

Latvijas Universitātes
Fizikas un matemātikas fakultāte
Fizikas bakalaura studiju programma
3. kurss

Andris Potrebko
Maija Sjomkāne

Laboratorijas darbs nr 1
Normālais Zēmana efekts

2018. gada 4. aprīlī

1 Darba uzdevumi

1. Lietojot Fabri-Pero interferometru, paštaisītu teleskopu, CCD kameru, un mērīšanas programnodrošinājumu, izmērīt kadmija atomu 643.847 spektrālīnijas sašķelšanos divās σ komponentēs. Noteikt komponentēm atbilstošos viļņu skaitļus kā funkciju no magnētiskā lauka indukcijas. Uzņemt $\frac{\delta}{\Delta}$ atkarību no magnētiskā lauka B , novērojot gan paralēli magnētiskajam laukam, gan perpendikulāri magnētiskajam laukam.
2. No 1. uzdevumā iegūtajiem rezultātiem novērtēt Bora magnetona vērtību.
3. Kvalitatīvi izpētīt gaismu, kas emitēta magnētiskā lauka virzienā, kā arī to gaismu, kas emitēta perpendikulāri magnētiskā lauka virzienam. Magnētiskā lauka vērtībām jābūt tādām, lai būtu skaidri redzama spektrālīnijas šķelšanās komponentēs. Ievietojot polarizatoru starp lēcām L2 un L3, uzņem attēlus pie polarizatora leņķiem 0° un 90° (kopā 4 attēli).

2 Teorētiskais paatojums

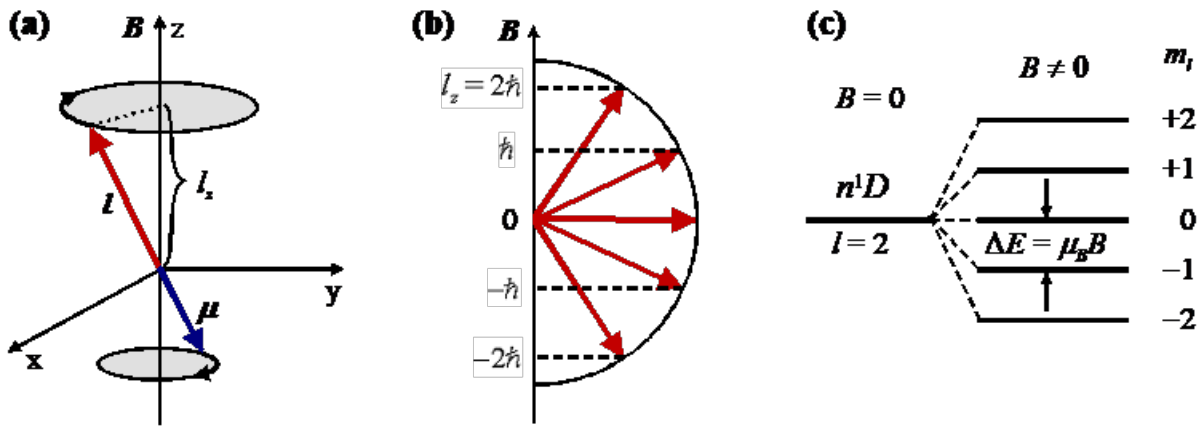
2.1 Atomāra elektrona kustība ārējā magnētiskajā laukā

Normālo Zēmana efektu ir ērti izskaidrot, izmantojot pusklasisko modeli, kurā elektrona kustība tiek aprakstīta ar klasisku cirkulāru orbītu, bet orbitālo impulsa momentu l uzdod ar kvantu mehānisku sakarību.

$$|l| = \sqrt{l(l+1)}\hbar$$

Normālais Zēmana efekts novērojams tikai tām pārejām starp atomu enerģētiskajiem stāvokļiem, kuru pilnais spins $s=0$. Ārējā magnētiskajā laukā magnētiskais dipols iegūst papildus potenciālo enerģiju

$$\Delta E = -B\mu = \frac{e}{2m_e}lB$$



T1.Attēls. Normālā Zēmana efekta vektoru modelis. (a) Magnētiskā momenta μ dēļ mijiedarbības ar ārējo magnētisko lauku B orbitālais moments l precesē ap magnētiskā lauka virzienu. (b) Orbitālā momenta projekcijas uz magnētiskā lauka virzienu var pieņemt tikai diskretas vērtības, kur $m_l = -l, -l+1, \dots, +l$ (zīmējumā shematiski attēlota projekcijas kvantēšanās atomārajam n^1D stāvoklim ar $l = 2$). (c) Katrs enerģijas līmenis ar doto l magnētiskajā laukā B sašķelās $2l+1$ ekvidistantos apakšlīmeņos ar dažādām m_l vērtībām un attālumu starp jebkuriem diviem apakšlīmeņiem $\Delta E = \mu_B B$.

Magnētiskā lauka virzienu parasti pieņem z -ass virzienu, t.i., $B = 0, 0, B_z = B$. Savukārt orbitālais moments l precesē ap B virzienu (1. att. (a)), un tā projekcija uz z -asi ir kvantēta (1. att. (b)), kur magnētiskais kvantu skaitlis m_l var pieņemt vērtības: $m_l = -l, -l+1, \dots, +l$.

Tādēļ katrs enerģētiskais līmenis magnētiskajā laukā sašķelās $2l+1$ ekvidistantos apakšlīmeņos ar dažādām m_l vērtībām (skat. zīm. 1c.). Attālums starp jebkuriem diviem blakus esošiem apakšlīmeņiem vienāds ar

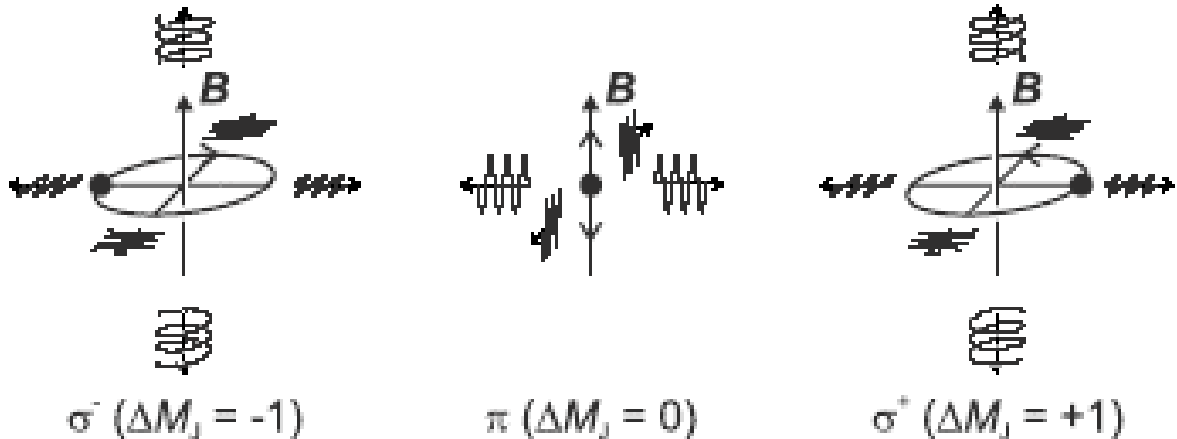
Lielumu

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}B = 9,27 \cdot 10^{-24} J/T$$

sauc par Bora magnetonu. Tātad papildus enerģija, ko enerģijas līmenis ar orbitālā momenta projekciju m_l iegūst magnētiskajā laukā, var uzrakstīt kā

$$\Delta E_{ml} = \mu_B m_l B$$

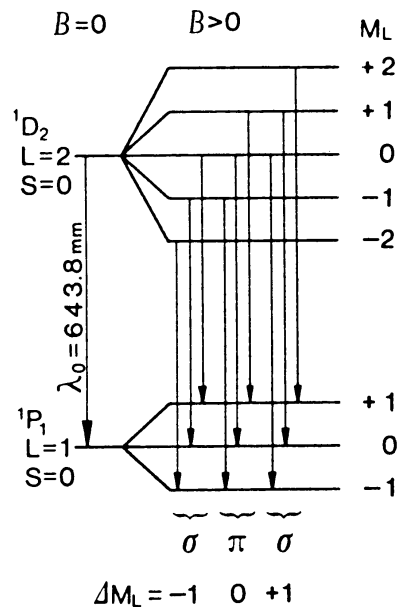
2.2 Gaismas emisija no atoma magnētiskajā laukā



T2.Attēls. Zēmama spektrālō komponentu polarizāciju ilustrācija dažādiem novērošanas virzieniem attiecībā pret magnētiskā lauka B virzienu pārejām ar dažādiem Δm_J .

Ja gaisma tiek emitēta magnētiskā lauka (t.i., z-ass) virzienā, tad tiek novērotas divas cirkulāri polarizētas komponentes $\sigma-$ un $\sigma+$ pie frekvencēm atbilstoši $\nu_0 - \Delta\nu$ un $\nu_0 + \Delta\nu$, kur ν_0 ir pārejas rezonanses frekvence, un $\Delta\nu = \mu_B B/\hbar$. Novērojot perpendikulāri magnētiskā lauka virzienam, var reģistrēt lineāri (π) polarizētu gaismu pie trīs frekvencēm: $\nu_0 + \Delta\nu$, ν_0 un $\nu_0 - \Delta\nu$.

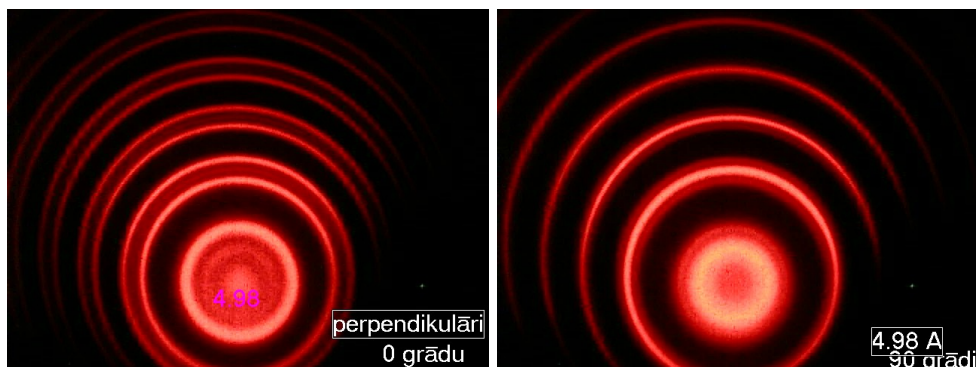
No klasiskā viedokļa pārejas ar $\Delta m_l = 0$ atbilst dipolam, kas oscilē paralēli magnētiskajam laukam (2. att.). Tādēļ gaisma netiek emitēta magnētiskā lauka virzienā. Gaisma, kas tiek emitēta perpendikulāri magnētiskajam laukam B ir lineāri polarizēta, jo gaismas viļņa elektriskā lauka intensitātes E vektors svārstās paralēli magnētiskajam laukam. Savukārt pārejās ar $\Delta m_l = \pm 1$ vairums fotonu tiek emitēti B virzienā. Tas atbilst diviem perpendikulāriem dipoliem, kas oscilē ar fāzu starpību $\frac{\pi}{2}$. Abu dipolu superpozīcija rada cirkulējošu strāvu. Tādējādi magnētiskā lauka virzienā tiek izstarota pa labi (pulksteņa rādītāja virzienā) cirkulāri polarizēta gaisma σ^+ pārejās ar $\Delta m_l = 0$, un pa kreisi (pretēji pulksteņa rādītāja virzienam) cirkulāri polarizēta gaisma σ^- fotonu pārejās ar $\Delta m_l = -1$.



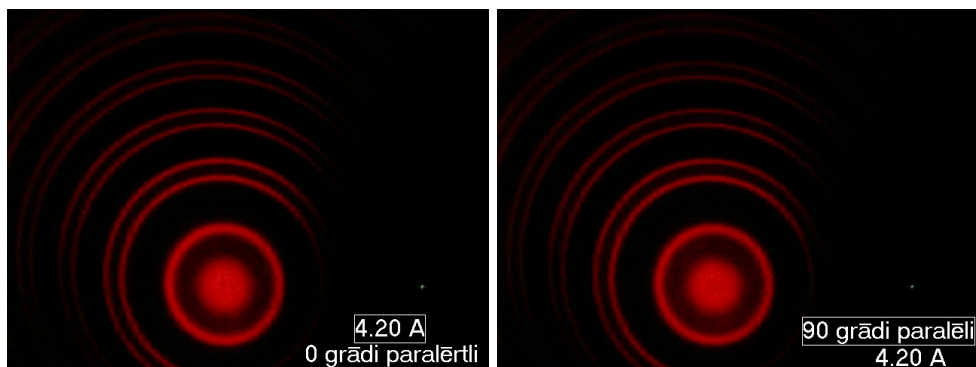
T3.Attēls. Zēmana enerģētisko stāvokļu sadalīšanās Cd atomam un atlautās pārejas.

3 Mērījumu rezultāti un datu apstrāde

3.1 Cd lampas 643.847 spektrālīnijas sašķelšanās magnētiskajā laukā kvalitatīvā analīze



(a) Perpendikulārā komponente ar polarizatora stāvokli 0° (b) Perpendikulārā komponente ar polarizatora stāvokli 90°



(c) Paralēlā komponente ar polarizatora stāvokli 0° (d) Paralēlā komponente ar polarizatora stāvokli 90°

1. Attēls. Cd lampas spektrālīnijas magnētiskajā laukā emitētas magnētiskā lauka virzienā (a un b) un perpendikulāri tam (c un d), pirms detektora, novietojot polarizatoru dažādos virzienos - 0° un 90° . Attēli analizēti sadaļā 4 Secinājumi un darba analīze.

3.2 Cd lampas 643.847 spektrālīnijas novērojumi magnētiskajā laukā B paralēli tā virzienam

1.tabula. Interferences gredzenu laukumi un to starpību attiecības.

	B, mT	1. kārtā		2. kārtā		3. kārtā		$\delta \cdot 10^3, \mu m^2$	$\Delta \cdot 10^3, \mu m^2$	$\frac{\delta}{\Delta}$	$\Delta \frac{\delta}{\Delta}$
		$S_{1,a} \cdot 10^3, \mu m^2$	$S_{1,b} \cdot 10^3, \mu m^2$	$S_{2,a} \cdot 10^3, \mu m^2$	$S_{2,b} \cdot 10^3, \mu m^2$	$S_{3,a} \cdot 10^3, \mu m^2$	$S_{3,b} \cdot 10^3, \mu m^2$				
1	2.4×10^2	59	67	117	126	182	192	8.6	62.1	0.139	0.014
2	4.5×10^2	53	74	111	135	178	206	24.0	64.3	0.373	0.068
3	5.8×10^2	53	75	109	132	172	206	26.2	62.6	0.419	0.120
4	6.7×10^2	50	76	108	137	173	209	30.6	64.1	0.478	0.086
5	3.6×10^2	56	72	113	131	179	200	17.5	62.7	0.280	0.046
6	5.1×10^2	54	73	110	135	178	207	24.3	64.7	0.376	0.094

Aprēķinu piemēri:

$$\delta = \frac{\sum_p S_{p,a} - S_{p,b}}{p} = \frac{(67 - 59 + 126 - 117 + 192 - 182) \cdot 10^3}{3} = 8,6 \cdot 10^3 \mu m^2$$

$$\Delta = \frac{\sum_{p-1} S_{p+1,a} - S_{p,a} + S_{p+1,b} - S_{p,b}}{2 \cdot (p-1)} = 62,1 \cdot 10^3 \mu m^2$$

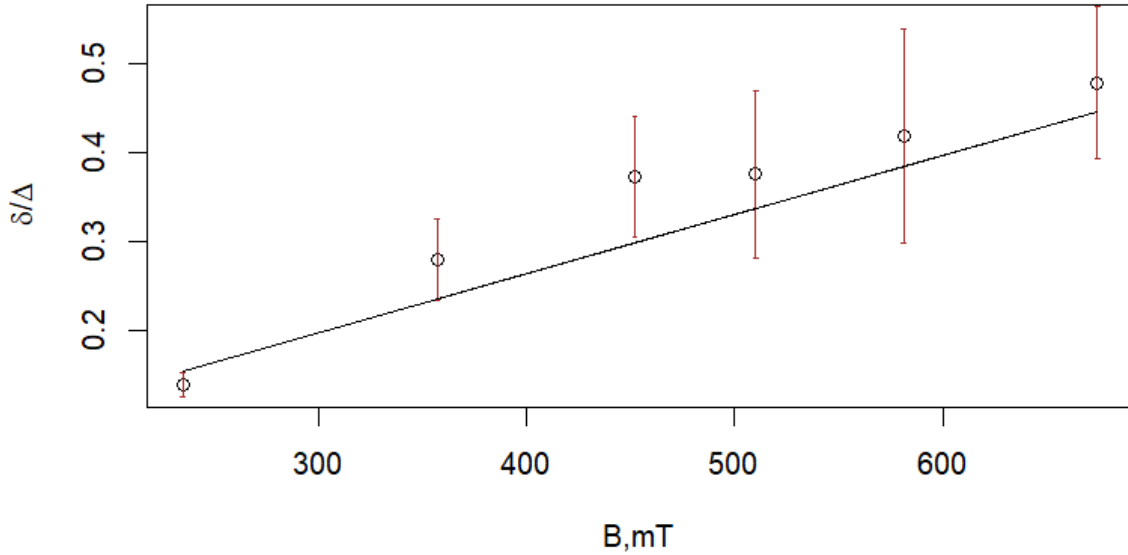
Kļūdas novērtējums: δ un Δ kļūdu nosaka, kā standartnovirzi, piemērs pirmajai rindīnai 1. tabulā.

$$\sigma(\delta) = 0,60$$

$$\sigma(\Delta) = 4,25$$

Kļūdu $\Delta \frac{\delta}{\Delta}$ var noteikt ar relatīvo kļūdu saskaitīšanas metodi:

$$\Delta \frac{\delta}{\Delta} = \frac{\delta}{\Delta} \cdot \sqrt{\frac{\sigma(\delta)^2}{\delta^2} + \frac{\sigma(\Delta)^2}{\Delta^2}} = 0,139 \sqrt{\frac{0,60^2}{8,6^2} + \frac{4,25^2}{62,1^2}} = 0,014$$



2. Attēls. Attiecība $\frac{\delta}{\Delta}$ atkarībā no magnētiskā lauka indukcijas vērtības B, apskatot komponenti paralēli magnētiskā lauka virzienam. Ar lineāro regresiju atrasta likne $y=kx$, kur $k = 6.61 \cdot 10^{-4} \pm 0.39 \cdot 10^{-5} 1/mT$. R^2 vērtība dotajai regresijai ir 0,98, kas ir tuvu 1 un liecina par labu regresiju.

No vienādojuma

$$\mu_B B = \frac{hc}{2\mu t} \frac{\delta}{\Delta}$$

redzams, ka 1. attēlā iegūtās līknes slīpuma koeficients k saistās ar Bora magnetonu μ_B kā

$$\mu_B = k \cdot \frac{hc}{2\mu t} = (6.61 \cdot 10^{-4}) \cdot 10^3 \cdot \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{2 \cdot 1.456 \cdot 3 \cdot 10^{-3}} = 1,50 \cdot 10^{-23} J/T$$

Kļūdu Bora magnetonam iegūst, izmantojot kļūdas izplatīšanās likumu, pieņemot, ka visi lielumi ir precīzi zināmi, izņemot k .

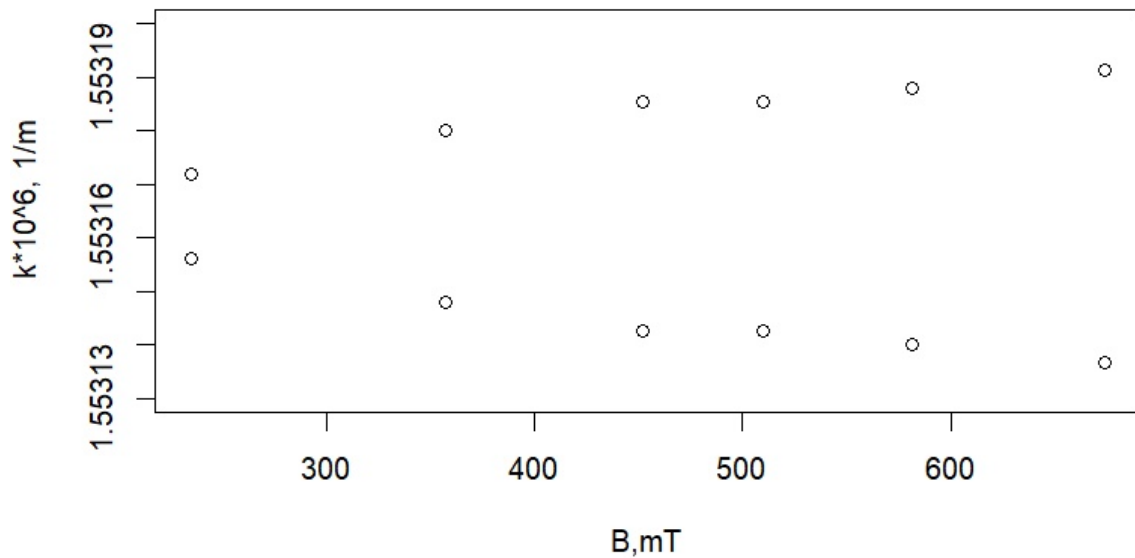
$$\Delta(\mu_B) = \Delta k \cdot \frac{hc}{2\mu t} = (0,39 \cdot 10^{-4}) \cdot 10^3 \cdot \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{2 \cdot 1.456 \cdot 3 \cdot 10^{-3}} = 0,09 \cdot 10^{-23} J/T$$

2.tabula. 1. tabulas turpinājums. No interferences gredzenu laukumiem noteiktās viļņu skaitļu starpības

	B, mT	$\Delta k, 1/m$	$\Delta(\Delta k), 1/m$
1	2.4×10^2	15.9	1.6
2	4.5×10^2	42.7	7.8
3	5.8×10^2	47.9	13.8
4	6.7×10^2	54.7	9.8
5	3.6×10^2	32.0	5.3
6	5.1×10^2	43.0	10.8

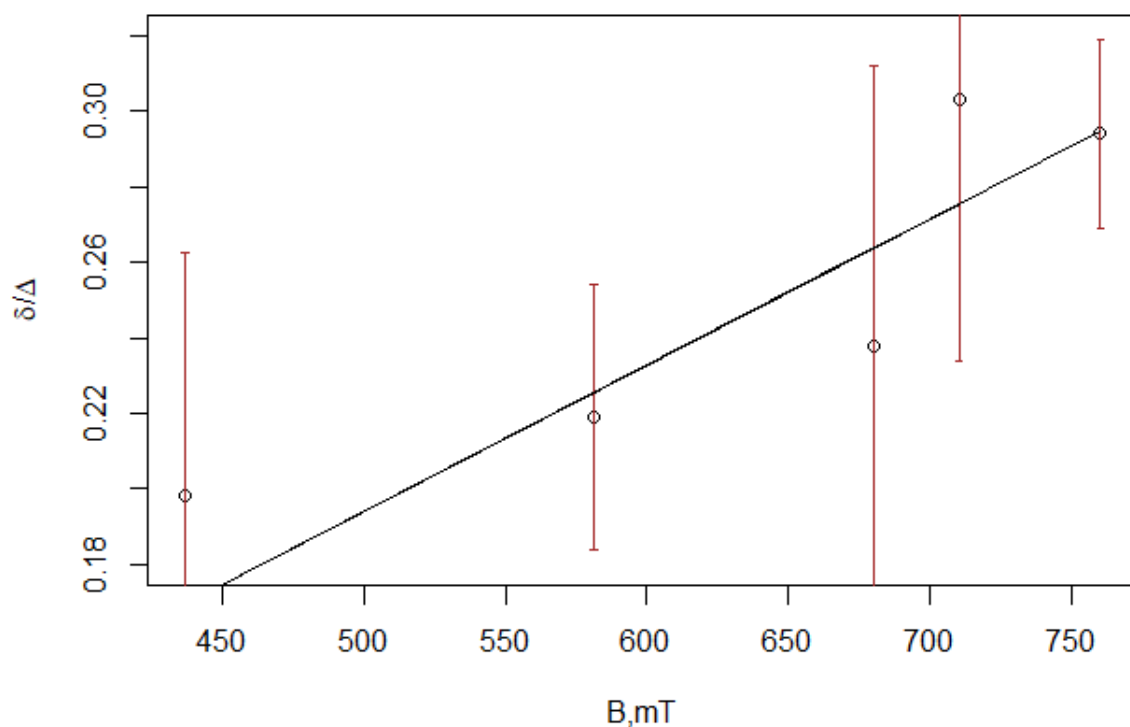
Aprēķinu piemēri:

$$\Delta k = \frac{1}{2} \cdot \frac{\delta}{\mu t \Delta} = \frac{1}{2 \cdot 1,456 \cdot 3 \cdot 10^{-3}} \cdot 0,139 = 15,91/m$$



3. Attēls. Sasāļtajām komponentēm ar $\Delta M_J = \pm 1$ atbilstošie viļņu skaitļi atkarībā no magnētiskā lauka indukcijas vērtības.

3.3 Mērījumi perpendikulāri magnētiskā lauka B virzienam



3.Attēls. Attiecība $\frac{\delta}{\Delta}$ atkarībā no magnētiskā lauka indukcijas vērtības B, apskatot komponenti perpendikulāri magnētiskā lauka virzienam. Ar lineāro regresiju atrasta līkne $y=kx$, kur $k = 3.88 \cdot 10^{-4} \pm 0.10 \cdot 10^{-5} 1/mT$.

Aprēķinos analogiski 3.2 sadaļai, rēķinot Bora magnetonu no komponentes paralēli magnētiskajam laukam, iegūst

$$\mu_B = 8,80 \pm 0,09 \cdot 10^{-24} J/T$$

3.4 Rezultāti

Pētot komponenti paralēli magnētiskā lauka virzienam tika iegūta Bora magnetona vērtība

$$\mu_{B,par} = 15,0 \pm 0,9 \cdot 10^{-24} J/T$$

Bet perpendikulārajai komponentei:

$$\mu_{B,perp} = 8,80 \pm 0,09 \cdot 10^{-24} J/T$$

Tā kā Bora magnetona vērtībai jābūt tai pašai neatkarīgi no komponentes, tad par galīgo rezultātu paņemam vidējo vērtību starp abām, tātad galīgā vērtība.

$$\mu_{B,perp} = 11,9 \pm 4,4 \cdot 10^{-24} J/T$$

Salīdzināšanai literatūrā atrodama vērtība:

$$\mu_{B_{perp}} = 9,27 \cdot 10^{-24} J/T$$

4 Secinājumi un darba analīze

1. attēlā redzami visi kvalitatīvi atšķirīgie attēli, ko iespējams iegūt no Cd 643 spektrālīnijas magnētiskajā laukā ar polarizatoru. Ja salīdzina attēlus a un b ar c un d, redzams, ka perpendikulāri magnētiskajam laukam redzamas trīs līnijas, tas ir nemainījusies līnija ar $\Delta M_J = 0$, kas ir starp divām līnijām ar nedaudz atšķirīgiem viļņa garumiem. Turklāt vidējā un malējās līnijas ir polarizētas savstarpēji perpendikulāri. Tas atbilst teorijai par to, ka Cd atoms perpendikulāri magnētiskajam laukam izstaro lineāri polarizētu gaismu, kas sastāv no trim komponentēm. Savukārt, paralēli magnētiskajam laukam nav redzama vidējā līnija, bet redzamas tikai divas malējās, kas nepazūd, mainot polarizatora stāvokli. Arī tas atbilst teorijai, kur teikts, ka paralēli magnētiskajam laukam Cd atomi izstaro cirkulāri polarizētu gaismu ar viļņa garumiem nedaudz izmainītiem no tā, kas ir bez magnētiskā lauka.
2. Iegūtās Bora magnetona vērtības var redzēt sadaļā rezultāti. Var redzēt, ka ar abām komponentēm rēķinātās Bora magnetona vērtības nesakrīt, bet to var skaidrot ar neprecīzu uz attēla iegūto interferences riņķu uzzīmēšanu. Pat izmantojot 3 punktu attēlošanu, dažviet attēlotais riņķis tomēr pagāja malā no interferences riņķa, iespējams, dažviet šie punkti nebija atlikti tieši interferences centrā, bet nedaudz nobīdīti. Precīzākam rezultātam būtu nepieciešams šo procesu veikt citādi, piemēram, izmantojot datorprogrammu atrast koordinātas, kur riņķis ir visspilgtākais, un tad attēlot riņķi, izmantojot iegūtās koordinātas.
Kļūdu ietekmē arī tas, ka magnētiskās indukcijas vērtības tika noteiktas no strāvas caur spoli vērtības no literatūrā dotā grafika. Indukcijas vērtību varētu noteikt precīzāk, ja grafika vietā būtu dots polinoms, kurš aprakstītu indukcijas atkarību no strāvas caur spoli dotajā strāvas vērtību apgabalā. Varētu arī veikt eksperimentu pie vairāk strāvas vērtībām, lai iegūtu vairāk datu punktus. Vidējā no šīm vērtībām tomēr sakrīt ar teorētisko vērtību, kas arī liecina, ka mērījumu kļūdas bija par maz novērtētas, kas skaidrojams ar iepriekš minētajiem apsvērumiem.
3. 2. attēlā redzamas divas no sašķeltajām komponentēm, to viļņu skaitli atkarībā no magnētiskā lauka. Redzams, ka atšķirība pieaug, pieaugot magnētiskā lauka indukcijai, bet izmaiņa ir maza salīdzinot ar pašu viļņa skaitli.