

A fizikai kísérletezés műhelytitkaiból ¹

Pontosabban nem is titkokról, hanem a fizika egy izgalmas módszeréről lesz szó. A módszer neve *kísérlet*.

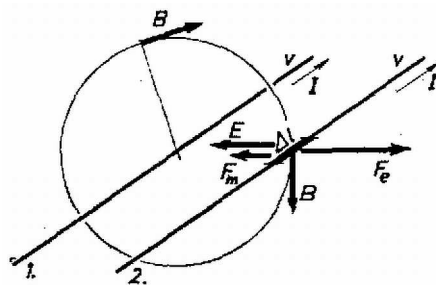
Érdekel egy téma, mérési feladatot kaptam, miként fogjak bele? Először ízelegetni, próbálgatni, majd nem vaktában mérgetni kell. Ezzel bizonyára kiszűrjük a legrosszabb, legkevésbé használható megoldásokat, megszerezzük azt a minimális gyakorlatot és reflexeket, amelyeket az adott téma megkövetel. Ezután következik a feladat átfogalmazása a kísérlet nyelvére. Jó példa erre a Coulomb-féle erőtvény. Elgondolni is szörnyű azt az adathalmazt, amely ezt a háromváltozós függvényt eredeti alakjában igazolná. Mélni kellene a két töltés nagyságát, a köztük levő távolságot és az erőt. Az elsőt és az utolsót sehogyan sem tudjuk megnyugtatóan megoldani a távolság mérésére ellenben igen pontos módszereink vannak. Teljesen meddő minden igyekezetünk a távolság mérésénél, hisz az eredmény pontosságát lerontja a két kellemetlen mennyiség hibája. E tanulságot ne felejtjük el, erre még visszatérünk. Közelebb jutunk a megoldáshoz, ha a törvény olyan feltételei és következményei után kutatunk, melyek egyszerűen és pontosan meghatározhatók, elszigetelhetők a zavaró jelenségektől. Ha a méréssel cáfolni akarunk, akkor nyilván szükséges következményeket keresünk és ezek mérés útján történő cáfolásával elvetjük az állítást. Ha igazolni kívánunk, akkor természetesen az elégséges feltételeket igyekszünk diadalra juttatni.

Lássuk tehát a Coulomb-törvényt a mérés számára átfogalmazott alakjában: egy feltöltött üreges fémtest belső üregében nem szabad villamos térerősséget észlelnünk. (Az igazolást lásd pl.: R. P. Feynman: Mai fizika. 5. kötet 57.8 és 57.10 szakaszok.) Ez ragyogó, hiszen ha Coulomb egy kicsit is téved, akkor egyszerűen leleplezhetjük. Akár néhány százezer voltra is feltölthető egy megfelelően nagy üreges fémgömb, a belsejében levő elektroszkóp mégsem jelez kitérést. Mivel ez a jelenség akkor és csakis akkor következhet be, ha az erőtvényben a távolság kitevője kettő, a kísérletek negatív eredménye igazolja Coulomb feltevését.

A fenti módszert *nullindikációnak* nevezik. A fizikában mindmáig az ilyen típusú eljárások adták a legbiztosabb eredményt. Így pontosabb méréseket végezhetünk, mint amennyire pontosan meg tudjuk határozni a mértékegységeinket. Csak arról kell meggyőződnünk, hogy van-e hatás vagy nincsen, és ez független a mértékegység meghatározásától. A Coulomb-törvényben ma 10^{-9} nagyságrendű pontossággal bízhatunk.

Az átfogalmazott alakú törvénynek lehetőleg minél kevesebb előre beláthatatlan zavaró körülménytől kell függenie. A mérés tulajdonképpen ezeknek a zavaró körülményeknek az elhárításából áll. A jelenségeket általában nem mi hozzuk a világra, csak azon fáradozunk, hogy minél többet észrevegyünk belőlük. Zavaró jelenség lehet a hőmérséklet-ingadozás, a fény vagy egy közelben levő vasdarab, és egyáltalán minden, amit nem a mért értékek közt tartunk számon. Gyakran a zavaró jelenségeket is mérjük, ezek hatását kiszámítva korrigálhatjuk az eredményt. Gyakran csak megbecsüljük a beláthatatlan zavarok hatását.

Néha egy-egy effektus meglepően sterilen áll rendelkezésünkre. Ilyen például a két vezető közti mágneses hatás.



A vezetőkben mozgó töltések közt a mágneses erőn kívül működni kell az elektrosztatikus hatásnak is. Ha mindkét vezető elsőfajú: ez a hatás taszítás lesz. Kimutatjuk, hogy a taszítás nemcsak kiegyenlíti az egyirányú áramok vonzását, hanem lényegesen túlnövi azt. A következőkben azt az esetet vizsgáljuk, amikor mindkét áram I erősségű, a vezetők párhuzamosak, keresztmetszeteik A -val egyenlők. Az 1. vezető mágneses tere r távolságban (tehát a 2. vezető helyén)

$$B = \frac{I}{2r\pi} \mu_0$$

nagyságú, és az ábrán látható irányba mutat.

A μ_0 természeti állandó a

$$\mu_0 \epsilon_0 = \frac{1}{c^2}$$

kifejezés ismeretében másként is felírható.

A 2. vezető Δl darabjára ható erő

$$F_m = Bqv = \frac{I}{2r\pi} \frac{1}{\epsilon_0 c^2} v \rho \Delta l A,$$

¹ A cikk elolvasását különösen azok figyelmébe ajánljuk, akik kísérleti pályázatainkon vesznek részt.

ahol q a Δl szakaszban levő töltés mennyisége, ρ a töltéssűrűség a vezetőben, v a töltéshordozók mozgássebessége. Ha v mindkét vezetőben azonos:

$$F_m = \frac{\rho^2 A^2 \Delta l}{2r\pi} v^2 \frac{1}{\varepsilon_0 c^2}.$$

Az igen hosszúnak tekinthető 1. vezető töltéshordozóinak villamos tere a 2. vezető helyén

$$E = \frac{A\rho}{2r\pi} \frac{1}{\varepsilon_0},$$

iránya az ábrán látható. Így a taszító erő a Δl hosszön

$$F_e = \frac{\rho^2 A^2 \Delta l}{2r\pi} \frac{1}{\varepsilon_0}$$

vagyis most már arányba állíthatók az erők:

$$\frac{F_m}{F_e} = \frac{v^2}{c^2}.$$

Ez meglepő, hisz közönséges vezetőknel ez a hányados 10^{-25} nagyságrendben mozog. Így a mágneses vonzás elenyészően kicsiny a vezetőkben mozgó elektronok közti elektromos taszító erőhöz képest. A mágneses hatást mégis észrevesszük és mérhetjük, mert a természet gondoskodik arról, hogy mindkét vezetőben pontosan egyforma számmal legyenek pozitív és negatív töltések, melyek teljesen lerontják egymás hatását. Így a két vezetőben igen nagy mennyiségű töltés van jelen sztatikailag leárnýékolva, de könnyűszerrel mozgásba hozhatóan. A mágneses erőhatás a mozgó töltés nagyságával is arányos! Így jut érvényre a mágnesség gyenge hatása. Tanuljunk a természettől: mi is *egyenlítsük ki a zavaró körülmények hatását*.

A *kompensáció* módszerét közvetlenül mérésre is felhasználhatjuk. Van egy mennyiségünk, ami alkalmatlan a direkt műszeres meghatározásra, előállítunk mesterségesen egy hasonlót, amit már mérni is tudunk, és ezután nullindikációval pontosan egyformára állítjuk a kettőt. Ekkor ez utóbbi mérésével megoldottuk a problémát. Ilyen eszközök az ellenállás mérésére használatos Wheatstone-híd, a feszültségkompenzátorok, a felhajtó erő mérésére szolgáló mérlegek, általában az egyensúlymódszerek, így mér a higanyos manométer stb.

Következő lényeges szempont a mérőeszközök összeválogatásánál *pontosságuk egymáshoz viszonyított értéke*. Az általuk alkotott rendszernek ne legyen gyenge pontja, és ne alkalmazzunk feleslegesen pontos módszereket sem. Ha a végeredményt a mért adatokból szorzás és osztás segítségével számítjuk, akkor minden paramétert a hatványkitevőjének abszolút értékével arányos pontossággal kell mérni. Így az eredmény hibájában nagyjából azonos részeket fognak kitenni a részhibák. Pl. a $P = U^2/R$ törvény kimérésekor a feszültséget 1,5 %-os pontosságú műszerrel mérve, az ellenállást és a teljesítményt elegendő 3 % toleranciával meghatározunk. Ha a vizsgált összefüggésben különbségek szerepelnek, akkor a tagok mérésére fokozott gondot kell fordítanunk abban az esetben, ha az egymásból kivont két szám lényegesen nagyobb a különbségünknel. Ekkor ugyanis könnyen előfordulhat, hogy a tagokat néhány százalékos hibával mérve, az eredmény hibája meghaladja a 100 %-ot. A műszerekre írt relatív hibák azok végkitérésére vonatkoznak, minden más mutatóállásnál ennél nagyobb hibával dolgoznak. Az abszolút hiba viszont végig állandó, tehát a végkitérésnél kiszámítható, és minden további esetben az adott kitérésre vonatkoztatva megkapjuk a tényleges relatív hibát.

Minden mérési jegyzőkönyv legalább egy eredményt kell, hogy tartalmazzon, és ez a *kísérlet hibája*. Miből tevődik össze ez a pontatlanság? Van jól meghatározható része: nevezetesen az eszközök hitelesítésénél garantált hibahatár és a jól értékelhető zavarok hatása. A részhibákból kiszámítható az eredmény hibája, ennek módját írják le pl. a következő összefüggések:

$$\begin{aligned} f &= x^a y^b, & \frac{\Delta f}{f} &= |a| \frac{|\Delta x|}{x} + |b| \frac{|\Delta y|}{y}; \\ f &= x + y + z, & \Delta f &= |\Delta x| + |\Delta y| + |\Delta z|; \\ f &= a^x, & \Delta f &= a^x (\ln a) |\Delta x|; \\ f &= a^x \log x, & \Delta f &= \frac{\Delta x}{x \ln a}. \end{aligned}$$

A másik csoportba tartoznak az alattomosabb természetű hibaforrások. Ilyenek a mérő egyén szubjektív hibái, és azok a pontatlanságok, amelyeket a zavaró körülmények egy beláthatatlan szövevénye okoz. Ezek ellen védekezhetünk a mérés megismétlésével, vagy egymástól távol végzett egyidejű kísérletekkel. Tévedés azonban azt gondolni, hogy erre mindig szükség van. Teljesen felesleges egy voltmérőt egymás után többször rákapcsolni ugyanarra a feszültségre. Nem valószínű, hogy eltérést tapasztalnánk. Annak viszont nagy jelentősége van, hogy egy növekvő feszültségsorozatot először felfelé, utóbb lefelé végigmérünk. Így a mutató hol alulról, hol pedig felülről áll be az egyensúlyi helyzetbe. Lényeges tehát, hogy a megismételt mérések alkalmával a kizárandó hibaforrások működési körülményeit is megváltoztassuk. (A mérési eredmények feldolgozására a hibák szempontjából értékes útmutatásokat olvashatunk a K. M. L. 1967. 5. szám 225–228. oldalán.)

A mérési eredményeket tartsuk tiszteletben, ne előítéleteinkhez igazítsuk azokat, hanem igyekezzünk magyarázatot adni a tapasztaltakra. Ha nem várt jelenségekre bukkanunk, akkor a kísérleti körülmények megváltoztatásával igyekezzünk behatárolni okukat. A rendszerezést, azonosítást egyszerűbbé tehetjük, ha mérési naplót vezetünk. Általában mérés közben vagy az adatok rendezgetése alatt jönnek újabb gondolatok, ne sajnáljuk ilyenkor megismételni a kísérleteket ezzel az újabb módszerrel. A kísérletezés egy permanens folyamat, amelyet mindig jobban javítva, csiszolva tökéletesíthetünk.