen pro neuspořádaný pohyb nehomogenit, v případě uspořádaného pohybu bychom dostali pouze nemodulovanou pozitivní interferenci.



Dvoupaprskové měření se používá naopak pro měření uspořádaného pohybu nehomogenit.



Brillouinův rozptyl

je neelastický rozptyl (mění se vnitřní energie nehomogenity), jedná se o rozptyl na akustických vlnách (**fononech**) v materiálu.

Fonony jsou kvazičástice, které popisují šířící se vibrace (kmity) krystalové mřížky. Akustické fonony jsou tři speciální fonony, jejichž energie jde k nule, jde-li jejich kvaziimpuls k nule (pozn.: moc tomu nerozumím).

Vztah mezi změnou frekvence světla a rychlostí ak. fononu – vyjdeme ze zákona zachování energie a hybnosti, $E_{AK} = hf_{AK} = \mp h(\nu_0 - \nu_S) = \mp h\Delta\nu$ a $\hbar\vec{k}_{AK} = \mp\hbar(\vec{k}_0 - \vec{k}_S) = \mp\hbar\vec{k}_S$, dále platí vztah (analogie vztahu pro světlo) $\vec{k}_{AK} = 2\pi\vec{s}_{AK}/\lambda_{AK} = 2\pi f_{AK}\vec{s}_{AK}/\nu_{AK}$. Pro $k_S \cong k_0$ vyjde dosazením $\Delta\nu = \mp 2\nu n\nu_{AK} \sin(g/2)/c$, což formálně odpovídá dynamickému rozptylu. Zde indexem AK jsou označeny vlastnosti fononu, index 0 a S znamená dopadající resp. rozptýlené světlo, ostatní veličiny viz dynamický rozptyl nebo jsou ve shodě s konvenčním značením.

Použití Brillouinova rozptylu pro charakterizaci viskoelastických vlastností látek.

Měření Brillouinova rozptylu pomocí Fabry-Perotova interferometru (je citlivější než mřížka).

Zdroj J. Štěpánek: Skripta k přednášce Metody optické spektroskopie v biofyzice, Internet