

ÖSSZEMÉRHETŐ TÖMEGEK GRAVITÁCIÓJA

Szerzők: Bodonyi László, Sarkadi Dezső

Research Centre of Fundamental Physics, H-7030 Paks, Kishegyi 16. HUNGARY

e-mail: dsarkadi@freemail.hu

Abstract – A G gravitációs állandó a legkisebb pontossággal mért fizikai állandó a természetben. Számos újabb meghatározás sem csökkentette a G hibáját, és néhány újabb mérés súlyos eltéréseket is mutatott az általánosan elfogadott G értéktől. Az elvégzett kísérletek közös jellemzői közül kiemelendő, hogy a gravitációs kísérletekben a „forrástömeg” nagysága jóval nagyobb, mint a „próbatest” tömege. Ez idáig a szakirodalomban nem találtunk olyan G meghatározást, amelynél egymással összemérhető nagyságú tömegeket használtak volna. Magyarországon az utóbbi években egy nagyon egyszerű és érzékeny eszköz lett kifejlesztve a gravitáció tanulmányozására, amely viszonylag nagyméretű fizikai ingát alkalmaz a gravitáció mérésére. Ez az új eszköz alkalmas egyenlő, illetve közel egyenlő tömegek gravitációjának vizsgálatára. Az új mérőeszközzel arra a meglepő eredményre jutottunk, hogy a gravitációs kölcsönhatás erőssége a kölcsönható tömegek különbségével arányos.

Keywords: - kísérleti gravitáció, dinamikus gravitáció, összemérhető testek gravitációja, kényszer-rezonancia mérés, Newton törvényének általánosítása.

1. Bevezetés

A gravitációs erő két test között GmM/r^2 -el egyenlő Newton törvénye szerint. A mai időkig a G gravitációs állandó pontossága lényegesen elmarad a többi alapvető fizikai állandó pontosságánál.^{1,2} Ennek kellemetlen ténynek talán a legfontosabb oka a gravitációs kölcsönhatás rendkívüli gyengesége. A G gravitációs állandó meghatározásánál a legtöbb esetben Cavendish típusú³ torziós ingákat használnak. Az ilyen mérések leginkább jellemző közös vonása az, hogy a mérésekhez alkalmazott „forrástömegek” lényegesen nagyobbak, mint a torziós inga gravitációs detektorát képező „ingatömegek”. Például a világon a leginkább pontosnak tekintett és általánosan elfogadott Luther és Towler⁴ által végzett G meghatározásánál a forrástömegek 15 kg-osak voltak, míg a torziós inga tömege 5 gramm volt.

A szokásos laboratóriumi méréseknél (amelyeknél torziós ingát használnak), az alkalmazott forrástömegek tehát nagyságrendekkel nagyobbak az ingatömegeknél, melynek célja a mérendő gravitációs effektus növelése a minél nagyobb mérési pontosság elérése céljából. Gyakorlatilag ez a fő oka annak, hogy a fizikusok eddig nem mértek gravitációt egymással egyenlő, vagy egymással összemérhető tömegek között.

Fontos továbbá megjegyezni, hogy jelenleg nem léteznek olyan szilárd alapokon nyugvó gravitációs elméletek, amelyek igazolni tudnák a gravitációs törvény szabad extrapolációját összemérhető nagyságú tömegekre. Évekkel ezelőtt intenzív vizsgálatokat folytattunk arra nézve, hogy milyen műszaki megoldással tudnánk kimérni az összemérhető tömegek gravitációs kölcsönhatását. Már a kezdetekben világossá vált, hogy a torziós ingás megoldás alkalmatlan erre a célra. Követve a gravitációs mérések történetét, megállapítható, hogy a forrástömegek nagysága a legtöbb mérésnél legalább a 10-50 kg-os tartományokba esett. A forrástömeg nagyságának alsó határát az elfogadható jel/zaj arány szabja meg. A kialakult gyakorlatnak megfelelően ekkor a torziós szál is legalább 10 kg-os ingatömeggel kellene terhelt. Nagy kérdés volt, létezik-e olyan torziós szál, amelynek nagy a teherbírása és mellette alacsony a torziós nyomatéka. A válasz már akkor egyértelmű volt, nincs reális lehetőségünk ilyen torziós szál kifejlesztésére, vagy beszerzésére.

2. A mérési módszer

Az összemérhető tömegek gravitációs kölcsönhatásának kísérleti vizsgálata céljára már a kezdetekben felmerült a fizikai inga alkalmazásának lehetősége. Egy gravitációs inga érzékenységét általános megközelítésben az inga tehetetlenségi nyomatéka és lengési ideje (periódusa) határozza meg. Megmutatható, hogy a gravitációs inga érzékenysége arányos az inga periódusának négyzetével. A Cavendish ingák esetén a tipikusan alkalmazott periódusidő a 600-1800 másodperc tartományba esik. Már a kezdeti kísérletek megmutatták, hogy a fizikai ingával a gyakorlatban elérhető legnagyobb periódusidő a 60-80 másodperc, amelynél még az inga mozgása szinuszosnak tekinthető. Ez az eredmény egyben választ adott arra, hogy miért is nem alkalmazták a fizikusok gravitációs mérési célból a fizikai ingát. A gyakorlatban megvalósítható fizikai ingák érzékenysége láthatóan lényegesen elmarad a torziós ingák érzékenységétől. Mindezek ellenére úgy gondoltuk, hogy a fizikai inga alacsony mérési érzékenysége elegendő lesz a kvalitatív összehasonlító mérésekre. Lényeges tehát kiemelni, *hogy a célunk nem a G újabb precíziós meghatározása, hanem a gravitáció tömegarány függésének kvalitatív kimutatása volt.*

A fizikai inga alacsony érzékenysége ellenére fontos előnyei is vannak a torziós ingával összehasonlítva. A fizikai inga beállítása és működtetése lényegesen egyszerűbb a torziós ingával szemben. A lengésidő viszonylag könnyen beállítható és állandó értékű, mivel a Föld homogén és állandó nagyságú gravitációs tere biztosítja a fizikai inga *effektív rugóállandóját*. A megvalósított mérések során jöttünk rá, hogy ez a körülmény nem pontosan teljesül a Hold gravitációs hatása miatt. A Hold zavaró gravitációs hatása azonban nem jelentett gyakorlati problémát, mivel a mozgása lassú, ezért a fizikai inga rugóállandója néhány órás mérés esetén állandónak tekinthető.

A fizikai inga alacsony érzékenységének kompenzálására rezonancia módszert alkalmaztunk, amely sikeres módszerként vált be a gravitációs méréseknél.⁵ A rezonancia módszer lényegéből következően alkalmas hosszabb idejű mérésekre, amely statisztikai szempontból jelentősen növeli a mérések jel/zaj viszonyát. Ez egyben hozzájárul a mérések pontosságához és megbízhatóságához. A méréseinket többször megismételtük a reprodukálhatóság ellenőrzése céljából. Amennyiben az ismételt mérések között jelentős eltéréseket tapasztaltunk, megkerestük a hiba okát, és a hibákat elhárítottuk.

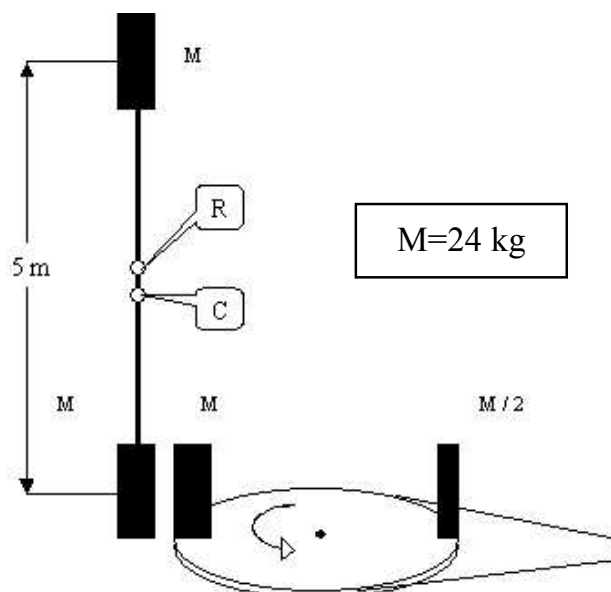
3. Az új gravitációs inga leírása

Kezdetben négy különböző méretű és konstrukciójú fizikai inga készült el tesztelési célból. A legsikeresebb, relatíve nagyméretű és nagy tömegű fizikai inga műszaki paramétereit az alábbi adatok jellemzik:

Az inga alsó, felső karhosszúsága:	2.5 méter
Inga alsó és felső tömege:	24-24 kg (ólom téglák)
Inga teljes tömege tartókerettel:	54.7 kg
Inga-keret anyaga:	alumínium
Inga csapágyazás:	két keményacél ék
Csillapítás (aluláteresztő szűrő):	hidraulikus csillapító
Alkalmazott ingaperiódus	60-80 sec
Inga helyzetmérés:	optocsatolt detektor
Forrástömegek:	ólom téglák forgó asztalon

A relatíve nagyméretű inga választásának két praktikus oka van: egyrészt a nagy lengésidő beállítása egyszerűbb, másrészt a kis inga amplitúdó (5-20 mm) nagyon kis elfordulást okoz az ékeknél, ami jelentősen csökkenti az inga súrlódási veszteségét.

Az 1. ábrán látható a gravitációs mérés egyszerűsített rajza. A fizikai inga szimmetrikus kialakítású, az alsó és felső tömeg nagysága $M = 24 \text{ kg}$. A hidraulikus csillapítót az ábrán nem tüntettük fel. A csillapító egy egyszerű vékony műanyag lap (kb. 500 cm^2 –es felületű), amely az inga alsó végéhez rögzített és egy oldalt álló vizes tartályba merül.



1. ábra: A gravitációs rezonancia mérés vázlata
R = lengési centrum, C = tömegközéppont, $M = 24 \text{ kg}$ (ólom)

Az alkalmazott mérőtömegek radioaktív sugárvédelemre gyártott standard méretű és tömegű ólomtéglákból vannak összeállítva. A két mozgó forrástömeg (12 kg, illetve 24 kg) diametrikusan van elhelyezve egy keményfából készült forgó asztalon, amelyet egy kis villanymotor áttételen keresztül hajt meg vékony gumiszíj beiktatásával. A gumiszíj szerepe a meghajtás vibrációs zajának csillapítása. A forgó asztal anyaga keményfa, de alkalmazható bármilyen, nem mágnesezhető anyag is. A forgó asztal és meghajtó mechanizmusa a helyiség padlózatára került, míg az inga felfüggesztése az épület mennyezetéhez rögzített. Ez a megoldás nagyon előnyös a vibrációs zajok csökkentésében. A forgó asztal sugara 0.6 méter, a forrástömegek 60 milliméter legkisebb távolságra közelítik meg az inga alsó tömegét (tömegközépponti távolság).

A mérőberendezés részeinek rögzítése rugalmas anyagokkal (gumiszőnyegekkel, PVC alátétekkel) történt. Kontroll kísérletekkel ellenőriztük, hogy a forgó asztal és az inga között nincs kimutatható mechanikus csatolás, azaz a forrástömegeket mozgató berendezés nem tud rezgéseket átadni az ingának. A gravitációs zavarok elkerülése érdekében a mérések alatt sem a labor helyiségben, sem annak közelében személyek nem tartózkodtak.

Kontroll méréseink során egy elválasztó vaslemezt helyeztünk be a forgó asztal és az inga közé, az esetleges levegőtörlődési hatások, illetve mágneses hatások megakadályozása céljából. A mérések azt mutatták, hogy ilyen elválasztó lemezre nincs szükség, mivel a feltételezett zavarok hatásai annyira kicsiny mértékűek, hogy nem okoznak mérhető hatásokat. Mind az inga, mind a forgó asztalon lévő tömegek galvanikus földeltek az elektrosztatikus feltöltődések ellen.

Az inga mozgását real-time módon, személyi számítógéppel rögzítettük, amely egyben grafikusan kinagyítva a számítógép képernyőn is mutatja az inga mozgását, az ismert vonalírókhoz hasonlóan. Az inga mozgásának detektálása optoelektronikusan történik, a számítógépes mintavételezés 0.2 – 2.0 másodperces gyakorisággal, beállíthatóan történik. Az

inga mozgásdetektorának felbontása kb. 5 mikron. Az inga alsó tömegének lengési amplitúdóját két puha fék határolja be, állítható módon a 15-50 mm-es mozgási tartományon.

A gravitációs mérések helyisége vibrációs és dinamikus gravitációs hatásoktól mentes környezetben van, a legközelebbi közlekedési úttól kb. 500 méterre. A helyiség légszigetelése is megfelelően biztosított. Mindezek ellenére a talajban mindig jelen lévő mechanikus rezgések energiájának egy része átadódik az ingának. A magasabb frekvenciájú rezgéseket a hidraulikus csillapító levágja, viszont az alacsonyabb frekvenciás tartományú rezgések az inga állandó, kb. 5-10 mm-es amplitúdójú lengésére vezetnek. *Az inga minimális amplitúdójú lengése előnyös a tapadási súrlódás elkerülése szempontjából.*

Tapasztalatunk szerint a gravitációs mérések csak szélcsendes időben végezhetők. Ugyanis a laboratóriumon kívüli nagy tömegű levegő mozgások gravitációs hatása jelentősen megnöveli az ingamozgás alapzaját. Sikeres mérések maximum 5 mm-es amplitúdójú alapzajnál végezhetők.

Az 1. ábra szerint két forrástömeget alkalmaztunk a két tömeg gravitációs hatásának egyidejű méréséhez. *A mérés megbízhatósága ugyanis lényegesen megnő a két forrástömeg egyidejű mérésével.* Ha a két tömeget időben elválasztva külön-külön mérjük, akkor felmerülhetnek időfüggő drift-hibák, amelyek a mérések reprodukálhatóságát jelentősen veszélyeztethetik. Természetesen célszerű lenne olyan légkondicionáló berendezést alkalmazni, mely nem okoz a mérőhelyiségen belül zavaró légáramlatokat.

4. Mérési eredmények

A szokásos gravitációs rezonanciaméréseknél a gravitációs inga lengési frekvenciájával megegyezően állítják be a forrástömeg periodikus mozgásának frekvenciáját. Először mi is ezt a beállítást próbáltuk ki a tesztlekések során, de nem sikerült rezonanciát létrehozni. Szerencsére ennek okát hamar felismertük, a relatíve gyorsan forgó forrástömegek erős amplitúdó modulációt okoztak az ingán, és ezzel együtt erős *frekvenciamodulációt* is. Tapasztalatunk szerint ugyanis a nagy lengésidejű ($T > 60$ s) ingánál az inga lengésideje erősen függ az amplitúdótól (a lengéside durván az amplitúdó négyzetével növekszik). Az instabil ingafrekvencia miatt a rezonancia nem alakulhatott ki.

A probléma megoldása a forgó tömegek mozgásának lassítása volt. A sikeres méréseknél az inga lengésideje 70 másodperc volt, a forgó asztal keringési periódusát pedig folyamatosan csökkentettük. A gravitációs rezonancia kb. 280 másodpercnél alakult ki, az inga amplitúdója megnőtt kb. 10 mm-re. (A mérés előtti alapzaj kb. 5 mm-es értékű volt.) A mérési módszerünket „kényszerrezonancia” mérésnek kell neveznünk, mivel a gerjesztési frekvencia az inga frekvenciájának csupán a negyede.

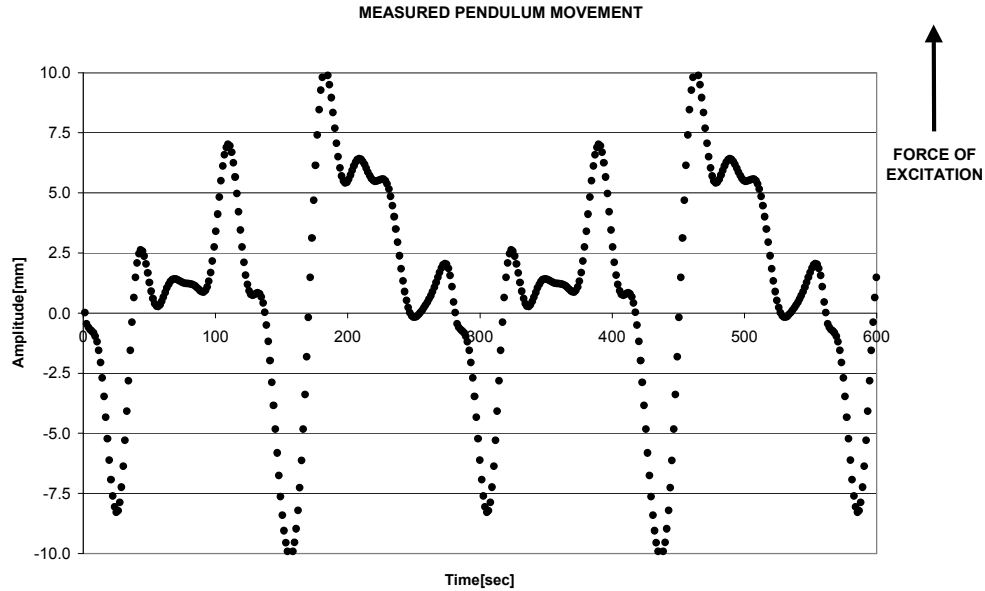
A nyers mérési adatok zajokkal terheltek, ezért megfelelő minőségű zajszűrésre volt szükség. A hidraulikus csillapító az inga mozgásában levágja a magas frekvenciájú zajokat, ezért a mérési adatokban tapasztalt magasabb frekvenciájú zajok túlnyomó része a mozgásdetektor mintavételi rendszeréből erednek. A magas frekvenciájú zajszűrésre többféle matematikai eljárás létezik, mi a Fourier transzformációt alkalmaztuk. A Fourier transzformáció elvégzése után a magasabb frekvenciájú Fourier amplitúdókat elhagyva, elvégeztük az inverz Fourier transzformációt. A szűrés eredményét láthatjuk a 2. ábrán.

5. A gravitációs kényszerrezonancia mérés kiértékelése

A fentiekben leírt kényszerrezonancia mérés célja az egymással összemérhető tömegek gravitációjának kísérleti vizsgálata volt. A mérés során az M nagyságú alsó ingatömegre periodikusan az M és $M/2$ nagyságú forrástömegekkel gravitációs úton hatunk, amely modulációt okoz az inga mozgásában. A mérés kiértékelése céljából elvégeztük a mérés numerikus szimulációját a Newton-i mechanika és Newton-i gravitáció alapján. A gravitációs mérés egyszerűsített matematikai modellje:

$$x'' + 2\lambda x' + \omega_0^2 x = \frac{F(t)}{M^*} = f(t), \quad (1)$$

ahol $x(t)$ az inga alsó tömegének időbeli mozgása, λ az inga csillapítási tényezője, ω_0 az inga sajátfrekvenciája, M^* az inga effektív tömege, $F(t)$ az inga alsó tömegére ható erő, az $f(t)$ a megfelelő erősítés.



2. ábra: Zajszűrt ingamozgás

Az (1) differenciálegyenlet homogén részének megoldása:

$$x(t) = Ae^{-\lambda t} \sin(\omega_0 t + \varphi), \quad (2)$$

amely az ismert csillapított rezgőmozgásnak felel meg. Feltevésünk, hogy a fizikai inga szabad mozgása kis kitérések esetén a csillapított harmonikus oszcillátor modelljével közelíthető. A külső erősítés biztosítja az inga folyamatos gerjesztését, amely hosszabb idő után az inga állandó amplitúdójú mozgására vezet. Az inga gerjesztéséhez a gravitációs kölcsönhatáson kívül a külső zajok is hozzájárulnak:

$$f(t) = f_g(t) + f_n(t), \quad (3)$$

ahol f_g a gravitáció, f_n a zaj erősítése. A zaj eredetű gerjesztés a hasznos jel kb. 10-15 százaléka. A gravitációs gerjesztés erősítése Newton gravitációs törvénye alapján:

$$f_g(t) = C_g \frac{GM}{M^*} \left[\frac{M_a}{r_a^2(t)} + \frac{M_b}{r_b^2(t)} \right], \quad (4)$$

ahol M az inga alsó tömege és a forrástömegek:

$$M_a = M / 2; \quad M_b = M = 24 \text{ kg}. \quad (5)$$

Az inga effektív tehetetlen tömege (becsült érték):

$$M^* = 51 \text{ kg} . \quad (6)$$

A számításnál a G gravitációs állandó általánosan elfogadott értékét használtuk:

$$G = 6.673 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ sec}^{-2} \text{ kg}^{-1} . \quad (7)$$

Az ingára ható zajt egyszerűen modelleztük:

$$f_n(t) = C_n \cos \omega_0 t . \quad (8)$$

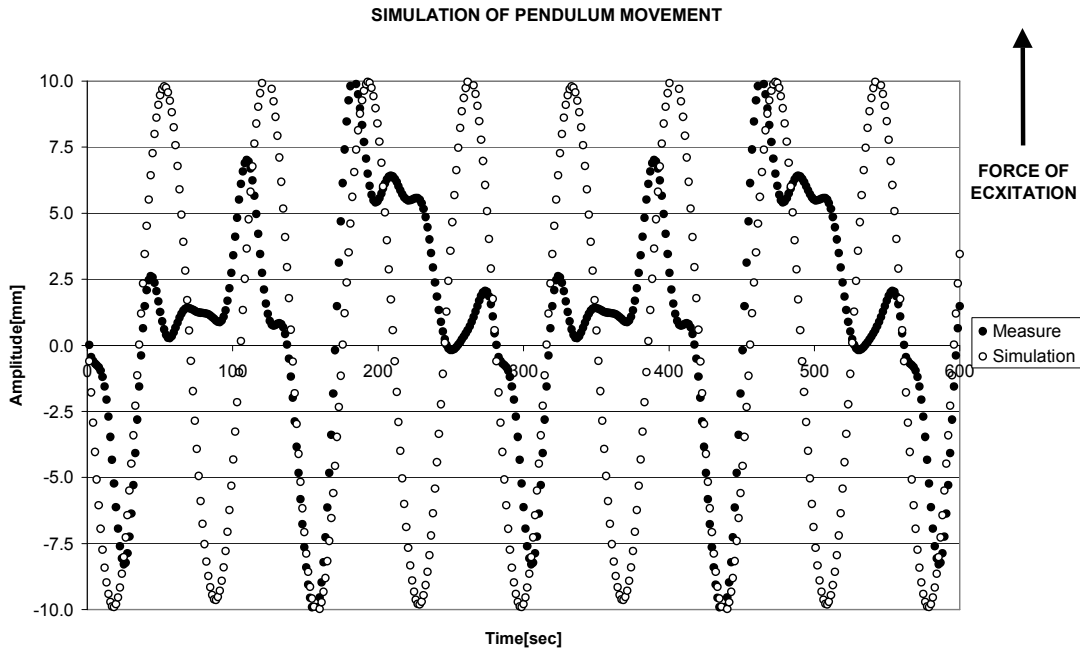
A numerikus szimulációban a C_g , C_n , és λ illesztési paraméterek természetesen nem függetlenek egymástól. A mérési eredményeink szerint az illesztési paraméterek reális tartományai:

$$C_g = 400 \div 550; C_n = (1 \div 3) \times 10^{-5}; \lambda = (0.5 - 2.0) \times 10^{-3} \quad (9)$$

A számítási modellünkben a csillapítási tényezőt 0.001/s értékűnek választottuk. Az inga csillapítási tényezőjét kísérleti szempontból csak becsülni lehet, mivel az erősen függ az amplitúdótól és a pillanatnyi háttérzajtól. A nagy lengésidejű inga érzékenysége olyan nagy, hogy gyakorlatilag állandó mozgást végez az 5-10 mm-es amplitúdó tartományban. Ebben a tartományban az inga csillapítási tényezője ezért zérusnak tekinthető. A numerikus szimuláció illesztését a legkisebb négyzetek módszerével végeztük, az illesztés eredményei:

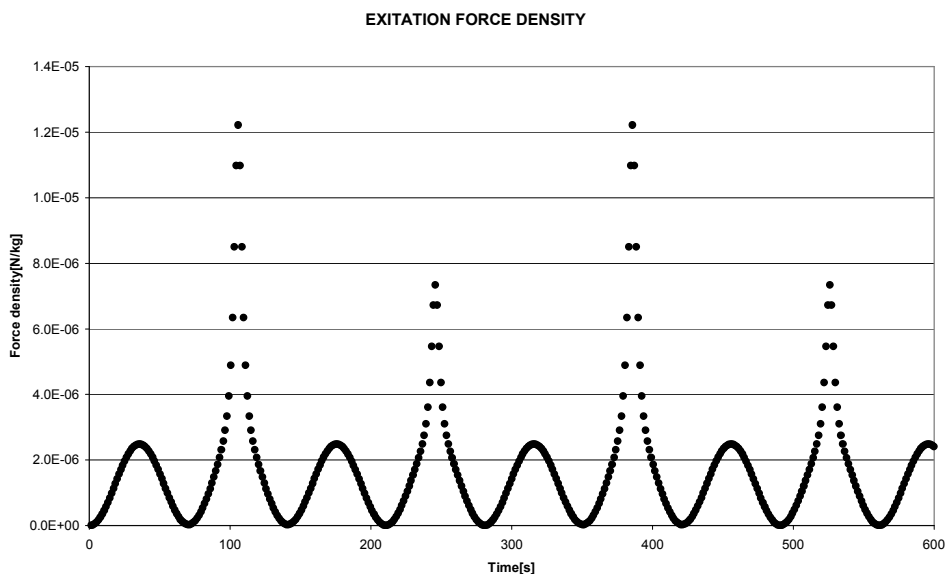
$$\begin{aligned} C_g &= 488; C_n = 1.21 \times 10^{-5}; \lambda = 0.001 / s \\ T_0 &= 70.05 \text{ s}; \omega_0 = 2\pi / T_0; A = 10.10 \text{ mm} \end{aligned} \quad (10)$$

Az alábbiakban numerikus szimuláció eredményeit grafikusán is bemutatjuk. A mért és szimulált ingamozgás együttesen látható a 3. ábrán:



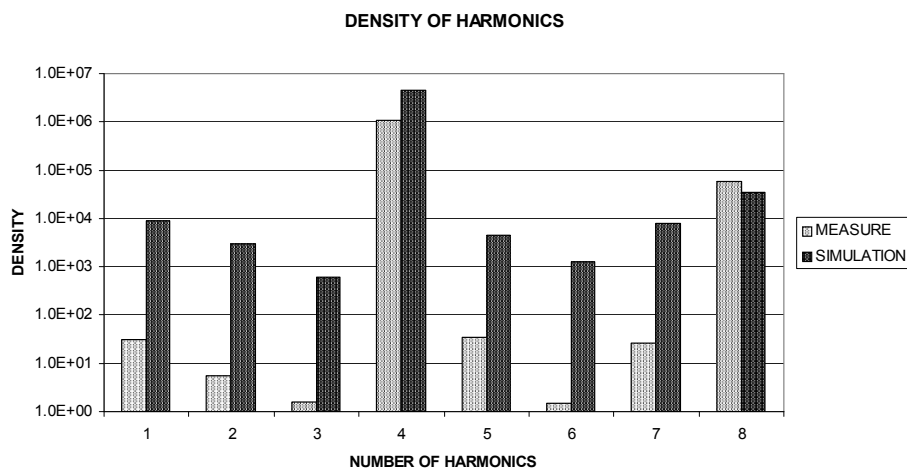
3. ábra: Mért és szimulált ingamozgás
Pontok: mérés; Karikák: szimuláció

A 4. ábra mutatja a szimulált gerjesztési erősítőséget, amely összevontan tartalmazza a gravitációs- és zajgerjesztést:



4. ábra: Szimulált gerjesztési erősítőség

Meghatároztuk a mért és szimulált ingamozgás felharmonikusainak Fourier intenzitásait, az eredmény az 5. ábrán látható:



5. ábra: A gerjesztés harmonikusainak Fourier intenzitása
Világos oszlopok: mérés; Sötét oszlopok: szimuláció

Összefoglalva megállapítható, hogy a numerikus szimuláció számottevő eltéréseket mutat a mérési eredményekkel összehasonlítva. Ha a méréseink korrektségét és megbízhatóságát elfogadjuk, akkor Newton gravitációs törvénye egymással összemérhető tömegek esetén szükségszerűen korrekcióra szorul.

6. Következtetések

A dolgozatban megmutattuk, hogy a fizikai inga alkalmas eszköz a gravitációs kölcsönhatás összehasonlító (kvalitatív) mérésére egymással egyenlő, illetve egymással összemérhető tömegek esetén. Az eddigi irodalmi adatok szerint a Cavendish-féle torziós ingát eddig még nem alkalmazták összemérhető tömegek gravitációs kölcsönhatásának vizsgálatára és valószínűleg (műszaki okok miatt) nem is alkalmas erre a célra.

A *testek szabadesésének gravitációs modulációján* alapuló G meghatározás módszerénél⁶ a modulációt okozó forrástömeg egyenlőnek választható a szabadesést végző tömeggel (próbatesttel), de ennél a mérésnél a meghatározó gravitációs kölcsönhatás Föld és a próbatest tömege között van, a forrástömeg csak a lokális gravitációs térerőt modulálja. Ezért a szabadesés mérési módszer alkalmatlan egyenlő tömegek gravitációjának vizsgálatára.

Egyelőre tehát úgy tűnik, hogy az általunk alkalmazott fizikai ingás módszer az egyedüli alkalmas módszer az egymással összemérhető tömegek gravitációjának mérésére.

A 3. ábra szerint számottevő eltérések vannak a mérés és a szimuláció között. A gravitációs kölcsönhatás szempontjából a legfeltűnőbb anomáliát a harmonikus analízis mutatja az 5. ábrán. *A mérés első három harmonikusa nagyságrendekkel kisebb a szimulált modellel összehasonlítva. Ennek egyetlen lehetséges magyarázata, hogy a forgó asztalon elhelyezett két forrástömeg közül az egyik gravitációs hatása elhanyagolhatóan kisebb a másiknál.* Ez teljes ellentmondásban van Newton gravitációs törvényével, amely szerint a forrástömegek hatása azok nagyságával arányos. Mérési hibáról nem lehet szó, mivel a mérést több alkalommal elvégeztük közel azonos eredményekkel. A méréseink alapján szükségszerűen arra a következtetésre jutunk, hogy a gravitációs kölcsönhatás a két kölcsönható tömeg különbségével arányos. Ennek kísérleti igazolásához elengedhetetlen olyan mérési módszer alkalmazása, amely alkalmas egymással összemérhető nagyságú tömegek gravitációjának mérésére.

A C_g gravitációs kölcsönhatás erősségét illesztő paraméter értéke meglepően nagyra adódott, amely semmiképpen sem tekinthető mérési hibának. A mérés és a szimulációs modell illesztése szerint a forrástömegek gravitációs hatása közel ötszázszorosa annak, ami Newton gravitációs törvényéből következne. A tapasztalt relatíve nagy mérési amplitúdó megjelenése további elméleti vizsgálatokat igényel. A jelen dolgozatban ezzel nem foglalkozhatunk, mivel célunk pusztán a kísérleti eredményeink ismertetése volt. A kísérleti eredményeket Newton gravitációs törvényének következő általánosításával foglalhatjuk össze:

$$F = G^* m(M - m) / r^2; \quad (m \leq M), \quad (11)$$

ahol az illesztett elméleti modell alapján:

$$G^* \approx 488 \times G. \quad (12)$$

Megjegyzendő, hogy a kísérleteink a (11) feltételezett formulától kis eltérést mutatattak, mivel egyenlő kölcsönható tömegek esetén is van egy kismértékű maradék erő, mely a kísérleti elrendezés aszimmetriájából következik. Tervezünk olyan kiterjesztett gravitációs kísérletet, melyben mind az ingatömegek, mind a forrástömegek két szimmetrikus, azonos méretű és tömegeloszlású fizikai ingát képeznek. A dinamikus gravitációt ezzel a két szimmetrikus, egymáshoz közel elhelyezett fizikai ingával, a fentiekhez hasonló rezonancia módszerrel kívánjuk pontosabban tanulmányozni.

Eredményünk láthatóan ellentmondásban van a tradicionális newtoni gravitációs törvénnyel, de egyben a szimmetrikus kettős csillagok létezésével is. Az elméleti vizsgálataink az ellentmondás feloldása tekintetében arra az eredményre vezettek, hogy gravitációsan kötött fizikai rendszerekben Newton gravitációs törvénye eredeti formájában érvényesül, ugyanis ekkor a fizikai rendszer gravitációs kötési energiája, és természetesen a teljes mechanikai energiája állandó (konzervatív gravitációs rendszerek). A (11) formulával reprezentált általánosított gravitációs törvény azon esetekre érvényes, amikor a kölcsönhatási folyamat során a gravitációs kötési energia intenzíven változik a folyamatos energia disszipáció miatt. A mi kényszer-rezonanciás mérési módszerünk során a gravitációs energia

állandó transzportja valósul meg a mozgó forrástömegektől az inga irányába, mely az inga jelentős amplitúdójú mozgását okozza, és egyben jelentős energia disszipációra (az inga tetemes súrlódási veszteségére) vezet.

Szilárd meggyőződésünk, hogy élesen meg kell különböztetnünk a *sztatikus* és *dinamikus* gravitációt. A jól ismert newtoni gravitáció a sztatikus gravitációt jellemzi, amely megfelel a hétköznapi tapasztalatoknak. Éppen ez a tény lehet oka annak, hogy a dinamikus gravitáció jelenségét eddig nem fedezték fel.

Eredményeink fizikai jelentőségére való tekintettel javasoljuk a kísérleteink elvégzését tőlünk független laboratóriumokban, ezzel együtt megvizsgálva azon elméleti feltevéseinket, amelyek a gravitáció új arcának, a dinamikus gravitáció jelenségének jobb megismerését célozza.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket fejezik ki a paksi atomerőmű mérnökeinek a gravitációs kísérletünk megvalósításában nyújtott műszaki segítségért. Különös hálával tartozunk prof. Demendy Zoltánnak, a miskolci műszaki egyetem fizika tanszékvezetőjének az érdeklődéséért és bátorításáért a gravitációs kísérletünk megvalósítása érdekében.

Hivatkozások

1. Gillies G.T., *Metrologia*, **24** (suppl.1.), 56, (1987).
2. Kestenbaum, D., Gravity Measurements Close in on Big G, *SCIENCE* **282**, 2180-2181, (1998).
3. Cavendish, H., Experiments to Determine the Density of the Earth, *Philos. Trans. R. Soc. London* **88**, 469-526, (1798).
4. Luther G.G. et al., *G. Phys. Rev. Lett. B*, **48**, 121-123, (1982).
5. Facy, L. & Pontikis, C., Détermination de la constante de gravitation par la méthode de resonance, *C. R. Acad. Sci.*, **272**, 1397-1398, (1971).
6. Schwarz, J.P. et al., A Free-Fall Determination of Newtonian Constant of Gravity, *Science*, **282**, 2230-2234, (1998).