Fotometrie a kolorimetrie

FOTOMETRIE

75,0 **Vnímání světla.** F o t o m e t r i e je část optiky, která se zabývá světlem z hlediska jeho působení na lidský zrak. Velikost (kvantitu) tohoto působení vyjadřujeme pomocí *fotometrických veličin*. Tyto veličiny jsou psychofyziologickou obdobou příslušných veličin fyzikálních. Nutnost zavedení fotometrických veličin

se spatřuje v tom, že lidský zrak nehodnotí velikost určitého světelného vjemu úměrně k energii nebo výkonu, jimiž byl vjem způsoben. Je to důsledek jednak různé citlivosti buněk sítnice k záření různých vlnových délek, jednak složitého psychofyziologického děje, jímž se světelný podnět mění v oku, optických nervových drahách a mozkové kůře v komplex nervových podráždění, jejichž výsledným subjektivním korelátem je zrakový vjem*).

Kvalitativní stránkou světelných vjemů, jež spojujeme s pojmem barvy, se zabývá kolorimetrie.

Vnímání světla se vyznačuje některými zvláštnostmi, na které musíme brát v praktické fotometrii zřetel. Uvedeme některé z nich.

Důležitou vlastností zraku je schopnost *adaptace*. Rozumíme tím automatické přizpůsobování citlivosti sítnice jasu a barvě zorného pole. Tímto dějem se při velkých jasech citlivost snižuje, při nepatrných jasech zvyšuje; to umožňuje vidění při velkém rozsahu jasů (až 10^{14}) bez poškození zrakového orgánu. V praxi rozeznáváme adaptaci na světlo, která nastává při jasu větším než několik cd m^{-2} **), např. při denním světle, a adaptaci na tmu, např. v noci. Adaptační děj trvá při přechodu ze tmy do světla asi 2 až 3 min, při přechodu ze světla do tmy až 1 h. Rychlé střídání jasů v zorném poli zrak unavuje, protože se oko nestačí adaptovat.

Adaptačnímu ději napomáhá *zornicový reflex*, jímž se automaticky mění průměr zornice v poměru asi 1 : 4.

V sítnici oka jsou uloženy dva druhy světlocitlivých buněk, a to čípky a tyčinky. Vidění, jehož se účastní převážně jen čípky, se nazývá *fotopické* (denní). Nastává při adaptaci oka na světlo a je to nejběžnější a prakticky nejdůležitější druh vidění. Protože jsou čípky nahromaděny hlavně uprostřed sítnice na žluté skvrně a protože každý čípek má samostatné optické nervové vlákno vedoucí do mozku, je fotopické vidění ostré. Fotopické vidění je dále barevné, protože v čípcích jsou uložena barviva působící jako barevné filtry, a to umožňuje rozeznávat světla různých vlnových délek tak, že jim přisuzujeme různé barevné tóny.

Není-li nic jiného udáno, vztahují se fotometrické veličiny vždy na fotopické vidění. Tuto úmluvu budeme dodržovat i v tomto textu.

Při adaptaci na tmu přejde oko na vidění *skotopické* (noční), jehož se účastní převážně jen tyčinky. Protože tyčinky jsou rozptýleny hlavně v periferních (okrajových) částech sítnice a jsou připojeny ke zrakovému nervu po skupinách (asi 100 tyčinek k jednomu vláknu), je skotopické vidění neostré (srov. kr. 74,0). Tyčinky nemají schopnost rozlišovat barvy, a proto je skotopické vidění bezbarvé (černobílé).

Kontrolní otázky

1. Vyložte, čím se zabývá fotometrie a kolorimetrie.
2. Proč se ve fotometrii zavádějí zvláštní fotometrické veličiny?
3. Co je to adaptace a zornicový reflex?
4. Vyjmenujte vlastnosti fotopického vidění a srovnejte s viděním skotopickým.

---

*) Podobnou situaci jsme poznali již ve fyziologické akustice.

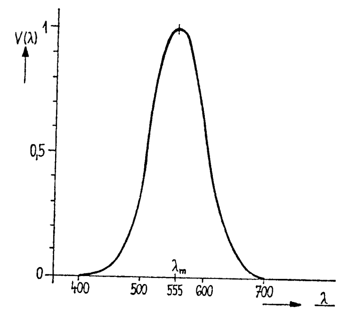
**) O veličině jas viz kr. 75,3.

75,1 Normální fotometrický pozorovatel. Protože citlivost zrakového orgánu k různým vlnovým délkám světla se u různých osob značně liší, ukázalo se nutné zjednodušit situaci zavedením normálního fotometrického pozorovatele. Je to myšlená osoba, jejíž zrak má spektrální citlivost stanovenou mezinárodní úmluvou. Hodnoty této citlivosti byly zjištěny měřením velkého počtu osob a přijaty Mezinárodní komisí pro osvětlování CIE*). Není-li řečeno nic jiného, vztahují se všechny fotometrické veličiny vždy na normálního fotometrického pozorovatele.

Citlivost normálního fotometrického pozorovatele je největší pro světlo vlnové délky asi $\lambda_m = 555$ nm při fotopickém vidění; uvedená vlnová délka se nazývá základní. Od této vlnové délky na obě strany spektra citlivost klesá, až při vlnových délkách kratších než asi 380 nm a delších než asi 760 nm je prakticky nulová. Dopadá-li tedy do oka záření vlnové délky jiné než základní, avšak v mezích od 380 do 760 nm, vyvolá světelný vjem, jehož intenzita je menší než intenzita vjemu, který vyvolá záření téže spektrální koncentrace zářivého výkonu (kr. 70,5), avšak základní vlnové délky.

Podíl spektrální koncentrace zářivého výkonu při základní vlnové délce $P_\lambda(\lambda_m)$ a spektrální koncentrace zářivého výkonu při uvažované vlnové délce $P_\lambda(\lambda)$, jež za stanovených fotometrických podmínek budí stejně intenzívní světelný vjem, se nazývá *poměrná světelná účinnost monochromatického záření* $V(\lambda)$. Je zřejmé, že $V(555\ \text{nm}) = 1$, $V(380\ \text{nm}) \approx V(760\ \text{nm}) \approx 0$.

Poměrná světelná účinnost monochromatického záření vyjadřuje tedy relativní citlivost oka ve srovnání s citlivostí při základní vlnové délce. Hodnoty poměrných světelných účinností (pro fotopické vidění jsou na obr. 75,1.**)



Obr. 75,1 Spektrální citlivost normálního fotometrického pozorovatele

Schopnost zářivého výkonu P (kr. 70,3) dopadajícího do oka vyvolat zrakový vjem vyjadřuje fotometrická veličina *světelný tok* Φ. Je zřejmé, že světelný tok závisí na spektrálním složení záření, neboť různé vlnové délky přispívají k pozoro-

---

*) CIE, zkratka pro Commission Internationale de l'Eclairage.

**) Při skotopickém vidění se citlivost přesouvá směrem ke kratším vlnovým délkám s maximem asi 507 nm. Tento jev pozoroval a popsal Jan Evangelista Purkyně (Purkyňův jev).

vanému světelnému toku nestejnou měrou, tj. podle svých poměrných světelných účinností.

Podíl světelného toku Φ a odpovídajícího zářivého výkonu P je *světelná účinnost záření* K:

$$K = \frac{\Phi}{P}\,. \tag{1}$$

Je zřejmé, že *největší světelnou účinnost* při fotopickém vidění má monochromatické světlo základní vlnové délky 555 nm, a to

$$K_m = 683 \text{ lm W}^{-1}\,. \tag{2}$$

Tuto hodnotu lze určit z definice lumenu a z hodnot poměrné světelné účinnosti monochromatického záření za použití Planckova zákona.

Světelná účinnost monochromatického záření $K(\lambda)$ vlnové délky λ, jehož poměrná světelná účinnost je $V(\lambda)$, je vzhledem k rov. 1 a 2

$$K(\lambda) = K_m\, V(\lambda)\,. \tag{3}$$

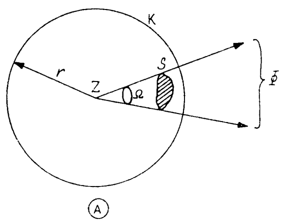
Kontrolní otázky

1. Co je normální fotometrický pozorovatel a proč jej zavádíme?
2. Definujte veličiny uvedené v tomto kroku.
3. Které světlo má největší světelnou účinnost a čemu se tato účinnost rovná?

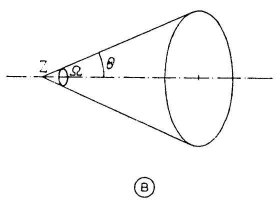
75,2 Záření bodového zdroje. Ze zdroje vychází obecně světlo všemi směry, tj. do celého prostoru obklopujícího zdroj. Světelný tok vyzařovaný do celého prostoru se nazývá *celkový světelný tok* Φ_c zdroje. Jsou-li rozměry zdroje tak malé, že je lze ve fotometrických úvahách zanedbat, pokládáme zdroj za bodový.

Z celkového světelného toku Φ_c bodového zdroje můžeme vymezit určitou část Φ, vysílanou zdrojem do některé části prostoru. Provedeme to tak, že do zdroje Z umístíme vrchol myšleného kužele, jehož plášť obaluje svazek paprsků směřujících do určené části prostoru (obr. 75,2A). Rozbíhavost kužele paprsků lze vyjádřit prostorovým úhlem Ω (tab. 024), který je určen vztahem

$$\Omega = \frac{S}{r^2}\,. \tag{4}$$



Obr. 75,2A Prostorový úhel a světelný tok



Obr. 75,2B K rov. 5

V tomto vztahu znamená S plošný obsah obrazce, který svazek paprsků vymezuje na povrchu koule K o poloměru r, jejíž střed je ve zdroji (tj. ve vrcholu prostorového úhlu).

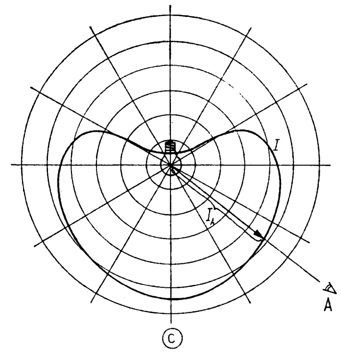
Celému prostoru přísluší tzv. plný prostorový úhel $\Omega = 4\pi$ sr, neboť plošný obsah obrazce vymezeného na kouli pak zahrnuje celý povrch koule $S = 4\pi r^2$. Obdobně přísluší poloprostoru prostorový úhel $\Omega = 2\pi$ sr. Speciálně pro rotační kužel, jehož povrchové přímky svírají s osou úhel Θ, lze odvodit vztah často užívaný ve fotometrii (obr. 75,2B)

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos\Theta)\,. \tag{5}$$

Abychom vyjádřili, jak je světelný tok rozložen do různých směrů v prostoru, zavedeme veličinu *svítivost* I vztahem*)

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}\,, \tag{6}$$

kde $d\Phi$ je elementární světelný tok vyzařovaný do elementárního prostorového úhlu $d\Omega$ v daném směru. Názorně si můžeme představit svítivost v daném směru jako vektor, jehož modul (velikost) je dán rov. 6 a jehož směr je totožný se směrem pa-



Obr. 75,2C Čára svítivosti

prsků. V tomto smyslu hovoříme někdy o *vektoru svítivosti*. Koncové body vektorů svítivosti vyplňují plochu, zvanou *plocha svítivosti*. Často postačí znát *čáru svítivosti*, tj. průsečnici plochy svítivosti s některou význačnou rovinou procházející světelným zdrojem (zpravidla rovinou procházející osou souměrnosti zdroje). Plocha nebo čára svítivosti se užívá ke grafickému znázornění rozložení světelného toku zdroje (obr. 75,2C; např. ve směru k pozorovateli v poloze A je svítivost I_A).

Z rov. 6 lze integrací přes prostorový úhel Ω vypočítat světelný tok vyzařovaný do tohoto prostorového úhlu:

$$\Phi = \int_{(\Omega)} I\, d\Omega\,. \tag{7}$$

*) Tento vztah není definicí svítivosti, protože svítivost je základní veličina; užíváme jej z didaktických důvodů (viz tab. 007).

Speciálně pro celkový světelný tok Φ_c (tj. vysílaný do celého prostoru) máme pak

$$\Phi_c = \int_0^{4\pi} I \, \mathrm{d}\Omega \,. \tag{8}$$

Praktické použití rov. 7 a 8 však naráží na potíže, neboť svítivost zpravidla nelze vyjádřit analytickou rovnicí. V těch případech je nutno integrovat numericky nebo graficky (k tomu účelu bylo vypracováno několik metod). Pouze v případě *rovnoměrného zdroje*, tj. zdroje, jehož svítivost je ve všech směrech stejná, dostáváme z rov. 7

$$\Phi = I\Omega \tag{9}$$

a pro celkový světelný tok z rov. 8

$$\Phi_c = 4\pi I \,. \tag{10}$$

Z rov. 10 vidíme, že celkový světelný tok, vysílaný zdrojem s rovnoměrnou (nebo průměrnou) svítivostí 1 cd, je 12,56 lm.

Kontrolní otázky

1. Co je celkový světelný tok?
2. Jaký prostorový úhel přísluší celému prostoru a poloprostoru?
3. Definujte vektor, plochu a čáru svítivosti.
4. Jaké vztahy lze napsat mezi veličinami svítivost a světelný tok?

75,3 Záření plošného zdroje.

Záření plošného zdroje. Skutečné zdroje vyzařují světlo vždy plochou konečné velikosti. Nelze-li tuto plochu zanedbat jako malou, hledíme na těleso jako na plošný zdroj. Přitom si představujeme, že zřídlem světla je viditelný povrch tělesa (tedy např. i osvětlený povrch papíru považujeme za zdroj světla).

Svítivost plošného zdroje libovolného tvaru určíme stejně jako v předešlém kroku, neboť si stačí pouze představit, že pozorovatel se nachází v tak velké vzdálenosti, že rozměry zdroje se stanou zanedbatelnými a zdroj pak pokládáme za bodový.

Jinak dojdeme ke svítivosti plošného zdroje z představy, že jeho plochu S rozdělíme na elementární plošky dS; svítivost každé plošky v daném směru označíme jako elementární svítivost dI. Svítivost celého zdroje v daném směru je pak dána integrálem elementárních svítivostí v témž směru přes plochu S, tj.

$$I = \int_{(S)} \mathrm{d}I \,.$$

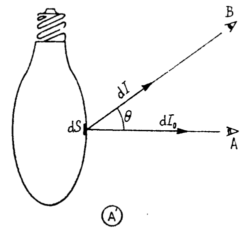
Pozorujeme-li plošný zdroj, může být každé jeho místo světlejší, stejně světlé nebo tmavší než jiné místo téhož zdroje nebo než jiné těleso. Veličina, která nám umožňuje toto vizuální srovnávání světlostí dvou ploch, se nazývá *jas* (luminance) L.

Uvažujme nejprve podle obr. 75,3A elementární plošku dS na povrchu plošného zdroje tak, že pozorovatel na ni hledí kolmo (poloha A). Označíme-li elementární svítivost plošky ve směru k pozorovateli (v tomto případě je to kolmá elementární svítivost) dI_0, definujeme *kolmý jas* L_0 plošky vztahem

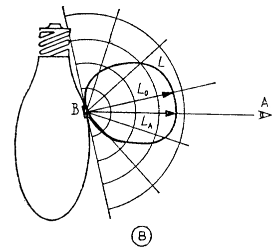
$$L_0 = \frac{\mathrm{d}I_0}{\mathrm{d}S} \,. \tag{11}$$

Ve speciálním případě, kdy plošný a přitom rovinný zdroj velikosti S má ve všech svých bodech stejnou kolmou svítivost I_0, je kolmý jas celého zdroje stejný a rovná se

$$L_0 = \frac{I_0}{S} \,. \tag{12}$$



Obr. 75,3A Svítivost v různých směrech



Obr. 75,3B Jas v různých směrech

Plošku dS však můžeme pozorovat i z jiného směru, určeného úhlem Θ (obr. 75,3A, poloha B). V tom případě se nám ploška jeví ve zdánlivé velikosti dS' = = d$S \cos \Theta$. Jas L plošky v daném směru je pak podle rov. 11

$$L = \frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}S \cos \Theta} \,, \tag{13}$$

kde dI je svítivost plošky v daném směru. Má-li rovinný zdroj ve všech bodech stejnou svítivost I v daném směru, je jeho jas v tomto směru po celé ploše stejný a rovná se podle rov. 12

$$L = \frac{I}{S \cos \Theta} \,. \tag{14}$$

Rozložení jasu do různých směrů (v rovině) znázorňujeme *čárou jasu* (obr. 75,3B; např. ve směru k pozorovateli A je jas L_A).

Kontrolní otázky

1. Co je plošný a bodový zdroj?
2. Jak se určí svítivost plošného zdroje?
3. Definujte veličinu jas.

75,4 **Kosinový zářič.** Většina plošných světelných zdrojů má tu vlastnost, že jejich jas pozorovaný v kterémkoli směru je aspoň přibližně konstantní, tj. nezávisí na úhlu Θ, pod nímž vystupují paprsky ze zdroje k pozorovateli. Jas v libovolném směru je pak roven také kolmému jasu, tj. $L = L_0$. Pro každou elementární plošku dS zdroje pak dostáváme z rov. 11 a 13 závislost elementární svítivosti dI na úhlu Θ ve tvaru

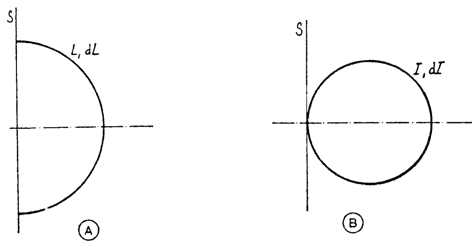
$$\mathrm{d}I = \mathrm{d}I_0 \cos \Theta\,, \tag{15}$$

kde dI_0 je kolmá svítivost plošky.

Pro rovinný plošný zdroj obdržíme z rov. 12 a 14 obdobně

$$I = I_0 \cos \Theta\,. \tag{16}$$

Vztahy 15 a 16 se někdy nazývají Lambertův zákon. Rovinné plošné zdroje, pro které platí Lambertův zákon, takže jejich jas je ve všech směrech konstantní, se nazývají *kosinové zářiče* (Lambertovy zářiče). Čáry jasu a svítivosti kosinového zářiče jsou kružnice; viz obr. 75,4 A a 75,4 B.



Obr. 75,4A, B Čáry jasu a svítivosti kosinového zářiče

Světelný tok kosinového zářiče do poloprostoru lze vyjádřit pomocí kolmé svítivosti zářiče I_0. Nejprve dosadíme do rov. 16 z rov. 5, takže máme $I = I_0(1 - \Omega/2\pi)$. Dosazením tohoto vztahu do rov. 7 a integrací přes prostorový úhel 2π dostaneme snadno

$$\Phi = \pi I_0\,, \tag{17}$$

tj. světelný tok kosinového zářiče do poloprostoru se rovná π-násobku jeho kolmé svítivosti.

Kontrolní otázky

1. Uveďte Lambertův zákon a) pro obecný zdroj, b) pro rovinný zdroj.
2. Co je kosinový zářič?
3. Čemu se rovná světelný tok kosinového zářiče?
4. Nakreslete čáru jasu a čáru svítivosti kosinového zářiče a vyložte.

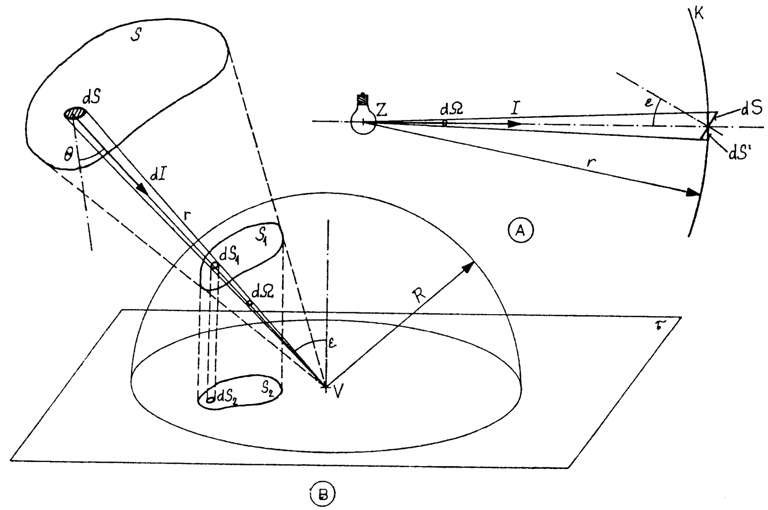
75,5 **Osvětlenost.** Dopadá-li světelný tok na nějakou plochu, např. povrch tělesa, osvětluje ji. Intenzitu tohoto osvětlení v daném bodě plochy vyjadřuje fotometrická veličina *osvětlenost* (osvětlení, intenzita osvětlení) E. Je definována jako podíl elementárního světelného toku dΦ, který dopadá na element plochy obsahující daný bod, a plošného obsahu dS tohoto elementu:

$$E = \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}S}\,. \tag{18}$$

Je-li světelný tok Φ rovnoměrně rozložen po osvětlované ploše S nebo počítáme-li střední osvětlenost, platí vztah

$$E = \frac{\Phi}{S}\,. \tag{19}$$

Osvětlenost bodovým zdrojem. Abychom určili osvětlenost E elementární plošky dS, která je ze vzdálenosti r osvětlena bodovým zdrojem Z, jehož svítivost ve směru k plošce je I, opíšeme podle obr. 75,5A ze zdroje poloměrem r kouli K.



Obr. 75,5A, B K osvětlenosti bodovým a plošným zdrojem

Na ní vytíná svazek paprsků dopadajících na plošku dS obrazec plošného obsahu dS' = d$S \cos \varepsilon$, kde ε je úhel dopadu paprsků. Světelný tok dopadající na plošky dS' a dS je stejný a podle rov. 6 se rovná d$\Phi = I$ dΩ. Prostorový úhel dΩ je podle rov. 4 roven dΩ = dS'/r^2 = d$S \cos \varepsilon/r^2$, takže d$\Phi = I$ d$S \cos \varepsilon/r^2$. Dosazením do rov. 18 máme

$$E = \frac{I \cos \varepsilon}{r^2}\,. \tag{20}$$

Vidíme, že osvětlenost bodovým zdrojem klesá s dvojmocí vzdálenosti osvětlované plochy od zdroje. Tento vztah se nazývá základní fotometrický zákon.

Osvětlenost plošným zdrojem. Abychom stanovili osvětlenost E v některém bodě V osvětlované plochy, působenou plošným zdrojem S (obr. 75,5B), rozdělíme zdroj na elementární plošky dS. Každá ploška by sama o sobě způsobila v bodě V jistou elementární osvětlenost dE. Podle rov. 20 je $dE = dI \cos \varepsilon / r^2$, kde dI je svítivost plošky ve směru k bodu V, ε je úhel dopadu světla na osvětlovanou plochu v bodě V a r je vzdálenost plošky dS od bodu V. Z rov. 13 plyne, že $dI = L dS \cos \Theta$, kde L je jas plošky ve směru k bodu V, Θ je úhel, pod nímž světlo vystupuje z plošky směrem k bodu V. Dosazením za dI dostáváme $dE = L dS \cos \Theta \cos \varepsilon / r^2$. Avšak součin $dS \cos \Theta = dS'$ je zdánlivá velikost plošky pozorované z bodu V (srov. kr. 75,3). Proto výraz $dS'/r^2 = dS \cos \Theta / r^2 = d\Omega$ je podle rov. 4 prostorový úhel, pod kterým vidíme z bodu V plošku dS. Tento prostorový úhel vytíná na povrchu myšlené koule opsané z bodu V poloměrem R obrazec plošného obsahu $dS_1 = R^2 \, d\Omega = R^2 \, dS \cos \Theta / r^2$, takže $dE = L dS_1 \cos \varepsilon / R^2$. Avšak výraz $dS_1 \cos \varepsilon = dS_2$ je obsah kolmého průmětu plošky dS_1 do roviny τ, která je tečnou rovinou osvětlované plochy v bodě V, takže $dE = L dS_2 / R^2$. Podobně lze sestrojit i průměty ze všech ostatních plošek zdroje, jež dohromady tvoří na rovině τ obrazec plošného obsahu S_2. Celkovou osvětlenost E dostaneme jako integrál elementárních osvětleností dE přes plochu S_2; protože $R =$ konst, máme

$$E = \frac{1}{R^2} \int_{(S_2)} L dS_2 \,. \tag{21}$$

Výpočet uvedeného integrálu je obecně velmi obtížný. Pouze pro kosinový zářič ($L =$ konst, viz kr. 75,4) dostáváme jednoduchý vztah

$$E = \frac{L S_2}{R^2} \,. \tag{22}$$

Tímto vztahem se výpočet osvětlenosti plošným zdrojem rovnoměrného jasu L převádí na geometrickou úlohu stanovení plošného obsahu průmětu S_2.

Osvětlenost nekonečně velkým plošným zdrojem. Dopadá-li do uvažovaného bodu V osvětlované plochy světlo z celého poloprostoru, považujeme zdroj za nekonečně velký (např. světlo dopadající na vodorovnou rovinu z ničím nestíněné oblohy). V tom případě je zřejmě $S_2 = \pi R^2$, takže speciálně pro kosinový zářič s konstantním jasem L máme podle rov. 22

$$E = \pi L \,, \tag{23}$$

tj. osvětlenost nekonečně velkým zdrojem s rovnoměrným jasem se rovná π-násobku jeho jasu.

V praxi lze za nekonečně velké považovat zdroje, jejichž rozměry jsou značně větší než vzdálenost zdroje od osvětlované plochy (např. rozlehlé svítící stropy).

Vidíme, že osvětlenost takovými zdroji nezávisí na vzdálenosti osvětlované plochy od zdroje, tj. nelze zde aplikovat základní fotometrický zákon (rov. 20).

Rozložení osvětlenosti na dané ploše lze znázornit *izoluxami*, tj. čarami, jež jsou množinami bodů se stejnou osvětleností.

Kontrolní otázky

1. Definujte veličinu osvětlenost a její jednotku SI.
2. Odvoďte a vyslovte základní fotometrický zákon.
3. Na základě obr. 75,5B odvoďte vztah pro výpočet osvětlenosti plošným zdrojem.
4. Odvoďte vztah pro osvětlenost nekonečně velkým plošným zdrojem.
5. Co jsou izoluxy?

75,6 Světelné vlastnosti těles. V kr. 72,1 jsme se zabývali odrazem světla na rozhraní dvou prostředí. Uvažovali jsme přitom rozhraní opticky hladké, tj. takové, jehož nerovnosti jsou mnohem menší než vlnová délka světla. V tomto případě se dopadající světlo odráží podle zákona odrazu (rov. 1/72); takový odraz se nazývá *zrcadlový*. Plocha, na níž nastává zrcadlový odraz, se pozorovateli jeví lesklá.

Dopadá-li světlo na povrch těles, jehož nerovnosti jsou řádově stejné nebo větší než vlnová délka světla, přitom však malé proti vzdálenosti, z níž těleso pozorujeme, pak se světlo při odrazu rozptyluje do různých směrů a povrch se jeví *matný*. Tento druh odrazu se označuje jako *rozptylný* (difúzní). Většina těles odráží světlo zčásti zrcadlově, zčásti rozptylně, takže jejich odraz je smíšený.

Abychom vyjádřili schopnost povrchu tělesa odrážet dopadající světlo, zavádíme veličinu *reflektance* (činitel odrazu) ϱ jako podíl odraženého světelného toku ${}^{r}\Phi$ a dopadajícího světelného toku Φ:

$$\varrho = \frac{{}^{r}\Phi}{\Phi} \,. \tag{24}$$

Reflektance závisí na spektrálním složení, úhlu dopadu a polarizaci světla.

Část světla projde tělesem a na druhé straně z něho vystoupí. Prochází-li světlo tělesem tak, že se přitom nemění kmitočet jeho monochromatických složek (tj. nedochází-li k fotoluminiscenci), mluvíme o *prostupu světla*. Nedochází-li při prostupu k rozptylu světla, jde o prostup přímý; jestliže se světlo rozptyluje (odrazem a ohybem na částečkách rozmístěných v látce), mluvíme o prostupu rozptylném. Smíšený prostup je současný přímý i rozptylný prostup.

Těleso, které propouští světlo převážně přímým prostupem, je *průhledné*; lze jím zřetelně pozorovat vzdálené předměty. Těleso propouštějící světlo převážně rozptylně, je *průsvitné*; vzdálené předměty jím nelze pozorovat.

Schopnost tělesa propouštět světlo vyjadřuje veličina *transmitance* (činitel prostupu) τ, definovaná jako podíl světelného toku ${}^{t}\Phi$ z tělesa vystupujícího a světelného toku Φ na těleso dopadajícího:

$$\tau = \frac{{}^{t}\Phi}{\Phi} \,. \tag{25}$$

Transmitance závisí stejně jako reflektance na spektrálním složení, úhlu dopadu a polarizaci světla.

Ta část světelného toku, která se od tělesa neodrazí ani jím neprojde, se v tělese pohltí (absorbuje) a jeho zářivá energie se změní nejčastěji ve vnitřní energii, popř. v jinou formu energie.

Schopnost těles pohlcovat světlo charakterizujeme veličinou *absorptance* (činitel pohlcení) α, definovanou jako podíl světelného toku ${}^{a}\Phi$ tělesem pohlceného a světelného toku dopadajícího Φ:

$$\alpha = \frac{{}^{a}\Phi}{\Phi}\,. \tag{26}$$

Podobně jako reflektance a transmitance je i absorptance závislá na spektrálním složení, úhlu dopadu a polarizaci světla.

Z předešlého výkladu vidíme, že světelný tok dopadající na těleso se rozdělí na část odraženou, propuštěnou a pohlcenou. Podle principu zachování energie musí být součet těchto toků roven toku dopadajícímu. Z rov. 24 až 26 tak dostáváme důležitý vztah

$$\varrho + \tau + \alpha = 1\,. \tag{27}$$

Všimněme si nyní těles, jejichž úkolem je rozptylovat světlo odrazem nebo prostupem; taková tělesa se nazývají *rozptylovače* (difuzory). Omezíme se nejprve na rovinný rovnoměrný rozptylovač, tj. rozptylovač, jehož jas je ve všech směrech konstantní, a to při jakémkoli směru dopadu světla. Podle kr. 75,4 je rovinný rovnoměrný rozptylovač kosinovým zářičem.

Osvětlený rovinný rovnoměrný rozptylovač plošného obsahu S a rozptylující odrazem je zdrojem světelného toku ${}^{r}\Phi$, pro který podle rov. 24 a 19 platí ${}^{r}\Phi = \varrho E S$, kde E je osvětlenost rozptylovače. Dosadíme-li tento vztah za Φ do rov. 17, platné pro kosinový zářič, obdržíme pro *kolmou svítivost rovnoměrného rozptylovače* I_0 vztah

$$I_0 = \frac{\varrho E S}{\pi}\,. \tag{28}$$

Podobně odvodíme vztah pro kolmou svítivost rozptylovače rozptylujícího prostupem (místo rov. 24 použijeme rov. 25):

$$I_0 = \frac{\tau E S}{\pi}\,. \tag{29}$$

Pro *svítivost* I v libovolném směru dostáváme z rov. 26

$$I = \frac{\varrho E S \cos\Theta}{\pi}\,, \quad \text{resp.} \quad I = \frac{\tau E S \cos\Theta}{\pi}\,. \tag{30, 31}$$

Konečně dosazením rov. 30 a 31 do rov. 14 (nebo rov. 28 a 29 do rov. 12) obdržíme pro *jas* rovnoměrného rozptylovače

$$L = L_0 = \frac{\varrho E}{\pi}\,, \quad \text{resp.} \quad L = L_0 = \frac{\tau E}{\pi}\,. \tag{32, 33}$$

Rovnoměrný rozptylovač, který odráží, resp. propouští všechno dopadající světlo, se nazývá dokonalý. Platí pro něj vztahy 28 až 33, kam dosadíme $\varrho = 1$ nebo $\tau = 1$. Dokonalý rozptylovač rozptylující odrazem se oku jeví jako dokonale matná bílá plocha.

Ostatní rozptylovače (nerovnoměrné) lze z hlediska rozložení odraženého, resp. propuštěného světelného toku do různých směrů charakterizovat *činitelem jasu* β. Činitel jasu v daném bodě na povrchu rozptylovače, v daném směru a za daných podmínek definujeme jako podíl jasu povrchu L a jasu dokonalého rozptylovače L^* za předpokladu, že oba povrchy jsou osvětleny a pozorovány stejným způsobem:

$$\beta = \frac{L}{L^*}\,. \tag{34}$$

Kontrolní otázky

1. Uveďte příklady těles se zrcadlovým, rozptylným a smíšeným odrazem, s přímým, rozptylným a smíšeným prostupem.
2. Definujte veličiny reflektance, transmitance a absorptance. Jaký vztah mezi nimi platí?
3. Odvoďte vztahy pro kolmou svítivost, svítivost a jas rovnoměrného rozptylovače.
4. Co je dokonalý rozptylovač?
5. Co je činitel jasu?

75,7 Kolorimetrie. Barvou neboli barevným vjemem rozumíme vlastnost zrakového počitku, která umožňuje pozorovateli zjistit rozdíl mezi dvěma ploškami zorného pole, jež mají stejnou velikost, tvar i strukturu, přičemž tento rozdíl má stejnou povahu jako rozdíl, který by vznikl změnou spektrálního složení světla.

Světlo vnikající do oka a budící barevný vjem nazýváme *barevným podnětem*. Jeho barevná jakost, tzv. *chromatičnost*, je určena spektrálním složením, tj. podněty téhož spektrálního složení budí týž barevný vjem*). Avšak stejný barevný vjem může být vyvolán i podněty odlišného spektrálního složení. Tento jev se nazývá *metamerie*; podněty odlišného spektrálního složení, avšak působící týž barevný vjem, označujeme jako metamerní. Spektrální složení tedy nevystihuje bezprostředně chromatičnost podnětu, protože nepřihlíží k metamerii. Proto zavádíme zvláštní kolorimetrické soustavy, které umožňují popsat barevnou jakost podnětu s ohledem na metamerii, tj. tak, že stejným barevným vjemům příslušejí stejné hodnoty kolorimetrických veličin dané soustavy nezávisle na spektrálním složení podnětů.

Dnes se užívá *kolorimetrická soustava CIE*. Je založena na tom, že libovolný barevný podnět lze napodobit metamerním podnětem, skládajícím se z adiční

*) Zde i dále nebudeme přihlížet k rušivým vlivům barevné adaptace, únavy apod.

(tj. současně na totéž místo sítnice působící) směsi tří vhodně zvolených, tzv. *měrných světel* X, Y, Z *). Potřebná množství těchto světel X, Y, Z pak jednoznačně popisují chromatičnost podnětu a nazývají se *trichromatické složky*. Lze je určit jednak měřením, jednak výpočtem ze známého spektrálního složení podnětu. Přitom rozlišujeme podněty se spektrem čárovým a spojitým.

1. Složky podnětu s čárovým spektrem (obsahujícím ve viditelné oblasti n spektrálních čar) jsou dány vztahy

$$X = \sum_{1}^{n} F(\lambda)\,\bar{x}(\lambda)\,, \qquad Y = \sum_{1}^{n} F(\lambda)\,\bar{y}(\lambda)\,, \qquad Z = \sum_{1}^{n} F(\lambda)\,\bar{z}(\lambda)\,, \tag{35}$$

kde $F(\lambda)$ je některá energetická veličina příslušející spektrální čáře vlnové délky λ (např. zářivý výkon, viz kr. 70,3). Funkce $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ se nazývají *trichromatické členitele* kolorimetrické soustavy CIE. Jejich hodnoty byly zjištěny měřením velkého počtu osob.

2. Složky podnětu se spojitým spektrem určíme ze vztahů

$$X = \sum_{380\,\mathrm{nm}}^{760\,\mathrm{nm}} F(\lambda)\,\bar{x}(\lambda)\,\Delta\lambda\,,$$

$$Y = \sum_{380\,\mathrm{nm}}^{760\,\mathrm{nm}} F(\lambda)\,\bar{y}(\lambda)\,\Delta\lambda\,,$$

$$Z = \sum_{380\,\mathrm{nm}}^{760\,\mathrm{nm}} F(\lambda)\,\bar{z}(\lambda)\,\Delta\lambda\,, \tag{36}$$

kde funkce $F(\lambda)$ je některá spektrální veličina vyjadřující složení podnětu (např. spektrální koncentrace zářivého výkonu, viz kr. 70,5). Sumační interval $\Delta\lambda$ se zpravidla volí konstantní a rovný 10 nm. Sčítáme přes celou viditelnou oblast, tj. od 380 do 760 nm.

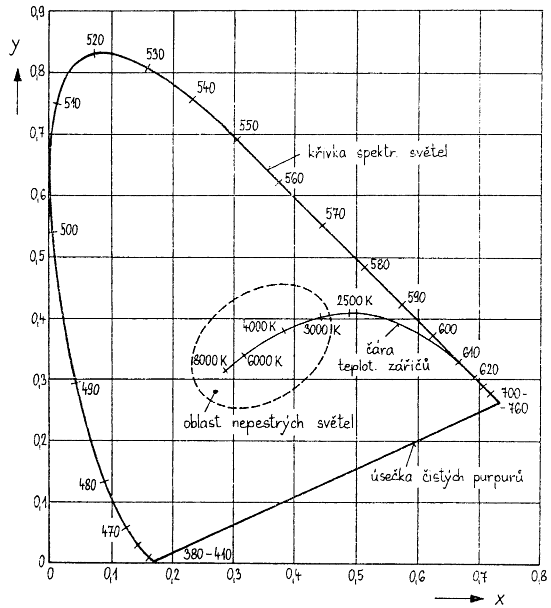
Je zřejmé, že chromatičnost lze znázornit bodem v prostorové souřadnicové soustavě $Oxyz$. Protože prostorové znázornění není praktické a protože mimoto bývá často známo pouze relativní spektrální složení podnětu, takže vypočítané složky mají rovněž relativní povahu, užívají se v praxi tzv. *trichromatické souřadnice* x, y, z. Jsou to poměry příslušných složek k součtu složek:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}\,, \qquad y = \frac{Y}{X + Y + Z}\,. \tag{37}$$

Souřadnice z se neudává, protože plyne ze vztahu $x + y + z = 1$. Pro výpočet souřadnic postačí dosadit do rov. 36 za $F(\lambda)$ relativní veličiny a vynechat násobení sumačním intervalem $\Delta\lambda$. Souřadnice popisují chromatičnost stejně jako složky, avšak na rozdíl od nich neobsahují informaci o kvantitě (množství) světla. Tu je možno v případě potřeby uvést dalším, samostatným údajem (např. údajem jasu).

*) Na stejné myšlence je založena např. barevná televize. Na obrazovce jsou plošky vydávající jen tři druhy světla (modré, zelené, červené), jež při pozorování z dostatečné vzdálenosti splývají a vytvářejí adiční směs.

S použitím trichromatických souřadnic lze chromatičnost znázornit bodem v rovinné soustavě souřadnic Oxy. Množina těchto bodů se nazývá *diagram chromatičnosti* (obr. 75,7). V diagramu vidíme především *křivku spektrálních světel*, tj. množinu chromatičností monochromatických světel; k jednotlivým bodům křivky jsou připsány příslušné vlnové délky. Krajní body křivky jsou spojeny *úsečkou čistých purpurů*; na ní leží chromatičnosti světel, jež vznikají adičním mísením krajního fialového a krajního červeného světla v různých poměrech. Uvnitř takto ohraničené plochy jsou chromatičnosti všech reálných podnětů. Čárkovaně je vyznačena oblast světel, jež mohou být považována za bílá. Čím více se bod vyjadřující chromatičnost daného podnětu blíží této oblasti, tj. čím více je vzdálen od křivky spektrálních světel a úsečky čistých purpurů, tím je sytost podnětu menší (tím je barva bledší). Největší možnou sytost mají tedy spektrální světla a čisté purpury. Vně ohraničené plochy jsou chromatičnosti myšlených světel, která nelze realizovat.



Obr. 75,7 Diagram chromatičnosti

Shoduje-li se chromatičnost daného podnětu s chromatičností záření černého tělesa při některé teplotě, pak ji lze vyjádřit také údajem termodynamické teploty černého tělesa; této teplotě pak říkáme *teplota chromatičnosti* T_c daného podnětu. Má-li např. žárovka $T_c = 2\,848$ K, značí to, že barevná jakost jejího světla se shoduje s barevnou jakostí světla vydávaného černým tělesem teploty $T = 2\,848$ K. Teplota

chromatičnosti světla vydávaného rozžhavenými tělesy je přibližně shodná s jejich skutečnou termodynamickou teplotou. Chromatičnosti teplotních zářičů vyjadřuje v diagramu chromatičnosti *čára teplotních zářičů* (obr. 75,7).

Světlo, jehož chromatičnost se jen přibližně shoduje s chromatičností černého tělesa při některé teplotě, charakterizujeme obecně *náhradní teplotou chromatičnosti* T_n. Např. má-li zářivka $T_n = 6\,500\,\mathrm{K}$, je barevná jakost jejího světla zhruba stejná jako jakost světla černého tělesa teploty $T = 6\,500\,\mathrm{K}$, avšak shoda není dokonalá (v diagramu neleží příslušný bod na křivce teplotních zářičů, nýbrž poblíže ní). Teplota chromatičnosti a náhradní teplota chromatičnosti se užívají namísto trichromatických souřadnic k vyjádření chromatičnosti světel, jež mohou být pokládána za bílá, např. k popisu světla běžných světelných zdrojů.

Až dosud jsme se zabývali barevnou jakostí světla, tj. chromatičností. Barevnou jakost však můžeme vztáhnout také na předměty; v tom případě mluvíme o *koloritě* předmětu. Kolorita je určena chromatičností světla odraženého od předmětu (popř. předmětem propuštěného) při osvětlení smluvním (dohodnutým) druhem světla, a dále údajem vyjadřujícím relativní schopnost předmětu odrážet (resp. propouštět) dopadající světlo, zpravidla činitelem jasu β (kr. 75,6).

Kontrolní otázky

1. Definujte pojmy barva, barevný podnět, chromatičnost, kolorita.
2. Vyložte pojem metamerie a metamerního podnětu.
3. Na jakém poznatku je založena kolorimetrická soustava CIE?
4. Co jsou měrná světla a trichromatické složky?
5. Jak se vypočítají trichromatické složky a trichromatické souřadnice?
6. Popište diagram chromatičnosti.
7. Definujte teplotu chromatičnosti.

Číslo — **Veličina — její značka a název**

Hlavní jednotka – název, značka, rozměr

Definice a vysvětlivky

751 $V(\lambda)$ **poměrná světelná účinnost monochromatického záření**

rozměr 1

Poměrná světelná účinnost monochromatického záření vyjadřuje relativní citlivost normálního fotometrického pozorovatele jako funkci vlnové délky; je určena podílem spektrální koncentrace zářivého výkonu při základní vlnové délce $P_\lambda(\lambda_m)$ a spektrální koncentrace zářivého výkonu při uvažované vlnové délce $P_\lambda(\lambda)$, jež při fotopickém vidění budí stejně intenzívní světelný vjem

$$V(\lambda) = P_\lambda(\lambda_m)/P_\lambda(\lambda)\,;$$

základní vlnová délka je $\lambda_m = 555\ \mathrm{nm}$.

752 Φ **světelný tok**

lumen, $\mathrm{lm = cd\,sr}$, rozměr cd

Světelný tok vyjadřuje schopnost daného zářivého výkonu vyvolat u normálního fotometrického pozorovatele světelný vjem; světelný tok zdroje vysílaný do prostorového úhlu Ω je určen integrálem svítivosti I (viz 007) zdroje v oboru tohoto úhlu

$$\Phi = \int_{(\Omega)} I\,\mathrm{d}\Omega\,.$$

753 K **světelná účinnost záření**

lumen na watt, $\mathrm{lm\,W^{-1} = m^{-2}\,kg^{-1}\,s^3\,cd}$

Světelná účinnost záření je mírou zrakové vnímatelnosti normálního fotometrického pozorovatele; je určena podílem světelného toku Φ a příslušného zářivého výkonu P

$$K = \Phi/P\,.$$

754 L **jas (luminance)**

kandela na metr čtvereční, $\mathrm{cd\,m^{-2} = m^{-2}\,cd}$

Jas je měrná veličina svítivosti plošného zdroje; je určen podílem svítivosti $\mathrm{d}I$ elementární plošky zdroje ve zvoleném směru a zdánlivé velikosti (kolmého průmětu) $\mathrm{d}S'$ plošky pozorované z tohoto směru

$$L = \mathrm{d}I/\mathrm{d}S'\,.$$

755 E **osvětlenost (osvětlení, intenzita osvětlení)**

lux, $\mathrm{lx = m^{-2}\,cd}$

Osvětlenost je měrná veličina světelného toku na osvětlované ploše; je určena diferenciálním podílem světelného toku a obsahu plochy, na niž tento tok dopadá

$$E = \mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}S\,.$$

756 ϱ **reflektance (činitel odrazu)**

rozměr 1

Reflektance vyjadřuje schopnost tělesa odrážet dopadající světlo; je určena podílem odraženého a dopadajícího světelného toku

$$\varrho = {}^{r}\Phi/\Phi\,.$$

757 τ **transmitance (činitel prostupu)**

rozměr 1

Transmitance vyjadřuje schopnost tělesa propouštět dopadající světlo; je určena podílem propuštěného a dopadajícího světelného toku

$$\tau = {}^{t}\Phi/\Phi\,.$$

758	α	**absorptance (činitel pohlcení)**
rozměr 1		

Absorptance vyjadřuje schopnost tělesa pohlcovat dopadající světlo; je určena podílem pohlceného a dopadajícího světelného toku

$$\alpha = {}^{a}\Phi/\Phi\ .$$

759	β	**činitel jasu**
rozměr 1		

Činitel jasu vyjadřuje relativní jas tělesa vzhledem k jasu dokonalého rozptylovače v témže směru a za týchž podmínek osvětlení a pozorování; je určen podílem jasu tělesa L a jasu dokonalého rozptylovače L^* za předpokladu, že obě tělesa jsou osvětlena a pozorována týmž způsobem

$$\beta = L/L^*\ .$$

75,8 Témata k opakování a příklady aplikace

1. Vypočítejte světelnou účinnost záření helium-neonového laseru, jehož spektrum je na obr. 70,5 A. (159 lm W^{-1})
2. Nad středem čtvercového stolu o straně 1,3 m visí ve výšce 60 cm žárovka s rovnoměrnou svítivostí 50 cd ve všech směrech. Určete osvětlenost středu stolu a jeho rohů.
3. Ve vzdálenosti 2 m jsou dvě žárovky o svítivostech 36 a 62 cd. Určete, do jaké vzdálenosti od silnější žárovky musíme na spojnici žárovek umístit destičku, má-li být osvětlenost destičky z obou stran stejná.
4. Nad středem kruhového stolu o poloměru R je zavěšen bodový zdroj se stejnou svítivostí ve všech směrech. Najděte obecně závislost osvětlenosti okraje stolní desky na výšce žárovky h nad deskou a určete, pro který poměr R/h je osvětlenost maximální. (1,414)
5. Vypočítejte jas etalonu kandely. ($6\ .\ 10^5$ cd m^{-2})
6. Jaký světelný tok musí mít promítací přístroj, aby obraz na promítací ploše o rozměrech 2×2 m a reflektanci 0,85 měl jas 10 cd m^{-2}? (148 lm)
7. Na vodorovnou betonovou desku o reflektanci 0,48 dopadá světlo z celé zatažené oblohy. Vypočítejte střední jas oblohy a jas desky, je-li osvětlenost desky 8400 lx. (2670 cd m^{-2}; 1280 cd m^{-2})
8. Průsvitná fólie má při osvětlenosti 260 lx při pohledu z osvětlené strany jas 23 cd m^{-2}, při pohledu z druhé strany 51 cd m^{-2}. Určete reflektanci, transmitanci a absorptanci fólie za předpokladu, že se chová jako rovnoměrný rozptylovač. ($\varrho = 0{,}28$; $\tau = 0{,}61$; $\alpha = 0{,}11$)
9. Abychom zabránili oslnění, umístíme žárovku do svítidla tvaru koule zhotovené z opálového skla o transmitanci 0,42. Vypočítejte přibližně potřebný průměr koule, je-li přípustný jas svítidla 300 cd m^{-2} a je-li střední svítivost žárovky 130 cd. (Asi 0,48 m)
10. Svítidlo tvaru koule z opálového skla vydává světlo z celého povrchu rovnoměrně všemi směry. Vypočítejte přibližně jas a světelný tok svítidla, je-li svítivost koule 240 cd a její průměr 36 cm. (2360 cd m^{-2}; 3000 lm)
11. Rovinný rozptylovač rozptylující odrazem je osvětlen osvětleností 200 lx a jeho jas v určitém směru je 40 cd m^{-2}. Určete činitel jasu rozptylovače v tomto směru. (0,63)

12. Vypočítejte, jak vysoko nad podlahou musíme umístit svítidlo malých rozměrů, abychom na pracovní ploše pod svítidlem dosáhli osvětlenosti 100 lx, je-li svítivost svítidla ve všech směrech 360 cd a výška pracovní plochy nad podlahou 0,85 m. (1,05 m)
13. Určete trichromatické souřadnice měrných světel X, Y, Z a zakreslete do diagramu chromatičnosti. [$x(X) = 1$; $y(X) = 0$; $x(Y) = 0$; $y(Y) = 1$; $x(Z) = 0$; $y(Z) = 0$]
14. Na základě řešení úlohy 13 rozhodněte, je-li možno měrná světla X, Y, Z fyzikálně realizovat.
15. Vypočítejte trichromatické souřadnice monochromatického světla vlnové délky 540 nm a porovnejte s diagramem chromatičnosti. ($x = 0{,}23$; $y = 0{,}75$)
16. Vypočítejte trichromatické souřadnice záření laseru z úlohy 1. ($x = 0{,}71$; $y = 0{,}29$)
17. Vypočítejte trichromatické souřadnice izoenergetického světla. ($x = 0{,}333$; $y = 0{,}333$)
18. Určete teplotu chromatičnosti světla vydávaného etalonem kandely. (1742 K)