

Előkészületek az Eötvös-kísérlet újramérésére

VÖLGYESI L.^{1,*}, SZONDY GY.², TÓTH GY.¹, PÉTER G.³, KISS B.³, DEÁK L.⁴, ÉGETŐ CS.¹,
FENYVESI E.⁴, GRÓF GY.⁵, VÁN P.^{4,5}

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Általános- és Felsőgeodézia Tanszék, H-1521 Budapest

²Független kutató, Budapest

³Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Irányítástechnika és Informatika Tanszék, H-1521 Budapest

⁴MTA, Wigner Fizikai Kutatóközpont, H-1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29–33.

⁵Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék, H-1521 Budapest

*E-mail: volgyesi.lajos@epito.bme.hu

Eötvös Loránd munkatársaival, Pekár Dezsővel és Fekete Jenővel 1906-tól mérésorozatot végeztek (EPF-mérések) a súlyos (gravitációs) és a tehetetlen tömeg arányosságára vonatkozóan. 1986-ban Ephraim Fischbach és társai az EPF-mérési eredményekben olyan szisztematikus anyagfüggést fedeztek fel, amelyet végül kísérletileg nem tudtak igazolni, ugyanakkor az eltérések okára máig sem találtak magyarázatot. A mérések elemzésének eredményeképpen most olyan szisztematikus hibalehetőséget találtunk, amely indokolttá teszi a mai korszerű technikai lehetőségek által kínált jobb feltételek mellett a kísérletek megismétlését. 2017 júniusában a Wigner Fizikai Kutatóközpontban (Wigner FK) döntés született az EPF-mérések Eötvös-ingával történő megismétlésére és az esetleges eltérések tényleges okának feltárására. A 2017 júniusától megkezdett munkában a mérésekben és ezek előkészületeiben az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpontja, a BME Általános- és Felsőgeodéziai Tanszéke, az Egyesület a Tudomány és Technológia Egységéért (ETTE), illetve a BME Irányítástechnika és Informatika Tanszéke vesznek részt más további szervezetek, tanszékek és szakértők bevonásával. A mérések több mint egy éves igen alapos előkészületek után a KFKI (Wigner FK) területén lévő Jánossy Földalatti Fizikai Laboratóriumban, 30 m mélységben, megfelelő nyugalmi körülmények és kontrollált feltételek között 2018 decemberében megkezdődtek. Az EPF-mérések megismétlésének külön aktualitást ad *Eötvös Loránd halála 100. évfordulójának tiszteletére* 2019-ben tartott Eötvös-év. Jelenlegi tanulmányunkban röviden áttekintjük a szükséges fizikai alapismereteket, az előzményeket, beszámolunk a mérések előkészületeiről és a jelenlegi állapotáról.

Völgyesi, L., Szondy, Gy., Tóth, Gy., Péter, G., Kiss, B., Deák, L., Égető, Cs., Fenyvesi, E., Gróf, Gy., Ván, P.: Preparations for the remeasurement of the Eötvös experiment

Between 1906 and 1908 Roland (Loránd) Eötvös and his colleagues Dezső Pekár and Jenő Fekete made measurements with revolutionary precision (the EPF measurement) for validating the equivalence of gravitational and inertial mass. Almost 80 years later, in 1986, Ephraim Fischbach and his colleagues reanalyzed the results of the EPF measurement and discovered a correlation between the small violations and some atomic parameter. Finally they were unable to reproduce this correlation experimentally, but there is still no valid explanation of these differences in the EPF results. Our analysis of the EPF experiment pointed to a possible bias that justifies repeating the tests under better conditions and using modern new technology. Planning and preliminary measurements started at July of 2017. Participants are from Wigner Research Centre for Physics of the Hungarian Academy of Sciences, Department of Geodesy and Surveying of Budapest University of Technology and Economics (BME), Society for the Unity of Science and Technology (SUST), and the Department of Control Engineering and Information Technology of BME in cooperation with other organizations, departments and experts. After more than one year of thoughtful preparation, in December 2018 preliminary tests have been started in a controlled and undisturbed environment of the Jánossy Underground Laboratory at KFKI, 30 meters below ground level. This paper gives a brief overview of the basic physics, history, preparations and present status of the new experiments. Another good reason for repeating the EPF measurements is that 2019 – as the 100th anniversary of Eötvös' death – is referred to as "Eötvös year".

Beérkezett: 2019. február 13.; elfogadva: 2019. március 4.

Előzmények

Eötvös Loránd és munkatársai 1906 és 1908 között Eötvös-ingával méréseket végeztek a súlyos és a tehetetlen tömeg azonosságának kimutatására. A méréseiket arra alapozták, hogy a földi nehézségi erő a tömegvonzási (gravitációs) 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 (Eötvös et al. 1922). Az elvégzett mérések csupán 10^{-9} hibahatár-közeli véletlenszerűen tűnő eltéréseket mutattak.

Renner János az 1930-as években más anyagpárokkal megismételte a kísérleteket, de anyagfüggést ő sem talált (Renner 1935). További kísérletekre közel 30 évet kellett várni, Dicke és munkatársai 10^{-11} (Roll et al. 1964), Braginsky és munkatársai pedig 10^{-12} -es pontossággal igazolták az ekvivalenciaelvet (Braginsky et al. 1971). Dicke és munkatársai É–D tájolású ingával a Nap vonzása és a Föld keringéséből adódó centrifugális erő viszonyának anyagfüggését mérték, aminek előnye, hogy az ingát a jel 24 órás periodicitása miatt a mérés során nem kellett forgatni.

Később, 1986-ban Fischbach és munkatársai azt találták, hogy ezek a kis eltérések mégsem teljesen véletlenszerűek, hanem az atommagok kötési energiájának lineáris függvényként írhatók fel, és felvetették egy rövid hatótávolságú, úgynevezett ötödik erő létezését (Fischbach et al. 1986). A feltételezés komoly vitákat váltott ki, és további méréseket és ellenőrző kísérleteket motivált. Eötvösök eredményeit részletesen elemezték, új, sokkal pontosabb méréseket is végeztek, de azokban nem mutatták ki a megjósolt Yukawa-jellegű, rövid hatótávolságú ötödik erőt.

Például 1990-től torziós ingákkal végzett kísérleteket az Eöt-Wash csoport (University of Washington), méréseikben elérték a 10^{-13} -os pontosságot (Király 2007, Patkós 2019).

Mindezek mellett az EPF-méréseket az eredeti formában és eredeti eszközökkel nem ismételték meg, és az újabb, kifinomultabb módszereket alkalmazó kísérletek mellett nem foglalkoztak az Eötvösök munkáiban megfigyelt szisztematikus eltérések okával. Mivel az eredeti EPF-kísérlet elvileg más, mint bármely későbbi teszt, ezért ez a szisztematikus eltérés továbbra is jelentheti az ekvivalenciaelv speciális sértését (Franklin, Fischbach 2016, Fischbach 2019). Az EPF-kísérlet megisméltése nemcsak az említett szisztematikus hibára vonatkozó feltevésünket igazolhatja, hanem új szempontokkal járulhat hozzá a jelenlegi legpontosabb földi mérésekhez.

A súlyos és a tehetetlen tömeg

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

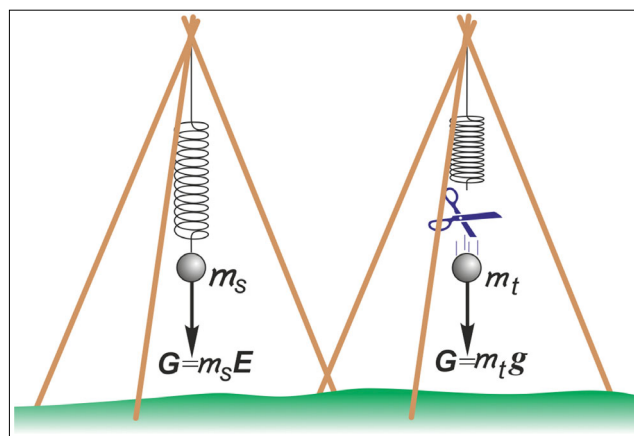
Van ugyanakkor egy erő, amely bármely két test között mindig fellép. Ez a vonzóerő az $F = kMm/r^2$ Newton-féle általános tömegvonzási (gravitációs) erő, melynek nagysága szintén arányos a testre jellemző mennyiséggel: a *súlyos tömeggel*.

A súlyos és a tehetetlen tömeg egymástól független mennyiség, amely 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*.

Tapasztalatunk szerint az 1. ábrán látható módon rugóra felfüggesztett test a rugót megfeszíti. A rugó megnyúlása arányos a rugót feszítő súlyerővel és fordítottan arányos a rugó erősségével. Így a rugót feszítő G erő a felfüggesztett test tömegével és az E nehézségi térerősséggel arányos:

$$G = m_s E. \quad (1)$$

Itt m_s a test azon tulajdonságát jellemzi, hogy adott nehézségi erőterben mennyire képes megnyújtani egy rugót. A test e statikai tulajdonságát az m_s *súlyos tömeg*ének nagyságával jellemezhetjük. A rugóra felfüggesztett test most nyugalomban van, hiszen a rá ható erők eredője zérus, mert a G súlyerőt pontosan kiegyensúlyozza az ellentétes irányú rugóerő.



1. ábra | Súlyos és tehetetlen tömeg a nehézségi erőterben
Figure 1 | Inertial and gravitational mass in gravity field

Ha a rugó elszakad, vagy levágjuk a rugóra függesztett tömeget, akkor megszűnik az a rugóerő, mely egyensúlyt tartott a súlyerővel, de változatlanul ugyanaz az erőter fog ugyanarra a testre hatni. Így a test a rá ható eredő erő, a súlyerő hatására Newton II., $F = ma$ törvényének megfelelően gyorsuló mozgást fog végezni. Ha a légalenállástól eltekintünk, a test a szabadesés gyorsulásával, a g nehézségi gyorsulással fog mozogni, tehát:

$$G = m_t g, \quad (2)$$

ahol m_t a test azon tulajdonságát jellemzi, hogy adott nehézségi erőterben mennyire képes ellenállni annak a gyorsító erőnek, amely a mozgásállapotát igyekszik megváltoztatni. A test e dinamikai tulajdonságát az m_t *tehetetlen tömeg*ének nagyságával jellemezhetjük.

Tekintettel arra, hogy az (1) és a (2) bal oldalán ugyanaz a G súlyerő szerepel, ezért

$$m_s E = m_t g. \tag{3}$$

A XVI. századtól kezdve többen is foglalkoztak ejtési kísérletekkel, például egy vasgolyó és fagolyó egyidejű ejtésekor azt tapasztalták, hogy 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. Eötvös Loránd már 1889-ben az addigi méréseknél több mint két nagyságrenddel pontosabb kísérleteket végzett, majd az akkori technikai lehetőségeknek megfelelően a híres EPF- (Eötvös–Pekár–Fekete-) kísérlettel a 9. jegyig terjedő pontossággal igazolta a súlyos és a tehetetlen tömeg azonosságát (Renner 1964, Perjés 2005). Einstein a súlyos és a tehetetlen tömeg egyenlőségére és anyagtól való függetlenségére, vagyis az ún. *gyenge ekvivalenciaelv*re építette fel az általános relativitás elméletét. Különböző fizikai megfontolások és megfigyelések azt mutatják, hogy a súlyos és a tehetetlen tömeg ugyan a testek két teljesen eltérő tulajdonságát jellemzi, mégis a két mennyiség egyenlő egymással, tehát az

$$m_s = m_t, \tag{4}$$

melynek alapján

$$E = g, \tag{5}$$

vagyis a szabadon eső test gyorsulása, a nehézségi gyorsulás, irány, értelem és nagyság szerint megegyezik a nehézségi térerősséggel (Völgyesi 2005).

Ezek szerint a gravitációs és a tehetetlenségi erők ekvivalensek. Ennek érzékeltetésére Einstein gondolat-kísérletet alkotott, amelynek az a lényege, hogy ha egy fizikust bezárunk egy kabinba, felruházzuk az emberiség teljes fizikatudásával, és a rendelkezésére bocsátunk minden elképzelhető fizikai eszközt és kísérleti lehetőséget, akkor sem képes sehogyan megállapítani, hogy a kabin gravitációs erőterben van felfüggesztve, vagy a kabint az univerzum távoli gravitációs tömegektől mentes területén rakéta-hajtómű gyorsítja. A helyzet azonban nem ilyen egyszerű; ha ugyanis graviméterrel két különböző alkalmas pontban mérünk, akkor a vonzó tömegetől mért távolság függvényében különböző értékeket fogunk észlelni, ugyanakkor gyorsuló erőterben nem tapasztalunk különbséget. A megkülönböztethetlenséget lokálisan, homogénnek tekintett erőterekre kell tekintetbe vennünk. A súlyos és a tehetetlen tömeg azonossága a mai napig aktuális kérdése a fizikának, bármilyen kölcsönhatásból származtatott erőre igaznak feltételezzük, illetve precíziós kísérletek sorával ellenőrizzük (Will 2014). Ezeknek a méréseknek a sorában az EPF-mérések máig viszonyítási alapnak, az első mérőföldkőnek számítanak.

Az EPF-mérések alapelve

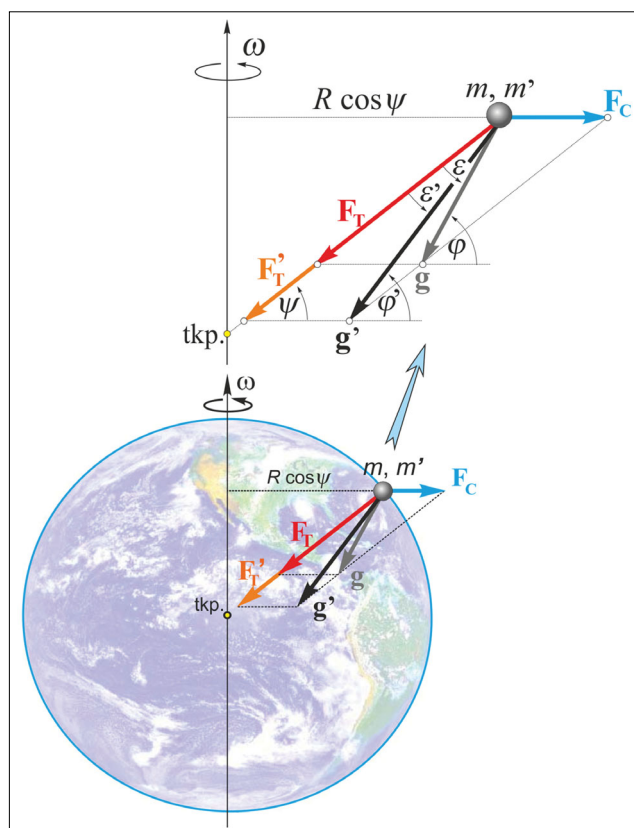
Eötvös Loránd és munkatársai, Pekár Dezső és Fekete Jenő 1906-tól több méréssorozatot végeztek (EPF-mé-

rések) a súlyos (gravitációs) és a tehetetlen tömeg arányosságára vonatkozóan.

A g földi nehézségi erő, az $F_T = Tm$ tömegvonzási- (gravitációs-), az $F_C = Cm$ forgási centrifugális és az árapálykeltő erők eredője (T a tömegvonzási (gravitációs), C pedig a centrifugális gyorsulást (térerősséget) jelöli). Az EPF-kísérletek során az árapálykeltő erők elhagyhatók, mivel a kísérletben használt eszközre kifejtett hatások általában kicsi. Más kérdés az, hogy ha az árapály az inga közelében valamilyen tömegátrendeződést okoz, akkor az igen érzékeny inga már érzékelheti ezt az indirekt árapályhatást.

Eötvös feltételezte, hogy az F_C forgási centrifugális erő független az anyagi minőségtől, viszont az F_T tömegvonzási (gravitációs) erő függhet attól. Gondolatban helyezzünk el a 2. 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 tömegre F_T míg az m' tömegre F'_T gravitációs erőt gyakorol. Ennek megfelelően a 2. ábrán látható módon az m tömegre ható nehézségi erő g , az m' tömegre ható nehézségi erő pedig g' .

A Földdel együtt forgó testekre ható F_C centrifugális erő merőleges a Föld forgástengelyére, melynek vízszintes irányú $F_C \sin \varphi$ összetevője a 3. ábrán látható módon (az északi féltekén) déli irányba mutat. Az $F_C \sin \varphi$ összetevő



2. ábra | A nehézségi erő feltételezett változása különböző anyagok esetén

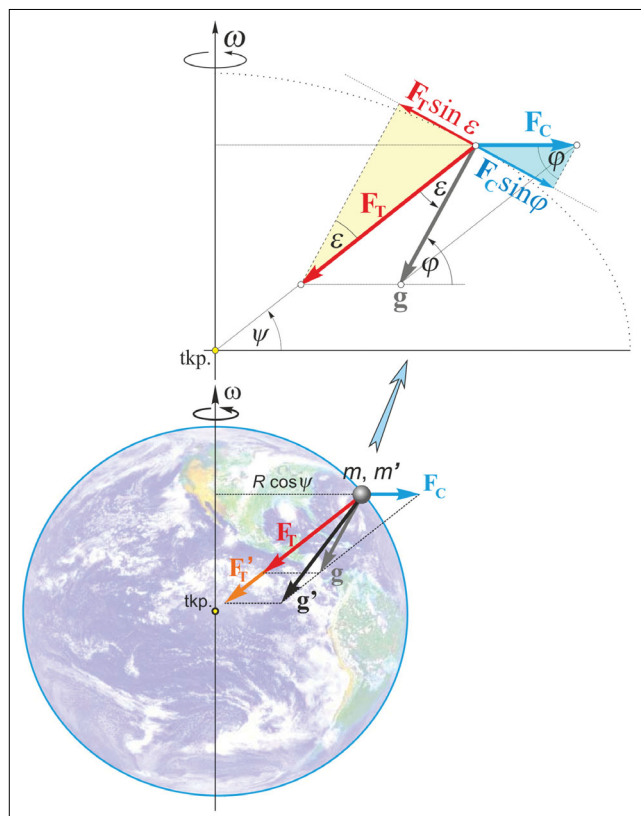
Figure 2 | Assumed difference of gravity in case of different materials

nagysága függ a hely φ földrajzi szélességétől. Ezzel az erővel egyensúlyban van az északra mutató $F_T \sin \varepsilon$ erő, amely a testre ható F_T tömegvonzási erő vízszintes síkba eső vetülete. A 3. ábrán látható ε szög a g nehézségi erő (az F_T gravitációs és az F_C forgási centrifugális erő eredője) és az F_T tömegvonzási erő által bezárt szög. Az $\varepsilon = 5'57''$ maximális értékét, a 45° -os földrajzi szélességen éri el.

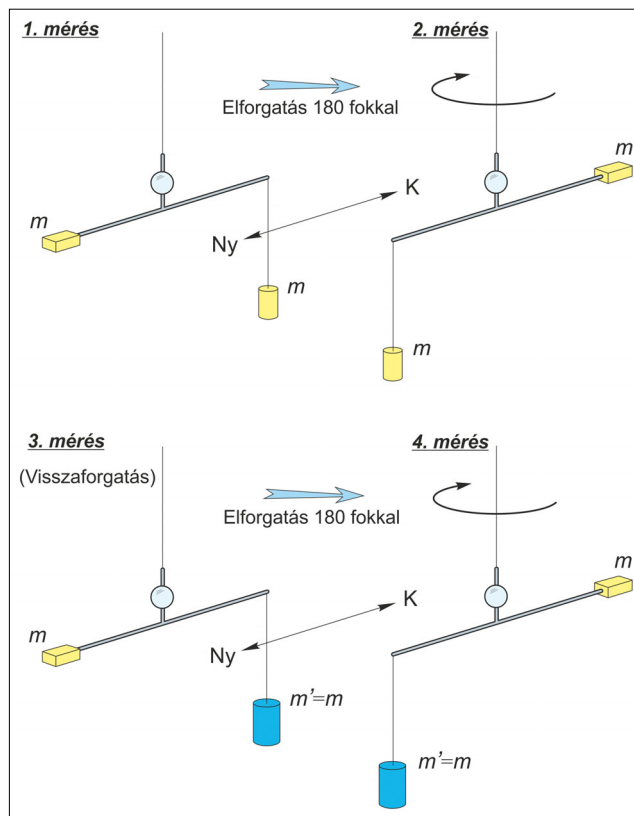
Feltételezve, hogy az F_T tömegvonzási (gravitációs) erő függhet az anyagi minőségtől, Eötvös az anyagi minőségi tényezőre az

$$\eta = 2 \frac{(m_s/m_t) - (m'_s/m'_t)}{(m_s/m_t) + (m'_s/m'_t)} \quad (6)$$

jelölést vezette be. Így ha valamilyen referenciaanyagra (pl. vízre) $\eta = 0$ értéket vesszük fel, akkor a gravitációs erő más testre az $(1 + \eta)F_T$ összefüggés szerint változik. Ha $\eta \neq 0$, akkor a gravitációs és tehetetlen tömeg eltérése miatt megszűnik a 3. ábrán látható erőegyensúly, ezért az m' tömegre egy kicsiny $\eta F_T \sin \varepsilon$ északi irányú erő fog hatni, amely erő az Eötvös-féle torziós inga karjának elfordulását eredményezi. Az Eötvös-kísérlet fő kérdése tehát az, hogy az inga karjáról lefogatott tömeget kicserélve a felső tömegtől eltérő másik anyagból készített tömegrre, a felső és az alsó testre ható feltételezett különböző erők miatt tapasztalható-e az inga karjának az elcsavarodása.



3. ábra | Vízszintes síkban ható erőösszetevők
Figure 3 | Horizontal components of forces



4. ábra | EPF-mérési stratégia a tömegek cseréjével
Figure 4 | Strategy of EPF measurement by exchanging masses

Mivel a kimutatásra váró feltételezett erő a 3. ábra szerint északi irányba mutat, ezért ez az erő a K–Ny-i irányban álló ingakar tömegeire hatva fejt ki maximális nyomatékokot.

Az EPF-mérések 1. módszere esetében az inga megfelelő forgatásával és a tömegek meghatározott cseréjével a 4. ábrán összefoglalt sorrend szerint történnek a mérések.

Az 1. lépésben és a K–Ny irányban ($\alpha = 90^\circ$ azimutban) állított ingaszerkezeten leolvassuk az ingarúd nyugalmi helyzetét.

A 2. lépésben 180 fokkal elfordítjuk az ingaszerkezetet, és az $\alpha = 270^\circ$ azimutban is leolvassuk az ingakar nyugalmi helyzetét.

A 3. lépésben visszaforgatjuk az ingaszerkezetet $\alpha = 90^\circ$ azimutba, az inga lefogatott aranyból készült tömegét kicseréljük egy ugyanolyan tömegű pl. alumínium tömegrre, majd nyugalmi állapotban leolvassuk az ingakar helyzetét.

Végül a 4. lépésben a felcserélt tömeggel elfordítjuk az ingaszerkezetet $\alpha = 270^\circ$ azimutba, és így is leolvassuk az ingakar nyugalmi helyzetét.

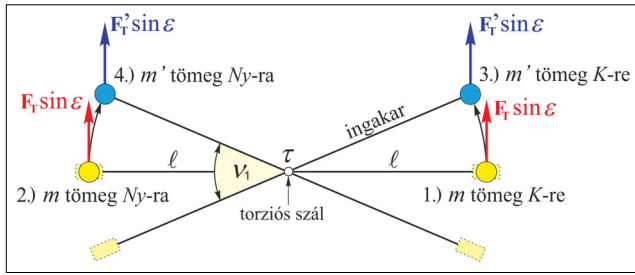
A torziós száltól keleti illetve nyugati irányban l távolságban elhelyezkedő tömegek esetében a súlyos és tehetetlen tömeg feltételezett különbözősége miatt fellépő $\eta l F_T \sin \varepsilon$ nyomatékok egymással ellentétes előjelűek, így az ingakar szöghelyzetének változása egyenesen arányos lesz a keresett nyomatéki hatás kétszeresével (5. ábra).

Az 5. ábrán a torziós inga karjának v_1 elfordulása látható felülnézetben ábrázolva, amennyiben nem teljesül a súlyos és tehetetlen tömeg ekvivalenciája. Az ábrán az inga alsó tömegét mutatjuk a 4. ábrán látható négy különböző helyzetében. Először az m tömeg a torziós szálhoz képest keletre, majd második lépésben nyugatra helyezkedik el. Miután az m tömeget kicseréljük egy másik anyagból készült m' tömegre ($m = m'$), az eltérő η anyagi minőségi tényezők miatt az ingakar mind keleti, mind nyugati irányában jelentkezik az m' tömegre ható kis erő, amely elforgatja az inga karját, és vele együtt az m' tömeg is új helyzetbe kerül.

A v_1 elfordulást pontosan megmérve kiszámítható az η anyagi minőségi tényező az adott anyagpárra az inga l félkarhossza és az m tömeg nagyságának függvényében:

$$\eta = \frac{\tau v_1}{2F_T l \sin \varepsilon}, \quad (7)$$

ahol τ a torziós szál csavarási állandója.



5. ábra | Az inga felfüggesztett tömegének helyzete körökkel jelölve felülnézetben a mérés 4 különböző fázisában, amennyiben nem teljesül az ekvivalencia elve

Figure 5 | The position of the suspended mass of the torsion balance is marked with circle in top view in 4 different phases of the measurement, if the principle of equivalence is not true

A méréseket zavaró tömeghatások

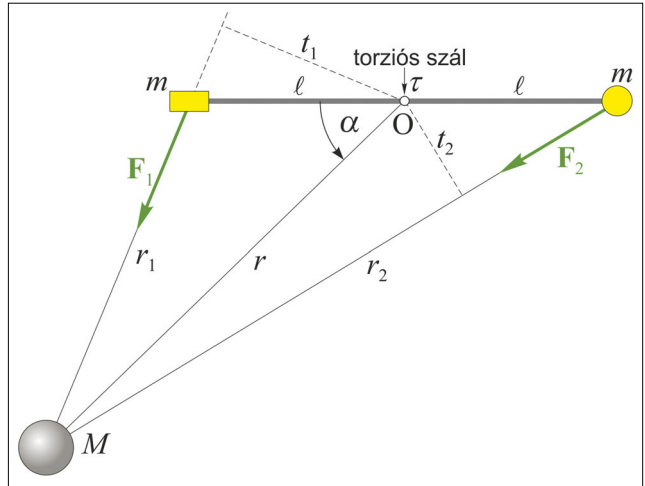
A torziós ingától t távolságban a 6. ábrán látható módon elhelyezett M tömeg az ingakart elfordítja. Jelöljük F_1 -gyel és F_2 -vel az M tömeg által az inga bal és jobb oldali m tömegére kifejtett Newton-féle tömegvonzási erőket, t_1 -gyel és t_2 -vel ezen erőknek az inga O pontjára vonatkozó erőkarját! Így az eredő forgatónyomaték

$$M_E = F_1 t_1 - F_2 t_2 = kMm \left(\frac{t_1}{r_1^2} - \frac{t_2}{r_2^2} \right), \quad (8)$$

ahol k a gravitációs állandó. A háromszögek területének egyenlősége miatt $r_1 t_1 = r_2 t_2$, így az eredő forgatónyomaték

$$M_E = kmMlr \sin \alpha \left(\frac{1}{r_1^3} - \frac{1}{r_2^3} \right). \quad (9)$$

A (9) összefüggéssel $m = 9$ g, $l = 10$ cm, $\tau = 6 \cdot 10^{-9}$ m²kg s⁻² ingaparaméterek esetében kiszámítható az ingakar elfordulása tetszőleges M tömeg hatására.



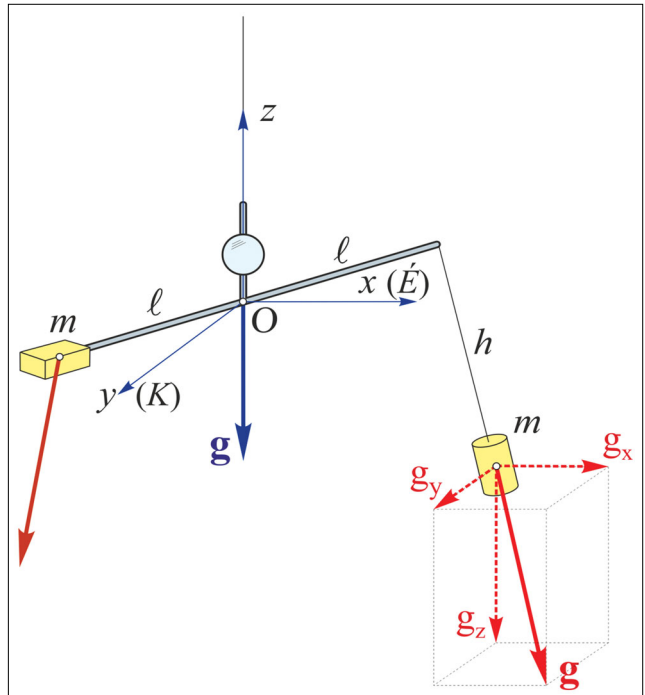
6. ábra | Az inga tömegeire ható erők forgatónyomatéka

Figure 6 | Torque of different gravity forces acting on the masses of the torsion balance

Példaként egy $M = 60$ kg tömegű észlelő az ingától $r = 0,5$ m távolságban $\alpha = 45^\circ$ -os szögben, 3,5 skálaegység változást okoz a leolvasásban; ugyanez a változás a Hold esetében 10^{-5} skálaosztás, amelyet az ingával már egyáltalán nem lehet kimutatni.

A Föld inhomogén sűrűségeloszlása miatt a nehézségi erő térbeli eloszlása teljesen szabálytalan, a g vektor hossza és iránya is pontról pontra változik, ezért a 7. ábrán látható módon az inga tömegeire különböző erők hatnak.

Az EPF-kísérlet szempontjából az mg_x és mg_y vízszintes erőösszetevők változása fontos, mert ezek okozhatnak olyan nyomatékokat, amely zavarva az EPF-méréseket az



7. ábra | Az inga tömegeire ható különböző erők

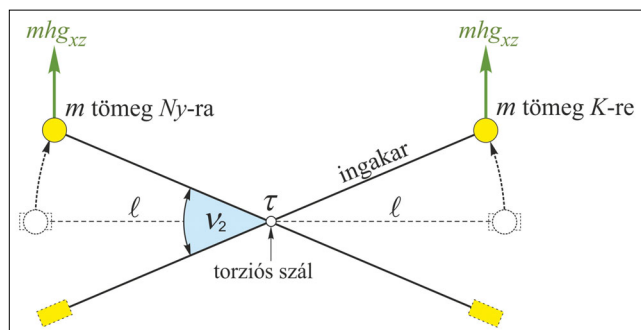
Figure 7 | Different gravity forces acting on the masses of the torsion balance

inga karjának elcsavarodását eredményezi. A K–Ny irányban álló ingarúd elcsavarodását csak az északi vagy a déli irányba mutató mg_x erőösszetevő változása okozza. A g_x összetevő a térben akár x , akár y , akár z irányban megváltozhat. Azonban a K–Ny helyzetben álló ingarúd lejjebb levő tömege esetében csak z irányú változás okozhat olyan nyomatékkülönbséget, amely elfordítja az inga karját. Ez a függőleges változás első közelítésben az $mg_x(z) = mzg_{xz}$ lineáris összefüggéssel írható le, ahol g_{xz} a g_x összetevő magassági gradiense, azaz magasságtól függő változásának mértéke. Így az ingakar 8. ábrán látható ν_2 szögelfordulása a nehézségi erő magasság szerinti megváltozása miatt

$$\nu_2 = -(2/\tau)mhg_{xz}, \tag{10}$$

ahol h az Eötvös-inga lejjebb levő tömegének távolsága az inga karjától. (Eötvös egyébként éppen az ilyen gradiensek mérésére fejlesztette ki a torziós ingáját.)

A 8. ábrán a torziós inga karja ν_2 elfordulásának okát szemléltetjük. Az ábrán az inga alsó tömegét láthatjuk felülnézetben, két különböző, az inga felfüggesztési pontjától keleti és nyugati helyzetben. Az inga alsó m tömegére akár keleti, akár nyugati helyzetében északi irányú erő hat a gravitációs erő mg_x összetevőjének térbeli változása miatt. Az ábrán látható mhg_{xz} erő abból adódik, hogy a torziós inga alsó tömege h -val lejjebb van, és ez kimozdítja az inga karját északi irányban. Ha az m tömeg kicserélése után csak kicsit is megváltozik ez az erő, a tapasztalt hatás tévesen úgy értelmezhető, hogy az 5. ábrához hasonlóan nem teljesen a súlyos és tehetetlen tömeg ekvivalenciája.



8. ábra Az inga körökkel jelölt felfüggesztett tömegének helyzete felülnézetben 2 különböző azimutban a g_{xz} gradiens hatására

Figure 8 Positions of the balance caused by the gradient g_{xz} in 2 azimuths. The suspended mass of the torsion balance are marked with circles

Mivel a (10) összefüggéssel kifejezett gradienshatás nagyságrendekkel nagyobb lehet a gravitációs és tehetetlen tömeg eltéréséből várható hatásnál, ezért az EPF-mérések során nagy pontossággal biztosítani kell a τ , m , l , h ingaparaméterek állandóságát, vagy ismerni kell ezek pontos értékét. Ezek bármilyen megváltozása meghamisíthatja a mérés eredményét, mivel a (7) összefüggés szerint az alsó tömeg cseréje után a ν elfordulás értékében tapasztalt változás értelmezhető lenne úgy is, mint a gravitációs és tehetetlen tömegek különbözőségének hatása. A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy a felsorolt paramétereket gondosan

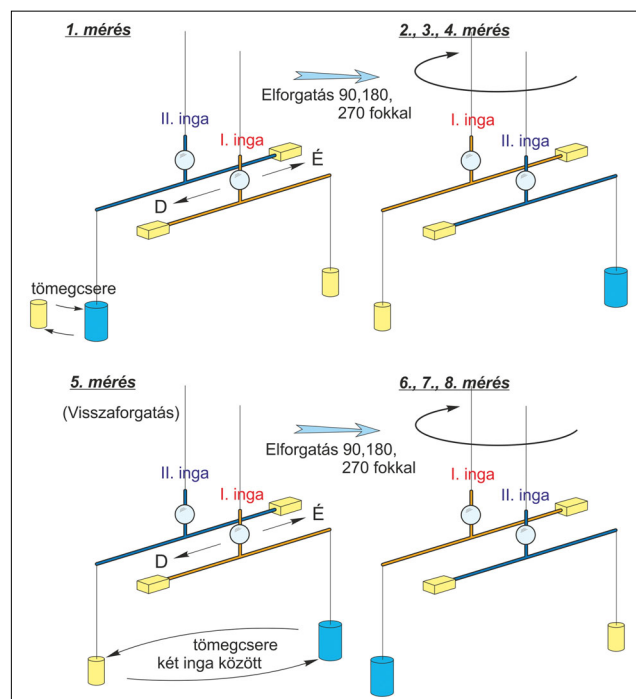
meg kell mérni az alsó tömeg cseréje előtt és után is, az esetleges kis eltéréseket pedig a számítások során figyelembe kell venni.

Az EPF mérések 2. módszere esetében Eötvös és munkatársai kihasználták azt a tényt, hogy az É–D irányban álló ingarúdra nincs forgató hatás az m és m' anyagi különbsége miatt, van viszont gradienshatás, amelyből számítható az ingakar w elfordulása a (10)-hez hasonló

$$w = (2/\tau)mhg_{yz}, \tag{11}$$

összefüggéssel. Ebben az esetben viszont csak az mg_y erőösszetevő $mg_y(z) = mzg_{yz}$ magasságtól függő változása játszik szerepet. (A (10) és a (11) közötti előjelkülönbség az mg_x és az mg_y erők egymással ellentétes irányú forgató hatása miatt adódik.)

Eötvösök ötletének lényege, hogy a ν/w hányados már nem tartalmazza a τ paramétert, viszont a ν/w hányadosnak az alsó tömeg kicserélése utáni megváltozásából a keresett η továbbra is kiszámítható. Ezt könnyen beláthatjuk, ugyanis a ν/w hányadosban szereplő ν , vagyis a K–Ny-i irányban álló ingakar teljes elfordulása kétfajta erő hatását tükrözi: egyrészt a gravitációs és tehetetlen tömeg eltérése miatti $\eta m G \sin \epsilon$ erőét (5. ábra), amely miatt ν_1 elfordulás adódik, másrészt a gravitációs erő megváltozása miatti mhg_{xz} erő hatását (8. ábra), amely miatt ν_2 elfordulás keletkezik. A teljes ν/w hányados tehát $(\nu_1 + \nu_2)/w$. Amennyiben a tömeg kicserélése után sem az mhg_{xz} , sem az mhg_{yz} erő nem változott meg, akkor ν_2 és w értéke azonos marad, tehát a hányados változása valóban csak a ν_1 változását, vagyis az anyagi minőségi tényező változását tükrözi.



9. ábra EPF-mérési stratégia Eötvösök 3. módszere szerint

Figure 9 EPF measurement strategy according to the 3rd method of Eötvös'

A (10) összefüggésből látható, hogy a g_{xz} gradiens megváltozása az EPF-kísérlet során befolyásolja, akár meg is hamisíthatja a kapott eredményt.

Az EPF mérések 3. módszerét alkalmazva a g_{xz} gradiens megváltozása sem hat a kísérlet eredményére. Ezt Eötvösök úgy érték el, hogy kettős torziós ingával végeztek szimultán méréseket a kétfajta tömeggel. A továbbfejlesztett Eötvös-ingákban (pl. Eötvös–Pekár-, Auterbal-, E54-ingákban) már két (I. és II. jelű) antiparalel ingatesetet helyeztek el. Így a g_{xz} esetleges időbeli változása azonos mértékben hat a két tömegrre, az elcsavarodások (pontosabban a v/w hányadosok) különbségéből a hatás kiesik. A szimultán mérést megismételték a két inga között felcserélve a tömegeket. Ezzel elérték, hogy a két inga kismértékben eltérő paraméterei és beállításai ne befolyásolják a végeredményt.

A 3. módszer szerinti EPF-mérések a tömegek cseréjével és az inga meghatározott sorrendű forgatásával a 9. ábrán látható mérési sorrendben történnek.

Az 1. lépésben a II. inga lelógatott aranyból készült tömegét kicseréljük egy ugyanolyan tömegű pl. alumínium tömegrre, és az $\hat{E}-D$ irányba ($\alpha = 0^\circ$ azimutba) állított ingaszerkezeten leolvassuk az ingák nyugalmi helyzetét.

A 2., 3. és 4. lépésben $\alpha = 90^\circ, 180^\circ$ és 270° azimutba elfordítva a teljes ingaszerkezetet szintén leolvassuk az ingakarok nyugalmi helyzetét.

Az 5. lépésben visszaforgatjuk az ingaszerkezetet $\alpha = 0^\circ$ azimutba, kicseréljük egymással az I. és II. ingarúdról lelógatott tömegeket, és így is leolvassuk a nyugalmi állapotban az ingakarok helyzetét.

Végül a 6., 7. és 8. lépésben az ingakarokon felcserélt tömegekkel elfordítjuk az ingaszerkezetet $\alpha = 90^\circ, 180^\circ$ és 270° fokos azimutba, és így is leolvassuk az I. és II. ingakar nyugalmi helyzetét.

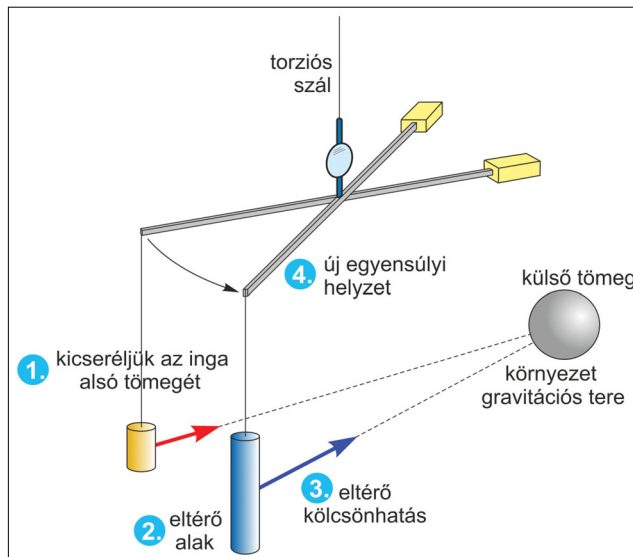
Ezzel a mérési stratégiával a fontos zavaró hibahatások kiejtethők.

Az EPF-mérések szabályos hibája

A (10) összefüggés mind pontszerű m tömegrre, mind pedig az EPF-kísérletben alkalmazott homogén sűrűségű henger alakú próbatestekre érvényes abban az esetben, ha az l és h távolságok a próbatest tömegközéppontjára vonatkoznak. Abban az esetben viszont, ha a g_x változása nem egyenletes, vagyis a $g_x(z) = g_{xz}z$ összefüggés nem írja le pontosan a magasságfüggő változást, akkor ezt a $g_x(z) = g_{xz}z + g_{xxx}z^2$ másodfokú összefüggéssel lehet jól közelíteni. Ekkor például henger alakú próbatestre – amelyeket Eötvösök is használtak a kísérletek során – a teljes erőhatást a módosított $g_x(z)$ függvény z szerinti integrálásával lehet meghatározni, és így a (10) képlet a

$$v_2 = -(2/\tau)m l [hg_{xz} + (h^2 + H^2/12)g_{xxx}] \quad (12)$$

szerint módosul, ahol H a henger alakú próbatest magasságát jelöli (Tóth 2019).



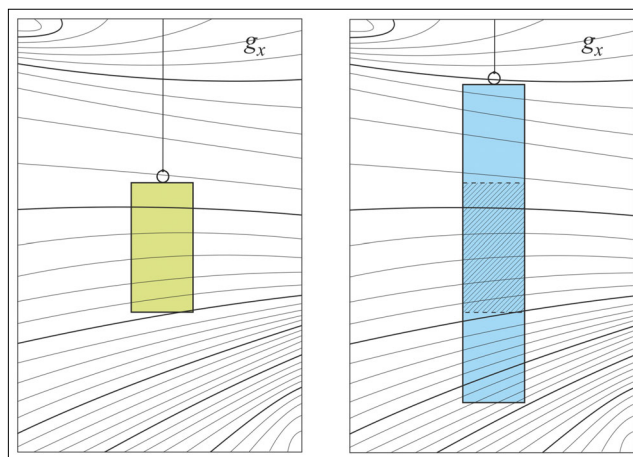
10. ábra A próbatest alakjának változása miatt megváltozik a külső tömegek okozta gravitációs kölcsönhatási erő, ezért az inga új egyensúlyi helyzetbe kerül

Figure 10 Depending on the shape of the mass, the gravitational interaction between the torsion balance and the external masses is different, so the torsion balance is stabilized in another equilibrium position

Ez a (12) összefüggés arra figyelmeztet, hogy *nem lineárisan változó mg_x nehézségi erőtér esetén az EPF-mérésekben szabályos hiba fog jelentkezni, mert a fellejő nyomaték és a v_2 elfordulás a próbatest H magasságától is függ!*

Az eredeti EPF-kísérletben az inga alsó henger alakú tömegét különböző anyagú próbatestekre cserélték ki, így a próbatestek H magasságai lényegesen eltértek egymástól (például a Pt-henger magassága 6 cm, a magnálium (Mg-Al ötvözet) hengeré 11,9 cm, a kígyófaból készült hengeré pedig 24 cm volt).

A próbatest alakjának változása miatt megváltozhat a külső tömegek okozta gravitációs kölcsönhatási erő, ezért



11. ábra Ugyanabban az erőterben különböző méretű tömegekre más erő hat, ha a g_x térbeli változása nem lineáris

Figure 11 In case the spatial change of the g_x is not linear effective gravitational forces in the same gravity field are depending on the size of the body

az inga szükségszerűen új egyensúlyi helyzetbe kerül még akkor is, ha az ekvivalenciaelv sem sérül, és a külső tömegek sem változnak meg (lásd a 10 ábrát).

Ennek az egyszerű magyarázatát a 11. ábrán láthatjuk. Ha a g_{zz} gradiensnek a térbeli változása szabálytalan (nem lineáris) az inga felfüggesztett tömegének környezetében, akkor az ábra bal oldalán lévő nagyobb sűrűségű, kisebb térfogatú tömegről más eredő erő hat, mint a jobb oldali kisebb sűrűségű, nagyobb térfogatú tömegről, amely egy része más erőterésben van. Változó sűrűségeloszlású külső tömegek közvetlen környezetében ez a hatás számottevő lehet, ugyanakkor teljesen szabályos, lineárisan változó erőterésben nem lenne ilyen hatás, itt a különböző méretű tömegekre azonos eredő erő hatna.

A (7) és a (12) képletekből látható, ha az alsó tömeg kicserélése után a próbatest magassága H -ról H' -re változik, akkor emiatt

$$\eta = g_{zz}/(12T \sin \epsilon)[H^2 - H'^2] \quad (13)$$

nem zérus anyagi tényező adódik, vagyis látszólag sérül az ekvivalenciaelv.

Fontos kérdés, hogy az EPF-mérések esetében mekkora szabályos hibát okoz, ha az inga cserélgetett tömegei nemlineáris g_{zz} gradiensű térben vannak.

A szabályos hiba a (13) összefüggés szerint egyenesen arányos g_{zz} értékével, amely egyébként a g_x összetevő magasság szerinti nemlineáris változásának mértékét jellemzi. Tapasztalataink szerint a nagy sűrűségkülönbségű határfelületek közelében legnagyobb a g_{zz} , vagyis itt a legnagyobb a nemlinearitás mértéke, itt változik a legmarkánsabban a g_x összetevő (Völgyesi, Ultman 2010). Akár kisebb tömegek is okozhatnak erős nemlinearitást, ha túl közel vannak a mérések helyszínéhez.

Sajnos az eredeti EPF-mérések helyszínéről nincsenek információink, sem az eredeti mérési jegyzőkönyvek, sem a kísérlet helyszínéről készült rajzok nem állnak rendelkezésre, így utólag a gradienshatást sem tudjuk pontosan meghatározni. A mérések és modellszámítások szerint viszont falak, padló vagy nagyobb tömegek közelében a g_{zz} értéke elérheti akár a $0,5\text{--}3 \text{ nGal/cm}^2$ értéket is, így a kísérlet eredményében jelentkező hatás zérus értéktől egészen a $8 \cdot 10^{-8}$ értékig terjedő tág tartományban változhat az erőteréstől és a hengerek alakjától függően (Tóth 2019). Az EPF-kísérlet eredményeit, az Eötvösök által kiszámított $\eta = \pm 1 - 6 \cdot 10^{-9}$ értékeket (Eötvös et al. 1922) ez a szabályos hiba elérheti, sőt kedvezőtlen esetben meg is haladhatja (Tóth 2019).

Az ekvivalenciakísérlet megismétlése tehát nemcsak azért indokolt, mert további szempontokat adhat a Fischbach és munkatársai által az EPF-kísérletben talált kötési energiától függő szabályos eltérés okára, hanem azért is, hogy ellenőrizzük a próbatestek alakjától függően jelentkező szabályos hatás befolyását a mérési eredményekre. Szerencsére a szabályos hiba viszonylag könnyen kezelhető a próbatestek alakjának célszerű megválasztásával. Ha ugyanis olyan henger alakú próbatömegeket használunk a kísérletben, amelyek esetében a $H^2/12 - R^2/4$ értéke



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

Figure 12 Torsion balances at the Department of Geodesy and Surveying of BME. On the left side of the picture the Auterbal, and the right side the Eötvös–Pekár torsion balance can be seen

állandó, akkor ez a szabályos hiba – függetlenül a gravitációs erőter szerkezetétől – az EPF-mérésekben nem jelentkezik (Tóth 2019). Természetesen a magasabbrendű effektusok és minden más hibaforrás nagyságát meg kell becsülnünk.

Előkészületek az EPF-mérések megismétlésére

A tervezett mérések céljára két különböző típusú műszert találtunk alkalmasnak: a BME Általános és Felsőgeodézia Tanszékének Eötvös–Rybár-féle Auterbal- (Automatic Eötvös–Rybár Balance) ingáját, illetve az MTA CSFK Geodéziai és Geofizikai Intézetének Eötvös–Pekár-féle torziós ingáját, az ún. Small original Eötvös G-2 műszert. A 12. ábra bal oldalán látható Auterbal-ingát az 1920-as években fejlesztették ki Rybár István, Eötvös későbbi utóda vezetésével a Kísérleti Fizikai Tanszéken. A korábbi ingákhoz képest az azimutonkénti 40 percre csökkentett észlelési idő mellett a legjelentősebb fejlesztés a műszer forgatásának rugós óraszerkezettel történő megoldása és a műszer leolvasási értékeinek fotografikus rögzítése volt (Szabó 1999). Az automatikus leolvasás lehetővé tette az inga felügyelet nélküli működését, ugyanakkor a kényes óraszerkezet gyakori meghibásodásai miatt a műszer folyamatos figyelmet igényelt.

A 12. ábra jobb oldalán látható Eötvös–Pekár-inga fejlesztése esetében Pekár Dezső a méretek és a lengésidő csökkentésére törekedett, és a műszerek egyszerűségének megőrzésére helyezve a hangsúlyt, maradt a pontosabb és megbízhatóbb vizuális leolvasás mellett. A Pekár által fejlesztett ingák Eötvös–Pekár-ingaként ismertek, de a hivatalos típusjelzésük Small original Eötvös G-2 volt (Szabó 1999). A műszert három változatban gyártották, amelyek alapvetően csak a torziós szál hosszában különböztek egymástól. Az 1926-ban gyártott műszerekben a szál hossza még 50 cm, az 1928-as típusú készülékekben 40 cm, az 1930-as ingákban pedig már csak 30 cm volt. Az Auterbal- és mindhárom Eötvös–Pekár-inga érzékenysége is meg egyezik az EPF-mérésekre használt ingák érzékenységeivel, köszönhetően a közben lezajlott fejlesztéseknek, azaz kb. 1 E.

Mivel a rendelkezésünkre álló ingákat igen régen használták, az első fontos lépés az ingák felújítása, javítása, használhatóságuk ellenőrzése, az ún. beszabályozása és kalibrálása volt (Völgyesi et al. 2009). Mindez hosszú hónapokat vett igénybe. A torziós szálak csavarodási driftjének minimálisra csökkentése céljából a szálakat közel egy éven keresztül folyamatosan terheltük az ingák kioldott helyzetében. A szálak hosszú idejű terhelésével a Pekár-inga esetében sikerült elérni mindkét szál közel driftmentes állapotát, míg az Auterbal-ingának egyelőre csak az egyik torziós szála érte el a szinte teljes driftmentes helyzetet. Ettől persze az Auterbal-inga is alkalmas mérésekre, mivel a drift a mérések kiértékelése során egyszerűen korrekcióba vehető, de a szélső pontosságot igénylő EPF-mérések céljára szerencsésebbnek látszott a Pekár-inga használata. Ráadásul mivel az EPF-mérések megismétlése tekintetében döntő szempont az ingában lévő tömegek egyszerű cserélhetősége, ezért az EPF-mérések céljára egyértelműen a 30 cm szálhosszúságú Pekár-inga mellett döntöttünk, és a további fejlesztéseket elsősorban erre az eszközre koncentráltuk.



13. ábra | Talajrezgések regisztrálása *Güralp* 3T 3 tengelyű szeizmográf-fal az inga szomszédságában
 Figure 13 | Registering microseismic vibrations with *Güralp* 3T 3-axis seismograph next to the torsion balance

A sikeres mérések legfontosabb követelménye a méréseket zavaró körülmények minél teljesebb kiiktatása. Az EPF-méréseket leginkább veszélyeztető hibaforrások: a műszert leolvasó észlelő zavaró tömege, a talajrezgések, a hőmérséklet változása és a nehézségi erőtér gradienseinek magas értéke az inga környezetében. Az utóbbi probléma egyszerűen kezelhető a megfelelő helyszín kiválasztásával és a nehézségi erő potenciáljának második deriváltjait tartalmazó Eötvös-tenzor elemeinek pontos feltérképezésével a műszer környezetében. Megfelelő helyszín kiválasztásával a környezeti hőmérséklet stabilitása és elsősorban a forgalom okozta talajrezgések is kiküszöbölhetők, ezért választottuk a mérések helyszínéül a KFKI Jánossy Földalatti Fizikai Laboratórium 30 m-es mélységben lévő földalatti folyosóját. Előzetes méréseink szerint a helyszín hőmérsékleti stabilitása megfelelő, a napi változás mindössze néhány század fok és a mikroszeizmikus talajnyugtalanság is megfelelően alacsony, amit a 13. ábrán látható *Güralp* 3T háromtengelyű, szélessávú szeizmográf-fal folyamatosan regisztrálunk az inga szomszédságában.

A mérések legjelentősebb és legveszélyesebb hibaforrása a műszert kezelő és leolvasó személy jelenléte, elsősorban a tömeghatása (Csapó et al. 2009). Ugyanakkor a jelenlétével a hőmérsékleti egyensúlyt is megbontja, és mozgásával egyértelműen érzékelhető talajrezgéseket kelt, sőt a tapasztalat szerint a műszer parányi megdőlését is okozza. A hibaforrás a közvetlen emberi jelenlét kiküszöbölésével, a mérési folyamat teljes automatizálásával, távvezérelt méréssel oldható meg. Ehhez szükséges a vizuális leolvasás helyett megfelelő CCD érzékelők alkalmazásával és számítógépes képiértékeléssel történő digitális műszerleolvasás, valamint az inga különböző mérési azimutokba forgatásához távvezérelt motor alkalmazása.

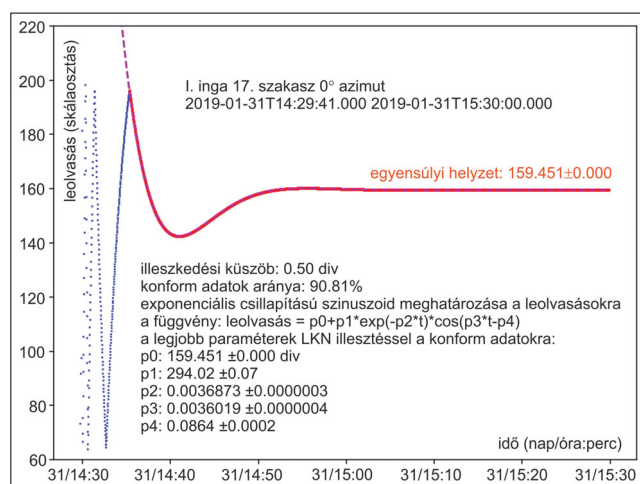


14. ábra | Az inga leolvasóberendezésének automatizálása
 Figure 14 | Reading the scale of the torsion balance has been automated

A Pekár-inga vizuális leolvasásra szolgáló okulárjának helyére CCD érzékelőt szerelve az inga karjának helyzetét a keletkezett digitális kép kiértékelésével tudjuk meghatározni (14. ábra). Vizsgálataink szerint megfelelő felbontású CCD kamerát alkalmazva az elektronikusan rögzített képen a kinagyított skála egy osztása 25–30 képpont nagyságú részt foglal el. Alkalmos képkiértékelési eljárással egy képpont tört részének megfelelő helyzet is meghatározható, így a várható leolvasási pontosság egy képből nagyjából $1/100$ skálaosztás (10^{-10}). Ez már így is egy nagyságrenddel jobb, mint az eredeti vizuális észlelés 10^{-9} pontossága. Ha ehhez hozzávesszük még azt, hogy az inga egyensúlyi helyzetéről másodpercenként több képet készítve néhány perc alatt akár 1000 kép is rögzíthető és kiértékelhető, ez további leolvasási pontosságnövekedést eredményezhet.

Fontos kérdés a mérés során az, hogy a digitális képfeldolgozás kellően gyors és hatékony-e? A relatív skálaelmozdulás két egymást követő kép között képkorrelációval az eredeti skálát használva is gyorsan és pontosan meghatározható. A skála abszolút helyzetének, vagyis a teljes leolvasásnak az automatikus meghatározása már jóval nehezebb, a mesterséges látás alkalmazását igényli, ugyanis fel kell ismerni a skála osztásaihoz tartozó számokat és azok helyzetét is.

Ezért új vonalkódos skálát terveztünk és ehhez kapcsolódó kiértékelési eljárást készítettünk, amely a számítógépes leolvasást jóval egyszerűbbé, hatékonyabbá teszi, ugyanakkor növelni tudja a leolvasási pontosságot is. A vonalkódos hosszmerési technológiát már évtizedek óta sikeresen alkalmazzák különböző geodéziai műszergyártó cégek a nagy pontosságú, szabatos digitális szintezésben. Ennek analógiájára olyan vonalkódos skálát terveztünk, amelynek a CCD-n látható részéből bármilyen leolvasási helyzetben nagy pontossággal és egyértelműen rekonstru-



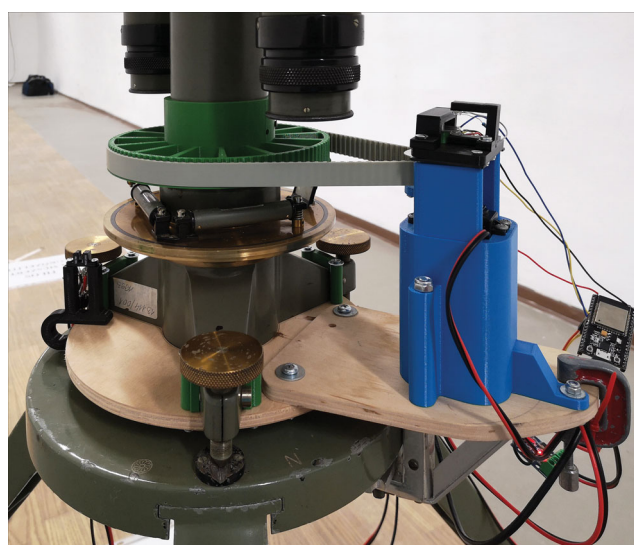
15. ábra Az ingakar egyensúlyi helyzetének meghatározása a mozgás csillapodási görbéjének illesztésével. Az ingakar a kezdeti gyors mozgás közben a határolók között ütközik, majd egy közel 1 órás időtartam elteltével nyugalmi helyzetbe kerül

Figure 15 Determining equilibrium position of the torsion balance's arm by fitting of a damping curve. The arm's movement starts with quick motion and bounces between delimiters, then it settles in the equilibrium position after about 1 hour

álható a skála nullpontjának távolsága, vagyis a keresett skálaleolvasás. Miután a vonalkódos skála hagyományos vizuális észlelésre nem alkalmas, ezért amint a 14. ábra felső részén is látható, kombinált vonalkódos és hagyományos számozott skálákat terveztünk. Így megmarad a hagyományos észlelés lehetősége, ugyanakkor a számítógépes leolvasás számára ideális és gyors vonalkódos kiértékelés is lehetővé válik. A kombinált skálák legyártása lézergravírozással folyamatban van, és amennyiben a pontosságuk kielégíti az igényeinket, akkor ezeket fogjuk alkalmazni a mérés során. Az első vonalkód-gravírozás minősége sajnos messze nem elégtette ki az elvárásainkat, ezért ezt követően részletesen meg kellett ismerkednünk a gyártási technológiákkal, és az új terveket ezek ismeretében kellett kialakítani.

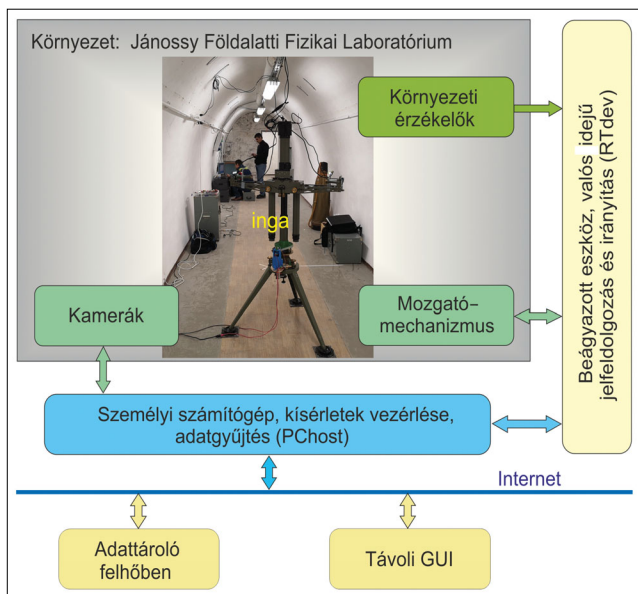
A kísérlet szempontjából lényeges követelmény az inga egyensúlyi helyzetének pontos meghatározása. Az Eötvös-kísérletben az inga egyensúlyi helyzetét az észlelő személy vizuális leolvasással állapította meg az ingakar mozgásának csillapodása után. Az eredeti kísérlettől eltérően az egyensúlyi helyzet meghatározását a leolvasások alapján az ingakar mozgását leíró csillapodási görbe illesztésével valósítjuk meg (15. ábra). Ennek az az előnye, hogy egyrészt több adat alapján pontosabb meghatározást tesz lehetővé, másrészt az ingakar lengésének folyamatos megfigyelése révén az inga mérés közbeni viselkedéséről is fontos információkhoz jutunk.

A mechatronikai megoldások közül a legkritikusabb elem az inga távvezérelt forgatását végző egység elkészítése. Az egységgel szemben támasztott fontos követelmény, hogy a forgatások közötti nyugalmi helyzetben, a mérések közben elkerüljük a forgatómotor és az ehhez kapcsolódó szerkezet által okozott permanens mágneses zavarokat. A motor vezérlését úgy kellett megoldani, hogy az inga 0° , 90° , 180° , 270° azimutokba forgatása pontosan, üzembiztosan, ugyanakkor hirtelen gyorsulások és lassulások nélkül,



16. ábra Az inga távvezérelt forgatásának megoldása

Figure 16 Preliminary solutions for the remote-controlled rotation of the torsion balance



17. ábra | A távvezérelt rendszer felépítése
 Figure 17 | Structure of the remote control system

a rendkívül érzékeny ingaszerkezet szempontjából kíméletesen, mechanikai sokkhatás nélkül történjen. A forgatás során a megfelelő indulás és megállás az inga lengésének csillapodását is kedvezően befolyásolja, rövidítheti a csillapodáshoz szükséges időt.

Az inga különböző mérési azimutokba forgatásához a 16. ábrán látható szerkezetet készítettük el, a forgatásról speciális motor gondoskodik, az inga szabadon futó felső részével összekötő bordásszíjas hajtáson keresztül. A legtöbb alkatrész 3D nyomtatással készült.

A jelenlegi áttétel 1:10, amelyhez egy 10 és egy 100 fogas tárcsa tartozik a motor, illetve az inga oldalán. A szöghelyzet megfelelő felbontású visszaméréséről optikai elven működő enkódertárcsa és a hozzá kapcsolt optokapuk gondoskodnak a hajtás motoroldali tengelyén. A tárcsa 100 vonalas, ez a dupla fototranzisztoros kialakításnak köszönhetően fordulatonként összesen 400 inkremenst jelent. Mivel az inkeremensek előjeles számlálása a motoroldali tengelyen történik, az áttétel miatt az inga teljes, 360°-os tartományára vonatkoztatva elvileg 0,09°-os felbontást kapunk. Az inga távvezérléssel történő forgatása már megfelelően, rutinszerűen működik, azonban a tapasztalataink szerint az ingakarok azimutjának gyakorlati meghatározási pontossága az EPF-mérésekhez még nem megfelelő. Jelenleg két olyan megoldáson dolgozunk, amely lehetővé teszi az ingakarok helyzetének lényegesen pontosabb meghatározását.

A mérés automatizálását biztosító megoldás architektúrájának vázlatát a 17. ábra mutatja. A beágyazott mikrovezérlőt tartalmazó egység (RTdev) feladata a valós idejű adatgyűjtés az inga környezetében elhelyezett szenzorokról (hőmérséklet, páratartalom, a mágneses tér mérése és kompenzálása stb., igény szerint), a tápellátás monitorozása, valamint az inga mozgóegységének vezérlése, így a szöghelyzet-jeladók kezelése is. A nem időkritikus mű-

veletek személyi számítógépen (PChost) valósulnak meg. Itt történik az automatizált méréshez rögzített, akár mérésenként egyedi módon definiált forgatási szekvenciák végrehajtása, a CCD érzékelőkön az adatgyűjtés vezérlése, a kapott adatok és képek naplózása és mentése, illetve feldolgozása is. A PChost fogadja a kameraképeket is. Itt nem szükséges valós idejű feldolgozás, ugyanakkor a képek rögzítésének pontos időpontját is tárolni kell.

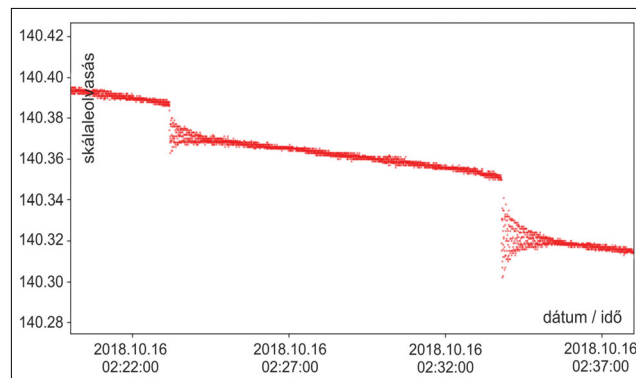
A sikeres mérések fontos követelménye, az inga modernizálásához szükséges egyedi informatikai megoldások mellett különleges alkatrészek precíziós beszerzése és gyártása. A soron következő legnehezebb feladat a megfelelő alakú és tömegű próbatömegek gyártása, valamint megfelelő szálakra függesztése és cseréje. A munka ebben a tekintetben is a tervek szerint halad, az első alumínium és réz próbatestek elkészültek és a felfüggesztő szálak rögzítésére is már vannak sikeres próbálkozásaink.

Az eddigi mérések és tapasztalatok

A műszerek felújítását követően a torziós szálak csavarodási driftjének csökkentése érdekében a szálakat hosszú ideig terheltük, közel egyéves terheléssel a Pekár-ingánál nagyjából sikerült elérni a szálak közel driftmentes állapotát. A szálak pihentetése után a drift újra jelentkezik, viszont rövidebb pihenés után gyorsabban megszűnik. Ennek szilárdtest-fizikai magyarázata van.

A drift minden eddiginél pontosabb megfigyelését az inga automatizált átalakítása tette lehetővé. A CCD érzékelők alkalmazásával lehetőségünk van másodpercenként több kép rögzítésére, és az általunk készített képkiértékelő szoftverrel század skálaegységnél is nagyobb pontosságú leolvasás lehetséges (az eredeti vizuális leolvasás esetében már a tized skálaegység is bizonytalan).

A drift részletes tanulmányozása során érdekes jelenségre figyeltünk fel. Amint a 18. ábrán látható, az inga lassú elcsavarodása miatt csökken a skálaleolvasások értéke, viszont ebben a lassú csökkenésben ugrásszerű változások is jelentkeznek. Az ugrást követően a zavar hatására az inga kis amplitúdóval lengeni kezd, de ez gyorsan csillapodik.



18. ábra | A torziós szálban terhelés hatására bekövetkező ugrásszerű elmozdulások, szögelfordulások

Figure 18 | Jump-like rotation changes by the load of torsion wire



19. ábra | A felfüggesztő szál hosszának mérése precíziós hosszú szárú tolómérővel

Figure 19 | Measuring the length of the suspension wire by a precision long-stem caliper

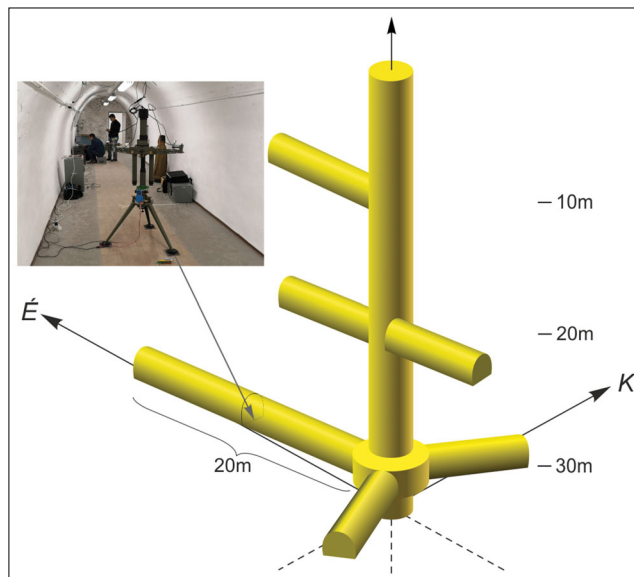


20. ábra | A felfüggesztett tömeg mérése Kern DLB precíziós labor-mérleggel

Figure 20 | Measuring the suspended mass with a Kern DLB precision laboratory balance

A jelenségnek szilárdtest-fizikai magyarázata van, az igen vékony (0,017 mm vastagságú) torziós szálban diszlokációk jelenlétére következtethetünk. A diszlokációk a torziós szál anyagában (kristályrácsában) meglévő szabálytalanságok, rácshibák. Ezek a szabálytalanságok és rácshibák különböző hatásokra (pl. hő- és erőhatásra) átalakulnak, átrendeződnek, a szemcsehatárokon fennakadnak, majd terhelés hatására felszabadulnak; megváltoztatva ezzel az anyag (a torziós szál) mechanikai tulajdonságait. (Eötvösék éppen a hőkezeléssel és a torziós szálak terhelésével érték el a szálakban a diszlokációk átalakítását, csökkentését.) A 18. ábrán a 2018. október 16-i éjszakai regisztrátum rövid kinagyított része látható; a függőleges tengelyen az I. inga skálaleolvasásai, a víz-

szintes tengelyen az idő szerepel. Eddig a torziós szálaknak ez a változása nem volt látható, erre a folyamatos és igen pontos skálaleolvasás adott először lehetőséget. Az általunk kimutatott változások elsősorban a szálak pihenés utáni terhelésekor jelentkeztek. Ez arra utal, hogy a jelenség a régóta ismert Portevin–Le Chatelier-effektus egy változata.



21. ábra | Az EPF-mérések helyszíne a Jánosy Földalatti Fizikai Laboratóriumban. Az Eötvös-ingát 30 m mélységben a közel É–D irányú, 20 m hosszú folyosó közepén állítottuk fel

Figure 21 | The location of the EPF measurements in the Jánosy Underground Laboratory. The torsion balance is set up at a depth of 30 m in the middle of a 20 m long corridor



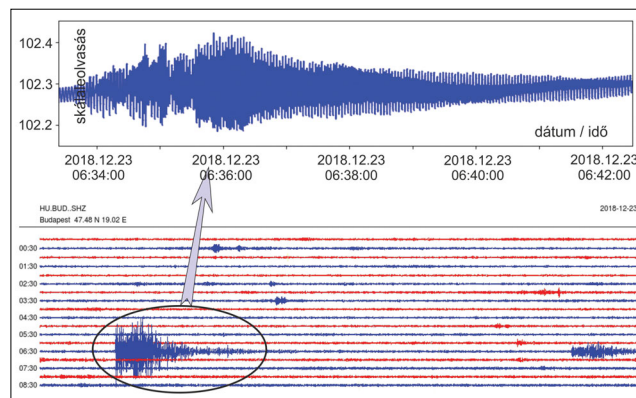
22. ábra | Mérés gyroteodolittal a Jánosy Földalatti Fizikai Laboratóriumban a pontos É–D irány meghatározására

Figure 22 | Measuring with gyrotheodolite at Jánosy Underground Laboratory to determine the exact N–S direction

A többé-kevésbé driftmentes állapot elérését követően az ingák pontos beszabályozása, a nullhelyzet beállítása, majd a műszerállandók ellenőrzése következett. A torziós szál τ csavarási állandóját és a lengő szerkezet mechanikai tehetetlenségi nyomatékát az inga közelében megfelelően elhelyezett különböző tömegek felhasználása mellett, a lengésidő mérésén keresztül határoztuk meg; a felfüggesztő szálak hosszát 0,05 mm pontosságú speciális tolómérővel mértük (19. ábra), a tömegeket a 20. ábrán látható Kern DLB precíziós labormérleggel 0,001 gramm pontossággal határoztuk meg. Itt kell megjegyeznünk, hogy a τ csavarási „állandó” a mérések során (pl. éppen a diszlokációk miatt) folyamatosan változhat. Ennek következtében az EPF-mérések szintjén már nem beszélhetünk a hagyományos értelemben vett „ingakalibrációról” és „inga-állandókról”, mivel mindkettő függ a szál változó csavarási „állandójától” is. Nem véletlen, hogy Eötvösök az EPF-kísérlet 2. és 3. módszerében igyekeztek kiejteni a csavarási „állandó” változásának hatását.

Az Auterbal- és az Eötvös-Pekár-ingák felújítását és átalakítását követően a kalibrációs összehasonlító mérésekre a BME Oltay-féle főalappontján (Ádám et al. 2018) került sor, ahol mindkét ingával több 5 azimutos mérést végeztünk a gradiensek meghatározása céljából. A két különböző ingával mért gradiensek az elvárt mértékben megegyeztek, az U_{xz} , U_{yz} horizontális gradiensek néhány tized E, az U_{Δ} , $2U_{xy}$ görbületesi gradiensek 1 E nagyságrendben tértek el egymástól.

2018-ban az ingák BME-n végzett fejlesztésével és a tesztmérésekkel párhuzamosan, a mérések végleges helyszínén, a Wigner FK Jánossy Földalatti Fizikai Laboratóriumában is folytak az előkészületek. Az EPF-méréseket a

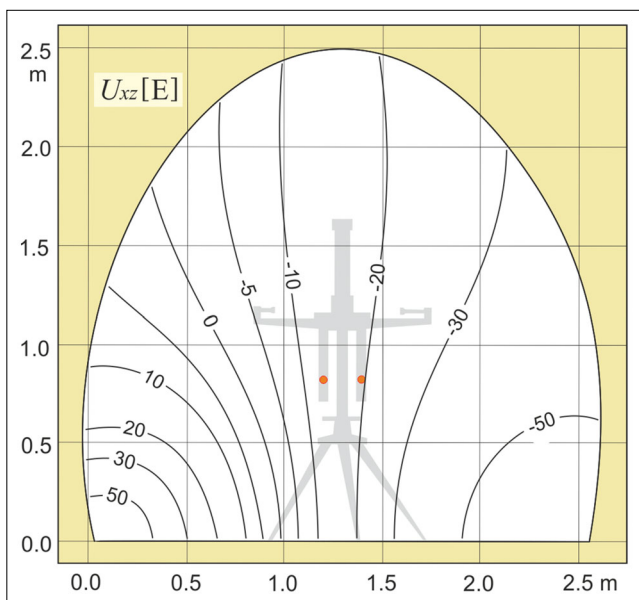


23. ábra Szerbiai földrengés felületi hullámai. Az ábra felső részén az Eötvös-ingával regisztrált kép, alatta a budapesti Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatórium felvételének egy részlete

Figure 23 Surface waves of Serbian earthquake. In the upper part of the figure is the registered picture by the torsion balance, below is the seismogram of the Kövesligethy Radó Seismological Observatory

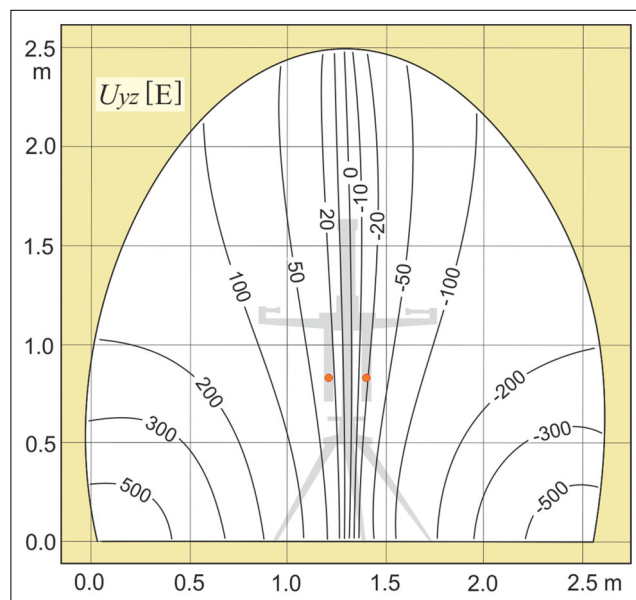
21. ábrán látható akna 30 m mélységben lévő közel É-D irányú, 20 m hosszúságú folyosója közepén terveztük.

A megfelelő elektromos hálózat és internetkapcsolat kiépítését követően elkészült a mélyakna légkondicionálása, megtörtént a digitális hőmérők, páratartalom-mérő és szeizmográf telepítése. A mérések céljára átalakított Eötvös-Pekár-inga 2018. december 20-án került a Jánossy Földalatti Fizikai Laboratóriumba. A tesztmérések elkezdése előtt giroteodolitos méréssel szögmásodperc megbízhatósággal meghatároztuk az EPF-mérésekhez szükséges pontos É-D irányt (22. ábra).



24. ábra Modellszámítással meghatározott U_{xz} gradiensek a Jánossy Földalatti Fizikai Laboratóriumban a mérési pont szelvényében

Figure 24 Calculated gravity gradients U_{xz} in the section of the measuring point in the Jánossy Underground Laboratory



25. ábra Modellszámítással meghatározott U_{yz} gradiensek a Jánossy Földalatti Fizikai Laboratóriumban a mérési pont szelvényében

Figure 25 Calculated gravity gradients U_{yz} in the section of the measuring point in the Jánossy Underground Laboratory

Röviddel a tesztmérések megkezdése után a 23. ábra felső részén látható szokatlan hullámokra lettünk figyelmesek az Eötvös-ingamérések során rögzített felvételeken. Mivel a hullámok hasonlítottak a földrengések esetén regisztrált felületi hullámokhoz, ellenőriztük, hogy a kérdéses időben valóban keletkezett-e olyan földrengés, amely a jelenséget okozhatta. Egyértelműen kiderült, hogy az Eötvös-ingával valóban földrengést regisztráltunk, ugyanis 2018. dec. 23-án reggel 06:34-kor Szerbiában, Belgrád közelében pattant ki az $M = 4,3$ magnitúdójú, kis fészekmélységű rengés, amelynek a hullámai Budapest területén is észlelhetők voltak. A 23. ábra alsó részén az MTA Budapesti Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatóriuma által regisztrált felvétel egy részlete látható, ahol megjelöltük a szerbiai rengés felületi hullámait. A földrengést a laborban telepített szeizmográfunk is mérte. Nagy biztonsággal állítható tehát, hogy az Eötvös-inga történetében először sikerült az ingával földrengés-hullámokat regisztrálnunk.

Az előző részekben láthattuk, hogy az EPF-mérések eredményeit veszélyesen befolyásolhatják a nehézségi erőter ismeretlen gradiensei. A nehézségi erő gradienseinek nemlinearitása az egykori EPF-mérések ismeretlen szabályos hibáját okozhatta. Ezen kétféle úton lehet segíteni: vagy megfelelő mérési technika alkalmazásával, vagy a nehézségi erőter gradienseinek ismeretében megfelelő korrekciós számításokkal. Bármelyik lehetőséget (akár a kettőt együtt is) használjuk, szükséges az inga felfüggesztett tömegeinek környezetében a nehézségi erőter gradienseinek pontos ismerete. Ezeket a gradienseket kétféleképpen határozhatjuk meg: modellszámításokkal és mérésekkel. Az EPF-mérések szempontjából kritikus U_{xz} , U_{yz} gradiensek modellszámításokkal meghatározott eloszlását a Jánossy Földalatti Fizikai Laboratóriumban a mérési pont szelvényében a 24. és a 25. ábrán láthatjuk. Az ábrákon feltüntettük az inga árnyképét is, így jól látható a gradiensek értéke és eloszlása az inga felfüggesztett tömegeinek környezetében.

A tesztméréseket követően mérésekkel is meghatároztuk a gradiensek értékét a mérési pont környezetében. Legkevesebb 3-3 darab, öt azimutos mérést végeztünk a mérési ponton, a mérési ponttól 15 cm távolságra É, D, K és Ny irányban, valamint az ingát 30 cm magasságra felemelve is mértünk.

A méréssel meghatározott U_{xz} gradiens $-15,2$ E volt, az U_{yz} pedig $-14,4$ E. A számított és mért U_{xz} gradiensek eltérése $1,0$ E, az U_{yz} gradiensé pedig $15,9$ E. Az U_{yz} viszonylag nagy eltérése nem meglepő, a 24. ábrán is látható nagy oldalirányú változás miatt. Ezt a változást a K-i irányban 15 cm-rel áthelyezett ingával megmérve az U_{yz} különbség $-24,4$ E-nek adódott, tehát a mért változás 10 cm-en keleten -16 E értéket tesz ki.

Az inga átalakítását követően, az eddigi tesztmérések tapasztalatai alapján bizakodva tekintünk az EPF-mérések megismétlése elé, bízunk a mérések sikerében és eredményességében.

Összegezés

Eötvös Loránd munkatársaival a súlyos és a tehetetlen tömeg arányosságára vonatkozóan elvégzett kísérletsorozatban apró, a hibahatárt alig meghaladó eltéréseket kaptak. Az Eötvösék méréseiben általunk feltárt szisztematikus hiba a nehézségi erőter gradienseinek olyan magasabb rendű hatása miatt lép fel, amelyet az alkalmazott minták alakjától függő erőhatást okoz. A mérésekben talált szisztematikus hibalehetőség indokolttá teszi a mai korszerű technikai lehetőségek által kínált jobb feltételek mellett a kísérletek megismétlését.

2017 júniusában a Wigner Fizikai Kutatóközpontban döntés született az EPF-mérések Eötvös-ingával történő megismétlésére és az esetleges eltérések tényleges okának feltárására. A mérésekben és ezek előkészületeiben az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpontja, a BME Általános és Felsőgeodéziai Tanszéke, az Egyesület a Tudomány és Technológia Egységéért (ETTE), a BME Irányítástechnika és Informatika Tanszéke vesznek részt más további szervezetek, tanszékek és szakértők bevonásával.

A méréseket a KFKI területén lévő Jánossy Mélyaknában, 30 m mélységben, megfelelő nyugalmi körülmények és kontrollált feltételek között tervezzük.

A mérések előkészületi munkái több mint egy éven keresztül folytak a BME Általános és Felsőgeodéziai Tanszékén. Az EPF-mérések céljára szolgáló Eötvös–Pekár-inga átalakítása megtörtént, a távvezérelt forgatómechanika működik, a CCD érzékelők a megfelelő skálavilágítással kiválóan alkalmasak a mérésekre, a szükséges vezérlő- és kiértékelőszoftverek döntő részét megírtuk és teszteltük, a Jánossy Mélyakna felújítása befejeződött.

A mérések céljára átalakított Eötvös–Pekár-inga 2018. december 20-án került a Jánossy Mélyaknába, ahol azóta a legfontosabb tesztmérések megtörténtek.

Jelenleg az inga működésének, valamint a vezérlő- és kiértékelőszoftvereknek a „finomhangolása” folyik, és további fontos tesztmérések is folyamatban vannak. Megoldandó feladat még a próbatömegek rutinszerű cseréjének kidolgozása. A napokban készültek el az igen pontosan megmunkált első alumínium- és réztömegek, az elkövetkező napok kritikus feladata a megfelelő hosszúságú felfüggesztő szálak rögzítése a tömegekhez.

Elképzeléseink szerint a tényleges EPF-méréseket a Jánossy Földalatti Fizikai Laboratóriumban 2019 februárjában tudjuk elkezdni. A kísérleteink célja, hogy az EPF-mérések pontosságát legalább egy nagyságrenddel javítva megmutassuk, hogy az azokban feltárt rejtélyes szisztematikus hibát valóban gradienshatás okozta-e, vagy esetleg valamilyen speciális, a Föld forgásához kötött ekvivalenciaelv-sértés történik. Az újabb torziós ingás méréseket nem pontosan az Eötvös-inga módszerével végezték, ezért ekvivalenciaelv-sértés sem zárható ki (Fischbach 2019).

Köszönetnyilvánítás

A mérések alapműszere, az Eötvös–Pekár-inga az MTA CSFK Geodéziai és Geofizikai Intézet tulajdona. Ezúton

fejazzük ki köszönetünket az intézet vezetőinek, hogy a műszert a méréseink céljára a rendelkezésünkre bocsátották. Köszönjük továbbá Lévai Péternek, a Wigner FK főigazgatójának, továbbá Barnaföldi Gergelynek és Somlai Lászlónak a Jánosy Földalatti Fizikai Laboratórium laborvezetőinek segítő közreműködését. Kutatásaink részben a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal – NKFIH No. 124286 támogatásával folytak.

A tanulmány szerzői

Völgyesi Lajos, Szondy György, Tóth Gyula, Péter Gábor, Kiss Bálint, Deák László, Égető Csaba, Fenyvesi Edit, Gróf Gyula, Ván Péter

Hivatkozások

Ádám J., Rózsa Sz., Tóth Gy., Völgyesi L. (2018): Magyarország 100 évvel ezelőtt létesített első gravimetriai főalappontjának újramérése a Műegyetemen. *Geodézia és Kartográfia*, 70(2), 4–14.

Eötvös R., Pekár D., Fekete J. (1922): Beiträge zum Gesetze der Proportionalität von Trägheit und Gravität. *Annalen d. Physik*, 11–66.

Braginsky V. B., Panov V. I. (1971): Verification of Equivalence Principle of inertial and Gravitational Mass. *Zh. Eksp. Theor. Fiz.*, 61, 873.

Csapó G., Laky S., Égető Cs., Ultmann Z., Tóth Gy., Völgyesi L. (2009): Test measurements by Eötvös-torsion balance and gravimeters. *Periodica Polytechnica Civil Eng.*, 53(2), 75–80.

Fischbach E., Sudarsky D., Szafe A., Talmadge C., Aronson S. H. (1986): Reanalysis of the Eötvös experiment. *Physical Review Letters*, 56(11), 3.

Fischbach E. (2019): The enduring significance of Eötvös' most famous experiment, arXiv:1901.11163.

Franklin A., Fischbach E. (2016): *The rise and fall of the fifth force: Discovery, pursuit, and justification in modern physics.* Springer, 2016.

Király P. (2007): A 100 éves Eötvös–Pekár–Fekete-kísérletek és máig tartó hatásuk. *Fizikai Szemle*, 57(1), 1–6.

Patkós A. (2019): Eötvös Loránd időszerűsége – 1. rész. *Fizikai Szemle*, 69(1), 6–12.

Perjés Z. (2005): Precíz gravitációs kísérletek. *Fizikai Szemle*, 55(2), 45–48.

Péter G., Deák L., Gróf Gy., Kiss B., Szondy Gy., Tóth Gy., Ván P., Völgyesi L. (2019): Az Eötvös–Pekár–Fekete ekvivalenciaelmérések megismétlése. *Fizikai Szemle*, 69(4).

Renner J. (1935): Kísérleti vizsgálatok a tömegvonzás és tehetetlenség arányosságáról. *Matematikai és Természettudományi Értesítő* 13, 542.

Renner J. (1964): Az Eötvös-kísérlet. *Fizikai Szemle*, XIV, 6–10.

Roll P. G., Krotkov R., Dicke R. H. (1964): The equivalence of inertial and passive gravitational mass. *Ann. Phys.* 26, 442.

Szabó Z. (1999): Az Eötvös-inga históriája. *Magyar Geofizika*, 40(1), 26–38.

Tóth Gy. (2019): Az Eötvös–Pekár–Fekete ekvivalenciamérések szabályos hibája. *Fizikai szemle* 69(5).

Völgyesi L., Égető Cs., Laky S., Tóth Gy., Ultmann Z. (2009): Eötvös-inga felújítása és tesztmérések a budapesti Mátyás-hegyi-barlangban. *Geomatikai Közlemények*, 12, 71–82.

Völgyesi L. (2005): A nehézségi erőttel kapcsolatos fizikai alapfogalmak áttekintése. *Geomatikai Közlemények* 8, 175–179.

Völgyesi L., Ultman Z. (2010): A nehézségi gradiensek linearitás vizsgálata a Mátyás-barlangban. *Geomatikai Közlemények*, 13(2), 123–128.

Will C. M. (2014): The confrontation between general relativity and experiment. *Living Reviews in Relativity*, 17.1, 4. (arXiv:1403.7377)