

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Matematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította
A Matematikai és Fizikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

LVII. évfolyam

1. szám

2007. január

A 100 ÉVES EÖTVÖS–PEKÁR–FEKETE KÍSÉRLETEK ÉS MÁIG TARTÓ HATÁSUK

Király Péter

KFKI RMKI Kozmikus Fizikai Főosztály

Eötvös Loránd 1905-ben lemondott akadémiai elnöki tisztéről, hogy a továbbiakban tudományos kutatásainak szentelhesse idejét és erőfeszítéseit. Az ezt követő évben három olyan fontos esemény is volt Eötvös életében, amelyek centenáriumát akár külön-külön is megünnepelhetnénk:

- Nemzetközi konferencián ismertette és elismertette módszereit és eredményeit;
- Ígéretet kapott további kutatásai rendszeres, bőkezű magyar állami támogatására;
- A Göttingeni Egyetem pályázatot írt ki, melynek elnyeréséért kísérletekbe kezdett.

Bár Eötvös számára talán az első két esemény fontosabbnak tűnhetett, a máig tartó hatások szempontjából a harmadiknak volt legnagyobb jelentősége.

A *Nemzetközi Földmérés* (Internationale Erdmessung), a mai *International Union of Geodesy and Geophysics* szervezet (IUGG) elődje, 1906-ban Budapesten rendezte 15. kongresszusát, amelyen Eötvös nagy sikerű előadást tartott módszereiről, addigi eredményeiről és az általa kifejlesztett műszerekről. Ezen meg tudta győzni a nemzetközi szervezet vezetőit, hogy az általa kifejlesztett „csavarási mérleg” vagy későbbi nevén Eötvös-inga segítségével nemcsak a Föld gravitációs sívőfelületeinek helyi jellemzőit tudja igen pontosan meghatározni, de a messze a talajszint alatti, eltemetett hegységek jelenlétére és alakjára is következtetni képes. Arad környékén terepi méréseken is bemutatta módszerei hatékonyságát.

A *Nemzetközi Földmérés* vezérkara a hallottak és látottak hatására azzal a kéréssel fordult a magyar kormányhoz, hogy Eötvös nagy fontosságú munkáit hatékonyan támogassa. A megítélt évi 60 ezer aranykoronás támogatás, amely az Eötvös-tanszék teljes állami juttatásainak mintegy 15-szörösét tette ki, nagyban segítette a

terepi munkákat, a műszerfejlesztést, sőt további munkatársak alkalmazását is lehetővé tette. A támogatással beszerzett tárgyakat a tanszék berendezésétől elkülönítve kellett leltározni, ami az e témákkal foglalkozó csoportnak bizonyos függetlenséget is biztosított. E csoportból nőtt ki Eötvös halála után a hazai geofizikai kutatásokat irányító önálló intézet, a mai Eötvös Loránd Geofizikai Intézet (ELGI) elődje.

A *Nemzetközi Földmérés* szervezetének egyik alapvető célkitűzése a Föld alakjának minél pontosabb meghatározása volt. De mit is jelent a Föld alakja? A tengereken az átlagos vízszint – bizonyos zavaró tényezőket elhanyagolva – mindenhol merőleges a gravitációból és a Föld forgása okozta centrifugális erőből összetevődő „nehézségi” erőre, vagyis az alakot a nehézségi erő tengerekre simuló szintfelülete adja. Kézenfekvő ezt a definíciót a szárazföldekre is kiterjeszteni. Ezért beszélhetünk a szárazföld belsejében is „tengerszint feletti magasságról”.

Némi fizikusi szőrszálhasogatással felvethető azonban az a kérdés, hogy csak a vízre, vagy minden anyagra azonosak-e a szintfelületek. A tehetetlen és súlyos tömeg szigorú arányossága esetén igen, de jogosan merül föl a kérdés, hogy ha a különböző anyagokra az arány kicsit más lenne, akkor mennyire térnének el egymástól a szintfelületek. Eötvös először az 1880-as évek végén, a torziós inga egy kezdeti változatával végzett méréseket különböző anyagok tehetetlen és súlyos tömegének arányosságára nézve. Már ekkor minden korábbinál nagyságrendekkel pontosabban, mintegy 5×10^{-8} relatív hibával bizonyította a vizsgált anyagokra az arányosságot. Ha az adott anyagokra a nehézségi erő szintfelületeit az Egyenlítőnél egybeejtjük, akkor a sarkoknál azok legfeljebb 0,7 mm-re térhetnének el egymástól, vagyis földmérési (geodéziai) szempontból teljesen kielégítő pontossággal igaz, hogy a Föld alakját (a geoidot) függetlenül tekinthetjük attól, hogy milyen anyagra vonatkozó szintfelülettel definiáljuk.

A cikk az MTA XI. Osztálya és az ELFT közös ünnepi ülésén 2006. november 22-én elhangzott előadás alapján készült.

A pontosság elég a geodétának, de kérdés, hogy kielégítheti-e a fizikust is. Hiszen a newtoni tömegvonzás egyik alapvető feltevéséről van szó. Eötvös korai kísérletei után minden bizonnyal többször visszatért ehhez a kérdéshez, de újabb, pontosabb vizsgálataihoz a döntő lökést a Göttingeni Egyetem Beneke-díj pályázatának 1906-os kiírása adta. A pályázat kiírása és a díj átadása között mindig három év telt el. A kiírásban Eötvös kifinomult módszereire explicite utaltak, és hangsúlyozták annak fontosságát, hogy a kérdést a fizika időközben tett fontos felfedezéseinek (elektrodinamika, radioaktivitás) fényében újra megvizsgálják. A Beneke-díj bizottság elnöke ekkor *Karl Runge*, a világ első alkalmazott matematika tanszékének vezetője volt, aki numerikus matematikában elért eredményei mellett (Runge–Kutta módszer) *Planck* barátja és a hidrogén-spektrum matematikai leírásának szakértője is volt.

Az Eötvös–Pekár–Fekete (EPF) és a későbbi Renner-kísérletek

A pályázat kiírása Eötvös számára minden bizonnyal elégtételt és kihívást is jelentett. Az új kísérletsorozatban ő már valószínűleg főleg irányítóként és konzulensként vett részt, míg magukat a hosszadalmas méréseket munkatársai végezték. Mivel a kora nyártól késő őszig terjedő időszakban a kutatók minden idejét a terepi, geodéziai és geofizikai célú mérések töltötték ki (melyeket *Pekár Dezső* vezetett), a pályázattal kapcsolatos munkák a téli és kora tavaszi időszakra összpontosulhattak. Kivétel 1908-ban lehetett, amikor a csak 1922-ben megjelent összefoglaló cikk [1] tanúsága szerint a sürgető beadási határidő miatt a kísérletek nyáron is folytatódtak. Sajnos a részletes mérési jegyzőkönyvek elvesztek, sőt maga a benyújtott pályázat sincs már meg, noha *Selényi Pál*, Eötvös 1953-ban megjelent összegyűjtött munkáinak [2] szerkesztője még annak alapján pótolta néhány az 1922-es cikkből kihagyott részt.

Az EPF-kísérletek alapkonceptiója ugyanaz volt, mint Eötvös korai mérésinél. Ha a gravitációs és tehetetlenségi erő aránya anyagfüggő, akkor különböző anyagokra kicsit más irányú a nehézségi gyorsulás. Egy kelet–nyugati irányban felállított, két végén két különböző összetételű anyaggal terhelt torziós ingára emiatt forgatónyomaték hat, amely az inga 180° -os elforgatásakor ellenkező előjelűvé válik. Ezt a kis különbséget kellett különválasztani a gravitációs potenciál második deriváltjai miatt fellépő, az inga irányától függő nyomatéktól. A korai méréseknél Eötvös rúd alakú, először Coulomb-ingának, majd görbületi variométernek nevezett ingát használt, amivel elég volt két (K–Ny és Ny–K) irányban mérni. Később kifejlesztette a ma Eötvös-ingának nevezett horizontális variométert, amelynél az egyik oldalon lévő tömeg mélyebben helyezkedik el, és amellyel a nehézségi potenciál második deriváltjait sokkal részletesebben tudta kimérni (2 helyett 4 összetevőt). Mivel az 1900-

as években a terepi mérésekhez már szinte kizárólag horizontális variométereket használtak, az EPF-kísérleteket is ilyenekkel végezték. A derivált tenzor összetevőit emiatt csak akkor lehetett a mérési eredményekből algebrailag kiküszöbölni, ha legalább négy irányban mértek (a fentiek mellett É–D és D–É irányban is). További komplikációt jelentett, hogy az inga érzékenysége, valamint a környezet gravitációs hatása (pl. esőzések vagy a pincében felhalmozott szénmennyiség változása miatt) a hosszú mérésorozat folyamán fokozatosan megváltozhat. Eötvös munkatársaival három mérési módszert dolgozott ki, amelyek e zavaró hatásokat egyre nagyobb mértékben küszöbölték ki. Emellett a kiértékelésnél interpolációs technikákkal igyekeztek a maradék változások hatását minél jobban csökkenteni.

Az EPF-kísérletek végül körülbelül egy nagyságrenddel szigorúbb felső korlátot adtak különböző anyagpárok esetén a súlyos és tehetetlen tömeg arányának lehetséges eltéréseire, mint Eötvös korai mérései. Szignifikánsnak tekintett eltérést sehol sem találtak. A Föld irányában ható nehézségi gyorsuláson alapuló módszer mellett végeztek egy mérést a Nap irányában ható gyorsulások összehasonlítására is. Ehhez az ingát É–D irányba kellett beállítani, és az inga járásában napi periodicitást kellett keresni. Ilyen periodicitást persze más (pl. hőmérsékleti) változások is okozhatnak, ezért a mérést két azonos anyaggal is el kellett végezni. Itt valamivel kisebb pontosságot értek el, de eltérést itt sem találtak. Emellett vizsgálták, hogy leárnyékolható-e a gravitáció, és hogy radioaktív anyagoknál sérül-e a tehetetlen és súlyos tömeg arányossága, mint ahogy azt egyes szerzők állították. Mindkét esetben a várt negatív eredményre jutottak. Az „ars longa, vita brevis” jellegű pályázat benyújtása után a három szerző 1909-ben elnyerte a Beneke-díjat. Jellegük arra utalt, hogy a mérések pontossága további vizsgálatokkal még fokozható.

Az EPF-kísérletek eredményeiről először Eötvös számolt be nyilvánosan a *Nemzetközi Földmérés* 1909-ben tartott 16., londoni kongresszusán. Mivel az előadás fő témája a torziós ingával végzett hazai geodéziai vizsgálatok leírása volt, csak röviden beszélt a nehézségi erő szintfelületeinek esetleges anyagfüggéséről. A mérési elvek és régi mérési eredményei ismertetése után csak megemlítette az új méréseket, melyek pontosságaként a 10^{-8} értéket adta meg. Eötvös 70 éves születésnapja alkalmából, 1918-ban *Pekár Dezső* és *Fekete Jenő* írt kissé részletesebben az EPF-kísérletek módszereiről és eredményeiről, de a részletes beszámoló, mint már említettük, csak 1922-ben jelent meg [1].

Renner János, aki a pályázatot követő években kapcsolódott be a csoport munkájába, majd később a Fásori Gimnázium nagy tekintélyű fizikatanára és igazgatója is lett, az 1930-as évek elején jobb eszközökkel és kevésbé feszítő időkorlátokkal lényegében megismételte az EPF-kísérleteket (bár természetesen a vizsgált anyagpárok és a mérések egyes részletei eltértek a korábbiaktól). 1935-ben magyar nyelven (német összefoglaló-

val) közölt dolgozata [3] szerint még egy nagyságrendet tudott javítani az EPF-kísérletek eredményén, és ennél pontosabb eredményeket az adott módszerekkel már nem is igen tartott lehetségesnek. A kétféle tömeg arányában ő sem talált sehol szignifikáns eltérést.

Eötvös eredményei és Einstein ekvivalenciaelvé

Einstein 1907-ben mondta ki ekvivalenciaelvét, amelynek alapján később az általános relativitás elmélete és a gravitáció geometriai interpretációja megszületett. Az, hogy szabadon eső liftben és gravitációmentes térben végzett nem-gravitációs kísérletek bizonyos megszorításokkal mindig ugyanarra az eredményre vezetnek, feltételezi a tehetetlen és súlyos tömeg arányosságát, de annál szélesebb jelenségkörre terjed ki. Einstein visszaemlékezései szerint az ekvivalenciaelv megfogalmazásakor nem volt tudatában Eötvös eredményeinek, hanem a kétféle tömeg azonossága inkább evidenciaként, intuitív igazságként élt tudatában. Az EPF-eredményekről már csak azért sem tudhatott, mert azok akkor még meg sem születtek. Elvileg azonban tudhatott volna Eötvös korai eredményeiről, amelyek az összes addigi mérések közül messze a legpontosabbak voltak.

Albert Einstein érdeklődése valószínűleg csak néhány évvel később fordult az ekvivalenciaelv kísérleti igazolása felé, amikor a gravitáció relativisztikus elméletével kapcsolatos vitákban felmerült az a kérdés, hogy a radioaktív bomlásnál felszabaduló energiára is érvényes-e a tehetetlen és súlyos tömeg arányossága. Einstein e kérdés kapcsán 1912-ben levélben fordult *Wilhelm Wien*hez, a Wien-féle eltolódási törvény felfedezőjéhez (aki 1911-ben kapott Nobel-díjat). Először ingaméréseket javasolt uránból és ólomból készült ingák lengésidejének összehasonlítására, és azt kérdezte, hogy Wien szerint elérhető-e ezekkel a szükséges pontosság. Majd új ötletként felvetette, hogy közönséges ingák helyett torziós ingával pontosabban elvégezhető lenne a mérés, és szinte szóról szóra felvázolta a korai Eötvös-kísérletek koncepcióját, sőt „ötletét” a görbületi variométer vázlatos rajzával is illusztrálta [4]. Még azt is felvetette, hogy Wien ezt a fontos kísérletet (*experimentum crucis*) végeztesse el laboratóriumában. Wien e levélre adott válasza nem került elő hagyatékából. Az viszont kétségtelen, hogy Einstein 1913-ban *Marcel Grossmann*-nal közösen írt cikkében már hivatkozik a korai Eötvös-kísérletekre, azok pontosságát is megadva. Arról, hogy e régi kísérletekre és a hivatkozott Eötvös-cikkre Wien, Grossmann, vagy esetleg más hívta fel figyelmét, legfeljebb találgathatunk. Az viszont mindenképpen meglepő, hogy 1912-ben saját ötletként éppen Eötvös zseniális módszerét javasolta, és felvetődhet a gyanú, hogy a méréseket valaki már korábban is említhette neki, de erről közben elfelejtkezett. Eötvös más irányú tevékenységéről egyébként tudott, hiszen nem sokkal korábban közölt cikket a kapillaritás Eötvös-törvényéről.

Einstein a potsdami geodéziai intézet igazgatójának halála után 1917-ben tanácsot kért Eötvöstől az utódlás kérdésében. Eötvös részletes javaslata után Einstein viszontválaszában köszönetet mondott neki azokról a kutatásaiért is, amelyek során a súlyos és tehetetlen tömeg arányosságát igazolta. Emellett elküldte neki könyvét, amelyben „e kérdés elméleti vonatkozásaival foglalkozik”.

Ekvivalenciaelv kísérletek 1960 és 1986 között

Renner János kísérletei után az 1960-as évek elejéig a fizika szinte minden területén jelentősen fejlődött a kísérleti technika, de a súlyos és tehetetlen tömeg arányosságának kérdésében nem volt számottevő előrehaladás. Maga az Eötvös-inga közben a nyersanyagkutatásban óriási jelentőségre tett szert, és Eötvös munkatársai (különösen Pekár Dezső és Fekete Jenő) alaposan kivették részüket mind az inga fejlesztéséből és exportra való gyártásából, mind a világ különböző tájain végzett olaj- és földgázkutatásokból. A 30-as évek végétől a gyorsabb graviméteres módszerek nyugaton egyre inkább kiszorították a torziós ingát a nyersanyagkutatásból, de keleten az embargó miatt ez az átállás egészen az 50-es évekig nem történt meg.

A 60-as években az ekvivalenciaelv első modern módszerekkel történő ellenőrzése *Robert Dicke* nevéhez fűződik, aki a gravitációelmélet, a csillagászat és az optika területén is számos újszerű elmélettel és technikai újítással vonta magára a figyelmet. Princetoni csoportjával együtt alaposan felkészült a feladatra, s ennek során a régi EPF- és Renner-mérések kritikai elemzésével is behatóan foglalkozott. 1961 januárjában *Jánosy Lajos* levelet kapott Princetontól egyik barátjától, aki felhívta figyelmét Dicke tervezett kísérletére, és arra kérte, hogy próbáljon kapcsolatot teremteni Dicke és Renner között, hogy a majdnem 30 éves Renner-kísérletek néhány homályos pontját tisztázhassák. Mint később kiderült, elsősorban e kísérletek pontossága és a kiértékelés módja terén voltak kételyeik.

Renner biztosította őket, hogy a zavaró hatások kiküszöbölése és a kiértékelés terén is lényegében ugyanúgy járt el, mint Eötvös, de jobb ingája volt és hosszabb mérési sorozatai. Elküldte nekik egyik mérésorozatának teljes adatsorát és kiértékelését, amit Dicke munkatársai lelkiismeretesen átszámoltak (e leveleket és a számolásokat később Renner hagyatékában, az MTA levéltárában találtam meg). Fő kritikájuk arra irányult, hogy Renner (mint valószínűleg korábban Eötvös is) a korábbi és későbbi mérésekből interpolált inga-leolvasásokat is független mérésenként kezelte, ami az adatok hibáit korrelálttá tette. Emiatt az átlag valódi mérési hibája az eredetileg számítottnál nagyobb (a Dicke-csoport szerint 2-es, illetve 3-as faktorral, saját későbbi számításaim szerint 2,4-es faktorral). E megnövelt hibákhoz képest viszont a Renner által különböző anyagpárookra megadott eltérések

túl kicsik. Ennek oka nem tisztázódott, ami később oda vezetett, hogy Renner eredményeit nem fogadták el teljes értékűnek.

Dicke és csoportja szimmetrikusabb torziós ingát használt, és Nap irányú gyorsulás alapján ellenőrizte az ekvivalenciaelvet; mintegy 10^{-11} relatív pontosságot ért el [5]. Néhány évvel később *Braginsky* és *Panov* Moszkvában hagyományosabb, de igen hosszú lengésidejű ingákkal állításuk szerint 10^{-12} pontosságot ért el [6], szintén Nap irányú gyorsulást felhasználva.

Az ekvivalenciaelv még erősebb formáját ellenőrizte az a kísérletsorozat, amely az Apolló-program során Holdra juttatott fényviszszaverő tükröket használt fel. A távolságok pontos mérésével ellenőrizhető, hogy a Föld és Hold ugyanolyan gyorsulással „esik”-e a Nap felé, noha tömegükben a gravitációs kötési energia hányada nagyon különböző. A ma már 10^{-13} relatív pontosságú mérések szerint a két test ugyanúgy esik, és a kötési energiára is nagy pontossággal érvényes a súlyos és tehetetlen tömeg arányossága. E pontos mérések alapján úgy tűnt, hogy az EPF- és Renner-mérések eredményei túlhaladottakká váltak, és már csak történeti jelentőségük van. Egy új hipotézis azonban rácaffolt erre a feltételezésre.

Az „ötödik erő” hipotézise és az EPF-kísérletek reneszánsza

1986-ban jelent meg *Ephraim Fischbach* és munkatársai cikke az „ötödik erő” hipotéziséről [7]. Nagy meglepetést keltett, hogy az új, anyagösszetételtől is függő, Yukawa-típusú távolságfüggést mutató kölcsönhatás hipotézise elsősorban a régi EPF-kísérletek eredményeire támaszkodott (bizonyos geofizikai módszerekkel kapott G -mérések és semleges kaonokkal kapcsolatos gyorsító mérések mellett). A cikk nem kevesebbet állít, mint hogy az EPF-mérések eredménye csak azért tűnt negatívnak, mert Eötvös idejében még nem volt meg az a rendszerező elv, amelynek alapján a különböző anyagpárookra vonatkozó kis, önmagukban nem szignifikáns különbségeket megfelelő sorrendbe lehetett volna állítani. A feltételezés szerint az új erő forrása nem maga a tömeg, hanem a barionok (protonok és neutronok) száma, az erő hatótávolsága pedig mindössze néhány száz méter. Az atommagok kötési energiája (tömeghiánya) miatt az erősen kötött magokban (pl. vasban) egységnyi tömegre több barion jut, mint a gyengén kötött magokban. A szerzők a Renner-kísérlet eredményeivel nem foglalkoztak, mert azokat Dicke kritikája némileg diszkreditálta. A Nap irányú gyorsulást felhasználó, még pontosabb mérések viszont azért nem cáfolták az ötödik erő létét, mert annak feltételezett hatótávolsága a Nap távolságánál sokkal rövidebb.

A feltételezett új erő egyrészt sérti az ekvivalenciaelvet, másrészt módosítja a gravitációs erőnél megszokott $1/r^2$ -tel arányos távolságfüggést. Az új erőt Fischbachék két paraméterrel jellemezték: a λ hatótávolsá-

sággal és a kölcsönhatás gravitációhoz viszonyított, kis távolságra érvényes α erősségével, ahol α függ a két test barionszám/tömeg arányától is. A gravitáció és az ötödik erő együttes potenciálját a következő kifejezéssel írták le:

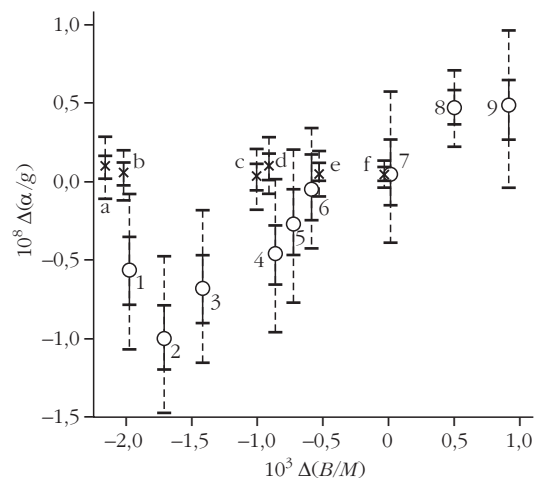
$$V(r) = -G \frac{m_1 m_2}{r} (1 + \alpha e^{-r/\lambda}),$$

ahol G a gravitációs állandó nagy távolságokra érvényes értéke, m_1 és m_2 a két tömeg, r pedig azok távolsága. A laboratóriumi G -mérések eszerint valójában nem G , hanem $G(1 + \alpha)$ értékét mérik, ezért tér el egymástól a laboratóriumi és geofizikai mérések eredménye. Az α paraméter értékét $-0,007$ -re, λ értékét pedig 200 m körülire becsülték.

Fischbachék cikkét követően mind az összetétel-függés, mind a távolságfüggés ellenőrzésére talán száznál is több, igen változatos módszerekkel végzett kísérleti vizsgálat indult, amelyek a 90-es években – több közbülső, pozitívnak látszó eredmény után – végül negatív eredménnyel zárultak. E kísérletek azonban hatékonyan fejlesztették a kísérleti technikát, az elméleti megfontolások pedig sok érveléssel támasztották alá azt a várákozást, hogy mind az ekvivalenciaelv, mind az $1/r^2$ -es távolságfüggés valamilyen szinten azért sérülhet.

Bár az eredeti Fischbach-hipotézis ma már halott, érdemes felidézni a nehézségi gyorsulások EPF- és Renner-kísérletekben talált kis relatív különbségeit a B/M (barionszám/tömeg) különbségek függvényében, saját egykori számításaim alapján. Míg az EPF-kísérletek eredményei valóban pozitív korrelációt sejtetnek, Rennernél ennek nyomát sem találjuk (*1. ábra*). Az eredeti hibaszámítást korrigáló megnövelt szórás miatt az EPF-korreláció sem látszik szignifikánsnak. A Renner-méréseknél viszont továbbra is talányos, miért ilyen kicsik a zérustól való eltérések.

1. ábra. A számmal jelzett pontok az EPF-, a betűvel jelzettek a Renner-mérések eredményét adják, az eredeti és annál 2,4-szer nagyobb hibával ([8] alapján). Renner eredményeinél nem látszik szisztematikus függés a B/M értékek különbségétől, de a zérustól való eltérések a vártnál kisebbek. Az anyagpárok megnevezését lásd [8]-ban.



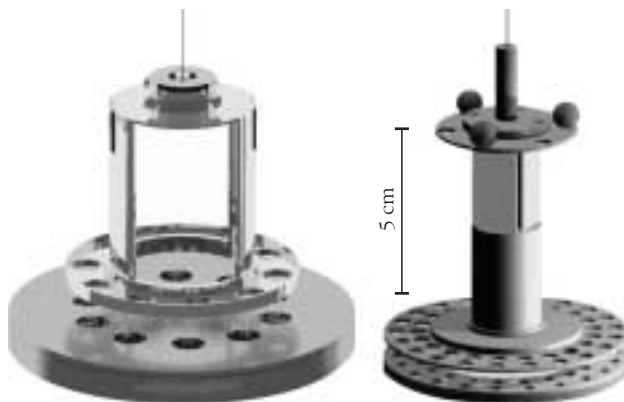
Valószínűleg érdemes lenne az általa alkalmazott hibaszámítást még részletesebben, a lassú külső eredetű változások statisztikáját is figyelembe véve újra megvizsgálni.

Eötvös-típusú kísérletek szerepe a modern kozmológia és a nagy egyesítések korában

Az „ötödik erő” hipotézise Eötvös Loránd nevét és az EPF-kísérleteket világszerte ismertté tette, ezért azóta a kísérletek tágabb körét tekintik „Eötvös-típusúnak”, mint korábban. Röviddel a Fischbach-sejtés közlése után alakult a Washingtoni Egyetemen (Seattle-ben) *Eric Adelberger* vezetésével egy csoport, amely azóta is főként kisméretű, precíziós torziós ingák segítségével végzi a fizika és kozmológia alapjait érintő kísérleteit. Ez a csoport Eötvös tiszteletére az „Eöt-Wash” nevet vette fel, és azóta is ezen a néven működik [9]. Ma is ők tartják a súlyos és tehetetlen tömeg arányára vonatkozó pontossági rekordot (10^{-13}). A Nap és Föld irányú gyorsulás mellett vizsgálták a Galaxis központja felé irányuló gyorsulásban esetleg meglévő anyagfüggést is, ami azért érdekes, mert így az Univerzum tömegének jelentős részét kitevő „sötét anyag” vonzására is kiterjeszhető a kétféle tömeg arányossága. Felmerült annak elméleti lehetősége is, hogy a tömeg mellett a spin is szerepet kaphat a gravitációs kölcsönhatásban. Ennek ellenőrzésére spin-polarizált anyagok felhasználásával is végeztek igen érzékeny ingaméréseket. A Hold lézeres megfigyelései során felmerült az a probléma, hogy az ekvivalenciaelvtől való eltérések egyrészt a Hold és Föld gravitációs kötési energiahányadának különbözősége, másrészt a két test eltérő összetétele miatt is felléphetnének. Szerencsétlen esetben a két hatás kompenzálhatja egymást. Az Eöt-Wash csoport ezért olyan torziós ingát szerkesztett, amely a Földdel, illetve Holddal azonos összetételű kis próbatesteket hasonlított össze, és itt sem talált különbséget. Ez szigorúan is bizonyította a gravitációs kötési energiára fennálló ekvivalenciaelvet.

Az ekvivalenciaelv Földön megvalósítható vizsgálatainál sokkal pontosabb érhető el űrbeli kísérletekben. Már mintegy 20 éve tervezés alatt áll a STEP (Satellite Test of the Equivalence Principle) kísérlet, ami a jelenleginél 5 nagyságrenddel nagyobb relatív pontosságot (10^{-18}) érhetne el. Egy Pisában 1993-ban rendezett STEP-konferencián Eötvös érdemeinek felsorolásával amellet próbáltam érvelni [10], hogy a kísérlet neve inkább Eötvös legyen (esetleg „Equivalence Orbital Test for a Variety Of Substances” rövidítéseként). Várható, hogy az elkövetkező években az ekvivalenciaelvet vizsgáló több űrkísérlet is előkészítési szakaszba lép, s valamelyiküknél talán Eötvös neve is megjelenik.

Felvethető, hogy mi értelme van az ekvivalenciaelv eddigieknél is pontosabb vizsgálatának. Korunk két alapvető elmélete az elemi részecskék világát leíró, modern kvantumelméleten alapuló térelmélet és a gravitációt leíró általános relativitáselmélet. Mindéig egyiknek a jóslatait sem sikerült mérésekkel meg-



2. ábra. Az Eöt-Wash csoport két torziós ingája a gravitációs kölcsönhatás távolságfüggésének vizsgálatára. Az alsó, lassan forgó tárcsa két részből áll; alsó részében nagyobbak a lyukak, és kissé el vannak forgatva a felsőhöz képest. Ha az $1/r^2$ -es távolságfüggés pontosan igaz, akkor a forgó és álló rész megfelelő távolsága esetén nem hat forgatónyomaték közöttük. A legújabb, sötét energiával kapcsolatos méréseket a jobb oldali eszközzel végezték.

cáfolni, igen sok próbát kiálltak. Ugyanakkor a két elmélet nem látszik összeegyeztethetőnek. Valamilyen szinten eltérést kell találni a két elméletből külön-külön következő jóslatoktól, hogy a közötti kapcsolatok megértéséhez kulcsot találjunk. E várakozás ösztönzi nemcsak az ekvivalenciaelv egyre szigorúbb ellenőrzését, de a hatalmas gyorsítók és távcsövek építését is.

Az ekvivalenciaelv esetleges sérülése mellett napjaink másik fontos elméleti várakozása, hogy a gravitáció $1/r^2$ -es távolságfüggése nem igaz minden korlát nélkül. Nagy méretekben a mindeddig hiába keresett részecskékhez kapcsolható sötét anyag és az Univerzum egyre gyorsuló tágulását előidéző sötét energia okoz problémát, és sokan a gravitáció távolságfüggésének módosulását sejtik ilyen nagy távolságokon. Igen kis távolságokon szintén módosulhat a gravitációs erőtvény, hiszen a távolság csökkenésével egyre erősebben jelentkezhetnek különböző kvantum-effektusok. Olyan jóslatok is vannak, hogy mintegy tized mm alatt a gravitáció a szokásos három térbeli dimenzió mellett további dimenziókba is be tud hatolni, és emiatt ennél kisebb távolságokon az $1/r^2$ -es távolságfüggés például $1/r^4$ -re módosul. Más típusú módosulást jósol a „kövér graviton” elmélet, amely szerint kis méretekben a gravitációs erő nem erősödik, hanem gyengül a távolság csökkenésével. Ez magyarázhatná a „sötét energia” nemrégiben kimért energiasűrűségének kicsiny voltát is, hiszen ekkor a nagyon kis hullámhosszú zéruspontrezgések nem járulnának hozzá az Univerzum energiájához. E kérdések vizsgálatához is alkalmasnak látszanak az Eöt-Wash csoport torziós ingái.

Nemrégiben jelent meg az Eöt-Wash csoport új cikke [11], amelyben egy torziós szálon függő, sok szabályosan elhelyezett lyukat tartalmazó korong és egy alatta elhelyezett, két rétegben szintén igen sok lyukat tartalmazó forgótárcsa segítségével vizsgálták a gravitáció távolságfüggését. A lyukak elrendezése olyan volt, hogy a korong és tárcsa közti megfelelő távolság

és $1/r^2$ -es távolságfüggés esetén gyakorlatilag ne gyakoroljanak egymásra forgatónyomatékokat (2. ábra). Az igen gondos, hosszan tartó mérés során kimutatták, hogy az $1/r^2$ -es távolságfüggés mintegy 50 mikrométer távolság fölött már igaz, ami kizár több korábbi jóságot, így a sötét energia „kövér gravitonokkal” való egyszerű magyarázatát is. Persze mindig léteznek bonyolultabb magyarázatok, és Adelberger csoportja valószínűleg még tovább fogja finomítani mérési módszereit.

Érdekes elgondolni, mit szólna Eötvös Loránd, ha tudná, hogy ingája nyomán, amely „egyszerű volt, mint Hamlet fuvolája”, ma olyan érzékeny mérőműszerek születnek, amelyek az Univerzum fő összetevőjének mibenlétét is képesek minden más műszernél pontosabban vizsgálni.

Végül felhívom az olvasók figyelmét, hogy Eötvös Loránd életéről, tevékenységéről és munkáiról a világhálón is sok információt találhatnak. Az Eötvös Loránd Geofizikai Intézet tartja fenn a virtuális Eötvös-múzeum honlapját [12], míg a KFKI tudománytörténeti honlapján [13] sok más, Eötvössel kapcsolatos anyag mellett az e cikk alapjául szolgáló előadás képei is megtalálhatók [14].

Irodalom

1. R. v. Eötvös, D. Pekár, E. Fekete, *Annalen der Physik* 68 (1922) 11
2. Roland Eötvös *gesammelte Arbeiten*. Összeállította: Selényi Pál, Akadémiai Kiadó, Budapest (1953)
3. Renner J., Kísérleti vizsgálatok a tömegvonzás és tehetetlenség arányosságáról. *Matematikai és Természettudományi Értesítő* 13 (1935) 542
4. J. Illy, Einstein und der Eötvös-Versuch: ein Brief Albert Einsteins an Willy Wien. *Annals of Science* 46 (1989) 417
5. P.G. Roll, R. Krotkov, R.H. Dicke, The equivalence of inertial and passive gravitational mass. *Ann. Phys. (NY)* 26 (1964) 442
6. V.B. Braginsky, V.I. Panov, Verification of Equivalence Principle of Inertial and Gravitational Mass. *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 61 (1971) 873, vagy *Sov. Phys. JETP* 34 (1972) 463
7. E. Fischbach et al., Reanalysis of the Eötvös Experiment. *Phys. Rev. Lett.* 56 (1986) 3
8. Fischbach, E., Bod L., Nárayné Ziegler M., Marx Gy., Az Eötvös-kísérlet száz éve. www.kfki.hu/eotvos/szazeves.html
9. Az Eöt-Wash csoport honlapja: www.npl.washington.edu/eotwash/
10. Király P., Eötvös and STEP. *Phys. Rev. Lett.* 98 (2007) 021101
11. D.J. Kapner et al., Tests of the gravitational inverse-square law below the dark-energy length scale. *arXiv:hep-ph/0611184* (2006)
12. Eötvös Loránd virtuális múzeum: www.elgi.hu/museum/
13. Eötvös Loránd munkái és méltatása: www.kfki.hu/eotvos/
14. Király P., Ünnepi előadás 2006. nov. 22-én. www.kfki.hu/eotvos/eotvoseloadas06.pdf

A FÖLD EREDETE

Nemecz Ernő
az MTA rendes tagja

A föld, ahol az élet terem,
a mindent nyelő sírverem,
a síkság, hegy, tenger, folyó:
öröknek látszik és múló.

Világűr és mennyboltozat,
sok forgó égi kapcsolat,
a milliárdnyi tűzgyoltyó:
öröknek látszik és múló.

Mit eltemet a feledés
egy gyík-kúszás, egy szárnyverés,
egy rezdület, mely elpörog:
múlónak látszik és örök.

Mert ami egyszer végbement,
azon nem másít semmi rend,
se Isten, se az ördögök:
múlónak látszik és örök.

Weöres Sándor

Azok a természettudományok, amelyek vizsgálati tárgyuk, a „valami” történetével is foglalkoznak – többek között a földtan, csillagászat – voltaképpen Weöres *Öröklét* című versének gondolatát követik, amikor a megtörtént, tehát örök életű eseményeket igyekeznek felderíteni. Ilyen eseménysor a Föld keletkezésének elgondolt története is.

Ahhoz, hogy a Föld létrejöttéről, összetételéről és a rajta megtörtént eseményekről valamilyen elképzelésünk legyen, rövid áttekintésben egészen a kezdetekig kell visszamennünk. Az Univerzum keletkezése az ősi kultúráktól kezdve máig foglalkoztatja az emberi elmét, és a nagy vallások, filozófiai irányzatok számtalan elgondolást hagytak ránk. Ezekre nem kitérve a mai felfogást a természettudományos elvekre és ismeretekre alapozó elméletekkel foglaljuk össze. Amikor azonban természettudományos megközelítésről be-

szélünk, nem szabad figyelmen kívül hagynunk, hogy nem a tudományos kutatásban megszokott kísérletekről, kísérletileg igazolt, vagy szükségszerű tényekről, hanem feltevésekben gazdag teóriákról van szó. Igaz, a fizika, a részecskekutatás révén, a világkezdett első perceihez közeli viszonyokat tudja felidézni, azonban mindazok a gondolatok és ismeretek, amelyeket az azóta eltelt időre és folyamatokra vetítünk, nem nélkülözik a spekulatívnek tekinthető összerendezést. Hiszen a Világegyetemmel nem kísérletezhetünk, de elképzelhetünk egy, a rendelkezésre álló ismeretekkel ellentétben nem álló eseménysort. Mivel az ismeretek is állandóan bővülnek, de távolról sem elegendők, az Univerzum történetét egyértelműen nem rajzolhatjuk meg. Innen van az, hogy sokféle elmélettel találkozunk, melyeknek sok filozófiai, sőt, mondhatjuk, metafizikai vonása is van.