

TOVÁBBKÉPZÉS ANYAGA

KÖZÉPISKOLAI FIZIKATANÁROK SZAKTÁRGYI TOVÁBBKÉPZÉSE Új utak keresése és a hagyományok megőrzése a fizikatanításban

Időpont: **2018. november 16. péntek, 10⁰⁰ – 15⁰⁰ óra**
Helyszín: **PPKE Információs Technológiai és Bionikai Kar**
1083 Budapest, Práter u. 50/a, 239-es terem

SZÉCHENYI  **2020**



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Szociális
Alap



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

Juhász András
ny. egyetemi docens

Báró Eötvös Loránd nagy kísérletei

Eötvös Loránd a klasszikus fizika mestere

A XIX.-XX. század fordulója korszakváltást jelent a fizika történetében. A klasszikus fizika nagy részterületei – mechanika, elektrodinamika, fénytan, termodinamika – a jelenségek fenomenologikus leírásával elvileg lezártak tűntek. A tehetséges fiatal fizikusokat az egyes részterületeket összekapcsoló kérdések, a klasszikus fizikai törvények mögött sejthető „működési” mechanizmusok, az anyag szerkezetével kapcsolatos kérdések foglalkoztatták. Új fizikai diszciplínaként megszületett a kvantum-fizika, a relativitáselmélet, statisztikus fizika.

Eötvös Loránd – bár német egyetemeken tanulva jól ismerte a forradalmian újnak számító kísérleti eredményeket és azok értelmezésére tett elméleti erőfeszítéseket – maga megmaradt a klasszikus fizika területén. Annak ellenére, hogy az általa vizsgált fizikai problémák látszólag távol álltak az európai „fősodortól”. Eredményei nemzetközi elismerést hoztak számára. Ezt talán leginkább jelzi az, hogy a súlyos- és tehetetlen tömeg ekvivalenciáját bizonyító méréseire – mint az általános relativitáselmélet alaptételét jelentő „ekvivalencia-elv” kísérleti bizonyítékára – Einstein is hivatkozott. Eötvös méréseit azóta többen is kritikusan, a legmodernebb mérés technika alkalmazásával, időről időre megismétlik, de állításait máig sem cáfolta meg senki.

Eötvös Loránd elméletileg kiváló felkészültséggel rendelkező vérbeli kísérleti fizikus volt. Kutatásai során a kísérleti fizika klasszikus, máig érvényes alapmódszerét követte. A jelenségkör megfigyelését a lényegi kérdések megfogalmazása követte. Ezután korábbi eredmények, elméleti megfontolások, számítások segítségével határozta meg, mi az a mérés, ami lényegi válaszokat adhat kérdéseire. Az így gondosan megtervezett mérések végrehajtása során rendkívüli precizitással járt el. Többször is megismételve méréseit, az eredmények alapján példaértékű pontossággal fogalmazta meg állításait. Gondosan ügyelt arra, hogy ne abszolút kijelentéseket tegyen, hanem csak a biztos tényekről nyilatkozzon. Így például soha nem jelentette ki, a tehetetlen- és a súlyos tömeg azonosságát, csak annyit mondott, hogy mivel mérései során nem tudott kimutatni különbséget a két tömeg közt, a két mennyiség esetleges eltérése nem haladhatja meg a méréseinek pontosságát.

Eötvös Loránd elméleti felkészültsége mellett kiváló gyakorlati érzéssel rendelkezett. Kutatásainak elvi eredményei mellett figyelt azok gyakorlati hasznosításának lehetőségeire is. Felismerte és bebizonyította, hogy az általa kifejlesztett Eötvös-inga, a nyersanyag-kutatásban eredményesen felhasználható. Az Eötvös-ingával végzett mérések évtizedeken keresztül a kőolaj és gázlelőhelyek felkutatásában világviszonylatban alapvető szerepet játszottak.

Eötvös Loránd a klasszikus fizika három különböző területen ért el nemzetközileg is elismert eredményt. Ezek:

- A folyadékok felületi feszültségének hőmérsékletfüggését leíró *Eötvös-törvény*
- Gravitációs vizsgálatai során:
 - a tehetetlen és súlyos tömeg egyenértékűségét bizonyító *Eötvös-kísérlet*.
 - a gravitációs kölcsönhatás független a test anyagi minőségétől
 - *Eötvös-ingával* végzett mérések a Föld felszín alatti lokális sűrűség viszonyainak vizsgálatára
- A forgó földön mozgó testek súlyváltozásának laboratóriumi mérése (*Eötvös-effektus*)

Eötvös Loránd munkássága nemzeti örökségünk része, aminek bemutatása diákjainknak fontos feladat. Ebben természetesen a legfontosabb a kísérleti munkájának bemutatása, de szemléletformáló eredményes kutatási módszerének megismertetése is.

Nevelési szempontból lényeges, hogy az eredményes szaktudós bemutatása mellett felhívjuk a figyelmet arra, hogy Eötvös Loránd nem csak a tudománynak és magának élő „szobatudós”. Fontosnak tartja a közösség-építő munkát országos szintű feladatok vállalásán túl a tágabb és szűkebb szakmai körökön át a számára nagyon fontos családig. A vállalt közösségi munkái közül a legfontosabbak: *kultuszminiszter*, *MTA-elnök*, egyetemi rektor. Fontosnak tartja a színvonalas tanárképzést (a nagyhírű Eötvös József Kollégium megalapítója), a tanárok szakmai összefogását, továbbképzését (megalakítja a Matematikai és Fizikai Társulat-ot) a szélesebb körű tudományos ismeretterjesztést (*Természettudományi Társaság* egyik vezetője). Eötvös professzorként maga köré gyűjti a legtehetségesebb tanítványait, bevonja őket kutatásaiba (halála után ők folytatják geofizikai kutatásokat). Eötvös Loránd magánélete is példaértékű. Imponálóan őszinte és szeretetteljes a kapcsolatát apjával, Eötvös Józseffel, könyv formában kiadott levelezésük is bizonyítja. Családjára, lányai nevelésére kiemelten figyel. Eötvös sportember, kispesti házából lóháton jár be az egyetemre, lányaival együtt kerékpározik, túrázó és sziklamászó (a Dolomitokban 2837 m magas sziklacsúcs viseli nevét).

A folyadékok felületi feszültségének vizsgálata – Eötvös- törvény

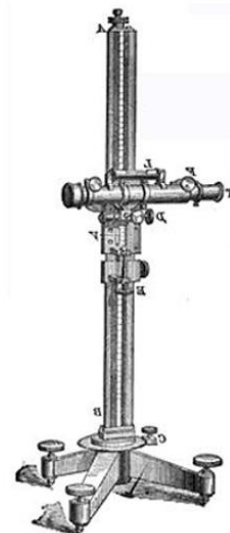
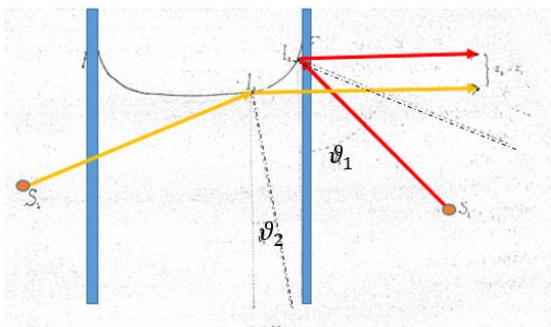
Eötvös Loránd heidelbergi tanulmányainak egyik szemeszterét a Königsbergi egyetemen, vendéghallgatóként töltötte. Itt Franz Neumann elméleti előadását hallgatva ismerkedett meg a felületi feszültség problémakörével. Az elmélet felkeltette érdeklődését, de a kísérleti eredményeket nem tartotta kielégítőnek. Zavarta, hogy a felületi feszültség mért értékei nagy szórást mutattak, így pl. a közönséges víz esetén nem csupán az egyes szerzők eredményei mutattak jelentős eltérést, de ugyanabban a laborban mért eredmények is, attól függően, hogy mennyi időt állt a víz az edényben mérés előtt. Eötvös, Neumann biztatására egy új módszert kidolgozásába fogott a mérések pontosságának javítására. Neumann megdicsérte az ötletet, de a módszer kipróbálására ott már nem volt idő. Miután Eötvös Loránd a doktori címet megszerezve hazatért, a pesti egyetemen folytatta a kapillaritás Königsbergben megkezdett vizsgálatát. Két alapvető kérdésre kívánt választ adni:

- *Valóban anyagi állandónak tekinthető-e a felületi feszültség? Mi az okozza a szakirodalomban található mérési eredmények nagy szórását?*

- *A folyadékok felületi viselkedése milyen kapcsolatban van a folyadékok molekuláris szerkezetével?*

Königsbergi ötlete a felületi feszültség mérésére vonatkozóan azon a feltevésen alapult, hogy egy adott folyadék esetén a felületi feszültség állandó érték. E feltevésből kiindulva értelmezni lehetett azt a köznapi megfigyelést, hogy az edény falát nedvesítő folyadékok a fal közelében megemelkednek. A falaktól távol a folyadék felszíne vízszintes sík, a falhoz közel a felszín görbült. A görbület geometriája a fal geometriájától és a folyadék felületi feszültségtől függ. Függőleges, sík üvegfalak esetén a falnál felemelkedő folyadék felszíne (meniszkusz) hengerfelületet alkot. Kör keresztmetszetű edényben a meniszkusz gömbfelület. Eötvös abból indult ki, hogy a meniszkusz felületi görbületét mérve a felületi feszültség kiszámítható.

Eötvös a folyadék-felület görbületének mérésre optikai módszert dolgozott ki. Az eljárás lényege, hogy a meniszkusz két pontjának, a sík folyadékfelszínhez viszonyított, eltérő magasságát nagy pontossággal méri. A meniszkusz felületi görbülete, és ebből a felületi feszültség értéke a mért magasságkülönbségből, a tartóedény geometriáját figyelembe véve meghatározható. Az ötlet mérési elrendezését a mellékelt ábra mutatja.



A keresztmetszeti rajz a tartóedény falaira felhúzó folyadék görbült meniszkusz-felületét mutatja. Legegyszerűbb esetben az edény falai függőleges síkok. Ekkor a görbült meniszkusz vízszintes alkotójú hengerfelület, amire felírható az

$$z = C\sqrt{2} \cdot \sin \frac{\vartheta}{2}$$

összefüggés, ahol z jelenti a görbült hengerfelület egy pontjának a falaktól távoli vízszintes síkú folyadékfelszíntől számított függőleges magasságát, ϑ a kiválasztott ponthoz tartozó felületi normális szögét a függőlegessel, C pedig az Eötvös által kapilláris állandónak nevezett faktor (dimenziója $1/\text{hosszúság}$), ami az α felületi feszültség, a folyadék ρ sűrűsége és a g nehézségi gyorsulással adható meg:

$$C = \sqrt{\frac{2\alpha}{\rho g}}$$

Méréstechnikai megfontolásból Eötvös nem a fenti egyenletben szereplő z értékét határozta meg, hanem ezzel egyenértékű, de technikailag egyszerűbben megvalósítható módon a meniszkusz két különböző pontjának magasságkülönbségét mérte. Ehhez a két pontra két keskeny fénynyalábot irányított úgy, hogy a folyadék görbült határfelületéről visszaverődő két nyaláb vízszintesen haladjon tovább. A visszaverődő sugarakkal szembe katetométert állított, amivel megmérte a műszer távcsövében látható két fénycsík magasságkülönbségét (a fényfoltok katetométerrel mért távolsága megegyezik a tükrözési pontok $z_1 - z_2$ magasságkülönbségével). Eötvös fényforrásként két vízszintesen elhelyezett, jól megvilágított rést használt, és meniszkuszra beeső fénynyalábok irányát ϑ_1 és ϑ_2 – a függőlegeshez viszonyítva mérte.) A mérés alapegyenletei így a következően módosulnak:

$$C = \frac{z_2 - z_1}{\sqrt{2}(\sin \frac{\vartheta_2}{2} - \sin \frac{\vartheta_1}{2})} \quad C^2 = \frac{2\alpha}{s \cdot g}$$

Innen az α felületi feszültséget kifejezve kapuk:

$$\alpha = C^2 s \cdot g = \left(\frac{z_2 - z_1}{\sqrt{2}(\sin \frac{\vartheta_2}{2} - \sin \frac{\vartheta_1}{2})} \right)^2 \cdot \rho \cdot g$$

Az ellenőrző mérések igazolták a módszer használhatóságát. Közben észrevették, hogy a mérések pontosan reprodukálódhatnak, ha a folyadék feletti gőztér zárt. Ezzel megoldódott a korábbi mérések eredményekben tapasztalt nagy eltérések problémája is. A felületi feszültség korábban mért értékeinek változása nem a tiszta folyadék felületi feszültség változásával magyarázandó, hanem a szabadon álló folyadék felületének szennyeződésével. Ha ezt a lehetőséget az edény leforrasztásával kizárjuk, a mérések évek múlva is jól reprodukálhatók. Eötvös a továbbiakban mindig gondosan leforrasztott edényben lévő folyadékokkal dolgozott. A felületi feszültség mérésének új reflexiós módszerét Eötvös Loránd 1876-ban publikálta az épp akkor induló *Műegyetemi Lapok* első számában.

Az első kísérleti sikerek után Eötvös különböző folyadékmintákat vizsgált úgy hogy valamennyit kb. 2 cm átmérőjű üvegsövekbe öntötte, majd a levegőt leszívta a kapszulákat leforrasztotta. Így biztosította az anyagok tisztaságát (minden folyadék csak saját gőzével állt kapcsolatban). A leforrasztott minták használata lehetővé tette azt is, hogy a lezárt kapszulákat melegítve a felületi feszültség hőmérsékletfüggését is vizsgálja. Ezzel új kérdéskörrel bővült a fiatal professzor kutatási területe.

A különböző folyadékok felületi feszültségének hőmérsékletfüggésére vonatkozó mérési eredményekben csak az volt közös, hogy valamennyi folyadék esetén a csökkent a felületi feszültség értéke a hőmérséklet növekedésével. Ez az eredmény azt sejtette, hogy a felületi feszültség hőmérsékletfüggése nem anyagspecifikus jelenség, hanem a folyadék-állapot általános jellemzője. Eötvös bízott benne, hogy alkalmas normáló faktor segítségével az egyes

folyadékok felületi feszültségének hőmérsékletfüggését leíró különböző paramétereket tartalmazó empirikus formulák, anyagi minőségtől függetlenné tehetők. Eötvös célja az volt, hogy megtalálja a folyadékok felületi feszültségének hőmérsékletfüggésére vonatkozó univerzális összefüggést.

Eötvös Loránd gondolatmenetének lényege, hogy az anyagi minőségre jellemző makroszkópikus fizikai mennyiségeknek molekuláris értelmezést kell adnunk, hogy a különböző anyagokra érvényes általános eredményekre jussunk. A felületi feszültség makroszkópikus fogalma helyett vezessük be a *molekuláris felületi energia* fogalmát! A *molekuláris felületi energia mértéke az a munka, amit végezzük, ha egy molekulát a folyadék belsejéből a szabad felszínre viszünk, azaz a folyadék-gőz határfelületet egy molekula által elfoglalt területtel növeljük*. A molekuláris felületi energia az $\alpha(T)$ felületi feszültség és egy molekula által elfoglalt terület ($v^{2/3}$ – ahol v az egy molekulára eső térfogat a T hőmérsékletű folyadékban) szorzataként fejezhető ki:

$$W = \alpha v^{2/3}.$$

Ha a folyadékok molekuláris állapota hasonló, molekulák közti erők és a hőmérsékleti hatások is hasonlóak, úgy várható, hogy a molekuláris felületi energia hőmérsékletfüggése a különböző folyadékok esetén azonos. Eötvös Loránd e következtetés igazságának ellenőrzésére a molekuláris felületi energiával arányos α felületi feszültségek hőmérsékleti koefficiensét mérte és hasonlította össze. A kísérleti eredmények igazolták Eötvös várakozását!

A folyadékok felületi feszültségének hőmérsékletfüggésére általánosan érvényű megállapítást a felfedező Eötvös Lorándról elnevezett ún.. Eötvös-törvény fogalmazza meg, Eszerint *a legkülönbözőbb folyadékok (pl. éter, alkohol, benzol, kloroform, stb.) esetén az 1 K foknyi hőmérsékletváltozás hatására a folyadékok molekuláris felületi energiája egyformán*

$$E = 2,1 \cdot 10^{-7} \text{ Jole/Kmol}^{2/3}$$

értékkel változik meg. Ez az érték sem az anyagi minőségtől sem a hőmérséklet konkrét értékétől nem függ, így E univerzális állandónak tekinthető energiaérték, neve. „Eötvös-állandó”

Az Eötvös-törvény matematikai megfogalmazása a következő:

$$\frac{d}{dt}(\alpha v^{2/3}) = E = 2,1 \cdot 10^{-7} \text{ Jole/Kmol}^{2/3} \quad (1)$$

illetve adott anyagra vonatkoztatva:

$$\alpha v^{2/3} = E(T_{kr} - T), \quad (2)$$

ahol a mérés hőmérséklet T , az anyag kritikus hőmérséklete (ahol a határfelület a telített gőz és a folyadék közt eltűnik, azaz $\alpha=0$).

A törvény érvényességi körét Eötvös Loránd világosan megadta: Olyan anyagok esetén érvényes, ahol a folyadék- és a gőzfázis molekuláris egysége azonos. Ezeket Eötvös „egyszerű folyadékoknak” nevezte. A közönséges víz pl. nem egyszerű folyadék, amire a törvény a fenti alakban nem érvényes. Ennek az oka az, hogy a folyékony vízben a H_2O egységek H-híd kötésekkel összekapcsolódva ún. „asszociátumokat” képeznek. Az asszociátumok mérete a víz hőmérsékletével változik. A cseppfolyós vízben ezek az asszociátumok tekinthetők molekuláris

szerkezeti egységeknek, A gőzben a molekulák közt nincsenek H-híd kötések, ott a kémiai képlettel megadott H₂O atomcsoport jelenti a molekuláris egységet.

A felületi feszültségre vonatkozó kutatásainak eredményeit Eötvös 1886-ban az *Annalen der Physik und Chemie* c. német szakfolyóiratban publikálta.

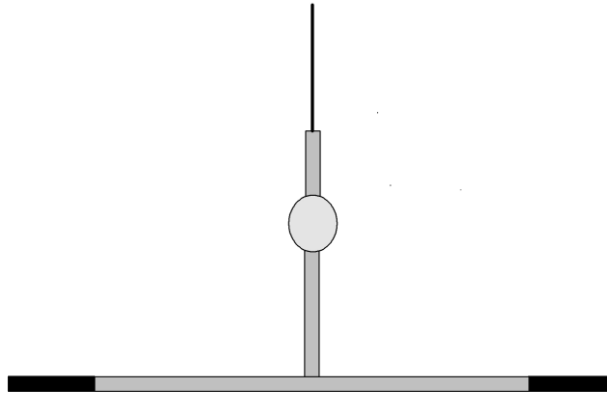
Megjegyzés:

Ramsay angol kémikus néhány évvel Eötvös mérései után (1893) szintén végzett hasonló méréseket, hasonló lényegi eredménnyel. A törvényt így az angolszász szakirodalomban – némi elfogultsággal – Ramsay - Eötvös-féle törvénynek nevezik.

Eötvös Loránd gravitációs mérései

Méréstechnikai alapok, görbületi variométer

Eötvös Loránd tudományos munkásságának középpontjában 1886-tól közel négy évtizeden át a gravitáció vizsgálata állt. Kísérleteit az igen kis erőhatások mérésére alkalmas torziós ingákkal végezte. Első kísérleti műszere az ún. „görbületi variométer” konstrukciója hasonló a korábban Coulomb, majd Cavendish által is használt torzós ingához. Eötvös egyrészt kisebb módosításokat végzett a műszeren, és ezzel annak érzékenységét növelte, másrészt a mérési eljárást gyorsította és egyszerűsítette. Torziós szálként kb. 60 cm hosszú, mindössze 0,04 mm vastag platinaszálat használt, amit gondos előkezeléssel (mérsékelt nyújtással és melegítéssel) minden belső feszültségtől mentessé tett. A felső végénél felfüggesztett szál aljára, arra merőlegesen és szimmetrikusan, kb. 40 cm hosszú, könnyű alumínium pálcát erősített. A pálca két végére két egyformán 30-30 g tömegű platina hengert rögzített. Az érzékeny torziós szál már igen kis erők hatására is elcsavarodott és forgási lengésbe jött. Hogy az inga egyensúlyát illetve lengéseit a lehető legkisebb hatás se zavarja, az egész ingát 3-5 mm vastag sárgarézről készült dupla falú házba helyezte el. Ez a burkolat kizárta a külső levegőáramlást és védte az ingát a gyors hőmérsékletingadozásoktól is. Az inga működése azon alapul, hogy külső gravitációs hatásra a vízszintes inga-rúd a házban elfordul és lengésbe jön. Az elmozdulást a burkolaton elhelyezett ablakon keresztül egy kistükör segítségével lehetett megfigyelni. A tükröt a torziós szál aljához rögzítették úgy, hogy az inga burkolatán kialakított ablakkal szemben legyen, és kívülről keskeny fénynyalábot irányítottak rá. A tükrőről a visszaverődő fény az ablakon át a műszer burkolatához erősített skálára esett, amit távolabbról távcsövön keresztül lehetett leolvasni. A fénymutató az inga elfordulását kétszeresére nagyítva mutatta. A fényfolt elmozdulást a skálán az ingától távolabbról, távcsövön keresztül mérték. A leírt torziós ingával végzett mérésekből Eötvös a gravitációs potenciál lokális görbületi változását tudta meghatározni, ezért a műszert „görbületi variométernek” nevezte.

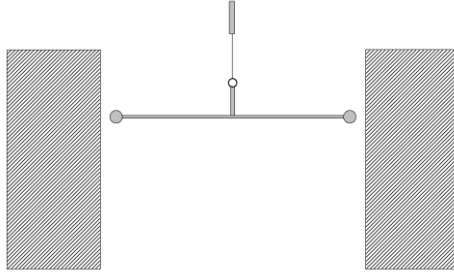


A görbületi variométer szerkezeti rajza

(Cavendish közel 100 évvel Eötvös előtt úgy határozta meg a tömegvonzási törvényben szereplő a gravitációs állandó értékét, hogy az inga egyensúlyi helyzetének szögelfordulását mérte. Egy-egy mérés ezért hosszú időt vett igénybe.) Eötvös Loránd méréseinek kiértékelésére fontos mérés technikai újítást vezetett be. A torziósszál egyensúlyi szög-elcsavarodásának mérése helyett ún. „dinamikus módszert” alkalmazott. Nem várta ki az lengő inga új egyensúlyának beálltát, hanem az ingalengések periódusidejét mérte, és ennek alapján számolva értékelte ki a mérést. A dinamikus módszer a jóval gyorsabbnak és pontosabbnak bizonyult a korábbi módszernél.

Később Eötvös tovább fokozta laboratóriumi gravitációs méréseinek pontosságát. Ez azon a felismerésén alapult, hogy az inga lengésideje változtatható, ha a mérésben szereplő testeken túl, más tömegeket is elhelyez az inga közelében. Alkalmos elhelyezés esetén e segédtömegek nem befolyásolják az inga egyensúlyi helyzetét, de ha az inga már kifordult egyensúlyi helyzetéből gravitációs hatásukkal már nyomatékot fejtenek ki az ingára. Ha a segédtömegek gravitációs nyomatéka ellentétes a torziós szál visszatérítő nyomatékával, az inga lengésideje és érzékenysége megnő (gravitációs kompenzációs módszer). Ha segédtömegek nyomatéka fordított értelmű, a lengéside csökken. A hatás tehát a segédtömegek elhelyezésétől függ. Ha az említett két esetben megmérjük a lengésidek különbségét, a számításból a segédtömegek kiesnek és a vizsgált gravitációs hatás a korábbi méréseknél jóval pontosabban meghatározható.

Eötvös elméleti számításokat végezve becsléseket végzett a segédtömegek hatására vonatkozóan, majd az eredményeket laboratóriumi mérésekkel ellenőrizte. Ellenőrző kísérletét publikálta is. Leírása szerint az ingát az ábra szerinti összeállításban helyezte el két ólomtéglából rakott oszlop közé. (az oszlopok keresztmetszete 30x30 cm alapterületűek és 60 cm magasak voltak)



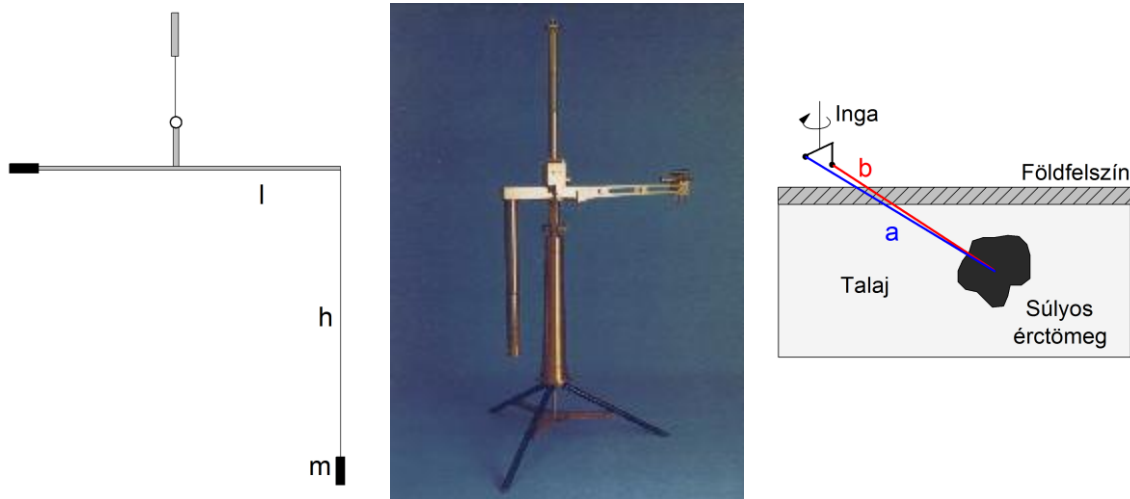
A kísérlethez Eötvös a klasszikus Coulomb-féle szimmetrikus elrendezésű ingát (görbületi variométert) használta. Az ólomtömbök között elhelyezett ingával két különböző helyzetből indítva végzett mérést. Az első esetben az inga egyensúlyi helyzete az ábra szerint a papír síkjával párhuzamos volt. Egyensúlyi helyzetben az ólomtömbök gravitációs hatása közömbösítette egymást. Ha az inga valamely irányban kitérül, a keresztrúd, rajta a két platina-tömeeggel kifordult az egyensúlyi helyzet síkjából, így az ólomtömbök vonzása visszatérítő erőpárként hat, ami forgató hatásával az ingát a kiinduló (egyensúlyi) helyzetbe igyekszik visszahúzni. A segédtömegek gravitációs hatása olyan, mintha a torziós szál direkcója megnőne. Az inga lengésideje ezáltal csökken. Ha az ingát az előbbi helyzethez képest 90 fokkal elfordítva - a fenti rajz papír-síkjára merőlegesen - helyezzük az ólomtömbök közé, a kezdeti egyensúly változatlanul fennmarad. Az ingát kitérítve az oszlopok gravitációs vonzása most is nyomatékot fejt ki a keresztrúdra, a nyomaték azonban az előző esettől eltérően nem az egyensúlyi helyzetébe húzza vissza az ingát, hanem ellenkezően. A segédtömegek gravitációs hatása tehát csökkenti az elcsavart torziós szál visszatérítő hatását. A torziós inga mért lengésideje így megnő. Eötvös a leírt laborkísérlet során rövidebb lengésideire $T_1 = 641$ mp-et, a hosszabbra $T_2 = 860$ mp –et mért. A két lengésideő különbsége jelentős ($\Delta T = 219$ mp) Ebből a szabadon álló inga lengésideje meghatározható. A számítások és az eredményt megerősítő labormérések kettős tanulsággal szolgáltak, egyrészt igazolták, hogy az inga lengéseire a környezetében lévő tömegek hatása számottevő lehet. (Ez a magyarázata, hogy a mérések során az inga mozgását jelző fénymutató állását messziről távcsővel követék, hiszen a műszer mellett ülő ember tömege befolyásolja a mérés eredményét.) A laborkísérlet másik fontos eredménye az, hogy megmutatta, hogy alkalmasan elhelyezett megfelelő nagyságú segédtömegekkel az ingás mérések érzékenysége nagymértékben növelhető. (A torziós szál visszatérítő nyomatékát gyengítő segédtömegek hatása úgy tekinthetjük, hogy a torziós szál effektív direkciónyomatékát csökkentették.

A laborkísérlet után Eötvös és munkatársai számos méréssel bizonyították a módszer gyakorlati használhatóságát is. Leírnak például egy mérést, ahol az Akadémia pincéjében elhelyezett és kompenzációval érzékenyített ingával kimutatható volt, hogy a közeli rakparton hajó kötött ki, vagy egy másik kompenzációval végzett mérés során elfogadható pontossággal meghatározták a műszertől 3 m távolságra leültetett ember tömegét.

Eötvös mintegy három évtizeden keresztül végzett gravitációs kísérleteket, méréseket. Laboratóriumi méréseit, amelyek esetén különös gondot fordított a pontosságra gravitációs kompenzációval érzékenyített módszerrel végezte.

Horizontális variométer – közismert nevén: Eötvös-inga

A korai sikeres kísérletek után Eötvös Loránd kis módosítással alkalmassá tette az ingát a földfelszín alatti lokális sűrűség-inhomogenitásainak mérésére. A módosítás abban állt, hogy a torziós inga kereszttrúdjának az egyik végéről levette a tömeget és egy kb. 1 m hosszú szálon lefogtatva rögzítette újból a rúd végére. Így az inga két tömege közt kb. 1 m szintkülönbség állt elő. Ezt az eszközt szokás általában „Eötvös-inga” -ként emlegetni. Maga Eötvös „horizontális variométernek” nevezi a műszert, ezzel utalva arra, hogy a lokális gravitációs erő vízszintes komponensének változásait lehet vele meghatározni.



Horizontális variométer fotó szerkezeti rajz, működési elv (Forrás: http://hu.wikipedia.org/wiki/F%C3%A1jl:Eotvos_inga.jpg)

Működésének magyarázata a következő: ha az inga helyének közelében a felszín alatt inhomogén a sűrűségeloszlás (pl. a felszín alatt egyenetlen eloszlásban nagy sűrűségű kőzetek, érc, vagy éppen kis sűrűségű földgázzal telt üreges helyek helyezkednek el), az 1 m szintkülönbséggel elhelyezett két ingatestre ható gravitációs erő (iránya és nagysága) különböző, ami elcsavarja a torziós szálat.

Érdeemes megjegyezni, hogy Eötvös torziós ingáit Budapestre települt német mechanikus mester, Süss Nándor készítette, ma is megcsodálható szakértelemmel és precizitással. (Süss Nándor alapította a később precíziós műszereiről híressé vált MOM (Magyar Optikai Művek) magyar nagyvállalatot.) Eötvös Loránd a fent bemutatott alaptípusokat folyamatosan fejlesztette, így kisebb-nagyobb változtatásokkal több ingát is tervezett és készített. Az eredeti műszerek többsége az Eötvös Loránd Geofizikai Intézetben elhelyezett és ott látogatható Eötvös Loránd Emlékiállításon látható. Az 1900-ban a párizsi Világkiállításon bemutatott, és aranyéremmel elismert ingát az ELTE Fizikai Intézete őrzi.

Eötvös Loránd kísérleti munkájának eredményességében fontos szerepe volt mechanikusának Süss Nándornak, aki az Eötvös elképzeléseinek megfelelő műszereket, műszaki felkészültségét és kreativitását beleadva elkészítette. Süss Nándor finommechanikai műhelyéből nőtt ki a később világhírű nagyüzem a Magyar Optikai Művek (MOM).

Eötvös Loránd mérései a súlyos és a tehetetlen tömeg azonosságának ellenőrzésére, az univerzális állandónak számító gravitációs együttható értékének pontosítására.

Eötvös Loránd torziós ingákkal végzett gravitációs méréseinek kevésbé ismert, de a tudomány szempontjából igen fontos részét azok a laboratóriumi mérések jelentik, amelyekkel a súlyos és a tehetetlen tömeg egyenértékűségét nagy pontossággal igazolta. Az égi és a földi mechanikát Newton foglalta egységbe a dinamika alapegyenletének (Newton II. törvénye) és az általános tömegvonzás törvényének megfogalmazásával. Mindkét törvényben fontos szerepe van a tömegnek. Probléma azonban, hogy míg Newton II. törvényében a tömeg a testek tehetetlenségének mértékét jellemzi, a gravitációs törvényben szereplő tömeg a testek gravitáló hatását. Newton maga is érezte, hogy a két tömegfogalom különbözik, és nem magától értetődő a feltevés, hogy egyként lehet kezelni őket. A szabadesésre vonatkozó mérések eredményét, nevezetesen, hogy légritka térben a testek súlyuktól és anyagi minőségüktől függetlenül azonos gyorsulással esnek, Newton ismerte, de a mérések pontosságát nem tartotta elég meggyőzőnek, ezért ingákkal kísérletezve maga is ellenőrző méréseket végzett. Eredményei alapján megállapította, hogy a két tömeg eltérése kisebb egy ezreléknél. 1830-ban Friedrich Bessel német természettudós, (csillagász és matematikus) megismételt inga-mérései pontosította Newton eredményét és a két tömeg egyezését már 1/60 000 –nyi pontossággal igazolta.

Eötvös Lorándot is foglalkoztatta a kétféle módon meghatározott tömeg egyezésének kísérleti bizonyítása. Méréseihez a Coulomb-féle torziós ingát használta. 1890-ben a Magyar Tudományos Akadémián tartott előadásában, és az Akadémia német nyelven megjelent közleményeiben (Mathematische und Naturwissenschaftliche Berichte aus Ungarn - 8. 65, 1890) már beszámol első kísérleteinek eredményéről, ami a két tömeg arányosságát 1/20 000 000 pontossággal bizonyította.

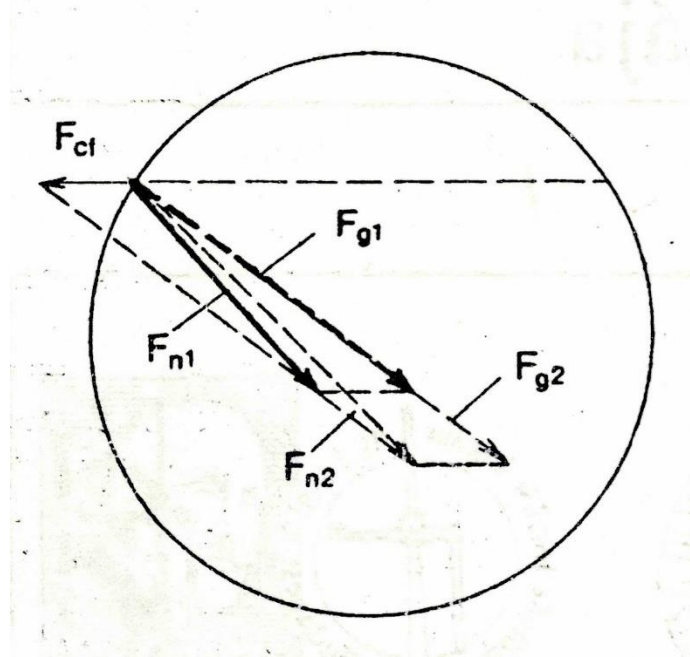
Eötvös eredményeire felfigyelt a tudományos világ, 1906-ban a Göttingeni Királyi Tudományos Társaság nemzetközi pályázatot írt ki a „tehetetlenség és a gravitáció arányosságára vonatkozó newtoni törvény széleskörű vizsgálatára”. 1906 és 1909 között Eötvös Loránd, Pekár Dezső és Fekete Jenő munkatársaival együtt igen körültekintő és alapos inga-méréseket folytatott, amiben a korábbi mérések pontosságának javítása mellett a vizsgálatokat új anyagokra is kiterjesztette, beleértve a gázokat és a radioaktív anyagokat is. A pályázatra beadott dolgozatukban a kétféle tömeg egyezését már 1/200 000 000 -es pontosságú mérésekkel bizonyítják és a gravitációs együtthatót

$$\gamma = 6.65 \cdot 10^{-11} \pm 0,02\% \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2}$$

értékben határozzák meg. Dolgozatukkal Eötvös és munkatársai elnyerték a pályadíjat.

Eötvös mérése azon alapult, hogy a testekre ható nehézségi erőt a test és a Föld közt ható gravitációs erő és a Föld forgásából adódó és a mérési hely földrajzi szélességétől függő centrifugális erő eredője adja. A centrifugális erő a test tehetetlenségével arányos, a gravitációs erő azonban ettől független hatás eredménye. A két erő eredőjeként adódó nehézségi erő változik, ha két összetevőjének bármelyike változik. Tegyük fel, hogy két azonos tömegű (tehetetlenségű), de különböző anyagú test esetén a Föld gravitációs hatása különböző!

(Newton tömegvonzási törvénye értelmében ez azt jelenti, hogy a két test esetén a „tehetetlen tömeg” és a „súlyos tömeg” különbözik.)

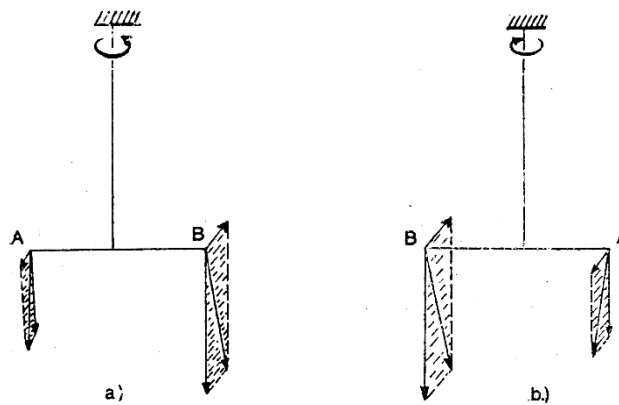


A szemléltető ábra a forgó Földhöz rögzített koordinátarendszerben mutatja, hogy miként változna a nehézségi erő iránya az É-i féltekén (pl. Budapesten) két azonos tömegű, de különböző anyagú test esetén, ha a föld gravitációs vonzása a két anyagra eltérő lenne. (Jelölések: F_{CF} – a Föld forgásából adódó centripetális erő, F_{g1} és F_{g2} két különböző anyagú testre ható azonos irányú, de különböző nagyságú gravitációs erő, F_{n1} és F_{n2} az előbbi erők eredőjeként a két testre megszerkesztett nehézségi erők.)

Newton és Bessel korábbi ingakísérletei nem tudtak kimutatni különbséget a kétféle tömeg közt. Eötvös torziós ingája azonban érzékenyebb volt az esetleges különbség kimutatására.

A torziós ingájával azt tudta vizsgálni, hogy elfordul-e az inga, ha a rúdja két azonos tömegű, de különböző anyagú testet rögzít. Ha a két anyag esetén a gravitációs hatás különbözik, az forgatónyomatékok eredményez inga keresztrúdján és elcsavarja a torziós szálát, amit könnyű kimutatni. A mérést azzal kezdte, hogy megvárta, míg az inga a két különböző anyagú tömeggel egyensúlyi helyzete kerül. Ekkor a különbözőnek feltételezett nehézségi erők forgatónyomatékát az elcsavart torziós szál direkciós nyomatéka kompenzálja. Az egyensúlyi helyzetet könnyű volt megállapítani, de az nem bizonyítható, hogy a torziós szál elfordult-e. A problémát Eötvös azzal oldotta meg, hogy az egyensúlyba került ingát, burkolatával együtt 180^0 –kal elforgatta. Ennek során a keresztrúdon lévő tömegek pozíciót cserélnek. Ha a munkahipotézis szerint a két testre ható nehézségi erők iránya és/vagy nagysága az anyagi minőségtől függ, úgy az az inga átfordítása során a testekre ható erők forgató nyomatéka ellentétes irányúra változik (ezt szemlélteti a mellékelt rajz).

A megváltozó nyomaték hatására, ha az meghaladja az inga érzékenységét, az inga kimozdul korábbi egyensúlyi állapotából. Eötvös ezt az elmozdulást figyelte.



Bár a legkülönbözőbb anyagokkal (pl. platina, Al-Mg ötvözet, réz, fa, márvány, üveg) kísérletezett soha nem tapasztalta az érzékeny torziós inga egyensúlyának változását, az inga helyzete az átfordítás után nem mozdult. A kísérleti tapasztalat tehát azt mutatta, hogy a gravitáció minden anyagra hasonló, vagy csak olyan csekély mértékben változik, amit az inga már nem tud kimutatni. Az inga érzékenységét figyelembe véve ez azt jelentette, hogy a tehetetlen és súlyos tömeg eltérése legfeljebb $\pm 1/200\,000\,000$ arányú lehet.

Eötvös méréseinek mai aktualitásai

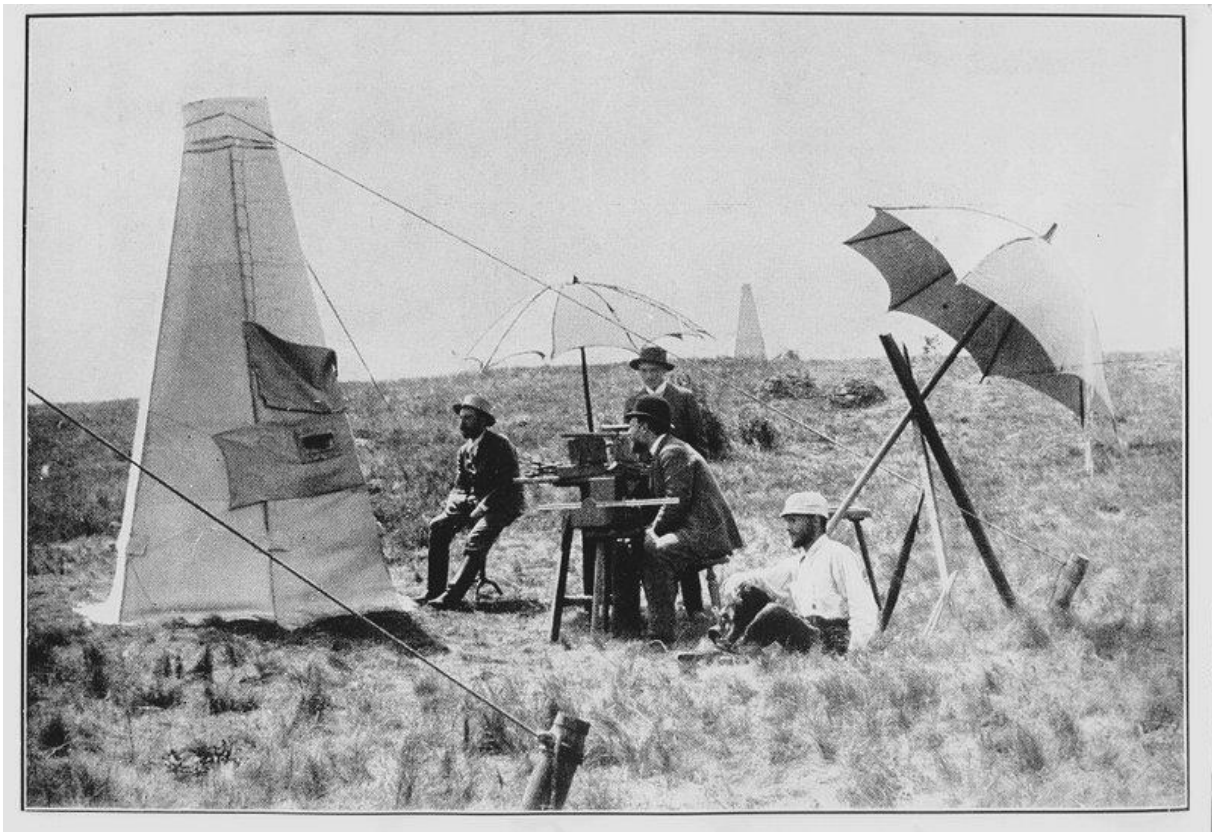
Eötvös Loránd nagy pontosságú mérései különös jelentőséget kapnak a modern fizikai világképben alapvető *általános relativitáselmélet* igazolásában. Einstein a relativitáselmélet alaptéziseként fogalmazta meg az ún. „ekvivalencia elvet”, mely szerint a gyorsuló vonatkoztatási rendszerekben a tehetetlenségi erők és a gravitációs erők közt nem tehető különbség, azaz a súlyos és a tehetetlen tömeg egyenértékű. Eötvös mérései, amint arra Einstein is hivatkozott, az ekvivalencia-elv kísérleti bizonyítékát jelentik. Eötvös méréseit azóta többen megismételték, ellenőrizték, illetve tovább pontosították. Közük a legismertebb egy amerikai kutatócsoport munkája, akik az 1960-as években R. H. Dicke vezetésével elsősorban az eredményekben kételkedve, ellenőrzésként fogtak a munkához. Kísérleteiket a legkorszerűbb mérés technikával, vákuumozott tartályban, emberi környezetű távoli mély kútban, temperált és rezgésmentes körülmények között a méréseket távolról vezényelve ismételték meg. Eredményeikről beszámoló publikációjukban (P. G. Roll, R. Krotkov, R. H. Dicke, *Annales of Physics*, New York, 26,442, 1964) igazolták Eötvös eredményeit, sőt $1/100\,000\,000\,000$ -re tovább pontosították a tehetetlen és a gravitáló tömeg arányosságának 1-től való eltérését.

Gravitációs mérések terepen

Az egyetemi laboratóriumban végzett sikeres kísérletek után a gravitációs ingakísérletek terepi kipróbálására került a sor. A fentebb leírt laboratóriumi kísérlet igazolta, hogy hatékony ingaméréseket lehet végezni különböző irányokba beállított egyensúlyi helyzetű ingákkal, kihasználva a lengésidek közti különbséget. 1888-ban Eötvös Loránd a budai Duna parton a Rudas-fürdő épületében állította fel görbületi variométerét, és végzett méréseket a Gellérthegy gravitációs hatásának, és ezen keresztül a hegy tömegének meghatározására. Először az inga

keresztrúdját a Duna folyásirányával párhuzamosan állítva mérték az inga lengésidejét, majd az ingát 90 fokkal elforgatva is. A lengésidők különbségén alapuló számításnak a Gellérthegy tömegére adott eredménye jól egyezett a más módszerekkel kapott adatokkal.

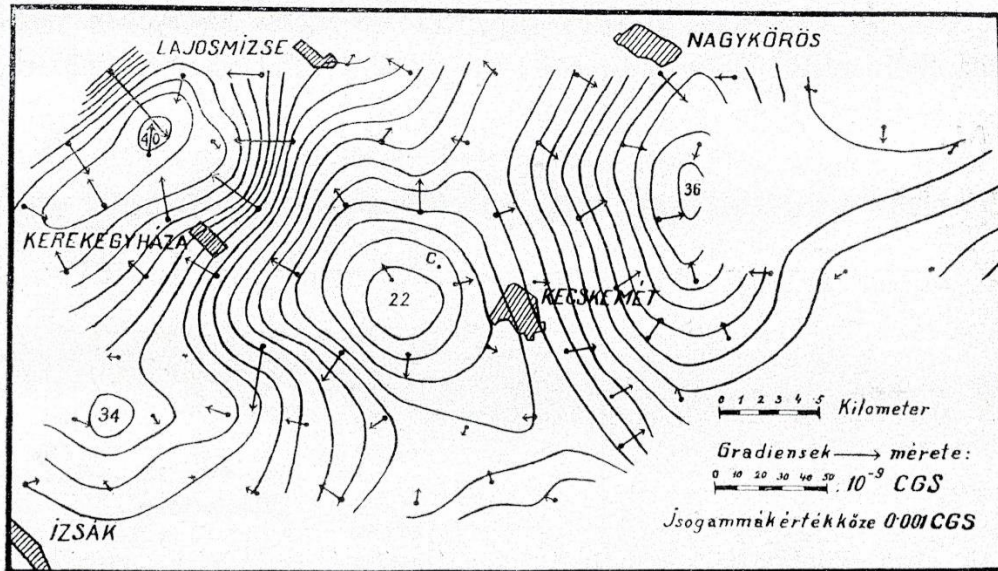
Az Eötvös-féle gravitációs mérés technika igazi jelentősége abban állt, hogy a földkéreg felszín alatti inhomogenitásairól adott információkat. A mérésekhez Eötvös és munkatársai a horizontális variométert (annak különböző változatait) használták. A hosszadalmas terepmunka első lépése a földtanilag érdekesnek mutatkozó területek kiválasztása volt, amit a hálózatszerűen elrendezett mérési pontok megtervezése követett. A terepen pontról pontra elvégezték a méréseket (ez esetenként hetekig is eltartott), majd az adatok otthoni feldolgozása következett. Eredményként a vizsgált terület egyfajta gravitációs „térképe” rajzolódott ki, amit más geológiai ismeretek és modellszámítások segítségével próbáltak értelmezni. A terepen végzett mérésekről érzékletes képet ad a korabeli fotó.



(Forrás: http://hu.wikipedia.org/wiki/E%C3%B6tv%C3%B6s_Lor%C3%A1nd_Geofizikai_Int%C3%A9zet#mediaviewer/File:SAGHEGY.JPG)

A felvétel 1891-ben a Sághegyen végzett mérésről készült. A torziós inga a környezeti hatásoktól védve a kép bal oldalán látható sátorban van elhelyezve. A sátor oldalán jól látható a nyílás, amin keresztül távcsővel lehetett észlelni az inga lengését. Az asztalon elhelyezett távcső mögött báró Eötvös Loránd ül, körülötte három munkatársa (oldalt a földön ül Kövesligethy Radó, a bal oldali széken Bodola Lajos, Eötvös mögött áll Tangl Károly).

Eötvös és munkatársai az 1900-as évek elejétől a Világháború kitöréséig, amikor az időjárás engedte gyakorlatilag folyamatos terepmunkát végeztek. 1901 és 1903 között a befagyott Balaton jegén mértek és megállapították, hogy a keleti medence hosszában egy törésvonal húzódik a tó alatt, 1909-ben Szeged és Szabadka térségéről, 1911-ben egy júliusi nagy földrengést követően Kecskemét térségéről készítettek „gravitációs térképet”. Ez utóbbi alapján megállapítható volt, hogy Kecskemét egy vulkáni hegyekkel körülvett és hordalékkal (homokkal, agyaggal, kavicsal) mindenestől vastagon betemetett medence felett épült (ábra).



Kecskemét és környéke ingamérések alapján készített „gravitációs térképe”

(A nyilak az adott pontban végzett mérésekből adódó potenciál gradienseket, a görbe vonalak az azonos gravitációs potenciálú pontok elhelyezkedését mutatják)

(Forrás: Báró Eötvös Loránd Emlékkönyv, Bp. MTA, 1930)

Történtek mérések az Alföld különböző részein, Délvidéken Erdélyben, a Dél-Ausztriai hegyekben, Horvátországban. A terepmérések nemzetközi elismerést hoztak Eötvösnek. A mérések elvi, tudományos értéke mellett egyre nagyobb érdeklődés nyilvánult meg a mérések gyakorlati alkalmazására, így alakult meg 1907-ben Eötvös Loránd vezetésével az állami fenntartású Geofizikai Intézet, (későbbi nevén Eötvös Loránd Geofizikai Intézet).

Eötvös Loránd 1919-ben bekövetkezett halála után a gravitációs vizsgálatokat tanítványai folytatták. Ez az időszak az Eötvös-inga alkalmazásának legsikeresebb korszaka, amikor világszerte erre az eszközre alapozták bizonyos ásványkincsek, leggyakrabban a kőolaj és földgáz-lelőhelyek felkutatását, részletes feltérképezését. Eötvös korábbi munkatársai Magyarország mellett Amerikától Ázsiáig végeztek kutatásokat.

Eötvös-effektus

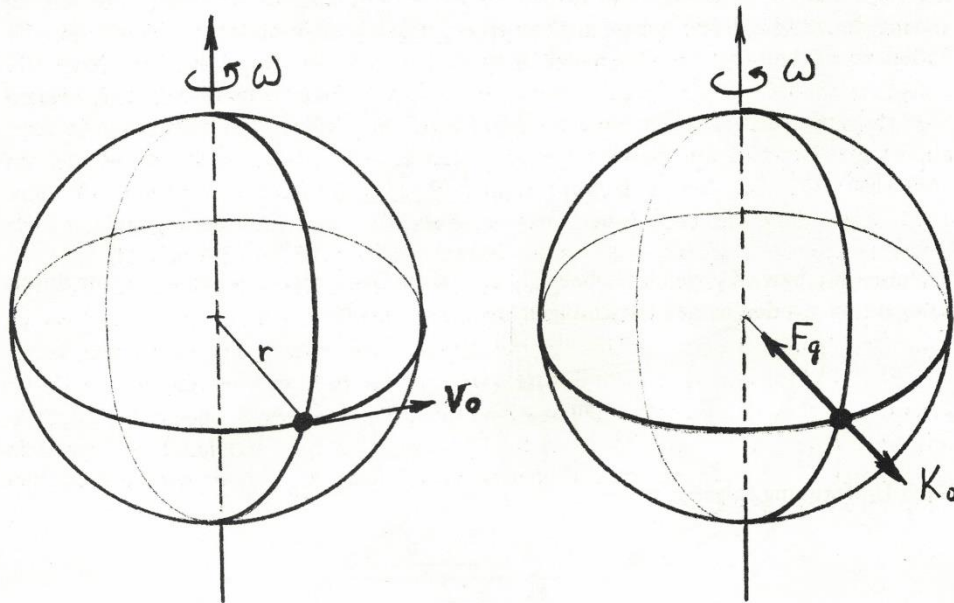
A Föld forgásának következménye, hogy a mozgó testek súlya kissé eltér a nyugvó helyzetben mérhető súlyától. Az eltérés azonban olyan csekély, hogy a mindennapi életünkben tudomást sem veszünk róla. A súlyváltozás a sebesség nagyságától és irányától, valamint a földrajzi szélességtől függ. Ha például egy test az Egyenlítőn 10 m/s sebességgel nyugat felé halad, súlya kb. 0,015%-kal nő, ha pedig kelet felé mozog, akkor ugyanennyivel csökken. Ezt a nagyon kicsi változást Eötvös Loránd 1917-ben szellemes laboratóriumi kísérlettel igazolta. A Földön mozgó testek súlyváltozási jelenségét azóta Eötvös-effektusnak nevezi a szakirodalom.

Az Eötvös-effektus megértéséhez először azt érdemes tisztázni, hogy mit nevezünk a testek súlyának. A test súlyán azt az erőt értjük, amivel a test nyomja a vízszintes alátámasztási felületet. A súly egyezményes jelölése G_0 . Tudnunk kell azt is, hogy az alátámasztó felület a hatás-ellenhatás törvénye értelmében a rajta nyugvó testet felfelé nyomja, pontosan akkora erővel, mint a test súlya. (A talaj által kifejtett nyomóerő szokásos jelölése K_0).

Nézzük meg most, hogyan mozognak a Földön nyugvó testek! A Földön nyugvó testek valóban mozognak a Földdel együtt, az állócsillagokhoz rögzített vonatkoztatási rendszerben. Mozgásuk egyenletes körmozgás. Ha a test az Egyenlítőn nyugszik, akkor egy $R=6378$ km sugarú körön éppen $v_0=465$ m/s sebességgel mozog az állócsillagokhoz képest (ábra) Newton II. törvénye értelmében egy test csak akkor végezhet egyenletes körmozgást, ha a rá ható erők vektori eredője épp a pálya középpontja (esetünkben a Föld középpontja felé mutat és nagysága :

$$F_e = m \frac{v_0^2}{R}$$

ahol m jelenti a test tömegét, R az Egyenlítő körének sugarát, v_0 a körmozgás sebességét. A példánkban szereplő testre két erő hat. Az egyik a Föld tömegvonzása (F_g - gravitációs erő) és a talaj által kifejtett K_0 a talaj által kifejtett nyomóerő. A gravitációs erőt a Föld fejti ki és függőlegesen lefelé, a Föld középpontja felé hat, a talaj nyomóereje épp ellentétes irányú, függőlegesen felfelé mutat. E két erő nagysága eltérő. A két erő különbsége biztosítja a körmozgást végző test centripetális gyorsulását.



$$F_g - K_0 = m \frac{v_0^2}{R}$$

Ha a test az Egyenlítőn v sebességgel kelet felé mozog, akkor az állócsillagokhoz viszonyítva $v = v_0 + v$ sebességű körmozgást végez, azaz sebessége v -vel meghaladja az Egyenlítőn a Föld forgásából adódó kerületi sebességet.

Hasonló okból a nyugat felé haladó test $v_0 - v$ sebességű körmozgást végez. Ezért a kelet felé haladó test centripetális erőigénye megnő, a nyugat felé mozgóé lecsökken. Mivel a testre ható F_g gravitációs erő mindkét esetben változatlan, a körmozgás biztosítására a K_0 erő változik meg, mégpedig a két esetben épp eltérő módon. A kelet felé mozgó testek esetén K_0 kicsit lecsökken, nyugat felé mozgó testek esetén megnő. A testekre ható nyomóerő, ami a test súlyának értékét határozza meg a forgó Földön mozgó testek esetén megváltozik. Az Egyenlítőn a Földhöz képest nyugalomban lévő test súlya tehát

$$K_0 = F_g - m \frac{v_0^2}{R}$$

A K-felé mozgó test súlya

$$K_K = F_g - m \frac{(v_0 + v)^2}{R}$$

A Ny-felé mozgótest súlya

$$K_{Ny} = F_g - m \frac{(v_0 - v)^2}{R}$$

A súlyváltozás nagyságát a két egyenlet kivonásával könnyen megkaphatjuk:

$$K_{Ny} - K_K = m \frac{(v_0 + v)^2}{R} - m \frac{(v_0 - v)^2}{R} = \frac{4mv_0v}{R}$$

Így például egy $m=100\text{kg}$ tömegű $v=100\text{km/h}$ sebességű test súlyváltozása az egyenlítőn, ha K irányú sebességét Ny irányúra változtatja a kb. $0,8\text{N}$. (ami 80 g tömegű test súlyának felel meg).

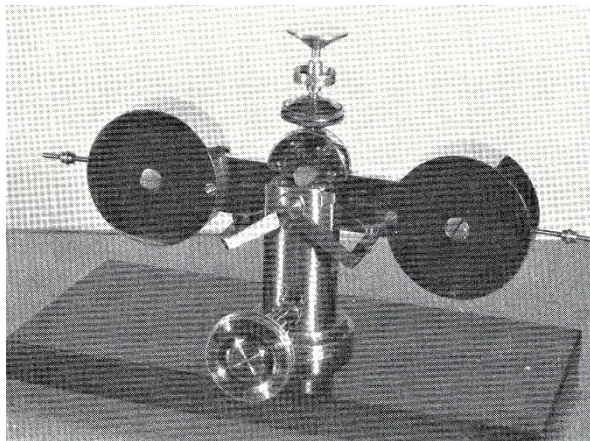
Ha számításainkat nem az Egyenlítőn történő mozgásokra vonatkoztatjuk, hanem a Föld tetszőleges φ földrajzi szélességű helyére a súlyváltozás mértéke:

$$K_{Ny} - K_K = \frac{4mv_0v}{R} \cdot \cos\varphi.$$

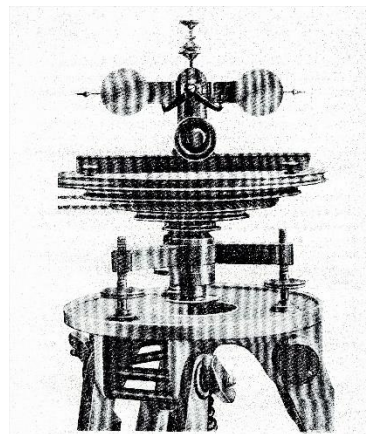
Eszerint Budapesten a példánkban szereplő test súlyváltozása kb. 55 g tömeg súlyának felel meg.

Eötvös Loránd forgó mérlege

A mozgó testek súlyváltozásának laboratóriumi kimutatására Eötvös Loránd egy speciális mérleget szerkesztett.



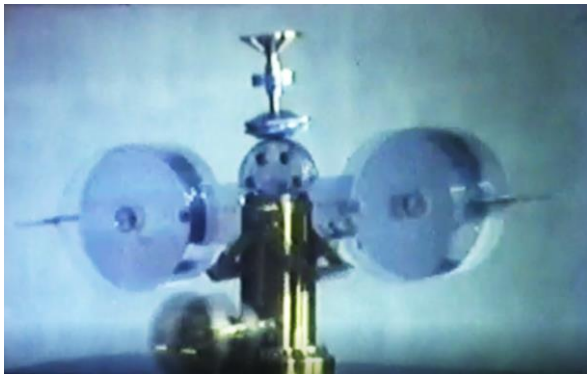
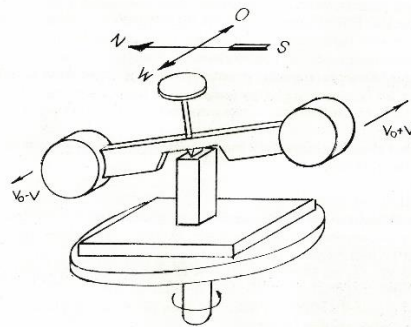
Eötvös Loránd eredeti mérlegét az Országos Műszaki Múzeum őrzi



Eötvös megoldása a mérleg forgatására

A mérleg karjaira korong alakú fém tömegeket erősített. A mérleget kiegyensúlyozta, hogy a karok vízszintesen álljanak. Az egész eszközt egy függőleges tengelyű forgatható tányérra helyezte és megforgatta. Az egyensúly megbomlott, és a mérleg forgás közben billegni kezdett. A forgó mérleg billegése az Eötvös-effektus meggyőző kísérleti bizonyítéka. A forgás közben – egy fél fordulat időtartamára – az egyik korong kelet felé, a másik nyugat felé mozog, azaz rendelkezik keleti, illetve nyugati irányú sebességkomponenssel. A kelet felé mozgó korong súlya csökken, a nyugat felé mozgóé nő. Így a mérleg kibillen

vízszintes helyzetéből, a nyugat felé haladó korong lesüllyed, a kelet felé mozgó felemelkedik. A következő félfordulat időtartamára a korongok szerepet cserélnek, ezért a súlyváltozás most ellenkezően dönti a mérleget. A folyamat minden fordulat alatt ismétlődik. Ha ezek a hatások – a fordulatszám alkalmas megválasztása esetén – abban az ütemben követik egymást, amely a mérleg természetes lengése, akkor rezonancia révén a mérlegkarok kitérése, amplitúdója növekszik. A lengés mértékének azonban határt szab a mérleg tengelysúrlódása és a levegő közegellenállása. Tökéletes rezonancia esetén megfigyelhető, hogy a mérlegkarok a vízszinteshez állandó szöggel hajló síkban forognak.



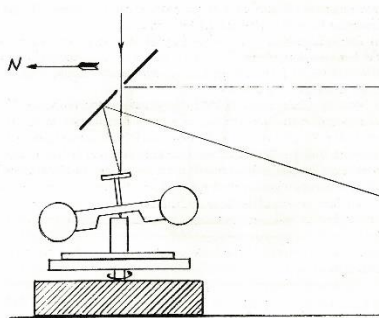
A billegve forgó mérleg két mozgásfázisa
az Eötvös-effektust bemutató filmből kiemelve

Az Eötvös-kísérlet szemléletesen igazolja a Földön mozgó testek súlyváltozását. Az Eötvös-mérleg azonban ennél többet is „tud”: ki lehet vele mérni a földforgás ω szögsebességét anélkül, hogy kilépnénk a laboratóriumból. A mérés alapja az a tény, hogy a lengő mérleg amplitúdója nem nőhet egy jellemző maximális érték fölé. Eötvös felkérésére Fröchlich Izidor, az egyetem elméleti fizika professzora számításokkal kimutatta, hogy a mérlegkarok maximális A_{\max} amplitúdóját a forgó mérleg tehetetlenségi adatai (a függőleges illetve vízszintes tengelyre vonatkoztatott tehetetlenségi nyomatéka - Θ_f, Θ_v , a φ földrajzi szélesség,

valamint a súrlódás és közegellenállás mértékére jellemző K arányossági tényező határozza meg:

$$A_{max} = \frac{2\omega \cdot \cos\varphi \cdot \Theta_f}{K \cdot \Theta_v} .$$

A fenti mennyiségek közül a tehetetlenségi nyomaték meghatározására pontos mérési módszerek álltak Eötvös rendelkezésére. A K tényező mérése azonban csak nehézkesen és pontatlanul végezhető el, továbbá a mérleg lengéseinek amplitúdója sem mérhető közvetlenül. E nehézségekre Eötvös Loránd ügyes kísérleti megoldást talált. A maximális amplitúdó mérésére ún. fénymutatót használt. A mérlegre, a forgástengely fölé vízszintes síkú tükröt szerelt és azt függőleges fénysugárral megvilágította. Ha a mérleg nyugalomban van, a fénysugár a tükörről önmagában (függőlegesen) verődik vissza. Ha a mérleg forog, de egyensúlya nem bomlik meg (arretálva van), a sugármenet nem változik. Ha azonban a forgó mérleg billeg is, akkor a tükörről visszaverődő fény egy függőleges tengelyű körkúp palástját súrolva mozog. A mérleg fordulatszámát a rezonanciajelenségig fokozatosan növelve, a lengési amplitúdóval együtt nő a kúp nyílásszöge is. A rezonancia-fordulatszámot túllépve az amplitúdó és vele együtt a fénykúp nyílásszöge is csökken. Eötvös azonban nem a kúp nyílásszögét figyelte, hanem a mozgó fénysugarat egy 45° os tükörrel a laboratóriumfalára akasztott ernyőre vetítette. A fényfolt az ernyőre kört rajzolt, aminek átmérőjét a fénykúp nyílásszöge határozta meg. Rezonancia esetén a billegve forgó mérlegről visszaverődő fénysugár által az ernyőre rajzolt kör mérete maximális volt. Eötvös ezt figyelve állapította meg mikor leng maximális amplitúdóval a mérleg.



Eötvös Loránd kísérleti módszere a rezonancia észlelésére

A K csillapítási tényező mérését Eötvös Loránd kompenzációs módszerrel küszöbölte ki. A mérleg karjaira egy-egy függőleges mágnesrudacskát rögzített és a mérleget egy $\vec{E} - \vec{D}$ irányba beállított áramjárta tekercs mágneses terében forgatta az előzetesen meghatározott rezonancia-fordulatszámmal. Ha a tekercsre nem kapcsolt áramot, a mérleg a korábban leírtak szerint billegve forgott. Ha a

Petzval Ottó –matek,
Kondor Gusztáv – csillagászat)
1867-1870 Heidelberg (Kirchoff, Bunsen, Helmholtz)
Königsberg (Neumann)
1870. júl. 8. Doktori szigorlatot tesz „summa cum laude” minősítéssel

(1871 febr.2 Eötvös József halála)

Eötvös Loránd közéleti tevékenysége

1870 - A m. kir. Természettudományi Társaság választmányi tagja
1871 - magántanári habilitáció,
„helyettes tanár” az új Matematikai mennyiségtan (elméleti fizika) tanszéken
1872 - „nyilvános rendes tanár”
1873 - az MTA levelező tagja
1878 - A Fizikai Intézet igazgatója, a kísérleti fizika professzora
1883 - MTA rendes tagja
1889 - 1905 az MTA elnöke
1891 - A Matematikai és Fizikai Társulat megalakító elnöke
(Matematikai és Fizikai Lapok elindítója)
1891/92. tanévben a bp.-i egyetem rektora
1894-95 m. kir. vallás- és közoktatási miniszter
Eötvös József Kollégium megalapítója

Eötvös Loránd, mint magánember

Családja: Szüleivel, nővéreivel szoros és ideális kapcsolatát heidelbergi levelezésük bizonyítja.

1876.ban nősül, felesége Horváth Gizella (1853 - 1919) társa haláláig Az Eötvös-család szoros, zárt közösség

lányai:

Eötvös Jolán (1877-79)

Eötvös Rolanda (1878-1952)

Eötvös Ilona (1880-1945)

Sport, hobbi: természetjárás, lovaglás, kerékpározás

hegymászás (lányaival) a Dolomitokban

Irodalom:

- *Báró Eötvös Loránd emlékkönyv* (szerk.: Fröchlich Izidor), MTA kiadványa, Budapest 1930
- Skrapits Lajos: *Százéves Eötvös torziós ingája*, Természet Világa, 1991/6. szám, 281–282. o.

- Ephraim Fischbach, Bod László, Nárayné Ziegler Mária, Marx György: *Az Eötvös-kísérlet száz éve*, <https://www.kfki.hu/static/tudtor/eotvos1/szazeves.html>
- I. Fözy, A. Juhász: *Der Eötvös-Effekt*, Praxis der Naturwissenschaften, Physik 1984/6. S. 170-173.
- Cseh Géza: *Fizikai Szemle* 31. (1981) 31-32.
- L. Eötvös: *Annalen der Physik* **59** (1919) S. 743-752.
- Eötvös L.: *A Föld vonzása különböző anyagokra* (MTA előadás 1890. jan 20-án) <http://mek.oszk.hu/03200/03286/html/eotvos1/eotv1.html>