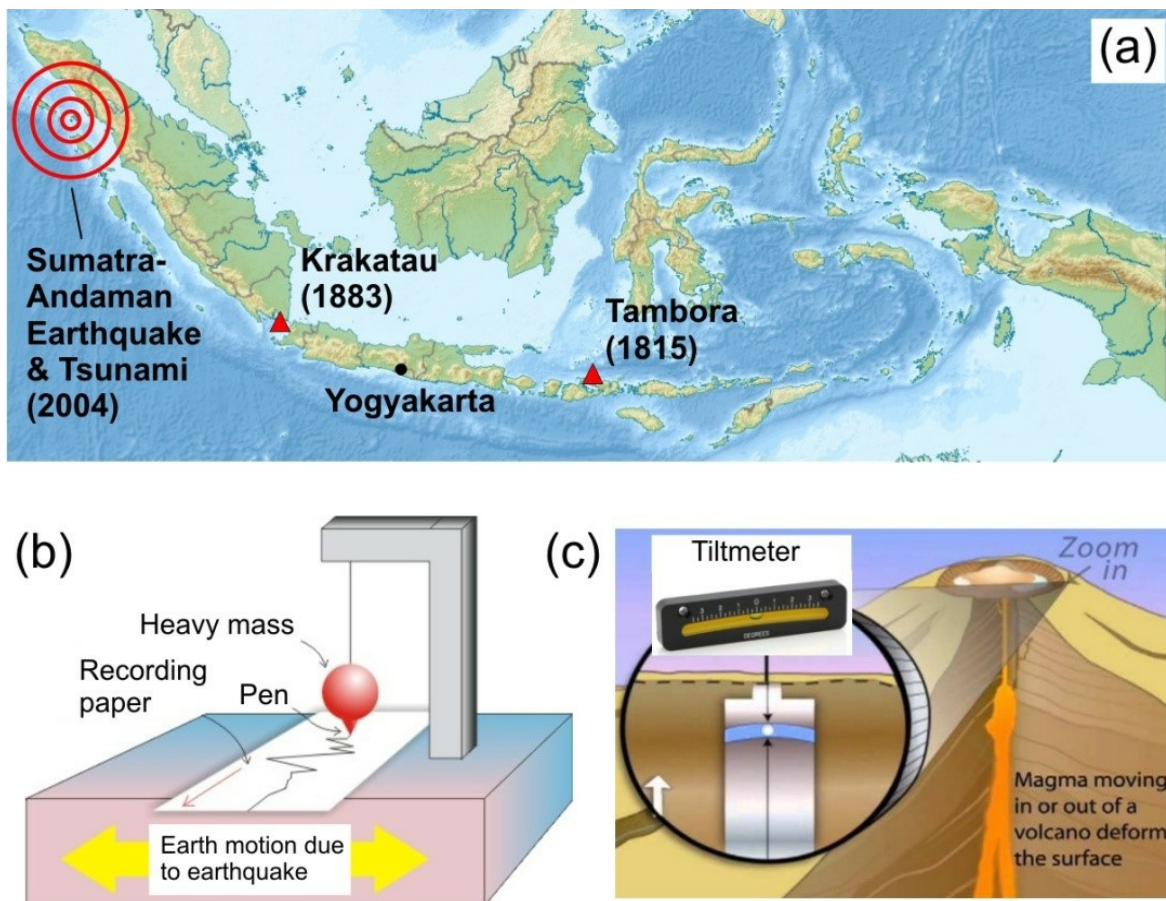


Paralēlu dipolu līnijas magnētiskais slazds zemestrīču un vulkānisku parādību mērīšanai

A. Ievads



Attēls 1 (a) Indonēzijas karte, kas parāda labi zināmo katastrofu vietas. (b) Vienkārša ierīce zemestrīču mērīšanai, kas mēra zemes kustību zemestrīces rezultātā, izmantojot papīru, atsvaru un pie tā piestiprinātu rakstāmo. (c) Slīpuma mērītājs, lai sekotu vulkāniskai aktivitātei.

Indonēzijā ir 17 000 salu un to bieži sauc par ekvatora pērli. Diemžēl to bieži piemeklē dabas katastrofas, tādas kā zemestrīces un vulkānu izvirdumi. Attēlā 1a ir uzskaitīti Sumatras-Andamana zemestrīce un cunami (2004), Krakatau (1883) un Tamboras (1815) vulkāniskie izvirdumi, kas ir bijušas vienas no nāvējošākām dabas katastrofām cilvēces vēsturē. Zemestrīču detektēšanai izmanto seismometrus, piemēram, tādus kā attēlā 1(b) parādītais. Lai noteiktu zemes virsmas slīpuma izmaiņu izmanto attēlā 1(c) parādīto ierīci. Šajā uzdevumā mēs pētīsim jauna veida magnētisko slazdu, kuru sauc par paralēlu dipolu līniju (PDL), zemestrīču un vulkānisku parādību mērīšanai.

Paralēlu dipolu līniju sistēma ir magnētisko dipolu izvietojums divās taisnēs (kuras sauc arī par dipolu līnijām) tā, kā parādīt attēlā 2. Nesen divi fiziķi no Indonēzijas atklāja interesantu efektu šajā sistēmā. Ja

dipolu līniju garums ir lielāks par kritisko garumu, tad magnētiskais lauks līniju galos pastiprinās, veidojot tā saucamo divkupru potenciālu, kas parādīts attēlā 2(a)*. Divkupru potenciāls ļauj izveidot paralēlu dipolu līnijas (PDL) slazdu. Eksperimentāli PDL slazdu var izveidot no diviem cilindriskiem magnētiem, kuru magnetizācija ir vērsta gar magnētu diametriem, no tā saucamajiem diametriskajiem magnētiem. Attēlā 2(c) ir parādīti diametriski magnēti, to magnētiskie poli atrodas uz liektās sānu virsmas, nevis uz plakanās galu virsmas.

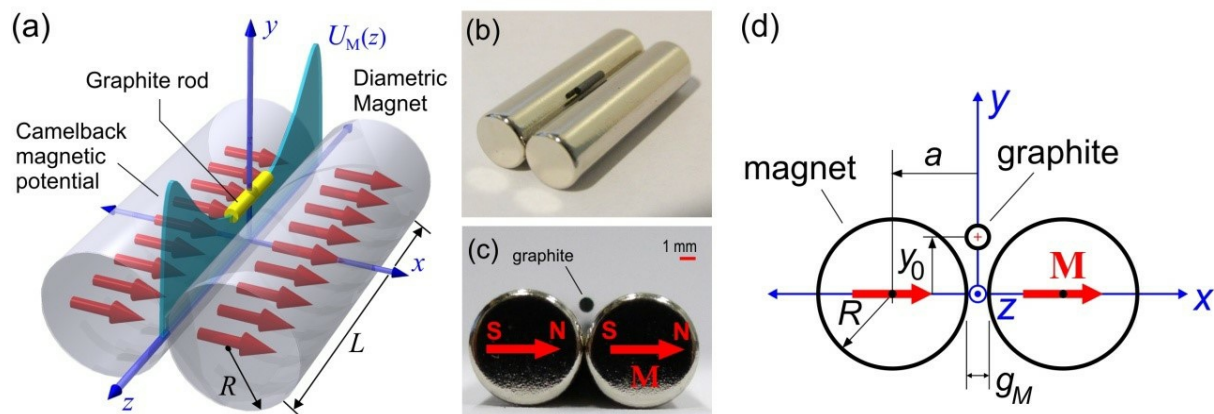
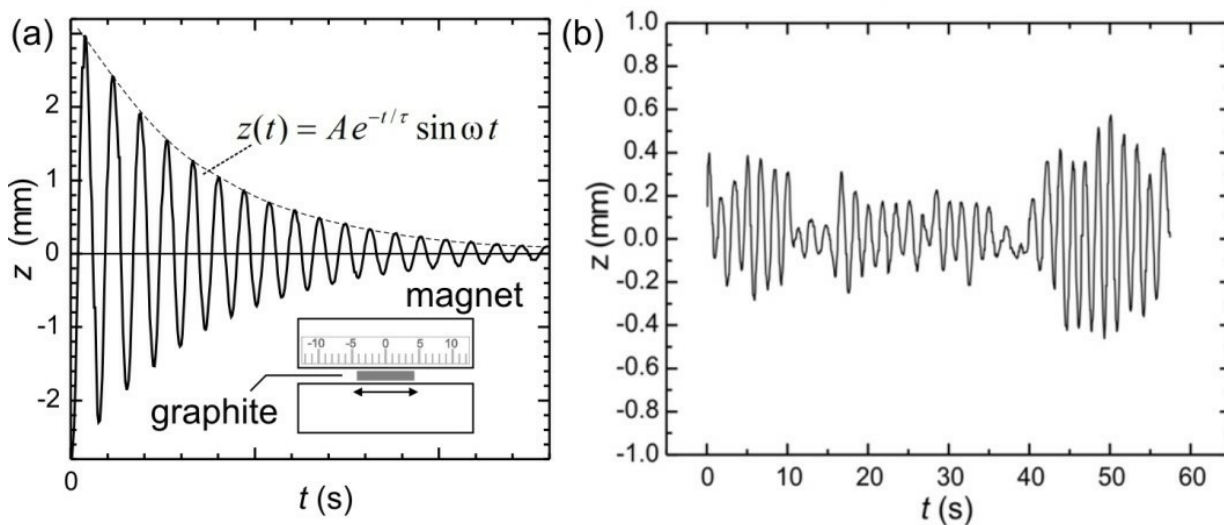


Figure 2. (a) Paralēlu dipolu līnijas slazda modelis ar divkupru potenciālu (**camelback magnetic potential**) atkarībā no z . Ar dzeltenu krāsu parādīts grafiņa stienis (**graphite rod**). (b) Eksperimentālā iekārta ar diametriskiem magnētiem. (c) Iepriekšējais attēls šķērs griezumā. (d) PDL slazda shematiskais attēlojums. [*Gunawan and Virgus, J. Appl. Phys. 121, 133902 (2017)].

Slazdā novietojot grafiņa stieni (parasta zīmuļa grafiņa serdeni), tas levitē jeb nonāk stabilā stāvoklī. Tas notiek tāpēc, ka x virzienā grafiņš atgrūžas no abiem magnētiem. Vertikālā y virzienā magnētiskās atgrūšanās spēks līdzsvaro gravitācijas spēku un magnēts levitē augstumā, ko apzīmē ar y_0 (att. 2(d)). Garenvirzienā gar z asi divkupru potenciāls stabili notur grafiņu.

Magnētiskā slazda divkupru potenciāls veido viendimensiju oscilatoru. Izvirzot grafiņa stieni no līdzsvara z ass virzienā, sākas rimstošas svārstības kā parādīts attēlā 3(a). Šo PDL slazdu var izmantot kā jūtīgu seismometru. Ja zeme kustas, tad grafiņa stienis paliks ieslazdots un tā relatīvais pārvietojums (att. 3(b)) raksturo zemestrīci. Līdzīgi to var izmantot arī kā jūtīgu virsmas slīpuma mērītāju. Ja slazds tiek sagāzts uz sāniem, tad grafiņa stienis būtiski novirzīsies bez jebkādas pretestības.



Attēls 3. (a) Nepietiekoši rimstošas (*underdamped*) grafīta stieņa svārstības divkupru potenciālā. (b) Seismometra pielietojums: Zemes svārstību reģistrēšana ar PDL slazdu.

Apskatīsim PDL slazda fiziku un pielietojumus nākamajās divās sadaļās.

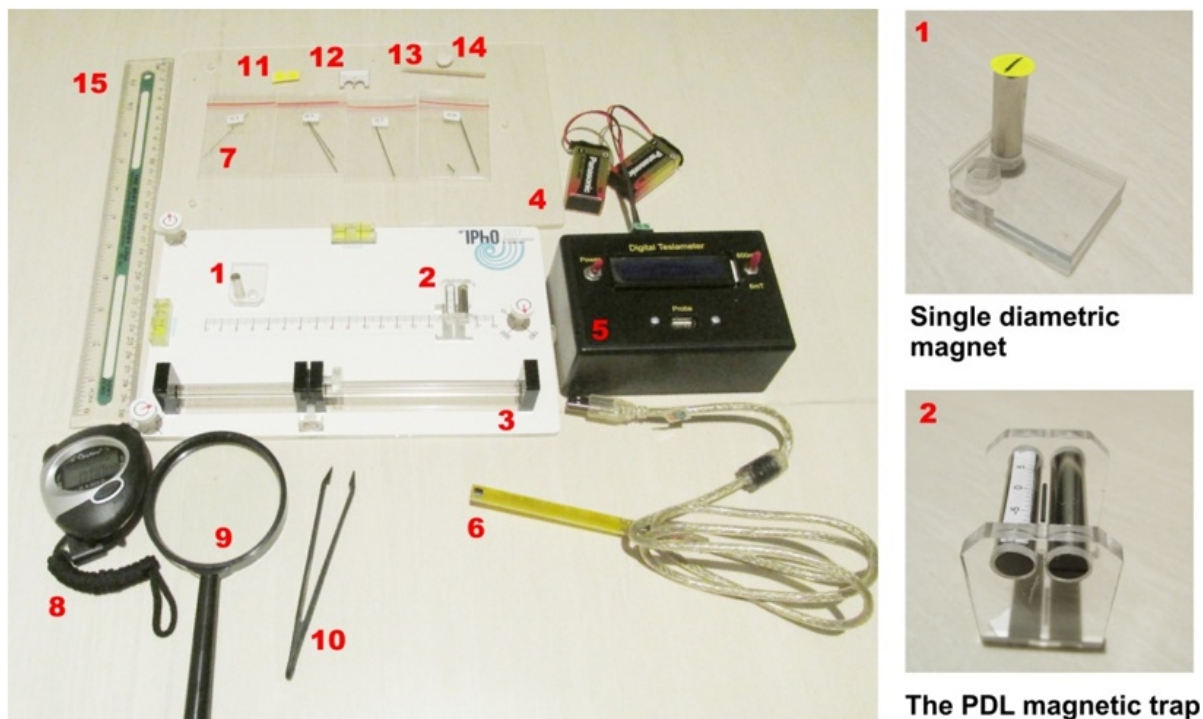
Sadaļa A: Pamata raksturlielumi

- (1) Magnēta magnetizācijas, M , noteikšana (2.5 pt.)
- (2) Magnetiskā levitācija un magnētiskā uzņēmība, χ (1.0 pt.)
- (3) Svārstības divkupru potenciālā un magnētiskā uzņēmība, χ (1.0 pt.)
- (4) Oscilatora labuma faktors, Q , un gaisa viskozitātes, μ_A , noteikšana (3.0 pt.)

Sadaļa B: Pielietojumi

- (5) PDL slazda seismometrs (0.5 pt.)
- (6) PDL slazda slīpuma mērītājs (2.0 pt.)

B. Eksperimentālā iekārta



Attēls 4. Eksperimentālā iekārta.

1. Ietvars ar vienu diametrisku magnētu (**Single diametric magnet**). Dzeltenā uzlīmē ir uzlīmēta, lai uz tās atzīmētu magnetizācijas virzienu.
2. Ietvars ar PDL magnētisku slazdu (**The PDL magnetic trap**), attēlā parādīts ar levitējošu grafīta gabaliņu. Neizņem magnētus ārā no ietvara!
3. Augšējā platforma ar 3 skrūvēm.
4. Apakšējā platforma.
5. Teslametrs magnētiskā lauka mērīšanai. Teslametra barošanu nodrošina baterijas. Teslametra sensoru pievieno ar atsevišķu vadu.
6. Teslametra sensors mērīšanas stieņa galā.
7. Grafīta stieņi (zīmuļu serdeņi) ar 4 dažādiem diametriem: HB/0.3, HB/0.5, HB/0.7, un HB/0.9. Skaitlis pie apzīmējuma ir aptuveni vienāds ar stieņa diametru milimetros, piemēram, HB/0.5 ir stienis ar diametru aptuveni 0.5 mm. Precīzas diamteru vērtības ir norādītas konstanšu un datu tabulā. Tev vajadzēs no šiem stieņiem nolauzt vajadzīga garuma gabaliņus.
8. Hronometrs.

9. Palielināmais stikls.
10. Pincete no antistatiskā materiāla.
11. Dzeltēna apaļa uzlīme, uz kuras jāatzīmē magnetizācijas virziens (ziemeļpols-dienvidpols) eksperimentā ar vienu magnētu.
12. Ieliekamā skala grafiņa levitācijas augstuma mērīšanai.
13. Zobu bakstāmais grafiņa stieņa pārvietošanai.
14. Lipeklis magnētu ietvaru piestiprināšanai pie platformas.
15. Lineāls.

Norādījumi un brīdinājums:

1. **Turi atsevišķu magnētu pa gabalu no PDL slazda (dubultmagnēta)! Tie var ar spēku sadurties un saplīst!**
2. **Turi teslametru izslēgtu, kamēr to neizmanto, lai taupītu baterijas!**
3. Uzmanīgi atvieno detaļas nr. 7, 11-14 no apakšējā platformas (detaļa nr. 4), un tad novieto augšējo platformu (detaļa nr. 3) uz apakšējās platformas.
4. Tu vari izmantot trīs skrūves lai regulētu augšējās platformas slīpumu.

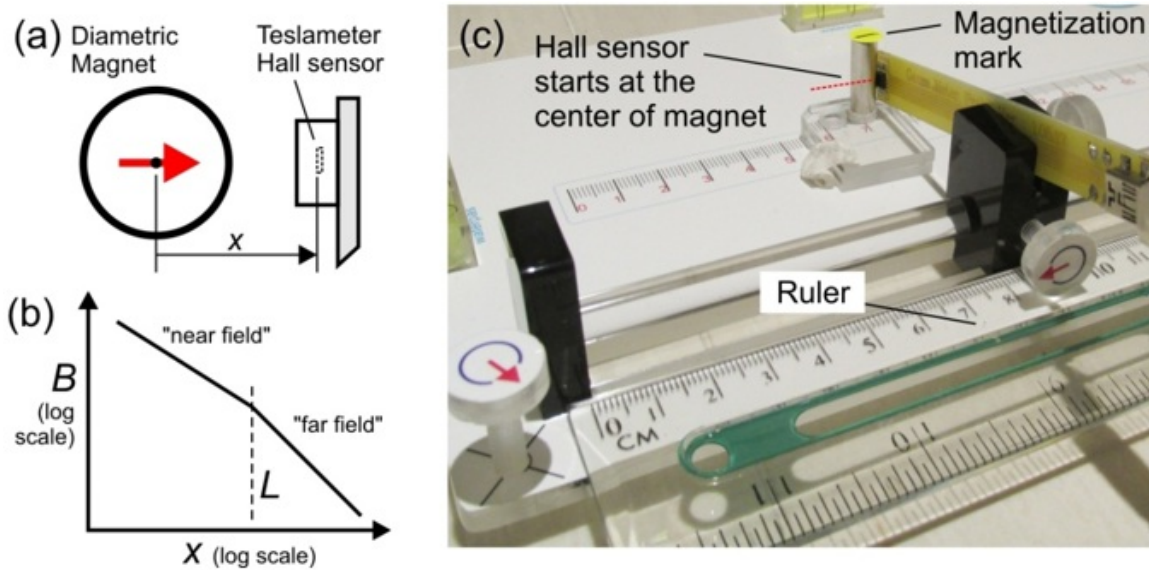
Konstantes un dati:

Diametriskā magnēta rādiuss	:	$R = 3.2 \text{ mm}$
Diametriskā magnēta garums	:	$L = 25.4 \text{ mm}$
PDL slazda spraugas platums	:	$g_M = 1.5 \text{ mm}$
Grafiņa blīvums	:	$\rho = 1680 \text{ kg/m}^3$
Grafiņa stieņa "HB/0.3" diametrs	:	$d = 0.38 \text{ mm}$
Grafiņa stieņa "HB/0.5" diametrs	:	$d = 0.56 \text{ mm}$
Grafiņa stieņa "HB/0.7" diametrs	:	$d = 0.70 \text{ mm}$
Grafiņa stieņa "HB/0.9" diametrs	:	$d = 0.90 \text{ mm}$
Istabas temperatūras	:	$T = 298 \text{ K}$
Vakuuma magnētiskā caurlaidība	:	$\mu_0 = 1.257 \times 10^{-6} \text{ H/m}$
Bolcmaņa konstante	:	$k_B = 1.38064852 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
Brīvās krišanas paātrinājums	:	$g = 9.8 \text{ m/s}^2$

C. Eksperiments un jautājumi

Sadaļa A. PDL slazda pamatraksturlielumi

[1] Magnēta magnetizācijas, M , noteikšana (2.5 pt.)



Attēls 5. (a) Magnētiskā lauka mērīšana. Uzraksti: **Teslameter Hall sensor** = Teslametra sensors. (b) Magnetiskā lauka profils logaritmiskā mērogā, parādot tuvā lauka (**near field**) apgabalu un tālā lauka (**far field**) apgabalu (c) Ierīces uzbūve.

Magnētiskā slazda stiprums ir atkarīgs no magnēta pilnā magnētiskā momenta m . Tas ir atkarīgs no magnetizācijas M , kas ir magnētiskais moments uz tilpuma vienību. M ir materiālu raksturojošs raksturlielums. Mūsu cilindriskam magnētam

$$M = \frac{m}{\pi R^2 L} \quad (1)$$

kur R ir magnēta rādiuss un L ir magnēta garums, skatīt **Konstantes un dati**. M vērtība ir tā pati visiem magnētiem šajā eksperimentā. Mēs pētīsim magnētiskā lauka profilu un noteiksim PDL slazdā izmantotā diametriskā magnēta magnetizāciju M .

Izmanto viena magnēta sistēmu, saliekot iekārtu atbilstoši attēlā 5c parādītajai shēmai. Orientē magnēta magnetizāciju pret teslametra sensoru (*Hall sensor*) kā parādīts attēlā 6a. Mēri magnētiskā lauka stiprumu gar x asi izmantojot teslametru. Magnētiskā lauka profils B tuvā lauka (jeb "dipolu taisnes") robežā, kas sniedzas līdz aptuveni $x \leq 16$ mm, ir aprakstāms ar formulu

$$B_I(x) = \frac{\mu_0 m}{2\pi x^3 L} \quad (2)$$

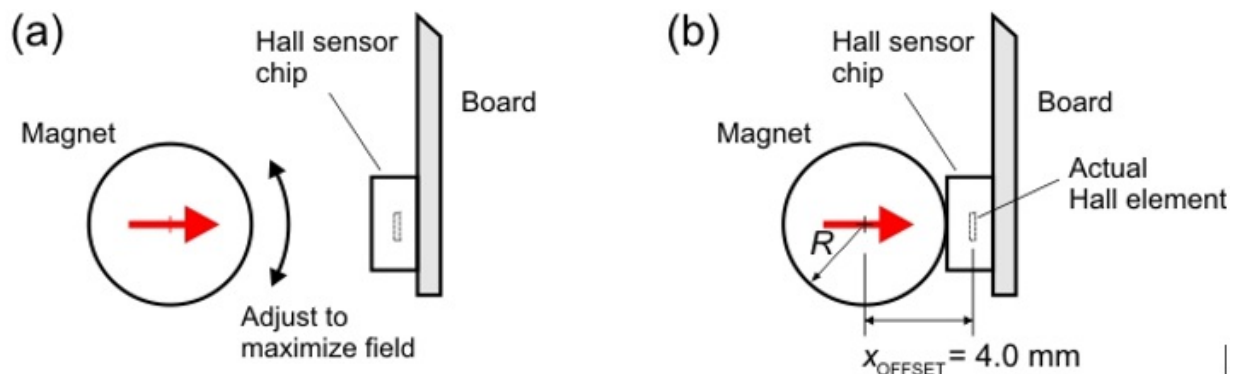
x -ass ir vērsta paralēli diametriskā magnēta magnetizācijas asij kā parādīts attēlā 6a un x apzīmē uz attālumu no diamagnētiskā magnēta centra līdz Teslametra sensoram (*Hall sensor*) mikroshēmas iekšienē.

Ievēro informāciju attēlā 6b, lai precīzi noteiktu x atsakītes punktu.

Veiksim mērījumus tikai tuvā lauka apgabalā:

A.1	Lai veiktu mērījumus tuvā lauka apgabalā, noteikt magnētiskā lauka fona līmeni, ja sensora tuvumā neatrodas neviens magnēts. Ar teslametru iegūto magnētiskā lauka fona vērtību B_0 atņemt no visām nākamiem magnētiskā lauka mērījumiem.	0.1 pt.
A.2	Izmērīt magnētiskā lauka indukciju B atkarībā no x tuvā lauka apgabalā ($7 \leq x \leq 16$ mm)! x ir attālums līdz magnēta centram. Pieraksti un uzzīmē rezultātus atbilstoši lapā. Seko "Norādījumi" sadaļai zemāk.	1.15 pt.
A.3	Izmanto eksperimentālos datus, lai noteiktu pakāpes rādītāja p vērtību.	0.75 pt.
A.4	Noteikt magnēta magnetizāciju M .	0.5 pt.

Norādījumu sadala:

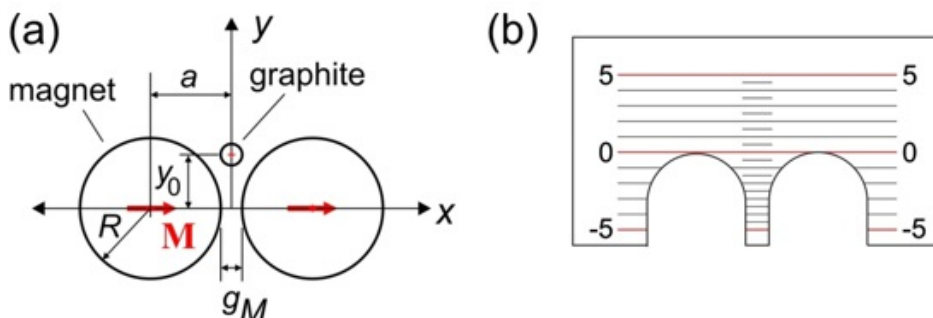


Attēls 6. Magnetiskā lauka mērījumi (a) Magnēta orientāciju iestata, maksimizējot lauku (*adjust to maximize field*). (b) Atskaites punkta novirze (*offset*). *Actual Hall element* = teslametra sensora faktiskā atrašanās vieta mikroshēmas (*chip*) iekšienē.

1. **Izslēdz teslametru, ja tas netiek izmantots, lai taupītu bateriju!**
2. Izmantojot teslametru, gaidīt 2 sekundes pirms mērījuma veikšanas.
3. Ņemt vērā, ka attālums x jānosaka līdz magnēta centram. Magnēta rādiuss $R = 3.2$ mm.
4. Izmantot attēlā 5(c) rekomendēto iekārtas izvietojumu.
5. Pagrieziet magnētu, lai tā magnetizācija ir vērsta teslametra sensora virzienā, tādējādi iegūstot maksimālo magnētiskā lauka vērtību, attēls 6a. Izmanto dzelteni apaļo līmlentu, lai uz tās uzzīmētu magnēta magnetizācijas virzienu.
6. Kad teslametra sensors pieskaras magnētam, patiesais attālums starp magnēta centru un sensora jutīgo punktu ir vienāds ar atsakītes punkta novirzes vērtību $x_{OFFSET} = 4$ mm
7. Pirmo mērījumu veic pie teslametra sensora attāluma $x = 5$ mm! Neveic mērījumu, kad sensors

pieskaras magnētam pie attāluma $x = 4$ mm, jo sensors var būt sasniedzis piesātinājumu vai būs deformējies stiprinājums.

[2] Magnētiskā levitācija un magnētiskā uzņēmība (χ) (1 pt.)



Attēls 7. (a) Magnētiskā levitācija PDL slazdā. (b) Vertikāli ievietojamais lineāls levitācijas augstuma y_0 mērīšanai.

PDL slazdā var demonstrēt levitācijas parādību. Grafīts levitē slazda centrā augstumā y_0 kā parādīts attēlā 7(a). Grafītu atgrūž magnēti ar spēku $F_M(y_0)$, kas atkarīgs no magnētiskā uzņēmības χ un stieņa augstuma y_0 . Magnētiskā uzņēmība parāda, cik daudz materiāls tiek magnetizēts ārējā lauka ietekmē. To nosaka sakarība $\mu = (1 + \chi)\mu_0$, kur μ ir materiāla absolūtā magnētiskā caurlaidība. Grafīta stieņa magnētiskās atgrūšanās spēks PDL slazdā ir aprēķināms pēc formulas:

$$F_M(y_0) = -\frac{\mu_0 M^2 \chi V_r}{2} \frac{R^4}{a^5} f\left(\frac{y_0}{a}\right) \quad (3)$$

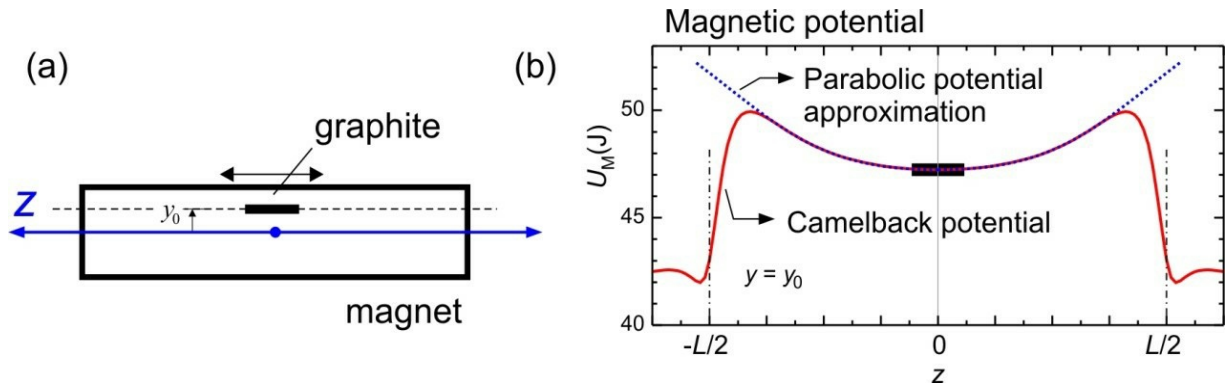
Ņem vērā, ka $F_M(y_0)$ ir pozitīvs, ja spēks ir vērsts uz augšu, un ievēro mīnus zīmi vienādojumā (3). V_r ir grafīta stieņa tilpums, M ir magnēta tilpuma magnetizācija (kas ir noteikta iepriekšējā sadaļā), a ir magnēta centra koordināte, ko aprēķina kā $a = R + g_M/2$ (skatīt att. 7a), kur g_M ir spraugas platums starp magnētiem: $g_M = 1.5$ mm. $f(u)$ ir bezdimensiju funkcija, kas šim slazdam ir vienāda ar

$$f(u) = \frac{4u(3-u^2)(1-u^2)}{(1+u^2)^5} \quad (4)$$

A.5	Maigi ievietot slazdā grafīta stieni HB/0.5 ar garumu = 8 mm. Izmēri stieņa levitācijas augstumu y_0 (skatīt att. 7a). Norādījums: izmanto vertikāli iespraužamo lineālu, kas ir parādīts attēlā 7b. Uzspraud lineālu uz magnētiem, lai nolasītu grafīta stieņa augstumu.	0.1 pt.
A.6	Izmantot A.5 rezultātu, lai aprēķinātu grafīta stieņa magnētisko uzņēmību χ .	0.8 pt.

A.7	Kāda tipa magnētisks materiāls ir grafiits? Izvēlēties vienu atbildi: (i) feromagnētisks; (ii) paramagnētisks; (iii) diamagnētisks?	0.1 pt.
------------	--	---------

[3] Svārstības divkupru potenciālā un magnētiskā uzņēmība (χ) (1 pts)



Attēls 8. (a) Magnēta svārstības augstumā y_0 . (b) PDL slazda divkupru potenciāls (*camelback potential*) un tā tuvinājums ar parabolu (*parabolic potential approximation*).

Veiksim χ neatkarīgu noteikšanu izmantojot svārstības PDL slazda divkupru potenciālā kā parādīts att. 8. Mazām svārstību amplitūdām ($z < 4$ mm) magnētisko potenciālu var tuvināti aprakstīt ar parabolu (skat. punktotu līniju attēlā 8b):

$$U_M = \frac{1}{2}k_z z^2, \quad (5)$$

kur k_z ir potenciālu raksturojoša atsperes konstante, un z ir stieņa masas centra novirze no līdzsvara. Atsperes konstante k_z ir atkarīga no magnetizācijas M (iegūta pirmajā sadaļā) un χ kā

$$k_z = -C_1 \mu_0 \chi M^2 V_r, \quad (6)$$

kur μ_0 ir vakuuma magnētiskā caurlaidība, V_r ir grafiņa stieņa tilpums, $C_1 = 198.6 \text{ m}^{-2}$ ir šo magnētisko slazdu raksturojoša konstante.

Ievieto grafiņa stieni magnētiskā slazda centrā. Pieregulē platformas virsmas slīpumu ar skrūvēm, lai stienis atrastos slazda centrā. Novirzi steini ar zobu bakstāmo, lai izraisītu svārstības gar divkupru potenciālu.

A.8	Ierosini svārstības stienim no "HB/0.5" ar $l = 8$ mm. Nodrošini mazas amplitūdas svārstības, $A < 4$ mm. Nosaki svārstību periodu. (Svārstības būs rimstošas, bet šajā punktā to ignorē).	0.2 pt.
A.9	Aprēķini grafiņa magnētisko uzņēmību, χ , izmantojot šīs svārstības.	0.8 pt.

[4] Oscilatora labuma faktors (Q) un gaisa viskozitātes noteikšana (3 pt.)

Mēs novērojam, ka stieņa svārstības ir rimstošas pateicoties gaisa pretestībai, un mēs vēlamies saprast kā šī berze ir atkarīga no grafiņa stieņa ģeometriskiem izmēriem (diametra un garuma), kā arī noteikt gaisa viskozitāti μ_A . Stieņa kustība var tikt aprakstīta kā nepietiekoši rimstošas svārstības: $z(t) = Ae^{-t/\tau} \sin(\omega t)$, kā parādīts att. 3a, kur A ir sākotnējā svārstību amplitūda un $\omega = 2\pi f$ ir svārstību leņķiskā frekvence. t ir laiks. Amplitūda laikā dilst kā $\exp(-t/\tau)$, kur τ ir svārstību rimšanas laika konstante. Tā nosaka svārsta "labuma faktoru" $Q = \omega\tau/2$. Ja $Q > 0.5$ svārstības sauc par nepietiekoši rimstošām (*underdamped*). $Q = 0.5$ atbilst kritiski rimstošām svārstībām (*critically damped*) un $Q < 0.5$ ir pārāk rimstošas (*overdamped*). Labuma faktors ir jāzin, būvējot PDL slazda seismometrus un slīpuma mērītājus.

Mēs varam aprēķināt svārstību rimšanas laika konstanti τ aproksimējot cilindrisku stieni kā garu ellipsoīdu un aprēķinot pretestības spēku pēc Stoksa formulas. Svārstību rimšanas laika konstante šajā tuvinājumā ir atrodama kā:

$$\tau = \frac{2}{3} \frac{\rho r^2}{\mu_A} \ln \left(0.607 \times \frac{l}{r} \right) \quad (7)$$

kur ρ , r un l ir attiecīgi grafiņa stieņa blīvums, radius un garums, bet μ_A ir gaisa viskozitāte. Mēs vēlamies novērtēt gaisa viskozitāti, izmantojot šo modeli.

A.10	Mums ir jānosaka svārstību rimšanas laika konstante τ . Uzskicē un īsi apraksti kā var <i>vienkāršā veidā</i> izmērīt τ .	0.5 pt.
A.11	Veic svārstību rimšanas eksperimentus, izmantojot dažāda diametra stieņus ar vienu un to pašu garumu 8 mm. Nosaki svārstību rimšanas laika konstanti katram stienim.	1.5 pt.
A.12	Nosaki gaisa viskozitātes koeficientu μ_A .	1.0 pt.

Sadaļa B. Pielietojumi

[5] PDL slazda seismometrs (0.5 pt.)

Lai izveidotu seismometru, izmantojot PDL magnētisko slazdu, ir jāpanāk augsta jutība jeb zems paātrinājuma trokšņa līmenis, kas ir mazākais paātrinājums, kuru ir iespējams izmērīt. Paātrinājuma trokšņa līmenis ($m/(s^2 Hz^{0.5})$ mērvienībās) ir aprēķināms kā

$$a_n = \sqrt{\frac{4k_B T \omega}{Q m_R}} \quad (8)$$

kur k_B ir Bolczmanņa konstante, T ir istabas temperatūra (skatīt **Konstantes un dati**), un m_R ir stieņa masa. Visi lielumi ir SI mērvienībās. 4. sadaļā tika izmērīta τ konstante dažādiem grafiņa diametriem. Izdomā, kāds stieņa diametrs ir jāizvēlas, lai no tā sanāktu vislabākais seismometrs.

B.1	Kura diametra stienis ir jāzivēlas?	0.2 pt.
B.2	Aprēķi paātrinājuma trokšņa līmeni (a_n) izvēlētajā diametra stienim.	0.3 pt.

[6] PDL slazda slīpuma mērītājs (2 pt.)

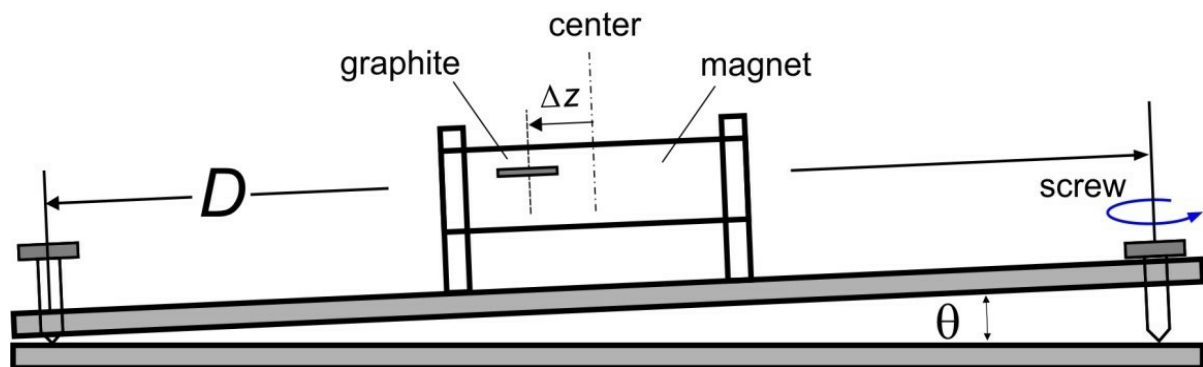


Figure 9. PDL slazda sistēma slīpuma mērīšanai

PDL slazdu var izmantot kā jutīgs slīpuma sensoru vulkānu novērošanai. Zemes slīpuma izmaiņa tiks imitēta ar skrūvēm un tavs uzdevums būs noteikt skrūves kāpuma soli S (S ir skrūves pārvietojums, viecot vienu pilnu apgriezianu). Parādīsim, ka, mērot grafīta stieņa novirzi slazdā, mēs varam precīzi izmērt slīpumu.

Šajā eksperimentā izmanto grafīta stieni HB/0.5 ar garumu $l = 8$ mm. Sāc no stāvokļa, kad stienis atrodas slazda centrā. Pieņem, ka divkupru potenciālu labi apraksta paraboliskais tuvinājums, kā uzdevumā 3:

B.3	Iegūsti teorētisku sakarību starp stieņa novirzi Δz (attēls 9), skrūves kāpuma soli S un skrūves apgriezianu skaitu N .	0.5 pt.
B.4	Lēni griežot skrūvi, noteikt stieņa novirzi Δz atkarībā no skrūves apgriezianu skaita N . Noteikt skrūves kāpuma soli S .	1.25 pt.
B.5	Kad zemes slīpums mainās, mēs vēlamies, lai grafīta stienis atgrieztos līdzsvarā cik vien ātri iespējams, ilgi nesvārstoties un ļaujot veikt nolasījumu. Cik liels būtu vispiemērotākais labuma faktors Q slīpuma mērīšanai?	0.25 pt.