

# GRADIOMETRIA, AVAGY A NEHÉZSÉGI TÉRERŐSSÉG GRADIENSÉNEK MÉRÉSTANA: MÚLT, JELEN, JÖVŐ

## GRADIOMETRY, OR THE MEASUREMENT OF GRAVITY GRADIENTS: PAST, PRESENT, AND FUTURE

Földváry Lóránt<sup>1</sup>, Tóth Sándor<sup>2</sup>, Fortágh József<sup>3</sup>, Domokos Péter<sup>4</sup>

<sup>1</sup>az MTA doktora, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Általános- és Felsőgeodézia Tanszék, Budapest  
foldvary.lorant@emk.bme.hu

<sup>2</sup>doktorandusz, Lechner Tudásközpont Koszmikus Geodéziai Observatórium, Pénc;  
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Általános- és Felsőgeodézia Tanszék, Budapest  
toth.sandor@emk.bme.hu

<sup>3</sup>Dr. rer. nat., Tübingeni Egyetem Fizikai Intézet, Tübingen, Németország  
fortagh@uni-tuebingen.de

<sup>4</sup>az MTA rendes tagja, HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Szilárdtest-fizikai és Optikai Intézet, Budapest  
domokos.peter@wigner.hu

### ÖSSZEFOGLALÁS

Az Eötvös-inga a maga korában forradalmi újításnak számított. Ez volt az első olyan eszköz, amellyel a nehézségi térerősség térbeli megváltozását lehetett meghatározni. A gyakorlat számára egy olyan új műszert jelentett, amely a nem látható, akár felszín alatti tömegeloszlás meghatározására is alkalmas, lehetővé téve a felszín alatti geológiai szerkezetek kimutatását, a fúrás nélküli nyersanyagkutató és térképezést. Hasonló mérési elven működött a 2009–2013 között méréseket végző GOCE-műhold. A GOCE mérései – kiváló térbeli felbontásukkal – a globális nehézségi erőter mai legrészletesebb modelljeinek alapját adják. Napjainkban, a klasszikus műholdas gravimetria korszakának alkonyán, a jövőbeli műholdas gravimetriai elképzelések között komoly jelöltnek számít az atom-interferométereken alapuló gradiometria. Jelen cikkünkben a gradiometria három főbb állomását: múltját (az Eötvös-ingát), jelenét (a GOCE-úrgradiométert) és jövőjét (az atom-interferometriai gradiométert) tekintjük át.

### ABSTRACT

In its day, the Eötvös torsion balance was a revolutionary innovation. It was the first instrument to measure spatial variations in gravity. For practitioners, it was a new tool for determining the invisible, underground mass distribution, enabling the mapping of subsurface geological structures and thus providing a mapping tool for resource exploration without drilling. The GOCE satellite, which took measurements between 2009 and 2013, used a similar measurement principle. GOCE measurements, with their excellent spatial resolution, form the basis of the most detailed models of the global gravity field available to date. Today, in the twilight of the

classical era of satellite gravimetry, cold-atom interferometry is a serious candidate for future satellite gravimetric concepts. In this paper, we review the three main stages of gradiometry: its past (the Eötvös torsion balance), its present (the GOCE space gradiometer), and its future (the cold-atom interferometric gradiometer).

**Kulcsszavak:** gradiometria, Eötvös-inga, GOCE-műhold, ultrahideg atom interferometria, CAI-gradiometria

**Keywords:** gradiometry, Eötvös torsion balance, GOCE satellite, Cold Atom Interferometry, CAI-gradiometry

## BEVEZETÉS

A földi nehézségi erőter ismeretének jelentőségét talán nem is kell hangsúlyozni: életünk, a Földhöz „kötött”, alapvető élettani felépítésünk a földfelszíni nehézségi erő nagyságához igazodik, élettani folyamataink a nehézségi erő által kijelölt függőleges és vízszintes irányok mentén történnek. Mindazonáltal a nehézségi térerősség nagyon pontos ismerete, a térerősség térbeli és időbeli változásának feltérképezése a mérnöktudományok és a geofizika számára igen hasznos információkat szolgáltatnak.

Mivel a Föld tömegeloszlása nem homogén, értelemszerűen annak nehézségi erőtere sem szabályos geometriailag; a tér különböző irányjaiban (általános esetben) a nehézségi térerősségnek mind a nagysága, mind az iránya változik. Ez viszont egy eszközt is biztosít a földtudományok számára, hiszen ezt a kapcsolatot megfordítva a nehézségi térerősség térbeli változásából a Föld tömegeloszlására lehet következtetni. A nehézségi térerősség (vagy az azzal analóg nehézségi gyorsulás) hosszegységre eső térbeli változása, azaz a tér egyes irányai szerinti első deriváltja adja a nehézségi gyorsulás gradiensét. Mivel a nehézségi gyorsulás vektora a nehézségi potenciál megváltozásának irányát és mértékét mutatja, a nehézségi gyorsulás a potenciál gradiense,  $g = grad(W) = \left[ \frac{\partial W}{\partial x} \quad \frac{\partial W}{\partial y} \quad \frac{\partial W}{\partial z} \right]$ , így a nehézségi gyorsulás gradiensei egyben a nehézségi erőter potenciáljának második deriváltjai is, amelyeket az Eötvös-tenzor foglal össze:

$$W_{ij} = grad(g) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial z} \\ \frac{\partial^2 W}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} & \frac{\partial^2 W}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial^2 W}{\partial z \partial x} & \frac{\partial^2 W}{\partial z \partial y} & \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \end{bmatrix}$$

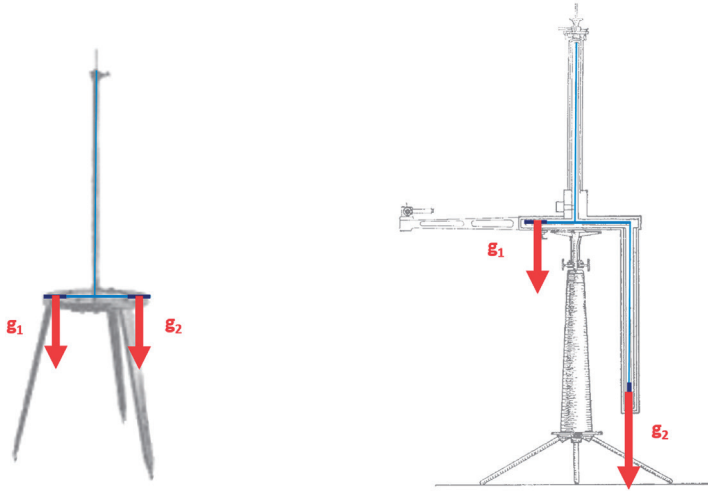
A szakzsargon az Eötvös-tenzor elemeit, a „nehézségi gyorsulás gradienseit”, azaz a  $W_{ij}$  értékeit egyszerűen „gradiens” névvel illeti. Az Eötvös-tenzorban szereplő 9 gradiens közül csak 6 független, mivel a parciális deriválás sorrendje felcserélhető, így minden  $i = x, y, z$  és  $j = x, y, z$  lehetséges kombinációja esetén az  $i \neq j$  feltétel mellett fennáll, hogy  $\frac{\partial^2 W}{\partial i \partial j} = \frac{\partial^2 W}{\partial j \partial i}$ .

Gradiometriának a gradiensek mérésének nevezik, amelyet Eötvös Loránd munkássága indított útjára. Eötvös életművének jelentőségét e téren az adja, hogy különböző típusú ingákat fejlesztett és próbált ki a gyakorlatban, megmérve a gradiensek értékeit. Úttörő kísérleteinek elismeréseként a nehézségi gyorsulás gradiensének mértékegységét Eötvösről nevezték el, ez az 1 Eötvös, rövidítve 1 E, ami az SI-egység egymilliárdod része, azaz  $1 E = 10^{-9} \text{ s}^{-2}$ . Jelen tanulmányban a gradiometria történeti fejlődésének ívét tekintjük át, követve a kronológiai sorrendet.

## A MÚLT

Eötvös Loránd érdeklődése az 1880-as években fordult a nehézségi erőter felé, legelőször is a Cavendish-kísérlet pontos reprodukálása foglalkoztatta. Ennek lényege a gravitációs állandó minél pontosabb meghatározása különböző tömegek közötti vonzás alapján. Mivel a gravitációs állandó akkoriban az egyik legkevésbé pontosan ismert fizikai állandó volt (ami egyébként mind a mai napig így van), ennek vizsgálata természetes célja volt kutatásainak. Eötvös eközben felismerte, hogy a Henry Cavendish által használt Coulomb-mérleg nemcsak a felfüggesztett tömegek és egy távolról közeledő próbatömeg közötti erők kimutatására képes, hanem a gravitációs mező maximális görbületének meghatározására is. Így fejlesztette ki első műszerét, a *görbületi variométert* (1. ábra, bal oldali kép).

A műszer lényegi eleme egy kb. 60 cm hosszú torziós szálon, arra merőlegesen felfüggesztett kb. 40 cm hosszú alumíniumrúd (amit ingakarnak nevezünk). A kar két végére két, egyenként 30 g tömegű platinahengert rögzítettek. A műszer ebben az elrendezésben a torziós szátra teljesen szimmetrikus, így, amennyiben ugyanakkora nehézségi erő hat a testekre, az inga nyugalomban marad. A nehézségi gyorsulás azonban térben változik, az eltérésnek (változásnak) az ingakar vízszintes síkjába eső összetevője az ingakart elfordítja, és forgási lengésbe hozza. Így az eszköz (a vízszintes síkban jelentkező érzékenysége révén) a szintfelület görbületi viszonyainak mérésére alkalmas, amely (az Eötvös-tenzor elemeivel kifejezve) az ún. horizontális gradiensekkel, a  $\frac{\partial^2 W}{\partial x^2}$ ,  $\frac{\partial^2 W}{\partial y^2}$  és  $\frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y}$  gradiensekkel mutat függvénykapcsolatot.



**1. ábra.** A görbületes variométer (balra) és a horizontális variométer (jobbra) működési sémája (a szerzők szerkesztése, szabadon használható fényképek felhasználásával)

Eötvös következő fejlesztése a *horizontális variométer*, mai nevén az Eötvös-inga volt, amelynek kialakítása során a görbületes variométer karján az egyik tömeget a másiknál alacsonyabba helyezte el (1. ábra, jobb oldali kép). Ezzel a mérés érzékenységét a vízszintes síkról kiterjesztette a térre, és az Eötvös-tenzor hat független eleméből háromnak, a  $\frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y}$ ,  $\frac{\partial^2 W}{\partial x \partial z}$ ,  $\frac{\partial^2 W}{\partial y \partial z}$  gradienseknek, illetve további kettő

különbségének (a  $\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 W}{\partial y^2}$  különbség) mérésére érzékeny műszert fejlesztett.

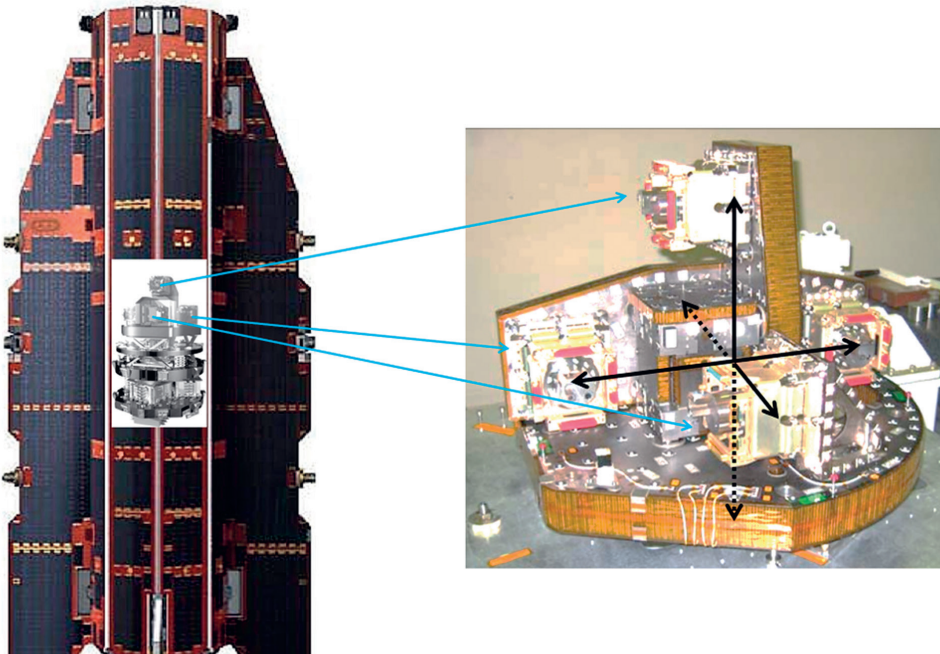
Ezen (viszonylag egyszerűnek tűnő) műszerfejlesztés jelentőségét a mérések értelmezéséhez, a nehézségi gradiensek meghatározásához szükséges elméleti háttér adja, amelyet az Eötvös által levezetett ingaegyenlet biztosít. Az Eötvös-inga a földtudományok első olyan eszköze lett, amely a nehézségi térerősség térbeli megváltozásának mérése révén a nem látható, akár felszín alatti tömegeloszlás meghatározását teszi lehetővé.

Ezáltal a műszer pusztán felszíni mérések alapján mélységi tömeganomáliák meghatározására, így fúrás nélküli nyersanyagkutatásra adott lehetőséget. Az Eötvös-inga az 1920-as évektől kezdődően forradalmasította a szénhidrogén-kutatást, és szerte a világon ismertté vált. A modern gyakorlati geofizika akkor született meg, amikor a feltérképezett gradiensekből felszín alatti geológiai szerkezeteket mutattak ki a mért fizikai tulajdonságok alapján. Ezzel az Eötvös-inga a világ első nyersanyagkutató geofizikai eszköze lett. (Az Eötvös-ingával kapcsolatban a tisztelt olvasó részletesen tájékozódhat Szabó Zoltán [1999], Völgyesi Lajos [2019] és Földváry Lóránt és szerzőtársai [2019] írásaiból.)

## A JELEN

Jelen alatt a napjainkban rendelkezésre álló, jelenleg elérhető, már bizonyítottan működő technológiákat értjük. Ez jelenthet egy piacon elterjedt mérőeszközt, de jelenthet olyan egyszeri és egyedi (például műholdas) megoldásokat is, amelyek mérési eredményei széles körben szabadon hozzáférhetőek, és a feldolgozás során bizonyították működőképességüket. Jelenleg terepi célra fejlesztett gradiométek nem terjedtek el, egy-egy kísérleti fejlesztésen kívül nem állnak rendelkezésre, így ezekkel most nem foglalkozunk. Sokkal inkább a GOCE-műhoddal, amely a műholdas gradiometria megvalósulását jelentette 2009–2013 között, és amelynek a mérései alapján meghatározott nehézségierőtér-modelleket mind a mai napig a legpontosabbak között tartják számon.

A GOCE-műhold méréseit a műhold tömegközéppontjában elhelyezett célirányos fedélzeti műszer, az űrgradiométer végezte. Az űrgradiométer három pár (tehát összesen hat) gyorsulásmérőt jelent, amelyeket a tömegközépponttól azonos távolságra (25 cm-re) három, egymásra merőleges térbeli irány mentén helyeztek el (2. ábra).



2. ábra. A GOCE-űrgradiométer: a GOCE-műhold tömegközéppontjától 25 cm-re, egymásra merőleges tengelyek mentén elhelyezett három pár gyorsulásmérő (a szerzők szerkesztése, szabadon használható fényképek felhasználásával)

A GOCE-úrgradiométer a nehézségi térerősség vektorának térbeli eltéréseit mérte, vagyis az Eötvös-inga által is szolgáltatott gradienseket. Valójában a teljes gradienstenzort, tehát annak valamennyi elemét mérte a GOCE, bár az egyik tengely irányában ez csak egy nagyságrenddel kisebb pontossággal volt technikailag megoldható.

A GOCE-műhold nagyon alacsony (220–270 km közötti) pályájának köszönhetően finom (pár 100 km-es) felbontásban ismertük meg a nehézségi erőteret. Ez hiánypótló eredmény, korábban műholdas mérésekből csak a durvább (1000 km-es léptékű), míg terepi mérésekből pedig csak a helyi (néhány 10 km-es kiterjedésű) formák voltak megbízhatóan megismerhetők. A GOCE segítségével viszont a nehézségi erőter közepes formái is ismertté váltak az egész Földre vonatkozóan.

A GOCE (a műholdas technológiák viszonylatában) kiemelkedően finom felbontásával lehetővé tette, hogy földfelszíni mérésekkel együttesen feldolgozva a nehézségi erőter egész Földet jól jellemző modelljét állítsák elő. A jelenlegi legkorszerűbb, globális nehézségierőter-modell, az EGM08 alapját a GOCE nehézségítérerősség-gradiensei adták. Ezeket nagyszámú terepi (földfelszíni) méréssel együttesen feldolgozva a nehézségi erőter néhány 10 m-es felbontású meghatározásra adtak lehetőséget (Pavlis et al., 2012).

Összefoglalásként megállapítható, hogy ahogy Eötvös Loránd korszakalkotó találmánya, az Eötvös-inga a maga idejében forradalmasította a nyersanyagkutatást, úgy napjainkban az ebből kifejlődött műholdas gravimetria rendkívül pontos mérései hasonlóan fontos szerepet játszanak a földtudományokban, hozzásegítve a kutatókat a Földünk felszínén és belsejében zajló folyamatok egyre jobb megismeréséhez. (A GOCE-műholdról további ismeretek találhatók magyarul Reiner Rummel [2002] és Földváry Lóránt és szerzőtársai [2015] munkáiban.)

## A JÖVŐ

Napjainkban, az ürtevékenység korában, az aktív műholdak száma exponenciálisan emelkedik. A tudományos konszenzus szerint mintegy tíz éven belül megvalósítható egy következő generációs gravitációs műhold küldetése (Next Generation Gravity Mission, NGGM). Az NGGM tudományos célkitűzései az eddigi gravitációs műholdakon már bevált technológiákra alapozva, azok továbbfejlesztésével érhetők el. Ennek megfelelően egy GOCE-hoz hasonló, gravitációs gradiensek mérését végző jövőbeli műhold is a tervek között szerepel.

A transzformatív technológiák (TransTech) közül kiemelkedő eredmények várhatóak az ultrahideg atomi felhőkön végzett interferometriai mérések (Cold Atom Interferometry, CAI) alkalmazásával (Hauth et al., 2014). Az interferometriai méréseket az atomok hullámtulajdonsága alapozza meg. A jelenlegi mérés technikák „hideg”, néhány mikrokkelvin ( $1 \mu\text{K} = 10^{-6} \text{ K}$ ) hőmérsékletű felhőket alkalmaz-



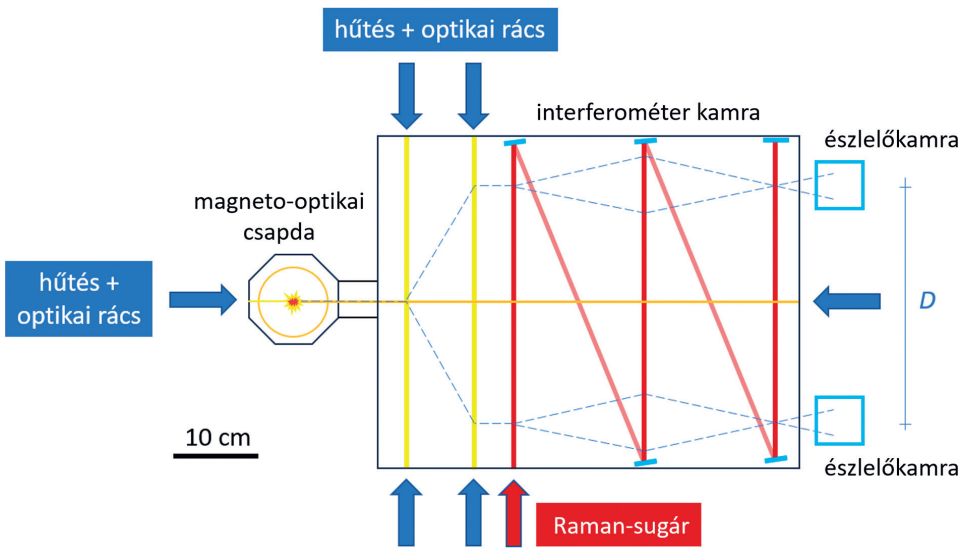
nak. A tipikusan  $10^3$ – $10^7$  atomot tartalmazó, vákuumban lézeres hűtés segítségével preparált mikroszkopikus méretű felhő a levegőnél 4–6 nagyságrenddel kisebb sűrűségű gáz. Néhány nagyságrenddel tovább hűtve, a nanokelvines ( $1 \text{ nK} = 10^{-9} \text{ K}$ ) tartományban az atomi hullámcsomagok már átlapolódnak (az atomi de Broglie-hullámhossz a hőmérséklet csökkentésével nagyobbra nő, mint az atomok közötti távolság), amely fázisátalakuláshoz vezet (Sörlei et al., 2005). Az átmenet során kialakuló kvantumgázban az atomok – ellentétben a klasszikus gázzal – megkülönböztethetetlenek, és közösen töltenek be egy makroszkopikus kvantumállapotot (egész spinű atomok esetén Bose–Einstein-kondenzátum, feles spinű atomok esetén Fermi-gáz). Kvantumos gázok interferométerekben további előnyöket nyújthatnak (Gaaloul et al., 2014).

A CAI-technológiától a műholdas gravimetriában is átütő eredményeket várhatunk. Egyelőre azonban ennek eléréséhez számos technológiai kihívást kell megoldani. Kihívás az ultrahideg atomok preparációjához és manipulációjához szükséges lézeres technikák kompakt, az űrtechnikával kompatibilis megvalósítása. Ennek jegyében, amolyan köztes lépcsőfok gyanánt, egy CAI-technológiát fedélzetén működtető, tudományos célú műholdat tervez megvalósítani az Európai Űrügynökség (European Space Agency, ESA), amelynek célja a CAI-alapú gravitációs érzékelők űrbeli megvalósíthatóságának és alkalmazhatóságának vizsgálata, az elméleti lehetőségek gyakorlatba ültethetőségének bizonyítása. Erre a jövőbeli műholdra Quantum Pathfinder Mission munkanéven hivatkoznak, és a jelen tervek szerint 2025 és 2035 között szeretnék megvalósítani.

A Quantum Pathfinder Mission műhold tervezése során értelemszerűen a CAI-technológia eddigi, földi alkalmazásaiból, annak eredményeiből indulnak ki a fejlesztők. A CAI-technológia laboratóriumi körülmények között már jól bevált eszköze a tudományos kutatásoknak, sőt terepen használható eszközök is rendelkezésre állnak (Ménoret et al., 2018). Ugyanakkor az űrben való alkalmazás egészen más környezetet jelent. Mikrogravitációs környezetben fogják a méréseket elvégezni, ami a földfelszíni „nagy” térerősség mellett végzett mérésekhez képest sokkal kedvezőbb körülményeket jelent a műszer számára. A szimulációk szerint a mikrogravitációs környezetben várhatóan nagyságrendekkel növekszik a CAI-technológia érzékenysége, de ezt alátámasztani csak az űrben, egy erre a célra telepített eszközzel lehet (éppen ezt a célt hivatott beteljesíteni a Quantum Pathfinder Mission). A küldetés megvalósítására számos elképzelés született már, ezek közül talán a legkiemelkedőbb az európai (főleg német és francia) együttműködésben tervezett CARIOQA-projekt (Lévêque et al., 2023).

Ha a Quantum Pathfinder Mission sikerrel jár, és a CAI-technológia űrbeli alkalmazhatóságának validálása megtörténik, a tapasztalatok bedolgozásával megindulhat a következő generációs gravitációs műhold, az NGGM-konceptciók közül a legígéretesebb kidolgozása, pontos paraméterezése, a fejlesztések megkezdése. A jelöltek között található a CAI-gradiometria, tehát az atominterferomet-

ria-alapú gradienstér mérés műholdas megoldása, a GOCE mérési koncepciójának CAI-technológiai kivitelezése. Mint korábban láttuk, a GOCE-űrgradiométer a gyakorlatban differenciálisan, három egymásra merőleges kar mentén, ultraérzékeny elektrosztatikus gyorsulásmérőkkel végzett gyorsulásmérést jelent, amely mérések alapján az 5–100 mHz-es mérési sáv szélességben az Eötvös-tenzor valamennyi komponense  $10\text{--}20 \text{ mE} \cdot \text{H}^{-1/2}$  közötti érzékenységgel áll rendelkezésre. Ezen gradiensekből a geoidot 1–2 cm-es pontossággal, mintegy 100 km-es térbeli felbontással lehetett meghatározni.



3. ábra. A CAI-gradiométer egy lehetséges működési sémája (a szerzők szerkesztése)

A CAI-gradiométer két, térben elkülönített CAI-graviméter segítségével méri a gyorsuláskülönbséget; a gravitációs gradienst két, térben elkülönített, szabadésben lévő atomfelhő egyidejű gyorsulásméréséből kapjuk. Ez alapján számos elrendezés kialakítható; egy lehetséges sémát mutat a 3. ábra (EC-JRC, 2020 alapján). Az ábrán a vékony fekete vonalak jelölik a berendezést, a vákuumkamra mechanikai szerkezetét. Az atomi felhő preparációja lézeres hűtéssel egy magneto-optikai csapdában (MOT) történik. A MOT-ot követően további hűtési technikákat alkalmazva előáll az interferometriára alkalmas atomi felhő, amelyet egy mozgó optikai rács – mint futószalag – szállít az interferométer kamrájába. A kamra bemenetéhez érkező atomi felhőt lézeres impulzusok megosztják, és a két eredő atomi felhőt a gradiométer térben szeparált interferométereihez vezetik. Az atominterferométerek a 3. ábrán piros vonallal jelölt Raman-lézersugár



hullámcsomagosztó, valamint -rekombinálo hatása által valósulnak meg. Az interferométerek karjait a kék szaggatott vonalak jelzik. Az ábrán a méretek jellemzéséhez a deciméter hosszát jelölő egységet is megjelöltük.

Mindkét CAI-graviméter a Raman-lézersugarak iránya mentén fellépő,  $\alpha$  gyorsulás hatására a különböző gerjesztettségi állapotú atomok által bejárt útvonalak mentén fellépő  $\Phi = kaT^2$  mértékű fáziskülönbséget észleli, ahol  $T$  pedig a két egymást követő Raman-impulzus közötti szabad időfejlődés, más néven interrogációs idő. Két ilyen,  $D$  távolsággal egymástól elválasztott interferométerrel végzett differenciális gyorsulásmérés lehetővé teszi a gyorsuláskülönbség, azon keresztül pedig a  $W_D$  gradiens értékének a kinyerését a  $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = k(\alpha_1 - \alpha_2)T^2 = kW_DDT^2$  fáziseltolódás-különbségből, ahol  $\alpha_1$  és  $\alpha_2$  a hidegatom-felhők által a két CAI-graviméterben tapasztalt gyorsulások.

Összehasonlítva a CAI-gradiometriát a GOCE-úrgradiometriával, jelentős előnyt biztosít a CAI-gradiometriának a mérések zajának spektrális eloszlása. A GOCE-gradiensek ugyanis az elektrosztatikus gyorsulásmérők mérés technikai korlátai miatt rosszul teljesítettek az alacsony frekvenciákon. Az alacsony frekvenciájú zaj hatásának ellensúlyozására speciálisan kialakított dekorrelációs szűrőket kellett alkalmazni, ezekkel a GOCE-gradiométerek zajának mesterséges fehéritésére törekedtek. Ezzel szemben egy CAI-gradiométer méréseit eleve fehér zaj jellemzi, ennek megfelelően a gradienseket is a gravitációs tér meghatározása szempontjából valamennyi releváns frekvencián azonos mértékű zaj jellemzi, amivel várhatóan mintegy  $5 \text{ mE} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$  pontossággal lehet majd a gradienseket meghatározni.

A 3. ábrán látható, hogy a két CAI-graviméter számára ugyanaz a mag-neto-optikai csapda adja a hideg atomokat. Ugyanannak az atomoptikai eszköznek a használata a két hidegatom-felhő kezelésére biztosítja, hogy a két felhőben megjelenő azonos hatások kioltják egymást, és nem jelennek meg a mért gyorsuláskülönbség értékében; más szóval a gravitációs gradiométer lehetővé teszi a közös módusú zajforrások (pl. a tükör rezgései) nagyfokú kiszűrését, hibahatásának minimalizálását.

A jelenlegi földi CAI-gradiométerek érzékenysége legfeljebb néhány  $10 \text{ E} \times \text{Hz}^{-1/2}$ . Az érzékenység fokozásának egyik fő korlátja az atomok 1g környezetben történő szabadesése miatti korlátozott lekérdezési időtartam. Mikrogravitációs környezetben több nagyságrendnyi javulás várható, mivel az érzékenység a kölcsönhatási idő négyzetével változik. További javulást eredményez, ha a Raman-osztókat olyan fényimpulzus-sorozatokkal helyettesítjük, amelyek többszörös foton-visszaverődést eredményeznek, és így növelik az atomok útvonala közötti távolságot az interferométerben.

Érdeemes kiemelni, hogy az interrogációs idő növekedése azonnali hatással lehet a mérés ismétlési gyakoriságára. Kiszámítható, hogy egy tipikus interferométer-fázis-zaj (5 s interrogációs idő és 50 cm-es műszerbázis esetén) mrad/

lövés szinten a gravitációs gradiens érzékenységének  $mE/l$  lövés nagyságrendű megváltozását okozza. Az ilyen nagy „single-shoot” érzékenység kihasználásához nagy mérési sebességre van szükség. A műszer-geometria megváltoztatása nélkül ez úgy érhető el, hogy a hidegatom-felhők előállításának ciklusidejét lényegesen az interferométer interrogációs ideje alá csökkentve, egyszerre több atomi felhőt propagáltatunk az interferométerben. Ekkor nem a geometria által meghatározott interrogációs idő, hanem az atomi felhők beküldésének periódusa határozza meg a mérés gyakoriságát. A mintegy 1 s előállítási idő alacsony,  $mE \times Hz^{-1/2}$  nagyságrendű érzékenységet eredményezne. A nagy érzékenység mellett egy ilyen CAI-gradiométer kiváló hosszú távú stabilitást biztosítana. Ez utóbbi tulajdonsága a hullámfüggvény osztásához használt lézer frekvenciájának pontosságától függ, azzal szabályozható. Ezzel abszolút pontos mérések valósíthatók meg, kalibrálás nélkül. A stabil műszerjárás, annak a lézer-interferométer esetében ismert esetleges jellegének a hiánya azt is eredményezné, hogy a műszer zaja alacsony frekvenciákon (azaz 1 mHz alatt) is alacsony, ellentétben az elektrosztatikus gyorsulásmérőkkel, amelyeknél 10 mHz alatt a mérési zaj gyorsan növekszik.

Összességében, a műholdas gravimetria áthelyezése interferometriai alapokról atom-interferometriára önmagában is rengeteg előnnyel járna, ami differenciális elrendezés esetén, egy CAI-gradiometriai megoldás során még erősebben jelentkezik. Mindezek fényében komoly esély van arra, hogy a CAI-gradiometria egy jövőbeli NGGM-műhold fedélzetén meg is valósuljon.

## IRODALOM

- EC-JRC (2020): European Commission Joint Research Centre – Travagnin, Martino (ed.): *Cold Atom Interferometry for Earth Observation. Perspectives for Satellite-Based Quantum Gravimetry. (JRC technical Reports)* EUR 30371. Publications Office of the European Union, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/225071>
- Földváry Lóránt – Kiss János – Szarka László et al. (2019): Modern geodéziai-geofizikai eredmények Eötvös nyomán. In: Dobszay Tamás – Estók János – Gyáni Gábor et al. (szerk.): *Eötvös Loránd emlékalbum*. Budapest, Kossuth Kiadó, 67–75. ISBN 9789630999274, [http://real-eod.mtak.hu/8253/1/001-176\\_tordeltl\\_magyar.pdf](http://real-eod.mtak.hu/8253/1/001-176_tordeltl_magyar.pdf)
- Földváry Lóránt – Tóth Gyula – Kiss Annamária et al. (2015): GOCE műhold: Eötvös-inga mérések Föld körüli pályán. *Magyar Tudomány*, 176, 9, 1063–1070. <http://www.matud.iif.hu/2015/09/07.htm>
- Gaaloul, Naceur – Hartwig, Jonas – Schubert, Christian (2014): *Precision Interferometry with Bose-Einstein Condensates. Proceedings of the International School of Physics “Enrico Fermi”*. Vol. 188 on Atom Interferometry, 657–689. DOI: 10.3254/978-1-61499-448-0-657
- Hauth, Matthias – Freier, Christian – Schkolnik, Vladimir et al. (2014): *Atom Interferometry for Absolute Measurements of Local Gravity. Proceedings of the International School of Physics “Enrico Fermi”*. Vol. 188 on Atom Interferometry, 557–603. DOI: 10.3254/978-1-61499-448-0-557

- Lévêque, Thomas – Fallet, Christine – Lefebvre, Julien et al. (2023): CARIOQA: Definition of a Quantum Pathfinder Mission. Proceedings of International Conference on Space Optics (ICSO) 2022; 3–7 October 2022; Dubrovnik; Croatia. Volume 12777, 127773L. DOI: 10.48550/arXiv.2211.0121, <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2211/2211.01215.pdf>
- Ménoret, Vincent – Vermeulen, Pierre – Le Moigne, Nicolas et al. (2018): Gravity Measurements below  $10^{-9}$  g with a Transportable Absolute Quantum Gravimeter. *Scientific Reports*, 8, 12300. DOI: 10.1038/s41598-018-30608-1, <https://www.nature.com/articles/s41598-018-30608-1>
- Pavlis, Nikolaos K. – Holmes, Simon A. – Kenyon, Steve C. et al. (2012): The Development and Evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 117, 8916. DOI: 10.1029/2011JB008916, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2011JB008916>
- Rummel, Reiner (2002): Gravitációs gradiometria: Eötvös Lorántól a modern űrkorszakig. (ford. Bodoky Tamás) *Magyar Geofizika*, 43, 145–150. [https://epa.oszk.hu/03400/03436/00170/pdf/EPA03436\\_magyar\\_geofizika\\_2002\\_04\\_145-150.pdf](https://epa.oszk.hu/03400/03436/00170/pdf/EPA03436_magyar_geofizika_2002_04_145-150.pdf)
- Sörlei Zsuzsa – Bakos József – Demeter Gábor et al. (2005): Hideg atomok. *Magyar Tudomány*, 166, 12, 1544–1550. <http://www.matud.iif.hu/05dec/15.html>
- Szabó Zoltán (1999): Az Eötvös-inga históriája. *Magyar Geofizika*, 40, 1, 26–38. [https://epa.oszk.hu/03400/03436/00164/pdf/EPA03436\\_magyar\\_geofizika\\_1999\\_01\\_026-038.pdf](https://epa.oszk.hu/03400/03436/00164/pdf/EPA03436_magyar_geofizika_1999_01_026-038.pdf)
- Völgyesi Lajos (2019): Eötvös Loránd munkásságának geodéziai jelentősége. *Geodézia és Kartográfia*, 71, 5, 4–13. DOI: 10.30921/GK.71.2019.5.1, <https://edit.elte.hu/xmlui/handle/10831/44576>