

OBSAH

PŘEDMLUVA	4
5 OPTIKA	
5.1 PAPERKOVÁ OPTIKA	6
Odraz a lom světla	12
Zrcadla	40
Čočky	57
Optické přístroje	82
5.2 VLNOVÁ OPTIKA	98
Vlnová délka a frekvence světla	99
Interference světla	101
Ohyb světla	116
5.3 FOTOMETRIE	123
6 SPECIÁLNÍ TEORIE RELATIVITY	
Relativistická kinematika	135
Relativistická dynamika	140
7 FYZIKA MIKROSVĚTA	
7.1 ZÁKLADNÍ POJMY KVANTOVÉ FYZIKY	146
Foton	148
Fotoelektrický jev	154
Vlnové vlastnosti částic	159
7.2 ELEKTRONOVÝ OBAL	162
7.3 JADERNÁ FYZIKA	172
Radioaktivita	175
Jaderné reakce	178
Jaderná energetika	179
Fyzika částic	183
8 ASTROFYZIKA	
Astrofyzika	188
Literatura	196

5.1 PAPRSKOVÁ OPTIKA

Optika je nauka o světle. V *paprskové optice* vycházíme z poznatku o přímočarém šíření světla a neuvažujeme při tom vlnovou a kvantovou povahu světla. Směr šíření světla udává *světelný paprsek*. Prostředí, ve kterém se může šířit světlo, se nazývá *optické prostředí*.

ODRAZ A LOM SVĚTLA

Mezi základní poznatky paprskové optiky patří zákon odrazu a zákon lomu světla.

1. *Zákon odrazu*: Úhel odrazu světla α' se rovná úhlu dopadu α :

$$\alpha' = \alpha$$

Odražený paprsek leží v rovině dopadu.

2. *Zákon lomu*: Poměr sinu úhlu dopadu α k sinu úhlu lomu β je pro dvě daná optická prostředí konstantní a rovná se poměru rychlostí světla v obou prostředích:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}$$

Lomený paprsek leží v rovině dopadu.

Index lomu n daného optického prostředí je definován vztahem

$$n = \frac{c}{v},$$

kde c je rychlost světla ve vakuu a v rychlost světla v daném optickém prostředí. Poněvadž rychlost světla v optickém prostředí závisí na frekvenci světla, závisí na frekvenci světla také index lomu. Tento jev se nazývá *disperze světla*.

Jestliže světlo přechází z optického prostředí s indexem lomu n_1 do optického prostředí s indexem lomu n_2 , lze zákon lomu zapsat ve tvaru

ÚLOHY

ODRAZ A LOM SVĚTLA

Úloha 1

Světelný paprsek dopadá ze vzduchu do vody pod úhlem $42^\circ 15'$. Pod jakým úhlem se láme? Index lomu vody je 1,33, index lomu vzduchu je přibližně 1.

Řešení


$$\alpha = 42^\circ 15', n = 1,33, n_{vz} \doteq 1; \beta = ?$$

Ze zákona lomu

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n}{n_{vz}} \quad \text{vyplyvá} \quad \sin \beta = \frac{n_{vz}}{n} \sin \alpha.$$

$$\text{Číselně} \quad \sin \beta = \frac{1}{1,33} \sin 42^\circ 15' \doteq 0,50554; \quad \beta \doteq 30^\circ 22'.$$

Paprsek dopadající ze vzduchu do vody se láme ke kolmici pod úhlem $30^\circ 22'$.

 *Poznámky*

1. Při počítání s goniometrickými funkcemi pomocí kalkulačky převádíme obvykle úhel vyjádřený ve stupních a minutách na úhel vyjádřený v desetinných zlomcích stupně (např. $\alpha = 42^\circ 15' = 42,25^\circ$), nebo naopak ($\beta = 30,37^\circ \doteq 30^\circ 22'$). Způsob, kterým se tento převod provádí, je uveden v návodu ke kalkulačce.
2. Ve všech dalších úlohách předpokládáme, že index lomu vzduchu $n_{vz} \doteq 1$.

Úloha 2

Červené světlo se šíří ve vodě rychlostí $2,256 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, fialové rychlostí $2,232 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Určete index lomu vody pro červené a fialové světlo. Rychlost světla ve vakuu je $2,998 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Řešení

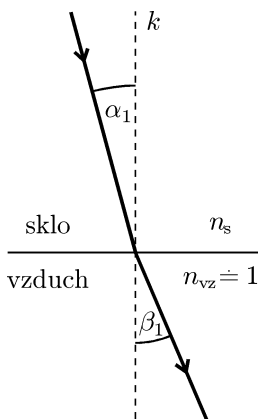
$$v_c = 2,256 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, v_f = 2,232 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1};$$
$$n_c = ?, n_f = ?$$

Index lomu vody pro červené a fialové světlo je

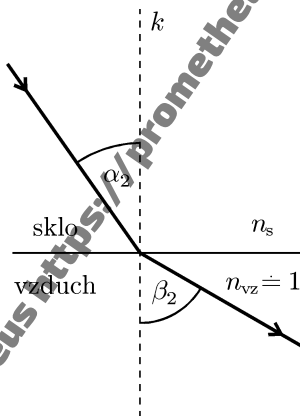
$$n_c = \frac{c}{v_c}, \quad n_f = \frac{c}{v_f},$$

Poněvadž při úhlu dopadu $\alpha_3 = 41^\circ 18'$ vychází úhel lomu 90° , vyplývá odtud, že úhel α_3 je úhel mezní ($\alpha_3 = \alpha_m$). Úhel dopadu α_4 je již větší než úhel mezní ($\alpha_4 > \alpha_m$), a proto se v tomto případě paprsek neláme a místo toho na rozhraní skla a vzduchu nastává úplný obraz.

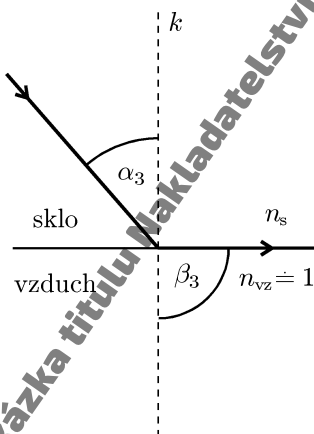
Chod světelného paprsku pro úhly dopadu α_1 až α_4 je znázorněn na obr. 7a, b, c, d.



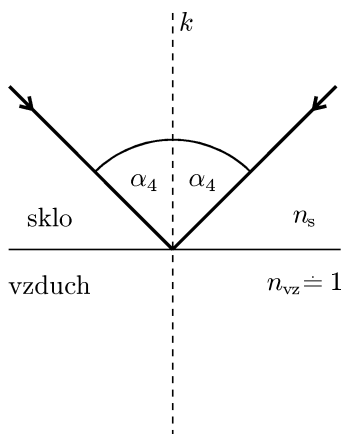
Obr. 7a



Obr. 7b



Obr. 7c



Obr. 7d

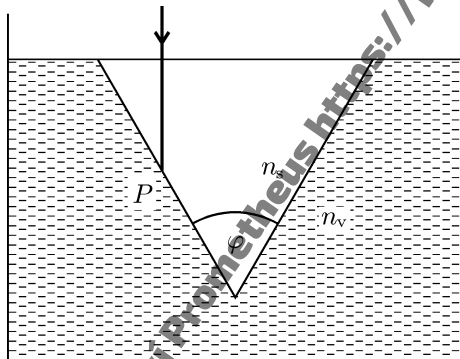
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_v}{n_s}, \quad \text{odkud} \quad \sin \beta = \frac{n_s}{n_v} \sin \alpha.$$

$$\text{Číselně} \quad \sin \beta = \frac{1,608}{1,33} \sin 45^\circ \doteq 0,85491; \quad \beta = 58^\circ 45'.$$

Chod paprsku v hranolu ponořeném do vody je znázorněn na obr. 13b.

Úloha 18

Skleněný hranol, jehož průřez má tvar rovnoramenného trojúhelníku, je ponořen do vody tak, že jeho základna splývá s hladinou vody (obr. 14). Kolmo na tuto základnu dopadá světelný paprsek. Při kterých hodnotách lámavého úhlu hranolu φ nastává na rozhraní skla a vody úplný odraz? Index lomu skla je 1,50, vody 1,33.



Obr. 14

Řešení

$$n_s = 1,50, \quad n_v = 1,33; \quad \varphi = ?$$

V bodě P dopadá světelný paprsek na rozhraní opticky hustšího a opticky řidšího prostředí. Pro mezní úhel α_m podle zákona lomu platí (viz obr. 15)

$$\frac{\sin \alpha_m}{\sin 90^\circ} = \frac{n_v}{n_s} \quad \text{a odtud} \quad \sin \alpha_m = \frac{n_v}{n_s}.$$

Podle obr. 15 je $\alpha_m = 90^\circ - \frac{\varphi}{2}$, takže

$$\sin \alpha_m = \sin \left(90^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) = \cos \frac{\varphi}{2} = \frac{n_v}{n_s}.$$

$$\text{Číselně} \quad \cos \frac{\varphi}{2} = \frac{1,33}{1,50} \doteq 0,88667; \quad \frac{\varphi}{2} \doteq 27,5^\circ, \quad \varphi \doteq 55^\circ.$$

Poněvadž $\alpha_m = 90^\circ - \beta$, dostáváme

$$\sin \alpha_m = \sin(90^\circ - \beta) = \cos \beta = \frac{1}{n}. \quad (\text{b})$$

Užitím rovnic (a) a (b) a užitím vztahu $\sin^2 \beta + \cos^2 \beta = 1$ pak dostaneme

$$\sin \alpha = n \sin \beta = n \sqrt{1 - \cos^2 \beta} = n \sqrt{1 - \frac{1}{n^2}} = \sqrt{n^2 \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)}$$

$$\text{a odtud } \sin \alpha = \sqrt{n^2 - 1}.$$

$$\text{Číselně } \sin \alpha = \sqrt{1,28^2 - 1} \doteq 0,798\ 10; \quad \alpha \approx 53^\circ.$$

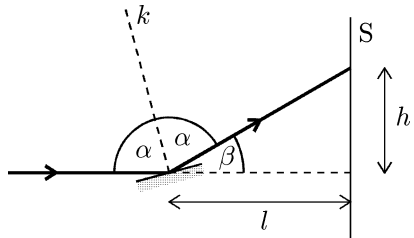
Při úhlu α menším než 53° bude podle vztahu (a) a podle obr. 23 úhel α_1 větší než mezní úhel α_m , a proto nastane v bodě B úplný odraz. Při úhlu α větším než 53° bude úhel α_1 menší než mezní úhel α_m , a proto v tomto případě paprsek pronikne do okolního vzduchu.

Světelný paprsek zůstane uvnitř vláknového vlnovodu, jestliže dopadne na jeho čelní stěnu pod úhlem menším než 53° .

ZRCADLA

Úloha 26

Světelný paprsek, který má vodorovný směr, dopadá kolmo na svisle umístěné stínítko. Jestliže do dráhy paprsku vložíme malé zrcátko, posune se na stínítku světelná skvrna směrem nahoru o 5,2 cm (obr. 24). Jaký je úhel dopadu paprsku na zrcátko? Vzdálenost zrcátka od stínítka je 60 cm.



Obr. 24

Řešení

$$h = 5,2 \text{ cm}, \quad l = 60 \text{ cm}; \quad \alpha = ?$$

Z náčrtu vyplývá

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{h}{l}; \quad \beta = 180^\circ - 2\alpha \quad \text{a odtud} \quad \alpha = \frac{180^\circ - \beta}{2}.$$

odražené od vypuklého zrcadla dopadají zpět na zadní stěnu stínítka a vytvářejí na ní světelný kruh, který má průměr $|KL| = 6$ cm a střed totožný se středem kruhového otvoru. Určete ohniskovou vzdálenost vypuklého zrcadla.

Řešení

$d = 4$ cm, $l = 16$ cm, $D = 6$ cm; $f = ?$

Paprsky, které dopadají na vypuklé zrcadlo rovnoběžně s jeho optickou osou, se odrážejí rozbíhavě tak, že po prodloužení se protínají v ohnisku (obr. 35). Z podobnosti trojúhelníků KFL a MFN vyplývá

$$\frac{D}{l+f} = \frac{d}{f} \quad \text{a odtud} \quad f = \frac{dl}{D-d}$$

$$\text{Číselně} \quad f = \frac{4 \cdot 16}{6-4} \text{ cm} = 32 \text{ cm.}$$

Ohnisková vzdálenost vypuklého zrcadla je 32 cm.

ČOČKY

Úloha 45

Předmět vysoký 1,5 cm stojí kolmo na optickou osu ve vzdálenosti 4 cm od spojky o ohniskové vzdálenosti 1,5 cm. Určete polohu a vlastnosti obrazu. Úlohu řešte také pomocí geometrické konstrukce a porovnejte veličiny, které zjistíte z obrázku, s veličinami vypočtenými.

Řešení

$y = 1,5$ cm, $a = 4$ cm, $f = 1,5$ cm; $a' = ?$, $Z = ?$, $y' = ?$

Ze zobrazovací rovnice čočky

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f}$$

vyplývá pro obrazovou vzdálenost a' vztah

$$a' = \frac{af}{a-f}$$

$$\text{Číselně} \quad a' = \frac{4 \cdot 1,5}{4-1,5} \text{ cm} = 2,4 \text{ cm.}$$

OHYB SVĚTLA

Ohyb světla nastává, jestliže se světlo za překážkou šíří i do oblasti geometrického stínu.

Při kolmém dopadu monofrekvenčního světla na *optickou mřížku* platí pro *interferenční maximum* vztah

$$\sin \alpha = k \frac{\lambda}{b},$$

kde λ je vlnová délka světla, b perioda mřížky (mřížková konstanta) a $k = 0, 1, 2 \dots$ je řád interferenčního maxima. Úhel α určuje směr, ve kterém toto maximum vzniká.

Světlo se nazývá *lineárně polarizované*, jestliže vektor intenzity elektrického pole \mathbf{E} kmitá stále v jedné přímce kolmé na směr, ve kterém se šíří vlnění. Světlo lze polarizovat např. odrazem, dvojlomem nebo pomocí polarizačních filtrů (polaroidů).

ÚLOHY

VLNOVÁ DÉLKA A FREKVENCE SVĚTLA

Úloha 86

Vypočítejte frekvenci světla odpovídající krajním vlnovým délkám spektra viditelného záření. Dolní fialová hranice viditelného světla má vlnovou délku 390 nm, horní červená hranice má vlnovou délku 790 nm. Rychlost světla ve vakuu je $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Řešení

$$\lambda_f = 390 \text{ nm} = 390 \cdot 10^{-9} \text{ m}, \lambda_{\bar{c}} = 790 \text{ nm} = 790 \cdot 10^{-9} \text{ m}, \\ c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; f_f = ?, f_{\bar{c}} = ?$$

Pro frekvence f_f a $f_{\bar{c}}$ odpovídající krajním vlnovým délkám spektra viditelného světla platí

7.1 ZÁKLADNÍ POJMY KVANTOVÉ FYZIKY

Kvantová fyzika popisuje a vysvětluje jevy mikrosvěta (např. světa atomů a molekul).

FOTON

Podle kvantové teorie se světlo šíří v podobě jednotlivých kvant elektromagnetického pole, která se nazývají *fotony*.

Energie fotonu E je určena vztahem

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

kde f je frekvence monofrekvenčního elektromagnetického záření, λ jeho vlnová délka ve vakuu, $c \doteq 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ rychlost světla ve vakuu a $h \doteq 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ *Planckova konstanta*.

Další veličinou charakterizující foton je *hybnost fotonu*. Velikost hybnosti fotonu je určena vztahem

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda},$$

kde E je energie fotonu elektromagnetického záření o frekvenci f a vlnové délce λ .

FOTOELEKTRICKÝ JEV


Jev, při kterém pod vlivem dopadajícího elektromagnetického záření vystupují z povrchu látky elektrony, se nazývá *vnější fotoelektrický jev*.

Při vnějším fotoelektrickém jevu se energie dopadajícího fotonu hf jednoduše využije na uvolnění elektronu z látky (na vykonání výstupní práce W_v), jednak přejde v kinetickou energii $\frac{1}{2}m_e v^2$ vystupujícího elektronu. Ze zákona zachování energie pak vyplývá

Číselně

$$N = \frac{2 \cdot 10^{-17} \cdot 5 \cdot 10^{-7} \cdot 1}{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8} \doteq 50$$

Do oka dopadne za 1 s asi 50 fotonů.

 *Poznámka*

Příklad dokumentuje velkou citlivost lidského oka, které je za příznivých okolností (zejména při adaptaci oka na tmu) schopno registrovat i nepatrnou světelnou energii.

FOTOELEKTRICKÝ JEV

Úloha 133

Jaká je minimální frekvence elektromagnetického záření, kterým je třeba ozářit povrch niklu, aby nastal vnější fotoelektrický jev? Výstupní práce elektronů z niklu je 5 eV (1 eV $\doteq 1,6 \cdot 10^{-19}$ J), Planckova konstanta je $6,63 \cdot 10^{-34}$ J · s.

Řešení

$$W_v = 5 \text{ eV} = 5 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 8 \cdot 10^{-19} \text{ J}, h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}; f_0 = ?$$

Na povrchu niklu je třeba nechat dopadat záření o mezní frekvenci f_0 , při níž se energie fotonu hf_0 rovná výstupní práci W_v potřebné na uvolnění elektronů z niklu (s nulovou kinetickou energií). Platí tedy

$$W_v = hf_0, \text{ odkud } f_0 = \frac{W_v}{h}.$$

$$\text{Číselně } f_0 = \frac{8 \cdot 10^{-19}}{6,63 \cdot 10^{-34}} \text{ Hz} \doteq 1,2 \cdot 10^{15} \text{ Hz}.$$

Minimální frekvence elektromagnetického záření, kterým je třeba ozářit povrch niklu, aby nastal fotoelektrický jev, je $1,2 \cdot 10^{15}$ Hz. Tato frekvence leží v oblasti ultrafialového záření.

Úloha 134

Jaká je výstupní práce elektronů z cesia, jestliže mezní vlnová délka cesia je 642 nm? Planckova konstanta je $6,63 \cdot 10^{-34}$ J · s, rychlost světla ve vakuu je $3 \cdot 10^8$ m · s⁻¹. Výstupní práci vyjádřete v elektronvoltech (1 eV $\doteq 1,6 \cdot 10^{-19}$ J).