Rozptyl světla v optickém vláknu

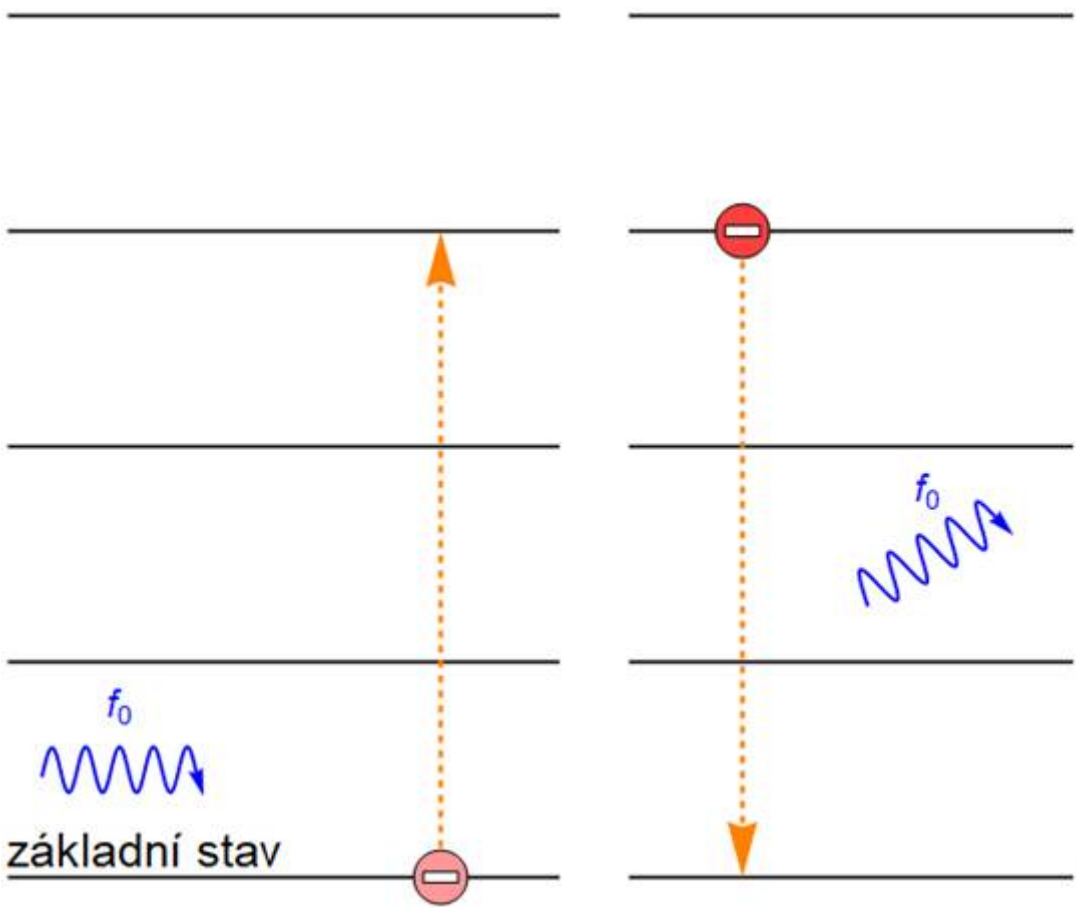
Šíří-li se světlo optickým vláknem, nastává při jeho šíření rozptyl světla. Tento rozptyl je několika druhů, které se liší příčinou vzniku, ale i způsobem ovlivnění světla šířícího se optickým vláknem.

Rayleighův rozptyl vzniká v důsledku nepravidelnosti struktury materiálu optického vlákna, mikroskopických změn hustoty materiálu a změn indexu lomu. Fotony procházející daným optickým prostředím částečně excitují elektrony v elektronových obalech atomů daného materiálu. Po následné spontánní emisi fotonů elektronem vznikají rozptýlené fotony, které mají stejnou frekvenci, jakou mají původní fotony přicházející do daného materiálu. Schematicky je tento typ rozptylu zobrazen na obr. 21.

Prolétávající foton tak občas excituje elektron v obalu atomu daného prvku. Excitovaný stav elektronu pro něj není energeticky výhodný, proto se elektron vrací zpět na základní energetickou hladinu a přitom vyzáří foton téže frekvence, jakou měl foton způsobující excitaci. Směr pohybu emitovaného fotonu není obecně stejný se směrem pohybu původního fotonu.

Energetické hladiny zobrazené na obr. 21 až obr. 23 přitom nepředstavují stacionární energetické hladiny elektronů v elektronovém obalu atomu. Jedná se energetické hladiny odpovídající vibracím elektronů.

Pokud by se jednalo o „normální“ energetické hladiny elektronů v atomech, byly by od sebe vzdáleny o různý přírůstek energie (jak odpovídá např. spektru atomu vodíku). Zobrazené hladiny představují míru vibrace elektronů v obalu atomu.



Obr. 21

Tento typ rozptylu je v materiálech častější - nastává přibližně 10milionkrát častěji, než Ramanův rozptyl. Rayleighův rozptyl je využíván v OTDR (*Optical time-domain reflectometer* -

optický reflektometr měřící optická vlákna): část světla vyslaného do optického vlákna se vlivem Rayleighova rozptylu vrací zpět ke zdroji světla.

Vzhledem k tomu, jak často Rayleighův rozptyl nastává, je velká pravděpodobnost, že se část znovu emitovaného světla bude šířit proti směru, ze kterého světlo původně přišlo.

Amplituda šířící se světelné vlny je úměrná vzdálenosti, kterou světlo v daném materiálu urazí. Ze znalosti amplitudy původního signálu a amplitudy signálu šířícího se zpět ke zdroji světla je možné proměřovat kvalitu optického vlákna. Většinou se proměřuje závislost útlumu světla na uražené vzdálenosti. Jakákoliv porucha (např. nalomení optického vlákna, nehomogenita optického vlákna, ...) se projeví v proměřovaném grafu a lze tedy přesně lokalizovat místo poruchy.

Přístrojem OTDR lze proměřovat také měrný útlum vlákna, tj. poměrné zmenšení výkonu světla (nebo obecně přenášeného signálu) po průchodu optickým vláknem jednotkové délky. Tato hodnota se udává v decibelech na metr (případně v decibelech na kilometr), je závislá na frekvenci přenášeného světla (resp. signálu) a je důležitou charakteristikou vypovídající o kvalitě optického vlákna.

K rozvoji teorie popisující tento typ rozptylu světla přispěl anglický fyzik John William Strutt, 3. baron Rayleigh (1842 - 1919). Zabýval se jím výrazně i český fyzik Georg Placzek (1905 - 1955), který se zúčastnil i amerického projektu Manhattan.

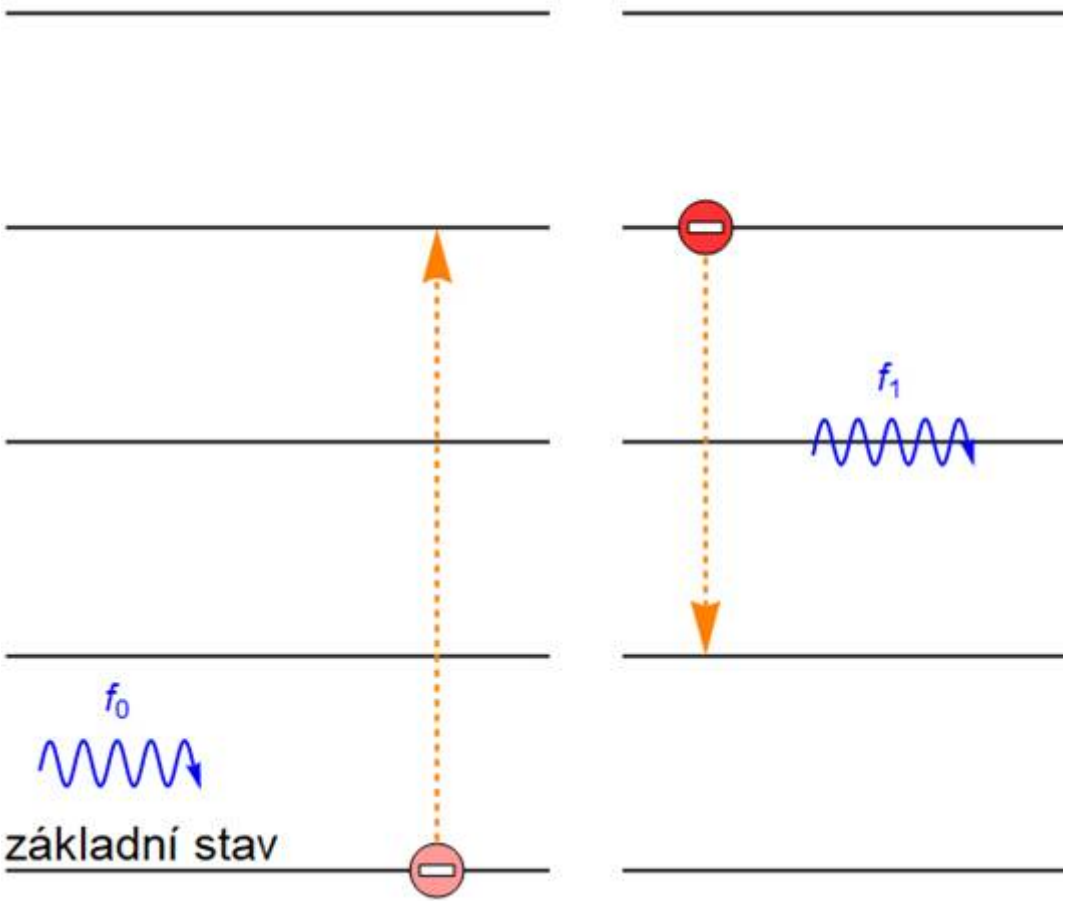
Ramanův rozptyl vzniká při interakci fotonů světla šířícího se vláknem s vibračními a rotačními energetickými stavy atomů nebo molekul.

To tedy znamená, že tento rozptyl přidává do původního světla navíc šum - kromě fotonů dané frekvence se budou vlivem Ramanova rozptylu vyskytovat ve světle šířícím se optickým vláknem i fotony dalších frekvencí. A to jak vyšších, tak nižších.

Tento jev experimentálně objevil v roce 1928 indický fyzik Chandrasekhara Venkata Raman (1888 - 1970), když předtím zůstala téměř bez povšimnutí teoretická práce rakouského fyzika Adolfa Smekala (1895 - 1959) z roku 1923, v níž tento jev předpověděl.

Šíří-li se optickým vláknem světlo, jehož fotony mají frekvenci f_0, přísluší jim energie $E_0 = h \cdot f_0$ (kde *h* je Planckova konstanta). Energie rozptýleného světla, které vzniká v důsledku Ramanova rozptylu, pak může být menší nebo větší ve srovnání s energií původního fotonu.

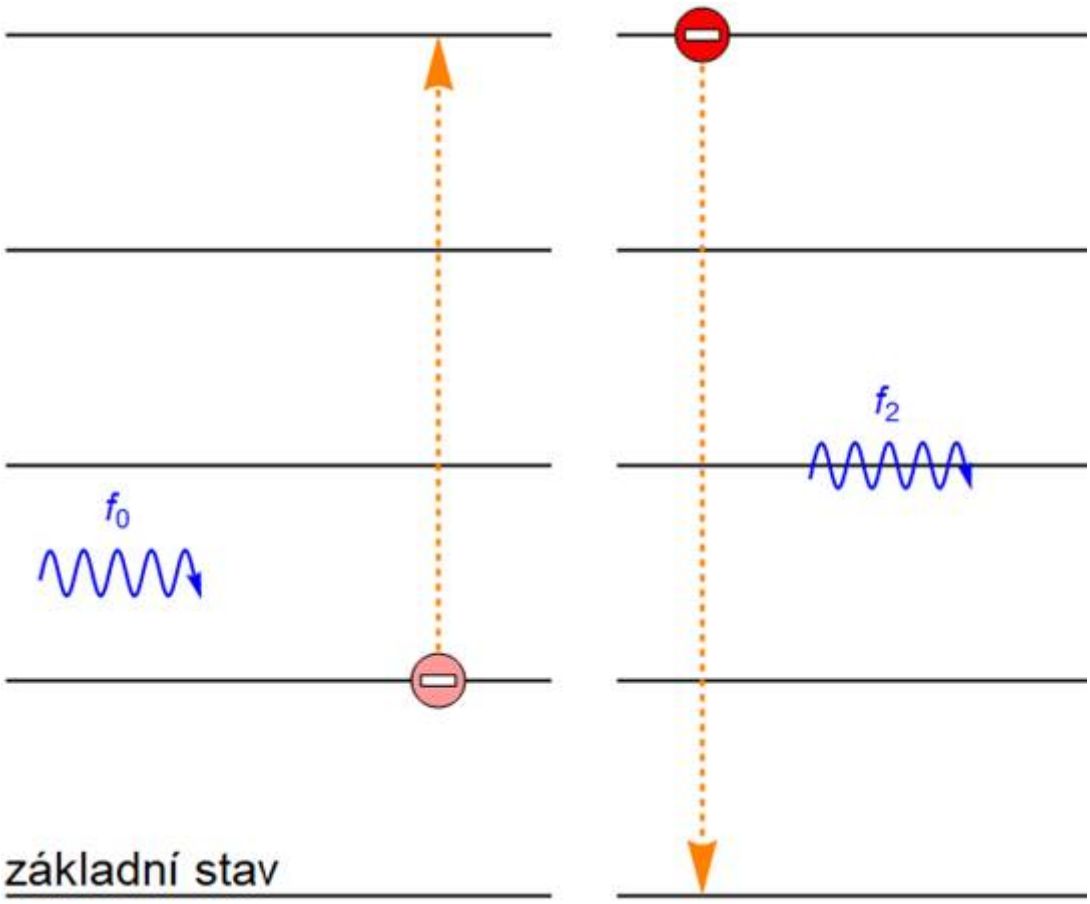
Je-li energie nově emitovaného fotonu $E_1 = E_0 - \Delta E = h \cdot f_1$, znamená to, že foton šířící se optickým vláknem byl absorbován elektronem v elektronovém obalu materiálu vlákna a tento excitovaný elektron poté přešel spontánní emisí na vyšší energetickou hladinu, než ze které byl excitován (viz obr. 22). Emitovaný foton má tak frekvenci nižší, než byla frekvence původního fotonu. Rozdíl energií ΔE je přitom absorbován atomem (tj. materiálem optického vlákna). Tomuto typu rozptylu se někdy také říká **Stokesův rozptyl** na počest irského fyzika a matematika George Stokese (1819 - 1903), který v roce 1852 ukázal, že světlo emitované při fluorescenci má delší vlnovou délku (tj. menší frekvenci) než světlo tuto emisi vyvolávající.



Obr. 22

Je-li energie nově emitovaného fotonu $E_2 = E_0 + \Delta E = h \cdot f_2$, znamená to, že foton šířící se optickým vláknem byl absorbován elektronem a tento excitovaný elektron následně přešel přešel na nižší energetickou hladinu, než ze které byl excitován (viz obr. 23). Emitovaný foton má tak frekvenci vyšší, než byla frekvence původního fotonu. Rozdíl energií ΔE je přitom dán vibracemi elektronů v elektronovém obalu atomů materiálu optického vlákna. Elektron se při tomto typu rozptylu nemusí nacházet na základní energetické hladině. Tento typ rozptylu se také nazývá **anti-Stokesův rozptyl**.

Ramanův rozptyl je podobný jako fluorescence, ale základní rozdíl je v tom, že světlo emitované při fluorescenci má pro daný materiál stálou frekvenci, zatímco frekvence světla emitovaného při Ramanově rozptylu má v daném materiálu konstantní odstup od frekvence světla přivedeného do optického vlákna.



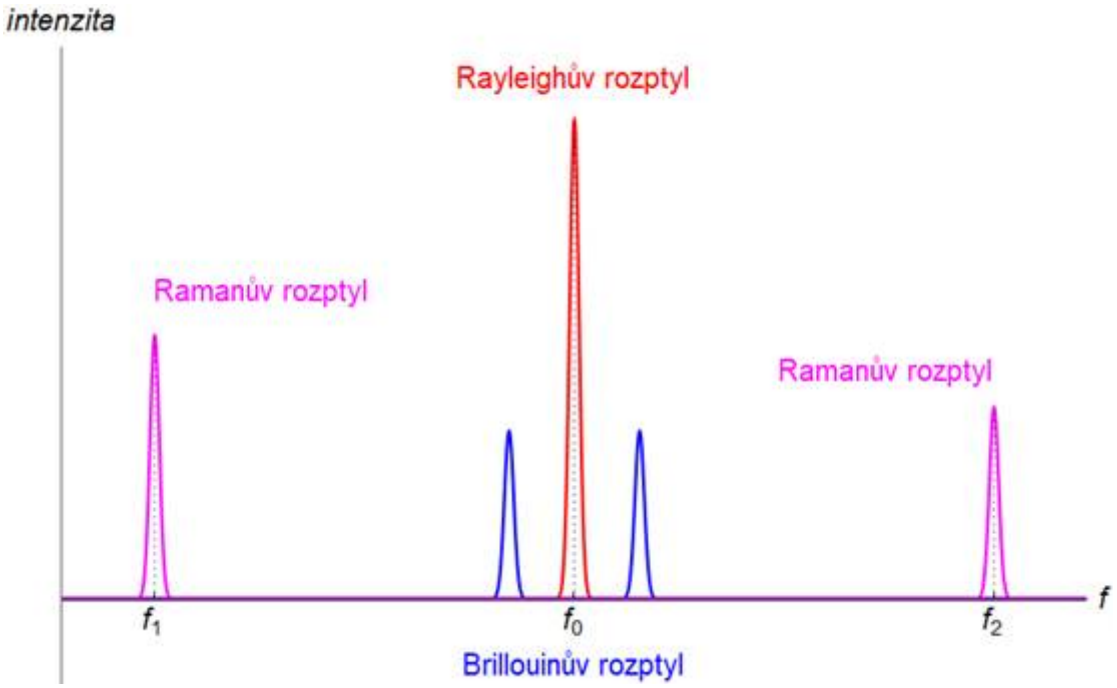
Obr. 23

Rozdíl energií ΔE absorbovaného a emitovaného fotonu přitom odpovídá rozdílům energetických hladin rezonančních stavů a je nezávislý na energii původního fotonu.

Rozdíl energií (tj. to, oč klesne nebo vzroste energie emitovaného fotonu ve srovnání s původním fotem) tedy nezávisí na energii původního fotonu. Tento rozdíl závisí pouze na míře vibrací elektronů v atomech materiálu optického vlákna.

Pokud budeme proměřovat spektrum Ramanova rozptylu, objeví se v něm k původní spektrální čáře odpovídající frekvenci f_0 původního fotonu další dvě čáry, které jsou symetricky rozložené kolem čáry dopadajícího fotonu (viz obr. 24). V praxi je ovšem dobře detekovatelná pouze jedna, protože není možné odfiltrovat Rayleighův rozptyl, který je řádově 10miliokrát častější, a tedy i jeho projev je výraznější.

Symetričnost rozložení spektrálních čar odpovídajících oběma typům Ramanova rozptylu kolem spektrální čáry původního fotonu vyplývá ze stejně vzájemně vzdálených vibračních energetických hladin. Rozdíl energií těchto hladin je přitom úměrný poklesu (resp. nárůstu) frekvence emitovaného fotonu. Intenzity obou spektrálních čar rozptýlených fotonů jsou obecně různé a jsou závislé na teplotě materiálu optického vlákna. Ve stavu termodynamické rovnováhy jsou nižší energetické hladiny obsazeny větším počtem elektronů, a proto převažují přechody elektronů právě z nižších energetických hladin na vyšší (tedy Stokesův rozptyl). Poměr intenzit Stokesova rozptylu a anti-Stokesova rozptylu závisí tedy na teplotě optického vlákna. Tento poměr je přitom i měřitelný.



Obr. 24

V optických vláknech může nastat při šíření světla ještě jeden typ rozptylu - tzv. **Brillouinův rozptyl** pojmenovaný podle francouzského fyzika Léona Brillouina (1889 - 1969). Tento typ rozptylu vzniká (stejně jako výše zmíněné typy rozptylů) interakcí světla s materiálem vlákna. V tomto případě je podstatná změna indexu lomu materiálu vlivem deformace optického vlákna (tah, tlak, krut, ...), akustickými vibracemi, posuvným proudem v dielektriku, ...

Výsledkem této interakce mezi fotony a deformovanou částí materiálu vlákna je změna frekvence části fotonů v určitém směru.

Pokud tedy budeme optické vlákno, kterým se šíří světlo, různě ohýbat, kroutit, ... nastane výše popsaný rozptyl právě v důsledku deformace. Vlivem deformace se změní síly působící mezi jednotlivými atomy daného materiálu, což se projeví ve změně energetických hladin. A to způsobí rozptyl fotonů (změní se podmínky pro emisi světla a následnou absorpci světla).

Šíří-li se intenzivní svazek světla (např. z laseru) optickým vláknem, mohou změny vnějšího elektrického pole, ve kterém se bude optické vlákno nacházet, indukovat v materiálu vlákna akustické vibrace. Ty se projeví jako tzv. elektrostrikce (tj. změna objemu vlivem vnějšího elektrického pole) nebo jako radiační tlak. Ve světelném svazku se tak může objevit Brillouinův rozptyl; fotony rozptýleného světla mají přitom většinou opačný směr pohybu ve srovnání se směrem pohybu původního světelného svazku.

Brillouinův rozptyl se využívá k měření mechanických deformací a teploty optického vlákna, ale také k proměřování vlnových délek (resp. frekvencí) různých typů oscilací v daném materiálu (kterým světlo prochází).

Rayleighův rozptyl se od Brillouinova rozptylu liší tím, že se týká pouze náhodných a nekoherentních termických fluktuací, zatímco Brillouinův rozptyl je koherentní a je způsoben periodickými fluktuacemi.

Ramanův rozptyl má rozsah frekvencí výrazně odlišnější než Brillouinův rozptyl. Navíc se na něm podílejí pouze nejbližší atomy nacházející se v sousedství atomu, který byl původním fotonem excitován. U Brillouinova rozptylu se na výsledném spektru podílejí atomy z výrazně větší oblasti. V neposlední řadě se také liší informace o materiálu, které lze na základě obou typů rozptylu získat. Na základě Ramanova rozptylu lze určovat chemické složení a molekulovou strukturu pomocí přístrojů založených na principu spektrometrů. Proměřením Brillouinova rozptylu lze proměřit materiál jako celek (jeho elastické vlastnosti, mechanické vlastnosti, ...) a to pomocí přístrojů

založených na principu interferometru.

© Encyklopedie Fyziky (http://fyzika.jreichl.com); Jaroslav Reichl, Martin Všetička
Licence http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/ zakazuje úpravy a komerční distribuci.