

OPTIKA

9. ZÁKLADNÉ VLASTNOSTI SVETLA

9.1. Pojem a fyzikálne vlastnosti svetla. Svetlom v obvyklom zmysle tohto slova sa nazýva fyzikálny dej, ktorý je príčinou viditeľnosti predmetov. Niektorí grécki filozofi sa domnievali, že rozoznávanie vzdialených predmetov okom je dej podobný ich ohmatávaniu rukami. S týmto názorom na svetlo súvisia aj dnes ešte používané slovné obraty ako „ohmatať pohľadom“ alebo „má prenikavý zrak“ a pod. Avšak skutočnosť, že telesá sa stávajú viditeľnými (stávajú sa prvotnými zdrojmi svetla), keď sa dostatočne zvýši ich teplota, viedla už v staroveku k presvedčeniu, že svetlo nevychádza z oka, ale z pozorovaných predmetov. Fyzikálna povaha svetla ostala však nielen v staroveku, ale aj v stredoveku nevyjasnená. Dlhو sa vedelo o svetle len toľko, že v homogénnych prostrediach sa šíri pozdĺž priamok, čo dokazoval vznik ostro ohraničených tieňov pri používaní malých svetelných zdrojov, ako aj vznik obrazov v tzv. *temnej komore* (*camera obscura*), a že sa na rozhraniach dvoch prostredí odráža a láme.

Prvé ucelené teórie svetla vznikli skoro súčasne až na prelome 17. a 18. storočia. Boli to *Huygensova vlnová* (*undulačná*) a *Newtonova výronová* (*emanačná* alebo tiež *korpuskulárna*) teória.

Ch. Huygens vo svojej rozprave „*Traité de la lumière*“ (1690) považuje svetlo za pozdĺžne vlnenie hypotetického svetelného éteru, podľa neho jemného, nevážiteľného plynu, ktorý je vo všetkých telesách, aj v dokonalom vákuu. Huygens pomocou svojej teórie veľmi presvedčivo vysvetľoval zákon odrazu a lomu svetla, ba vysvetlil aj vznik dvojlomu v kryštáloch; nemohol však uspokojivo vysvetliť priamočiare šírenie sa svetla. Dnes vieme, že príčinou tohto neúspechu Huygensovej teórie je príliš malá vlnová dĺžka svetla, v dôsledku čoho sa tzv. svetelné ohybové javy len ťažko pozorujú, takže na konci 17. storočia sa ešte nevedelo, že sa svetlo nešíri vždy pozdĺž priamok.

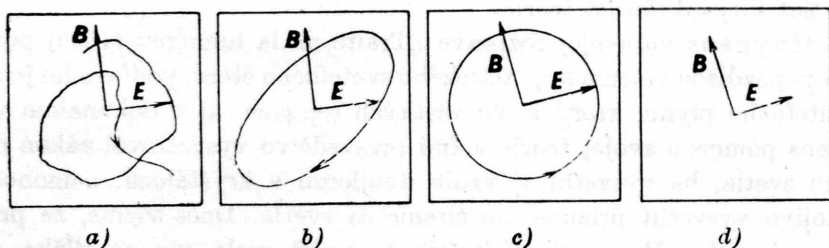
I. Newton zaoberá sa vznikom a šírením sa svetla vo svojom spise „*Optica*“ (1704). Podľa Newtona zo svetelného zdroja vyletujú veľkou rýchlosťou na všetky strany zvláštne svetelné častice rôznej veľkosti, ktoré pri svojom dopade do oka vyvolávajú v ňom zrakový vnem. Newtonova predstava vysvetľuje

veľmi prirodzene zákon priamočiareho šírenia sa svetla a možno pomocou nej vysvetliť, spôsobom aspoň z kvalitatívnej stránky prijateľným, aj odraz a lom svetla. Táto jej zdanlivá prednosť spolu s jej prepracovanosťou a vedeckou autoritou jej pôvodcu zapríčinili, že Newtonova emanačná teória svetla bola všeobecne prijatá a že ju vyše sto rokov pokladali za správnu.

Huygensovu undulačnú teóriu svetla zaviedli opäť do vedeckých fyzikálnych úvah Young a Fresnel na začiatku 19. storočia. Th. Young považoval svetlo najskôr za pozdĺžne vlnenie svetelného éteru. Až keď Malus objavil r. 1808 jav polarizácie svetla odrazom, priklonil sa r. 1817 Young k názoru, že svetlo je priečne vlnenie svetelného éteru.

Undulačnú teóriu do podrobností prepracoval najmä A. J. Fresnel. Na základe interferencie svetla podarilo sa mu vysvetliť aj približne priamočiare šírenie sa svetla v homogénnych prostrediach. Keď neskoršie prijal Youngov názor, že svetlo je priečne vlnenie svetelného éteru, mohol podať výklad všetkých vtedy známych svetelných javov, teda aj interferencie, ohybu, polarizácie a dvojlomu. Fresnelova undulačná teória svetla nebola však bez nedostatkov. Muselo sa predpokladať, že svetelný éter má vlastnosti pevného telesa, lebo v kvapalinách a plynch priečne vlnenie nemôže jestvovať, a museli sa mu prisudzovať mechanické vlastnosti, ktoré boli vo vzájomnom rozpore.

Zásadný obrat vo vysvetľovaní svetelných javov nastal až zásluhou J. C. Maxwella (1873), ktorý svojimi teoretickými úvahami o elektromagnetickom vlnení bol privedený k poznatku, že svetlo je elektromagnetické vlnenie s pomerne veľmi krátkymi vlnovými dĺžkami. Maxwell sa tak stal zakladateľom aj dnes ešte všeobecne uznávanej *elektromagnetickej teórie svetla*.

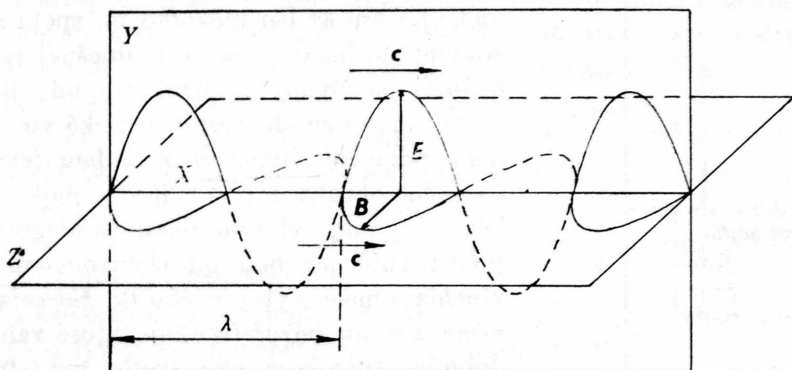


Obr. 9.1.

Podľa tejto teórie pozdĺž smeru svetelného lúča šíria sa súčasne dve vlnenia, vlnenie elektrického vektora E a magnetického vektora B , ktoré — ako sme sa presvedčili v čl. 7.2 — v rovinnej elektromagnetickej vlne zhodujú sa vo fáze a sú na spoločný smer postupu oboch vlnení aj vzájomne na seba

ustavične kolmé. Zo vzorcov (7.2.4) a (7.2.5) však nevyplýva, že by napríklad vektor $\mathbf{E}$ musel mať v rovine na smer postupu vlnenia kolmej nejaký s časom sa nemeniaci pevný smer. Musíme si preto predstavovať, že vo všeobecnosti koncový bod grafického obrazu napríklad vektora $\mathbf{E}$ (a preto aj vektora $\mathbf{B}$) v rovine na smer postupu rovinného svetelného vlnenia kolmej sa pohybuje po krivke úplne náhodilého tvaru, ako je to znázornené na obr. 9.1a.

Svetlo sa nazýva *jednoduchým* (monochromatickým), keď vektory $\mathbf{E}$ a $\mathbf{B}$ sú v ňom harmonické funkcie času. Inakšie hovoríme, že svetlo je *zložené*. Jednoduché svetlo sa vyznačuje svojou *frekvenciou* ν , od ktorej je závislý subjektívny



Obr. 9.2.

dojem *farby* svetla, a vlnovou dĺžkou $\lambda = v/\nu = vT$, resp. vo vákuu $\lambda_0 = c/\nu = cT$. Na charakterizovanie monochromatického svetla sa používa aj tzv. *vlnopočet* $\varrho = \frac{1}{\lambda_0} = \frac{\nu}{c}$, veličina, ktorá sa číselne rovná počtu svetelných vln. pripadajúcich vo vákuu na jednotku dĺžky.

Zložené svetlo možno pomocou *hranola* alebo *ohybovej mriežky* rozložiť na jeho monochromatické zložky, čím vzniká tzv. *spektrum*.

Keď v prípade jednoduchého svetla koncové body grafických obrazov vektorov $\mathbf{E}$ a $\mathbf{B}$ opisujú v rovine na smer postupu svetla kolmej elipsu (kružnicu, úsečku), hovoríme, že svetlo je *elipticky* (kruhovo, lineárne) *polarizované* (obr. 9.1b, c, d), pričom v prípade eliptickej a kruhovej polarizácie treba rozlišovať svetlo (pri pozorovaní proti chodu svetla) *pravotočivo* (obr. 9.1b) a *ľavotočivo* (obr. 9.1c) *polarizované*. Rozloženie polí vektora $\mathbf{E}$ a $\mathbf{B}$ v prípade lineárne polarizovaného monochromatického svetelného vlnenia, postupujúceho v smere osi X, je znázornené pre určitý okamžik na obr. 9.2.

Vlnové dĺžky tzv. viditeľného svetla, t. j. elektromagnetického vlnenia, na ktoré je citlivé ľudské oko, vyplňujú interval len asi od $0,4 \mu$ (fialový okraj

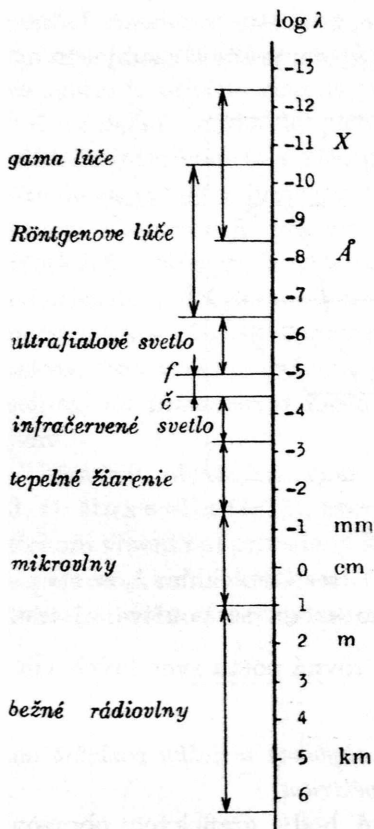
spektra viditeľného svetla) do $0,75 \mu$ (červený okraj spektra viditeľného svetla), t. j. asi od 4 000 do 7 500 Å. Tieto hranice sú však subjektívne a závisia aj od intenzity svetla, lebo citlivosť ľudského oka sa pri svetlách týchto dĺžok práve končí.

Okrem elektromagnetického vlnenia, ktoré sa nazýva svetlom (v užšom zmysle tohto slova) poznáme dnes elektromagnetické vlnenia s veľmi rozlič-

nými vlnovými dĺžkami. Ich prehľad s použitím logaritmickú stupnicu pre merné čísla vlnových dĺžok, vyjadrených v cm, podáva obr. 9.3. Rozhlasové a televízne vlny, s vlnovými dĺžkami niekoľko km až len niekoľko m, spolu s Hertzovými decimetrovými a v dnešnej radarovej technike používanými ultrakrátkymi milimetrovými vlnami sú elektromagnetické vlnenia budené pomocou umelých zariadení (elektrické oscilačné okruhy a pod.). Keďže najkratšie takéto vlny majú vlnovú dĺžku len niekoľko mm, predstavujú prechod od elektromagnetického vlnenia umele vytvoreného k žiareniu tepelnému a svetlu infračervenému, ktoré vzniká podobným spôsobom ako svetlo viditeľné, má však o niečo väčšiu vlnovú dĺžku. S klesajúcou vlnovou dĺžkou po viditeľnom svetle nasledujú za sebou svetlo ultrafialové, ktoré bolo sledované až po vlnovú dĺžku 136 Å , Röntgenove ($13 - 0,1 \text{ Å}$), rádioaktívne γ -žiarenie ($1,4 - 0,005 \text{ Å}$) a nakoniec elektromagnetická zložka žiarenia kozmického. Rozsahy týchto posledných vlnení sa čiastočne aj prekrývajú.

Vlastné svetelné deje vysvetľuje Maxwellova elektromagnetická teória veľmi dobre, jej dôsledky zhodujú sa so skutočnosťou úplne. Keď sa však študuje vznik svetla z iných foriem

energie (napríklad žiarenie tzv. dokonale čierneho telesa alebo vznik svetla s čiarovým spektrom, aké vydávajú za vhodných podmienok voľné atómy prvkov), alebo premena svetla na iné formy energie (fotoelektrický jav, Comptonov jav), objavujú sa zákonitosti, ktoré síce elektromagnetickej teórii svetla neodporujú, ktoré však len pomocou tejto teórie nemožno vysvetliť. To viedlo M. Plancka (1900) k vysloveniu tzv. kvantovej domnienky, podľa ktorej premena svetelnej energie (v širšom slova zmysle) na iné formy energie



Obr. 9.3.

a obrátene nemôže nastávať v ľubovoľných množstvách, ale iba v celistvých násobkoch elementárneho množstva (kvanta) ε , daného súčinom tzv. *Planckovej kvantovej konštanty* h a frekvencie príslušného žiarenia ν ,

$$\varepsilon = \nu h, \quad h = 6,624 \cdot 10^{-34} \text{ joule} \cdot \text{s}$$

Podľa Einsteina tieto kvantá žiarivej energie ostávajú v blízkosti určitého bodu aj pri svojom postupe v elm. vlnení, v dôsledku čoho energia na vlnoploche nie je rozložená rovnomerne. Tieto kvantá predstavujú akési atómy svetelnej energie, ktoré sa volajú *folóny*. To všetko však znamená určitý návrat k Newtonovej emanačnej (korpuskulárnej) teórii. *Kvantová teória svetla* s úspechom vysvetlila mnohé svetelné javy súvisiace s atomárnou štruktúrou hmoty, niektoré svetelné javy (napríklad interferencia a polarizácia svetla) z hľadiska kvantovej teórie svetla sú však nepochopiteľné. Pre túto príčinu používa sa dnes v optike niekedy klasická Maxwellova elektromagnetická teória svetla, podľa ktorej svetlo je elektromagnetické vlnenie šíriace sa z bodových svetelných zdrojov spojite na všetky strany, inokedy sa však výklad opiera o predstavu kvantovú. Úlohou dnešnej fyziky je odstrániť rozpor medzi obidvoma týmito predstavami.

Mnoho svetelných javov možno vysvetľovať aj bez používania podrobnej predstavy o fyzikálnej povahe svetla. Takýmito javmi sa zaoberá *fotometria* a *geometrická optika*. Ostatné skúma tzv. *fyzikálna optika*. Pri praktickej aplikácii zákonov geometrickej optiky, ktorá sa zapodieva najmä tzv. *optickým zobrazovaním*, treba však niekedy používať aj pojmy fotometrické a často prizerať ku skutočnej fyzikálnej povahe svetla, takže uvedené tri hlavné časti optiky sú od seba do značnej miery závislé.

9.2. Hlavné veličiny a fotometrické zákony. Zdroje svetla sa rozdeľujú na primárne a sekundárne alebo na vlastné a nevlastné. Vlastné zdroje vidíme ich vlastným svetlom, t. j. svetlom, ktoré samé vyžarujú; zdroje nevlastné vidíme, len keď v ich okolí je vlastný zdroj svetla, ktoré nevlastný zdroj odráža, rozptyľuje a nerovnakou absorpciou jednotlivých zložiek zloženého svetla prípadne tiež vo farbe pozmeňuje.

Svetelný zdroj vyžaruje svetelnú energiu obyčajne v rôznych smeroch. Vektor $\mathbf{h}$, v okolí bodového svetelného zdroja, ktorého smer je so smerom postupu svetla súhlasne rovnobežný a ktorého absolútna hodnota sa číselne rovná množstvu svetelnej energie prechádzajúcej za jednotku času cez plošnú jednotku na smer postupu svetla kolmú, nazýva sa *vektorom hustoty prúdenia svetelnej energie*. Jeho absolútna hodnota sa nazýva *intenzita žiarenia*.