

# T É M A: ŘEŠENÍ ÚLOH NA OHYB SVĚTLA

Vypracoval/a:

Třída:

Spolupracoval/a:

Datum:

## ANOTACE:

V laboratorní práci se žáci seznámí s vlastnostmi světla a jeho chováním při dopadu na překážky srovnatelné s vlnovou délkou světla. Žáci se seznámí pomocí jednotlivých příkladů s ohybem světla na štěrbině, dvojštěrbině a na optické mřížce. Na příkladech se žáci seznámí s podmínkami ohybu světla včetně vzorců a jejich využitím u jednotlivých příkladů. V druhé části laboratorní práce žáci samostatně řeší složitější příklady. Žáci by měli být schopni zpracovat zadané údaje a vypočítat příklady.

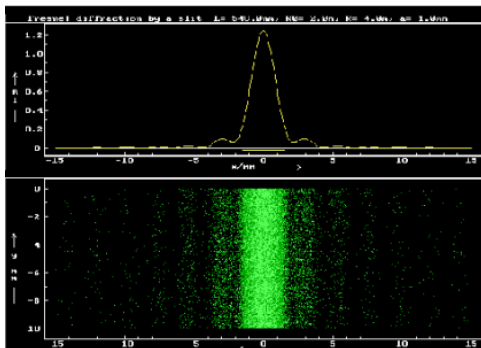
## TEORIE:

**Viditelné světlo** je elektromagnetické záření o vlnové délce 400–750 nm. Vlnové délky světla leží mezi vlnovými délkami ultrafialového záření a infračerveného záření

Tři základní vlastnosti světla jako elektromagnetického vlnění vůbec jsou svítivost (amplituda), barva (frekvence) a polarizace (úhel vlnění).

Kvůli dualitě částice a vlnění má světlo vlastnosti jak vlnění, tak částice.

- Difrakce** (česky **ohyb**) je jev, u kterého se vlnění dostává do oblasti geometrického stínu
- Difrakce světla neboli ohyb je jev způsobený vlnovými vlastnostmi světla.
- Ohyb se projevuje při dopadu světla na překážku, kdy se světlo šíří i za překážku do oblasti geometrického stínu, čili do prostoru, kam by na základě přímočarého šíření nemělo proniknout.
- Díky tomu nevzniká za překážkou ostrá hranice světla a stínu.
- Za překážkou také vzniká **ohybový (difrakční) obrazec** v podobě světlých a tmavých proužků.



Obrazek 1 Rozložení intenzity světla při ohybu světla na štěrbině

Tento obrazec je výsledkem interference světla, které do jednoho místa přichází z různých bodů vlnoplochy a tedy s různým fázovým rozdílem.

Tento proces lze sledovat, když prochází světlo štěrbinou, jejíž šířka je srovnatelná s vlnovou délkou světla.

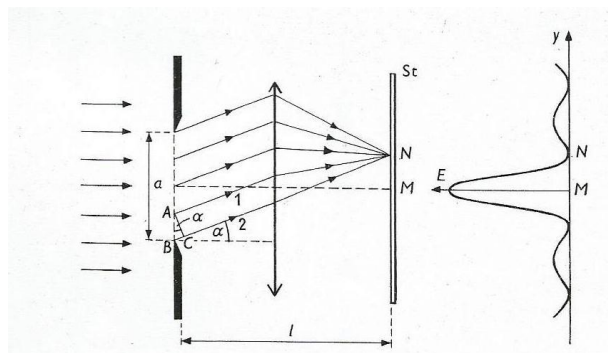
Za štěrbinou se na stínítku zobrazí difrakční neboli ohybové obrazce, tj. světlé a tmavé proužky různé šířky.

převzato

<http://sirrah.troja.mff.cuni.cz/~mira/famdifr/famdifr.html>)

Z

## Ohyb světla na štěrbině

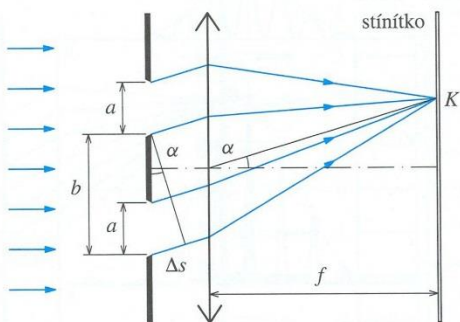


Ohyb světla se projevívá vznikem **ohybového obrazce**.

- Uprostřed tohoto obrazce vzniká interferenční maximum nultého řádu a po jeho obou stranách se následně střídají interferenční minima a maxima.
- Maximum** při ohybu světla **na štěrbině** o šířce  $a$  nastane ve směrech, pro které se dráhový rozdíl  $\Delta l = a \cdot \sin \alpha$  rovná lichému násobku  $\frac{\lambda}{2}$ .
- $a \cdot \sin \alpha = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$ , kde  $k = 0, 1, 2, \dots$
- $\alpha \dots$  úhel, o který se světlo odchýlí od původního směru kde  $a$  představuje šířku štěrbinu,  $\lambda$  je vlnová délka světla,  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$  je řád minima.

- **Minimum** při ohybu světla **na štěrbině** o šířce  $a$  nastane ve směrech, pro které se dráhový rozdíl  $\Delta l = a \cdot \sin \alpha$  rovná sudému násobku  $\frac{\lambda}{2}$ .
- $a \cdot \sin \alpha = 2k \cdot \frac{\lambda}{2}$ , kde  $k = 0, 1, 2, \dots$   
Z tohoto vztahu je patrné, že konečný tvar ohybového obrazce je dán šířkou štěrbin.  
**Užší štěrbina způsobuje výraznější ohyb**
- Výsledný **interferenční obrazec** v sobě zahrnuje širší maxima a minima odpovídající ohybu na štěrbině a dále užší maxima a minima odpovídající interferenci světla vycházejícího ze dvou různých zdrojů.

### Ohyb světla na dvou štěrbinách



Osvětíme-li dvě štěrbinu o šířce  $a$  umístěné ve vzájemné vzdálenosti  $b$  rovnoběžným svazkem paprsků, nastává ohyb světla na obou štěrbinách.

- V tomto případě do každého bodu na stínítku dopadá světlo z obou štěrbin.
- Výsledný **interferenční obrazec** v sobě zahrnuje širší maxima a minima odpovídající ohybu na štěrbině a dále užší maxima a minima odpovídající interferenci světla vycházejícího ze dvou různých zdrojů.
- **Interferenční maximum** nastane, jestliže se dráhový rozdíl  $\Delta l = b \cdot \sin \alpha$  rovná sudému násobku  $\frac{\lambda}{2}$ .
- $b \cdot \sin \alpha = 2k \cdot \frac{\lambda}{2}$ , kde  $k = 0, 1, 2, \dots$

- **Interferenční minimum** nastane, jestliže se dráhový rozdíl  $\Delta l$  rovná lichému násobku  $\frac{\lambda}{2}$ .
- $b \cdot \sin \alpha = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$ , kde  $k = 0, 1, 2, \dots$

- $b \dots$  vzdálenost středů dvou štěrbin

$\lambda$  je vlnová délka světla,

$k = 1, 2, 3, \dots$  je řád minima.

Důvodem proč se používá v optické spektroskopii mřížka nikoli dvojštěrbina je, že má větší světelnost a též ostřejší maxima. Při korektním výpočtu závislosti pozorované intenzity na úhlu vyzařování od štěrbin zjistíme, že jde o hladkou funkci. Naopak pro ideální mřížku je šířka maxima nulová.

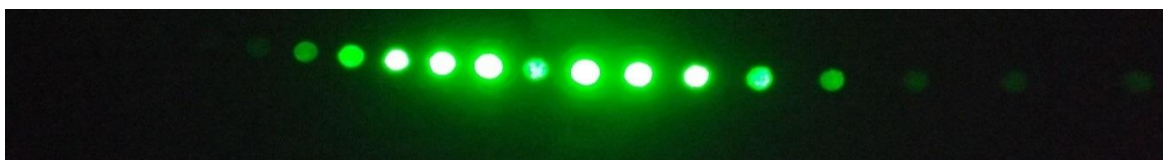
### Ohyb světla na optické mřížce optická mřížka:

Je skleněná destička, na níž přesným dělicím přístrojem vyryta diamantem řada rovnoběžných, stejně od sebe vzdálených vrypů.

Je soustava mnoha rovnoběžných štěrbin ve vzdálenosti  $b$ . Vzdálenost  $b$  nazýváme mřížková konstanta

- Místo mřížkové konstanty je někdy uváděna převrácená hodnota – počet vrypů na 1 mm délky. Běžné optické mřížky mají 10 – 100 vrypů na 1 mm.

Dopadá-li svazek rovnoběžných paprsků jednobarevného světla na mřížku, projde světlo jednotlivými štěrbinami a po průchodu se šíří všemi směry. Protože paprsky jsou koherentní, mohou navzájem interferovat.



Obrázek 2 Mřížka osvětlena laserem

Optickou mřížku si můžeme představit, jako by byla složena z velkého počtu dvojštěřbin, a proto nalezené podmínky pro dvojštěrbinu platí v prvním přiblížení i pro optickou mřížku. Intenzita světlých proužků je tolikrát větší než při jedné štěrbině, kolik štěrbin má mřížka. Mezi světlým a tmavým pruhem není pozvolný přechod, nýbrž ostrá hranice.

Proto optickou mřížkou můžeme určit velmi přesně vlnovou délku dopadajícího jednobarevného světla, a to použitím vztahu pro maximum prvního řádu.

- ohybový obraz má úzká interferenční maxima
- maxima jsou vzdálena od sebe více, čím menší je perioda mřížky
- při kolmém dopadu světla platí pro interferenční maximum:
- **Maximum** nastane ve směrech, pro které platí
- $b \cdot \sin \alpha = k \cdot \lambda$ , kde  $k = 0, 1, 2, \dots$
- **Minimum** nastane ve směrech, pro které platí
- $b \cdot \sin \alpha = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$ , kde  $k = 0, 1, 2, \dots$
- $b \dots$  mřížková konstanta (perioda mřížky)
- $k \dots$  řád příslušného maxima (minima)

$\alpha$  - určuje směr ve kterém vzniká interferenční maximum

$k = 0, 1, 2, \dots$  - řád maxima

Velikost úhlu určíme nepřímo  $\tan \alpha = \frac{y_k}{l}$

pro  $\alpha < 5^\circ$  platí, že  $\tan \alpha \approx \sin \alpha$

$l \dots$  vzdálenost mřížky  $M$  a stínítka  $S$

$y_k \dots$  vzdálenost  $k$  - ého maxima od nultého

Při **ohybu bílého světla** nastane rozklad světla na barevné složky.

U **maxima nultého řádu** nenastane rozklad bílého světla na barevné složky.

**Maximum prvního řádu** vznikne po obou stranách maxima nultého řádu, v bílém světle se vytvoří **spektra** ( $\alpha_c > \alpha_f$ ).

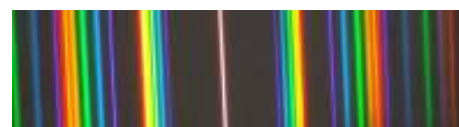
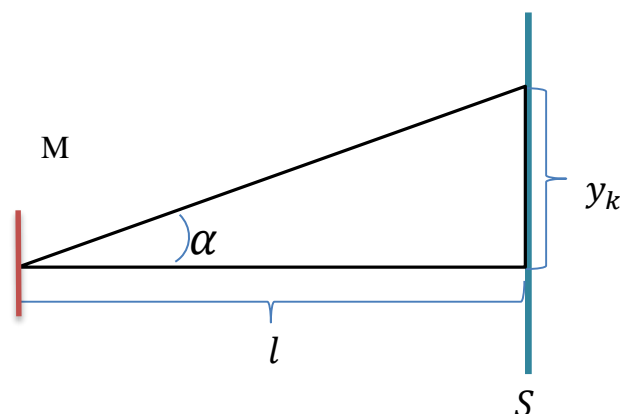
**Spektra vyšších řádů** jsou stále širší, překrývají se a postupně slábnou.

## PŘÍPRAVA:

1. Zopakujte nebo prostudujte si učivo: Vlnová optika – ohyb světla
2. Za použití odborné literatury nebo internetových zdrojů vypracuj následující úkoly.
3. Budete dále potřebovat MFCH tabulky a kalkulačku.

1. Proč vzniká ohyb světla?

2. Zopakujte si, pojmy mřížková konstanta dráhový rozdíl interferenční maximum a minimum na dvojštěbině.



Obrázek 3 Mřížka osvětlená bílým světlem

## ÚKOL Č. 1

Na štěrbinu šířky 0,02 mm dopadá kolmo svazek paprsků monochromatického světla o vlnové délce 500 nm. Určete šířku obrazu štěrbinu na stínítku ve vzdálenosti 1 m od štěrbinu. Šířkou obrazu je vzdálenost mezi interferenčními minimy, která jsou nejbližší hlavnímu interferenčnímu maximu.

### ŘEŠENÍ

#### ZADÁNÍ

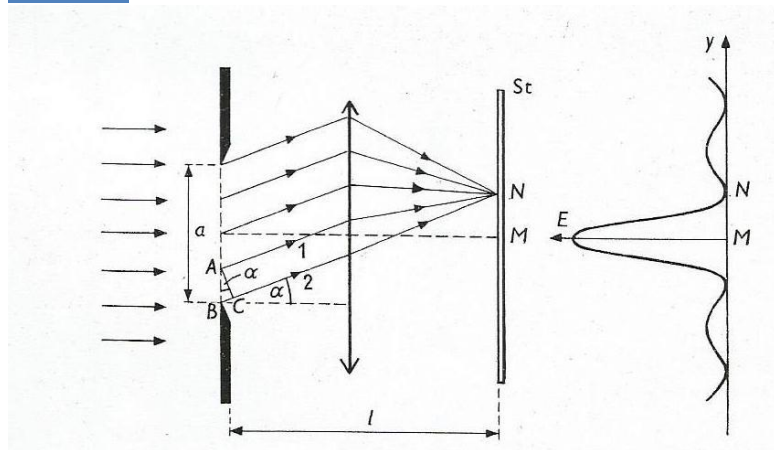
$$a = 2 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

$$\lambda = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$l = 1 \text{ m}$$

$$2y = ?$$

#### NÁKRES



První interferenční minimum leží ve směru  $\alpha$ , který je určen rovnicí:

$$a \sin \alpha = k \lambda$$

Pro malé úhly  $\sin \alpha \approx \alpha = \frac{y}{l}$ , kde  $y$  je vzdálenost interferenčního minima od středního maxima nultého řádu. Pro šířku obrazu štěrbinu pak platí:

#### VÝPOČET

$$2y = \frac{2\lambda l}{a} = \frac{2 \cdot 5 \cdot 10^{-7} \cdot 1}{2 \cdot 10^{-5}} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

Šířka obrazu štěrbinu je 5 cm.

## ÚKOL Č. 2

Tenké vlákno o průměru 0,3 mm je umístěno do rovnoběžného svazku paprsků monochromatického světla – viz obr. Na stínítku ve vzdálenosti 2 m pozorujeme ohybový obrazec. Vidíme, že uprostřed stínu vlákna se vytvořil světlý proužek interferenčního maxima a vně stínu pozorujeme soustavu tmavých proužků interferenčních minim. První interferenční minimum je ve vzdálenosti 2 mm od středu stínu. Pomocí ohybového obrazce určete vlnovou délku použitého světla.

### ŘEŠENÍ:

#### ZADÁNÍ

$$d = 3 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

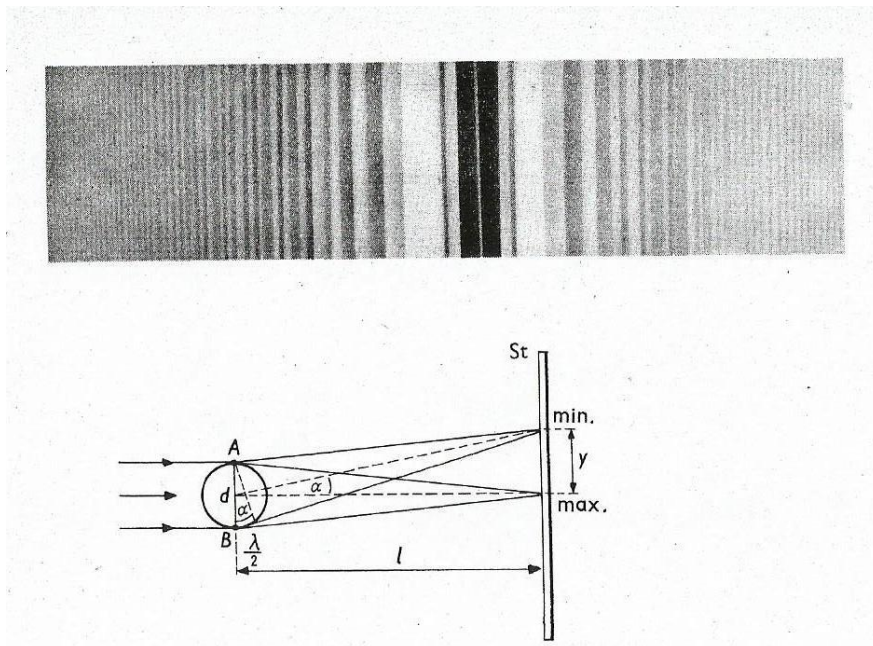
$$l = 2 \text{ m}$$

$$y = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\lambda = ? \text{ m}$$

K určení vlnové délky světla použijeme tmavé proužky interferenčních minim. Okrajové body A, B vlákna můžeme považovat za zdroje koherentního vlnění. Uprostřed stínu, kam obě vlnění dospívají s nulovým dráhovým rozdílem, vzniká interferenční maximum. Nejbližší tmavý proužek (první interferenční minimum) vzniká v místě, kam vlnění od obou zdrojů dospívá s dráhovým rozdílem  $\frac{\lambda}{2}$ . Z obrázku je zřejmé že pro malé úhel  $\alpha$  platí:

## NÁKRES



## VÝPOČET

$$\alpha \approx \sin \alpha = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\lambda}{2d} = \frac{y}{l}$$
$$\lambda = \frac{2dy}{l} = \frac{2.3 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{2} = 6 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

Vlnová délka použitého světla je 600 nm.

## ÚKOL Č. 3

Na optickou mřížku s mřížkovou konstantou 2,2  $\mu\text{m}$  dopadá monochromatické světlo. Určete vlnovou délku světla, jestliže úhel mezi směry k prvnímu a druhému maximu je 15°.

### ŘEŠENÍ:

### ZADÁNÍ

$$d = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

$$\alpha_{12} = 15^\circ$$

$$\lambda = ? \text{ m}$$

## VÝPOČET

První maximum vzniká podle rovnice:

$$a \sin \alpha = k \lambda$$

Ve směru, pro který platí

$$d \sin \alpha_1 = \lambda.$$

Podobně pro druhé maximum platí  $d \sin(\alpha_1 + 15^\circ) = 2\lambda$

z těchto rovnic najdeme

$$\sin(\alpha_1 + 15^\circ) = 2 \sin \alpha_1$$

Použijeme vztah

$$\sin(\alpha_1 + 15^\circ) = \sin \alpha_1 \cos 15^\circ + \cos \alpha_1 \sin 15^\circ \text{ a dostaneme}$$

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{\sin 15^\circ}{2 - \cos 15^\circ} =$$

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{0,2588}{2 - 0,9659} = 0,2503$$

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = 0,2503 \quad \alpha = 14^\circ$$

Z rovnice určíme vlnovou délku světla  $d \sin \alpha_1 = \lambda$

$$\lambda = d \sin \alpha_1 = 2,2 \cdot 10^{-6} \cdot \sin 14^\circ = 5,3 \cdot 10^{-7} \text{ m.}$$

Světlo má vlnovou délku 530 nm.

## ÚKOL Č. 4

Štěrba o šířce 0,57 mm je postavena před promítací stěnu ve vzdálenosti 1,5 m a osvětlena zeleným světlem. Určete jeho vlnovou délku, byly-li na téže straně od hlavního maxima středy dvou tmavých pruhů vzdáleny 1,5 mm.

### ŘEŠENÍ:

### ZADÁNÍ

$$l = 1,5 \text{ m}$$

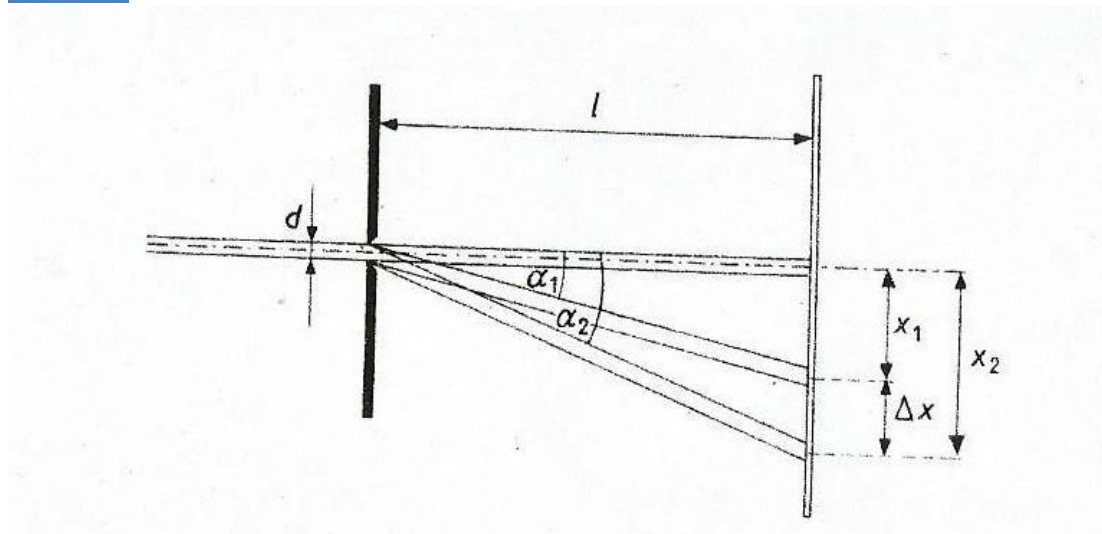
$$d = 0,57 \text{ mm} = 0,57 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\Delta x = 1,5 \text{ mm} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\lambda = ? \text{ m}$$

Budeme postupovat podle obrázku

### NÁKRES



### VÝPOČET

Podmínka pro minimum je  $d \sin \alpha_k = k \lambda$

Podmínka pro minimum 1. řádu  $\lambda$

$$\sin \alpha_1 = \frac{\lambda}{d},$$

Podmínka pro minimum 2. řádu

$$\sin \alpha_2 = \frac{2\lambda}{d},$$

Dále platí:

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{x_1}{l}, \text{ odtud } x_1 = l \operatorname{tg} \alpha_1$$

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{x_2}{l}, \text{ odtud } x_2 = l \operatorname{tg} \alpha_2$$

Poněvadž jsou úhly  $\alpha_1$  a  $\alpha_2$  malé, lze psát  $\operatorname{tg} \alpha_1 = \sin \alpha_1$ , takže dostáváme

$$x_2 - x_1 = l(\operatorname{tg} \alpha_2 - \operatorname{tg} \alpha_1) = l(\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1)$$

$$x_2 - x_1 = l \left( \frac{2\lambda}{d} - \frac{\lambda}{d} \right) = \frac{l}{d} (2\lambda - \lambda)$$

a odtud

$$\lambda = \frac{d \cdot \Delta x}{l}$$

Po dosazení vychází

$$\lambda = \frac{0,57 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}}{1,5} = 570 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 570 \text{ nm}$$

Vlnová délka zeleného světla je 570 nm.



## ÚKOLY NA PROCVIČENÍ:

### ÚKOL Č. 1

Monochromatické světlo o vlnové délce  $\lambda = 5893 \text{ Å}$  dopadá na ohybovou mřížku mající 300 vrypů na milimetr. Pod jakým úhlem se zobrazuje na stínítko první, druhý a třetí řád spektrální čáry?

### ÚKOL Č. 2

Dva velmi malé otvory clony, jejichž vzdálenost  $a = 1 \text{ mm}$ , jsou umístěny před monochromatickým zdrojem světla o vlnové délce  $\lambda = 5000 \text{ Å}$ . Jaká je vzájemná vzdálenost  $\Delta h$  tmavých interferenčních proužků, jež vzniknou na stínítku? Vzdálenost clony od stínítka je  $l = 2,5 \text{ m}$ .

### ÚKOL Č. 3

Na optickou mřížku dopadá kolmo monofrekvenční světlo o vlnové délce  $486 \text{ nm}$ . Určete mřížkovou konstantu, jestliže na stínítku ve vzdálenosti  $1 \text{ m}$  od mřížky vznikne ohybové maximum prvního řádu  $2,43 \text{ cm}$  od maxima nultého řádu.

## VYPRACOVÁNÍ:

### VYPRACOVÁNÍ ÚKOLU Č. 1:

#### ZADÁNÍ

$$\lambda = 5893 \text{ Å} = 5893 \cdot 10^{-7} \text{ mm}$$

$$d = \frac{1}{300} \text{ mm}$$

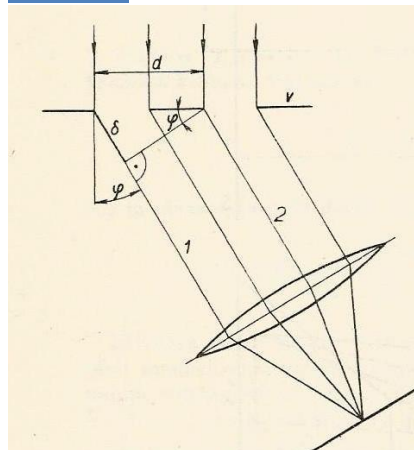
$$\varphi_1 = ?$$

$$\varphi_2 = ?$$

$$\varphi_3 = ?$$

Ohybová mřížka je tvořena například vrypy na skleněné desce.

#### NÁKRES



Na obrázku jsou vrypy vyznačeny čarami **v** a světlo jimi neprochází. Po dopadu rovinné vlny světla na desku představují neporušená místa skla desky koherentní zdroje světla, jejichž paprsky interferují, neboť mezi paprsky 1 a 2 vzniká dráhový rozdíl.

#### ŘEŠENÍ

## VYPRACOVÁNÍ ÚKOLU Č. 2:

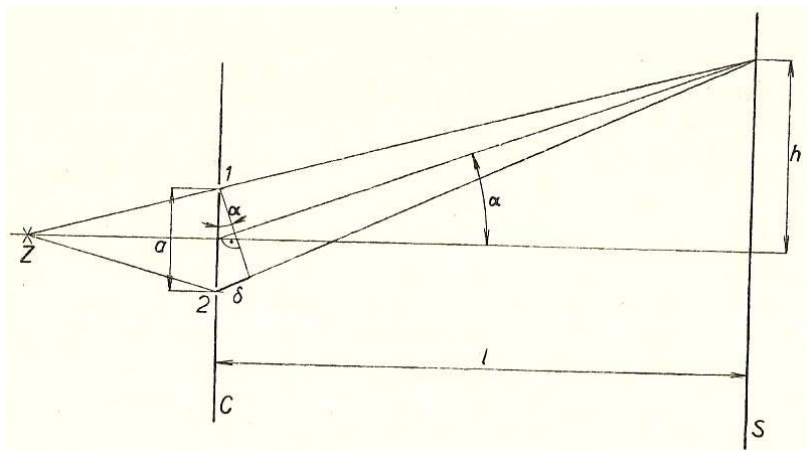
### ZADÁNÍ

$$\lambda = 5000 \text{ Å}$$

$$a = 1 \text{ mm}$$

$$l = 2,5 \text{ m}$$

$$\Delta h = ?$$



### ŘEŠENÍ

Dráhový rozdíl  $\delta$  určíme z úměry – viz obr:

$$\frac{l}{h} = \frac{a \cdot \cos \alpha}{\delta}$$

Poněvadž uhel  $\alpha$  je velmi malý, a tedy  $\cos \alpha \approx 1$ , je

$$\delta = \frac{a}{l} h$$



## VYPRACOVÁNÍ ÚKOLU Č. 3:

### ZADÁNÍ

$$\lambda = 486 \cdot 10^{-9} m;$$

$$l = 1 m;$$

$$y = 2,43 \cdot 10^{-2} m$$

$$k = 1;$$

$$b = ?$$

### ŘEŠENÍ

## SEZNAM ZDROJŮ:

- [01] Fyzika pro gymnázia – Optika, Oldřich Lepil, Přemysl Šedivý, Prometheus Praha 2002 ISBN 80-7196-237-6, 205 s  
[02] Sbírka úloh z fyziky Miroslav Kružík SPN Praha 1969, 335 s

## METODICKÝ LIST

Název školy	Gymnázium a Jazyková škola Zlín
Autor	Mgr. Albert Vacek
Vzdělávací oblast	Člověk a příroda
Vzdělávací obor	Fyzika
Tematický okruh	Ohyb světla
Druh učebního materiálu	Laboratorní cvičení – učitel
Cílová skupina	Žák, 18 – 19 let
Anotace	Pracovní list určen do výuky studentům – podklad pro seminární cvičení z fyziky. Informace student čerpá z vlastních poznámek, odborné literatury a internetu. Náplň: Ohyb světla