Az Eötvös-kísérlet újramérése: pillanatnyi helyzet és további tervek

Tóth, Gy., Szondy, Gy., <u>Ván, P.</u>, Völgyesi, L., Barnaföldi, G., Deák, L., Égető, Cs., Fenyvesi, E., Gróf, Gy., Harangozó, P., Kiss, B., Lévai, P., Péter, G., Somlai, L.

Wigner Fizikai Kutatóközpont és BME, ...



Eötvös-Pekár-Fekete (1904-22)

Fischbach-Sudarsky-Szafer-Talmadge-Aronson, 1986



Alakerő? (2017)





Tóth, arXiv:1803.04720

Ekvivalencia elvek: gyenge, erős, stb...

Einstein eqvivalencia elv (EEP):

- Gyenge ekvivalencia elve (WEP) avagy a szabadesés univerzalitása (UFF): "súly" arányos a "tömeggel".
- 2 Erős ekvivalencia elve (SEP): ugyanez öngravitáló testeknél.
- 3 Lokális Lorentz inveriancia (LLI),
- Lokális helyzet invariancia (LPI).

Ha az Einstein ekvivalencia elv igaz, akkor a gravitáció elmélete alapulhat görbült téridőn.

Lásd: Will: Living Rev. Relativity, 2014

"Most of the ideas solving the big problems in physics predict effects that could show up in EP tests." (Adelberger)

Gyenge ekvivalencia elvének sérülése

Skalár, vektor kölcsönhatások, húrelmélet, extra dimenziók, szuperszimmetrikus elméletek, axionok, általánosított gravitáció (Horndeski, Brans-Dicke (?), Bekenstein-MOND, stb.), ...

$$m_S = m_T + \sum_A \frac{\eta^A E^A}{c^2}$$

 m_S a súlyos, passzív gravitáló tömeg, m_T tehetetlen tömeg E^A belső energia, az A kölcsönhatás mellett, η^A a csatolási állandó Pl. barionos kölcsönhatásra :

$$\mathcal{W}(r) = -G_{\infty} rac{m_1 m_2}{r} \left(1 + lpha e^{-rac{r}{\lambda}}
ight), \qquad lpha = -\xi_B \left(rac{B_1}{m_1}
ight) \left(rac{B_2}{m_2}
ight)$$

A konkrét elmélet megadja az értelmezést, gravitációt önmagát is beleértve. Célzott kísérletek.

Gyenge ekvivalencia helyzetkép 1

Egyre finomabb kísérletek szerint a gyenge ekvivalencia elv nem sérül.



6 / 53

Gyenge ekvivalencia helyzetkép 2



Franklin-Fischbach (2016), Adelberger et al. (2009).

Ötödik erő \neq módosul a gravitációs erőtörvény. Pl. MOND

- Vajon mit mért Eötvös Loránd? (Fishbach könyv, arXiv:1901.11163)
- Gradiens hatás?
- Kétséges kísérleti módszertan és dokumentáció (Dicke, Braginszkij)
- Saját kísérlet elméleti ötletekhez (extra dimenziók, termodinamika, qg, egzakt Földalak, ...)
- Működő érzékeny műszer és szakértelem
- Jánossy Földalatti Fizikai Laboratórium
- Eötvös-év minimális finanszírozás reménye
- Einstein-teleszkóp technológia

Remény: két nagyságrend javítás.

Horizontális variométer

Eötvös-inga: a nehézségi erőtér gradiensét méri.

Eötvös-tenzor:

$$W = -
abla^2 U = egin{pmatrix} W_{xx} & W_{xy} & W_{xz} \ W_{xy} & W_{yy} & W_{yz} \ W_{xz} & W_{yz} & W_{yz} \ \end{pmatrix}$$

Eötvös-képlet :

$$\phi - \phi_0 = \frac{K}{\tau} \left((W_{yy} - W_{xx}) \sin(2\alpha) + 2W_{xy} \cos(2\alpha) \right) - \frac{2mhl}{\tau} \left(W_{xz} \sin(\alpha) - 2W_{yz} \cos(\alpha) \right)$$



Levezetés: Cserti-Dávid, Fizikai Szemle, 2019. 7-8.

Az ekvivalenciaelvmérés

Mérési protokollok: Földre és Napra.



Földre: forgatás, tömegcsere. Napra: inga mozdulatlan, a Föld forog.



Két Eötvös-inga: AutERBal, kis eredeti Pekár



Az Eötvös-inga szerkezete



tükrök, torziós szál és alsó tömeg



A pontosság növelése, korszerűsítés

- Automatikus leolvasás: képelemzés, szögleolvasás
- Automatikus forgatás: léptetés, pontos pozícionálás
- Stabil csendes környezet: Jánossy Földalatti Fizikai Laboratórium
- Sok mérés, finomított kiértékelés (pl. csillapítás szimulációja, önkonzisztens egyenletmegoldás, stb...)



- az alakhatás kézben tartható, ha H²/12 R²/4 állandó
 az újramérés során ilyen próbatesteket használunk
- az alakhatás maga vizsgálható ettől eltérő, például hengeres próbatestekkel
- az újramérés során ezért meg kell határozni a gravitációs gradienst, majd korrigált illetve állandó keresztmetszetű mintákkal is méréseket kell végezni



Gravitációs gradiensek a Jánossy Földalatti Fizikai Laboratóriumban (JFFL)

- a laboratórium tömegmodelljéből számítottuk
- meg is mértük a helyszínen: U_{xz} = -15.2 E, U_{yz} = -14.4 E
- a g_{xzz} számított függőleges változás kicsi
- a mért g_{xzz} változás 0.051 nGal/cm²



Az újramérés jelenlegi helyzete

- kettős eredeti kis Pekár inga (Pekár-Eötvös G-2) telepítve lett a JFFL-ben
- az inga távoli elérése és vezérlése megoldott
- környezet megfigyelése folyamatos (hőmérséklet, légnyomás, talajrezgések)
- automatikus forgatás és irányba állítás működik
- a szöghelyzet automatikus, valós idejű észlelése (Renishaw kódgyűrű) megoldott, ennek bemérése folyamatban
- alapparaméterek (tájolás, mágneses tér, gravitációs gradiens) bemérve
- a skálaleolvasás és automatikus egyensúlyi helyzet meghatározás megoldott
- adatszervezés folyamatban



A mérés során tapasztalt problémák

- $\bullet\,$ az Eötvösék által elért pontosság az η ekvivalenciaparaméter meghatározásában 3 $\cdot\,10^{-9}$
- a kísérlet megismétlése várhatóan 1-2 nagyságrenddel pontosabb eredményeket hozhat, ha sikeresen kezelni tudjuk a következő problémákat:
 - a torziós szál ugrásszerű driftje
 - az inga érzékenysége a rezgésekre
 - légnyomás hatása
 - az ingakar szöghelyzetét és a nehézségi erőteret pontosan ismerni kell a Föld nehézségi erőterében végzett mérés során
 - az egyéb környezeti tényezőket kézben tudjuk tartani (csapadék tömeghatás, páratartalom, ...)

A torziós szál ugrásszerű driftje

- Ugrásokat csak hosszabb ideig terheletlen szálakkal figyeltünk meg
- A szál folyamatos terhelésével az ugrások szerencsére teljesen megszűntek



A torziós szál driftje és egy zavarba ejtő korreláció

 a kezdeti drift 0.01 osztás/óra, ami 1 nap után lineárissá válik és 0.005 osztás/óra (2 μrad/óra) vagy kisebb értékre csökken



 a drift levonása után a leolvasások a két ingán jellegzetes (anti)korrelációt mutatnak



Az Eötvös-ingával észlelt távoli földrengés

- M = 4.3 szerbiai sekély fészkű rengés 2018.12.23. 06:34.
- a JFFL-ben az ingával rögzített jel
- a Kövesligethy Radó Szeizmológiai Obszervatórium szeizmogramja



Az inga érzékenysége a befogási pont rezgéseire

- Speake és Gillies (1987), Karagioz et al. (1975)
- "súlyzóhatás": az inga egyszerű lengései átcsatolódhatnak a torziós lengésekre
- fizikai magyarázat: a mozgási energia minimális, ha a "súlyzó" iránya megegyezik az inga egyszerű lengéseihez tartozó forgástengellyel
- egyszerű Coulomb-inga torziós lengésének szimulációja a befogási pont 1 μ m amplitúdújú, 10 Hz-es regzése miatt:
- szabályos hibát okozhat az ekvivalenciamérésben



Operatív földrengés-előrejelzés torziós ingákkal?

• Tipikus GV jel regisztrátum a közeledő földrengés miatti szeizmikus tevékenység következtében (Volfson et al. 2011)



Operatív földrengés-előrejelzés torziós ingákkal?

- A gravitációs variométerek (GV) szeizmikus rezgésekre való érzékenységét szinte véletlenül fedezték fel a Szovjetúnióban az 1970-es években (Volfson et al. 2010)
- A gravitációs variométerek kitérését figyelték meg nagyon távoli jelforrásokra, jelemzően többször 10 órával a földrengések előtt (Kalinnikov et al., 1992)
- Az inga a maximálisan lehetséges rezonáns energiafelvételre törekszik a befogási pont váltakozó irányú vízszintes mozgása miatt (Kalinnikov, 1990).
- Az 1980-as évek végén 18 pár GV működött 7 szeizmikus állomáson Kazahsztánban és 15 éven át folyamatosan észlelt (Khaidarov et al., 2003)

Légnyomás változás

- A mérés helyszínén Bosch BME280 szenzorral mért légnyomás
- Egy közeli épület tetején levő meterorológiai állomással mért légnyomás
- A légnyomás-változások jól korrelálnak egymással



Ingakar szöghelyzet és légnyomás kapcsolata

- A sávszűrt (2 perc 60 perc) légnyomás jól korrelál az ingakarok szöghelyzetével - magyarázat az észlelt (anti)korrelációra
- a hatás erősen függ az ingakar azimutjától
- nyilvánvaló lehetőség a zaj csökkentésére



Adaptív zajszűrés légnyomás adatokkal

- alkalmazás: akusztikus jelek vagy LIGO mérések feldolgozása
- II. inga (Al tömeg) leolvasások (1 min decimált)
- referencia zaj: BME280 légnyomás adatok
- NLMS algoritmus (Normalized Adaptive Least Mean Squares)
- szűrt jel rms: eredeti jel kb. 20%-a



Ekvivalencia mérés a Nap gravitációs terében

valószínűleg Eötvös eredeti ötlete



Fig. 4.

eine nach oben gerichtete vertikale Kraft (Fig. 4)

$$-Z = f \frac{M}{D^3} \cos \zeta - C \cos \zeta + f M \frac{a}{D^3} \left(2 \cos^2 \zeta - \sin^2 \zeta \right)$$

Közölt eredményeik a Pt-Magnálium anyagpárra

Beiträge zum Gesetze der Proportionalität usw. 49

Wir haben dann aus den Beobachtungen der ersten Versuchsreihe: n'-n = -0.062.

Beobachtungen im Meridian sur Bestimmung der Differens (x - x') besüglich der Sonnenansiehung.

Als Grundlage dient Gleichung (12) und die ihr vorangehenden Betrachtungen. Benützen werden wir das einfache Schwerevariometer, für welches

$$\Sigma m_a l_a \varkappa_a - \Sigma m_b l_b \varkappa_b = M_a l_a (\varkappa_a - \varkappa_b),$$

gesetzt

$$\vartheta = \vartheta_0 - \frac{1}{r} \left(f_0 \; \frac{M}{D^2} \right) \; M_a \, l_a (\mathbf{x}_a - \mathbf{x}_b) \sin \zeta \sin d \, ,$$

für die Sonnenanziehung

$$f_0 \frac{M}{D^2} = 0,586$$

aus den Beobachtungen der zweiten Versuchsreihe:

$$n' - n = -0.046$$

Wollten wir unsere Berechnung auf eine einzige Versuchsreihe begründen, also die Formel (a) benützen, so ergebe sich

$$\varkappa_{\text{Magnalium}} - \varkappa_{\text{Pt}} = -0.018 \cdot 10^{-6}.$$

Mit Ausschluß jener störenden Einflüsse, welche Schwankungen von täglicher Periode bewirken, also mit Benutzung der Resultate beider Versuchsreihen und der Formel (b) erhalten wir aber richtiger

$$\varkappa_{\text{Magnalium}} - \varkappa_{\text{Pt}} = +0,006 \cdot 10^{-6}.$$

27 / 53

Forgatásos mérések nincsenek kiértékelve, az inga automatikus pozícionálása önmagában a motorral nem volt elég pontos. Renishaw kódgyűrű telepítése.

- az ingák felső tömegei minden esetben Au
- az I. inga alsó tömege minden esetben Au
- a II. inga alsó tömege Cu, majd Al
- az újramérés során használt próbatestek mentesek az alaktól függő szabályos hibától:

$$H^2/12 - R^2/4$$

értéke állandó mindegyik tömegre

• 7 napos mérések az I. inga É-i és D-i azimutba állításával

Ekvivalencia méréseink a Nap gravitációs terében

- Először Cu-Au anyagpáron vizsgáltuk
 - a Pekár inga felső tömegei mindkét ingában Au
 - 6.5 napig mérve a 0°-os azimutban (É) a Cu-Au tömegekkel
 - 13 napig mérve a 180°-os azimutban (D) a Cu-Au tömegekkel (adathiányok)



Ekvivalencia méréseink a Nap gravitációs terében

• Ezután Al-Au anyagpáron vizsgáltuk

- $\,$ o $\,$ 7 napig mérve 0°-os (É) azimutban az Al-Au tömegekkel
- 7 napig mérve 180°-os (D) azimutban az Al-Au tömegekkel
- parabolikus drift nélkül, 1 min decimálás
- NLMS adaptív szűrés légnyomás referencia jellel



Mérések feldolgozása

- Roll, Krotkov, Dicke (1964) számítási módszerével
 - a n leolvasásokra függvény illesztés legkisebb négyzetek módszerével a valódi helyi t napidő függvényében (t = 0 délben):

$$n(t) = S\sin(t) + C\cos(t) + k$$

• η számítható az S amplitúdóból



Napméréseink előzetes eredményei

- A becsült szórás 0.2 · 10⁻⁹ (az Au-Cu, Au-Al anyagpárokra kapott nemzérus értékekből)
 - légnyomás változás hatásának csökkentése: NLMS adaptív zajszűréssel

mérési időszak	anyag	η
05.15-05.20.	Cu	$0.002 \cdot 10^{-9}$
05.15-05.20.	Au	$0.012 \cdot 10^{-9}$
05.21-06.04.	Cu	$-0.076 \cdot 10^{-9}$
05.21-06.04.	Au	$0.015 \cdot 10^{-9}$
06.17-06.24.	Al	$0.174 \cdot 10^{-9}$
06.17-06.24.	Au	$-0.033 \cdot 10^{-9}$
06.26-07.03.	Al	$0.091 \cdot 10^{-9}$
06.26-07.03.	Au	$0.009 \cdot 10^{-9}$

- a környezeti hatások miatt jelentkező mérési zaj csökkentése (légnyomás, hőmérséklet, szeizmikus zajok, mágneses tér)
- ekvivalenciamérések a Föld nehézségi erőterében nagyobb a mérendő jel, de meg kell oldani a következőket:
 - az inga karjának folyamatos forgatása az É, K, D, Ny irányokba (próbamérések már történtek, feldolgozásuk folyamatban)
 - pontos forgatás és a szöghelyzet precíz meghatározása (~10 szögmásodperc, Renishaw kódgyűrűvel megoldható, az excentricitás ismeretében)
 - pontos (0.1 E) gravitációs gradiens értékek szükségesek (gondos méréssel megoldható)
- a szabályos hiba ellenőrzése nem optimális alakú próbatestekkel

Publikációk

- Völgyesi Lajos, Deák László, Égető Csaba, Fenyvesi Edit, Gróf Gyula, Kiss Bálint, Péter Gábor, Szondy György, Tóth Gyula, Ván Péter, Előkészületek az Eötvös-kísérlet újramérésére, Magyar Geofizika, 59/4, 165-179, 2018.
- Péter Gábor, Deák László, Gróf Gyula, Kiss Bálint, Szondy György, Tóth Gyula, Ván Péter, Völgyesi Lajos, Az Eötvös-Pekár-Fekete ekvivalencia-elv mérések megismétlése, *Fizikai Szemle*, 69/4, 111-116, 2019.
- Tóth Gyula, Az Eötvös-Pekár-Fekete ekvivalencia-mérések szabályos hibája, Fizikai Szemle, 69/5, 155-158, 2019.
- Tóth Gyula, Gravity gradient bias in the EPF experiment, arXiv:1803.04720.
- Tóth Gyula, Völgyesi Lajos, Szondy György, Péter Gábor, Kiss Bálint, Barnaföldi Gergely, Deák László, Égető Csaba, Fenyvesi Edit, Gróf Gyula, Somlai László, Harangozó Péter, Lévai Péter, Ván Péter, Remeasurement of the Eötvös-experiment, recent status and first results, *PoS*, 2019, accepted.
- Völgyesi Lajos, Szondy György, Tóth Gyula, Péter Gábor, Kiss Bálint, Barnaföldi Gergely, Deák László, Égető Csaba, Fenyvesi Edit, Gróf Gyula, Somlai László, Harangozó Péter, Lévai Péter, Ván Péter, Preparations for the remeasurement of the Eötvös-experiment, *PoS*, 2019, accepted.



Az Eötvös-kísérlet újramérésében résztvevők:



Võlgyesi Lajos

Szondy György

Tóth Gyula

Barnafoldi Gergely



Egyesült Nemzetek kulturális Szervezete

Eőtvös Loránd (1848-1919) fizikus, geofizikus és a felsöoktatás megújítójának 100. évfordulója Az UNESCO-vel közösen emlékezve



















Köszönöm a figyelmet!

Az Eötvös-inga (1896-1934)

- 1886 Coulomb-inga korszerűsítés: gravitációs sokszorozó
- 1889 első ekvivalencia mérések, fényképezés, automatizálás, tükör, szál öregítés
- 1891 súlyok szinteltolása: horizontális variométer
- Sághegyi mérés: számolható, anomália?
- 1902 Kettős inga: rövidebb, pontosabb mérés
- 1906 Budapest-Arad konferencia: állami támogatás
- 1906-09 EPF mérések, vízhűtés
- 1916-17 Egbell hitelesítés
- 1920-38 Texas, India, Venezuela, Perzsia,...
- 1934 Budafapuszta (Kondor: A másik szárnysegéd)



Az Eötvös-inga (1896-1934)

- 1886 Coulomb-inga korszerűsítés: gravitációs sokszorozó
- 1889 első ekvivalencia mérések, fényképezés, automatizálás, tükör, szál öregítés
- 1891 súlyok szinteltolása: horizontális variométer
- Sághegyi mérés: számolható, anomália?
- 1902 Kettős inga: rövidebb, pontosabb mérés
- 1906 Budapest-Arad konferencia: állami támogatás
- 1906-09 EPF mérések, vízhűtés
- 1916-17 Egbell hitelesítés
- 1920-38 Texas, India, Venezuela, Perzsia,...
- 1934 Budafapuszta (Kondor: A másik szárnysegéd)



A leolvasott szöghelyzetek frekvenciaanalízise

- parabolikus illesztés utáni maradékokat elemeztük
 - erős 3 órás összetevő hőmérsékleti hatás?
 - alacsony frekvenciás összetevők dominálnak



A leolvasott szöghelyzetek frekvenciaanalízise

- maradékok összegzett jelteljesítmény-spektruma
 - markáns jelösszetevők az 5 perc 3 órás periódusokban
 - \circ az inga csillapított torziós lengési sajátfrekvenciája pprox 30 perc



Légnyomás változása

- Légnyomás fél éves adatsor spektruma
- napos és félnapos légköri árapály összetevők látszanak
- jól egyeznek az elméleti amplitúdóval



Képfeldolgozás

- fekete-fehér képpé alakítás: Sauvola eljárása
- összefüggő képelemek keresése
- határoló téglalapok: skálaosztások, számjegyek
- határoló téglalapok egyesítése



Képfeldolgozás

- skálaosztások távolságának meghatározása
- skálaosztások sorszámozása
- 10-es osztások helyzetének meghatározása
- számjegyek felismerése tulajdonság-tér-beli távolságokból (hasonlósági mérték)
- képközépponti átlagos leolvasás számítása (szórás: 0.0025 div)



Adaptív zajszűrés

- Ismeretlen zajjal terhelt jel szűrése
- Ismert a referencia zajforrásból származó bemenet
- a jel és zaj nem korrelálnak egymással
- FIR (véges impulzusválaszú) szűrővel szűrt referencia zaj jól korrelál a zajjal
- alkalmazás: akusztikus jelek vagy LIGO mérések feldolgozása





Hőmérsékleti adatok

- a ingán elhelyezett érzékelők
- az emberi "beavatkozások" hőmérsékleti "ugrásokként" láthatók
- ullet a lassan változó rész amplitúdója $\pm 0.02^\circ {
 m C}$
- a digitalizáció hibája korlátozza a pontosságot



Hőmérsékleti adatok spektruma

• 24, 6 és 3 órás összetevők látszanak



Légnyomás hatása a torziós ingára

- Szélessávú gravitációs gradiométerek (WBG) a Tula-i Egyetemen (S.A. Shopin)
- az inhomogén gravitációs tér mérésére tervezték, az ingakar szöghelyzetének észlelése alapján



Figure 4. System case-screen: 1 – working volume of the case; 2 – fastening and regulation device of the torsion system; 3 – case cover; 4 – instrument basement; 5 – cover of the working window; 6 – duct; 7 – duct stand



РИС. 1. Крутильная система прибора ШГМ: О — точка поднеса крутильной система; 1 — нить поднеса; 2 — коромысло; 3 — груз сложной формы; 4 — груз-противовес

Légnyomás hatása a torziós ingára

- a WBG jel és az 1-50 mHz sávszűrt légnyomás változás
- erős korrelációt tapasztaltak a sávszűrt légnyomás változással (Shopin, 2014)
- feltevés: a torziós rendszerek a légnyomás változásának sávszűrőjeként működnek



Pontosságvizsgálat

- a szöghelyzeti hibákat AR(1)-folyamatokkal modelleztük 1 percenként 1-késéses autokovariancia 0.4-es értékével (dekorrelációs idő: 130 s) szórás: 0.0025 div
- idősor hossza: 6 nap
- különböző η ekvivalenciaparaméterekkel kapott becslések a jel 70-89%-át adják vissza :

•
$$\eta = 1 \cdot 10^{-9}$$
 - becsült: 0.89 $\cdot 10^{-9}$

•
$$\eta = 5 \cdot 10^{-10}$$
 - becsült: $4.2 \cdot 10^{-10}$

•
$$\eta = 1 \cdot 10^{-10}$$
 - becsült: 0.7 $\cdot 10^{-10}$



A tömegek kiszabadítása



SEP violations

Generalized gravitation, e.g. Horndeski, Brans-Dicke (?), MOND, ...

$$m_P = m_I + \eta_N E_g$$

It is WEP for self-gravitating bodies, so called Nordtvedt effect. m_P passive gravitational mass, m_I inertial gravitational mass.

 E_N is gravitational self-energy, η_N is the coupling constant. With PPN parameters:

$$\eta_N = 4\beta - \gamma - 3 - \frac{10}{3}\xi - \alpha_1 + \frac{2}{3}\alpha_2 - \frac{2}{3}\zeta_1 - \frac{1}{3}\zeta_2.$$

 γ , β , cuvature and superposition nonlinearity (Eddington-Robertson-Schiff); ξ preferred-location; $\alpha_{1,2,3}$ preferred-frame; α_3 , $\zeta_{1,...4}$ total momentum conservation.

MICROSCOPE



Platinum and titanium test masses. $\eta < 10^{-14}$.

Inga multipól nyomatékok és EPF eredmények

- az inga tömegeloszlását a q_{lm} multipól nyomatékok adják
 - a próbatest alakhatás fő része lineárisan függ a $\Delta q_{31}/q_{31}$ mintapárokként számított hányadosától
- nem látszik lineáris függés a 2. módszer eredményeiben, viszont összeegyeztethetők a lineáris függés modelljével a 3. módszer eredményei
 - részletek : Fizikai Szemle 2019/5, arXiv :1803.04720, EPJC (bírálat alatt)

