

## Pracovní úkol :

- 1) Proměřte závislost magnetické indukce na proudu magnetu.
- 2) Ze známé hodnoty indexu lomu určete velikost disperzní oblasti Lummerovy-Gehrckeovy desky.
- 3) Změřte rozštěpení červené spektrální čáry kadmia pro několik hodnot magnetické indukce. Rozštěpení pozorujte ve směru kolmém k magnetickému poli. Zpracujte graficky.
- 4) Určete polarizaci složek rozštěpené čáry. Totéž proveďte při pozorování ve směru magnetického pole.
- 5) Kvalitativně popište výsledky pozorování Zeemanova jevu na zelené čáře kadmia ( $\lambda = 508,6 \text{ nm}$ ).

## Teorie:

Rozlišujeme normální a anomální Zeemanův jev (ZJ). Při normálním ZJ se spektrální čáry, pokud na ně působí magnetické pole, štěpí na triplet, při anomálním ZJ na složitější multiplet.

Normální ZJ lze popsat Lorenzovou teorií. Vychází z modelu klasického harmonického oscilátoru, který je tvořen elektronem v poli kvazielektrické síly. V homogenním magnetickém poli může elektron vykonávat pouze tři periodické pohyby – jeden lineární s frekvencí  $\omega_0$ , další dva kruhové s frekvencemi  $\omega_0 \pm \Delta\omega$ . Pro vlnové délky obou krajních složek tripletu tedy platí :

$$\lambda = \lambda_0 \pm \Delta\lambda, \quad (1)$$

kde

$$\Delta\lambda = \frac{eB\lambda_0^2}{4m_e\pi c} \quad (2)$$

Pozorujeme-li rozštěpení ve směru kolmém ke směru magnetického pole, je střední část tripletu lineárně polarizována ve směru magnetické indukce a obě krajní čáry jsou lineárně polarizované ve směru kolmém k magnetickému poli. Pozorujeme-li světelný zdroj ve směru magnetického pole, vidíme pouze obě krajní složky, které jsou kruhově polarizované.

Při studiu Zeemanova jevu je nutné použít přístroj s vysokou rozlišovací schopností, v našem měření spektrometr s Lummer-Gehrckeovou deskou. Pro velikost oblasti  $\Delta\lambda$  platí vztah:

$$\Delta\lambda \cong \frac{\Delta\beta}{(\Delta\beta)'} \frac{\lambda^2}{2d\sqrt{n^2 - 1}}, \quad (3)$$

kde  $d$  je tloušťka destičky a  $n$  index lomu materiálu při dané  $\lambda$  definovaný vztahem:

$$n = 1,44263 + \frac{7,065}{\lambda - 144}, \quad (4)$$

příčemž hodnoty  $\lambda$  se dosazují v nm. Poměr  $\frac{\Delta\beta}{(\Delta\beta)'}$  lze experimentálně volit tak, že nám umožní stanovit hledané rozštěpení  $\Delta\lambda$  pouze ze znalostí parametrů desky  $n$  a  $d$  bez nutnosti měření hodnot příslušných úhlů. Pro  $\Delta\beta = \Delta\beta'$  nám vztah (3) udává velikost disperzní oblasti. Známe-li disperzní oblast  $\Delta\lambda_D$ , můžeme vypočítat rozštěpení  $\Delta\lambda$  podle vztahu :

$$\Delta\lambda = \frac{y_1 - z_1}{x_2 - x_1} \Delta\lambda_D \quad (5)$$

kde  $(y_1 - z_1)$  je vzdálenost krajních složek tripletu  $k$ -tého maxima a  $(x_2 - x_1)$  vzdálenost  $(k - 1)$  a  $(k + 1)$  maxima.

K vysvětlení anomálního Zeemana je již potřebný kvantový popis.

## Vypracování:

Magnetickou indukci mezi pólovými nástavci elektromagnetu jsem měřila magnetometrem s Hallovo sondou. Měnila jsem hodnotu proudu  $I$  od 0A do maximální možné hodnoty 14,2A (nepřekročila jsem tedy maximální povolený proud 15A). Na voltmetru jsem odečítala odpovídající napětí  $U$  a podle převodního vztahu 1mV ~ 100 mT jsem vypočítala hodnoty magnetické indukce  $B$ .

Třída přesnosti ampérmetru byla 1, měřila jsem na rozsahu 15A. Ampérmetr byl určený na měření střídavých proudů, což znamená, že je možné, že měl stupnici přizpůsobenou na měření efektivních hodnot proudu. Vzhledem k tomu, že další měření provádím s tímto ampérmetrem ve stejném stavu, jako nyní proměřuji magnetickou indukci Hallovo sondou, není nutné znát skutečnou hodnotu proudu. Pro určení odpovídající indukce stačí znát křivku  $B(I)$ , kterou jsme takto proměřila. Voltmetr měl třídu přesnosti 1, napětí jsem měřila na rozsahu 15mV.

Naměřené hodnoty jsou zapsány v tabulce 1 a vyneseny grafu 1. Programem Micronal Origin jsem proložila naměřené hodnoty polynomem 2.stupně a program mi vypočítal tyto koeficienty:

$$B [T] \sim a + b I [A] + c I^2 [A]$$

$$a = (-0,10 \pm 0,02)$$

$$b = (0,139 \pm 0,004)$$

$$c = (-0,0047 \pm 0,0002)$$

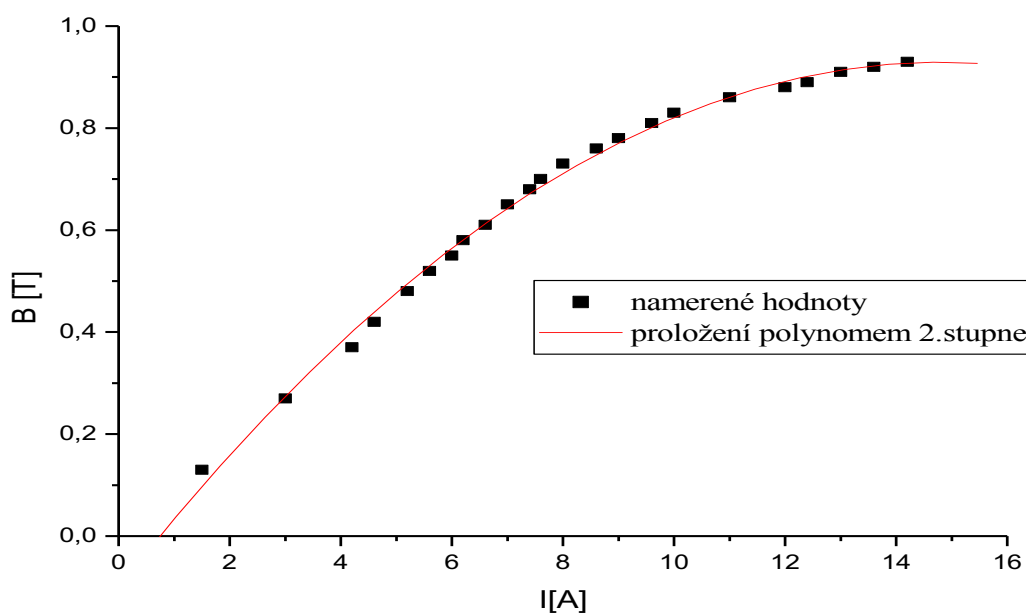
Tuto závislost používám pro určení magnetické indukce v dalších bodech měření.

V oblasti hodnot, se kterými budu pracovat, je tato aproximace dostatečně přesná. Uvedené chyby koeficientů jsou statistické chyby určené programem Micronal Origin. Při přepočtu proudu na mg. indukci je skutečná chyba větší, je zvýšená o chyby měření na ampérmetru a voltmetru- jedná se o 1% na maximálním rozsahu. Celková chyba jistě nepřesahuje 5%. Tyto chyby nejsou v grafu 1 vyznačeny.

I [A]	U [mV]	B [T]
14,2	9,3	0,93
13,6	9,2	0,92
13,0	9,1	0,91
12,4	8,9	0,89
12,0	8,8	0,88
11,0	8,6	0,86
10,0	8,3	0,83
9,6	8,1	0,81
9,0	7,8	0,78
8,6	7,6	0,76
8,0	7,3	0,73
7,6	7,0	0,70
7,4	6,8	0,68
7,0	6,5	0,65
6,6	6,1	0,61
6,2	5,8	0,58
6,0	5,5	0,55
5,6	5,2	0,52
5,2	4,8	0,48
4,6	4,2	0,42
4,2	3,7	0,37
3,0	2,7	0,27
1,5	1,3	0,13

Tabulka 1: Závislost magnetické indukce na proudu magnetu

Graf 1: Závislost magnetické indukce na proudu magnetu



Ze známé hodnoty indexu lomu potřebuju určit velikost disperzní oblasti Lummerovy-Gehrckeovy desky :

Podle vztahu (4) jsem vypočítala index lomu použité Lummer-Gehrckeovy desky pro červenou čáru kadmia ( jí odpovídá vlnová délka  $\lambda = 643,8 \text{ nm}$ ):  $n_c = 1,4568$ . Tloušťka desky byla  $d = 4,04 \text{ nm}$  . Podle vztahu (3) s uvážením  $\Delta\beta = \Delta\beta'$  jsem vypočítala velikost disperzní oblasti  $\Delta\lambda_D = 4,84 \cdot 10^{-11} \text{ m} = 484 \text{ nm}$ .

Dále jsem změřila rozštěpení červené spektrální čáry kadmia pro 5 hodnot magnetické indukce s využitím vztahu (5) . Místo sondy byla mezi pólové nástavce umístěna kadmiová výbojka. Pomocí výchylkoměru jsem proměřovala jednotlivé vzdálenosti. Chybu určení všech vzdáleností odhaduji na 1 r.j. Pro každou hodnotu magnetické indukce jsem se snažila provádět více měření na různých místech, abych snížila vliv nehomogenit. Rozštěpení jsem pozorovala ve směru kolmém k magnetickému poli.

Naměřené hodnoty uvádím v Tabulce 2. Podle vztahu (2) jsem určila  $\Delta\lambda_{teoret.}$ , které v tabulce také uvádím.

Díky symetrii jsem určila ještě další hodnotu  $B$ , které odpovídá  $\frac{\Delta\beta}{(\Delta\beta)'} = 1/3$ , tedy příslušné  $\Delta\lambda_{teoret.} = 161 \text{ nm}$ . Zapsala jsem si hodnoty proudu ,respektive odpovídající mg.indukce  $B$ , ve chvíli, kdy jsem zrakem pozorovala stejné vzdálenosti jednotlivých čar, tedy rozštěpení každé z původních čar na třetiny. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.

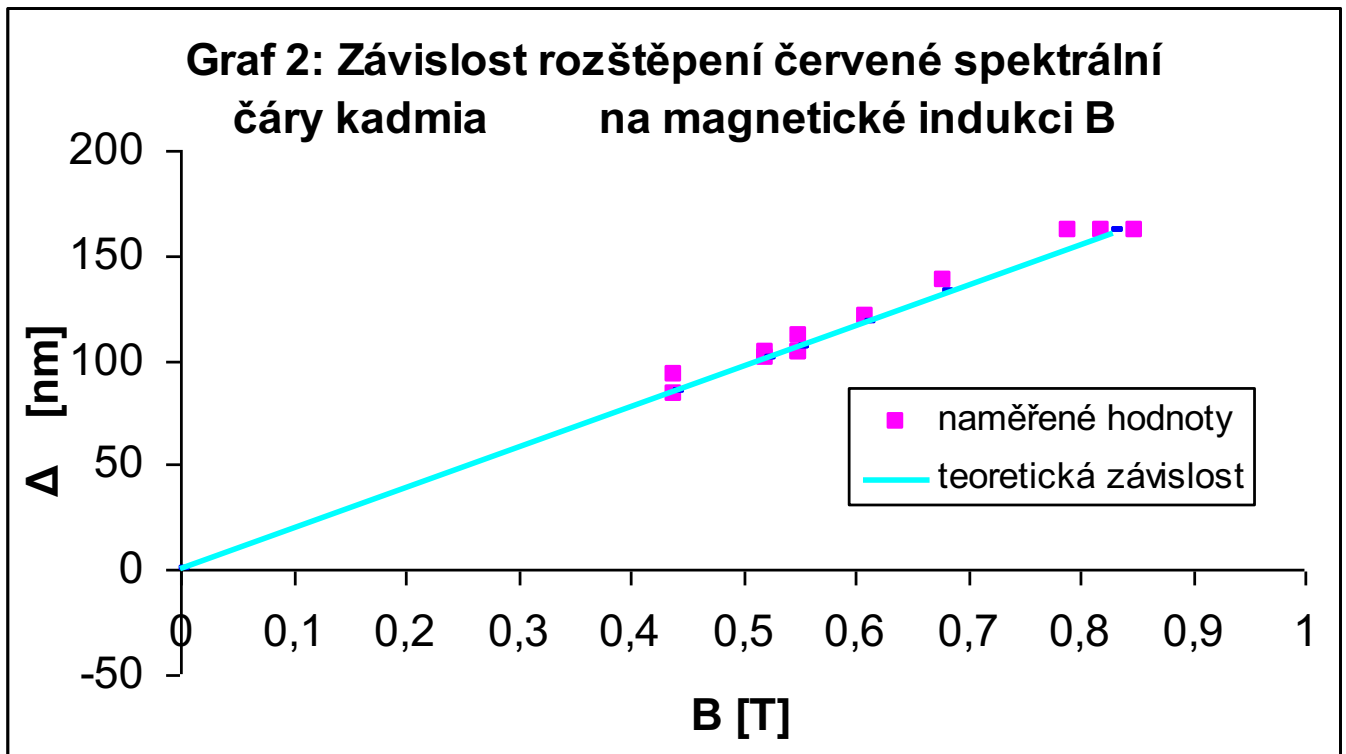
V Grafu 2 jsou zakresleny naměřené hodnoty pro závislost  $\Delta\lambda$  na  $B$ . Naměřené hodnoty jsou proloženy přímkou vyplývající ze vztahu (2), podle kterého se jedná o lineární závislost. Naměřená závislost tomu odpovídá.

$I$ [A]	$B$ [T]	$x_2$ [r.j.]	$y_1$ [r.j.]	$z_1$ [r.j.]	$x_0$ [r.j.]	$\Delta\lambda$ [nm]	$\Delta\lambda_{teoret.}$ [nm]
4,8	0,44	10	21	26	36	93	85
4,8	0,44	90	100	104	113	84	85
5,6	0,52	77	91	98	110	103	101
5,6	0,52	48	59	64	72	101	101
6,0	0,55	82	93	99	110	104	106
6,0	0,55	25	36	42	51	112	106
6,0	0,55	56	72	81	98	104	106
6,6	0,61	36	47	53	60	121	118
7,4	0,68	12	17	21	26	138	132

Tabulka 2: Závislost rozštěpení červené spektrální čáry kadmia na magnetické indukci

$\Delta\lambda = \Delta\lambda_D/3$ [nm]	$I$ [A]	$B$ [T]
161	10,2	0,82
161	9,2	0,79
161	10,8	0,85

Tabulka 3: Magnetická indukce, při které se červená spektrální čára kadmia rozštěpila na třetiny



Dále jsem určovala polarizaci složek rozštěpené čáry – nejdříve kolmém ke směru magnetického pole. V tomto případě byl vidět triplet, jeho všechny složky byly polarizovány lineárně, krajní čáry kolmo vzhledem k prostřední, což bylo možné pozorovat jako střídavé ztavení bočních čar nebo prostřední čáry při otáčení polarizátorem.

Při pozorování ve směru magnetického pole jsme viděla pouze krajní složky tripletu. Prostřední složka byla nepozorovatelná, protože dipól nevyzařuje ve směru své osy. Kombinací polarizátoru a čtvrtvlnné destičky jsem ověřila, že jsou kruhově polarizované, přičemž jejich polarizace je opačná ( při určitém natočení byla vidět vždy jen jedna z čar)

Nakonec jsem pozorovala Zeemanův jev na zelené čáře kadmia ( $\lambda = 508,6 \text{ nm}$ ). Při postupném zvětšování magnetického pole došlo k rozmazání původně ostrých zelených čar ve spojitý pás, v němž byly jednotlivé čáry nerozlišitelné. nebylo možné rozeznat jednotlivé složky multipletu, ty se slévaly v jednu tlustší čáru. Nepozorovala jsem žádnou strukturu multipletu, nebylo ani možné ověřit, že se skládá skutečně z devíti čar. Jednalo se o případ anomálního Zeemanova jevu.

## Diskuse:

Závislost magnetické indukce na proudu magnetu, která je graficky znázorněna v grafu 1 jsem proložila polynomem 2. stupně. V oblasti hodnot, se kterými jsem dále pracovala, je tato aproximace dostatečně přesná. Chyba určení  $B$  v závislosti na proudu  $I$  není větší než 5%.

Závislost rozštěpení červené spektrální čáry kadmia na magnetické indukci lze v souladu s teorií -vztah (2) proložit lineární závislostí. Zde se projevovala zejména nepřesnost určení polohy čáry, protože ta nebyla ideálně tenká a navíc s rostoucím počtem měření stoupala únava zraku, což ztěžovalo přesné určení polohy kříže, pomocí kterého jsem odečítala relativní vzdálenosti potřebné k výpočtu  $\Delta\lambda$  podle vztahu (5). Naměřené hodnoty však dobře odpovídají teoretické závislosti, kterou jsem také vynesla do grafu 2.

Zjištěné polarizace složek rozštěpené čáry ve směru pozorování kolmo k magnetickému poli  $i$  ve směru magnetického pole kvalitativně odpovídají popisu v [1].

## Závěr:

Studovala jsem Zeemanův jev. Proměřila jsem závislost magnetické indukce na proudu magnetem (tabulka 1, graf 1). Určila jsem velikost disperzní oblasti Lummerovy-Gehrckovy desky:  $\Delta\lambda_D = 484$  nm. Proměřila jsem rozštěpení červené spektrální čáry kadmia pro několik hodnot magnetické indukce (tabulka 2 a 3 a graf 2). Určila jsem polarizaci složek rozštěpené čáry ve směru pozorování kolmo k magnetickému poli  $i$  ve směru magnetického pole. Pozorovala jsem anomální Zeemanův jev na zelené čáře kadmia.

## Literatura :

[1] studijní text k úloze A17 ( na <http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp>)