

(uslijed velikih brzina protjecanja u njoj). Jedan jednostavni sustav za kontinualno izvođenje fotokemijskih reakcija s pomoću sjajica s dugim lukom prikazan je na sl. 5, kojog nije potrebno nikako objasnjenje.

LIT.: A. Schönberg, Präparative organische Photochemie, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1958. — W. A. Noyes, G. S. Hammond, J. N. Pitts, Advances in photochemistry, New York-London 1963. — G. O. Schenck, Apparaturen für photochemische Reaktionen i H. Mauser, Strahlenchemie u dijelu Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie, München-Berlin 1965, Bd. 1. — D. C. Neckers, Mechanistic organic photochemistry, New York 1967.

Ž. Viličić

FOTOMETRIJA (grč. φῶς fos, svjetlo i μετρέω metreō, mjerim), nauka o metodama mjerena različitih svjetlosnih veličina. Pod pojmom *svjetlo* razumije se ono elektromagnetsko zračenje koje podržava osjetne stanice mrežnice oka i izaziva osjet vida. Vid, vidljivost, svjetloča psihološki su pojmovi, dok je svjetlo kao specijalno elektromagnetsko zračenje fizikalni pojam. Zato je fotometrija psihofizičkog karaktera. Sva se mjerena osnivaju na *vidnosti* (vizuelnosti), pa je i cijeli sustav veličina fotometrije specifični vizuelni sustav. Veličine elektromagnetskog zračenja, pak, fizikalne su veličine. Povezano oba sustava omogućena je po tzv. *kružilji svjetlosnosti* prosječnog (normalnog) oka, prema kojoj se objektivnim metodama dobivene vrijednosti fizikalnih veličina mogu preračunati u vizuelne fotometrijske veličine. Zato su fizikalne veličine zračenja definirane analogno vizuelnim veličinama, kako bi se preračunavanje iz jednog sustava u drugi učinilo što jednostavnijim.

Budući da svjetlila (izvori svjetla) zrače i elektromagnetska zračenja bez vidnog učinka (nevidljiva), potrebno je pri objektivnim metodama uzeti u obzir osim vidnog spektralnog područja (optičkog zračenja) još i susjedna spektralna područja ultraljubičastog i infracrvenog zračenja. Na taj se način uključuje u fotometriju sve elektromagnetsko zračenje od krajne granice ultraljubičastog ($\sim 10\text{ nm}$) do krajne granice infracrvenog zračenja ($\sim 10\text{ }\mu\text{m}$).

Oznake i imena fizikalnih (energetskih) i vizuelnih veličina te njihovih jedinica upotrijebljene u ovom prikazu odgovaraju najnovijem prijedlogu ISO (International Organization for Standardization).

U fotometriji se može razlikovati uže područje gdje se radi o određivanju karakteristika svjetlila, koje se odvija u specijalnim laboratorijima, i šire područje gdje se fotometrijske metode primjenjuju za određivanje osvjetljenja na prostorima izvan laboratorijskih i za određivanje optičkih, a po njima i drugih karakteristika različitih materijala. U ovom članku prikazani su ugaljnom uredaji i metode užeg područja fotometrije. Nisu prikazani uređaji i metode kolorimetrije, koji će biti obrađeni u posebnom članku *Kolorimetrija*, i denzitometrije koji su obrađeni u članku *Fotografija*.

Fotometrija se razvila iz praktičkih potreba radi određivanja uvjeta javne rasvjete ulica i trgovina, te javnih dvorana. Početak fotometrije pada u godinu 1725, kada je Pierre Bouguer usporedio svjetlosne jakosti dva svjetila jednostavnim uredajem s dvije prozračne (translucentne) mrlje na papiru. Osnovno znanstveno djelo fotometrije "Photometria, sive de mensura et gradibus luminis colorum et umbrarum" J. H. Lambert objelodano je 1760. U njemu su već izneseni zakoni zbrajanja osvjetljenja, zakon opadanja osvjetljenja s kvadratom udaljenosti, te zakon kosinus osvjetljenja i svjetljivosti. Od tada su konstruirani različiti manje ili više uspješni fotometri. Znatan napredak znači Bunsenov fotometar, prvi put opisan 1843. U glavi se tog fotometra dvije strane papira s masnom mrljom osvjetljuju sa dva usporedbena svjetila i preko koso nagnutih zrcala motri nestanak masne mrlje uz jednakobranost osvjetljenja. Na istom principu nastanjana razlike po svjetljivosti optički proizvedene "mrlje", osnova se glava fotometrije po Lummeru i Brodhunu, prvi put opisana 1889, koja već omogućuje precizna mjerena.

Kako su se razvijale sve preciznije metode fotometrije tako je rasla i potreba za što pouzdanim standardnim svjetiljkama. Prvotne svijeće, makako propisano izradivane, nisu mogle zadovoljiti zahtjeve reproducibilnosti. Prešlo se na različite svjetiljke, neke vrlo komplikirano izradene. Od njih su od znatnije važnosti bile Carcelova svjetiljka (1800), zatim Harcourtova pentanska svjetiljka (1877) i Hefnerova svjetiljka (1884).

Pokušalo se sa žaruljama, ali pojedini se primjeri žarulja ne mogu s dovoljnom preciznošću reproducirati. Zato je dogovoren nacionalnih laboratorijskih standarde Francuske, Velike Britanije i USA 1909 ustanovljena jedinica "internacionalna svijeća" koja nije određena standardnim izvorom nego nizom međusobno uspoređivanih žarulja. Tako ustanovljenu jedinicu prihvatala je 1921 i Međunarodna komisija za rasvetu (CIE — Commission Internationale de l'Eclairage).

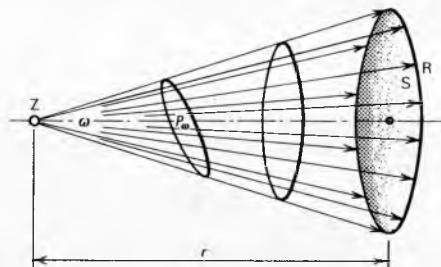
Godine 1908 predložili su Waidner i Burgess da se kao standardni izvor neko određeno crno tijelo (savršeno zračilo) pri temperaturi očvršćivanja (skrućivanja) platine. Kroz niz godina vršeni su pokusi s takvim izvorom svjetla, te se mjerjenjima nastojalo priklučiti ga na dodatašnje izvore svjetla. Konačno je god. 1937 takav standardni izvor bio prihvoden od Internationalnog komiteta za mjeru i utege, a 1. januarom 1948 uvedena je jedinica *kandela*, osnovana na takvom standardnom izvoru.

FIZIKALNE VELIČINE ZRAČENJA

Zračenje točkastog izvora. Fizikalne veličine elektromagnetskog zračenja u spektralnom području koje se obuhvaća u fotometriji prikladno se definiraju na primjeru točkastog izvora kakav je prikazan na slici 1. Izvor zračenja Z (zračilo, radijator) malih je dimenzija u odnosu na udaljenost r plohe R na koju upada zračenje. Ploština te plohe je S i malena je u odnosu na r^2 , tako da se može smatrati kalotom kugle polujmera r. Uz takve se uvjete može izvor Z smatrati točkastim, jer će se zrake što izlaze iz različitih njegovih područja, a usmjerene su prema istoj točki plohe R, tek neznatno razlikovati po smjeru. Zrake što prolaze periferijom plohe R omeđuju ugao (prostorni kut, stergon) veličine

$$\omega = \frac{S}{r^2}.$$

U taj ugao zračilo odašilje (emitira, odzračuje) snop elektromagnetskog zračenja, koji predstavlja struju energije zračenja. Kroz svaki poprečni presjek tog prostornog ugla prolazi u jedinici vremena ista količina energije zračenja, tj. kroz presjek prolazi ista *snaga zračenja* P. U tom se smislu može govoriti o snazi zračenja izvora, o snazi nekog snopa zračenja neovisno o izvoru, i o snazi zračenja što upada na neku plohu. Kako se radi o struci energije zračenja u određenom prostornom uglu, može se govoriti o jačosti te struje, pa je uvedena veličina *tok zračenja* Φ_ω koja ima takoder dimenziju snage, a prilagodena je predodžbi strujanja.



Sl. 1. Zračenje točkastog izvora u ugao ω

O toku zračenja ima smisla govoriti i onda kad je snop zračenja paralelan ili kad je izvor zračenja neodređen. U istom smislu govoriti se o toku upadnog zračenja Φ_u na neku plohu neovisno o izvoru ili o izlaznom toku Φ_i nekog izvora zračenja. Tok zračenja Φ može se uzeti kao polazna veličina po kojoj se onda mogu definirati ostale veličine. No, baš tu polaznu veličinu nije moguće niti direktno mjeriti, niti standardizirati. Receptorom R izmjeri se upadni tok Φ_u , što pripada baš osjetljivoj površini ploštine S tog receptora. Drugim receptorma različitih ploština na istom položaju i za isti izvor izmjere se različite vrijednosti upadnog toka, jer su im ploštine različite. Da se dobije vrijednost toka karakterističnu za već spomenuti izvor i položaj receptora, uvodi se veličina

$$E = \frac{\Phi_u}{S},$$

koja se naziva *ozračenje* (iradijancija), a znači plošnu gustoću toka, odnosno snage. Jedinica u SI joj je vat po četvornom metru, Wm^{-2} . Tako određena veličina E predstavlja samo neku srednju vrijednost, jer niti izvor zrači jednoliko u svim smjerovima, niti je receptor jednako osjetljiv po cijeloj površini. Prave vrijednosti ozračenja mogu se odrediti tako da se na receptoru koristi samo malen dio površine, ploštine ΔS , za koji se može uzeti da je konstantne osjetljivosti. Na različitim mjestima mjeri se onda tok $\Delta\Phi_u$ uvijek tim istim dijelom površine receptora. Tada će prava vrijednost ozračenja u nekoj točki plohe R biti

$$E = \frac{\Delta\Phi_u}{\Delta S}.$$

Malenom dijelu površine receptora, ploštine ΔS , odgovara i maleni ugao

$$\Delta\omega = \frac{\Delta S}{r^2},$$

kao i tok izračivanja $\Delta\Phi_i$, karakterističan za izračivanje izvora u određenom smjeru. Opet će zbog različitih veličina ΔS biti različiti $\Delta\Phi_i$ za isti izvor i u istom smjeru. Zato se uvodi veličina *zračevna jakost* (radiacijski intenzitet)

$$I = \frac{\Delta\Phi_i}{\Delta\omega}$$

koja predstavlja gustoću toka, odnosno snagu po jedinici ugla. Veličina I je vektor, a jedinica u SI joj je vat po steradijanu, W sr^{-1} . Zato se govori o jakosti izračivanja nekog izvora u određenom smjeru.

U strogo diferencijalnom obliku navedene su veličine ovako definirane:

$$d\omega = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{r^2} = \frac{dS}{r^2}$$

$$E = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta\Phi_u}{\Delta S} = \frac{d\Phi_u}{dS}$$

$$I = \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \frac{\Delta\Phi_i}{\Delta\omega} = \frac{d\Phi_i}{d\omega}.$$

Iz tih izraza slijedi uz točkast izvor zračenja i kuglastu kalotu

$$dS = r^2 d\omega; \quad S_\omega = \int_0^\omega r^2 d\omega$$

$$d\Phi_u = E dS; \quad \Phi_u = \int_0^S E dS = \int_0^\omega E r^2 d\omega = r^2 \int_0^\omega E d\omega$$

$$d\Phi_i = I d\omega; \quad \Phi_i = \int_0^\omega I d\omega.$$

Ukoliko se radi o istom snopu zračenja, tako da je

$$d\Phi_u = d\Phi_i,$$

slijedi

$$EdS = Id\omega,$$

odnosno

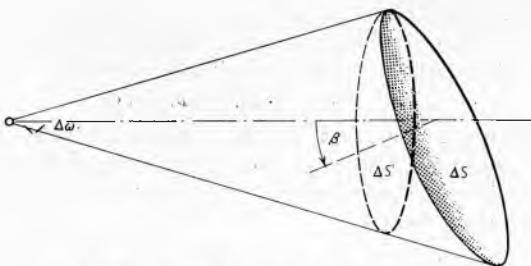
$$Er^2 d\omega = Id\omega,$$

iz čega slijedi

$$Er^2 = I \quad \text{i} \quad E = \frac{I}{r^2}.$$

Uz određenu jakost zračenja ozračenje opada s kvadratom udaljenosti ozračene plohe od zračila što je evidentno, jer kuglasti presjeci snopa izračivanja rastu s kvadratom udaljenosti, a isti tok se raspodjeljuje po njima.

U slučaju da je ozračena ploha postavljena koso prema centralnoj zraci snopa (sl. 2), tako da normala čini kut β prema toj



Sl. 2. Ozračenje uz koso upadanje snopa zračenja na plohu

zraci, bit će

$$d\Phi_u = E dS \quad dS = \frac{dS'}{\cos \beta} = \frac{r^2 d\omega}{\cos \beta},$$

i odatle

$$\frac{Er^2 d\omega}{\cos \beta} = Id\omega \quad \text{i} \quad E = \frac{I}{r^2 \cos \beta}.$$

To je opća formula za računanje ozračenja E u točki plohe u kojoj pravac vektora I prolazi kroz tu plohu udaljenu za r od zračila

i koje normala s tim pravcem zatvara kut β . Strogo uvezši, po toj se formuli može izračunati ozračenje E samo za jedan vrlo maleni element plohe ΔS , no za dovoljno udaljene plohe računa se i za veće dijelove plohe.

Da se odredi tok izlaznog zračenja $\Phi_{i,\omega}$ nekog zračila u konačni ugao ω , potrebno je poznavati funkciju po kojoj se mijenja zračevna jakost $I = f(\varphi, \Theta)$, i da se onda tok odredi kao integral

$$\Phi_{i,\omega} = \int_0^\omega I d\omega = \int_0^\omega \int_0^{2\pi} I d\varphi d\Theta.$$

Ako je zračenje rotacijski simetrično s obzirom na vertikalnu os zračila, u praksi se odredi niz vrijednosti I_O određenog meridijana, koje se kao vektori nanesu iz točke koja označuje zračilo i tako se dobije *polarni dijagram* zračila (sl. 3).

Da se pak odredi tok upadnog zračenja $\Phi_{u,\omega}$ nekog točkastog zračila na plohu konačne ploštine S , kojoj odgovara ugao ω , potrebno je poznavati vrijednosti ozračenja E za pojedine elemente plohe ΔS , kao i udaljenost tih elemenata od izvora i njihovu orientaciju, pa je

$$\Phi_{u,\omega} = \int_0^S EdS \cos \beta = \int_0^\omega Er^2 d\omega.$$

Zračenje plošnog izvora. Radi kraćeg izražavanja uvodi se za određeni element površine bilo zračila bilo prijemnika (receptora) pojam *prividne ploštine*.

Na sl. 4 shematski je naznačen plošni element ploštine ΔA . Iz smjera pravca p , koji s normalom n tog plošnog elementa čini kut α , pokazuje se taj element samo svojom projekcijom na ravnicu okomitu na pravac p . Ploština te projekcije je $\Delta A' = \Delta A \cos \alpha$ i naziva se prividnom ploštinom plošnog elementa s obzirom na pravac p .

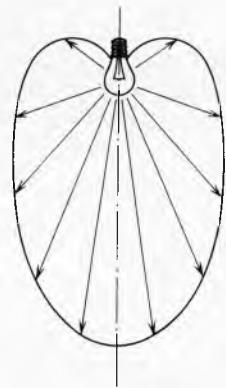
Ako je taj plošni element dio površine zračila, koje zrači u svim smjerovima poluprostora ($2\pi \text{ sr}$), onda se za receptor u dovoljno velikoj udaljenosti može taj element zračila smatrati točkastim izvorom zračenja. Potrebno je onda odrediti za takav plošni element zračevnu jakost u različitim smjerovima. Radi jednostavnosti može se uzeti da je plošni element receptora orijentiran okomito na pravac mjerjenja i da se uvijek nalazi na istoj udaljenosti od elementa zračila, tj. na kuglinoj plohi polumjera r , kako je za jedan presjek prikazano na sl. 5. Mjeri se upadni tok $\Delta\Phi_u$ ugla $\Delta\omega$ koji odgovara plošnom elementu receptora ΔS , te je:

$$\Delta\omega = \frac{\Delta S}{r^2} \quad \text{i} \quad \Delta I = \frac{\Delta\Phi_u}{\Delta\omega},$$

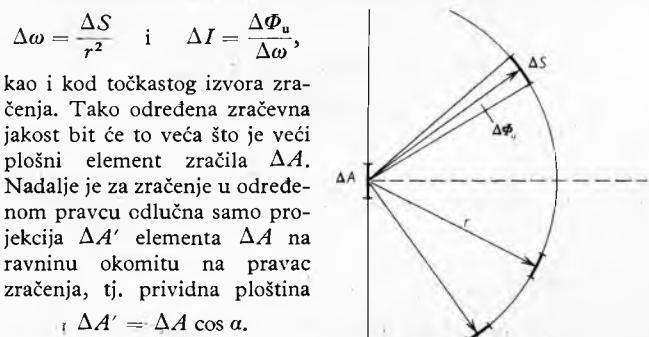
kao i kod točkastog izvora zračenja. Tako određena zračevna jakost bit će to veća što je veći plošni element zračila ΔA . Nadalje je za zračenje u određenom pravcu cdučna samo projekcija $\Delta A'$ elementa ΔA na ravnicu okomitu na pravac zračenja, tj. prividna ploština

$$\Delta A' = \Delta A \cos \alpha.$$

Da bi se dobila veličina koja karakterizira zračilo u određenoj točki površine neovisno



Sl. 3. Polarni dijagram zračenja. Duljine su radijus-vektora proporcionalne zračevnoj jakosti



Sl. 5. Određivanje zračevne jakosti plošnog elementa u različitim smjerovima

o veličini elementa zračenja, uvodi se veličina *zračivost* (radijancija) L , time da se zračevna jakost podijeli još s prividnom ploštinom zračila $\Delta A \cos \alpha$

$$L_a = \frac{\Delta I_a}{\Delta A \cos \alpha} = \frac{1}{\Delta A \cos \alpha} \cdot \frac{\Delta^2 \Phi_u}{\Delta \omega},$$

pa je jedinica te veličine u SI $\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$. U općem će slučaju i plošni element receptora biti koso orijentiran prema pravcu mjeđenja, pa će prema sl. 2 biti

$$\Delta \omega = \frac{\Delta S'}{r^2} = \frac{\Delta S \cos \beta}{r^2}.$$

Na sl. 6 shematski je prikazan odnos između elementa ΔA zračila i elementa ΔS receptora, odnosno ozračene plohe.

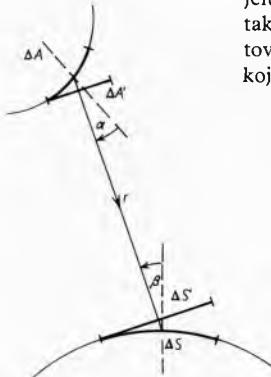
Tada potpuna formula za L glasi

$$L = \frac{1}{\Delta A \cos \alpha} \cdot \frac{r^2}{\Delta S \cos \beta} \cdot \Delta^2 \Phi_u,$$

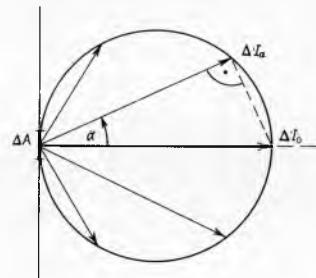
odnosno u diferencijalnom obliku

$$dL = r^2 \cdot \frac{d^2 \Phi_u}{\cos \alpha dA \cdot \cos \beta dS}.$$

Veličina L , općenito uvezši, različita je za različite plošne elemente zračila i za različite smjerove istog elementa. No, u specijalnom slučaju jednolične i savršeno raspršne (difuzne) površine zračila, ta je veličina konstantna za cijelu površinu i neovisna o smjeru. Za takvu površinu vrijedi, naime, Lambertov zakon odzračivanja (emisije) po kojem zračevna jakost opada s kosinusom



Sl. 6. Prikaz medusobnog odnosa plošnih elemenata zračila ΔA i ozračene plohe ΔS i njihovih prividnih ploština



Sl. 7. Opadanje zračevne jakosti savršeno difuzne površine s kosinusom kuta odzračivanja

kuta što ga čini pravac zračenja s normalom na površinu zračila, te je prema sl. 7

$$dI_a = \Delta I_0 \cos \alpha,$$

pa je onda zračivost

$$L_a = \frac{\Delta I_a}{\Delta A \cos \alpha} = \frac{\Delta I_0 \cos \alpha}{\Delta A \cos \alpha} = \frac{\Delta I_0}{\Delta A},$$

dakle neovisna o kutu.

Za određivanje toka zračenja s cijele površine zračila na cijelu površinu receptora potrebno je izvesti dvostruku integraciju izraza

$$d^2 \Phi_u = L \cdot \cos \alpha dA \cdot \cos \beta dS \cdot \frac{1}{r^2}$$

$$\Phi_u = \iint L \cos \alpha dA \frac{\cos \beta dS}{r^2} = \iint L \cdot \frac{dA' \cdot dS'}{r^2},$$

gdje funkcija raspodjelje vrijednosti L za cijelu površinu zračila mora biti poznata. Za jednoličnu je i savršeno difuznu površinu zračila L konstantno, pa je

$$\Phi_u = L \iint \frac{dA' dS'}{r^2} = L \iint \frac{\cos \alpha dA \cdot \cos \beta dS}{r^2}.$$

Još se jedna veličina uvodi da bi se karakteriziralo plošno zračilo: *odzračnost* (radijacijska egzitancija) M definirana za pojedinu točku površine kao zračevni tok (snaga) što ostavlja (napušta) jedinicu površine zračila; izražava se dakle u SI jedinicom

vat po četvornom metru, Wm^2 ;

$$M = \frac{d\Phi_i}{dA}.$$

Za zračilo, savršeno difuzne površine, L je konstantno za sve smjerove, pa se integracijom za poluprostor ($2\pi \text{ sr}$) dobiva relacija

$$M = \pi L.$$

U izrazu za odzračnost diferencijal $d\Phi_i$ odnosi se na cijeli poluprostor, ali samo za plošni element zračila dA . Za zračilo konačne ploštine A ukupni bi izlazni tok bio

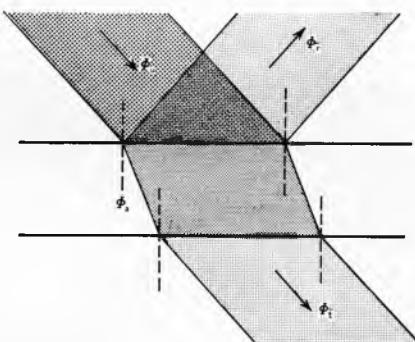
$$\Phi_i = \int_0^A M dA.$$

Sve su navedene veličine zračenja: Φ , I , E , L , M različite za različite duljine vala, pa uz svaku valju staviti indeks λ : Φ_λ , I_λ , E_λ , L_λ i M_λ . Taj indeks označuje da se te veličine odnose samo na zračenje uskog spektralnog područja od λ do $(\lambda + d\lambda)$. Označene veličine bez indeksa odnose se na cijelokupno spektralno područje zračila, a računaju se integracijom po cijelom području duljine vala. Tako je

$$\Phi = \int \Phi_\lambda d\lambda; \quad I = \int I_\lambda d\lambda; \quad E = \int E_\lambda d\lambda;$$

$$L = \int L_\lambda d\lambda; \quad M = \int M_\lambda d\lambda.$$

Karakteristike materijala s obzirom na zračenje. Odnose pri prolazu zračenja kroz materiju shematski prikazuje sl. 8. Paralelan snop zračenja toka Φ_u upada na planparalelnu ploču nekog materijala. Pri tom će jedan dio zračenja toka Φ_r biti re-



Sl. 8. Odnosi pri prolazu snopa zračenja kroz propustan sloj materije

flektiran (odbijen, odražen), jedan će dio toka Φ_a biti apsorbiran (upijen), a jedan će dio toka Φ_t biti transmitiran (prolazan, propušten). Tokovi reflektiranog, transmitiranog i apsorbiranog zračenja bit će, naravno, proporcionalni upadnom toku. Tako je

$$\Phi_r = \varrho \Phi_u; \quad \Phi_a = \alpha \Phi_u; \quad \Phi_t = \tau \Phi_u.$$

Faktori proporcionalnosti nazivaju se: ϱ faktor refleksije (reflektancija, odbojnosc), τ faktor transmisije (transmitancija, propusnost), α faktor apsorpcije (apsorptancija, upojnost).

Pri tom vrijede odnosi

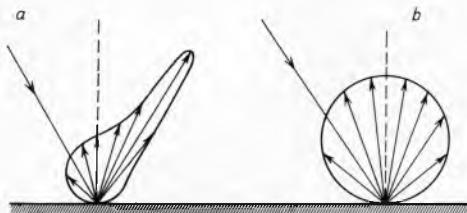
$$0 \leq \varrho, \tau, \alpha \leq 1; \quad \varrho + \tau + \alpha = 1.$$

Razlikuju se dva načina refleksije: usmjerenja (pravilna, zrcalna) i raspršna (difuzna) refleksija, pa se i faktor refleksije raspavlja u dva pribrojnika:

$$\varrho = \varrho_u + \varrho_d.$$

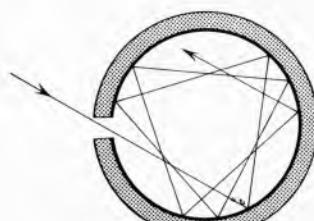
Faktor refleksije karakterističan je samo za površinski tanki sloj tvari i stanje površine, a neovisan je o debljini ploče, odnosno, općenito tijela. Za gladku je površinu $\varrho_u > \varrho_d$ dok je za sitno hrapavu (mat) površinu $\varrho_d > \varrho_u$. S obzirom na da dva faktora refleksije razlikuju se dva ekstremna slučaja stanja površine. Prvi je slučaj površina za koju je $\varrho_u = 1$, tj. sve upadno zračenje usmje-

reno se reflektira; naziva se *savršeno zrcalna površina* (idealno zrcalo). Približno su takve uglađene površine metalna. Drugi je slučaj površine za koju je $\varrho_d = 1$, tj. sve upadno zračenje reflektira se difuzno u svim smjerovima bez obzira na smjer upadnog zračenja, a naziva se *savršeno raspršna površina* (idealni difuzer). Na sl. 9 prikazani su polarni dijagrami za ta dva ekstremna slučaja refleksije.



Sl. 9. Polarni dijagrami refleksije zračenja: a na uglađenoj, b na savršeno raspršnoj površini

Faktor *transmisije* i faktor *apsorpcije* su karakteristični za određenu debeljinu sloja neke tvari. Za karakterizaciju apsorpcije tvari služi koeficijent apsorpcije. Pri pojavi apsorpcije treba razlikovati apsorpciju u površinskom sloju, kao npr. u čadi ili pak po cijelom volumenu. U slučaju površinske apsorpcije radi se o tom da je $\tau = 0$, a ϱ malen. Ekstremni slučaj bi bio da je za površinsku apsorpciju $\alpha = 1$, tj. da sve upadno zračenje biva apsorbirano. Tom se ekstremu približava počaćena površina ili pak koloidnim srebrom ili platinom prekrivena površina (pocrnen fotografiski sloj, platinovo crnilo), no sve takve površine ipak reflektiraju nešto zračenja. Savršeno apsorbira (upija) svo zračenje samo šupljina vrlo malenog otvora, tzv. crno tijelo (sl. 10).



Sl. 10. Shematski prikaz crnog tijela koje apsorbira sve upadno zračenje

Zakoni zračenja savršenog zračila (crnog tijela). Za tjelesa koja su rastavljena dijatermnim (za zračenje propusnim) sredstvom, a nalaze se u termičkoj ravnoteži, vrijedi Kirchhoffov zakon koji kaže da je omjer radijacijske egzitancije M i faktora apsorpcije α za određenu duljinu vala i određenu temperaturu konstantan, tj. neovisan o tvari tih tjelesa:

$$\frac{M_{\lambda,1}}{\alpha_{\lambda,1}} = \frac{M_{\lambda,2}}{\alpha_{\lambda,2}} = \dots = \text{konst.}$$

Apsolutno crno tijelo ima $\alpha_{\lambda,c} = 1$, dok je za sivo tijela $\alpha_{\lambda,s} < 1$. Iz jednakosti omjera:

$$\frac{M_{\lambda,s}}{\alpha_{\lambda,s}} = \frac{M_{\lambda,c}}{\alpha_{\lambda,c}}$$

slijedi

$$M_{\lambda,s} = M_{\lambda,c} \cdot \alpha_{\lambda,s}.$$

Poznavajući, dakle, faktor apsorpcije sivog tijela i radijacijsku egzitanciju $M_{\lambda,c}$ crnog tijela, može se odrediti $M_{\lambda,s}$ za sivo tijelo. Omjer

$$\frac{M_{\lambda,s}}{M_{\lambda,c}} = \varepsilon_{\lambda,s}$$

naziva se još i *spektralna emisivnost* (izračivost) sivog tijela.

Prema Kirchhoffovom zakonu tijelo najveće apsorpcije najviše emitira (odašilje) zračenje. Zbog toga će jednolično zagrijana šupljina kroz maleni otvor emitirati više zračenja nego bilo koje drugo tijelo ugrijano na istu temperaturu. Takva šupljina (crno tijelo) predstavlja savršeno zračilo. Kako zakoni zračenja takvog zračila čine osnovu za mjerjenja i proračunavanja zračenja sivih tijela, nastala je potreba za njihovim određivanjem.

Crna su tijela građena od tvari koje mogu podnijeti visoke temperature od nekoliko tisuća kelvina, moraju biti dobro termički izolirana, a okolina malenog otvora mora biti dobro termički zaštićena, tako da se može mjeriti samo zračenje emitirano

iz otvora takvog zračila. Krajem XIX st. niz istraživača bavio se i eksperimentalno i teoretski problemom zračenja. Eksperimentalno su određivane snage sveukupnog odzračivanja kao i raspodjela spektralne radijacijske egzitancije M_λ za niz temperaturu, te su odredene krivulje raspodjela (sl. 12). Na temelju tih eksperimentalnih istraživanja i kasnijim teoretskim izvođenjem nadjeni su ovi zakoni:

1. Stefan-Boltzmannov zakon za sveukupno odzračivanje crnog tijela (savršenog zračila):

$$M_c = \sigma \cdot T^4; \quad \sigma = 5,66961 (1 \pm 1,7 \cdot 10^{-4}) \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4};$$

2. Wienov zakon pomaka koji kaže da je umnožak duljine vala λ_m maksimalne egzitancije i temperature konstantan:

$$\lambda_m \cdot T = 2,8978 (1 \pm 1,4 \cdot 10^{-4}) \cdot 10^{-3} \text{ Km.}$$

Po tom je zakonu moguće određivanjem λ_m odrediti temperaturu crnog tijela;

3. Wienov zakon za raspodjelu spektralne egzitancije

$$W_{\lambda,T} = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp(c_2/\lambda T)}$$

kojim se dobro prikazuju vrijednosti $W_{\lambda,T}$ za kraće duljine vala ($\lambda < \lambda_m$), ali koji daje znatna odstupanja za veće duljine vala ($\lambda > \lambda_m$);

4. Planckov zakon za raspodjelu spektralne egzitancije. Funkciju raspodjele koja je u skladu s empirijskim vrijednostima $W_{\lambda,T}$ dao je i teoretski obrazložio M. Planck (1900). Ta je funkcija

$$W_{\lambda,T} = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp(c_2/\lambda T) - 1}$$

gdje su c_1 i c_2 prva i druga konstanta zračenja. Empirijski određene vrijednosti tih konstanta jesu:

$$c_1 = 3,74051 (1 \pm 1 \cdot 10^{-4}) \cdot 10^{-16} \text{ W m}^2$$

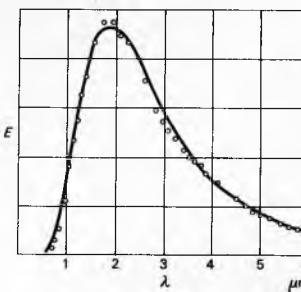
$$c_2 = 1,438833 (1 \pm 4,3 \cdot 10^{-5}) \cdot 10^{-2} \text{ Km}$$

a teoretski su dobiveni izrazi za te konstante:

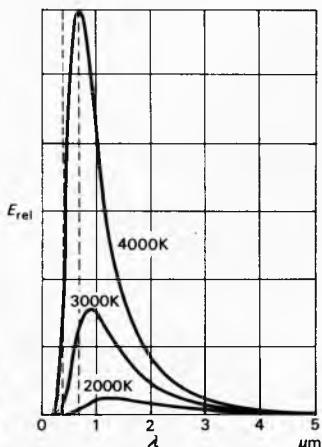
$$c_1 = 2\pi h c^2, \quad c_2 = \frac{hc}{k},$$

gdje je: h Planckova konstanta, k Boltzmannova konstanta, a c brzina svjetlosti. Na sl. 11 prikazana je krivulja raspodjele energije zračenja crnog tijela za temperaturu $T = 1596$ K, nacrtana prema vrijednostima računatim po Planckovoj formuli, a uneseni kružići odgovaraju empirijskim vrijednostima. Vidi se da je slaganje vrlo dobro.

Na sl. 12 prikazan je niz krivulja relativne spektralne raspodjele energije zračenja crnog tijela za tri različite temperature.



Sl. 11. Relativna raspodjela energije zračenja crnog tijela za $T = 1596$ K prema Planckovoj formuli (izvučena) i prema mjerjenjima (kružići)



Sl. 12. Relativna raspodjela energije zračenja crnog tijela za temperature 2000, 3000 i 4000 K prema mjerjenjima (kružići)

VIZUELNA FOTOMETRIJA

Vizuelne fotometrijske veličine. Svjetlo (lat. lux, lumen, svjetlost) može se definirati kao ono elektromagnetsko zračenje koje kao podražaj (stimulus) izaziva osjet vida (vizuelni osjet). Zbog jednostavnosti naziva se *vidljivo zračenje* (vizuelna radi-

jacija). To vidljivo zračenje zaprema u spektru zračenja područje $\lambda = 380 \text{ nm} \dots \lambda = 780 \text{ nm}$ na koje se područje s obje strane nadovezuju područja nevidljivog zračenja: *ultraljubičastog* ($\lambda = 380 \text{ nm}$ do $\lambda \approx 10 \text{ nm}$) i *infracrvenog* (od $\lambda = 780 \text{ nm}$ do $\lambda \approx 80 \mu\text{m}$). No oko, odnosno osjetne (senzorne) stanice vida nisu jednakosjetljive za cijelo navedeno područje vidljivog zračenja. Najosjetljivije su za područje oko $\lambda = 550 \text{ nm}$, a prema granicama područja vidljivosti osjetljivost opada. To znači da za isti intenzitet vizuelnog osjeta potreban je prema granicama vidljivog područja znatno jači podražaj, tj. veća snaga zračenja, nego za središnje područje. U tom se smislu govor o različitoj svjetlosnoj učinkovitosti (svjetlosnosti, luminozitetu) različitih spektralnih područja zračenja, odnosno uskih područja, za određenu duljinu vala.

Budući da se u fotometriji zračenje ocjenjuje prema vidnom učinku, bilo je potrebno uvesti posebne vizuelne veličine i jedinice koje nisu fizikalne, ali su analogne fizikalnim veličinama zračenja. Te su veličine bile uvedene u počecima fotometrije za praktične svrhe mjerena rasvjete ulica, bez ikakvog odnosa na fizikalni sustav mjera. Pri tom je bio jedini prosudivač (arbitar) ljudsko oko, odnosno osjet vida. Čitav sustav fotometrijskih veličina osniva se na konvencionalno izabranom standardnom izvoru svjetla i na sposobnosti vida da može opaziti i vrlo malene razlike u svjetljivosti dviju susjednih ploha. Na tom svojstvu vida osnivaju se svi vizeulni fotometri i tzv. subjektivne metode fotometrije.

U modernoj se fotometriji sve više primjenjuju objektivne metode, a iz dobivenih fizikalnih veličina množenjem s faktorom svjetlosne učinkovitosti dolazi do odgovarajućih svjetlosnih veličina.

Polazna veličina vizuelnog sustava fotometrijskih veličina jest *svjetlosna jakost* (luminozni intenzitet) standardnog izvora svjetla (svjetilila) I_s u određenom smjeru. Jedinica svjetlosne jakosti je *kandela* (cd). Ona je definirana svjetljivošću savršenog zračila odredene temperature.

Po svjetlosnoj jakosti I_s može se onda definirati odgovarajući diferencijal *svjetlosnog toka* (luminognog fluksa)

$$d\Phi_s = I_s d\omega$$

i veličinu *osvjetljenje* (iluminanciju)

$$E_s = \frac{d\Phi_s}{dA} = \frac{I_s}{r^2} \cdot \cos \beta.$$

Osvjetljenje drugih izvora svjetla E može se uspoređivati sa osvjetljenjem standardnog izvora svjetla E_s bilo subjektivno, vizuelnim fotometrom, bilo objektivno fotoelektričnim fotometrom, a po tom i odgovarajuće svjetlosne tokove Φ i svjetlosne jakosti I .

Jedinica za svjetlosni tok je *lumen* (lm), a za osvjetljenje *lux* (lx). Vezu između triju jedinica, kandele, lumena i luxa može se teoretski uspostaviti s pomoću idealnog točkastog svjetilila jakosti 1 cd u svim smjerovima. Tok takvog svjetilila po 1 sr je onda upravo 1 lm, a osvjetljenje kugline plohe kojoj je svjetililo u središtu, a polujmer joj je 1 m, upravo je 1 lx.

U praktičnoj se fotometriji odnosi tih triju jedinica uspostavljaju preko osvjetljenja E na nekom receptoru.

Kao i kod zračila, razlikuju se točkasta i plošna svjetilila, pa se analogno uvode veličine *svjetljivost* (luminancija) L_v , koja se izražava u cd/m^2 i *svjetlosna izlaznost* (luminacijska egzitancija) M_v , koja se izražava u lm/m^2 .

Zakon odzračivanja plošnog elementa ΔA svjetilila luminan-
cije L_v plošnom elementu ΔS receptora jest isti kao za svako zračenje:

$$d^2\Phi_m = L \cos \alpha \Delta A \frac{\cos \beta \Delta S}{r^2},$$

gdje su (prema sl. 6) α i β kutovi što ih ΔA , odnosno ΔS čine sa spojnicom središta tih plošnih elemenata.

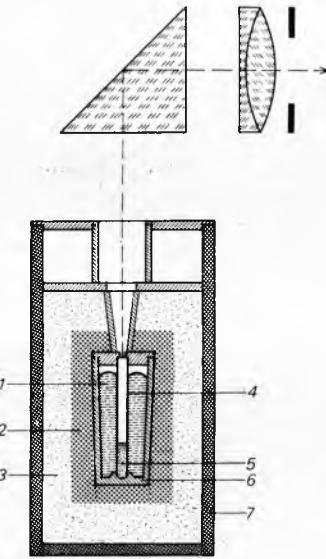
Standardni izvori svjetla. Od tri glavne fotometrijske veličine: jakost, tok i osvjetljenje, samo se prva može standar-dizirati. Polazište za fotometriju čini neki standardni izvor svjetla. Zato služi crno tijelo na temperaturi skrućivanja platine (2045 K).

Na sl. 13 shematski je prikazano ostvarenje crnog tijela koje služi kao primarni izvor svjetla. Kao savršeno zračilo služi uska

cjevčica od taljenog torijum-oksida, u kojoj se nalazi malena količina praška isto od taljenog torijum-oksida. Ta je cjevčica, ak-sijalno smještena u veću, ponešto koničnu, posudicu od istog materijala. U toj posudici oko cjevčice je kemijski čista platina. S gornje je strane posudice poklopac u koji ulazi cjevčica, a povrh nje je u poklopcu rupica od svega 1,5 mm promjera; ona pred-stavlja izvor svjetla. Cijela je posudica opkoljena slojem praška-tog taljenog torijum-oksida, a oko njega još slojem netaljenog torijum-oksida. Konačno se sve nalazi u cilindričnoj posudi od vatrostalnog materijala. Iznad otvora crnog tijela nalazi se zaš-titi sloj s nešto širim koničnim otvorom.

Cijeli se uređaj zagrijava u visokofrekvenčkoj indukcijskoj peći (snage $\sim 7 \text{ kW}$, strujom frekvencije $\sim 1 \text{ MHz}$) sve dok se platina ne rastali i još zagrije na višu temperaturu, tako da hla-denje do temperature očvršćivanja potraje barem 20 minuta. Preko prizme za totalnu refleksiju mjeri se luminancija koja hla-denjem opada, te ostane konstantnom uz temperaturu očvršćivanja platine (2045 K). Za trajanja konstantne temperature luminancija iznosi $60 \cdot 10^4 \text{ cd/m}^2$, odnosno 60 cd/cm^2 , i tada se s tim primarnim fotometarskim izvorom uspoređuju sekundarni fotometarski izvori svjetla. To su evakuirane žarulje s volframovom niti, po-sebno gradene za fotometrijske svrhe. Sa sekundarnim fotome-tarskim izvorima dalje se uspoređuju tzv. radne standardne žarulje, a tek se s njima uspoređuju različita svjetila. Kako se karakteristične žarulje upotrebo razmjerno brzo mijenjaju, moraju se radni standardi često kontrolirati usporednjom sa sekundarnim stan-dardima.

Kod standardne žarulje važno je da se konstantnim održava i kvaliteta (temperatura boje) i intenzitet svjetla. Upotrebljavaju se niskonaponske žarulje, pa je potrebna jaka struja, koja opet mora biti održavana konstantnom uz veliku točnost, što se može postići samo napajanjem iz akumulatora i mjerenjem jakosti struje, odnosno napona, instrumentima visoke preciznosti.

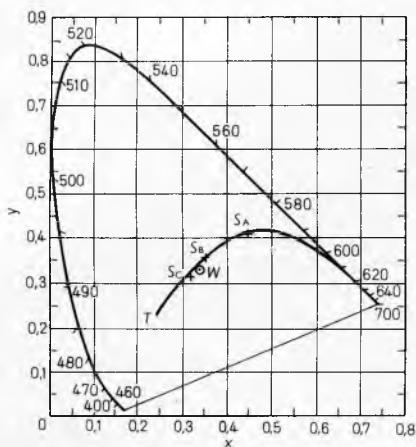


Sl. 13. Primarno standardno svjetilo.
1 Platina, 2 prašak taljenog torijum-oksida, 3 prašak netaljenog torijum-oksida, 4 i 6 cjevčica i posudica od taljenog torijum-oksida, 5 prašak taljenog torijum-oksida, 7 posuda od vatrostalnog materijala

Kao standardni izvori svjetla po kvaliteti određena su tri bijela svjetila (tj. svjetila koja se ubrajaju među bijela). To su CIE standardna svjetila S_A , S_B , i S_C koja se mogu strogo realizirati i koja služe kao podloga za kolorimetriju.

Svetilo S_A čini plinom punjena žarulja s volframovom niti, temperature boje $T_b = 2854 \text{ K}$. To je svjetilo reprezentant rasvjete žaruljama. Svjetilo S_A u kombinaciji s plavim tekućinskim filterima po Davisu i Gibsonu daje svjetilo S_B ($T_b = 4800 \text{ K}$) i svjetilo S_C ($T_b = 6500 \text{ K}$). S_B predstavlja prosječno dnevno svjetlo žućkaste boje, dok S_C predstavlja dnevno svjetlo uz vedro nebo.

Za ta su standardna svjetila poznate relativne raspodjele snage zračenja, a približno odgovaraju raspodjelama zračenja crnog tijela. Na sl. 14 prikazan je CIE dijagram kromatičnosti (v. Boja, TE 2, str. '61) u kojem je unesena krivulja kromatičnosti crnog tijela. Točke na toj krivulji određuju boju svjetla za različite temperature crnog tijela. Na toj su krivulji označene točke boje koje odgovaraju svjetilima S_A , S_B i S_C , kao i točka bjeline W .



Sl. 14. Dijagram kromatičnosti T za crno tijelo.
Oznacene su tocke sto odgovaraju CIE-svetilima
 S_A , S_B i S_C , kao i tocka bjeline W

Vizuelni fotometri. Osjetom vida, kao uostalom ni drugim osjetima, ne možemo direktno mjeriti, bar ne nekom većom točnošću, jer je oko jako podvrgnuto adaptaciji. A ipak je oko zadnjih prosudivač u vizuelnoj fotometriji. Svojstvo vida da oko uz stonovite uvjete može zapaziti razlike u svjetljivosti (luminanciji) s točnošću od 1 do 1,5% omogućuje da se uz pomoć instrumenata obavlja vizuelna mjerjenja s velikom točnošću. Uvjet je da se svijetle plohe dodiruju, da je granica oštro izražena i da je vidno polje tih ploha maleno, svega 2° do 4° u promjeru. Ako se pri određivanju položaja mjerila za jednakost svjetljivosti obaju polja u okularu primjeni metoda dvostrukog očitavanja, te načini velik broj mjerena, može se postići točnost i do 0,2%. Ta se metoda sastoji u tome da se očita mjerilo kad je jedno od polja tek jedva vidljivo tamnije od drugog, pa se zatim načini da je drugo polje jedva vidljivo tamnije od prvog, te ponovo očita, a dobiveni interval očitavanja se raspolovi.

Svaki vizuelni fotometar sastoji se od dva glavna dijela: a) nekom uredaju koji omogućuje uspoređivanje dvaju svjetlih polja, od kojih je jedno osvijetljeno svjetilom kojemu se mjeri neka veličina; b) uredaju za mijenjanje svjetljivosti (luminancije) drugog svjetlog polja prema nekom zakonu.

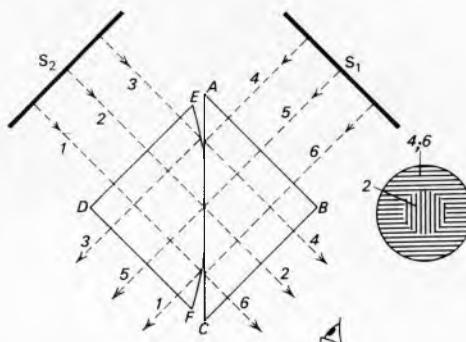
Ti su pak uredaji prilagoden različitim metodama mjerena. Posebno se mogu razlikovati metode i uredaji za laboratorijska mjerena na optičkoj klupi i oni za mjerena izvan laboratorija s prijenosnim fotometrima.

U fotometrijskim se laboratorijsima u prvom redu određuju karakteristike svjetilika: intenzitet za pojedini smjer, raspored intenziteta, prosječni intenzitet, ukupni tok, ovisnost intenziteta o temperaturi boje i drugo.

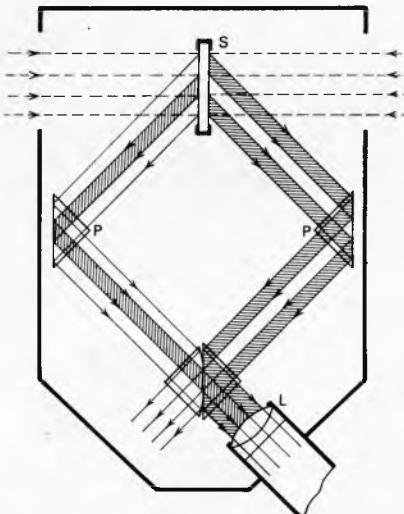
Kao uredaj za određivanje jednakosti svjetljivosti služi glava fotometra po Lummeru i Brodhunu. U njoj je glavni dio kocka za dobivanje oštro razgraničenih svjetlih polja kojima svjetljivost treba izjednačiti. Na sl. 15 shematski su prikazani takva kocka i izgled vidnog polja koje se s njom dobije. Kocka se sastoji od dviju pravokutnih prizama, od kojih je jednoj hipotenuzna površina ravna, a drugoj sferična. Srednji dio sferične plohe je ravno izbršen i uglađen, tako da savršeno prianja uz ravnu hipotenuznu plohu druge prizme, tj. da su obje prizme u optičkom kontaktu.

S_1 i S_2 predstavljaju dvije svjetle površine. Svjetlo što dolazi od S_2 i okomito upada na plohu DE prolazi samo krugom optičkog kontakta, te prolazi drugom prizmom i izlazi prema oku. Svjetlo pak što dolazi od S_1 dijelom prolazi krugom optičkog

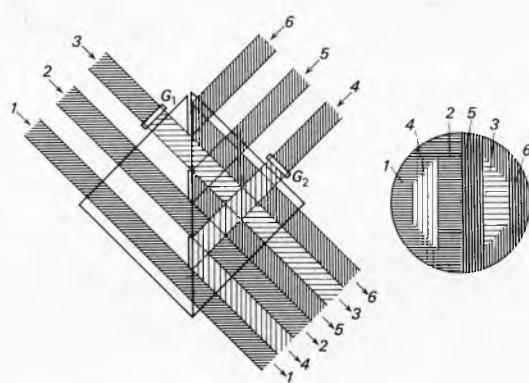
kontakta i izlazi kroz plohu DF , a drugim se dijelom totalno reflektira na plohi AC i izlazi prema oku. Desno je prikazano vidno polje u dalekozoru kojim se motri. Cijela fotometarska glava shematski je prikazana na sl. 16. Pločica u čvrstom držaču S (debljine ~ 4 mm) od bijelog je difuznog materijala i osvijetljena je sa svake strane različitim izvorima svjetla. S pomoću dvije postrane, paralelno sa S , smještene prizme za totalnu refleksiju P svjetlo se sa svake strane pločice S dovodi u fotometarsku kocku. Lećom L stvara se oštra slika hipotenuzne plohe kocke, te se dobije oštra granica obaju osvijetljenih polja. Unutrašnje površine glave fotometra su pocrnjene da se izbjegnu refleksije raspršenog svjetla. Pločica S može se izvaditi iz čvrstog držača i preokrenuti ju, što je pri mjerenu potrebno učiniti zbog eventualnih nejednoličnosti površine pločice.



Sl. 15. Shematski prikaz usporedbi svjetljivosti površina S_1 i S_2 s pomoću kocke po Lummeru i Brodhunu, te izgled vidnog polja u okularu dalekozora

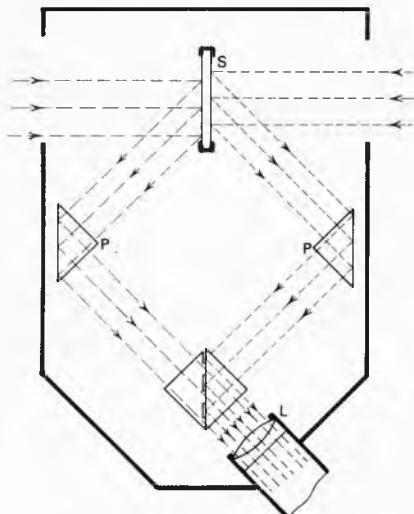


Sl. 16. Presjek glave fotometra po Lummeru i Brodhunu, za slučaj izjednačavanja svjetlosti polja u okularu



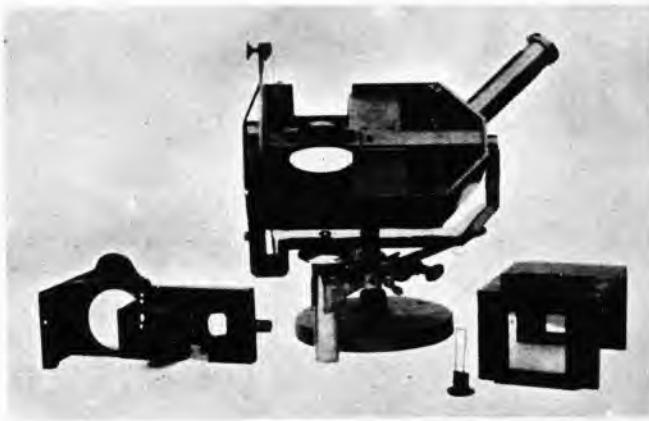
Sl. 17. Shematski prikaz kocke po Lummeru i Brodhunu za slučaj izjednačavanja kontrasta u polju okulara

Daljim istraživanjima i usavršavanjima Lummer-Brodhunove glave pokazalo se da je oko još osjetljivije na razlike u kontrastu svjetloće susjednih površina. Takva Lummer-Brodhunova kocka kontrasta i njeno vidno polje shematski su prikazani na sl. 17. Hipotenuzne plohe su ravne s dijelovima ohrapavljenim brušenjem pjeskom ili jetkanjem. G_1 i G_2 označuju tanke staklene ploče na dijelovima upadnih ploha. Zbog refleksije svjetla na tim



Sl. 18. Presjek glave fotometra po Lummeru i Brodhunu s kockom za izjednačenje kontrasta

pločicama dobiva se smanjenje svjetljivosti za 4 do 8% i tako nastaje kontrast u svjetloći trapezoidnih polja i okolnog dijela vidnog polja. Cijela glava shematski je prikazana na sl. 18. Sl. 19 prikazuje dijelove glave fotometra s vidnim poljem kontrastnih ploha. Osim ove glave fotometra s kockom po Lummeru i Brodhunu, primjenjuju se i drugi načini dobivanja oštrog razgraničenja svjetlih polja, npr. biprizmom po Fresnelu koja se primjenjuje u fotometru po Martensu, kasnije razradenom za spektrofotometriju po Königu.



Sl. 19. Dijelovi glave fotometra po Lummeru i Brodhunu s kockom za izjednačenje kontrasta

Primjenjuje se još i treća metoda određivanja izjednačenja luminancije dvaju svjetlih polja. To je metoda *prestanka treperenja* (flicker-metoda). Ona se sastoji u tom da bijelu difuznu površinu naizmjence osvjetljujemo s dva izvora svjetla, te mijenjamo frekvenciju osvjetljavanja. Promatrujući tu površinu imamo osjet treperavog svjetlenja. Kod odredene frekvencije bit će minimum treperenja ukoliko su osvjetljenja različita, a nestat će treperenja kad se osvjetljenja izjednače. Povećanjem frekvencije naizmjeničnog osvjetljavanja proširuje se područje prestanka treperenja, a za veće razlike osvjetljenja ono se ne javlja. Zato se traži da se izjednačenje određuje uz najnižu moguću frekvenciju.

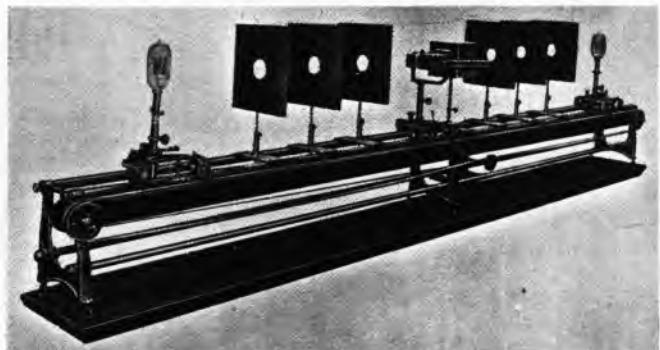
Fotometri s treperenjem (tzv. »flicker-fotometri«) služe posebno u slučaju kad se svjetla dvaju svjetlosnih izvora razlikuju u kvalitetu, tj. po boji, pa će biti prikazani u poglavljju Heterokromna fotometrija.

Za mijenjanje svjetljivosti (luminancije) jedne strane usporedne pločice S primjenjuju se uređaji osnovani na različitim pojавama slabljenja toka zračenja i koriste zakoni slabljenja takvih pojava. Osvjetljenje (iluminancija) se može slabiti: 1) udaljavanjem od izvora svjetla pri čemu osvjetljenje opada s kvadratom udaljenosti od izvora; 2) postavljanjem na put snopu svjetla sektorskog kotača koji rotira dovoljno velikom brzinom, tako da se ne primjećuje treperenje svjetla nastalo prekidanjem snopa svjetla. Osvjetljenje se smanjuje u omjeru kuta sektora φ i punog kuta 2π ; 3) primjenom linearno polariziranog svjetla, tako da se snop pušta kroz analizator; zakretanjem analizatora za kut a slabi snop svjetla proporcionalno s $\tan^2 a$; 4) prolazom snopa svjetla kroz tvar koja neutralno apsorbira svjetlost osvjetljenje opada s debjinom sloja po eksponencijalnom zakonu. Za kontinuirano mijenjanje debline služe dvostruki sivi klinovi apsorpcije.

Prva dva načina slabljenja gotovo se isključivo primjenjuju u laboratorijskoj fotometriji, a druga dva većinom u prijenosnim instrumentima.

Metoda udaljenosti. Najčešće primjenjivana metoda u vizuelnoj fotometriji jest metoda udaljenosti, kojom se određuje intenzitet svjetla nekog izvora svjetla. Usporedba intenziteta izvodi se na temelju zakona promjene osvjetljenja s kvadratom udaljenosti svjetilila od osvjetljene površine.

Mjeri se na tzv. fotometrijskoj klupi. Bijela difuzna pločica u glavi fotometra mora biti postavljena strogo okomito na

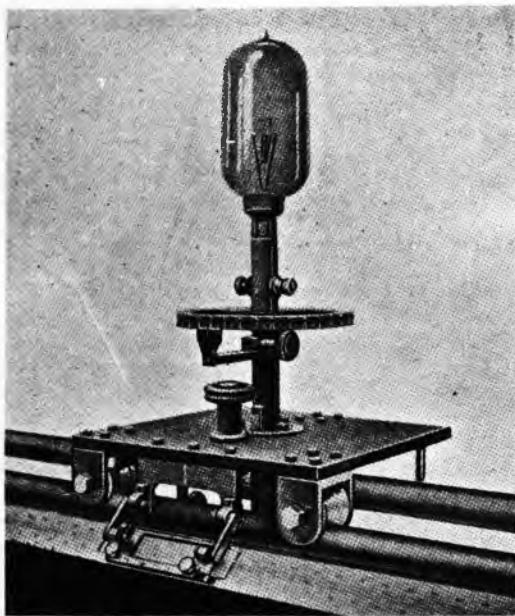


Sl. 20. Uredaji na fotometrijskoj klupi: svjetila na pomičnim stalcima, glava fotometra i zaštitni zastori

spojnicu obaju kvazi-točkastih izvora svjetla. Da se to postigne u svakom slučaju i uz relativno pomicanje izvora ili glave fotometra, postavljaju se svjetila i glava fotometra na čvrste stalke koji se mogu na kolicima pomicati po učvršćenim tračnicama. Visina svjetilila na stalcima može se podešavati. Između svjetilila i glave fotometra postavljaju se, također na stalcima, zasloni tako da u glavu fotometra upadaju samo direktni snopovi svjetla. Na klupi se nalazi točno mjerilo sa skalom u milimetrima, a na stalcima svjetilila i fotometarske skale pričvršćene su kazaljke po kojima se određuje položaj stalaka. Sl. 20 je fotografija jedne takve optičke klupe, a na sl. 21 prikazan je stalak sa svjetililom. Kolica stalaka mogu se pomicati s pomoću uzice preko kolotura i to s mjestima glave fotometra, tako da motritelj može gledajući u okular podešavati udaljenost.

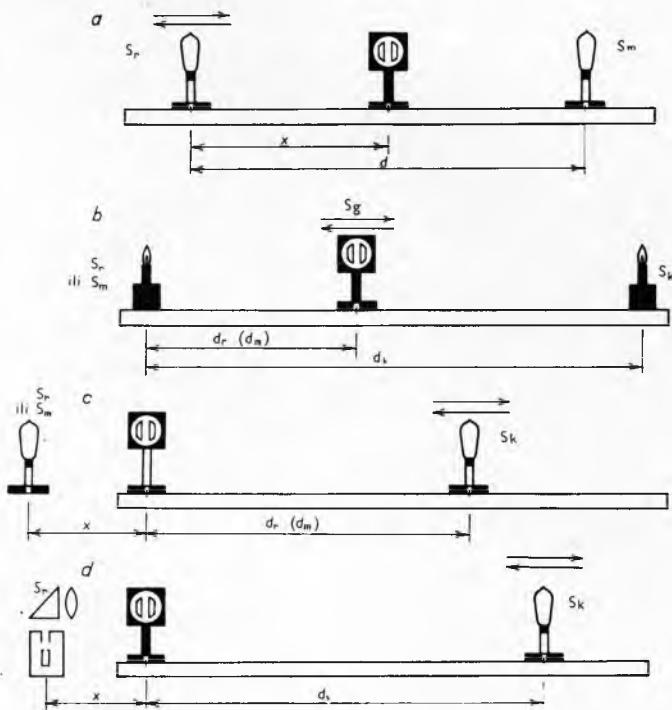
Najjednostavniji način mjerjenja prikazan je na sl. 22 a. Radni standard S_r i mjereno svjetilo S_m učvršćeni su u prikladnoj udaljenosti d , a stalak glave fotometra S_g nalazi se između njih i pomiče se dok se ne postigne izjednačenje svjetloće, odnosno kontrasta u okularu. Zato se to naziva mjerjenje uz stalnu udaljenost. Ako je onda S_g na udaljenosti x od S_r , vrijedi odnos $I_r/I_m = (d - x)^2/x^2$, gdje su I_r i I_m svjetlosne jakosti svjetilila S_r , odnosno S_m . Ta metoda pretpostavlja da su centralne zrake snopova svjetla, što od oba svjetilila upadaju na obje strane bijele difuzne pločice u glavi fotometra, strogo okomite na površinu pločice i da su obje površine pločice jednolične i jednakih faktora refleksije ρ .

To je vrlo teško postići, pogotovu kad treba S_k pomicati. Da bi se izbjeglo tom zahtjevu, primjenjuje se metoda komparacije s nekim trećim komparativnim svjetilom S_k , kojemu jakost I_k ne treba uopće poznavati. Takva se metoda općenito primjenjuje u fotometriji.



Sl. 21. Stalak sa svjetilom na kolicima koja se mogu pomicati po tračnicama kluge

Na sl. 22 b, c i d prikazano je nekoliko načina primjene komparacijskog svjetilila. U slučaju b) na nul-položaj stavlja se jednom radni standard S_r , a zatim mjereno svjetilo S_m , dok se komparativno svjetilo S_k nalazi na udaljenosti d_k . Izjednačenje svjetloće postignuto je na udaljenostima d_r i d_m glave fotometra S_g . Tada je $I_r/I_k = (d_k - d_r)^2/d_r^2$ i slično $I_m/I_k = (d_k - d_m)^2/d_m^2$.



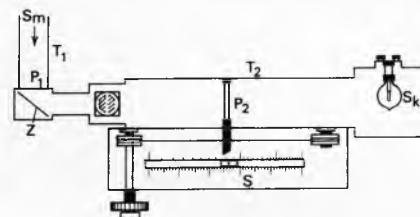
Sl. 22. Shema načina mjerjenja na optičkoj klupi. S_r radno standardno svjetilo, S_m mjereno svjetilo, S_k komparativno svjetilo, S_g primarno standardno svjetilo, Sg stalak s glavom fotometra. Sa x označene su po volji uzete udaljenosti, a strelicama je označen stalak podešavanja

Iz toga se dobiva:

$$\frac{I_m}{I_r} = \frac{(d_k - d_m)^2}{d_m^2} \cdot \frac{d_r^2}{(d_k - d_r)^2}$$

U slučaju c) glava fotometra S_g postavlja se na nul-položaj, komparacijsko svjetilo S_k pomiče se na fotometarskoj klupi, a radni standard, odnosno mjereno svjetilo, S_r i S_m uzastopno se postave na isto mjesto (metoda supstitucije); udaljenost x nije potrebno poznavati. Iz mjereneih udaljenosti S_k , d_r i d_m , što se odnose na uspoređivanje S_r , odnosno S_m , sa S_k odreduje se I_m iz relacije $I_m/I_r = d_r^2/d_m^2$.

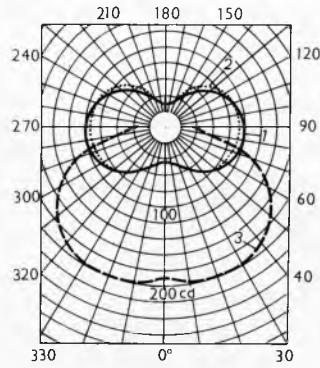
Ta je metoda osobito prikladna kad se neko svjetilo uopće ne može smjestiti na fotometarsku klupu, kao npr. standardno svjetilo, kako je prikazano na sl. 22 d, ili integracijska kugla, ili pak žarulja smještena u nekom uredaju za okretanje da bi se odredio polarni dijagram. Ista se metoda primjenjuje i u nekim prijenosnim fotometrima, kao npr. Weberovom fotometru kojega je shema prikazana na sl. 23.



Sl. 23. Prijenosni fotometar po Weberu

U tubusu T_1 nalazi se pločica P_1 od opalnog stakla, sitno nahrapipljena brušenjem, koja se osvjetljuje mjerenim svjetilom S_m . U tubusu T_2 nalazi se komparativno svjetilo S_k (niskonaponska žaruljica) koja osvjetljava drugu opalnu pločicu P_2 . Ova se može pomicati unutar tubusa T_2 , a na vanjskoj strani nosi kazaljku koja se pomiče duž skale S . S kvadratom udaljenosti P_2 od S_k mijenja se osvjetljenje na P_2 , a time i svjetljivost (luminanciju) pločice P_2 . Svjetljivost se P_1 preko zrcala Z uspoređuje sa svjetljivošću P_2 s pomoću Lummer-Brodhunove kocke.

Određivanje rasporeda svjetlosne jakosti. Općenito je svjetlosna jakost svjetila različita u različitim smjerovima. Radi rasvjete potrebno je poznavati raspored jakosti, i to ili samo u horizontalnoj ravnini, ili samo u vertikalnoj ravnini kroz svjetilo, ili pak potpuni raspored u prostoru, po kojem se onda može odrediti i srednja jakost svjetila. Raspored intenziteta u jednoj ravnini prikladno se prikazuje *polarnim dijagramom*. Obično se

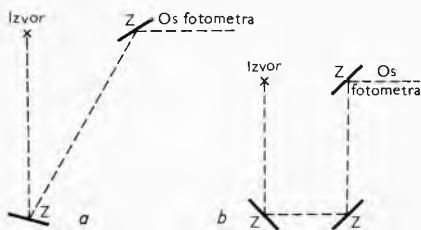


Sl. 24. Primjeri polarnih dijagrama za visokotlačne živine sjajice: 1 fluorescent, 2 bez fluorescenčnog praha, 3 reflektorsku (sve svedeno na 1000 lm svjetlosnog toka)

za svjetila daju polarni dijagrami za vertikalnu ravninu, i to ili za svjetilo samo ili zajedno sa sjenilom, odnosno reflektorm. Sl. 24 je primjer takvog polarnog dijagrama za tri različita svjetila.

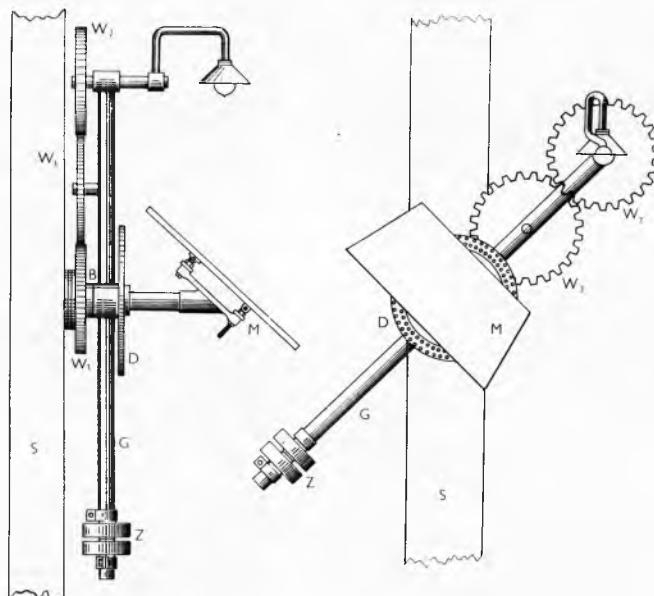
Pri određivanju rasporeda svjetlosne jakosti u vertikalnoj ravnini traži se da svjetiljka ili svjetilo ostane u vertikalnom položaju u kojem se i u praksi primjenjuje, a da snop svjetla upada

u smjeru osi fotometra. Obično za to služe dva ili više zrcala, kako je to prikazano na sl. 25. Tada se sustav zrcala zakreće oko osi fotometarske glave koja mora prolaziti kroz izvor svjetla. Na sl.



Sl. 25. Shematski prikaz postavljanja zrcala pri mjerjenju raspodjele svjetlosne jakosti: a sa dva zrcala, b sa tri zrcala

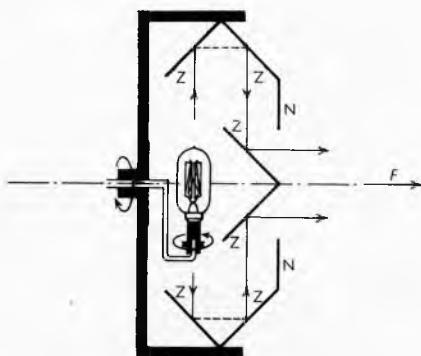
26 prikazan je vrlo prikladan uređaj za određivanje rasporeda svjetlosne jakosti u vertikalnoj ravnini koji sadržava samo jedno zrcalo. Na čvrstom staklu S pričvršćen je zupčanik W₁; motka G čvrsto je vezana s horizontalnom osovinom koja na sebi nosi okruglu ploču D i zrcalo M, i koja je uležištena u ležaju B. Na jednom je kraju motke preko U-držača pričvršćena svjetiljka na osovinu na kojoj je učvršćen zupčanik W₂. Meduzupčanik W₃ okreće se oko osovine učvršćene u motku G. Na suprotnom kraju motke je protuteg Z, tako da se motka lako zaokreće. U pločici D izbušene su rupice za svaki 5° zakret, pa se s utikačem kroz rupice može poluga G uz stalak S učvrstiti u željenom položaju. Kako se zakreće poluga G, tako se preko zupčanika zaokreće i nosač svjetiljke u suprotnom smislu, te svjetiljka ostaje u vertikalnom položaju. Zrcalo M nagnuto je 45° prema horizontalnoj osovini, a zaokreće se zajedno s cijelom motkom G, te u svakom položaju odašilje snop svjetla što od svjetiljke upada na zrcalo horizontalno prema glavi fotometra. Glava fotometra stavlja se na nul-položaj i mijenja se udaljenost komparativnog svjetilila, kako je to već opisano.



Sl. 26. Uredaj za mjerjenje rasporeda svjetlosne jakosti samo jednim zrcalom, pri čemu svjetilo ne mijenja svoj položaj svijetljenja

Ukoliko se želi odrediti prostorni raspored, određuje se vertikalni raspored za po 10° azimuta. To je i temeljna metoda za određivanje cijelokupnog toka nekog svjetilila.

Da bi se pak odredila srednja svjetlosna jakost nekog svjetilila, upotrebljava se uređaj prikazan na sl. 27. Žarulja je postavljena na koljenastom držaču i okreće se s pomoću motora oko vertikalne osi (motor nije prikazan). Kućište s ugrađenim zrcalima Z i zaslonima N okreće se oko horizontalne osovine držača, kojoj os prolazi središtem žarnih nitи. Horizontalni snop svjetla šalje se u glavu fotometra F.



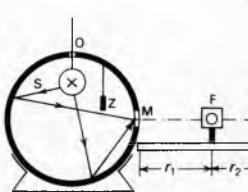
Sl. 27. Uredaj za određivanje srednje svjetlosne jakosti

Određivanje cijelokupnog svjetlosnog toka. Cijelokupni svjetlosni tok nekog svjetilila, koji se obično navodi kao njegova karakteristika, može se odrediti mjeranjem zračevne jakosti u svim smjerovima. No, ta je metoda određivanja raspodjele jakosti dugotrajna i naporna. Zato su se tražile metode za jednostavije i brže određivanje cijelokupnog toka (totalnog fluksa). Nakon mnogih uređaja s pomoću zrcala, danas se isključivo primjenjuje *integracijska kugla*, koju je u fotometriju uveo 1900 R. Ulbricht, pa se obično i naziva njegovim imenom.

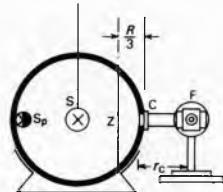
Limena kugla promjera 0,5...3 m s unutrašnje strane je pre-mazana bijelom tvari koja raspršno (difuzno) reflektira svjetlo, te da površinu kugle vrijedi Lambertov zakon kosinus. Teoretski se može pokazati da bi svjetilo koje svjetli u svim smjerovima, stavljen u bilo kojem položaju, proizvelo uslijed mnogostrukih refleksija jednolično osvjetljenje po cijeloj unutrašnjoj površini kugle. Ako se sa R označi polumjer kugle, sa ϱ faktor refleksije, a sa Φ ukupni svjetlosni tok svjetilila u kugli, osvjetljenje je E na bilo kojem dijelu površine

$$E = \frac{\Phi}{2\pi R^2} \cdot \frac{\varrho}{1 - \varrho} = K_1 \Phi,$$

tj. proporcionalno je ukupnom toku Φ . Da bi se to osvjetljenje moglo mjeriti, na kugli se ostavlja malen mjerni otvor M, kako je to prikazano na sl. 28. Da bi se pak spriječilo osvjetljenje otvora direktnim snopom svjetla iz izvora, stavlja se zaštitni zastor Z. Pri mjerenu svjetilila malenog toka otvor se ostavlja otvoren i mjeri se osvjetljenje, odnosno svjetljivost površine nasuprot otvora. Ako li se radi o svjetililima velikog ukupnog toka, u otvor se stavlja mlijeko staklo kojemu se onda mjeri luminancija.



Sl. 28. Ulbrichtova kugla za određivanje ukupnog svjetlosnog toka u sklopu fotometrijske klupi



Sl. 29. Ulbrichtova kugla s pomoćnim svjetiljkom u kombinaciji s prijenosnim fotometrom

Kugla se priklučuje na fotometarsku klupu tako da os fotometra F prolazi sredinom otvora i središtem kugle. Mjerene se izvodi posredstvom pomoćnog svjetilila P. U kuglu se stavlja najprije radno standardno svjetililo S_r, za koje je ukupan tok određen iz prostornog rasporeda svjetlosne jakosti, a zatim se u istom položaju stavlja mjereno svjetililo S_m (metoda supstitucije). Prozoriči M predstavljaju izvor svjetla jakosti I, pa se prethodni izraz može pisati i ovako

$$E = K_2 I,$$

gdje I znači svjetlosnu jakost prozoriča M u smjeru osi fotometra. Iz oba izraza za E slijedi

$$I = C\Phi \quad C = K_1/K_2.$$

Za osvjetljenje E_g bijele pločice S u glavi fotometra vrijedi

$$E_g = \frac{I}{r_1^2} = C \cdot \frac{\Phi}{r_1^2},$$

gdje je r_1 udaljenost prozorića M od pločice S. Dakle, neposredno se uspoređuju pripadni tokovi Φ_r , radnog standarda i Φ_m mjerenog svjetlila.

Katkada se radno standardno svjetlilo i ispitivano svjetlilo znatno razlikuju po veličini i jakosti, a posebno još po svojoj opremi (držači, grla, štitnici i sl.). Ta oprema djelomično apsorbira svjetlo izvora, pa se na taj način smanjuje učin ukupnog svjetlosnog toka, tj. osvjetljenje mjer ног prozorića. Da bi se mogao nekako uzeti u račun različit negativan učinak opreme svjetilila, H. Helwig je u kuglu nasuprot prozoriću stavio pomoćno svjetlilo (na sl. 29 označeno S_p). Prema središtu kugle okrenuta strana pomoćne žarulje jest s vanjske strane premašana nepropusnim slojem koji svjetlo od žarulje reflekтира prema površini kugle. Standardno i mjereno svjetlilo stavljaju se u sredinu kugle, a mjereni otvor je zaštićen od direktnog snopa iz svjetilila zastorom u obliku pruge smještene poput tetine u udaljenosti $R/3$ od M. Širina je zastora 2 $R/3$.

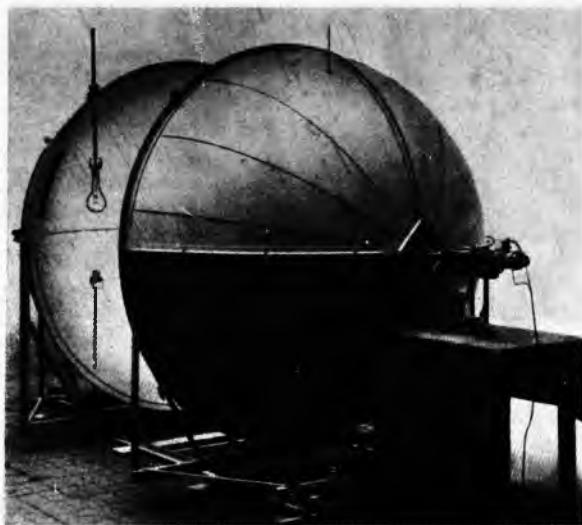
Za određivanje ukupnog toka mjer ног svjetilila S_m treba obaviti četiri mjerjenja: 1. u kugli svjetli samo S_r ; mjerjenjem se odredi E_0 , pa je $\Phi_0 = K_0 E_0$, gdje je Φ_0 poznati svjetlosni tok standardnog svjetilila; 2. isključeno je svjetlilo S_r , a svjetlilo S_p ; izmjeri se E'_0 pa je $\Phi'_0 = K_0 E'_0$; 3. standardno se svjetlilo izvadi i na njegovo mjesto stavi mjereno svjetlilo S_m , ali se ne uključi. Svjetli opet samo S_p ; izmjeri se E'_m te je $\Phi'_m = K_m E'_m$; 4. isključi se S_p , a uključi S_m ; izmjeri se E_m , pa je $\Phi_m = K_m E_m$.

Kako je $\Phi'_m = \Phi'_0$ slijedi iz navedenih odnosa izraz

$$\Phi_m = \Phi_0 \cdot \frac{E_m}{E'_0} \cdot \frac{E'_0}{E'_m}$$

po kojem se onda izračuna svjetlosni tok Φ_m . Mjerjenima sa S_p uvažuje se različitost opreme za S_r i S_m .

Na sl. 30 prikazan je izgled otvorene Ulbrichtove kugle s glavnim i pomoćnim svjetlilom, te priključenim prijenosnim fotometrom.



Sl. 30. Ulbrichtova kugla

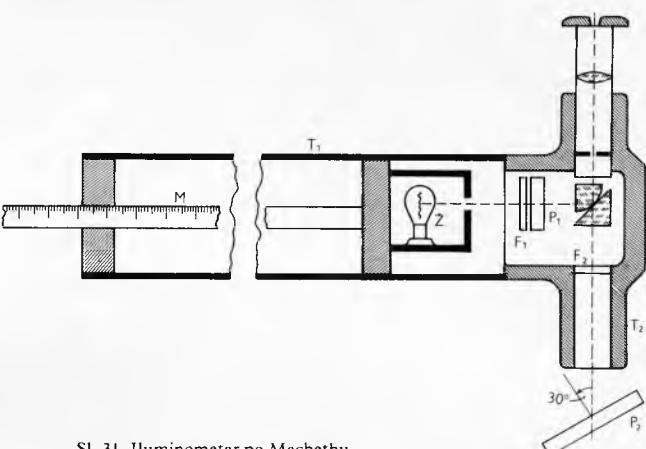
Određivanje osvjetljenja. Veličina *osvjetljenje* ne može se neposredno mjeriti vizuelnim metodama, nego samo posredno. Osvjetli se brušena pločica opalnog stakla s jedne strane i onda se mjeri svjetlivost (luminancija) ili s iste ili s druge strane. Pločica mora biti potpuno slobodna, ničim nezaklonjena, tako da svjetlo može do nje dopirati iz cijelog poluprostora. Osim toga uredaj mora biti takav da se može orijentirati u bilo kom smjeru, što znači da cijeli uredaj mora biti malen i prenosljiv. Takva mjerena opalna pločica uspoređuje se po svjetlivosti s drugom istovrsnom komparacijskom pločicom osvjetljenom nekim standardiziranim svjetlilom. Osvjetljenje se na komparacijskoj pločici tada mijenja: ili mijenjanjem udaljenosti svjetilila, ili mijenjanjem jakosti struje žarulje koja služi kao svjetlilo, ili zakretanjem raspršne

(difuzerske) pločice pred svjetlilom, ili pak mijenjanjem otvora dijafragme pred raspršnom pločicom.

U svakom slučaju, najosjetljiviji dijelovi takvog uredaja jesu mjerena i komparacijska opalna pločica, koje moraju biti vrlo čiste, pa se povremeno moraju očistiti. Za slučaj mjerjenja refleksijske svjetlivosti može prikladno poslužiti metalna pločica na koju je nadimljen magnezijum-oksid. Takva je površina sitno hrapava, gotovo idealno raspršna i bijela, samo treba češće obnavljati nadimljeni sloj magnezijum-oksida.

Na sl. 23 prikazani Weberov fotometar izrađen je na principu usporedbi svjetlivosti opalnih pločica: mjerne P_1 i komparacijske P_2 . No namjena mu je prvenstveno za mjerjenje svjetlosne jakosti svjetilila. Ako se, međutim, ukloni pločica P_1 , taj fotometar može poslužiti i za mjerjenje osvjetljenja, tj. kao iluminometar.

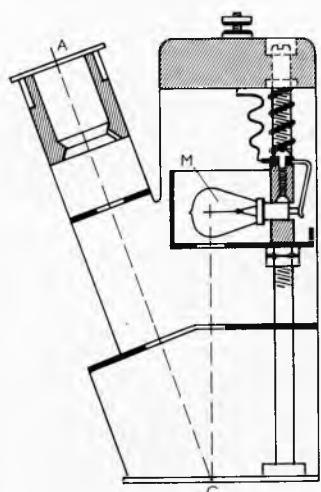
Specijalno izrađen *iluminometar po Macbethu* prikazan je na sl. 31. Žarulja Z nalazi se u posebnom kućištu koje se s pomoću



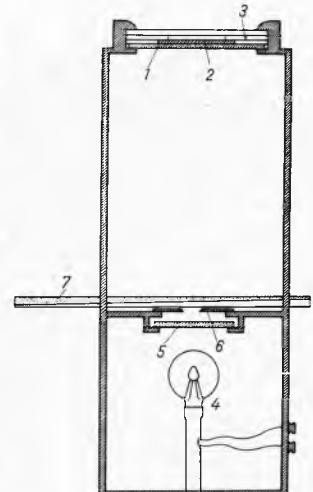
Sl. 31. Iluminometar po Macbethu

motke M s mjerilom može pomicati unutar tubusa T₁. Time se mijenja svjetlivost komparacijske pločice P₁, pred koju se prema potrebi stavlja neutralni filter F₁, da se u određenom omjeru smanjuje svjetlivost pločice P₁ pri mjerenu slabih osvjetljenja. Kroz okular, a preko Lummer-Brodhunove kocke i tubusa T₂, motri se mjerena raspršna pločica P₂, i to pod kutom od 30°. Pri mjerenu vrlo jakih osvjetljenja uključi se neutralno sivi filter F₂ (i naravno ukloni filter F₁), te se na taj način u određenom omjeru smanji mjereno osvjetljenje.

Kao mjerena raspršna pločica može vrlo prikladno poslužiti metalna pločica nadimljena magnezijum-oksidom. Mjerena pločica mora biti dovoljno velika, tako da gledana i iz nešto veće udaljenosti ispunja cijelo vidno polje okulara. Ako je taj uvjet



Sl. 32. Prijenosni standardni uredaj za kontrolu Macbethovog iluminometra



Sl. 33. Uredaj za mjerjenje vrlo slabih osvjetljenja

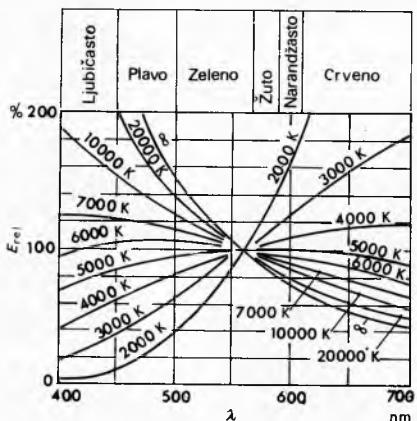
ispunjeno, vrijednost je svjetljivosti mjerne pločice neovisna o udaljenosti fotometra od pločice. Za određivanje osvjetljenja neprikladno orijentiranih ploha može se na tubus T_2 staviti kojlenasti nastavak sa zrcalom.

Zbog promjena što s vremenom nastaju u fotometru (slabljene žarulje, prašina, onečišćenja pločice P_1 i sl.), potrebna je povremena kontrola fotometra. Uredaj za kontrolu prikazan je na sl. 32. U otvor A stavlja se tubus T_3 iluminometra i motri difuzna bijela površina C osvijetljena standardnom žaruljom M. Struja se kroz žarulju iluminometra otpornikom regulira do jednakosti kontrasta, odnosno svjetloće u okularu fotometra.

Za mjerjenja vrlo slabih osvjetljenja služi fotometar prikazan na sl. 33. Prstenasta bijela površina 3 izložena je slaboj vanjskoj rasvjeti. Sredina prstena osvijetljena je žaruljom 4 preko opalnog stakla 5 kroz malen otvor zaslona 6, dalje kroz neutralno sivi dvostruki klin 7, te pločicu opalnog stakla 1 i tanak sivi filter 2. Bijela površina prstena i difuzno osvijetljeni otvor u sredini prstena motre se s oba oka bez ikakvog pomagala, te se pomicanjem dvostrukog sivog klina uspostavlja jednakost svjetljivosti prstena i otvora u njemu.

Kvalitet svjetla. Različiti izvori svjetla ne razlikuju se samo po jakosti nego još više po kakvoći (kvalitetu). Pogotovo je u novije vrijeme za praktičnu rasvjetu uvedeno više tipova izvora svjetla koji se po kvalitetu bitno razlikuju. Sa stanovišta fotometrije postavlja se problem uspoređivanja takvih izvora po jakosti.

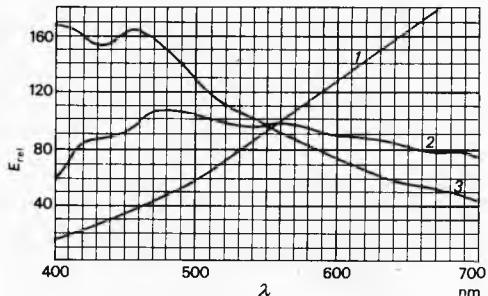
Kvalitet svjetla nekog izvora ne može se u svakom slučaju kvantitativno izraziti nekim brojem. Najpotpunije je kvalitet svjetla određen spektralnom raspodjelom snage zračenja. Međutim, za vizuelnu fotometriju odlučan je osjet boje bez obzira kojim spektralnim sustavom je taj osjet izazvan. Zato je za izražavanje kvaliteta svjetla uvedena veličina *temperatura boje* (T_b). Može se ovako definirati: Temperatura boje nekog izvora svjetla jest ona temperatura crnog tijela uz koju je boja crnog tijela jednak boji promatranoj izvori svjetla. Izražava se kao apsolutna temperatura u kelvinima. Tom se veličinom može dobro karakterizirati kvalitet termičkih izvora svjetla kojima je spektar kontinuiran, a raspored snage zračenja u spektru sličan rasporedu crnog tijela. No njom se mogu karakterizirati i drugi izvori s manje ili više diskontinuiranim rasporedom snage zračenja u spektru.



Sl. 34. Relativni raspored snage zračenja crnog tijela za različite temperature, u odnosu prema zračenju za $\lambda = 555$ nm

Razlike izvora svjetla po kvalitetu mogu se najprikladnije prikazati krivuljama relativnog spektralnog rasporeda snage zračenja. Ordinate su tih krivulja omjeri snage zračenja za pojedine duljine vala λ i za neku određenu duljinu vala λ_0 . S obzirom na vidljivo područje zračenja, prikladno je za omjeravanje izabrana duljina vala najveće osjetljivosti oka $\lambda_0 = 555$ nm. Na sl. 34 prikazane su takve krivulje relativnog rasporeda snage zračenja crnog tijela za različite temperature. Ako se u području vidljivog zračenja relativni raspored snage zračenja ne razlikuje znatno od rasporeda crnog tijela, može se kvalitet (boja) svjetla prikladno karakterizirati temperaturom boje. Na sl. 35 prikazane su krivulje relativnog rasporeda snage zračenja za CIE svjetilo A (1).

i usporedo za Sunčevu direktno svjetlo zajedno s vedrim nebom (2) i za zenitno svjetlo vedrog neba (3).



Sl. 35. Relativni raspored snage zračenja za CIE svjetilo A (1), za Sunčevu direktno svjetlo zajedno s vedrim nebom (2) i za zenitno svjetlo vedrog dana (3)

Heterokromna fotometrija. Ako se usporeduju svjetila različitog kvaliteta (različite boje svjetla), ocjenjivanje jednakosti svjetloće ili jednakosti kontrasta u vidnom polju glave fotometra postaje nesigurno, te se ponavljana mjerjenja znatno razlikuju. Dok su razlike u boji neznatne, stanoviti motritelji mogu još izvoditi mjerjenja s istom točnošću kao i za svjetla jednakne boje. Kad su razlike boja znatne, mogu se mjerena intenziteta izvoditi na tri glavna načina: metodom postupnog uspoređivanja (metodom »korak po korak«), metodom optičkih filtera, metodom treperenja (flicker-metodom).

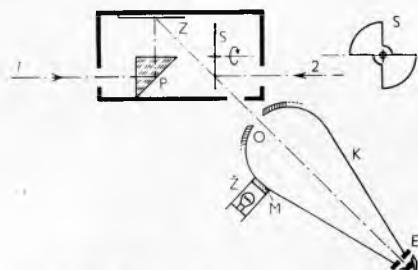
Po metodi »korak po korak« pri uspoređivanju nekog standardnog svjetila S_s i nekog mjerenoj svjetila S_m , a koji se znatno razlikuju po boji svjetla, uključuje se niz komparativnih svjetila $S_1, S_2 \dots S_n$, koji se počevši od S_s sve više po boji približuju svjetilju S_m . Pri tom se po intenzitetu usporeduju prvo S_s i S_1 , a zatim S_1 i S_2 itd., i konačno se usporedi S_n i S_m . Točnost mjerena intenziteta ostaje nesmanjena u odnosu prema točnosti uspoređivanja jednakobojnih svjetila ako su motritelji prikladni za takva mjerjenja, ako vidno polje usporedbe ne premašuje 2° pa svjetlo u oku pada samo na centralnu jamicu (lat. fovea centralis) koja je ispunjena samo čunjićima, te je mjesto najjasnijeg vida (tzv. fovealno gledanje), i ako je svjetljivost polja dovoljno velika (gledanje samo čunjićima).

Po metodi optičkih filtera izjednačuje se boja svjetla obaju svjetila filtrima kojima je poznata krivulja propustljivosti (transmisije) i koji se stavljuju u snop svjetla jednog svjetilja, te se onda svjetila mogu usporediti po intenzitetu. Računom se uzima u obzir smanjenje intenziteta zbog prolaza snopa svjetla kroz filter.

Metoda treperenja osniva se na posebnom svojstvu ljudskog oka. Ako se, naime, bijela difuzna pločica u glavi fotometra naizmjence osvijetljava dvama raznobojnim svjetlima, oko zamjećuje treperenje boje svjetla. Povećanjem frekvencije osvjetljavanja treperenje se sve manje zamjećuje, i konačno uz neku izvjesnu frekvenciju isčezne, te se više ne opaža treperenje boje, premda se još dalje zamjećuje treperenje po svjetloći. Pomicanjem jednog svjetila može se uspostaviti jednakost po svjetloći, odnosno po kontrastu, pa tada nestane u vidnom polju svako treperenje. Postoji neka minimalna frekvencija kod koje nestaje treperenje i uz tu frekvenciju je oko za izjednačenje polja u vidnom polju fotometra najosjetljivije, tj. točnost mjerena najveća. Osjetljivost mjerena se još poveća ako je površina oko vidnog polja fotometra također osvijetljena približno do iste svjetljivosti kao i samo vidno polje.

Na sl. 36 prikazan je tip treperavog (treptavog) fotometra koji u dobroj mjeri odgovara svim uvjetima mjerena po metodi treperenja. Iz izvora 1 snop svjetla preko prizme P okomito osvjetljava bijeli difuzni zastor Z. Taj se zastor motri kroz posebnu komoricu K iz položaja E, a kroz otvor O, kojemu rubovi oštro ograničuju vidno polje. Žaruljica Ž u malenom kućištu posredstvom mlijekočnog stakla M blago rasvjetljuje unutrašnjost komorice K. Iz izvora 2 snop svjetla pada na sektorski kotač S, koji se vrti oko horizontalne osovine. Površine zastora Z, sektorskog kotača S i komorice K nadimljene su magnezijum-oksidom, koji čini vrlo difuznu bijelu površinu. Otvor O je tolik da oku

smještenom na drugom kraju u E daje vidno polje baš od 2° . Sektorski kotač ima dva dijаметralna izreza po 90° . Kako se S vrti, tako oko naizmjence motri površinu zastora Z i površinu kotača S. Svjetila 1 i 2 postavljaju se tako da vidno polje bude otplike jednake svjetloće kao i unutarnja površina komorice K. Uz malenu brzinu rotacije kotača S opaža se treperenje boje.



Sl. 36. Treperavi fotometar po Guildu

Brzina se rotacije povećava dok ne prestane treperenje boje, a zatim se podešavaju udaljenosti izvora dok ne prestane i treperenje svjetloće.

OBJEKTIVNA FOTOMETRIJA

Receptori svjetla. Jakost struje plinova, tekućina, električita, pa i topline može se mjeriti direktno po nekom učinku, a da struja ostane nepromijenjena. Struja elektromagnetskog zračenja može se naprotiv mjeriti samo indirektno. Elektromagnetsko zračenje kao oblik energije može se mjeriti samo tako da se pretvoriti u neki drugi oblik energije (toplinsku, električku, kemijsku energiju). Zato služe posebni uređaji: *receptori* (primači) elektromagnetskog zračenja, odnosno svjetla. Takvi receptori mogu biti ili jednakosjetljivi u cijelom području spektra: ultraljubičastom, optičkom i infracrvenom (*neutralni receptori*) ili različite osjetljivosti za različita spektralna područja (*selektivni receptori*). Vrijedno je istaknuti još jednu razliku među receptorima. Naime, većina receptora reagira na intenzitet zračenja, pa se mogu nazvati *intenzitetnim receptorma*. Za njih postoji prag intenziteta ispod kojeg ne reagiraju makako dugo bili izloženi zračenju. No, postoji i jedna vrsta receptora koja reagira na sumu zračenja (*sumativni receptori*); takav je receptor fotografski sloj. On reagira i uz vrlo male intenzitete zračenja, samo ako se dovoljno dugo izloži zračenju.

U tabl. 1 navedeni su glavni receptori svjetla, svrstani prema navedenim karakteristikama, spektralnoj osjetljivosti i načinu indiciranja svjetla.

Tablica 1
OSNOVNE KARAKTERISTIKE RECEPTORA SVJETLA

Receptor	Spektralna osjetljivost	Indiciranje svjetla
Termostup	neutralan	intenzitetno
Biometar	"	"
Fotoelement	selektivan	"
Fotoćelija	"	"
Fotomultiplikator	"	"
Oko	"	"
Fotografski sloj	"	sumativno

Da bi se selektivni receptori mogli ispravno primijeniti, potrebno je za njih odrediti krivulje relativne spektralne osjetljivosti, koje pokazuju raspored osjetljivosti po duljini vala.

Kod neutralnih receptora, bolometra i termostupa, energija zračenja pretvara se u toplinsku energiju koja se onda mjeri prema povišenju temperature. Neutralni su receptori znatno manje osjetljivi nego što su selektivni receptori, pa uglavnom služe samo za određivanje spektralne osjetljivosti selektivnih receptora.

Jakost struje *i fotoelektričnih receptora* proporcionalna je toku zračenja Φ_e

$$i = C \Phi_e$$

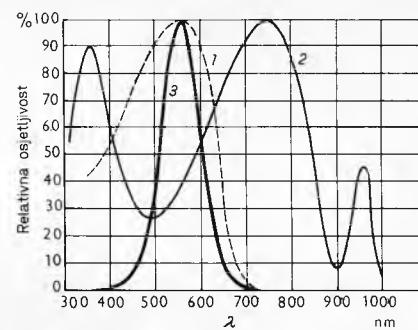
Faktor proporcionalnosti je ovisan o duljini vala zračenja, pa za određeno usko područje duljine vala (λ do $\lambda + d\lambda$) treba staviti:

$$C(\lambda) = \frac{i}{\Phi_{e,\lambda}}.$$

$C(\lambda)$ ima značenje apsolutne spektralne osjetljivosti za duljinu vala λ i izražava se u A/W. Za neku određenu duljinu vala λ_0 (npr. $\lambda_0 = 555$ nm) određuje se apsolutna osjetljivost $C(\lambda_0) = C_0$, a za ostale se duljine vala tada određuju samo omjeri $\frac{C(\lambda)}{C_0} = F(\lambda)$, koji onda znače relativnu osjetljivost receptora. Fotostruja za kontinuirani spektralni zračila je tada:

$$i = \int C(\lambda) \Phi_{e,\lambda} d\lambda = C_0 \int F(\lambda) \Phi_{e,\lambda} d\lambda.$$

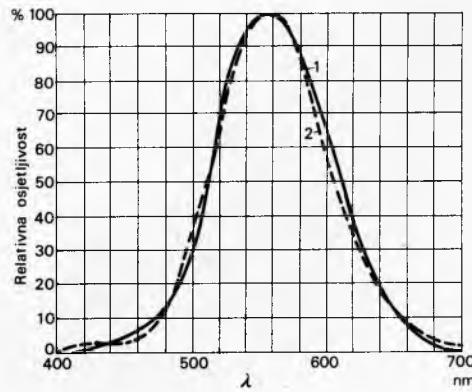
U praktičnoj se fotometriji primjenjuju uglavnom fotoćelije i fotoelementi (v. Pretvaranje optičkih veličina u električne, u članku *Električna mjerena TE 3*, str. 641 i 646). Na sl. 37 prikazane su krivulje relativne spektralne osjetljivosti za najčešće upotrebljavane Se-fotoelemente (1) i Cs/Ag-fotoćelije (2). Uz



Sl. 37. Relativna spektralna osjetljivost Se-fotoelementa (1), Cs/Ag-fotoćelije (2) i prosječnog oka (3)

to je za usporedbu ucrtana i standardna krivulja svjetlosnosti (luminositeta) (3).

Fotoelementi su apsolutno osjetljiviji (do $500 \mu\text{A/lm}$) od fotoćelija (do $10 \mu\text{A/lm}$), mnogo jednostavniji za upotrebu, ali im fotostruja nije strogo proporcionalna toku zračenja, a osim toga ta se struja može samo neznatno pojačati (istosmjernim pojačalom). Zato se fotoelementi primjenjuju u prenošljivim fotometrima i za manje precizna mjerena. Naprotiv, vakuumske fotoćelije daju fotostruju strogo proporcionalnu toku zračenja, a osim toga se struja može s pomoću elektronki, odnosno tranzistora, uz prekidani snop zračenja znatno pojačati. Fotoćelije se zato gotovo isključivo primjenjuju za laboratorijska mjerena, a samo izuzetno i u prenošljivim uređajima, i to za precizna mjerena.



Sl. 38. Relativna spektralna osjetljivost fotoćelije (2) i s pomoću tekućinskog filtra prilagođena osjetljivost oka (1)

Spomenuti se receptori primjenjuju ili sami bez filtra, pa se za svjetla različite temperature boje, odnosno različite vrste svjetila, određuju korekcijski faktori ili u kombinaciji s odgovarajućim

FOTOMETRIJA

filtrom kojim je raspored relativne spektralne osjetljivosti prilagođen osjetljivosti oka. U tabl. 2 dani su korekcijski faktori za fotoelement baždaren za $T_b = 2700$ K, a za nekoliko vrsta praktičnih svjetilja. Na sl. 38 prikazana je krivulja relativne spektralne osjetljivosti fotočelije u kombinaciji sa tekućinskim filtrom i usporedno krivulja osjetljivosti za prosječno oko prema CIE. Takvi fotoelementi i fotočelije prilagodene osjetljivosti omogućuju objektivnu fotometriju za razliku od subjektivne (vizuelne) fotometrije.

Tablica 2
KOREKCIJSKI FAKTORI SELENSKOG FOTOELEMENTA ZA RAZLIČITA SVJETLILA I RAZLIČITE TEMPERATURE BOJE

Svetilo	Boja	Korekcijski faktor
Žarulja	2700 K	1,000
"	2800 K	0,99
"	2900 K	0,98
"	3000 K	0,97
"	3200 K	0,95
"	3400 K	0,94
Fluorescentna cijev	bijela (3500 K)	1,04
" "	45 bijela (4500 K)	0,94
" "	dnevno svjetlo (6500 K)	0,84
" "	blago bijela	0,95
" "	fotografska	0,76
" "	plavo-bijela	0,77
" "	industrijsko bijela	0,79
" "	plava	0,46
" "	zelena	1,45
" "	ružičasta	0,93
" "	zlatna	1,27
" "	crvena	0,68
Zivina sijalica	H-6 (kvarcni balon)	0,66
" "	H-6 (stakleni balon)	0,70
" "	«Germicidal» (18T8)	0,58
Natrijumska sijalica	NA-9	1,36
Neonska sijalica	cijev 15 mm uz 30 mA	0,85
" "	s užarenom katodom (C-H)	0,83
" "	tinjalica	1,09
El. luk s ugljenom	(50 V, 60 A)	0,48
" "	malog intenziteta (140 V, 14 A)	0,31

Oko kao receptor svjetla. Čovječe oko je također receptor za elektromagnetsko zračenje i to selektivni receptor, pa i za njega postoji, kako je već rečeno, spektralna osjetljivost. Biokemijskim i biofizičkim promjenama, što ih izaziva elektromagnetsko zračenje u oku i dalje u senzornom sustavu, nastaje osjet vida. Elektromagnetsko zračenje određenog spektralnog područja je fizički podražaj (stimulus) za psihički doživljaj osjeta vida.

Jakost osjeta vida — svjetloča — zavisna je naravno o intenzitetu podražaja — o snazi upadnog zračenja. Kvalitet osjeta vida — boja — zavisna je pak o spektralnom području, odnosno područjima, elektromagnetskog zračenja. Jednak intenzitet stimulusa, tj. jednaka snaga zračenja, ne izaziva u različitim spektralnim područjima i jednaku jakost osjeta vida, tj. jednaku svjetloču. Najveća je svjetloča za područje $\lambda \sim 555$ nm, te opada prema manjim i većim duljinama vala. Da bi se kvantitativno mogao odrediti raspored osjetljivosti oka, potrebno je povezati svjetlosne veličine s fizičkim (energetskim).

Za određeno usko spektralno područje može se uzeti da je svjetlosni tok Φ_v proporcionalan zračevnom toku Φ_e (energetskom toku)

$$\Phi_v = K \cdot \Phi_e.$$

Faktor proporcionalnosti K može se nazvati faktor svjetlosnog učina ili *svjetlosna učinkovitost* zračenja nekog spektralnog područja. On je ovisan o duljini vala, pa se to može označiti izrazom

$$K(\lambda) = \frac{\Phi_{v\lambda}}{\Phi_{e\lambda}}.$$

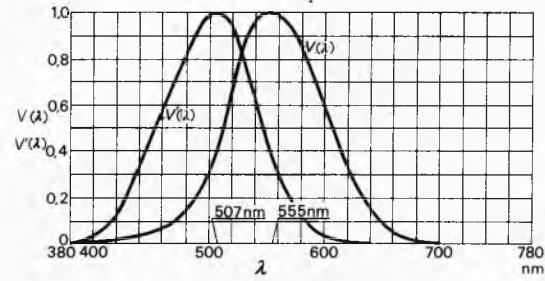
Vizuelnim fotometrom može se odrediti vrijednost svjetlosnog toka $\Phi_{v\lambda}$, a fizičkim se metodama može odrediti energetski tok $\Phi_{e\lambda}$, pa se tako može odrediti i faktor svjetlosne učinkovitosti $K(\lambda)$. Međutim, takva su mjerena vrlo suptilna i traže mnogostruk uređaj za mjerenu, pa se $K(\lambda)$ apsolutno određuje samo za jednu duljinu vala, odnosno usko spektralno područje oko te duljine vala. Ostale se vrijednosti $K(\lambda)$ određuju relativno metodom »korak po korak», tako da se za dva susjedna spektralna područja iz dva različita izvora uspostavi jednakost luminancije usporedbenih površina u glavi fotometra i odredi omjer snaga za oba izvora zračenja. Za $\lambda = 555$ nm osjetljivost oka je najveća, te toj duljini vala odgovara maksimalna vrijednost K_m . Kao relativna veličina svjetlosne učinkovitosti uvodi se veličina

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m}.$$

koja je bezdimenzijska i koja bi se mogla nazvati »faktor svjetlosnosti« nekog zračenja ili kratko *svjetlosnost*; nekada se označava i sa V_λ . Krivulja koja pokazuje raspored te veličine u ovisnosti o duljini vala može se nazvati *krivulja svjetlosnosti* (luminoziteta). Ona predstavlja spektralnu razdiobu osjetljivosti ljudskog oka, pa se katkada naziva i krivulja vidljivosti ili pak krivulja osjetljivosti oka.

Vrijedina $V(\lambda)$ određuje se subjektivnom metodom, pa se vrijednosti što ih odrede različiti motritelji manje ili više razlikuju. Izvedeni su zato nizovi određivanja $V(\lambda)$ s mnogim motriteljima neporemećenog vida, te se odredila krivulja spektralne osjetljivosti za neko prosječno ljudsko oko, kao standardna krivulja (v. i članak *Boja*, TE 2, str. 59). Takvu standardnu krivulju rasporeda svjetlosnosti, a koja predstavlja spektralnu osjetljivost prosječnog ljudskog oka, prihvatala je 1924 Medunarodna komisija za rasvetu CIE, a 1933 i Medunarodni komitet za mjere i utege.

Vrijednosti $V(\lambda)$ se odnose na slučaj većih vrijednosti svjetljivosti (luminancije) usporedbenih površina (danje gledanje), dok za niske vrijednosti svjetljivosti (noćno gledanje) vrijedi druga krivulja spektralne osjetljivosti, kojoj se ordinatne označuju sa $V'(\lambda)$. Na sl. 39 prikazane su obje te krivulje, 1 za $V(\lambda)$ i 2 za



Sl. 39. Krivulje relativne osjetljivosti standardnog oka za »danje« $V(\lambda)$ i »noćno« gledanje $V'(\lambda)$

$V(\lambda)$. Krivulja 2 je pomaknuta prema kraćim duljinama vala, a maksimum je kod $\lambda = 507$ nm. Osim toga one se razlikuju i po obliku. Vrijednosti $V(\lambda)$ i $V'(\lambda)$ date su u tabl. 3.

Ta je razlika u rasporedu osjetljivosti posljedica dviju vrsta senzornih stanica na mrežnici oka, tzv. štapića i čunjića (v. Optička fiziologija u članku *Električno osvjetljenje*, TE 4, str. 266). Te dvije krivulje predstavljaju ekstremne slučajeve gledanja samo čunjićima (krivulja 1), odnosno samo štapićima (krivulja 2). Međutim, za razine slabije rasvjete može se gledanje zbijavati s obje vrste senzornih stanica, pa se krivulja osjetljivosti za taj slučaj premješta negdje između krivulja 1 i 2, a kao posljedica nastaje tzv. Purkyněov efekt (v. *Boja*, TE 2, str. 60). Stoga je pri fotometrijskim mjeranjima važno da plohe koje uspoređujemo budu dovoljno osvjetljene, kako bi raspored osjetljivosti oka bio po krivulji 1.

Principi fotometrije fotoelektričnim uređajima. Fotoelektričnim uređajima mogu se obavljati fotometrijska mjerena i lakše, i brže, i pouzdano nego vizuelna mjerena i ona nisu tako zamorna kao ova. No, pri upotrebi fotoelektričnih receptora

ne smije se smetnuti s umu da svaki od tih receptora ima različit raspored osjetljivosti, a da je oko konačni arbitar u fotometriji. Zato osnovu mogućnosti primjene fotoelektričkih uredaja čini krivulja svjetlosnosti, a uz nju krivulje relativnog rasporeda osjetljivosti fotoelektričnih receptora. To znači da treba najprije jakost fotostruja povezati sa snagom koja je dozračena receptoru, a onda za tu snagu preračunati svjetlosni učinak.

Svetlosni tok Φ_v za zračilo s kontinuiranim spektrom izračunava se integralom:

$$\Phi_v = K_m \int V(\lambda) \Phi_{e,\lambda} d\lambda,$$

gdje je $V(\lambda)$ relativna osjetljivost oka, odnosno »svjetlosnost«, a K_m apsolutna osjetljivost oka za $\lambda = 555$ nm. Uz temperaturu tališta platine 2045 K za spektar crnog tijela izlazi $K_m = 682$ lm/W (fotometrijski ekvivalent zračenja).

Fotostruja za kontinuirani spektar zračenja izračunava se integralom:

$$i = C_0 \int F(\lambda) \Phi_{e,\lambda} d\lambda.$$

Dalje se postavlja da je Φ_v proporcionalan jakosti fotostruja

$$\Phi_v = k \cdot i,$$

gdje je faktor proporcionalnosti određen izrazom:

$$k = \frac{K_m}{C_0} \cdot \frac{\int V(\lambda) \Phi_{e,\lambda} d\lambda}{\int F(\lambda) \Phi_{e,\lambda} d\lambda}.$$

$\Phi_{e,\lambda}$ je tok zračenja uskog spektralnog područja što upada na površinu receptora. On se može odrediti bilo mjeranjem nekim neutralnim receptorom, bilo računom na temelju funkcije raspodjele radijacijske egzitancije M_λ crnog tijela:

$$M_\lambda = c_1 f(\lambda, T)$$

i spektralne emisivnosti $\epsilon(\lambda)$ mjerenoj sivog svjetilila, a onda se može odrediti i faktor k .

Za praktične svrhe je mnogo pogodnije da se prikladnim filterom raspored osjetljivosti fotoelektričnog receptora prilagodi rasporedu osjetljivosti oka, kao što je prikazano na sl. 38. U tom je slučaju $F(\lambda) = V(\lambda)$, pa je:

$$k = \frac{K_m}{C_0},$$

ukoliko je i C_0 određeno za $\lambda_0 = 555$ nm. Faktor k je onda određen omjerom faktora svjetlosne i fotoelektrične učinkovitosti. On se može direktno odrediti u odnosu na standardno svjetililo.

Tablica 3
STANDARDNE VRIJEDNOSTI SVJETLOSNOŠTI $V(\lambda)$ NA SVJETLO
I $V'(\lambda)$ NA TAMU ADAPTIRANOG OKA

λ nm	$V(\lambda)$	$V'(\lambda)$	λ nm	$V(\lambda)$	$V'(\lambda)$
380	—	$5,89 \cdot 10^{-4}$	580	0,870	$0,1212$
390	—	$2,209 \cdot 10^{-3}$	590	0,757	$6,55 \cdot 10^{-2}$
400	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$9,29 \cdot 10^{-2}$	600	0,631	$3,315 \cdot 10^{-2}$
410	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$3,484 \cdot 10^{-2}$	610	0,503	$1,593 \cdot 10^{-2}$
420	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$9,66 \cdot 10^{-3}$	620	0,381	$7,37 \cdot 10^{-3}$
430	$1,16 \cdot 10^{-2}$	0,1998	630	0,265	$3,325 \cdot 10^{-3}$
440	$2,3 \cdot 10^{-2}$	0,3281	640	0,175	$1,497 \cdot 10^{-3}$
450	$3,8 \cdot 10^{-2}$	0,455	650	0,107	$6,77 \cdot 10^{-4}$
460	$6,0 \cdot 10^{-2}$	0,567	660	$6,1 \cdot 10^{-2}$	$3,129 \cdot 10^{-4}$
470	$9,1 \cdot 10^{-2}$	0,676	670	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$1,480 \cdot 10^{-4}$
480	0,139	0,793	680	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$7,15 \cdot 10^{-5}$
490	0,208	0,904	690	$8,2 \cdot 10^{-3}$	$3,533 \cdot 10^{-5}$
500	0,323	0,982	700	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$1,780 \cdot 10^{-5}$
507	—	1,000	710	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$9,14 \cdot 10^{-6}$
510	0,503	0,997	720	$1,05 \cdot 10^{-3}$	$4,78 \cdot 10^{-6}$
520	0,710	0,935	730	$5,2 \cdot 10^{-4}$	$2,546 \cdot 10^{-6}$
530	0,862	0,811	740	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$1,379 \cdot 10^{-6}$
540	0,954	0,650	750	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$7,60 \cdot 10^{-7}$
550	0,995	0,481	760	0,10	$4,26 \cdot 10^{-7}$
555	1,000	—	770	—	$2,413 \cdot 10^{-7}$
560	0,995	0,3288	780	—	$1,390 \cdot 10^{-7}$
570	0,952	0,2076			

Mjerenje svjetlosne jakosti. Za mjerenje svjetlosne jakosti može se primijeniti više metoda. Najjednostavnija je metoda supstitucije. Standardno i mjereno svjetililo stavlju se uza stopno na isto mjesto, a receptor stoji čvrsto u prikladnoj udaljenosti. Mjerenje se obavlja na fotometrijskoj klupi. Svjetilila obavjavaju osjetljivu površinu receptora te proizvode fotostruju. Kod vakuum-fotočelija fotostruja je strogo proporcionalna osvjetljenju osjetljive površine, pa se svjetlosna jakost I_m mjereno svjetilila može odrediti iz omjera:

$$\frac{I_m}{I_s} = \frac{i_m}{i_s},$$

gdje je I_s svjetlosna jakost standardnog svjetilila, a i_m i i_s su odgovarajuće jakosti fotostruja.

Pri mjerjenjima treba fotoelement namjestiti na takvu udaljenost od svjetilila da jakost fotostruje bude u »području linearitet«, tj. dovoljno slaba, jer za veće jakosti struje ne postoji više proporcionalnost sa svjetlosnom jakošću.

Da se izbjegne neproporcionalnost, može se fotoelektrični receptor postaviti na nul-položaju optičke klupe, a mjereno i standardno svjetililo postaviti u takvim udaljenostima d_m i d_s da daju jednaku fotostruju. Tada je:

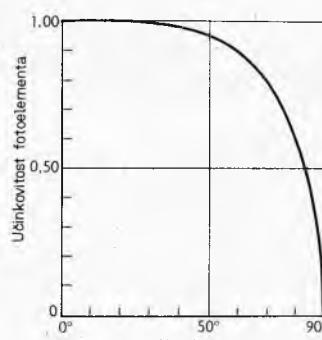
$$\frac{I_m}{I_s} = \frac{d_s^2}{d_m^2}.$$

Treći je način da udaljenost između receptora i svjetilila bude stalna i podešena, tako da slabije svjetililo daje fotostruju prikladne jakosti, a svjetlosna jakost jačeg svjetilila se smanjuje sektorskim kotačem ili neutralnim dvostrukim klinom dok se opet ne postigne jednakaka jakost fotostruje.

Ukoliko su oba svjetilila jednakog spektralnog sastava, nije potrebno uzimati u obzir spektralnu osjetljivost receptora. Ako li se uz sličnu raspodjelu energije zračenja razlikuju po boji, mogu se odgovarajućim filtrom izjednačiti po boji, pa onda uzeti u račun apsorpciju u filtru. Međutim, razlika se u boji može uvažiti i korekcijskim faktorom (v. tabl. 2).

Uredaji za mjerenje osvjetljenja (luksmetri). Za mjerjenja osvjetljenja vrlo su prikladni selenski fotoelementi. Maleni su i lagani, osjetljivom površinom mogu se po volji orijentirati, nije potreban poseban izvor struje kao kod fotočelija, jedino je uz njih potreban osjetljiv galvanometar. Fotoelement kao receptor svjetla može se spojiti s galvanometrom s pomoću poduljeg savitljivog voda, tako da se galvanometar može postaviti na neki stolič i točno očitavati položaj kazaljke, a fotoelement se postavlja na mjesto mjerjenja osvjetljenja i orijentira prema potrebi.

No, i fotoelement ima svoje nedostatke. Jedan je taj što samo malim dijelom registrira svjetlo što na osjetljivu površinu upada pod kutom većim od 60° , kao što prikazuje dijagram na sl. 40.



Sl. 40. Krivulja ovisnosti učinkovitosti fotoelementa o kutu upadanja svjetla

Osim toga se raspored relativne osjetljivosti fotoelementa razlikuje od rasporeda za oko. Da bi se ta razlika uklonila primjenjuje se prikladan filter, i poveća se učinak za koso upadno svjetlo. Kod preciznih fotometara stavlja se nad osjetljivu površinu fotoelementa šuplja staklena polukugla koja sadržava ujedno i korekcijski filter i time se postiže bolji učinak za koso upadno svjetlo.

U dobroj se mjeri može popraviti učinak za koso upadno svjetlo, i na taj način da se nad osjetljivi sloj fotoelementa stavi sitno ohrapavljeni tanka staklena pločica.

Budući da uz jako osvjetljenje fotostruja više nije proporcionalna osvjetljenju, stavlja se na fotoelement difuzni filter od nahrapiavljenog opalnog stakla, koji smanjuje upadni svjetlosni tok u određenom omjeru (10 : 1 ili 100 : 1). Za mjerjenja vrlo malenih osvjetljenja upotrebljava se više fotoelemenata spojenih paralelno (sl. 41).



Sl. 41. Fotoelektrički luksmetar za mjerjenje slabih osvjetljenja

SPEKTROFOTOMETRIJA

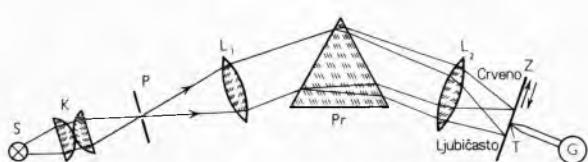
Za određivanje ovisnosti snage zračenja o duljini vala mjerena se izvode u pojedinim uskim područjima spektra; fotometri koji to omogućavaju nazivaju se *spektrofotometri*. Vizuelni spektrofotometri praktički se više ne upotrebljavaju, pa zato neće biti ni prikazani. Osim toga u modernoj se spektrofotometriji mjerena izvode i u nevidljivim područjima spektra: u ultraljubičastom i u infracrvenom području.

Primjena spektrofotometrije je višestruka. S pomoću nje se određuje: spektralna raspodjela snage zračenja različitih svjetilila i to apsolutno ili relativno u odnosu na svjetilo poznate raspodjelu zračenja; spektralna osjetljivost selektivnih receptora svjetla, specijalno fotoelemenata i fotoćelija; spektralna propustljivost optičkih filtera i spektralna reflektivnost površina; spektralna područja apsorpcije različitih tvari radi kemijske analize (apsorpciona spektralna analiza); koordinate kromatičnosti u kolorimetriji.

U većini slučajeva primjenjuju se danas spektrofotometri s uređajem za registraciju, naročito kad služe za određivanje spektralne propustljivosti, ili apsorpcije.

Kao fotoelektrični receptori dolaze u obzir termočlanci za apsolutna mjerena i fotoćelije za relativna mjerena, jer je potrebna stroga proporcionalnost struje i toka zračenja.

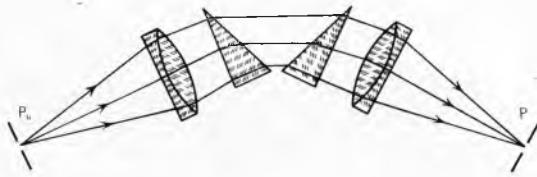
Spektrofotometri. Pojednostavljenu shemu spektrofotometra prikazuje sl. 42. Kondenzorom K hvata se snop svjetla iz svjetilila S (žarulje, vodikove svjetiljke, osvijetljene plohe i dr.)



Sl. 42. Shema elementarnog spektrofotometra

i dovodi na pukotinu P, koja se nalazi u fokusu kolimatorske leće L₁. Iza nje nastaje paralelan snop koji prolazi kroz prizmu Pr. Leća L₂ stvara na zastoru Z niz realnih slika pukotine, spektar. Slike pukotine djelomično se prekrivaju i stoga spektar ne sadrži same čiste spektralne boje. Spektar je to čišći što je pukotina uža, ali tada je, naravno, i svjetljivost spektra manja. Na zastoru se nalazi pukotina kojom se izdvaja uski dio spektra. Zastor se zajedno s pukotinom može pomicati duž spektra i na taj način se mogu izdvajati različiti dijelovi spektra. Neposredno iza pukotine u zastoru nalazi se pukotina termostupa T s pomoću kojeg se mjeri snaga zračenja očitavanjem otklona galvanometra G.

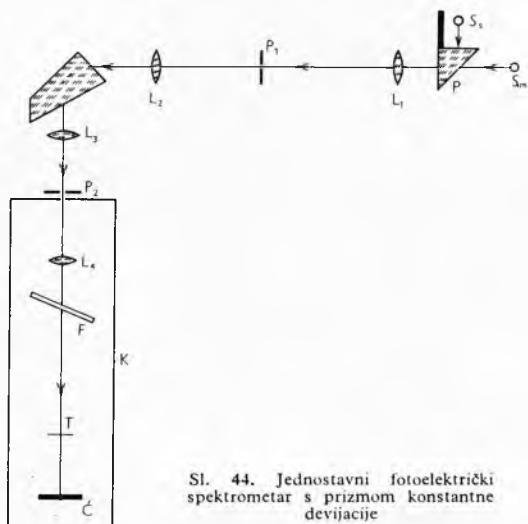
Tako jednostavan uređaj ima dva glavna nedostatka: a) njime je nemoguće uklanjanje raspršeno svjetlo koje nastaje od refleksija na staklenim površinama i od raspršivanja na česticama prašine i različitim rubovima; b) osjetljivost tog mjernog uređaja je ograničena. Prvi se nedostatak najbolje uklanja tzv. dvostrukim monokromatorom, kako je to shematski prikazano na sl. 43. U njemu



Sl. 43. Shema dvostrukog simetričnog monokromatora

snop svjetla iz prvog disperzijskog sistema prelazi u drugi disperzijski sistem jednak prvom ali obrnut, tako da se raspršeno svjetlo s njime odvaja, a ne sakuplja s obzirom na glavni prolazni snop. Pojedini dijelovi spektra dovode se na izlaznu pukotinu P₁ zakretanjem obih prizama s pomoću bubenja na kojemu je naznačena skala duljine vala. Drugi se nedostatak može ukloniti primjenom fotoćelije i pojačala ili fotomultiplikatora. Tada je potrebno prethodno odrediti spektralnu osjetljivost receptora ukoliko se želi mjeriti apsolutna snaga zračenja za pojedina područja spektra. Međutim, za relativna mjerena, kad se u spektru uspoređuje snaga zračenja nekog standardnog svjetila sa snagom mjerena svjetila, nije potrebno poznavanje spektralne osjetljivosti receptora, jer se uspoređuju istovrsna zračenja.

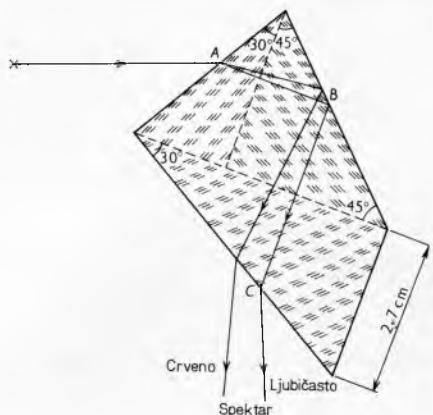
Jednostavan ali dovoljno precizan fotoelektrični spektrofotometar shematski prikazuje sl. 44. U njem je umjesto dvostrukog



Sl. 44. Jednostavni fotoelektrički spektrometar s prizmom konstantne devijacije

monokromatora primjenjena *prizma konstantne devijacije*. Prolaz svjetla kroz takvu prizmu prikazan je na sl. 45. Što je put snopa svjetla kroz prizmu dulji to je disperzija veća. Osim toga, kut devijacije je konstantan za različite kute upadanja. Na sl. 44 su naznačena dva svjetila: standardno S_s i mjereno S_m. S pomoću prizme P za totalnu refleksiju uvodi se snop svjetla iz S_s, a kad se ona ukloni, upada snop iz S_m. Lećom L₁ fokusira se snop svjetla na pukotinu P₁, koja s lećom L₂ čini kolimator. Paralelan snop

upada na disperzijsku prizmu, a pri izlazu iz nje leća L_3 fokusira snop na pukotinu P_2 , koja je smještena na ulazu kućišta K potrojnjeg s nutarnje strane. Lećom L_4 stvara se povećana slika pukotine P_2 na katodi fotočelije C . Neutralno-sivi filter F apsorbira raspršeno svjetlo, a koso je položen da ne dode do višestruke refleksije.

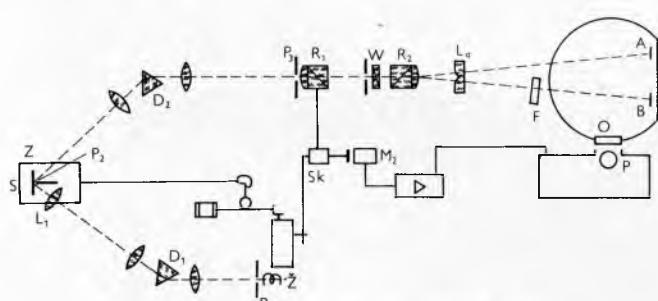


Sl. 45. Prikaz prelaza svjetla kroz prizmu konstantne devijacije

Ako se ne usporeduju dva svjetila nego se želi odrediti faktor transmisijske nekog filtra ili otopine, stavlja se na mjesto T planarne paralelnu kivetu, odnosno filter.

U novije se vrijeme sve više upotrebljavaju registracijski spektrofotometri kod kojih se s pomoću motora cijeli spektar automatski prevodi preko izlazne pukotine monokromatora, a posebnim se uredajem vodi pisaljka po izvodnici valjka koji se jednoliko okreće. Na plaštu valjka pričvršćena je papirna traka s ucrtanom mrežom. Na vremenskoj osi ubilježene su duljine vala a na ordinatnoj osi ubilježena je skala mjerene veličine.

Jedan od osobito dobro razrađenih takvih uredaja jest *registracijski spektrofotometar po Hardyju*, shematski prikazan na sl. 46. Tri su bitna dijela tog uredaja: dvostruki monokromator s dvije prizme po 60° , fotoelektrični fotometar s integracijskom kuglom i registracijski uredaj.



Sl. 46. Registracijski spektrofotometar po Hardyju

Zaruljom Z preko kondenzora osvjetljuje se ulazna pukotina P_1 monokromatora. Snop svjetla prolazi zatim kroz prvi disperzijski sustav D_1 i pomoćnom lećom L_1 načini se oštra slika pukotine P_1 na zrcalu Z . Okomito na zrcalu pomiciće se oštrica jednostrane pukotine P_2 , kojom se izdvaja uski dio spektralnog snopa, a taj se onda dovodi u drugi disperzijski sustav D_2 . Konačno se na izlaznoj pukotini P_3 monokromatora dobiva čista vrpca spektra od svega 10 nm širine. Pomicanjem cijelog stakla S sa zrcalom po pravcu okomitom na ravninu zrcala dovode se različiti dijelovi spektra na pukotinu P_2 .

Svetlo iz pukotine P_3 ulazi u polarizacijsku prizmu R_1 i izlazi linearno polarizirano. Takvo svjetlo prolazi Wollastonovom polarizacijskom prizmom W , u kojoj se snop svjetla razdvaja u dva snopa međusobno okomito polarizirana, koji zatim prolaze kroz analizator R_2 i zatim se dvolećom L_d stvaraju povećane slike pukotine P_3 na standardnoj bijeloj površini A i na mjerenoj površini B unutar integracijske kugle. Na njoj je prozorčić od opalnog

stakla O , kojemu se svjetljivost mjeri fotočelijom P . Zakretanjem polarizatora R_1 podešava se odnos osvjetljenja na ploham A i B. Analizator R_2 smješten je u šupljoj osovinu sinhronog motora (nije naznačen), te tako naizmjence slab i jača osvjetljenje na A i B. Ako se na plohi B nalazi uzorak koji selektivno apsorbira, razlikovat će se svjetljivosti A i B, pa će struja fotočelije biti naizmjence jača i slabija, i to frekvencijom sinhronog motora. Pojačalom i preko tiratrona izmjenična komponenta struje dovodi se do balansnog motora M_2 , koji onda zakreće polarizator R_1 za određeni kut α dok se svjetljivosti površina na ploham A i B ne izjednače. Zakretanje polarizatora R_1 može se očitavati na bubnju sa skalom Sk , čije se zakretanje prenosi na pisač. Kutni zakret polarizatora uz koji nastaje izjednačenje svjetljivosti jest mjera za relativnu reflektanciju mjerene površine u odnosu na standardnu bijelu površinu. Graf registracije prikazuje onda krivulju rasporeda relativne reflektancije. U koliko se, pak, radi o određivanju krivulje rasporeda relativne transmitancije τ , stavlja se na obje plohe A i B standardna bijela površina, a u jedan snop se stavlja filter F za koji se određuje krivulja.

Suvremena nastojanja u fotometriji idu za tim da se što bolje razviju objektivne metode i da se poveća točnost mjerjenja. Izraduju se mnogostruko primjenljivi prijenosni uredaji, vrlo razrađeni spektralni fotometri ili, bolje rečeno, radiometri, jer služe i za mjerjenja u ultraljubičastom i infracrvenom području zračenja.

U programu Generalne konferencije za mjere i utege za godinu 1975., Savjetodavni odbor za fotometriju postavio je i problem eventualne redefinicije jedinice »kandela« konvencionalnim fiksiranjem veličine K_m (maksimalne svjetlosne učinkovitosti).

LIT.: R. Sewig, Handbuch der Lichttechnik, Berlin 1938. — W. Arndt, Praktische Lichttechnik, Berlin 1938. — A. Richter, Beleuchtungstechnik, Leipzig 1943. — B. Ф. Федоров, Общий курс светотехники, Москва 1944. — J. O. Kraehenbuehl, Electric illumination, London 1951. — W. E. Barrows, Light, photometry, and illuminating engineering, New York 1951. — R. G. Weigel, Grundzüge der Lichttechnik, Essen 1952. — W. B. Boast, Illumination engineering, New York 1953. — B. B. Meukov, Основы светотехники, Ч. 1, Москва 1957. — J. W. T. Walsh, Photometry, London 1959. — H. Cotton, Principles of illumination, London 1960. — II. M. Tuxódeev, Световые измерения в светотехнике (фотометрия), Москва 1962. — A. A. Волькенштейн, Визуальная фотометрия малых яркостей, Ленинград 1965. — H. A. E. Heitz, Lichtberechnungen und Lichtmessungen, Eindhoven 1967. — P. A. Сапожников, Теоретическая фотометрия, Ленинград 1967. — M. M. Гуревич, Введение в фотометрию, Ленинград 1968. — M. Brezinčák, Mjerenje i računanje u tehniči i znanosti, Zagreb 1971.

K. Kempni

FUNKCIJE su u modernoj matematici vrlo općeniti pojmovi i podudaraju se s pojmom *preslikavanja*. Neka su zadana dva skupa (bilo kakvih elemenata) X i Y i neka je zadano neko pravilo f kojim se svakom elementu $x \in X$ (znak \in čita se »element od«) pridružuje jedan (i samo jedan) element $y \in Y$. Kaže se tada da je pravilom f zadano preslikavanje skupa X u skup Y . Element y koji odgovara elementu x označuje se sa $f(x)$, tj. piše se $y = f(x)$. Često se kaže da je y funkcija od x , premda, strogo uvezvi, to nije točno, jer je y oznaka za element skupa Y , a nije funkcija u smislu preslikavanja (nego je f funkcija koja svakom elementu x pridružuje pripadni element y). Simbol x predstavlja bilo koji element skupa X i naziva se *nezavisna varijabla* (promjenljiva), a y je element skupa Y i naziva se *zavisna varijabla*. Skup X je područje definicije funkcije, *ulazni skup* ili *domena*. Skup Y je područje vrijednosti funkcije, *izlazni skup* ili *kodomena*. Svakom x iz skupa X pridružen je, dakle, jedan (i samo jedan) element od Y , no time ne moraju biti iscrpeni svi elementi od Y . Kaže se još da je funkcija *uredena trojka* (X, Y, f) . (»Uredena« znači da je bitan poredaj u kojem su elementi X , Y , f te trojke napisani: prvi element X je područje definicije, drugi element Y je područje vrijednosti, treći element f je funkcija ili pravilo pridruživanja.) Druga je uobičajena oznaka $f : X \rightarrow Y$ (tj. f je preslikavanje skupa X u skup Y) ili samo f , zatim $x \mapsto f(x)$, $x \in X$, $f(x) \in Y$ (tj. elementu x je pridružen element $f(x)$, x je element od X , $f(x)$ je element od Y) ili samo $x \mapsto f(x)$, a u starijoj literaturi često se piše $y = f(x)$ ili samo $f(x)$. Element x se zove *original*, a pridružen element $f(x)$ je njegova *slika*. Ako je npr. područje definicije i područje vrijednosti skup realnih brojeva R , i ako se svakom realnom broju pridruži njegov kvadrat, onda se za tu funkciju piše $x \mapsto x^2$, $x \in R$, $x^2 \in R$, ili samo $x \mapsto x^2$ (kad je jasno o kojem