

## PODSTAWOWE POJĘCIA TECHNIKI OŚWIETLENIOWEJ

Wprawdzie niemal wszystkie źródła światła sztucznego są obecnie źródłami elektrycznymi, ale wytworzone przez nie światło i pole świetlne jest medium nieelektrycznym. W zastosowaniach światła do celów oświetleniowych rozpoznawanie i opisywanie zjawisk oraz zachodzących zależności wymaga posługiwania się wielkościami i prawami fotometrycznymi, które poza fizyczną naturą światła biorą pod uwagę fizjologię widzenia człowieka, a ściślej - umownego reprezentatywnego obserwatora CIE. Dobra znajomość tych wielkości i praw jest niezbędna do rozumnego stosowania norm i przepisów oświetleniowych, do projektowania i racjonalnej eksploatacji urządzeń oświetleniowych, a zwłaszcza do dokonywania kompetentnej kontroli ich stanu i formułowania wniosków bądź zaleceń pokontrolnych.

Przy korzystaniu z norm oświetleniowych dobrze wiedzieć, że większość z nich powstawała jako dokumenty normatywne Międzynarodowej Komisji Oświetleniowej CIE (*Publication CIE*). Skrót ten pochodzi od francuskiej nazwy Komisji: *Commission Internationale de l'Éclairage* i łatwo go pomylić ze skrótem CEI francuskiej (*Commission Électrotechnique Internationale*) lub skrótem IEC angielskiej (*International Electrotechnical Commission*) nazwy Międzynarodowej Komisji Elektrotechnicznej, która nie zajmuje się techniką oświetlania, lecz tylko sprzętem oświetleniowym. Poza krajami anglojęzycznymi rzadko używa się skrótu ICI angielskiej nazwy Międzynarodowej Komisji Oświetleniowej: *International Commission on Illumination*. Międzynarodowa Komisja Oświetleniowa CIE powstała w roku 1913 z Międzynarodowej Komisji Fotometrycznej, istniejącej od roku 1900. Aktualnie skupia 37 krajów świata; Polskę reprezentuje działający przy SEP Polski Komitet Oświetleniowy.

Bywa, że uznane zasady wiedzy dotyczące niektórych trudnych problemów oświetleniowych długo pozostają w postaci dokumentów CIE i dopiero po latach są wprowadzane do norm regionalnych, np. do Norm Europejskich.

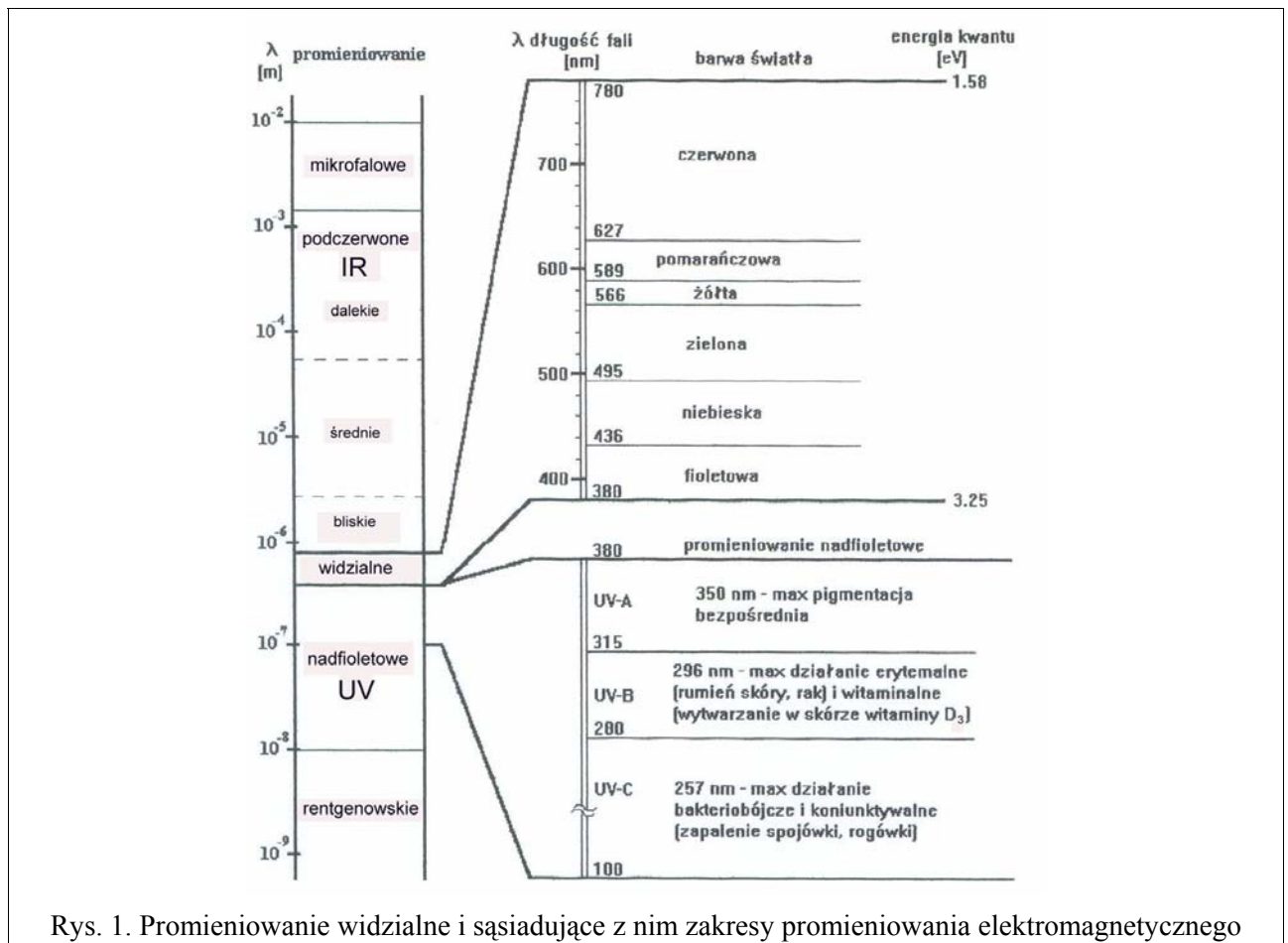
### 1. Światło jako promieniowanie elektromagnetyczne

Światło, czyli promieniowanie widzialne, to promieniowanie elektromagnetyczne wywołujące u ludzi i zwierząt wrażenia świetlne umożliwiające widzenie. W widmie fal elektromagnetycznych promieniowaniem widzialnym dla człowieka jest bardzo wąski zakres o długości fali  $\lambda$  od 380 nm (skrajny fiolet) do 780 nm (skrajna czerwień). Wyróżnienie tego zakresu promieniowania wynika tylko z faktu percepcji wzrokowej, z fizjologii oka ludzkiego, i w żaden sposób nie jest usprawiedliwione z fizycznego punktu widzenia.

W fizyce przez światło (promieniowanie optyczne) na ogół rozumie się zakres promieniowania obejmującego poza zakresem widzialnym również sąsiednie zakresy niewidzialne: promieniowanie nadfioletowe UV i promieniowanie podczerwone IR, których właściwości oraz metody wytwarzania i badania są podobne (rys. 1). Dowolne promieniowanie elektromagnetyczne można opisać podając m.in. następujące parametry bądź charakterystyki fizyczne (tabl. 1), najzupełniej obiektywne, niezwiązane z selektywnością odbioru promieniowania przez oko.

**Moc promienista** albo **strumień energetyczny** [W] – moc wysyłana, przenoszona lub odbierana w postaci promieniowania, czyli ilość energii promienistej  $Q_e$  [J] wysyłana, przenoszona lub odbierana w jednostce czasu  $t$  [s].

$$F_e = \frac{dQ_e}{dt} \quad [\text{W}]$$



**Gęstość widmowa mocy promienistej** albo **gęstość monochromatyczna mocy promienistej** [ $\text{W}/\text{nm}$ ] – iloraz nieskończenie małej części mocy promienistej  $dF_e$  przypadającej na nieskończenie mały przedział  $d\lambda$  widma, zawierający daną długość fali  $\lambda$ , przez szerokość tego przedziału.

$$F_{\text{ek}} = \frac{dF_e}{d\lambda} \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{nm}} \right]$$

**Egzytancja promienista** źródła lub **natężenie napromienienia** odbiornika w określonym punkcie [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] – iloraz mocy promienistej (emitowanej ze źródła lub padającej na odbiornik) przypadającej na elementarną powierzchnię otaczającą dany punkt, przez pole tej powierzchni.

$$E_e = \frac{dF_e}{dS} \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

Za przykład mogą posłużyć dane odnoszące się do promieniowania słonecznego:

$$E_e = 1360 \text{ W}/\text{m}^2 \pm 1,6\% \quad \text{– stała słoneczna (na granicy atmosfery ziemskiej),}$$

w tym    7,0 % - promieniowanie nadfioletowe UV,  
           47,3 % - promieniowanie widzialne,  
           45,7 % - promieniowanie podczerwone IR,

$$E_e = 1360 \frac{\pi R^2}{4\pi R^2} = 340 \text{ W}/\text{m}^2 \quad \text{– średnie dobowe natężenie napromienienia na powierzchni Ziemi (o promieniu } R) \text{ przy pominięciu wpływu atmosfery.}$$

Tablica 1. Relacje między wielkościami fizycznymi charakteryzującymi dowolne promieniowanie elektromagnetyczne a wielkościami fotometrycznymi

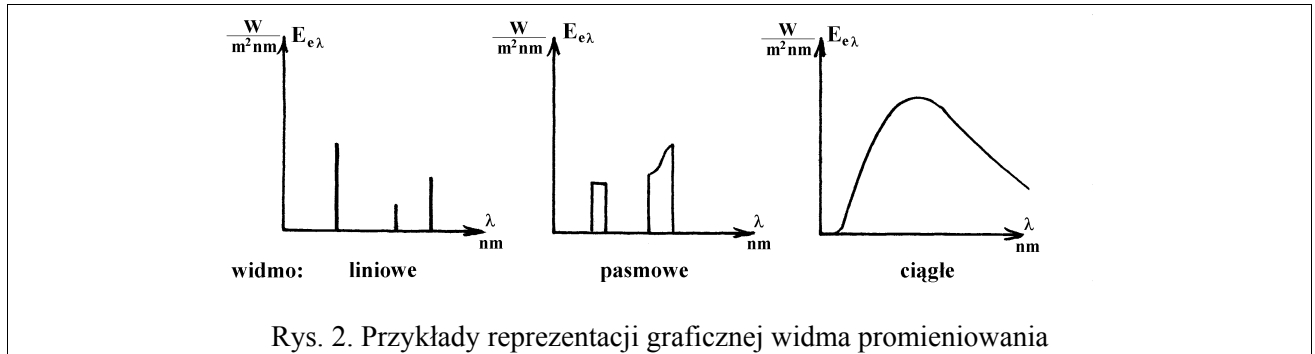
Wielkość fizyczna		Wielkość fotometryczna		
$X_{el}$		$X_{tot} = K_m \int X_{el} V_\lambda d\lambda$		
nazwa	jednostka	nazwa	jednostka	uwagi
<b>Energia promienista</b> (wytworzana, przenoszona i odbierana w postaci promieniowania) $Q_e$	J	Ilość światła $Q$	lm·s lm·h	
<b>Moc promienista, strumień energetyczny</b> $F_e = \frac{dQ_e}{dt}$	W	<b>Strumień świetlny</b> $\Phi$	lm	$\Phi_o$ – całoprzestrzenny $\Phi_v$ – półprzestrzeni dolnej $\Phi_\lambda$ – półprzestrzeni górnej
<b>Gęstość widmowa mocy promienistej</b> $F_{e\lambda} = \frac{dF_e}{d\lambda}$	$\frac{W}{nm}$	Gęstość widmowa (monochromatyczna) strumienia świetlnego	$\frac{lm}{nm}$	
Natężenie promieniowania $I_e = \frac{dF_e}{d\omega}$	$\frac{W}{sr}$	<b>Światłość</b> (→) $I = \frac{d\Phi}{d\omega}$	$\frac{lm}{sr} = cd$	$I_\alpha$ – światłość kierunkowa w kierunku wyznaczonym przez kąt $\alpha$ względem pionu
Natężenie napromienienia (odbiornika promieniowania) $E_e = \frac{dF_e}{dS}$	$\frac{W}{m^2}$	<b>Natężenie oświetlenia</b> (→) $E = \frac{d\Phi}{dS}$	$\frac{lm}{m^2} = lx$	
Egzytancja promienista (źródła promieniowania) $E_e = \frac{dF_e}{dS}$	$\frac{W}{m^2}$	Egzytancja świetlna $E = \frac{d\Phi}{dS}$	$\frac{lm}{m^2}$	
<b>Gęstość widmowa egzytancji promienistej</b> $E_{e\lambda} = \frac{dE_e}{d\lambda} = \frac{d^2F_e}{dS d\lambda}$	$\frac{W}{m^2 \cdot nm}$			
Gęstość powierzchniowa natężenia promieniowania $L_e = \frac{d^2F_e}{d\omega dS \cos\alpha}$	$\frac{W}{sr \cdot m^2}$	<b>Luminancja</b> (→) $L = \frac{d^2\Phi}{d\omega dS \cos\alpha} = \frac{I_\alpha}{dS \cdot \cos\alpha}$	$\frac{cd}{m^2} = nt$	
Napromienienie $N_e = \frac{dQ_e}{dS} = \int E_e dt$	$\frac{J}{m^2}$	Naświetlenie $N = \frac{dQ}{dS} = \int E dt$	lx·s	Pojęcie stosowane w fotografii

(→) oznacza wielkość fotometryczną wektorową  
Pogrubioną czcionką wyróżniono najważniejsze wielkości

**Gęstość monochromatyczna egzytancji promienistej** źródła lub **gęstość monochromatyczna natężenia napromienienia** odbiornika [ $W/m^2 \cdot nm$ ] – iloraz egzytancji promienistej lub natężenia napromienienia przypadających na nieskończenie mały przedział widma, obejmujący daną długość fali, przez ten przedział.

$$E_{e\lambda} = \frac{dE_e}{d\lambda} \quad \left[ \frac{W}{m^2 \cdot nm} \right]$$

**Widmo promieniowania** – zależność gęstości monochromatycznej egzytancji promienistej od długości fali. Widmo jest obrazem powstającym przez rozłożenie promieniowania złożonego na składniki monochromatyczne (rys. 2).

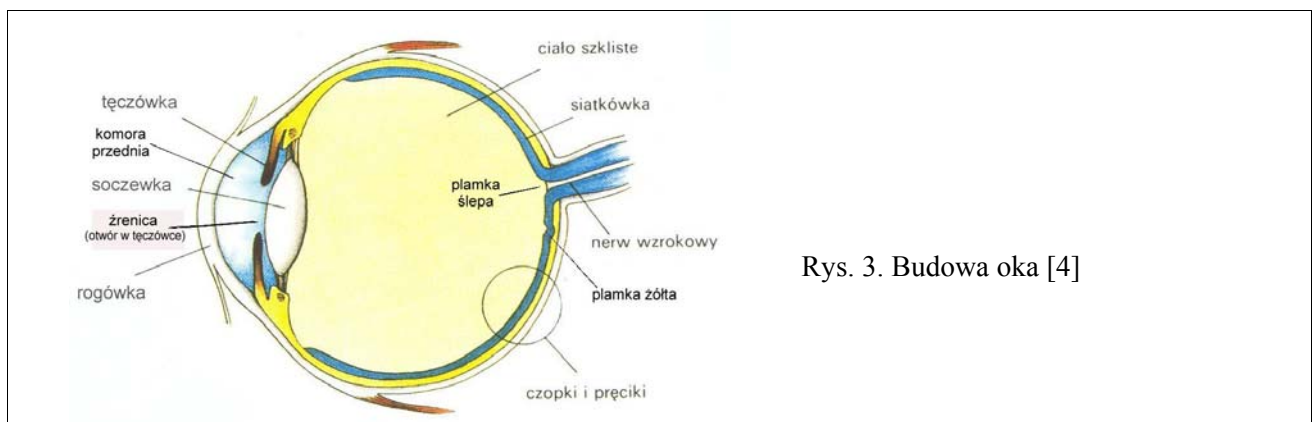


**Natężenie promieniowania** w określonym kierunku [W/sr] – iloraz mocy promienistej wysyłanej przez źródło w elementarnym kącie bryłowym, obejmującym dany kierunek, do wartości tego kąta, czyli gęstość przestrzenna mocy promienistej.

$$I_e = \frac{dF_e}{d\omega} \quad \left[ \frac{W}{sr} \right]$$

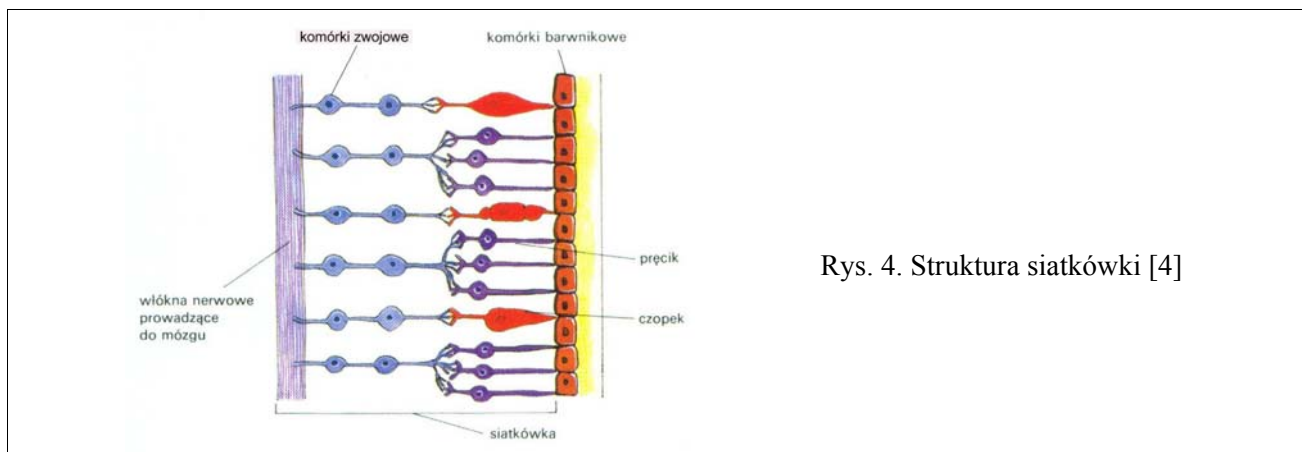
## 2. Czulość widmowa oka

Ludzkie oko jest selektywnym odbiornikiem promieniowania elektromagnetycznego, wykazuje czulość zależną od długości fali bądź częstotliwości bodźca. Czulość zależy ponadto od mechanizmu widzenia, który samoczynnie dostosowuje się do warunków oświetleniowych uaktywniając właściwe fotoreceptory rozmieszczone na siatkówce oka. Zawierają one pigmenty, substancje światłoczułe podlegające pod wpływem światła przemianom fotochemicznym powodującym zmianę potencjału elektrycznego całej komórki (rys. 3, 4). Inicjuje to impuls, który może być przekazywany do mózgu poprzez włókno nerwowe powiązane z fotoreceptorem. Po chwili pigment rekombinuje i fotoreceptor ponownie jest gotowy do detekcji fotonu.



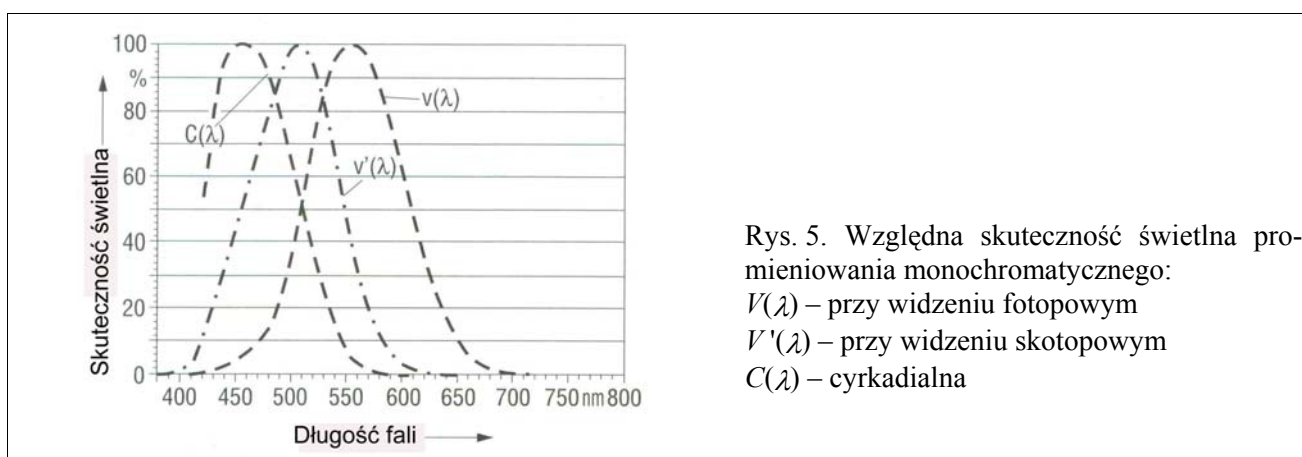
Przy **widzeniu fotopowym** (widzeniu dziennym, widzeniu czopkowym) aktywne są **czopki** (rys. 4) zawierające jako barwnik jodopsynę (fiolet wzrokowy). Czopki są receptorami o małej czulości, ale umożliwiają widzenie barwne, percepcję barw chromatycznych (barw kolorowych) dzięki

temu, że są trzy odmiany czopków o maksymalnej czułości odpowiednio dla promieniowania o dużej, średniej i małej długości fali, co w uproszczeniu odpowiada barwom podstawowym RGB (ang. *red, green, blue*). Jedno oko zawiera ok. 7 mln czopków i są one skupione głównie w środku siatkówki, wokół osi optycznej oka, gdzie znajduje się plamka żółta (rys. 3), miejsce najwyraźniejszego widzenia. Mechanizm fotopowy dominuje przy większych poziomach luminancji przedmiotów zadania wzrokowego (powyżej ok.  $30 \text{ cd/m}^2$ ). Oko wykazuje wtedy największą czułość (rys. 5) na promieniowanie monochromatyczne o długości fali 555 nm (światło o barwie żółtozielonej).



Rys. 4. Struktura siatkówki [4]

Przy **widzeniu skotopowym** (widzeniu zmierzchowym, widzeniu pręcikowym) aktywne są **pręciki** (rys. 4) zawierające rodopsynę (purpurę wzrokową). Pręciki są receptorami o progu pobudzenia tysiąc razy mniejszym niż czopki [3], ale są niewrażliwe na barwy chromatyczne. Umożliwiają dostrzeganie konturów i mogą oddawać różne stopnie szarości, tzn. barwy achromatyczne (barwy niekolorowe). To dlatego *w nocy wszystkie koty są szare*. Mechanizm skotopowy dominuje przy bardzo małych poziomach luminancji przedmiotów zadania wzrokowego (poniżej ok.  $0,003 \text{ nt}$ ). Oko wykazuje wtedy największą czułość (rys. 5) na promieniowanie monochromatyczne o długości fali około 510 nm (światło o barwie zielonej). Pojedyncze oko zawiera ok. 130 mln pręcików, rozmieszczonych poza plamką żółtą. Obserwując nocą obiekty o małej jasności najlepiej patrzeć na nie kątem oka, sytuować obraz na krawędzi pola widzenia o rozwarciu  $10 \div 30^\circ$ , bo wtedy tworzy się on właśnie w rejonie największego skupienia pręcików. Taka technika obserwacji, nazywana zerkanem, przydaje się przy obserwacjach nieba za pomocą teleskopu optycznego.



Rys. 5. Względna skuteczność świetlna promieniowania monochromatycznego:  
 $V(\lambda)$  – przy widzeniu fotopowym  
 $V'(\lambda)$  – przy widzeniu skotopowym  
 $C(\lambda)$  – cyrkadialna

W przekazywaniu sygnałów z komórek fotoreceptorowych do miliona włókien w każdym z dwóch nerwów wzrokowych, a następnie do ośrodków wzrokowych mózgu, pośredniczą komórki zwojowe siatkówki (rys. 4). W obrębie plamki żółtej każda komórka zwojowa jest związana z jednym czopkiem, wobec czego jej pole recepcyjne jest małe, a zdolność rozdzielcza oka (ostrość

widzenia) w tych połączeniach obrazu, wokół osi wzrokowej, największa. Natomiast w części peryferyjnej jedna komórka zwojowa odbiera pobudzenie od wielu czopków lub pręcików, co obniża zdolność rozdzielczą, ale podnosi wrażliwość tego obszaru siatkówki na słabe bodźce świetlne. Do pobudzenia pojedynczego pręcika wystarcza jeden foton<sup>1</sup> o energii na przykład  $3 \cdot 10^{-19}$  J (światło niebieskie), ale to nie znaczy, że informacja o takim pobudzeniu dotrze do mózgu.

Przy **widzeniu mezopowym** (widzeniu czopkowo-pręcikowym), w pośrednich warunkach oświetleniowych, aktywne są w różnym stopniu oba rodzaje receptorów. W miarę zwiększania się luminancji postrzeganych obiektów, poczynając od warunków „zmiernych”, stopniowo zanika udział pręcików ze względu na trwały rozpad rodopsyny, a zwiększa się udział czopków. Z kolei przy bardzo słabym oświetleniu czułość czopków jest zbyt mała i widzenie umożliwiają tylko pręciki.

Podwójną charakterystykę widmową oka (rys. 5) ciekawa hipoteza tłumaczy radykalną zmianą otoczenia świetlnego w toku ewolucji gatunku ludzkiego. Około 500 000 lat temu afrykańscy przodkowie *hominis sapiens* wyszli spod zielonego sufitu puszczy tropikalnej i wybrali bytowanie na rozświetlonych terenach sawanny. Charakterystyka  $V'(\lambda)$  przy widzeniu skotopowym miałaby być atawizmem.

Siatkówkę oka nazywa się niekiedy wysuniętym fragmentem mózgu, aby podkreślić, że **to mózg widzi, a nie oko** [3, 4], a także to, że siatkówka – zbudowana z komórek nerwowych – dokonuje wstępnej selekcji elementów obrazu. Z powstającego na siatkówce obrazu rzeczywistego, pomniejszonego, odwróconego, o poszarpanych konturach, z ciemną plamą w miejscu tarczy nerwu wzrokowego (plamki ślepej), dopiero ośrodki wzrokowe mózgu, uwzględniając wcześniejsze osobnicze doświadczenie w pracy wzrokowej (pamięć wzrokową), tworzą spójny obraz otaczającego świata i pozwalają identyfikować obserwowane obiekty oraz ich zachowanie się. To osobnicze doświadczenie zdobywa się całe życie, ale najintensywniej we wczesnym okresie niemowlęcym, kiedy trzeba odwrócić świat postawiony na głowie, kiedy wykształcają się ostrość widzenia, rozróżnianie barw, widzenie faktury przedmiotów, widzenie stereoskopowe, postrzeganie ruchu jako procesu ciągłego (a nie skaczących klatek) i umiejętność przewidywania dalszego położenia poruszającego się obiektu oraz zdolność percepcji całości obrazu, a nie tylko pojedynczych szczegółów.

Cały system wielkości i jednostek fotometrycznych przyjmuje za podstawę względną czułość widmową oka ludzkiego przy widzeniu fotopowym  $V_\lambda$  (rys. 5), kiedy jest ono najbardziej uczulone na promieniowanie o długości fali  $\lambda = 555$  nm. Jeśli do wywołania określonego wrażenia wzrokowego jest potrzebna moc takiego promieniowania  $F_{e555}$ , to równoważne wrażenie wywołuje promieniowanie monochromatyczne o innej długości fali i mocy odpowiednio większej:

$$F_{e\lambda} = \frac{F_{e555}}{V_\lambda}$$

Stosunek obu mocy

$$V_\lambda = \frac{F_{e555}}{F_{e\lambda}}$$

nazywa się **względną skutecznością świetlną promieniowania monochromatycznego**, ale bardziej pogładowa jest jego interpretacja jako względnej czułości widmowej oka ludzkiego.

Przedstawione wyżej rozumowanie uwzględnia tylko rolę światła dla procesu widzenia, a pomija, iż światło jest nie tylko nośnikiem informacji o kształtach i barwach otaczającego świata, ale jest też **stymulatorem biologicznym** i tej jego funkcji nie należy lekceważyć w trakcie projektowania oświetlenia. Poza czopkami i pręcikami, fotoreceptorami powiązаныmi z ośrodkami wzrokowymi kory mózgowej płata potylicznego, wrażliwe na światło są też same komórki zwojowe siatkówki, w których barwnikiem odpowiedzialnym za ich światłoczułe właściwości jest melanopsyna [1, 6]. Niektóre z nich, stosunkowo nieliczne, są powiązane z jądrem nadskrzyżowaniowym

<sup>1</sup> Wystarczy na sekundę zaświecić latarkę ręczną, aby wyemitować  $10^{18}$  fotonów [3]. Przypadłoby ich ponad sto milionów na każdego mieszkańca kuli ziemskiej. Te liczby poświadczają niezwykłą czułość pręcików.

SCN (*Suprachiasmatic Nucleus*) w podwzgórzu i z szyszynką. Są to ośrodki wyznaczające **rytm okołodobowy** organizmu, nazywany też rytmem cyrkadialnym<sup>1</sup>, a więc spełniające funkcję zegara biologicznego. Szyszynka jest gruczołem dokrewnym, w którym zachodzi rytmiczna synteza melatoniny, hormonu biorącego udział w procesie pomiaru czasu w organizmie. Do podtrzymania prawidłowych rytmów biologicznych niezbędna jest codzienna, co najmniej kilkugodzinna, ekspozycja na silne światło, do której w toku ewolucji przywykli afrykańscy przodkowie dzisiejszego człowieka. Najbardziej efektywne pod tym względem jest światło niebieskie o długości fali ok. 455 nm, co obrazuje (rys. 5) krzywa względnej skuteczności świetlnej cyrkadialnej promieniowania monochromatycznego  $C(\lambda)$ .

Synteza melatoniny w szyszynce zachodzi w okresie ciemności, jej rozkład zaś w wyniku ekspozycji na silne światło. W razie ciemności lub niskiego natężenia oświetlenia rośnie w mózgu poziom melatoniny, co może prowadzić do senności i stanów depresyjnych. Dobry nastrój sprzyjający aktywności zależy od wysokiego poziomu serotoniny, przekątnika nerwowego, który w ciemności jest odwracalnie przetwarzany w melatoninę. Zakłócenia tego rytmu leczy się fototerapią - ekspozycją na silne światło – praktykowaną, nie tylko w krajach północnych, w przypadkach depresji zimowej, a także w odniesieniu do osób oderwanych od naturalnych fotorytmów, np. pracujących w półmroku albo odbywających długie podróże samolotem wzdłuż równoleżników.

Zawartość nadfioletu w widmie lamp elektrycznych jest restrykcyjnie limitowana i kontrolowana ze względu na jego szkodliwość, ale korzystny jest śladowy udział nawet nadfioletu UV-B (rys. 1), który współdziała w wytwarzaniu w organizmie witaminy D<sub>3</sub> zapobiegającej osteomalacji (rozmiękaniu kości), a więc krzywicy, zaburzeniom w budowie zębów i podobnym schorzeniom. Przecież w naturalnych warunkach niezanieczyszczonej atmosfery nadfiolet UV-B dociera szcążkowo do powierzchni ziemi, dopiero promieniowanie nadfioletowe o długości fali mniejszej niż 280 nm jest w całości pochłaniane przez atmosferę. To, co w dużej dawce szkodzi, a nawet zabija, w dawce znikomej pomaga, a nawet leczy, o czym zresztą od dawna przekonują entuzjaści homeopatii.

Jak widać, pewnych efektów biologicznych światła nie uwzględniają ani obowiązujący w technice oświetleniowej system wielkości fotometrycznych, ani procedury projektowania oświetlenia, ale to nie znaczy, że te efekty można ignorować.

### 3. Tworzenie wielkości fotometrycznych

Każdej wielkości fizycznej  $X_e$  (tabl. 1) charakteryzującej promieniowanie, określonej w sposób **obiektywny**, odpowiada wielkość fotometryczna  $X_{\text{fot}}$  oceniana **subiektywnie** przez oko ludzkie, tzn. przez selektywny odbiornik promieniowania opisany krzywą  $V_\lambda$  przy widzeniu fotopowym:

$$X_{\text{fot}} = K_m \int_{\lambda} X_{e\lambda} V_\lambda d\lambda \quad \text{przy czym} \quad \int_{\lambda} = \int_0^{\infty} = \int_{380}^{780}$$

$K_m = 683 \text{ lm/W}$  jest to **fotometryczny równoważnik promieniowania** – stała, której wartość i wymiar wynikają z przyjętego układu jednostek fotometrycznych.

Cały niżej przedstawiony system wielkości i jednostek fotometrycznych uległby zmianie, gdyby miał się odnosić do innego selektywnego odbiornika promieniowania niż normalne oko ludzkie, np. do odbioru wrażeń świetlnych przez inne istoty żywe, do działania terapeutycznego światła, do działania bakterioobójczego, do fotosyntezy itd.

### 4. Strumień świetlny

Strumień świetlny  $\Phi$  jest to moc promieniowania widzialnego oceniana subiektywnie przez oko ludzkie o czułości widmowej określonej krzywą  $V_\lambda$ .

<sup>1</sup> Z łaciny: *circa* - około, *dies* - dzień.

$$\Phi = K_m \int_{\lambda} F_{e\lambda} V_{\lambda} d\lambda \quad [\text{lm}] = [\text{cd} \cdot \text{sr}]$$

Jednostką strumienia świetlnego jest lumen<sup>1</sup> (1 lm), jednostka mała, wobec czego chętnie wykorzystuje się jej wielokrotności: 1 klm, 1 Mlm.

### Przykłady

- 1) Promieniowanie monochromatyczne o długości fali  $\lambda = 555 \text{ nm}$  i mocy  $F_e = 1 \text{ W}$  stanowi strumień świetlny

$$\Phi = F_{e555} V_{555} = 1 \cdot 1 = 1 \text{ wat świetlny,}$$

ale ponieważ taka jednostka strumienia świetlnego nie przyjęła się, to obliczenie powinno mieć postać następującą:

$$\Phi = K_m F_{e555} V_{555} = 683 \cdot 1 \cdot 1 = 683 \text{ lm,}$$

a zatem 1 W promieniowania najbardziej efektywnego dla procesu widzenia to aż 683 lm.

- 2) Promieniowanie monochromatyczne o długości fali  $\lambda = 589 \text{ nm}$  (sodówka niskoprężna) i mocy  $F_e = 1 \text{ W}$  niesie strumień świetlny:

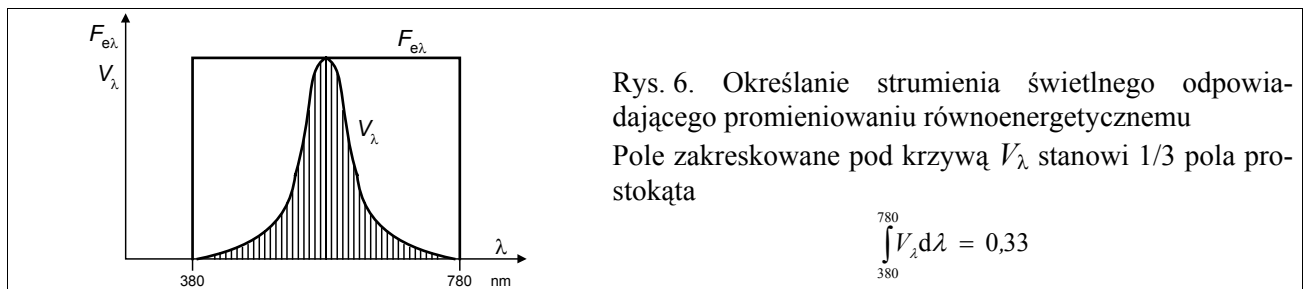
$$\Phi = K_m F_{e589} V_{589} = 683 \cdot 1 \cdot 0,76 = 519 \text{ lm}$$

- 3) Promieniowanie monochromatyczne o długości fali  $\lambda = 253,7 \text{ nm}$  (promieniowanie rezonansowe rtęci we wnętrzu świetłówki) i mocy  $F_e = 1 \text{ W}$  daje strumień świetlny:

$$\Phi = K_m F_{e253,7} V_{253,7} = 683 \cdot 1 \cdot 0 = 0 \text{ lm}$$

- 4) Promieniowanie równoenergetyczne ( $F_{e\lambda} = \text{const}$ ) w zakresie długości fal  $\lambda = 380 \div 780 \text{ nm}$  (rys. 6), o mocy  $F_e = 1 \text{ W}$  oznacza strumień świetlny:

$$\Phi = K_m F_e \int_{380}^{780} V_{\lambda} d\lambda = 683 \cdot 1 \cdot 0,33 = 225 \text{ lm}$$



Rys. 6. Określanie strumienia świetlnego odpowiadającego promieniowaniu równoenergetycznemu. Pole zakreskowane pod krzywą  $V_{\lambda}$  stanowi 1/3 pola prostokąta

$$\int_{380}^{780} V_{\lambda} d\lambda = 0,33$$

## 5. Światłość

Światłość  $I$  jest to stosunek strumienia świetlnego  $\Phi$  wysyłanego przez źródło w danym kierunku, w stożku o nieskończenie małym kącie rozwarcia obejmującym ten kierunek, do kąta bryłowego  $\omega$  tego stożka. Inaczej mówiąc światłość jest przestrzenną (kątową) gęstością strumienia świetlnego. Światłość jest wielkością wektorową, tzn. że ten sam punkt świecącej powierzchni może mieć różną światłość w różnych kierunkach.

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} \quad \left[ \frac{\text{lm}}{\text{sr}} \right] = [\text{cd}]$$

Jednostką światłości jest kandela (1 cd), czyli lumen na steradian, jedyna jednostka fotome-

<sup>1</sup> W języku łacińskim są dwa słowa oznaczające światło: *lumen* oraz *lux* i oba fotometria wykorzystwała jako nazwy jednostek (*lumen* oraz *luks*).



tryczna wśród siedmiu jednostek podstawowych układu SI (m, kg, s, A, K, cd, mol). W roku 1979 została na nowo zdefiniowana przez XVI Generalną Konferencję Miar: kandela jest światłością w określonym kierunku źródła wysyłającego promieniowanie monochromatyczne o częstotliwości  $540 \cdot 10^{12}$  Hz ( $\lambda = 555$  nm) i natężeniu promieniowania w tym kierunku

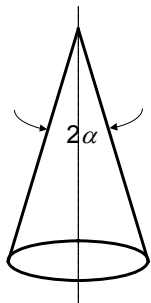
$$I_e = \frac{1}{683} \left[ \frac{\text{W}}{\text{sr}} \right]$$

Według tej definicji kandelę można odtworzyć z dokładnością 0,5%, dawniej nieosiągalną. Nazwa jednostki *kandela* wywodzi się od świecy (łac. *candela*, wł. *candela*, franc. *chandelle*, ang. *candle*), bo światłość zbliżoną do 1 kandelii ma płomień świecy woskowej lub stearynowej, podczas gdy światłość niektórych innych źródeł wynosi w przybliżeniu:

- 100 cd – żarówka 100 W,
- 500 cd – sodówka wysokoprężna 70 W,
- $3 \cdot 10^{27}$  cd – Słońce na granicy atmosfery ziemskiej.

Tablica 2. Relacja między kątem płaskim rozwarcia stożka a utworzonym przez ten kąt bryłowym

Kąt płaski rozwarcia stożka $2\alpha$	Stożkowy kąt bryłowy $\omega_{2\alpha} = 2\pi(1 - \cos\alpha)$
[°]	[sr]
5	0,00598
10	0,0239
30	0,214
60	0,842
90	1,840
120	$\pi$
180	$2\pi$



**Przykład.** Projektor, traktowany jako punktowe źródło światła, wytwarza wiązkę światła w obrębie stożka o płaskim kącie rozwarcia  $10^\circ$  i jednakowej światłości  $I = 400$  kcd w każdym kierunku. Obliczyć jego strumień świetlny.

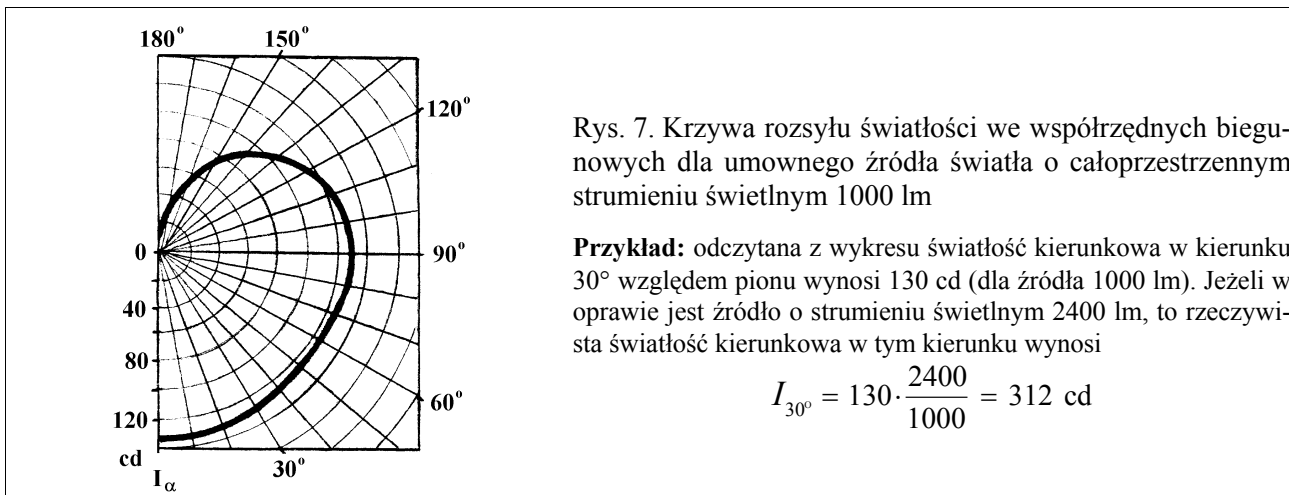
Przy kącie płaskim rozwarcia  $2\alpha = 10^\circ$ , kąt bryłowy stożka  $\omega_{2\alpha} = 0,0239$  sr (tabl. 2). Strumień świetlny projektora wynosi:

$$\Phi = I \cdot \omega_{2\alpha} = 400\,000 \cdot 0,0239 = 9560 \text{ lm}$$

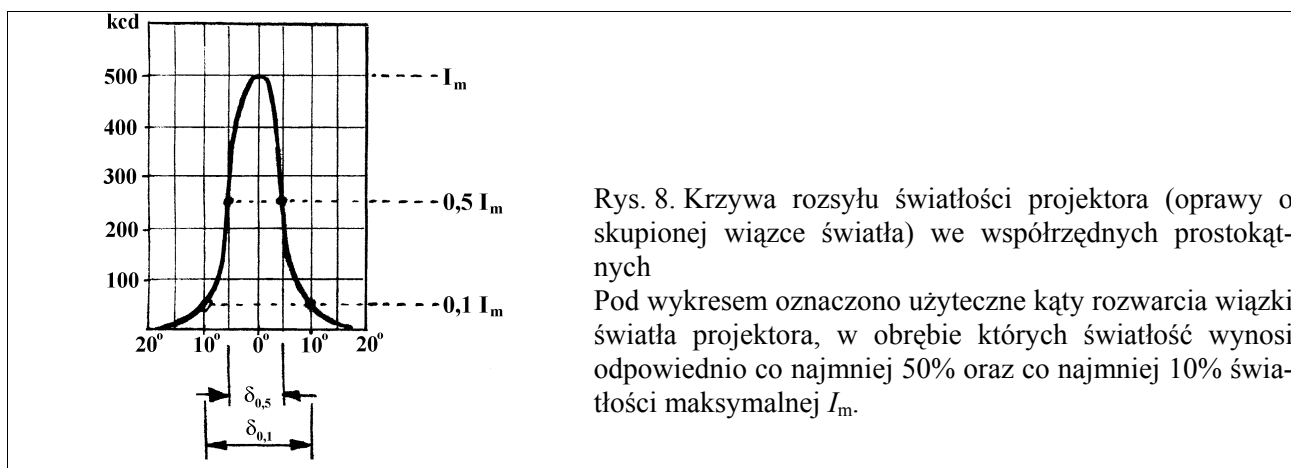
Przy projektowaniu oświetlenia i przy ocenie stanu technicznego istniejących urządzeń oświetleniowych trzeba znać **rozszył światłości** oprawy z określonym źródłem światła bądź – wyjątkowo – samego nieosłoniętego źródła światła, jeśli tak jest ono instalowane. Chodzi o światłość w funkcji kąta płaskiego względem przyjętego kierunku, w określonej płaszczyźnie.

**Bryła fotometryczna światłości** (powierzchnia rozsyłu światłości) jest to miejsce geometryczne końców wektorów światłości wychodzących ze wspólnego bieguna, z optycznego środka źródła światła. W taki sposób, za pomocą trójwymiarowej bryły, można opisać dowolnie złożony rozszył światłości i zawrzeć go w komputerowym programie projektowania oświetlenia, ale poglądowne przekazywanie go na rysunku dwuwymiarowym jest kłopotliwe.

**Krzywa rozsyłu światłości**  $I_\alpha = f(\alpha)$  jest to zazwyczaj krzywa przedstawiająca światłość w płaszczyźnie pionowej przechodzącej przez środek optyczny źródła (oprawy) w funkcji kąta płaskiego liczonego względem pionu. Jeśli bryła fotometryczna światłości jest bryłą obrotową, to krzywa rozsyłu światłości w pełni charakteryzuje przestrzenny rozszył strumienia świetlnego. Obracając krzywą rozsyłu światłości o  $360^\circ$  względem przyjętej osi otrzymuje się bryłę fotometryczną światłości.



Krzywą rozsyłu światłości zwykle rysuje się we współrzędnych biegunowych (rys. 7), w postaci zredukowanej - dla strumienia świetlnego źródła 1000 lm. W oprawie można umieszczać źródła o różnym strumieniu i wobec tego wartość światłości kierunkowej odczytanej z wykresu należy przeliczyć proporcjonalnie do wartości strumienia źródła (rys. 7, przykład). Dla projektorów o skupionej wiązce światła wykres taki byłby nieczytelny, wobec czego rysuje się go we współrzędnych prostokątnych (rys. 8).



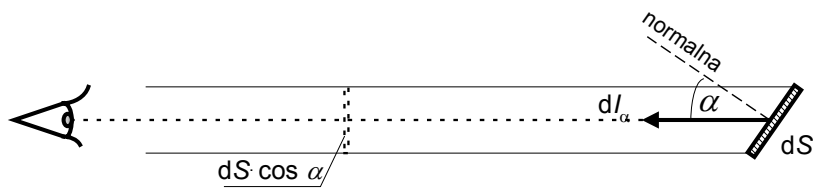
W przypadku opraw i źródeł światła o rozsyłe niesymetrycznym, których nie da się opisać jedną krzywą rozsyłu światłości, można podawać:

- dwie krzywe rozsyłu światłości w płaszczyznach południkowych wzajemnie prostopadłych, jeśli bryła fotometryczna światłości ma dwie płaszczyzny symetrii (światłówki liniowe),
- wykres izokandeli na powierzchni umyślonej kuli, której środek pokrywa się ze środkiem źródła światła,
- wykres izoluksów na oświetlanej płaszczyźnie (np. drogi, placu), względem której źródło ma określone położenie (odległość pionowa i pozioma, kąt nachylenia itd.).

## 6. Luminancja

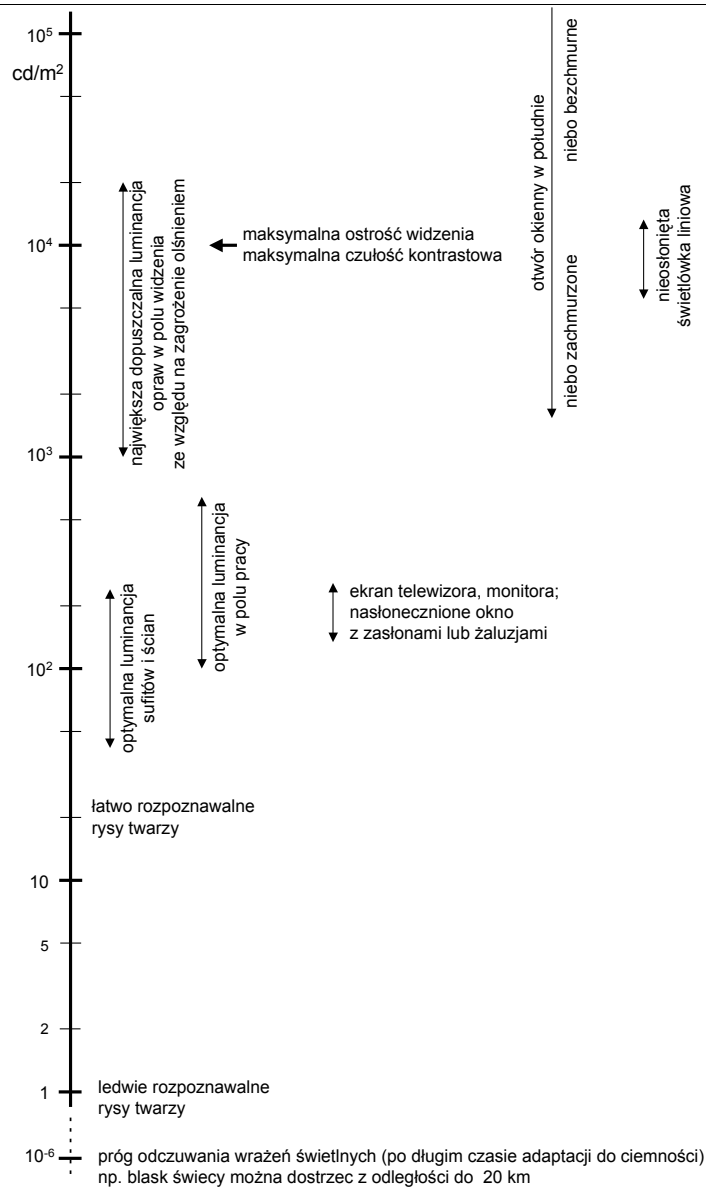
Luminancja  $L$  określonego punktu powierzchni, w określonym kierunku, jest to stosunek światłości elementarnego pola powierzchni w tym kierunku do pola powierzchni pozornej tego elementu (rys. 9). Luminancja jest wielkością wektorową, wartość luminancji określonego pola powierzchni może zależeć od kierunku obserwacji. Luminancja jest miarą jaskrawości postrzeganych obiektów.

$$L_{\alpha} = \frac{dI_{\alpha}}{dS \cdot \cos \alpha} = \frac{d^2 \Phi}{d\omega \cdot dS \cdot \cos \alpha} \quad \left[ \frac{\text{cd}}{\text{m}^2} \right]$$



Rys. 9. Wyjaśnienie pojęcia luminancji obserwowanej powierzchni

Legalną jednostką luminancji jest  $\text{cd}/\text{m}^2$ . Do niedawna nazywano ją nitem i stosowano też jednostkę  $10^4$  razy większą, a mianowicie stilb, przy czym  $1 \text{ sb} = 1 \text{ cd}/\text{cm}^2 = 10^4 \text{ nt} = 10^4 \text{ cd}/\text{m}^2$ . Rys. 10 pozwala oswoić się z wartościami luminancji spotykanymi zwłaszcza we wnętrzach. Zdziwić musi rozpiętość zakresu luminancji, do których oko łatwo się adaptuje; najskromniej oceniając od  $10^{-4}$  do  $10^4 \text{ cd}/\text{m}^2$ , co oznacza rozpiętość 1:100 000 000, jak jeden do stu milionów!



Rys. 10. Charakterystyczne zakresy wartości luminancji

To właśnie luminancja postrzeganych przedmiotów, jej poziom, proporcje i rozkład przestrzenny, a nie natężenie oświetlenia, jest parametrem bezpośrednio decydującym o mechanizmie widzenia, o jakości widzenia i subiektywnym wrażeniu świetlnym.

Z drugiej strony luminancja źródeł światła znajdujących się w polu widzenia jest parametrem bezpośrednio określającym stopień zagrożenia oślnieniem. Dotyczy to również wtórnych źródeł światła, np. błyszczących powierzchni odbijających światło oraz otworów okiennych.

W różnych punktach rozpatrywanej powierzchni luminancja może przyjmować różne wartości od luminancji najmniejszej  $L_{\min}$  do luminancji największej  $L_{\max}$ . Średnia arytmetyczna wartości luminancji we wszystkich punktach obliczeniowych bądź pomiarowych jest **luminancją średnią**  $\bar{L}$  tej powierzchni. Stosunek luminancji najmniejszej  $L_{\min}$  do luminancji średniej  $\bar{L}$  nazywa się **równomiernością luminancji** tej powierzchni ( $\delta_L = L_{\min}/\bar{L}$ ).

Jeżeli dokumenty normatywne stawiają wymagania odnośnie do poziomu luminancji w polu zadania wzrokowego, to określają wymaganą **luminancję eksploatacyjną**  $\bar{L}_m$ , tzn. wartość, od której nie powinna być mniejsza luminancja średnia na określonej powierzchni pola zadania wzrokowego niezależnie od wieku i stanu urządzenia oświetleniowego [8]. Aby to wymaganie spełnić, luminancja początkowa  $\bar{L}_i$ , tzn. luminancja średnia bezpośrednio po oddaniu do eksploatacji nowego urządzenia oświetleniowego, powinna być odpowiednio (o kilkadziesiąt procent) większa.

**Kontrast luminancji** charakteryzuje względną różnicę luminancji przedmiotu zadania wzrokowego  $L_2$  oraz luminancji tła albo większej części pola widzenia  $L_1$ . Oblicza się go rozmaicie [8] i wobec tego podając wartość kontrastu i jego znak (w przypadku  $C_2$  i  $C_3$ ), trzeba określić sposób obliczenia:

$$C_1 = \frac{L_2}{L_1} \quad \text{– wzór dotyczący raczej bodźców niejednoczesnych (kontrast następczy luminancji),}$$

$$C_2 = \frac{L_2 - L_1}{L_1} \quad \text{– wzór zwykle stosowany, dotyczy powierzchni postrzeganych jednocześnie (kontrast równoczesny luminancji),}$$

$$C_3 = \frac{L_2 - L_1}{0,5 \cdot (L_2 + L_1)} \quad \text{– wzór stosowany, jeśli sąsiadujące powierzchnie o różnej luminancji mają porównywalne pola.}$$

Poza kontrastem luminancji operuje się pojęciem kontrastu barwy, który też ułatwia postrzeganie, jeśli jest wyraźny. Mówiąc lub pisząc skrótowo *kontrast*, ma się na myśli kontrast luminancji, a kiedy chodzi o kontrast barwy, trzeba to wyraźnie zaznaczyć.

## 7. Natężenie oświetlenia

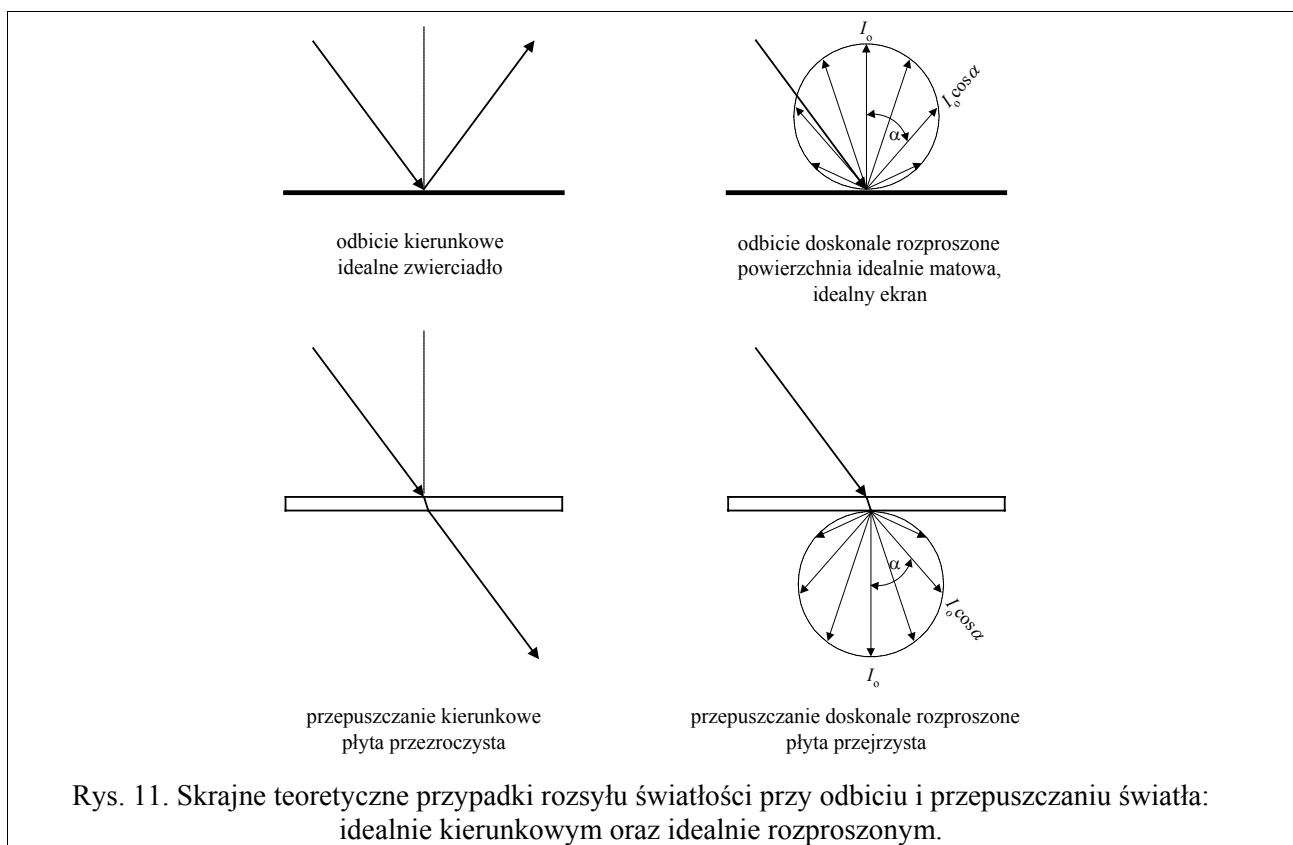
Natężenie oświetlenia  $E$  w określonym punkcie oświetlanej powierzchni jest to stosunek strumienia świetlnego  $d\Phi$  padającego na elementarne pole powierzchni  $dS$ , otaczające ten punkt, do tego pola. Jest to zatem powierzchniowa gęstość strumienia świetlnego padającego na oświetlaną powierzchnię. Jednostką natężenia oświetlenia jest luks (lx).

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad \left[ \frac{\text{lm}}{\text{m}^2} \right] = [\text{lx}]$$

Jak wyżej wspomniano, o jakości widzenia decyduje bezpośrednio luminancja postrzeganych przedmiotów, którą niełatwo się oblicza i mierzy. Sprawa upraszcza się przy oświetlaniu powierzchni rozpraszających światło czyli powierzchni matowych. Powierzchnię idealnie matową odbijającą światło albo płytę przezrystą doskonale rozpraszającą przepuszczone światło, charakteryzuje luminancja jednakowa w każdym kierunku i kosinusoidalny rozsył światłości (rys. 11). W takim przypadku luminancja powierzchni  $L$  jest wprost proporcjonalna do natężenia oświetlenia  $E$  tej powierzchni odbijającej światło (o współczynniku odbicia  $\rho$ ) albo przepuszczającej światło (o współczynniku przepuszczania  $\tau$ ):

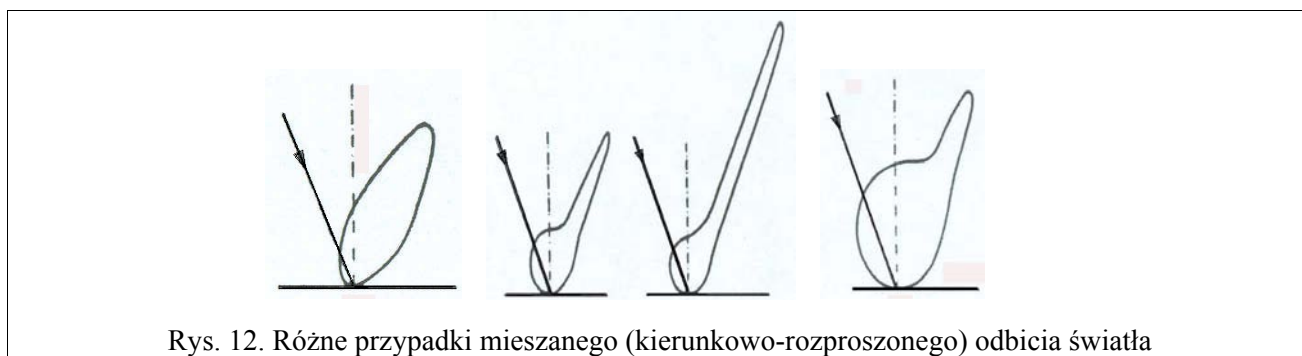
$$L_{\rho} = \frac{\rho \cdot E}{\pi}$$

$$L_{\tau} = \frac{\tau \cdot E}{\pi}$$



Usprawiedliwia to posługiwanie się prostszym narzędziem - natężeniem oświetlenia - jako kryterium przy projektowaniu i badaniu stanu oświetlenia wewnątrz, których ściany i wyposażenie, łącznie z przedmiotami w polu zadania wzrokowego, na ogół są matowe.

Postępowanie takie zawodzi, jeśli znaczną część pola widzenia, a zwłaszcza pola zadania wzrokowego, zajmują stale lub przejściowo powierzchnie błyszczące, odbijające światło kierunkowo, np. przy oświetlaniu mokrej nawierzchni drogi albo narzędzi chirurgicznych w polu operacyjnym lub w jego otoczeniu bezpośrednim.



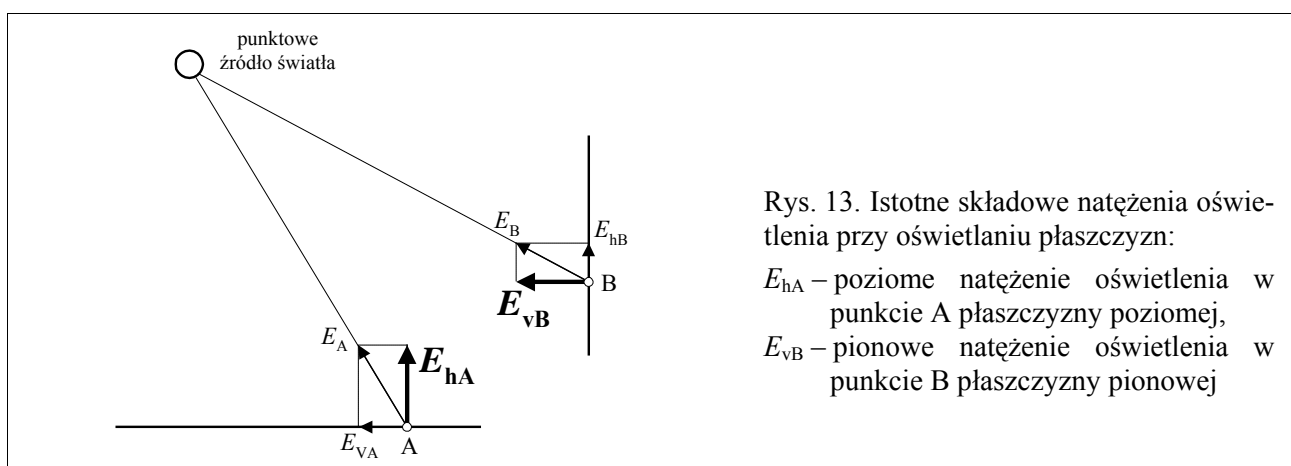
Na rys. 11 przedstawiono dwa skrajne przypadki rozsyłu światłości przy odbiciu i przepuszczaniu światła: idealnie kierunkowym oraz idealnie rozproszonym. W pierwszym przypadku bryłą fotometryczną jest pojedynczy wektor światłości, a w drugim – sfera<sup>1</sup> styczna do świecącej powierzchni w rozpatrywanym punkcie. Możliwe są niezliczone przypadki pośrednie (rys. 12) odpowiadające płynnemu przejściu od pierwszej do drugiej skrajności: pojedynczy wektor światłości

<sup>1</sup> Sfera jest powierzchnią kuli. Sferoida jest powierzchnią elipsoidy.

staje się sferoidą silnie wydłużoną, następnie w miejscu jej styczności z powierzchnią świecąca pojawia się powierzchnia o kształcie zbliżonym do sfery, po czym zwiększa się średnica tej sfery, a maleje dłuższa oś elipsoidy aż do jej zaniku.

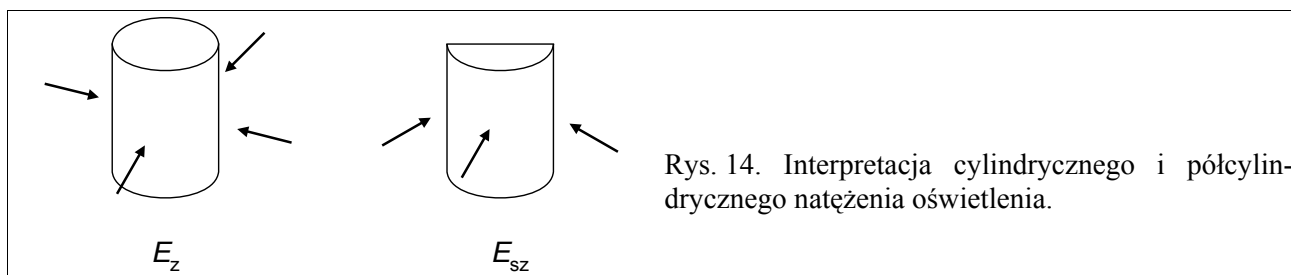
*Reductio ad absurdum* to niezły sposób wykazania różnicy między własnościami powierzchni odbijającej idealnie kierunkowo a powierzchni idealnie matowej, doskonale rozpraszającej światło odbite, jeżeli ktoś ma kłopot ze zrozumieniem tej różnicy. Należy obejrzeć obraz z projektora skierowany na duże zwierciadło, a następnie – zależnie od płci – ogolić się albo nałożyć makijaż przed białą ścianą o dowolnie dużym współczynniku odbicia.

W różnych punktach rozpatrywanej powierzchni natężenie oświetlenia może przyjmować różne wartości od najmniejszego natężenia oświetlenia  $E_{\min}$  do największego  $E_{\max}$ . Średnia arytmetyczna wartości natężenia oświetlenia we wszystkich punktach obliczeniowych bądź pomiarowych jest to **natężenie oświetlenia średnie**  $\bar{E}$  tej powierzchni, zaś stosunek natężenia oświetlenia najmniejszego  $E_{\min}$  do natężenia oświetlenia średniego  $\bar{E}$  jest to **równomierność oświetlenia** tej powierzchni ( $\delta = E_{\min}/\bar{E}$ ).



Normy i przepisy, stawiające wymagania odnośnie do poziomu natężenia oświetlenia w polu zadania wzrokowego, określają wymagane **natężenie oświetlenia eksploatacyjne**  $\bar{E}_m$ , tzn. wartość, od której nie powinno być mniejsze natężenie oświetlenia średnie na powierzchni pola zadania wzrokowego niezależnie od wieku i stanu urządzenia oświetleniowego [7, 8]. Aby to wymaganie spełnić, natężenie oświetlenia początkowe  $\bar{E}_i$ , tzn. natężenie oświetlenia średnie bezpośrednio po oddaniu do eksploatacji nowego urządzenia oświetleniowego, powinno być większe o kilkadziesiąt procent.

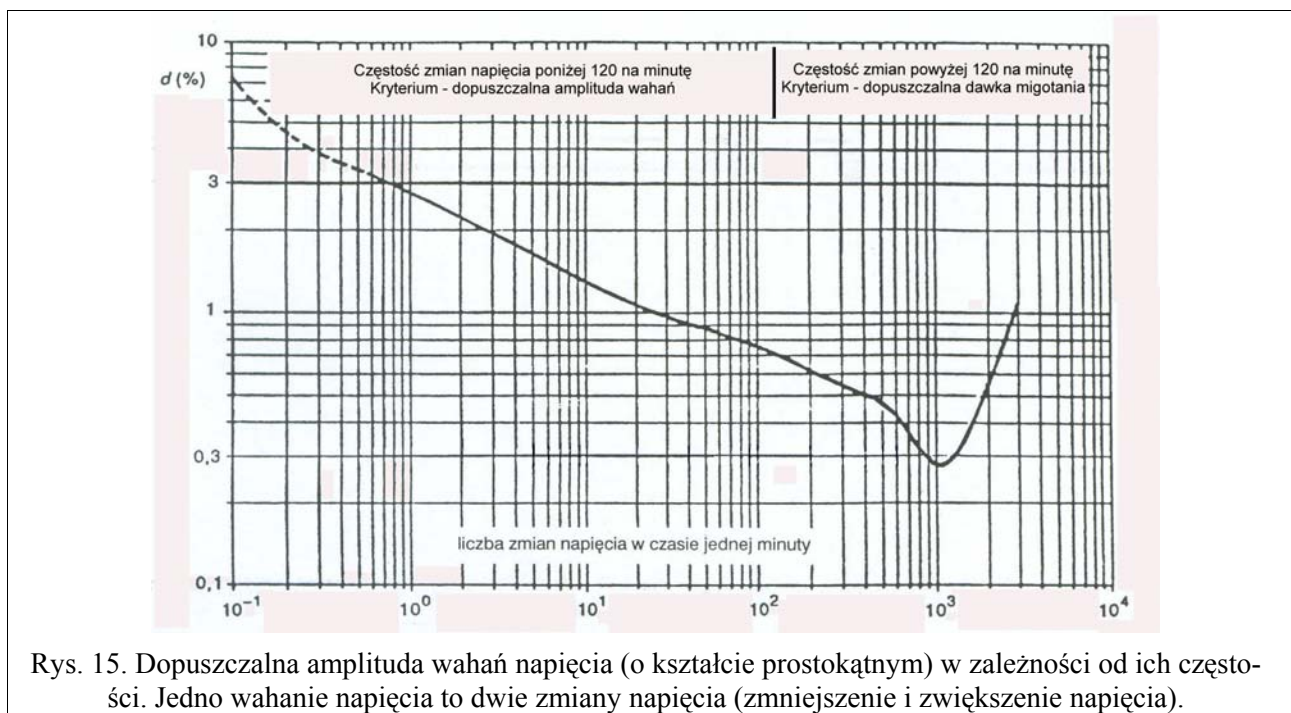
Pamiętać należy, że natężenie oświetlenia jest wielkością wektorową. Wszelkie stawiane wymagania dotyczą składowej natężenia oświetlenia prostopadłej do powierzchni odniesienia, której dotyczy. Łatwo o pomyłkę: na płaszczyźnie poziomej jest to poziome natężenie oświetlenia  $E_h$ , czyli składowa usytuowana pionowo (rys. 13), a na płaszczyźnie pionowej – pionowe natężenie oświetlenia  $E_v$ , czyli składowa usytuowana poziomo. Na pochyłej płaszczyźnie, np. pulpitu sterowniczego, jest to składowa prostopadła do tej płaszczyzny.



Sprawa jest bardziej złożona przy oświetlaniu obiektów trójwymiarowych, jeżeli postrzeganie różnych szczegółów jest istotne. Operuje się pojęciem natężenia oświetlenia odpowiednio półcyldrycznym  $E_{sz}$ , cylindrycznym  $E_z$ , półsferycznym  $E_{hs}$  i sferycznym  $E_o$  w określonym punkcie. Jest to uśrednione natężenie oświetlenia odpowiednio na bocznej powierzchni półcylindra<sup>1</sup> i cylindra, na powierzchni półsfery i sfery [8], przy czym te powierzchnie o bardzo małych wymiarach są umieszczone w rozpatrywanym punkcie i odpowiednio zorientowane przestrzennie. Na przykład natężenie oświetlenia półcylindryczne (na powierzchni półcylindrycznej o osi pionowej, jak na rys. 14) jest miarodajne przy oświetlaniu twarzy oglądanej w zwierciadle w łazience lub w gabinecie kosmetycznym. Dla pojedynczego widza lub pojedynczej kamery jest też miarodajne przy oświetlaniu całej postaci zawodnika na boisku piłkarskim, ale ten półcylinder trzeba obracać, aby sprawdzić wartości natężenia oświetlenia półcylindrycznego miarodajnego dla widzów i kamer patrzących ze wszelkich możliwych kierunków.

## 8. Migotanie światła i tętnienie światła

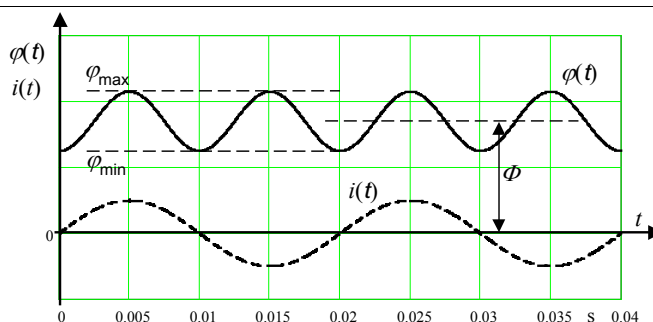
Migotanie światła oraz tętnienie światła to dwa różne zjawiska objawiające się zmiennością w czasie strumienia świetlnego wytwarzanego przez źródło światła oraz barwy światła, a w następstwie - zmiennością natężenia oświetlenia i luminancji oświetlanych obiektów. Szerząca się niedbałość terminologiczna sprawia, że nawet w książkach i normach te dwa terminy są mylone, zamieniane znaczeniami albo traktowane jak synonimy. Tymczasem są to dwa odmienne zjawiska, które mają różne przyczyny i które ogranicza się w rozmaity sposób.



**Migotanie światła** to zmienność wspomnianych wielkości fotometrycznych wywołana zakłóceniami zmianami napięcia – **wahaniami napięcia**, które na ogół mają charakter losowy. Wahania napięcia (szybkie zmiany napięcia o amplitudzie nieprzekraczającej 10%) są wywoływane przede wszystkim pracą odbiorników niespokojnych, zwłaszcza dużymi prądami załączeniowymi (np. prądami rozruchowymi silników) oraz szybkozmiennym obciążeniem niektórych odbiorników. Poza wartością amplitudy wahania napięcia charakteryzuje się **częstością** (a nie częstotliwością, bo na ogół nie są to przebiegi o regularnej powtarzalności). Najłatwiej wyczuwalne i najbardziej dokuczliwe są wahania napięcia o częstości zbliżonej do częstotliwości rezonansowej oka, czyli

<sup>1</sup> Jeżeli nie podano inaczej, to półcylinder ma pionową płaszczyznę cięcia, a półsfera - poziomą.

ok. 10 wahań na sekundę (20 zmian napięcia na sekundę), kiedy amplituda wahań napięcia powinna być ograniczona poniżej 0,3% (rys. 15), podczas gdy wahania o małej częstotliwości (np.  $1 \text{ min}^{-1}$ ) wystarczy ograniczyć do poziomu kilku procent (np. 3%). Przy małej częstotliwości wahań napięcia za kryterium ich dopuszczalności uważa się amplitudę wahań, natomiast przy dużej częstotliwości oblicza się dawkę migotania uwzględniającą kumulację efektów zmęczenia aparatu widzenia. Wahania napięcia mogą zakłócać działanie różnych urządzeń odbiorczych, ale najsurowsze wymagania co do ich ograniczania, jakie stawiają normy i przepisy, przyjmują za podstawę lampy elektryczne, a ściślej – wzorcową żarówkę 60 W, 230 V. Warto podkreślić, że migotanie światła może występować przy zasilaniu lamp zarówno napięciem przemiennym, jak i napięciem stałym.



Rys. 16. Przebieg w czasie prądu przemiennego płynącego przez lampę  $i(t)$  oraz jej strumienia świetlnego  $\varphi(t)$

**Tętnienie światła** to regularna, okresowa zmienność w czasie wspomnianych wielkości fotometrycznych wywołana naturalną, niezakłóconą zmiennością napięcia przemiennego zasilającego źródło światła. **Częstotliwość** tętnienia światła jest dwukrotnie większa ( $2 \cdot f$ ) niż częstotliwość napięcia zasilającego ( $f$ ); przy zasilaniu z instalacji 50 Hz wynosi 100 Hz (rys. 16). Przyczyną tętnienia światła jest niewystarczająca bezwładność procesu wytwarzania światła w lampie.

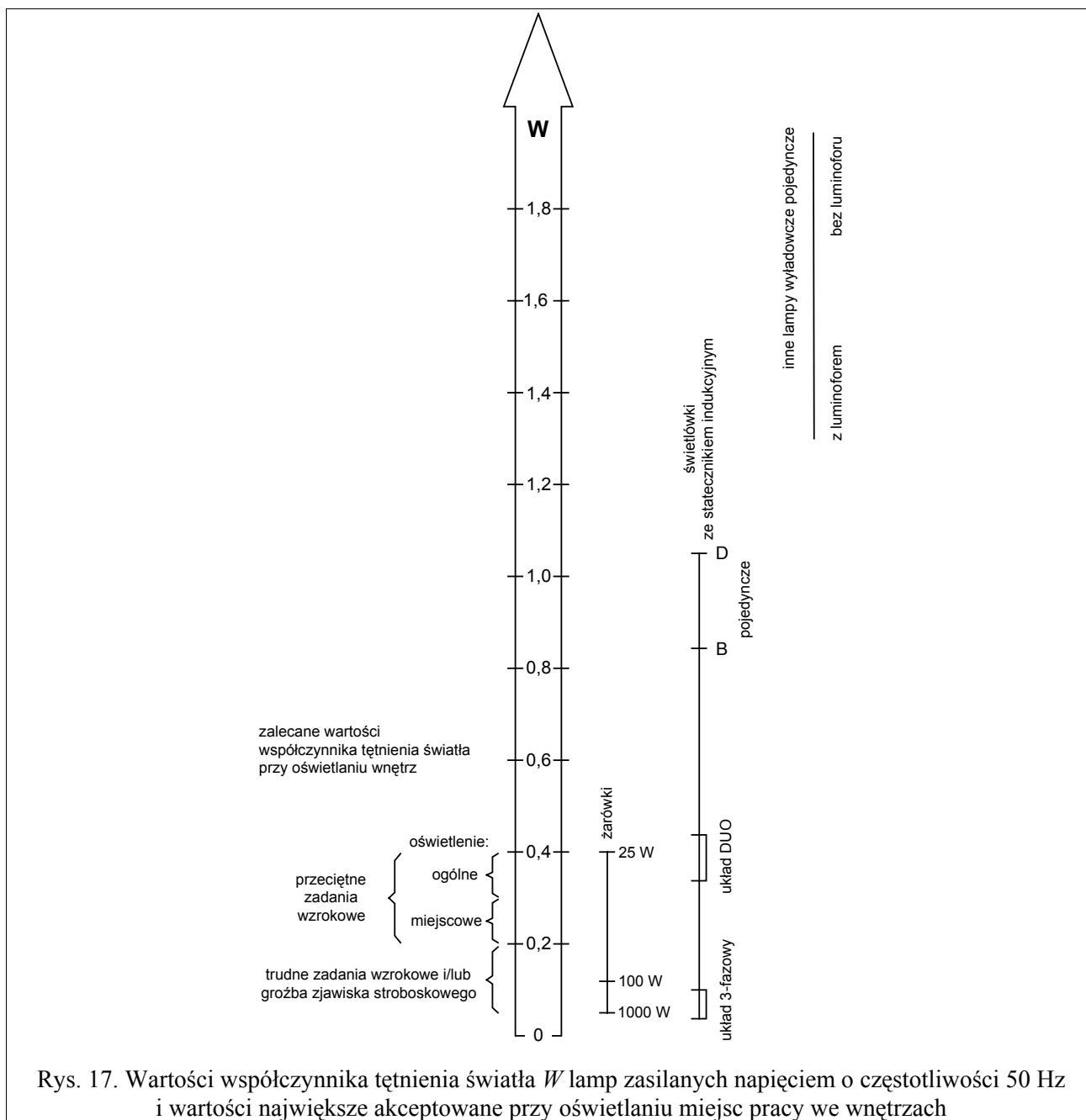
Spośród sześciu znanych definicji i wzorów pozwalających obliczyć współczynnik tętnienia strumienia świetlnego (w skrócie *tętnienie światła*) będzie dalej używana wersja następująca: względna wartość amplitudy tętnień ( $\varphi_{\max} - \varphi_{\min}$ ) odniesiona do wartości średniej arytmetycznej strumienia świetlnego  $\Phi$ . Tak zdefiniowany współczynnik tętnienia  $W$  może przyjmować wartości z zakresu  $0 \div 2$ .

$$W = \frac{\varphi_{\max} - \varphi_{\min}}{\Phi} = 0 \div 2$$

przy czym:  $\varphi_{\max}$  – największa wartość strumienia świetlnego,  
 $\varphi_{\min}$  – najmniejsza wartość strumienia świetlnego,  
 $\Phi$  – średnia wartość strumienia świetlnego.

W toku ewolucji wzrok człowieka kształtował się przy świetle naturalnym nietętniącym. Przy narastającej od zera częstotliwości tętnienia światła początkowo oko wyraźnie rozróżnia rozjaśnienia i przyciemnienia. Efekt ten jest najbardziej dokuczliwy, kiedy częstotliwość tętnienia pokrywa się z **częstotliwością rezonansową oka** (ok. 10 Hz). Przy dalszym zwiększaniu częstotliwości tętnienia jego efekt maleje, słabnie wrażenie oscylującej luminancji. Powyżej **częstotliwości zanikowej oka** aparat widzenia nie dostrzega różnic w luminancji kolejnych obrazów na siatkówce, uśrednia ją zgodnie z prawem Talbota. Podobnie jest ze zmianą położenia obserwowanych obiektów, co wykorzystuje się przy projekcji filmowej (24 klatki na sekundę).





Tętnienia światła o częstotliwości 100 Hz człowiek nie postrzega w sposób świadomy, ale oko je odczuwa. Świadczą o tym elektroretinogramy, czyli przebiegi prądów czynnościowych oka. Świadczą o tym również badania porównawcze ostrości widzenia i szybkości spostrzegania przy świetle tętniącym i nietętniącym. Niekorzystny wpływ tętnienia światła nasila się przy wyężonej pracy wzrokowej i niezbędnej wtedy dużej luminancji w polu zadania wzrokowego.

Przy oświetlaniu przedmiotów poruszających się ruchem obrotowym lub posuwistozwrotnym tętnienie światła może powodować **zjawisko stroboskopowe**, czyli złudzenie bezruchu lub ruchu pozornego o małej prędkości. Ze względu na wynikające stąd zagrożenie wypadkami tętnienie światła powinno być wtedy silnie ograniczane.

W porównaniu z tętnieniem światła o częstotliwości 100 Hz przy zasilaniu lamp bezpośrednio napięciem sinusoidalnym 50 Hz (rys. 17):

- tętnienie światła żarówek nasila się w przypadku stosowania ściemniaczy o sterowaniu fazowym, a tym bardziej przy zasilaniu żarówek prądem wyprostowanym jednofazowo, co w przypadku lamp do ogólnych celów oświetleniowych jest niedopuszczalne z dwóch powodów: znacznie zwiększa się współczynnik tętnienia światła, a częstotliwość tętnienia obniża się do

50 Hz,

- tętnienie nieco słabnie przy zasilaniu lamp prądem zwiększonej częstotliwości 200...400 Hz i praktycznie zanika przy zasilaniu prądem 25...40 kHz.

Światłem nietętniącym jest światło wszelkich świetlówek (liniowych, kołowych, kompaktowych) wyposażonych w stateczniki elektroniczne i zasilanych prądem o częstotliwości rzędu 40 kHz, a tym bardziej światło lamp indukcyjnych zasilanych prądem o częstotliwości rzędu megaherców. Współczynnik tętnienia światła  $W$  wymienionych lamp jest praktycznie równy zero.

## 9. Skuteczność świetlna

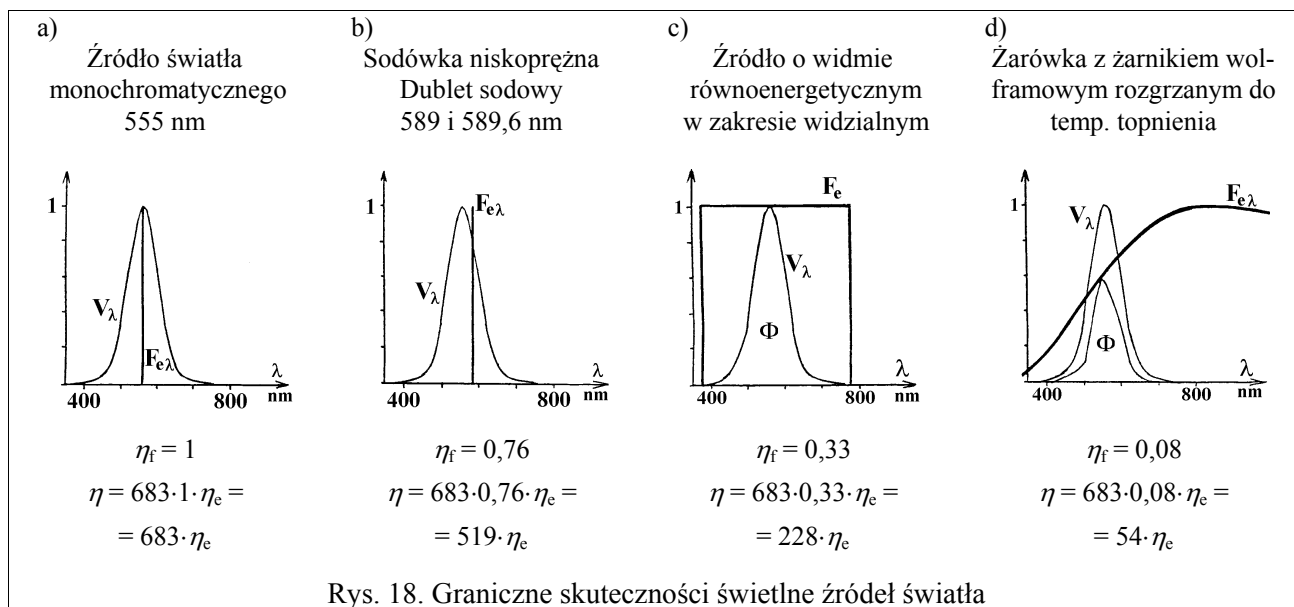
Skuteczność świetlna  $\eta$  źródła światła jest to stosunek strumienia świetlnego wysyłanego przez źródło do pobieranej mocy elektrycznej. Skuteczność świetlna jest wyrażona w lumenach na wat (lm/W) i charakteryzuje sprawność wytwarzania światła; ma taki sens fizyczny, jak sprawność innych odbiorników energii elektrycznej. W przypadku lamp wyładowczych ucziwie jest podawać skuteczność świetlną źródła światła wraz z układem stabilizująco-zapłonowym, która jest mniejsza niż skuteczność świetlna samego źródła światła. Skuteczność świetlną można obliczyć następująco:

$$\eta = \frac{\Phi}{P} = K_m \frac{\int F_{e\lambda} V_\lambda d\lambda}{F_e} \cdot \frac{F_e}{P} = K_m \eta_f \eta_e \quad \left[ \frac{\text{lm}}{\text{W}} \right]$$

przy czym:

$\eta_e = \frac{F_e}{P}$  – Sprawność energetyczna obrazująca, jaka część mocy elektrycznej [W] pobranej przez źródło światła jest wypromieniowana w postaci mocy promienistej [W]. Wynosi przykładowo od 0,23 w przypadku świetlówek do 0,80 w przypadku żarówek.

$\eta_f = \frac{\int F_{e\lambda} V_\lambda d\lambda}{F_e}$  – Sprawność fotometryczna obrazująca względną przydatność widma mocy promienistej rozpatrywanego źródła dla procesu widzenia. Wynosi ona od 0,025 dla żarówek do 0,68 dla sodówek niskoprężnych.



Rys. 18. Graniczne skuteczności świetlne źródeł światła

Sens fizyczny pojęcia *skuteczność świetlna* źródła światła wyjaśniają przykłady z rys. 18. Zarazem wskazują one nieprzekraczalną granicę poziomu skuteczności świetlnej lamp o określonej zasadzie działania. Dla uproszczenia wszystkie przykłady są czysto teoretyczne i kolejno dotyczą następujących sytuacji:

a) Źródło światła monochromatycznego o jednej linii widmowej 555 nm odpowiadającej maksym-

malnej czułości oka ludzkiego ( $V_\lambda = 1$ ). Być może pojawiają się takie diody świecące; aktualnie najbliższe tej sytuacji są niektóre świetliki (robaczki świętojańskie), bioluminescencyjne źródła światła.

- b) Niskoprężna sodówka, której widmo zawiera tylko dublet sodowy. W widmie rzeczywistej sodówki ponadto występuje śladowo widmo pasmowe o znikomej gęstości widmowej  $E_{e\lambda}$ , co obniża sprawność fotometryczną do  $\eta_f = 0,68$ , a skuteczność świetlną do  $\eta = 464 \cdot \eta_e$ .
- c) Źródło o widmie równoenergetycznym w zakresie widzialnym, którego barwa światła nazywa się bielą równoenergetyczną (iluminant E) i gwarantuje idealne oddawanie barw oglądanych obiektów.
- d) Żarówka z żarnikiem wolframowym rozgrzanym do temperatury topnienia (3660 K).

Największą skutecznością świetlną kuszą źródła światła monochromatycznego, o jednej linii widmowej jak najbliższej długości fali 555 nm (rys. 18a, b). Niestety, w takim świetle nie jest możliwe poprawne rozróżnianie barw oświetlanych obiektów.

## 10. Własności barwowe światła

### 10.1. Elementarz kolorymetrii

Własności barwowe światła lamp elektrycznych do ogólnych celów oświetleniowych określa się w sposób uproszczony podając dwa parametry: temperaturę barwową najbliższą  $T_{cp}$  oraz ogólny wskaźnik oddawania barw  $R_a$ . Nowa norma dotycząca oświetlenia miejsc pracy we wnętrzach [7] stawia wymagania odnośnie do wartości wskaźnika  $R_a$  na różnych stanowiskach pracy. Nie wystarcza to w takich sytuacjach, również poza miejscami pracy, gdzie własności barwowe światła mają szczególne znaczenie, gdzie chodzi o bardzo wierne oddawanie barw albo wprost przeciwnie – o ich zniekształcenie dla uzyskania efektów specjalnych. Rozumne operowanie parametrami barwowymi światła wymaga zrozumienia podstawowych praw kolorymetrii trójchromatycznej [2].

Trzy prawa Grassmana stanowiące podstawę kolorymetrii i najważniejsze wnioski z nich wynikające można przedstawić następująco.

**I prawo Grassmana.** Każda barwa może być określona za pomocą trzech niezależnych barw (trzech współrzędnych), przy czym trzy barwy są niezależne, jeżeli addytywne (przez dodawanie) mieszanie dowolnie wybranych dwóch z nich – bez względu na proporcje składników – nie może odtworzyć trzeciej. Istnieje nieograniczona liczba możliwych układów trzech barw niezależnych, natomiast cztery dowolne barwy są zawsze we wzajemnej zależności. Ze względów praktycznych stosuje się tylko kilka wybranych **układów trójchromatycznych** (układów trzech barw niezależnych). Prawo to jest podstawą rachunku trójchromatycznego, barwnego druku, barwnej fotografii i barwnej telewizji.

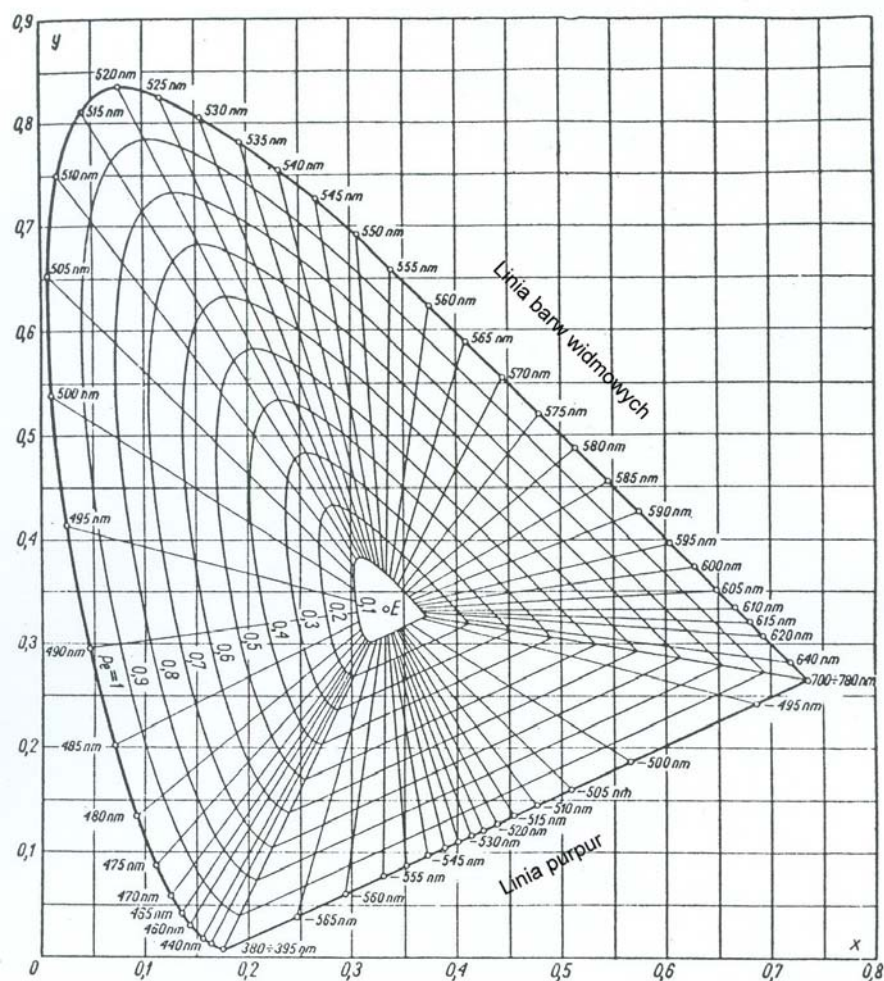
**II prawo Grassmana.** Jeżeli w mieszaninie dwóch barw jeden ze składników jest utrzymywany bez zmiany, a drugi poddawany ciągłej zmianie, to barwa mieszaniny zmienia się również w sposób ciągły. Prawo to wyklucza możliwość istnienia barwy, która by nie sąsiadowała z innymi, nie różniła się dowolnie mało od jakichś innych barw. Oznacza to również, że promieniowanie świetlne o dowolnej barwie może być drogą ciągłych przemian przekształcone w promieniowanie o jakiegokolwiek innej barwie. Ciągła zmiana **barwy** nie jest jednak równoznaczna z ciągłą zmianą subiektywnego **wrażenia barwy**. Aby obserwator odczuł zmianę, musi ona przekroczyć pewną wartość progową, jak w przypadku wszelkich innych wrażeń odbieranych zmysłami.

**III prawo Grassmana.** Światła o tej samej barwie dają w mieszaninach z innym światłem identyczny wynik, bez względu na ich rozkład widmowy. Barwa mieszaniny zależy tylko od barw jej składników, a nie zależy od ich rozkładu widmowego. Określone mu widmu promieniowania widzialnego odpowiada jedna i tylko jedna barwa światła. Określonej barwie światła może odpowiadać nieskończona liczba kombinacji rozkładów widmowych promieniowania.

Kiedy Newton rozszczepił światło białe przechodzące przez pryzmat, początkowo wydawało się, że wrażenie barwy zależy od długości fali świetlnej wpadającej do oka, chociaż powinno zastanawiać, iż w tym widmie rozszczepienia światła białego brakuje wielu barw. Okazało się później,

że po zmieszaniu choćby dwóch wiązek światła monochromatycznego o różnej długości fali oko widzi nie dwie różne barwy, ale jedną - rezultat mieszania i nie jest w stanie rozpoznać, jakie barwy weszły w skład tej mieszaniny. Fenomenem procesu widzenia barwnego jest zatem **metameryzm**, tzn. nierozróżnianie składu widmowego promieniowania świetlnego. Percepcja superpozycji fal świetlnych przez oko różni się od percepcji superpozycji fal dźwiękowych przez ucho, które oddzielne tony tworzące akordy może zidentyfikować. Skoro oko nie analizuje składu widmowego promieniowania, to tworząc barwne obrazy rzeczywistości nie trzeba odtwarzać ich właściwości spektralnych, lecz wystarczy odtwarzać bodźce barwowe.

Układy trójchromatyczne służą do definiowania **barw chromatycznych** (kolorowych, scharakteryzowanych odcieniem) i przeprowadzania różnych operacji z użyciem tych barw. Przeciwstawieniem są **barwy achromatyczne** (niekolorowe), czyli wszelkie stopnie szarości od bieli do czerni, które można przedstawić przy użyciu podziałki jednowymiarowej, za pomocą jednego parametru.



Rys. 19. Wykres chromatyczności xyz [2]

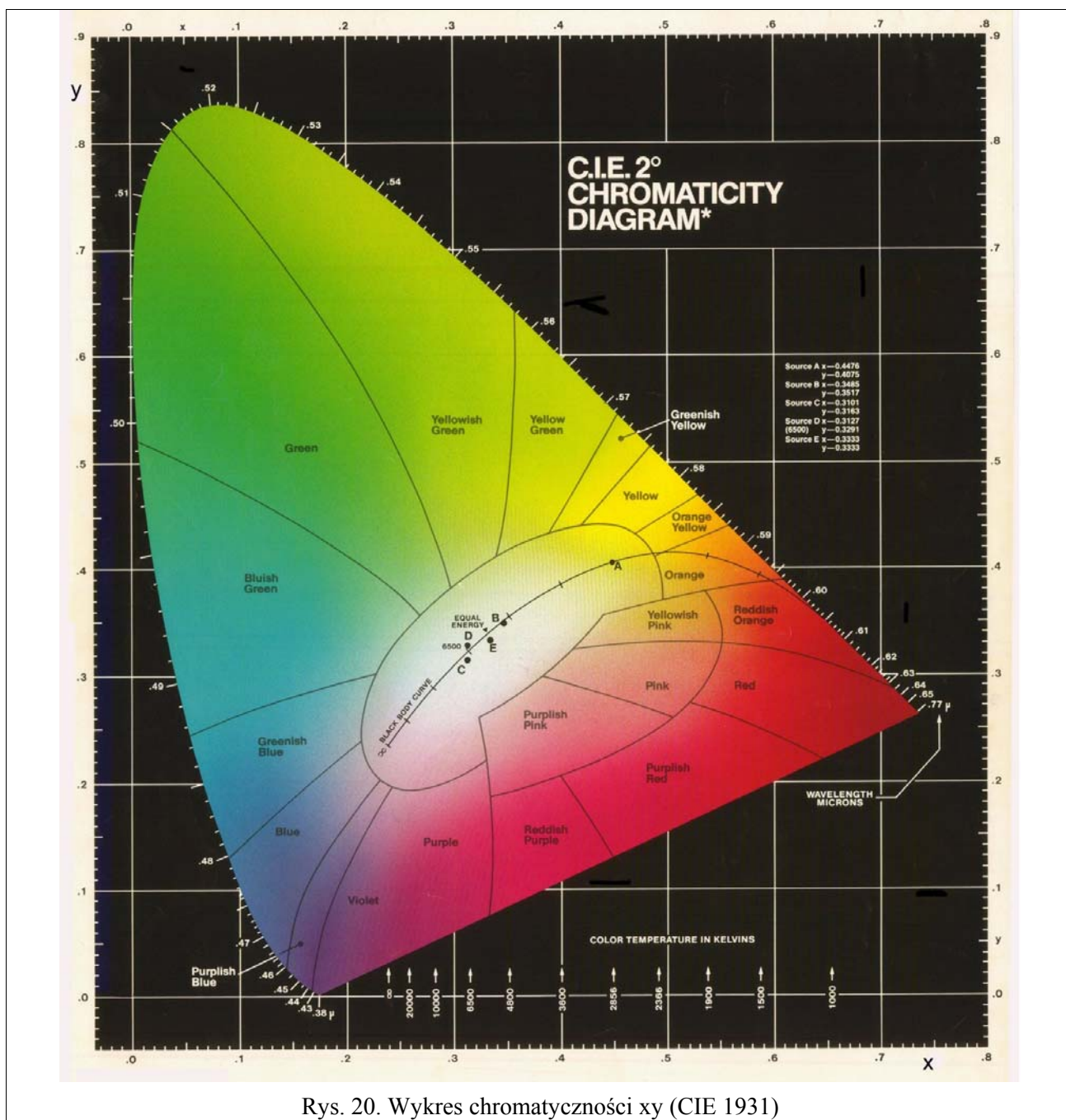
Na „półeliptycznej” linii barw widmowych są podane długości fali dominującej promieniowania monochromatycznego odpowiadającego danej barwie. Na dolnej linii purpur są podane (ze znakiem minus) długości fali dopełniającej promieniowania monochromatycznego, którego barwa zmieszana w odpowiedniej proporcji z daną barwą purpurową daje biel równoenergetyczną (punkt E).

Spośród niezliczonych układów trójchromatycznych, jakie można by utworzyć w oparciu o I prawo Grassmana, zwłaszcza dwa następujące wykorzystuje się w technice oświetleniowej:

**układ (XYZ)** – normalny układ kolorymetryczny CIE 1931, najwygodniejszy przy rozważaniu addytywnego (przez dodawanie) mieszania barw (rys.19 i 20),

**układ (UVW)** – układ kolorymetryczny CIE 1960 równomiernej przestrzeni barw UCS (ang.

*uniform colour scale*), najodpowiedniejszy przy rozważaniu różnicy wrażeń barwnych, przy określaniu temperatury barwowej  $T_c$  bądź temperatury barwowej najbliższej  $T_{cp}$  oraz wskaźników oddawania barw indywidualnych  $R_i$  oraz ogólnego  $R_a$ ; jego pochodną jest układ (u'v') CIE 1976 (rys. 21).



Rys. 20. Wykres chromatyczności xy (CIE 1931)

W każdym z układów procedurę określania barwy można tak ustalić, aby operować względnymi udziałami każdego z trzech bodźców, na przykład:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

Zważywszy, że suma trzech bodźców względnych jest równa jedności

$$x + y + z = 1$$

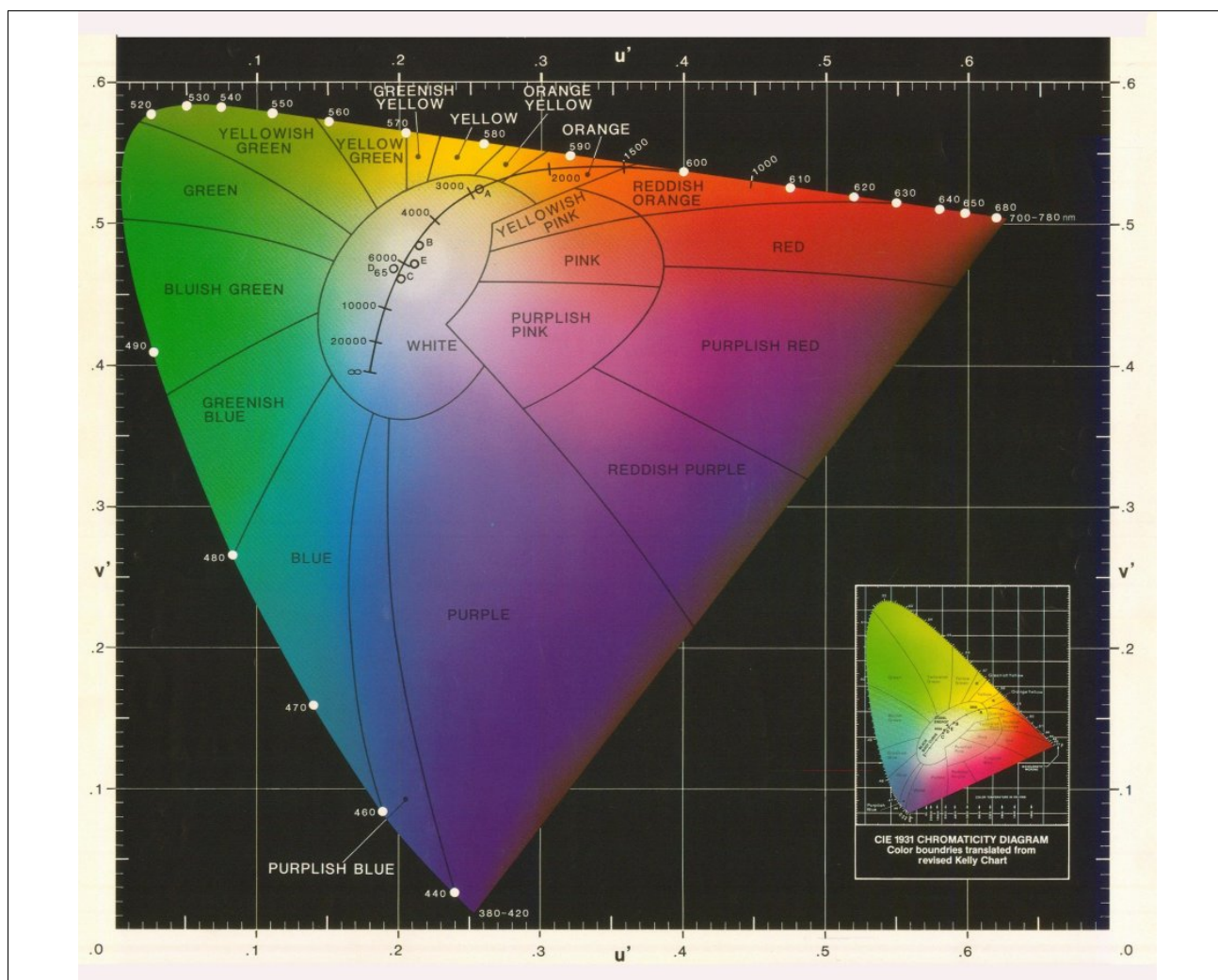
barwę światła można jednoznacznie określić podając tylko dwie informacje, np. współrzędne x-y



lub  $u-v$ , a wartość trzeciej jest domyślna:  $z = 1 - (x + y)$  albo  $w = 1 - (u + v)$ . Oznacza to, że wszelkie barwy chromatyczne można przedstawić za pomocą tylko dwóch parametrów. Przestrzeń barw może być tworem dwuwymiarowym, przedstawionym na płaszczyźnie, w postaci płaskiej figury, o kształcie na ogół zbliżonym do trójkąta (trójkąt barw).

Wybrane bodźce XYZ (podobnie UVW) są abstrakcyjne, fizycznie nierealne, tzn. na przykład, że nie można zobaczyć barwy o parametrach  $x = 1, y = 0, z = 0$ . Bodźce podstawowe zostały tak dobrane, aby uzyskany trójkąt barw spełniał postawione założenia, ważne z punktu widzenia użytkowego. Na przykład przy konstruowaniu układu (XYZ) główne założenia były następujące:

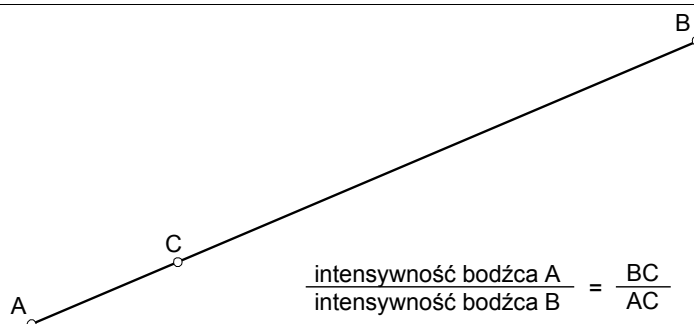
- światło o jednakowym udziale wszystkich trzech bodźców  $x = y = z = 1/3$  ma być achromatyczne (niekolorowe), tzn. ma mieć barwę bieli równoenergetycznej (pkt E na rys. 19 i 20),
- barwy widmowe (barwy czyste), pochodzące z rozszczepienia światła białego, mają leżeć na linii barw widmowych (*spectrum locus*) ograniczającej trójkąt barw i mają być możliwie równo odległe od punktu E bieli równoenergetycznej,
- punkt określający barwę mieszaniny dwóch bodźców świetlnych ma leżeć na prostej łączącej punkty opisujące barwy składowe i to w miejscu ściśle określonym przez proporcje obu składników (rys. 22),
- ponieważ skrajne barwy widmowe (czerwień i fiolet) muszą się znaleźć na końcach linii barw widmowych, to odcinek prosty je łączący będzie linią purpur (mieszaniny czerwieni i fioletu) zamykającą trójkąt barw.



Rys. 21. Równomierna przestrzeń barw  $u'v'$  (CIE 1976). W dowolnej części tej przestrzeni ta sama odległość geometryczna oznacza w przybliżeniu tę samą liczbę progów odczuwalności różnicy barwy.

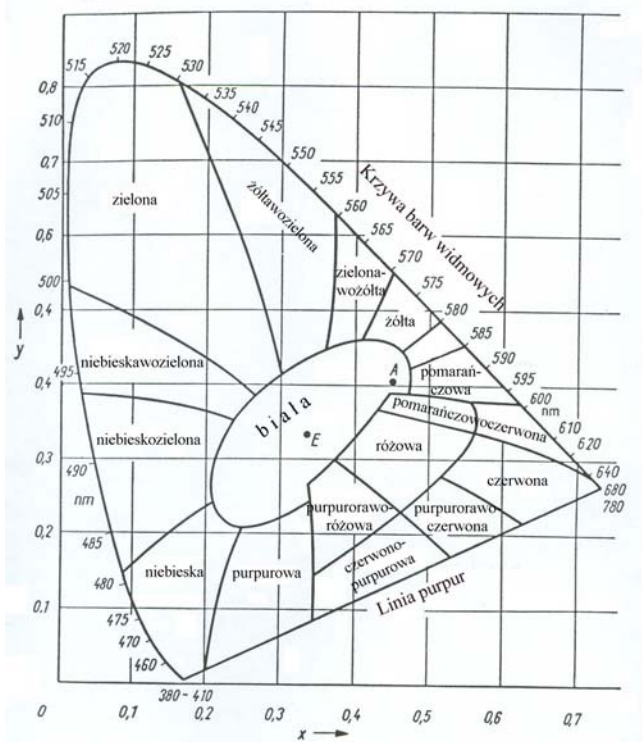
Dowolną barwę chromatyczną można zdefiniować na wykresie chromatyczności ( $xy$ ) – jak w przypadku każdego wykresu o współrzędnych prostokątnych – podając dwie współrzędne ( $x, y$ ), co jednak jest informacją mało komunikatywną. Chętniej określa się to inaczej (rys. 19), podając:

- długość fali dominującej  $\lambda_{\text{dom}}$  i czystość pobudzenia  $p$  w przypadku barw, które można otrzymać mieszając barwę widmową z bielą równoenergetyczną,
- długość fali dopełniającej  $\lambda_{\text{dop}}$  (ze znakiem minus) i czystość pobudzenia  $p$  w przypadku barw leżących w trójkącie purpur, których nie można otrzymać mieszając barwę widmową z bielą równoenergetyczną.



Rys. 22. Addytywne mieszanie dwóch wiązek barwnych światła w układzie XYZ: po zmieszaniu w proporcji podanej na rysunku wiązki światła o barwie określonej (w trójkącie barw) przez punkt A z wiązką o barwie określonej przez punkt B powstaje światło o barwie określonej przez punkt C.

Z rys. 19 wynika, jak należy rozumieć długość fali dominującej oraz długość fali dopełniającej. Linie proste jednakowej długości fali dominującej łączą punkt E bieli równoenergetycznej z odpowiednią barwą widmową (na linii barw widmowych), której odpowiada ta właśnie długość fali promieniowania monochromatycznego. Linie tej samej długości fali dopełniającej  $\lambda_{\text{dop}}$  są przedłużeniem poprzednich poza punkt E do linii purpur.

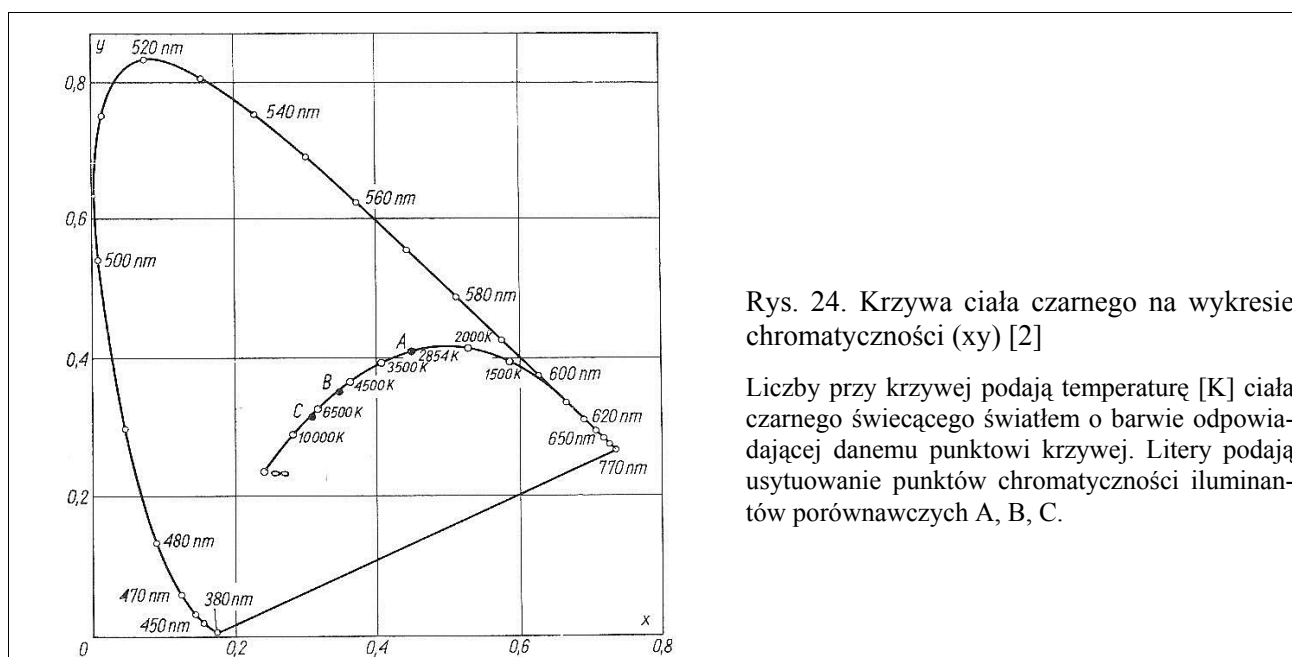


Rys. 23. Pola barw w normalnym układzie kolorymetrycznym ( $xyz$ )

Czystość pobudzenia  $p$  określa względny udział bodźca barwowego (barwy widmowej lub czystej purpury) w mieszaninie ze światłem białym. Na wykresie chromatyczności ( $xy$ ) jest to zmierzona wzdłuż linii jednakowej długości fali (dominującej lub dopełniającej) odległość punktu określającego barwę od punktu E podzielona przez odległość linii trójkąta barw (linii barw widmowych lub linii purpur) od punktu E. Zatem na linii barw widmowych i na linii purpur  $p = 1$ , a w punkcie E bieli równoenergetycznej  $p = 0$ ; między tymi punktami skrajnymi podziałka jest liniowa. Barwom, których chromatyczność różni się tylko czystością pobudzenia (stopniem nasycenia) można przypisać pola barw, wycinki w trójkącie barw, i nazwać je w sposób zrozumiały dla każdego (rys. 20 i 23). Plastycy i inne osoby, rozróżniające i umiejące nazwać kilkakrotnie więcej barw niż przeciętny śmiertelnik, widzą w trójkącie barw wielokrotnie więcej pól. Na przykład barw tylko na literę „b” rozróżniają ponad dwadzieścia: bahama yellow, bananowa, beżowa, biała (odcienie), biskupia, błękitna, błękit bromotymolowy, błękit lazurowy, błękit metylenowy, błękit paryski, błękit pruski, błękit Thénarda, błękit Turnbulla, błękit tymolowy, bordowa, brązowa (odcienie), brunatna, brzoskwiniowa, buraczkowa, burgund, bursztynowa (odcienie), bura.

## 10.2. Barwa postrzegana światła

Od dawna kusiała możliwość określenia barwy światła za pomocą tylko jednej liczby. Skoro rozgrzane ciało czarne zaczyna świecić: nagrzane do 800 K jest czerwone, nagrzane do 3000 K – żółte, nagrzane do 4000 K – ciepłobiałe, nagrzane do 5000 K – zimnobiałe, nagrzane do 8000 K – niebieskawobiałe, to można jednoznacznie zdefiniować barwę rozgrzanego ciała czarnego podając tylko jedną liczbę, jego temperaturę bezwzględną w kelwinach. Miejscem geometrycznym punktów chromatyczności światła emitowanego przez ciało doskonale czarne (promiennik zupełny) o różnej temperaturze jest krzywa ciała czarnego (rys. 24). Z jej przebiegu wynika, że może ona dobrze reprezentować zwłaszcza barwy o małym nasyceniu.



Rys. 24. Krzywa ciała czarnego na wykresie chromatyczności ( $xy$ ) [2]

Liczby przy krzywej podają temperaturę [K] ciała czarnego świecącego światłem o barwie odpowiadającej danemu punktowi krzywej. Litery podają usytuowanie punktów chromatyczności iluminantów porównawczych A, B, C.

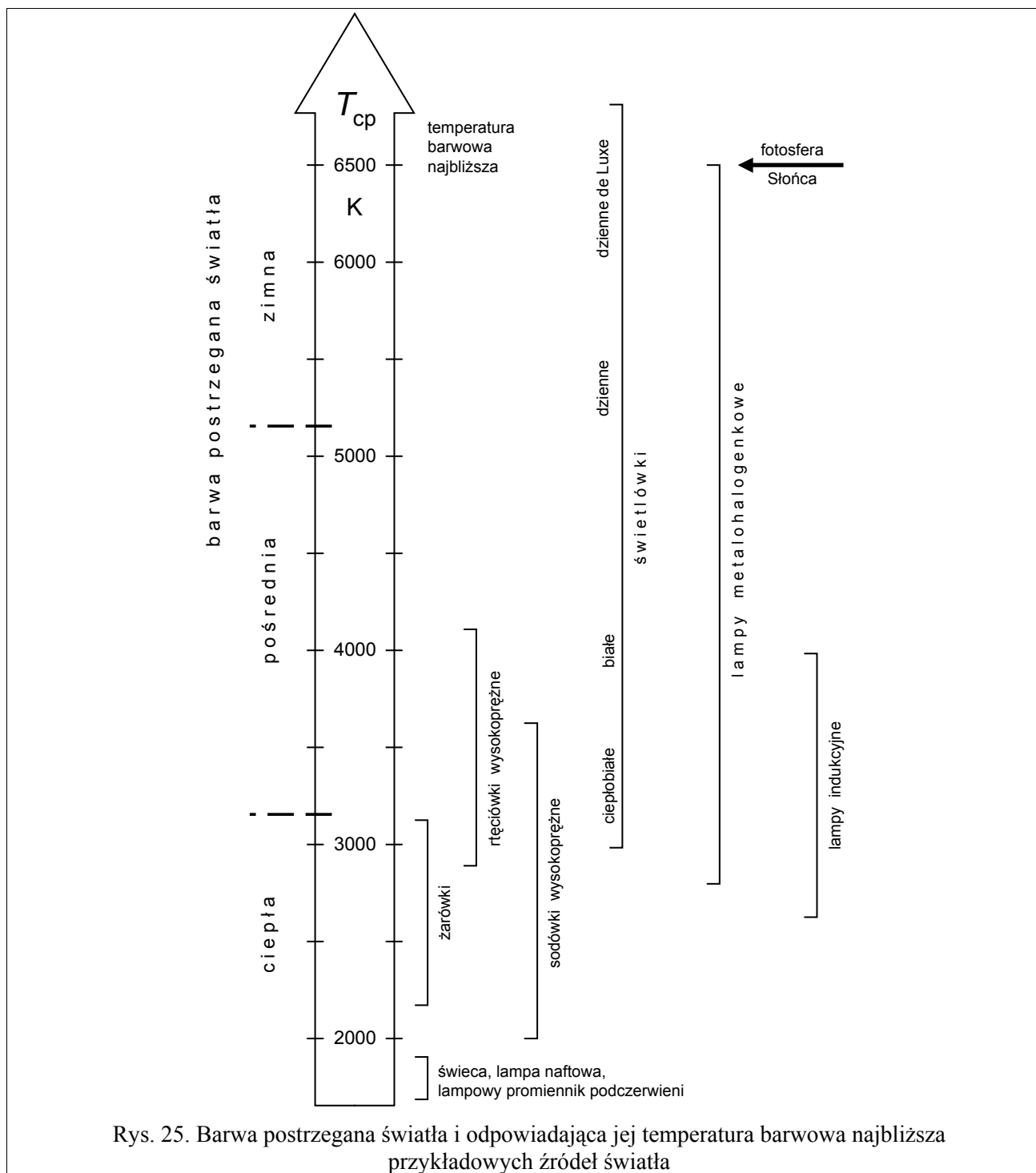
Liczne elektryczne źródła światła emitują światło o chromatyczności usytuowanej na krzywej ciała czarnego bądź w jej pobliżu. Dzięki temu barwę postrzeganą światła emitowanego przez lampy elektryczne (rys. 25) można scharakteryzować:

- **temperaturą barwową**  $T_c$  (ang. *colour temperature*), czyli temperaturą ciała czarnego wytwarzającego promieniowanie o tej samej chromatyczności, co dotyczy zwłaszcza żarówek, albo
- **temperaturą barwową najbliższą**  $T_{cp}$  (ang. *correlated colour temperature*), czyli temperaturą ciała czarnego wytwarzającego promieniowanie o chromatyczności najmniej różniącej się od chromatyczności światła rozpatrywanego źródła.



Jeżeli punkt chromatyczności światła rozpatrywanego źródła nie leży na krzywej ciała czarnego, to w równomiernej przestrzeni barw (uv) wystarczy znaleźć najbliższą (w sensie geometrycznym) leżącą punkt na tej krzywej i odpowiadającą mu temperaturę podać jako temperaturę barwową najbliższą  $T_{cp}$  światła rozpatrywanego źródła. Podobna operacja na wykresie chromatyczności (xy) jest bardziej skomplikowana, bo w różnych obszarach trójkąta barw tej samej różnicy wrażenia barwy odpowiadają różne odległości geometryczne.

W zależności od temperatury barwowej najbliższej barwę postrzeganą światła (rys. 25) określa się jako ciepłą ( $T_{cp} \leq 3300$  K), pośrednią ( $3300$  K  $< T_{cp} \leq 5300$  K) lub zimną ( $T_{cp} > 5300$  K). Identyczna temperatura barwowa  $T_{cp}$  różnych źródeł światła oznacza zbliżoną barwę światła, ale nie oznacza takiego samego widma promieniowania, co wynika z III prawa Grassmana.

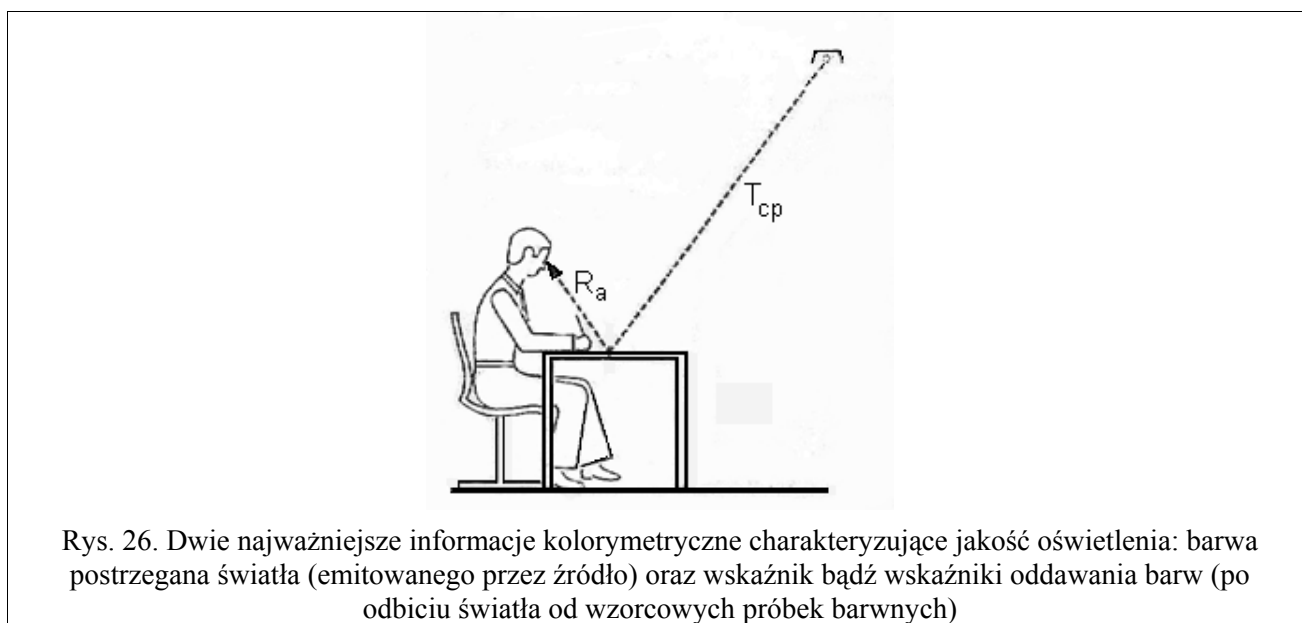


Rys. 25. Barwa postrzegana światła i odpowiadająca jej temperatura barwowa najbliższa przykładowych źródeł światła

Lampy elektryczne o takiej samej zasadzie działania i tej samej nazwie mogą mieć temperaturę barwową najbliższą światła znacznie różniącą się, czego wyrazem jest rozpiętość wartości na rys. 25. W przypadku żarówek temperatura barwowa światła jest o kilkadziesiąt kelwinów większa niż temperatura robocza żarnika i można ją precyzyjnie określić bez pomiarów, jeśli zna się temperaturę żarnika. W przypadku lamp wyładowczych bez luminoforu decyduje skład atmosfery jarznika i ciśnienie cząstkowe jej składników, a w przypadku lamp z luminoforem decyduje jego skład chemiczny i struktura cząsteczek.

### 10.3. Wskaźnik oddawania barw

Barwa postrzegana światła, scharakteryzowana temperaturą barwową, nie informuje, jak w świetle określonej lampy są oddawane barwy obserwowanych przedmiotów (rys. 26), bo światła o tej samej barwie mogą mieć bardzo różny rozkład widmowy, co wynika z III prawa Grassmana. Natomiast przybliżoną informację na ten temat stanowi **ogólny wskaźnik oddawania barw  $R_a$**  (ang. *general colour rendering index*). Oblicza go komputer po otrzymaniu w postaci cyfrowej widma światła  $F_{e\lambda} = f(\lambda)$ , o które chodzi.



Procedura obliczeń ogólnego wskaźnika oddawania barw  $R_a$  jest następująca.

1. Komputer wczytuje gęstość widmową mocy promienistej  $F_{e\lambda}$  rozpatrywanego źródła światła w zakresie widzialnym i na tej podstawie oblicza temperaturę barwową najbliższą  $T_{cp}$ .
2. Komputer wybiera iluminant<sup>1</sup> porównawczy o zbliżonej chromatyczności. Wchodzą w rachubę następujące iluminanty (rys. 20 i 24):
  - iluminant A – odpowiadający światłu promiennika zupełnego P w temperaturze 2856 K,
  - iluminant B – odpowiadający światłu słonecznemu bezpośrednio o temperaturze barwowej najbliższej  $T_{cp} = 4874$  K,
  - iluminant C – odpowiadający przeciętnemu światłu dziennemu o temperaturze barwowej najbliższej  $T_{cp} = 6774$  K,
  - iluminant D65 – odpowiadający fazie światła dziennego o temperaturze barwowej najbliższej  $T_{cp} = 6504$  K,

<sup>1</sup> Iluminant – promieniowanie o precyzyjnie określonym widmie w zakresie widzialnym, decydującym o postrzeganiu barwy oświetlanych przedmiotów. Fizyczna realizacja źródła tego promieniowania od pewnego czasu nie jest normelizowana.

oraz iluminanty dodatkowe – odpowiadające fazie światła dziennego D55 ( $T_{cp} = 5495$  K) i D75 ( $T_{cp} = 7519$  K).

Na przykład dla żarówki komputer wybierze iluminant A, a dla świetlówki de Luxe o świetle dziennym - iluminant D65.

3. Komputer porównuje oddawanie barw w świetle rozpatrywanego źródła z oddawaniem tych samych barw w świetle iluminantu porównawczego. Jeżeli chromatyczność  $i$ -tej próbki barwnej oświetlanej jednym i drugim światłem nie różni się albo różni się w stopniu nierozpoznawalnym przez oko, to indywidualny wskaźnik oddawania tej barwy  $R_i$  wynosi 100. Jeśli występuje różnica, to komputer wyraża ją liczbą  $n$  progów odczuwalności różnicy barwy w równomiernej przestrzeni barw (uv) i przypisuje tej próbce indywidualny wskaźnik oddawania barwy

$$R_i = 100 - n \cdot 5$$

Jeżeli na przykład  $R_2 = 65$ , oznacza to, iż w przypadku drugiej próbki (o barwie ciemnej szarawożółtej przy świetle dziennym) jej chromatyczność przy oświetleniu jednym i drugim światłem tak się różni, że normalne oko jest w stanie dostrzec między jedną a drugą barwą siedem progów odczuwalności różnicy barwy ( $R_i = 100 - 7 \cdot 5 = 65$ ). Wskaźnik  $R_i$  ma wartość ujemną, jeśli między jedną a drugą barwą oko jest w stanie dostrzec więcej niż dwadzieścia progów odczuwalności różnicy barwy.

4. Opisaną wyżej operację komputer wykonuje osiem razy dla ośmiu próbek podstawowych z atlasu Munsella reprezentujących wybrane barwy złamane, zwykle dominujące w polu widzenia (jasna szarawoczerwona, ciemna szarawożółta, silna żółtozielona, średnia żółtawozielona, jasna niebieskawozielona, jasna niebieska, jasna fioletowa, jasna czerwonopurpurowa), po czym oblicza średnią arytmetyczną otrzymanych ośmiu indywidualnych wskaźników oddawania barwy:

$$R_a = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 + R_8}{8}$$

Tak obliczona średnia jest to **ogólny wskaźnik oddawania barw  $R_a$**  (rys. 27), przy czym wytwórca źródeł światła może, ale nie musi podawać wartości poszczególnych wskaźników indywidualnych od  $R_1$  do  $R_8$ .

5. Operację opisaną w punkcie 3 można kontynuować dla sześciu dalszych próbek barwnych: silna czerwona, silna żółta, silna zielona, silna niebieska, jasna żółtaworóżowa (skóra człowieka rasy białej), średnia oliwkowozielona (liście). Oblicza się dla nich **dodatkowe (szczególne) wskaźniki oddawania barw** od  $R_9$  do  $R_{14}$ , które podaje się każdy z osobna, bo uśrednianie ich byłoby bezsensowne. Są one przydatne, kiedy chodzi o oświetlenie dekoracyjne szczególnie wiernie oddające albo przesadnie uwydatniające określoną barwę bądź określone barwy.

Z powyższych wyjaśnień wynikają ważne wnioski praktyczne. Ogólny wskaźnik oddawania barw  $R_a$  nie jest wystarczającą informacją, dopóki nie zna się temperatury barwowej najbliższej światła, tzn. dopóki nie wie się, z jakim iluminantem porównywano oddawanie barw. Pełna informacja może zatem wyglądać następująco

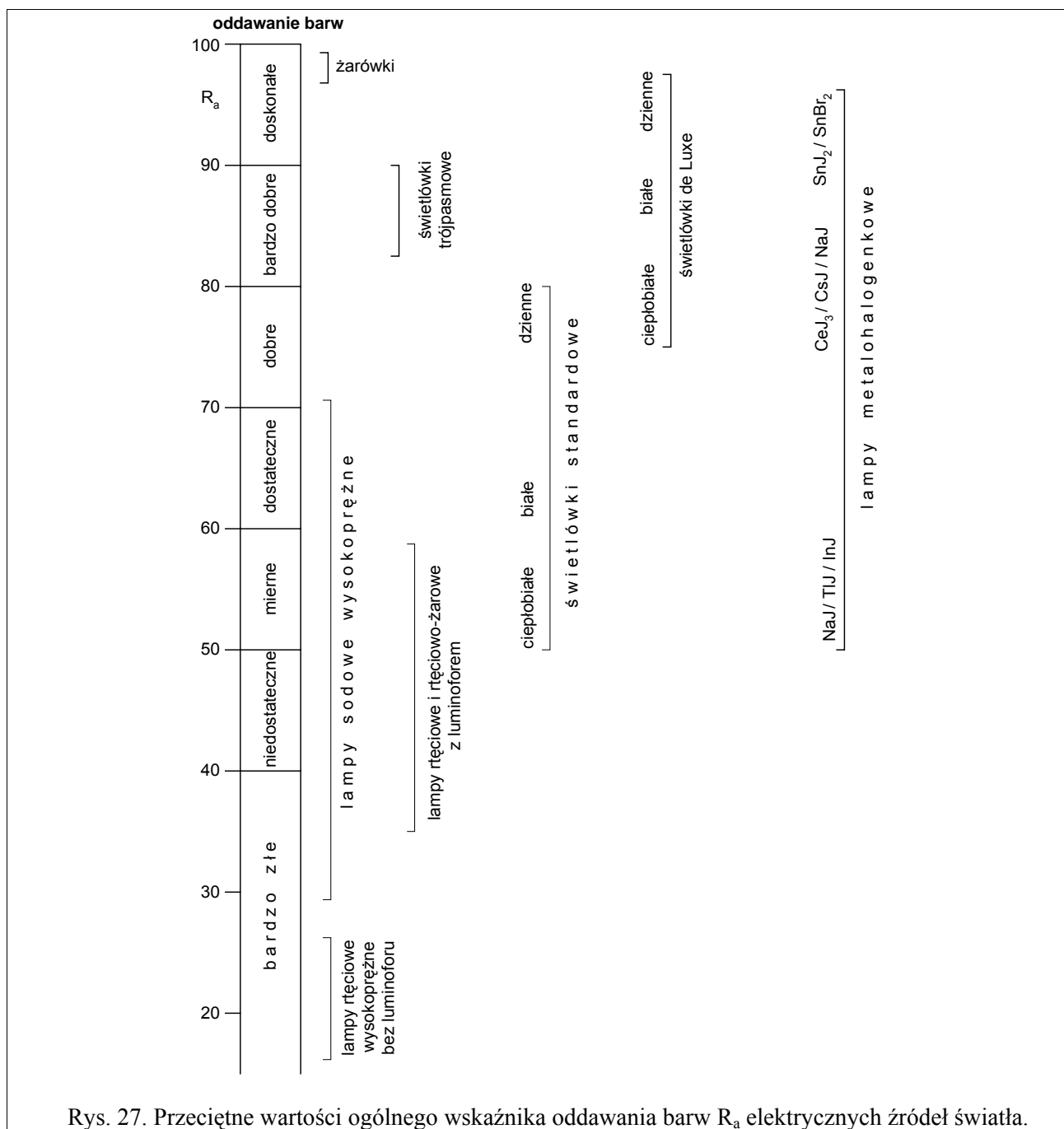
$$R_a (P 2300) = 35 \text{ dla sodówki wysokoprężnej,}$$

$$R_a (D 6500) = 80 \text{ dla świetlówki De Luxe Daylight,}$$

z tym, że podanych wyżej dwóch wartości  $R_a$  żadną miarą porównywać nie można. Wskaźniki  $R_a$  różnych źródeł światła można sensownie porównywać, jeżeli ich temperatury barwowe światła różnią się nie więcej niż o 300 K.

Ogólny wskaźnik oddawania barw  $R_a$  jest średnią arytmetyczną ośmiu wskaźników indywidualnych. Jeżeli ta średnia jest duża, np. 85 lub 90, to znaczy, że wszystkie próbki wyglądają bardzo podobnie przy świetle rozpatrywanym i przy świetle wzorcowym iluminantu. Jeżeli natomiast ta średnia jest mała, np. 60, to nie wiadomo, czy w przypadku większości próbek występuje około ośmiu progów odczuwalności różnicy barwy, czy też niektóre barwy są oddawane bardzo dobrze,

a inne bardzo źle i o które z nich chodzi.



Rys. 27. Przeciętne wartości ogólnego wskaźnika oddawania barw R<sub>a</sub> elektrycznych źródeł światła.

Warto na koniec podkreślić ważne konsekwencje, wspomnianego na wstępie rozdz. 10.1, zjawiska metameryzmu: obiekty sprawiające wrażenie jednakowej barwy przy oświetleniu określonym światłem, mogą mieć znacznie różniące się barwy w innym świetle. Barwa nie jest immanentną, fizyczną cechą obserwowanego obiektu; wrażenie barwy jest odczuciem subiektywnym, jest wrażeniem zmysłowym wywołanym w mózgu. Barwa jest iluzją, a kolorymetria jest sztuką przewidywania wrażenia barwy, jest sztuką kwantyfikowania tej iluzji na podstawie obiektywnych pomiarów i analizy obiektywnych wielkości fizycznych.

W systemie ILCOS (ang. *International Lamp Coding System*) dla świetlówek przewidziano skrócone oznaczenie własności barwowych za pomocą trzech cyfr „rff”, przy czym:

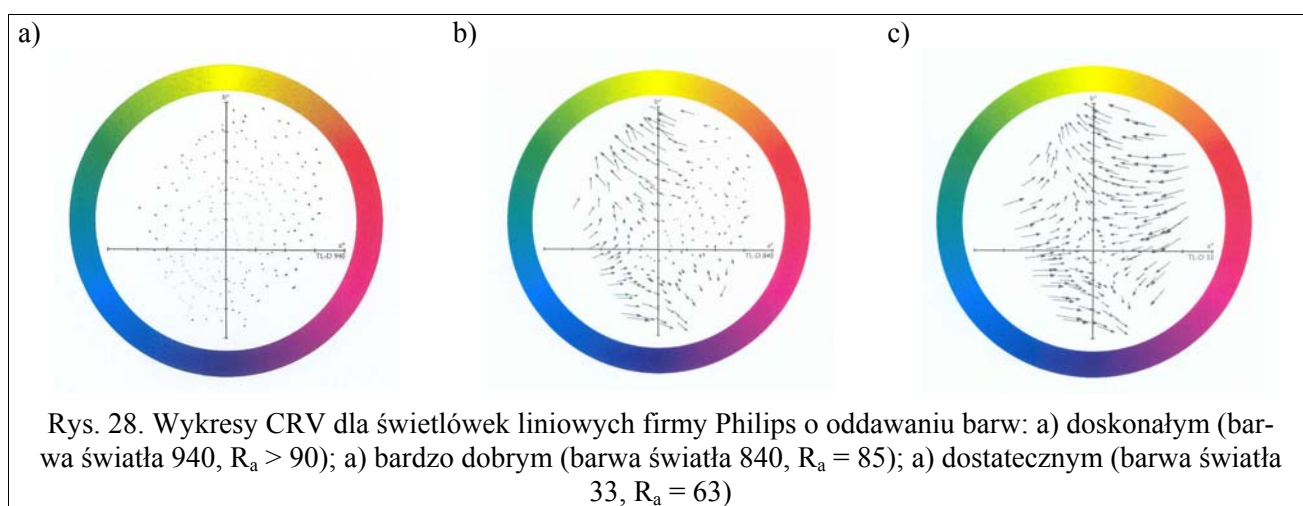
- pierwsza cyfra „r” oznacza wskaźnik oddawania barw R<sub>a</sub> podzielony przez 10, z odrzuceniem cyfry po przecinku (wynik zaokrąglony w dół),

- dwie następne cyfry „ff” oznaczają temperaturę barwową najbliższą  $T_{cp}$  [K] podzieloną przez 100, z odrzuceniem cyfr po przecinku (wynik zaokrąglony w dół).

Zatem napis 850 na świetlówce oznacza dwie następujące informacje:  $R_a = 80 \div 89$ ,  $T_{cp} = 5000 \div 5099$  K.

#### 10.4. Wektory oddawania barw

W najnowszym *Katalogu źródeł światła i osprzętu 2005/2006* firma Philips proponuje bardziej wyczerpujące przedstawienie wierności oddawania barw, mianowicie system CRV (ang. *colour rendering vectors*) obejmujący aż 215 próbek barwnych oświetlanych obiektów. W białym polu koła barw z barwną obręczą barw widmowych, zbliżoną do koła barw Schiffermüllera, są oznaczone w miarę równomiernie rozmieszczone punkty odpowiadające wybranym 215 próbkom barwnym oglądanym w świetle iluminantu porównawczego. Każda z tych próbek oglądana w świetle rozpatrywanego źródła światła może mieć inną barwę, określoną przez nowy punkt w kole barw. Wektor narysowany od pierwszego do drugiego punktu pokazuje stopień zniekształcenia tej barwy (długość wektora) oraz kierunek tego zniekształcenia (kierunek i zwrot wektora). Jeśli kierunek wektora pokrywa się z prostą łączącą środek układu współrzędnych z krawędzią koła, to zniekształceniu ulega tylko nasycenie barwy (stopień pobudzenia). Zwrot wektora ku krawędzi koła oznacza, że nasycenie wzrasta, a zwrot do środka układu współrzędnych – że maleje. Im bardziej kierunek wektora odbiega od wspomnianego kierunku, tym bardziej zniekształcony jest odcień barwy.



Zwiększenie liczby próbek barwnych z ośmiu ( $R_a$ ) lub czternastu ( $R_a$  oraz sześć wskaźników dodatkowych) do dwustu piętnastu nie pociąga za sobą większych kosztów. Wszystkie obliczenia błyskawicznie wykonuje program komputerowy, który w każdym przypadku zawiera szczegółowe parametry widmowe iluminantów porównawczych oraz obserwatora normalnego. W pierwszym przypadku program ponadto potrzebuje szczegółowych widmowych współczynników luminancji 14 próbek barwnych, a w drugim - 215 próbek. Wprowadza się je raz, przy opracowywaniu programu. Natomiast przystępując do obliczeń każdorazowo – niezależnie od liczby uwzględnianych próbek barwnych – trzeba wprowadzić gęstość widmową mocy promienistej  $F_{e\lambda}$  rozpatrywanego źródła światła.

Pozostaje pytanie, czy i na ile te mnogie informacje są miarodajne i użyteczne. Aby długość wektora naprawdę informowała o stopniu zniekształcenia różnych barw, wektory musiałyby być rysowane w równomiernej przestrzeni barw (uv), a nie są. Jeżeli niemal wszystkie wektory mają znikomą długość, przechodzą w punkt, to oczywiście oddawanie barw jest doskonałe (rys. 28a). Zapewne ogólny wskaźnik oddawania barw ma wtedy wartość  $R_a > 90$  i miałby taką wartość również wtedy, gdyby przyjąć inne próbki barwne za podstawę oceny. W sytuacji przeciwnej (rys. 28c) ocenę nie sposób skwantyfikować lub w inny sposób wyrazić precyzyjnie tym bardziej, że jedna-

kowa długość wektorów w różnych częściach koła nie oznacza tej samej liczby progów odczuwalności różnicy barwy.

Zatem trudno wróżyć systemowi CRV wielkiej przyszłości w normach oświetleniowych i w standardowym projektowaniu oświetlenia. Widok 215 wektorów w kole barw trudno ogarnąć i zrozumieć większości elektryków związanych z oświetleniem, którzy kolorymetrię uważają za ni to wiedzę, ni to magię, a szacunku do niej nabierają dopiero po stłuczce samochodowej, kiedy komputer bezbłędnie dobiera im chromatyczność lakieru. Nie bez racji powiedzą, że nadmiar informacji jest rodzajem dezinformacji. Tylko oświetleniowcy obcy z kolorymetrią potrafią wykorzystać zestaw informacji, jaki oferują wykresy CRV, ale będzie w tym więcej wycucia niż precyzji.

## **L i t e r a t u r a**

1. Berson D. M., Dunn F. A., Takao M.: Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. *Science*, 2002, February.
2. Felhorski W., Stanioch W.: Kolorymetria trójchromatyczna. WNT, Warszawa, 1973.
3. Moinet M.-L.: C'est notre cerveau qui „voit”. *Science et vie*, 1985, nr 811, s. 16-28, 170.
4. Popek S.: Barwy i psychika. Wyd. UMCS, Lublin, 2003.
5. Praca zbiorowa: Informacja obrazowa. WNT, Warszawa, 1992.
6. Tran Quoc Khanh: Lichttechnische Einflussfaktoren auf die visuelle Wahrnehmung den Menschlichen Biorythmus. *Licht*, 2004, nr 10, s. 980-985.
7. PN-EN 12464-1:2004 Światło i oświetlenie. Oświetlenie miejsc pracy. Część 1: Miejsca pracy we wnętrzach.
8. PN-EN 12665:2003 (U) Światło i oświetlenie. Podstawowe terminy oraz kryteria określania wymagań dotyczących oświetlenia.

### Dane bibliograficzne:

Musiał E.: **Podstawowe pojęcia techniki oświetleniowej**. Biul. SEP INPE „Informacje o normach i przepisach elektrycznych” 2005, nr 75, s. 3-38.