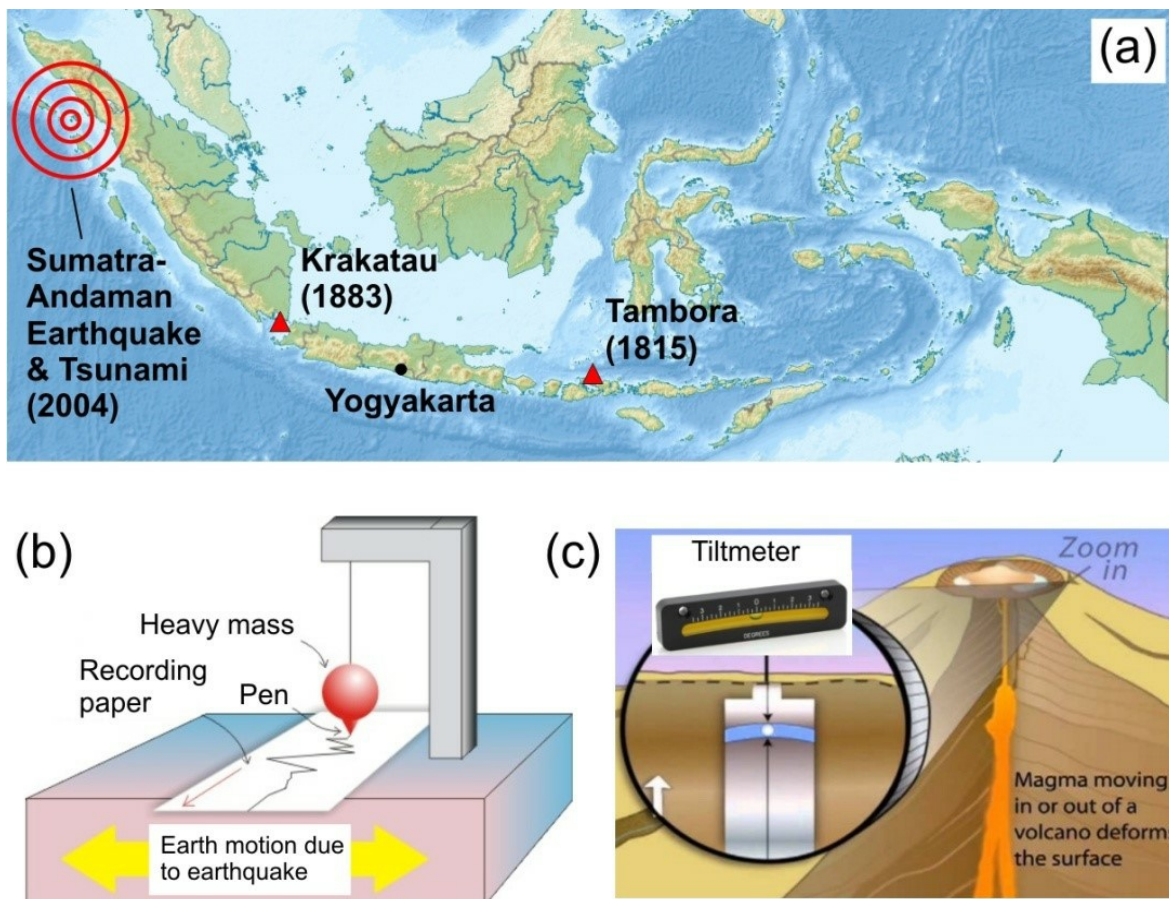


Párhuzamos dipólus vonal mágneses csapda, mint földrengés- és vulkán szenzor

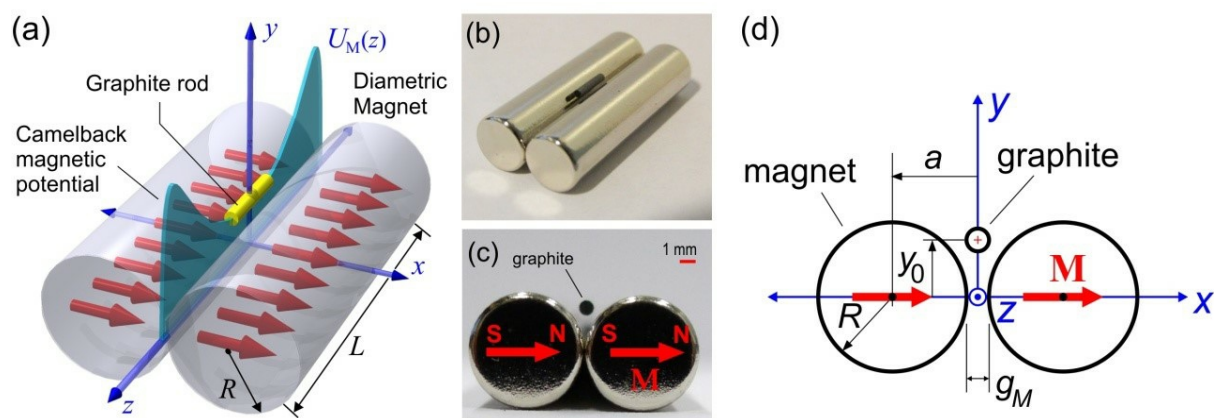
A. Bevezetés



1. ábra (a) Indonézia térképe a leghíresebb eseményekkel (b) Egyszerű szeizmométer földrengések érzékeléséhez (c) Dőlésmérő vulkánok monitorozásához

Indonézia a világ legnagyobb szigetvilága kb. 17000 trópusi szigettel, ezért szokták "az egyenlítő ékszerének" nevezni. Sajnos egy sor természeti veszély is van, mint a földrengések és a vulkánkitörések. A legnagyobb katasztrófák (1.a ábra), mint a Sumatra-Andaman földrengés és cunami (2004), Krakatau (1883) és Tambora (1815) vulkánkitörések, a feljegyzett történelem legtöbb halálos áldozatot követelő eseményei közt vannak. A földrengések érzékeléséhez *szeizmométert* használnak, ami általában egy inga-alapú rendszer a talaj elmozdulásának vagy gyorsulásának a mérésére (1.b ábra). A vulkánok monitorozásához *dőlésmérőt (tiltmeter)* lehet használni, amely érzékeli a talaj dőlésszögének *magmamozgások miatti változását* (1.c ábra). Ebben a feladatban egy új típusú mágneses csapda - párhuzamos dipólus vonal, *Parallel Dipole Line (PDL)* - érzékelőrendszer fizikáját és felhasználását fogod vizsgálni, amit földrengések érzékelésére és vulkánok monitorozására lehet használni.

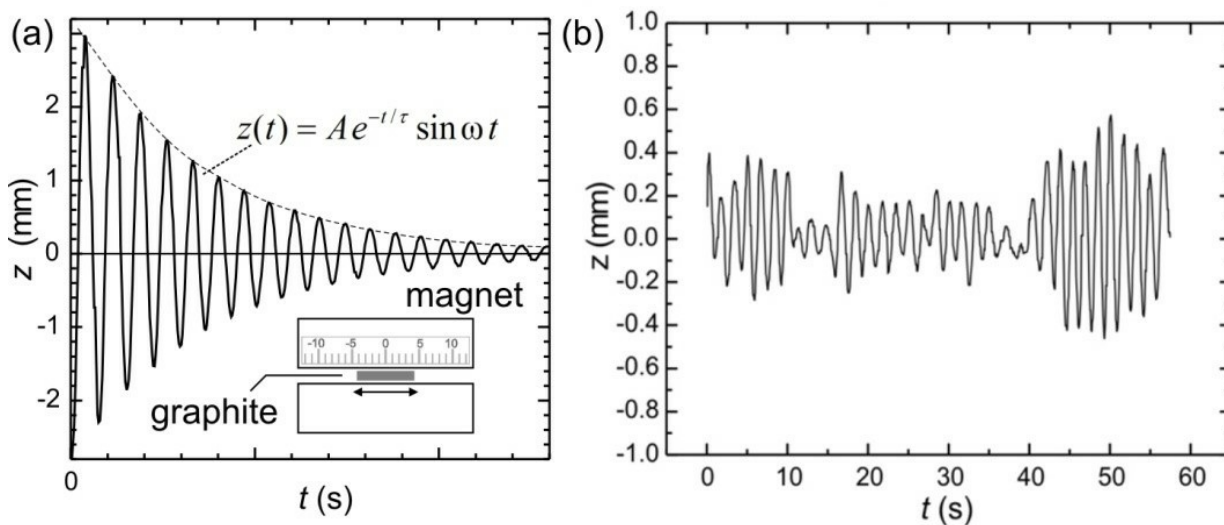
A párhuzamos dipólus vonal rendszer egy olyan elrendezés, amely mágneses dipólusok két vonalmenti elrendezéséből (két dipólus vonalból) áll, ahogy a 2. ábrán látható. Nemrég két indonéz fizikus felfedezett egy nagyon érdekes effektust: ha a dipólus vonalak hossza nagyobb egy kritikus értéknél, akkor a mágneses tér erősebb lesz a vonalak végénél, ami egy kétpúpú "tevehát potenciált" eredményez, ahogy a 2.a ábrán látszik.* Ez a "tevehát effektus" nagyon fontos, mert lehetővé teszi, hogy a rendszer egy új típusú mágneses csapda, un. *Parallel Dipole Line (PDL)* legyen. Kísérletileg megvalósítható ez a PDL csapda, ha két diametrikus mágnest használunk, azaz olyan hengermágneseket, melyek mágnesezettsége az átmérő (diameter) irányába mutat (2.c ábra), azaz az északi és déli pólus a henger lapos végei helyett a görbült felületen található.



2. ábra (a) Párhuzamos dipólus vonal (PDL) modell z-irányú tevehát potenciállal (b) Kísérleti elrendezés "diametrikus" mágnesekkel (c) Keresztmetszeti nézet (d) A PDL csapda vázlatja [* Gunawan and Virgus, J. Appl. Phys. 121, 133902 (2017)].

Ha egy grafit rudat (közönséges ceruzabetétet) teszünk a csapdába, akkor lebegni fog vagy stabil állapotban csapdába kerül. Ez azért lesz így, mert x -irányban a grafitot a két mágnes mindkét irányból taszítja, függőleges (y) irányban a mágneses taszítóerő egyensúlyt tart a gravitációval, és lebegteti y_0 magasságban (2.d ábra). A hosszanti (z) irányban pedig a tevehát potenciál tartja a grafitot stabilan.

A mágneses csapda *tevehát potenciálja* egy *egydimenziós oszcillátort* hoz létre. Ha a z -tengely mentén egy kicsit meglökjük a grafit rudat, akkor az egy gyengén csillapított rezgést fog végezni (3.a ábra). Ez a PDL csapda érzékeny szeizmométerként használható. Ha az alatta lévő talaj rázkódik, akkor a grafit rúd igyekszik nyugalomban maradni, és a relatív elmozdulása (3.b ábra) a "földrengés" jel. Hasonlóan, használható érzékeny dőlésmérőként (tiltmeter) is: ha a csapdát kicsit megdöntöd, a grafit rúd lényegében súrlódás nélkül fog mozogni.



3. ábra (a) A grafit rúd gyengén csillapított rezgése a tevehát potenciálban (b) Szeizmométer alkalmazás: a talaj rezgésének detektálása a PDL csapdával.

A következőkben két részben fogod vizsgálni a PDL csapda fizikáját és felhasználását.

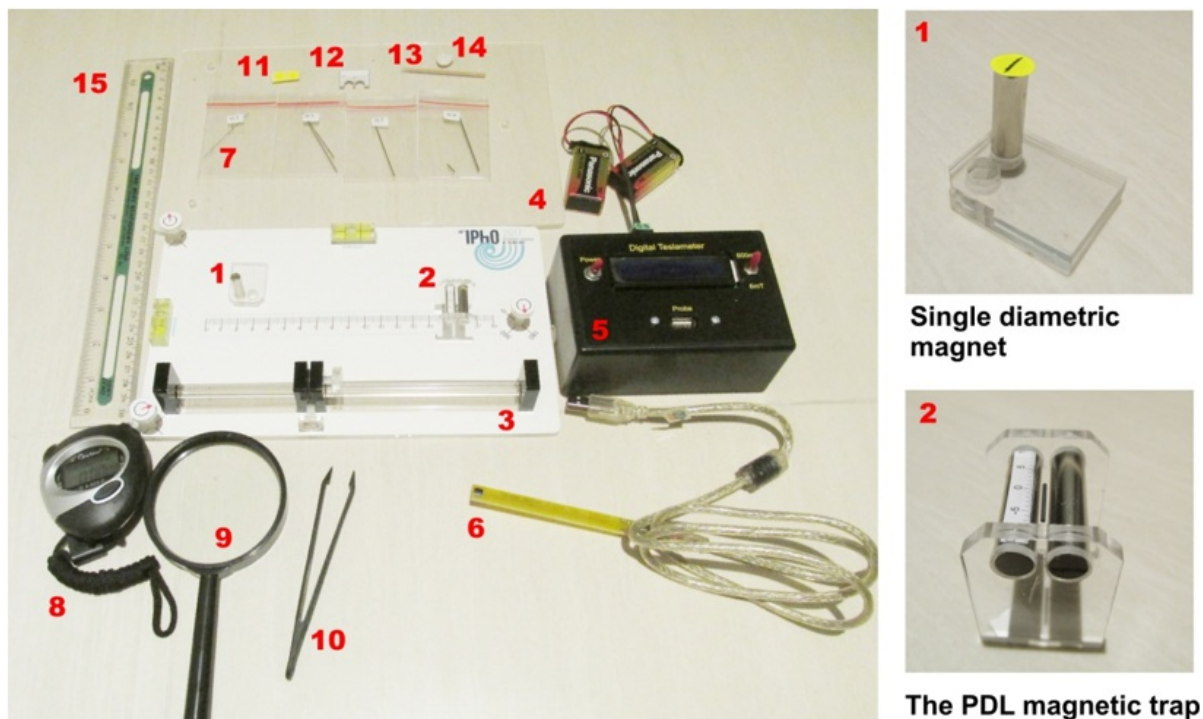
A rész: Alapvető jellemzés

- (1) A mágnesek M mágnesezettségének meghatározása (2,5 p.)
- (2) Mágneses lebegtetés és a χ mágneses szuszceptibilitás (1,0 p.)
- (3) A tevehát potenciál rezgés és a χ mágneses szuszceptibilitás (1,0 p.)
- (4) Az oszcillátor Q jósági tényezőjének és a levegő μ_A viszkozitásának meghatározása (3,0 p.)

B rész: Alkalmazások

- (5) PDL csapda szeizmométer (0,5 p.)
- (6) PDL csapda dőlsmérő (tiltmeter) (2,0 p.)

B. Eszközök



4. ábra A kísérleti eszközök

1. Egyedülálló diametrikus mágnes tartón. A sárga öntapadó korong szolgál a mágnesezettség irányának jelölésére.
2. PDL mágneses csapda elrendezés lebegő grafitokkal
3. Felső alaplappal 3 csavarral
4. Alsó alaplappal
5. Tesla-méter a mágneses tér méréséhez
6. Hall-szonda a Tesla-méterhez
7. Grafit rudak (ceruza betétek) 4 különböző átmérővel HB/0.3, HB/0.5, HB/0.7 és HB/0.9, ahol a szám a közelítő átmérőt jelöli mm-ben, azaz pl. HB/0.5 átmérője kb. 0,5 mm. A pontos átmérők az *állandók és adatok* táblázatban találhatóak. A grafit rudakat esetleg el kell törnöd a különböző előírt hosszakhoz.
8. Stopper
9. Nagyító
10. Antisztatikus csipesz

11. Sárga öntapadó papírkorong az egyedülálló mágnes mágnesezési irányának jelöléséhez (észak-déli pólus)
12. "Beilleszthető" vonalzó a grafit lebegési magasságának méréséhez
13. Fogpiszkáló a grafit rúd mozgatásához
14. Gyurma (silly putty) a mágneses elrendezések alaplaphoz rögzítéséhez
15. Vonalzó

UTASÍTÁSOK ÉS FIGYELMEZTETÉSEK:

1. **Tartsd az egyedülálló mágnest és a PDL csapdát (dupla mágnes) egymástól távol, mert különben az erős vonzástól egymásnak ütközhetnek és eltörhetnek!**
2. **Kapcsold ki a Tesla-mérőt, ha nem használod, hogy ne merüljön le a telep!**
3. Vedd le a 7. és 11-14. jelű dolgokat az alsó alaplapról (4-es számú), és aztán helyezd a felső alaplapot (3-as számú) az alsó alaplapra.
4. A három csavar segítségével tudod a felső alaplap magasságát állítani.

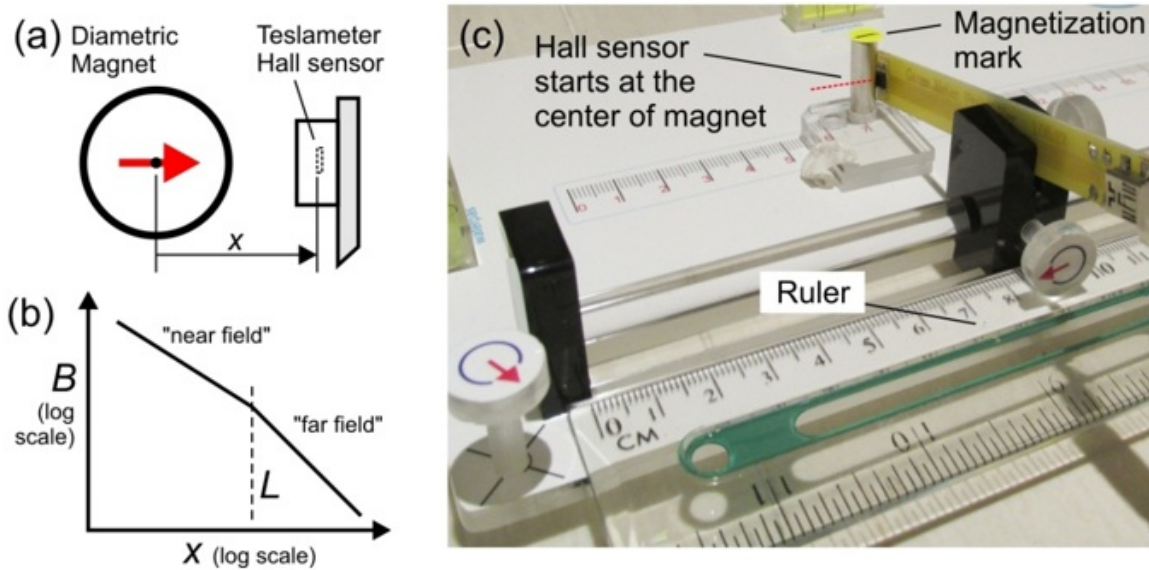
ÁLLANDÓK ÉS ADATOK:

A diametrikus mágnes sugara	:	$R = 3,2 \text{ mm}$
A diametrikus mágnes hossza	:	$L = 25,4 \text{ mm}$
Rés a PDL csapdában	:	$g_M = 1,5 \text{ mm}$
A grafit sűrűsége	:	$\rho = 1680 \text{ kg/m}^3$
Grafit rúd "HB/0.3" átmérője	:	$d = 0.38 \text{ mm}$
Grafit rúd "HB/0.5" átmérője	:	$d = 0.56 \text{ mm}$
Grafit rúd "HB/0.7" átmérője	:	$d = 0.70 \text{ mm}$
Grafit rúd "HB/0.9" átmérője	:	$d = 0.90 \text{ mm}$
Szobahőmérséklet	:	$T = 298 \text{ K}$
A vákuum mágneses permeabilitása	:	$\mu_0 = 1,257 \times 10^{-6} \text{ H/m}$
Boltzman-állandó	:	$k_B = 1,38064852 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
Gravitációs gyorsulás	:	$g = 9,8 \text{ m/s}^2$

C. Kísérlet és kérdések

A. RÉSZ: A PDL CSAPDA ALAPTULAJDONSÁGAI

[1] A mágnes M mágneszettségének meghatározása (2.5 pt.)



5. ábra. (a) A mágneses tér mérése. (b) A mágneses tér helyfüggése. (c) Kísérleti elrendezés.

A mágneses csapda ereje függ a mágnes m teljes dipólmomentumától. Ez összefüggésben áll a mágneses anyag egy jellemzőjével, az M mágneszettségével, ami a térfogategységre eső mágneses momentum. A kísérletben szereplő hengeres mágnes esetén:

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

ahol R a henger sugara, L pedig a hossza (lásd az állandók és adatok táblázatot). A kísérletben használt mágnesek M mágneszettsége azonosnak tekinthető. A mágneses tér helyfüggésének vizsgálatával meghatározzuk a PDF csapdában használt diametrikus mágnes M mágneszettségét.

Az egyedül álló diametrikus mágnes segítségével hozd létre az 5c ábrán látható elrendezést! A mágneszettséget (a 6a ábrán látható módon) irányítsd a Hall-szonda (Tesla-méter) felé! A Tesla-méter segítségével mérd meg a mágneses indukció erősségét az x -tengely mentén! A B mágneses indukció helyfüggése a dipólus-vonalhoz közel, azaz $x \leq 16$ mm esetén:

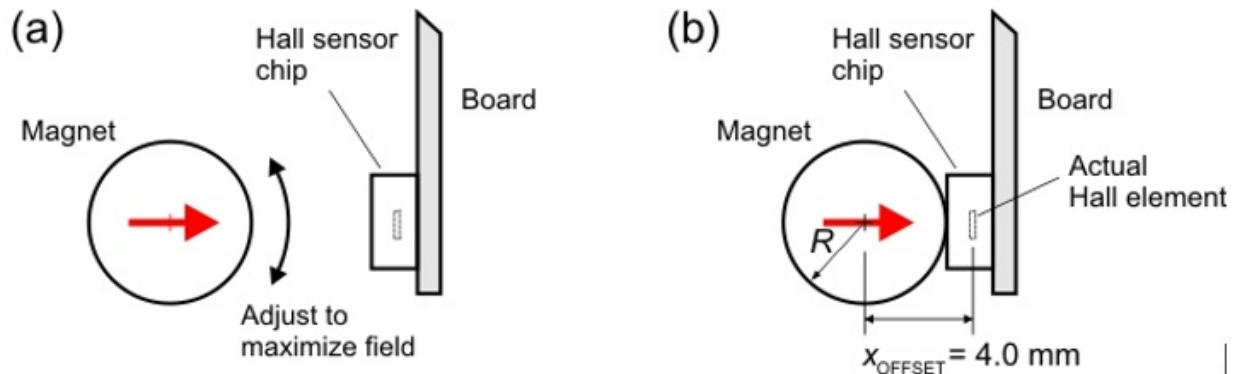
$$B_I(x) = \frac{\mu_0 m}{2\pi x^3 L}. \quad (2)$$

Az x -tengely a 6a ábra szerint a diametrikus mágnes mágneszettségének irányába mutat, és x a mágnes középvonala és a Hall-szonda belsejében levő érzékelő közti távolság (lásd a 6b ábrát és a hozzá tartozó iránymutatást).

Csak a dipólus-vonalhoz közel végzünk mérést.

A.1	Mérd meg a Tesla-méter B_0 nullhibáját, azaz a minden mágnestől messze mutatott értéket. A következő mérésekben minden mért értéket korigálj ezzel a nullhibával!	
A.2	Mérd meg a B mágneses indukciót az x távolság függvényében a <i>mágneshez közel</i> ($7 \text{ mm} \leq x \leq 16 \text{ mm}$)! <u>Itt x a mágnes közepétől mért távolság.</u> Eredményeidet foglald táblázatba és ábrázd a válaszlapon (answer sheet)! Kövesd az alább megadott javaslatokat és iránymutatásokat!	1.15 pt.
A.3	A mérési eredmények felhasználásával határozd meg a p kitevőt!	0.75 pt.
A.4	Határozd meg a mágnes M mágnesezettségét!	0.5 pt.

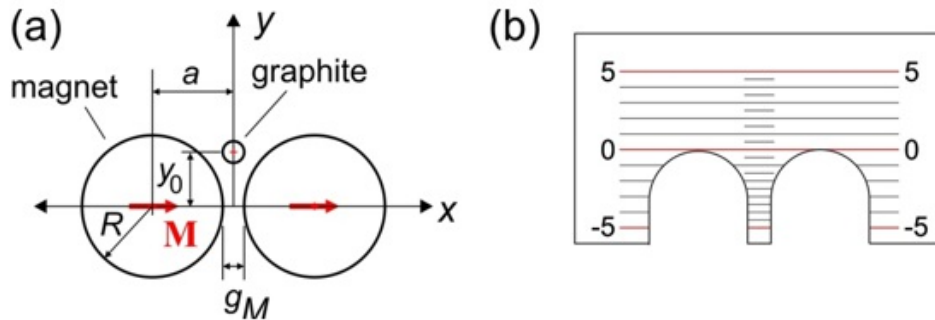
JAVASLATOK ÉS IRÁNYMUTATÁSOK:



6. ábra. Mágneses indukció mérése: (a) beállítás, (b) offset.

1. **Ha nem használod, kapcsold ki a Tesla-métert, hogy kíméld az elemet!**
2. A Tesla-méter használatakor minden mérési érték leolvasása előtt várj körülbelül 2 másodpercig.
3. Az x távolságot a mágnes középvonalától mérjük. A mágnes sugara $R = 3,2 \text{ mm}$.
4. Használd az 5c ábrán javasolt kísérleti elrendezést!
5. Forgasd a mágnest olyan helyzetbe, hogy mágnesezettsége a Hall-szonda felé mutasson (6a ábra), és így a mágneses tér maximális legyen! A mágnesezettség irányának jelöléséhez ráragaszthatod a sárga, öntapadó papírkorongot a mágnesre.
6. Amikor a Hall-szonda hozzáér a mágneshez, akkor a valódi távolság a mágnes közepe és a Hall-érzékelő között adott $x_{\text{OFFSET}} = 4 \text{ mm}$ (ún. offset).
7. A mérést kezd a Hall-szonda $x = 5 \text{ mm}$ távolságánál! Ne használj a szenzor és a mágnes érintkezésekor ($x = 4 \text{ mm}$) kapott értéket, mert a szenzor telítésbe megy vagy deformálódik ilyenkor!

[2] Mágneses lebegtetés és mágneses szuszceptibilitás (χ) (1 pt.)



7. ábra (a) Mágneses lebegtetés a PDL csapdában. (b) "Beilleszthető" vonalzó az y_0 lebegési magasság méréséhez.

A PDL csapda segítségével mágneses lebegtetés is létrehozható. A 7(a) ábrán látható módon a grafit y_0 magasságban lebeg a PDL csapda közepén. A grafitra ható $F_M(y_0)$ mágneses taszító erő a grafit χ mágneses szuszceptibilitásától és y_0 -tól függ. A mágneses szuszceptibilitás azt jellemzi, hogy egy anyag külső mágneses tér hatására hogyan mágnesesedik. A szuszceptibilitás a $\mu = (1 + \chi)\mu_0$ összefüggésben jelenik meg, ahol μ az anyag mágneses permeabilitása. A PDL csapdában a grafit rúdra ható mágneses taszító erő:

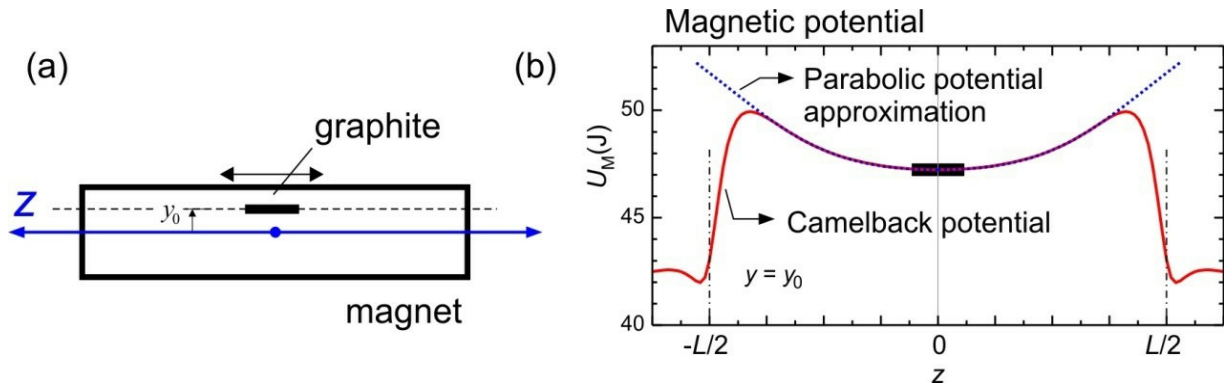
$$F_M(y_0) = -\frac{\mu_0 M^2 \chi V_r}{2} \frac{R^4}{a^5} f\left(\frac{y_0}{a}\right). \quad (3)$$

A fenti képletben $F_M(y_0)$ akkor pozitív, ha az erő felfelé mutat, és van egy negatív előjel a formulában. A V_r a grafit rúd térfogata, M a mágnes mágnesezettsége (az 1. kérdésben megkapott érték), $a = R + g_M/2$ a mágnes középvonalának helyzete (7a ábra), ahol $g_M = 1.5$ mm a mágnesek közti rés. Az $f(u)$ egy dimenzió nélküli függvény, amely az adott elrendezésben:

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

A.5	Óvatosan helyezz a csapdába egy HB/0.5 jelű, $\ell = 8$ mm hosszú grafitrudat! Mérd meg a rúd y_0 lebegési magasságát (7a ábra). Javaslat: használd a 7b ábrán látható "beilleszthető" vonalzót. A vonalzót nyomd ütközésig a mágnesek közé és úgy olvasd le a grafitrúd helyzetét.	0.1 pt.
A.6	Az A.5 pont eredménye segítségével határozd meg a grafitrúd χ mágneses szuszceptibilitását!	0.8 pt.
A.7	Milyen típusú mágneses anyag a grafit? Az alábbiak közül válassz egyet: (i) Ferromágneses; (ii) Paramágneses; (iii) Diamágneses.	0.1 pt.

[3] Oszcilláció a tevehát potenciálban és mágneses szuszceptibilitás (χ) (1 pt)



8. ábra. (a) Grafit rezgése y_0 magasságban. (b) A PDL csapda tevehát potenciálja és másodrendű (parabolikus) közelítése.

Újra meghatározzuk a grafit χ mágneses szuszceptibilitást a PDL csapda tevehát potenciáljában való rezgésből (8.ábra). Kis amplitudó esetén ($z < 4$ mm) a mágneses potenciál másodfokú kifejezéssel közelíthető (a 8b ábrán pontozott vonal):

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

ahol k_z a potenciál rugóállandója, z pedig a grafitrúd tömegközéppontjának elmozdulása. A k_z a mágnes M mágnesezettségétől (lásd 1.kérdés) és χ -től függ:

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

Itt μ_0 a mágneses permeabilitás, V_r a grafitrúd térfogata, és $C_1 = 198.6 / \text{m}^2$ egy erre a mágneses csapdára jellemző konstans.

Helyezd a grafitrudat a mágneses csapda középsébe! A szintező csavarok segítségével állítsd be az alaplapot úgy, hogy a rúd a csapda közepén maradjon! Fogpiszkálóval térítsd ki a rudat, és indítsd el a tevehát potenciálban a rezgést!

A.8	Hozd rezgésbe a "HB/0.5" jelű, $\ell = 8$ mm hosszú grafitrudat! A rezgés amplitúdója legyen kicsi, azaz $A < 4$ mm. Határozd meg a rezgés periódusidejét! (A rezgés lassan csillapodik; ezt ne vedd figyelembe!)	0.2 pt.
A.9	A rezgésből határozd meg a grafit χ mágneses szuszceptibilitását!	0.8 pt.

[4] A rezgés Q jósági tényezője és a levegő viszkozitásának becslése (3 pt.)

Megfigyelhető, hogy a közegellenállás miatt a grafitrúd rezgése csillapodik. A grafitrúd méretének (átmérőjének és hosszának) segítségével a csillapodásból szeretnénk megbecsülni a levegő μ_A viszkozitását. A grafitrúd mozgása a 3a ábrán látható gyengén csillapodó rezgésnek tekinthető: $z(t) = Ae^{-t/\tau} \sin(\omega t)$, ahol A a kezdeti amplitúdó, $\omega = 2\pi f$ a körfrekvencia és t az idő. Az amplitúdó időben az $\exp(-t/\tau)$ faktorial csökken, ahol τ a csillapítási időállandó. Ez utóbbi határozza meg a rezgés jósági tényezőjét: $Q = \omega\tau/2$. Ha $Q > 0.5$, akkor a rezgés gyengén csillapított, $Q = 0.5$ mellett kritikusan csillapított, és $Q < 0.5$ esetén túlcillapított. *A jósági tényező fontos PDL csapdán alapuló szeizmográf és dőlésmérő tervezésekor.*

A grafitrudat hosszú ellipszoiddal közelítve, és felhasználva a Stokes-féle közegellenállási törvényt, meghatározható a τ csillapítási időállandó:

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

ahol ρ , r és l rendre a grafitrúd sűrűsége, sugara és hossza, valamint μ_A a levegő viszkozitása. Ezzel a modellel szeretnénk a levegő viszkozitását megbecsülni.

A.10	Szükségünk van a rezgés τ csillapítási időállandójára. Vázolj egy egyszerű módszert τ mérésére!	0.5 pt.
A.11	Különböző vastagságú de azonos, 8 mm hosszúságú grafitrudakkal végezd el a csillapítási időállandó mérést! Határozd meg minden rúd esetén a τ csillapítási időállandót!	1.5 pt.
A.12	Határozd meg a levegő μ_A viszkozitását!	1.0 pt.

B RÉSZ: ALKALMAZÁS ÉRZÉKELŐKÉNT

[5] PDL csapdán alapuló szeizmométer (0.5 pt.)

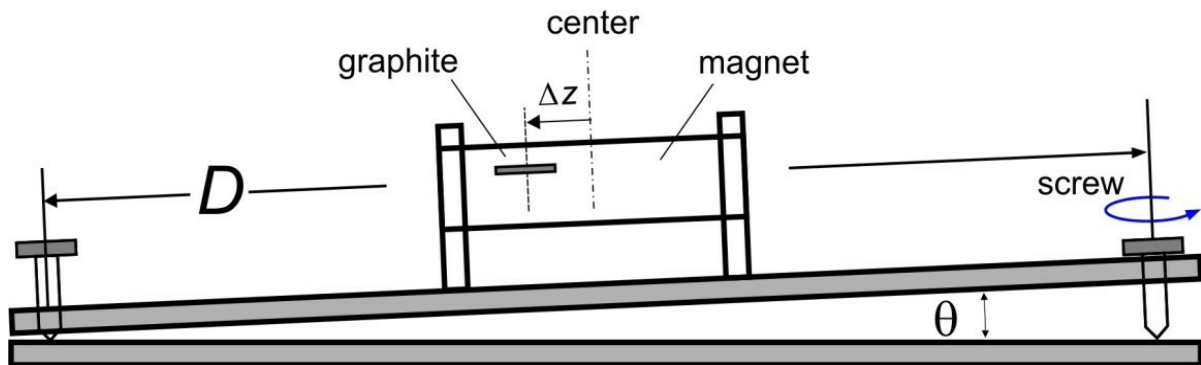
Képzeld el, hogy egy PDL-csapdán alapuló szeizmométert tervezünk. A legnagyobb érzékenységet, azaz a legkisebb "gyorsulás-zavarküszöböt" szeretnénk elérni. (Ez a műszerrel érzékelhető legkisebb gyorsulás.) A gyorsulás-zavarküszöböt ($\text{m}/(\text{s}^2 \text{Hz}^{0.5})$ egységben) az

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

képlet adja meg, ahol k_B a Boltzmann-állandó, T a rendszer hőmérséklete, (lásd: Állandók és adatok táblázat), és m_R a rúd tömege, minden SI egységben. A 4. kérdésben már meghatároztad τ értékét különböző átmérőjű grafitrudakra. Válaszd ki azt, amelyikből véleményed szerint a legjobb szeizmométer készíthető!

B.1	Melyik rúdátmérőt választottad?	0.2 pt.
B.2	A kiválasztott rúdátmérő esetén számold ki a szeizmométer a_n gyorsulásvavarküszöbét!	0.3 pt.

[6] PDL-csapdán alapuló dőlésmérő (2 pt.)



9. ábra. PDL csapda mint dőlésmérő.

A PDL-csapdát vulkánok vizsgálatához is használhatjuk, mint nagyon érzékeny dőlésmérőt. A talaj dőlésének változását a szintező csavarok állításával szimulálhatjuk. Először a csavarok S menetemelkedését határozzuk meg, ahol S a csavar egy teljes körbefordításához tartozó emelkedés. Megmutatjuk, hogy a grafitrúd csapdában való elmozdulásának mérésével a dőlésszög igen pontosan mérető.

A kísérletben használj HB/0.5 jelű, $l = 8$ mm hosszú grafitrudat! Kezdetben a rúd legyen középen! A tevhát-potenciált közelítsd a 3. kérdésben használt harmonikus potenciállal!

B.3	Elméleti úton vezess le egy összefüggést a Δz elmozdulás és a csavar S menetemelkedése valamint a csavar körbefordításainak N száma között!	0.5 pt.
B.4	A csavart lassan mozgatva mérd meg a rúd Δz elmozdulását a csavar körbefordításainak N számának a függvényében! Határozd meg az S menetemelkedést!	1.25 pt.
B.5	Szeretnénk, hogy a talaj dőlésének változásakor a grafitrúd (hosszú rezgések helyett) a lehető leggyorsabban felvegye egyensúlyi helyzetét, azért, hogy a műszer könnyen leolvasható legyen. Mekkora az ideális dőlésmérő Q jósági tényezője?	0.25 pt.