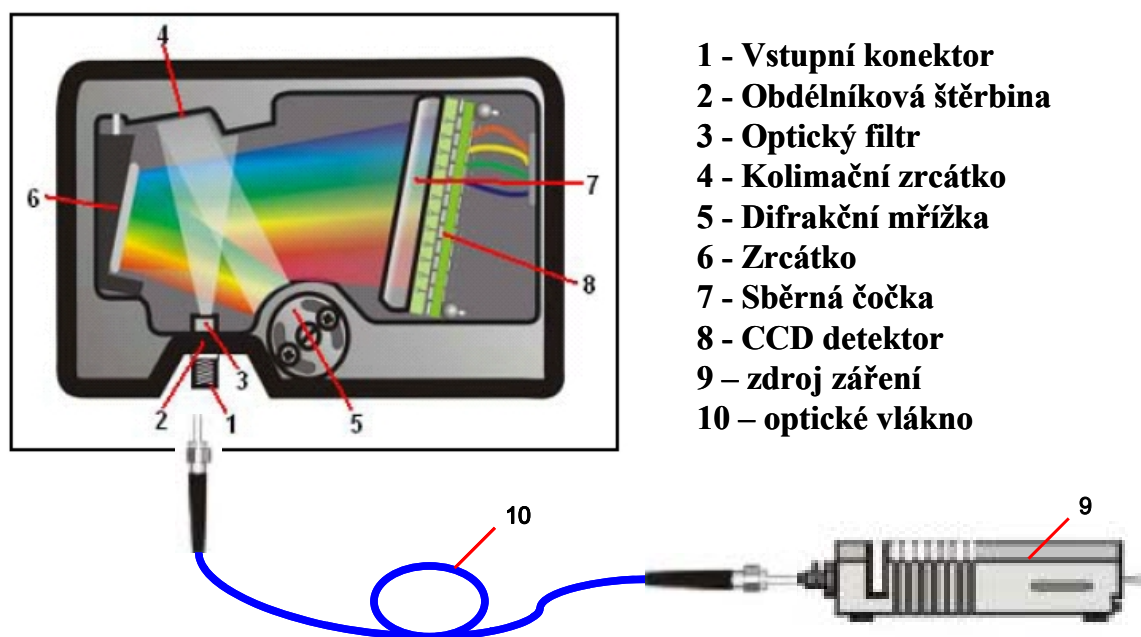


## Měření optických vlastností materiálů

- Úkoly :
1. *Určete spektrální propustnost vybraných materiálů (různých typů stavebních skel, fólií a optických filtrů) pomocí spektrofotometru*
  2. *Určete spektrální odrazivost vybraných optických povrchů pomocí spektrofotometru*
  3. *Proveďte spektrální měření barevnosti povrchů pomocí spektrofotometru*

### 1. Určení spektrální propustnosti materiálů

Měření spektrální propustnosti materiálů bude prováděno pomocí vláknových sond spektrofotometru USB2000 od firmy Ocean Optics (**obr.1**)

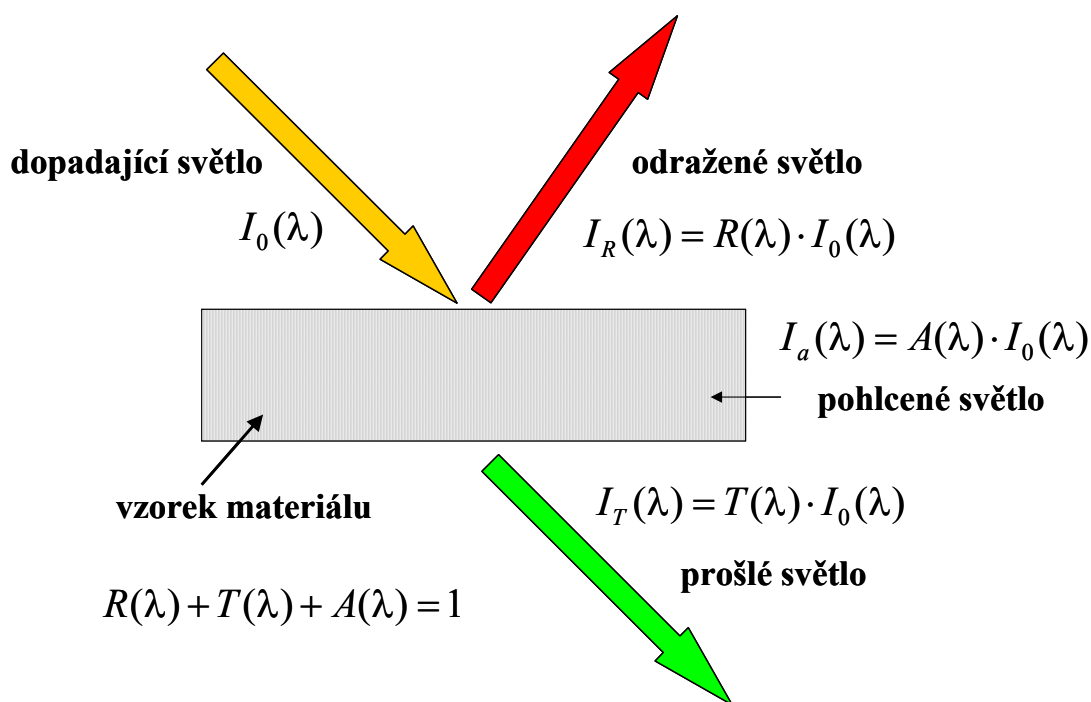


**Obr.1:** Schéma spektrofotometru USB2000

a halogenového světelného zdroje LS-1, který vyzařuje v oblasti vlnových délek 360 nm – 2000 nm.

Spektrofotometr umožňuje pomocí rozkladu vstupujícího světla na difrakční mřížce automaticky zaznamenat intenzitu světla dopadajícího na CCD detektor a určit závislost intenzity záření  $I(\lambda)$  na vlnové délce  $\lambda$ .

Spektrální propustnost  $T(\lambda)$  je definována jako poměr intenzity  $I_T(\lambda)$  záření prošlé vzorkem k intenzitě záření  $I_0(\lambda)$ , které na vzorek dopadá (viz. **obr.2**).

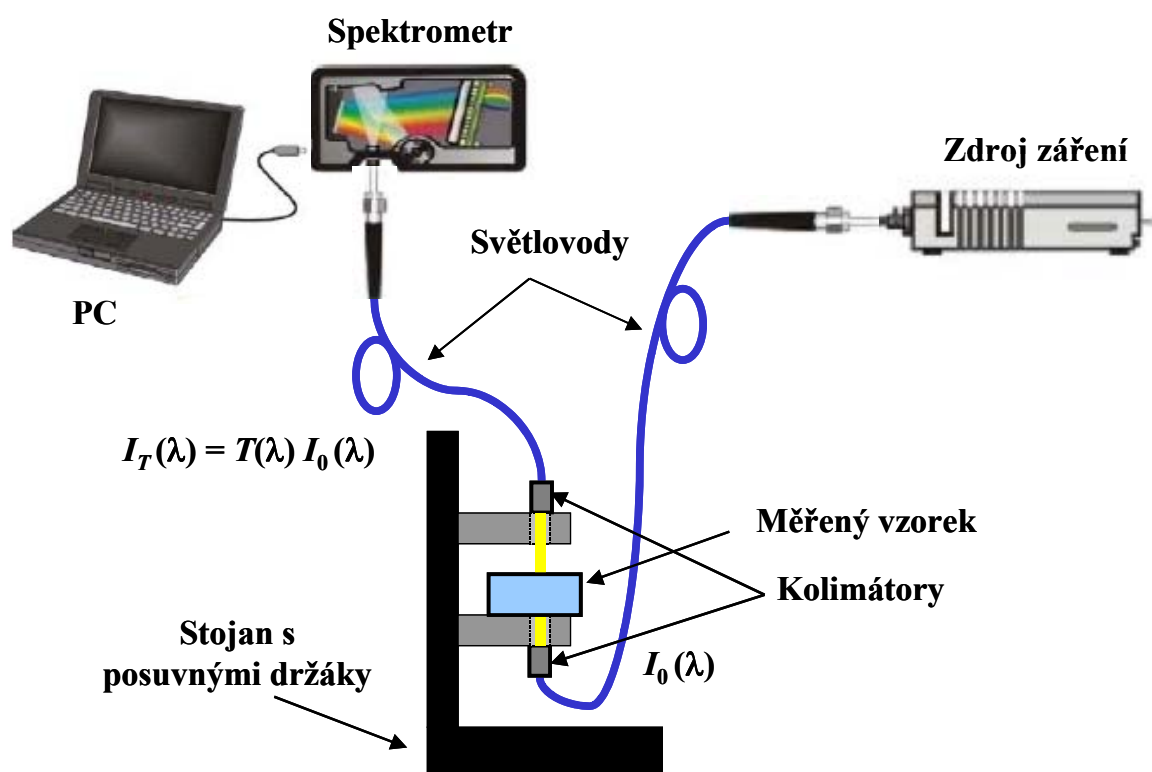


**Obr.2:** Dopad světla na vzorek materiálu

Schéma měření spektrální propustnosti pomocí spektrofotometru USB2000 je znázorněno na **obr.3**. Měřený vzorek bude upevněn na stojánku pro měření propustnosti. Měření se provádí pomocí ovládacího software spektrofotometru **OOIBase32**, ke kterému je přiložen podrobný návod.

Měření spektrální propustnosti  $T(\lambda)$  proved'te pro následující vzorky opticky propustných materiálů:

- optické filtry 1-6, kombinace filtrů 3+4+5
- plexisklo 1 a ostatní druhy skel 2-4
- okenní skla 1-3 (dvojsklo, dvojsklo s fólií, trojsklo s fólií)
- CD



**Obr.3:** Schéma měření spektrální propustnosti pomocí spektrofotometru USB2000

Při provádění měření propustnosti je nutné postupovat následovně:

- 1) Optická vlákna upevníme podle obrázku přes kolimátory (jemně zašroubujte do horního a spodního držáku vlákna na stojanu). S vlákny zacházíme velmi opatrně a zachováváme velké poloměry křivosti při jejich ohýbání.
- 2) V řídicím programu **OOIBase32** si nastavíme měření a zobrazování spektrální intenzity (menu *Spectrum – Scope Mode*). Zapneme zdroj vypínačem na jeho zadní straně. Signál ze spektrometru při zapnutém zdroji světla by měl být přibližně mezi 3200-3500. Pokud tomu tak není, musíme tuto hodnotu nastavit buď posuvem horního držáku s vlákem (blíže nebo dále od vzorku) popř. nastavením jiné integrační doby CCD snímače (*Integration Time*).
- 3) Provedeme měření referenčního spektra  $R_S(\lambda)$  (tzv. Reference Spectrum) pro zapnutý zdroj záření bez vloženého vzorku a spektrum uložíme pomocí příkazu menu *Spectrum – Store Reference*.

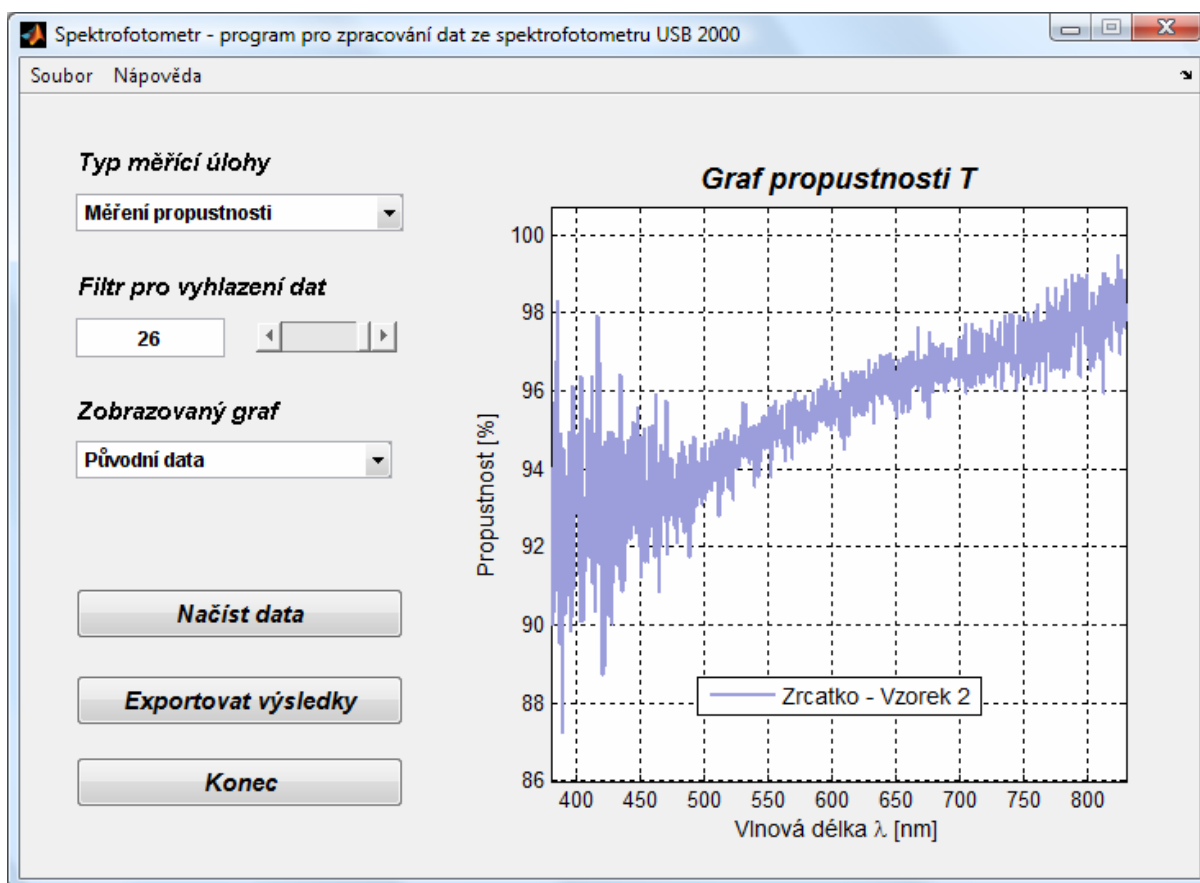
- 4) Dále zastíníme vlákno, které vede světlo ke spektrometru, nějakým nepropustným stínítkem a provedeme měření spektra  $D_S(\lambda)$  (tzv. Dark Spectrum) pro vypnutý resp. zastíněný zdroj (toto spektrum odpovídá šumu při detekci záření a elektronickém zpracování signálu). Spektrum uložíme pomocí příkazu menu *Spectrum – Store Dark*.
- 5) Po naměření a uložení předchozích spekter již lze přistoupit k měření spektrální propustnosti  $T(\lambda)$  vybraných vzorků opticky propustných materiálů (různých typů skel, optických filtrů, apod.). V řídicím programu **OOIBase32** si nastavíme měření a zobrazování spektrální propustnosti (menu *Spectrum – Transmission Mode*). Pro každý vzorek se naměří spektrum  $S_S(\lambda)$  a výsledky měření se poté uloží do souboru na disk počítače. Při zpracování prováděného měření na počítači si každá skupina **vytvoří nový adresář ve složce C:\Dokumenty\** a do tohoto adresáře bude nadále ukládat veškerá měřená data. Spektrum světla prošlého vzorkem uložíme pomocí příkazu *File – Save – Processed* do vytvořeného adresáře (název si zvolte podle typu a čísla měřeného prvku – např. „filtr2“ nebo „okno1“, apod.).

Všechna spektra musí být naměřena ve stejné konfiguraci (během měření nelze měnit např. integrační dobu snímače, vzdálenost vláken, apod.) . Spektrální propustnost  $T(\lambda)$  vzorku se vypočte podle vztahu

$$T(\lambda) = \frac{S_S(\lambda) - D_S(\lambda)}{R_S(\lambda) - D_S(\lambda)} \cdot 100 \% .$$

Naměřená spektrální data jsou uložena ve speciálním textovém datovém souboru, který si můžeme prohlédnout v libovolném textovém editoru (např. Notepad ve Windows).

Pro zpracování dat použijte program **Spektrofotometr** - ikona programu je umístěna na pracovní ploše počítače. Po spuštění tohoto programu je nutno načíst data pomocí standardního okna prostředí MS Windows. Program umožňuje načtení několika datových souborů spektrofotometru a provede jejich grafické zpracování. Načtené soubory jsou zobrazeny do jednoho grafu. Program vykreslí spektrální závislost naměřené veličiny (např. propustnosti – viz. **obr.4**) Vykreslete vždy grafy pro celou skupinu porovnávaných materiálů (např. optických filtrů, okenních skel, apod.). Grafické výstupy lze uložit ve formátu JPEG a Matlab Figure File. Jako závěr by mělo být provedeno stručné srovnání měřených prvků (např. okenních skel, optických filtrů, apod.).



**Obr.4:** Program Spektrofotometr - graf spektrální propustnosti vzorku

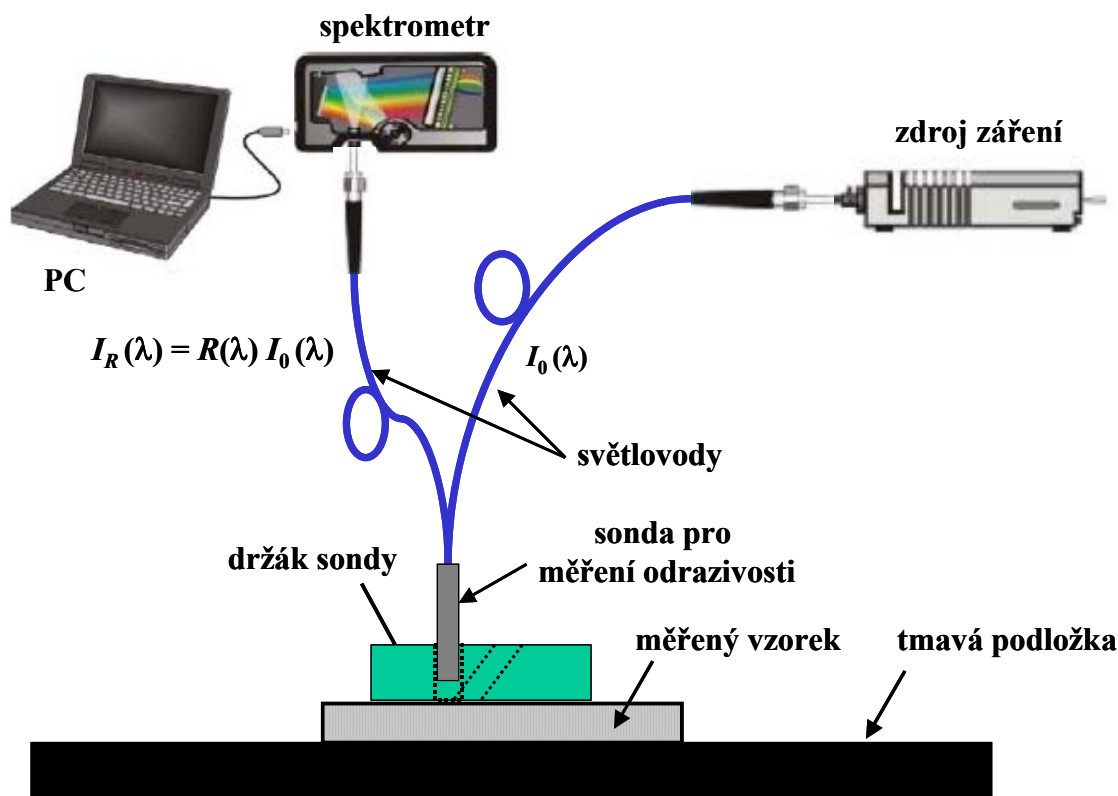
## 2. Určení spektrální odrazivosti materiálů

Měření spektrální odrazivosti materiálů bude prováděno pomocí spektrofotometru USB2000 od firmy Ocean Optics (**obr.1**), halogenového světelného zdroje LS-1, který vyzařuje v oblasti vlnových délek 360 nm – 2000 nm a speciální vláknové sondy pro měření odrazivosti. Principiální schéma měření spektrální propustnosti pomocí spektrofotometru USB2000 je ukázán na **obr.5**.

Spektrální odrazivost  $R(\lambda)$  je definována jako poměr intenzity  $I_R(\lambda)$  záření odražené od povrchu vzorku k intenzitě záření  $I_0(\lambda)$ , které na vzorek dopadá (**obr.2**). Měřený vzorek bude buď upevněn na stojánku nebo se použije speciální držák optického vlákna, který se položí na povrch vyšetřovaného vzorku materiálu (**obr.5**). Měření se provádí pomocí ovládacího software spektrofotometru **OOIBase32**, ke kterému je přiložen podrobný návod.

Měření spektrální odrazivosti  $R(\lambda)$  proved'ete pro následující vzorky povrchů:

- a) zrcátka 1-3
- b) plexisklo 1 a obyčejné sklo 6
- c) okenní skla 1-3 (dvojsklo, dvojsklo s fólií, trojsklo s fólií)
- d) povrch CD



**Obr.5:** Schéma měření spektrální odrazivosti pomocí spektrofotometru USB2000

Při provádění měření spektrální odrazivosti je nutné postupovat následovně:

- 1) Optické vlákno se sondou pro měření odrazivosti upevníme podle obrázku ke zdroji světla a spektrometru (jemně zašroubujte do příslušných závitů). S vlákny zacházíme velmi opatrně a zachováváme velké poloměry křivosti při jejich ohýbání.
- 2) Vlastní sondu pro měření odrazivosti upevníme kolmo do speciálního držáku (**obr.5**) tak, aby konec sondy byl přibližně 5-10 mm před koncem držáku, který při měření přikládáme k vyšetřovanému vzorku.

- 3) V řídicím programu **OOIBase32** si nastavíme měření a zobrazování spektrální intenzity (menu *Spectrum – Scope Mode*).
  - 4) Zapneme zdroj vypínačem na jeho zadní straně a provedeme měření referenčního spektra  $R_S(\lambda)$  (tzv. Reference Spectrum) pro referenční odraznou plochu (referenční zrcátko). Signál ze spektrometru při by měl být přibližně mezi 3200-3500. Pokud tomu tak není, musíme tuto hodnotu změnit nastavením jiné integrační doby CCD snímače (*Integration Time*) popř. nastavením jiné vzdálenosti sondy od povrchu vzorku. Referenční spektrum uložíme pomocí příkazu menu *Spectrum – Store Reference*.
  - 5) Dále zastíníme světelný svazek, který vede světlo do sondy, např. nějakým nepropustným stínítkem a provedeme měření spektra  $D_S(\lambda)$  (tzv. Dark Spectrum) pro vypnutý resp. zastíněný zdroj. Spektrum uložíme pomocí příkazu menu *Spectrum – Store Dark*.
  - 6) Po naměření a uložení předchozích spekter již lze přistoupit k měření spektrální odrazivosti  $R(\lambda)$  vybraných vzorků povrchů materiálů (různých typů skel, zrcátek, optických filtrů, apod.). V řídicím programu **OOIBase32** si nastavíme měření a zobrazování spektrální propustnosti (menu *Spectrum – Transmission Mode*). Pro každý vzorek se naměří spektrum  $S_S(\lambda)$  a výsledky měření se poté uloží do souboru na disk počítače. Při zpracování prováděného měření na počítači si každá skupina **vytvoří nový adresář ve složce C:\Dokumenty\** a do tohoto adresáře bude nadále ukládat veškerá měřená data. Spektrum světla prošlého vzorkem uložíme pomocí příkazu *File – Save – Processed* do vytvořeného adresáře (název si zvolte podle typu a čísla měřeného prvku – např. „zrcatko2“ nebo „okno1“, apod.). Všechna spektra musí být naměřena ve stejné konfiguraci (během měření nelze měnit např. integrační dobu snímače, vzdálenost sondy od měřeného povrchu, apod.)
- .
- 7) Spektrální odrazivost  $R(\lambda)$  vzorku se vypočte podle vztahu

$$R(\lambda) = \frac{S_S(\lambda) - D_S(\lambda)}{R_S(\lambda) - D_S(\lambda)} \cdot 100 \% .$$

Naměřená spektrální data jsou uložena ve speciálním textovém datovém souboru, který si můžeme prohlédnout v libovolném textovém editoru (např. Notepad ve Windows).

Pro zpracování dat použijte program **Spektrofotometr**. Vypočtené hodnoty spektrální odrazivosti se vztahují k použitému normálu pro měření odrazivosti (referenční zrcátko s odrazivostí 75%) a jsou následně přepočteny v programu.

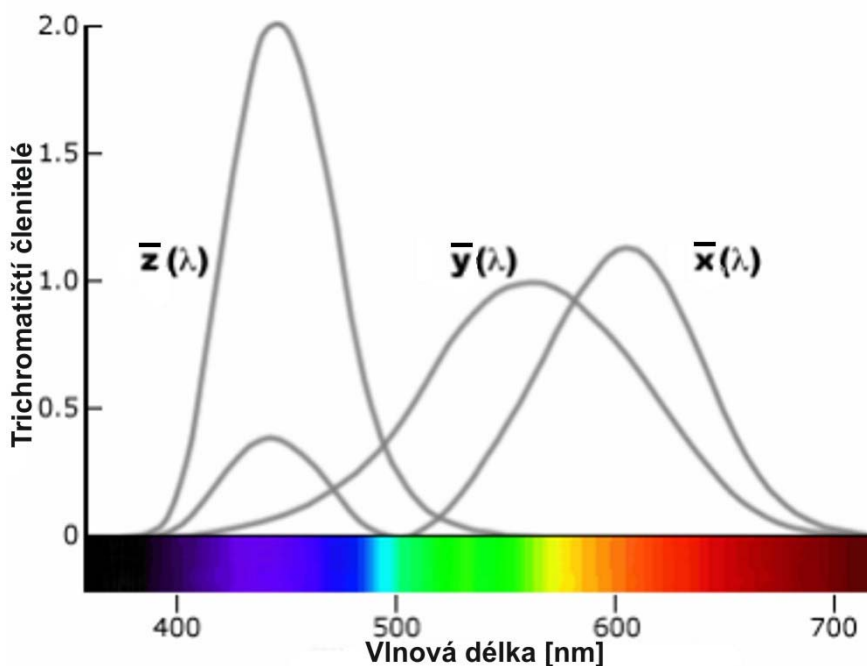
Program vykreslí spektrální závislost naměřené veličiny (např. odrazivosti). Grafy je nutno přiložit do protokolu o měření. Jako závěr by mělo být provedeno stručné srovnání odrazivosti měřených povrchů.

### 3. Spektrální měření barevnosti povrchů pomocí spektrofotometru

Dopadá-li světlo určitého spektrálního složení do oka, vzniká v mozku barevný vjem, barva. Světlo je charakterizováno *světelným tokem*, který je mírou účinnosti světla při vyvolání vjemu jasu, *vlnovou délkou* jíž odpovídá vjem barvy zvaný *tón* a *čistotou* jíž odpovídá *syntost*. Subjektivní barevné vjemy můžeme vyjádřit číselnými hodnotami, které přesně vystihují barvu. Podle normy *Mezinárodní osvětlovací komise (CIE)* z roku 1931, vzniklé na základě měření velkého počtu pozorovatelů, se předpokládá, že oko vnímá třemi orgány, jejichž citlivost k barvám je vyjádřena *barevnými podněty* (*trichromatickými členiteli*)  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  spektrální barvy vlnové délky  $\lambda$ . *Barevnými souřadnicemi* (*trichromatickými souřadnicemi*) příslušné spektrální barvy nazýváme veličiny

$$x = \frac{\bar{x}}{\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}}, \quad y = \frac{\bar{y}}{\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}}, \quad z = \frac{\bar{z}}{\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}}. \quad (1)$$

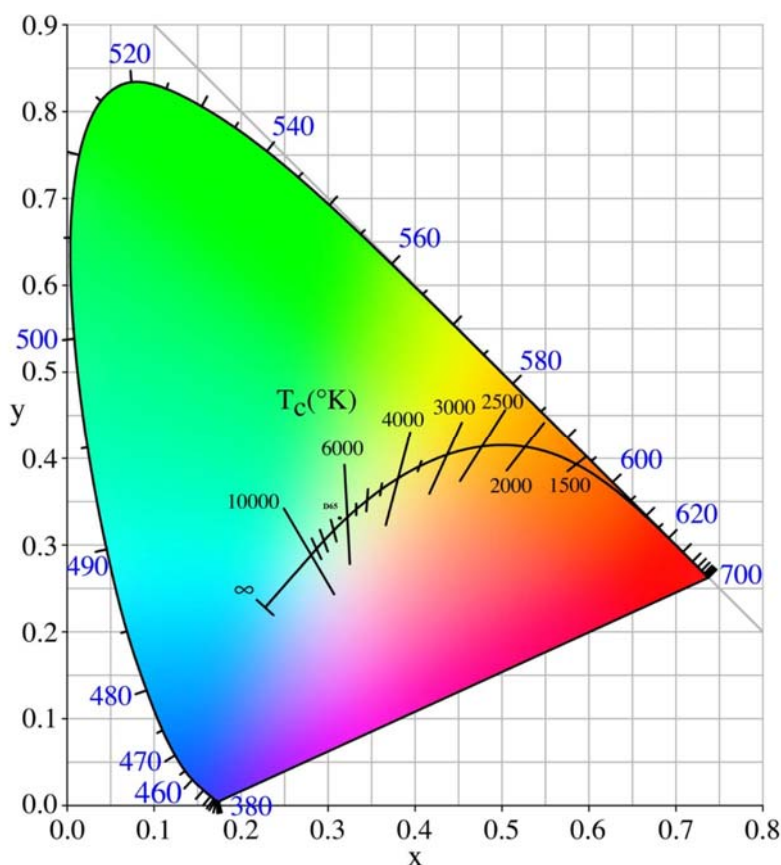
Protože platí  $x + y + z = 1$ , stačí k definici barvy znát jenom dvě z těchto veličin. Barevné podněty, v závislosti na vlnové délce světla, jsou znázorněny na **obr.6**.



**Obr.6:** Barevné podněty (trichromatické členitele) CIE 1931



Grafické znázornění spektrálních barev  $x, y$  je na **obr.7**. Spojnice konců křivky, přímka purpurů (směsné barvy složené z fialové  $\lambda = 380$  nm a červené  $\lambda = 700$  nm), představuje nespektrální barvu. Souřadnice  $(x,y)$  všech skutečných barev jsou uvnitř plochy vymezené uvedenými dvěma čarami (*kolorimetrický trojúhelník, diagram chromatičnosti*) **obr.7**. Tyto barvy jsou aditivní směsí z barev spektra. Každá barva je tedy určena bodem  $(x,y)$  v diagramu chromatičnosti.



**Obr.7:** Kolorimetrický trojúhelník, diagram chromatičnosti  $x,y$

Při *určování barevných souřadnic zdroje světla* postupujeme tak, že určíme barevné podněty (trichromatické složky)  $X, Y, Z$  tohoto světla ze vztahů

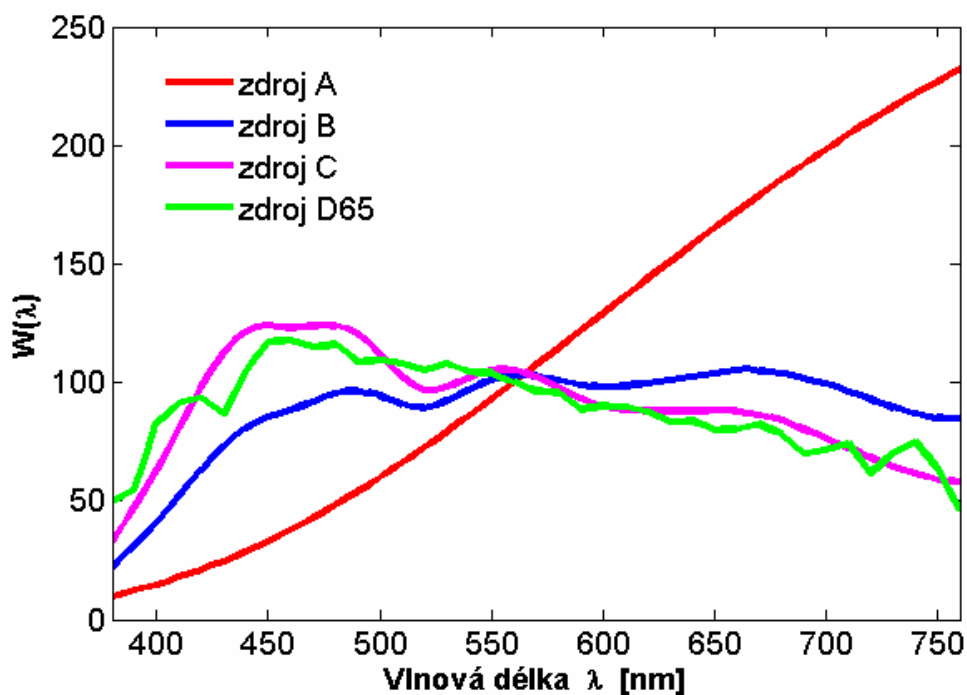
$$X = \int_0^{\infty} \bar{x}(\lambda)W(\lambda)d\lambda, \quad Y = \int_0^{\infty} \bar{y}(\lambda)W(\lambda)d\lambda, \quad Z = \int_0^{\infty} \bar{z}(\lambda)W(\lambda)d\lambda, \quad (2)$$

kde  $W(\lambda)d\lambda$  je tok světla pro vlnovou délku  $\lambda$  zkoumaného zdroje světla. Barevné souřadnice (trichromatické souřadnice) pak jsou

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}, \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z}. \quad (3)$$

Předměty vidíme pomocí světla které odrážejí nebo které jimi prochází. Barva jimi odraženého nebo propuštěného světla závisí na barvě na ně dopadajícího světla. Jako normy pro měření barvy světla odraženého nebo propuštěného předmětem byly přijaty tři zdroje světla, které se získají zvláštním uspořádáním žárovek a selektivně absorbujících roztoků: Zdroj A (přibližně žárovka 300 W), zdroj B, jehož světlo odpovídá přímému slunečnímu světlu a zdroj C, jehož světlo vystihuje rozptýlené denní světlo. *Spektrální rozdělení energie*  $W(\lambda)$  světla těchto zdrojů, které se blíží světlu absolutně černého tělesa při teplotách 2856 K (A), 4874 K (B) a 6774 K (C) je uvedeno na **obr.8**

V důsledku velkých fluktuací přirozeného denního světla, doporučila CIE řadu D zdrojů s barevnými teplotami 5500 K ( $D_{55}$ ), 6500 K ( $D_{65}$ ) a 7500 K ( $D_{75}$ ). Zdroj  $D_{65}$  představuje průměrné denní světlo a jemu odpovídající spektrální rozdělení energie  $W(\lambda)$  je uvedeno na **obr. 8**.



**Obr.8:** Spektrální rozdělení energie  $W(\lambda)$  standardizovaných světelných zdrojů

Předpokládejme nyní, že světlo zdroje interaguje s předmětem (prochází či se odráží) mající spektrální propustnost  $T(\lambda)$  resp. odrazivost  $R(\lambda)$  pro vlnovou délku  $\lambda$ , potom hodnoty barevných podnětů určíme ze vztahů

$$X = \int_0^{\infty} \bar{x}(\lambda)T(\lambda)W(\lambda)d\lambda, \quad Y = \int_0^{\infty} \bar{y}(\lambda)T(\lambda)W(\lambda)d\lambda, \quad Z = \int_0^{\infty} \bar{z}(\lambda)T(\lambda)W(\lambda)d\lambda,$$

resp. (4)

$$X = \int_0^{\infty} \bar{x}(\lambda)R(\lambda)W(\lambda)d\lambda, \quad Y = \int_0^{\infty} \bar{y}(\lambda)R(\lambda)W(\lambda)d\lambda, \quad Z = \int_0^{\infty} \bar{z}(\lambda)R(\lambda)W(\lambda)d\lambda$$

a barevné souřadnice potom určíme dle vztahu (3).

Všimněme si nyní pojmu *bílé světlo* (*achromatické světlo*). Neexistuje jediná definice bílého světla. Za bílé světlo se nejčastěji považuje světlo zdroje C, D<sub>65</sub> nebo izoenergetické světlo E o barevných souřadnicích  $x = 1/3$ ,  $y = 1/3$  (bod chromatičnosti izoenergetického světla).

Na základě popsaného modelu vyjadřování barev lze pomocí různých transformací zkonstruovat různé barevné systémy např. *CIE RGB*, *CIE Luv*, *CIE Lab* atd.

Vaším úkolem je určit barevné souřadnice  $x,y$  měřených barevných povrchů vzorků. Měření proveďte pomocí spektrometru zapojeného v režimu na odraz. Využijte software **SpectraSuite**, ve kterém můžeme zvolit standardizovaný zdroj světla a program na základě měření odrazivosti povrchu provede výše naznačený výpočet a zobrazí barevné souřadnice měřeného povrchu.

---

**Pomůcky : spektrofotometr USB2000, halogenový zdroj záření LS-1, optická vlákna, stojánek pro měření, držák vláken pro měření odrazivosti, počítač se softwarem**