

# EÖTVÖS LORÁND IDŐSZERŰSÉGE – 1. rész

## Az ekvivalenciaelv kísérleti ellenőrzése újabb kísérletekkel

Patkós András  
ELTE Fizikai Intézet

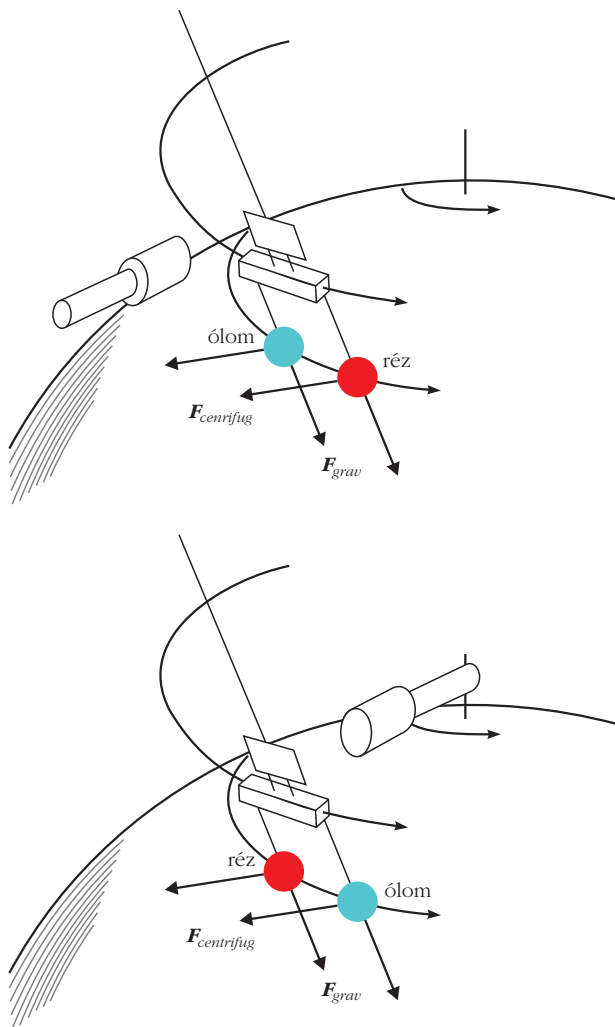
*Mikola Sándor írta az Eötvös Loránd halálának 10. évfordulója alkalmából kiadott Emlékkönyvben [1]: „Báró Eötvös Lorándnak a nehézségi erőre és a felületi feszültségre vonatkozó igazságai ezer év múlva éppolyan igazak és értékesek maradnak, amilyenek ma, még abban az esetben is, ha akkorára a tömegvonzásra és az anyag legkisebb részeire vonatkozó mai fogalmaink meg is szűnnek.”*



*Patkós András (1947) akadémikus az ELTE emeritus egyetemi tanára. Elméleti fizikus, aki a kvantumtérelméletek megoldási módszereit fejleszti, az erős és az elektromágneses anyag fázisátalakulásait, azok kozmológiai szerepét kutatja. Számos tankönyv (társ)-szerzője. Rendszeresen ír tudományos-népszerűsítő cikkeket is.*

A Mikola által célba vett időtáv logaritmikus közepéhez érkezve elmondható, hogy Eötvös tudományos alkotásainak igazságát nem csak nem kérdőjelezte meg a tudományos haladás elmúlt évszázada, de mérőberendezésének konstrukciós koncepcióját változtatlanul, technikai megvalósítását pedig egyre tökéletesítve alkalmazzák a gravitációnak a 20. század elején született új elmélete központi fontosságú elve, az ekvivalenciaelv érvényességi tartományának kiterjesztésére. Azaz Eötvös méréseinek egyre tökéletesedő továbbvitele *Einstein* gravitációs elméletének egyik legfontosabb próbája. E cikk mellett kíván érvelni, hogy ugyan majd fél évszázadnyi késéssel, de Eötvös Loránd tudományos felfogását követve alakult ki a kísérleti gravitációs fizika, az alapvető kölcsönhatások legígéretesebbnek tűnő 21. századi kutatási irányzata.

*Király Péter* 2007-ben részletes cikkben ismertette az ekvivalenciaelvhez kapcsolódó kutatások akkor aktuális helyzetét [2]. Alább friss fizikátörténeti közle-



1. ábra. Az Eötvös-mérés elve. Torziós szárra szimmetrikus felfüggesztéssel egy ólomból és egy rézből készült, azonos súlyú golyót helyeznek el. Mindkét golyóra hat a Föld tömegvonzása és a forgásból származó centrifugális erő. A torziós szárra nyomatéka a két golyóra ható erők forgatónyomatékainak eredőjét kompenzálva alakítja ki az egyensúlyi helyzetet. A golyókat megcserélve, a szál elfordulását eredményezi, ha a tehetetlenségi és súlyos tömeg hányadosa a kétféle anyagra különböző.

mények, illetve az elmúlt évtizedek gravitációs mérés-sorozatairól megjelent összefoglaló cikkek alapján aktualizálom az általa írottakat, majd a közelmúltban elért újabb eredményekkel foglalkozom.

## Eötvös-ingával Galilei és Newton nyomában

A 16. és 17. század fordulóján egyre elterjedtebben próbálkoztak a testek föld felé esése sebességének kísérleti vizsgálatával. *Benedetto Varchi* (1544), majd *Giuseppe Moletti* (1576) is beszámolt ejtési kísérleteiről, amelyek ellentmondtak a korábban kétségbe vonhatatlan arisztotelészi megállapításnak, miszerint a nehezebb testek gyorsabban esnek. *Simon Stevin* 1586-ban *Jan de Grootal* a delfti Nieuwe Kirke 30 méter magas tornyából leejtett különböző súlyú ólomgolyók becsapódásakor keletkező hang egyidejűségé-

ből arra jutott, hogy a testek esési végsebessége azonos. Galilei (1634-ben kiadott) *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche* című munkája abban volt első, hogy a szabadesés matematikai leírását adta és hangsúlyozta, hogy – a légellenállástól eltekintve – a törvény független az anyagi minőségtől. Azt, hogy a tollpihe könnyűségű testek esés helyett felfelé szállnak ő tulajdonította elsőként a légellenállásnak [3]. A szabadesés univerzalitásának (anyagi minőségtől és az anyag mennyiségétől való függetlenségének) tulajdonságát az általános relativitás elmélet gyenge ekvivalenciaelvnek keresztelte.

A gravitációs gyorsulás anyagi minőségtől való függetlenségét Galilei, majd Newton is különböző anyagból készült súlyok ingamozgásának összehasonlításából vonta le. A tehetetlen (a gyorsítással szemben „ellenálló”) és a súlyerővel arányos súlyos tömeg fogalmi különbözőségét Newton fogalmazta meg elsőként. *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* című művének [4] I. meghatározásában írja: „Ingával végzett nagyon pontos kísérletekkel megállapítható, hogy a tömeg a súllyal arányos mennyiség.” Newton különböző anyagból készült pontszerű tömeget hordozó matematikai ingái lengésidejének összehasonlítása ezen arányosság univerzalitásának ellenőrzéseként értelmezendő. Newtont követően *F. Bessel* végzett úgynevezett reverzibilis ingával gravitációs-gyorsulás-méréseket (1832), megerősítve a súlyos és tehetetlen tömeg univerzális arányosságának tulajdonságát.

Eötvös Loránd a két különböző anyagú lengő inga lengésidejeinek összehasonlítása helyett torziós inga két karjára függesztette fel a kétféle anyagból készült mintát. A torziós inga elcsavarodását a két próbatestre ható erők forgatónyomatékának különbsége határozza meg. Ezzel elkerülte az ingás mérések pontosságát korlátozó azon körülményt, hogy a két tömeg önálló lengésidejének különbségében keressen egy kicsiny, nem zérus maradékot. Eljárásával mérései pontosságát Bessel korábbi mérései pontosságának négyszázszorosára finomította [5]. A mérés elvét a műszer szépséges részleteitől megfosztott vázlatos ábra teszi áttekinthetővé (1. ábra).

Az *A* és *B* jelű próbatestekkel végzett mérésekből az úgynevezett *Eötvös-paraméterre* lehet becslést (null-eredmény esetén abszolút értékére felső korlátot) adni:

$$\eta(A, B) = 2 \frac{\left(\frac{m_g}{m_i}\right)_A - \left(\frac{m_g}{m_i}\right)_B}{\left(\frac{m_g}{m_i}\right)_A + \left(\frac{m_g}{m_i}\right)_B}.$$

Itt  $m_g$  a tömegvonzás hatását érzékelő tömeget,  $m_i$  a Newton II. törvényben szereplő tehetetlenségi tömeget jelöli. Eötvös és munkatársai a null-eredménytől való lehetséges eltérésre  $10^{-8}$ – $10^{-9}$  nagyságrendű felső korlátot nyertek [6].

## Növekvő pontosságú Eötvös-típusú kísérletek

A gravitáció modern elméletéhez kapcsolódó kísérleti/megfigyelési gravitációs fizika területén az Eötvös-csoport munkáit követő évtizedekben az általános relativitás elméletét igazoló kis számú klasszikus effektuson (Merkúr perihéliummozgása, fény elhajlása a Nap körül) túl nem volt kiterjedt kutatási program. *Robert Dicke* munkásságáról írott tanulmányában *P. J. E. Peebles* [7] idézi Dicke 1957-ben tartott konferencia-előadásának szövegét [8]: „Szerencsétlen helyzet, hogy az általános relativitáselmélet kísérleti ellenőrzésének helyzete alig jobb, mint néhány évvel annak megalkotása után, mondjuk 1920-ban volt. Ez kiáltó ellentétben van a kvantumelmélettel, amelynek sokezernyi kísérleti ellenőrzését tartják számon.”

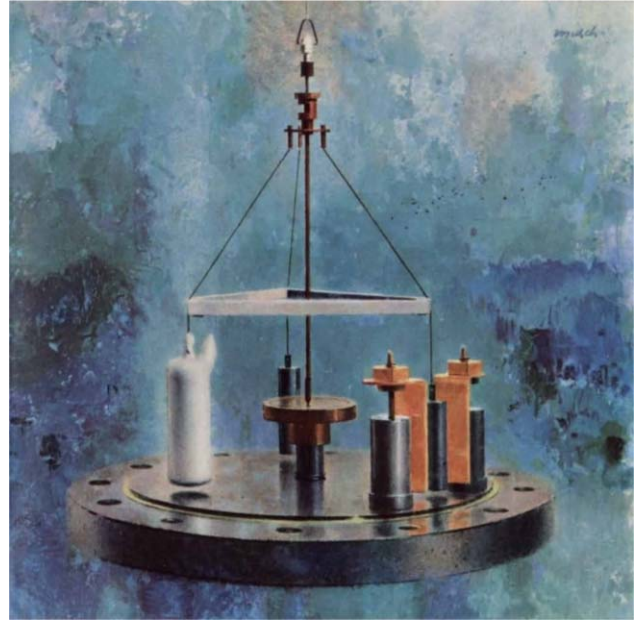
Dicke a kísérleti gravitációs fizika új korszakának elindítására hirdetett programot: „A kísérleti fizika nagy kihívása e helyzet megjavítása. Az elmélet ellenőrzéséhez új kísérleteket kell konstruálni, régebbieket pedig finomítani.” A finomítandó eredményű kísérletek között első helyen a gravitációs gyorsulás modern eszközökkel való újramérését, második helyen pedig az Eötvös-kísérlet megismétlését említette.

Az utóbbihoz kapcsolódóan tette fel azt a kérdést, amelyet ma a tankönyvek az „erős ekvivalenciaelv” érvényességének kérdéseként emlegetnek: „A gravitációs állandó helyről helyre változhat, hiszen a gravitációs energia esetleg másképp járul hozzá a test súlyához, mint az egyéb energiák. Elvben az ekvivalenciaelv sérülhet is, vagy csak közelítőleg lehet igaz. Az Eötvös-kísérletnek éppen ezen a ponton nincs mondanója, mert nem eléggé pontos.” Mai terminológiával az eredeti Eötvös-kísérlet a „gyenge ekvivalenciaelv”, vagy más elnevezéssel az „univerzális szabadesés” nagy pontosságú bizonyítéka.

Előadásában Dicke meg is fogalmazta a javított Eötvös-kísérlet alapötletét: „Feltéve, hogy a gravitációs kötési energia anomálishan járul hozzá a test súlyához (egyáltalán nem vagy éppen túlzottan járul hozzá), egy nagy test gravitációs gyorsulása eltérne egy kis testétől. Az első esetleg megfigyelhető hatás egy kis különbség lenne egy test súlyában, amennyiben a Föld Nap felé eső, vagy azzal ellentétes oldalán mérik meg.”

Végül a princetoni csoport egy jelentősen megjavított stabilitású, hőszigetelésű és adatkiolvasási biztonságú Eötvös-ingát készített (2. ábra). Dicke ötletének megfelelően Föld saját tengelyforgására bízták a két minta Naphoz viszonyított helyzetének felcserélését. Amennyiben az alumínium- és aranyminták Nap-irányú gyorsulása eltérő lett volna, akkor az inga csavarodási szöge időfüggésének Fourier-felbontásában 24 órás periódusú jelet kellett volna találni. A napi periodicitást mutató hatások kiküszöbölése komoly kihívást jelentett, ám végül az Eötvös-paraméterre  $10^{-11}$  nagyságrendű korlátot tudtak adni [9], azaz közel három nagyságrendet javítottak az akkor nagyjából fél évszázados mérési korlátot.

A kísérlet előkészítése során fellépő nehézségeket felismerve Dicke magyar fizikusokkal is kapcsolatot



2. ábra. A Princeton Egyetem Eötvös-ingájának elvi vázlatát a *Scientific American* 1961. decemberi címlapképén. Az alig több, mint 1 század milliméter vastagságú volfrámhuzalon lógó kvarcháromszög-re két arany- és egy alumíniumhengert akasztottak.

keresett. Megkapta az Eötvös, *Pekár* és *Fekete* 1922-es cikkének alapjául szolgáló mérési jegyzőkönyvet, majd később *Renner* egyik méréssorozatát is, amelynek elemzésében *Renner* az EPF-cikk eljárását követte. Az Eötvös–Dicke-mérésként emlegetett mérésükről készült publikáció történetére visszaemlékezve *Peter Roll* a Dicke-től kapott feladatai között hangsúllyal sorolta fel Eötvös és társai, valamint *Renner* adatainak újraelmzését [7].

A moszkvai Lomonoszov Egyetem Fizikai intézetének pincéjében építette fel *Viktor Braginszkij* és munkatársa azt az Eötvös-típusú ingát, amellyel 1972-ben a platina- és alumínium-próbatárgyak Nap felé gyorsuló esésében tesztelték a 24 órás periódus fellépését. *Braginszkij* az öt meglátogató *Anna Nobilinak* még meg tudta mutatni [10] azt az elrendezést, amely szimmetrikusan elhelyezett 4-4 Al- és Pt-próbatestből állt. Az elrendezés speciális geometriájával a gravitációs tér inhomogenitása multipólus-sorfejtésének ötödik kifejtési együtthatóját is kiküszöbölték. A napi periódusú környezeti hatásoktól a Lomonoszov Egyetem alatti sziklába vájt pince védte a berendezést. *Braginszkij* és *Panov* újabb nagyságrenddel közelebb szorította nullához az Eötvös-paraméter értékét [11].

A legszisztematikusabb Eötvös-típusú méréssorozatot Washington Állam Egyetemén, Seattle-ben az *Eric Adelberger* vezetésével dolgozó csoport hajtotta végre. Mérésüket a gyenge ekvivalenciaelvet ellenőrző program *E. Fischbach* (3. ábra) által átfogalmazott stratégiája ösztönözte [12]. Egy véges makroszkopikus hatótávolságú erőter, amely például különböző intenzitással csatolódik a protonokhoz és a neutronokhoz, a gyenge ekvivalenciaelvet sértő Yukawa-potenciállal egészítené ki az általános tömegvonzás Newton-törvényét. Megtalálása (vagy cáfolata) volt *Adelberger* csoportjának célja.



3. ábra. Ephraim Fischbach az 5. erő keresésének kezdeményezésével 1986-ban új életre keltette az Eötvös-kísérletet. A kép az akkor még létezett tihanyi Eötvös-inga gyűjteményben tett 1988-as látogatásakor készült (A *Nat. Geo. Magazine* engedélyével).

A Nap felé gyorsulást mérő korábbi princetoni és moszkvai mérések révén csak a  $10^{11}$  m-nél nagyobb hatótávolságú erők kimutatására lett volna esély. Viszatarterek a Föld gravitációs terében történő szabadesés Eötvös-paraméterére végzett kísérletekhez. A seattle-i laboratórium környezetének gravitációs inhomogenitása lehetővé tette, hogy a hipotetikus Yukawa-potenciál létezését egészen 1 m-es hatótávolságig ellenőrizhessék.

Továbbá meg akartak szabadulni a mérési eredmények pontosságát szisztematikusan korlátozó napi periódusú környezeti zajoktól is. Miután a berendezés alkatrészei (torziós szál, forgótányér stb.) sajátrezgéseikhez való dinamikus csatolódást is meg kívántak

4. ábra. Az Eöt-Wash csoport forgó Eötvös-ingája.



akadályozni, végül mHz periódussal forgó Eötvös-ingával oldották meg a próbatetek ciklikus cserélésének feladatát (4. ábra).

A kísérletekhez 4-4 Be-Ti és Be-Al anyagpárból álló próbatetet alakítottak ki, amelyek rezgésállapotát együttforgó tükrök segítségével 75, illetve 110 napig regisztrálták, majd a jel időfüggésének Fourier-felbontásából felső korlátot adtak a mHz-es spektrális komponens jelenlétére. A múlt év végéig a seattle-i csoport Eötvös-mérés elvén alapuló méréséből származó  $10^{-13}$ -as korlát volt a gyenge ekvivalenciaelv érvényességére vonatkozó legjobb kísérleti eredmény [13].

## Túl az Eötvös-típusú méréseken

### Égitestek szabadesése

Peebles történeti visszatekintése [7] szerint az 1957-es Chapel Hill konferencián tartott előadásában Dicke javaslatot tett a Hold mozgásának nagy pontosságú mérésére is, amely végül a Hold-Föld-távolság hosszú időtartamú lézeres monitorozásához vezetett. Az ehhez szükséges tükröt Dicke javaslatára az Apollo-11 vitte el a Holdra. A tükrő lézersugárral történő megtalálása komoly nehézségek után sikerült (a szovjet Lunohod-1 automata holdraszálló egysége által 1970-ben elhelyezett tükröt 2010-ben találták meg). 1971-ben az Apollo-15 misszió újabb, nagyobb felületű tüköregyüttest helyezett el. (Ekkor végezte el a Galileinek tulajdonított ejtési kísérletet – egyik kezéből egy kalapácsot, másikkal egy madártollat leejtve – *David Scott* a Holdon, lásd <http://fizikaiszemle.hu/extra/1901patkos.mp4>.)

A Földről indított néhány szögmásodpercnyi lézernyaláb a Holdon néhány kilométeresre szélesedik. A tükrőről visszaverődő fotonok a Földön a megfigyelő állomás körüli néhány tíz kilométeres sugarú területre érkeznek, így fejlett eljárásokkal érhető csak el, hogy néhány másodpercenként észleljenek egy-egy visszaverődő foton. A foton körútjának idejét mérve 1969-ben 15 cm-es, jelenleg 1 cm-es pontossággal tudják mérni a Föld-Hold-távolságot.

A két égitest pályájának gravitációs szabadesése a Nap felé összevetve a Lawrence Livermore Laboratórium szuperszámítógépén folyamatosan integrált tisztán newtoni háromtest-mozgásegyenletek megoldásával szintén  $10^{-13}$  nagyságrendű korlátot adott az Eötvös-paraméterre [14]. A két égitest elemösszetételének különbözősége esetén ez a gyenge ekvivalenciaelv teljesülésére ad korlátot, ám a geológusok között erős a tábora az azonos összetételnek, amelyet pártolói a két égitest azonos történeti eredetére alapoznak. Ugyanakkor a Föld súlyos tömegében a gravitációs kötési energia részaránya  $10^{-9}$  nagyságrendű. Ennek alapján viszont az Eötvös-paraméterre vonatkozó korlátból először sikerült korlátot találni az erős ekvivalenciaelv teljesülésének mértékére. A két fenti adat egyszerű kombinálásával a *Lunar Laser Ranging* teszttel  $10^{-4}$  pontosságú bizonyítéokra jutottak!

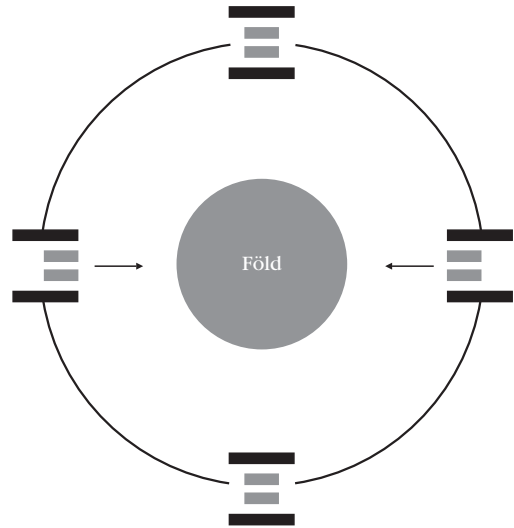
Amennyiben a szabadesés gyorsulásának megfigyelését nagyobb tömegű égitestekkel lehet elvégezni, az erős ekvivalenciaelv érvényességére is erősebb felső korlátot lehet találni. Ezt a mérést valósították meg négyéves megfigyelési munkával 2018 nyarára *M. A. Archibald* és munkatársai [15]. A 2014-ben felfedezett PSR J0337+1715 jelzésű hármas csillagrendszer egy szorosabban kötött neutroncsillag-fehér törpe kettőscsillagból (periódusidő: 1,6 nap), valamint azok gravitációs terében lazábban kötve mozgó második fehér törpéből áll (periódusidő: 327 nap). A két pálya majdnem tökéletesen egy síkba esik és külön-külön nagyon kis excentricitásúak. A mérés célja annak vizsgálata volt, hogy a kettős csillag két (nagyon erősen eltérő barionikus összetételű) tagja azonos gyorsulással esik-e a „magányos” fehér törpe felé? Ha a két objektum gyorsulása különbözne, akkor a hatéves megfigyelés során pályájuk excentricitásának meg kellett volna növekednie. A  $\sim 2 \cdot 10^{-6}$  értékű korlát a gyenge ekvivalenciaelv szempontjából nem „világrekord”. Am a neutroncsillag gravitációs kötési energiája a teljes súlyos tömeg 20%-át is elérheti, így az eredmény az erős ekvivalenciaelv érvényességi korlátját két nagyságrenddel megjavítja. (A jelen szerzőhöz hasonlóan, nemspecialisták az igen tömör közlemény lényegét [16] segítségével foghatják fel.)

### Szabadesési kísérletek mesterséges holdon

A MICROSCOPE (Micro-Satellite à traînée Compensée pour l’Observation du Principe d’Équivalence) francia műholdat 2016 tavaszán állították 710 km magasságú pályájára. Fedélzetén két tökéletesen azonos geometriájú berendezést helyeztek el. Mintatárgyai hengerek, belülről lyukasak, így a kisebb sugarú a nagyobb belsejében helyezhető el. Az egyik berendezésben azonos anyagból (90% Pt, 10% Rh) készült a külső és a belső henger is. Ez a referenciaberendezés. A másikban a belső henger ugyanilyen, a külső viszont (90% Ti, 6% Al és 4% V) összetételű ötvözetből készült. A két hengert a Földön koncentrikusan helyezték el, a külsőt rögzítették, a belső viszont kapacitív elektrosztatikus erővel (tehát mechanikai érintés nélkül) tartható a helyén, ha valamely erők el kívánják mozdítani.

A mérés egyszerű elvét a 5. ábra mutatja. A Föld körüli pálya azon szakaszain, ahol a gravitációs vonzás lényegében a hengerek tengelye mentén hat, a kétféle anyagból készült hengereket tartalmazó berendezésben a belső henger elmozdulna a külsőhöz képest, ha a kétféle anyagra eltérő gravitációs gyorsulás hatna. Ezt ellensúlyozó erők ébrednek, amelyek nagyságának időbeli alakulását regisztrálják. Itt tehát a gravitációs erőt kompenzáló nemgravitációs erők összehasonlításából számítják az Eötvös-paramétert.

A gyenge ekvivalenciát sértő jel a keringési frekvencia kétszeresével jelentkezne (5. ábra). Megfelelő keringési idő választással az erőhatások időmenetének Fourier-spektrumában a napi periódusú zajhatásoktól elkülönült helyen várható a jel. A mikroszonda



5. ábra. A Föld körüli pályán minden fordulat során a belső henger kétszer tud elmozdulni a Föld felé, ha gyorsulása nagyobb, a Földdel ellentétesen, ha a rá ható erő kisebb, mint ami a külső hengerre hat. Az elmozdulást elektrosztatikus jellegű erők fellépése akadályozza. A kompenzáló erő időfüggését hosszú időtávon regisztrálva lehetséges a gyenge ekvivalenciaelvet sértő hatás intenzitásának pontos meghatározására.

a keringési síkjára merőleges tengely körül is megpörgethető, amelynek frekvenciája hozzáadódik (kivonódik) a keringési frekvenciához(ból).

2017 decemberében tették közzé az első 120 teljes fordulat során regisztrált erőhatási amplitúdósorozat feldolgozásának eredményét. Az időfüggés Fourier-transzformáltját képezve meghatározták a forgási frekvenciával modulált frekvenciaértékeknél mért spektrális erősség felső korlátját, amiből az Eötvös-hányados értékére

$$\eta(\text{Ti}; \text{Pt}) = [-1 \pm 9(\text{stat}) \pm 9(\text{syst})] \cdot 10^{-15}$$

adódik. Ez  $10^{-14}$ -es korlátnak felel meg, ami újabb nagyságrenddel megjavítja a legjobb földi méréssel nyert korlátot [17]. A berendezés további egy évre tervezett működése alatt megnövekedő statisztikájával egy újabb nagyságrenddel remélik csökkenteni az Eötvös-hányadosra vonatkozó felső korlátot.

Jelenleg is dolgoznak az űrben még nagyobb,  $10^{-17}$ -es pontossággal végrehajtható ellenőrzés fejlesztésén [18] (és folytatják a szükséges milliárd eurós finanszírozás elnyeréséért folytatott meggyőző „hadjáratot”).

### A gyenge ekvivalencia sérülésének elméleti részecskefizikai vonatkozásai

Milyen határig van értelme az ekvivalenciaelv teljesülési pontossága ellenőrzésének? Alább *P. Fayet* cikke [19] nyomán a vizsgálódás elméleti részecskefizikai érdekességét szeretném vázolni.

A standard részecskefizikai elméleten túli alapvető kölcsönhatások között mind a húrelméletek, mind a szuperszimmetrikus elméletek elvezetnek egy úgynevezett „sötét foton” létezéséhez. Ez az erőter a mak-

roszkopikus anyag töltésjellegű mennyiségeinek (azaz a  $Q$  elektromos töltés, a  $B$  barionikus töltés és az  $L$  leptontöltés) valamilyen kombinációjához csatolódnak. Az általa közvetített kölcsönhatás igen kis mértékben (ezt a kicsinységet alább számszerűen is jellemezni fogjuk) keveredik az elektromágneses kölcsönhatással, ezért érdemes az anyagnak a sötét fotonhoz való csatolódási erősségét az  $e$  elektromos egységöltés arányában kifejezni:

$$Q_{\text{sötét}} = (\varepsilon_Q Q + \varepsilon_B B + \varepsilon_L L) e.$$

Az  $\varepsilon_i$  mennyiségek jellemzik az egyes töltésekhez való csatolás erősségét az elektromágneses csatolás erősségének arányában. A sötét foton a Föld és a próbatest között (a gravitációval egyszerre) Coulomb-típusú potenciált hoz létre (az azonos előjelű testek taszítják egymást):

$$V_{\text{sötét}} = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r} (\varepsilon_Q Q + \varepsilon_B B + \varepsilon_L L)_{\text{Föld}} \cdot (\varepsilon_Q Q + \varepsilon_B B + \varepsilon_L L)_{\text{próba}}.$$

A nagy hatótávolságból származó exponenciális tényező nem játszik szerepet az alábbi nagyságrendi elemzésben, ezért nem törődünk vele.

A fenti potenciálból származó gyorsulás a tömegvonzási gyorsulásra szuperponálódva éppen azért sérti a szabadesés univerzalitását, mert az az anyag fenti kombinációval jellemzett töltésállapotától függ. A teljes gyorsulás

$$g \rightarrow a_{\text{próba}} = (1 + \delta_{\text{próba}}) g$$

módon változik meg, ahol

$$\delta_{\text{próba}} = \frac{V_{\text{sötét}}}{V_{\text{grav}}}.$$

Az Eötvös-paraméterre világos módon fennáll az egyszerű kapcsolat:

$$\eta(A, B) = \delta_A - \delta_B.$$

Mivel a próbatestek semlegesek a sötét foton által közvetített erőhatásban az elektromos  $Q_A$  és  $Q_B$  töltéshez csatolódo rész nem játszik szerepet. Egyszerű bővítéssel a potenciálok hányadosát két proton kölcsönhatásának hányadosával lehet kifejezni:

$$\delta_A = - \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 G_N m_p^2} \left( \frac{m_p}{u} \right)^2 \cdot \frac{(\varepsilon_B B + \varepsilon_L L)_{\text{Föld}}}{m_{\text{Föld}}/u} \frac{(\varepsilon_B B + \varepsilon_L L)_A}{m_A/u},$$

ahol  $u$  az atomi tömegegység (egyezség szerint a  $^{12}\text{C}$  mag tömege:  $12 u$ ). A továbbiakban az  $m/u$  relatív

atomtömegeket  $A_r$ -rel jelöljük. Az első két tényező óriási számtényezőt ad:

$$\delta_A = -1,2536 \cdot 10^{36} \left( \varepsilon_B \frac{B}{A_r} + \varepsilon_L \frac{L}{A_r} \right)_{\text{Föld}} \left( \varepsilon_B \frac{B}{A_r} + \varepsilon_L \frac{L}{A_r} \right)_A.$$

A Föld anyagának összetételére modellt alkotva, az első tényezőben az  $\varepsilon$  keveredési együtthatók melletti számfaktorok megbecsülhetők, így az Eötvös-paraméterre

$$\eta(A, B) \approx -1,2546 \cdot 10^{36} (\varepsilon_B + 0,4866 \cdot \varepsilon_L) \cdot \left( \varepsilon_B \Delta \frac{B}{A_r} + \varepsilon_L \Delta \frac{L}{A_r} \right)$$

adódik, ahol  $\Delta$  a két próbatest megfelelő adatainak különbségét jelöli. A MICROSCOPE kísérletben használt Pt- és Ti-ötözetre Fayet a következő becslésre jut [19]:

$$\eta(\text{Ti, Pt}) \approx -1,2546 \cdot 10^{36} (\varepsilon_B + 0,4866 \cdot \varepsilon_L) \cdot (0,00079 \cdot \varepsilon_B + 0,05704 \cdot \varepsilon_L).$$

A legnépszerűbb elméletváltozatokban a sötét foton vagy tisztán a barionszámhoz, vagy tisztán a leptonszámhoz, vagy a  $B-L$  különbséghez csatolódnak. Utóbbi az atomos anyag esetében a neutronok sűrűségéhez való csatolódást jelenti. Mindegyik esetében az Eötvös-paraméternek az ekvivalenciaelvet sértő értékére adott korláttal a sötét foton és a standard erők közötti keveredés effektív paraméterére adódik korlát. A MICROSCOPE korlátból akár a bariontöltés révén, akár a leptontöltés révén nagyságrendileg az  $\varepsilon \approx 10^{-24}$  nagyságrendű keveredési erősség adódik.

Van-e bármilyen esély, hogy ilyen hihetetlenül csekély keveredési intenzitás adódjék elméleti megfontolásból (vagy még ennél is kisebb, ha a mérési pontosság további javulásával újabb nagyságrendekkel csökkenne az Eötvös-paraméterre vonatkozó korlát)?

Fayet cikke a szuperszimmetrikus elméletek azon tulajdonságára mutat rá, amely szerint a standard és nemstandard kölcsönhatás közötti keveredést általában az elmélet két lényegesen eltérő jellemző energiakálájának hányadosa határozza meg. A szuperszimmetrikus részek várt (remélt) tömegskálája  $m_{\text{SUSY}} \approx 1-10 \text{ TeV}$ , míg az elmélet egészére az átfogó egységes elmélet skálája jellemző:  $A \approx 10^{12}-10^{14} \text{ TeV}$ , ahol az összes elemi kölcsönhatás egyetlen egységes alapvető kölcsönhatásban egyesül. A keveredési  $\varepsilon$  paraméter a kettő hányadosának négyzetével arányos, ami éppen a jelenleg vizsgált tartományba esik!

A gyenge ekvivalenciasérülés skálájának megtalálása olyan eszköz a standard modellen túllépő részecskefizikai elméleti modellek ellenőrzésére, amely a gyorsító részecskeeltetés tartományán túl eső tartományokról is adhat információt.

## Záró megjegyzés az Eötvös-mérés fizikatörténeti helyéről

Érdemes rámutatni, hogy az Eötvös-mérést kiemelkedő személyiségek sora kapcsolja a modern asztrofizika legnagyobb jelentőségű kísérleti vállalkozásaihoz. 1965-ben posztdoktori kutatóként Dicke irányításával dolgozott Rainer Weiss, aki 2017-ben a gravitációs hullámok felfedezéséért kapott Nobel-díjat. Érdemes hosszabban idézni a Peebles-szel folytatott interjújának egy jelen cikk témájához illeszkedő részét:

„Dicke Eötvös-kísérletének kulcs gondolata volt, hogy alacsony zajú szenzorok jeleit visszacsatolta a mechanikai berendezés (az inga) csillapítására és helyzetének meghatározására. A berendezés helyzetének rögzítése és azon – időben változó – erő használata a fizikai információ kiolvasására, amellyel azt helyzetében rögzítette, Dicke Eötvös-kísérletét követően sok nagy pontosságú mechanikai mérés kulcsmomentuma lett. A visszacsatolással elérte, hogy a rendszer a lineáris válasz tartományában maradt és az ügyes megvalósítással a szerkezet nemlinearitásával potenciálisan gerjeszthető normálmódusokat el tudta nyomni. Ezzel lecsökkentette a mérés fizikai információt tároló módusának zaját. A LIGO sok ezer ilyen visszacsatolást tartalmaz.”

E megjegyzés fényében elég természetes, hogy 1993-ban Viktor Braginszkij csoportja is csatlakozott a LIGO-kooperációhoz. 2016-os elhunytakor az orosz sajtó a gravitációs hullámok társfelfedezőjeként emlékezett meg róla. Az Eöt-Wash csoport torziós méréseknél fellépő zajok kiszűrésére konstruált eszközei/eljárásai természetes úton vezettek például az Advanced LIGO szeizmikus szigetelési stratégiájának kidolgozásában való részvételükhöz.

Az Eötvös-mérést a tudományos világ a nagy pontosságú kísérleti gravitációs fizika történetének kiindulópontjaként tartja számon. Ezt a vélekedést látványosan megerősíti az elmúlt fél évszázad Eötvös-típusú mérései és a ma legnagyobb figyelmet elnyerő gravitációs kutatási irányok közötti személyi folyamatosság is.

## Irodalom

1. Mikola Sándor: Báró Eötvös Loránd tudós egyénisége, in: *Báró Eötvös Loránd Emlékkönyv*. A gr. Vigyázó-vagyon jövedelmének felhasználásával kiadta a Magyar Tudományos Akadémia, 1930 (szerk. Fröhlich Izidor) 261–286.
2. Király Péter: A 100 éves Eötvös–Pekár–Fekete kísérletek és máig tartó hatásuk. *Fizikai Szemle* 57/1 (2007) 1–6.
3. G. Galilei műveiből és valós cselekedeteiből leszűrt tudománytörténeti jelentőségét összefogottan méltatja Simonyi Károly *A fizika kultúrtörténete* című könyvének 3.3 fejezete (199. oldal, 5. kiadás, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2011)
4. I. Newton: *A Principiából és az Optikából, Levelek Bentleyhez.* (válogatta Heinrich László) TÉKA, 1981.
5. R. v. Eötvös: Über die Anziehung der Erde auf verschiedene Substanzen. *Mathematische und naturwissenschaftliche Berichte aus Ungarn* 8 (1889) 65.
6. R. v. Eötvös, D. Pekár, E. Fekete: Beiträge zum Gesetze der Proportionalität von Trägheit und Gravität. *Annalen der Physik* 68 (1922) 11.
7. P. J. E. Peebles: Robert Dicke and the naissance of experimental gravity physics. *Eur. Phys. J. H* 42 (2017) 177–259.
8. R. H. Dicke: The Experimental Basis of Einstein's Theory. In: *Proc. of 1957 Chapel Hill Conference on the Role of Gravitation in Physics.* (ed. B. DeWitt) 5–12.
9. P. G. Roll, R. Krotkov, R. H. Dicke: The equivalence of inertial and passive gravitational mass. *Ann. Phys.* 26 (1964) 442–517.
10. A. M. Nobili, A. Anselmi: Relevance of the weak equivalence principle and experiments to test it: lessons from the past and improvements expected in space. *Physics Letters A* 382 (2018) 2205–2218.
11. V. B. Braginsky, V. I. Panov: Verification of the equivalence of inertial and gravitational mass. *Sov. Phys. JETP* 34 (1972) 463–466.
12. E. J. Fischbach: The fifth force: a personal history. *Eur. Phys. J. H* 40 (2015) 385–467.
13. T. A. Wagner, S. Schlamminger, J. H. Gundlach, E. G. Adelberger: Torsion-balance tests of the weak equivalence principle. *Classical and Quantum Grav.* 29 (2012) 184002.
14. J. G. Williams, S. G. Turyshev, D. H. Boggs: Lunar laser ranging tests of the equivalence principle. *Classical and Quantum Gravity* 29 (2012) 184004.
15. M. A. Archibald, N. V. Gusinskaia, J. W. T. Hessels, A. T. Deller, D. L. Kaplan, D. R. Lorimer, R. S. Lynch, S. M. Ransom, I. H. Stairs: Universality of free fall from the orbital motion of a pulsar in a stellar triple system. *Nature* 559 (2018) 73–76.
16. C. M. Will: General relativity passes another test. *Nature* 559 (2018) 40–41.
17. P. Touboul et al.: MICROSCOPE Mission: First Results of a Space Test of the Equivalence Principle. *Phys. Rev. Lett.* 119 (2017) 231101.
18. A. M. Nobili, A. Anselmi: Testing the equivalence principle in space after the MICROSCOPE mission. *Phys. Rev. D* 98 (2018) 042002.
19. P. Fayet: MICROSCOPE limits for new long-range forces and implications for unified theories. *Phys. Rev. D* 97 (2018) 055039.

# SZÁMÍTUNK RÁD, LÉGY



## A FIZIKA BARÁTJA!

Támogasd adód 1%-ával az Eötvös Társulatot!

Új adószámunk: 19815644-2-43