

# Hranolový spektrometr

## a vodíkové spektrum

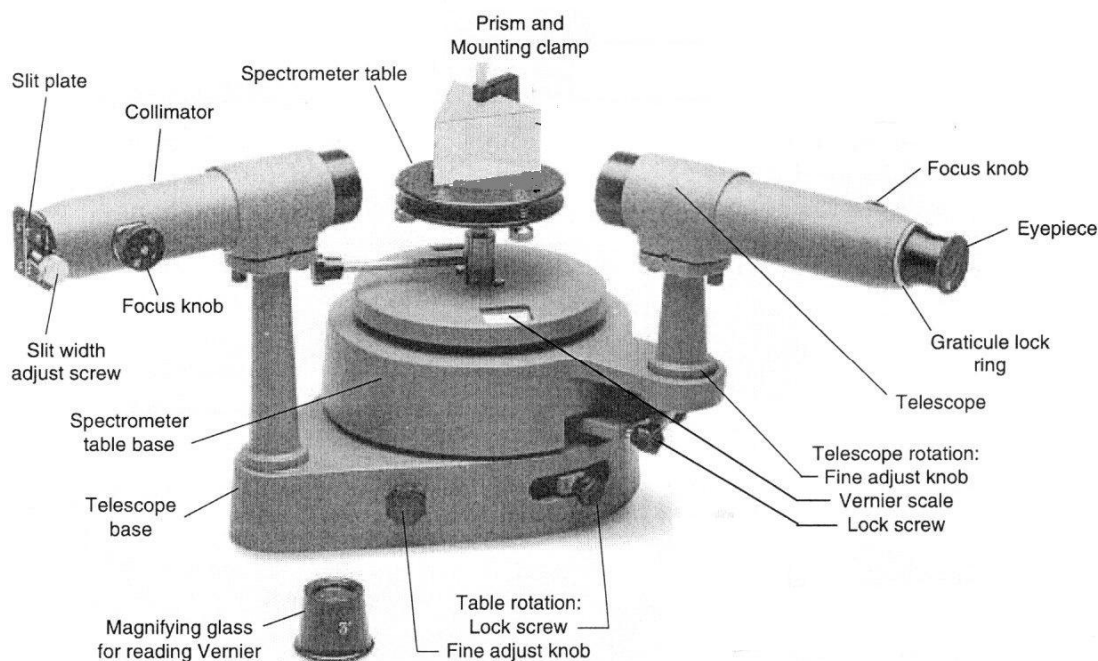
### Úkoly

1. Okalibrujte hranolový spektrometr.
2. Určete vlnové délky spektrálních čar vodíkové výbojky.
3. Určete kvantové elektronové přechody v atomu vodíku.
4. Určete absorpční oblasti vybraných vzorků kapalných a pevných látek.
5. Stanovte index lomu hranolu (volitelná úloha).

**Potřeby:** Viz seznam v deskách u úlohy na pracovním stole.

### Obecná část

**Spektroskop** je optický přístroj k pozorování spekter. Umožňuje-li nám navíc určit vlnové délky ve spektru, nazýváme ho **spektrometr**. Podle typu disperzního elementu rozeznáváme spektroskop hranolový a mřížkový. Předmětem této úlohy je seznámit se s hranolovým spektroskopem, proto u dalšího omezení pouze na tento typ spektroskopu. Jeho schéma je

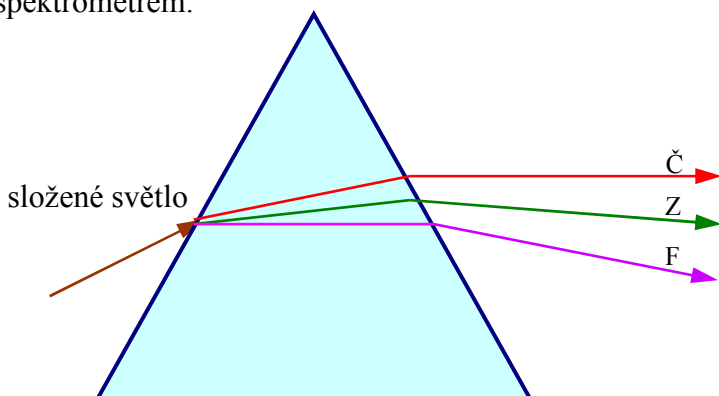


Obr 1. – HRANOLOVÝ SPEKTROMETR

Hranolový spektrometr je složen z kolimátoru, optického hranolu, teleskopu a goniometru (stolek spektroskopu), kterým je možné nezávisle nastavit polohu hranolu a teleskopu. K rozkladu studovaného světla dochází při jeho průchodu hranolem. Dopadá-li světelný paprsek na rovinné rozhraní vzduch/hranol pod úhlem  $\alpha$  určuje index lomu hranolu  $n$  jednoznačně úhel lomu  $\beta$  paprsku, což matematicky vyjadřuje **Snellův zákon**

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c}{v} = n, \quad (1)$$

kde  $c$  značí rychlost světla ve vakuu a  $v$  rychlost světla v prostředí hranolu. Rychlost šíření světla je závislá na jeho frekvenci (vlnové délce) a ze vztahu (1) přímo vyplývá, že i úhel lomu je různý pro různé frekvence optického záření. Z viditelného oboru (t.j. světlo o vlnové délce zhruba 400 nm – 760 nm) obvykle vykazuje nejvyšší rychlost šíření (a také se nejméně láme) červené světlo, lom u ostatních barev směrem k fialové narůstá (a rychlost šíření klesá). Tento jev se nazývá **disperze světla**. Graf závislosti rychlosti šíření světla v prostředí hranolu na jeho vlnové délce, případně závislost indexu lomu  $n$  hranolu na vlnové délce  $\lambda$  se nazývá **disperzní křivkou hranolu** a její znalost nám umožňuje určit frekvence, resp. vlnové délky studovaného spektra daným spektrometrem.



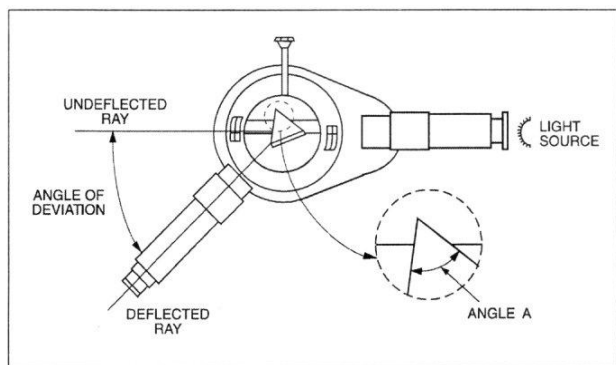
Obr. 2. - PRŮCHOD SVĚTLA HRANOLEM

Při průchodu světla optickým hranolem dochází k lomu světelného paprsku na obou rozhraních vzduch/hranol a hranol/vzduch (viz obr. 2), a tím je rozklad světla výraznější než při jednoduchém lomu. Bílé světlo se tak po průchodu hranolem rozloží na spojité spektrum nazývané **spektrém hranolovým**.

## PRINCIP MĚŘENÍ (metoda minimální deviace)

Úhel deviace světelného paprsku procházejícího hranolem o vrcholovém úhlu  $A=60^\circ$  je naznačen na Obr. 3. Pro danou vlnovou délku dopadajícího světla existuje charakteristický úhel dopadu, pro který je úhel deviace minimální  $D_m$ . Lze odvodit, že mezi indexem lomu materiálu  $n$ , ze kterého je zhotoven hranol, vrcholovým úhlem hranolu  $A$  a úhlem minimální deviace  $D_m$  je splněn následující vztah

$$n = \frac{\sin\left(\frac{A + D_m}{2}\right)}{\sin\left(\frac{A}{2}\right)} \quad (2)$$



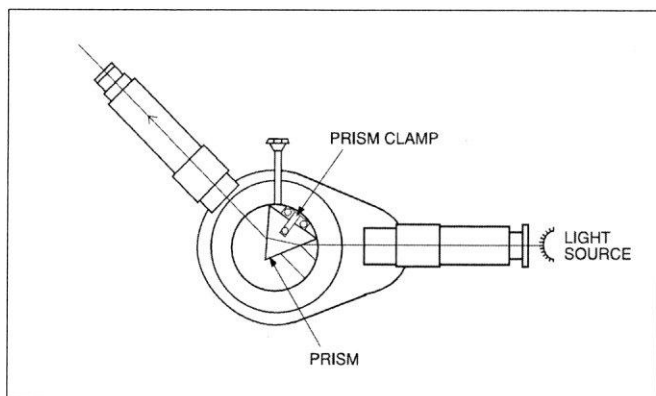
Obr 3. – ÚHEL MINIMÁLNÍ DEVIACE

Ze závislosti indexu lomu na vlnové délce vyplývá, že i úhel minimální deviace  $D_m$  je spektrálně závislý. Proměřením závislosti  $D_m(\lambda)$  a s použitím vztahu (2) můžete získat index lomu hranolu pro dané vlnové délky světla a potažmo také disperzní křivku hranolu.

## Postup měření

- 1) Nejprve provedeme **kalibraci spektroskopu**. K tomuto úkolu se velice dobře hodí čárové spektrum rtuťové-kadmiové výbojky, jež obsahuje vedle několika slabších i řadu intenzivních spektrálních čar (viz Tabulka v příloze A).
  - i. Pomocí svěry a šroubů připevněte hranol na stolek spektroskopu tak jak je naznačeno na Obr. 4
  - ii. Umístěte světelný zdroj několik centimetrů před vstupní štěrbinu kolimátoru.
  - iii. Nastavte teleskop a stolek spektrometru tak, aby obraz štěrbinu byl pozorovatelný teleskopem.

Změřením úhlu natočení teleskopu  $\theta$  při zaměření dané kalibrační spektrální čáry (poloha hranolu je v tomto případě neměnná) určíte závislost  $\lambda(\theta)$ , kterou budete používat v dalším úkolu pro určení vlnových délek vodíkové výbojky. Úhel na vernierově stupnici (Obr. 5) odečítejte s přesností alespoň 5 minut, nejlépe však s přesností 1 minuty. Proměřené hodnoty vynesete do tabulky a do grafu. Diskrétními experimentální body proložte křivku (polynom 3. stupně). Případné špatně odečtené nebo přiřazené body (spektrální čáry) z kalibrace vyřaďte!



Obr. 4. – UMÍSTĚNÍ HRANOLU



Obr. 5. – VERNIEROVA STUPNICE

- 2) **Určení neznámé vlnové délky** spektrálních čar vodíkové výbojky. K výpočtu vlnových délek  $\lambda$  použijte vámi určený kalibrační vztah  $\lambda(\theta)$ . Výsledky zaokrouhľujte vždy na tři platná místa, t.j. s přesností na jednotky nanometrů. Vypočítané hodnoty pak zapište do tabulky a porovnejte je s hodnotami tabelovanými. Kromě měření a výpočtu spektrálních čar Balmerovy série, spočítejte podle vztahu B3 (viz. příloha B.) také hlavní kvantová čísla  $k$  těch hladin, které se podílejí na těchto elektronových přechodech. Uvědomte si, že hodnoty kvantových čísel  $k$  by se měly blížit celým číslům (3, 4, 5).

### 3) Určení indexu lomu hranolu metodou minimální deviace (volitelná úloha)

pro všechny studované spektrální čáry atomu vodíku. Výsledky srovnajte s tabelovanými daty. Postup **měření úhlu minimální deviace** je následující (s pomocí učitele):

- i. Dívající se do teleskopu, otáčejte pomalu stolek goniometru v jednom a druhém smyslu. Prověřte, že se přitom úhel lomu (a tedy i pozice) pozorované spektrální čáry mění. Otáčejte stolek spektrometru do polohy ve které je tento úhel minimální. Následně otáčejte teleskopem tak, aby vertikální čára záměrného kříže ležela na hraně obrazu štěrbinu dané spektrální čáry. Použijte jemné nastavení rotace teleskopu a stolku spektroskopu pro nejpřesnější určení úhlu minimální deviace. Nakonec zaznamenejte úhel teleskopu odečtením hodnoty na vernierově stupnici.

- ii. Aniž by jste měnili polohu stolku spektroskopu, odejměte hranol a otočte teleskopem tak, aby záměrný kříž ležel na hraně obrazu štěrbinu (zobrazujícího v tomto případě nerozložené světlo) a zaznamenejte úhel na vernierově stupnici. Rozdíl mezi touto hodnotou a hodnotou úhlu určenou v předchozím bodě je hledaná hodnota úhlu minimální deviace

**4) Určení absorpčních oblastí** vybraných barevných filtrů. K realizaci tohoto úkolu použijte **Bunsenův spektroskop** (viz. Obr. 6) s pevným nastavením teleskopu a kolimátoru (štěrbinu). Na rozdíl od předcházejících úkolů nepozorujete v tomto případě spektrum emisní, ale doplňkové spektrum absorpční. Zatímco spektra látek v plynném skupenství jsou spektra čárová, u látek v kapalném skupenství a u pevných látek pozorujeme spektra pásová. Navíc hranice pásů nebývají ostré, takže měření je spíše jen orientačního charakteru.



Obr. 6.

Vlastní experiment provádíte tak, že před kolimátor (štěrbinu) spektrometru dáte zdroj bílého světla (žárovku). V zorném poli dalekohledu by mělo být pozorovatelné celé (spojité) spektrum viditelného světla – červená by měla začínat u pátého dílku. Pak mezi zdroj bílého světla a štěrbinu vkládejte postupně jednotlivé vzorky (kyvety s barevnými roztoky event. barevná skla) a kvalitativně určujte příslušné hranice tj. odečítejte dílky, kde začínají a končí absorpční oblasti. Dílky převedte na vlnové délky s využitím hodnot pro dispersní křivku spektroskopu, které jsou v tabulce nalepené na zdi event. jsou přiloženy v deskách. Výsledné pozorování a vztahy mezi barvou kapaliny případně pevné látky a absorpčního spektra vysvětlíte.

## PŘÍLOHY

### A. Tabulka kalibračních sektrálních čar Hg-Cd výbojky

Pořadí (zleva)	Barva čáry	Intenzita čáry	Prvek	Vlnová délka $\lambda$ (nm)
1	červená	silná	Cd	644
2	žlutý dublet	silná	Hg	579/577
3	žlutozelená	silná	Hg	546
4	zelená	silná	Cd	509
5	modrozelená	velmi slabá	Hg	492
6	modrozelená	silná	Cd	480
7	modrá	slabá	Cd	468
8	modrá	silná	Hg	436

### B. Spektrum atomu vodíku:

Vodíkový atom představuje jednoduchý kvantový systém tvořený jedním elektronem lokalizovaným v potenciálové jámě atomového jádra. Pro energetické hladiny elektronu platí vztah

$$E_n = -\frac{h.c.R}{n^2} \quad , \quad (B1)$$

kde  $R = 10\,973\,731,6 \text{ m}^{-1}$  je **Rydbergova konstanta**,  $h = 6,626\,068 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$  **Planckova konstanta**,  $n$  **hlavní kvantové číslo** a  $c = 299\,792\,458 \text{ m.s}^{-1}$  **rychlost světla ve vakuu**.

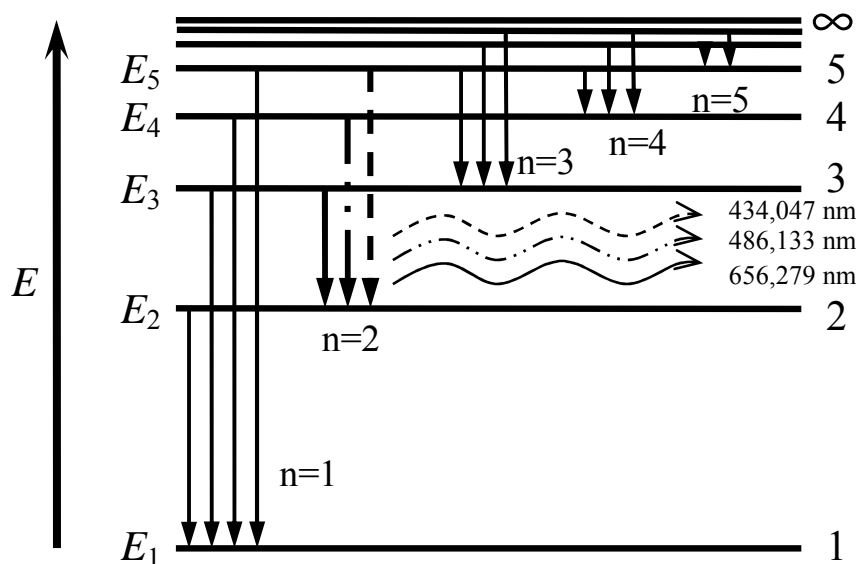
Při přechodu elektronu z vyšší energetické hladiny  $k$  na nižší  $n$  (při tzv. **deexcitaci**) se vyzařuje elektromagnetické záření o frekvenci  $f$  (resp. vlnové délce  $\lambda$ ) v souladu se vztahem (**POZOR** na to, že energie vázaného elektronu **je záporná !!!**)

$$h.f = \frac{h.c}{\lambda} = E_k - E_n = h.c.R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right) \quad . \quad (B2)$$

K excitaci elektronu na vyšší energetickou hladinu dochází při výboji v parách tohoto plynu. Při následné deexcitaci se tedy vyzaří elektromagnetické záření o vlnové délce  $\lambda$ , pro niž platí **Rydbergův vztah**

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right) \quad . \quad (B3)$$

Ze vztahu (4) je patrné, že lze vodíkové spektrum rozdělit do několika (teoreticky i nekonečně mnoha) sérií spektrálních čar, z nichž každá je charakterizována pevným kvantovým číslem  $n$  příslušným hladině, na kterou vždy elektron sestoupí po deexcitaci z libovolné vyšší energetické hladiny s kvantovým číslem  $k$  ( $k > n$ ) – viz následující obrázek



ELEKTRONOVÉ PŘECHODY V ATOMU VODÍKU

Jednotlivé série byly pak nazvány podle svých objevitelů:

- $n = 1$  ..... série Lymanova (v ultrafialové části spektra)
- $n = 2$  ..... série Balmerova (jediná ve viditelné části spektra)
- $n = 3$  ..... série Paschenova (v infračervené části spektra)
- $n = 4$  ..... série Brackettova (v infračervené části spektra)
- $n = 5$  ..... série Pfundova (v infračervené části spektra)

Čáry vodíkového spektra, jež leží ve viditelném oboru elektromagnetického záření, přísluší pouze do **Balmerovy série**, pro kterou platí  $n = 2$ .