

Úloha č. 2: Optika 3A – Interference a difrakce světla

jarní semestr 2020

Obsah

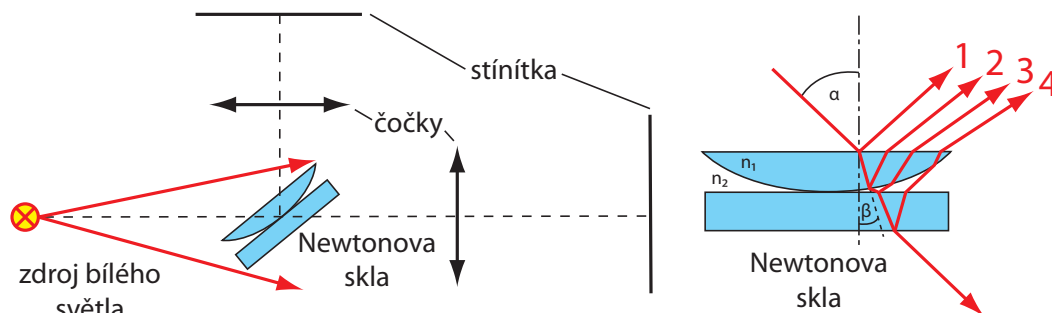
1 Experimenty	2
1.1 Interference dělením amplitudy	2
E1 Interference světla na tenké vrstvě – proužky stejné tloušťky	2
E2 Interference světla na tenké vrstvě – proužky stejného sklonu	2
1.2 Interference dělením vlnoplochy	3
E3 Interference na dvojštěrbíně	3
E4 Určení vlnové délky z Youngova pokusu – jednoduchý a úplný difraktograf	4
E5 Prostorová koherence	4
E6 Časová koherence	4
1.3 Difrakce	5
E7 Difrakce laserového svazku	5
E8 Difrakce světla na lineární optické mřížce	5
E9 Difrakční jevy pozorované okem a dalekohledem	5
1.4 Laser, difrakce a interference	6
E10 Vlastnosti laserového svazku při interferenci a difrakci	6
E11 Princip rekonstrukce holografického obrazu	6
A Interference dělením amplitudy	7
A.1 Odvození vztahu pro intenzitu při dvojsvazkové interferenci	7
A.2 Odvození vztahu pro dráhový rozdíl	7
A.3 Započítání fázových posuvů	8
B Interference na dvojštěrbíně - interference a difrakce	8
B.1 Interference na dvojštěrbíně - čistá interference (bodové otvory)	8
B.2 Interference na dvojštěrbíně - započítaná difrakce (otvory určité šířky)	9
C Interference na dvojštěrbíně – časová a prostorová koherence	9
C.1 Prostorová koherence	9
C.2 Časová koherence	10
D Difrakce na význačných objektech	10
D.1 Difrakce na obdélníkovém otvoru	10
D.2 Difrakce na štěrbině	11
D.3 Difrakce na kruhovém otvoru	11
E Difrakce světla na lineární optické mřížce s N vrypů	12
E.1 Interference na mřížce - čistá interference (bodové otvory)	12
E.2 Interference na dvojštěrbíně - započítaná difrakce (otvory určité šířky)	12

1 Experimenty

1.1 Interference dělením amplitudy

E 1 – Interference světla na tenké vrstvě – proužky stejné tloušťky

1. Zobrazte interferenci světla na Newtonových sklech současně na odraz a na průchod.
2. Pozorujte interferenci na tenké vzduchové mezeře mezi dvěma skly.



- Proč jsou interferenční obrazce na průchod a odraz komplementární (poloha maxim a minim)?
- Proč je při použití červeného filtru vidět více proužků než v bílém světle? (prostudujte dodatek C.2)
- Které z paprsků 1-4 interferují? (prostudujte dodatek C.2)
- Proč je různá viditelnost interferenčních obrazců na odraz a průchod?

Nápověda:

$$r_s = -\frac{\sin(\alpha-\beta)}{\sin(\alpha+\beta)} \quad r_p = -\frac{\tan(\alpha-\beta)}{\tan(\alpha+\beta)}$$

Fresnelovy vzorce:

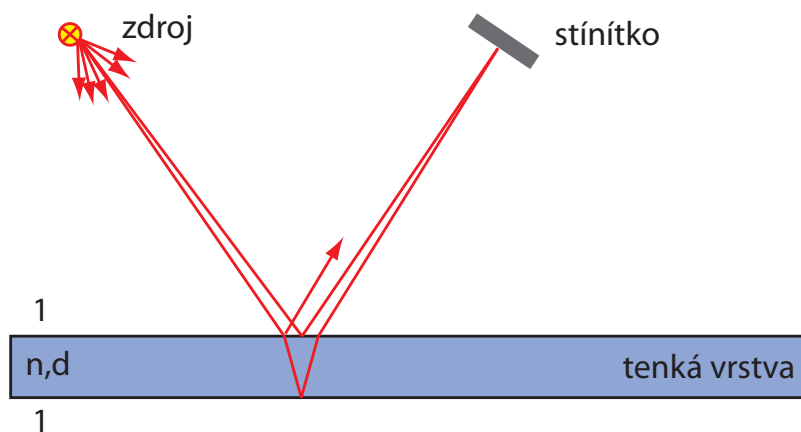
$$t_s = \frac{2n_1 \cos \alpha}{n_1 \cos \alpha + n_2 \cos \beta} \quad t_p = \frac{2n_1 \cos \alpha}{n_2 \cos \alpha + n_1 \cos \beta}$$

Pro kolmý dopad:

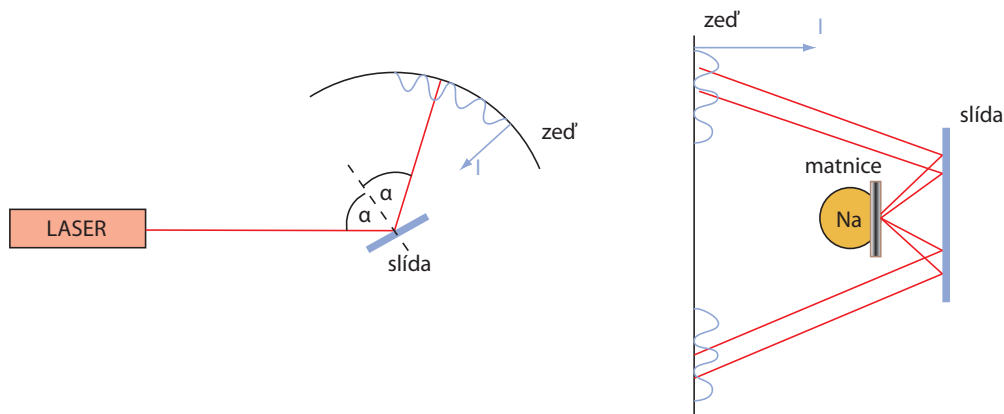
$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$$

E 2 – Interference světla na tenké vrstvě – proužky stejného sklonu

1. Jak je možné, že interference vzniká na tenké vrstvě a je viditelná i bez čočky? Jaké musí být splněny podmínky?



2. Vytvořte interferenci mírně rozbíhavého laserového svazku na slídové destičce.

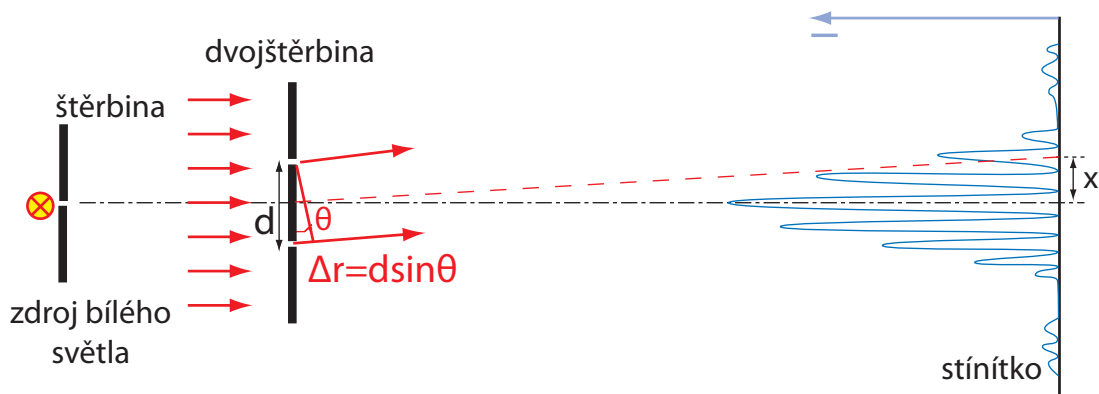


3. Vytvořte interferenci světla sodíkové výbojky na slídové destičce. Vysvětlete pozorování.

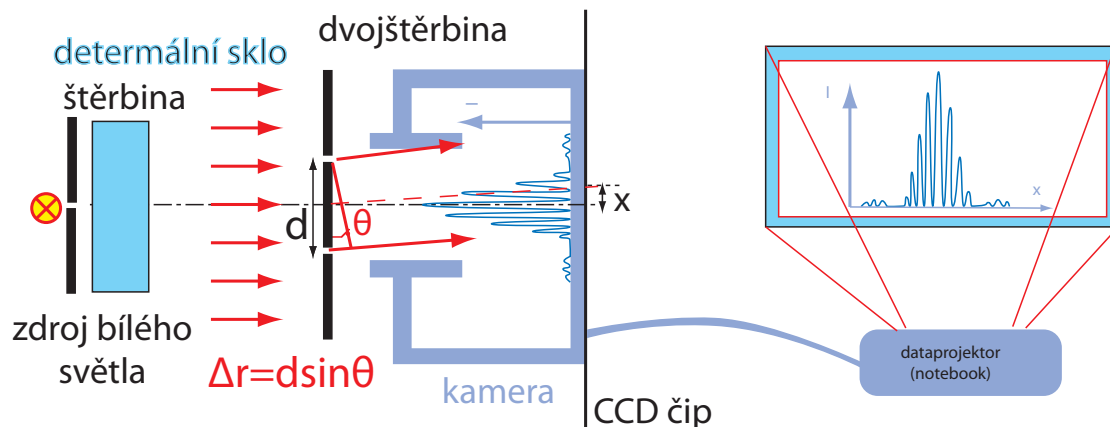
1.2 Interference dělením vlnoplochy

E3 – Interference na dvojštěrbíně

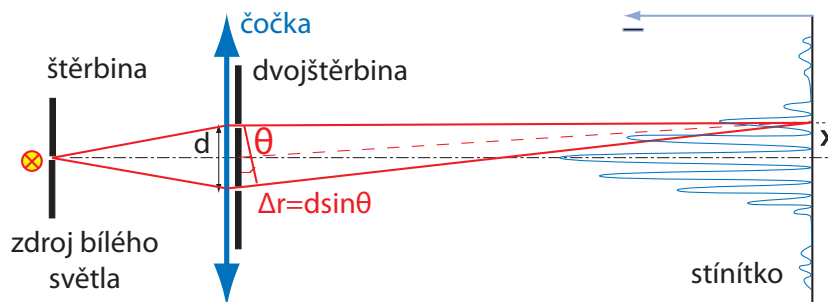
1. Zobrazte interferenční obrazec, který získáte interferencí bílého světla na dvojštěrbíně, bez pomoci čoček na velmi vzdálené stínítko. Experiment uspořádejte tak, aby šlo zdroj považovat za bodový a dopadající svazek za rovnoběžný.



2. Zopakujte předchozí experiment tak, že IR záření odfiltrujete determálním sklem a interferenční obrazec zobrazíte pomocí webové kamery (objektiv sejmут, kamera těsně za dvojštěrbínou - pozor na zahlcení světlem!).



3. Zopakujte předchozí experiment tak, že použijete čočku, její pomocí zaostříte obraz štěrbinu na stínítko a těsně za čočku vložte dvojštěrbinu (jednoduchý difraktograf).

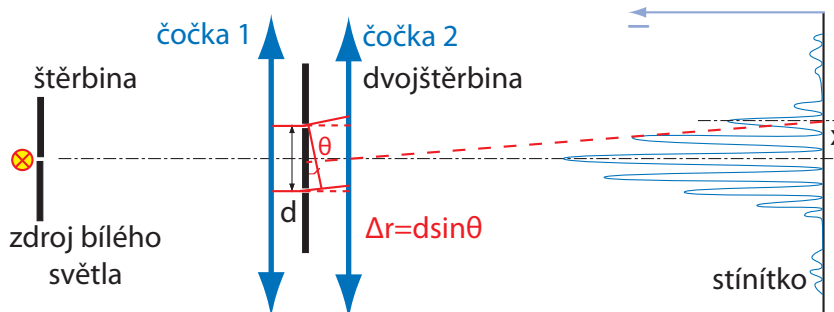


E 4 – Určení vlnové délky z Youngova pokusu – jednoduchý a úplný difraktograf

1. Sestavte jednoduchý difraktograf (viz předchozí obrázek), použijte různé dvojštěrbiny s různými vzdálenostmi štěrbin. Určete z nich (alespoň orientačně) vlnovou délku viditelného světla.
2. Promyslete si, jak experiment měření vlnové délky světla zpřesnit.
3. Promyslete si, proč je při pozorování v jednoduchém difraktografu štěrbina osvětlena rovinným svazkem, i když používáme jen jednu čočku, a ne dvě jako v úplném difraktografu (schéma je na dalším obrázku).

Nápovědné otázky:

- (a) Jak se šíří světlo v tomto difraktografu?
- (b) Kde mají čočky ohniska?
- (c) Kudy se šíří paprsky světla s naznačeným dráhovým rozdílem a kam dopadají?



E 5 – Prostorová koherence

1. Použijte to z předchozích zapojení, ve kterém jste nejlépe pozorovali interferenční obrazec. Jako zdroj světla použijte štěrbinu proměnné šířky s v libovolné vzdálenosti a od dvojštěrbiny. Otázky:
 - (a) Jak závisí viditelnost interferenčního jevu na parametrech a a s ?
 - (b) Jaký má význam interferenční šířka?

E 6 – Časová koherence

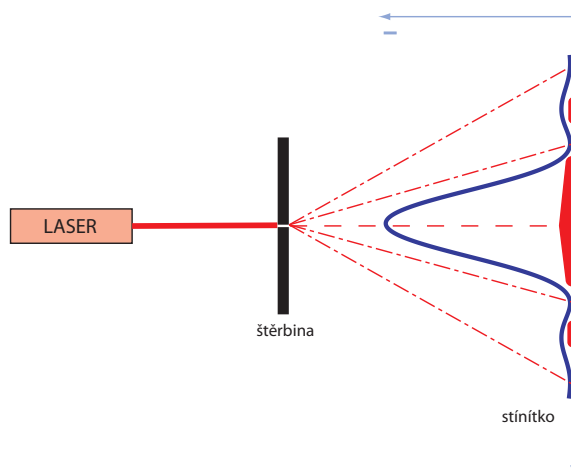
1. Použijte to z předchozích zapojení, ve kterém jste nejlépe pozorovali interferenční obrazec. Nastavení experimentu zvolte tak, aby byl prostorově koherentní. Jako dvojštěrbinu užíjte tu, která má možnost zakrýt jednu či obě štěrbinu sklem. Pozorujte interferenční obrazec při překrytí jedné a obou štěrbin sklem.

- Vysvětlete pozorovaný jev.
- Potom zopakujte pokus s laserem. Vysvětlete.

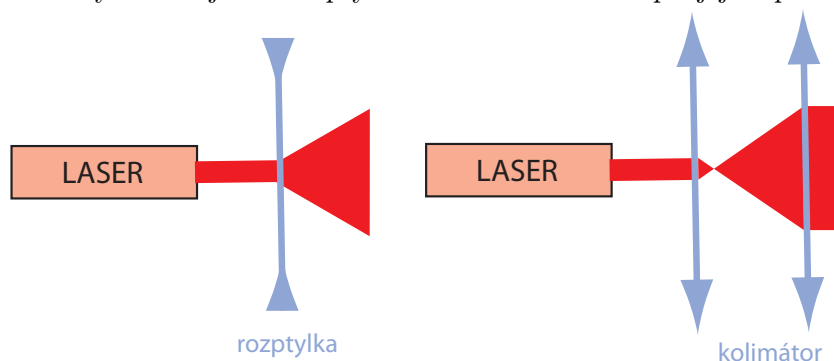
1.3 Difrakce

E 7 – Difrakce laserového svazku

- Demonstrujte difrakci laserového světla na vhodných objektech (štěrbina, obdélníkový otvor, kruhový otvor...).



- Objasněte rozšiřování centrálního maxima při difrakci na obdélníkovém otvoru.
- Pomocí difrakce na vlasu změřte tloušťku vlasu.
- Pomocí zvoleného difrakčního jevu určete vlnovou délku světla.
- K dispozici pro laserový svazek jsou i rozptylka a kolimátor. Co se při jejich použití změní?



E 8 – Difrakce světla na lineární optické mřížce

- Pozorujte difrakci světla na různých optických mřížkách v jednoduchém difraktografu (viz E4-3.).
- Z pozorovaných jevů odhadněte mřížkovou konstantu a šířku štěrbin mřížky.
- Zdůvodněte, proč jsou obrazy jednotlivých difrakčních maxim rozmístěny nikoliv v rovině, ale na kružnici se středem v optickém středu čočky.

E 9 – Difrakční jevy pozorované okem a dalekohledem

- Pozorujte difrakční jevy tak, že objekt, na kterém dochází k difrakci, přiložíte těsně před oko anebo před přední čočku dalekohledu. Jako zdroj použijte bodový zdroj světla.

- Promyslete si, jak konkrétně realizovat bodový zdroj světla pro obě pozorování.
- Zakreslete chod paprsků světla při těchto pozorováních. Jaký je princip tohoto pozorování? Jako difrakční objekty použijte dvojtěrbiny, štěrbiny, mřížky, tkaninu, pleteninu a další vhodné objekty.

1.4 Laser, difrakce a interference

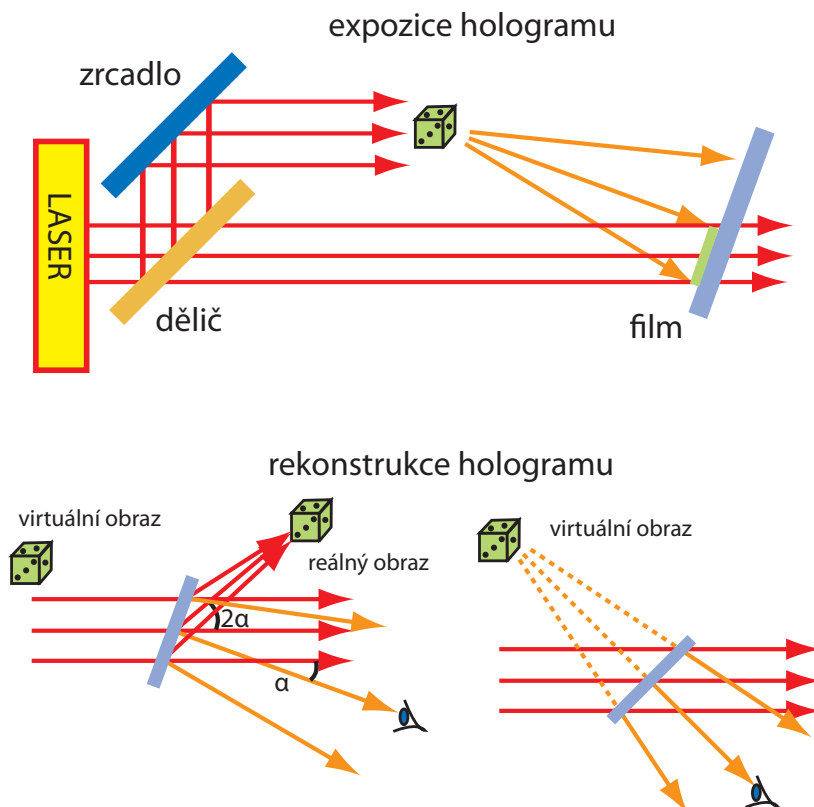
E 10 – Vlastnosti laserového svazku při interferenci a difrakci

- Objasněte princip laseru, na konkrétních provedeníh (HeNe laser, polovodičová dioda) vysvětlete, jak jsou splněny podmínky vzniku stimulované emise (aktivní prostředí s metastabilními stavy, optický rezonátor).
- Jak je to s prostorovou a časovou koherencí laserového svazku?
- Musí být světlo vycházející z laseru lineárně polarizované? Jak lze zařídit, aby bylo?
- Proveďte s laserem vhodné interferenční a difrakční experimenty (viz předchozí úlohy).
- Objasněte, jak lze pomocí laserového světla rozeznat, jsou-li přední a zadní strana skleněné desky rovnoběžné či nikoliv, experiment proveďte.

Kromě laserů a difrakčních a interferenčních objektů je k dispozici i rozptylka a kolimátor produkující rovnoběžný svazek paprsků.

E 11 – Princip rekonstrukce holografického obrazu

- Vytvořte na stínítku obraz hologramu metodou dopadu laserového paprsku na hologram pod úhlem přibližně 45° a zobrazení odchyleného světla na stínítko.
- Pozorujte laserový hologram okem tak, že svazek roztáhnete pomocí rozptylky a oko vložíte na místo, kde stálo stínítko.



Teorie

A Interference dělením amplitudy

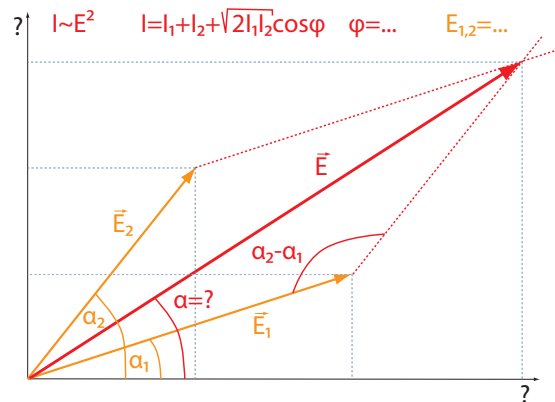
Situace: tenké vrstvy, antireflexní vrstvy, olej na vodě, klínové vrstvy, Newtonova skla...

A.1 Odvození vztahu pro intenzitu při dvojsvazkové interferenci

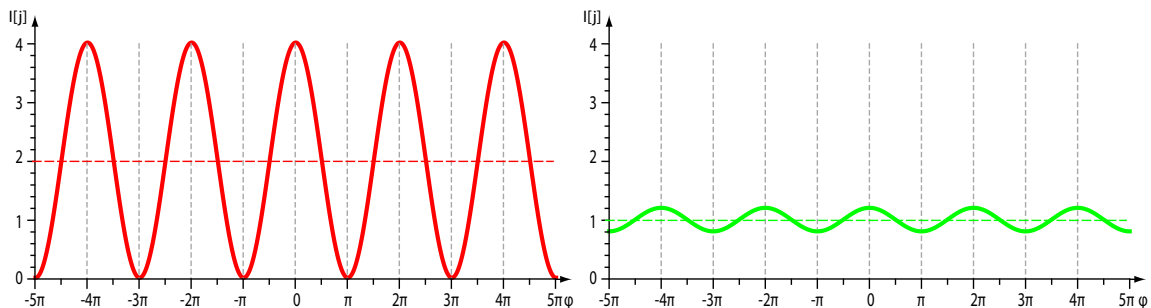
Odvoďte vztah

$$I = I_1 + I_2 + \sqrt{2I_1I_2} \cos \varphi,$$

kde $\varphi = \alpha_2 - \alpha_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x$, vysokoškolsky (vektor elektrické intenzity jako komplexní exponenciála) a středoškolsky pomocí fázorů (viz obrázek):



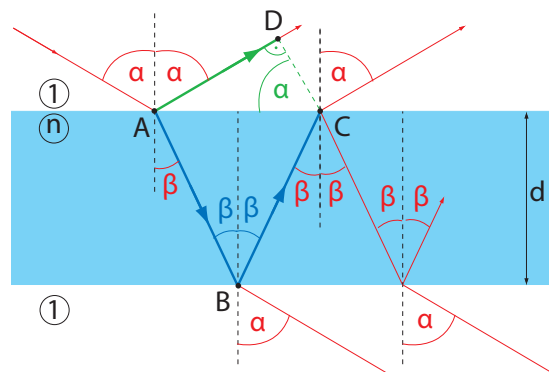
Porovnání intenzity maxim a minim pro $I_1 = I_2$ a $I_1 = 100I_2$:



A.2 Odvození vztahu pro dráhový rozdíl

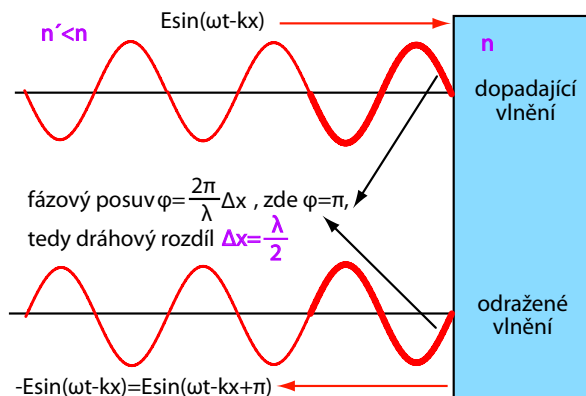
Odvoďte vztah pro dráhový rozdíl

$$\Delta x = 2nd \cos \beta :$$

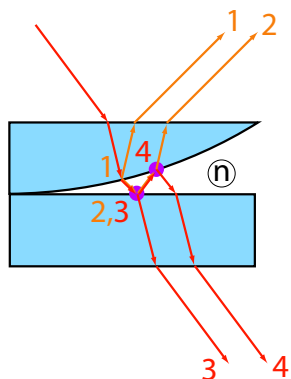


A.3 Započítání fázových posuvů

Při odrazu na hustším prostředí dochází ke změně fáze o π :



Vypočítejte dráhové rozdíly pro Newtonova skla a další situace, které v praktiku budete řešit.

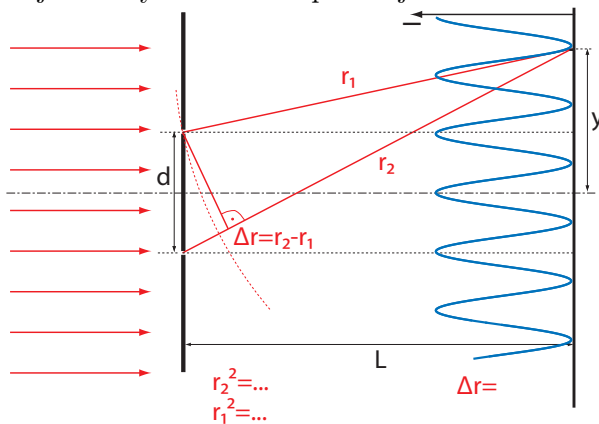


B Interference na dvojštěrbíně - interference a difrakce

Bohužel, při interferenci na dvojštěrbíně se objevují oba tyto jevy současně.

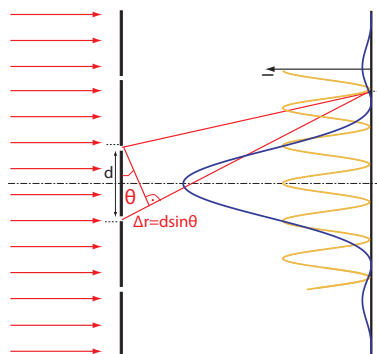
B.1 Interference na dvojštěrbíně - čistá interference (bodové otvory)

- Odvoďte vztah pro polohu interferenčních maxim a minim, pokud uvažujete o interferenci na dvojštěrbíně. Zdroj i otvory ve štěrbině považujte za bodové.



- Napište podmínky interferenčního maxima a minima - buď vycházející ze vztahu pro dráhový rozdíl anebo ze vztahu pro interferenční intenzitu.

B.2 Interference na dvojštěrbině - započítaná difrakce (otvory určité šířky)



Dále viz E - difrakce světla na lineární optické mřížce s N vrypy.

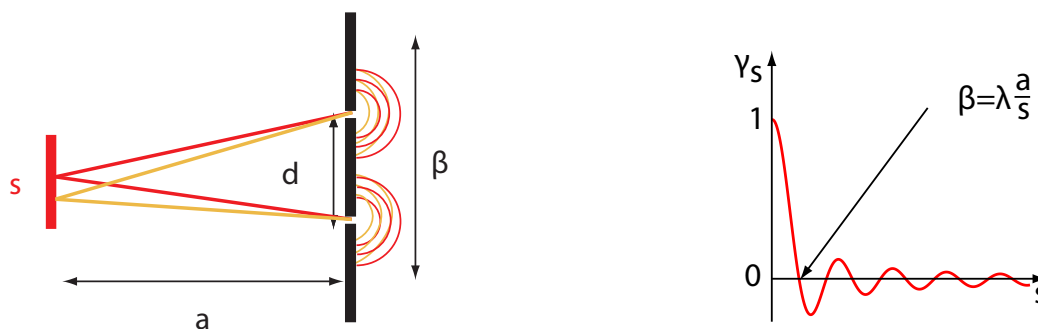
C Interference na dvojštěrbině – časová a prostorová koherence

Literatura ke studiu

- J. Kuběna: Úvod do optiky, MU Brno 1994, skriptum. (též <http://physics.muni.cz/~kubena/PDF/ao1v55.pdf>)
- P. Malý, Optika, Karolinum 2008.
- J. Fuka, B. Havelka: Optika, SPN 1961, přístupné na: <http://www.opto.cz/knihy/>
- F5412 Základní kurz fyziky v příkladech a aplikacích 2
<http://is.muni.cz/predmet/sci/podzim2014/F5412>

C.1 Prostorová koherence

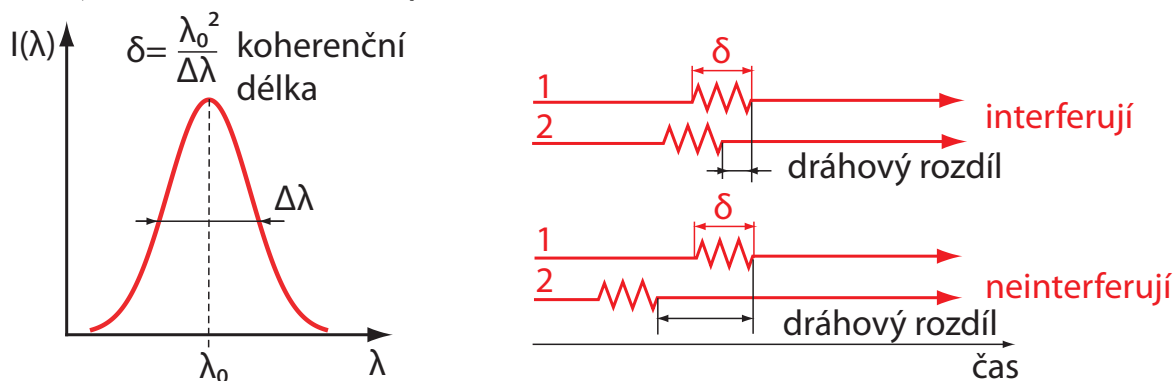
Při dělení vlnoplochy je potřeba pracovat s takovým nastavením, aby oba zdroje byly pod tzv. koherenční šířkou β - pokud se tak děje, je interferenční obrazce zřetelný, se světlým proužkem pro nulový dráhový rozdíl.



$$I = sI_1 + sI_2 + 2s\gamma_s\sqrt{I_1I_2}\cos\varphi \quad \gamma_s = \frac{\sin \frac{kds}{2a}}{\frac{kds}{2a}}$$

C.2 Časová koherence

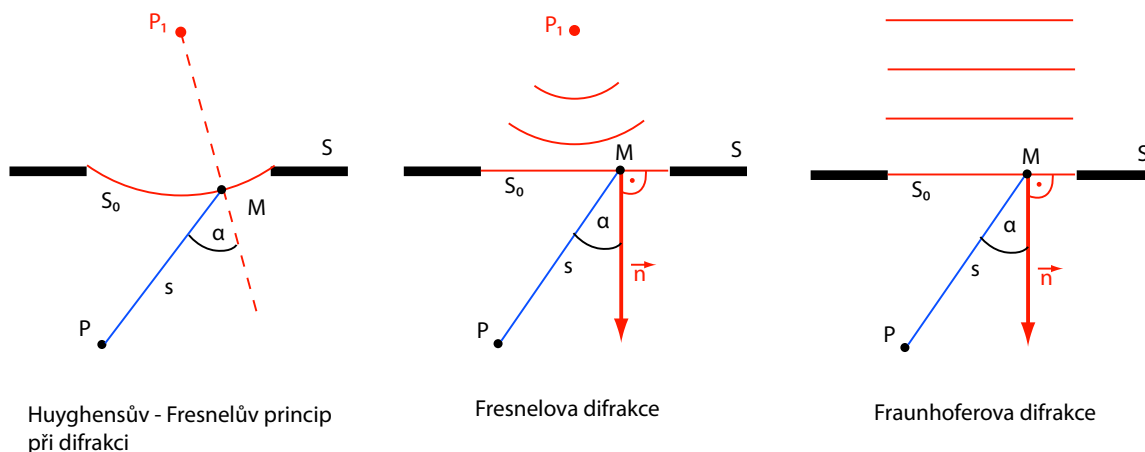
K interferenci dochází pouze tehdy, je-li dráhový rozdíl menší než koherenční délka. Ta je určena spektrální šířkou interferujícího světla - čím je tato menší, tím je délka větší. Odhadněte si ji pro bílé světlo, sodíkovou D čáru a lasery.



D Difrakce na význačných objektech

Literatura ke studiu Podrobnější text o difrakci najdete na <http://physics.fme.vutbr.cz/komrska/Difrakce/KapD04.pdf>.

Je potřeba rozlišovat mezi Fresnelovou (dopadající kulová vlna) a Fraunhoferovou (dopadající rovinná vlna) difrakcí.

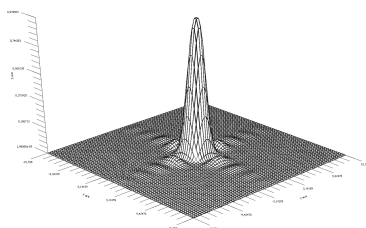


D.1 Difrakce na obdélníkovém otvoru

Intenzita I při ohybu na obdélníkovém otvoru, jehož rozměry jsou b a c , je dána vztahem (podmínky odvození upřesněny v další podkapitole)

$$I = I_0 \left(\frac{\sin x}{x} \right)^2 \left(\frac{\sin y}{y} \right)^2,$$

kde $x = kb \sin(\alpha)/2$ a $y = kc \sin(\beta)/2$.



D.2 Difrakce na štěrbině

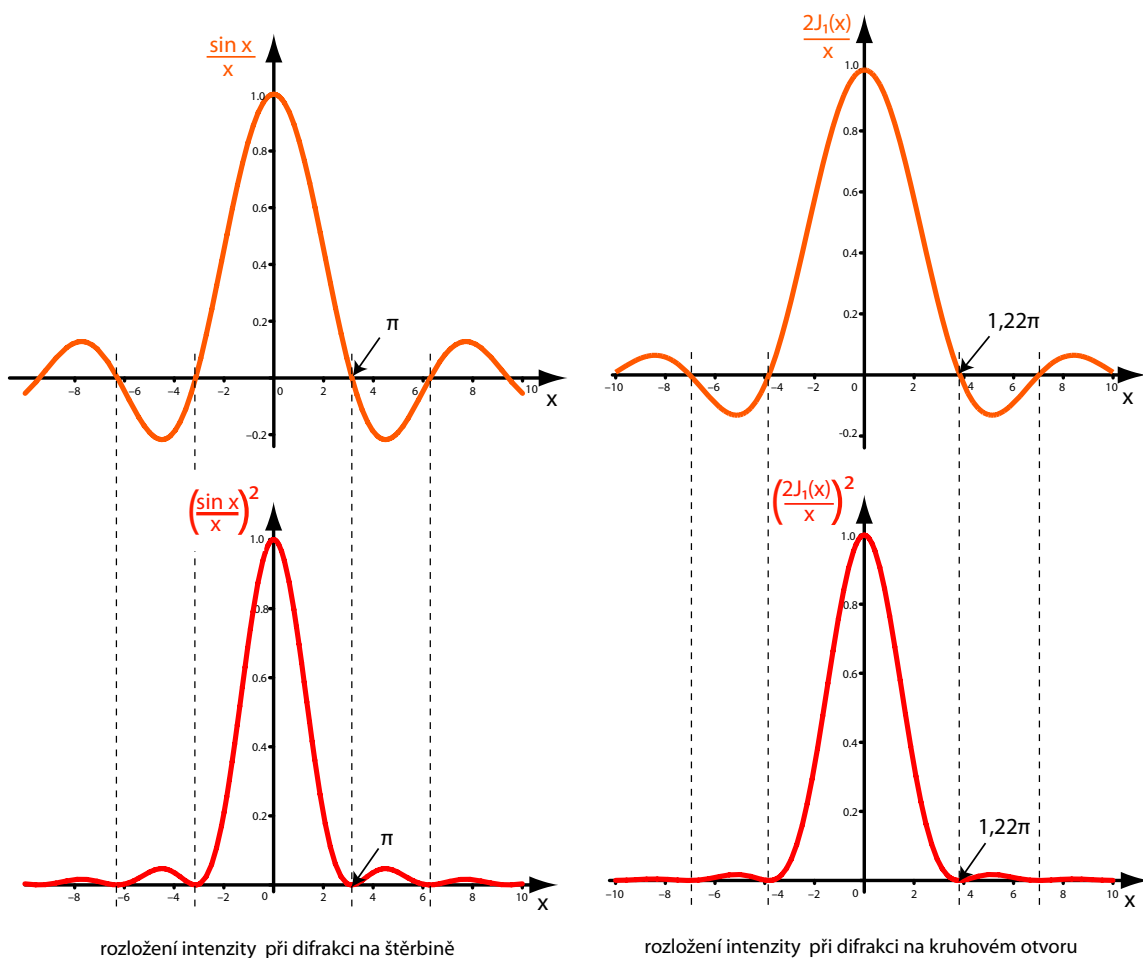
Dopadá-li na obdélníkovou, velmi dlouhou štěrbinu šířky b rovinná monochromatická vlna vlnové délky λ , jejíž vlnový vektor \vec{k} je kolmý k rovině štěrbinu, pak intenzita světla po průchodu štěrbinou v místě, určeném směrem odklonu α , je dána vztahem

$$I = I_0 \left(\frac{\sin x}{x} \right)^2,$$

kde $x = kb \sin(\alpha)/2$ a I_0 je intenzita světla uprostřed středního světlého proužku, tj. pro $\alpha = 0$.

Poloha tmavých proužků (ohybových minim) je určena podmínkou

$$b \sin \alpha = m\lambda \quad m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$



Obrázek 1: Difrakce na obdélníkové štěrbině (vlevo) a na kruhovém otvoru (vpravo).

D.3 Difrakce na kruhovém otvoru

Intenzita světla I při ohybu na kruhovém otvoru průměru D ve směru, který svírá s osou otvoru úhel α , je dána vztahem

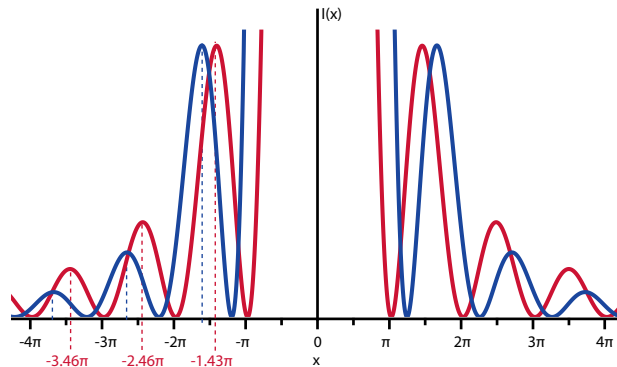
$$I = I_0 \left(\frac{2J_1(x)}{x} \right)^2,$$

kde $x = kD \sin(\alpha)/2$ a výraz $J_1(x)$ reprezentuje Besselovu funkci prvního druhu řádu jedna. Pro ohybový obrazec dostáváme, že jeho středová světla ploška má úhlový poloměr dán vztahem

$$\sin \alpha_0 = 1,22 \frac{\lambda}{D},$$

který pro $D \gg \lambda$ přechází ve tvar

$$\alpha_0 = 1,22 \frac{\lambda}{D}.$$

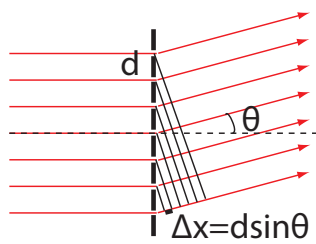


Obrázek 2: Polohy maxim a minim pro ohyb na štěrbině (červeně) a kruhovém otvoru (modře). Křivky jsou vykresleny tak, že intenzity prvních ohybových maxim jsou stejné.

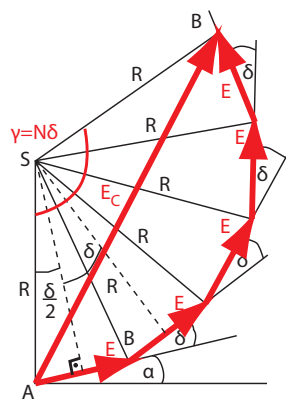
E Difrakce světla na lineární optické mřížce s N vrypů

E.1 Interference na mřížce - čistá interference (bodové otvory)

Odvození vztahu pro interferenci na mřížce:



$$\begin{aligned} E_1 &= E \sin(\omega t - kx) = E \sin \alpha \\ E_2 &= E \sin(\omega t - kx - k\Delta x) = E \sin(\alpha + \delta) \\ &\vdots \\ E_N &= E \sin(\alpha + N\delta) \end{aligned}$$



$$E = 2R \sin(0.5\delta)$$

$$E_C = 2R \sin(0.5N\delta)$$

$$E_C = E \sin(0.5N\delta) / \sin(0.5\delta)$$

$$I_C \sim E_C^2$$

$$I = I_0 \frac{\sin^2[Nkd \sin(\theta)/2]}{\sin^2[kd \sin(\theta)/2]}.$$

E.2 Interference na dvojštěrbině - započítaná difrakce (otvory určité šířky)

hlavní maxima:

$$d \sin \theta = m\lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Rozložení intenzity

$$I(\alpha) = I_0 \underbrace{\frac{\sin^2[kb \sin(\theta)/2]}{[kb \sin(\theta)/2]^2}}_{\text{difr. (otvor.) faktor}} \cdot \underbrace{\frac{\sin^2[Nkd \sin(\theta)/2]}{\sin^2[kd \sin(\theta)/2]}}_{\text{interf. (mříž.) faktor}},$$

