

A gravitációs kölcsönhatás mérése fizikai ingával

Szerzők: SARKADI DEZSŐ, BODONYI LÁSZLÓ

Összefoglaló: A gravitációs kölcsönhatás vizsgálatához, a gravitációs állandó meghatározásához általában a Cavendish-féle torziós inga modernizált változatait használják mind a mai napig. Ezen mérések közös jellemzője, hogy a torziós inga tömege általában lényegesen kisebb, mint a gravitációs hatást kiváltó, úgynevezett forrástömeg. Közismert, hogy a gravitációs állandó pontossága több nagyságrenddel alatta marad a többi alapvető fizikai állandók pontosságának. Meglepő, hogy a különböző laboratóriumokban, nagy precizitással végrehajtott mérések között nem ritka a néhány ezrelékes relatív eltérés sem. A jelen cikk szerzői ezen mérési eltérések egyik lehetséges okát a kölcsönható tömegek jelentős különbözőségében látják. Az elérhető szakirodalom szerint, eléggé meglepő módon, ez idáig nem végeztek gravitációs méréseket egyenlő, illetve közel egyenlő tömegek között. Vizsgálataink szerint az egyenlő, illetve nagyságrendileg egyenlő tömegek gravitációjának méréséhez a fizikai inga előnyösnek bizonyult. A cikkben részletesen ismertetésre kerül egy, a gyakorlatban megvalósított, újszerű megoldású gravitációs inga, amely a fizikai inga tulajdonságaira épül.

1. Bevezetés

A gravitációs kölcsönhatás kísérleti vizsgálata annak rendkívüli gyengesége miatt a kísérleti fizika legbonyolultabb feladatai közé sorolható. A G gravitációs állandó első laboratóriumi meghatározása Henry Cavendish (Ref.1.1) nevéhez fűződik, aki a méréseihez legelőször alkalmazta a róla elnevezett, nagy érzékenyséű torziós ingát (1798). Az eltelt közel két-száz év alatt sokan végeztek különböző, *laboratóriumi* és *nem-laboratóriumi* gravitációs méréseket, amelyek legfontosabb célja a gravitációs állandó minél pontosabb meghatározása volt. A feladat mind a mai napig aktuális maradt. A nem-laboratóriumi G mérések túlnyomó része a nehézségi gyorsulás magasságtól való függésének mérésein alapulnak (g mérések tengerszinten, hegycsúcsokon, illetve bányákban). A nem-laboratóriumi mérések csoportjába sorolhatók a kisebb-nagyobb hegyek tömegei által létrehozott gravitációs térbeli anizotrópia mérések és újabban hatalmas víztárolókban tárolt, változó mennyiségű víztömeg gravitációs hatásának kimérései is (Ref.1.2, 1.3). A felsorolt gravitációs méréseket *geofizikai méréseknek* is szokás nevezni. Ezeknek a méréseknek közös jellemzője, hogy igen nagy tömegek gravitációs hatásával kell számolni és a kölcsönhatási távolságok is viszonylag nagyok. A mai, modern technikát alkalmazó, különféle geofizikai mérések, meglepő módon, *körülbelül egy százalékkal nagyobb gravitációs állandó értéket eredményeznek, mint a laboratóriumi mérések* (Ref.1.4).

Érthető okokból egyelőre a laboratóriumi mérések pontossága valamivel meghaladja a nem-laboratóriumi mérések pontosságát. Általában azonban elmondható, hogy mindkét mérési módszernek megvannak a maga előnyei és hátrányai. Jelenleg a gravitációs állandó legpontosabbnak tartott és nemzetközileg általánosan elfogadott értéke:

$$G = (6.67259 \pm 0.00085) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ sec}^{-2} \text{ kg}^{-1}, \quad (1.1)$$

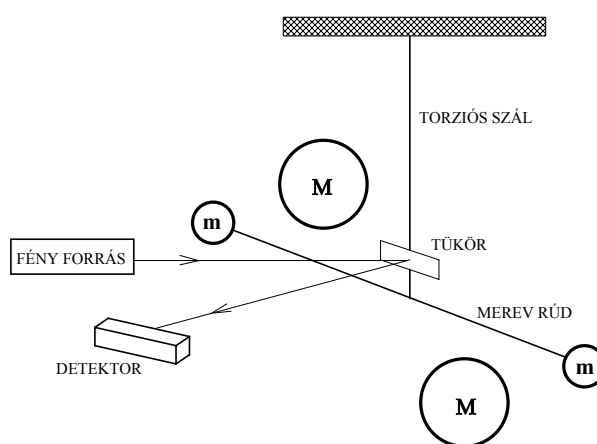
melyet Cohen és Taylor az összesített gravitációs mérési eredményekből és az alapvető fizikai konstansok összehangolásából határozták meg az 1980-as évek derekán (Ref. 1.5, 1.6).

A gravitációs állandó nagy pontosságú meghatározására irányuló eddigi törekvések azonban egyelőre nem hozták meg az elvárt pontosságú eredményt. Zavaró továbbá az a körülmény, hogy a különböző, nagy precizitású laboratóriumi G mérések között is jelentősek az eltérések. A különböző, nagy megbízhatóságú kísérletekből ez idáig publikált mérési eredmények összehasonlításából a gravitációs állandó relatív pontosságát a legjobb esetben is csak

10^{-4} értékűre becsülhetjük. Ha viszont tekintetbe vesszük a geofizikai mérések eredményeit is, amelyek szerint a G értéke szisztematikusan kb. egy százalékkal nagyobb a laboratóriumi mérések eredményeinél, akkor *a gravitációs állandó hibáját szükségszerűen legalább egy százalékosnak kell tekintenünk.* A gravitációs állandó kísérleti értékeinek ilyen nagyfokú szórára mind a mai napig nincs elfogadható magyarázat.

2. A gravitáció mérése torziós ingával

Cavendish gravitációs mérőeszközének elrendezését a következő egyszerűsített rajzon láthatjuk:



1. ábra: A torziós inga alapelve
(m:=ingatömegek; M:=forrástömegek.)

A torziós inga kis amplitúdójú lengések esetén harmonikus oszcillátorral modellezhető, amelynek sajátfrekvenciáját az

$$\omega^2 = \frac{D}{\Theta}; \quad \left(\omega = \frac{2\pi}{T} \right) \quad (2.1)$$

egyenlet határozza meg, ahol D a torziós szál direkciós nyomatéka, Θ az inga tehetetlenségi nyomatéka. A szakirodalomban *a torziós inga érzékenységet D -vel azonosítják*, azaz a torziós inga annál érzékenyebb, minél kisebb a direkciós nyomatéka. Általában a torziós ingák érzékenysége 10^{-3} - 10^{-10} Nm/rad határok között van. A gravitációs mérések során a D értékét általában az inga T lengési idejéből határozzák meg. A lengési idő viszonylag egyszerű módon, nagy pontossággal mérhető. A gravitáció méréséhez használt torziós ingák tipikus lengésideje 10^1 - 10^4 másodperc tartományba esik. A tehetetlenségi nyomatékot vagy számítják az inga teljes tömegének és tömegeloszlásának ismeretében, vagy kiegészítő mérésekkel határozzák meg. A precíziós torziós ingákat a levegő mozgásából eredő zavarok kiküszöbölése érdekében általában átlátszó falú, hengeres formájú vákuum-kamrában helyezik el. A viszonylag nagyméretű forrástömegek a vákuum-kamrán kívül helyezkednek el, amelyek távirányítással kerülnek a mérési pozíciójukba. Az ingatömegek nagyságrendje szokásosan 10-50 gramm, a forrástömegeké 20-50 kg. Általában elmondható, hogy a Cavendish típusú gravitációs mérésnél a "forrástömeg/ingatömeg" arány mintegy ezres nagyságrendű.

A torziós inga megbízható működéséhez feltétlenül biztosítani kell a környezet klimatikus állandóságát, valamint a külső vibrációs és gravitációs zajok minimalizálását. A vibrációs zajok csillapítása céljából a gravitációs inga állványát nagy tömegű padozatra, betonkockára, stb. helyezik rá. A torziós inga hátrányos tulajdonságai a torziós szál fizikai sajátos-

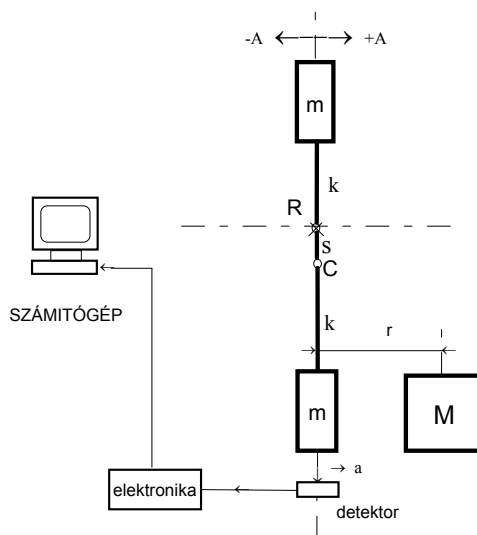
ságaival függenek össze, ezek elsősorban a torziós szál anyaghibái, kúszása, csavarási hiszterézise, valamint öregedése (Ref. 2.1, 2.2).

Alapvető követelmény, hogy a gravitációs méréseknél használt torziós inga érzéketlen legyen elsősorban a sztatikus elektromágneses zavarokra. Az elektrosztatikus zavarok ellen általában a gondos galvanikus összekapcsolás és földelés elegendőnek bizonyul. Nem-fémes, azaz nem áramvezető torziós szál alkalmazása esetén a szál felületére vezető fémréteget galvanizálnak, ezzel biztosítják a torziós szál elektrosztatikus földelését. A sztatikus mágneses zavarok elkerülése érdekében a mintatömegek és az inga tartószerkezetének ferromágneses szennyeződéseit a lehetséges mértékben csökkentik.

A különböző célú és kivitelű torziós ingák műszaki megoldásairól részletes ismertetés található G.T. Gillies cikkében (Ref. 2.3).

3. A gravitáció mérése fizikai ingával

A gyenge erőhatások, így a gravitációs erő laboratóriumi méréséhez fizikai ingát - tudomásunk szerint - eddig még nem alkalmaztak. A fizikai inga lényegében egy függőlegesre állított torziós ingának feleltethető meg, az inga visszatérítő erejének forrása a Föld konstans nagyságú és irányú gravitációs tere. A torziós szállal ellentétben a gravitációs tér esetén "hiszteréziséről", "kúszásáról", ...stb. nem beszélhetünk, ebben rejlik a fizikai inga egyik előnye a torziós ingával szemben. A kísérleti eszközünk vázlatos rajzát a következő ábra mutatja:



2. ábra: Gravitációs kísérlet fizikai ingával, a mérés elvi rajza

M := forrástömeg; m :=ingatömegek; A :=az inga nyugalmi amplitúdója;
 R :=forgáscentrum; C :=tömegközéppont; s := RC távolság; k :=az inga karhosszúsága;
 r :=kölcsonhatási távolság; a := a mérhető kitérés

A mérőeszköz részletesebb ismertetésére az 5. pontban kerül sor. A megvalósított fizikai inga karhosszúságai 75-75 centiméteresek, a téglatest alakú, alsó és felső ingatömegek nagy tisztaságú ólomból készültek, a tömegük egyenként 12 kg nagyságú. Az inga tömegeket magába foglaló létraformájú keret, valamint az ingát tartó állvány rozsdamentes acélból készült, a sztatikus mágneses hatások minimalizálása érdekében.

Az inga optimális környezeti feltételek esetén is egy állandó, minimális amplitúdójú lengést végez, elsősorban a talajban mindig meglévő mikrorezgések miatt. Az inga minimális nyugalmi amplitúdóját a fenti rajzon A -val jelöltük, amelynek átlagolt nagysága optimálisan alacsony háttér zaj esetén egy méteres kartávolságnál kb. 0.1-0.2 mm. Az inga alsó tömegéhez közelített M forrástömeg az inga lengési középpontjának a nagyságú eltolódását eredményezi,

amelynek nagyságrendje szintén tized-milliméterekben fejezhető ki. Könnyen igazolható, hogy a mérhető gravitációs effektus (eltolódás) a forrástömeggel arányos. Egyenlő, illetve közel egyenlő tömegek gravitációs mérésénél ezért az inga tömegét is jelentősen növelni kellett. A fizikai inga kis amplitúdójú lengések esetén harmonikus oszcillátornak tekinthető, amelynek sajátfrekvenciáját az

$$\omega^2 = \frac{mgs}{\Theta}; \quad \left(\omega = \frac{2\pi}{T} \right) \quad (3.1)$$

képlet határozza meg, ahol m az inga teljes lengő tömege, g a nehézségi gyorsulás, s az inga forgástengelye és tömegközéppontja közötti távolság, Θ az inga forgástengelyére vonatkozó tehetetlenségi nyomaték. A fizikai inga érzékenységét a torziós inga mintájára a következő módon definiálhatjuk:

$$D = \Theta \omega^2 = mgs, \quad (3.2)$$

amely elvileg tetszőlegesen csökkenthető, részben az inga tömegének (tehetetlenségi nyomatékának) csökkentésével, részben az inga lengési idejének növelésével. Látható, hogy *az inga érzékenysége a lengési idő négyzetével fordítottan arányos*.

Tapasztalataink szerint a nagyméretű fizikai ingával az egy perces lengésidő minden különösebb nehézség nélkül beállítható, de a stabil két perces lengésidő elérése a gyakorlatban már megvalósíthatatlannak bizonyult. A lengési idő beállítása az inga súlypontjának függőleges eltolásával történik, durva és finom állítócsavarok segítségével.

A gravitációs kísérletek pontosságánál az egyik lényeges szempont az inga lengési idejének állandó értéken tartása. Vizsgálataink szerint a lengésidő szórása a lengési idő növelésével egyre fokozottabban növekszik. Ez a jelenség érthető módon megakadályozza a fizikai inga érzékenységének tetszőleges mértékű növelését. A gravitációs méréseknél tehát meg kell találnunk az optimális kompromisszumot az inga pontossága és érzékenysége tekintetében. Tapasztalataink szerint az elkészült fizikai ingánk érzékenységét csak 0.5, ... 0.1 Nm/rad tartományig tudtuk növelni, amelyhez kb. 40-80 másodperces lengésidő tartomány tartozik. Sajnos ez az optimálisan beállítható érzékenység jócskán alatta marad a torziós ingák érzékenységi tartományának, de a viszonylag alacsony érzékenység jól kompenzálható egyrészt a *helyzetmérés felbontásának növelésével*, másrészt az ún. *dinamikus mérési módszer* alkalmazásával (az utóbbról a következő pontban lesz szó).

Elvileg a fizikai inga mérési érzékenységét lényegesen lehetne növelni az inga teljes tömegének csökkentésével. Az inga tömegének csökkentésével azonban növekszik annak felület/tömeg aránya, ezzel együtt nő az inga mozgását fékező légellenállás is. Vákuum kamra alkalmazását az inga tervezett, viszonylag nagy geometriai mérete miatt eleve kizártuk. Hosszas próbálkozásaink végén arra a következtetésre jutottunk, hogy az ingatömegeknek a gyakorlatban legalább egy-két kilogrammosnak kell lenniük, az inga alsó-felső karhosszúságát nem célszerű fél méternél kisebbre választani. A viszonylag nagy tömegű és nagyméretű fizikai inga alkalmazása mérés technikai szempontból határozottan előnyösebb. Ennek oka nemcsak a kedvezőbb légellenállási viszony, hanem az inga könnyebb beállíthatósága, hitelesítése is. Az inga méret és tömeg növelésének természetesen határt szab a mérőhelyiség (laboratórium) mérete, az inga egyre nehezebb kiszolgálása és az előállítási költségek növekedése.

A fizikai inga érzékenységét a fentieken kívül még jelentősen befolyásolja az inga csapágyazását jelentő ékek keménysége és kopásállósága. Erre a célra a kísérleteinkhez egy speciális szerszámacélfajtát alkalmaztunk, amelyet hosszúságú körrel alakítottunk ki a megfelelő alakúra. Az eddigi tapasztalataink szerint az acélból készült ékek beváltak, zavaró mértékű kopást, hirtelen változó értékű súrlódási effektusokat nem észleltünk. Az inga *csillapítási tényezője* természetesen erősen függ az ékek minőségétől, tisztaságától, valamint a pár-

huzamos (egytengetlyű) beállításuktól. Mivel az inga érzékenysége szorosan összefügg a csillapítási tényezőjével, a gravitációs méréseket minden esetben csillapítás mérésekkel kezdjük. Természetesen a fizikai inga zavarmentes működéséhez biztosítani kell mindazon zavarmentes környezeti feltételeket is, melyekről már a torziós ingánál szót ejtettünk.

4. A gravitáció sztatikus és dinamikus mérése

A gravitációs kölcsönhatás vizsgálata a gyengesége miatt rendkívüli érzékenységgű kísérleti eszközt igényel, amely egyben a nemkívánatos zavaró hatások, elsősorban a külső vibrációs és gravitációs zaj leválaszthatatlan megjelenését jelenti a mérésekben. Különösen hátrányosak ezek a külső zavarok az egyenlő, illetve közel egyenlő tömegek gravitációjának mérésekor, mivel ekkor az inga gravitációs kitérése minimális. Ez a közvetlen oka annak, hogy a hagyományos torziós ingával végzett méréseknél a kölcsönható tömegek aránya tipikusan 1000 : 1 a forrástömeg javára.

A külső zavaró tényezők lehetséges csökkentése mellett még feltétlenül szükségesek olyan kiegészítő mérés technikai megoldások alkalmazása is, amelyek javítják az úgynevezett "jel/zaj" arányt. Ilyen a rezonancia mérési módszer alkalmazása, amelyről az alábbiakban még lesz szó. A mérési eredmények kiértékelésében a statisztikai módszerek szerepe jelentősen megnövekszik, a jó statisztikai eredmény elérése céljából a méréseket többször meg kell ismételni. Ez a gyakorlatban legalább 30-40 mérést jelent. *A nagyszámú mérés elvégzéséhez célszerű a méréseket automatizálni és on-line számítógépet használni.*

A gravitáció sztatikus mérése során a mérőeszközhöz közelített forrástömeg egy kicsiny, de állandó értékű inga kitérést hoz létre, amelyet egy érzékeny detektorral (például tükörös kivetítéssel) detektálhatjuk. Az általunk megvalósított fizikai inga optimálisan elérhető érzékenysége 0.1 Nm/rad körüli érték. Végezzünk itt el egy gyors számítást a mérhető effektusra! Legyen az inga alsó és felső m tömege 12 kg, az inga karok legyenek $k = 0.75$ méteresek és az M forrástömeg legyen 24 kg. Ekkor a 2. ábra szerint az inga alsó tömegére ható N forgatónyomaték $r = 0.2$ méter távolság esetén:

$$N = k \times F = k \times G \frac{mM}{r^2} \approx 3.6 \times 10^{-7} \text{ Nm} . \quad (4.1)$$

Itt elhanyagoltuk a felső tömegre ható kicsiny forgatónyomatékot. Ebből kiszámítható az inga elfordulási szöge radiánban:

$$\Delta\varphi = \frac{N}{D} = \frac{3.6 \times 10^{-7} \text{ Nm}}{0.1 \text{ Nm/rad}} \approx 3.6 \times 10^{-6} \text{ rad} . \quad (4.2)$$

Az inga kitérése egy méteres mutató esetén csak néhány mikrométer nagyságú. Nagyobb gond viszont az, hogy az inga alapzaj amplitúdója a legkedvezőbb környezeti feltételek esetén is ennél majdnem két nagyságrenddel nagyobb. A mérhető effektus tehát elvesz a háttér zajban. Ennek ismeretében megállapítható, hogy *a fizikai inga a gravitáció sztatikus mérésére nem alkalmas eszköz.* Ez lehet az oka annak, hogy történetileg a torziós inga terjedt el és vált általánosan ismertté nemcsak a gravitáció, de a sztatikus elektromágneses kísérletekben is. Az inga lengési idejének növelésével ugyan tovább növelhető az inga érzékenysége, de az inga stabil egyensúlyi állapotának beállítása egyre körülményesebbé válik.

Amint már a fentiekben említettük, a torziós inga érzékenysége több nagyságrenddel meghaladja a fizikai inga érzékenységét. A torziós ingánál tipikusan beállítható tíz-húsz perces lengési idő tartományban a háttérzajok amplitúdói már viszonylag kicsik, ezért *a torziós inga az igazán alkalmas eszköz a sztatikus gravitáció méréséhez.*

A gyakorlatban megvalósított sztatikus mérések között kiemelendő a kompenzációs módszer, amelynél külön elektrosztatikus erőterrel a gravitációs kitérítő erőt folyamatosan kompenzálják (ezt egy finoman beállított elektronikus szabályozó kör végzi). A kompenzáló erő nagyságát egy számítógép folyamatosan méri és tárolja (Ref. 4.1, 4.2, 4.3).

A sztatikus mérés régebbi, de nagyon szellemes módszer az angol *C.V. Boyes* nevéhez fűződik (Ref. 4.4), aki a torziós inga lengési idejének megváltozásából határozta meg a múlt század végén a gravitációs állandót. Ha ugyanis a torziós inga tömegeinek külső oldalához közelítjük a forrástömegeket, azok sztatikus gravitációs tere kismértékben megnöveli az inga eredő direkciós nyomatékát, amely a lengésidő kb. egy-két százalékos csökkenését eredményezi. Két amerikai fizikus, *Luther* és *Towler* 1982-ben publikált egy gravitációs állandó meghatározást (Ref. 4.5), akik Boyes módszerét újították fel a legmodernebb technika alkalmazása mellett. A Luther és Towler által mért gravitációs állandót a szakirodalom az egyik legmegbízhatóbbnak és legpontosabbnak tartja, az eredményük:

$$G = (6.6726 \pm 0.0005) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ sec}^{-2} \text{ kg}^{-1}. \quad (4.3)$$

A gravitáció dinamikus mérési módszere a gravitációs erőter munkavégző képességén alapszik. A dinamikus mérési módszer éppen az ellentéte a kompenzációs módszernek, ugyanis ebben az esetben megengedjük, hogy az ingához közelített forrástömegek maximális mértékű ingakitérést hozzanak létre. Ha az *M* forrástömeget elvileg végtelen távolságból *r* távolságra közelítjük a fizikai inga alsó tömegéhez (2. ábra), az inga mérhető szögelfordulását a következő energia-megmaradási egyenlet határozza meg:

$$\frac{1}{2} D(\Delta\varphi)^2 = G \frac{mM}{r}. \quad (4.4)$$

A fentiekben ismertetett sztatikus kitérítési számítás kiinduló adatait behelyettesítve ebbe az egyenletbe, az inga elfordulása:

$$\Delta\varphi = \sqrt{\frac{2GmM}{rD}} \approx 1.39 \times 10^{-3} \text{ rad}, \quad (4.5)$$

amely már igen jól mérhető effektus, a sztatikus gravitációs hatás közel négyszáz-szorosa.

A dinamikus módszer esetében azonban az inga kitérése nem marad állandó, mivel a megnövekedett lengési amplitúdó a súrlódások miatt rövid időn belül (20-30 perc) lecsillapodik az inga alapzajának szintjére. Az ingakísérletek szerint a gravitáció dinamikus hatásából származó, viszonylag nagy amplitúdójú inga kitérés szembevető módon jelentkezik. Összefoglalva tehát azt mondhatjuk, hogy a fizikai inga alapvetően a gravitáció dinamikus mérésére alkalmas. Könnyen belátható, hogy azonos kezdeti feltételek esetén a dinamikus hatás arányos a sztatikus hatással, ezért a gravitációs állandó mindkét mérési módszerrel kimérhető.

Az amerikai *Gillies* professzor a méréstechnikai összefoglaló cikkében (Ref. 2.3) élesen megkülönbözteti a kétféle mérési módszert, azonban az eddig megvalósított különböző megoldású gravitációs mérőeszközök túlnyomó részénél együttesen jelentkezik mind a sztatikus, mind a dinamikus hatás. A mérések pontosságát befolyásolhatja a kétféle hatás nem megfelelő szétválasztása.

5. A megvalósított gravitációs inga

A gravitációs inga tervezésénél és kivitelezésénél elsődlegesen azt kellett számításba venni, hogy az inga viszonylag nagyméretű és nagy tömegű, tehát biztosítani kellett annak

kellő mechanikai szilárdságát. Az inga karok gravitációs hatásának csökkentése és a kellő szilárdság biztosítása egymásnak ellentmondó követelmény, végül egy létraformájú tartókeret megvalósítása mellett döntöttünk. A keret alsó és felső végére csavaros kötással rögzíthetők az m ingatömegek, biztosítva azok cserélhetőségét. Az inga karok hosszúsága 75-75 cm, amelyet az ingatömegek súlypontjai határoznak meg. Az inga tartóállványának is feltétlenül szilárdnak kell lennie, az esetleges zavaró sajátlendések elnyomása céljából. Mind a tartóállványt, mind az inga keretét rozsdamentes acél-csövekből (KO32) hegesztettük össze. A tartóállvány tömege kb. 70 kg, az üres ingakeret tömege 2.4 kg. Az ingakeret szélessége 200 mm, a létraszerkezet csövei 16 mm átmérőjűek, 2 mm falvastagságúak. Az inga állványát a mérőhelyiség padlójához, vagy a mennyezetéhez stabilan rögzíteni kell. A külső eredetű vibrációk csillapítása érdekében a rögzítés gumi-alátétek közbeiktatásával történt.

Az ingakeret állítható módon, csavaros kötésekkel csatlakozik az inga tengelyét képező, 250 mm hosszúságú, 25 mm átmérőjű csődarabhoz. Az inga súlypontját ezekkel a csavarokkal lehet durván középre állítani. A csőtengely két végén található az ékágak, amelyek helyzete külön állító csavarok segítségével optimalizálható. A szerszámacélból készült ékek (anyag specifikáció: MSZ 4351-84) ezekre az ágyakra vannak ragasztással rögzítve. Az ékágak, és így az ékek is szükség esetén könnyen leszerelhetők, cserélhetők. A tartóállványon ugyancsak csavarokkal beállítható módon vannak felszerelve az ékek ellenpárjait befogadó ékágak is. Az inga függőleges helyzetének, illetve súlypontjának finombeállítása az inga csőtengelyén átmenő, függőleges és vízszintes irányú állítócsavarokkal történik. A beállító csavarok anyaga szintén rozsdamentes acél (KO32) és elfordulás ellen biztosítottak. Tapasztalataink szerint *a pontos és reprodukálható gravitációs mérések alapvető feltétele az inga megfelelően stabil mechanikai kivitele.*

A mérések során az M forrástömeget egy kisméretű és kis teljesítményű (10 W-os) villanymotorral meghajtott *telemechanikai rendszer* mozgatja a mérési pozícióba, mindig az inga lengési síkjára merőlegesen. Ezzel a megoldással realizáljuk a forrástömeg kezdeti, "végtelen távolságú" pozícióját. A forrástömeget mozgató rendszer nincs mechanikai kapcsolatban az inga állványával, valamint a mozgatás vibrációs hatása szigeteléssel csillapított. A villanymotor az inga lengési síkjára merőlegesen, attól mintegy két méter távolságban helyezkedik el, az esetlegesen szórt elektromágneses tere gondosan leárnyékolva.

Néhány szót kell ejtenünk az általunk is sikeresen alkalmazott *rezonancia módszerről*, amelyről két francia fizikus, *Facy* és *Pontikis* publikált először 1971-ben (Ref.5.1). Ennél a mérési módszernél a forrástömeget egy egyenletesen forgatható, vízszintes helyzetű, kör alakú asztalra helyezzük, amelynek forgási középpontját közvetlenül az inga alsó tömege alatt néhány milliméterre állítjuk be. A körasztal fordulatszáma az inga lengési frekvenciájával egyezik meg, amely rezonancia kölcsönhatásra vezet. *A gravitációs rezonancia kialakulását a stabil fázis-szinkronizáció jelentkezése igazolja az inga mozgásában.* Érthető módon a dinamikus gravitáció mérésének statisztikáját a rezonancia módszer lényegesen javítja, a mérés időtartama akár több óra is lehet. A gyakorlati megvalósítás során két dologra kellett nagy figyelmet fordítani: a körasztalt az esetleges mágneses hatások elkerülése céljából rétegelt falemezből készítettük, a járulékos vibráció csillapítását gumírozott felületű görgőkkel, illetve kör alakú megvezető sín-pályával oldottuk meg. A körasztal átmérője 1.2 méter, tömege kb. 60 kg, meghajtása stabilizált fordulatszámú villanymotorral történik.

6. Az inga kitérésének mérése; a helyzetdetektor

A gravitációs inga viszonylagosan kis érzékenységét az amplitúdó, illetve kitérés mérésének nagy felbontásával tudtuk kompenzálni. Műszaki szempontból az inga helyzetének pontos mérése nagyobb problémának bizonyult, mint magának az ingának a mechanikai kivitelezése. A szakirodalomban (pl. Ref. 2.3) *a kontaktus nélküli helyzetmérésre* vonatkozóan

többféle megoldásról esik szó, de részletes leírást általában nem közölnek. Az analóg mérés-technikában elsősorban az induktív, illetve kapacitív elven működő eszközök váltak be.

Az utóbbi évtizedekben a digitális helyzetmérések kerültek előtérbe, amelyek jobban illeszthetők az általánosan elterjedt *on-line számítógépes mérés technikához*. Az egyik megoldás hasonló a közismert elektronikus "vonalkód" leolvasóhoz, amelynél integrált félvezető technológiával megvalósított, egymás mellett sűrűn elhelyezkedő fotodiódák alkotják a detektort (CCD). Az élesre fókuszált fénysugarat az ingához rögzített tükörrel vetítik a fotodiódák mátrixra, a helyzetinformációt digitális formátumban elektronika olvassa ki. A módszer ideálisan elérhető felbontása 10-20 mikrométer, legfontosabb előnye az egyszerűsége. Sokkal ígéretesebbek azonban azok a módszerek, amelyeknél a helyzetmérés időmérésre van visszavezetve. Az elektronika mai fejlettsége lehetővé teszi az idő rendkívül nagy felbontású és nagy pontosságú mérését. A nagy felbontású *optoelektronikus detektorok ezért a helyzetmérést időmérésre vezetik vissza*.

Az általunk megvalósított optoelektronikus helyzetdetektor szintén időmérési elven működik, amelynek a részletes ismertetését egy külön publikációban kívánjuk megadni. A detektorunkkal elért műszaki paraméterek a következők:

Mérési tartomány:	± 4 mm
Felbontás:	kisebb, mint 5 mikrométer
Non-linearitás:	kisebb, mint 0.5 %
Mintavételi periódus:	0.2 sec ... 2 sec (folyamatosan állítható)
Kiolvasás:	16 bites számlálóval

A kiolvasott digitális helyzetjel coax-kábelén keresztül csatlakozik egy személyi számítógép soros portjára. A számítógép az inga mozgását grafikusan megjeleníti, valamint folyamatosan letárolja. A relatíve nagy mintavételi periódus idő miatt a számítógép sebességére nézve nincs különösebb követelmény.

A teljesség kedvéért meg kell említenünk még a *lézer-interferométeres* detektorokat is, amelyek távolság felbontása közismerten nagyságrendekkel nagyobb a fentiekben ismertetett megoldásoknál. Ezeknek a viszonylag drága eszközöknek a gravitációs mérés technikai alkalmazásairól azonban nincsenek konkrét ismereteink. Véleményünk szerint a helyzetmérés 5-10 mikronos felbontása elegendő a gravitációs mérésekhez, *a felbontás további növelésének a magasabb frekvenciájú háttérzajok jelenléte miatt nincs értelme*.

7. Az inga érzékenysége és csillapítása

A torziós ingák érzékenységét, amint ezt már említettük, a direkciós nyomatékukkal szokásos definiálni, amely definíció a fizikai ingára is kiterjeszthető. Ennek meghatározása egyszerű feladat, az inga csőtengelyére egy kis tömegű és néhány centiméter hosszúságú, vízszintes segédkart erősítünk, amelyre néhány gramm tömegű, etalon súlyt helyezünk. Ez meghatároz egy ismert nagyságú forgató nyomatékot, amely egy pontosan mérhető inga eredményez. Az adatok alapján az érzékenység egyszerűen számítható. A megvalósított inga érzékenységét gondosan kimértük a lengésidő függvényében, amelyet a 3. ábrán logaritmikus lép-tékben ábrázoltuk. A mérési pontok illesztése alapján az inga érzékenységét egy-két százalékon belül a következő képlet adja meg:

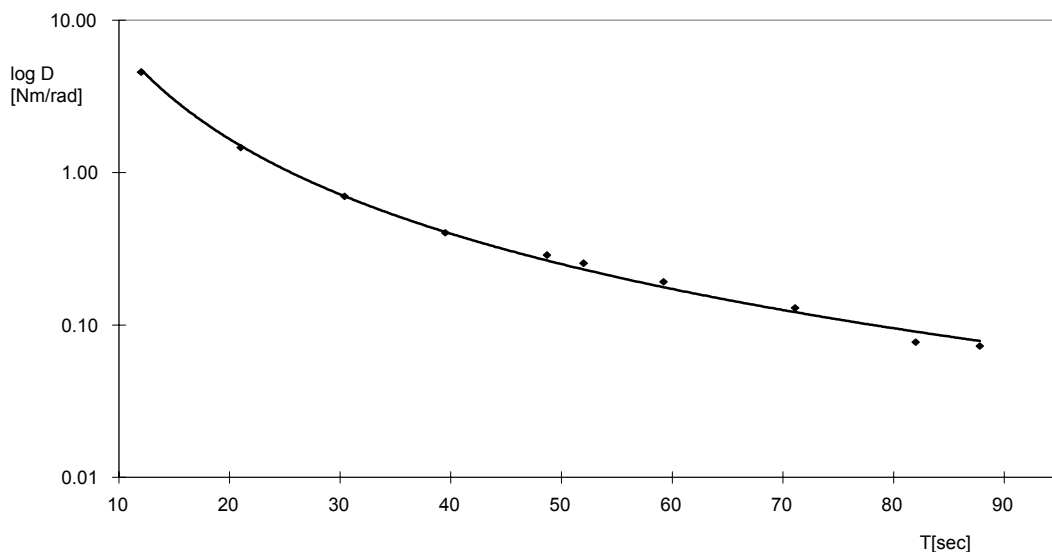
$$D(Nm/rad) = 794.8 \times T^{-2.061} \quad (7.1)$$

Az inga meglepően nagy érzékenységét jól jellemzi, hogy a 80 másodperc körüli lengésidőre beállított inga képes egy emberi test dinamikus gravitációs hatását mintegy öt-tíz

métről kimutatni. Ennek magyarázatát a (4.4) összefüggés adja meg, amely szerint *az inga dinamikus kitérése a forrástömeg távolságának négyzetgyökével fordítottan arányos*.

Ebből következik az a megfigyelésünk, hogy egy forgalmas út gépjárművei a vibrációs zajok mellett jelentős gravitációs zajokat is keltenek, még viszonylag nagy távolságból is.

A gyakorlatban kissé körülményesebb az inga *csillapításának pontos meghatározása*, mivel a háttér zaj miatt a magára hagyott inga amplitúdójának csökkenése nem egészen exponenciális jellegű. A gyakorlatban végrehajtott csillapítás méréseknél az inga induló amplitúdója legalább tízszerese az alapzaj amplitúdójának. Az előzetes csillapítás mérés alapfeltétele a gravitációs mérések elindításának, mivel a csillapítás mértékéből az ékek megfelelő állapota, illetve megfelelő beállítására lehet következtetni.



3. ábra: A gravitációs inga mért érzékenysége a lengésideő függvényében

A tapasztalat szerint a dinamikus gravitációs mérések elegendő pontossággal, reprodukálható módon végrehajthatók, ha a λ csillapítási tényező kisebb, mint 5×10^{-4} . Ez a feltétel tapasztalataink szerint viszonylag könnyen teljesíthető. Mivel a csillapítási tényező a méréseink szerint nem függ lényegesen az inga lengési idejétől, ebből arra lehet következtetni, hogy az alkalmazott 40 - 80 másodperces lengési idő tartományban az inga légellenállásából származó csillapítása elhanyagolható mértékű.

8. Zajvédelem

Utoljára maradt az inga zajvédelmének kérdése, pedig a gravitációs mérések végrehajthatóságának legfontosabb alapfeltétele a különböző eredetű háttér zajok minimális szintjének biztosítása, azaz a jel/zaj arány optimalizálása. *A háttér zajnak két alapvető forrása van, ez a vibráció és a dinamikus gravitáció.* Szerencsére mindkét zaj jelentősen csökkenthető a mérőhelyiség, laboratórium helyének körültekintő megválasztásával. Például sűrűn lakott és forgalmas közúti közlekedéssel terhelt környezet gyakorlatilag alkalmatlan a gravitációs mérésekre.

Ideális mérési környezet biztosítható elhagyott bányákban, barlangban, lakott területtől távol eső pincékben, stb. Ezzel azt a fontos követelményt is biztosítjuk, hogy a háttér zaj intenzitása viszonylag egyenletes legyen. Az általunk megvalósított gravitációs inga optimális elhelyezését egy kis település határában lévő hétvégi ház garázsában találtuk meg. A háztól a legközelebb eső, ritka forgalmú közút mintegy 500 méter távolságban van.

A mérőhelyiség kialakítása a nyílászárók megfelelő légszigetelésével kezdődött, ugyanis a legkisebb légáramlatok is erősen zavaróak lehetnek. A helyiség alapterülete kb. 18 négyzetméter, magassága 2.5 méter. Tervezzük az inga teljesen zárt falú szekrénybe helyezését is. A mérések során a mérőhelyiségben általában nem tartózkodunk, a többször megismételt mérések folyamatát egy távolabbi szobából, számítógép képernyőjén követjük. Innen történik a forrástömegek távvezérelt mozgatása is.

A mérések végrehajtását még két jelentős, de szerencsére csak időszakosan jelentkező gravitációs háttérzaj akadályozhatja meg. Naponta két alkalommal jelentkezik a Hold erős dinamikus zavaró hatása (hozzávetőlegesen Hold kelte és nyugta idején). A Hold zavaró hatása jelentősen csökkenthető az inga lengési síkjának észak-dél irányú beállításával.

A legerősebb dinamikus gravitációs zavarokat a közeledő, illetve távolodó légköri frontok jelentik, amelyek órákon keresztül többszörösére növelik az inga alapzaj amplitúdóját. Természetesen nagy alapzaj esetén a gravitációs méréseket nem lehet elvégezni.

9. Összefoglaló értékelés

A *dinamikus gravitáció vizsgálatára*, illetve korlátozott pontosságú, *relatív mérésére* tervezett és kivitelezett fizikai inga beváltotta a hozzáfűzött reményeket. Az újszerű megoldású gravitációs inga meglepően jó jel/zaj viszonya lehetővé teszi az egyenlő, illetve közel egyenlő tömegű testek dinamikus kölcsönhatásának kellő pontosságú kimérését. A gravitációs mérések időtartamai az inga tipikusan alkalmazott egy perces lengésideje miatt lényegesen lerövidülnek, összehasonlítva a torziós ingával végzett mérések időtartamával.

A fizikai inga hátránya a viszonylag alacsony érzékenysége, ezért a gravitáció sztatikus mérésére nem alkalmas. Előnyei viszont a könnyű kezelhetősége, egyszerű beállíthatósága és viszonylag gyors mérési képessége. Ezek a tulajdonságai kiválóan alkalmassá teszik nemcsak kutatási, de oktatási célokra is. A javasolt gravitációs inga továbbfejlesztett változatai valószínűleg alkalmasak lesznek akár abszolút G mérésekre is, de ehhez feltétlenül szükségesek a különlegesen stabil klíma feltételek és a lehető legalacsonyabb háttérzaj biztosítása. Tapasztalataink és elméleti megfontolásaink szerint azonban az alapzaj lényeges csökkentésére nincs igazán komoly lehetőség. A jel/zaj viszony további javításának egyetlen járható útja az inga tömegének, és ezzel méretének további növelése. A gravitációs inga jelenleg megvalósított formájában elsősorban összehasonlító (relatív) mérések elvégzésére alkalmas.

Köszönetnyilvánítás

A cikkben ismertetett gravitációs inga és a hozzákapcsolódó méréstechnika a *Paksi Energetikai Szakképzési Intézet* támogatásával és közreműködésével valósult meg. Köszönettel tartozunk az Intézet vezetőinek, dr. Petz Ernő professzor úrnak és dr. Gálos István igazgató úrnak, valamint az inga tervezését és gyártását irányító Tanka János és Kónya János uraknak.

Hivatkozások

- 1.1. Cavendish, H., Experiments to Determine the Density of the Earth.
Philos.Trans.R.Soc.London **88**, 469-526 (1798)
- 1.2. Müller, G., Zürn, W., Lindner, K. & Rösch, A., Search for non Newtonian gravitation - a gravimetric experiment in a hydroelectric lake.
Geophys. J. Int., **101**, 329-344 (1990)
- 1.3. B.Huber, A.Cornaz & W.Kündig, (Univ. Zürich) beszámolója az Európai Geofizikai Társaság kongresszusán (Hamburg, 1995 április 3-7).

- 1.4. Stacey, F.D., Tuck, G.J., Moore, G.I., Holding, S.C., Goodwin, B.D. & Zhon,R.K.,
Geophysics and the law of gravity. *Rev. Mod. Physics.* **59**, (1), 157-174 (1987)
- 1.5. Cohen E.R. & Taylor B.N., The 1986 adjustment of the fundamental physical constants.
CODATA Bulletin, **63**, (12), (1986)
- 1.6. Cohen E.R. & Taylor B.N., The fundamental physical constants.
Phys.Today, **40**, BG11-BG15, (1987)
- 2.1. Kuroda, K., (University of Tokyo) *Phys. Rev. Lett.* **75**, 2796-2798 (1995)
- 2.2. Maddox, J., Systematic errors in "Big G"? *Nature* **377**, 573 (1995)
- 2.3. Gillies, G.T., Torsion balances, torsion pendulums, and related devices.
Rev.Sci.Instrum. **64**, (2), 283-309 (1993)
- 4.1. Fitzgerald, M.P. et al, *Metrologia* **31**, 301-310 (1994)
- 4.2. Fitzgerald, M.P., *Bull.Am.Phys.Soc.* **40**, 408 (1995a)
- 4.3. Fitzgerald, M.P., *Bull.Am.Phys.Soc.* **40**, 975 (1995b)
- 4.4. Boyes, C.V., *Philos.Trans.Roy.Soc. London Ser.A* **1**, 1 (1895)
- 4.5. Luther, G.G. & Towler, W.R., Redetermination of the Newtonian gravitational constant.
G. Phys. Rev. Letter. B. **48**, 121-123 (1982)
- 5.1. Facy, L. & Pontikis, C., Détermination de la constante de gravitation par la méthode de
résonance. *C. R. Acad. Sci.*, **272**, 1397-1398 (1971)