



AZ EÖTVÖS-KÍSÉRLET MEGISMÉTLÉSE

A súlyos és a tehetetlen tömeg

Eötvös Loránd és munkatársai 1906-tól több mérés-sorozatot végeztek a súlyos és a tehetetlen tömeg azonosságára vonatkozó ekvivalencia-elv igazolására. Ugyan Einstein általános relativitáselméletének kiinduló alappillére, mégis az ekvivalencia-elv a mai napig vitatott kérdése a fizikának. A XVI. századtól kezdve többen is foglalkoztak erre vonatkozó kísérletekkel, és például azt tapasztalták, hogy vas és fagyó egyidejű ejtésekora a két test a nagy súlykülönbség ellenére gyakorlatilag egyszerre ért a talajra. Később Newton és Bessel már kimondottan a súlyos és tehetetlen tömeg ekvivalenciáját tesztelték különféle ingákkal végzett kísérletekben. Az ekvivalencia-elvet végül Eötvös Loránd és munkatársai bizonyították igen nagy pontossággal, azonban az ő méréseik után is maradt nyitott kérdés.

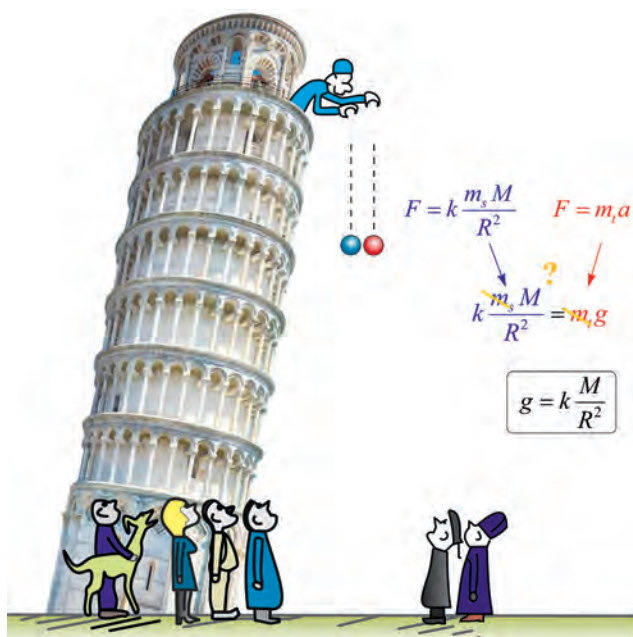
Newton II. törvénye szerint bármely testre ható erő egyenlő a test tömegének és a gyorsulásának szorzatával ($F=ma$), vagyis bármilyen mechanikai erőhatás is éri a testet (lehet ez rugóerő, súrlódási erő, vagy akár nehézségi erő), az erő és a gyorsulás hányadosa mindig ugyanannyi, a testre jellemző mennyiség, a *tehetetlen tömeg*.

Van ugyanakkor egy erő, ami bármely két test között mindig fellép. Ez a vonzóerő a jól ismert Newton-féle általános tömegvonzási (gravitációs) erő, melynek nagysága szintén arányos a testre jellemző mennyiséggel, a *súlyos tömeggel*.

A súlyos és a tehetetlen tömeg egymástól független mennyiség, ami két teljesen különböző fizikai törvényben jelenik meg. Newton óta a fizika kiemelt kérdése, hogy a két tömeg valójában ugyanaz-e, vagy más-más mennyiséget jelöl.

A kétfajta tömeg azonosságának igazolására a legenda szerint elsőként Galilei 1586-ban végzett látványos kísérletet a pisai ferde toronyban, ahol különböző anyagokat ejtett le, és a talajra érkezésük egyidejűségét vizsgálta (1. ábra). (A kísérlet egyébként nagy valószínűséggel nem Galilei, hanem korábban Simon Stevin, és nem a pisai ferde toronyban, hanem a hollandiai Delftben végezte.) A kísérlet alapkérdése az volt, hogy vajon anyagfüggő-e a gravitáció. Az ejtési kísérlet fizikai alapelvét megfontolva könnyen megérthetjük a súlyos és a tehetetlen tömeg azonosságának kérdését.

Különböző tömegek között a Newton-féle általános tömegvonzási erő (F) hat, amelynek nagysága arányos a Föld M és az ejtett próbatest m_s súlyos tömegével és fordítva arányos a tömegközéppontjaik közötti R távolság négyzetével. A jól ismert összefüggés az 1. ábrán látható, amelyben a gravitációs állandót k -val jelöltük. Ugyanakkor Newton II. törvénye értelmében a testek erő hatására gyorsuló mozgást végeznek, az a gyorsulás arányos a tömegre ható F erővel és fordítottan arányos a test m_t tehetetlen tömegével. Elhanyagolva most a forgási centrifugális erőt és az árapály erőket, a szabadon eső testek $a = g$ gyorsulását éppen a Newton-féle tömegvonzási erő okozza, így a két egyenlet az 1. ábrán látható módon egyenlővé tehető egymással. Amennyiben az egyenlőség két oldalán a súlyos m_s és a tehetetlen m_t tömeg egyenlő egymással, akkor egyszerűsíthetünk velük, és végeredményként azt kapjuk, hogy a g gyorsulás csak a Föld M tömegétől és az R föld sugártól függ, vagyis független a szabadon eső testek tömegétől és anyagától. A tapasztalat szerint az ejtési kísérletben a különböző anyagok egyszerre értek a talajra, ami az akkori szerény pontossággal azt mutatta, hogy a súlyos és a tehetetlen tömeg azonosak.



1. ábra. Galilei legendás ejtési kísérlete a pisai ferde toronyban

Nagyjából 300 évvel később, Eötvös Loránd először 1889-ben, az addigi méréseknél több nagyságrenddel pontosabb kísérleteket végzett, majd később 1906-tól az akkori technikai lehetőségeknek megfelelően a híres Eötvös–Pekár–Fekete (EPF-)kísérlettel a kilencedik tizedesjegyig terjedő pontossággal igazolta a súlyos és a tehetetlen tömeg azonosságát [1].

Einstein a súlyos és a tehetetlen tömeg egyenlőségére és anyagtól való függetlenségére, vagyis az ún. *gyenge ekvivalencia-elve* építette fel általános relativitáselméletét. A *gravitációs (súlyerő) és a tehetetlenségi erő* érzékeltetésére Einstein gondolatkísérletet alkotott, melynek az a lényege, hogyha egy fizikust bezárunk egy kabinba, felruházzuk az emberiség teljes fizikatudásával és a rendelkezésére bocsátunk minden elképzelhető fizikai eszközt és kísérleti lehetőséget, akkor sem képes megállapítani, hogy a kabin gravitációs erőterében nyugszik, vagy az univerzum távoli gravitációs tömegektől mentes területén rakétahajtómű gyorsítja (2. ábra). A helyzet azonban nem ilyen egyszerű; ma már tudjuk, hogy méréssel mégis különbséget lehet tenni a két erőter között. Ha ugyanis egyszerű rugós graviméterrel két különböző alkalmas pontban mérünk, akkor gravitációs erőterében a vonzó tömegtől mért távolság függvényében különböző értékeket fogunk észlelni, ugyanakkor gyorsuló erőterében, különböző pontokban nem tapasztalunk különbséget. Szaknyelven fogalmazva: a gravitációs erőternek van gradiense, a gyorsuló erőter viszont homogén. Ez is arra utal, hogy a súlyos és a tehetetlen tömeg azonosságának kérdése egyáltalán nem egyszerű probléma.

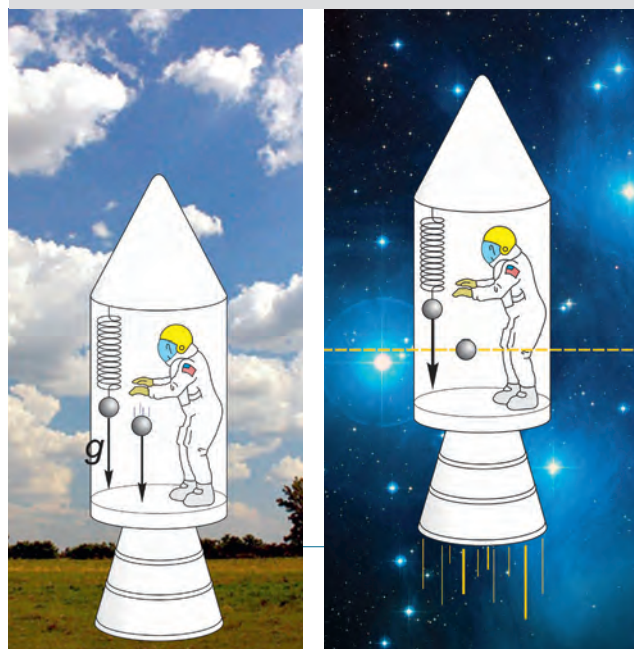
Az Eötvös-féle ekvivalencia-mérések

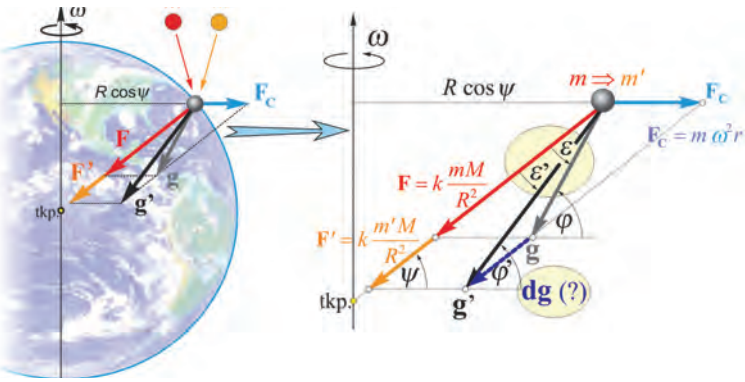
Eötvös Loránd és munkatársai, Pekár Dezső és Fekete Jenő 1906-tól több mérésorozatot végeztek a súlyos (gravitációs) és a tehetetlen tömeg arányosságára vonatkozóan. A méréseiket arra alapozták, hogy a földi nehézségi erő a tömegvonzási és a forgási centrifugális erő eredője, és amennyiben a gravitációs erő anyagfüggő, akkor az eredő nehézségi erő iránya szintén az lesz, ami egy K-Ny tájolású Eötvös-ingával kimutatható. Az elvégzett mérések csupán 10^{-9} hibahatár közeli véletlenszerűnek tűnő eltéréseket mutattak.

A g földi *nehézségi erő* három összetevője az F_T tömegvonzási erő, a Föld tengelykörüli forgásából következő F_C centrifugális erő és az árapálykeltő erők eredője. Az EPF-kísérletek során az árapálykeltő erők elhagyhatók, mivel a kísérletben használt eszközre kifejtett hatásuk kicsi. Eötvös feltételezte, hogy az F_C forgási centrifugális erő független az anyagi minőségtől, az F_T tömegvonzási erő viszont függhet tőle. Gondolatban helyezzünk el a 3. ábrán látható földfelszíni pontban különböző anyagokat, pl. aranyat és alumíniumot. A két különböző testnek legyen szigorúan azonos a tömege ($m = m'$). A feltételezés szerint mindkét testre azonos F_C forgási centrifugális tehetetlenségi erő hat, viszont a Föld az m tömegről F_T míg az m' tömegről F_T' gravitációs erőt gyakorol. Ennek megfelelően a 3. ábrán látható módon az m tömegről ható nehézségi erő g , az m' tömegről ható nehézségi erő pedig g' . Amennyiben a gravitáció anyagfüggő, a g és a g' közötti parányi dg különbség tapasztalható, mely Eötvös-ingával mérhető.

Az ekvivalencia-kísérletben az Eötvös-inga megfelelő forgatásával és a tömegek meghatározott cseréjével a 4. ábrán összefoglalt stratégia szerint történnek a mérések.

2. ábra. Súlyerő és tehetetlenségi erő Einstein gondolatkísérletében





3. ábra. A nehézségi erő feltételezett változása különböző anyagok esetén

Az első lépésben a K-Ny irányba beállított ingaszerkezeten leolvassuk az ingarúd nyugalmi helyzetét. A második lépésben 180 fokkal elfordítjuk az ingaszerkezetet és itt is leolvassuk az ingakar nyugalmi helyzetét. A harmadik lépésben visszaforgatjuk az ingaszerkezetet K-Ny irányba, az inga lelógatott aranyból készült tömegét kicseréljük egy ugyanolyan tömegű más, pl. alumínium tömegre, majd a nyugalmi állapotban ismét leolvassuk az ingakar nyugalmi helyzetét. Végül a negyedik lépésben a felcserélt tömeggel is elfordítjuk az ingaszerkezetet 180 fokkal és így is leolvassuk az ingakar nyugalmi helyzetét. A súlyos és a tehetetlen tömeg különbözősége esetén a felcserélt tömegekkel kissé megváltozna az ingakar nyugalmi pozíciója. A valóságban a mérési stratégia ennél bonyolultabb, mivel kettős-ingákkal mérünk, és egyetlen Eötvös-ingában 180 fokkal ellentétes pozícióban két független ingaszerkezet működik [2, 3].

Eötvösék az ekvivalencia-mérésekhez a legkülönbözőbb anyagokat, pl. platina, magnárium (Mg-Al ötvözet), kigyófa, réz, azbeszt, faggyú, víz, rádium-bromid, rézszulfát-pentahidrát, stb. használtak. A mérések során jelentős különbséget egyetlen anyagpárra sem találtak, így 10^{-9} pontossággal igazolták a súlyos és a tehetetlen tömeg azonosságát. A mérésekben azonban tapasztalhatók parányi nyugtalanító eltérések. Renner János az 1930-as években más anyagpárokkal megismételte a kísérletet, de anyagfüggést ő sem talált.

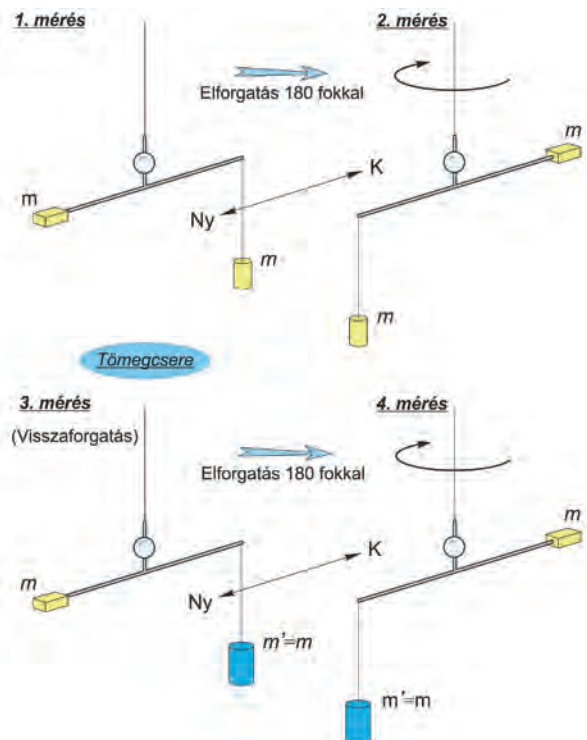
Később, 1986-ban Fischbach és munkatársai az említett eltéréseket vizsgálva arra a következtetésre jutottak, hogy ezek nem teljesen véletlenszerűek, hanem az atommagok kötési energiájának lineáris függvényeként írhatók fel, és felvetették egy rövid hatótávolságú, úgynevezett ötödik erő létezését [4]. Az ötödik erő szerintük a gravitációnál lényegesen gyengébb, a barionok (protonok és neutronok) számával arányos, és hatótávolsága néhány tíz vagy száz méter. A feltételezés komoly vitákat váltott ki, és további méréseket és

ellenőrző kísérleteket motivált. Eötvösék eredményeit részletesen elemezték, új, sokkal pontosabb méréseket is végeztek, de azokban nem mutatták ki a megjósolt Yukawa-jellegű, rövid hatótávolságú ötödik erőt. További más kísérletek során Dicke és munkatársai 10^{-11} , Braginsky és társai pedig 10^{-12} -es pontossággal igazolták az ekvivalencia-elvet. Dicke és munkatársai észak-dél tájolású ingával a Nap tömegvonzása és a Föld keringéséből adódó keringési centrifugális erő viszonyának anyagfüggését mérték, aminek előnye, hogy az ingát, a jel 24 órás periodicitása miatt a mérés során nem kellett forgatni.

Az ekvivalencia-kísérlet újramérése

Az EPF-kísérletben vizsgált ekvivalencia-elv ma újra a kutatások homlokterében áll, a torziós inga továbbra is fontos kérdések eldöntésére alkalmas. 2017-ben fizikus kollégákkal úgy gondoltuk, hogy Eötvös Loránd halálának 100 éves évfordulója tiszteletére a mai modern technikai adottságokat kihasználva megismételjük az ekvivalencia-méréseket. Elhatározásunk akkor vált különösen indokolttá, amikor az előkészületek során tanulmányozva az eredeti méréseket megfejtettük a szabályos eltérések nagy valószínűségű okát. Vizsgálataink szerint az ekvivalencia-mérésekben tapasztalható parányi szabályos eltérés abból adódhat, hogy a próbatest méretével összevethető távolságon a nehézségi erő megváltozása már nem tekinthető egyenletesnek, így a kísérlet eredményét befolyásolja a próbatestek alakja is [5]. Eötvösék méréseiben a felhasznált különböző sűrűségű, henger alakú próbatestek térbeli

4. ábra. Az Eötvös-kísérlet mérési stratégiája a tömegek cseréjével





5. ábra. A mérésekre kész műszerek a BME Általános- és Felsőgeodézia Tanszékén. Balra hátul az AutERBal-, jobbra elől az Eötvös–Pekár-inga

kiterjedése, magassága lényegesen eltérő volt, például a platina henger 6 cm, a magnárium henger 11,9 cm, a kigyófaból készült henger pedig már 24 cm magas volt. Olyan nehézségi erőterben (pl. vastag falak közelében), ahol az erőter változása rövid távolságon belül is jelentős, a kisebb kiterjedésű testekre más erő hat, mint azokra, amelyek nagyobb kiterjedésük miatt más térerősségű helyre is benyúlnak. Az eredeti ekvivalencia-kísérlet annyira érzékeny volt, hogy már egy ilyen kicsiny másodrendű gravitációs hatás is megjelenhetett az eredményekben, amire Eötvösék akkor nem gondoltak.

A tervezett mérések céljára az 5. ábrán látható két különböző típusú Eötvös-inga jöhetett szóba: egy Eötvös–Rybár-féle AutERBal-inga és egy Eötvös–Pekár-féle ún. kettős kis eszköz. Mindkét rendelkezésünkre álló műszert az 1930-as években terepi mérések céljára készítették. Az AutERBal-inga fotóregisztrálással teljesen automatizáltan működött, speciális óraszerkezet vezérelte, a Pekár-inga nem automatizált, tapasztalatunk szerint megbízhatóbb és pontosabb műszer. Első fontos feladatunk az ingák felújítása, javítása, használhatóságuk ellenőrzése, a mai modernebb technikai lehetőségeknek megfelelő átalakítása és kalibrálása volt. Az előkészületek közel 2 évet vettek igénybe. A torziós szálak csavarodási driftjének minimálisra csökkentése céljából a szálakat több mint fél éven keresztül folyamatosan terheltük az ingák kioldott helyzetében. A szálak hosszú idejű terhelésével a Pekár-inga esetében sikerült elérni mindkét

szál gyakorlatilag driftmentes állapotát, így az igen nagy pontossági igényű mérések céljára a Pekár-inga használata mellett döntöttünk. Ráadásul mivel az Eötvös-kísérlet tekintetében fontos szempont az ingában lévő tömegek egyszerű cserélhetősége is, ezért a további fejlesztéseket már csak erre az eszközre koncentráltuk.

A sikeres mérések legfontosabb követelménye a zavaró körülmények minél teljesebb kiiktatása. Az Eötvös-kísérlet méréseit leginkább veszélyeztető hibaforrások a műszert leolvasó személy zavaró tömege, a talajrezgések, a hőmérséklet változása és a nehézségi erőter gradienseinek magas értéke az inga környezetében. Utóbbi probléma egyszerűen kezelhető megfelelő mérési helyszín kiválasztásával és a gradiensek pontos meghatározásával a műszer környezetében. Megfelelő helyszín kiválasztásával biztosítható a környezeti hőmérséklet stabilitása és csökkenthetők az elsősorban forgalom okozta talajrezgések is. Ezek szem előtt tartásával választottuk a KFKI területén a Jánossy Földalatti Fizikai Laboratórium 30 m-es mélységben lévő folyosóját. Méréseink szerint a helyszín hőmérsékleti stabilitása megfelelő, a napi változás mindössze néhány század fok, a mikroszeizmikus talajnyugtalanyságot pedig az Eötvös-inga mellett elhelyezett nagy érzékenységu szejmográffal tudjuk folyamatosan regisztrálni és korrekcióba venni.

A mérések legjelentősebb és legveszélyesebb hibaforrása a műszert kezelő és leolvasó személy jelenléte, elsősorban tömeghatása, ami a rendkívül érzékeny ingaszerkezet nyugalmi helyzetét megváltoztatja. Ugyanakkor az észlelő személy jelenlétével a műszer környezetében a hőmérsékleti egyensúlyt is megbontja és mozgásával egyértelműen érzékelhető talajrezgéseket kelt. A hibaforrás a közvetlen emberi jelenlét kiküszöbölésével, a mérési folyamat teljes automatizálásával, távvezérelt méréssel szüntethető meg.

A Pekár-inga vizuális leolvasásra szolgáló okulárjának helyére a 6. ábrán látható CCD érzékelőt szerelve az inga karjának nyugalmi helyzetét a keletkezett digitális kép kiértékelésével tudjuk meghatározni. Az általunk fejlesztett számítógépes képkiértékelési eljárással egy képpont tört részének megfelelő helyzet is meghatározható, így a leolvasási pontosság egy képről

6. ábra. Távvezérelt forgatási mechanika és az automatizált műszerleolvasás kialakítása az Eötvös–Pekár-ingán.





7. ábra. Az Eötvös-kísérlet újramérése 30 m mélységben a KFKI Jánosy Földalatti Fizikai Laboratóriumában az átalakított Eötvös–Pekár-ingával

nagyjából 1/100 skálaosztás (az eredeti vizuális leolvasás esetén ez csak 1 skálaosztás, a tizedet már csak becsülni lehetett). Ha ehhez hozzávesszük, hogy az inga egyensúlyi helyzetéről nem csupán egyetlen leolvasást tudunk készíteni, hanem hosszabb időn keresztül másodpercenkénti több képet készítve maga a csillapodási görbe is meghatározható, akkor ez további jelentős pontosságnövekedést eredményez. Fejlesztéseinknek köszönhetően közel két nagyságrenddel jobb leolvasási pontosságot tudunk elérni, mint az eredeti vizuális észleléssel.

A mechatronikai megoldások közül a legkritikusabb elem az inga számítógéppel távvezérelt forgatását végző egység elkészítése volt. A forgatómotor vezérlését úgy kellett megoldani, hogy az inga különböző irányokba forgatása pontosan, üzembiztosan, ugyanakkor hirtelen gyorsulások és lassulások nélkül, a rendkívül érzékeny ingaszerkezet szempontjából kíméletesen, mechanikai sokkhatás nélkül történjen. Az inga különböző mérési irányokba forgatásához a 6. ábrán látható szerkezetet készítettük, a forgatásról speciális motor gondoskodik, az inga szabadon futó felső részéhez kapcsolódó bordásszíjas hajtáson keresztül [3]. A legtöbb alkatrész 3D nyomtatással készült. A *Renishaw* optikai enkódergyűrű alkalmazásával az ingaszerkezet különböző irányokba forgatott pozíciójának kiolvasási pontossága szögmásodperc pontossággal lehetséges.

Az átalakított műszerrel hosszan tartó és alapos tesztméréseket és kalibrációs méréseket követően a tényleges új ekvivalencia-mérések 2019. május 14.-én

kezdődtek a földalatti laboratóriumban. A 7. ábrán az átalakított Eötvös–Pekár-ingát láthatjuk. A méréseket eddig arany, sárgaréz és alumínium próbatömegekkel végeztük sok hasznos tapasztalatot gyűjtve a további vizsgálatokhoz. Az adatok előzetes kiértékelése alapján Eötvösök eredeti mérési pontosságát már egy nagyságrenddel felülmúlva 10^{-10} pontossággal tudjuk igazolni az ekvivalencia-elv érvényességét arany, réz és alumínium tömegek esetére. Méréseinket további más anyagok vizsgálatára is kiterjesztjük, a végleges eredmények több éves további kísérletek után várhatók.

Az EPF-kísérlet megismétlése nem csak az említett szisztematikus hibára vonatkozó feltevésünket igazolhatja, hanem új szempontokkal járulhat hozzá a jelenlegi legpontosabb földi mérésekhez. Einstein általános relativitáselmélete eddig minden próbát kiállt, de a nagyon kicsi vagy nagyon nagy távolságokra vonatkozó inverz négyzetes távolságfüggés-tesztet, esetleg az ekvivalencia-elv mérések eredményei felvethetik a teljes érvényességi körének korlátosságát.

A mérésekben és ezek előkészületeiben az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpontja, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Általános- és Felsőgeodézia Tanszéke, Irányítástechnika és Informatika Tanszéke és az Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszéke, valamint az Egyesület a Tudomány és a Technológia Egységéért kutatói és mérnökei vesznek részt más további szervezetek, tanszékek és szakértők bevonásával. A kutatócsapat tagjai: *Ván Péter, Barnaföldi Gergely, Deák László, Fenyvesi Edit, Lévai Péter, Somlai László* fizikusok, *Völgyesi Lajos* geofizikus, *Tóth Gyula* és *Égető Csaba* geodétamérnökök, *Kiss Bálint, Harangozó Péter, Péter Gábor* villamosmérnökök, *Gróf Gyula* gépészmérnök és *Szondy György* villamosmérnök, független kutató.

VÖLGYESI LAJOS

IRODALOM

Nyitókép: Ingák Eötvös eredeti publikációjából [1]

- [1] Eötvös R., Pekár D., Fekete E. (1922): Beiträge zum Gesetze der Proportionalität von Trägheit und Gravität. *Annalen d. Physik*, 11-66.
- [2] Völgyesi L., Szondy Gy., Tóth Gy., Péter G., Kiss B., Deák L., Égető Cs., Fenyvesi E., Gróf Gy., Ván P. (2018): Előkészületek az Eötvös-kísérlet újramérésére. *Magyar Geofizika*, 59/4, 165-179.
- [3] Péter G., Deák L., Gróf Gy., Kiss B., Szondy Gy., Tóth Gy., Ván P., Völgyesi L. (2018): Az Eötvös-Pekár-Fekete ekvivalencia-elv mérések megismétlése. *Fizikai Szemle*, 69/4, 111-116.
- [4] Fischbach E., Sudarsky D., Szafe A., Talmadge C., Aronson S. H. (1986): Reanalysis of the Eötvös experiment, *Physical Review Letters*, 56(11), 3.
- [5] Tóth Gy. (2019): Az Eötvös-Pekár-Fekete ekvivalencia-mérések szabályos hibája. *Fizikai Szemle*, 69/5, 155-188.