Fotometrické veličiny

Fotometrické veličiny, které jsou historicky starší než veličiny radiometrické, jsou omezeny pouze na záření viditelné lidským okem. Jsou definovány podle citlivosti lidského oka a jsou tudíž závislé na barevném složení zkoumaného záření (lidské oko je nejcitlivější na žlutozelené světlo o vlnové délce 555 nm). Tyto veličiny v podstatě nemají fyzikální smysl.

Jedná se o veličiny, které mají v názvu „světlo“.

Abychom mohli korektně definovat fotometrické veličiny (tj. popsat světlo z hlediska jeho vnímání lidským okem), je nutné definovat standardního pozorovatele, tj. průměrného člověka a jeho vidění. V této souvislosti se tedy definuje průměrná citlivost lidského zraku na světlo skládající se ze světel různých vlnových délek. Citlivost lidského oka za běžného denního světla je však výrazně jiná než citlivost při nočním vidění. Proto byly definovány dvě standardní citlivosti:

1. fotopická citlivost - definovaná pro běžné denní světlo (fotopické vidění) a je proto dána citlivostí čípků na sítnici oka;
2. skotopická citlivost - definovaná pro noční vidění (skotopické vidění) a tedy je dána citlivostí tyčinek na sítnici oka.

Čípky jsou totiž citlivé na světla různých barev, a proto se více uplatňují při denním vidění. Tyčinky, které jsou citlivé pouze na intenzitu dopadajícího světla, se uplatňují při nočním vidění (skotopické vidění).

Fotopická citlivost a skotopická citlivost se liší zejména průměrem duhovky lidského oka. Při fotopickém vidění je otvor v duhovce menší, zatímco při skotopickém vidění je tento otvor zvětšený.

Duhovka má analogický význam jako clona ve fotoaparátu: koriguje množství světla, které dopadá na světlocitlivou vrstvu (u oka je to sítnice, u fotoaparátu je to fotografický film nebo CCD panel).

Pro všechny fotometrické veličiny a jejich jednotky, které popisují světlo, se používá pouze fotopická citlivost oka.

Mezi fotometrické veličiny patří:

1. světelný tok - vztahuje se k přenosu světla prostorem;
2. svítivost - vyjadřuje vlastnost zdroje světla;
3. osvětlení - určuje účinky světla při jeho dopadu na povrch tělesa.

Definovat fotometrické veličiny můžeme v různém pořadí. Bylo by logické začít s definicí svítivosti, neboť ta se udává v kandelách patřících do základních jednotek soustavy SI. Svítivost se ale definuje pomocí světelného toku, takže je stejně logické začít definice fotometrických veličin světelným tokem. Tento přístup je logičtější a snáze se vysvětlí souvislosti s ostatními fotometrickými veličinami.

SVĚTELNÝ TOK Φ VYJADŘUJE INTENZITU ZRAKOVÉHO VJEMU NORMÁLNÍHO OKA, VYVOLANÉHO ENERGIÍ SVĚTELNÉHO ZÁŘENÍ, KTERÉ PROJDE ZA JEDNOTKU ČASU URČITOU PLOCHOU V PROSTORU, KTERÝM SE SVĚTLO ŠÍŘÍ. $[\Phi]=\mathrm{lm}$ (LUMEN).

Jinými slovy, světelný tok udávaný v lumenech odpovídá zářivému toku udávanému ve wattech s tím, že je zahrnuta do úvahy citlivost lidského oka na jednotlivá světla barevného spektra.

Žárovka s výkonem 100 W vyzařuje těchto 100 W ve formě elektromagnetického záření (celkový vyzářený výkon všech druhů elektromagnetického záření je 100 W), ale ve formě světelného záření září méně. Může zářit i např. 0 lm, pokud se jedná o infračervenou žárovku vyzařující záření, na které lidské oko není citlivé. Okem neviditelné záření se tedy do světelného toku nepočítá!

Svítivost I je základní fotometrická veličina; $[I]=\mathrm{cd}$ (kandela). Jednotka svítivosti 1 kandela

odpovídá přibližně svítivosti obyčejné svíčky. Žárovka o příkonu 100 W má svítivost asi 200 cd.

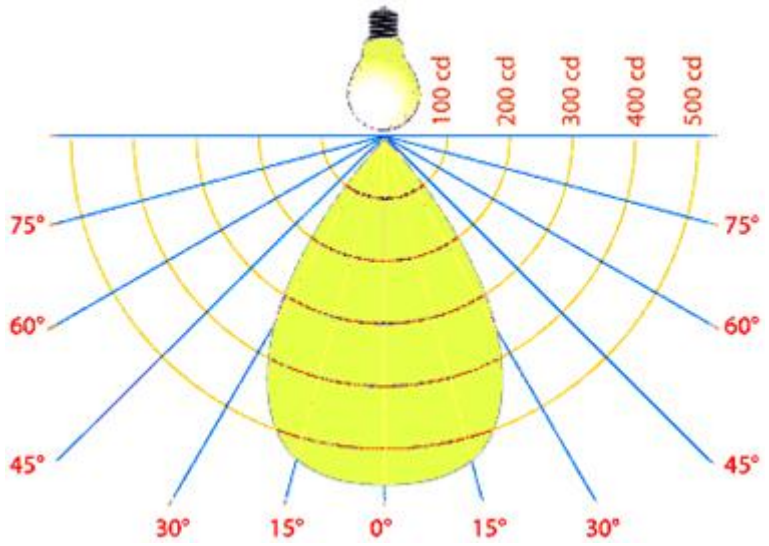
Kandela patří mezi základní jednotky soustavy SI. Fotometrické veličiny sice nemají příliš velký fyzikální význam, a proto by kandela toto „výsadní postavení“ patřit do základních jednotek soustavy SI mít neměla, ale nějaká jednotka z fotometrických veličin mezi základními být musí. Jinak by nebylo možné vyjádřit další jednotky fotometrických veličin.

SVÍTIVOST BODOVÉHO ZDROJE V DANÉM SMĚRU LZE DEFINOVAT JAKO PODÍL SVĚTELNÉHO TOKU $\Delta\Phi$ VYZÁŘENÉHO ZDROJEM V TOMTO SMĚRU DO MALÉHO PROSTOROVÉHO ÚHLU $\Delta\Omega$ A VELIKOSTI TOHOTO PROSTOROVÉHO ÚHLU:

$$I = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\Omega}; \qquad (1)$$

$[I]$ = CD (KANDELA).

Svítivost tedy vyjadřuje rozdělení světelného toku do různých směrů, do kterých vyzařuje zdroj světla.



Obr. 285

Svítivost si můžeme také představit jako soubor vektorů vycházejících ze zdroje světla, jejichž velikosti v daném směru odpovídají svítivosti v daném směru. Koncové body těchto vektorů vytvoří tzv. plochu svítivosti, z níž většinou pro praktické účely stačí znát pouze její řez některou rovinou procházející světelným zdrojem (např. rovina procházející osou souměrnosti zdroje, ...). Tento řez se nazývá čára svítivosti (resp. diagram svítivosti - viz obr. 285).

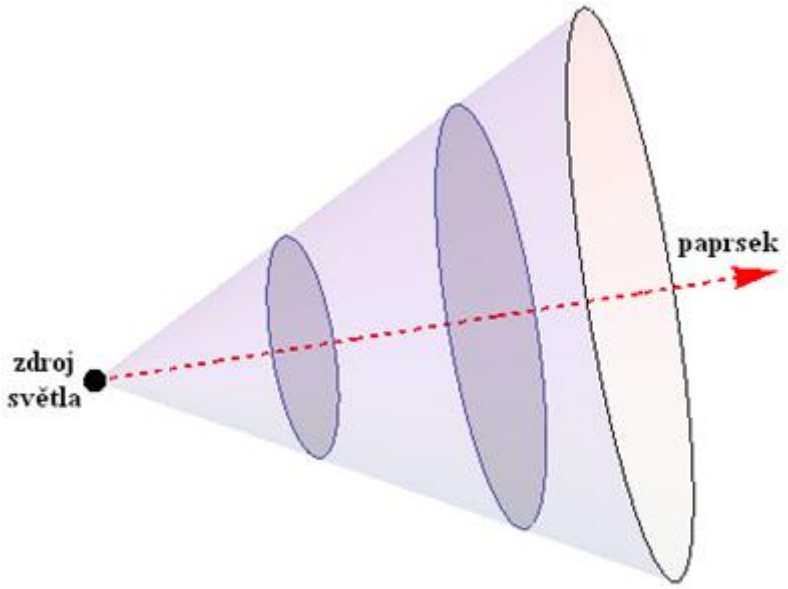
Tímto způsobem lze popsat vyzařování světla světelných zdrojů do různých směrů, neboť světelné zdroje nesvítí obvykle do všech směrů stejně.

Např. reflektory automobilů svítí velmi silně směrem dopředu a pak velmi málo do stran.

Proto je nutné znát tzv. diagram svítivosti (viz obr. 285), který vyjadřuje, jaká část světelného toku je daným zdrojem vyzařována do daného směru. Z obr. 285 je zřejmé, že přímo ve směru osy (tj. do úhlu $0°$) má žárovka svítivost přibližně 550 cd, do úhlu $15°$ je její svítivost zhruba 520 cd a do úhlu $30°$ přibližně 300 cd. Do úhlu většího, než je $30°$ na obě strany od osy žárovky, je její svítivost téměř nulová (resp. pouze zbytková).

Svítivost tedy udává jakousi hustotu světelných paprsků v závislosti na konkrétním směru. Hodnota svítivosti (tj. hustota paprsků) se nijak nemění se změnou vzdálenosti od světelného zdroje, tj. zůstává stále stejná. Tuto skutečnost názorně zobrazuje obr. 286.

Světelný tok (resp. světelný výkon) je pak dán součinem této „hustoty paprsků“ (tj. svítivosti) a úhlu, do kterého byly paprsky vyzářeny. V analogii paprsků představuje světelný tok celkový počet paprsků.



Obr. 286

Typické hodnoty svítivosti některých zdrojů světla jsou uvedeny v tab. 4.

Zdroj světla	Svítivost
LED	0,005 cd
svíčka	1 cd
100 W žárovka	135 cd
reflektory automobilu (směrem dopředu)	100000 cd
fotografický blesk (maximální hodnota)	1000000 cd

tab. 4

Fotometrická veličina, která je již závislá na vzdálenosti osvětlené plochy od zdroje světla, je osvětlení.

OSVĚTLENÍ *E* ZÁVISÍ NA ČÁSTI SVĚTELNÉHO TOKU $\Delta\Phi$, KTERÝ DOPADÁ KOLMO NA PLOCHU O OBSAHU ΔS. JE DEFINOVÁNO VZTAHEM

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}; \tag{2}$$

$[E] = 1\mathrm{lx}$ (LUX).

Ze zkušenosti víme, že osvětlení plochy se s rostoucí vzdáleností této plochy od zdroje světla rychle zmenšuje. Závisí i na úhlu α, pod nímž světlo na danou plochu dopadá (viz obr. 288). Nejlépe je osvětlena plocha, na kterou dopadají světelné paprsky kolmo. Jsou-li paprsky s plochou rovnoběžné, osvětlení plochy je nulové.

Uvědomíme-li si, že element prostorového úhlu $\Delta\Omega$ je definován vztahem

$$\Delta\Omega = \frac{\Delta S}{r^2}, \tag{3}$$

můžeme osvětlení definované vztahem (2) vyjádřit ve tvaru $E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\Omega . r^2}$. Použijeme-li ještě definiční vztah svítivosti (1), můžeme pro **KOLMÉ** osvětlení dané plochy ve vzdálenosti *r* od zdroje psát vztah ve tvaru

$$E = \frac{I}{r^2} . \qquad (4)$$

Budeme-li chtít do našich úvah zahrnout i úhel α , pod kterým dopadají paprsky na uvažovanou plochu ΔS, je nutné analyzovat situaci podle obr. 289. Plocha ΔS, na kterou dopadá světlo pod obecným úhlem α , se jeví zdánlivě větší, než plocha $\Delta S'$, na níž dopadá světlo kolmo. Pro plochu $\Delta S'$ tedy můžeme psát

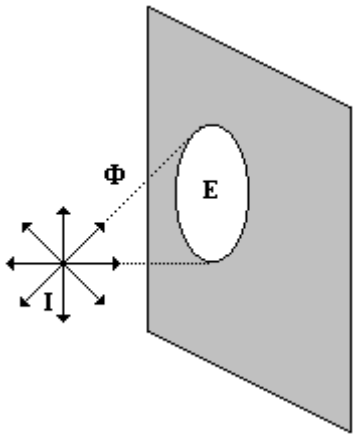
$$\Delta S' = \Delta S \cos\alpha . \qquad (5)$$

Vzhledem k tomu, že na plochu $\Delta S'$ dopadají paprsky kolmo, převedli jsme obecný případ dopadu světla na určitou plochu na případ kolmého dopadu světla na jinou plochu. A to již umíme řešit.

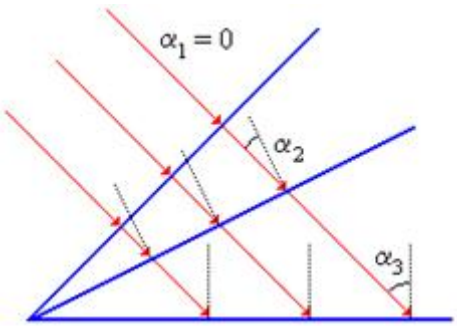
Zahrnutím vztahu (5) do vztahů (2) a (3) získáme pro osvětlení *E* dané plochy ve vzdálenosti *r* od zdroje světla se svítivostí *I*, na kterou dopadají paprsky pod úhlem α , vztah

$$E = \frac{I \cos\alpha}{r^2} . \qquad (6)$$

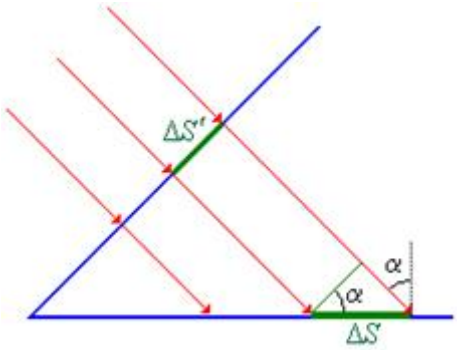
I zde stejně jako v jiných částech optiky je úhel α úhel mezi dopadajícím paprskem a kolmicí dopadu vztyčenou v místě dopadu paprsku.



Obr. 287



Obr. 288



Obr. 289

Na vztahu (6) je založeno měření osvětlení, které je z hlediska potřeb praxe nejdůležitější fotometrickou veličinou. K měření se obvykle používají přístroje založené na přímé přeměně energie elektromagnetického záření v elektrickou energii (tzv. fotoelektrický jev).

Samostatný přístroj pro měření osvětlení se nazývá **luxmetr**. Často je však čidlo při měření osvětlení (resp. světelného toku) zabudováno do optických přístrojů (fotografické přístroje, videokamery, ...). Dostatečné osvětlení patří k základním požadavkům na hygienu práce a jeho hodnota je stanovena normami.

Např. ke čtení je nutné osvětlení 500 lx, rýsování (montáž drobných objektů, ...) vyžaduje 1500 lx, k osvětlení schodiště stačí 15 lx. Slunce za jasného dne dokáže způsobit osvětlení až 50000 lx, svíčka ve vzdálenosti 30 cm dává osvětlení 10 lx, ...

Citlivost oka je značná a je schopno rozlišit předměty již při osvětlení $3.10^{-5}\,\mathrm{lx}$.

Veličina, která se nejvíce blíží tomu, co v běžném životě chápeme jako *jas*, je **luminance** *L*.

LUMINANCE L JE DEFINOVÁNA JAKO PODÍL ČÁSTI SVĚTELNÉHO TOKU $\Delta\Phi$ DOPADAJÍCÍ NA PLOCHU ΔS V PROSTOROVÉM ÚHLU $\Delta\Omega$ POD ÚHLEM α A TÉTO PLOCHY ΔS, TOHOTO PROSTOROVÉHO ÚHLU $\Delta\Omega$ A KOSINU ÚHLU α. PLATÍ TEDY VZTAH

$$L = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S.\Delta\Omega.\cos\alpha}; \tag{7}$$

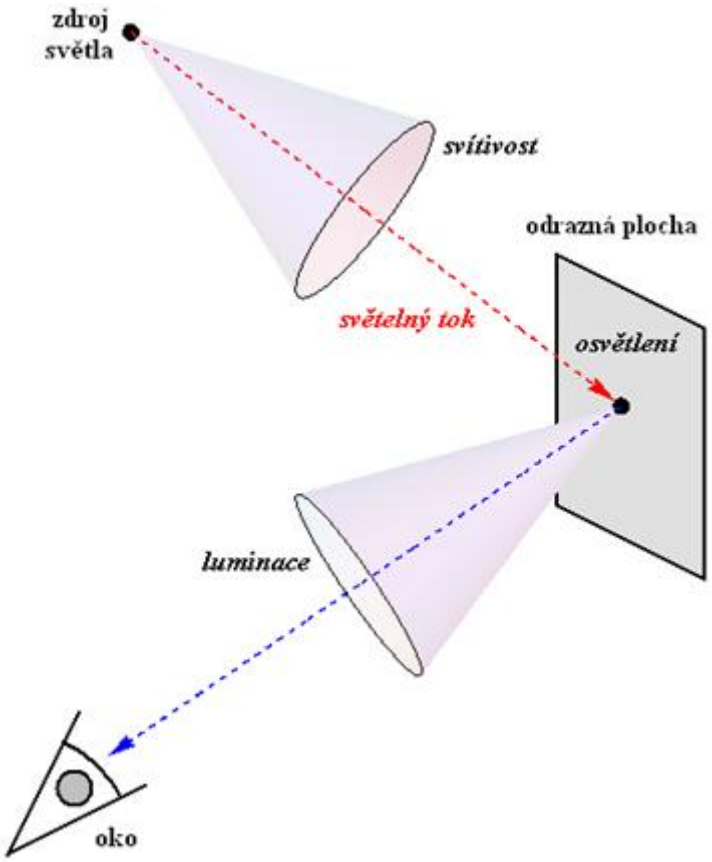
$[L] = \mathrm{lm.sr^{-1}m^{-2}} = \mathrm{cd.m^{-2}}$.

S využitím definičního vtahu (1) svítivosti *I* lze vztah (7) vyjádřit v ekvivalentním tvaru

$$L = \frac{\Delta I}{\Delta S.\cos\alpha}. \tag{8}$$

Luminance je tedy vlastně jakási „síla“ světla odraženého od plochého difúzního předmětu (papír, plátno, ...) nebo vyzářeného plochým zdrojem světla (televize, monitor, ...). Udává tedy svítivost uvedeného „zdroje“ světla (odrazná deska nebo plochý zdroj světla) s plochou o obsahu $1\,\mathrm{m^2}$. Zajímá nás tedy jen „hustota světelných paprsků“ (tj. svítivost) vztažená na obsah plochy a ne „počet světelných paprsků“ (tj. světelný tok).

Schématicky je znázorněn vztah fotometrických veličin na obr. 290.



Obr. 290

Typické hodnoty luminance jsou uvedeny v tab. 5, níž jsou hodnoty pro různé druhy papíru uvedeny při osvětlení 400 lx.

Situace	$\frac{L}{\mathrm{cd.m^{-2}}}$

povrch Slunce	1650000000
slunná pláž	15000
40 W zářivka	5000
bílý papír (odrazivost 0,8)	50
šedý papír (odrazivost 0,4)	25
černý papír (odrazivost 0,04)	2,5

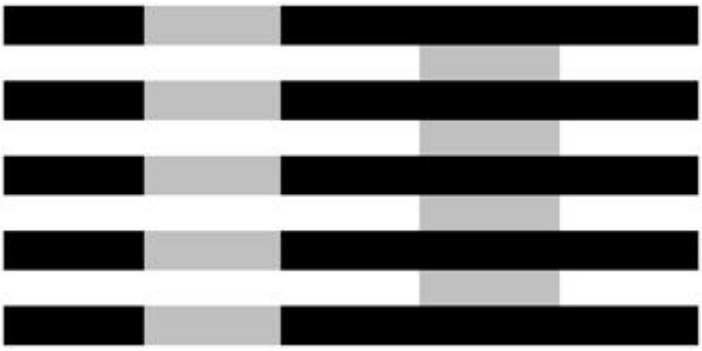
tab. 5

Poslední veličinou, která patří mezi fotometrické veličiny a která poskytuje doplňující pohled na běžně užívaný pojem *jas*, je veličina **brightness**.

Brightness je subjektivní dojem, který v člověku vyvolává pozorování předmětu, který má určitou luminanci. Brightness se často zaměňuje s luminancí, ale tyto dvě veličiny je nutné odlišovat. Daná luminance totiž může vyvolávat různé dojmy brightness.

To znamená, že z těchto dvou veličin, které obě patří mezi subjektivní veličiny, je luminance „objektivnější“.

Brightness závisí na aktuálním stavu lidského oka (stav duhovky, velikost vstupní pupily, ...), ale i na kontextu a okolí pozorovaného předmětu (tmavý předmět pozorovaný na světlém pozadí se zdá tmavší, ...). Na tomto principu je založena i celá řada optických klamů. Jeden z nich je zobrazen na obr. 291: šedé obdélníky v černých pruzích se zdají světlejší, než tou samou barvou nakreslené obdélníky v bílých pruzích. Všechny šedé obdélníky přitom mají stejnou luminanci.



Obr. 291

V barevném prostoru RGB modelu může být brightness vypočítán jako aritmetický průměr μ hodnot červené souřadnice R, zelené souřadnice G a modré souřadnice B. Tedy platí

$$\mu = \frac{R+G+B}{3}. \qquad (9)$$

Ačkoliv by se mohlo zdát, že μ je absolutní číslo, je nutné si uvědomit, že barevný prostor RGB je relativní. Proto i číslo vypočítané na základě relativních barevných souřadnic je relativní.

Pro představu uvedeme konkrétní příklad:

Běžná žárovka s výkonem 100 W má světelný výkon (světelný tok) zhruba 1700 lm. Znamená to, že celkový světelný tok vyzařovaný všemi směry je 1700 lm. Tato žárovka má tedy svítivost $\frac{1700}{4\pi}\,\mathrm{cd} \doteq 135\,\mathrm{cd}$ za předpokladu, že svítí všemi směry stejně. To ovšem není pravda, neboť směrem k patici žárovky vyzařuje méně světla, než na opačnou stranu. Právě vypočítaná hodnota svítivosti je tedy průměrná svítivost - směrem k patici bude nižší, směrem opačným bude vyšší.

Pokud tato žárovka osvětluje kolmo předměty ve vzdálenosti 2 metry od ní, je jejich osvětlení

$\frac{135}{2^2}\,\mathrm{lx} \doteq 34\,\mathrm{lx}$, což je hodnota velmi malá (zhruba osvětlení chodby, aby člověk viděl na schody, na čtení je to málo). Pokud bude touto žárovku v uvedené vzdálenosti osvětlován bílý papír s odrazivostí 0,8, bude jeho luminance přibližně $4{,}3\,\mathrm{cd\,m^{-2}}$.

© 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.