

UNIVERZA V MARIBORU
FAKULTETA ZA KEMIJO IN KEMIJSKO TEHNOLOGIJO

Zbrana navodila za laboratorijske vaje pri fiziki za študente kemije in kemijske tehnologije

Samo Korpar, Marko Bračko

Maribor, 2013

Osnovni podatki o publikaciji

Vrsta publikacije: Elektronska zbirka navodil za laboratorijske vaje iz fizike

Izdaja, datum: 1. izdaja, november 2013

Avtorja: Samo Korpar, Marko Bračko

Dostopno na naslovu:

http://fizika.fkkt.uni-mb.si/navodila_praktikuma.html

Gradiva iz publikacije brez dovoljenja avtorjev ni dovoljeno kopirati, reproducirati, objavljati ali prevajati v druge jezike.

Opombe in zahvale

Navodila so nastala na osnovi starejših navodil za fizikalni praktikum za kemijske tehnologe, ki jih je pripravil prof. Gvido Pregl. Za pomoč pri oblikovanju besedila ter risanju skic in diagramov se avtorja zahvaljujeta tehničnemu sodelavcu Igorju Grosu.

1 Kundtova cev

NALOGA

Izmeri hitrost zvoka v aluminiju in iz nje določi prožnostni modul aluminija.

RAZLAGA

V trdnih snoveh se lahko razširja longitudinalno in transversalno valovanje. Hitrost razširjanja valovanja je odvisna od vrste valovanja, od gostote snovi in od njenih elastičnih lastnosti. V plinih se lahko razširja samo longitudinalno valovanje. Longitudinalno valovanje s frekvencami v območju med 16 Hz in 20 kHz imenujemo zvok in ga zaznamo z ušesi.

Hitrost razširjanja zvoka v trdnih snoveh je povezana z gostoto (ρ_{tr}) in s prožnostnim modulom (E) snovi:

$$c_{tr} = \sqrt{\frac{E}{\rho_{tr}}} . \quad (1.1)$$

Za hitrost razširjanja zvoka v plinih v splošnem velja zveza:

$$c_{pl} = \sqrt{\frac{1}{\rho_{pl}\chi_a}} = \sqrt{\frac{\kappa p}{\rho_{pl}}} = \sqrt{\frac{\kappa RT}{M}} = c_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}} , \quad (1.2)$$

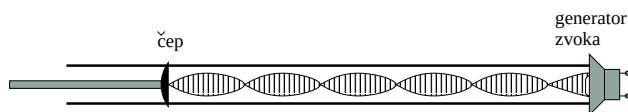
kjer sta p in ρ_{pl} tlak in gostota plina, χ_a je adiabatna stisljivost, $\kappa = c_p/c_V$ je razmerje specifičnih toplot plina, M pa kilomolska masa plina. T je temperatura plina v Kelvinih, $T_0 = 273,15$ K. Če za hitrost zvoka v plinu pri temperaturi $T_0 = 0^\circ\text{C}$ vstavimo $c_0 = 331,5$ m/s, za hitrost razširjanja zvoka v zraku pri temperaturi T dobimo naslednji izraz:

$$c_{zr} = 331,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \sqrt{\frac{T}{T_0}} . \quad (1.3)$$

Poglejmo še, kaj se z zvočnim valovanjem zgodi pri prehodu iz enega sredstva v drugo. Frekvenca valovanja se pri tem ne spremeni ($\nu = \nu_1 = \nu_2$), zato pa je drugačna hitrost razširjanja valovanja c in s tem valovna dolžina $\lambda = c/\nu$. Valovni dolžini v obeh sredstvih lahko povežemo med sabo, če upoštevamo ohranitev frekvence pri prehodu:

$$\lambda_2 = \frac{c_2}{\nu_2} = \frac{c_2}{\nu_1} = \frac{c_2}{c_1} \lambda_1 , \quad (1.4)$$

pri čemer z indeksoma 1 in 2 označimo količine v prvem in drugem sredstvu. Valovno dolžino zvočnega valovanja v plinih lahko izmerimo s Kundtovo cevjo. Generator zvoka vzbudi v plinu, ki je v zaprti stekleni cevi, stoječe zvočno valovanje, kot prikazuje slika 1.1. Po cevi je raztresen plutovinast prah, ki močno



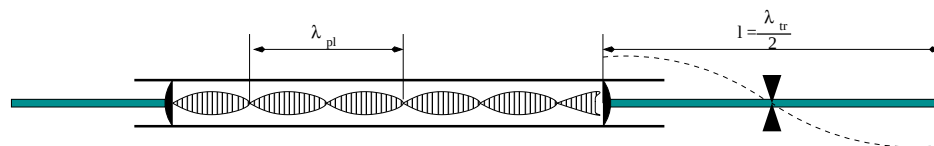
Slika 1.1: Kundtova cev je steklena cev s plinom in plutovinastim prahom. Cev je na enem koncu zaprta s čepom, na drugem koncu je nameščen generator zvoka. Za primer na sliki je razdalja med generatorjem zvoka in čepom na koncu enaka $\frac{11}{4}\lambda$.

poskakuje na mestih, kjer so hrbti stoječega valovanja, in miruje tam, kjer ima stoječe valovanje vozle. Če je razdalja med generatorjem zvoka in zaprtim koncem cevi enaka lihemu mnogokratniku četrtnine valovne dolžine (sliki 1.1 in 1.2), je slika jasno izražena. V tem primeru je frekvenca generatorja zvoka enaka eni izmed lastnih frekvenc valovanja zraka v cevi.

Za generator zvoka lahko uporabimo palico, ki je vpeta v sredini. Na koncu palice, ki sega v Kundtovo cev, je pritrjena ploščica z nekoliko manjšim premerom, kot je premer cevi. V palici vzbudimo stoječe valovanje (lastno nihanje), tako da jo s krpo podrgnemo v vzdolžni smeri. Ker je palica v sredini vpeta, je tam vozle valovanja, na obeh koncih pa sta hrbta. V splošnem je lahko med sredino in koncem palice še več vozlov valovanja, vendar pa je dolžina palice vselej enaka lihemu mnogokratniku polovice valovne dolžine. Če palico rahlo drgnemo po zadnji četrtni v smeri proti koncu, pa v resnici vzbudimo pretežno le valovanje z najnižjo lastno frekvenco. Dolžina palice l je tedaj enaka polovici valovne dolžine tega valovanja:

$$l = \frac{\lambda_{tr}}{2}, \quad (1.5)$$

saj je v sredini palice edini vozle (glej sliko 1.2). Frekvenca valovanja v palici je



Slika 1.2: Kundtova cev s kovinsko palico kot generatorjem zvoka (na desni). Označeni sta tudi valovni dolžini zvoka v palici in zraku.

tedaj:

$$\nu = \frac{c_{tr}}{\lambda_{tr}} = \frac{c_{tr}}{2l}, \quad (1.6)$$

če je c_{tr} hitrost zvoka v palici. Stoječe zvočno valovanje, ki ga nihanje konca palice s ploščico vzbudi v zraku, ima isto frekvenco. Ker zvočno hitrost c_{zr} v

zraku poznamo (enačba (1.3)), lahko izračunamo hitrost zvoka v palici:

$$c_{tr} = \frac{\lambda_{tr}}{\lambda_{zr}} c_{zr} . \quad (1.7)$$

Iz zveze (1.1), ki podaja hitrost zvoka v dolgi prožni palici, lahko izračunamo še prožnostni modul E , če poznamo gostoto snovi, iz katere je palica.

NAVODILO

S krpo, na katero si natresel nekaj zrn smole, enakomerno in ne premočno drgni palico po zadnji četrtini, tako da krpo vlečeš v smeri proti koncu palice. Na ta način v palici vzbudiš valovanje s pretežno osnovno frekvenco. S premičnim batom uglašuj cev, dokler ne slišiš najglasnejšega tona. Takrat prah najmočneje poskakuje. Izmeri povprečno razdaljo d med sosednjima vozlova ter določi napako izmerjene količine. Izmeri še temperaturo zraka in na barometru odčitaj zračni tlak. Iz zgornjih enačb izračunaj hitrost zvoka v aluminiju in prožnostni modul aluminija, oceni pa tudi mersko napako obeh količin. (Gostota aluminija je 2700 kg/m^3 .)

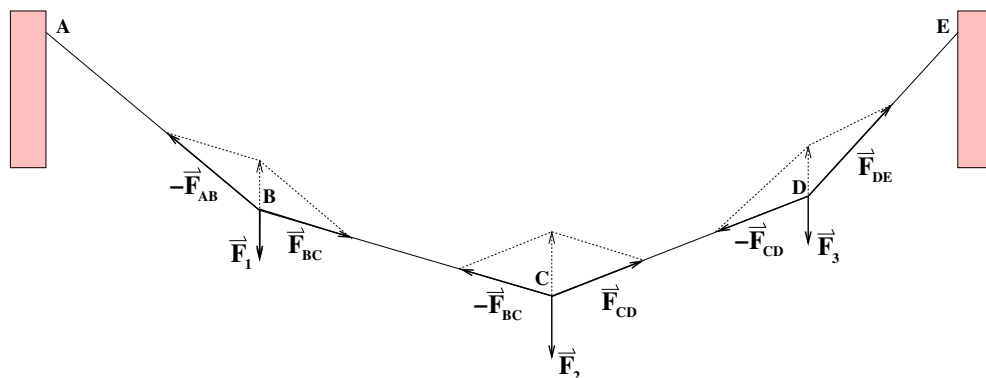
2 Sestavljanje sil

NALOGA

Na vrvico obesimo 3 uteži, od katerih eno stehaj. Masi preostalih dveh uteži izmeri tako, da grafično določiš natezne sile v različnih odsekih vrvice.

RAZLAGA

Na vrvico, razpeto med točkama A in E, obesimo na mestih B, C in D uteži z masami m_1 , m_2 in m_3 (in težami F_1 , F_2 in F_3), kot prikazuje slika 2.1. Če bi vrvico na posameznih odsekih prerežali in s silomerom izmerili natezne sile F_{AB} , F_{BC} , F_{CD} in F_{DE} , bi iz izmerjenih vrednosti lahko izračunali vse tri mase. Ker pa se sile vektorsko seštevajo, lahko natezne sile v vrvici določimo grafično, če eno od uteži stehamo in pripišemo vrvico na list papirja.



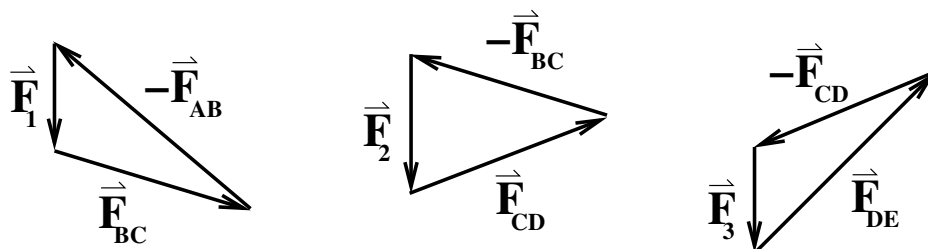
Slika 2.1: Vrvica z obešenimi utežmi. Prikazane so teže vseh uteži in natezne sile v posameznih odsekih vrvice.

Poglejmo podrobneje, kako lahko pridemo do omenjene rešitve. Ker uteži mirujejo, so vse sile v ravnovesju. Ravnovesni pogoji lahko zapišemo za vsako vozlišče posebej in tako pridemo do sistema vektorskih enačb:

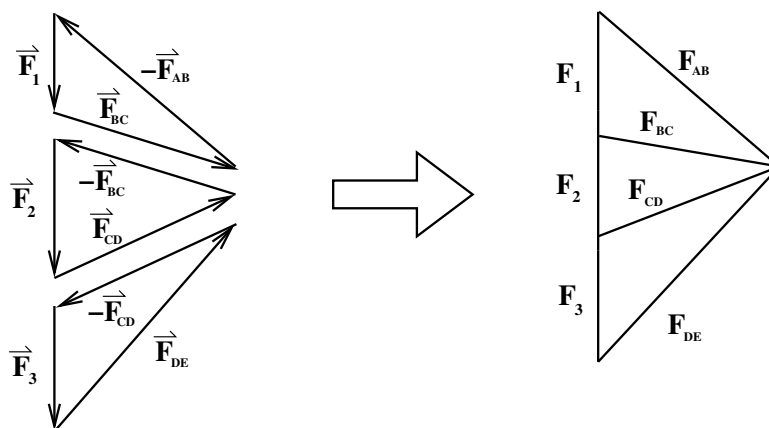
$$\begin{aligned}
 A &: \vec{F}_1 + \vec{F}_{BC} - \vec{F}_{AB} = 0, \\
 B &: \vec{F}_2 + \vec{F}_{CD} - \vec{F}_{BC} = 0, \\
 C &: \vec{F}_3 + \vec{F}_{DE} - \vec{F}_{CD} = 0.
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Zgornji sistem enačb bi lahko rešili računsko, če bi poznali vse naklonske kote vrvice in težo ene od treh uteži. Nas pa zanima grafična rešitev, zato vsako od treh vektorskih enačb sistema (2.1) ponazorimo s trikotnikom sil (glej sliko 2.2). Ker so nekatere stranice skupne, lahko vse tri trikotnike združimo med sabo. Tako

dobimo vrtni poligon, ki ga prikazuje slika 2.3. Iz poligona lahko določimo obe neznani sili, če poznamo maso enega od bremen in vse naklone vrvic.



Slika 2.2: Trikotniki sil v vozliščih A, B in C, kot jih opisujejo enačbe (2.1).



Slika 2.3: Konstrukcija vrtnega poligona.

IZVEDBA

Napni risalni papir na desko in obesi uteži. Narisati moraš eno od treh navpičnic, lego vseh treh vozlišč in točki na krajnjih odsekih vrvice. Pri risanju bodi skrajno natančen in pazi, da ne boš naredil napake zaradi paralakse!

Snemi papir in izriši celotno vrvico. Pri risanju poligona izberi primerno merilo za težo uteži, ki si jo stehtal. V smeri navpičnice nariši najprej znano silo, nato pa z vzporednim prenašanjem smeri vrvic izriši poligon. Odseka na navpičnici ti bosta dala velikosti neznanih sil, odseki na vzporednicah k vrvici pa natezne sile. Zamenjaj razporeditev uteži in meritev ponovi!

Na koncu stehtaj vse uteži in primerjaj rezultate z grafično določenimi masami!

3 Fizično nihalo

NALOGA

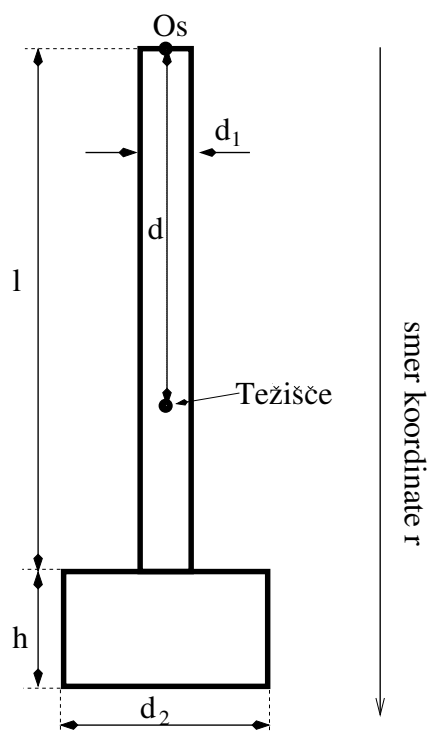
Izmeri nihajni čas fizičnega nihala.

RAZLAGA

Fizično nihalo je sestavljeno iz valjaste kovinske palice in kovinskega valja, pritrjenega na koncu palice (glej sliko 3.1). Nihajni čas takšnega nihala pri nihanju z majhnimi odmiki izračunamo z enačbo:

$$t_0 = 2\pi \sqrt{\frac{J}{(m + M)gd}}, \quad (3.1)$$

kjer je m masa palice, M masa valja, g težni pospešek, d je razdalja med težiščem nihala in osjo vrtenja, J pa je vztrajnostni moment nihala glede na os vrtenja.



Slika 3.1: Skica fizičnega nihala z oznakami. Označena je tudi integracijska spremenljivka r , ki nastopa v enačbi (3.2).

Če sta premera d_1 in d_2 mnogo manjša od dolžine izbranega nihala, lahko vztrajnostni moment J za izračunamo na naslednji način:

$$\begin{aligned}
 J = J_1 + J_2 &= \int_0^l r^2 dm + \int_l^{l+h} r^2 dm \\
 &= \int_0^l r^2 \rho S_1 dr + \int_l^{l+h} r^2 \rho S_2 dr \\
 &= \rho S_1 \frac{r^3}{3} \Big|_0^l + \rho S_2 \frac{r^3}{3} \Big|_l^{l+h} \\
 &= \frac{\rho S_1 l^3}{3} + \frac{\rho S_2}{3} \left[(l+h)^3 - l^3 \right].
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Ko upoštevamo še zvezi za $m = \rho S_1 l$ in $M = \rho S_2 h$, lahko zapišemo končni rezultat za vztrajnostni moment:

$$J = \frac{ml^2}{3} + \frac{Mh^2}{3} \left[\left(1 + \frac{l}{h} \right)^3 - \left(\frac{l}{h} \right)^3 \right]. \tag{3.3}$$

NAVODILO

Valj odvij s palice, nato pa oba dela nihala stehtaj. Dolžini l in h izmeri z merilnim trakom in kljunastim merilom. Lego težišča določi z ugotavljanjem ravnovesja: najprej na prstu in nato še na ostrini ravnila. Z izmerjenimi vrednostmi izračunaj nihajni čas t_0 iz enačb (3.1) in (3.3). Oцени tudi napako izračunane vrednosti. Dobljeno vrednost primerjaj z izmerjenim nihajnim časom, ki ga določiš tako, da s stoparico izmeriš čas, potreben za 100 nihajev. Meritev ponovi trikrat in izračunaj povprečni čas, potreben za en nihaj, ter statistično napako. Ali se obe izmerjeni vrednosti ujemata v okviru napak?

4 Viskozimeter s padajočo kroglico

NALOGA

Določi koeficient viskoznosti tekočine z merjenjem časa padanja kovinskih kroglic.

RAZLAGA

Na kroglico, ki pada v tekočini, delujejo tri sile: gravitacijska sila, vzgon in upor tekočine. Pri dovolj počasnem gibanju kroglice je upor tekočine pretežno posledica viskoznosti. Plast tekočine ob kroglici se prilepi ob površino kroglice in se giblje skupaj z njo. Sosednje plasti tekočine se tudi gibljejo, njihova hitrost pa se manjša z oddaljenostjo od kroglice. Sila upora je torej posledica trenja med sosednjimi plastmi tekočine. Pri dovolj počasnem gibanju kroglice je sila upora v neomejeni tekočini podana s Stokesovo enačbo:

$$F_u = 6\pi r \eta v, \quad (4.1)$$

kjer je η koeficient viskoznosti, v je hitrost kroglice, r pa njen polmer. Zapišimo Newtonov zakon za padanje kroglice v neomejeni tekočini:

$$m\vec{a} = \vec{F}_g + \vec{F}_{vzg} + \vec{F}_u = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho \vec{g} - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho' \vec{g} - 6\pi r \eta \vec{v}, \quad (4.2)$$

kjer je ρ gostota snovi, iz katere je kroglica, ρ' je gostota tekočine, g pa gravitacijski pospešek. Vse tri sile na desni strani enačbe leže na navpičnici: gravitacijska sila je usmerjena navzdol, vzgon in Stokesova sila upora pa navzgor (glej sliko 4.1). Zaradi viskoznosti preide v začetku pospešeno gibanje kroglice prej ali slej v enakomerno. Tedaj so vse tri sile v ravnovesju in velja:

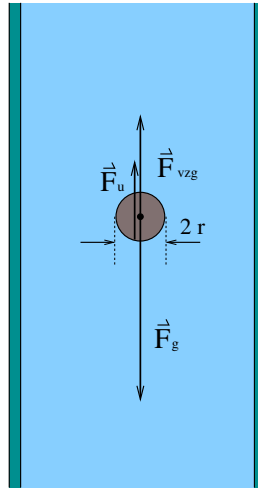
$$6\pi r \eta v = \frac{4}{3}\pi r^3 (\rho - \rho') g, \quad (4.3)$$

odtod pa lahko izračunamo viskoznost:

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{g(\rho - \rho') r^2}{v}. \quad (4.4)$$

Enačbo (4.4) moramo še popraviti zaradi končne hitrosti kroglice, zaradi končnega premera in končne višine tekočinskega stolpca. Področji veljavnosti Stokesove enačbe (linearni zakon upora) in enačbe za dinamični upor (kvadratni zakon upora) v grobem razmejimo z Reynoldsovim številom Re :

$$Re = \frac{2r\rho'v}{\eta}. \quad (4.5)$$



Slika 4.1: Sile, ki delujejo na padajočo kroglico v tekočini.

Kadar je $Re \ll 1$, velja Stokesov linearni zakon upora, pri zelo velikem Reynoldsovem številu, $Re \gg 1$, pa prevladuje dinamični upor. V vmesnem področju so razmere zapletene, zato si pomagamo s približki. Do vrednosti $Re \simeq 1$ tako računamo s popravljeno Stokesovo enačbo (4.1), v kateri s faktorjem

$$f_1 = 1 + \frac{3}{16}Re \quad (4.6)$$

upoštevamo prispevek dinamičnega upora. Viskoznost, izračunana z enačbo (4.4) je torej prevelika, zato jo moramo deliti s faktorjem (4.6).

Naslednji popravek je potreben zaradi končnega premera valja, v katerem pada kroglica. Kroglica v resnici pada počasneje, kot predvideva Stokesov zakon, tako da je viskoznost navidez povečana za faktor:

$$f_2 = 1 + 2,1 \frac{2r}{2R}, \quad (4.7)$$

če je $2R$ notranji premer valja. Viskoznost v enačbi (4.4) je zato treba deliti tudi s faktorjem (4.7).

Na merjeno viskoznost η vpliva še višina stolpca tekočine, v kateri pada kroglica. Tudi zaradi tega efekta je viskoznost navidezno povečana, tokrat za faktor:

$$f_3 = 1 + 3,3 \frac{r}{H}, \quad (4.8)$$

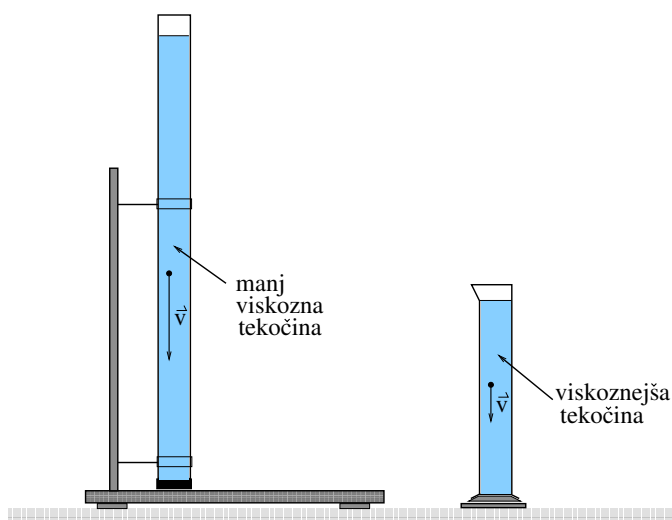
kjer smo s H označili višino tekočinskega stolpca.

Končno enačbo za izračun viskoznosti tako dobimo z upoštevanjem izraza (4.4) in vseh treh popravkov (4.6-4.8):

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{g(\rho - \rho')r^2}{v} \frac{1}{1 + \frac{3}{16}Re} \frac{1}{1 + 2,1 \frac{2r}{2R}} \frac{1}{1 + 3,3 \frac{r}{H}}. \quad (4.9)$$

IZVEDBA

Izmeriti moraš viskoznost dveh tekočin, manj viskozna je v visokem valju, viskoznejša pa v nizkem (glej sliko 4.2). Za poskus izberi tri kroglice različnih velikosti in z mikrometrom izmeri njihov premer. Izmeri tudi razmik med oznakama na valju, notranji premer valja in višino tekočinskega stolpca. Vsako od kroglic nato spusti tik nad gladino tekočine, tako da pade čim bliže osi valja. S štoparico izmeri čas, v katerem kroglica pade od zgornje do spodnje oznake na valju. Meritev za vsako kroglico ponovi trikrat. Tako boš za vsak valj dobil 9 različnih meritev časa. Meritve časa povpreči za vsako kroglico posebej.



Slika 4.2: Shema eksperimenta.

Koeficient viskoznosti izračunaš tako, da najprej iz enačbe (4.4) izračunaš η za vsako kroglico posebej. S tako dobljenim koeficientom viskoznosti izračunaj nato ustrezna Reynoldsova števila (enačba (4.5)). Na koncu iz enačbe (4.9) izračunaj popravljene koeficiente viskoznosti. Za vsako tekočino poišči povprečno vrednost viskoznosti iz rezultatov za vsako od treh kroglic in oceni napako meritve.

5 Določanje gostote trdnih teles z vzgonom

NALOGA

Z merjenjem vzgona določi gostoto kovinskega merjenca in gostoto 50-gramske uteži. Ker sta obe telesi iz zlitine bakra in cinka, obakrat izračunaj še masne in volumske deleže obeh kovin v zlitini.

RAZLAGA

Gostoto telesa poznamo, če izmerimo njegovo maso in prostornino. Obe količini bomo določili s tehtanjem na laboratorijski tehtnici. Pri tem volumna ne bomo merili direktno, ampak preko sile vzgona. V ta namen bomo najprej stehali samo čašo z vodo, nato pa bomo pred ponovnim tehtanjem v čašo z vodo potopili dano telo, obešeno na stojalo (glej sliko 5.1).

Prepričajmo se, da na omenjeni način zares lahko izmerimo gostoto danega telesa. S tehtanjem telesa najprej določimo njegovo težo:

$$F_1 = F_g = mg = \rho V g . \quad (5.1)$$

Volumen telesa nastopa tudi v izrazu za vzgon na dano telo v tekočini z gostoto ρ_{tek} :

$$F_{vzg} = \rho_{tek} V g . \quad (5.2)$$

Gostoto telesa torej lahko dobimo z deljenjem enačb (5.1) in (5.2):

$$\rho = \frac{F_g}{F_{vzg}} \rho_{tek} , \quad (5.3)$$

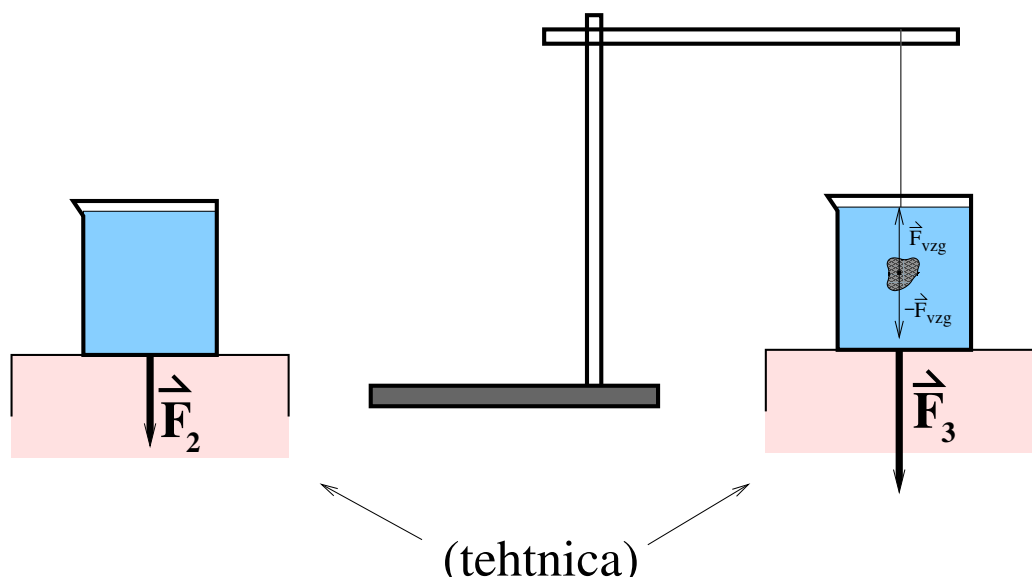
ne da bi zares računali maso in volumen telesa.

Določiti moramo še silo vzgona. Če stehamo čašo s tekočino, v kateri je potopljeno telo, obešeno na vrvici, ugotovimo, da je izmerjena sila (F_3) v tem primeru večja, kot pa če stehamo samo čašo s tekočino (F_2). Razlika je enaka sili, s katero lebdeče telo deluje na čašo. Ta sila je po Newtonovem zakonu nasprotno enaka sili vzgona, kar je prikazano tudi na sliki 5.1. Silo vzgona torej izmerimo kot razliko sil pri obeh tehtanjih:

$$F_{vzg} = F_3 - F_2 , \quad (5.4)$$

z dobljeno vrednostjo pa lahko iz enačbe (5.3) izračunamo gostoto danega telesa:

$$\rho = \frac{F_g}{F_{vzg}} \rho_{tek} = \frac{F_1}{F_3 - F_2} \rho_{tek} . \quad (5.5)$$



Slika 5.1: Čašo tehtamo dvakrat: pri prvem tehtanju čašo napolnimo z vodo (leva slika), pri drugem pa v vodo potopimo še telo, obešeno na stojalu (desna slika).

IZVEDBA

Najprej stehtaj dano telo! S tem izmeriš silo F_1 . Nato stehtaj čašo z vodo, s čimer določiš silo F_2 . Na koncu stehtaj še čašo z vodo, v kateri je potopljeno telo, obešeno na stojalu! To je meritev F_3 . Vse tri meritve opravi z laboratorijsko tehtnico. Natančnost tehtanja je določena z maso najmanjše uteži, ki jo imamo na voljo, zato si to vrednost zapiši. Pri delu pazi, da se stojalo z obešenim telesom nikjer ne dotika tehtnice! Tudi potopljeno telo mora med tehtanjem lebdeti v vodi in se ne sme nikjer dotikati čaše! Vsa tri tehtanja nato ponovi še za drugo telo in iz enačbe (5.5) izračunaj obe gostoti.

Za obe telesi določi iz izmerjene gostote še masni in prostorninski delež bakra in cinka v zlitini (gostota bakra je $8,93 \text{ g/cm}^3$, cinka pa $7,14 \text{ g/cm}^3$).

6 Določitev Faradayevega naboja

NALOGA

S Hoffmanovim elektrolitskim aparatom določi Faradayev naboj!

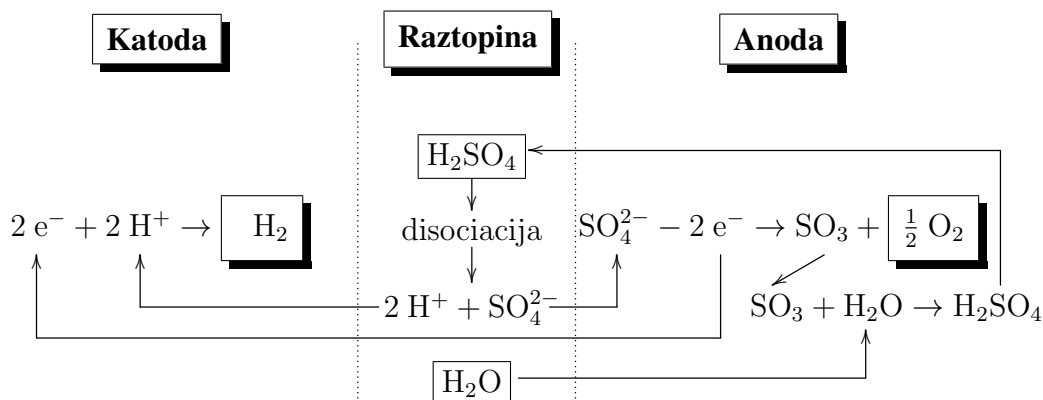
RAZLAGA

Ob enosmernem električnem toku skozi raztopino kisline, baze ali soli (elektrolit) se na elektrodah izločajo snovi. Ta pojav imenujemo elektroliza. Nosilci toka v teh raztopinah so pozitivni in negativni ioni, katerih naboj je enak celemu večkratniku osnovnega naboja $e_0 = 1,602 \cdot 10^{-19}$ As. Količina izločene snovi je odvisna samo od pretočenega naboja q . Po Faradayevem zakonu je za izločitev kilogramskega ekvivalenta poljubne snovi potreben naboj $q_F = N_A e_0 = 96,5 \cdot 10^6$ As, pri čemer je $N_A = 6,026 \cdot 10^{26}$ Avogadrovo število, naboj q_F pa imenujemo Faradayev naboj. Pretočeni naboj q torej izloči maso:

$$m = \frac{q}{q_F} \frac{M}{v}, \quad (6.1)$$

kjer je M masa kilomola izločene snovi in v njena valenca. Kvocient M/v imenujemo kilogramski ekvivalent.

Podrobneje si oglejmo dogajanje v vodni raztopini žveplene kisline, po kateri teče električni tok. Poskus pokaže, da se v tem primeru na elektrodah izločata kisik in vodik (glej sliko 6.1). Potek elektrolize si predočimo z naslednjo shemo, ki kaže povezave med procesi, ki potečejo na obeh elektrodah in v raztopini:



Končna bilanca procesov je razkroj vode, $H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2} O_2$, medtem ko ostane množina kisline nespremenjena. Za elektrolizo enega kilomola vode torej porabimo dva Faradayeva naboja, pri tem pa se na elektrodah sprosti en kilomol vodika (H_2) in pol kilomola kisika (O_2). Ker imamo opravka s plini, bomo namesto mase raje merili in računali prostornine plinov. Pri normalnih okoliščinah, to je pri

temperaturi $T_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ in tlaku $p_0 = 101325\text{ Pa}$, bi nastali vodik tako zavzemal prostornino $22,415\text{ m}^3$, kisik pa $11,208\text{ m}^3$. Da boš lahko pričakovane vrednosti primerjal s svojimi, moraš izmerjeni prostornini $V'(\text{H}_2)$ in $V'(\text{O}_2)$ reducirati na normalne okoliščine.

Najprej izračunajmo tlak plina v bireti. Račun bomo napravili za en plin, na primer za vodik, račun za kisik pa je potem povsem enak. Celoten tlak v bireti je vsota delnega tlaka plina p_p in delnega tlaka vodne pare p_v , po velikosti pa je enak vsoti zračnega tlaka p_z in tlaka tekočine zaradi višinske razlike h_1 (slika 6.1) med gladinama v srednjem kraku aparata in v bireti:

$$p_{p1} + p_v = p(\text{H}_2) + p_v = p_z + \rho g h_1, \quad (6.2)$$

pri čemer je ρ gostota kisline. Pri temperaturah med $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ je gostota 10 % raztopine žveplene kisline okoli $1,10\text{ g/cm}^3$. Zgostitev kisline zaradi razkroja vode je neznatna. Iz zgornje enačbe sedaj lahko izračunamo tlak plina:

$$p(\text{H}_2) = p_z + \rho g h_1 - p_v. \quad (6.3)$$

Delni tlak vodne pare p_v nad kislino je odvisen od temperature in od koncentracije kisline. Pri temperaturah med $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ je za 10 % kislino p_v enak 95,6 % nasičenega parnega tlaka čiste vode (p_s) pri dani temperaturi (Parni tlak čiste vode lahko odčitaš iz tabele 6.1).

Sedaj poiščimo še reducirano prostornino vodika, $V(\text{H}_2)$. Po plinski enačbi je:

$$\frac{p(\text{H}_2)V'(\text{H}_2)}{T_1} = \frac{p_0V(\text{H}_2)}{T_0}, \quad (6.4)$$

tako da je reducirana prostornina vodika:

$$V(\text{H}_2) = V'(\text{H}_2) \frac{p(\text{H}_2)T_0}{p_0T_1}. \quad (6.5)$$

pri čemer je T_1 izmerjena absolutna temperatura plina, p_0 in T_0 pa sta tlak in temperatura pri normalnih okoliščinah, $p_0 = 101325\text{ Pa}$ in $T_0 = 273,15\text{ K}$. Na enak način izračunamo tudi reducirano prostornino kisika, $V(\text{O}_2)$.

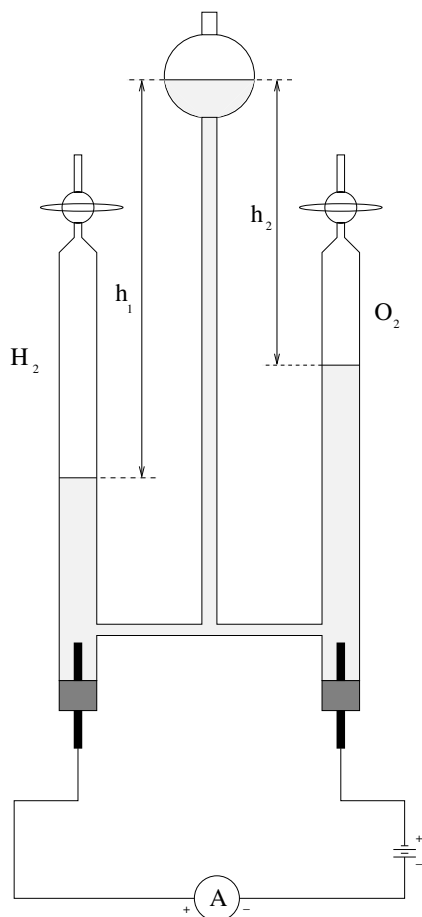
Z izmerjeno povprečno vrednostjo električnega toka $\bar{I}$ lahko določimo pretočeni naboj $q = \bar{I}t$. V skladu z enačbo (6.1) lahko z vsako od reduciranih prostornin, $V(\text{H}_2)$ in $V(\text{O}_2)$, posebej izračunamo Faradayev naboj:

$$q_F = \frac{\bar{I}t}{2} \frac{V_M}{V(\text{H}_2)} = \frac{\bar{I}t}{4} \frac{V_M}{V(\text{O}_2)}, \quad (6.6)$$

pri čemer je $V_M = 22,415\text{ m}^3$ kilomolska prostornina plina pri normalnih okoliščinah.

NAVODILO

Hoffmanov aparat je sestavljen iz treh krakov. Stranska dva sta merilni bireti in služita za merjenje prostornine plinov, ki se izločata na platinskih elektrodah, vtaljenih v spodnjem delu bilet. Srednji krak služi kot rezervoar vodne raztopine kisline. Shema Hoffmanovega aparata prikazuje skica 6.1.



Slika 6.1: Skica Hoffmanovega aparata. Vodik se nabere v bireti, v katero je vtaljena negativna elektroda, kisik pa v bireti s pozitivno elektrodo.

Aparat naj bo do pipic napolnjen z 10 % žvepleno kislino. Zaporedno zveži ampermeter in Hoffmanov aparat ter ju priključi na usmernik (glej shemo na sliki 6.1). Skleni tok za toliko časa, da nasitiš kislino v biletah z vodikom in kisikom. Nato pipici polagoma odpri toliko, da izpustiš plin do konca in ju spet zapri. Pri tem pazi, da kislina ne brizgne iz aparata! Če nad pipico ostane kaplja kisline, jo obriši s krpo ali s koščkom papirne brisače. Na ta način je vse pripravljeno za meritev. Poglej na uro in hkrati vključi tok! Zaradi morebitnega spreminjanja

toka kontroliraj in zapisuj tok v enakomernih presledkih, na primer vsako minuto. Zaradi lažjega nadzora meritev istočasno zapiši tudi volumen izločenega vodika. Ko se nabere okrog 25 cm^3 vodika, ustavi tok in poglej na uro. Zabeleži si čas, v katerem je tekel tok in preberi na biretah prostornini izločenih plinov, V'_{H_2} in V'_{O_2} . Z ravnilom izmeri še višinski razliki h_1 in h_2 med gladinami kisline v biretah in srednjem kraku aparata. Izmeri temperature plinov in kisline – upoštevaj, da so te temperature približno enake temperaturi okolice – in na barometru preberi zunanji zračni tlak. S temi podatki boš izračunal tlak plina v obeh biretah.

Za vsakega od plinov izračunaj reducirano prostornino (enačba (6.5)), z njo pa ustrezni Faradayev naboj (enačba (6.6)). Poišči še povprečje obeh vrednosti in oceni natančnost meritve.

$T \text{ [}^\circ\text{C]}$	$p_s \text{ [N/m}^2\text{]}$
15	1700
16	1810
17	1930
18	2070
19	2200
20	2340
21	2470
22	2640
23	2810
24	2990
25	3170
26	3360
27	3560
28	3770
29	4000
30	4240

Tabela 6.1: Odvisnost nasičenega parnega tlaka čiste vode (p_s) od temperature T .

7 Specifična toplota vode

NALOGA

Izmeri specifično toplotu vode.

RAZLAGA

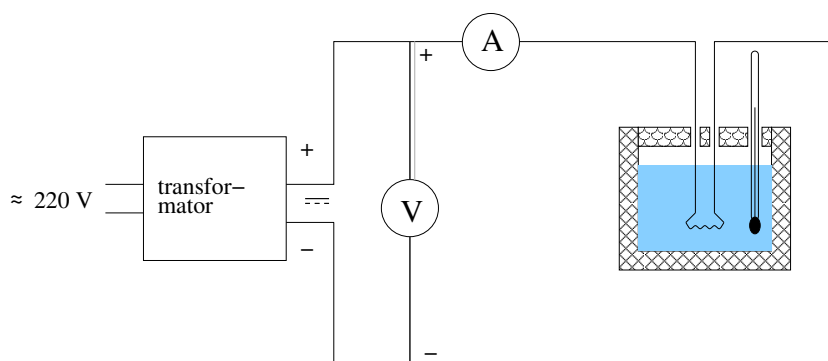
Če v kalorimeter, katerega toplotno kapaciteto poznamo, vlijemo znano maso vode, m_v , in jo segrevamo z električnim grelcem, se bo voda segrela. Toplota, ki jo bo grelec oddal vodi, je enaka električnemu delu. Tako velja

$$UIt = (m_v c_p + C_{kal}) \Delta T, \quad (7.1)$$

kjer je U napetost, I je jakost toka, t je čas segrevanja, c_p je specifična toplota vode pri konstantnem tlaku, C_{kal} je toplotna kapaciteta kalorimetra, ΔT pa sprememba temperature vode in kalorimetra zaradi segrevanja. Iz enačbe (7.1) lahko izračunamo c_p , če poznamo ostale količine.

NAVODILO

V kalorimeter vlij okoli 400 ml vode iz vodovoda (volumen vode natančno izmeri). Kalorimeter pokrij z zamaškom, v katerem sta termometer in grelec. Zapiši si začetno temperaturo. Nato zveži priključka na grelcu po shemi, prikazani na sliki 7.1. Pripravi si tabelo, v katero boš nanašal podatke o času, temperaturi, napetosti in toku.



Slika 7.1: Shema aparature.

Ko priključiš transformator na 220 V, vključi štoparico. Vsako minuto si v pripravljeno tabelo zapiši temperaturo v kalorimetru ter vrednosti toka in napetosti. Vodo v kalorimetru mešaj tako, da umirjeno premikaš kalorimeter. Ko se temperatura vode dvignila za okoli 15 °C, izključi grelec in dalje mešaj. Ko se tem-

peratura ustali, si jo zapiši. Ker si maso vode m natančno izmeril, imaš tako v enačbi (7.1) znane vse količine razen c_p in C_{kal} .

Sedaj moraš določiti še toplotno kapaciteto kalorimetra, C_{kal} . To naredi na naslednji način: Pred meritvijo si v čaši pripravi enako količino hladne vode, kot si jo vлил v kalorimeter. V tako pripravljeno vodo vtakni termometer in jo pusti pri miru do konca prvega dela meritve. Ko si končal z zgornjo meritvijo in izmeril končno temperaturo ogrete vode v kalorimetru, odčitaj temperaturo vode v rezervni čaši. Nato naglo zlij toplo vodo iz kalorimetra in v njega vlij hladnejšo vodo, katere temperaturo si pravkar izmeril. Ker je bil kalorimeter topel, se bo ta voda nekoliko segrela, kalorimeter pa se bo ohladil. Iz dviga temperature vode, ΔT_v , in padca temperature kalorimetra, ΔT_{kal} , lahko izračunaš, koliko toplote se je preneslo v drugem delu meritve:

$$m_v c_p \Delta T_v = C_{kal} \Delta T_{kal}. \quad (7.2)$$

Če v obeh meritvah res uporabiš enako količino vode, lahko iz enačb (7.1) in (7.2) izračunaš specifično toploto vode, ne da bi poznal toplotno kapaciteto kalorimetra:

$$c_p = \frac{UIt}{m_v \Delta T} \cdot \left(1 + \frac{\Delta T_v}{\Delta T_{kal}} \right)^{-1}. \quad (7.3)$$

OPOMBA

Pri izračunu upoštevaj še, da se merjena napetost U porazdeli na grelec in ampermeter, tako da je napetost na grelcu manjša, kot kaže voltmeter. Padec napetosti na ampermetru lahko izračunaš, če poznaš velikost toka in upornost ampermetra. Slednjo vrednost prebereš na pokrovu instrumenta. Na koncu še preveri, če oba termometra – tisti v kalorimetru in tisti, s katerim si izmeril temperaturo hladne vode – kažeta enako. Natančnejši je termometer v kalorimetru.

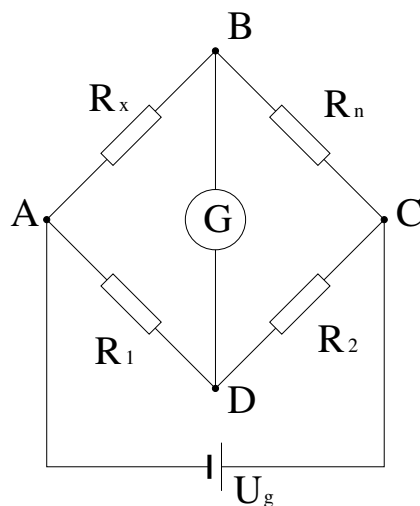
8 Wheatstonov most

NALOGA

Izmeri neznane upore z Wheatstonovim mostičem.

RAZLAGA

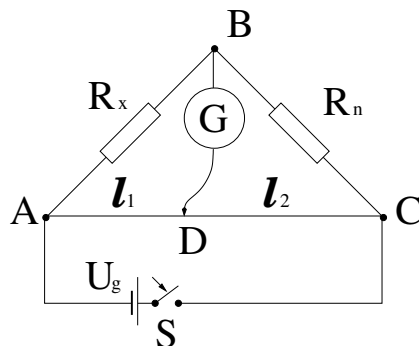
Meritev z Wheatstonovim mostičem, shematsko prikazanim na sliki 8.1, je klasična metoda za meritev uporov. Mostič je sestavljen iz štirih upornikov, povezanih v



Slika 8.1: Shema vezja v Wheatstonovem mostiču.

zanko. V eni diagonalni veji vezja je galvanometer G , v drugi pa izvor gonilne napetosti, U_g . Upornik, katerega upor R_x želimo izmeriti, je priključen v veji AB, v veji BC pa je standardni upornik, katerega upor R_n lahko spreminjamo – običajno je to uporovna dekada. Spreminjamo lahko tudi razmerje preostalih dveh uporov, R_1/R_2 . Preprosto izvedbo Wheatstonovega mostiča prikazuje slika 8.2. Vejo ADC in s tem upornika R_1 in R_2 v tem primeru nadomešča na merilu razpeta enakomerno debela uporovna žica. Razmerje uporov R_1/R_2 tako spreminjamo kar s premikanjem drsnika D po žici.

Tok, ki teče skozi galvanometer, je odvisen od uporov R_1 , R_2 , R_n in R_x . S premikanjem drsnika je moč izbrati takšno razmerje uporov R_1/R_2 , da tok skozi galvanometer ne teče. Takrat pravimo, da smo Wheatstonov mostič uravnovesili. Pri uravnovešenem mostiču sta potenciala v točkah B in D enaka, zato sta enaki tudi napetostni razliki na zgornji in spodnji veji: $U_{AB} = U_{AD}$ ter $U_{BC} = U_{DC}$. Če z I_1 označimo tok v veji ABC, z I_2 pa tok v veji ADC, lahko prejšnji enačbi



Slika 8.2: Shema Wheatstonovega mostiča, v katerem sta upora R_1 in R_2 nadomeščena z enakomerno debelo žico.

zapišemo kot:

$$U_{AB} = U_{AD} \rightarrow I_1 R_x = I_2 R_1, \quad U_{BC} = U_{DC} \rightarrow I_1 R_n = I_2 R_2. \quad (8.1)$$

Z medsebojnim deljenjem zgornjih enačb pridemo do naslednje zveze:

$$R_x = R_n \frac{R_1}{R_2}. \quad (8.2)$$

Upor kovinske žice je sorazmeren dolžini žice l in obratno sorazmeren z njenim presekom S :

$$R = \xi \frac{l}{S}, \quad (8.3)$$

sorazmernostni koeficient ξ pa se imenuje specifični upor, ki je odvisen od lastnosti snovi. Upora R_1 in R_2 lahko tako izrazimo z dolžinama l_1 in l_2 :

$$R_1 = \xi \frac{l_1}{S}, \quad R_2 = \xi \frac{l_2}{S}. \quad (8.4)$$

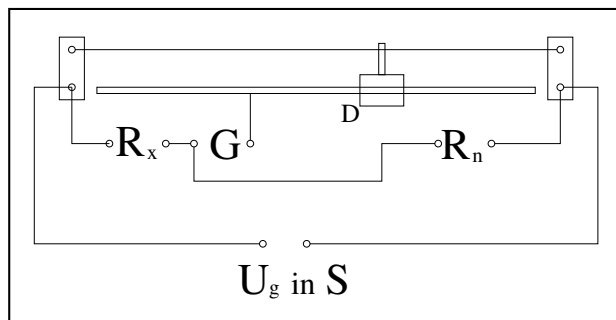
Če upoštevamo zvezo $l_1 + l_2 = l$, lahko s kombiniranjem enačb (8.2) in (8.4) izrazimo neznani upor R_x v naslednji obliki:

$$R_x = R_n \frac{l_1}{l_2} = R_n \frac{l_1}{l - l_1}. \quad (8.5)$$

V principu lahko upor R_x izmerimo pri poljubni vrednosti upora R_n . Od velikosti upora R_n je namreč odvisen le položaj drsnika, pri katerem je mostič uravnovešen, to pa vpliva le na razmerje $l_1/(l - l_1)$. Izkaže se, da je meritev neznanega upora najbolj natančna takrat, ko upor R_n izberemo tako, da dosežemo uravnovešenje mostiča v bližini sredine uporovne žice. (Glej opis v Dodatku k navodilom za to vajo.)

NAVODILO

Poveži vezje na deščici, upornik R_n , galvanometer G , stikalo S , upornik R_x in izvor gonilne napetosti U_g tako, kot kaže slika 8.3. Na mesto R_x veži nez-



Slika 8.3: Shema vezja Wheatstonovega mostiča, v katerem sta upora R_1 in R_2 nadomeščena z enakomerno debelo žico.

nani upornik in si zapiši njegovo oznako. Drsnik D na začetku nastavi na sredo uporovne žice. Preden drsnik premakneš, ga dvigni, da se pri premikanju ne dotika uporovne žice, po premiku pa ga zopet pritisni ob uporovno žico.

Izberi na uporovni dekadi določen upor, nato za kratek čas pritisni tipko na stikalu in si zapomni odklon galvanometra. Postopek ponavljaj z različnimi upori na dekadi, dokler ni odklon galvanometra najmanjši. Nato poišči z drsnikom točko na uporovni žici, v kateri je mostič uravnovešen, tako da skozi galvanometer tok ne teče. Odčitaj lego drsnika (določi dolžino l_1) in upor dekade R_{n1} . Nato spremeni upor dekade v $R_{n1}(1 \pm 5\%)$, $R_{n1}(1 \pm 10\%)$ in $R_{n1}(1 \pm 15\%)$ ter vsakič ponovno uravnovesi mostič. Po vsakem uravnovešenju mostiča odčitaj lego drsnika, l_1 , in ustrezni upor dekade, R_n . Na ta način s ponavljanjem postopka dobimo sedem parov vrednosti R_{ni} , l_{1i} , iz katerih z enačbo (8.5) izračunamo sedem neodvisnih rezultatov za neznani upor R_x . Nato izračunaj še povprečno vrednost $\langle R_x \rangle$ in standardno statistično napako σ_{R_x} .

Meritev ponovi še za en neznani upornik R_x . Tudi za tega si ne pozabi zapisati oznake.

DODATEK

Poglejmo, kako je napaka pri meritvi upora R_x odvisna od položaja drsnika, pri katerem je mostič uravnovešen. Pri računu bomo upoštevali samo vpliv napake pri meritvi položaja drsnika, Δl_1 , na izmerjeno vrednost R_x .

Z odvajanjem enačbe (8.5) dobimo:

$$\frac{\partial R_x}{\partial l_1} = R_n \frac{l}{(l - l_1)^2}, \quad (8.6)$$

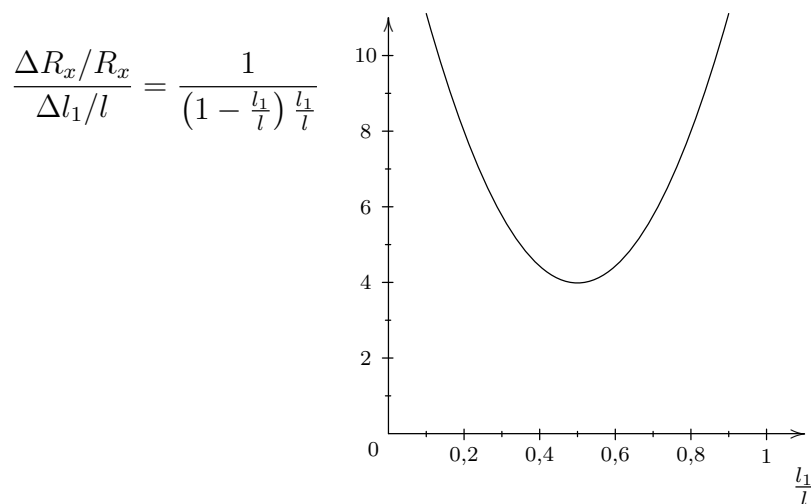
s čimer lahko izračunamo napako upora R_x :

$$\Delta R_x = \left| \frac{\partial R_x}{\partial l_1} \right| \Delta l_1 = \frac{R_n l}{(l - l_1)^2} \Delta l_1. \quad (8.7)$$

Iz enačb (8.7) in (8.5) lahko izračunamo še relativno napako:

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{l}{l_1(l - l_1)} \Delta l_1 = \frac{1}{\left(1 - \frac{l_1}{l}\right) \frac{l_1}{l}} \frac{\Delta l_1}{l}, \quad (8.8)$$

ki je pri določeni merski napaki dolžine Δl_1 odvisna le še od razmerja l_1/l . S slike 8.4, ki prikazuje odvisnost relativne napake meritve neznanega upora R_x od razmerja dolžin l_1/l , je razvidno, da je pri dani merski napaki Δl_1 relativna napaka meritve neznanega upora najmanjša takrat, ko je $l_1/l = 1/2$. To pomeni, da je pri meritvi priporočljivo izbrati upor R_n tako, da dosežemo uravnovešanje mostiča v bližini sredine uporovne žice.



Slika 8.4: Odvisnost relativne napake meritve neznanega upora R_x od razmerja dolžin l_1/l .

9 Meritev magnetnega polja Zemlje po Gauss-u

NALOGA

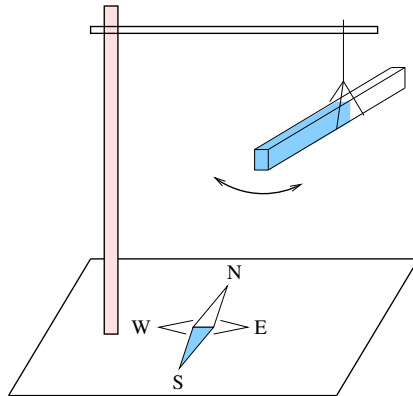
Izmeri vodoravno komponento zemeljskega magnetnega polja in magnetni moment paličastega magneta.

RAZLAGA

V homogenem magnetnem polju deluje na magnetni dipol, ki ga predstavlja magnetnica ali paličasti magnet, navor:

$$\vec{M} = \vec{p}_m \times \vec{B}, \quad (9.1)$$

kjer je $\vec{p}_m$ magnetni moment dipola, $\vec{B}$ pa gostota magnetnega polja. Navor vrtil magnetni dipol okoli osi, ki je hkrati pravokotna na magnetni dipolni moment $\vec{p}_m$ in na smer magnetnega polja. Prosto gibljiva magnetnica se zato postavi tako, da vektorja $\vec{p}_m$ in $\vec{B}$ sovpadata. Tedaj navor na magnetni dipol izgine ($\vec{p}_m \times \vec{B} = 0$).



Slika 9.1: Magnetni dipol niha okoli zemeljskega magnetnega polja v vodoravni smeri. Nihajni čas tega nihanja je odvisen od vodoravne komponente gostote zemeljskega magnetnega polja.

Poglejmo, kaj se zgodi, če magnetni dipol, vrtljiv okoli navpične osi, ki gre skozi težišče magneta, izmaknemo iz ravnovesne lege v vodoravni smeri (glej sliko 9.1). Dipol zaniha, ker ga v ravnovesno lego sili navor:

$$M' = |\vec{p}_m \times \vec{B}| = p_m B' \sin \phi, \quad (9.2)$$

pri čemer je $\vec{B}'$ tista komponente gostote magnetnega polja, ki leži v ravnini vrtenja magnetnice kompasa. Za kot ϕ med $\vec{p}_m$ in $\vec{B}'$ smemo pri dovolj majhnih amplitudah nihanja uporabiti približek: $\sin \phi \approx \phi$. Če zapišemo Newtonov

zakon za vrtenje togega telesa okoli nepremične osi, dobimo naslednjo diferencialno enačbo:

$$J^* \frac{d^2 \phi}{dt^2} + p_m B' \phi = 0. \quad (9.3)$$

Ko zgornjo enačbo zapišemo kot enačbo nihanja:

$$\frac{d^2 \phi}{dt^2} + \omega_0^2 \phi = 0, \quad (9.4)$$

lahko iz nje preberemo lastno krožno frekvenco nihanja magnetnega dipola:

$$\omega_0^2 = \sqrt{\frac{p_m B'}{J^*}} \quad (9.5)$$

in ustrezni lastni nihajni čas:

$$t_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{J^*}{p_m B'}}. \quad (9.6)$$

Z meritvijo nihajnega časa lahko torej določimo produkt $p_m B'$, če poznamo J^* – vztrajnostni moment magnetnega dipola glede na os vrtenja. Za dolg in tanek paličasti magnet vztrajnostni moment določimo s tehtanjem in merjenjem dolžine magnetu l , saj velja:

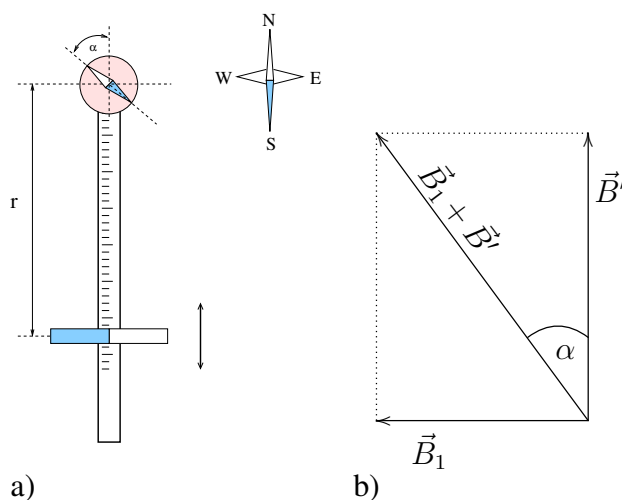
$$J^* = \frac{ml^2}{12}. \quad (9.7)$$

Da bomo lahko izmerili p_m in B' , potrebujemo poleg nihajnega časa (9.6) še eno neodvisno meritev. V ta namen namestimo paličasti magnet tako, da kaže vektor $\vec{p}_m$ pravokotno na smer vodoravne komponente zemeljskega magnetnega polja, v primerni razdalji od paličastega magnetu pa postavimo magnetnico (glej sliko 9.2 a). Magnetnica naj bo vrtljiva v vodoravni smeri okoli svojega težišča. Paličasti magnet lahko obravnavamo kot točkasti magnetni dipol, če je razdalja med njim in magnetnico velika v primerjavi z razsežnostmi magnetu. Vodoravna komponenta gostote magnetnega polja, ki jo na mestu magnetnice povzroči paličasti magnet, je v tem primeru:

$$\vec{B}_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\vec{p}_m}{r^3}, \quad (9.8)$$

če je r razdalja med težiščema magnetnice in paličastega magnetu. Pod vplivom magnetnih polj $\vec{B}'$ in $\vec{B}_1$ se magnetnica postavi v smer rezultante obeh polj (glej sliko 9.2 b), tako da velja:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{B_1}{B'} = \frac{\mu_0}{4\pi r^3} \frac{p_m}{B'}. \quad (9.9)$$



Slika 9.2: a) Zaradi približevanja paličastega magneta se magnetnica zasuka okoli navpične osi in odkloni od smeri sever–jug. b) Magnetnica se postavi v smeri rezultante magnetnih polj Zemlje in paličastega magneta.

Z izmerjenim kotom α torej lahko izračunamo kvocient p_m/B' :

$$\frac{p_m}{B'} = \frac{4\pi r^3}{\mu_0} \operatorname{tg} \alpha. \quad (9.10)$$

Meritvi nihajnega časa paličastega magneta in kota α lahko torej preko enačb (9.6) in (9.10) uporabimo za to, da istočasno določimo magnetni moment paličastega magneta in velikost vodoravne komponente gostote magnetnega polja na mestu magnetnice.

NAVODILO

Na tanko nit obesi paličasti magnet, tako da lahko niha v vodoravni ravnini, kot je to prikazano na sliki 9.1. Ko se magnet umiri, ga za majhen kot izmakni iz ravnovesne lege, tako da prične nihati v vodoravni legi. Nihajni čas izmeri s štoparico za deset nihajev skupaj. Meritev večkrat ponovi in določi povprečno vrednost. Na koncu še stehtaj paličasti magnet in izmeri njegovo dolžino, tako da boš lahko izračunal vztrajnostni moment (9.7). Iz enačbe (9.6) izračunaj povprečno vrednost produkta $p_m B'$ in napako.

V drugem delu vaje naravnaj merilo ob podstavku z magnetno iglo točno v smer sever-jug (glej sliko 9.2). Pred to nastavitvijo odnesi magnet dovolj daleč stran. Nato postavi paličasti magnet na jahača na merilu. Izberi največjo razdaljo med paličastim magnetom in magnetnico. Pri tej legi magneta je odklon magnetnice od ravnovesne lege komaj še zaznaven. Odčitaj odklon magnetne igle (kot α) in

razdaljo r med težiščema paličastega magneta in magnetnice. V korakih po 5 cm približuj paličasti magnet magnetnici in odčitaj ustrezne odklonske kote. Napravi vsaj deset meritev in nato za vsako od njih iz enačbe (9.10) izračunaj razmerje p_m/B' . Tudi tokrat povpreči vse izmerjene vrednosti in oceni napako.

Vodoravno komponento zemeljskega magnetnega polja B' in dipolni moment paličastega magneta p_m dobiš z deljenjem in množenjem obeh povprečij izmerjenih količin: $\langle p_m \cdot B' \rangle$ in $\langle p_m/B' \rangle$. Pri obeh končnih rezultatih moraš navesti tudi napako.

10 Balistični galvanometer

NALOGA

Umeri balistični galvanometer.

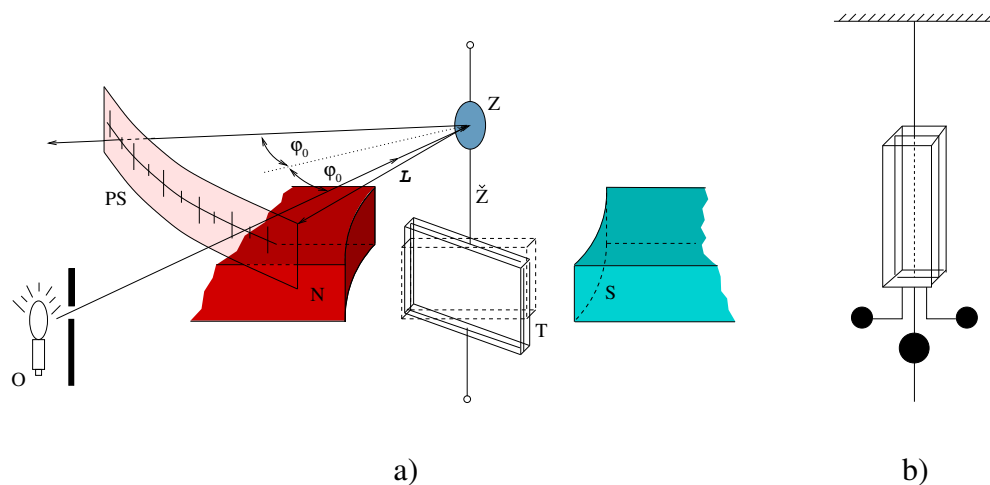
RAZLAGA

Z balističnimi galvanometri merimo električne naboje. Po izvedbi so to zrcalni galvanometri, pri katerih odziv inštrumenta merimo z zasukom zrcala, na katerega posvetimo s svetilom (glej sliko 10.1 a). Osrednji del takega galvanometra predstavlja tuljava, ki ji z dodatnimi masami povečamo vztrajnostni moment, vse skupaj pa obesimo na prožno žico (slika 10.1 b). Na ta način dobimo torzijsko nihalo, katerega nihajni čas je:

$$t_0 = 2\pi\sqrt{\frac{J}{D}}, \quad (10.1)$$

pri čemer je J vztrajnostni moment tuljave z dodatnimi masami, D pa torzijski koeficient žice.

Poglejmo si osnove delovanja takega galvanometra. V času Δt , ki je znatno krajši od nihajnega časa t_0 , definiranega v enačbi (10.1), naj teče skozi tuljavo balističnega galvanometra električni tok I . Zaradi toka delujejo v magnetnem polju trajnega magneta na tuljavo zunanje sile. Navor teh sil, M , skuša tuljavo zavrteti



Slika 10.1: a) Shematski prikaz zrcalnega galvanometra. Označeni deli so: Z - zrcalo; Ž - prožna žica; PS - prozorna skala; T - tuljava; N, S - severni in južni pol trajnega magneta; O - svetilo; b) Povečan prikaz tuljave z dodatnimi masami, obešene na prožni žici.

okoli njene osi. Električni tok in navor se v splošnem sicer spreminjata s časom, $I = I(t)$, $M = M(t)$, vendar pa sta ves čas med sabo sorazmerna: $M(t) \propto I(t)$. Ker nas zanima celotni naboj q_G , ki steče skozi galvanometer, skušamo v resnici izmeriti tokovni sunek:

$$q_G = \int_0^{\Delta t} I(t) dt, \quad (10.2)$$

ta pa je sorazmeren sunku navora zunanjih magnetnih sil:

$$\int_0^{\Delta t} I(t) dt \propto \int_0^{\Delta t} M(t) dt. \quad (10.3)$$

Sunek navora zunanjih sil lahko povežemo s spremembo vrtilne količine tuljave galvanometra:

$$\begin{aligned} \int_0^{\Delta t} M(t) dt &= \Delta\Gamma = \Gamma(\Delta t) - \Gamma(0) = \\ &= J\omega - 0 = J\omega. \end{aligned} \quad (10.4)$$

Tuljava se torej po času Δt začne vrteti s kotno hitrostjo ω , tako da njena kinetična energija takrat znaša:

$$W_{kin} = \frac{1}{2} J\omega^2. \quad (10.5)$$

Tuljava prične nato zvijati žico in se po določenem času $t_0/4$, ko se je zasukala za kot φ_0 , ustavi. V tistem trenutku se je začetna kinetična energija (10.5) spremenila v prožnostno energijo žice, tako da velja:

$$W_{kin} = W_{prož} \Rightarrow \frac{1}{2} J\omega^2 = \frac{1}{2} D\varphi_0^2. \quad (10.6)$$

Odtod lahko izluščimo zvezo med kotno hitrostjo ω in zasukom φ_0 :

$$\omega = \sqrt{\frac{D}{J}} \varphi_0. \quad (10.7)$$

Ko združimo enačbe (10.2), (10.3), (10.4) in (10.7), ugotovimo, da za naboj q_G , ki steče skozi galvanometer, velja:

$$q_G = \int_0^{\Delta t} I(t) dt \propto \int_0^{\Delta t} M(t) dt \propto \omega \propto \varphi_0. \quad (10.8)$$

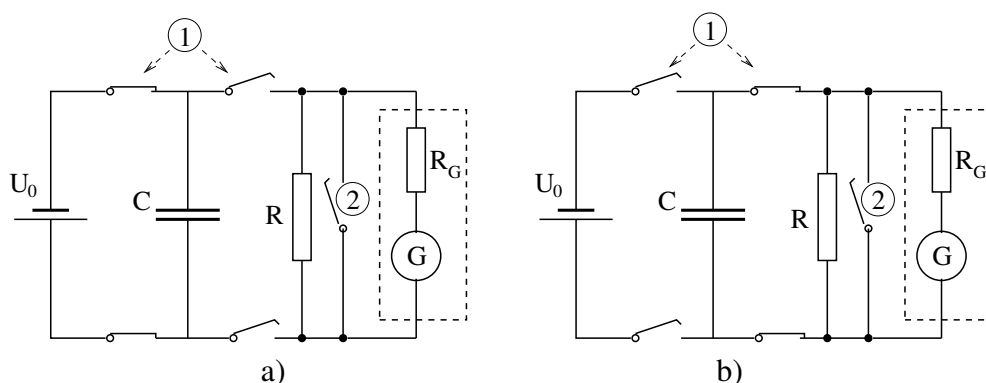
Če je torej izpolnjen pogoj $\Delta t \ll t_0$, je naboj q_G sorazmeren z največjim zasukom tuljave φ_0 :

$$q_G = C_q \varphi_0. \quad (10.9)$$

Sorazmernostni koeficient C_q v zgornji zvezi imenujemo balistična konstanta galvanometra in jo moramo za dani galvanometer izmeriti. Ko konstanto C_q določimo, pravimo, da smo galvanometer umerili, saj lahko iz največjega zasuka φ_0 izračunamo naboj q_G , ki je stekel skozi galvanometer.

NAVODILO

Za umeritev balističnega galvanometra imaš pripravljen stik v plastični škatlici. Shema stika prikazuje slika 10.2. Prikluči galvanometer na priključka na škatlici, nato pa postavi stikalo 1 v položaj „baterija”, stikalo 2 pa v položaj „praznjenje” (slika 10.2 a). S tem nabiješ kondenzator in priključka galvanometra pripraviš za naslednji korak. Stikalo 1 nato preklopi v položaj „kondenzator”. S tem si sklenil tokokrog kondenzator – tuljava balističnega galvanometra (glej sliko 10.2 b). Na merilu odčitaj največji odklon X_0 svetlobnega zajčka. Meritev ponovi desetkrat: petkrat naj se svetlobna pika odkloni v eno smer, petkrat pa v drugo (odklon v drugo smer dosežeš tako, da zamenjaš priključka galvanometra).

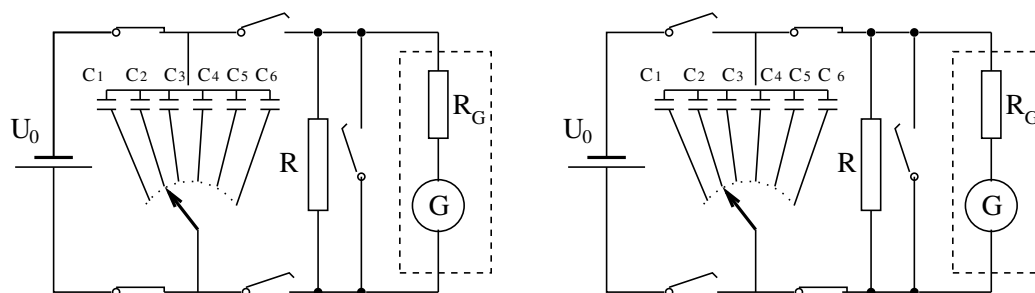


Slika 10.2: Shema vezja, namenjenega umeritvi balističnega galvanometra G. Položaj stikal ① in ② pri: a) polnjenju kondenzatorja; b) praznjenju kondenzatorja skozi upornik in galvanometer.

Iz izmerjenega največjega odklona zajčka, X_0 , izračunaj najprej ustrezni največji zasuk:

$$\varphi_0 = \frac{X_0}{L}, \quad (10.10)$$

kjer je L razdalja med zrcalcem galvanometra in sredino merila. Poišči povprečno vrednost $\langle \varphi_0 \rangle$ in oceni napako. Balistično konstanto galvanometra izraziš iz zveze



Slika 10.3: Shema na sliki 10.2 prikazuje umeritveno vezje z enim kondenzatorjem s kapaciteto C . V vezju, ki ga imaš na voljo, pa lahko v resnici izbiraš med šestimi različnimi kondenzatorji.

(10.9), če naboj q_G , ki steče skozi galvanometer, izračunaš iz podatkov za upor R , notranji upor galvanometra R_G , kapacitete kondenzatorja C in gonilne napetosti baterije U_0 :

$$q_G = \frac{R}{R + R_G} C U_0. \quad (10.11)$$

Pri meritvi lahko izbiraš med šestimi različnimi vrednostmi kapacitet (glej sliko 10.3 in tabelo 10.1) kondenzatorja. Za vsako od teh vrednosti določi q_G in povprečni največji odklon galvanometra $\langle \varphi_0 \rangle$. Na graf nariši q_G kot funkcijo $\langle \varphi_0 \rangle$. Naklon premice, ki jo potegneš skozi dobljene točke, je enak balistični konstanti galvanometra. Iz napake pri risanju premice oceni tudi napako balistične konstante.

L	27 cm $\pm$ 1 mm
1 oznaka	0,965 mm
R_G	1410 Ω
U_0	3,2 V
R	197 Ω
C_1	0,505 μ F
C_2	1,02 μ F
C_3	2,23 μ F
C_4	3,45 μ F
C_5	4,47 μ F
C_6	5,52 μ F

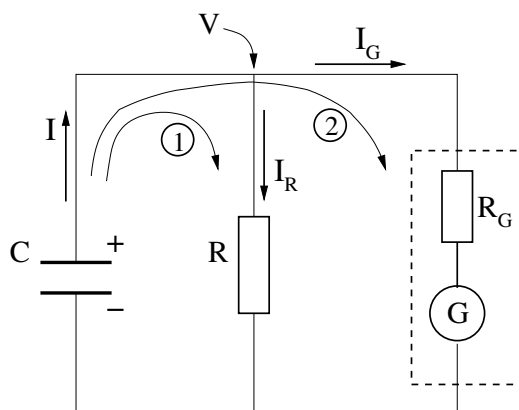
Tabela 10.1: Podatki o galvanometru ter elementih vezja.

OPOZORILO

Ko je stikalo 2 v položaju „galvanometer”, je tuljava galvanometra kratko sklenjena, s čimer varujemo občutljivi sistem galvanometra pred nihanjem, ki jih povzročajo zunanje motnje. V ta položaj prestavi stikalo 2 na plastični škatli, ko zaključiš z vajo!

DODATEK

Poglejmo, kako pridemo do zveze (10.11). Ko si sklenil tokokrog, se prične kondenzator prazniti preko uporov R in R_G (glej sliko 10.4, ki ustreza sliki 10.2 b). Z uporabo Kirchhoffovih izrekov pridemo do naslednjih enačb za tokove in padce



Slika 10.4: Vezava pri praznjenju kondenzatorja. Označeni so vsi tokovi, ki tečejo skozi vozlišče V, ter obhoda ① in ②, za katera zapišemo padce napetosti.

napetosti:

$$V : I - I_R - I_G = 0, \quad (10.12)$$

$$\textcircled{1} : U - R I_R = 0, \quad (10.13)$$

$$\textcircled{2} : U - R_G I_G = 0, \quad (10.14)$$

kjer je U napetost na kondenzatorju. Ko iz enačb (10.13) in (10.14) izrazimo I_R in I_G ter upoštevamo, da je celotni tok posledica odtekanja naboja s kondenzatorja:

$$I = -\frac{dq_C}{dt} = -\frac{d(CU)}{dt} = -C \frac{dU}{dt}, \quad (10.15)$$

lahko zvezo (10.12) predelamo v diferencialno enačbo za napetost na kondenzatorju:

$$\frac{dU}{dt} + \frac{U}{\tau} = 0, \quad (10.16)$$

če vpeljemo časovno konstanto τ :

$$\tau = \frac{RR_G}{R + R_G} C. \quad (10.17)$$

Z rešitvijo diferencialne enačbe (10.16) ugotovimo, da napetost na kondenzatorju in celotni tok eksponentno padata s časom:

$$U(t) = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{in} \quad I(t) = -\frac{dq}{dt} = -\frac{d(CU)}{dt} = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (10.18)$$

Začetni vrednosti celotnega toka in napetosti na kondenzatorju sta seveda povezani:

$$I_0 = \frac{CU_0}{\tau}. \quad (10.19)$$

Celotni naboj, ki steče skozi galvanometer, izračunamo z integralom toka:

$$\begin{aligned} q_G &= \int_0^{\infty} I_G(t) dt = \int_0^{\infty} \frac{U(t)}{R_G} dt \\ &= \frac{U_0}{R_G} \int_0^{\infty} e^{-\frac{t}{\tau}} dt = \frac{U_0}{R_G} \tau. \end{aligned} \quad (10.20)$$

Ko upoštevamo še definicijo časovne konstante τ (10.17), dobimo za celotni naboj, ki steče skozi galvanometer, naslednji izraz:

$$q_G = \frac{R}{R + R_G} CU_0,$$

ki smo ga uporabili v enačbi (10.11).

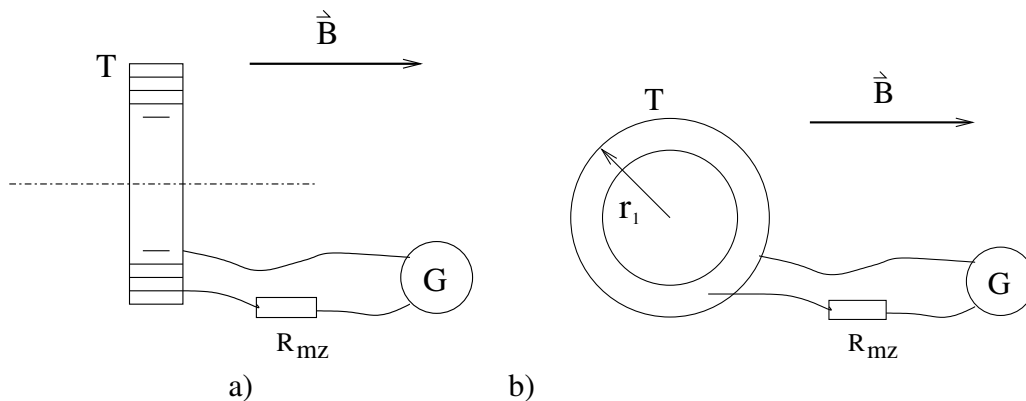
11 Meritev zemeljskega magnetnega polja z indukcijo

NALOGA

Izmeri vodoravno in navpično komponento gostote magnetnega polja Zemlje.

RAZLAGA

Indukcijski zakon omogoča neposredno merjenje magnetnega pretoka, s tem pa posredno tudi meritev gostote magnetnega polja. V magnetno polje gostote $\vec{B}$ postavimo merilno tuljavo, tako da je geometrijska os tuljave vzporedna s smerjo magnetnega polja, in jo povežemo z umerjenim balističnim galvanometrom (glej prejšnjo vajo), kakor kaže slika 11.1 a. Tuljavo nato na hitro zasučemo iz začetne



Slika 11.1: Merjenje indukcije z merilno tuljavo (T) in balističnim galvanometrom (G). Slika prikazuje postavitev tuljave v: a) začetni legi; b) končni legi.

leže v končno lego, v kateri je os tuljave pravokotna na magnetno polje (glej sliko 11.1 b). Pri zasuku se magnetni pretok Φ_m skozi tuljavo v kratkem času t_1 zmanjša z maksimalne vrednosti na 0, zato se v tuljavi inducira napetostni suneč:

$$\left| \int_0^{t_1} U_i dt \right| = \left| \int_0^{t_1} \frac{d\Phi_m}{dt} dt \right| = |\Phi_m(t_1) - \Phi_m(0)| = |0 - NBS| = NBS, \quad (11.1)$$

ki je odvisen od gostote magnetnega polja B in števila ovojev N ter preseka S merilne tuljave. Zaradi inducirane napetostnega sunka dobimo v tokokrogu

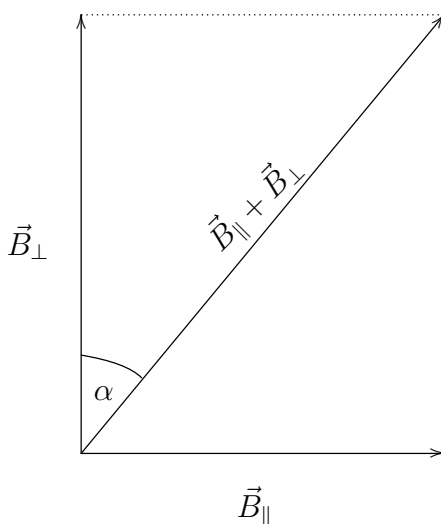
merilna tuljava–tuljava galvanometra kratkotrajni sunek električnega toka:

$$\left| \int_0^{t_1} I dt \right| = \left| \frac{1}{R_m} \int_0^{t_1} U_i dt \right| = \frac{NBS}{R_m} = q, \quad (11.2)$$

ki je poleg inducirane napetosti odvisen tudi od upora tokokroga, R_m . Upor tokokroga sestavljajo upor tuljave R_t , notranji upor galvanometra R_G in upor R_{mz} :

$$R_m = R_t + R_G + R_{mz}. \quad (11.3)$$

V enačbi (11.2) smo zapisali tudi, da je tokovni sunek enak električnemu naboju q , ki je zaradi spremembe magnetnega pretoka skozi tuljavo stekel po električnem krogu. Če z balističnim galvanometrom izmerimo pretočeni naboj, lahko torej preko indukcije izmerimo gostoto magnetnega polja, v katerem stoji tuljava.



Slika 11.2: Komponenti magnetnega polja: vodoravno označimo z $\vec{B}_{\parallel}$, navpično pa z $\vec{B}_{\perp}$

Velikost in smer magnetnega polja Zemlje sta odvisni od geografske širine in dolžine. V splošnem ima magnetno polje Zemlje vodoravno $B_{\parallel}$ in navpično komponento $B_{\perp}$ (glej sliko 11.2), le na ekvatorju ima samo vodoravno, na magnetnih tečajih pa samo navpično. Izmeriti moramo torej obe komponenti, meritvi pa bi radi izvedli ločeno. Če hočemo izmeriti samo eno od obeh komponent magnetnega polja, moramo tuljavo zasukati okoli osi, ki je ravno vzporedna z drugo komponento magnetnega polja. Ko na primer tuljavo postavimo tako, da je njena geometrijska os navpična, nato pa jo zavrtimo okoli vodoravne osi, ki poteka v

smeri sever–jug, je vodoravna komponenta magnetnega polja Zemlje ves čas pravokotna na geometrijsko os. Sinek inducirane napetosti je v tem primeru zgolj posledica navpične komponente polja, $B_{\perp}$. Iz enačbe (11.2) lahko tedaj izrazimo naboj $q_{\perp}$, ki steče skozi galvanometer:

$$q_{\perp} = \frac{NB_{\perp}S}{R_m}. \quad (11.4)$$

Ko tuljavo na enak način zavrtimo okoli navpične osi, je pretočeni naboj odvisen samo od vodoravne komponente magnetnega polja Zemlje:

$$q_{\parallel} = \frac{NB_{\parallel}S}{R_m}. \quad (11.5)$$

Oba pretočena naboja izračunamo iz največjih odklonov balističnega galvanometra:

$$q_{\perp} = C_q \varphi_0^{\perp} \quad \text{in} \quad q_{\parallel} = C_q \varphi_0^{\parallel}, \quad (11.6)$$

če poznamo balistično konstanto galvanometra C_q . Ko izmerjeni vrednosti največjega odklona vstavimo v enačbi (11.4) in (11.5), lahko izračunamo obe komponenti magnetnega polja Zemlje:

$$B_{\perp} = \frac{R_m C_q}{NS} \varphi_0^{\perp} \quad \text{in} \quad B_{\parallel} = \frac{R_m C_q}{NS} \varphi_0^{\parallel}, \quad (11.7)$$

na koncu pa še celotno vrednost:

$$B = \sqrt{B_{\perp}^2 + B_{\parallel}^2}. \quad (11.8)$$

NAVODILO

Najprej umeri galvanometer in določi balistično konstanto C_q . Pri tem ravnaj enako kot pri prejšnji vaji, za določitev konstante C_q pa naredi vsaj 10 meritev.

Potem ko si umeril balistični galvanometer, ga poveži z merilno tuljavo. Tuljavo postavi tako, da je njena geometrijska os navpična in da se lahko vrti okoli osi, ki je vzporedna s smerjo sever–jug. Pri tem si pomagaj s kompasom. Tuljavo nato hitro zavrti za 90° stopinj in odčitaj največji odklon svetlobnega zajčka. Meritev ponovi vsaj desetkrat. Iz izmerjenih vrednosti izračunaj povprečno vrednost za navpično komponento magnetnega polja in oceni napako.

Tuljavo nato postavi še tako, da se njena geometrijska os ujema s smerjo sever–jug in da je vrtljiva okoli navpične osi. Tudi tokrat tuljavo na hitro zasukaj za 90° stopinj in odčitaj največji odklon svetlobnega zajčka, meritev pa spet ponovi vsaj desetkrat. Iz izmerjenih vrednosti izračunaj povprečno vrednost za vodoravno komponento magnetnega polja in oceni napako. Iz obeh vrednosti izračunaj še celotno velikost gostote magnetnega polja v enačbi (11.8). Vse izračunane vrednosti lahko znatno odstopajo od geofizikalnih podatkov za Maribor.

12 Lom svetlobe na planvzporedni plošči

NALOGA

Opazuj prehod svetlobe skozi planvzporedno ploščo in izmeri lomni količnik stekla. Izmeri in izračunaj paralelni premik žarkov pri prehodu skozi ploščo v odvisnosti od vpadnega kota.

RAZLAGA

Pri prehodu iz enega sredstva v drugo se svetloba lomi v skladu z lomnim zakonom:

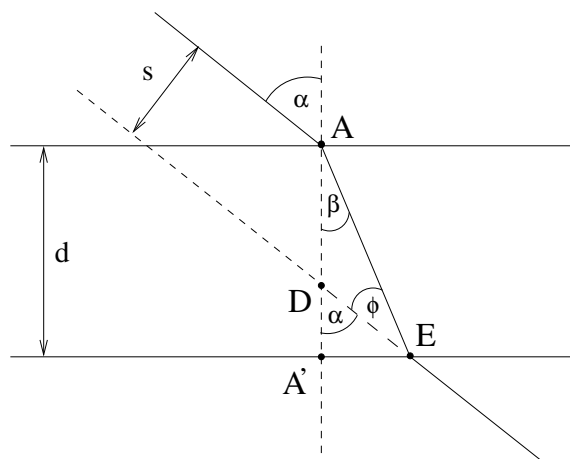
$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta, \quad (12.1)$$

kjer sta n_1 in n_2 lomna količnika v prvem in drugem sredstvu, α in β pa kota, ki ju žarek oklepa s pravokotnico na mejo med obema sredstvoma (glej sliko 12.1). Za prehod iz zraka lahko postavimo $n_1 = 1$ in $n_2 = n$, če je n lomni količnik sredstva, tako da lahko zgornjo enačbo zapišemo v poenostavljeni obliki:

$$\sin \alpha = n \sin \beta. \quad (12.2)$$

Če torej merimo α in β , lahko določimo lomni količnik pri prehodu skozi planvzporedno ploščo:

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}. \quad (12.3)$$



Slika 12.1: Prikaz poti žarka skozi planvzporedno ploščo debeline d . Žarek vstopa v ploščo z zgornje strani in izstopa na spodnji strani, zaradi loma pa se vzporedno premakne za razdaljo s .

S slike 12.1 lahko razberemo naslednje zveze:

$$\sin \alpha = \frac{\overline{A'E}}{\overline{DE}} \quad \text{in} \quad \sin \beta = \frac{\overline{A'E}}{\overline{AE}}, \quad (12.4)$$

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\overline{AE}}{\overline{DE}}. \quad (12.5)$$

Lomni količnik torej lahko izrazimo z razdaljami, ki jih izmerimo na sliki, če uporabimo enačbo (12.5).

Radi bi izrazili še vzporedni premik žarka po prehodu planvzporedne plošče, s . Na sliki 12.1 preberemo še:

$$\frac{s}{\overline{AE}} = \sin \phi = \sin(\alpha - \beta) \quad \text{in} \quad \frac{d}{\overline{AE}} = \cos \beta, \quad (12.6)$$

tako da lahko premik žarka izračunamo kot:

$$s = \overline{AE} \sin(\alpha - \beta) = d \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\cos \beta}, \quad (12.7)$$

kjer je d debelina plošče.

NAVODILO

S kljunastim merilom na več mestih natančno izmeri debelino plošče. Na list papirja nariši vzporednici z razmakom d . Riši točno! Na eni od vzporednic označi točko A, iz nje pa pod izbranim kotom α navzven potegni črto, ki ponazarja vpadni žarek. Vpadni kot žarka boš najlažje določil tako, da s kotomerom označiš izbrano vrednost kota α in šele potem potegneš črto. Nato postavi ploščo na papir, pri čemer naj se robova plošče natančno pokrijeta z narisanimi vzporednicama, točka A pa naj leži na mestu, kjer je na plošči vgravirana črta. Ta črta predstavlja sveto. Na narisano črto, ki ponazarja vpadni žarek, zapiči buciko. Poglej skozi ploščo v

Žarek	α	β	$\overline{AE}$	$\overline{DE}$	s_{izmer}	$s_{\text{izrač}}$	n	σ_n
1								
2								
3								
4								

Tabela 12.1: Rezultate meritev in izračunov zapiši v obliki razpredelnice.

taki smeri, da se gravirana črta na plošči in bucika pokrijeta. V tej smeri zapiči pred ploščo še dve buciki, tako da stojijo vse tri bucike skupaj navidez v ravni črti. Zaznamuj mesta, kamor si zapičil bucike, nato pa na listu skiciraj pot žarka in označi vse količine. Na ta način boš dobil sliko, podobno sliki 12.1, na kateri boš lahko izmeril razdalje $\overline{AE}$, $\overline{DE}$ in s ter kota α in β . S temi podatki lahko izračunaš iz enačb (12.5) in (12.7) lomni količnik n in premik žarka s . Rezultate zapiši v obliki razpredelnice 12.1. Meritev ponovi za štiri različne vrednosti vpadnega kota α , vse slike pa nariši na isti list. Slika bo najbolj pregledna, če jo narišes za dva žarka, ki vpadeta z leve in za dva z desne. Narisano sliko prilepi v zvezek. Za vsako od izračunanih vrednosti lomnega količnika n oceni tudi napako. Na koncu izračunaj še povprečno vrednost lomnega količnika $\langle n \rangle$ in določi njeno napako.

13 Leče

NALOGA

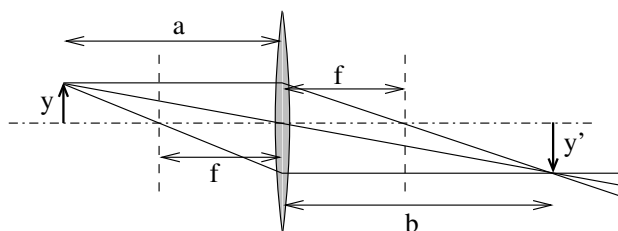
Z Besslovo metodo določi goriščno razdaljo konveksne in konkavne leče.

RAZLAGA

Preslikava je pri tanki leči določena z enačbo:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}, \quad (13.1)$$

kjer je a razdalja med predmetom in lečo, b razdalja med sliko in lečo, f pa goriščna razdalja leče (glej sliko 13.1). Goriščno razdaljo konveksne (zbiralne) leče bi torej lahko merili tako, da bi določili a in b pri preslikavi in iz enačbe (13.1) izračunali f . Še hitreje bi goriščno razdaljo konveksne leče določili, če bi pogledali, kje nastane slika neskončno oddaljenega predmeta. Ta slika nastane namreč v gorišču, ki je od leče oddaljeno ravno za goriščno razdaljo. Obe omenjeni metodi pa sta precej nenatančni, saj je običajno težko določiti mesto, kjer nastane slika predmeta. Pri vaji bomo goriščno razdaljo merili z Besslovo



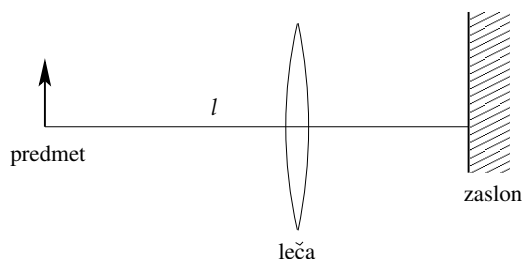
Slika 13.1: Preslikava predmeta s tanko konveksno lečo. Pri konkavni leči je razdalja b negativna, saj dobimo le navidezno sliko.

metodo, ki je boljša od obeh omenjenih. Pri tej metodi konveksno lečo postavimo na optično klop med fiksni predmet in zaslon, kar je skicirano na sliki 13.2. Če je razmik l med predmetom in zaslonom večji od $4f$, je vedno mogoče najti dva položaja leče, pri katerih nastane slika predmeta ravno na zaslonu. Pri eni legi leče je slika na zaslonu povečana, pri drugi pa pomanjšana. Na sliki 13.3 so označene količine za oba primera, ko na zaslonu dobimo ostro sliko. Za omenjene količine velja naslednja zveza:

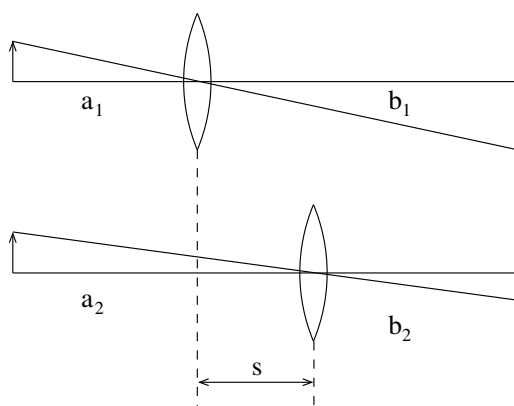
$$l = a_1 + b_1 = a_2 + b_2, \quad (13.2)$$

iz katere lahko izračunamo razdaljo s med obema legama leče:

$$s = a_2 - a_1 = b_1 - b_2. \quad (13.3)$$



Slika 13.2: Pri Besslovi metodi konveksno lečo položimo na optično klop med predmet in zaslon.



Slika 13.3: Razmere pri obeh legah konveksne leče, pri katerih dobimo na zaslonu ostro sliko.

Z merjenjem razdalj l in s lahko izračunamo goriščno razdaljo konveksne leče preko naslednje zveze (za izpeljavo glej dodatek) :

$$f = \frac{l^2 - s^2}{4l}. \quad (13.4)$$

Na podoben način kot prej določimo tudi goriščno razdaljo sistema dveh leč, saj jo preko enačbe (13.4) lahko izračunamo iz izmerjenih razdalj l in s . Za sistem dveh leč pa skupno goriščno razdaljo lahko izračunamo tudi z naslednjo enačbo:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2}, \quad (13.5)$$

če sta f_1 in f_2 goriščni razdalji posameznih leč, d pa razdalja med njima. Zgornja načba velja tudi, če je ena od obeh leč konkavna (razpršilna), zato Besslova metoda omogoča merjenje goriščne razdalje tudi za konkavno lečo. V ta namen moramo najprej izmeriti goriščno razdaljo take leče skupaj s konveksno lečo in nato iz enačbe (13.5) izračunati goriščno razdaljo konkavne leče. Pri tem moramo seveda

paziti, da ima konveksna leča v sistemu dovolj majhno goriščno razdaljo, da je skupna goriščna razdalja sistema konkavne in konveksne leče še vedno manjša od $l/4$, kar je pogoj za izvedbo meritve z Besslovo metodo.

IZVEDBA

Na optični klopi se nahajata predmet (steklena ploščica) in zaslon. Predmet osvetliš z lučjo, ki jo postaviš tik za predmet. Luč moraš priklopiti na omrežje. Z upodobitvijo zelo oddaljenega predmeta najprej oceni goriščno razdaljo konveksne leče. Nato namesti zaslon na optični klopi tako, da bo oddaljen od predmeta za več kot $4f$. Med predmet in zaslon postavi merjeno konveksno lečo in naravnaj vse skupaj tako, da bodo vsa središča na isti višini. To najlažje kontroliraš z opazovanjem slike na zaslonu pri obeh legah leče. Sedaj izmeri razdaljo l ; to je razdalja od predmeta do zaslona. Poišči obe legi leče, ko dobiš na zaslonu ostro sliko. Vsako lego izmeri vsaj trikrat. Izračunaj s , kot je definiran v enačbi (13.3), nato pa z enačbo (13.4) določi goriščno razdaljo konveksne leče. Oceni tudi napako. Na optično klop zatem poleg konveksne leče namesti tudi konkavno. Ker se razdalja med lečama pri premikanju ne sme spreminjati, boš meritev najlažje opravil tako, da boš nosilca leč postavil tesno skupaj. Izmeri razdaljo d med središčema leč in na enak način kot prej oceni goriščno razdaljo sistema. Poskrbi, da bo razdalja med predmetom in zaslonom tudi tokrat večja od štirikratnika goriščne razdalje. Če si pri tem premikal zaslon ali predmet, ne pozabi ponovno izmeriti razdalje l . Na enak način kot za samo konveksno lečo tudi za sistem leč poišči dve legi, ko dobiš na zaslonu ostro sliko ter vsaj trikrat izmeri razdaljo s . Iz enačbe (13.4) izračunaj goriščno razdaljo sistema, nato pa z enačbo (13.5) izračunaj goriščno razdaljo konkavne leče. Ne pozabi, da je gorišče konkavne leče negativno.

DODATEK

Poglejmo, kako pridemo do zveze (13.4). Če uporabimo enačbi (13.2) in (13.3), lahko izrazimo naslednjo razliko kvadratov:

$$l^2 - s^2 = (a_1 + b_1)(a_2 + b_2) - (a_2 - a_1)(b_1 - b_2) = (a_1 + b_2)(a_2 + b_1). \quad (13.6)$$

Ko za obe legi, v katerih dobimo ostro sliko, zapišemo še enačbo leče (13.1):

$$\frac{1}{a_1} + \frac{1}{b_1} = \frac{1}{f} \quad \text{in} \quad \frac{1}{a_2} + \frac{1}{b_2} = \frac{1}{f}, \quad (13.7)$$

dobimo naslednji zvezi:

$$fl = a_1b_1 = a_2b_2 \quad \text{in} \quad b_1b_2 = a_1a_2. \quad (13.8)$$

Z deljenjem prve zgornje enačbe z drugo ugotovimo, da obe legi leče, v katerih dobimo ostro sliko, ležita simetrično:

$$a_1 = b_2 \quad \text{in} \quad a_2 = b_1, \quad (13.9)$$

tako da lahko zgornjo razliko kvadratov zapišemo v naslednji obliki:

$$l^2 - s^2 = 2a_1 \cdot 2b_1 = 4fl. \quad (13.10)$$

Razdalja s je res pozitivna, kadar je razmik l med predmetom in zaslonom večji od $4f$. Iz izpeljane zveze lahko izrazimo goriščno razdaljo konveksne leče z merjenima količinama l in s :

$$f = \frac{l^2 - s^2}{4l},$$

kar smo uporabili v enačbi (13.4).

14 Uklon svetlobe

NALOGA

Iz meritve uklonske slike svetlobe na reži določi širino reže.

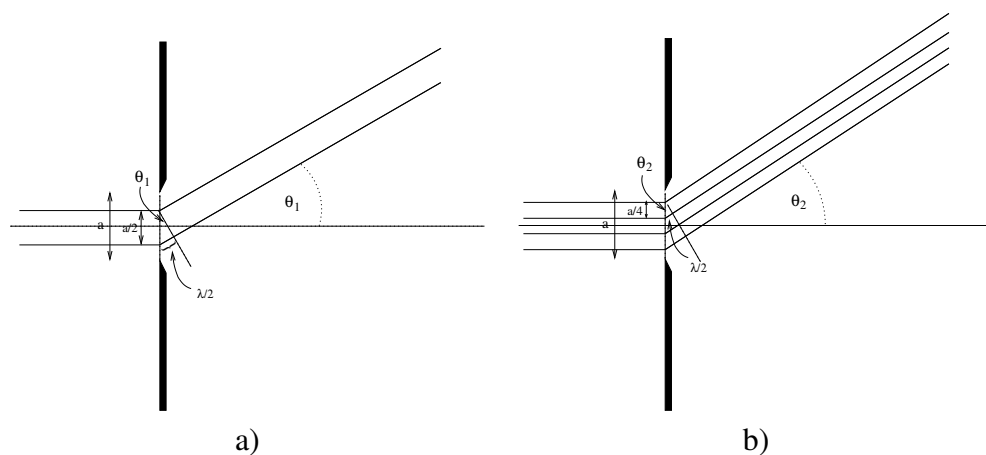
RAZLAGA

Pri uklonu svetlobe na reži dobimo interferenčno sliko. Do ojačitev in oslabitev pride pod koti, za katere so izpolnjeni določeni pogoji.

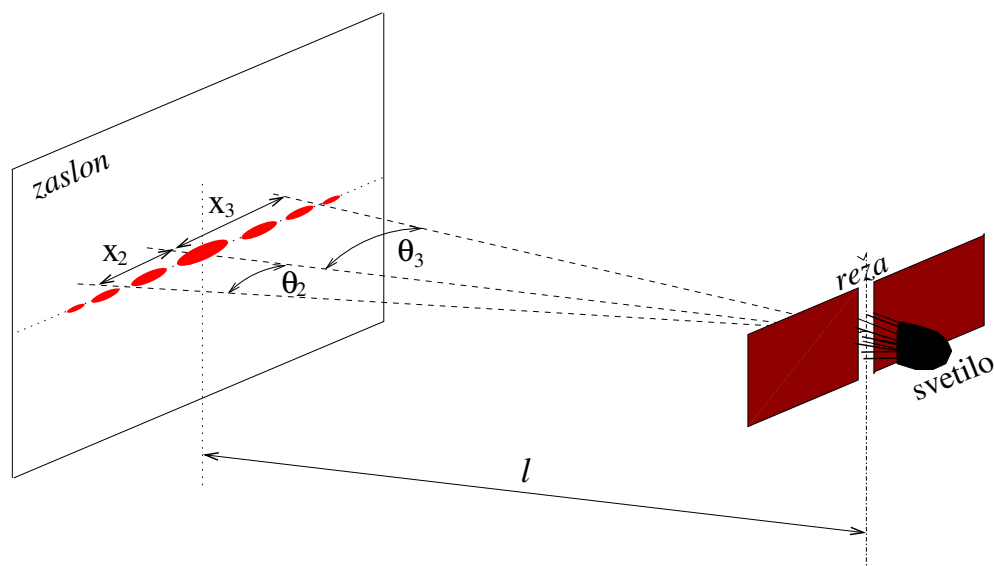
Poglejmo najprej, kako izgleda pogoj za prvo oslabitev. Curek svetlobe skozi režo si mislimo razdeljen v dve delni valovanji, katerih sredini sta razmaknjeni za $a/2$, če je a širina reže (glej sliko 14.1 a). Na simetrijski ravnini reže med obema valovanjema ni razlike poti, zato je tam valovanje ojačeno ($\theta = 0$). Prva oslabitev nastopi pri kotu θ_1 , pri katerem je razlika poti med sredino prvega in drugega nadomestnega valovanja $\lambda/2$. Tako za prvo oslabitev dobimo naslednji pogoj:

$$\frac{a}{2} \sin \theta_1 = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow a \sin \theta_1 = \lambda. \quad (14.1)$$

Pri izpeljavi pogoja za drugo oslabitev ravnamo podobno, le da si curek svetlobe skozi režo tokrat mislimo razdeljen v štiri delna valovanja (glej sliko 14.1 b), med katerimi je razlika poti $\lambda/2$. Sedaj se oslabita delni valovanji v zgornji polovici



Slika 14.1: Uklon valovanja na reži; na sliki a) so razmere pri prvi oslabitvi ($n = 1$), na sliki b) pa pri drugi ($n = 2$). Isti pogoji za oslabitve so izpolnjeni tudi pri negativnih kotih θ , ki ležijo na drugi strani simetrijske ravnine reže.



Slika 14.2: Uklon curka laserske svetlobe na navpični reži. Uklonsko sliko, ki nastane v vodoravni ravnini, opazujemo na zaslonu. Ojačitve in oslabitve ležijo simetrično glede na simetrijsko ravnino reže: na sliki sta označeni razdalja med centralno ojačitvijo in drugo oslabitvijo na levi (x_2) ter razdalja med sredino in tretjo oslabitvijo na desni (x_3).

reže in delni valovanji v spodnji polovici reže. Pogoj za oslabitev je tokrat:

$$\frac{a}{4} \sin \theta_2 = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow a \sin \theta_2 = 2\lambda. \quad (14.2)$$

Naslednje pogoje za oslabitve dobimo tako, da razmislek ponovimo za poljubno sodo število pasov, ki jih lahko razdelimo v pare, med katerimi je razlika poti enaka $\lambda/2$. Splošni pogoj za oslabitve pri uklonu na eni reži potem izgleda kot:

$$a \sin \theta_n = n\lambda, \quad (14.3)$$

kjer je $n = 1, 2, \dots$ zaporedno število minimuma. Seveda pogoju za oslabitev zadoščajo tudi koti na drugi strani simetrijske ravnine reže, tako da dobimo simetrično uklonsko sliko (glej sliko 14.2).

Zgornjo enačbo (14.3) lahko poenostavimo, če so koti, pod katerimi pride do oslabitev, majhni:

$$a \sin \theta_n \approx a \theta_n \approx a \operatorname{tg} \theta_n = a \frac{x_n}{l}, \quad (14.4)$$

saj lahko potem širino reže

$$a = \frac{n\lambda l}{x_n} \quad (14.5)$$

izračunamo iz razdalj x_n , ki jih na zaslonu, oddaljenem za razdaljo l , izmerimo kot razliko med centralno ojačitvijo in n -to zaporedno oslabitvijo.

NAVODILO

V zaboju sta na vodilo pritrjena dva nosilca. Na prvem je laserska dioda z navpično režo, na drugem nosilcu, ki je premičen v prečni ravnini, pa je pritrjena fotodioda. Laserska dioda ustvari curek rdeče laserske svetlobe z valovno dolžino $\lambda = 670 \text{ nm}$, fotodioda pa je detektor svetlobe, ki ga uporabljamo za opazovanje uklonske slike. Prečna ravnina, v kateri lahko premikamo fotodiodo, tako deluje kot zaslon.

Na zunanji strani škatle vključi stikalo za izvor napetosti in priključi multimeter. Uklonsko sliko si najprej oglej na listu papirja, ki ga postaviš pred fotodiodo, in videno primerjaj s sliko 14.2. Nosilec s fotodiodo nato s sukanjem vijaka premakni v skrajno prečno lego, ki je označena s črtico. Z vrtenjem vijaka premikaj fotodiodo po korakih vse do druge skrajne lege in odčitavaj napetost na detektorju. Koraki naj bodo dolgi $0,5 \text{ mm}$, kar ustreza polovici obrata vijaka. Celotni premik v prečni smeri naj bo okoli 3 cm .

Izmerjene vrednosti prikaži na sliki, narisani s katerim od računalniških programov. S slike določi lege posameznih oslabitev, nato pa za vsako posebej iz zveze (14.5) izračunaj širino reže. Vse rezultate združi v povprečno vrednost in oceni njeno slučajno napako.

OPOZORILO

Ob koncu vaje ne pozabi izklopiti napetosti na laserski diodi!