

Oddělení fyzikálních praktik při Kabinetu výuky obecné fyziky MFF UK

PRAKTIKUM IV – Jaderná a subjaderná fyzika

Úloha č. A15

Název: Studium atomových emisních spekter

Pracoval: Radim Pechal

dne 19. listopadu 2009

Odevzdal dne:

	Možný počet bodů	Udělený počet bodů
Práce při měření	0 – 5	
Teoretická část	0 – 1	
Výsledky měření	0 – 8	
Diskuse výsledků	0 – 4	
Závěr	0 – 1	
Seznam použité literatury	0 – 1	
Celkem	max. 20	

Posuzoval: dne

Pracovní úkol

1. S použitím spektra rtuti zkalibrujte hranolový spektrometr.
2. Ověřte vlnovou délku sodíkového dubletu.
3. Na základě pozorování sodíkového dubletu diskutujte rozlišovací schopnost spektrometru.
4. Prohlédněte si spektra výbojek s náplní Ar, He, Ne a CO₂. Určete vlnové délky nejjasnějších čar. Porovnejte s tabulkovými hodnotami.
5. Změřte vlnové délky čar H_α, H_β, H_γ Balmerovy série vodíkového spektra. Vypočítejte Rydbergovu konstantu.

Teoretický úvod

Při elektrickém výboji v prostředí, které tvoří nějaký plyn, můžeme sledovat emisní spektra. Ve světle, které je z plynu vyzařováno, jdou vidět diskretní spektrální čáry. Tyto diskretní hodnoty jsou důsledkem kvantování energie částic. Vyjdeme-li z Ritzova kombinačního principu a Bohrovy teorie, můžeme říci, že vlnová délka světla pro přechod částice z energetického stavu E_n do stavu E_m je dle [1] dána vztahem

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{hc} (E_n - E_m), \quad (1)$$

kde h je tzv. Planckova konstanta a c je rychlost světla ve vakuu. Pro vodík můžeme ve viditelné oblasti sledovat výrazné vodíkové čáry, tzv. Balmerova série. Pro jejich vlnovou délku λ můžeme vyjít ze vztahu 1 a vlnovou délku popsat ve tvaru

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

přičemž R je Rydbergova konstanta. Pro čáru H_α z Balmerovy série bereme $n = 3$, pro H_β $n = 4$. .

Pro zjednodušený model, kdy elektron obíhá kolem pevného jádra dostáváme Rydbergovu konstantu

$$R_\infty = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 ch}, \quad (3)$$

kde m_e je hmotnost elektronu a e je náboj elektronu. V případě, že nezanedbáváme hmotnost atomového jádra M , dostáváme pro Rydbergovu konstantu R hodnotu

$$R = R_\infty \left(1 + \frac{m_e}{M}\right). \quad (4)$$

Při měření používáme hranolové spektrometr. Rozlišení Ro tohoto spektrometru můžeme určit vztahem

$$Ro = \frac{\lambda}{d\lambda}, \quad (5)$$

kde $d\lambda$ je minimální rozdíl vlnových délek, které od sebe umíme rozlišit.

Výsledky měření

Nejdříve jsem si okalibroval stupnici. Využíval jsem k tomu známé spektrum rtuťové výbojky. Zaznamenával jsem počty dílů d stupnice pro známé velikosti vlnové délky λ spektrálních čar. Hodnoty jsem zapsal do tabulky 1. Tyto hodnoty jsem fitoval polynomem pátého řádu, tedy funkcí ve tvaru

$$\lambda = \alpha \cdot d^5 + \beta \cdot d^4 + \gamma \cdot d^3 + \delta \cdot d^2 + \varepsilon \cdot d + \zeta. \quad (6)$$

Získal jsem nafitované koeficienty

$$\begin{aligned}\alpha &= (4,5 \pm 1,5) \cdot 10^{-15} \text{ nm} \cdot \text{d}^{-5}, \\ \beta &= (-3,1 \pm 1,3) \cdot 10^{-11} \text{ nm} \cdot \text{d}^{-4}, \\ \gamma &= (9 \pm 5) \cdot 10^{-8} \text{ nm} \cdot \text{d}^{-3}, \\ \delta &= (-12 \pm 8) \cdot 10^{-5} \text{ nm} \cdot \text{d}^{-2}, \\ \varepsilon &= (0,12 \pm 0,06) \text{ nm} \cdot \text{d}^{-1}, \\ \zeta &= (354 \pm 17) \text{ nm}.\end{aligned}$$

Naměřené body jsem proložil nafitovanou závislostí a znázornil v grafu 1 jako kalibrační křivku.

d	λ [nm]	d	λ [nm]
656 ± 1	404,7	2462 ± 1	577,0
720 ± 1	407,8	2476 ± 1	579,1
1174 ± 1	433,9	2608 ± 1	607,3
1184 ± 1	434,8	2630 ± 1	612,3
1204 ± 1	435,8	2676 ± 1	623,4
1864 ± 1	491,6	2852 ± 1	671,6
2282 ± 1	546,1	2910 ± 1	690,7

Tabulka 1: Kalibrace stupnice použitého spektrometru.

Dále jsem zkoumal vlnovou délku sodíkového dubletu. Měřil jsem tři dvojice spektrálních čar, jejichž vlnové délky se lišily velmi málo. Toto pozorování jsem využil k určení rozlišovací schopnosti spektrometru Ro . K jejímu výpočtu jsem použil vztah 5. Druhá dvojice čar ($\lambda = 569,1 \text{ nm}$ a $\lambda = 568,7 \text{ nm}$) byly na pokraji rozlišitelnosti. Proto předpokládám, že použitý spektrometr má rozlišení

$$Ro = 1568.$$

Naměřené hodnoty jsem porovnal s tabulkovými hodnotami. Vše jsem zapsal do tabulky 2.

d	λ [nm]	λ_{tab} [nm]	Ro
2528 ± 1	590,0	589,59	479
2522 ± 1	588,8	589,00	
2420 ± 1	569,1	568,86	1568
2418 ± 1	568,7	568,82	
2646 ± 1	616,0	616,08	1300
2644 ± 1	615,6	615,42	

Tabulka 2: Spektrální čáry sodíkového dubletu.

Dále jsem se prohlédl spektra pro argon, neon, helium a oxid uhličitý. Naměřené vlnové délky prvků jsem srovnal s příloženými tabulkami a zapsal do tabulek 3 až 6. V tabulkách uvádím také relativní intenzitu I .

Posledním úkolem bylo proměření Balmerovy série vodíku. Určil jsem vlnové délky čar H_α , H_β a H_γ . Těmto čarám jsem přiřadil n . Hodnoty jsem zapsal do tabulky 7 a fitoval vztahem (2). Vyšlo mi

$$R = (1,0978 \pm 0,0074) \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}.$$

Atom vodíku je tvořen protonem, který je v jádře a elektronem, který obíhá ve slupce. Platí tedy, že hmotnost jádra $M = m_p$, kde m_p je hmotnost protonu. V [2] jsem našel $m_e = 9,109534(47) \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ a $m_p = 1,6726845(86) \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. Ze vztahu 4 jsem tak určil

$$R_\infty = (1,0973 \pm 0,0074) \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}.$$

d	λ [nm]	λ_{tab} [nm]	I
2952 ± 1	705,0	706,722	400
2924 ± 1	695,3	696,543	400
2746 ± 1	641,3	641,632	100
2590 ± 1	603,2	604,323	100
2372 ± 1	560,6	560,673	500
2344 ± 1	555,9	559,746	500
2304 ± 1	549,3	549,587	1000
2094 ± 1	519,0	518,757	800
2074 ± 1	516,4	516,282	500
1646 ± 1	470,2	470,232	1200
1528 ± 1	460,0	459,610	1000
1414 ± 1	450,8	451,073	1000

Tabulka 3: Naměřené spektrální čáry Ar.

d	λ [nm]	λ_{tab} [nm]	I
2790 ± 1	653,5	653,2882	100
2780 ± 1	650,7	650,6528	1000
2742 ± 1	640,2	640,2250	2000
2734 ± 1	638,1	638,2991	1000
2718 ± 1	633,9	633,4428	1000
2690 ± 1	626,8	626,6495	1000
2670 ± 1	621,8	621,7280	1000
2648 ± 1	616,5	616,3594	1000
2638 ± 1	614,2	614,3060	1000
2618 ± 1	609,5	609,6163	300
2610 ± 1	607,7	607,4338	1000
2590 ± 1	603,2	602,9997	1000
2566 ± 1	598,0	598,7910	150
2548 ± 1	594,1	594,4834	500
2520 ± 1	588,3	588,1895	1000
2504 ± 1	585,1	585,2488	2000
2244 ± 1	540,0	540,0562	2000

Tabulka 4: Naměřené spektrální čáry Ne.

d	λ [nm]	λ_{tab} [nm]	I
2954 ± 1	705,7	706,519	70
2838 ± 1	667,6	667,815	100
2516 ± 1	587,5	587,562	1000
2244 ± 1	540,0	540,056	2000
1952 ± 1	501,5	501,568	100
1866 ± 1	492,0	492,193	50
1656 ± 1	471,1	471,314	40
1360 ± 1	446,8	447,148	100
1246 ± 1	438,7	438,793	30

Tabulka 5: Naměřené spektrální čáry He.

d	λ [nm]	d	λ [nm]
2814 ± 1	660,5	2100 ± 1	519,8
2700 ± 1	629,3	2782 ± 1	651,2
2608 ± 1	607,2	1414 ± 1	450,9
2372 ± 1	560,6	1248 ± 1	438,9

Tabulka 6: Naměřené spektrální čáry CO₂.

čára	n	d	λ [nm]	λ_{tab} [nm]
H _{α}	3	2796 ± 1	655,2	656,285
H _{β}	4	1812 ± 1	486,3	486,133
H _{γ}	5	1176 ± 1	434,1	434,047

Tabulka 7: Naměřené spektrální čáry Balmerovy série H.

Diskuse výsledků

Při měření jsem se dopouštěl největší chyby při odečítání ze stupnice. Stupnice se měnila po $2d$. Chybu měření dílků odhaduji na $\sigma_d = \pm 1d$. Abych získal přepočet dílků na vlnovou délku, tak jsem provedl kalibrační měření s rtuťovou výbojkou. Naměřenou charakteristiku jsem fitoval pomocí programu GNUplot v. 4. 2., která zohledňuje chyby měření fitovaných veličin.

V případě, že jsem se pokoušel určit chybu měření λ pomocí kvadratického zákona přenosu chyb, který je uveden v [3], narazil jsem na problém příliš vysokých chyb u fitovaných veličin. Veličina ζ je určena s chybou $\sigma_\zeta = \pm 17$ nm. Což by znamenalo, že by vlnová délka λ daná vztahem (6) nemohla mít menší chybu. Což není dobře, neboť při porovnání spektrálních čar s tabulkami (zvláště u Balmerovy série, kde je zřejmé, že jsem vlnové délky určil s rozdílem ≈ 1 nm). Chybu měření vlnové délky proto pouze odhaduji na $\sigma_\lambda = \pm 1,5$ nm.

Abych se vyhnul takto velké chybě při fitování, bylo by potřeba přesněji vyjádřit závislost vlnové délky na počtu dílků. Vztah (6) je pouze přibližný, což může mít za následek zmiňované veliké chyby měření.

Při určování rozlišovací schopnosti spektrometru jsem využil sodíkového dubletu. Měřil jsem tři dvojice čar, u nichž jsem určil Ro . Určující je nejvyšší hodnota. Pozorované spektrální čáry byly na pomezí rozlišitelnosti, proto dobře určují rozlišovací schopnost spektrometru.

Závislost vlnové délky na n u Balmerovy série vodíku jsem fitoval pomocí vztahu (2). Z fitu jsem určil Rydbergovu konstantu R . Pomocí vztahu (4) jsem dopočítal R_∞ . Jak je vidět, tak $R_\infty = (1,0973 \pm 0,0074) \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$ se shoduje v rámci chyby měření s tabulkovou hodnotou $R_\infty = 1,09737317710^7 \text{ m}^{-1}$. Opět jde vidět, že by i kdyby byla chyba řádově menší, tak bych dosáhl shody s tabulkovou hodnotou.

V tabulkách jsem také uvedl relativní intenzitu. Tato veličina mi posloužila jako určitá kontrola před hrubými chybami. Je zřejmé, že pokud bych naměřil všechny čáry s relativní intenzitou $I = 1000$ a jednu s intenzitou $I = 10$, tak jsem se dopustil chyby. Zároveň když jsem naměřené čáry porovnával s tabulkovými hodnotami, tak v případě, že jsem se nemohl rozhodnout, kterou ze dvou blízkých čar jsem viděl, tak jsem zvolil tu intenzivnější.

Závěr

Okalibroval jsem používaný spektrometr. Využil jsem k tomu známých čar u rtuťové výbojky, data jsem zapsal do tabulky 1.

Z pozorovaných spektrálních čar sodíku (tabulka 2) jsem určil rozlišovací schopnost spektrometru

$$Ro = 1568.$$

Dále jsem pozoroval spektrální čáry Ar, He, Ne a CO₂. Naměřené hodnoty jsem uvedl v tabulkách 3 až 6.

Proměřil jsem Balmerovu sérii vodíku ve viditelném spektru. Naměřené hodnoty jsem zapsal do tabulky 7. Z naměřených dat jsem určil Rydbergovu konstantu

$$R = (1,0978 \pm 0,0074) \cdot 10^7 \text{ m}^{-1},$$

ze které jsem vypočítal

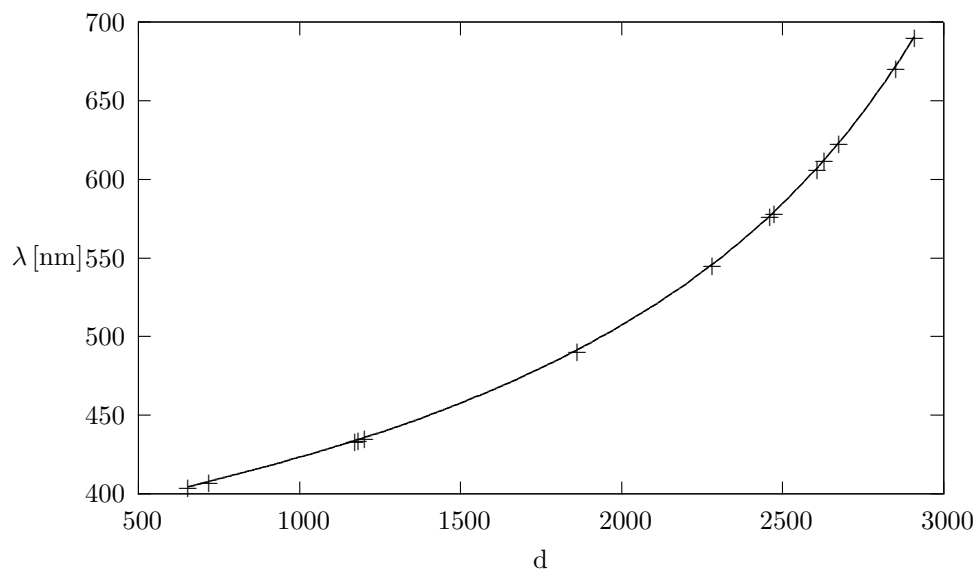
$$R_{\infty} = (1,0973 \pm 0,0074) \cdot 10^7 \text{ m}^{-1},$$

což se shoduje v rámci chyby měření s tabulkovou hodnotou.

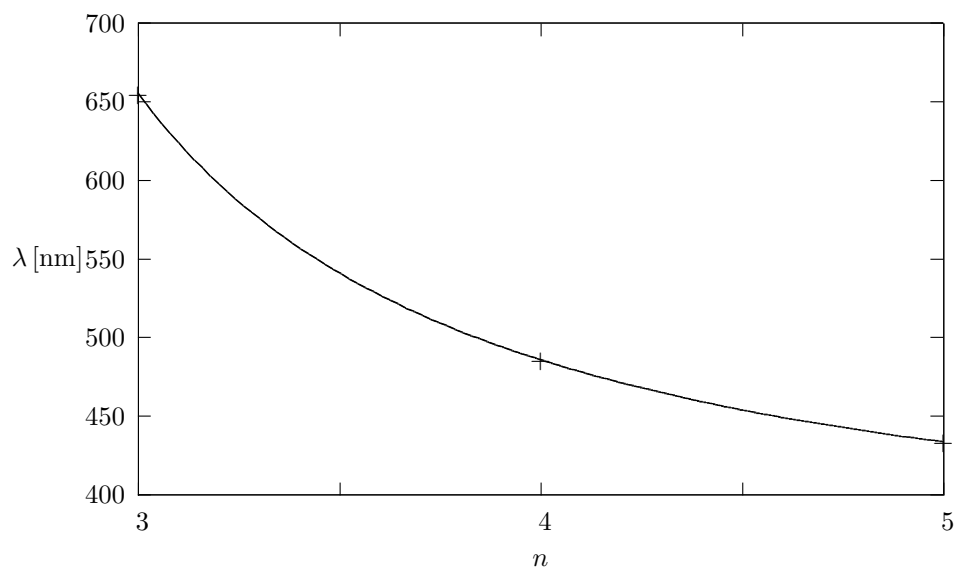
Seznam použité literatury

- [1] *Studijní text: Studium atomových spekter*
http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/txt_415.pdf, listopad 2009.
- [2] J. Mikulčák, B. Klimeš, V. Šůla:
Matematické fyzikální a chemické tabulky pro střední školy.
Prometheus 1988. ISBN 80-85849-84-4

Grafy



Graf 1: Kalibrační křivka



Graf 2: Závislost vlnové délky světla na n u Balmerovy série vodíku.