

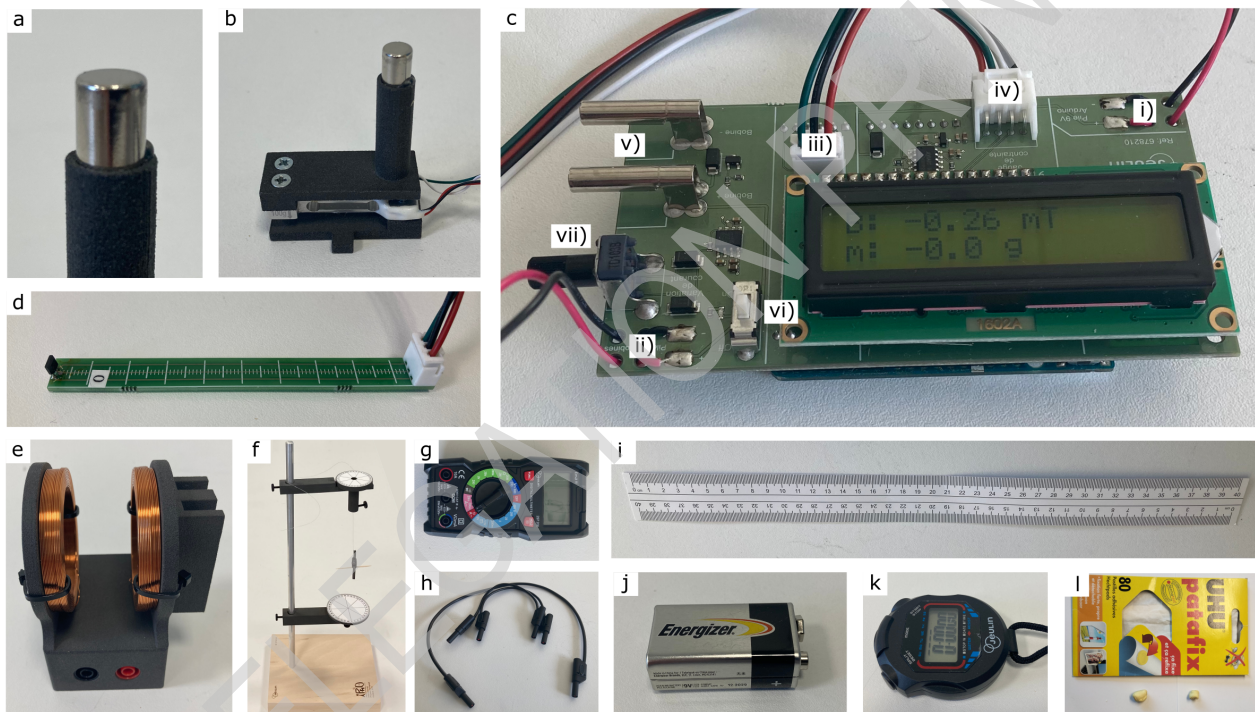
A Föld mágneses terének mérése (10 pont)

Bevezetés

A mérés célja, hogy meghatározzuk a Föld mágneses terének vízszintes komponensét. Először egy úgynevezett Gouy-mérleg segítségével vizsgálunk egy mágnest, majd egy hasonló mágnes segítségével a Föld mágneses terét vizsgáljuk.

Az egész feladatban a mérési eredmények hibáját ne az egyes mérések hibájából, hanem a grafikonok illesztéséből határozd meg!

Eszközök listája



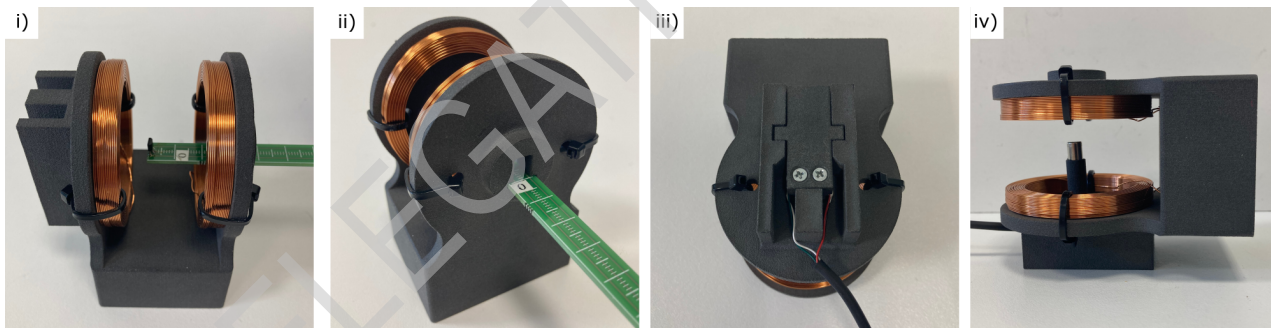
1. ábra. Fényképek az eszközökről.

Az eszközök képei az 1. ábrán láthatóak, tételes listájuk pedig alább. Amennyiben egy eszközből több van, számuk [] jelek között kerül feltüntetésre. Ha úgy tűnik, hogy valami nem működik, kérj segítséget!

- **(a) Mágnesek [3].** Az egyik mágnes az erő szenzorhoz van rögzítve (b), és nem szabad eltávolítani. Egy másik mágnes az (f) foglalatba van behelyezve, és csak akkor szabad eltávolítani, ha arra külön utasítás érkezik. A harmadik mágnest az A.5. pontban fogjuk használni. A mágnesek azonosnak tekinthetők.
- **(b) Erő szenzor.** Az Arduinohoz (c) csatlakoztatva ez az érzékelő a tengelye mentén méri az m_f erőt, gramm-erőben ("g"). Egy gramm-erő az 1 gramm tömegű testre ható nehézségi erő a Föld felszínén, ($g_0 = 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$). Az egyik mágnes (a) fixen az erő szenzorhoz van csatlakoztatva. Minden egyes visszakapcsoláskor az erő szenzor kijelzője 0-ra áll vissza, függetlenül a pillanatnyi terheléstől. *Ezt a szenzort nem szabad 200 gramm-erőnél nagyobb erőnek kitenni! Óvatosan csomagold ki!*
- **(c) Arduino digitális kijelzővel.** Ez az egység táplálja a tekercseket (e), és ez szolgál az erő- és mágneses tér mérésére is, amit a kijelző közvetlenül gramm-súlyban ("g") és mT-ban jelenít meg. Az Arduino-t tápláló elemet (j) az (i) csatlakozóhoz, a tekercseket (e) tápláló elemet (j) pedig a (ii) csatlakozóhoz kell csatlakoztatni (ügyeljünk a polarításra). Az erő szenzort (b) és a mágneses tér érzékelőt

(d) a (iv) és (iii) csatlakozóhoz, a tekercsek tápkábeleit pedig a (v) kivezetésekhez kell csatlakoztatni. A (vi) kapcsoló zárja a tekercs tápáramkörét (LED jelzi), amelynek áramát a (vii) tekerőgombbal lehet szabályozni.

- **(d)** Mágneses tér szenzor vonalzóval. Az Arduinohoz (c) csatlakoztatva ez az érzékelő mT-ban méri a mágneses tér B_z komponensét a vonalzó $\vec{e}_z$ iránya mentén.
- **(e)** Tekercsek anti-Helmholtz elrendezésben (ellentétes irányban tekercselve). Ezeket a tekercsokat sorba kell kapcsolni az ampermérővel (g) és az Arduinoval (c), hogy mágneses mezőt hozzanak létre.
- **(f)** Fából készült talapzaton álló fémállvány, a felfüggesztett foglalattal, amelybe kezdetben egy mágnest (a) helyeztek be, és a szögjelző tárcsákkal. A készülék részletes összeszerelését később ismertetjük.
- **(g)** Multiméter. Kizárólag ampermérőként használható a 10A méréshatárban. Inaktív állapotban a multiméter egy idő után kikapcsol, ilyenkor először "OFF" állásba kell kapcsolni, majd vissza kell kapcsolni. Ne használd a multiméter dobozában található két kábelt.
- **(h)** Elektromos vezetékek [3].
- **(i)** 40 cm-es vonalzó.
- **(j)** 9V-os elemek [3]. Kapacitásuk 300 mA · h nagyságrendű.
- **(k)** Stopperóra.
- **(l)** Ragasztópaszta. Az egész feladat során felhasználható.



2. ábra. A szenzorok elhelyezkedése az anti-Helmholtz tekercsekben.

Az Arduinohoz kapcsolt szenzorok használata (2. ábra)

A mágneses tér szenzor (d) az (i) ábrán látható módon csúsztható a tekercsek (e) közé, és a tekercsek tengelyében méri a mágneses teret. Az érzékelő $z = 0$ helyzete a (ii) ábrán látható, és z növekszik, ahogy a szonda a tekercsek közé hatol.

Az erő szenzort (b) először a (iii) ábrán látható módon helyezd a tekercsekbe, majd a tekercsokat a (iv) ábrán látható módon fordítsd el úgy, hogy a szenzor függőlegesen álljon. *Ügyelj arra, hogy az elektromos vezetékeket a megfelelő vágatokban vedd ki!*

A torziós állvány (f) összeszerelése (3. ábra). (Az állványt csak a B. részhez kell összeszerelni, kezdetben 34 cm hosszú torziós szállal.)

- Helyezd a fémrudat (f0a) a műanyag lábakkal ellátott falapba (f0b), hogy kialakuljon az állvány (f0).
- Az állvány alján elhelyezkedő szögmérő tárcsa (f1) a lengő foglalattal szögének mérésére szolgál. Rögzítsd a kart (f1b) egy csavarral (f4) a fémoszlopra, majd rögzítsd a tárcsát (f1a) a karra egy másik csavarral (f4).

Experiment

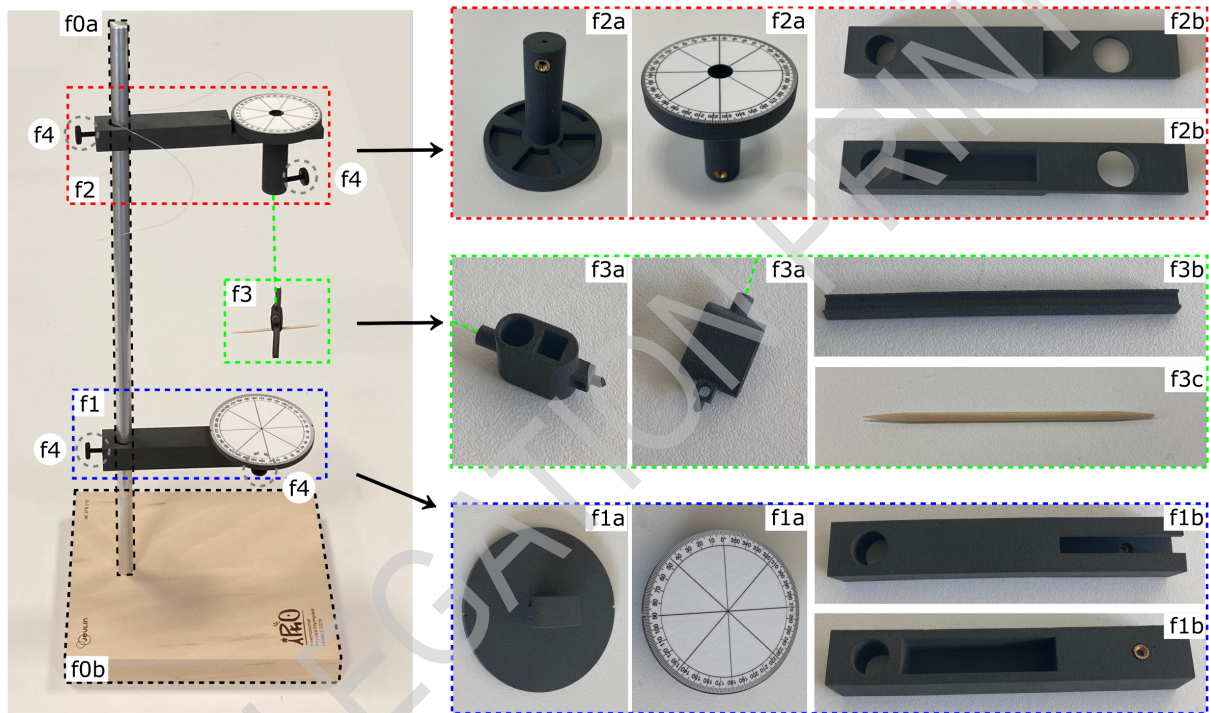


International
Physics Olympiad
FRANCE 2025

Q1-3

Hungarian (Hungary)

- A felső szögmérő tárcsa (f2) tartja a torziós szálát. Egy csavarral (f4) rögzítsd a kart (f2b) a fémoszlophoz, majd helyezd rá a felső tárcsát (f2a).
- A lengő rész (f3) összeszereléséhez helyezd be a műanyagrudat (f3b) és a fogpiszkálót (f3c) a foglalatba (f3a), amelyben már benne van egy mágnes (a). Fűzd be a foglalatból kiinduló torziós szál másik végét a felső tárcsába (f2a), és rögzítsd egy csavarral (f4). A felső tárcsa (f2a) elforgatásával megváltoztatható a torziós szál rögzítési szöge. A fogpiszkáló lehetővé teszi a foglalat szögének pontos mérését.



3. ábra. A torziós állvány összeszerelése. Az ábrán az (f1a), (f1b), (f2a), (f2b) és (f3a) alkatrészek két különböző szögből láthatóak. Négy darab egyforma műanyag csavarra (f4) van szükség.

A. rész: Gouy-mérleg és mágneses momentum

Elmélet

Feltételezzük, hogy a mágnes mágneses dipólusként kezelhető, amelynek mágneses momentuma $\vec{m}_m$. A $\vec{B} = B(z)\vec{e}_z$ mágneses térbe helyezett $\vec{m}_m = m_m\vec{e}_z$ mágneses momentumú dipólra ható erő:

$$\vec{F} = m_m \frac{dB(z)}{dz} \vec{e}_z. \quad (1)$$

Ha az anti-Helmholtz-tekerceken i áram folyik, akkor az $\vec{e}_z$ irányú forgástengely mentén a $\vec{B}$ mágneses tér értéke:

$$\vec{B}(z) = \alpha i (z - z_0) \vec{e}_z. \quad (2)$$

Ez az egyenlet csak az eszköz középpontja közelében érvényes, amelynek helyzetét a $z = z_0$ jelöli.

Mágneses mező a tekercsekben

- A.1** Adj számszerű becslést a kísérletben használt elemek egyikének τ tipikus működési idejére, feltételezve, hogy az áramerősség a 2A nagyságrendben van. 0.2pt

Ezt az eredményt figyelembe kell vened a későbbi mérések során! Megjegyezzük, hogy a tekercseket csak az A részben kell használni, és szükség esetén kérhetsz egy pótelemet.

Helyezd a mágneses tér szondát a tekercsekbe a 2. ábrán látható módon. Ugyancsak ezen az ábrán láthatod, hogyan kell meghatározni a szenzor helyzetét.

- A.2** Állandó $i_0 \approx 1.0\text{A}$ áramerősség mellett mérd meg és ábrázold a B_z mágneses teret az érzékelő (a tekercsek tengelyén elfoglalt) z helyzetének függvényében! Határozd meg azt a legnagyobb $[z_{\min}, z_{\max}]$ tartományt, ahol a mágneses tér kísérletileg lineárisan függ a helyzettől! 0.8pt

- A.3** Az érzékelőt a lineáris függőségi tartományban két pozícióba helyezve (z_1, z_2) ellenőrizd egy-egy diagramon a (2) egyenletben megadott $\vec{B}$ térnek az áramerősségtől való függését, és határozd meg α értékét és hibáját! 0.9pt

Gouy-mérleg

Vedd ki a mágneses tér szondát a tekercsekből, és óvatosan helyezd bele az erő szondát, a 2. ábrán leírtak szerint. Különösen ügyelj arra, hogy az elektromos vezetékek a vágatokban legyenek.

- A.4** Mérd meg a mágnesre ható m_f erőt (gramm-erő egységben) az i áramerősség függvényében! Eredményeidet ábrázold megfelelő grafikonon, majd határozd meg az m_m mágneses momentumot és annak hibáját! 0.8pt

A mágneses nyomaték alternatív mérése

A dipólus közelítésben az m_m mágnes momentumú dipólus mágneses tere a z forgástengelyén a következő

$$B_z(z) = \frac{\mu_0 m_m}{2\pi(z - z_a)^3}, \quad (3)$$

ahol z_a nem feltétlenül a mágnes geometriai középpontja, és ahol $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H} \cdot \text{m}^{-1}$.

- A.5** Mérd meg a B_z mágneses teret a különálló mágnes forgástengelye mentén a z távolság függvényében. Rajzolj megfelelő grafikont a (3) egyenlet szerinti modell ellenőrzésére, bemutatóva az egyenlet és a kísérleti eredmények egyezését és eltérését. Számold ki ebből a mérésekből is az m_m értékét és hibáját! 1.3pt

- A.6** Az A.4. és A.5. pontban kapott két eredményt figyelembe véve tegyél javaslatot a m_m végleges kísérleti értékére és annak bizonytalanságára! 0.2pt

B. rész: A Föld mágneses terének meghatározása**Elmélet**

Most egy mágnes vízszintes síkban történő torziós oszcilláló mozgása alapján becsüljük meg a Föld mágneses terének vízszintes komponensének B_e értékét, lásd a 3. ábrát és a 3. ábra feletti összeszerelési utasításokat. A mágnest tartalmazó foglalatra (f3) két forgatónyomaték hat a függőleges tengely körül:

- a huzal forgatónyomatéka, amelyet a következőképpen modellezünk: $\Gamma_f = -\frac{C_f}{L}(\theta - \theta_0)$, ahol C_f állandó, L a huzal két rögzítés közötti teljes hossza, a θ_0 szög pedig a huzal csavaródásmentes állapotához tartozó szög.
- a Föld mágneses terének forgatónyomatéka, amely a $\Gamma_e = -m_m B_e \sin(\theta - \theta_e)$ formulával adható meg, ahol θ_e a földi mágneses mező szöge.

Jelölje J a foglalat és a benne levő mágnes függőleges tengelyre vonatkoztatott, ismeretlen tehetetlenségi momentumát! A forgómozgás alaptörvénye szerint:

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = \Gamma_f + \Gamma_e = -\frac{C_f}{L}(\theta - \theta_0) - m_m B_e \sin(\theta - \theta_e). \quad (4)$$

Ha a $\sin(\theta - \theta_e) \approx \theta - \theta_e$ közelítés érvényes, akkor ez egy szinuszos rezgéshez vezet, amelynek periódusa T . Ebben a feladatban a ragasztópaszta (I) tetszőleges méretben és formában hozzátapasztatható a lengő részhez.

Vigyázat! A külső mágneses mezők okozta zavarok elkerülése érdekében a mágnest legalább 20 cm távolságra kell elhelyezni bármilyen fémtárgytól vagy mágnestől.

Kísérleti elrendezés és első mérés

A B.1-B.5. kérdéseknél a torziós szál hosszát állítsd $L = 34 \text{ cm}$ -re, és győződj meg róla, hogy nincs elcsavarodva. Ebben a beállításban azzal a feltételezéssel élünk, hogy a huzal forgatónyomatéka elhanyagolható a Föld mágneses teréből származó nyomatékhöz képest, erre a hipotézisre később még visszatérünk.

A θ_0 és a θ_e összehangolásához az (f2a) tárcsával állítsd be θ_0 -t úgy, hogy a foglalat (f3) ne forogjon el, amikor a mágnest eltávolítod. Ezután helyezd vissza a mágnest a foglalatba, és tartsd változatlanul a θ_0 szöveget a B.5. kérdésig.

B.1 Javasolj kísérleti módszert a B_e meghatározására! Mutasd be a különböző mérendő mennyiségeket és azok mértékegységeit! Készíts az elrendezésről vázlatos rajzot, és vezess le egyenleteket, amelyek összekapcsolják a mérendő mennyiségeket a korábban bevezetett mennyiségekkel! Minden egyes mennyiség esetén add meg a jegyzőkönyvben, hogy az állandó (F) vagy változó (V)!

0.3pt

B.2 A fent leírt módszer segítségével vegyél fel egy alkalmas grafikont, és határozd meg B_e értékét (első érték) és ennek hibáját!

1.1pt

A torziós szál forgatónyomatéka

B.3 A $L = 34 \text{ cm}$ megtartásával vizsgál meg a mágnes nélküli lengő rész mozgását, és határozd meg a C_f értékét és mérési hibáját! Két különböző elrendezésben végezz egy-egy periódusidő mérést! Add meg a C_f és a mért mennyiségek közötti összefüggés egyenletét!

0.7pt

- B.4** A korábbi eredményeid felhasználásával határozd meg analitikusan és numerikusan is azt az L_c kritikus szálhosszt, amely mellett az Γ_f és Γ_e forgatónyomatékokban szereplő C_f/L és $m_m B_e$ amplitúdók egyenlők. A B.2 kérdésben mekkora volt a $(C_f/L)/(m_m B_e)$ arány? Az eredményt a következő intervallumok közül válaszd ki: [0 %, 1 %] ; [1 %, 5 %] ; [5 %, 20 %] ; [20 %, 50 %] ; [50 %, ∞ %] . (Mindegyik intervallum balról zárt, jobbról nyílt.) 0.3pt

Statikus tartomány mérése

Most a Föld mágneses terének statikus mérésére teszünk javaslatot. Helyezd vissza a mágnest a foglalatba! A 3. ábrán látható (f2a) tárcsa segítségével módosítsd a θ_0 szöget; ennek hatására a huzal elcsavarodik.

- B.5** Még mindig a $L = 34\text{ cm}$ rögzített hosszánál megfelelő grafikonon ábrázold, hogy a mágnes θ_{eq} egyensúlyi helyzete hogyan függ a θ_0 szögtől, és határozd meg a B_e értékét és ennek mérési hibáját (második érték)! 1.1pt
- B.6** Változtasd a torziós szál L hosszát, és ismételd meg az előző vizsgálatot két másik hosszra, így ellenőrizve a huzal nyomatékának L függését. Az összes függőséget összefoglaló végső grafikon segítségével határozd meg a B_e új értékét, annak bizonytalanságával együtt. 2.3pt