

Cserti József

**ELTE TTK
Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék
Budapest**



**Eötvöstől Einsteinig — a modern gravitációelmélet
kísérleti és elméleti alapjai, I. rész —
Eötvös Loránd és a gravitáció**

Az atomoktól a csillagokig, 2014. szeptember 11., ELTE TTK, Budapest



Eötvös Loránd

(1848-1919)

életrajza dióhéjban



Eötvös József (1813-1871)

író, politikus

Báró **Eötvös Loránd** 1848-ban született Vásárosnaményben.

Édesapja báró **Eötvös József** író, politikus, édesanyja **Barkóczi Rosty Ágnes**.

Középiskoláit 1857-től a pesti piaristáknál, illetve magántanulóként végezte.

1865-ben *érettségizik*, majd beiratkozott a *jogi* fakultásra, de *matematikát*, *ásvány-* és *kőzettant*, illetve *kémiát* is hallgatott.

1867 egyetemi tanulmányok Heidelbergben, tanárai: *Kirchhoff*, *Helmholtz* és *Bunsen*.

1870-ben *summa cum laude* **doktorált**.

1871 **magántanár** a budapesti bölcsészeti karon, és a következő évben **rendes tanár**.

1875 A budapesti egyetem *Elméleti Fizikai Tanszékének első vezető tanára*.

1878-ban pedig, Jedlik Ányos nyugalomba vonulása után, a *Kísérleti Fizikai Tanszék vezetője*.

1891-től a Budapesti Tudományegyetem rektora.

1873-ban a *Magyar Tudományos Akadémia levelező*, 1883-ban pedig *rendes tagja*.

1889 és 1905 között az **Akadémia elnöke** (16 éven át!).

1894. június 10. és 1895. január 15. között **vallás- és közoktatási miniszter** volt.

1891-ben többedmagával megalapította a *Mathematikai és Fizikai Társulatot* és

Mathematikai és Fizikai Lapok címen folyóiratot indít el.

Eötvös Loránd

(1848-1919)

a tudós, egyetemi oktató és közéleti ember

életkor	események
23	egyetemi magántanár
24	egyetemi rendes tanár
25	akadémiai levelező tag
35	akadémiai rendes tag
41	akadémia elnöke
43	az egyetem rektora
46	miniszter
47	újra tanít
57	visszavonul a közélettől az "ingákhoz".

Körmendi Alpár: *Eötvös gravitációs vizsgálatokhoz vezető útja*, Fizikai Szemle 1998/6. 183.o.

Tudományos eredmények:

Eötvös-törvény (kapillaritás)

Eötvös-inga (torziós inga)

A súlyos és tehetetlen tömeg ekvivalenciája

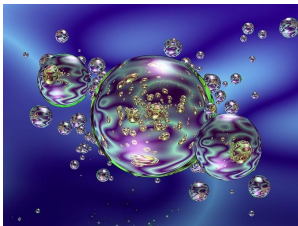
Eötvös-effektus (Atomcsill, **Tél Tamás** ELTE TTK, Elméleti Fizikai Tanszék:
*Vízáramlás és örvények az Egyenlítő két oldalán —
a Föld forgásának hatása kicsiben és nagyban*, Időpont: 2013. március 7.)

Eötvös kezdeti kutatási témája a *felületi feszültség*

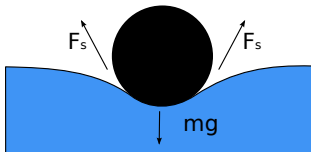
darázs a víz felületén



szappanbuborékok

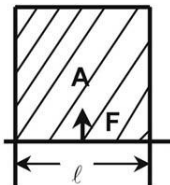


pénz úszik a vízben



szabandon
mozoghat

drótkeret



$$\gamma = \frac{F}{l}$$

felületi feszültség

A felületi feszültség hőmérsékletfüggése

Az Eötvös-szabály

felületi feszültség

Eötvös-állandó

$$\gamma V_m^{2/3} = k(T_k - T)$$

a folyadék moláris térfogata

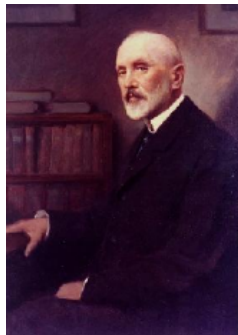
a folyadék kritikus hőmérséklete

hőmérséklet

The diagram shows the Eötvös equation: $\gamma V_m^{2/3} = k(T_k - T)$. Arrows point from text labels to the corresponding parts of the equation: 'felületi feszültség' points to γ ; 'a folyadék moláris térfogata' points to $V_m^{2/3}$; 'Eötvös-állandó' points to k ; 'a folyadék kritikus hőmérséklete' points to T_k ; and 'hőmérséklet' points to T .

A felületi feszültség lineárisan csökken a hőmérséklet növelésével.

Eötvös-féle torziós inga



Eötvös Loránd (1848-1919)

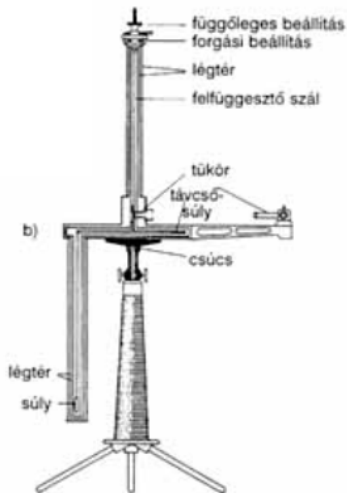
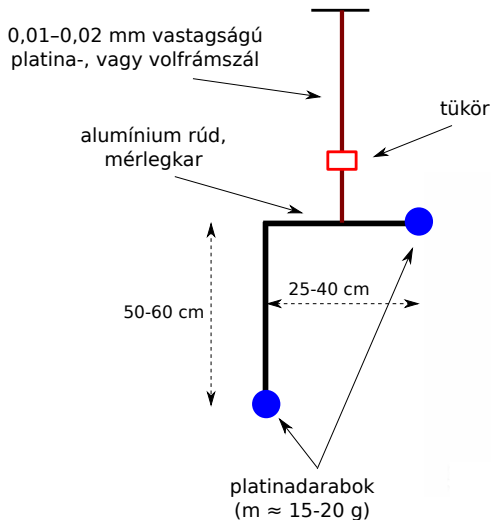
A **Cavendish**-féle torziós inga (1798)
javított változata

Eötvös jelentősen növelte az eszköz stabilitását és érzékenységét.

Zavaró hatások kiszűrése (mágneses és elektromos terek, felmelegedések, légáramlatok):
hármass falú fémszekrénybe zárta az ingát.

Az 1900-as párizsi világkiállításon díjat nyert.

Az Eötvös-féle torziós inga általános elrendezése „horizontális variométer”



Eötvös-féle torziós inga alkalmazásai

A gravitációs állandó meghatározása

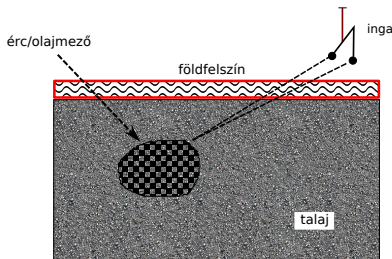
A g gravitációs gyorsulás helyi változásainak
rendkívül pontos mérése (az egyik súly lejjebb van)

A súlyos és a tehetetlen tömeg azonosságának kimutatása

A *gravitáció árnyékolhatatlansága* (változik-e az inga mozgása,
ha az egymást vonzó tárgyak közé egy harmadik testet teszünk).



Érc-, olajmező keresése az Eötvös-féle torziós ingával



Lehetőség nyílt a **nehézségi erőter** helyi változásának rendkívül **nagy pontosságú** mérésére.

Földtani kutatásokban a gravitációs gyorsulás egysége (Galilei tiszteletére):

$$1 \text{ gal} = 1 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$$

Tipikus mérési pontosság: $0,01 \text{ mgal} = 10^{-7} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Árapály okozta változások: $\sim 0,2 \text{ mgal}$

Nap gravitációs hatása: $\sim 0,05 \text{ mgal}$

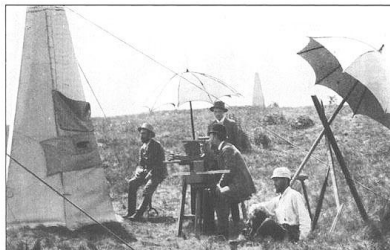
A nehézségi erőter hely szerinti változásának egysége

az **Eötvös**:

$$1 \text{ E} = 10^{-9} \text{ gal/cm} = 0,1 \text{ mgal/km}$$

A Föld felszínén a g változása $\sim 3000 \text{ E} = 0,3 \text{ mgal/m}$.

Az első kísérleti mérések az Eötvös-féle torziós ingával



Gravitációs mérés 1891-ben, Ság-hegy.

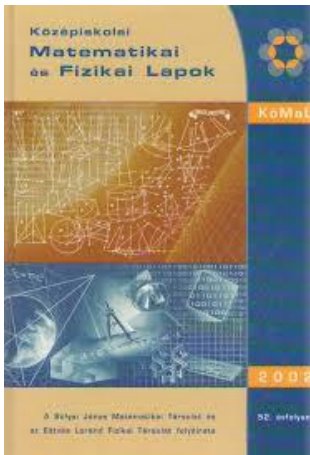
Az észlelő távcsőnél [Eötvös Loránd](#), mögötte [Tangl Károly](#) egyetemi hallgató, a földön [Kövesligethy Radó](#) csillagász ül, a széken [Bodola Lajos](#) geodéta (forrás: Meskó Attila: *Eötvös Loránd geofizikai vizsgálatai*, Természet Világa - 2006. I. különszám).

Az első kísérleti mérések: 1891-ben a [Ság-hegyen](#),
1901 és 1903 telén a [Balaton jegén](#).

Az 1920–30-as években, [Eötvös](#) és munkatársai ([Pekár Dezső](#), [Rybár István](#) és mások) az **Egyesült Államokban, Németországban, Iránban, Indiában**, stb. használták **földgáz-, olaj-, érc-, szénlelőhelyek** felkutatására.

A [dallasi Ewing Olajtársaság](#) (alapítva 1930-ban) is használhatta

Középiskolai Matematikai és Fizikai Lapok (KöMaL)



Arany Dániel úgy döntött, hogy egy középiskolásoknak szóló matematikai újságot alapít.

A lap első példánya **1894. január 1-én** jelent meg!

Azóta **matematikusok** és **más tudósok** **több generációja** csiszolta problémamegoldó képességét a KöMaL révén.

A fizika rovat jelenlegi szerkesztője: **Gnädig Péter**

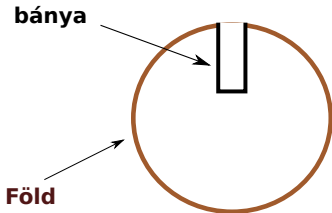
A **KöMaL Magyar Örökség Díjas** (2012. április 3.)
Hungarikum

Középiskolai Matematikai és Fizikai Lapok

(Kömal), 1975. év, 2. szám

1271. Hol nagyobb a nehézségi gyorsulás: a Föld felszínén, vagy egy mély bányákban? Számítsuk ki az eltérést egy 1000 m-es akna esetén! (A gömb alakúnak tekintett Föld átlagos sűrűsége $5,5 \text{ g/cm}^3$, a kéregé 3 g/cm^3 . A Föld forgását ne vegyük figyelembe.)

(Egyetemi versenyfeladat)* **BC**

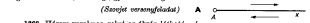


tes fogyasztót akarunk létezteni 24 V-os hálózatra, a teljes huzalhossz felhasználásával; Hogyan kell a kapcsolást összeállítani?

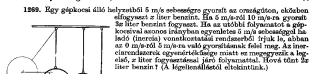
Közl: *Kepkovich László*

Kitűzött feladatok

1267. Az A pontban nyugvó test t ideig egyenletesen gyorsul a irányban, utána t_2 ideig állandósított irányú állandó gyorsulással mozog, s így újra az A pontba jut, de most már a sebessége v . Milyen maximális távolságra jutott el a test az A ponttól? Rajzoljuk meg az elmozdulás-, sebesség-, gyorsulás-idő grafikonokat!



1268. Hétfőn reggelünk polyó az ábrán látható módon, egyenlő tömegű és sűrűségű. A tömegközéppontja: $m_1, m_2, m_3 = 4:2:1$. Az m_1 tömegű golyót A magasságból elengedjük. Milyen magasságra fog emelkedni az m_2 tömegű golyó az ütközés után? (Az ütközések teljesen rugalmasak.)



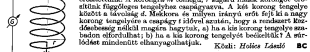
1269. Egy gépkocsi álló helyzetből 5 m/s^2 sebességgel gyorsul az országúton, aközben elfogyozik a liter benzint. Ha 0 m/s^2 -rd 10 m/s^2 -ra gyorsul 30 liter benzint fogyaszt. Ha az utóbbi folyamatot a gépkocsi acsoon irányban egyenesen 0 m/s^2 sebességgel haladó (inertis) vonatkoztatási rendszerből írjuk le, abban az 0 irányú 5 m/s^2 -ra való gyorsulásnak felel meg. Az inerciarendszerben egyenértékű egyenletrendszerrel megvizsgáljuk a helyzetet, s liter fogyasztással járó folyamatot. Hová tűnt az liter benzint? (A helytelenséget eltekintjük.)



1270. Hogyan barométerünk megváltozhat levegő került a Torricelli-érbe. Egy alacsonyabb barométer 730 mm -en állt, utána $730,5 \text{ mm}$ -re emelkedett. Azonban barométerünk is van, de a méréstőlja alább hullott, az vizorát tudjuk köln, hogy a méréstőlja a változástól határoson jobbra. A mérés forgó két sípósnak közt az utóbbi barométer 10 torr emelkedést jelezett. A légnyomás barométer jelzése az alábbi hányadosok felett 800 mm . Megállapítható-e ezekből az adatokból a légnyomás valódi értéke? Tudunk-e olyan szűkített köztöltésű légtérnyomásmérőket, amelyek a valódi légnyomást jelel? Egyenletes hőmérséklet mellett ez a szűkítés M lenne az alapvető hibája ennek a barométernek?

Közl: *Dr. Bercsényi András*

1271. Hol nagyobb a nehézségi gyorsulás: a Föld felszínén, vagy egy mély bányákban? Számítsuk ki az eltérést egy 1000 m-es akna esetén! (A gömb alakúnak tekintett Föld átlagos sűrűsége $5,5 \text{ g/cm}^3$, a kéregé 3 g/cm^3 . A Föld forgását ne vegyük figyelembe.)



1272. Az ábra szerinti csapágyasról M tömegű R sugarú homogén aranyozott lemez egyenletesen változó mértékben forogást szenved. A fogaskat csúján átvesztették, és a végére m_2 tömegű testet erősítettünk. A lemezre ráerősítettünk Q mennyiségű töltést, amitől a fogaskat függőleges tengelyhez csapágyává. A két korong tengelye között a távolság l . Mekkora se milyen irányú erő fejt ki a nagy korong tengelyére a csapágy l távolságán, hogy a rendszer kitérésbeesség nélkül magára hagyjuk, a) ha a kis korong tengelye szabadon elfordítható; b) ha a kis korong tengelyét becsúsztuk? A mérőket mindkét esetben elhanyagolhatjuk.

Közl: *Hollós László*

1273. Az ábrán látható szomszédos tekercsű tekercs körül Q szigetelt csapágyú fém A tekercs felületét hirtelen megmozdítva Q ballisztikus galvanométer áramkörébe mutat, amely a megadott t_0 -

* Az ELTE Fizikus Diákköre és az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Ifjúsági Szakcsoportja által rendezett problémamegoldó verseny, mai néven **Ortvay-verseny**, 1972.

Megoldás (Kömal, 1975/11. szám, 182-183. oldal)

A gravitációs gyorsulás a bányaknában

$$5,6 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}^2 = 56 \text{ mgal}$$

értékkel **nagyobb** a felszíni értékhez képest.

Ez **0,006 %**-os növekedés, és a mai eszközökkel már jól mérhető.

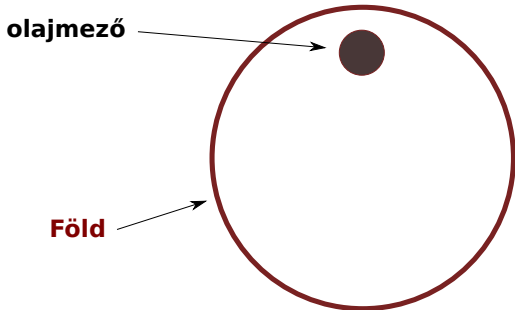
A növekedés abból származik, hogy bár kisebb tömeg vonzását kell figyelembe vennünk, de közelebb kerültünk a geometriai középponthoz.

Középiskolai Matematikai és Fizikai Lapok

(Kömal), 2007/4. szám, 251. oldal

3977. Mennyivel változtatja meg a gravitációs gyorsulás nagyságát a földkéregben lévő gömb alakú olajmező, ha a gömb sugara 10 km, a középpontja pedig 11 km mélyen van a Föld felszíne alatt? Számítsuk ki, hogy mennyi a változás a Föld felszínén pontosan az olajmező fölött, illetve ettől a ponttól 20 km távolságban!

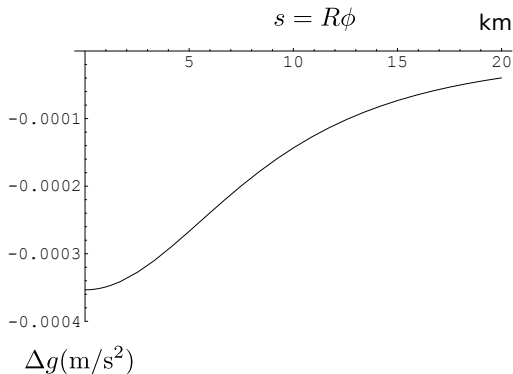
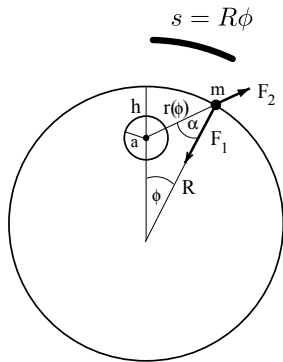
(Kitűző: Cserti József)



Megoldás (Kömal 2008/1. szám, 52-53. oldal)

Az olajmező fölött: $-0,01 \text{ m/s}^2 = 1 \text{ gal}$, azaz **1 ezreléssel kisebb**,

20 km távolságban: **0,1 ezreléssel kisebb** a gravitációs gyorsulás.



A tehetetlen és a gravitációs (súlyos) tömeg azonossága

A gyenge ekvivalenciaelv

1906-ban a göttingeni egyetem Benecke-féle pályázatának kiírása az alábbi célkitűzést tartalmazta:

"... vizsgáltsák meg részletesen a Newton-féle törvény a gravitáció és tehetetlenség arányosságáról".

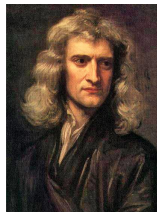
A pályázat elbírálására 1909-ben került sor.
A kiírásra egyetlen pályamunka érkezett, szerzői:

Eötvös Loránd, Pekár Dezső és Fekete Jenő.

Tartalma szerint pedig a kétfajta tömeg $1/200\,000\,000$ pontosságig mérve egyezik.

Gyenge ekvivalenciaelv: a gravitációs gyorsulás független az anyagi minőségtől

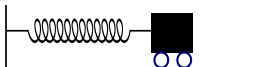
A tehetetlen tömeg Newton II. törvénye



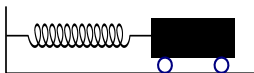
Sir Isaac **Newton**
(1642 - 1726)

Adott idő alatt (pl. 1 sec) milyen messzire gurul a két kiskocsi?
A rugók egyformán vannak összenyomva (azonos erő hat a kocsikra).

$$s = \frac{a}{2} t^2$$



etalon tömeg (pl. 1 kg)



a mérendő tömeg

$$F = ma$$

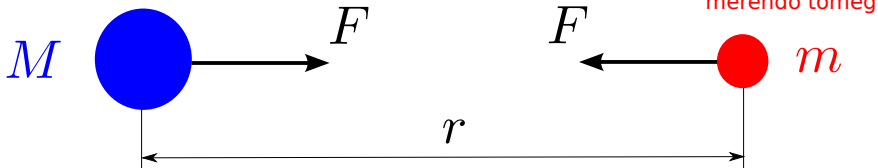
$$F = m_t a$$

tehetetlen tömeg

A súlyos tömeg Newton gravitációs törvénye

Két tömeg vonzza egymást:

etalon tömeg (pl. 1 kg)



A gravitációs erő nagysága:

súlyos tömeg

$$F = G \frac{m_s M}{r^2}$$

Gravitációs állandó

$$G = (6,67427 \pm 0,00067) \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$$

Newton II. törvénye és a gravitációs erő

Szabadesés

A test súlya, azaz a ráható gravitációs erő:

$$F = m_s g$$

Newton II. törvénye:

$$F = m_t a$$

$$m_s g = m_t a$$

$$a = \frac{m_s}{m_t} g$$

$$g \rightarrow g \frac{m_s}{m_t}$$

$$h = \frac{a}{2} t^2$$

$$t = \sqrt{\frac{2h}{a}} = \sqrt{\frac{2h}{g} \frac{m_t}{m_s}}$$



Galileo **Galilei**
(1564-1642)

Az Apollo-15 program

Három napos tartózkodás a Holdon

(1971. július 26- augusztus 7.)

Legénység: Dave Scott parancsnok, Al Worden és Jim Irwin

Cél: geológiai vizsgálatok, kőzetminták gyűjtése



balról jobbra: Scott, Worden, Irwin

A Galilei kísérlet modern változata:

Scott egy madártollat és egy kalapácsot ejtett le egy időben a Holdon.

A légkör hiánya miatt nincs légellenállás, ezért a két test egyszerre esett le a Hold felszínére.

Scott kísérletét televíziós kamera közvetítette.



<https://www.youtube.com/watch?v=MJyUDpm9Kvk>

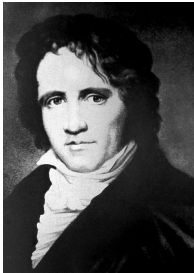
Newton II. törvénye és a gravitációs erő

Ingamozgás



$$g \rightarrow g \frac{m_s}{m_t}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \rightarrow 2\pi \sqrt{\frac{l}{g} \frac{m_t}{m_s}}$$



Friedrich Wilhelm **Bessel**
(1784 - 1846)

Német természettudós, csillagász, geodéta, matematikus, Carl Friedrich Gauss kortársa.

Inga-kísérletekkel megmutatta, hogy a **súlyos** és a **tehetetlen tömeg**

$$2 \cdot 10^{-5}$$

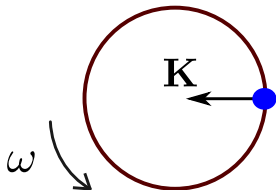
pontossággal **egyenlő**.

Forgó koordinátarendszer A centrifugális erő



körhinta

külső megfigyelő
rendszerében



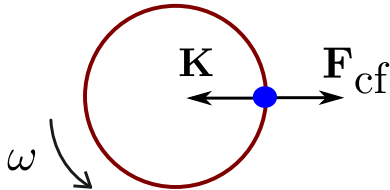
$$K = m_t a$$

$$a = \omega^2 r$$

K kötelerő,
valós erő

Newton II. törvénye

forgó koordinátarendszerben
(a körhintában)



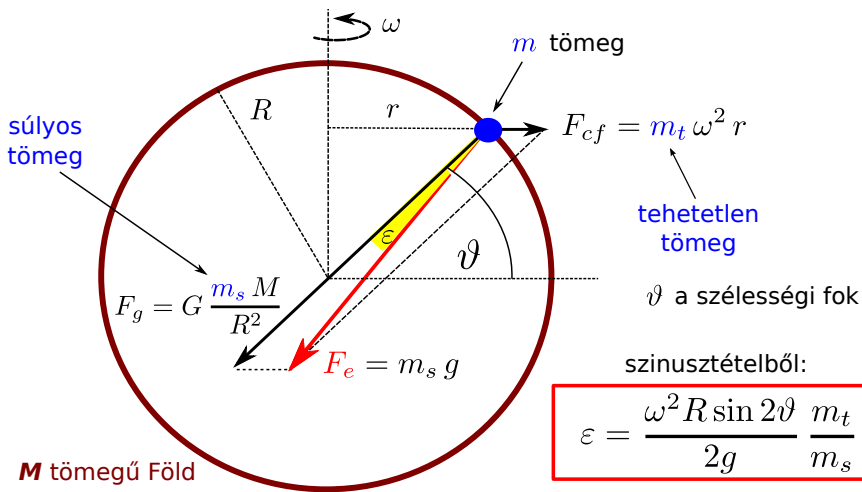
$$K = F_{cf}$$

$$F_{cf} = m_t \omega^2 r$$

A forgó koordinátarendszerben be kell vezetni egy **fiktív erőt**:

F_{cf} **centrifugális erő**

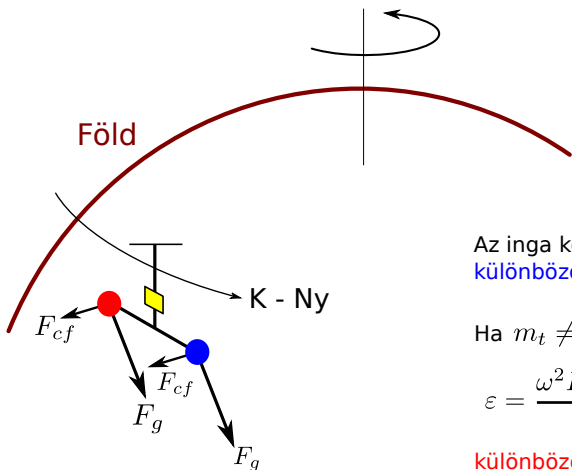
A testek súlya a Földön



$$\varepsilon \approx 6' = 0,1^\circ \text{ Budapesten}$$

A Földön a testek súlya a **gravitációs** és a **centrifugális erő** eredője.

Az Eötvös-ingára ható erők a forgó Földön



Az inga két végére **azonos** tömegű, de **különböző anyagú** testeket helyezünk.

Ha $m_t \neq m_s$, akkor

$$\varepsilon = \frac{\omega^2 R \sin 2\vartheta}{2g} \frac{m_t}{m_s}$$

különböző lesz a két testre.

A két testre ható F_e eredő erő **nem lesz párhuzamos**.

A torziós szál a tükörrel együtt **elfordul**. **Az ingára forgatónyomaték hat.**

Az ingára ható forgatónyomaték és a két eredő erő közti szög

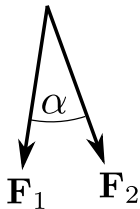
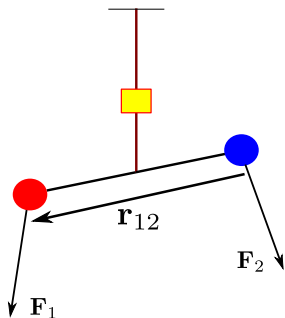
A torziós szál irányában mutató forgatónyomaték nagysága:

$$M = \frac{\mathbf{r}_{12} \cdot (\mathbf{F}_1 \times \mathbf{F}_2)}{|\mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2|}$$

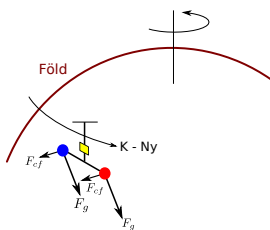
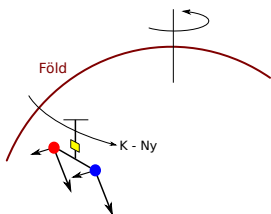


$$M \sim \left| \frac{m_{1t}}{m_{1s}} - \frac{m_{2t}}{m_{2s}} \right|$$

$$\alpha = \frac{1}{600} \sin 2\vartheta \left| \frac{m_{1t}}{m_{1s}} - \frac{m_{2t}}{m_{2s}} \right|$$



A mérés pontossága (Eötvös-paraméter)



$$\eta = \frac{|g_1 - g_2|}{(g_1 + g_2)/2}$$



$$\eta = 2 \frac{\left| \frac{m_{1t}}{m_{1s}} - \frac{m_{2t}}{m_{2s}} \right|}{\frac{m_{1t}}{m_{1s}} + \frac{m_{2t}}{m_{2s}}}$$

év	kísérlet	módszer	vizsgált anyag	η
1686	Newton	inga	különféle	10^{-3}
1832	Bessel	inga	különféle	10^{-5}
1922	Eötvös, Pekár és Fekete	torziós inga	különféle	$2 \cdot 10^{-9}$
1935	Renner	torziós inga	különféle	$2 \cdot 10^{-9}$

Dicke mérései az ekvivalenciaelv igazolására (1964)

A Föld helyett a **Nap** gravitációs vonzásából adódó gyorsulások különbségét mérték. A torziós szál elfordulásának szöge időben **szinuszgörbeszerű** 24 órás periódussal.



Roll, Peter G.; Krotkov, Robert; Dicke, Robert H.: *The equivalence of inertial and passive gravitational mass*, Annals of Physics, Vol. 26, pp. 442-517 (1964).

Egy a pisai ferde torony magasságú vákuumcsőben való ejtéssel, a másodpercet 10^{-8} pontossággal kellene mérni.

év	kísélet	módszer	vizsgált anyag	η
1686	Newton	inga	különféle	10^{-3}
1832	Bessel	inga	különféle	10^{-5}
1922	Eötvös, Pekár és Fekete	torziós inga	különféle	$2 \cdot 10^{-9}$
1935	Renner	torziós inga	különféle	$2 \cdot 10^{-9}$
1964	Roll, Krotkov és Dicke	torziós inga	Au és Al	10^{-11}
1972	Bringinszkij és Panov	torziós inga	Pt és Al	10^{-12}

Miért fontos a mérések pontosságának növelése?

1 kilogramm **rézgolyó** 560,0 g neutron, 451,2 g protont és 0,24 g elektront tartalmaz.
1 kilogramm **ólom** esetén ugyanezek az adatok: 619,0; 393,0; 0,21.

Ha a gravitáció **csak a neutronra** hatna, ez olyan különbséget okozna, hogy ezt már **Galileinek** észre kellett volna vennie.

Ha a gravitáció a **magerőkkel** és a **barionszámmal** (neutron+protonok száma) lenne valamilyen kapcsolatban, annak kimutatására már **Bessel** mérési pontossága szükséges.

Ha azt akarjuk eldönteni, hogy az **elektronnak** is van-e súlya, akkor már **Eötvös** pontossága kell.

Simonyi Károly: *A magyarországi fizika kultúrtörténete* c. tanulmányából (Természet Világa különszáma, 2001.)

Erős ekvivalenciaelv: a súlyos és tehetetlen tömeg arányosságának elve **érvényes a gravitációs kötési energiára is.**

$$E = mc^2$$

A G gravitációs állandó az Univerzumban **mindenhol ugyanakkora.**

Az ekvivalenciaelv **érvényes az antirészecskékre is** (pl. pozitron, antiproton, antineutron, ...).

Az ötödik erő hipotézise

A négy alapvető kölcsönhatás:

az **erős**, a **gyenge**, az **elektromágneses** és a **gravitációs** kölcsönhatás

Eötvös-Pekár-Fekete kísérletek reneszánsza:

Fischbach és munkatársai cikke az "ötödik erő" hipotéziséről (1986)*

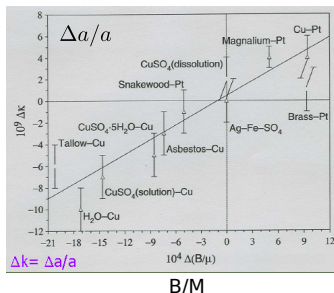
Eötvösök méréseiben használt anyagpárok:

1. faggyú - Cu; 2. víz - Cu; 3. CuSO₄ oldat - Cu;
4. CuSO₄ kristályok - Cu; 5. azbeszt - Cu;
6. fa - Pt; 7. ezüstsulfát + vassulfát (reakció előtt és után);
8. magnalium - Pt; 9. Cu - Pt.

Eötvösök adatai Fischbach szerint

B/M függvényében **lineáris** függést mutatnak, ahol

B a **barionszám** = a neutronok + protonok száma
és $M = m/m_H$ ← a hidrogén atom tömege.



Intenzív kutatás kezdődött (talán száznál is több kísérlet) az ötödik erő kimutatására, de ezek végül **negatív** eredménnyel zárultak.

NINCS ötödik erő !

* E. Fischbach et al., Reanalysis of the Eötvös Experiment, Phys. Rev. Lett. 56, 3 (1986).

Király Péter: Az "ötödik erő" és az Eötvös mérés, Természet Világa, 5,154, 1987

Király Péter: A 100 éves Eötvös-Pekár-Fekete kísérletek és máig tartó hatásuk, Fizikai Szemle 2007/1. 1.0

Eöt-Wash csoport

<http://www.npl.washington.edu/eotwash/>

Center for Experimental Nuclear Physics and Astrophysics, University of Washington, Seattle, USA

Torziós-ingával különböző anyagoknak a Föld, a Nap és a Tejút közepe felé történő gyorsulását mérik.

A torziós szál 1.07 m hosszú, 20 μm vastag wolframszál.

Mágneses árnyékolás Ni-Fe ötvözzel (mu-metal)

$B \sim 2,5 \mu\text{Tesla}$ (a Föld tere 25 - 65 μTesla).

A hőmérséklet helyfüggése $\sim 44 \text{ mK/m}$

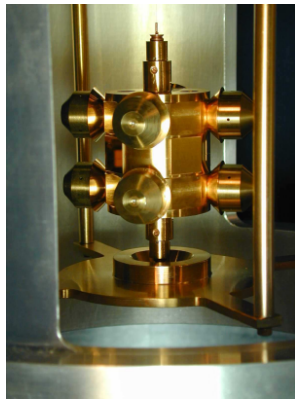
Több szisztematikus zajforrás (hőmérséklet, rezgések, stb.)

periódusa, a Föld forgása miatt, 24 h.
Ennek kiküszöbölésére a torziós-ingát egy egyenletesen forgó ($T \sim 15\text{-}20$ perc) asztalra szerelik.

Be-Ti/Be-Al anyagpárookra a pontosság:

$$\eta \approx (0,3 \pm 1,8) \times 10^{-13}$$

Laboratóriumi rekord!



Az ekvivalenciaelv kiterjesztése az Univerzum tömegének jelentős részét kitevő "sötét anyag" vonzására.

Lézeres Hold-távolság mérés

(Lunar Laser Ranging Experiment)

A Föld-Hold távolságát ma már cm-es pontossággal lehet mérni.

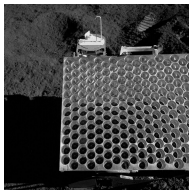
Bay Zoltán vezette csoportnak 1945-ben sikerült először a világon radarjelet küldeni a Holdra és a visszavert jelet érzékelni.



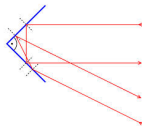
Bay Zoltán Lajos
(1900-1992)



lézersugár kilövése



saroktükrök (macskaszem)
Apollo 11, 1969



Ha a Föld és a Hold esetében nem teljesülne az ekvivalenciaelv, akkor eltérően "esnének" a Nap felé, a köztük lévő távolság változna és lézeres távolságméréssel kimutatható lenne.

A Föld és a Hold eltérő tömege miatt a gravitációs kötési energiájuk különböző.
A mérések szerint a **kötési energiára** is **érvényes** a súlyos és tehetetlen tömeg arányossága.

pontosság: $\eta = 10^{-12}$

$$E = mc^2$$

Shapiro, Irwin I.; Counselman III, Charles C.; King, Robert W.: *Verification of the principle of equivalence for massive bodies*, Physical Review Letters **36** 555-558 (1976);

E. G. Adelberger, et al.: *Eötvös experiments, lunar ranging and the strong equivalence principle*, Nature **347**, 261-263 (1990).

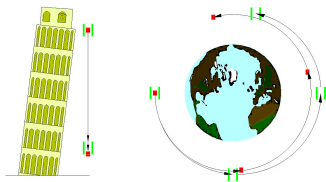
Tervezett űrkísérletek

STEP (Satellite Test of the Equivalence Principle) :

<http://einstein.stanford.edu/STEP/>

A STEP belsejében 4 pár mintatestet helyeznek el

Nemzetközi csapat dolgozik a Stanford Egyetem kutatóinak vezetésével



cél: $\eta = 10^{-18}$

MICROSCOPE (MICRO-Satellite à traînée Compensée pour l'Observation du Principe d'Equivalence): <http://smc.cnes.fr/MICROSCOPE/>

cél: $\eta = 10^{-15}$

"GALILEO GALILEI" GG (Olasz project): <http://eotvos.dm.unipi.it/nobili/>

cél: $\eta = 10^{-17}$

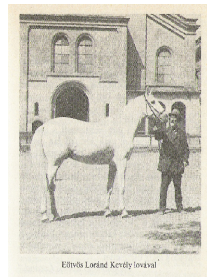
Eötvös Loránd, mint tudós és közéleti szereplő

"Két dolgot soha nem értünk meg egészen: a mindenséget és önmagunkat. Minden tudománynak elérhető tárgya e kettő között fekszik. "

Kései naplójegyzetében írja:

.."csak az válik kitűnővé,
ki magas célokat tűz ki
és igen sokat követel magától".

1873-tól a Magyar Tudományos Akadémia levelező, 1883-tól rendes tagja, 1889-től 1905-ig elnöke, az ő kezdeményezésére alakul meg 1891-ben a Matematikai és Fizikai Társulat, minisztersége idején, 1894-ben megalapítja az Eötvös József kollégiumot stb.



Az egyetemre lóháton járt be.

Eötvös Lorándot három ízben, 1911-ben, 1914-ben és 1917-ben jelölték **Nobel-díjra**, de sajnos nem kapta meg.

(forrás: 1./ Beck Mihály: *A Nobel-díj és a magyar Nobel-díjasok*,

<http://www.kfki.hu/~cheminfo/hun/teazo/nobel/nobeldij.html>

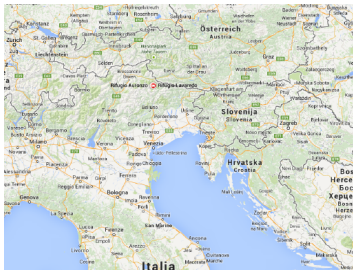
2./ Károlyházy Frigyes: *Hungarae gentis decus*, Fizikai Szemle 1998/12. 397.o.

Elhangzott 1998. október 14-én az ELTE Eötvös épületének (VIII. Puskin utca 5-7.) "búcsú" ülésén.)

Eötvös Loránd, mint híres hegymászó

Eötvös a Dolomitok nagy feltárója.

1902-ben az egyik 2837 m magas csúcsot róla nevezték el
Cima di Eötvösnek, azaz Eötvös csúcsnak.



Összefoglalás (helyett)

Einstein:

Eötvös is the last classic of the classical physics

„A fizikának egy fejedelme halt meg.”

"A nagy példakép, Newton sírkövén

ez olvasható: *Humani generis decus* - az emberi nem dísze.

Mi írjuk ide, hogy Eötvös Loránd a magyar nemzet ékessége: *Hungaræ gentis decus*."

(forrás: Károlyházy Frigyes: *Hungaræ gentis decus*, Fizikai Szemle 1998/12. 397.o.)

Az előadás folytatása:

Dávid Gyula (ELTE TTK, Atomfizikai Tanszék):

Eötvöstől Einsteinig — a modern gravitációelmélet kísérleti és elméleti alapjai,

II. rész — Gravitáció és geometria

Fontosabb források

Eötvös Loránd munkái és méltatása

Dolgozatok és dokumentumok gyűjteménye

Készítették: Borbás Józsefné, Király Péterné, Kőrösi Magdolna,
Szalay Istvánné, Vámos Judit, Zimányi Magdolna

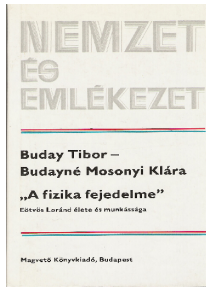
<http://wwwold.kfki.hu/eotvos/>

<http://mek.oszk.hu/02000/02054/>

Köszönet

Dávid Gyula: ELTE TTK, Atomfizikai Tanszék

Radnai Gyula: ELTE TTK, Anyagfizikai Tanszék



Eötvös Loránd néhány gondolata

"Nincsen nemzet a világon, melynek jobban fájna az idegenek gáncsa, nincsen nemzet, amely büszkébb volna azon fiaira, akik a világ szeme láttára lobogtatták a nemzeti zászlót, akár a harci dicsőség, akár a tudomány vagy a művészet jelvényeit hordotta az magán ... mégis nem csökkenni, hanem növekedni látszik napjainkban azoknak száma, kik bár a diadalt óhajtják, az idegen iránt való ellenszenvből visszautasítják mind az arra segítő eszközöket."

"Az az érdem, hogy sokat tanult, még nem ment fel senkit társadalmi kötelességei alól, s azért a legtudósabb is helyesen cselekszik és méltán köszönetet érdemel, mikor néha leszáll tudományának magaslatáról, s megfontolt tanácsával vagy gyönyörködtető előadásával a sokaságnak okulást és élvezetet szerez, csak attól óvakodjék, hogy az ilyenféle szolgálatokkal kiérdemelt elismerést tudományos ambíciója kielégítésének tekintse."