

EÖTVÖS-INGÁK FELÚJÍTÁSA ÉS TOVÁBBFEJLESZTÉSE, JEL-ZAJ VISZONYAIK ELEMZÉSE

Völgyesi Lajos¹, Szondy György¹, Tóth Gyula¹, Fenyvesi Edit², Kovács Péter², Kiss Bálint³, Égető Csaba¹, Barnaföldi Gergely Gábor², Lévai Péter², Ván Péter^{2,4}

¹ BME, Építőmérnöki Kar, Általános- és Felsőgeodézia Tanszék,

² HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont,

³ BME, Irányítástechnika és Informatika Tanszék,

⁴ BME, Gépészmérnöki Kar, Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék,

Napjainkban több okból vált újra időszerűvé az Eötvös-ingák használata. Jelenleg a geoid finomszerkezetének meghatározásában [1], korábban olaj- és földgázlelőhelyek felkutatásában, valamint a fizikában a súlyos és a tehetetlen tömeg azonosságának igazolásában volt és van nagy jelentőségük [2]. Az ekvivalenciaelv modern kori méréseiről több áttekintő jellegű publikáció is elérhető, pl. az Eöt-Wash csoport egyik ilyen írása [3]. A 115 évvel ezelőtti Eötvös Loránd, Pekár Dezső és Fekete Jenő nevéhez fűződő ekvivalenciakísérlet eredményei kapcsán merült fel az 1980-as években egy rövid hatótávolságú ötödik erő létezése, melynek igazolása vagy cáfolata a mostani feladatunk – végső soron – ez keltette életre a jelen kutatásainkat. Az Eötvös-inga a fizikában a mai napig az egyik leghitelesebb nagy pontosságú mérőeszköz, ráadásul a jelenlegi technikai lehetőségek alkalmazásával lehetőségünk adódott a korábbi leolvasási pontosság két nagyságrenddel történő további növelésére. Ez a pontosságnövekedés időközben olyan érdekes jelenségek megfigyelését is lehetővé tette, mint pl. az ingák földrengéseket megelőző viselkedése, vagy a légköri frontok átvonulása által okozott földkéreg-deformációk

gravitációs hatásának vizsgálata. A méréshez szükséges komplex mérő-adatgyűjtő rendszer felépítése a kutatócsoport számára rengeteg tudás és tapasztalat felhalmozását jelentette a precíziós mérőrendszerek felépítése és üzemeltetése, valamint a zavaró hatások azonosítása, kiszűrése és kompenzálása terén. A méréseket jelenleg a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont föld alatti laboratóriumában, 30 m-es mélységben végezzük egy általunk felújított, modernizált és automatizált Pekár-ingával. Emellett további három Auterbal-inga felújítását és továbbfejlesztését fejeztük be, amelyekkel jelenleg tesztmérések folynak. Az alábbiakban ezekről a tapasztalatainkról számolunk be.



Völgyesi Lajos geofizikus, az MTA levelező tagja. A BME Általános- és Felsőgeodézia Tanszékének professor emeritusa. Főbb kutatási területei a fizikai, csillagászati és matematikai geodézia, a Föld forgása és nehézségi erőterének mérése és vizsgálata, az Eötvös-inga továbbfejlesztése és alkalmazási lehetőségei. Akadémiai Díjas, számos hazai és nemzetközi tudományos bizottság elnöke és tagja.



Szondy György okleveles villamosmérnök, fizikatanár, információ-biztonsági szakmérnök. Elsősorban informatikai rendszerek fejlesztésével foglalkozik. Jelenleg a BME Általános- és Felsőgeodézia Tanszékének doktorandusza. Aktívan foglalkozik a gravitáció fundamentális, elméleti és gyakorlati kérdéseivel és a relativitáselmélettel. 2006-óta az Egyesület a Tudomány és Technológia Egységéért (ETTE) társalapítója és elnökségi tagja.



Tóth Gyula egyetemi docens, a műszaki tudomány kandidátusa, földmérőmérnöki szakon végzett 1985-ben. Azóta a BME Általános- és Felsőgeodézia Tanszékén oktat és kutat. Kutatási területe a fizikai és matematikai geodézia, azon belül a Föld matematikai alakjának, a geoidnak a meghatározása. Ez irányú kutatásaiért 2011-ben Akadémiai Díjban részesült.



Fenyvesi Edit fizikus, PhD, a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont tudományos munkatársa, a Nehézion-fizikai Kutatócsoport tagja. Kutatási témái: a gravitációshullám-detektorok infrahangzaj hátterének vizsgálata és alacsony háttérű gamma-spektrometriai mérések.



Kovács Péter geofizikus, PhD, a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Részecske és Magfizikai Intézete Úrfizikai és Űrtechnikai Osztályának tudományos főmunkatársa. Kutatási területe a geomágneses tér és a Föld körüli elektromágneses környezet dinamikájának vizsgálata.

1. A jelenleg rendelkezésre álló torziós ingák

Napjainkban Eötvös torziós ingái közül már csak néhány terepi mérésekre készített műszer hozzáférhető és tehető működőképessé. A terepi mérések céljára kifejlesztett három legfontosabb műszer az Eötvös–Pekár-féle, az Eötvös–Rybár-féle Auterbal- (*Automatic Eötvös–Rybár Balance*), és az ötvenes években gyártott E54 inga. Az 1. ábra bal oldalán látható Eötvös–Pekár-inga fejlesztése esetében Pekár Dezső a méretek és a lengésidő csökkentésére és a műszerek egyszerűségének megőrzésére helyezte a fő hangsúlyt, ezért végül megmaradt a manuális forgatás, valamint 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 [4]. Ezt az ingát 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-tól gyártott ingákban pedig már csak 30 cm volt.

Az 1. ábra középső részén látható Eötvös–Rybár- (Auterbal-) ingát az 1920-as években fejlesztették ki



1. ábra. Az Eötvös–Pekár-, az Auterbal- és az E54 ingák

Rybár István, Eötvös későbbi utóda vezetésével a Pázmány Péter Tudományegyetem Kísérleti Fizikai Tanszékén. A korábbi ingákhoz képest az azimutonkénti 40 percre csökkentett észlelési idő mellett a legjelentősebb fejlesztés a műszer automatikus forgatásának rugós óraszerkezettel történő megoldása és a műszer leolvasási értékeinek fotografikus rögzítése volt [4]. Bár az automatikus leolvasás lehetővé tette az inga felügyelet nélküli működését, a kényes óraszerkezet gyakori meghibásodásai miatt a műszer mégis folyamatos felügyeletet igényelt.

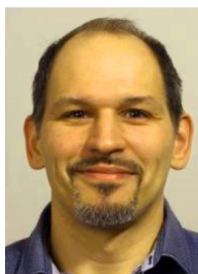
Az 1. ábra jobb oldalán látható E54, majd később az E60 ingát az 1950-es években fejlesztették ki alapvetően szénhidrogének kutatására: ezek döntő részben exportra készültek. A cél a minél rövidebb csillapodási idő elérése volt, részben az érzékenység rovására.



Kiss Bálint okleveles villamosmérnök, PhD, egyetemi docens, a BME Irányítástechnika és Informatika Tanszék vezetője. Kutatási területe a robotika és mechatronikai rendszerek irányítása.



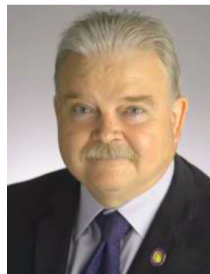
Égető Csaba okleveles földmérő és térinformatikai mérnök, PhD, adjunktus a BME Általános- és Felsőgeodézia Tanszékén. Kutatási témája a szélsőpontosságú geodéziai mérések tervezése és alkalmazása.



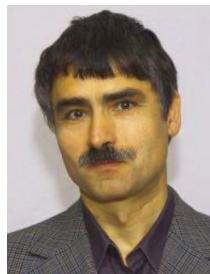
Barnaföldi Gergely Gábor fizikus, PhD, a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Nehézion-fizikai Kutatócsoportjának vezetője. Kutatási témái: nagyenergiás nehézion-fizika, kompakt csillagok vizsgálata, az erősen kölcsönható anyag szerkezete.

2. Eötvös-ingák javítása, felújítása

A jelenleg rendelkezésünkre álló ingák közül egy Eötvös–Pekár-ingát 2017-ben az ekvivalenciamérések céljára kaptuk kölcsön az akkori soproni Geodéziai és Geofizikai Intézettől. Előtte a műszer mintegy 40–50



Lévai Péter fizikus, az MTA rendes tagja, kutatóprofesszor, a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont főigazgatója. Kutatási témái: nagyenergiás nehézion-fizika, fundamentális kölcsönhatások, kutatási infrastruktúrák fejlesztése és fenntartása.



Ván Péter fizikus, az MTA doktora, a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Részecske és Magfizikai Intézete Elméleti Fizikai Osztályának és a BME Gépészmérnöki Kar Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszékének tudományos tanácsadója. Kutatási területe a nem egyensúlyi termodinamika, illetve az Eötvös-inga kutatása által motiváltan a gravitáció termodinamikai elmélete.

évig pihent az intézet raktárában, így sérülésmentes, de használhatatlan állapotban jutottunk hozzá. Emiatt jelentős felújításra szorult, főként az alumínium alkatrészek korróziója, a csapágyak szorulása, a libellák letapadása és más hasonló problémák miatt.

A Műgyetem Auterbal-ingája évtizedekig csupán hibás, használhatatlan muzeális leltári tárgyként szerepelt a tanszék nyilvántartásában. 2004 tavaszán vizsgáltuk meg, hogy egyáltalán lehetséges-e a megjavítása. Mivel a torziós szálak a műszerben voltak, elvileg lehetségesnek tűnt a javítás. A vezérlőszerkezet felújítása és átalakítása, valamint két törött alkatrész pótlása után sikerült a műszert működőképes állapotba hozni. A felújítást követő tesztmérések során viszont kiderült, hogy az egyik torziós szál felfüggesztésével is gond van. Hosszú kísérletezések után, speciális rögzítő anyag alkalmazásával sikerült egy új, megbízható módszert kialakítani a torziós szálak rögzítésére, így végül az ingát sikerült teljesen használható állapotba hozni [5].

2019-ben, az Eötvös-centenárium évében lehetőség adódott további két Auterbal-inga javítására, illetve felújítására. Mindkét inga használhatatlan állapotban volt, az egyik a hiányzó és törött alkatrészével első rátekintésre javíthatatlannak tűnt, és a torziós szálakat is pótolni kellett. Ráadásul ez valamikor átesett egy szakszerűtlen javításon is, ami nagy károkat okozott a különböző szerkezeti elemeiben. A másik inga optikai rendszere volt alkalmatlan a mérésekre. Az ingákat teljesen szét kellett szedni, a szereléshez célszerszámokat kellett készíteni, csapágyakat kellett cserélni, új alkatrészeket kellett tervezni és pótolni. A legnehezebb feladat a forgatórugó ki- és visszaszerelése, majd be szabályozása volt [6]. A két inga felújítása több mint másfél évet vett igénybe, viszont ma már mindkét ingának a mechanikája kiválóan működik (2. ábra).



2. ábra. Auterbal-ingák a BME Általános, és Felsőgeodézia Tanszékének gravitációs laboratóriumában

Az Eötvös-ingák egyedi műszerek, egyedi paraméterekkel. A paraméterek ismerete nélkül nem ér-

telmezhetőek a műszerekkel végzett mérések. Sajnos a felújított ingák közül egyedül a BME Auterbal-ingájának a gépkönyve állt rendelkezésre, és csak ennek a műszernek ismertük az ingaparamétereit. A Pekár-inga paramétereit magunk határoztuk meg, a többi műszer paramétereinek meghatározása folyamatban van.

A torziós állandókat és a tehetetlenségi nyomatékokat az ingák lengésidőjéből és különböző henger alakú kalibráló tömegek alkalmazásával határoztuk meg, a felfüggesztő szálak hosszának mérésére speciális céleszközt készítettünk, a tömegek mérésére mg pontoságú mérleget használtunk.

Vizsgáltuk és vizsgáljuk a műszerek ismétlési pontosságát és az egyes műszereken belüli két antiparallel inga által mért gradiensek eltéréseit. A kalibráló, összehasonlító méréseket az Általános- és Felsőgeodézia Tanszéken található Oltay-féle gravitációs alapponton végeztük és végezzük.

3. Az Eötvös-ingák továbbfejlesztése

A mérések legjelentősebb és legveszélyesebb hibaforrása a műszert kezelő és leolvasó személy jelenléte, elsősorban a tömeghatása [7]. Az észlelő személy a jelenlétével a hőmérsékleti egyensúlyt is megzavarja, és lépteivel zavaró talajrezgéseket kelt, sőt bizonyos mérési pontokban a talaj rugalmassága miatt a műszer parányi megdőlését is okozza. Ezek a hibaforrások a közvetlen emberi jelenlét kiküszöbölésével, a mérési folyamat teljes automatizálásával, távvezérelt méréssel szüntethetőek meg. Ennek megfelelően a vizuális leolvasást megfelelő CCD érzékelők alkalmazásával, digitális műszerleolvasással váltottuk fel, az ingák különböző mérési azimutokba állítását pedig távvezérelt forgatómechanika alkalmazásával oldottuk meg [6, 8, 9].

Az automatikus leolvasás megvalósítása céljából az egyes ingákon több különböző típusú, érzékenységgű és sebességű CCD érzékelőt próbáltunk ki és alkalmaztunk; a skálák megvilágítására pedig erős fényű LED-eket (fénykibocsátó diódákat) használtunk. Megfelelő felbontású CCD érzékelőket alkalmazva az elektronikusan rögzített képeken a kinagyított skálaosztások közötti távolság 25–30 képpont, így az általunk készített képkiértékelési eljárással egy skálaosztás tört részének megfelelő helyzet is meghatározható. Ezzel az elérhető leolvasási pontosságunk egy képből nagyjából néhány ezred skálaosztás (10^{-11}), amely nagyjából két nagyságrenddel jobb, mint Eötvösék eredeti vizuális észlelésének becsült 10^{-9} [6, 8, 9], illetve valamivel jobb, mint a Robert Dicke és a princetoni csoport mérésének $3 \cdot 10^{-11}$ -es érzékenysége [16].

A mérési folyamat teljes automatizálásának másik fontos eleme az ingák különböző mérési azimutokba állítása távvezérelt forgatással.

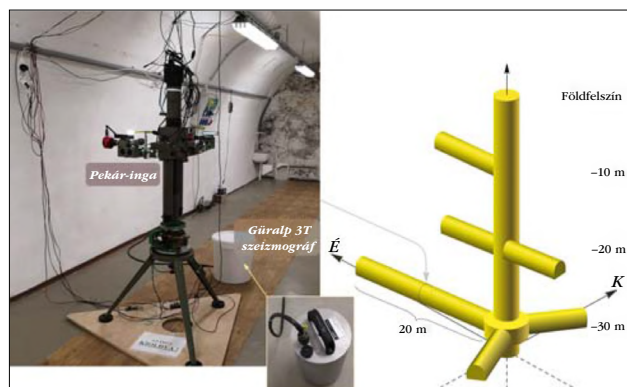
A forgatómechanikának fontos követelményeket kell kielégíteni. A forgatások közötti nyugalmi helyzetben, a mérések közben, nem keletkezhetnek a forgatómotor és az ahhoz kapcsolódó szerkezetek által okozott permanens mágneses zavarok. A motor vezérlését úgy kellett megoldani, hogy az inga tetszőleges azimutokba forgatása szögmásodperc pontossággal, üzembiztosan, ugyanakkor hirtelen gyorsulások és lassulások nélkül, a rendkívül érzékeny ingaszerkezet szempontjából kíméletesen, körültekintően definiált sebességprofilot követve történjen. A forgatás során a megfelelően lassú, egyenletes indulás és fokozatos megállás az inga lengésének csillapodását is kedvezően befolyásolja, rövidítheti a csillapodáshoz szükséges időt [6, 8, 9].

Az inga különböző mérési azimutokba történő automatikus forgatásához speciális szerkezetet építettünk, a mágneses hatások kiküszöbölése miatt legtöbb alkatrészt 3D nyomtatással készítettük [6, 9].

A távvezérelt forgatás legfontosabb eleme az inga tengelyére rögzített kör alakú, pozíciómeghatározásra és mozgásvezérlésre használható Renishaw-kódgyűrű, amely abszolút skálával rendelkezik, és a hozzá tartozó optikai olvasófej segítségével az inga pozíciója (azimutja) szögmásodperc pontossággal beállítható és kiolvasható. Az eredeti Eötvös-kísérletek során az azimutmeghatározás mágnesűvel történt, így a beállítás pontossága mindössze fok nagyságrendű, de legjobb esetben néhány tized fok lehetett [9].

4. Jelenlegi mérések

2017-ben elhatároztuk, hogy Eötvös Loránd halálának 100. évfordulója tiszteletére megismételjük az Eötvös–Pekár–Fekete- (EPF-) kísérletet (más néven az ekvivalenciaelv-méréseket) [10, 11], amelyek Einstein gravitációelméletének legfontosabb kísérleti alapját képezik. Különös motivációt adott a kísérlet megismételése, hogy az egykori mérések leírásait tanulmányozva lehetséges magyarázatot találtunk a méréseket terhelő szabályos hibaforrásra [12]. Az eredeti EPF-kísérletet az



3. ábra. EPF-mérés Eötvös–Pekár-ingával a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Jánosy Földalatti Kutatási Laboratóriumában

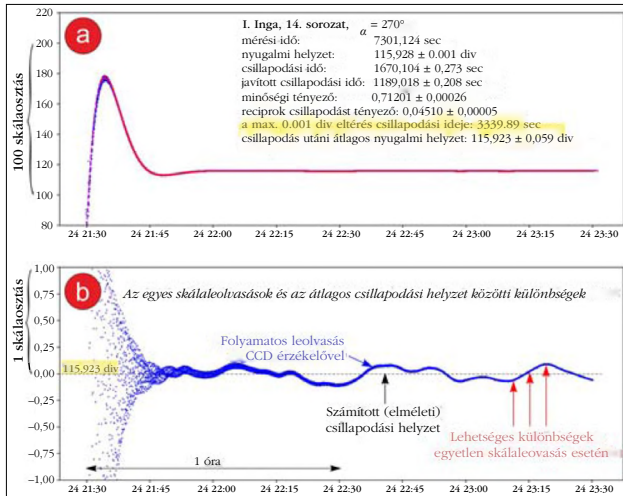
ún. kettős nagyesszközzel [4] végezték. Ehhez az újabb műszerek közül teljesítőképességében az Eötvös–Pekár-inga áll a legközelebb, és megfelelő átalakításokkal ezt az ingát alkalmazhatóvá tudtuk tenni az ekvivalencia-mérésekre. A mérések jelenleg is folyamatban vannak a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Jánosy Földalatti Kutatási Laboratóriumában (3. ábra).

Időközben a jelentősen megnövelt leolvasási pontosság mellett a méréseinkben megjelentek a különböző földrengések által okozott zavaró hullámok is. Ezek az EPF-méréseink szempontjából mérési zajként jelentkeztek. A 2022. év elején azonban jelentős fordulat következett be, ugyanis a 2022. január 9-i görögországi florinai rengés kipattanása előtt olyan, eddig ismeretlen furcsa előjeleket rögzítettünk az ingával, amelyet egyetlen szeizmológiai obszervatórium műszerei sem rögzítettek, és a torziós ingánk közvetlen szomszédságában működő szeizmográf regisztrátumaiban sem voltak láthatók [13, 14]. Mindez újabb fontos irányt adott az Eötvös-ingával végzett kutatásainkban. A most felújított három Auterbal-ingával elsősorban a földrengéseket és az ezeket megelőző esetleges előjeleket tervezzük tanulmányozni, és arra próbálunk választ keresni, hogy torziós ingákkal lehetséges-e bizonyos földrengések előrejelzése.

5. A torziósinga-méréseket zavaró jelenségek

Korábban a hagyományos Eötvös-ingával végzett mérések úgy történtek, hogy az inga kioldása vagy elforgatása után a csillapodási idő elteltével az észlelő óvatosan megközelítette a műszert, majd egyszeri vizuális leolvasással, a skálaosztások közötti érték becslésével megállapította és jegyzőkönyvbe rögzítette a leolvasott skálaértéket. Amennyiben a skálaosztások közötti értéket helyesen becsültük meg, a számítható gradiensek pontossága 10^{-9} s^{-2} , azaz 1 E (1 eötvös). Ehhez képest a CCD érzékelővel ellátott műszereken, digitális leolvasással több mint két nagyságrenddel növelhető a leolvasási pontosság. Ebben az esetben rendkívül fontos, hogy nemcsak az inga csillapodott állapotában készítsünk egyetlen skálaleolvasást, hanem hosszabb időn keresztül, másodpercenkénti leolvasást végezve, a csillapodási görbe alakjából határozzuk meg az ingakar átlagos nyugalmi helyzetét (példaként lásd a 4. ábrát).

Az új, jóval pontosabb leolvasási technika alkalmazásával azt tapasztaljuk, hogy a torziós inga a csillapodási idő letelte után sem lesz soha tartósan nyugodt, mozdulatlan egyensúlyi állapotban (lásd a 4. ábra alsó részét). Ennek több különböző oka lehet, amelyek azonosítása, szétválasztása és hatásuk kompenzálása kutatásaink egyik legnagyobb kihívása. A zavaró hatások elkülönítésére és kompenzálására vonatkozóan többek

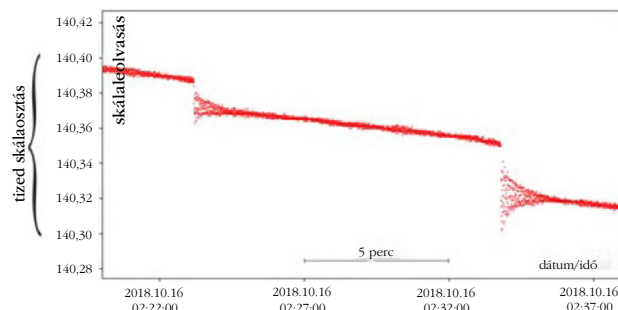


4. ábra. Az Eötvös–Pekár-inga elméleti és valódi nagyított csillapodási görbéje. Az (a) felső ábra egy teljes csillapodási görbét, míg a (b) alsó, nagyított ábra az illesztett görbe, és a tényleges leolvasások eltéréseit mutatja

között egy most induló doktori kutatási téma keretében kerül sor.

A 4b. ábra jobb felén láthatjuk, hogy a korábbi egyetlen vizuális leolvasás alapján miért nincs esélyünk a tényleges nyugalmi helyzet pontos megállapítására. Attól függően, hogy néhány perc különbséggel éppen mely időpontban olvassuk le a skálát, más-más értéket kapunk [5].

A csillapodás folyamatos rögzítésével a csillapodási idő letelte után időnként furcsa jelenségekre lehetünk figyelmesek, a görbéken időnként hirtelen változások tapasztalhatók. Ezek a változások a torziós szálak hosszabb idejű terheletlen állapota után jelentkeznek, az ingaszerkezet kioldását (*dezarretálását*) követő órákban illetve napokban. Ilyen változásokat láthatunk az 5. ábrán, amelyen egyébként ideális, driftmentes esetben, jóval a csillapodási idő letelte után vízszintes egyenes vonalat kellene látnunk. Ezzel szemben a leolvasási értékek monoton csökkenése a torziós szál lassú elcsavarodását, a csavarodási driftet mutatja, a hirtelen ugrások és az ezeket követő gyorsan lecsengő tranzien hullámok pedig a torziós szálon belüli apró „csavarodási szakadásokra”, a szilárdtestfizikában jól ismert diszlokációkra utalnak [5].



5 ábra. Csavarodási drift és diszlokációk a torziós szálan

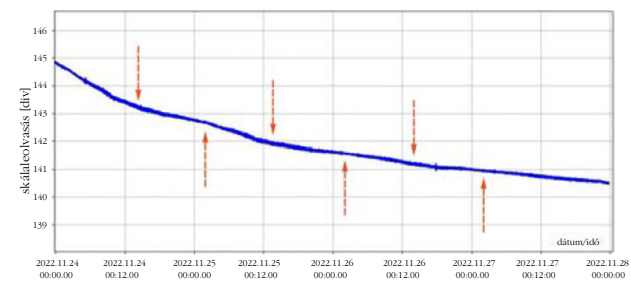
Érdeemes megemlíteni, hogy ezt a jelenséget aktívan kutatja Groma István, Ispánovity Péter Dusán és csoportjuk az ELTE-n. A méréseikkel kimutatták, hogy a Zn egykristály mikrooszlopokban a diszlokációlavinák által okozott akusztikus emisszió-jelek statisztikus tulajdonságai analógiában állnak a földrengéseknel megfigyelt viselkedéssel. Ennek megfelelően kísérleti eljárást dolgoztak ki mikrooszlopokban lejátszó diszlokációlavinák detektálására és kvantifikálására [17].

Megfigyeltük, hogy ezek a változások a torziós szálakat érintő „sokkhatások” következményei, amelyek annál nagyobbak és időben hosszabb ideig tartanak, minél hosszabb ideig pihen az inga a mérések előtt rögzített (*arretált*) állapotban. Több napig arretált állapotban lévő szálak újratelhelését követően minimum egy, de inkább két nap szükséges ahhoz, hogy a szálak közel driftmentesek legyenek, de több éven keresztül tárolt ingák esetében a szálak közel driftmentes állapotának eléréséhez több hétig, esetleg hónapig is várni kell, hogy a terhelt torziós szálak megszabaduljanak a drifttől és alkalmasak legyenek a nagy pontosságú mérésekre. Tapasztalatunk szerint az ingaszerkezet forgatása nem okoz számottevő sokkhatást a torziós szálakra.

Szerencsére az Eötvös-, valamint az Eöt-Wash csoport által alkalmazott forgatásos (differenciális) módszer használatával mind a szál driftjének hatása, mind pedig a Dicke- és Braginskii-csapat mérését befolyásoló, 24 órás periódusú szisztematikus hibaforrások (hőmérséklet, vibráció stb.) kiszűrhetők [3].

Fontos kérdés, milyen további zavarok okozzák, hogy az ingák hosszú idő után sem tudnak teljesen csillapodott állapotba jutni. Ez a kérdés az 1964-es Dicke-mérés esetén is megválaszolatlanul maradt, ahol a problémát a kompenzáló erő folyamatos növelésével (driftkompenzátor) igyekeztek kezelni [16].

A tapasztalataink szerint a méréseinket leginkább a mikro szeizmikus talajnyugalanság és a már említett földrengések zavarják. Megfelelő mérési helyszínt választva a „technogén” zaj (elsősorban a forgalom által okozott talajrengések) csökkenthető, viszont a földrengések, a Föld szabadrengései, az óceánok, tengerek partí hullámveréseinek zaja állandóan jelen vannak. Ezek kiszűrése céljából az ingánk mellett egy Güralp



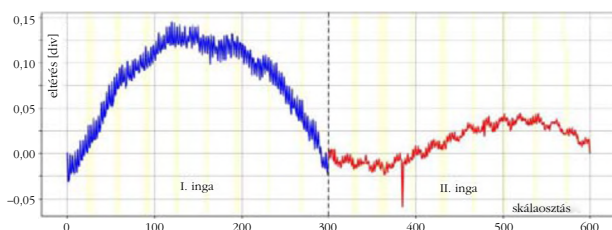
6 ábra. Csavarodási drift 24 órás ciklusú változása a frissen felújított Aulerbal-ingán

3T szeizmográfval folyamatosan regisztráljuk a különböző szeizmikus eseményeket, talajrezgéseket és földrengéseket, illetve előzetes méréseink alapján (lásd 6. ábra) fontosnak látjuk vizsgálni a driftszeizmikus zaj függését, ami egyúttal a korábbi Dicke-méréssel kapcsolatosan az Eöt-Wash csoport által megfogalmazott fenntartásokat is alátámaszthatja [3, 16].

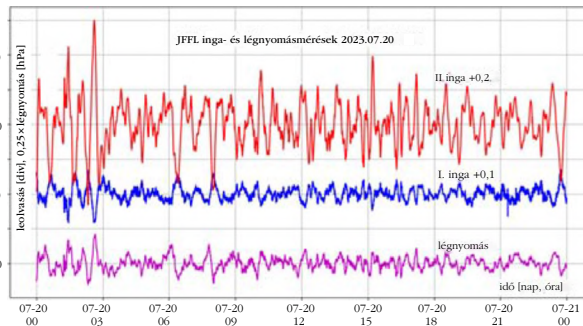
A megnövelt leolvasási pontosság mellett már nem elhanyagolhatóak a műszer skálájának gyártási hibái, pontatlanságai sem, valamint a leolvasás során megváltozó különböző optikai paraméterek, mint pl. az optikai úthossz és a leolvasási szög változása. A kívánt tényleges leolvasási pontosságot csak ezeknek a tényezőknek a meghatározásával és figyelembevételével tudjuk elérni. A 7. ábrán a Pekár-inga skálakalibrációja során mért eltérések láthatók. A 0–300 közötti skálaosztások az I. inga, a 300–600 közötti skálaosztások az II. inga skálájának osztáshibáit mutatják.

Az új, nagyobb leolvasási pontosság mellett jelentős zavaró hatással vannak az ingamérésekre a hőmérséklet- és légnyomásváltozások – különösen ezek infrahang-tartományába eső frekvencián változó összetevői. Ezért az EPF-méréseink helyszínén az inga közvetlen és távolabbi környezetében több pontban folyamatosan regisztráljuk a hőmérséklet-, légnyomás- és páratartalom-értékeket. A HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Jánossy Földalatti Kutatási Laboratóriumában a hőmérséklet napi változása igen alacsonyan, akár századfok pontossággal tartható, azonban ezek a kis változások is zavarják a méréseinket, ezért hőmérsékleti korrekciót kell alkalmaznunk.

A méréseink szerint az Eötvös-inga különösen érzékenyen reagál a légnyomás néhányszor 10 perces rövid periódusú változásaira (ezt mutatja a 8. ábra). Látszik, hogy mindkét inga mozgása erősen függ a légnyomás változásától. Az ingakarok helyzetétől függően különböző mértékű pozitív vagy negatív korreláció tapasztalható, melynek mértéke $\pm 0,2 - 1$ osztás/hPa. Az ekvivalenciakísérlet szempontjából különösen fontos ennek a légnyomáscsökkentésének a lehetőség szerinti csökkentése, kiküszöbölése, illetve ha ez utóbbi nem lenne lehetséges, akkor a korrekcióba vétele. A kiküszöböléséhez ismerni kellene a zaj fizikai okát. Legvalószínűbb ok a légnyomásváltozásoknak a felszindölésen keresztüli becsatolódása. A felszindölések ugyanis finoman mozgatják az ingát, ami mozgás a torziós szálon keresztül átadódik az ingakarnak, és az ebből



7. ábra. A Pekár-inga skálakalibrációja során mért eltérések



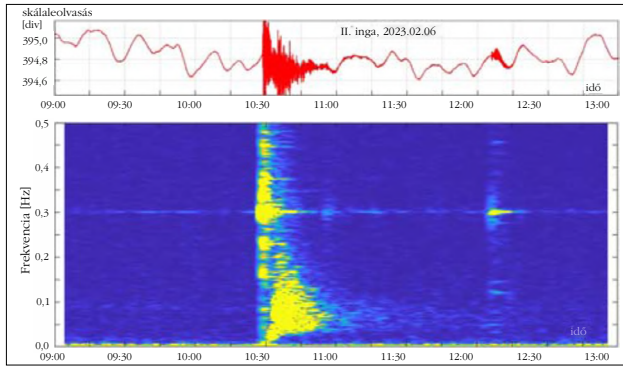
8. ábra. A légnyomásváltozás által okozott zaj a leolvasásokon

eredő, torziós szállhoz képest külpontos közegellenállási erő végeredményben változó nyomatékot fejt ki az ingára. A lassú periódusú szeizmométerek légnyomás okozta dőlészaja ehhez hasonló és jól ismert probléma a szeizmológusok körében [15]. A jelenség további vizsgálatához elkészült egy speciális „billegető” szerkezet, amellyel aktívan szimulálni tudjuk és várhatóan tisztázni lehet az előbb vázolt mechanizmust. Ettől függetlenül egy megfelelően méretezett adaptív szűrővel a légnyomáscsökkentés lényegesen csökkenthető lesz.

A 8. ábrán a Pekár-ingának a Jánossy Földalatti Kutatási Laboratóriumában (JFKL) 2023.07.20-án regisztrált leolvasásai és az ingán elhelyezett szenzorral mért légnyomásváltozások láthatók. Az ábra alsó részén a légnyomásváltozás görbéje látható, a középső részen az I. inga, az ábra felső részén a II. inga mozgása követhető nyomon. A lassú változásokat 1 órás mozgóátlag-szűrővel távolítottuk el a 10 másodperces időközökre interpolált adatokból. Az 1. inga mozgása erősebb pozitív, a 2. inga mozgása kisebb negatív korrelációt mutat a légnyomás változásaival.

Az inga működését jellemző zajok mértékét és ezek időbeli változását, valamint környezeti változókkal való kapcsolatát az ingajelek dinamikus spektrumai alapján folyamatosan vizsgáljuk. Példaként a 9. ábrán a II. inga 2023.02.06 09:00 és 13:00 UTC közötti szakaszának spektrogramját mutatjuk be, amelyet 512 mp hosszú és 500 mp időtartamon átlapolott Hanning-típusú analízisablak alkalmazásával képeztünk.

A spektrogramon kb. 0,3 Hz körüli frekvencián folyamatos periodikus jel látszik, amely az inga sajátrezgéséhez kapcsolódik ugyan, de – a másodperces mintavételből adódó időbeli átlapolódás (*temporal aliasing*) miatt – annak valódi frekvenciájánál kisebb frekvencián jelenik meg. A rendszer sajátfrekvenciája az inga geometriáját figyelembe vevő modellszámítások alapján a valóságban $\sim 0,7$ Hz. Az inga csillapodásához köthető, illetve a környezeti paraméterekkel összefüggő változások általában hosszú periódusúak, tehát a spektrogramok alsó tartományában vizsgálhatók. Ezzel szemben a közelben vagy nagy magnitúdóval kipattanó földrengések az ingákat széles frekvenciatartományban (+0–0,5 Hz) gerjeszthetik, ezért a spektrogramokon a rengéshullámok beérkezési



9. ábra. A II. inga 2023.02.06 09:00 és 13:00 UTC közötti időszakra számolt idősora (*fent*) és spektrogramja 512 s hosszú, 500 s hosszön átlapolt Hanning analízáló ablak használatával számolva (*lent*). A 0,3 Hz környékén látható folyamatos jel az inga sajátrezgésével áll összefüggésben (lásd a szövegben). 10:29 és 12:08 UTC időpontokban földrengés által okozott ingarezgés látható az inga idősorán és spektrogramján (lásd a szövegben)

időpontjában függőleges gerjesztési zóna jelenik meg (lásd 10:29 UTC a 9. ábra spektrogramján). Tapasztalatunk szerint azonban a távoli vagy kis magnitúdójú földrengések is érzékelhetőek, mert ilyenkor az inga sajátrezgésének amplitúdója megnő, és ez az átlapolt sajátfrekvencián energianövekedésként jelentkezik a spektrumokon (lásd 12:08 UTC a 9. ábra spektrogramján). Ennek alapján egy automatikus földrengés-detektáló algoritmust fejlesztettünk, amely akkor jelez, ha a két egymással szembe fordított inga sajátperióduson mért rezgésének amplitúdója bizonyos időtartamon belül egyszerre halad meg egy előre beállított szintet. Az algoritmus segítségével 2022 kezdetétől közel 2200 földrengést detektáltunk, amelyek eredetét a USGS földrengés-katalógusának (earthquake.usgs.gov) bejegyzéseivel tudjuk azonosítani. A 9. ábra spektrogramján felismerhető földrengések Törökországban patantak ki 2023. február 6-án $M = 7,6$ (10:29 UTC) és $M = 5,7$ (12:08 UTC) magnitúdóval.

Foglalkoztunk továbbá a környezet geológiai felépítésével is. A méréseket egy 30 m mélységben kialakított aknában, mészkőben elhelyezett vízáró, rendkívül szilárd „reaktorbeton” tömbben végezzük. Mérésekkel és modellszámításokkal is nagy felbontással meghatároztuk a mérési pont környezetében a horizontális és a görbületi gradienseket, nagy részletességgel felmértük a mágneses télerősség térbeli eloszlását, és Lippmann-féle dőlésmérővel hosszabb ideje figyeljük a parányi talajdőléseket, amelyek szintén befolyásolják az Eötvös-ingával végzett méréseket.

Műszereink legérzékenyebb része az Eötvös-ingák lelke, a pillanatnyilag pótolhatatlan torziós szál. Ennek

kiváltásához, új torziós szálak fejlesztéséhez száltesztelő berendezés fejlesztése van folyamatban.

Hivatkozások

- Völgyesi L.: Local geoid determinations based on gravity gradients. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 36/2 (2001) 153–162. DOI: 10.1556/AGeod.36.2001.2.3
- Wagner T. A., Schlamminger S., Gundlach J. H., Adelberger E. G.: Torsion-balance tests of the weak equivalence principle. *Class. Quantum Grav.* 29 (2012) 184002 and arXiv:1207.2442 (gr-qc)
- Ván P., Pszota M.: Ekvivalenciáék és gravitációelméletek. *Fizikai Szemle* 73/4 (2023) 405–415. (Lásd ebben a számban.)
- Szabó Z.: Az Eötvös-inga története. *Magyar Geofizika* 40/1 (1999) 26–38.
- Völgyesi L., Égető Cs., Laky S., Tóth Gy., Ultmann Z.: Eötvös-inga felújítása és tesztmérések a budapesti Mátyás-hegyi-barlangban. *Geomatikai Közlemények XII* (2009) 71–82.
- Völgyesi L., Tóth Gy., Szondy Gy., Kiss B., Fenyvesi E., Barnaföldi G., Égető Cs., Lévai P., Ván P.: Jelenlegi Eötvös-inga felújítások, fejlesztések és mérések. *Geomatikai Közlemények XXIV.* (2021) 129–139.
- Csapó G., Laky S., Égető Cs., Ultmann Z., Tóth Gy., Völgyesi L.: Test measurements by Eötvös-torsion balance and gravimeters. *Periodica Polytechnica Civil Eng.* 53/2 (2009) 75–80.
- Péter G., Deák L., Gróf Gy., Kiss B., Szondy Gy., Tóth Gy., Ván P., Völgyesi L.: Az Eötvös–Pekár–Fekete ekvivalencia-elv mérések megismérlése. *Fizikai szemle* 69/4 (2019) 111–116.
- Völgyesi L., Szondy Gy., Tóth Gy., Péter G., Kiss B., Deák L., Égető Cs., Fenyvesi E., Gróf Gy., Ván P.: Előkészületek az Eötvös-kísérlet újramérésére. *Magyar Geofizika* 59/4 (2018) 165–179.
- Eötvös R., Pekár D., Fekete E.: Beiträge zum Gesetze der Proportionalität von Trägheit und Gravität. *Annalen d. Physik* (1922) 11–66.
- Bod L., Fischbach E., Marx Gy., Nárayné Ziegler M.: Az Eötvös-kísérlet száz éve. *Fizikai Szemle* 42/3 (1992) 94–101.
- Tóth Gy.: Az Eötvös–Pekár–Fekete ekvivalencia-mérések szabályos hibája. *Fizikai Szemle* 69/5 (2019) 155–158.
- Völgyesi L., Tóth Gy., Égető Cs., Szondy Gy., Kiss B., Barnaföldi G., Fenyvesi E., Lévai P., Kovács P., Imre E., Pszota M., Ván P.: A pre-earthquake signal detection by the Eötvös torsion balance (2023). In: Kaliakin V. N. et al.: Smart Geotechnics for Smart Societies: Proceedings of the 17th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (17th ARC, Astana, Kazakhstan, 14–18 August, 2023). DOI: 10.1201/9781003299127-112
- Völgyesi L., Tóth Gy., Szondy Gy., Kiss B., Fenyvesi E., Barnaföldi G., Égető Cs., Lévai P., Imre E., Pszota P., Ván P.: Report on a pre-earthquake signal detection by enhanced Eötvös torsion balance. arXiv:2202.09607
- Alejandro A. C. B., Ringler A. T., Wilson D. C., Anthony R. E., Moore S. V.: Towards understanding relationships between atmospheric pressure variations and long-period horizontal seismic data: a case study. *Geophysical Journal International* 223/1 (2020) 676–691. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa340>
- Roll P. G., Krotkov R., Dicke R. H.: The equivalence of inertial and passive gravitational mass. *Ann. Phys.* 26 (1964) 442–517.
- Ispanovity P. D., Ugi D., Péterffy G., Knapke M., Kalacska Sz., Tüzes D., Dankházi Z., Mathis K., Chmelik F., Groma I.: Dislocation avalanches are like earthquakes on the micron scale. *Nature Commun.* 13 (2022) 1975. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29044-7>

fizikaiszemle.elft.hu

A honlapon megtalálhatja régebbi és új lapszámainkat, valamint számos mellékletet!