

Úkol

1. S použitím spektra rtuti zkalibrujte hranolový spektrometr. Pro vyloučení hrubých chyb vynesete kalibrační křivku ihned do grafu.
2. Ověřte vlnové délky sodíkových dubletů (alespoň tří).
3. Na základě pozorování sodíkových dubletů diskutujte rozlišovací schopnost spektrometru. Diskutujte přesnost takto určené rozlišovací schopnosti.
4. Prohlédněte si spektra výbojek s náplní He, Ne, Ar, N₂ a CO₂. Určete vlnové délky nejjasnějších čar. Porovnejte s tabulkovými hodnotami.
5. Změřte vlnové délky čar H_α, H_β, H_γ Balmerovy serie vodíkového spektra. Vypočítejte Rydbergovu konstantu.

Teorie

V této úloze studujeme atomová emisní spektra plynů. Využíváme k tomu hranolový spektrometr Hilgerova typu, jehož detailní popis je uveden ve studijním textu [1]. Tento spektrometr neudává přímo vlnové délky pozorovaných čar, je proto potřeba jej okalibrovat pomocí známých vlnových délek emisního spektra rtuti. Tabulkové hodnoty těchto vlnových délek jsou uvedeny v sekci výsledků měření v tabulce 1.

Pro rozlišovací schopnost r spektrometru platí vztah

$$r = \frac{\lambda}{d\lambda}, \quad (1)$$

který určuje minimální rozdíl vlnových délek λ a $\lambda + d\lambda$, který ještě spektrometr dokáže rozlišit. V tomto případě využijeme pro určení rozlišovací schopnosti měření dubletů sodíku.

Ve viditelném emisním spektru vodíku jsou pozorovatelné čtyři čáry H_α (červená), H_β (modrozelená), H_γ (modrá) a H_δ (fialová). Tyto čáry jsou součástí tzv. Balmerovy série, pro vlnočty jejíž spektrálních čar platí vztah

$$\sigma = \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (2)$$

kde R je Rydbergova konstanta a $n = 3, 4, 5, 6$ jsou přirozená čísla odpovídající jednotlivým čarům. Rydbergovu konstantu určíme z tohoto vztahu metodou nejmenších čtverců.

Výsledky

Úkol 1

Pomocí tabulkových hodnot vlnových délek spektrálních čar rtuti byla provedena kalibrace hranolového spektrometru. Skutečné hodnoty a naměřené hodnoty v obecných jednotkách jsou uvedeny v tabulce 1 a vzniklá kalibrační křivka je zobrazena v grafu na obrázku 1. Pro fit kalibrační křivky byl použit polynom pátého řádu, $f(x) = ax^5 + bx^4 + cx^3 + dx^2 + ex + f$, jehož koeficienty a až f jsou uvedeny v tabulce 2.

Úkol 2 a 3

V tabulce 3 jsou uvedené tabulkové hodnoty vlnových délek sodíkových dubletů λ_{tab} a naměřené hodnoty téhož λ_m . Tyto hodnoty jsou pak doplněny rozdíly vzdáleností obou čar v daném dubletu $d\lambda_{tab}$ resp. $d\lambda_m$. Poslední sloupec pak obsahuje rozdíl tabulkové a naměřené hodnoty pro tyto spektrální čáry. Soudě podle čtvrtého uvedeného dubletu v tabulce není rozlišovací schopnost spektrometru definovaná vztahem (1) lepší než 10^3 .

Úkol 4

Tabulka 4 obsahuje naměřené hodnoty vlnových délek spektrálních čar různých plynů.

Úkol 5

V tabulce 5 jsou uvedeny tabulkové a naměřené hodnoty vlnových délek spektrálních čar α , β a γ vodíku a odpovídající hodnoty n ve vztahu (2). Pomocí lineární regrese zobrazené v grafu na obrázku 2 získáme Rydbergovu konstantu

$$R = (10\,965 \pm 17) \times 10^3 \text{ m}^{-1}.$$

Tabulková hodnota Rydbergovy konstanty je

$$R_{tab} = 10\,973,732 \times 10^3 \text{ m}^{-1}.$$

Diskuse

Fit kalibrační křivky proveden bezprostředně po naměření hodnot vlnových délek spektrálních čar rtuti umožnil průběžně kontrolovat naměřené hodnoty čar ostatních zdrojů s tabulkovými hodnotami a tak se vyhnout hrubé chybě. Určitá chyba kalibrace byla způsobena jednak omezenou přesností spektrometru, tak i faktem, že především v modré oblasti spektra značně záleželo na úhlu, pod kterým se pozorovatel díval do okuláru.

Rozlišovací schopnost spektrometru byla určena na 10^3 , avšak tato hodnota je značně spekulativní. Je pravda, že v jednom případě se dublet, jehož čáry mají podle tabulek vzdálenost 0,5 nm, nepodařilo rozlišit, naopak se až podezřele dobře podařilo rozlišit dublet se vzdáleností pouze 0,1 nm, který měl navíc ještě vyšší vlnovou délku.

Rydbergovu konstantu se podařilo určit v rámci chyby shodně s tabulkovou hodnotou.

Závěr

Hranolový spektrometr byl úspěšně zkalibrován, byly proměřeny hodnoty vlnových délek sodíkových dubletů a pomocí tohoto měření byla odhadnuta rozlišovací schopnost spektrometru

$$r = 10^3.$$

Dále byly určeny vlnové délky nejjasnějších čar několika plynových vzorků včetně vodíku, z jehož čar byla spočítána Rydbergova konstanta

$$R = (10\,965 \pm 17) \times 10^3 \text{ m}^{-1}.$$

Reference

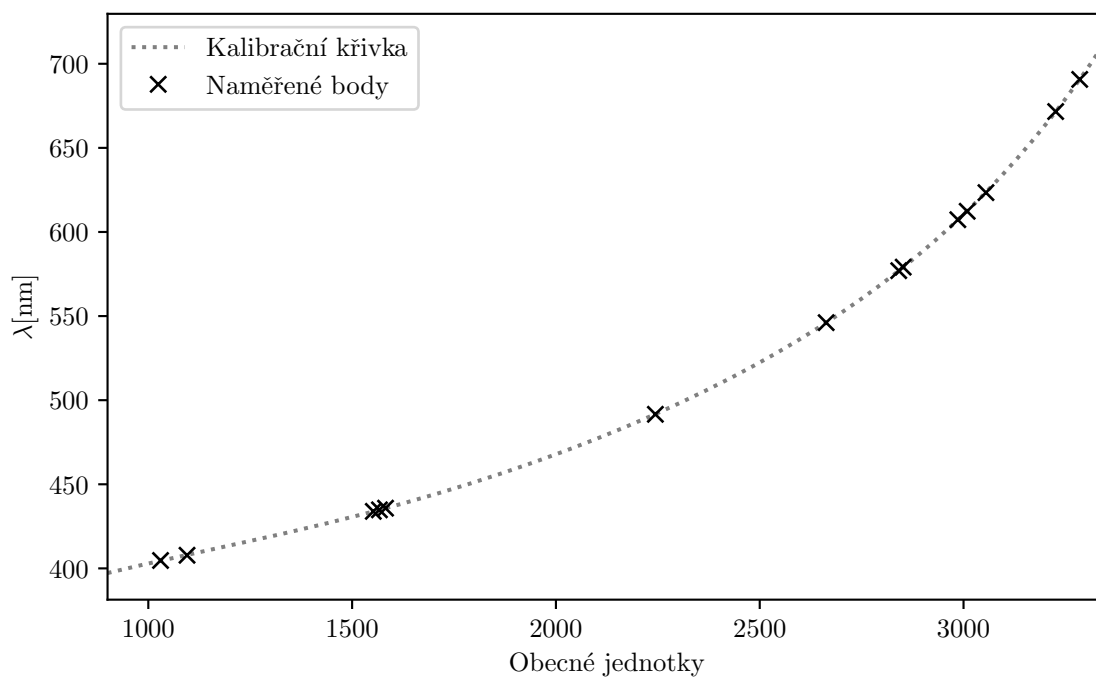
- [1] Pokyny k měření “Studium atomových spekter”, dostupné z
https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_415.pdf,
12. 11. 2019

λ [nm]	hodnota na stupnici [obecné jednotky]
690,7	3285
671,6	3226
623,4	3055
612,3	3009
607,3	2986
579,1	2852
577,0	2841
546,1	2663
491,6	2244
435,8	1582
434,8	1567
433,9	1552
407,8	1095
404,7	1030

Tabulka 1: Tabulkové hodnoty vlnových délek spektrálních čar rtuti a naměřené hodnoty v obecných jednotkách spektrometru

parametr	hodnota	chyba
a	$5,36 \times 10^{-15}$	$0,93 \times 10^{-16}$
b	$-4,81 \times 10^{-11}$	$1,03 \times 10^{-11}$
c	$1,80 \times 10^{-7}$	$0,45 \times 10^{-8}$
d	$-3,18 \times 10^{-4}$	$0,92 \times 10^{-5}$
e	$3,18 \times 10^{-1}$	$0,92 \times 10^{-2}$
f	$2,66 \times 10^2$	$0,34 \times 10^1$

Tabulka 2: Parametry fitu kalibrační křivky



Obrázek 1: Kalibrační křivka pro použitý spektrometr

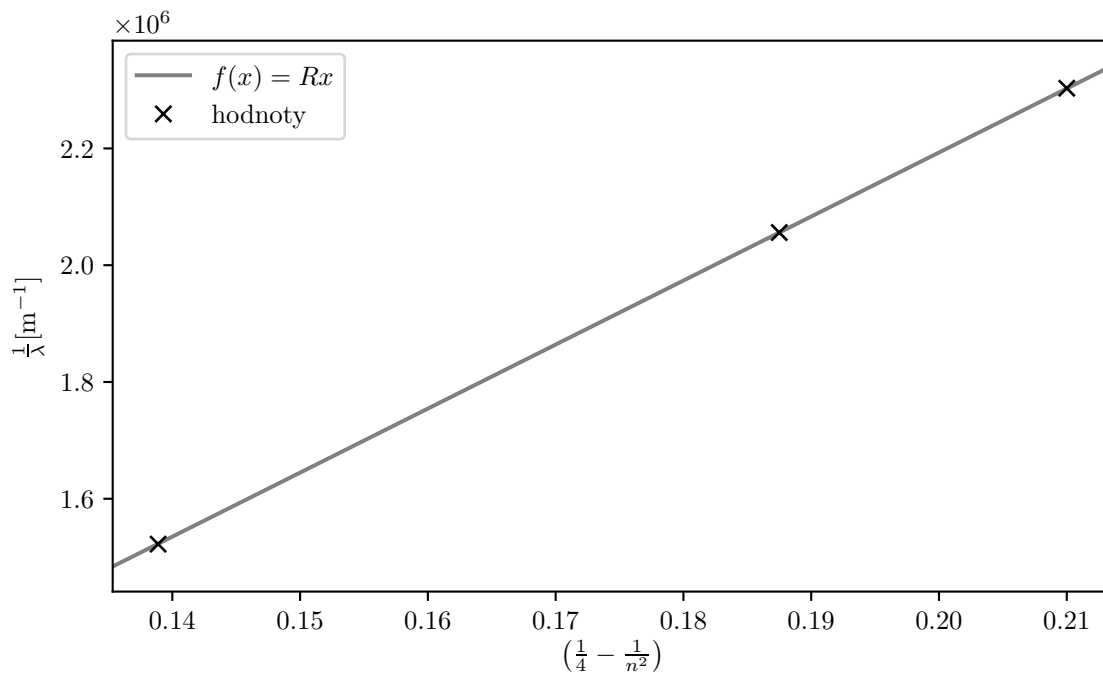
λ_{tab} [nm]	$d\lambda_{tab}$ [nm]	hodnota na stupnici [obecné jednotky]	λ_m [nm]	$d\lambda_m$ [nm]	$\ \lambda_{tab} - \lambda_m\ $ [nm]
616,1	0,7	3022	615,6	0,3	0,5
615,4		3021	615,3		0,1
589,6	0,6	2903	589,2	0,4	0,4
589,0		2901	588,8		0,2
568,9	0,1	2796	568,5	0,4	0,4
568,8		2794	568,1		0,7
515,4	0,5	2442	514,9	0,0	0,5
514,9		2442	514,9		0,0
498,3	0,4	2302	498,1	0,1	0,2
497,9		2301	498,0		0,1

Tabulka 3: Tabulkové a naměřené hodnoty vlnových délek dubletů sodíku a jejich rozdíly

Ar	λ_{Ar}	He	λ_{He}	Ne	λ_{Ne}	CO ₂	λ_{CO_2}	N	λ_{N}
[o. j.]	[nm]	[o. j.]	[nm]	[o. j.]	[nm]	[o. j.]	[nm]	[o. j.]	[nm]
3439	749,2	3216	668,3	3322	703,6	2988	607,6	3218	669,0
2971	603,8	3024	616,0	3122	641,1	2754	561,1	3190	660,5
2794	568,1	2897	588,0	3018	614,6	2480	519,8	3165	653,1
2475	519,1	2578	533,2	2886	585,7	2164	483,4	2986	607,2
2030	470,5	2334	501,8	2625	540,2	1789	450,4	2836	575,9
1798	451,1	2251	492,5	1605	437,3	1625	438,6	2605	537,2
1324	420,3	2040	471,4	2037	471,2	1180	412,5	2144	481,4
2690	550,3	1744	447,0	2354	504,1	3198	662,9	1874	457,1
2918	592,3							1441	427,0
3306	698,0								

Tabulka 4: Naměřené hodnoty vlnových délek spektrálních čar různých plynů

hodnota na stupnici [obecné jednotky]	λ_m [nm]	λ_{tab} [nm]	n []
3178	656,9	656,3	3
2193	486,4	486,1	4
1558	434,2	434,0	5

Tabulka 5: Tabulkové a naměřené hodnoty vlnových délek spektrálních čar vodíku a odpovídající n 

Obrázek 2: Lineární regrese naměřených vlnových délek čar vodíku