

MESKÓ ATTILA

Eötvös Loránd geofizikai vizsgálatai

Eötvös Loránd negyven éven át foglalkozott a gravitációs tér kis változásainak igen pontos mérésével. A Coulomb-féle torziós ingát először arra használta, hogy meghatározza a gravitációs tér potenciáljának távolságegységre eső változásait, úgynevezett gradienseit, majd ezekből számította a potenciálfelület görbületét. Az eszköz pontosságát szinte hihetetlen mértékben fokozta – többek között azzal – , hogy speciális platinaszálakat használt és védőburkolatokat helyezett el az inga körül. Mindkét eszközzel alapvetően fontos méréseket végzett. Meghatározta a gravitációs állandót és igen nagy pontossággal igazolta a súlyos és tehetetlen tömeg arányosságát.

Később új műszert alakított ki, melyben az egyik súlyt a vízszintes rúd vége alatt függesztette fel. Mivel a két súly különböző szintre került, a gravitációs tér horizontális gradiense is meghatározhatóvá vált. Ez a műszer az 1920-as években Eötvös-ingaként vált világhírűvé és hozott forradalmi változásokat az olajkutatásban. Segítségével megbízhatóbban lehetett következtetni a felszín alatti geológiai viszonyokra, mint bármely más addigi módszerrel: megszületett a modern gyakorlati geofizika. Az első keresett szerkezetek a sódómk és felboltozódások voltak, ugyanis ezek az alakzatok kapcsolatosak lehetnek olajtelegekkel. Több száz szerkezet és ezekben több milliárd hordó kőolaj megtalálása tulajdonítható az Eötvös-inga alkalmazásának.

Eötvös Loránd a mágneses tér nagy pontosságú mérésével is foglalkozott. Laboratóriumában különböző ősi edények, téglák és más tárgyak gyenge remanens mágneses terét határozta meg, ezzel megalapozva az archeomágnességet. Terepi méréseiben a nehézségi erőter gradiensei mellett többnyire lemérte a mágneses teret is és kapcsolatot állított fel a két mennyiség között. A terjedelem korlátai miatt azonban csak a gravitációs vizsgálatokkal foglalkozunk.

Eötvös Lorándot a tudománytörténet a klasszikus fizika legkiválóbb művelői



Eötvös Loránd

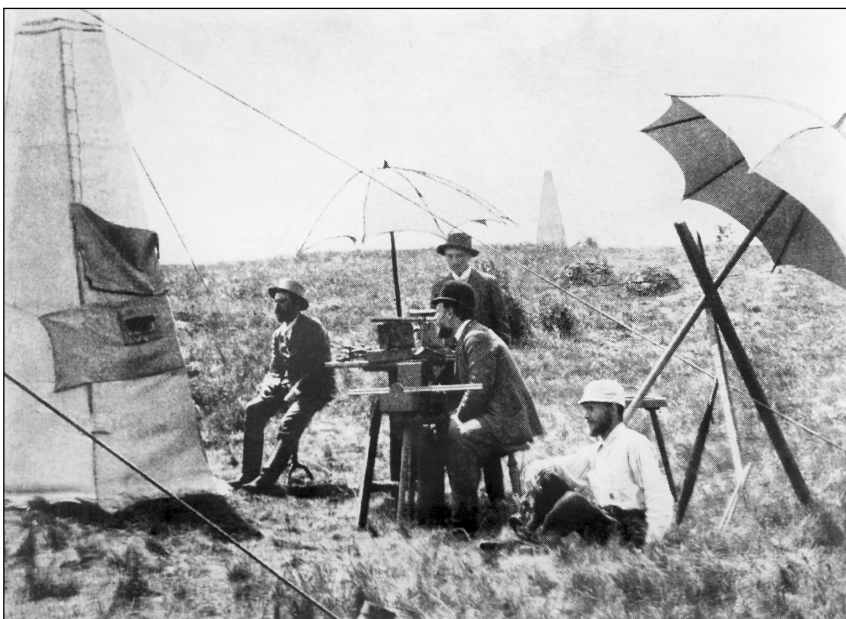
között tartja számon. A súlyos és tehetetlen tömeg ekvivalenciájának nagy pontosságú igazolása az Einstein által megalkotott általános relativitáselmélet egyik legfontosabb kísérleti bizonyítéka.

Eötvösnek a XIX–XX. század fordulója körüli években végzett mérésére – mely rendkívül nagy pontossággal kimutatta, hogy a tömegvonzás független az anyagi minőségtől – a nemzetközi szakirodalomban ma is mint Eötvös-kísérletre hivatkoznak.

Ugyanakkor Eötvös Loránd a modern geofizikai kutatás egyik megalapozója. A nehézségi erőter gradienseinek nemzetközi egysége ma is az eötvös (10^{-9} gal/cm). Az ő nevét viseli az a hatás, mely a Földhöz képest mozgó testek súlyváltozását írja le: ez az Eötvös-hatás, mely minden mozgó eszközzel végzett gravitációs mérés korrekciójában fontos szerepet kap. De a legtöbbször – talán gyakorlati haszna, az olajkutatásban betöltött több évtizedes nélkülözhetetlen szerepe miatt – az Eötvös-ingát ismerik.

A kísérleti mérések: 1891-ben a Ság-hegyen, majd 1901 és 1903 telén a Balaton jegén végzett észlelések bizonyí-

Gravitációs mérés 1891-ben. Az észlelő távcsőnél Eötvös Loránd, mögötte Tangl Károly egyetemi hallgató, a földön Kövesligethy Radó csillagász ül, a széken Bodola Lajos geodéta



tották, hogy a torziós inga a laboratórium rendezett világából a természetbe lépve is alkalmas a nehézségi erőter szintje hihetetlen pontosságú meghatározására. Néhány évvel később, 1916-ban, az Egbell környéki mérések már gázmező pontosabb körülhatárolását segítették, majd az első világháborút követően a műszer megkezdte diadalútját. Európa, Ázsia, Észak- és Dél-Amerika kutatási területein csaknem két évtizeden át az olajkutatás versenytárs nélküli eszköze volt. Egyedül a Mexikói-öbölben az 1930-as évek közepéig 35-40 Eötvös-ingás mérőcsoport dolgozott és legalább 80 termelő mezőt fedezett fel, összesen több mint 1 milliárd hordó készlettel. A könnyebben kezelhető, egyszerűbb korrekciókat igénylő graviméterek csak 1940 körül kezdték felváltani az Eötvös-ingákat, bár pontosságuk akkor még jóval kisebb volt, mint az ingával megvalósítható 1 eötvös.

A nehézségi erő mérése: elmélet

A nehézségi erő vizsgálata több évszázados múltra tekint vissza. Newton a XVII. században ismerte fel az általános tömegvonzás törvényét. A törvény általános, mert minden tömegnek van gravitációs tere. Az m tömegű, pontszerűnek elképzelt test terében, a tőle r távolságban lévő egységnyi tömegre ható erő $G \cdot m/r^2$, azaz a vonzás egyenesen arányos a tömeggel, fordítottan arányos a távolság négyzetével. A képletben még szereplő

G a gravitációs állandó. Ennek értéke SI egységben: $6,67 \cdot 10^{-11}$. Mivel G ennyire kicsiny, számottevő erőter csak igen nagy tömegek körül alakul ki. A G meghatározása is nehéz. Nem meglepő, hogy G a legkisebb pontossággal ismert valamennyi univerzális állandó közül, a negyedik tizedes értéke már bizonytalan.

A Föld tömege elég nagy; köznapi tapasztalat, hogy vonzásának hatására az alá nem támasztott tömegek gyorsulva esnek. Már Galilei is végzett kísérleteket annak tisztázására, függ-e a gyorsulás a leejtett testek anyagától. Az általa elérhető megfigyelési pontosság határain belül nem talált eltérést. Később Eötvös vizsgálatai tisztázták, hogy a súlyos (a vonzerőt adó) tömeg és a tehetetlen (az erő hatására kialakuló gyorsulást meghatározó) tömeg azonos. Egészen precízen fogalmazva: ha van is eltérés, ez csak rendkívül kis érték, bármelyik tömeg kétszázmilliomod része lehet. Természetesen minden gyakorlati célú megfontolásban, számításban jogosult a két tömeget azonosnak tekinteni. A két tömeg azonosságának mélyreható elméleti jelentőségét az adja, hogy az általános relativitáselmélet is a tömeg két, különböző azonosságán alapul.

Az erő a tömeg és a gyorsulás szorzata. Emiatt az egységnyi tömegre ható erő számértéke megegyezik az általa ugyan ezen tömegen létrehozott gyorsulás számértékével. Ez az alapja annak, hogy a geofizikában a gravitációs mérési eredményeket gyorsulásegységekben adják meg – bár műszereink valójában

az erőt mérik. Az 1 cm/s^2 gyorsulást Galilei tiszteletére *gal*-nak nevezik. Közismert, hogy a gyorsulás a Föld felszínén közelítőleg 10 m/s^2 . Ez éppen 1000 gal. A földtani kutatásban azonban a gal kényelmetlenül nagy érték, emiatt ezredrészét, a milligalt (mgal) használjuk. A jelenleg elérhető mérési pontosság század mgal, különös gonddal végzett speciális mérések esetén ezred mgal. A rutinszerűen biztosítandó mérési pontosság század milligal, a teljes érték százmilliomod része. Ezt nem lehet elérni, ha a teljes mennyiséget próbálnánk mérni. A gyakorlati kutatás azonban szerényebb igényű. Rendszerint néhányszor 100 km^2 – néhányszor 1000 km^2 nagyságú területeket vizsgálunk. A nehézségi erőter változása ekkora területen ritkán haladja meg a 100 mgal -t, azaz már „csak” 4 nagyságrenddel nagyobb a kívánt pontosságnál. Megjegyezzük, hogy a pontosság megvalósítását nemcsak a műszer teljesítőképessége határozza meg, hanem a korrekciók elvégzése is befolyásolja. Pontos eredményekhez pontos korrekciókra van szükség.

Végeznek a teljes gyorsulás meghatározására is méréseket, de ezek az ún. abszolút gyorsulás mérések hosszadalmasak, különleges eszközöket igényelnek, és mérési hibájuk jóval nagyobb.

Évszázadok óta tudjuk, hogy a nehézségi erő a Föld felszínén változó, az Egyenlítőn a legkisebb, a sarkok felé haladva növekszik. Ennek döntően a Föld forgása az oka. A forgás miatt fellépő centrifugális erő az Egyenlítőn éppen ellentétes irányú a tömegvonzással. Itt a legnagyobb is, hiszen az Egyenlítő van a legtávolabb a forgástengelytől. A sarkok lényegében a forgástengelyre esnek, ahol a centrifugális erő zérus, itt tisztán a vonzerő érvényesül. Már Newton felismerte, hogy a Föld lapultságát a forgás okozza. A lapultság értéke közelítőleg $1/300$. Az Egyenlítő pontjai így is mintegy 21 kilométerrel vannak távolabb a tömegközépponttól, mint a sarkok. A forgás mellett ez is hozzájárul ahhoz, hogy az Egyenlítőn a nehézségi erő kisebb legyen, mint a sarkokon.

A tengerszint feletti magasságnak is van hatása, hiszen a Föld középpontjától távolodva a vonzerő értéke csökken. A legmélyebb tengeri árokban és a legmagasabb hegycsúcson pusztán a Föld középpontjától mért különböző távolságok miatt valamivel több mint 5 gal különbséget mérnénk – ha más tényezők nem volnának. Valójában a tényleges értékeket befolyásolja a környező anyagok, a hegycsúcs alatti, a hegyet alkotó kőzetek, illetve a tengerfenék kőzetei és a tengervíz vonzása is. Összehasonlítva az átlagos 1000 gallal, kitűnik, hogy a maximális különbség nagyjából a teljes érték 5 ezreléke.

Mérések 1931-ben. Az észlelőcsoport jobb oldalán Bakos Tibor matematika-fizika szakos hallgató, Eötvös-kollégista



Nagyjából ekkora a változás az Egyenlítő és a sarkok között is. A forgási ellipszoiddal jól közelíthető alakú forgó Földön az egyenlítői (átlagos) gyorsulás 978,049 gal, a sarki gyorsulás ennél mintegy 5 ggal nagyobb: 983,221 gal. A teljes Földre számított átlag: 979,8 gal. A Budapesten mért érték közel van az átlaghoz: 980,8 gal.

A Föld forgásának további következménye, hogy más a tömegvonzás és más a nehézségi erő iránya. A tömegvonzás iránya a Föld középpontja felé mutat, a nehézségi erő azonban a tömegvonzás és a forgásból adódó centrifugális erő eredője. A két irány közötti eltérés a Föld különböző pontjain nem azonos. A két vektor (a tömegvonzás vektora és az eredő) azonos irányú az Egyenlítőn, mert itt a tömegvonzás vektora és a centrifugális erő vektora ugyan ellentétes irányú, de azonos egyenesbe esik és azonos a sarkokon, mert itt nincsen centrifugális erőből eredő járuléka. A két vektor szöge a Föld összes többi pontján zérustól különböző, például a 45°-os szélességen közelítőleg 5,9° (közel 6 szögmásodperc).

A függőn a nehézségi erő irányába áll be. A geodéták a Föld alakját közelítőleg forgási ellipszoidnak tekintik. A forgási ellipszoidra emelt merőleges egy másik függőleges irányt határoz meg. Ez a másik „függőleges” irány csillagászati módszerekkel állapítható meg. A kettő különbsége az ún. függővonal-elhajlás. Eötvös módszert adott a függővonal-elhajlás mérésére és rámutatott arra, hogy a Föld alakjának pontos meghatározásához a nehézségi erőtér mérésével juthatunk el.

A Földet körülvevő nehézségi erőtér, melynek minden pontban meghatározott iránya és nagysága van, a potenciál értékével is lehet jellemezni. A potenciálon a tér valamely pontjában azt a munkát értjük, amelyet a nehézségi erő végez, amikor egységnyi tömeget a kérdéses pontból végtelen nagy távolságba juttat. Ebből következik, hogy a potenciál értéke a Föld felszíne közelében más, mint nagyobb magasságban. Mindazon pontok, amelyekben a potenciál értéke ugyanakkora, folytonos felületet alkotnak, amelynek egyenlő potenciálú felület vagy *szintfelület* a neve. Például a nyugalomban lévő tengervíz felülete is szintfelület. Tudományosan a Föld alakját is szintfelülettel definiáljuk: a tengerszint felületét gravitációs mérési eredmények alapján, számítások segítségével folytatjuk a szárazföldeken. Az ilyen módon gondolatban az egész Földre kiterjesztett szintfelület a *geoid*.

Végtelen sok szintfelület gondolható el egymáson belül és mindegyikre érvényes az, hogy ha valamely tömeg a szintfelületen mozdul el, a nehézségi erő

nem végez munkát. Bármely pont környezetében a potenciál értéke minden irányban változik, kivéve a szintfelület menti elmozdulást. A potenciálhosszúság egységre eső változása a szintfelületre merőleges irányban adja az illető pontra vonatkozó nehézségi gyorsulást. A potenciálhosszúság egységre eső változását a potenciál differenciálhányadosának nevezzük. Ezzel a szóhasználattal élve a potenciál függőleges irány szerint vett differenciálhányadosa a nehézségi gyorsulás. A potenciálnak más irányban, például vízszintes irányban számított differenciálhányadosa a vízszintes irányú erőösszetevőt jelenti. A nehézségi erőtér jól jellemezhető a potenciál különböző irányokban vett differenciálhányadosaival, és a teljes leírásához három különböző differenciálhányadosra van szükség, melyek a három koordinátatengely-irányú összetevőt adják meg.

Az elemzésben azonban még egy lépéssel tovább mehetünk. Az erő változását az erő differenciálhányadosai, tehát a potenciál második differenciálhányadosai jellemzik. Eötvös néhány második differenciálhányadost közvetlenül meg tudott mérni, mások összetett hatással jelentkeztek, de volt egy olyan is, melynek meghatározására eszközei nem adtak módot. Ez az erőtér függőleges irányú változása. Valamennyi második differenciálhányados jelenleg is használt egysége az eötvös = 10^{-9} gal/cm ($=10^{-7}$ gal/m).

A nehézségi erő mérése: eszközök

A nehézségi gyorsulást a XIX. század végéig ingák lengésidejéből határozták meg. Ezek abszolút mérések voltak, így nem lehettek elég pontosak sem. Még kevésbé voltak alkalmasak praktikus földtani feladatok megoldására. Eötvös az 1880-as évektől kezdve a relatív mérésekkel foglalkozott. Nem a teljes teret, hanem annak változásait, a potenciál második differenciálhányadosait törekedett minél pontosabban meghatározni. A Coulomb-féle csavarási vagy torziós ingát választotta alapműszerként. Ez egy vékony torziós szála függesztett vízszintes ingarúd, két végén azonos nagyságú tömegekkel. A csavarási inga, szerkezeténél fogva, eleve vízszintes erők közötti különbségek mérésére alkalmas. Amikor ugyanis a két tömegről különböző erők hatnak, ezek forgatónyomatéka is eltérő lesz. A forgatónyomatékok közötti különbség az egyensúlyi helyzet elérésekor éppen a felfüggesztő szál elcsavaródásából (torziójából) származó forgatónyomatékkal lesz egyenlő. Coulomb mágneses és elektromos erőtérrel határozott meg az eszközzel, Cavendish

pedig viszonylag nagy tömegek vonzó hatását mérte.

Eötvös jelentősen növelte az eszköz stabilitását és érzékenységet. Gondosan kiküszöbölt minden zavaró hatást. Először kettős, majd hármas falú fémsekerevénybe zárta az ingát, hogy azt mind a külső mágneses és elektromos terek, mind az egyenlőtlen felmelegedés és a légáramlatok elől elzárja. Különösen sokat kísérletezett a legalkalmasabb torziószál megtalálásával. Az érzékenység növelése érdekében az addigiaknál hosszabb és vékonyabb szálat használt. A legjobbnak talált, irídiummal ötvözött platinaszálat hosszú idejű hőkezeléssel és húzással a lehetőség szerint feszültségmentessé tette és a szálak közül előzetes méréssorozattal választotta ki a legjobbakat. Kiselejtezte azokat a szálat, amelyeknél az egyensúlyi helyzet eltolódása vagy a hőmérséklet okozta változás a megengedettnél nagyobb volt. Erre a korát megelőző, egyedülállóan gondos technológiára nagy szüksége volt, mert az érzékenység növelését ösztönözött kellett egyeztetnie az egyensúlyi helyzet állandóságának követelményével. A kis elfordulások pontos meghatározását azzal is segítette, hogy az ingarúdra tükröt erősített, és az arról visszavert fénysugár helyét a műszerhez rögzített skálán távcsővel olvasta le.

A változatlan alakú, de minden addigal érzékenyebb és stabilabb Coulomb-féle csavarási vagy torziós ingáját Eötvös görbületi variométernek nevezte. A név oka az, hogy a görbületi variométerrel végzett mérésekből levezethető a potenciál szintfelületének görbülete. Bár a potenciál szintfelülete csak virtuális felület, görbülete ugyanúgy értelmezhető, mint egy valódi felületé. A görbületi variométerrel az ingarúd középpontján „áthaladó” potenciál-szintfelület görbületét tudjuk meghatározni. Az egyszerűség kedvéért gondoljuk azt, hogy a szintfelület azonos a fizikai felszínnel, és képzeljük el, hogy a felszint elmeszszük egy függőleges síkkal. A metszévonal valamilyen görbe, mely a mérési pontban körívvel közelíthető. Ennek a legjobban illeszkedő körívnek a sugara a görbületi sugár. A képzeletbeli, mérési ponton áthaladó függőleges sík irányát változtatva különböző görbületek és különböző nagyságú görbületi sugarakat kapunk. Bizonyítható, hogy a bármilyen felület esetén a legkisebb és legnagyobb görbületi sugarat egymásra merőleges irányú metszetekben kapjuk.

Ha a rúd teljesen szabadon mozoghatna és nem tartaná beállított iránya közelében a torziós szál elcsavaródásából származó forgatónyomaték, a legkisebb görbületi sugár síkjába állna be. Mivel a torziós szál csak akkor elmozdulást en-

ged meg, hogy a torziós szál elcsavarodásából származó és a görbületek különbsége miatt az adott irányba beállított rúdra ható forgatónyomatékok azonosak legyenek, a rúd a legkisebb görbületi sugar síkja irányában mozdul el.

A görbületi adatokat térképen ábrázolva következtetni lehet a mélybeli sűrűségeloszlás jellegére. Eötvös az „eltemetett hegység” szemléletes képét használta. Ez egyszerűen nagyobb sűrűségű kőzetrétegeket jelent, melyeket befed, láthatatlanná tesz a rájuk halmozódott lazább üledékek tömege. Utóbbiak sűrűsége kisebb, mint az eltemetett hegységé. A sűrűségkülönbségből eredő szintfelület-változásokat érzékeljük a görbületek sajátos eloszlásában is.

A horizontális gradiensek sokkal áttekinthetőbb, könnyebben értelmezhető képet adnak. A horizontális gradiensek méréséhez azonban a Coulomb-mérleg meg kellett változtatni. Eötvös zseniális módosítása az volt, hogy az ingarúd egyik végéhez csatolt tömeget néhány deciméterrel mélyebben függesztette fel. Az eszközt szerényen „horizontális variométer”-nek nevezte el, az Eötvös-inga név csak később terjedt el. Az alapjában igen egyszerű, de döntő jelentőségű módosítás révén az inga különböző egyensúlyi helyzeteiből levezethetővé vált a nehézségi erőter horizontális irányú megváltozása, az erőter horizontális gradiense.

Az ingarúd két végén elhelyezett tömegekre a földi nehézségi erőter vízszintes irányú összetevői hatnak. Az erők különbsége vízszintes forgatónyomatékokat ad, és ez elcsavarja a torziós szálat. Több lengés után egyensúlyi helyzet alakul ki, melyben az erőter változásából eredő forgatónyomaték a felfüggesztő szál torziós nyomatékával lesz egyenlő. Mivel több ismeretlen mennyiség is van, a műszer szekrényét és vele együtt az ingarudat különböző irányokba kell beállítani és minden helyzetben megvárni, amíg az inga eléri az egyensúlyi helyzetet.

Mivel a második differenciálhányadosok mellett a felfüggesztő szál csavaratlan egyensúlyi helyzetét is meg kell állapítani, összesen 5 különböző állásban kell az ingarúd egyensúlyi helyzetét megfigyelni. Eötvös az irányokat 72°-onként, szimmetrikusan osztotta el. Tervszerűen arra törekedett, hogy az észlelési időt minél inkább megrövidítse, továbbá a műszer méreteit csökkentse. Első műszereinél a felfüggesztő szál hossza a kellő érzékenység érdekében kb. másfél méter volt, az észlelési idő pedig másfél óra. Vékonyabb fémszálak alkalmazásával az érzékenység megtartása mellett a szál hosszúságát kb. fél méterre sikerült csökkentenie, s ezzel a

műszer méretei és az észlelési idő is jelentősen csökkentek.

Igen jelentős volt Eötvösnek az a gondolata, hogy olyan műszert szerkesszen, amellyel kevesebb állásban kell észlelni. Két horizontális variométert helyezett el egymás mellett egymással párhuzamosan, de úgy, hogy a lelógó tömegek ellenkező oldalon legyenek. A két ingát közös külső fémszekrénybe zárta. Eötvös számításai szerint ezzel a kettős ingával a lényeges adatok meghatározására már csak 3 azimutban kell észleléseket végezni, amiből 6 leolvasás adódik. Ez éppen elegendő, mert mindkét inga felfüggesztő szálának csavaratlan egyensúlyi helyzetét is meg tudjuk határozni.

A tömegvonzás együtthatójának meghatározása

Eötvös eszközeit az 1880-as évek végén már elegendő pontosságúnak tartotta ahhoz, hogy velük néhány alapvető mérést elvégezzen. Egyik ezek közül a tömegvonzás állandójának, a G-vel jelölt mennyiségnek a megmérése volt.

Ennek sztatikus végrehajtásához a görbületi variométer alatt, forgatható asztalon két, egyenként 50 kg tömegű ólomgolyót helyezett el úgy, hogy mind egyik az ingarúd végein lévő tömegek alatt legyen. Az ingarúd a vonzó tömegek hatására egyensúlyi helyzetet vesz fel. Az elrendezés miatt ez alig különbözik a súlyok nélküli egyensúlyi állapottól. Ezután az asztalt elforgatta úgy, hogy az ólomgolyók az ingarúd végein levő tömegektől a lehető legtávolabb kerüljenek. Az elforgatás után az ingarúd új egyensúlyi helyzetet vett fel, és ebből az új helyzetben fellépő erők forgatónyomatéka meghatározhatóvá vált. Eötvös azt is meg tudta állapítani, hogy milyen az ólomgolyók legkedvezőbb helyzete, melyben a vonzóhatás a legnagyobb.

A sztatikus mérés a klasszikus Cavendish-féle mérés javított változata és annál jóval pontosabb is, de az igazi sikert a dinamikus mérés hozta. Ezzel Eötvös több mint 100 éve már csaknem olyan pontosan meghatározta a G-t, mint a modern módszerek. A dinamikus módszer a lengésidők összehasonlításán alapszik. Eötvös két oszlopot épített ólomtéglákból, egymással párhuzamosan. Az oszlopok alja 30x30 cm, magassága 60 cm volt. A két ólomoszlop közötti, szintén négyzet alakú szabad tér közepén állította fel a torziós ingát és a lengésidőt kétféle helyzetben mérte meg. Az egyikben az ingarúd az oszlopok falával párhuzamos, a másikban arra merőleges volt. Eötvös megmutatta, hogy a lengésidők reciprok négyzetei-

nek különbsége arányos a vonzó tömeg, esetünkben az ólom sűrűségével és a G-vel (Eötvös, 1896). A lengésidők (kerekítve) 640, illetve 860 másodpercnek adódtak és a G-re kapott érték (a jelenleg használt SI-egységre átírva) $6,65 \cdot 10^{-11}$, $0,01 \cdot 10^{-11}$ hibával. Az 1891-ben, Kövesligethy Radóval és Tangl Károllyal közösen végzett mérési sorozat eredménye annyira pontos, hogy ma is csak csodálni tudjuk a klasszikus fizika egyszerű eszközzel és módszerrel elért teljesítményét.

Az Eötvös-hatás

Eötvös élete utolsó éveiben foglalkozott a Földön mozgó testek súlyváltozásával. Figyelmét erre a kérdésre O. Heckernek az Indiai-óceánon és a Csendes-óceánon, mozgó hajón végzett gravitációs mérései hívták fel. A mérési eredmények feldolgozásában nem vették figyelembe a hajó mozgásának irányát és ez rendszeres eltéréseket okozott. Bár számunkra nyilvánvalónak látszik, hogy a Föld forgásával azonos irányban haladó járművön a nyugvó helyzetűkhöz képest valamivel kisebb, a Föld forgásával ellentétes irányban haladó járművön a nyugvó helyzetűkhöz képest valamivel nagyobb értéket mérünk, Eötvös kritikája előtt mégsem gondolt senki ennek a korrekciónak a szükségességére. Különösen fontosá vált ez a javítás a légi gravitációs mérések kiértékelésében, melyet a szakirodalom azóta is Eötvös-hatásnak nevez.

Könnyen belátható, hogy a Földhöz képest mozgó testek súlya megváltozik. A nehézségi erő a Föld vonzásának és a centrifugális erőnek az eredője. Amikor egy test kelet felé mozog, a reá ható centrifugális erő nagyobb, mint amikor a Földhöz képest nyugvó állapotban van. Ugyanígy belátható, hogy a Földön keletre nyugatra mozgó test súlya nagyobb, mint a nyugvó testé. Eötvös kiszámította, hogyan függ a súlyváltozás a földrajzi szélességtől és a sebességtől. A hatás kicsiny, de pontos méréseknél nem elhanyagolható. Például a 45° földrajzi szélességen egyóránként 100 km sebességgel haladó test súlya mintegy 0,3 ezeléssel növekszik vagy csökken attól függően, hogy keletről nyugatra, vagy nyugatról keletre halad. Eötvös javaslatára Hecker 1909-ben a Fekete-tengeren két hajón végzett nehézségi méréseket. Az egyik hajó nyugatról keletre, a másik keletről nyugatra haladt. A mérések feldolgozása után Eötvös számításai (természetesen) igazolódtak.

Annak ellenére, hogy az Eötvös-hatás egyenes következménye a Föld forgásának és mint ilyen, nyilvánvalónak tűnik, a nemzetközi szakirodalom ma is így ne-

vezi, megadva a tiszteletet annak, aki először hívta fel a figyelmet erre a nyilvánvaló és mégis elfeledett effektusra. Az Eötvös-hatásnak komoly jelentősége van mozgó eszközökön végzett mérések korrigálásában.

A nehézségi erő mérése: földtani alkalmazás

Eötvös különböző sűrűségű rétegekből felépített egyszerű modellek segítségével mutatta meg, hogy a görbület és gradiens alkalmas a mélybeli sűrűségeloszlás – vagy ha úgy tetszik – a különböző geológiai rétegek helyzetének kimutatására. A horizontális gradiensek ismeretében a nehézségi gyorsulás változása is számítható. Abszolút értékekre földtani feladatok megoldásában nincs is szükségünk, elegendő tudnunk, hogy a területen egy tetszőleges vonatkoztatási pontbeli értékhez képest más pontokban mennyivel nagyobb vagy kisebb a nehézségi erőterét értéke. A vonatkoztatási pontbeli értéktől való eltéréseket hagyományosan g -vel jelöljük, belőlük úgynevezett anomáliatérképet szerkeszthetünk. Rendszerint az azonos g értékeket összekötve, szintvonalakkal ábrázoljuk a változásokat. Ez könnyen áttekinthető, szemléletes, mert mindannyian megszoktuk és „értjük” a domborzati térképeket. A pozitív gravitációs anomália ebben az ábrázolásmódban hegy, a negatív anomália völgy szintvonalas képeinek felel meg. Ha ilyen típusú g térképet kívánunk készíteni, természetesen elég sok pontban kell ismernünk a horizontális gradiens értékeit.

A g térképekből következtetni tudunk különböző sűrűségű geológiai rétegek helyzetére. Ahol a nagyobb sűrűségű rétegek közelebb kerülnek a felszínhez, a környezetnél nagyobb g értéket tapasztalunk, a térképen pozitív anomália alakul ki. Az anomália a geofizikus szóhasználatban – eltérően a köznapitól – csak a szabályostól való eltérést jelent. A geológusok a felboltozódást antiklinálisnak nevezik és elég régóta tudják, hogy kedvező esetben az antiklinálisban kőolaj vagy földgáz halmozódhat fel. Sokszor az antiklinális olyan mélységben van, hogy közvetlen, felszíni megfigyelésekből nem lehet jelenlétét megállapítani. Ez adja a gravitációs mérések jelentőségét. Természetesen ezekből is csak következtetni tudunk az antiklinális helyére, alakjára, hiszen nem magát az alakzatot látjuk, csak gravitációs terét érzékeljük az összes többi sűrűség inhomogenitás által is módosított gravitációs térben. De már ez is óriási segítség.

A gyakorlati kutatások szempontjából igen jelentősek voltak az 1901 és 1903

télen a Balaton jegén végzett mérések. A mérési módszer kipróbálására kiválóan alkalmas volt a sima jégfelület, mert a közvetlen környezetnek, jégfelületnek nem volt zavaró hatása, tehát a nehézségi erőterét észlelt hatása viszonylag könnyen volt elemezhető. Eötvös ezt az elemzést már terepi méréseinek kezdetén nagy körültekintéssel végezte el. A közvetlen környezet hatásának számítására gyakorlatilag jól használható képleteket vezetett le. A képletek alkalmazásához a műszerállás környezetében szinthezesszel meg kellett határozni a terep egyenletlenségeit. A szintezést 8 irányban és kb. 100 m távolságig végezték el. A szintezési adatokból kiszámított hatást Eötvös térszínhatásnak nevezte.

A további területek eredményei is érdekesek, de még nem kapcsolatosak a nyersanyagkutatással. Eötvös azonban valószínűleg régóta gondolt erre. Már a mérési területek kiválasztása is sejteti, hogy a maga szokások higgadt, minden eshetőséget számba vevő munkamódszerével ezt készítette elő. Tisztában volt a terepi munka nehézségeivel, különösen a megfelelő korrekciók elvégzésének fontosságával. A korrekciók még a balatoni mérésekénél is (ahol pedig az átlomás 100 méteres közvetlen környezetének hatása a nagyjából vízszintes jégfelület miatt elhanyagolható és csak az ún. térképi hatást kellett figyelembe venni) jelentősen befolyásolta a végeredményt. A további német nyelvű előadásából idézve:

„A hasznosítható energia új forrásainak kutatása a legújabb időkben több gyakorlati szakember érdeklődését fordította az éghető földgáz felé. Magyarországon például az Alföldön egyes fúrásokból kiáramló gázt már több mint két évtizede használják világításra és motorok üzemeltetésére. A legutóbbi három évben pedig, az erdélyi gazdag gázforrások feltárása után, az éghető gázok előfordulásának tisztázása gazdaságilag is igen jelentős kérdéssé vált. Egyetlen, az erdélyi Kis-Sármás mellett kialakított 302 méter mélységű fúrásból másodpercenként $10,55 \text{ m}^3$, vagyis egy nap közel egymillió köbméter kémiailag csaknem tiszta metángázt nyertek.

Hol kell ilyen gáz megtalálása érdekében fúrni? A geológusok megegyeznek abban, hogy a gázt tartalmazó területen a legeredményesebb, legtöbb gázt szolgáltató fúrások a gázokat tartalmazó és azokat lefedő rétegek antiklinálisai közvetlen közelében képezhetők ki. Emellett

szólnak az Amerikában, Oklahomában szerzett tapasztalatok, de az erdélyi megfigyelések is, már amennyire a rétegek elhelyezkedését és tulajdonságait a (felszínen végzett) geológiai kutatások meg tudták ismerni.

De az ilyen geológiai ismertetőjelek teljesen hiányoznak a nagy magyar síkság, az Alföld homokkal és üledékekkel fedett területein. Aki tehát ott vagy hasonló területeken gázt tartalmazó antiklinálisokat keres, nem mellőzheti a torziós inga méréseket. Hogy milyen sikerrel, azt a jövő fogja megmondani.”

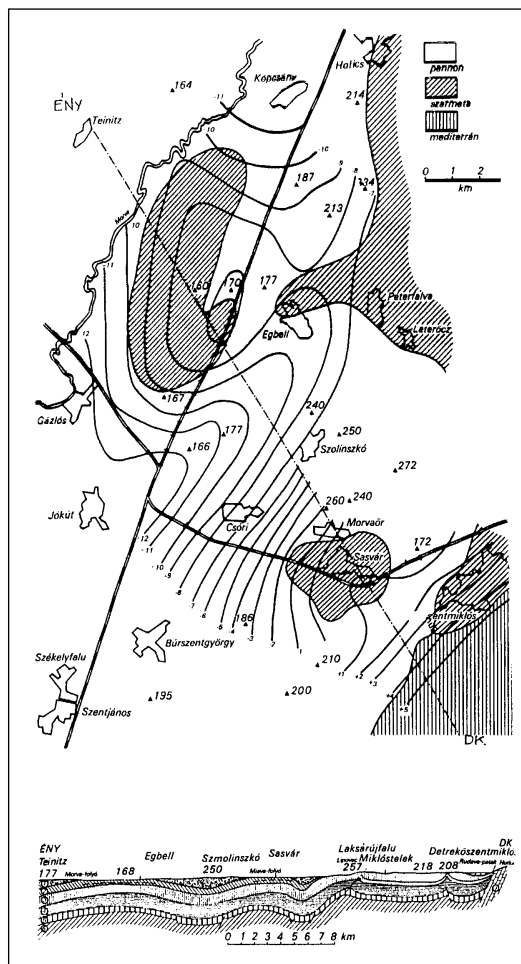
Ma már tudjuk, hogy a siker elsöprő volt, az Eötvös-inga segítségével több milliárd köbméter gázt és több száz millió tonna olajat találtak meg. Ezt azonban az alkotó nem érthette meg. A zseniális felfedezés sem neki magának, sem szeretett hazájának anyagi hasznot nem hozott.

Élete utolsó éveiben még részt vett a világon az első, kimondottan szénhidrogénkutatási célú terepi mérésben. Erre 1916-ban Morvamezőn, Egbell (ma Gbely, Szlovákia) környékén került sor. Eötvös ekkor 68 éves volt, de a kutatócsoportot maga vezette. A geológus szakértő Böckh Hugó volt. Baráti együttműködésük máig tanulságos példa arra, hogy a földtani kutatás akkor eredményes, ha minden érintett tudományterület egyenrangú partnerként vesz részt a munkában. A területen gáz- és olajnyomokat már találtak. A kérdés az volt, hol kellene új fúrásokat mélyíteni.

A horizontális gradiensok alapján szerkesztett gravitációsanomália-térképet az ábra mutatja be, lényegében az eredeti közlemény alapján, minimális módosításokkal. Az ábra alján látható egy nagyjából ÉNy-DK irányú földtani szelvény, melynek nyomvonalát a térképen eredményvonal (pont-vonal változása) jelöli.

A gradiensok alapján szerkesztett térképen Egbelltől nyugatra gravitációs maximum van, megerősítve a geológusok feltételezését a felboltozódásról. A később itt lemélyített fúrások közül több produktívnak bizonyult. Az egbelli boltozattól délkeletre, Sasvár környékén Eötvös egy érdekes részletre figyel fel. A gravitációs anomáliatér szintvonalai itt nem záródnak, de az egyenletes csökkenésre jellemző párhuzamos lefutás helyett kiöblösödés alakul ki. Az egyenletes csökkenést a Kis-Kárpátokat alkotó és a síkság alatt folytatódó, fokozatosan mélyebbre kerülő, nagyobb sűrűségű kőzetrétegek okozhatják. Ha ezt a nagy területet érintő, emiatt regionálisnak nevezhető hatást kivonjuk, a kiöblösödés helyett Sasvárnál is záródó gravitációs maximum alakul ki. Ezt pedig az itt is meglévő antiklinális hatásá-

Eötvös Loránd geofizikai vizsgálatai



Az Ebell–Sasvár-szerkezet Eötvös-inga-mérésekből levezetett gravitációs-anomália-térképe és egy földtani szelvény

nak tulajdoníthatjuk. A gondolat helyesnek bizonyult, a Sasvár környéki másodlagos, úgynevezett reziduál maximumra is eredményes fúrásokat telepítettek.

Az ebelli mérés a modern geofizikai kutatás minden lényeges elemét tartalmazta: a geológiai ismeretek, illetve modell alapján telepített gravitációs – és a most nem tárgyalt, de szintén elvégzett mágneses – méréseket, azok gondos feldolgozását és értelmezését. Fontos lépés volt a regionális hatás felismerése és eltávolítása.

A nemzetközi olajvállalatok is felfigyeltek a műszerre, az Angol–Perzsa Vállalat volt az első, mely több Eötvös-ingát vett és az Egyesült Államok importját csak az első világháború akadályozta meg. Az új eszközre égető szükség volt, mert az antiklinálisok felszíni geológiai térképezése, a felszíni olajszivárgások felderítése már nem volt elégséges a mélyebben fekvő szénhidrogén-

mezők kutatásához. 1922-ben a Shell és az Amerada Olajvállalat szereztek be ingákat, 1924-ben az Amerada felfedezte a Nash Dome szerkezetet, és ezzel megszületett az Egyesült Államok geofizikai kutatóipara.

Az Eötvös-inga nem magát a nyersanyagot (olajat vagy gázt) mutatja ki, hanem a felhalmozódásának lehetőségét megteremtő geológiai szerkezetet, a potenciális lelőhelyet. Az antiklinálisok vagy a sódóмок megtalálásának lehetősége még így is óriási nyereség volt és az eszközt, az Eötvös-ingát rendkívül népszerűvé tette. Megjegyezzük, hogy a gyakorlati geofizika, vagy ezen belül a gravitációs kutatás azóta is csak a potenciális lelőhely megtalálására vállalkozik, a közvetlen olaj- vagy gázkutatás nagyon kevés és speciális földtani adottságú helyen volt sikeres.

Tanulások, összefoglaló értékelés

Eötvös Loránd nevéhez számos időtálló tudományos megállapítás, fontos kísérlet és nagy gazdasági hasznot hozó műszer, illetve mérési módszer fűződik. Csak a geofizikára szorítkozva: nevét őrzi a gravitációs potenciál második deriváltjának egysége az eötvös, az Eötvös-kísérlet, az Eötvös-inga, az Eötvös-hatás, említhetjük a gravitációs állandó meghatározását, a gradiens és görbület földtani felhasználásának az egész világ számára példát adó kidolgozását, a mérések korrekciójától kezdve egészen az értelmezésig. De megalapozója, első kutatója volt az archeomágnességnek, a gravitációs és mágneses adatok együttes értelmezésének is. Csaknem egy évszázaddal Eötvös alapvető publikációi után kezdődött el a gravitációs gradiometria virágkora. Ismét „világossá vált”, hogy a gravitációs anomáliák – a potenciál első z-szerinti deriváltja anomáliáinak – képe helyett finom változások sokkal jobban láthatók a potenciál különböző második deriváltjainak térképein.

Az elmúlt évtizedekben új, gyorsabb műszereket konstruáltak. A graviméterekkel a gyorsulás változása közvetlenül mérhető, elmaradhatnak a horizontális gradiensekre támaszkodó számítások, az új műszerek kevésbé érzékenyek a közvetlen környezet sűrűségkülönbségeire.

Az 1970-es években a tengeralattjárók navigációjának segítésére valamennyi második derivált meghatározására alkalmas műszert is építettek (igaz, hogy a fejlesztés néhány milliárd dollárba került). Pontosabb, gyorsabb helymeghatározást lehet végezni, sokkal sürűbben tudunk mérni, a kézi számításokat, térképszerkesztéseket elvégzi a szá-

mítógép. Az elvek, alapgondolatok azonban ma is azok, amiket Eötvös kidolgozott és szívós munkával gyakorlattá tett. Biztosan állíthatjuk, hogy munkássága jelentősen meggyorsította a geofizika fejlődését, eredményessé tette a mélységi olaj- és gázkutatást.

Példaként szolgál az utókor számára Eötvös dolgozatainak kristálytisza fogalmazása, logikus felépítése. Magyarzatai részletesek és közérthetőek, nincsen szüksége arra, hogy többet vagy mást mondjon, mint amit évek alatt végig gondolt, megmért és ellenőrzött. Követendő példa az évtizedeken át végzett szívós munka, a rendkívüli eredményességű életmű, mely az egész emberiség hasznára vált.

IRODALOM

- Eötvös, L., 1890: Über die Anziehung der Erde auf verschiedene Substanzen
Math. und Naturw. Ber. aus Ungarn, 8., 65–68
- Eötvös, L., 1896: Vizsgálatok a gravitatio és mágnesség köréből
Mathematikai és Természettudományi Értesítő, XIV. kötet
- Eötvös, L., 1896: Untersuchungen über Gravitation und Erdmagnetismus
Ann. d. Phys. u. Chem. Neue Folge, 59: 354–400
- Eötvös, R., 1908: Die Niveauflehen und die Gradienten der Schwerkraft an Balatonee
in: Resultate der wissenschaftlichen Erforschung des Balatonees.
Band I, Teil I, Geophysikalischer Anhang, Budapest–Wien
- Eötvös, L., 1906: Bestimmung der Gradienten der Schwerkraft und ihrer Niveauflehen mit Hilfe der Drehwaage
Verhandl. der XV. Konferenz der Internat. Erdmessung in Budapest,
Band I., 337–395
- Eötvös, L., 1909: Bericht über geodtische Arbeiten in Ungarn besonders über Beobachtungen mit der Drehwaage
Verhandl. der XVI. Konferenz der Internat. Erdmessung in Cambridge-London. Band I., 319–350
- Eötvös, L., 1912: Über Arbeiten mit der Drehwaage ausgeführt im Auftrage der kön. ungarische Regierung in den Jahren 1908–1911
Verhandl. der XVII. Konferenz der Internat. Erdmessung in Hamburg. Band I., 427–438
- Eötvös, L., 1919: Experimenteller Nachweis der Schwerenerdung, die ein auf normal geformter Erdoberfläche in östlicher oder westlicher Richtung bewegter Körper durch diese Bewegung erleidet
Annalen der Physik, 59: 743–752
- Fekete J., 1930: Eötvös Loránd földmágneses vizsgálatai.
In: Fröhlich I. (szerkesztő) Báró Eötvös Loránd Emlékkönyv, 206–229.
Magyar Tudományos Akadémia. Budapest
- Klupathy Jenő, 1906: Báró Eötvös Loránd Földkutatásai
Uránia, VII. évf. 11. szám, 421–432
- Környei E. (szerkesztő), 1964: Eötvös Loránd a tudós és művelődéspolitikus írásából
Gondolat Kiadó
- Meskó A., 1991: Eötvös Loránd és a gyakorlati geofizika születése
Természet Világa
- Meskó A., 1998: Az Eötvös-inga
Magyar Tudomány, XLIII. kötet 7. szám: 783–795
- Novobátczy K., 1964: Eötvös Loránd szellemi arcképe, In: Környei E. (szerk.): Eötvös Loránd, a tudós és művelődéspolitikus írásából. p. 17–22
Gondolat Kiadó
- Pekár D., 1921: Föld alatti vetődések kimutatása a torziós ingával
Mathematikai és Természettudományi Értesítő, 39, 1–29
- Renner J., 1963: Eötvös Loránd gravitációs vizsgálatai
Magyar Geofizika, 10: 167–171