

FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM

Fyzikální praktikum 3

Zpracoval: Jan Beran

Naměřeno: 6. května 2019

Obor: UF

Skupina: F4210/04

Testováno:

Úloha . 10: Zeemanův jev

1. Úkoly

- Ověřte funkci Fabry-Perotova interferometru. Ukažte, že naměřené poloměry různých interferenčních kroužků jedné vlnové délky souhlasí s vhodným vztahem uvedeným v návodu.
- Pomocí posunu vlnotů při normálním Zeemanově jevu zjistíte velikost Bohrova magnetonu.
- Zjistěte, které složky rozštěpených spektrálních čar jsou vyzařovány ve směru kolmém na indukci magnetického pole, a které ve směru rovnoběžném. Změřte, jak jsou jednotlivé složky rozštěpených spektrálních čar polarizovány. Polarizaci stanovte pro oba směry záření (kolmý i rovnoběžný k magnetické indukci) a pro normální i anormální Zeemanův jev.

2. Teorie

Zeemanův jev spočívá v rozštěpení spektrálních vyzařovaných atomů v magnetickém poli, které vzniká díky změně energie jednotlivých hladin způsobené vnějším magnetickým polem.

Normální Zeemanův jev nastává při přechodu mezi singletovými stavy. Budeme ho pozorovat na přechodu kadmia $3^1D_2 \rightarrow 2^1D_1$, kterému odpovídá červené světlo o vlnové délce 643,847 nm. Tato čára se v magnetickém poli rozštěpí na tři, přičemž rozdíl energií fotonů krajních čar od prostřední se liší o hodnotu $\pm \mu_B B$, kde μ_B je Bohrov magneton, který budeme chtít změřit a B je velikost indukce použitého magnetického pole.

Anormální Zeemanův jev nastává, při přechodu mezi stavy, kdy celkový spin elektronů je nenulový. Budeme ho pozorovat na přechodu kadmia $2^3S_1 \rightarrow 3^3P_2$, kterému odpovídá zelené světlo o vlnové délce 508,588 nm. Tato čára se v magnetickém poli rozštěpí na čar devět.

K pozorování čar se v této úloze využívá Fabry-Perotův interferometr, který nám jednu čáru rozloží na rovnoběžný svazek fázově posunutých paprsků. Po průchodu interferometrem je interferenční obrazec Z-krát zvětšen a zobrazen spojkou s ohniskovou vzdáleností f na čip CCD kamery, kde vytvoří kružnicové proužky.

Pro poloměry r sousedních kroužků, indexy $(p+1)$ a p jedné spektrální čáry platí vztah

$$r_{p+1}^2 - r_p^2 = 2(fZn)^2 \frac{1}{2nd\bar{\lambda}}, \quad (1)$$

kde n je index lomu interferometru pro danou spektrální čáru o vlnotě $\bar{\lambda}$. Tento vzorec použijeme pro ověření funkčnosti Fabry-Perotova interferometru. Na pravé straně jsou pouze parametry měření, které jsou pro všechny poloměry konstantní, musí tedy být i rozdíl kvadrátů poloměrů, který si pro další úpravy označme Δ^2 , stejný pro všechny sousední dvojice kroužků. Pro poloměry kroužků r_a a r_b dvou blízkých spektrálních čar, s vlnotě $\bar{\lambda}_a$ a $\bar{\lambda}_b$, pak platí vztah

$$\frac{r_{b,p}^2 - r_{a,p}^2}{r_{a,p+1}^2 - r_{a,p}^2} = 2nd(\bar{\lambda}_b - \bar{\lambda}_a). \quad (2)$$

Tento vztah můžeme upravit do tvaru

$$\Delta E = E_b - E_a = \frac{r_{b,p}^2 - r_{a,p}^2}{r_{a,p+1}^2 - r_{a,p}^2} \cdot \frac{hc}{2nd'}, \quad (3)$$

kde h je Planckova konstanta, c je rychlost světla a E_a , E_b jsou energie fotonů jednotlivých čar. Protože pro $r_b > r_a$ je

$$\Delta E = \mu_B B, \quad (4)$$

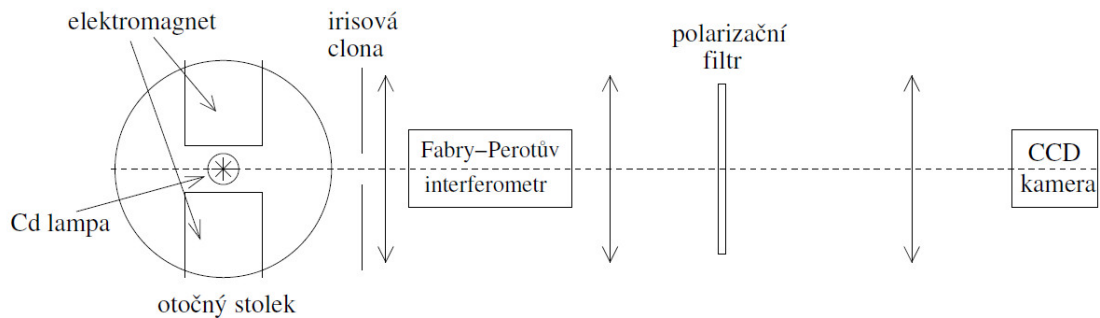
můžeme Bohrovův magneton vyjádřit jako

$$\mu_B = \frac{\Delta E}{B} \quad (5)$$

Jednotlivé složky spektrálních čar jsou různě polarizovány, buď lineárně nebo kruhově. Lineární polarizaci poznáme tak, že mezi interferometr a kameru vložíme lineární polarizátor. Je-li propustná osa kolmá na roviny polarizace, příslušný kroužek zmizí. Abychom poznali kruhově polarizované, musíme před lineární polarizátor vložit ještě čtvrtvlnnou destičku, která mění kruhově polarizované světlo na lineární polarizované.

3. Naměřené hodnoty a zpracování měření

Celé měření jsem prováděl na aparatuře, která je zobrazena která má následující schéma:



Obrázek 1: Schéma aparatury.

3.1. Ověření funkčnosti Fabry-Perotova interferometru

Nejprve jsem proměřil funkčnost Fabry-Perotova interferometru. Měřil jsem tedy při nulovém magnetickém poli a měření jsem provedl pro červenou čáru o vlnové délce $\lambda_c = 643,847$ nm. Naměřené poloměry kroužků jsou v tabulce 1. Podle rovnice (1) musí být rozdíly kvadrátů poloměrů konstantní (Rozdíly kvadrátů jsem označil jako Δ^2). Rozdíly kvadrátů poloměru jsou taktéž v tabulce 1. Průměrem hodnot jsem dostal hodnotu

$$\Delta^2 = (80600 \pm 6400) \mu\text{m}^2 \quad (6)$$

s relativní nejistotou 7,9 %. Tím, že je tato nejistota dostatečně malá, tak mohu funkčnost Fabry-Perotova interferometru potvrdit.

3.2. Zjištění velikosti Bohrova magnetonu

Dále jsem měřil velikost Bohrova magnetonu. Zjišťoval jsem závislost energie na magnetické indukci. Protože jsem ovšem neměřil přímo magnetickou indukci, ale proudu protékající cívkou, bylo nutné proložit polynomem závislost magnetické indukce na proudu. (V mém případě je to polynom třetího stupně.) Získaný polynom má tvar

$$B(I) = 19,12 + 50,48 \cdot I + 2,85 \cdot I^2 - 0,21 \cdot I^3, \quad (7)$$

Tabulka 1: Naměřená a vypočtené hodnoty pro ověření činnosti Fabry-Perotova interferometru.

č. kroužku	r [μm]	Δ [μm^2]
1	122,4	
2	297,3	73405,53
3	404,6	75313,87
4	494,1	80433,65
5	574,9	86375,20
6	946,7	565730,88

kde B je v jednotkách militesla a I je v ampérech.

Toto měření jsem prováděl pro červenou čáru, pro kterou index lomu refraktometru má hodnotu $n = 1,4560$. Tloušťka interferometru je $d = 3$ mm. Pro 6 různých hodnot proudu jsem naměřil 3 kroužky, kde každý představuje jednu spektrální čáru, která se v magnetickém poli rozštěpila na tři. Naměřil jsem tedy pro každou hodnotu proudu 9 poloměrů kroužků. Naměřené hodnoty jsou v tabulkách 2 a 3. Pro zjištění rozdílu energií jednotlivých čar jsem použil rovnici (3). Dosadil jsem hodnotu Planckovy konstanty jako $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J \cdot s. Vypočítal jsem střední hodnotu rozdílu energií a odchylku pro každou jednotlivou hodnotu proudu. Vypočtené rozdíly energií jsou v tabulce 4.

Tabulka 2: Naměřené poloměry kroužků pro nastavené hodnoty proudu a jim odpovídající magnetickou indukci.

	$I = 4,74$ [A] / $B = 0,3001$ [T]			$I = 5,95$ [A] / $B = 0,3762$ [T]			$I = 6,82$ [A] / $B = 0,4294$ [T]		
p	r_a [μm]	r_b [μm]	r_c [μm]	r_a [μm]	r_b [μm]	r_c [μm]	r_a [μm]	r_b [μm]	r_c [μm]
1	83,7	127,9	161,3	67,9	128,2	170,7	55,5	129	170,7
2	279,8	297,8	313,4	275,5	297,1	318,2	274,7	300,1	322
3	392,9	408,7	418,6	390,4	407,2	423,6	388,7	408,1	426

Tabulka 3: Naměřené poloměry kroužků pro nastavené hodnoty proudu a jim odpovídající magnetickou indukci.

	$I = 7,46$ [A] / $B = 0,4672$ [T]			$I = 8,58$ [A] / $B = 0,5294$ [T]			$I = 9,65$ [A] / $B = 0,5830$ [T]		
p	r_a [μm]	r_b [μm]	r_c [μm]	r_a [μm]	r_b [μm]	r_c [μm]	r_a [μm]	r_b [μm]	r_c [μm]
1	43,5	129,7	176,6	30,4	126,7	181,2	28,7	128	185
2	270,8	300,2	325,3	267	299,4	330,1	266,2	299,6	329,5
3	385,5	408,8	427,1	383,3	408,6	430,4	381,9	406,7	432,2

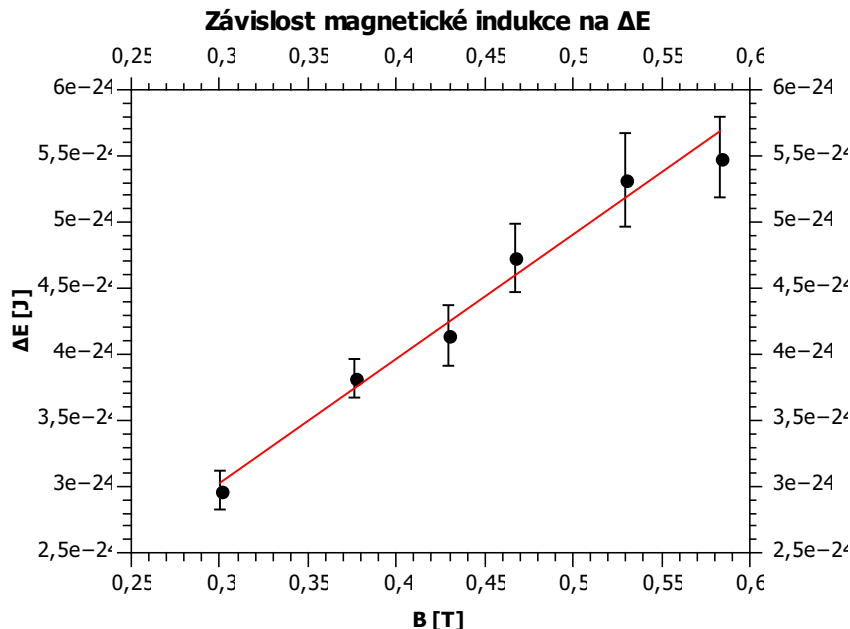
Tabulka 4: Vypočtené hodnoty energií pro jednotlivé hodnoty magnetické indukce.

B [T]	ΔE [10^{-24} J]
0,3001	2,97
0,376	3,82
0,4294	4,14
0,4672	4,73
0,5294	5,32
0,583	5,49

Závislost z tabulky 4 jsem vynesl do grafu na obrázku 2, který jsem proložil přímkou, protože z rovnice (4) plyne, že velikost Bohrova magnetonu je směrnice oné přímky. Hodnota Bohrova magnetonu mi tedy vyšla

$$\mu_B = (9,40 \pm 0,97) \cdot 10^{-24} \text{ J} \cdot \text{T}^{-1} \quad (8)$$

kde relativní nejistota dosahuje hodnoty 10,3 %.



Obrázek 2: Graf závislosti rozdílu energií na magnetické indukci proložený přímkou, pro určení Bohrova magnetonu.

3.3. Určení polarizace a směru rozštěpených čar

Pro určení polarizace a směru rozštěpených čar jsem použil lineární polarizátor a čtvrtvlnnou destičku. Lineární polarizátor ve směru kolmém na magnetické pole propustil obě okrajové čáry. Prostřední čáru propustil taktéž, ale ve směru rovnoběžném s magnetickým polem.

Po otočení stolku o 90° (světlo šlo tedy rovnoběžně s magnetickým polem) jsem pozoroval pouze okrajové čáry. Je to způsobeno tím, že prostřední čára je polarizována rovnoběžně s magnetickým polem a tudíž ji není možné vidět. Ani jedna z čar ovšem nijak nereagovala na lineární polarizaci. Pomocí čtvrtvlnnové destičky, která dokáže převést kruhově polarizované světlo na lineární polarizované, jsem zjistil, že je obě čáry jsou polarizovány kruhově, avšak jedna má levotočivou kruhovou polarizaci a druhá má pravotočivou kruhovou polarizaci.

3.4. Anomální Zeemanův jev

Anomální Zeemanův byl neměřitelný, neboť nebylo možné rozeznat od sebe spektrální jednotlivé čáry.

4. Závěr

Nejprve jsem ověřoval funkčnost Fabry-Perotova interferometru. Protože mi relativní nejistoty mezi rozdíly kvadrátů poloměrů kroužků vyšla 7,9 % mohl jsem funkčnost přístroje potvrdit.

Následně jsem určoval hodnotu Bohrova magnetonu, která mi vyšla $\mu_B = (9,40 \pm 0,97) \cdot 10^{-24} \text{ J} \cdot \text{T}^{-1}$ s relativní nejistotou 10,3 %. Tabulková hodnota Bohrova magnetonu je $\mu_B = 9,274009994(57) \cdot 10^{-24} \text{ J} \cdot \text{T}^{-1}$. Protože jsem naměřil interval, ve kterém se tato hodnota nachází, s relativní chybou 10,7 %, mohu toto

měření prohlásit za velmi úspěšné, neboť rozlišovací schopnosti oné optické soustavy nebyli nejspíše dostatečně přesné na to, abych dokázal rozlišit jednotlivé spektrální čáry u anomálního Zeemanova jevu je nepravděpodobné dosáhnout s touto aparaturou větší přesnosti.

Nakonec jsem určoval polarizaci a směr jednotlivých složek spektrálních čar, které jsem shrnul v odstavci [3.3.](#).

Anomální Zeemanův jev jsem nemohl naměřit z důvodu špatné rozlišitelnosti jednotlivých čar jak bylo komentováno výše.