



Hana Kudrnová, KVOF MFF UK

## Úloha 4

### Fotometrie a radiometrie

#### Pracovní úkol:

1. Změřte radiometrické a fotometrické vlastnosti světelného zdroje č. 1.
  1. Spektroradiometrem změřte spektrální závislost intenzity vyzařování do jednoho vybraného směru ve vzdálenosti 20 cm od zdroje v jednotkách  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ . Vypočítejte intenzitu ozařování v jednotkách  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ .
  2. Spektroradiometrem změřte ve stejném směru a vzdálenosti od zdroje spektrální závislost osvětlení v jednotkách  $\text{lx}\cdot\text{nm}^{-1}$ . Vypočítejte osvětlení v jednotkách lx.
  3. Zpracováním naměřených spekter zkonstruujte křivku spektrální citlivosti aparatury a porovnejte ji se známou křivkou spektrální citlivosti průměrného lidského oka. Stanovte světelnou účinnost zdroje v jednotkách  $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$ . Vypočítejte světelný tok zdroje v jednotkách lm. Stanovte účinnost zdroje danou poměrem světelného (resp. zářivého) výkonu a elektrického příkonu v jednotkách  $\text{lm}/\text{W}$  (resp. %).
  4. Změřením osvětlení luxmetrem v různých vzdálenostech od světelného zdroje stanovte jeho svítivost do stejného směru, který byl použit pro předchozí měření.
  5. Proměřte fotometrický diagram světelného zdroje a jeho zpracování použijte k diskusi předchozích výsledků.
2. Obdobným postupem změřte radiometrické a fotometrické vlastnosti světelného zdroje č. 2.
3. Srovnejte změřené parametry obou světelných zdrojů a diskutujte rozdíly. Výsledky porovnejte i s údaji od výrobců zdrojů.
4. Proměřte fotometrický diagram světelného zdroje č. 3 a ověřte, že je plošným zdrojem světla. Stanovte jeho jas.

#### Základní vztahy a klíčová slova:

Fotometrické a radiometrické veličiny, svítivost a zářivost, světelný a zářivý tok, intenzita vyzařování a spektrální intenzita vyzařování, osvětlení, jas, světelné zdroje anizotropní, izotropní, Lambertův zákon, kosinový zářič

# Fotometrie a radiometrie

Elektromagnetické vlnění, tedy i světlo, je nositelem energie. Světlo šířící se prostorem lze tedy charakterizovat energií či výkonem procházejícími v daném směru jednotkovou plochou. To jsou veličiny *energetické (radiometrické)*. Ve viditelné oblasti spektra je však v řadě případů nutné charakterizovat záření podle světelného vjemu, který vyvolává v lidském oku. Odpovídající veličiny a jejich jednotky se nazývají *fotometrické*.

Fotometrie tedy definuje a studuje veličiny charakterizující působení světelného záření na lidské oko. Pro účely fyzikálního praktika zde stručně zavedeme následující fotometrické veličiny: svítivost (základní fotometrická veličina), světelný tok, jas a osvětlení.

*Svítivost* charakterizuje především bodový zdroj světla, tj. zdroj, jehož rozměry jsou zanedbatelné vůči vzdálenosti, z níž zdroj studujeme. Je to základní fotometrická veličina v soustavě SI. Svítivost vyjadřuje schopnost bodového zdroje vyvolat v daném bodě zrakový vjem. Její jednotkou je kandela (cd). U *anizotropních* zdrojů závisí svítivost na směru; prostorové rozložení svítivosti takových zdrojů znázorňujeme fotometrickým diagramem - z pevného bodu, který ztotožňujeme se zdrojem, vynášíme vektory všech možných směrů takové, že velikost každého vektoru udává svítivost zdroje v příslušném směru (u *izotropního* zdroje je prostorovým fotometrickým diagramem koule).

*Světelný tok* vysílaný bodovým zdrojem o svítivosti  $J$  do prostorového úhlu  $d\Omega$  v daném směru je definován vztahem

$$d\Phi = J d\Omega . \quad (1)$$

Pro izotropní zdroj světla je světelný tok  $\Phi$  do celého prostoru, tj. prostorového úhlu  $4\pi$ , dán tedy jako

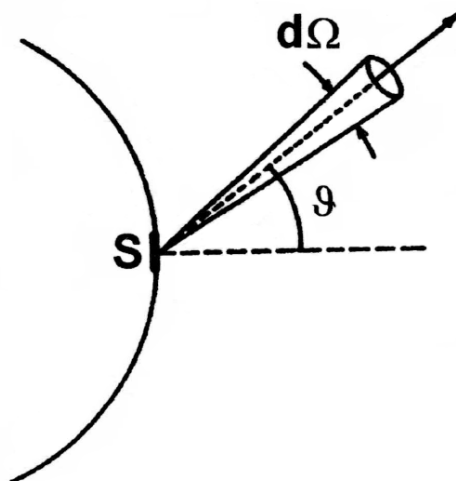
$$\Phi = 4 \pi J . \quad (2)$$

Jednotkou světelného toku je lumen (lm). Je to světelný tok vyzařovaný do prostorového úhlu 1 steradiánu bodovým zdrojem světla, jehož svítivost do všech směrů je 1 kandela (cd).

Energetická veličina, odpovídající světelnému toku  $\Phi$ , je *zářivý tok*  $\Phi_e$ , který udává množství energie nesené zářením v daném směru za 1 sekundu. Jednotkou zářivého toku je watt (W). Podíl světelného toku  $\Phi$  a odpovídajícího zářivého toku  $\Phi_e$  se nazývá *světelnou účinností zdroje*  $K$

$$K = \frac{\Phi}{\Phi_e} \quad (\text{lm.W}^{-1}) . \quad (3)$$

$K$  závisí na vlnové délce a představuje křivku spektrální citlivosti průměrného lidského oka, proto je  $K$  rovno nule mimo oblast viditelného spektra; tedy zdroj např. výkonného záření v ultrafialové oblasti spektra ( $\lambda < 400\text{nm}$ ) vysílá nulový světelný tok (!)



Obr. 1 K definici jasu

*Jas.* Pojem jasu se zavádí pro plošné (nikoli bodové) světelné zdroje. Jestliže vezmeme na povrchu zdroje malou plošku  $S$  (viz obr. 1) a představíme si z ní vystupující paprsek pod úhlem  $\vartheta$  k normále, pak jasnem zdroje v daném směru  $B_{\vartheta}$  nazýváme světelný tok  $d\Phi$  vystupující z plošky  $S$  v tomto směru, vztažený na jednotkový prostorový úhel a na jednotkovou velikost plošky ( $S \cos\vartheta$ ) viditelnou z daného směru:

$$B_{\vartheta} = \frac{d\Phi}{S \cos \vartheta d\Omega} = \frac{J_{\vartheta}}{S \cos \vartheta} \quad (4)$$

Zde  $J_{\vartheta}$  je svítivost plošky  $S$  do vybraného směru.

Jas  $B_{\vartheta}$  se tedy obecně mění s úhlem  $\vartheta$ ; na první pohled by se mohlo zdát, že ze vztahu (4) vyplývá růst jasu  $B_{\vartheta}$  s rostoucím úhlem  $\vartheta$ , což je v rozporu s intuitivním očekáváním. Tento zdánlivý růst  $B_{\vartheta}$  je totiž ve skutečnosti do značné míry kompenzován poklesem svítivosti s růstem  $\vartheta$ . U mnoha světelných zdrojů lze tento pokles svítivosti plošných zdrojů popsat závislostí

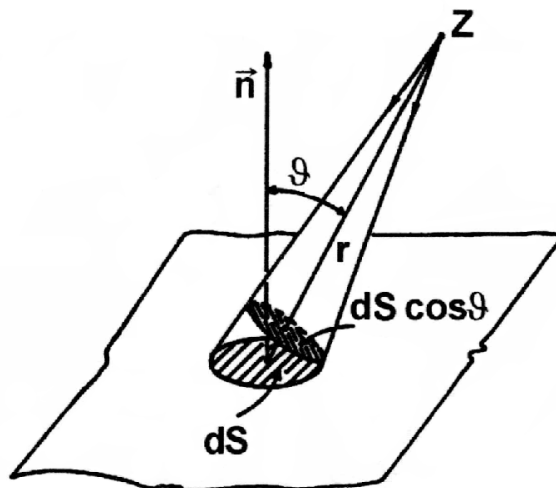
$$J_{\vartheta} = J_0 \cos \vartheta, \quad (5)$$

kde  $J_0$  je svítivost zdroje ve směru normály ( $\vartheta = 0$ ). Takový zdroj se nazývá kosinový zářič a vztah (5) Lambertův zákon. Ze vztahu (4) pak ihned vyplývá, že pro kosinový zářič jeho jas nezávisí na směru. Jako příklad může sloužit homogenní svítící koule - zdá se nám být stejně jasná uprostřed i na krajích a proto se jeví jako plochá (Měsíc).

Jednotkou jasu je  $\text{cd}/\text{m}^2$ . Je to jas povrchu, jehož svítivost v kolmém směru činí  $1 \text{ cd}$  z každého metru čtverečního.

*Osvětlení.* Osvětlením  $E$  dané plochy se rozumí poměr světelného toku  $\Phi$  dopadajícího rovnoměrně na ozařovanou plochu a velikosti této plochy  $S$ :

$$E = \frac{\Phi}{S}. \quad (6)$$



Obr. 2 K definici osvětlení

Nechť je zdroj bodový, má svítivost  $J$  a paprsky dopadají pod úhlem  $\vartheta$  k normále osvětlované plochy (viz obr. 2). Pak světelný tok do prostorového úhlu

$$d\Omega = \frac{dS \cos \vartheta}{r^2} \quad (7)$$

je dle definice

$$d\Phi = J d\Omega = \frac{J dS \cos \vartheta}{r^2}. \quad (8)$$

Vydělením velikostí plochy  $dS$  na povrchu máme

$$E = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{J}{r^2} \cos \vartheta. \quad (9)$$

Osvětlení je tedy nepřímo úměrné čtverci vzdálenosti od bodového zdroje a je tím slabší, čím „šikměji“ dopadají paprsky na osvětlovaný povrch. Jednotkou osvětlení je lux (lx). Je to osvětlení produkované světelným tokem 1 lm, rovnoměrně dopadajícím na plochu 1 m<sup>2</sup>.

Oproti fotometrii je radiometrie obecnější, není spektrálně omezena na viditelnou oblast. Kromě již zmíněného zářivého toku se zavádějí další radiometrické veličiny obdobné fotometrickým, např. zářivost, zář, intenzita ozáření či intenzita vyzařování.

Pro vyjádření spektrálních závislostí uvedených veličin je možné zavést odpovídající spektrální hustoty. Např. *spektrální hustota zářivého toku*  $\Phi_\lambda$  odpovídá zářivému toku  $\Phi_e$  vztaženému na jednotkový frekvenční interval okolo vlnové délky  $\lambda$ . Zářivý tok do frekvenčního intervalu  $d\lambda$  je pak roven

$$d\Phi_e = \Phi_\lambda d\lambda . \quad (10)$$

Veličina, charakterizující světelné zdroje, *intenzita vyzařování* neboli plošná hustota zářivého toku je definovaná jako měrná veličina zářivého toku na jednotku plochy a uvádí se v jednotkách ( $\text{W.m}^{-2}$ ). *Spektrální intenzita vyzařování* se pak často měří v jednotkách ( $\text{W.m}^{-2}.\text{nm}^{-1}$ ).

Příloha 1 Přehled základních radiometrických a fotometrických veličin a jejich jednotek

Radiometrické veličiny			Fotometrické veličiny		
zářivý tok ( <i>radiant flux, radiant power</i> )	$\Phi_e$	W	světelný tok ( <i>luminous flux, luminous power</i> )	$\Phi$	lm
zářivost ( <i>radiant intensity</i> )	$I_e$	$\text{W.sr}^{-1}$	svítivost ( <i>luminous intensity</i> )	$I$	$\text{cd} = \text{lm.sr}^{-1}$
ozáření, intenzita ozáření ( <i>irradiance, flux density</i> )	$E_e$	$\text{W.m}^{-2}$	osvětlení, intenzita osvětlení ( <i>illuminance</i> )	$E$	$\text{lx} = \text{lm.m}^{-2}$
intenzita vyzařování ( <i>irradiance</i> )	$M_e$	$\text{W.m}^{-2}$	světlení ( <i>luminous emittance</i> )	$M$	$\text{lm.m}^{-2}$
zář ( <i>radiance</i> )	$L_e$	$\text{W.sr}^{-1}.\text{m}^{-2}$	jas ( <i>luminance</i> )	$L$	$\text{nt} = \text{cd.m}^{-2}$
expozice ( <i>exposure</i> )	$H_e$	$\text{W.s.m}^{-2}$	osvit ( <i>luminous exposure</i> )	$H$	$\text{lx.s}$
spektrální hustota zářivého toku ( <i>spectral flux</i> )	$\Phi_{e,\nu}$	$\text{W.Hz}^{-1}$			
spektrální hustota zářivého toku ( <i>spectral flux</i> )	$\Phi_{e,\lambda}$	$\text{W.m}^{-1}$ ( $\text{W.nm}^{-1}$ )			
spektrální hustota záření ( <i>spectral irradiance</i> )	$E_{e,\nu}$	$\text{W.m}^{-2}.\text{Hz}^{-1}$			
spektrální hustota záření ( <i>spectral irradiance</i> )	$E_{e,\lambda}$	$\text{W.m}^{-2}.\text{nm}^{-1}$			

## Fotometrie a radiometrie – principy měření a pokyny

Přístroje k měření fotometrických veličin (svítivost, světelný tok, osvětlení, atd.) lze v zásadě rozdělit na subjektivní a objektivní.

U *objektivních* fotometrických zařízení se dopadající světelný tok převádí na některou jinou fyzikální veličinu, obvykle elektrickou, kterou lze vhodným způsobem změřit. Pro převádění lze použít různé fotoelektrické elementy, termočlánky, aj. Správně ocejchovaný přístroj dává možnost stanovit fotometrickou veličinu přímo, bez použití srovnávacího normálu. Potíže mohou vzniknout v souvislosti se spektrální citlivostí zařízení. Fotoelektrické veličiny jsou totiž definovány na základě spektrální citlivosti oka. Pro správné měření je proto potřeba, aby provádějící element měl stejnou spektrální citlivost jako lidské oko, což nemusí být vždy snadné splnit. Jinak cejchování přístroje platí vždy jen pro vhodné spektrální složení dopadajícího světla.



Obr. 1 Příklad přístroje na měření osvětlení: Luxmetr VC – 4in1

K měření osvětlení budeme používat luxmetr ocejchovaný přímo v luxech. Luxmetr LX 1108 s externí sondou pro měření osvětlení má možnost výběru kalibrace pro 4 různé typy světla (žárovka, zářivka, sodíková výbojka a rtuťová výbojka). V našem případě vybereme měření v módu žárovka. (V případě měření pomocí multimetru VC - 4in1 vybereme funkci luxmetr zeleným tlačítkem Select.) Ze změřeného osvětlení  $E$  ve vzdálenosti  $r$  při kolmém dopadu světla na sondu luxmetru lze určit svítivost  $J$  zdroje světla.

$$J = E r^2 \quad (1)$$

Měření provedeme při několika různých vzdálenostech  $r$  v celém rozsahu optické lavice (diskutujte přesnost měření).

Svítivost světelných zdrojů může různým způsobem záviset na směru. V obecném případě je tato směrová závislost charakterizována *fotometrickým tělesem*. Z pevného bodu (počátku) vyneseme vektory všech možných směrů takové, že velikost každého vektoru udává svítivost zdroje v příslušném směru. Fotometrické těleso je vytvořeno koncovými body těchto vektorů. *Fotometrický diagram* charakterizuje stejným způsobem směrovou závislost

svítivosti v určité rovině (např. horizontální či vertikální), je to tedy vlastně úhlová závislost svítivosti vynesena v polárních souřadnicích.

Svítivost mnoha plošných rovinných zdrojů  $J$  splňuje s větší či menší přesností Lambertův zákon

$$J = J_0 \cos \vartheta , \quad (2)$$

kde  $\vartheta$  je úhlová odchylka od normály plochy zdroje a  $J_0$  konstanta nezávislá na směru. Pro srovnání vynesete naměřené hodnoty svítivosti plošného zdroje do fotometrického diagramu, kam zakreslíte rovněž křivku (2).

Jas  $B$  plošného zdroje je dán vztahem

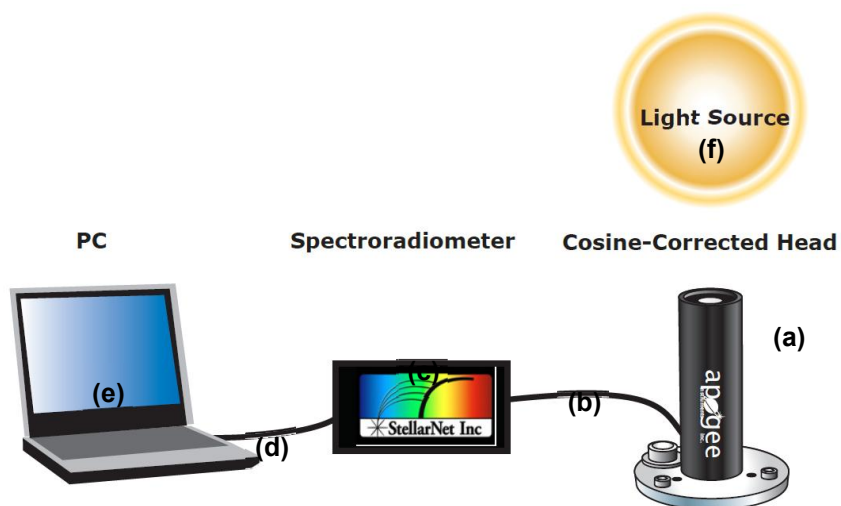
$$B = \frac{J}{S \cos \vartheta} , \quad (3)$$

kde  $S$  je plocha zdroje. Jas zdroje splňujícího Lambertův zákon (kosinový zářič) tedy nezávisí na směru.

Po skončení měření s luxmetrem zakryjte ihned sondu luxmetru krytem.

Radiometrické veličiny charakterizují energetické a výkonové vlastnosti záření nejen ve viditelné části spektra. K radiometrickým měřením se opět používá objektivních zařízení, která dopadající zářivý tok převádějí na měřitelnou elektrickou fyzikální veličinu. Patří k nim fotodetektory, termočlánky, dozimetry atd.

Chceme-li zároveň sledovat i spektrální vlastnosti radiometrických veličin, použijeme aparaturu založenou na spektrometru. Příkladem je měřící aparatura schematicky znázorněná na obr. 2.



Obr. 2 Ukázka sestavy aparatury k měření spektrometrických veličin

V praktiku je pro měření úlohy připraven vláknový spektrometr Apogee PS-300 (c). Pracuje v rozsahu vlnových délek 300 až 1000 nm s rozlišením 2 nm. Do vstupu spektrometru je světlo přivedeno světlo otickým vláken (b) s připojenou sondou s kosinovým korektorem (a). Takto je aparatura ocejchována v měřícím módu „Radiometer“ na měření veličin: „Power“ ( $\text{W m}^{-2} \text{nm}^{-1}$ ), „Photon flux“ ( $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{nm}^{-1}$ ) a „Luminosity“ ( $\text{lux m}^{-2}$ ).

Intenzitu osvětlení  $E$  světelným zdrojem lze stanovit integrací změřené spektrální závislosti intenzity osvětlení přes viditelnou oblast spektra.

$$E = \int_{380}^{780} E(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

Intenzitu ozáření  $E_e$  získáme obdobně integrací změřené závislosti ozáření na vlnové délce.

Při stanovování světelného toku  $\Phi$  ze změřené intenzity osvětlení ve vzdálenosti  $r$  od světelného zdroje v jednom určitém směru lze použít vztahu platného pro izotropní zdroje světla.

$$\Phi = 4 \pi E r^2 \quad (5)$$

Musíme mít ale na paměti, že v případě anizotropního zdroje světla není svítivost do všech směrů stejná. Tedy pro stanovení správné hodnoty světelného toku anizotropního zdroje, odpovídající např. údají o světelném toku od výrobce, bychom museli změřit úplný prostorový fotometrický diagram. Obdobně lze získat zářivý tok  $\Phi_e$ .

Světelný tok  $\Phi$  lze určit přepočtem zářivého toku  $\Phi_e$  na citlivost standardního oka pro denní vidění. Tato citlivost je vyjádřena křivkou spektrální citlivosti běžného lidského oka  $K(\lambda)$ , která je tabelována (např. i v normách ČSN, DIN atd.). Oko je nejcitlivější pro vlnovou délku 555 nm, funkce  $K(\lambda)$  je pro tuto vlnovou délku normována. Jednotka lumen je definována tak, že na této vlnové délce (555 nm) odpovídá 1 W zářivého toku 683 lumenům světelného toku. To tedy znamená, že světelný tok je spojen se spektrální hustotou zářivého toku vztahem

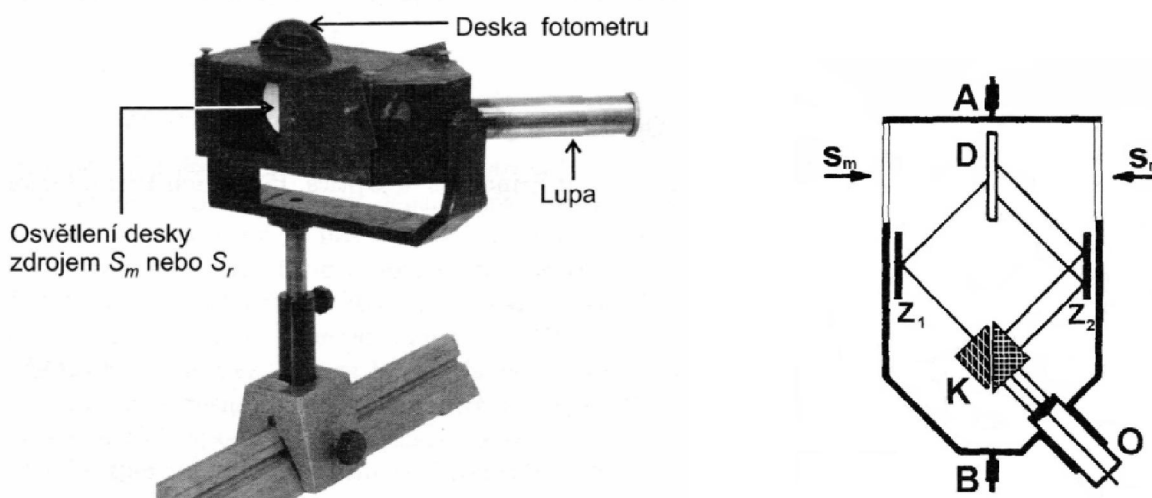
$$\Phi = K_m \int_{380}^{780} K(\lambda) \Phi_e(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

Konstanta  $K_m$  odpovídá maximální světelné účinnosti denního vidění, její hodnota  $K_m = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ . Křivku v digitalizované podobě mají studenti praktika k dispozici ke stažení na stránce se zadáním úlohy.

Návod na ovládání spektrometru Apogee je přiložen u aparatury.



Ačkoliv to není v povinné náplni úlohy, zmíníme se ještě o subjektivním způsobu měření fotometrických veličin. U *subjektivních* přístrojů se využívá možnosti rozhodnout při vizuálním pozorování, zda sousední plochy vysílají světlo stejné barvy, mají stejný jas. Měření je v tomto případě vždy relativní, měřený zdroj světla porovnáváme s normálovým zdrojem, jehož fotometrické hodnoty jsou známy. Zorné pole přístroje je rozděleno na části, z nichž některé jsou osvětleny měřeným zdrojem, jiné normálem (fotometrické pole). Intenzitu osvětlení od jednoho nebo od obou zdrojů lze definovaně měnit. Nastavíme-li celé zorné pole na stejný jas, lze z nastavení přístroje určit poměr svítivostí obou zdrojů, poměr jejich jasů či dalších fotometrických veličin.



Obr. 3 Lummerův-Brodhunův fotometr včetně znázornění jeho vnitřního uspořádání

Pro měření svítivosti lze použít například Lummer-Brodhunův fotometr, jehož principiální uspořádání vidíme na obr. 3. Každý z obou porovnávaných světelných zdrojů  $S_m$ ,  $S_r$  osvětluje jednu stranu desky  $D$  s bílým rozptylujícím povrchem. Světlo difusně odražené na obou stranách se po odrazu na zrcadlech  $Z_1$ ,  $Z_2$  pozoruje Lummerovou-Brodhunovou kostkou  $K$ , která vytváří fotometrické pole. Skládá se ze dvou pravouhlých hranolů, které k sobě přiléhají přeponovými stěnami. Přeponová stěna jednoho, např. levého hranolu, je na okrajích sbroušena tak, že pouze její střední část je v optickém kontaktu se stěnou pravého hranolu. Touto střední částí může světlo kostkou nerušeně procházet v původním směru. Při pozorování kostky lupou  $O$  zaostřenou na styčnou plochu hranolu tedy vidíme ve středu zorného pole světlo přicházející z levého povrchu desky  $D$ . Na krajích přeponové stěny pravého hranolu dochází k úplnému odrazu, takže světlo v okrajové části zorného pole přichází z pravého povrchu desky  $D$ . Vyrovnání obou částí zorného pole na stejný jas se zde provádí změnou vzdáleností  $r_m$ ,  $r_r$  zdrojů  $S_m$ ,  $S_r$  od desky  $D$ . Svítivost zdrojů označme  $J_m$ ,  $J_r$ . Při vyrovnání jsou osvětlení

$$E_m = \frac{J_m}{(r_m)^2}, \quad E_r = \frac{J_r}{(r_r)^2} \quad (7)$$

obou stran desky **D** stejné, takže je-li např. **S<sub>r</sub>** normálový zdroj se známou svítivostí, lze svítivost zdroje **S<sub>m</sub>** určit ze vztahu

$$J_m = J_r \frac{(r_m)^2}{(r_r)^2} . \quad (8)$$

Pro vyloučení vlivu případných nesouměrností povrchů desky **D** a zrcadel **Z<sub>1</sub>**, **Z<sub>2</sub>** je možno celý přístroj otočit o 180° kolem osy **AB**, měření opakovat a jako výsledek brát průměr obou získaných hodnot. Aby bylo možné vyrovnání jasu obou polí přesně provést, musí být splněna podmínka, že oba zdroje mají stejnou barvu světla.

Po skončení měření uzavřete ihned kryty Lummerova-Brodhunova fotometru.