

## OHYB A INTERFERENCE SVĚTLA OPTICKOU MŘÍŽKOU

### Měřicí potřeby

- 1) spektrometr
- 2) optická mřížka
- 3) sodíková výbojka
- 4) vodíková výbojka

### Teorie

Optická mřížka na průchod světla je skleněná destička, na níž je vyryta řada jemných, rovnoběžných, stejně od sebe vzdálených vrypů. Vrypy tvoří neprůhledná místa a neporušené sklo mezi nimi vytváří řadu rovnoběžných štěrbin. Vzdálenost dvou sousedních vrypů  $d$  (rovná vzdálenosti středů sousedních štěrbin) se nazývá **mřížková konstanta**. Její převrácená hodnota udává počet vrypů (štěrbin) připadajících na jednotku délky (u nejkvalitnějších mřížek až 1800 vrypů na 1 mm).

Uvažujme rovnoběžné koherentní paprsky dopadající kolmo na mřížku. Šíření světla od štěrbin popíšeme pomocí Huygensova principu. Štěrbin se stávají koherentními světelnými zdroji, od nichž se světlo šíří všemi směry. Vyšetříme, jaká bude intenzita světla po průchodu optickou mřížkou.

Paprsky 1 a 2 procházejí středy dvou sousedních štěrbin. Ve směru odchýleném o úhel  $\alpha$  (viz obr. 1) interferují nové paprsky 1' a 2'. Jejich dráhový rozdíl je  $\delta$  a platí pro něj:

$$\delta = d \cdot \sin \alpha \quad (1)$$

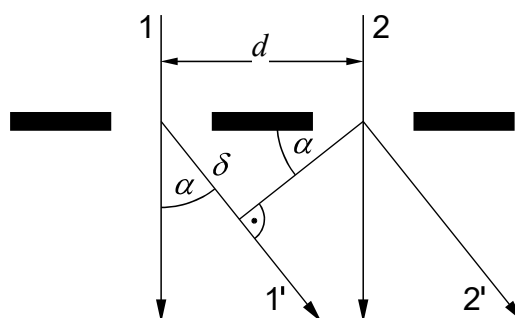
Bude-li dráhový rozdíl roven celistvému násobku vlnové délky  $\lambda$ , budou se paprsky v tomto směru interferencí maximálně zesilovat. Podmínka pro maximum intenzity ve směru daném úhlem  $\alpha$  je tedy:

$$d \cdot \sin \alpha = k \lambda \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

Změříme-li úhel  $\alpha$ , pak ze známé hodnoty mřížkové konstanty  $d$  můžeme určit vlnovou délku použitého světla

$$\lambda = \frac{d \cdot \sin \alpha}{k} \quad (3)$$

Číslo  $k$  se nazývá řádem maxima. Pro  $k = 0$  musí být  $\alpha = 0$  pro všechny vlnové délky. V tomto případě hovoříme o maximu nultého řádu. Symetricky po obou jeho stranách lze pak pozorovat pro různé vlnové délky maxima prvního, druhého i třetího řádu. Maxima dalších řádů bývají již málo intenzivní. Nejméně odchýlena od přímého směru je vždy barva fialová a nejvíce barva červená.



Obr. 1 Průchod světelných paprsků mřížkou

Důležitým parametrem mřížky je její rozlišovací schopnost  $\lambda/\Delta\lambda$ , kde  $\Delta\lambda$  je nejmenší rozdíl vlnových délek dvou spektrálních čar, které je možno mřížkou ještě rozlišit. Lze dokázat, že platí:

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = km, \quad (4)$$

tj. rozlišovací schopnost mřížky závisí na použitém řádu spektra  $k$  a na celkovém počtu vrypů na mřížce  $m$ . Přesnější měření vlnových délek světla se provádí k tomuto účelu sestrojenými Michelsonovými interferometry.

Použijeme-li jako zdroj světla například vlákno žárovky (tuhé těleso), uvidíme spektrum *spojité* – barva se bude plynule měnit od fialové přes modrou, zelenou, žlutou až k červené. Naopak budou-li zdrojem světla excitované atomy plynů nebo par (např. výbojka), bude spektrum *čárové* – složené z jednotlivých izolovaných barev. Neschopnost klasické fyziky vysvětlit vznik čárových (diskrétních) spekter plynů a par (a spojitéch spekter pevných látek) přispěla počátkem dvacátého století k její krizi a ke vzniku kvantové fyziky. Známým teoretickým pokusem o vysvětlení stavby a vyzařování atomů byl r. 1913 Bohřův „polokvantový“ model atomu.

Již v roce 1885 však sestavil švýcarský fyzik Johan Jacob Balmer empirický vzorec, který přesně předpovídá vlnovou délku čtyř viditelných emisních čar vodíku. Tyto emisní čáry (červená, modrozelená, fialová<sup>2</sup>, fialová<sup>1</sup>) vešly do dějin fyziky pod názvem Balmerova serie. Balmerův vztah zní:

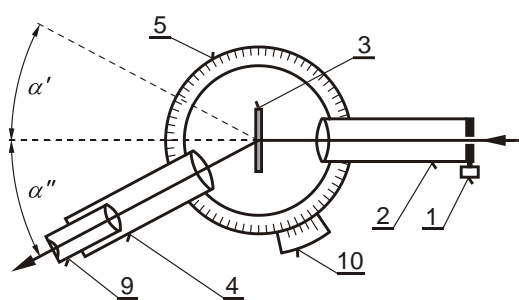
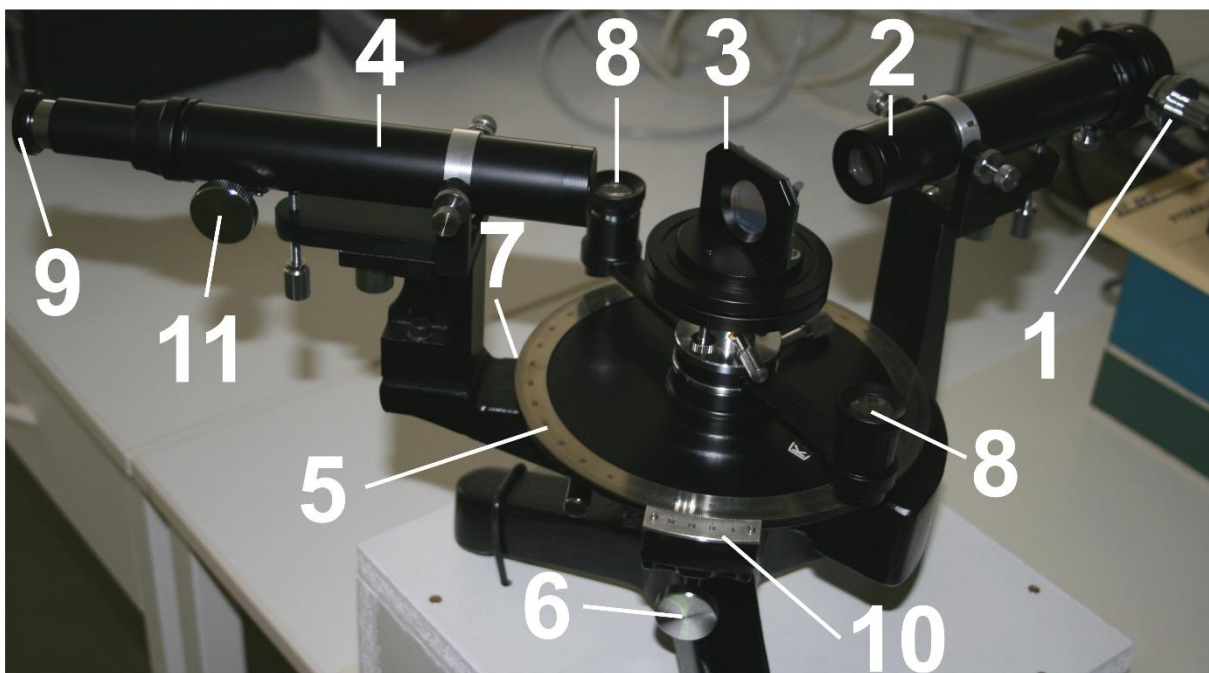
$$\frac{1}{\lambda_n} = R \cdot \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (6)$$

kde  $n$  . . . . . je celé číslo 3, 4, 5 nebo 6 (později nazváno *kvantovým*)  
 $\lambda_n$  . . . . . vlnová délka příslušející číslu  $n$   
 $R$  . . . . . konstanta, dnes nazývaná Rydbergova

### **Měřicí přístroje**

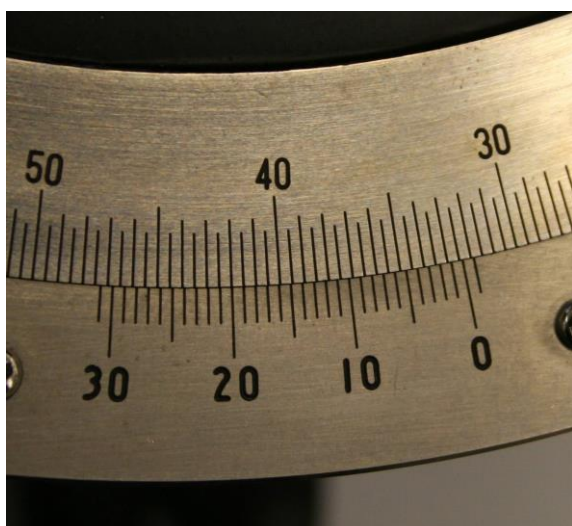
K měření použijeme přístroje zvaného spektrometr (obr. 2). Jeho hlavní části jsou kolimátor **2**, pozorovací dalekohled **4**, držák pro upevnění mřížky (popř. hranolu) a kruh **5** s úhломěrnou stupnicí a noniem. Kolimátor slouží k vytvoření rovnoběžného svazku paprsků k osvětlení celé plochy mřížky. Na vstupu má štěrbinu, jejíž šířku lze měnit šroubem **1**. Štěrbina leží v ohniskové rovině achromatické (bez barevné vady) spojně čočky, která je umístěna na výstupu z kolimátoru. Kolimátor je pevně spojen s podstavcem přístroje.

Dalekohled **4** můžeme při uvolnění šroubu **6** volně otáčet; při utažení šroubu **6** s ním lze jemně pohybovat pomocí mikroposuvného šroubu **7** v rozsahu asi  $\pm 5^\circ$ . S dalekohledem je pevně spojena noniová stupnice **10** (detail viz obr. 3), na níž odečítáme polohu dalekohledu (noniové stupnice jsou u tohoto přístroje dvě, ale používejte jen tu vpravo). Nejmenší dílek stupnice je  $0,5^\circ$  a nonius je 30-ti dílkový. To znamená, že je možno měřit s přesností na  $1/30 \times 0,5^\circ$  tj. na minuty.



- 1 – šroub pro nastavení šířky štěrbin
- 2 – kolimátor
- 3 – mřížka
- 4 – dalekohled
- 5 – kruh s úhломěrnou stupnicí
- 6 – uvolňovací šroub na hrubý posuv dalekohledu
- 7 – jemný posuv dalekohledu (po utažení šroubu 6)
- 8 – lupa na čtení stupnice
- 9 – okulár
- 10 – nonius
- 11 – zaostření obrazu

Obr. 2 Spektrometr



Nulová ryska nonia leží v **první** polovině stupně 33, kryje se 19-tý dílek, takže úhel je  $32^{\circ} 19'$



Nulová ryska nonia leží v **druhé** polovině stupně 33, kryje se 14-tý dílek, takže úhel je  $32^{\circ} 44'$  ( $14' + 30'$ )

Obr. 3 Příklad čtení úhlu z noniové stupnice

Je nutno dávat pozor, zda nulová ryska nonia ukazuje do první poloviny nebo do druhé poloviny stupně. Ve druhém případě je třeba k hodnotě z nonia přičíst 30'. Střed zorného pole dalekohledu je vyznačen záměrným křížem.

### **Pokyny společné pro obě měření:**

- 1) Na mřížku nesahejte ani s ní nemanipulujte.
- 2) Výbojku postavte velmi těsně ke vstupní štěrbině kolimátoru (výšku výbojky nastavte pomocí přiložených podložek dle návodu u jednotlivých měření níže).
- 3) Přesuňte dalekohled **4** proti kolimátoru **2** tak, aby byl vidět přímý obraz štěrbin.
- 4) Zasouváním a vysouváním okuláru **9** zaostřete záměrný kříž (látka musí být odkryta, aby byl kříž vidět). Poté zaostřete obraz štěrbin pomocí knoflíku **11** na pravé straně okuláru.
- 5) Šroubem **1** nastavte šířku štěrbin co nejmenší tak, aby byl dostatek světla pro pozorování. Pro maximální jas je nutno zdroj světla vycentrovat do optimální polohy. Záměrný kříž (jeho svislou část) zaměřujte vždy na **pravý** (nepohyblivý) okraj štěrbin.
- 6) Zaměřte přesně pravý okraj štěrbin. Úhel musí být nyní 0° 00'. Pokud ne, požádejte vyučujícího o seřízení nuly.
- 7) Zaměřte jednotlivá maxima prvních, druhých a třetích řádů. Maxima se v dalekohledu jeví jako obrazy štěrbin pod různými úhly v různých barvách (pokud se spektrum skládá z diskrétních vlnových délek). Obraz je možno během měření doostřovat knoflíkem **11**.
- 8) Úhly pro jednotlivé barvy měřte na obě strany od přímého paprsku. Při poloze dalekohledu vlevo získáváte rovnou úhly od přímého paprsku –  $\alpha'_1, \dots, \alpha'_n$ , při měření vpravo získáte úhly  $\beta_1, \dots, \beta_n$ , a úhly od přímého paprsku  $\alpha''$  dopočtete jako doplněk do 360° (již doma). Z hodnot vpravo a vlevo se pak bere aritmetický průměr.
- 9) Úhly měřte a zapisujte s přesností na minuty. U méně viditelných čar můžete zvětšit šířku štěrbin. Zaměřujte ale stále na pravý (nepohyblivý) okraj štěrbin!
- 10) Spektrometr zakryjte černou látkou kvůli omezení vnějšího světla. Je však nutno průběžně kontrolovat, zda látka nebrání chodu paprsků. Aby byl vidět záměrný kříž, je nutno látku mírně nadzdvihnout.

### **Měření**

Vlastní měření se skládá ze dvou samostatných částí:

#### **A. Zjištění mřížkové konstanty pomocí světla o známé vlnové délce.**

- Jako zdroj se používá sodíková výbojka (po zapnutí chvíli trvá, než se výbojka plně nažhaví), která vydává (převážně) světlo žluté barvy s vlnovou délkou  $\lambda = 589,3$  nm. Je to průměrná vlnová délka sodíkového dubletu, což jsou dvě velmi blízké vlnové délky.

- Výška výbojky: vstupní štěrbina musí být ve výši ochranného skla na výbojce
- Přesuňte dalekohled proti kolimátoru tak, aby byl vidět přímý obraz štěrbin. V okuláru vidíme dva velmi blízké obrazy štěrbin žluté barvy (v této poloze pro maximum 0. řádu). Pro naše účely postačí zaměřit kříž mezi ně (získáme tak přímo průměrnou hodnotu). Nyní změřte úhly ohybových maxim 1. a 2. řádu **pro tuto žlutou barvu** (doleva a doprava). Hodnoty zapisujte do tabulky 1. Z naměřených úhlů se vypočte ze vzorce (2) mřížková konstanta  $d$  a jako výsledek se vezme aritmetický průměr (ostatní viditelné barvy ignorujte).

Tabulka 1: Naměřené a vypočtené hodnoty pro sodíkovou výbojku

řád	barva	$\alpha'$ [°]	$\beta$ [°]	$\alpha'' = 360 - \beta$ [°]	$\alpha = \frac{\alpha' + \alpha''}{2}$ [°]	$d$ [nm]
1	žlutá					
2	žlutá					

## B. Měření emisního spektra vodíku ve viditelné oblasti

- Spektrum vodíku se měří pomocí výbojky s čistým vodíkem, která nabíhá rychle a stačí ji tak zapnout těsně před tím, než ji budete potřebovat.
- Výška výbojky: vstupní štěrbina musí být uprostřed červeně zářící části výbojky
- Pro zápis a výpočet naměřených hodnot můžete použít tabulku 2 (při měření zapisujte hodnoty ve stupních a minutách a teprve doma převed'te na desetinný výraz ve stupních).

Tabulka 2: Naměřené a vypočtené hodnoty pro vodíkovou výbojku

řád	barva	$\alpha'$ [°]	$\beta$ [°]	$\alpha'' = 360 - \beta$ [°]	$\alpha = \frac{\alpha' + \alpha''}{2}$ [°]	$\lambda$ [nm]	$n$	$R$ [cm <sup>-1</sup> ]
1	fialová1							
	fialová2							
	modrozelená							
	červená							
2	fialová1							
	fialová2							
	modrozelená							
	červená							
3	fialová2							
	modrozelená							

### Pracovní úkol

- 1) Pro sodíkovou výbojku změřte polohy ohybových maxim 1. a 2. řádu pro žlutou barvu na obě strany od přímého paprsku.
- 2) Proměřte spektrum vodíkové výbojky do 3. řádu (viz tabulka). Pozor – fialová1 je hůře viditelná a ve 2. řádu již nemusí být znatelná.

- 3) Vypočtete (již doma) mřížkovou konstantu  $d$  a počet vrypů na 1 mm.
- 4) Pomocí mřížkové konstanty z úkolu 3) vypočtete příslušné vlnové délky.
- 5) Přiřaďte jednotlivým barvám kvantová čísla  $n$ .
- 6) Na základě Balmerova vztahu vypočtete pro každou vlnovou délku Rydbergovu konstantu  $R$ . Dále spočtete její střední hodnotu a směrodatnou chybu. Veškeré informace týkající se chyb měření najdete v úvodní části skript v kapitole „Chyby měření“.
- 7) Vypočtete průměrnou vlnovou délku všech 4 pozorovaných barev a porovnejte ji s teoretickými hodnotami vypočtenými z Balmerova vztahu (za  $R$  dosaďte tabulkovou hodnotu).
- 8) Vypočtete hodnoty  $1/\lambda$  a  $1/4 - 1/n^2$ , uveďte je do tabulky a sestrojte graf závislosti výrazu  $1/\lambda$  na  $(1/4 - 1/n^2)$ . Pomocí lineární regrese (viz „Chyby měření“, odst. D) najděte rovnici této přímkové závislosti. Směrnici přímky je totiž přímo Rydbergova konstanta (zvolte proto pro tento graf vhodné jednotky u vlnové délky). Graf a přímku sestrojte ze všech naměřených hodnot (nikoli jen z 1. řádu). Protože vztah (6) je prostá přímá úměra, přímka prokládaná lineární regresí musí být vypočítána tak, aby procházela počátkem ( $y = kx + q$ ;  $q = 0$ ). Pro výpočet je nutno použít vzorec na str. 19 nahoře. (V Excelu je nutno při „Přidávání spojnice trendu“ zaškrtnout volbu „ $Y = 0$ “ na panelu „Možnosti“.)
- 9) Porovnejte obě hodnoty Rydbergovy konstanty s tabulkovou hodnotou  $R = 109\,737,314\,3\text{ cm}^{-1}$ .