



Optoelektronické systémy

# Teoretické základy

Prof. RNDr. Ing. Ján Turán, DrSc., KEMT FEI TU Košice

# Základné fyzikálne vlastnosti svetla

## História:

n 17. storočie

- .. Vlnová teória Hooka a Huygensa
- .. Korpuskulárna teória Newtona

n Rok 1873:

- .. **Maxwellové rovnice**
- .. Základ jednotnej všeobecnej elektromagnetickej teórie svetla

n Svetlo je transverzálna elektromagnetická (**TEM**) vlna s rýchlosťou

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

$\mu_0$  – je permeabilita,  $\epsilon_0$  – permitivita vákua  
( $c=2,997925 \cdot 10^8=3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$ )

## História:

### n Rok 1887

- Hertz generoval elektromagnetické vlny ( $\lambda=10\text{m}$ )
- **Korpuskulárny vlnový dualizmus fotónov**

### n Rok 1901 – **Planckova fotónová teória**

## Kvantum energie fotónu

$$E_{\text{fot}} = \mathbf{h}\omega = fh = \frac{hc}{\lambda}$$

$\mathbf{h}=1,054 \cdot 10^{-34}$  – redukovaná **Planckova konštanta**

$\mathbf{h} = h/2\pi$  a  $\omega=2\pi f$

**Fotoefekt:**

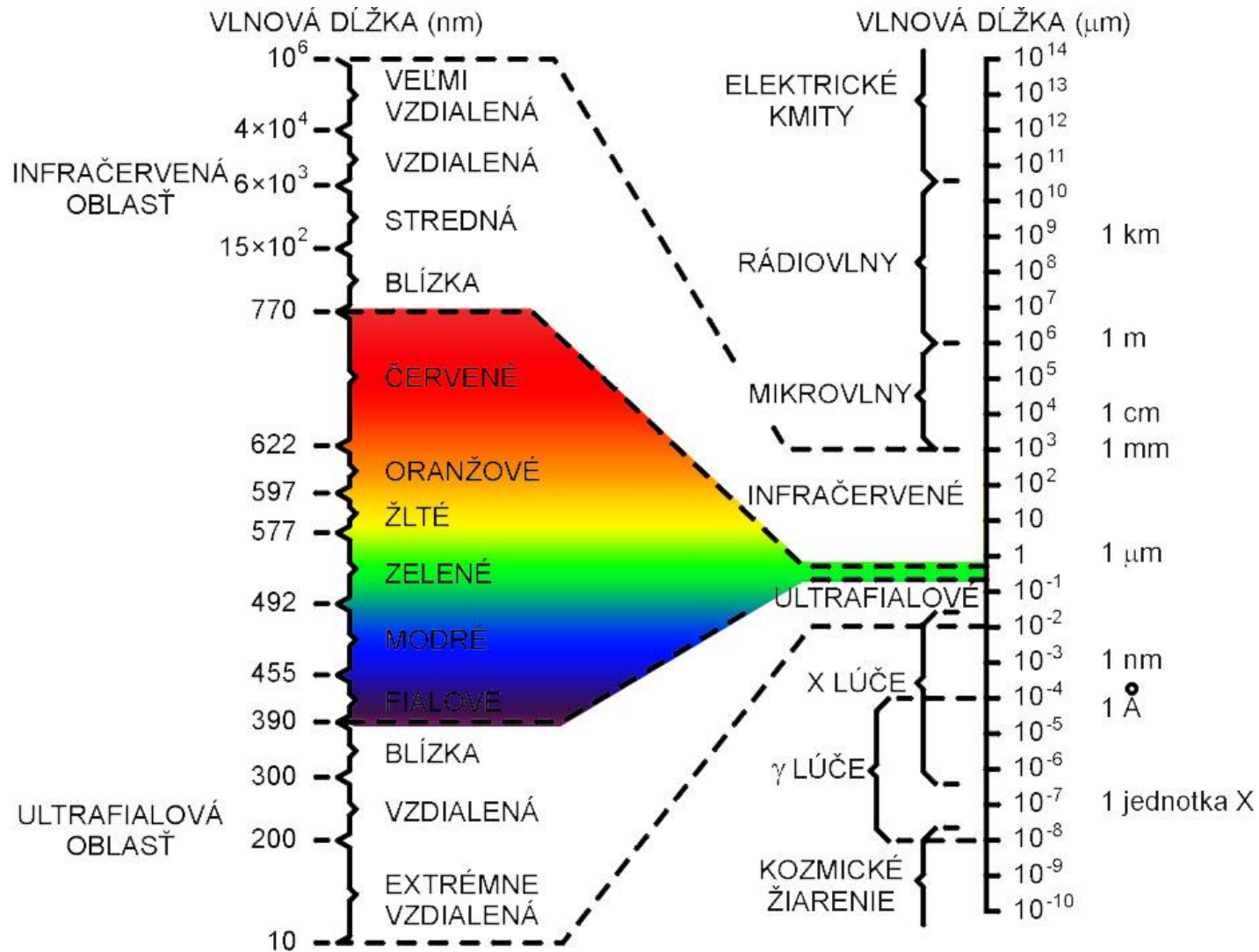
- n Emisia voľných elektrónov z povrchu tuhých látok vyvolaná ich ožiarením svetlom
- n **Objasnený v roku 1905 Einsteinom – Nobelova cena**

**Spektrum elektromagnetického žiarenia:**

- n **Optické žiarenie**
- n **Mikrovlnové žiarenie**
- n **X lúče**
- n **Infračervené žiarenie**
- n **Viditeľné svetlo**
- n **Ultrafialové žiarenie**

Žiarenie (svetlo) pre optické komunikácie:  $\lambda=0,4$  až  $12\mu\text{m}$

# Elektromagnetické spektrum



## Vlnová podstata svetla

### Charakterizácia svetla

$\mathbf{E}$  – intenzita elektrického poľa

$\mathbf{H}$  – intenzita magnetického poľa

$\mathbf{E}$  a  $\mathbf{H}$  vyhovujú **Maxwellovým rovniciam** –  
získame **vlnové rovnice**

$$\Delta(\mathbf{E}, \mathbf{H}) = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\mathbf{E}, \mathbf{H})$$

$\Delta$  – je **Laplaceov operátor**,  $c$  – rýchlosť svetla,  $f$  – frekvencia kmitov,  $\lambda_0$  – vlnová dĺžka vo vákuu

$$c = f\lambda_0$$

## Rýchlosť svetla v materiálovom prostredí

$$n \quad v = \frac{c}{n} = f\lambda$$

$n$  – je **index lomu**

$$n \quad n = \sqrt{\mu_r \epsilon_r}$$

$\mu_r$  a  $\epsilon_r$  – **relatívna permeabilita a permitivita**

## Sínusové (harmonické) vlny

$$n \quad E(x, t) = E_0 \cos(\omega t - kx + \phi)$$

$E_0$  – amplitúda

$$n \quad j = \omega t - kx + \phi$$

$\phi$  – fáza,  $k=2\pi/\lambda$  je vlnové číslo a  $\phi$  – fázová konštanta

## Rýchlosť šírenia vlnoplochy TEM vlny

$$n \quad v = \frac{W}{k} = f\lambda$$

Vlnový balík pohybujúci sa grupovou rýchlosťou

$$n \quad v_g = \frac{\partial W}{\partial k}$$

Vlny šíriace sa v ľubovoľnom smere

$$n \quad E(x, y, z, t) = E_0 \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + f)$$

$\mathbf{k}$  – vlnový vektor  $\mathbf{r}$  – polohový vektor



## Guľová vlna

$$n \quad E = \frac{A}{r} \cos( \omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} )$$

**Polarizácia** – spôsob pohybu vektora intenzity elektrického poľa v rovine kolmej na smer šírenia

- .. Lineárna
- .. Kruhová  $\longrightarrow$  Ľavotočivá, Pravotočivá
- .. Eliptická  $\nearrow$

## Elektromagnetická vlna

- .. Polarizovaná
- .. Nepolarizovaná
- .. Čiastočne polarizovaná

## Disperzné vlastnosti optických prostredí

- · Priehľadné
- · Priesvitné
- · Nepriehľadné

## **Geometrická optika**

### **Odraz svetla**

- Regulárny
- Difúzny

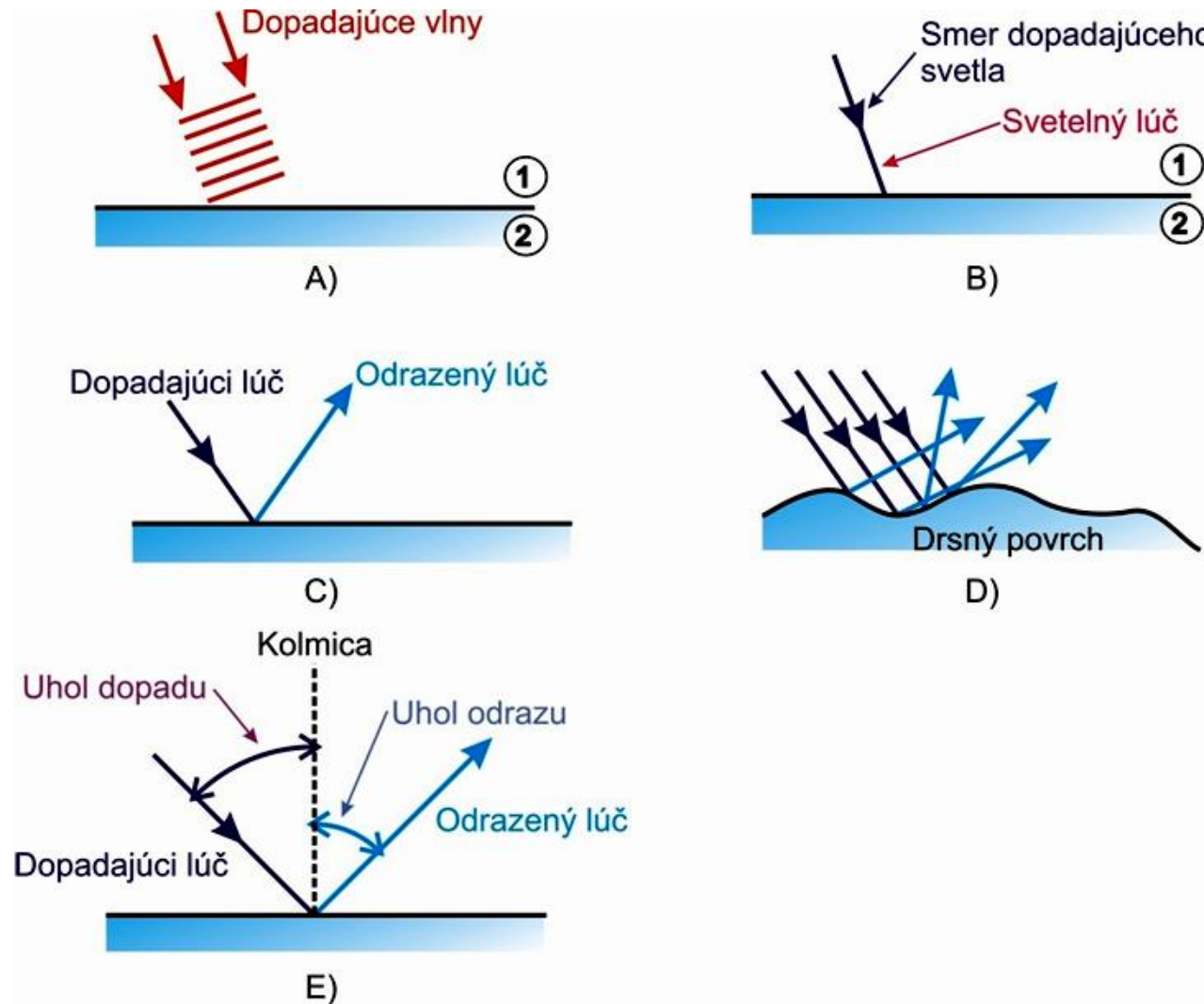
### **Zákon odrazu**

Uhol dopadu  $\theta_d$  sa rovná uhlu odrazu  $\theta_o$

### **Lom svetelného lúča**

Vzniká pri dopade svetla na rozhranie dvoch optických prostredí

Dopad svetla na rozhranie: (a) dopadajúce vlny, (b) svetelný lúč, (c) regulárny odraz, (d) difúzny odraz, (e) zákon odrazu



## Snellov zákon lomu

$$n_1 \sin q_d = n_2 \sin q_p \Rightarrow \frac{\sin q_p}{\sin q_d} = \frac{n_1}{n_2} = n_{12}$$

$n_{12}$  – relatívny index lomu

$$n_{12} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{\frac{c}{v_1}}{\frac{c}{v_2}} = \sqrt{\frac{\epsilon_{r1} m_{r1}}{\epsilon_{r2} m_{r2}}}$$

Keď svetlo dopadá na rozhranie z opticky hustejšieho prostredia potom sa lúč v druhom prostredí láme **smerom od kolmice** ( $\theta_p > \theta_d$ ) a pre určitý uhol  $\theta_d = \theta_c$  (**kritický uhol dopadu**) sa bude šíriť pozdĺž rozhrania obidvoch prostredí

Pre uhly  $\theta_d > \theta_c$  je  $\sin \theta_p > 1$ , dochádza k **úplnému (totálnemu) odrazu**, šíri sa **povrchová vlna**

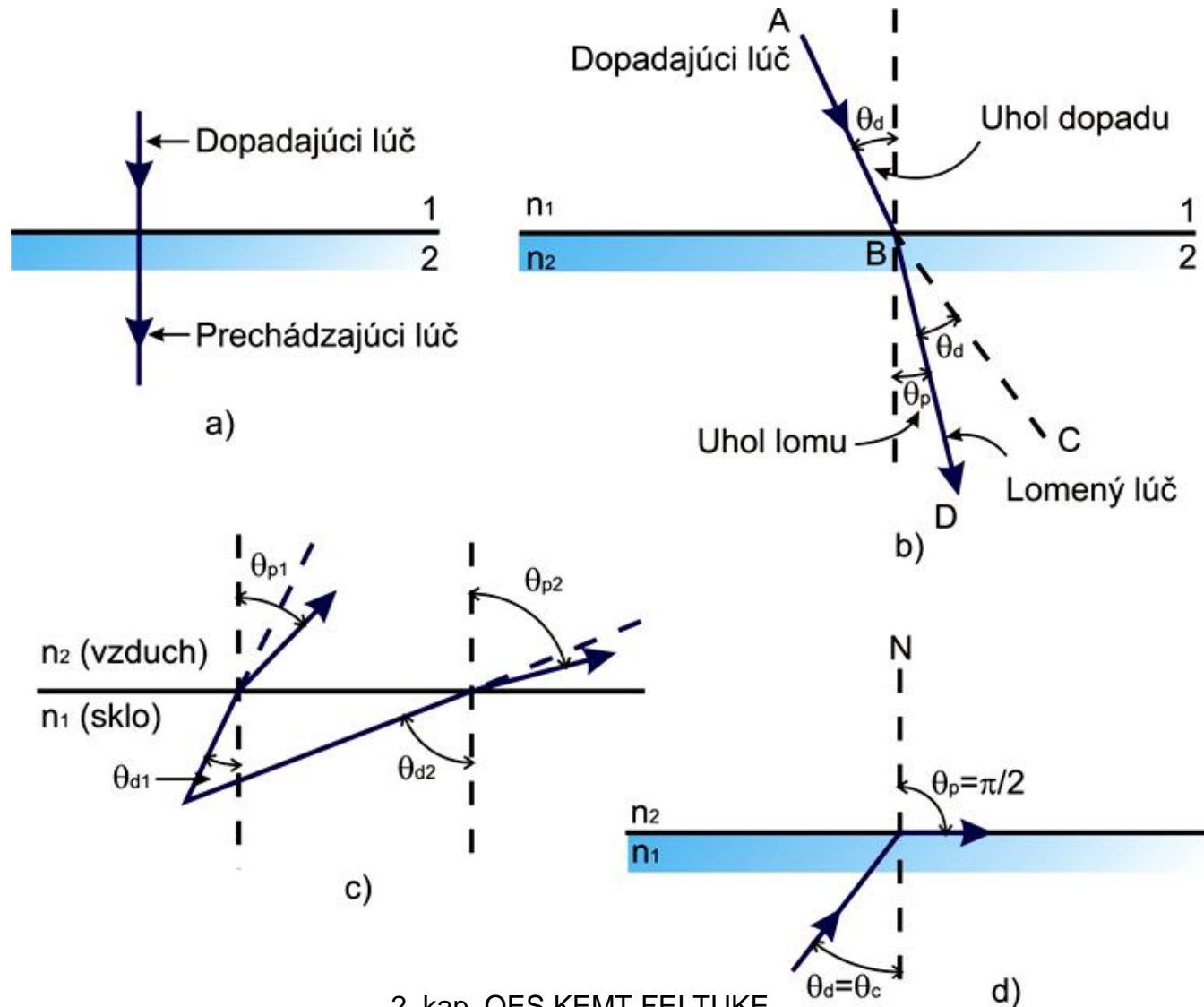
## Brewsterov uhol $q=q_B$

paralelná zložka má nulovú odrazivosť

$$n_1 \sin q_B = n_2 \cos q_B$$

$$\mathbf{tg} q_B = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{n_{12}}$$

Lom světla na rozhraní: (a) kolmý dopad, (b) šikmý dopad (lom ku kolmici), (c) šikmý dopad (lom od kolmice), (d) totální odraz



**Polaroid** – plastická fólia (tenká vrstva)  
polyvinilalkoholu impregnovaného jódom

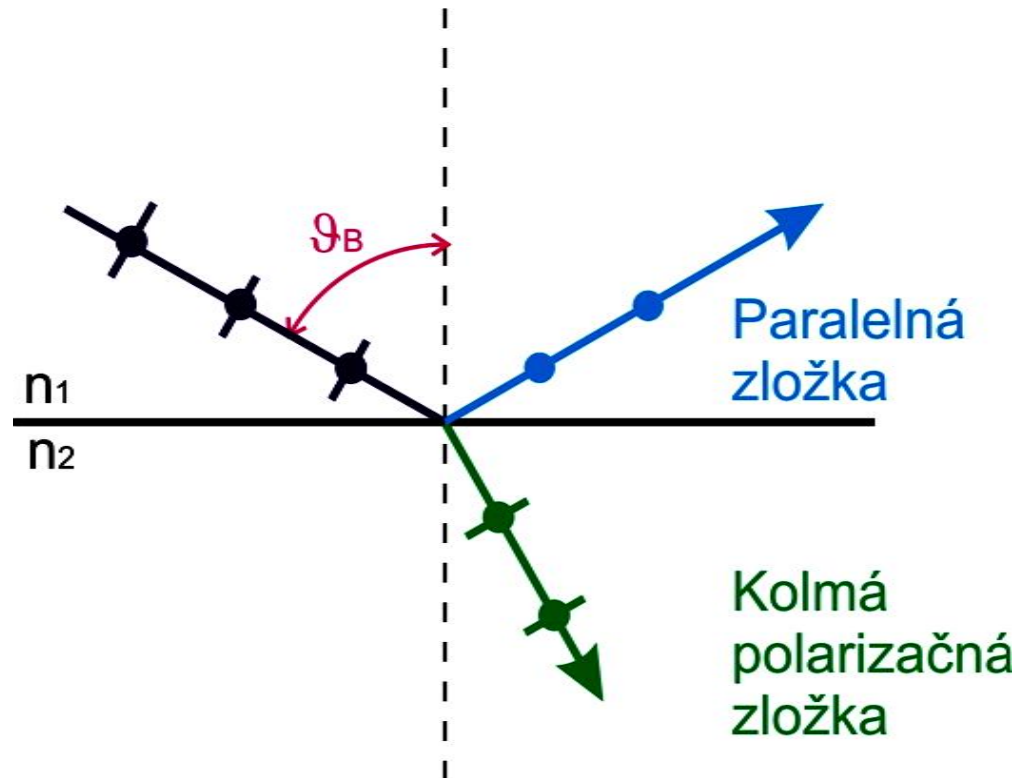
**Polaroidová fólia** – vytvorenie lineárne  
polarizovaného svetla v optických systémoch

**Polarizačné hranoly - účinnejšie**

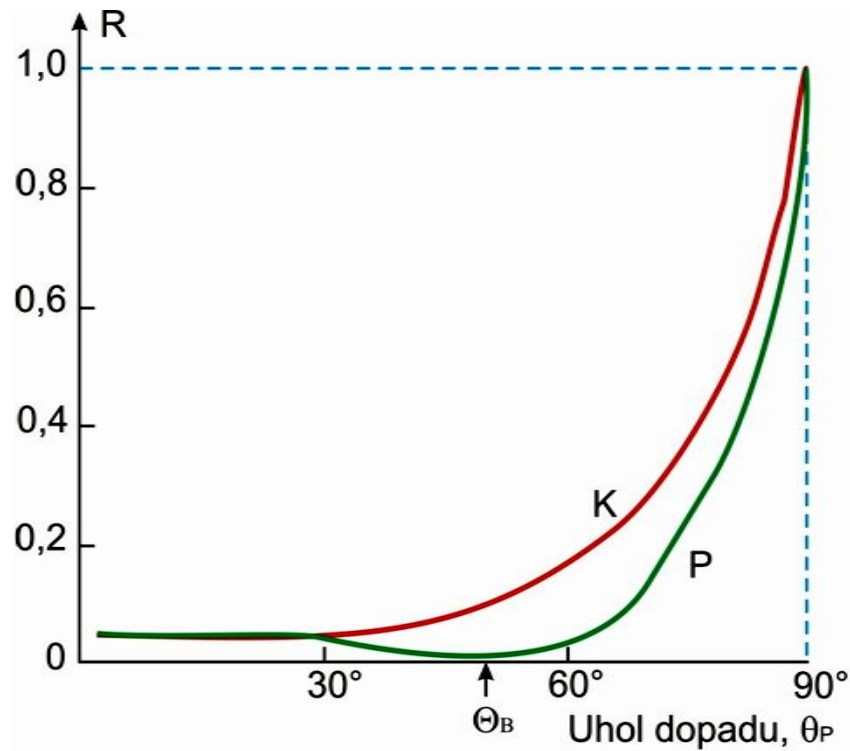
- · **Nicolov hranol**
- · **Glanov-Thompsonov hranol**



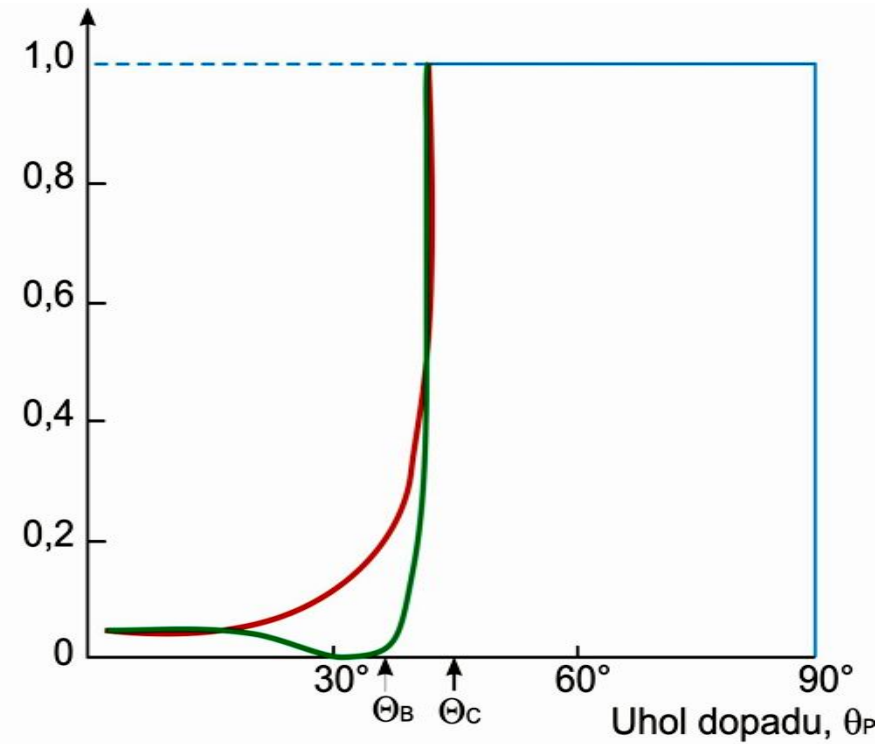
## Lom svetla pri dopade pod Brewsterovým uhlom



Odrazivost' ako funkcia uhlu dopadu pre paralelne (P) a kolmo (K) polarizovanú zložku (a) opticky redšie prostredie, (b) opticky hustejšie prostredie



(a)



(b)

## Intenzita prenášaného svetla – Malusov zákon

$$I = E_0^2 \cos^2 q = I_0 \cos^2 q$$

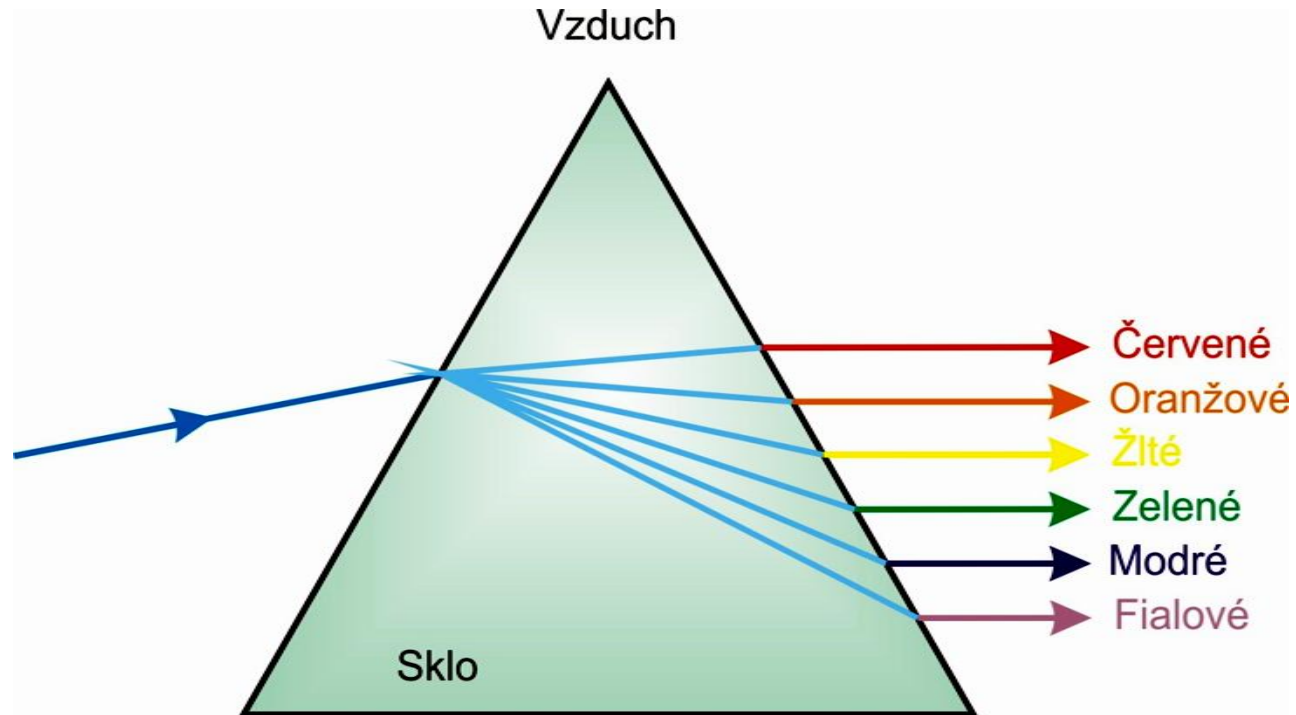
$I_0$  – intenzita dopadajúceho svetla

**Monochromatický lúč** – lúč len s jedinou vlnovou dĺžkou

**Polychromatický lúč** – svetlo s mnohými vlnovými dĺžkami (reálne svetelné lúče)

**Disperzia** – v dôsledku rôznej rýchlosti šírenia zložiek svetla s rôznou vlnovou dĺžkou

## Disperzia bieleho svetla



## Superpozícia dvoch alebo viacerých vln

$$\mathbf{n} \quad \vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots$$

## Koherentné svetlo

$\mathbf{n}$  Rôzne zdroje majú konštantné fázové pomery

$\mathbf{n}$  **Interferenčné prúžky**

## Matematický opis interferencie

$$n \quad E_1 = E_{01} \sin(\omega t - kx + f_1)$$

$$E_2 = E_{02} \sin(\omega t - kx + f_2)$$

$$n \quad I = E_0^2 = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos(f_2 - f_1)$$

Pre rovnaké amplitúdy vln  $E_{01} = E_{02}$

$$n \quad I = 2E_{01}^2 [1 + \cos(f_2 - f_1)]$$

resp.

$$n \quad I = 4E_{01}^2 \cos^2\left(\frac{f_2 - f_1}{2}\right)$$

**Youngov pokus (rok 1802)** – klasický prípad demonštrácie interferencie

Intenzita svetla v bode P závisí od fázového rozdielu

$$\Delta f = f_2 - f_1 = \frac{2p}{l}(D_2 - D_1)$$

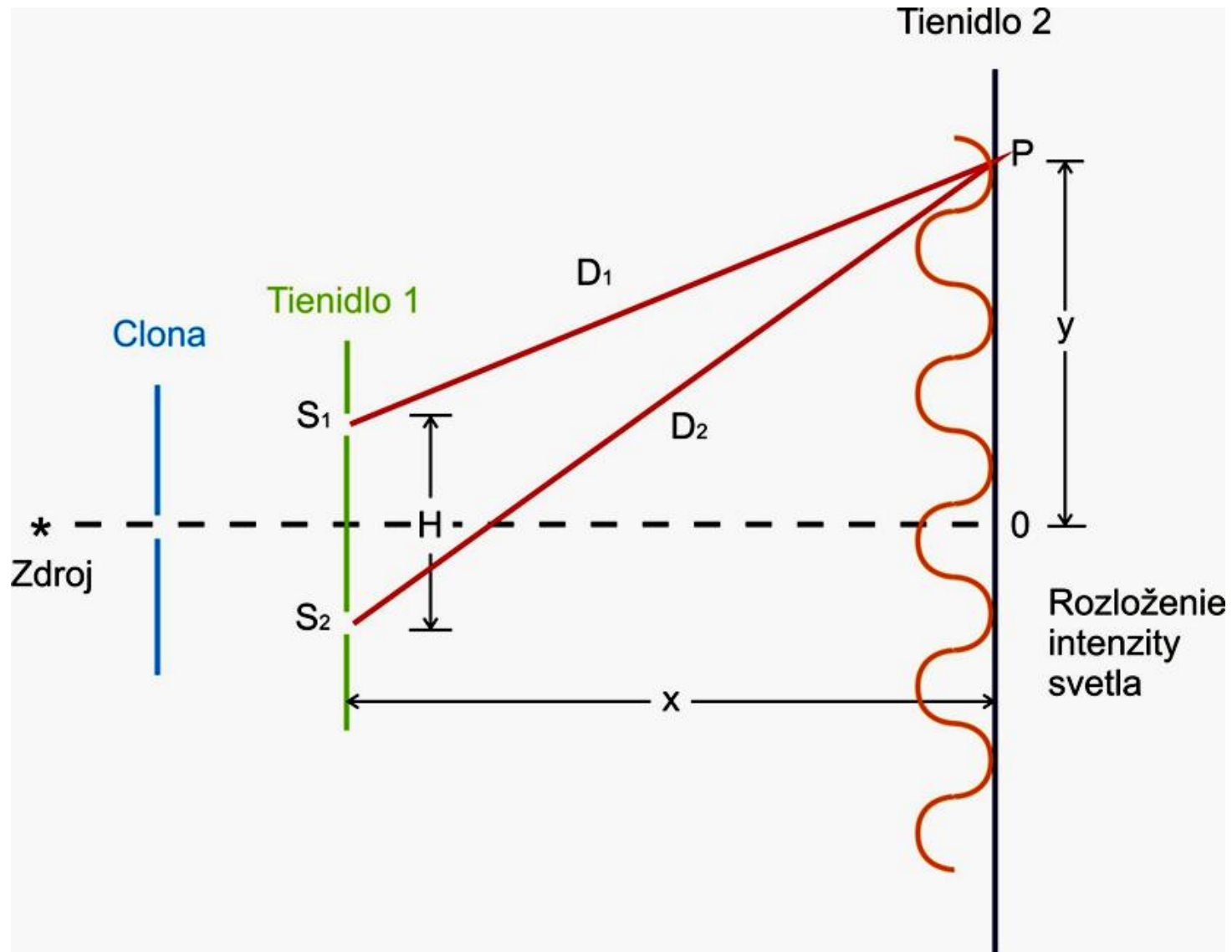
**Svetlé interferenčné prúžky** – vznikajú ak je fázový rozdiel je  $\Delta\phi=0$ , alebo  $\pm 2p\pi$

$$\frac{2p}{l}(D_2 - D_1) = \pm 2p\pi$$

**Tmavé interferenčné prúžky** vznikajú ak platí

$$|D_2 - D_1| = (2p + 1)\frac{l}{2}$$

## Geometria Youngovho pokusu





Interferenčné javy možno pozorovať aj na **tenkých vrstvách alebo platničkách**

Použitím elementárnej geometrie a Snellovho zákona lomu je fázový rozdiel

$$n \Delta q = \frac{2p}{l} (2nL \cos q_2)$$

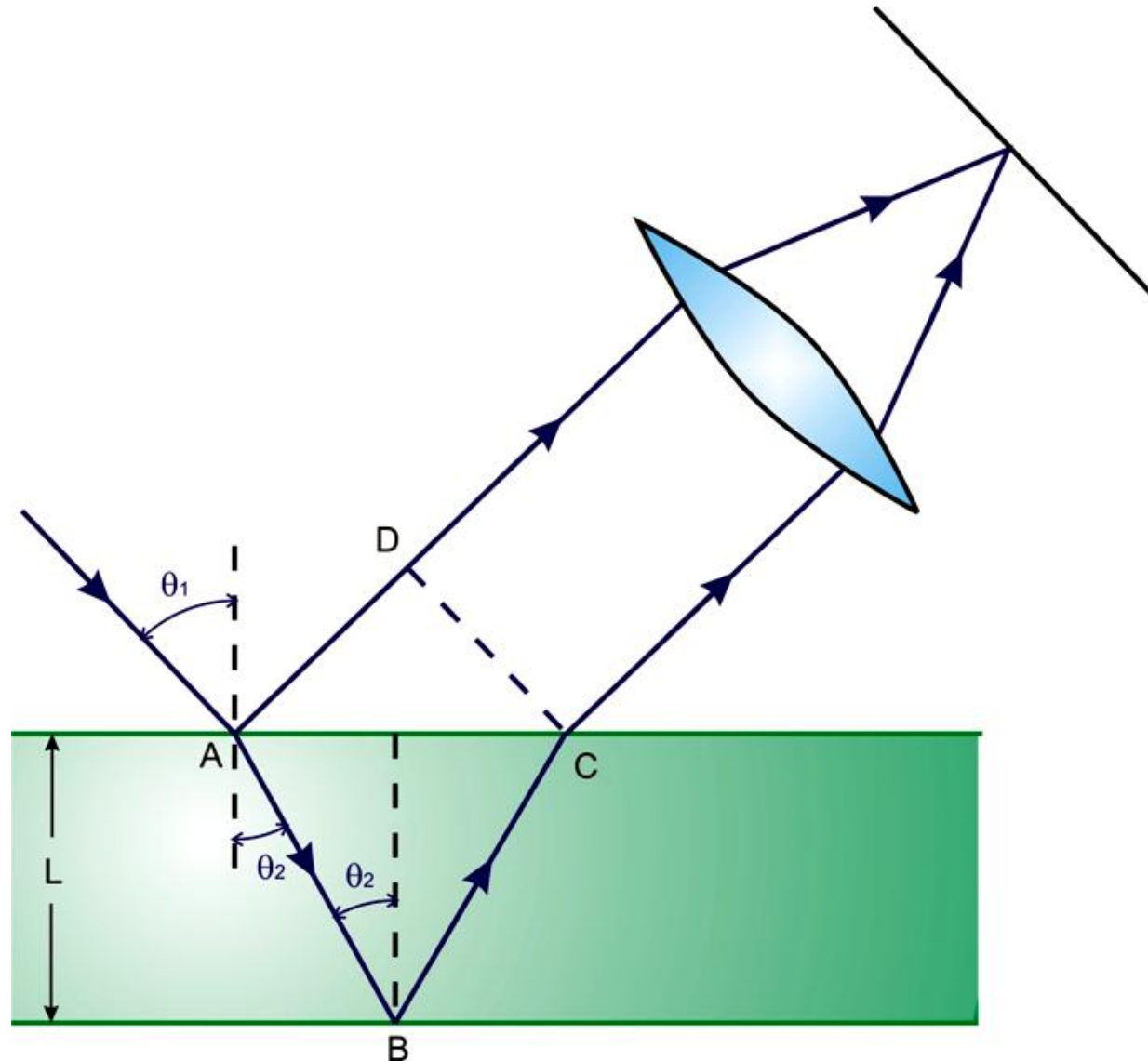
**Svetlé interferenčné prúžky** vznikajú, ak platí

$$n \frac{4pnL \cos q_2}{l} = 2pp$$

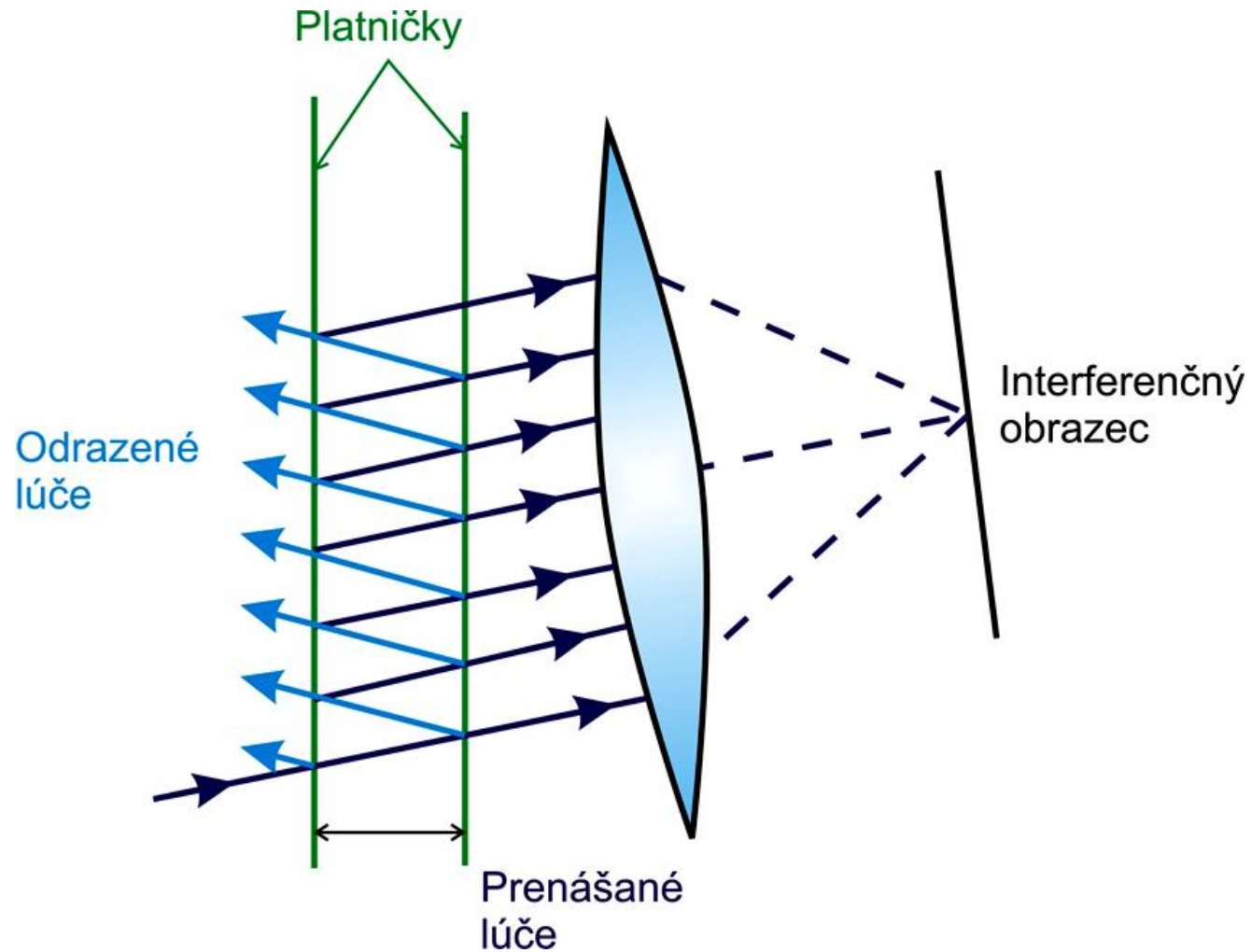
**Tmavé interferenčné prúžky** vznikajú, ak platí

$$n (2p + 1) \frac{l}{2} = 2nL \cos q_2$$

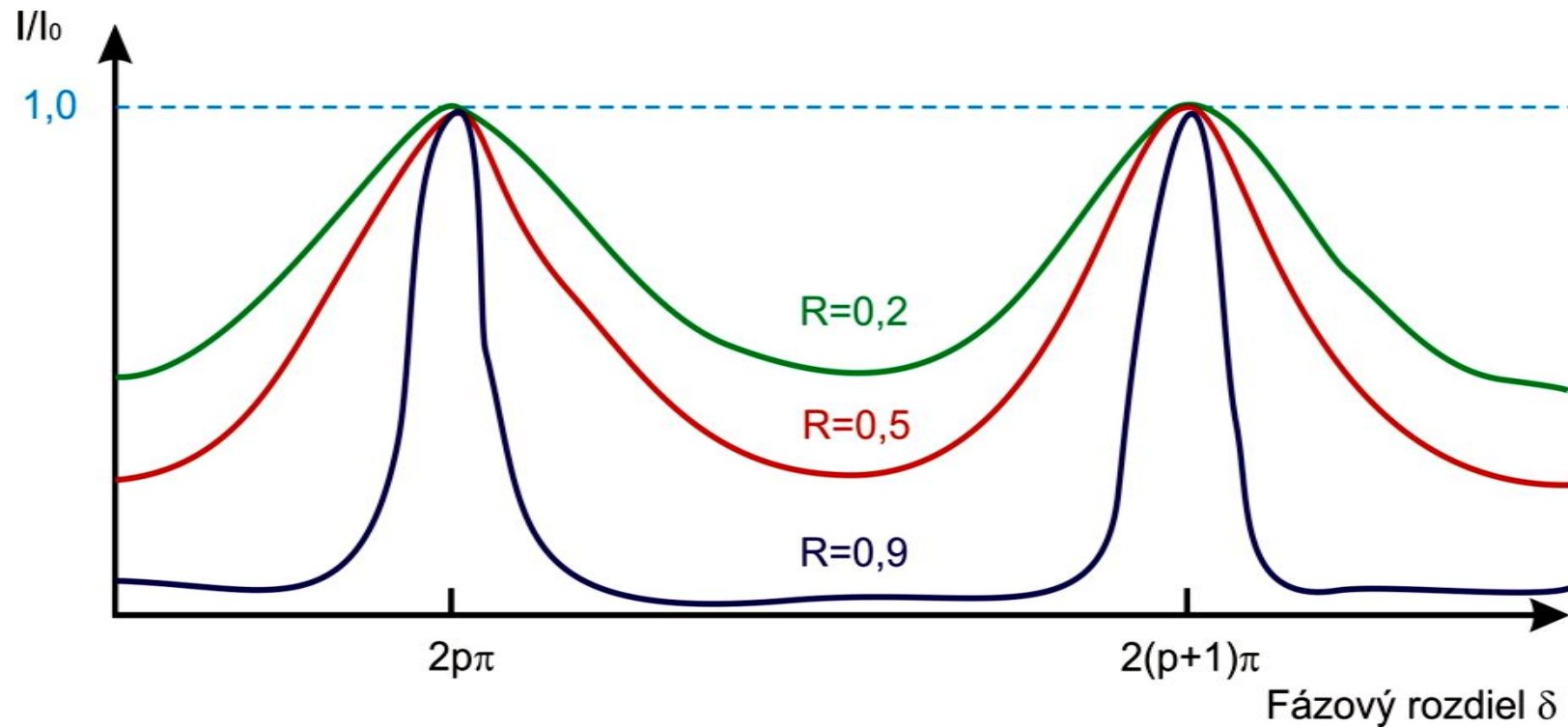
## Interferenčný jav na tenkej vrstve alebo platničke



## Mnohonásobný odraz a interferencia na dvou rovnoběžných (paralelných) platničkách



Zmena relatívnej intenzity ( $I/I_0$ ) interferenčných prúžkov od zmeny hodnoty odrazivosti zrkadiel  $R$



## Mnohonásobne odrazené lúče

Rozdelenie intenzity

$$I = \frac{I_0 T^2}{1 - R^2} \left( \frac{1}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \frac{d}{2}} \right)$$

R – koeficient odrazu, T – koeficient prenosu

**Fabry-Perotov rezonátor** – vznikajú interferenčné prúžky s veľmi ostrými maximami

**Optická mriežka** – sklenená doštička v ktorej je veľké množstvo pravidelných vrypov

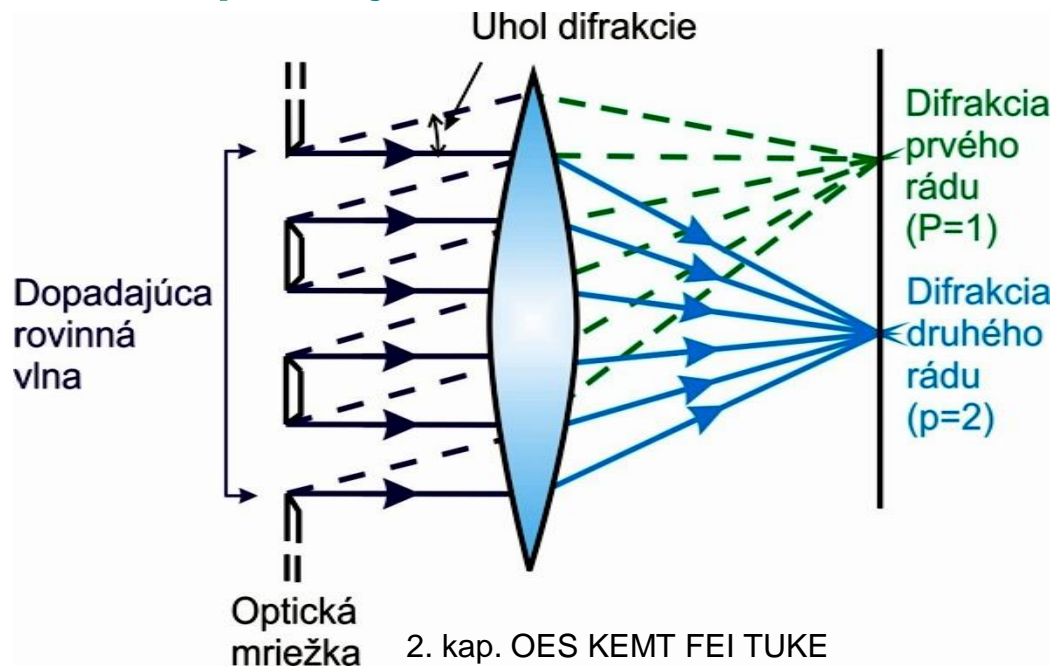
Maximum interferenčného obrazca pre optickú (difrakčnú) mriežku vzniká, ak platí

$$n p l = (a + b) \sin q = d \cos q$$

$d=a+b$  – konštanta mriežky (a je šírka a b vzdialenosť vrypov)

$\theta$  – uhol difrakcie

### Interferencia na optickej mriežke



## Huygensov princíp

- .. Šírenie svetelnej vlny môže byť predikované uvažovaním, že každý bod vlnoplochy pôsobí ako zdroj sekundárnych guľových vln, ktoré sa šíria do všetkých smerov
- .. Opis – **Fresnelov-Kirchhoffov vzorec**

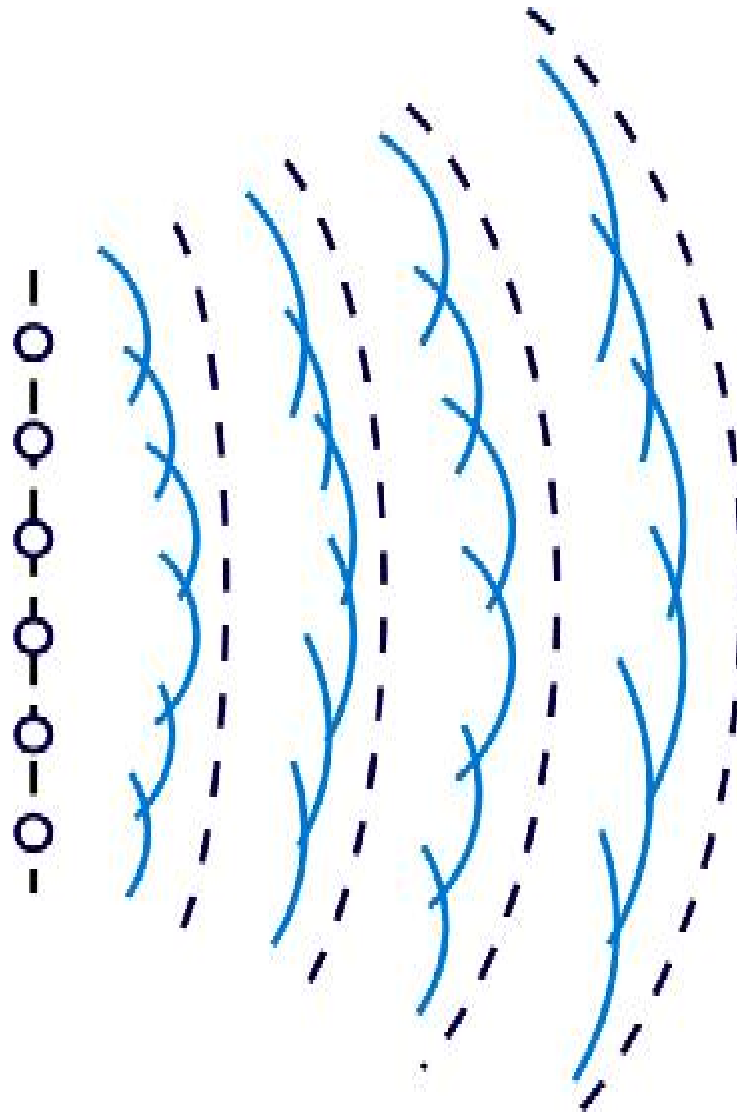
Miera difrakcie: 
$$\sin q = 1,22 \frac{l}{D} \approx \frac{l}{D}$$

## Difrakcia

- .. **Fraunhoferova**
- .. **Fresnelova**

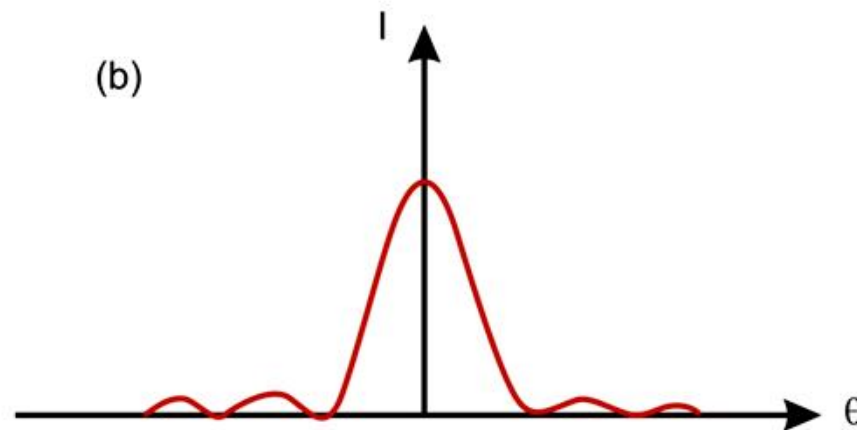
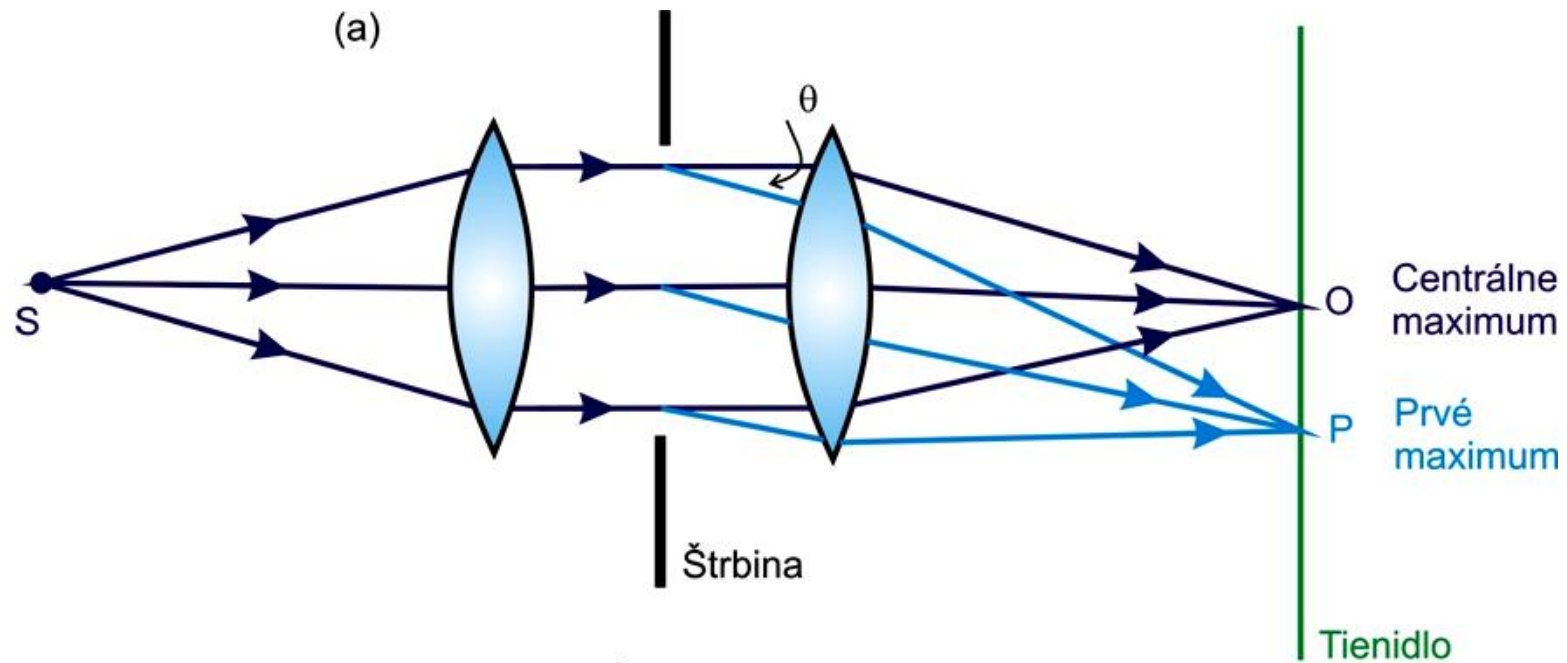
**Airyho disk** – centrálna oblasť, kde je sústredené okolo 84% svetla

## Huygensov princíp





Fraunhoferova difrakcia (a) a rozloženie ožiarenia (b)



## ***Základy radiometrie a fotometrie***

**Rádiometrické jednotky** (index **e – energia**) –  
meranie energie žiarenia

- Základná jednotka – **watt (W)**

**Fotometrické jednotky** (index **v – visible**) –  
meranie viditeľného svetla

- Základná jednotka – **lumen (lm)**

**Fotometria** neuvažuje neviditeľné žiarenie

## Žiarivý tok

$$\mathbf{n} \quad P_e = \frac{dQ_e}{dt}$$

## Vyžiarená energia

$$\mathbf{n} \quad Q_e = \int P_e dt$$

**Svetelný tok (energia)**  $P_v$  – časť žiarivého toku  $P_e$ , na ktorú je citlivý ľudský zrak

## Vyžarovanie

$$\mathbf{n} \quad M_e = \frac{dP_e}{dA_s}$$

$dP_e$  – plošný element,  $dA_s$  – vyžiarený žiarivý tok

$$\mathbf{n} \quad M_e = \int_{\Omega} L_e d\Omega$$

## Žiarivý tok

$$\mathbf{n} \quad P_e = \int M_e dA_s$$

## Žiarivosť bodového žiariča

$$\mathbf{n} \quad I_e = \frac{dP_e}{d\Omega}$$

## Žiarivý tok do priestorového uhlu

$$\mathbf{n} \quad P_e = \int_{\Omega} I_e d\Omega$$

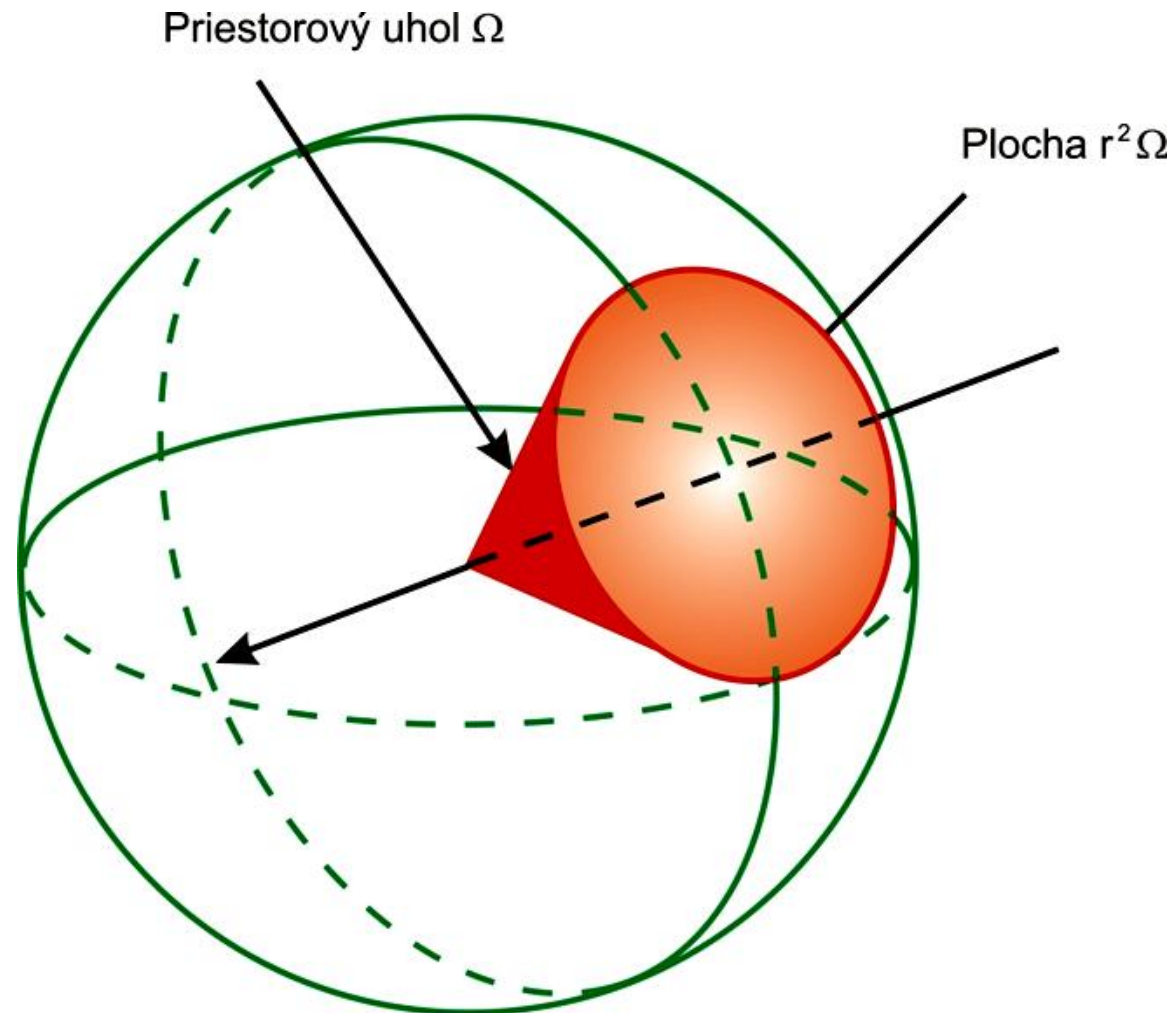
$$\mathbf{n} \quad P_e = \iint_{A_s \Omega} L_e dA_s \cos j d\Omega$$

$$\mathbf{n} \quad P_e = \int_A E_e dA$$

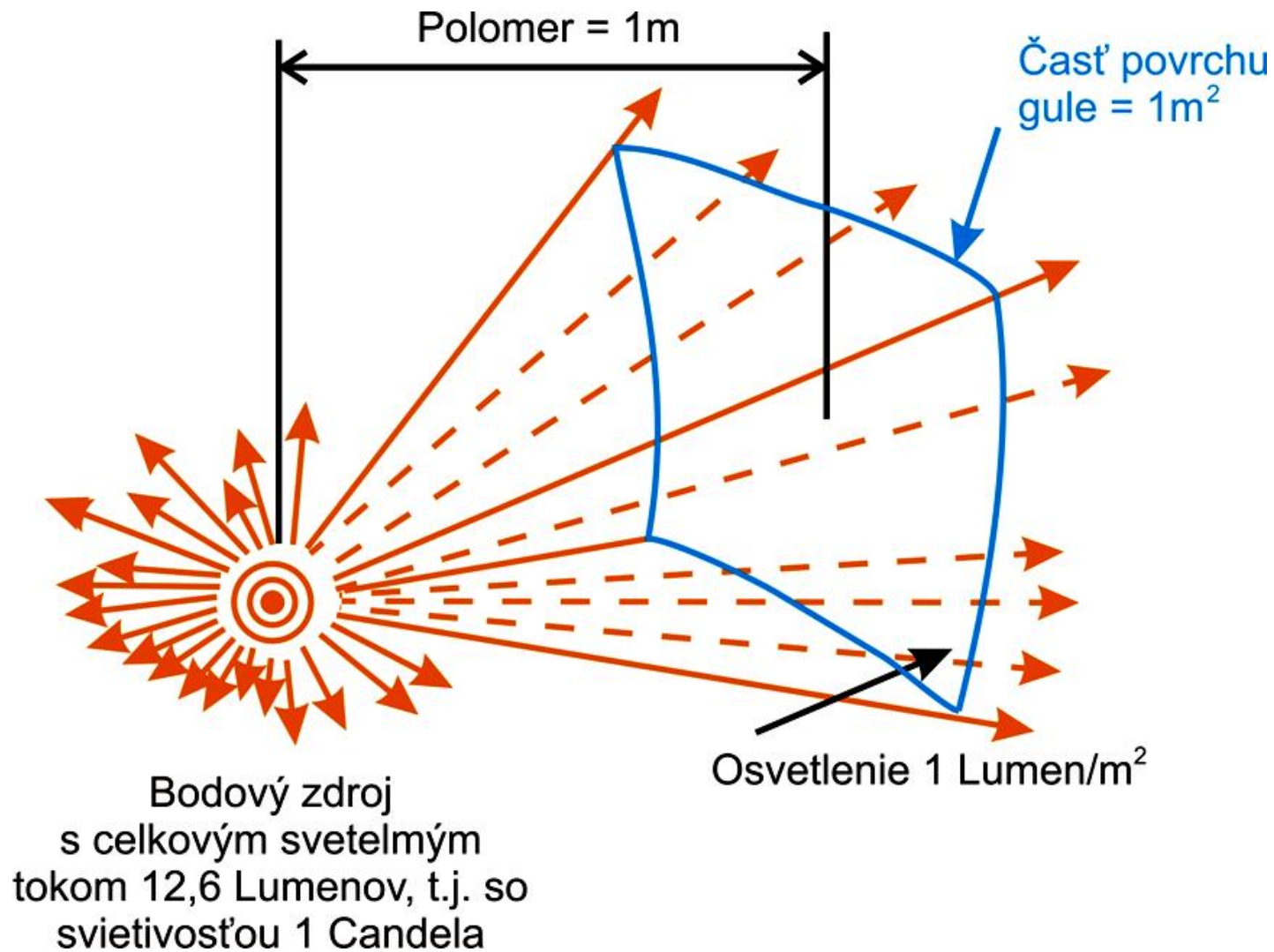
## Svietivosť

- .. Časť žiarivosti  $I_e$ , na ktorú je citlivý ľudský zrak
- .. Jednotka: **candela (cd)**

## Žiarivý tok bodového žiariča do priestorového uhla $\Omega$



## Svietivosť bodového zdroja



## Žiara

$$\mathbf{n} \quad I_e = \frac{dI_e}{dA_{sf}} = \frac{dI_e}{dA_s \cos j} = \frac{d^2 P_e}{dA_s \cos j d\Omega}$$

$$\mathbf{n} \quad I_e = \int_{A_s} L_e dA_s \cos j$$

**Jas** – časť žiary  $L_e$ , na ktorú je citlivý ľudský zrak



## Účinnosť zdroja žiarenia (zdroja sveta)

$$\eta h_e = \frac{P_e}{P}$$

$$\eta h_v = \frac{P_v}{P}$$

$P$  – vstupný (budiaci) výkon,  $P_e$  resp.  $P_v$  – výstupné výkony žiarenia, resp. svetla

**Ožiarenie** – základná jednotka:  **$Wm^{-2}$**

$$\eta E_e = \frac{dP_e}{dA}$$

## Osvetlenie

- Časť ožiarenia  $E_e$ , ktorá je z oblasti citlivosti ľudského zraku - základná jednotka: **lux (lx) =  $lm/m^2$**

## Dávka ožiarenia –

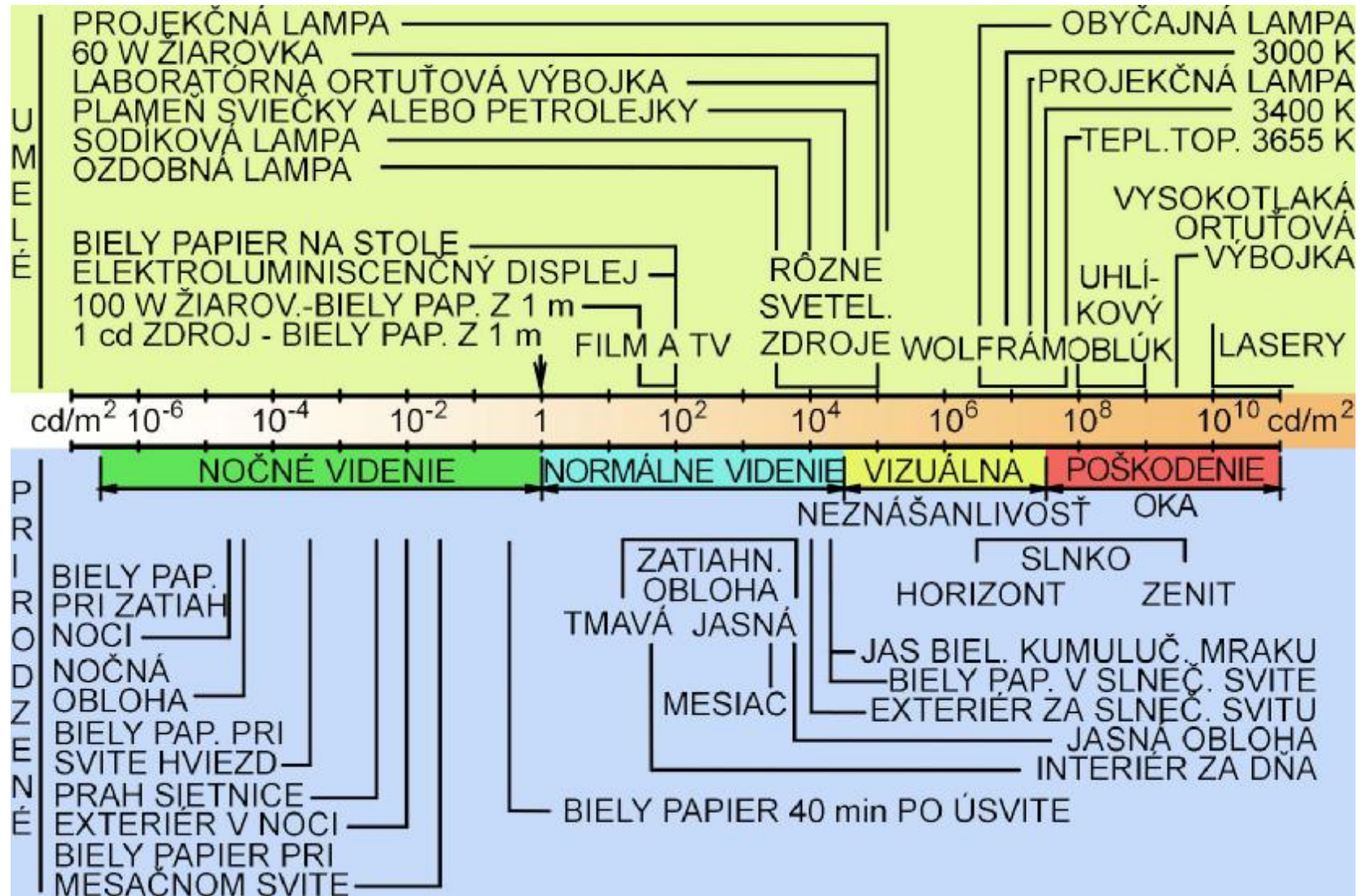
základná jednotka:  **$\text{Wsm}^{-2}=\text{Jm}^{-2}$**

$$n \quad H_e = \int_T E_e dt$$

## Expozícia

- Časť dávky ožiarenia  $H_e$ , na ktorú je citlivý ľudský zrak - základná jednotka:  **$\text{lmsm}^{-2}=\text{lx.s}$**

## Oblasti jasu umelých a prírodných zdrojov svetla



## Spektrálne rádiometrické veličiny

Názov	Definícia	Praktická jednotka
Spektrálny žiarivý tok	$P_{el} = \frac{dP_e}{d\lambda}$	W. ( 1 / nm )
	$P_{ef} = \frac{dP_e}{df}$	W. ( 1 / Hz )
Spektrálna dávka žiarenia	$H_{el} = \frac{dH_e}{d\lambda}$	Wsm-2.( 1 / nm )
Spektrálna žiara	$L_{el} = \frac{dL_e}{d\lambda}$	Wm-2. ( 1 / nm )
Spektrálna žiarivosť	$L_{el} = \frac{dI_e}{d\lambda}$	W / sr. ( 1 / nm )
Spektrálne vyžarovanie	$M_{el} = \frac{dM_e}{d\lambda}$	Wm-2. ( 1 / nm )
Spektrálne ožiarenie	$E_{el} = \frac{dE_e}{d\lambda}$	Wm-2. ( 1 / nm )

## ***Optická holografia***

**Rok 1947** – objavil anglický fyzik maďarského pôvodu **D. Gábor** – r. **1971 Nobelova cena**

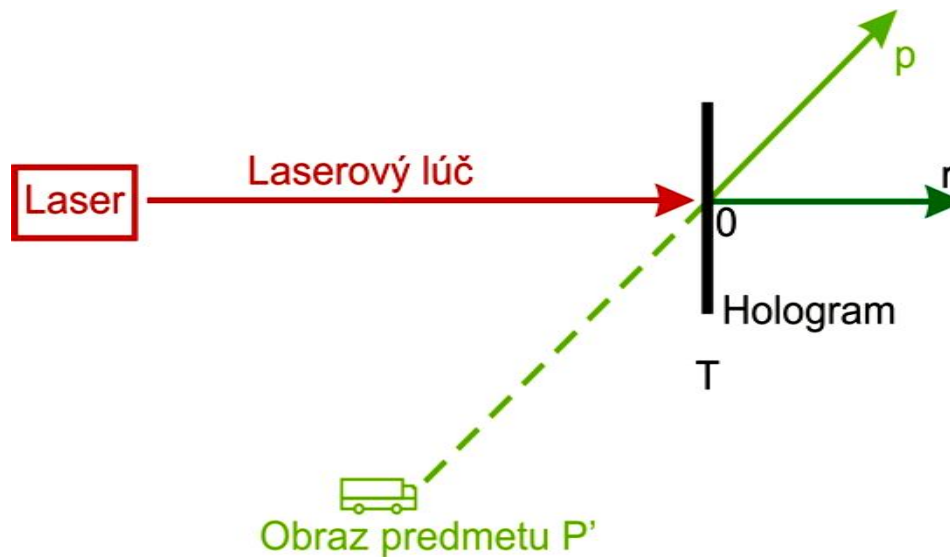
### **Holografia**

n **Úplný záznam optickej vlny** (amplitúdy aj fázy)

### n **Použitie**

- .. Sledovanie rýchle sa pohybujúcich predmetov
- .. Záznam a modelovanie mikrovlnových polí
- .. Výroba holografických optických prvkov (mriežok, filtrov ...)
- .. Záznam číslicovej a analógovej informácie – holografická pamäť
- .. Rozpoznávanie obrazcov

## Záznam hologramu



## Rekonštrukcia hologramu

