



Az Eötvös-ingától a GOCE műholdig

Földváry Lóránt

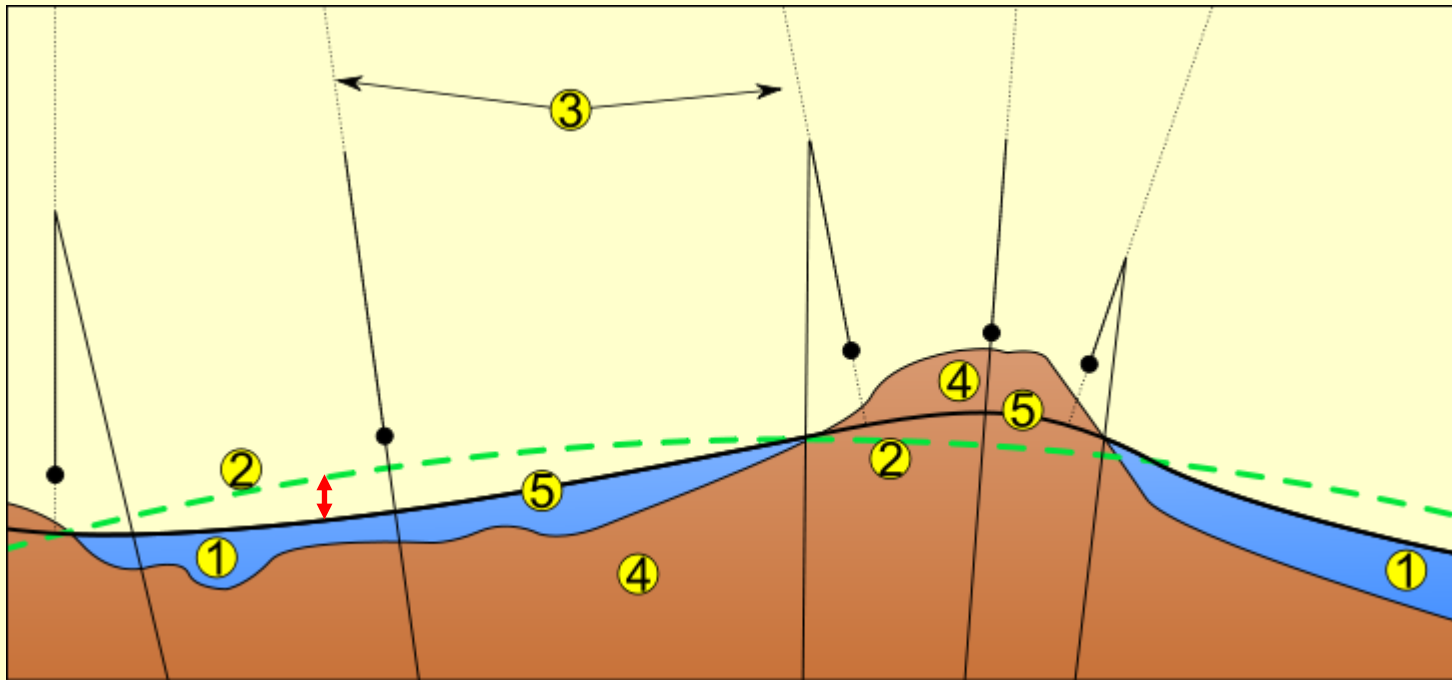
BME Általános- és Felsőgeodézia Tanszék

Elhangzott előadás a Magyar Mérnök Kamara, Geodéziai és Geoinformatikai Tagozatának taggyűlésén,
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Általános- és Felsőgeodézia Tanszék, 2012.09.22.



I. Elméleti alapozás

Geoid modell



1. óceán
2. szferoid
3. helyi függővonal
4. fizikai földfelszín
5. geoid

geoid: középtengerszint

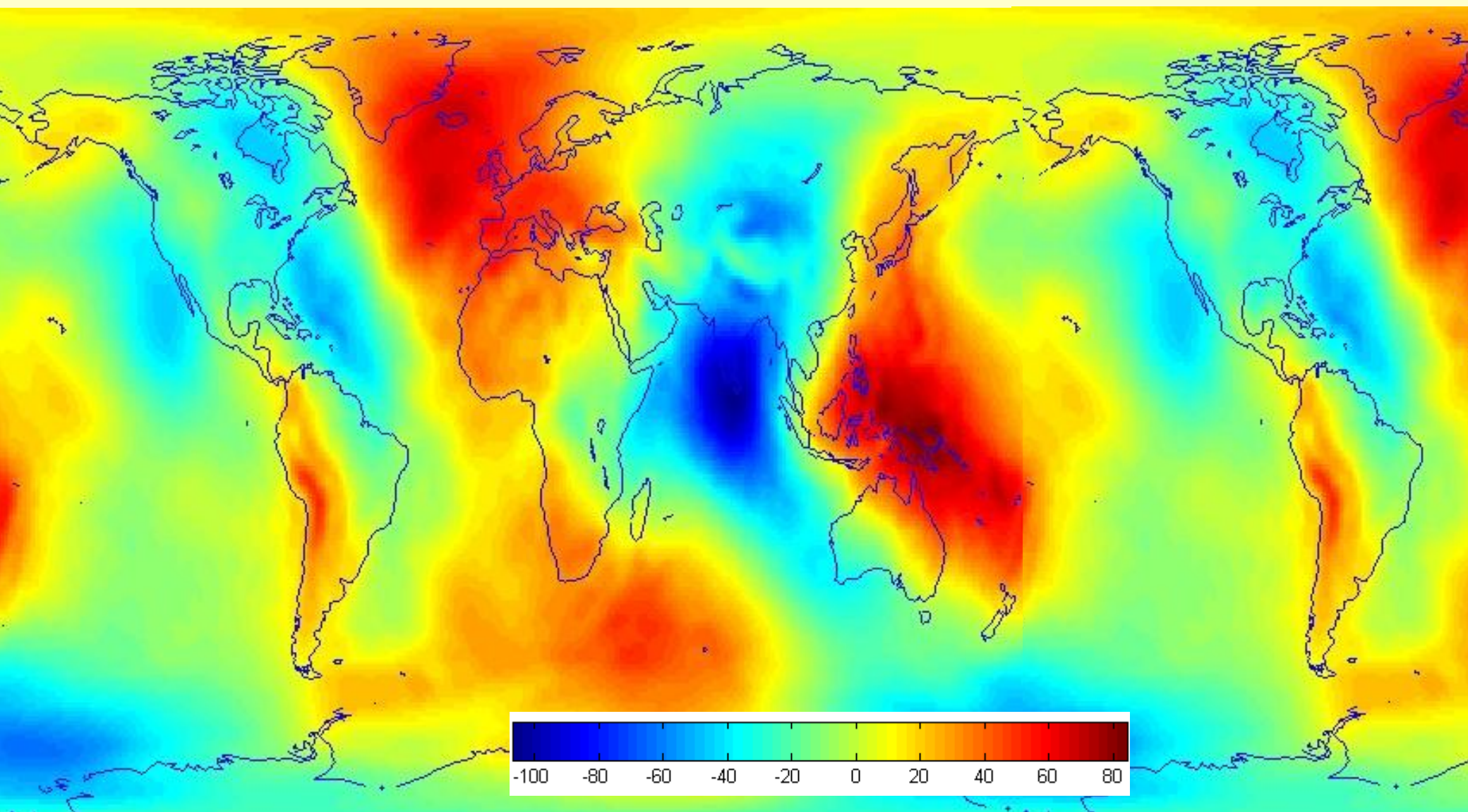
szferoid: egyszerűsített geoid

- tömege = Föld tömeg, tkp.= Föld tkp.

- alakja: ellipszoid

geoid unduláció: a geoid és az ellipszoid különbsége

Geoid modell



Geoid modell

Szerepe:

$$V(r, \varphi, \lambda) = \frac{GM}{R} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{R}{r} \right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (C_{nm} \cos m \lambda + S_{nm} \sin m \lambda) P_{nm}(\sin \varphi)$$

A geopotenciál és a földfelszín konkrét pontjai közötti kapcsolat (függvény) **globális és regionális** kezelése.

$$V = V(r, \varphi, \lambda, GM, \overline{K}_{lm})$$

Geoid modell

Szerepe: $V = V (r , \varphi , \lambda , GM , \overline{K}_{lm})$

A geopotenciál és a földfelszín konkrét pontjai közötti kapcsolat (függvény) **globális és regionális** kezelése.

1. Direkt feladat $(r , \varphi , \lambda , GM , \overline{K}_{lm}) \rightarrow V / \Delta g / g / V_{xx}$

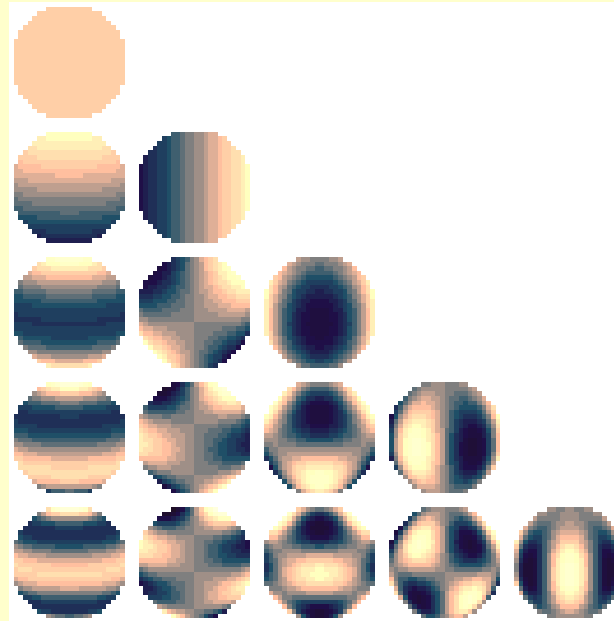
2. Inverz feladat $(V , r , \varphi , \lambda) \rightarrow GM , \overline{K}_{lm}$

3. Gyakorlati alkalmazások

pl. pályaintegrálás $(\overline{r}_0 , \overline{\dot{r}}_0 , GM , \overline{K}_{lm}) \rightarrow \overline{r}_t , \overline{\dot{r}}_t$

Gömbfüggvény együtthatók

$C_{0,0}$						
$C_{1,0}$	$C_{1,1}$					
$C_{2,0}$	$C_{2,1}$	$C_{2,2}$				
$C_{3,0}$	$C_{3,1}$	$C_{3,2}$	$C_{3,3}$			
$C_{4,0}$	$C_{4,1}$	$C_{4,2}$	$C_{4,3}$	$C_{4,4}$		
$C_{5,0}$	$C_{5,1}$	$C_{5,2}$	$C_{5,3}$	$C_{5,4}$	$C_{5,5}$	



alacsony fok és rend:

a nehézségi erőter nagyobb vonásai

magas fok és rend:

a nehézségi erőter kisebb részletei

Geoid modell meghatározás

Műholdas technikákkal az elmúlt évtizedben megnőtt a nehézségi erőter meghatározásának pontossága és a felbontása (magas fok és rend).

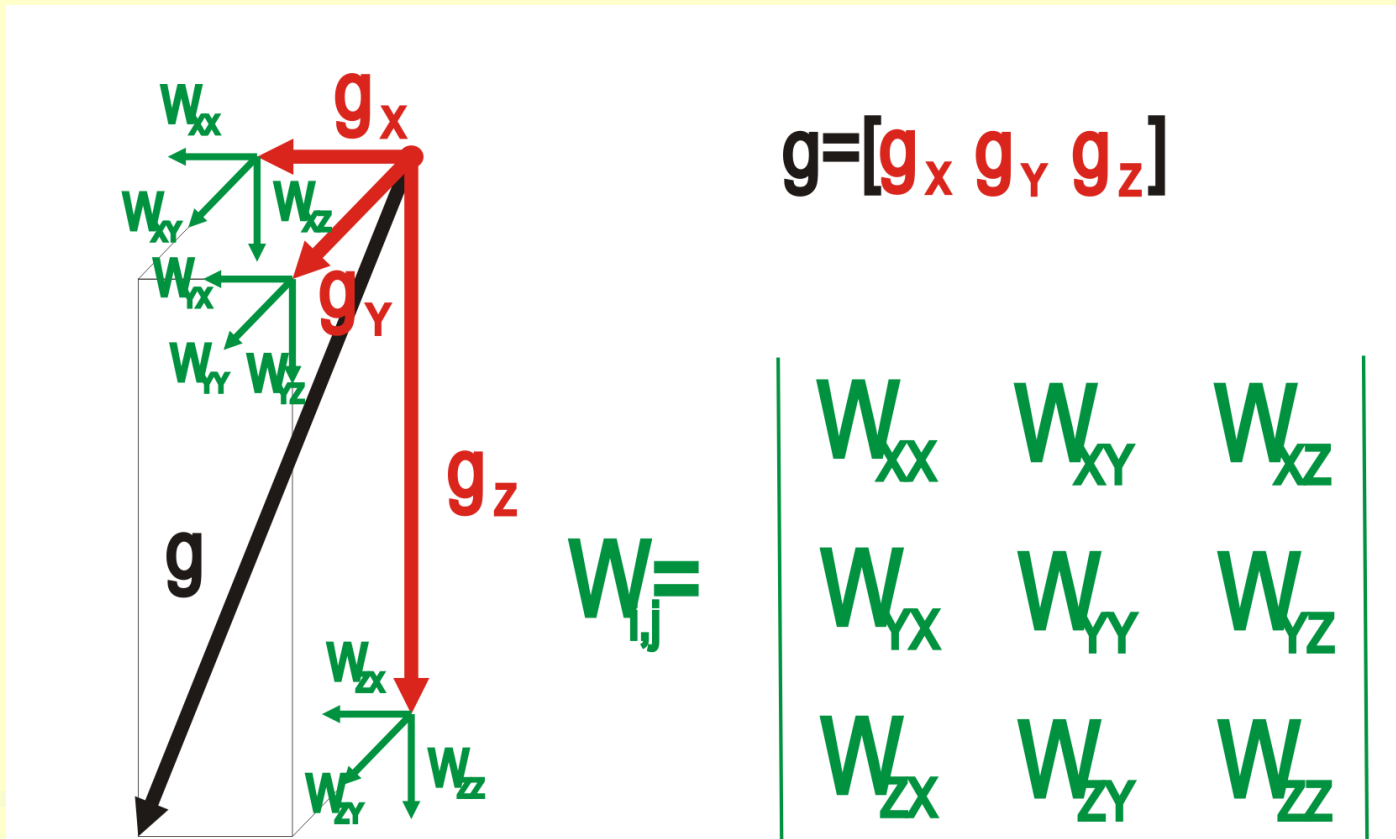
Mérési mennyiségek:

- folyamatos műholdpálya (CHAMP)
- két műhold közötti távolságváltozás (GRACE)
- gravitációs gradiens (GOCE)

Gravitációs gradiens

A tömegvonzás térbeli megváltozását fejezi ki.

$$W_{ij} = \text{grad} (\vec{g}) = - \text{grad} (\text{grad} (W)) = - \frac{\partial^2 W}{\partial i \partial j}; \quad i, j = x, y, z$$



Gravitációs gradiens



Eötvös Loránd

Az Eötvös Loránd által fejlesztett torziós inga (Eötvös-inga) az első műszer, amely a gravitációs gradiens térbeli komponenseinek mérésére szolgál.

$$\underline{\underline{E}} = \begin{vmatrix} W_{xx} & W_{xy} & W_{xz} \\ W_{xy} & W_{yy} & W_{yz} \\ W_{xz} & W_{yz} & W_{zz} \end{vmatrix}$$

A gravitációs gradiens mértékegysége:
1 Eötvös (jele 1 E)

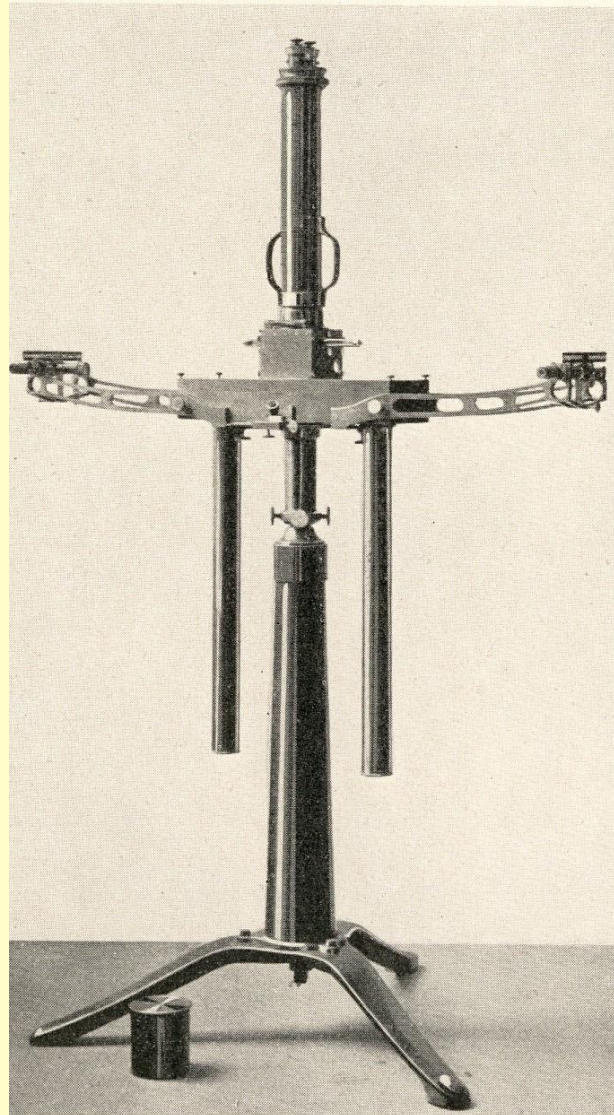


II. Eötvös-inga

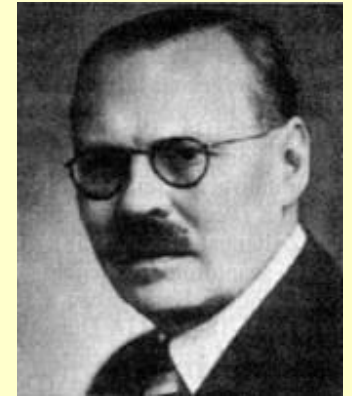
Az Eötvös-inga és létrehozói



Eötvös Loránd



Pekár Dezső



Rybár István



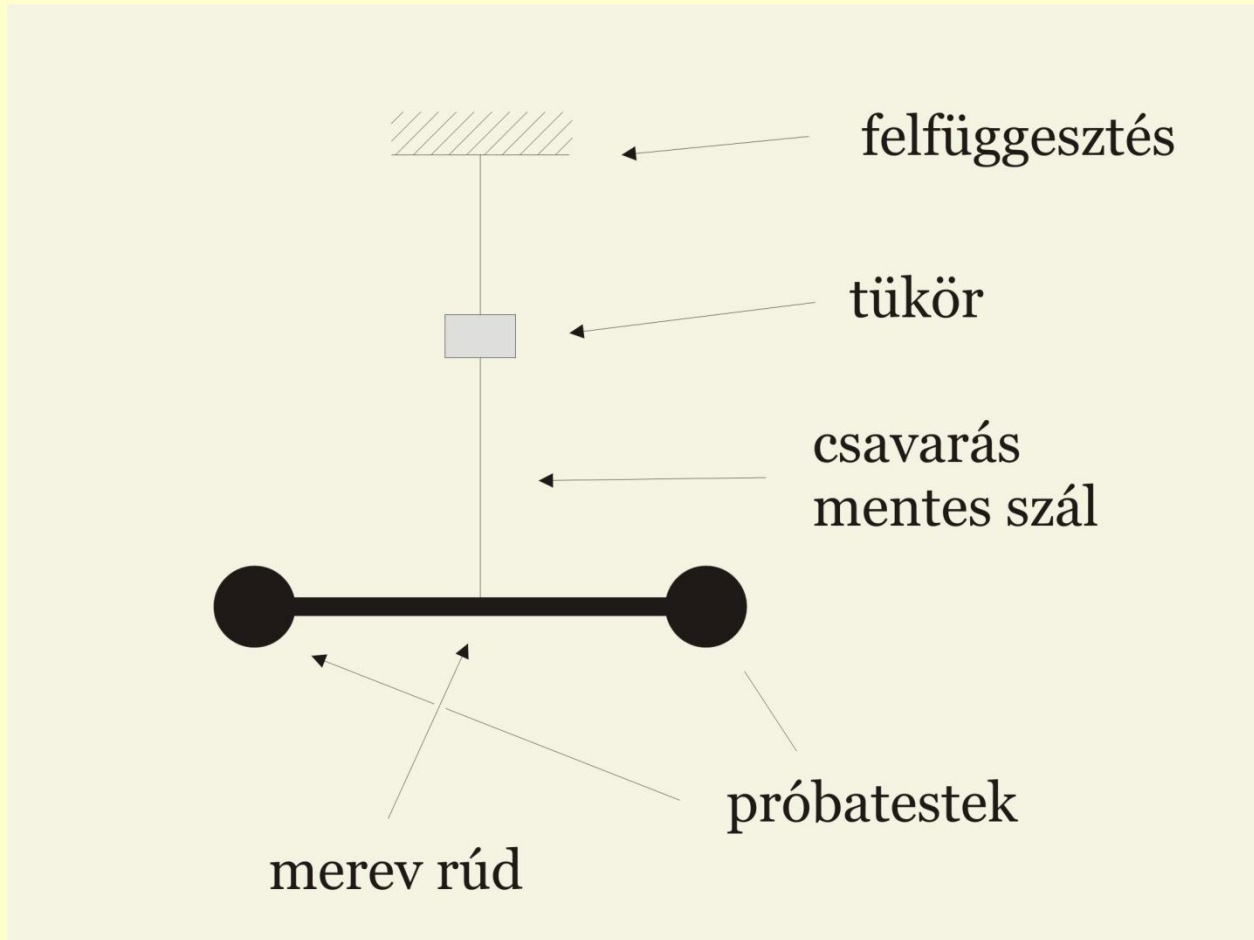
Böckh Hugó



Süss Nándor

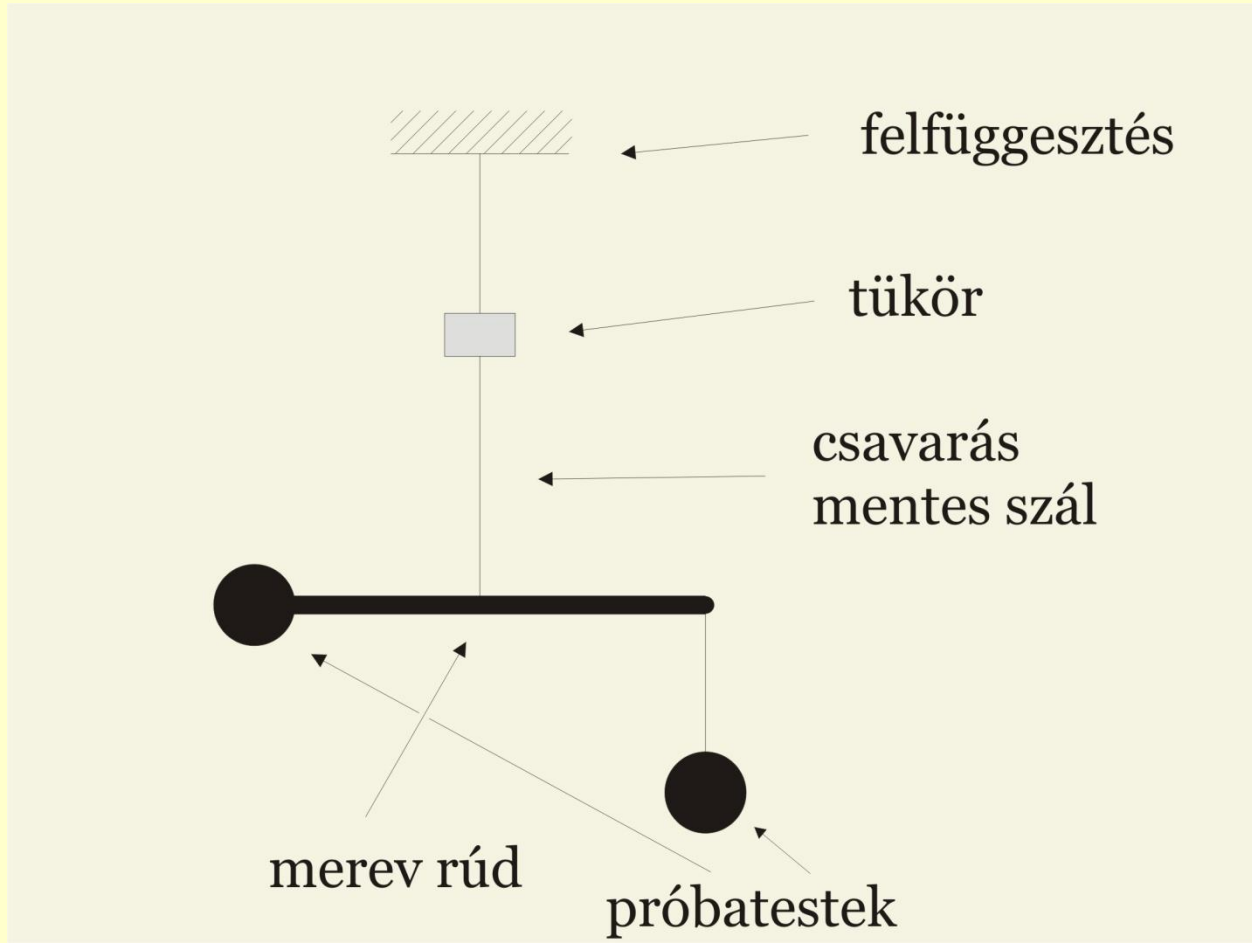
Eötvös-inga

A Cavendish-féle torziós inga felépítése:



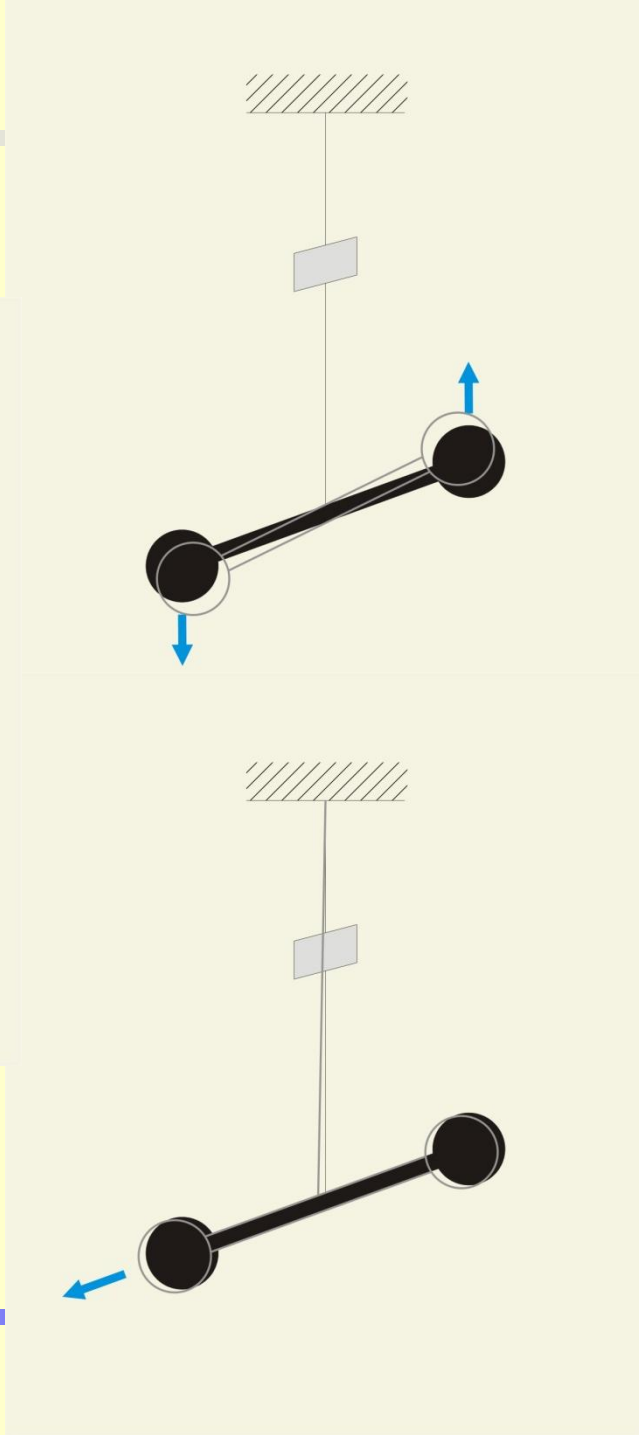
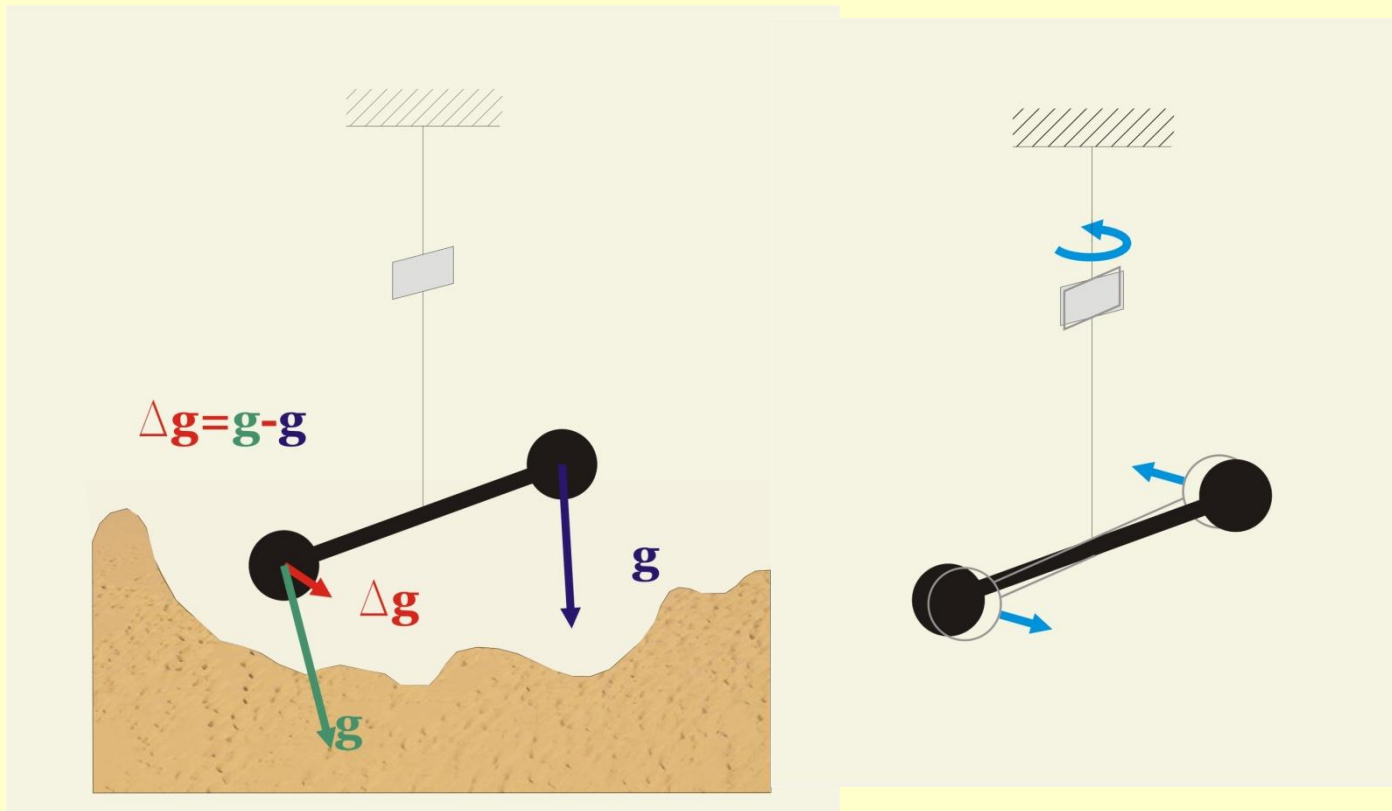
Eötvös-inga

Az Eötvös-inga felépítése:



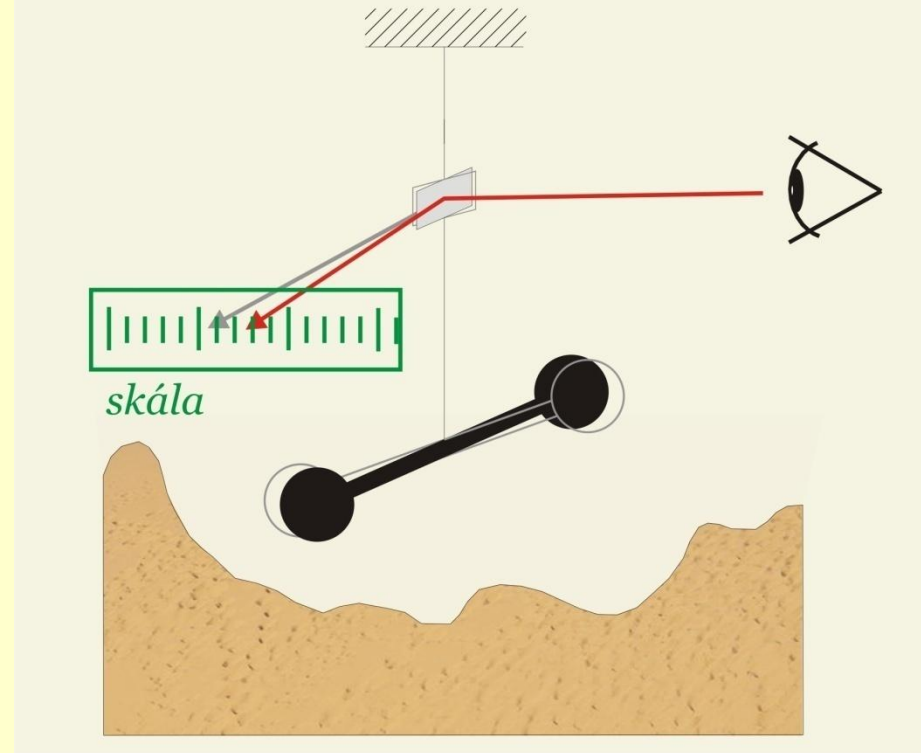
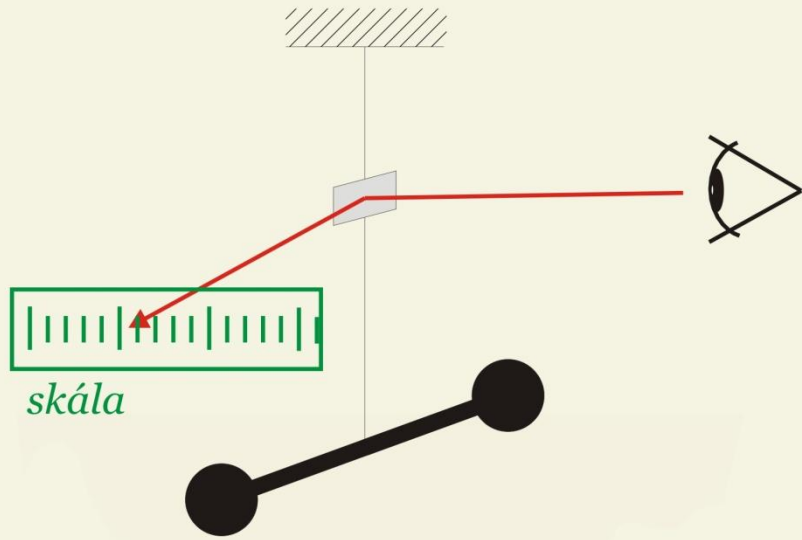
Eötvös-inga

A torziós ingák mérési alapelve:



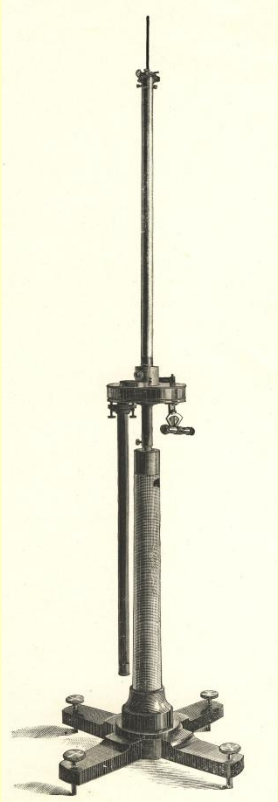
Eötvös-inga

A torziós ingák mérési alapelve:

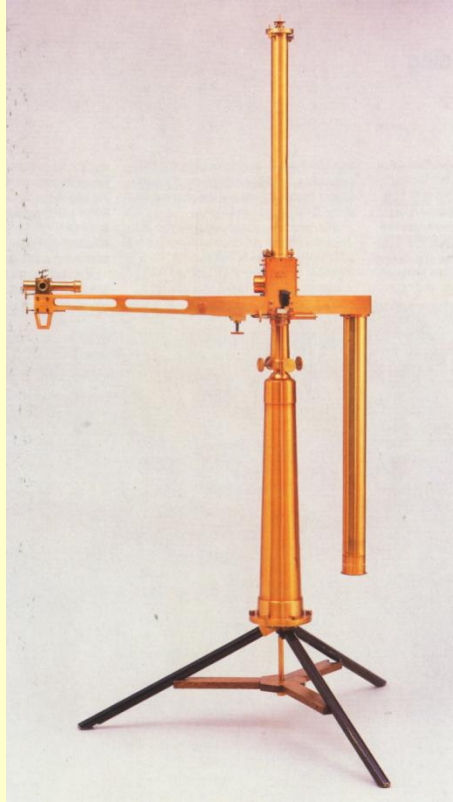


Eötvös-inga

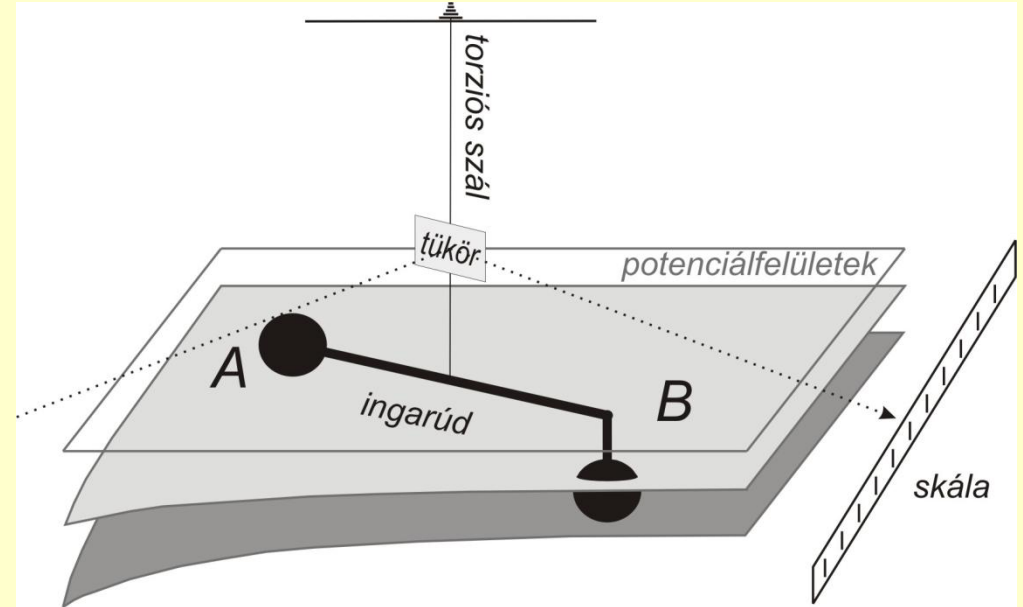
Eötvös Loránd torziós ingái és mérési alapelve:



horizontális variométer
1890



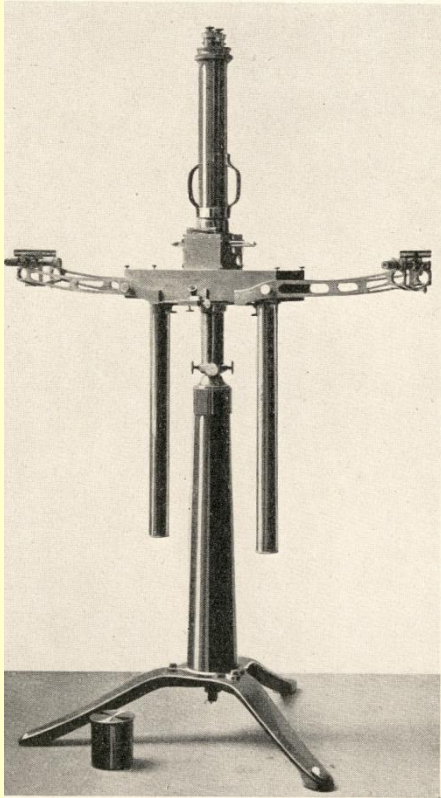
balatoni inga
1898



Alapelv: Az **A** és **B** tömegekre ható nehézségi erők eltérése a torziós szálban forgatónyomatékokat ébresztnek, és a rúd elfordul. Az elfordulás mértékét egy skálán mérve az **AB** karhosszon a nehézségi erő térbeli megváltozására (gradiensére) következtethetünk.

Eötvös-inga

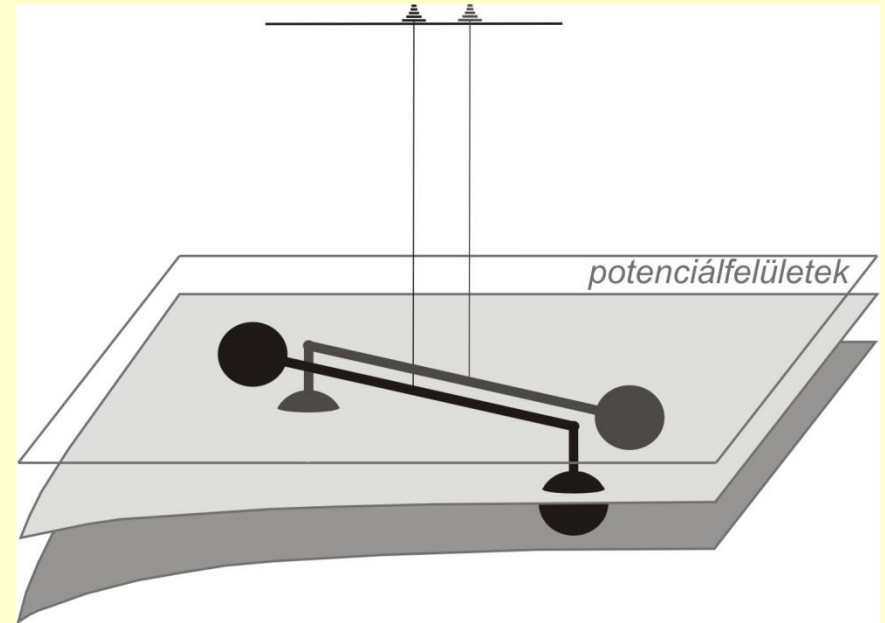
Eötvös Loránd torziós ingái és mérési alapelve:



kettős nagy eszköz
1902



kettős kis eszköz
1908



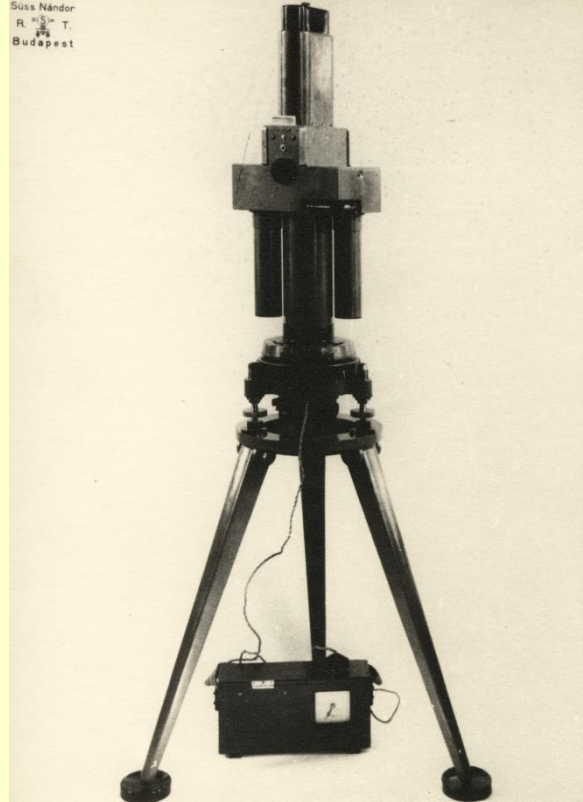
Alapelv: Eötvös két ingát egymás mellé helyezett, egymáshoz képest 180 fokkal elfordított helyzetben.

Eötvös-inga

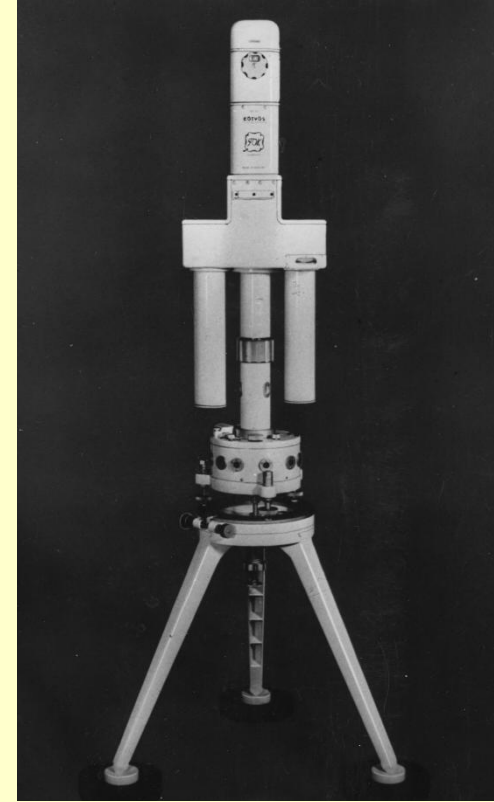
Későbbi híresebb fejlesztések:



Eötvös-Pekár
1926



Auterbal
1928

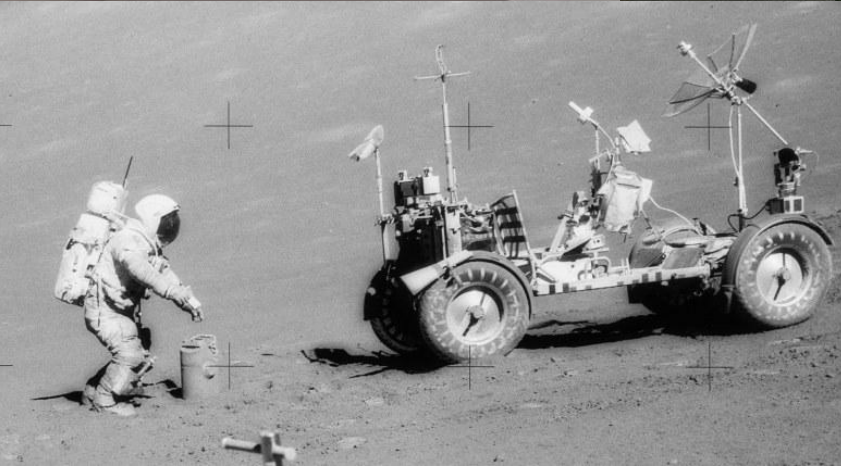
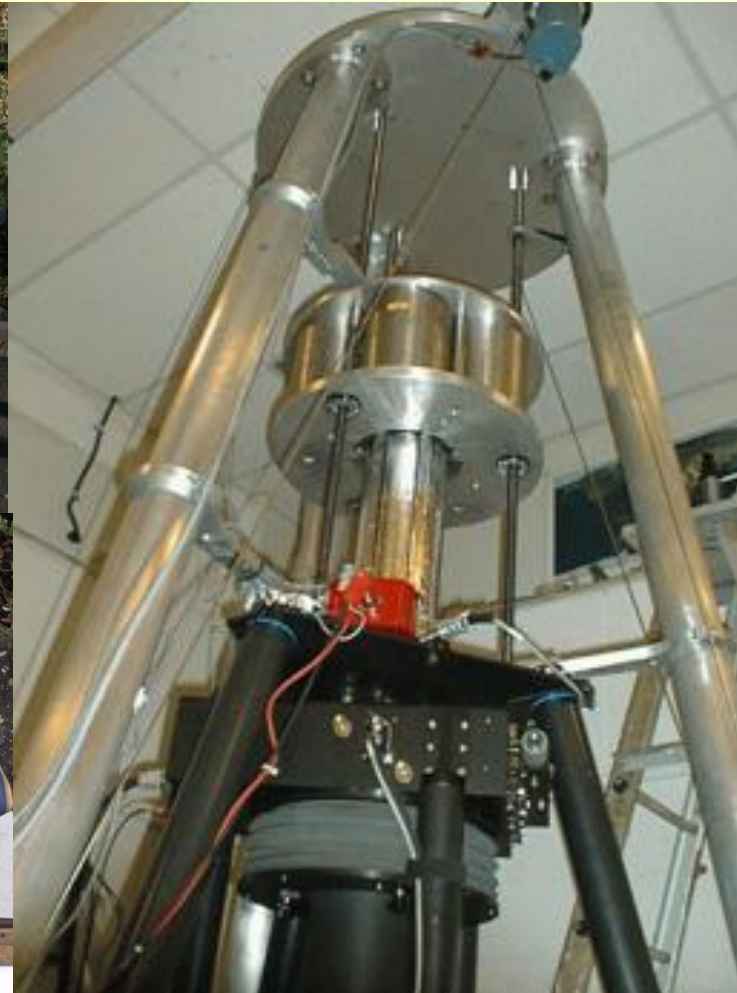


E-54
1954

Graviméterek

Az Eötvös-inga gyakorlati használata a 60 évekre megszűnt.

Szerepét a graviméterek (a „g”-t mérik) vették át.



Two gravimeter generations:
Scintrex CG-5 and LCR-6



III. GOCE

GOCE

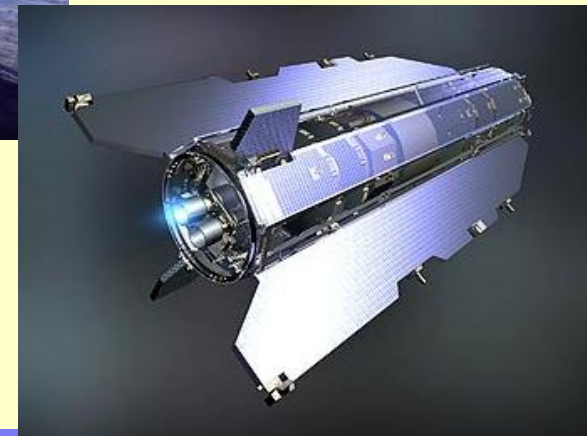
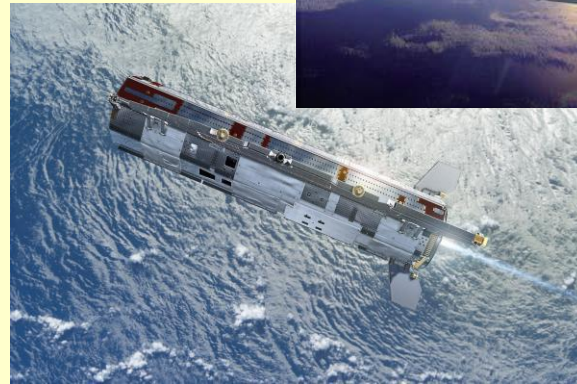
2009: A **GOCE** nevű műhold pályára állításával újra van gravitációs gradiens mérő műszerünk!



A műhold fedélzeti műszere az ún. űrgradiométer.

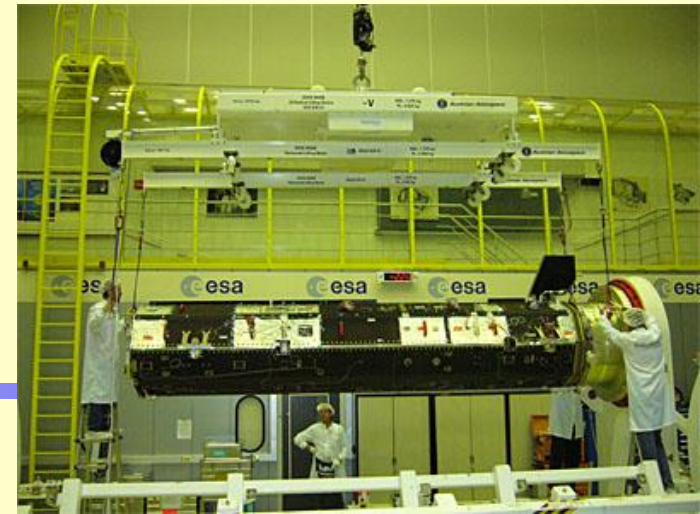
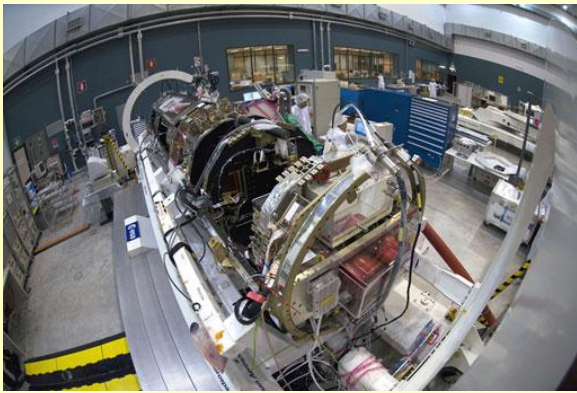
GOCE

képgaléria – minden különösebb ok nélkül

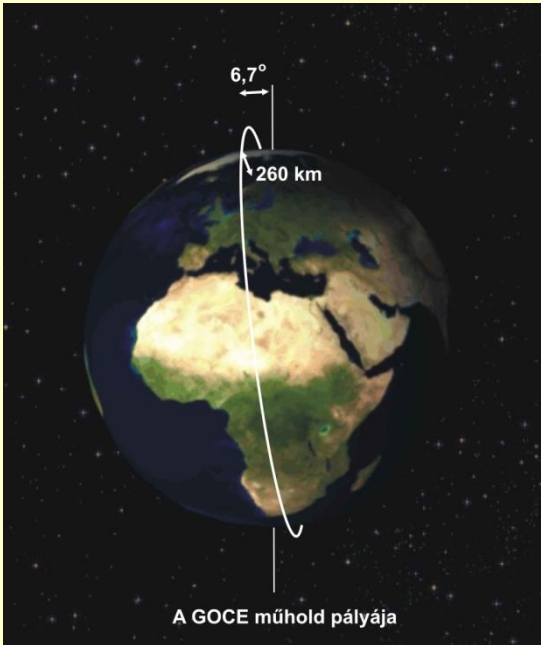


GOCE

képgaléria – minden különösebb ok nélkül



GOCE



GOCE adatok:

fellövés: 2009.

üzemeltető: ESA (Európai Űrügynökség)

pályája:

közel poláris (a sarkoktól $6,7^\circ$ -kal tér el)

közel kör alakú

nagyon alacsony magasságú (255 km)

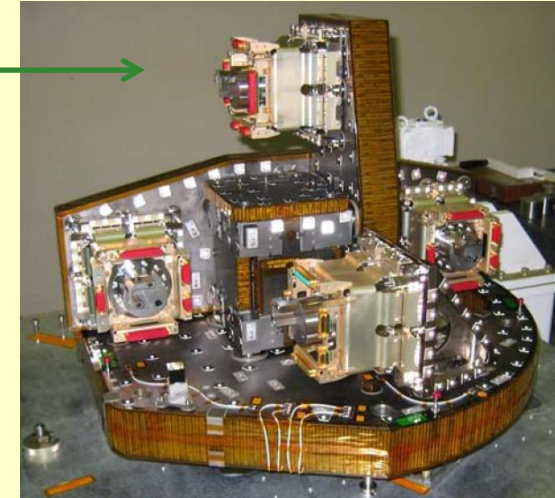
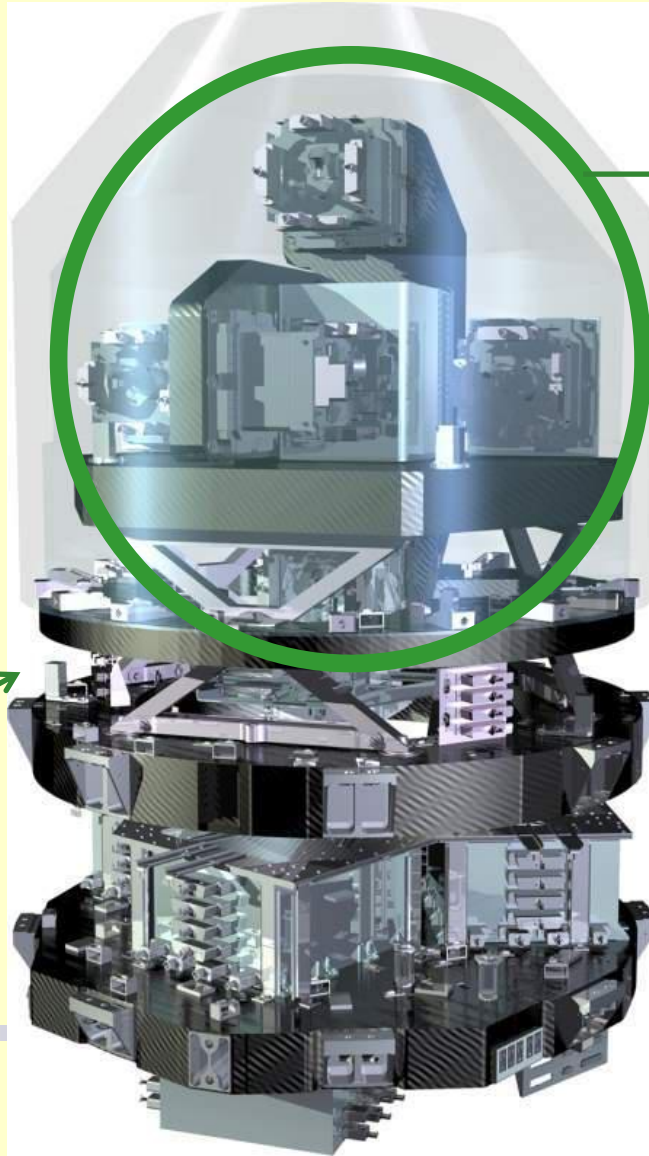
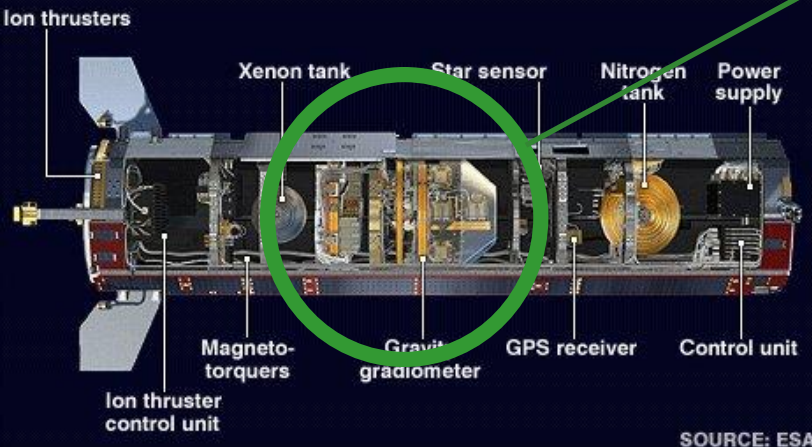
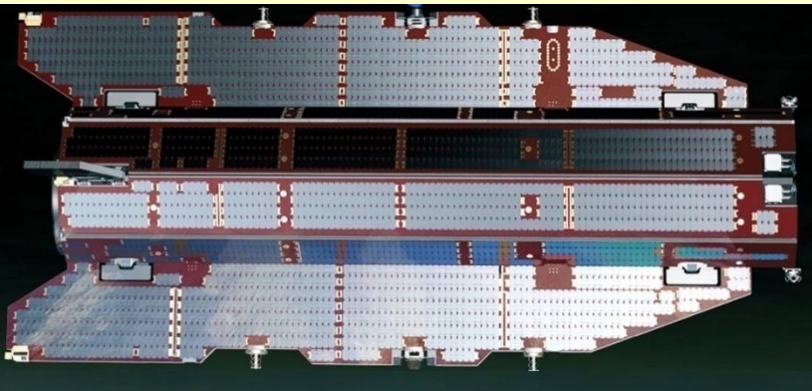
a Föld valamely pontja fölé mintegy

2 havonta tér vissza

egy nap alatt 15-16 fordulat tesz meg

GOCE gradiométer

A GOCE űrgradiométer



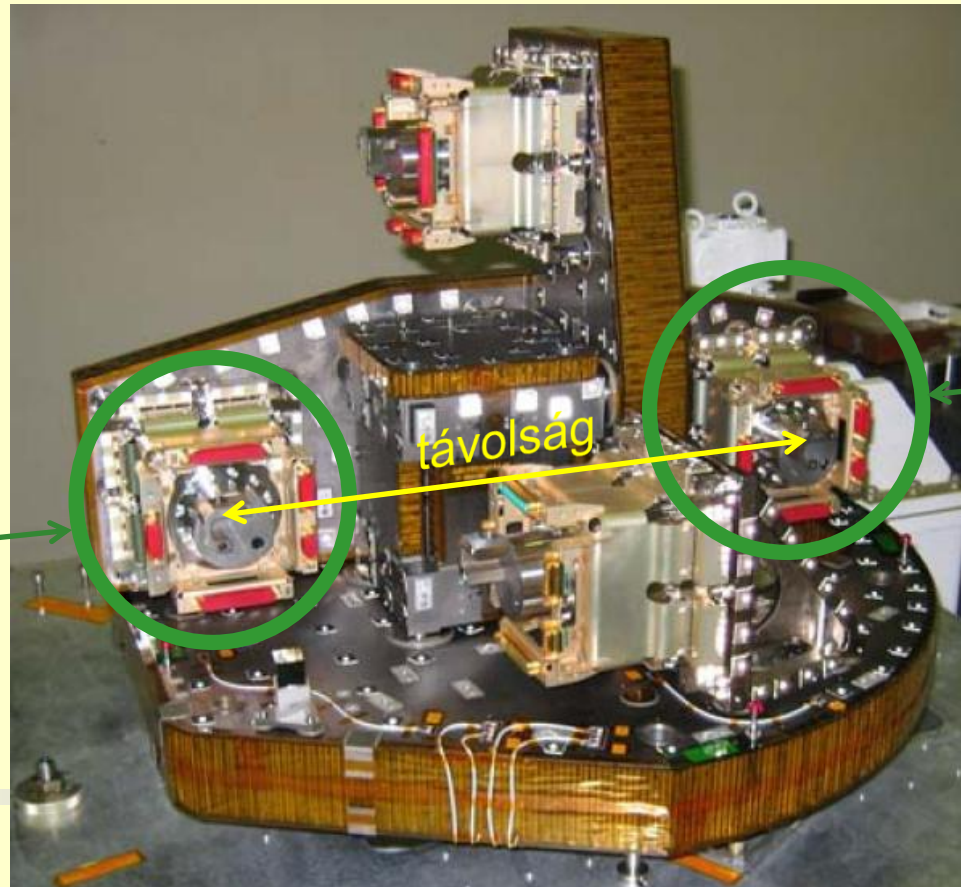
GOCE gradiométer

A GOCE űrgradiométer mérési alapelve:

3 pár *kapacitív gyorsulásmérő*vel egymástól ismert távolságokra egyidejűleg gyorsulásméréseket végeznek.

$$\Delta g = g_2 - g_1$$

gradiens = $\Delta g / r$



1. gyorsulásmérő

2. gyorsulásmérő

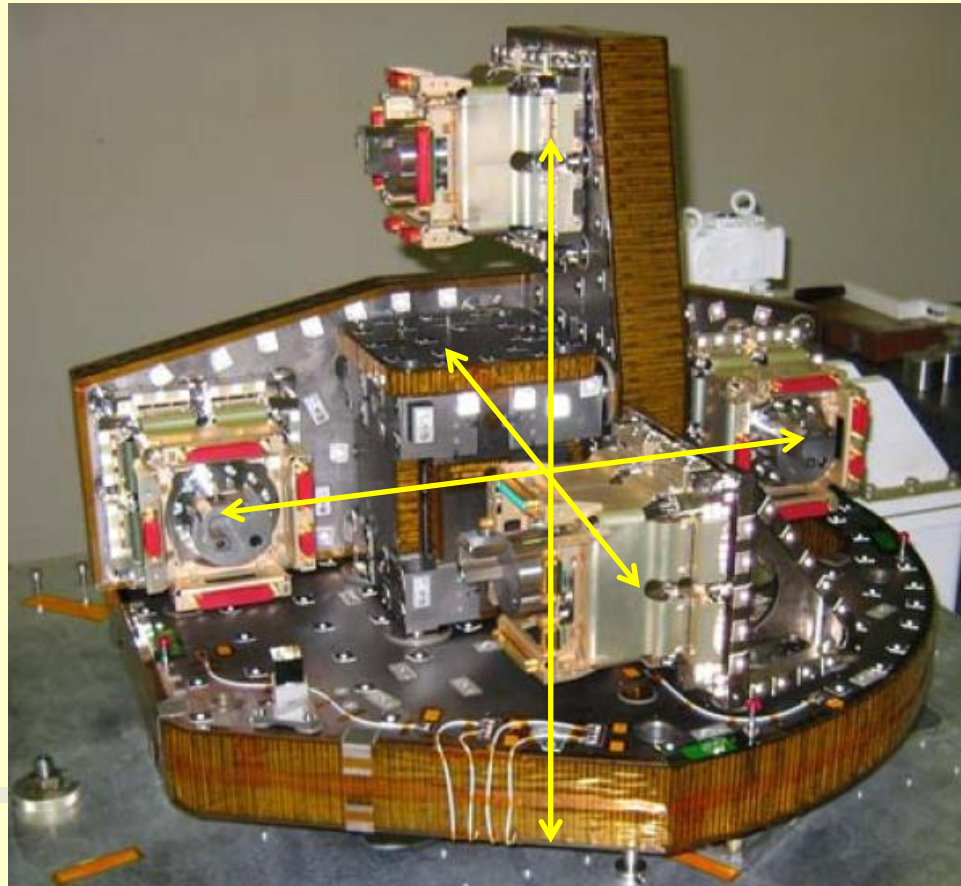
távolság

GOCE gradiométer

A GOCE űrgradiométer mérési alapelve:

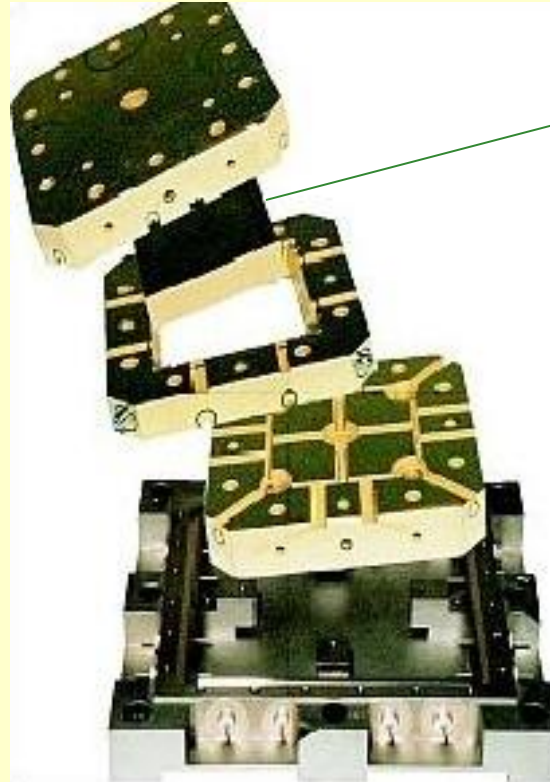
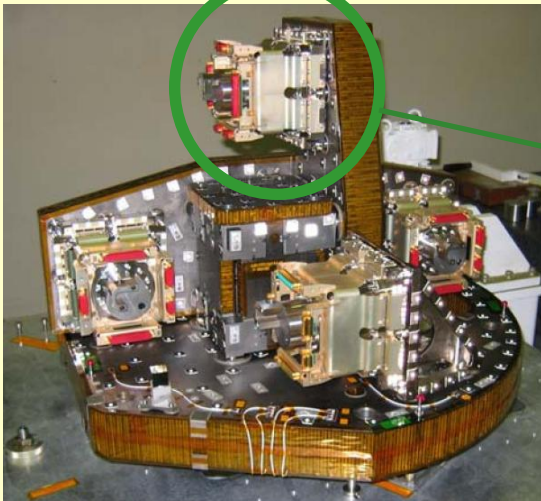
$$E = \frac{1}{d} \cdot \begin{bmatrix} \gamma_{x2} - \gamma_{x1} & \gamma_{y2} - \gamma_{y1} & \gamma_{z2} - \gamma_{z1} \\ \gamma_{x4} - \gamma_{x3} & \gamma_{y4} - \gamma_{y3} & \gamma_{z4} - \gamma_{z3} \\ \gamma_{x6} - \gamma_{x5} & \gamma_{y6} - \gamma_{y5} & \gamma_{z6} - \gamma_{z5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{xx} & V_{xy} & V_{xz} \\ V_{yx} & V_{yy} & V_{yz} \\ V_{zx} & V_{zy} & V_{zz} \end{bmatrix} + \underline{\underline{\Omega}} + \underline{\underline{\dot{\Omega}}}$$

gradient = $\Delta g / r$

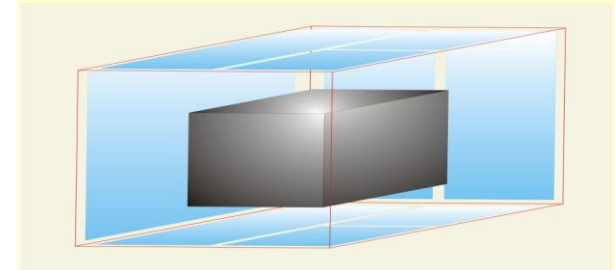


GOCE gradiométer

A GOCE űrgradiométer mérési alapelve:
a gyorsulásmérő

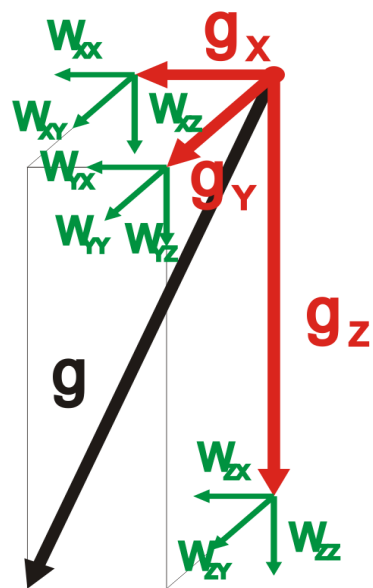


a próbatest



Vacuumban lebegtetnek egy próbatestet, elmozdulását kapacitív elven gátolják.

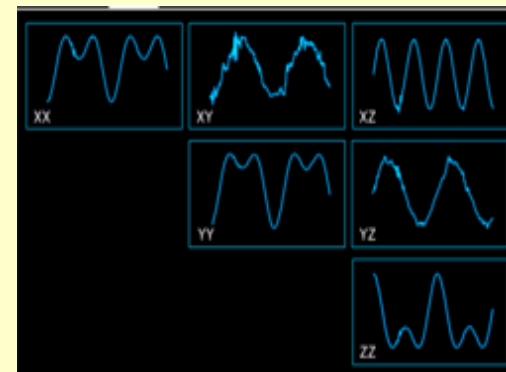
A gradiométer mérési mennyisége



$$g = [g_x \ g_y \ g_z]$$

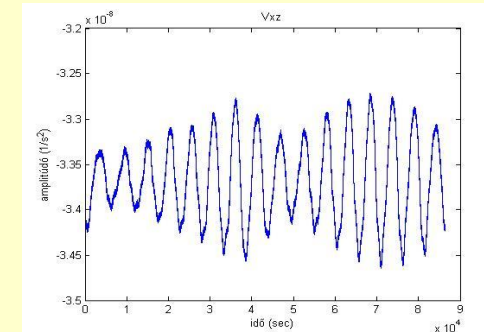
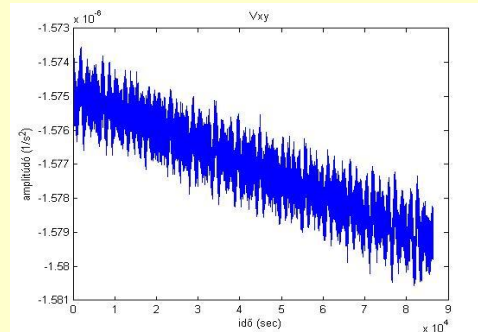
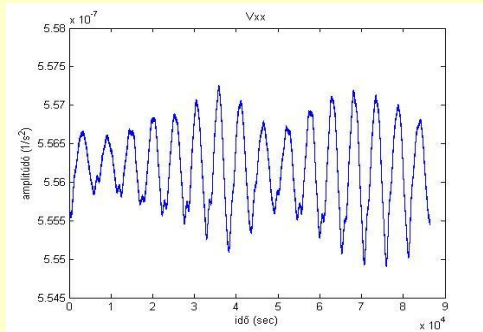
$$W_{i,j} =$$

$$\begin{vmatrix} W_{xx} & W_{xy} & W_{xz} \\ W_{yx} & W_{yy} & W_{yz} \\ W_{zx} & W_{zy} & W_{zz} \end{vmatrix}$$



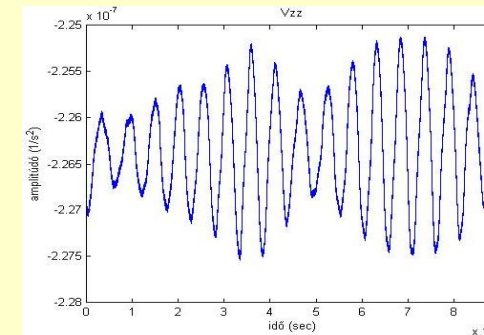
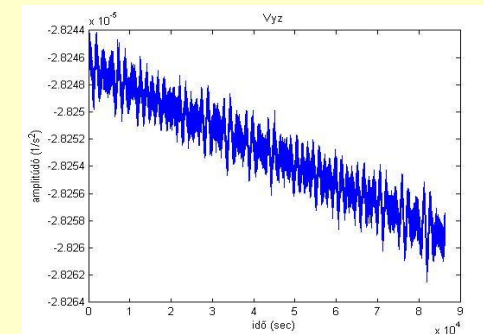
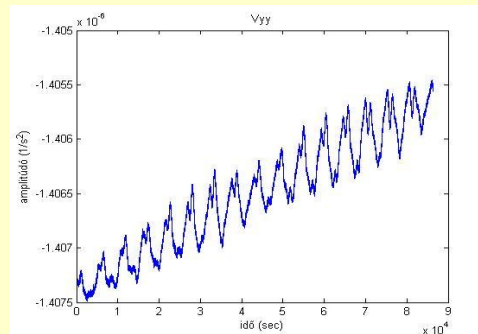
A gradiométer az Eötvös-tenzor 6 független elemének idősorát méri másodperces felbontásban.

A gradiométer mérési mennyisége



Értékes mérések az 5 – 100 mHz frekvencia tartományban vannak.

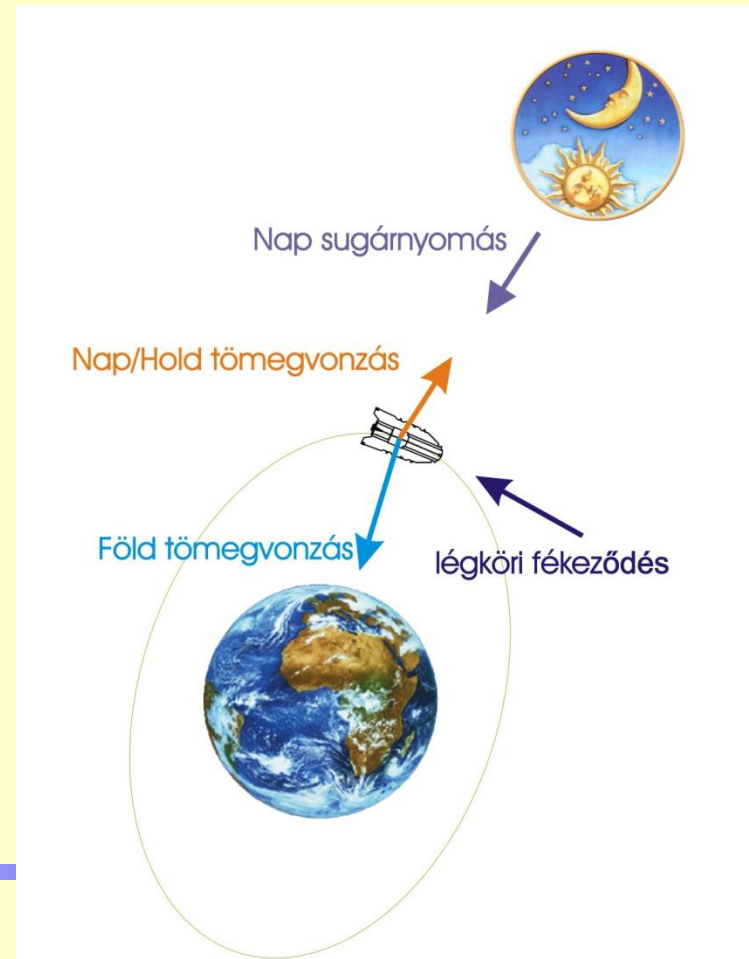
Fontos mind a mérések, mind a feldolgozó eljárás spektrális szűrése.



A gradiométer mérési mennyisége

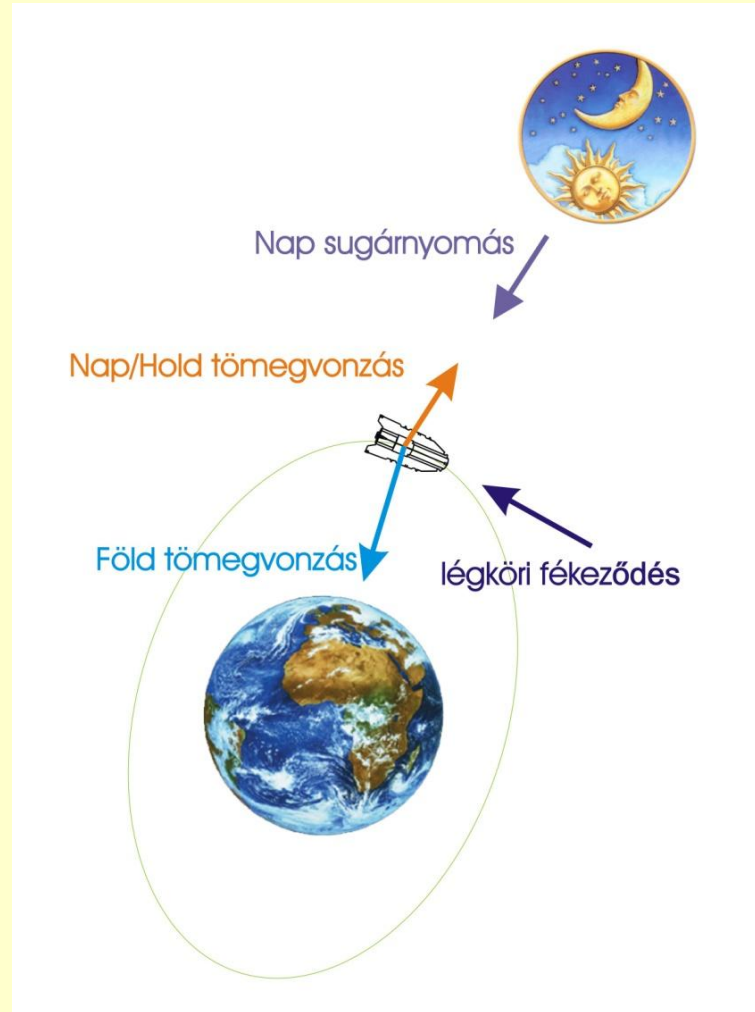
A mérések fizikai tartalma:

A gyorsulásmérők minden gyorsulást mérnek, nem csak gravitációs gyorsulást!



Egy mesterséges holdra ható erők

1. A Föld gravitációs tere
2. Egyéb égitestek gravitációs tere
3. A Föld dinamikus változásai
 - » ár-apály jelenségek
 - merev Föld
 - óceán
 - pólus mozgás
4. Nem gravitációs eredetű erőhatások

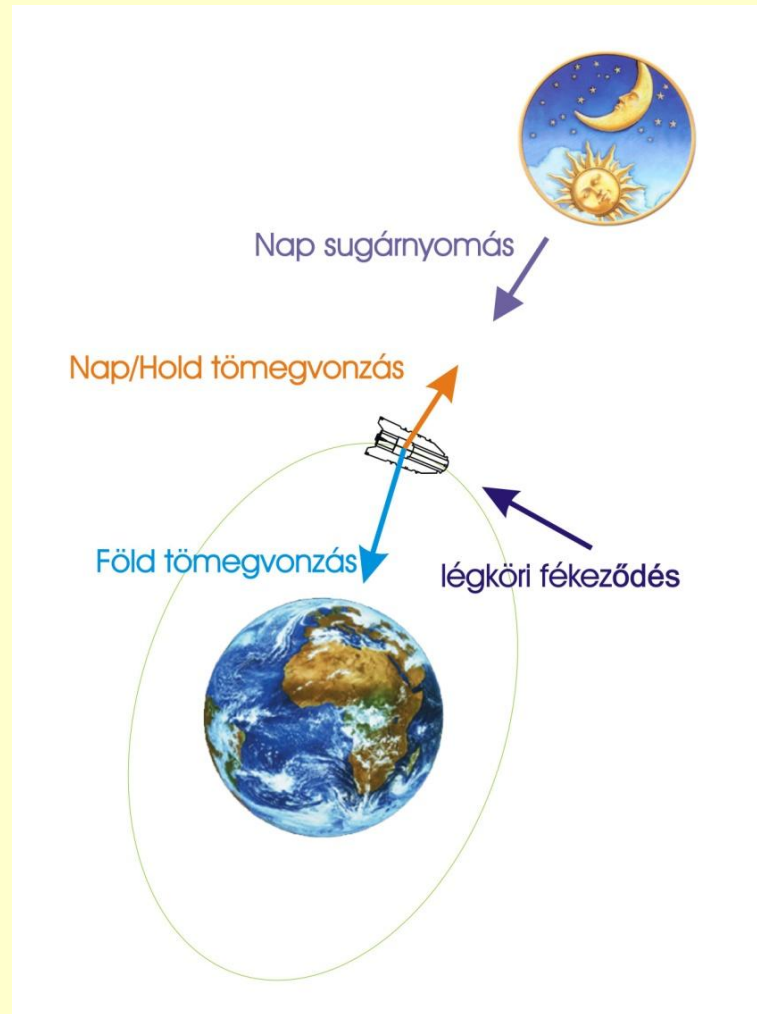


Nem gravitációs eredetű erőhatások

Disszipatív erők
(felületi erők):

1. Nap sugárnyomás
2. Légköri fékezés

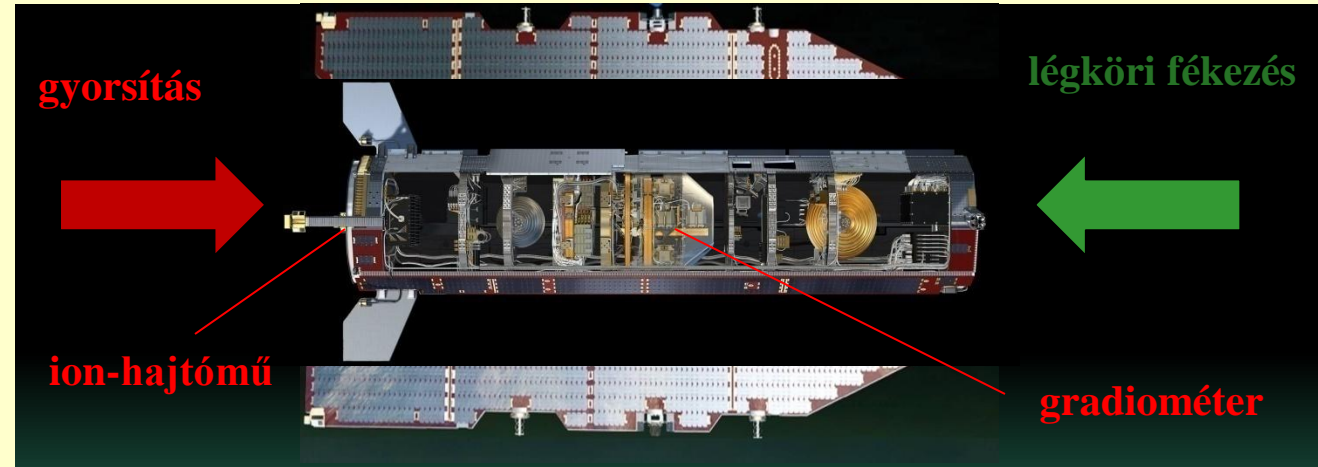
A disszipatív erőket a
GOCE valós időben
meghatározza, és
kiküszöböli.



Nem gravitációs eredetű erőhatások

A nem gravitációs eredetű erőhatások kiküszöbölése:

külső hatások
kiküszöbölése



belső hatások
kiküszöbölése

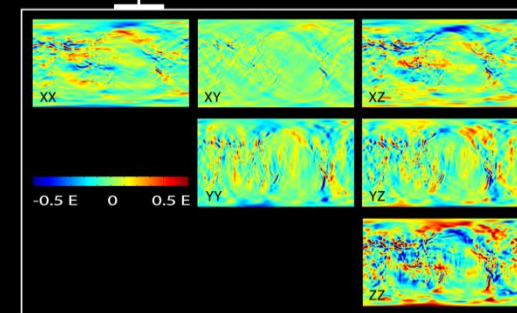
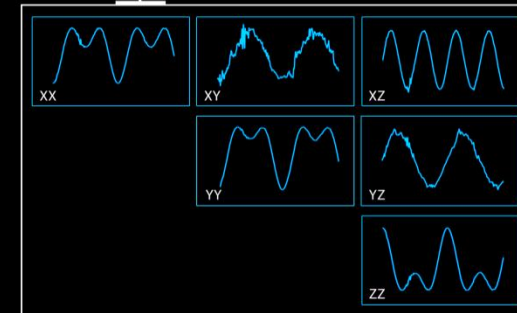
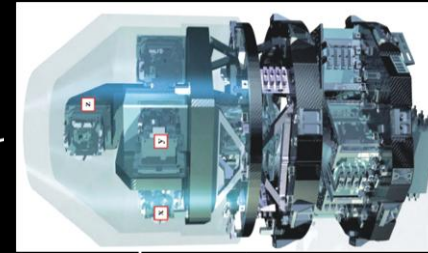
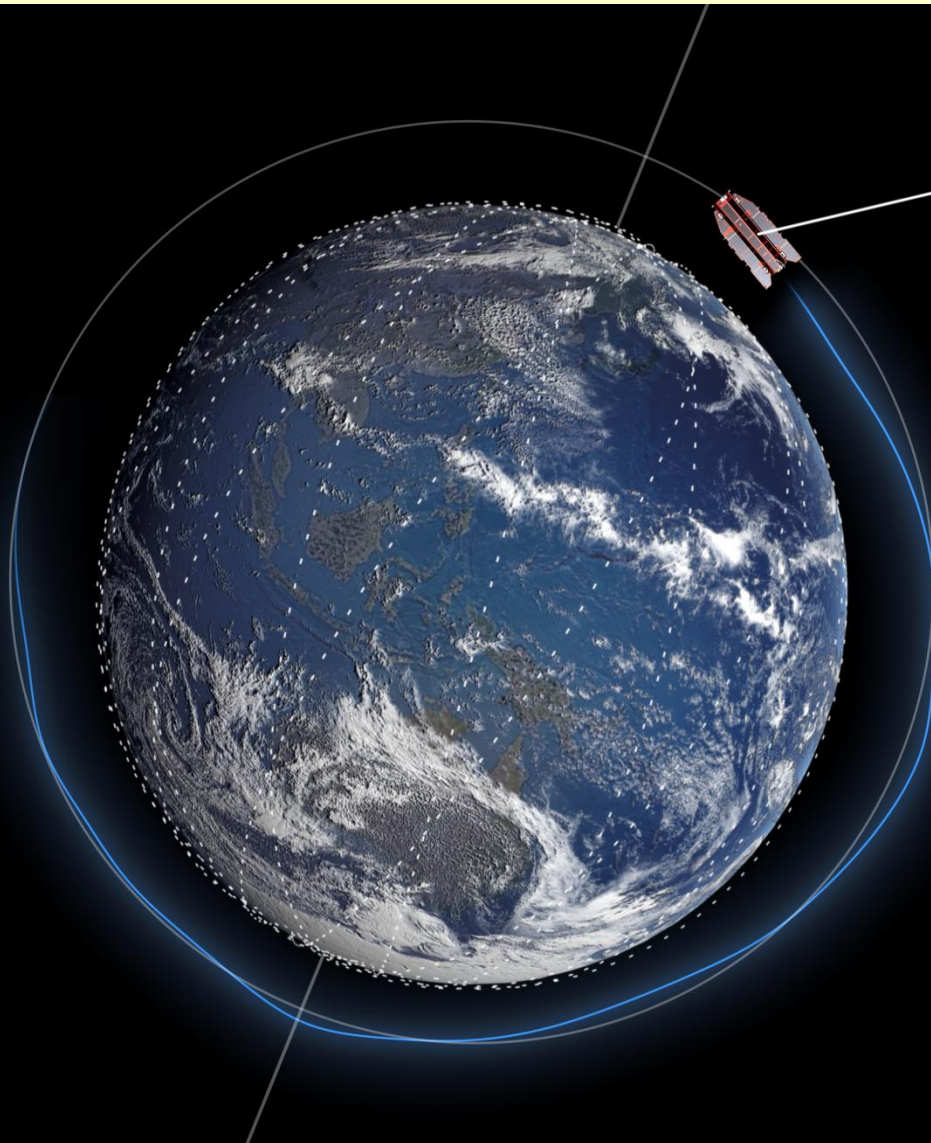
A műhold fedélzetén
nincs
mechanikus alkatrész

„csendes műhold”

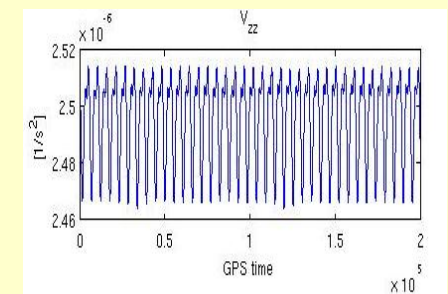
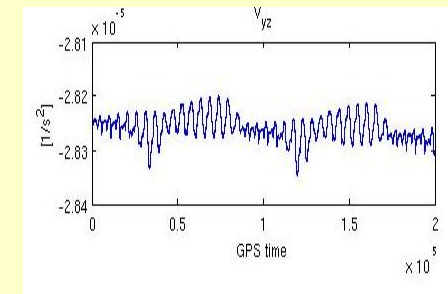
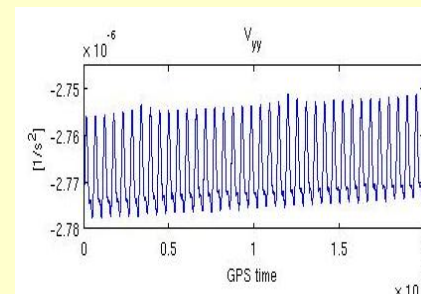
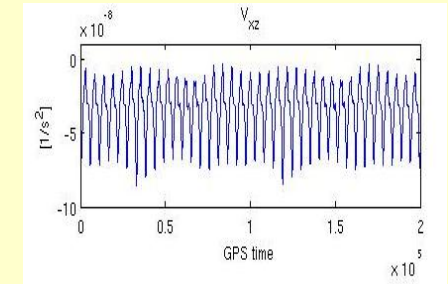
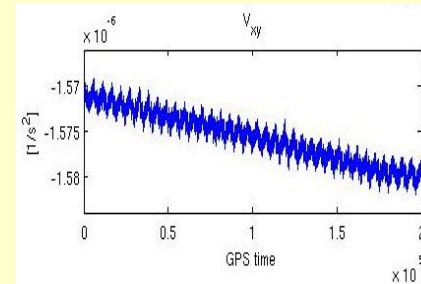
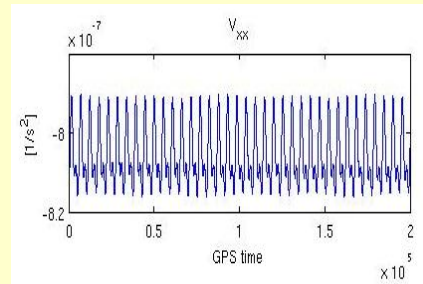


IV. GOCE műhold eredményei

GOCE mérések

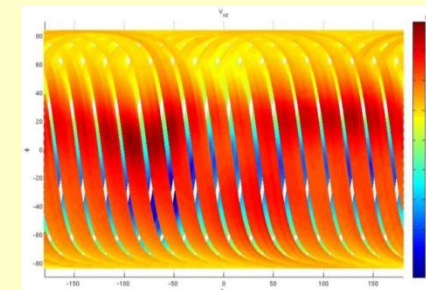
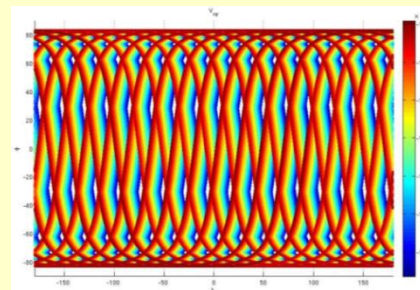
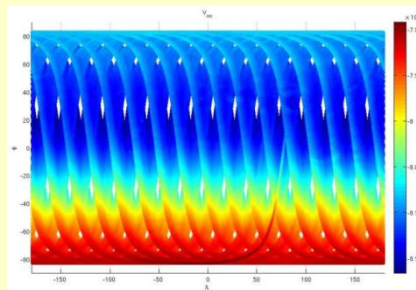


GOCE mérések

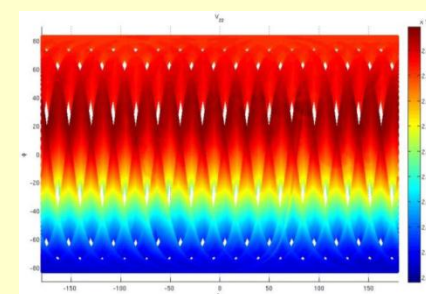
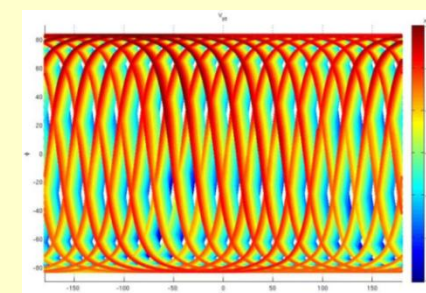
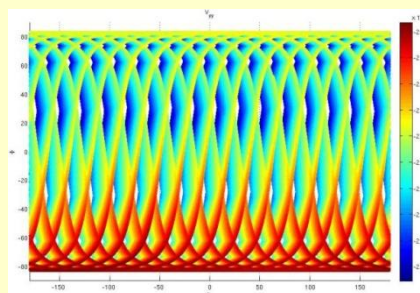


200.000 epocha időSORA

GOCE mérések

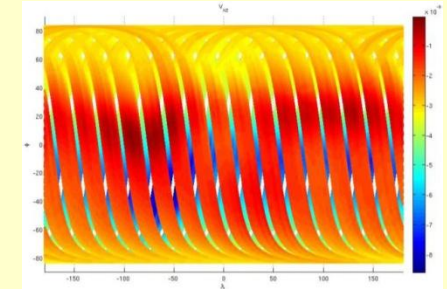
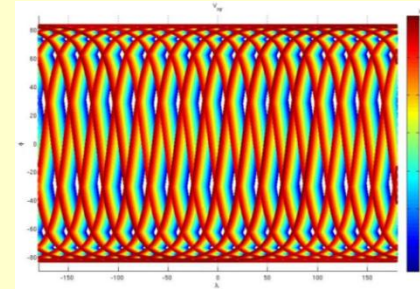
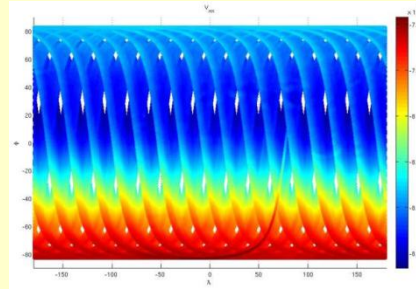


Teljes lefedettség
„jó” felbontásban:
2 hónap alatt

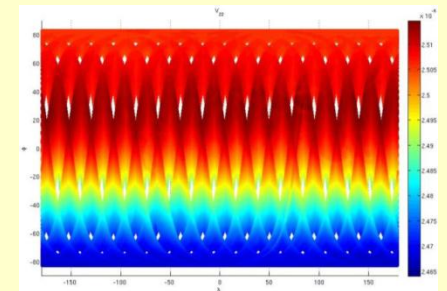
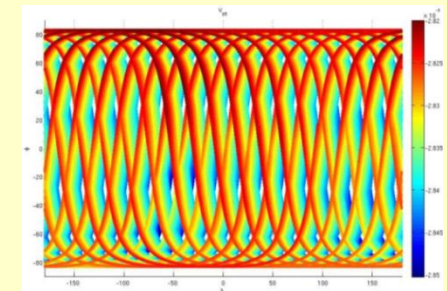
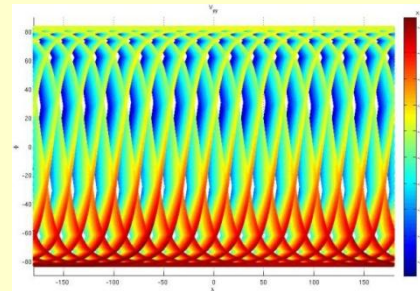


200.000 epocha időSORa
a Föld felszínére vetítve

GOCE mérések feldolgozása



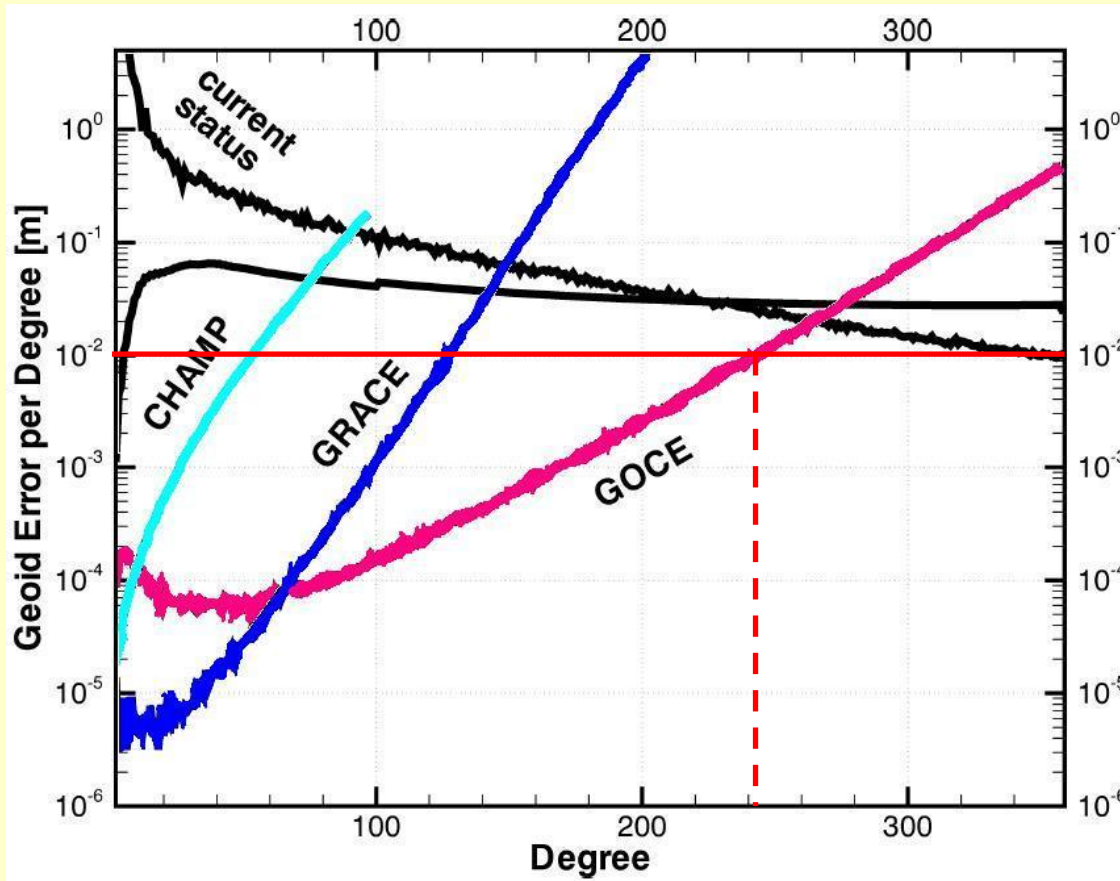
Alapelv: Az inverz feladat
kiegyenlítése a Legkisebb
Négyzetek Módszerével



$$(V_{ij}, r, \varphi, \lambda) \rightarrow GM \overline{K_{nm}}$$

$$V(r, \varphi, \lambda) = \frac{GM}{R} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{R}{r} \right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (C_{nm} \cos m \lambda + S_{nm} \sin m \lambda) P_{nm}(\sin \varphi)$$

GOCE műhold eredményei



Pontossági mérőszám

fokvariancia: pontosság a (gömbharmonikus fokával leírt) térbeli felbontás függvényében.

cm-es geoid: mintegy 240 fokig és rendig (kb. 170 km-es felbontás)

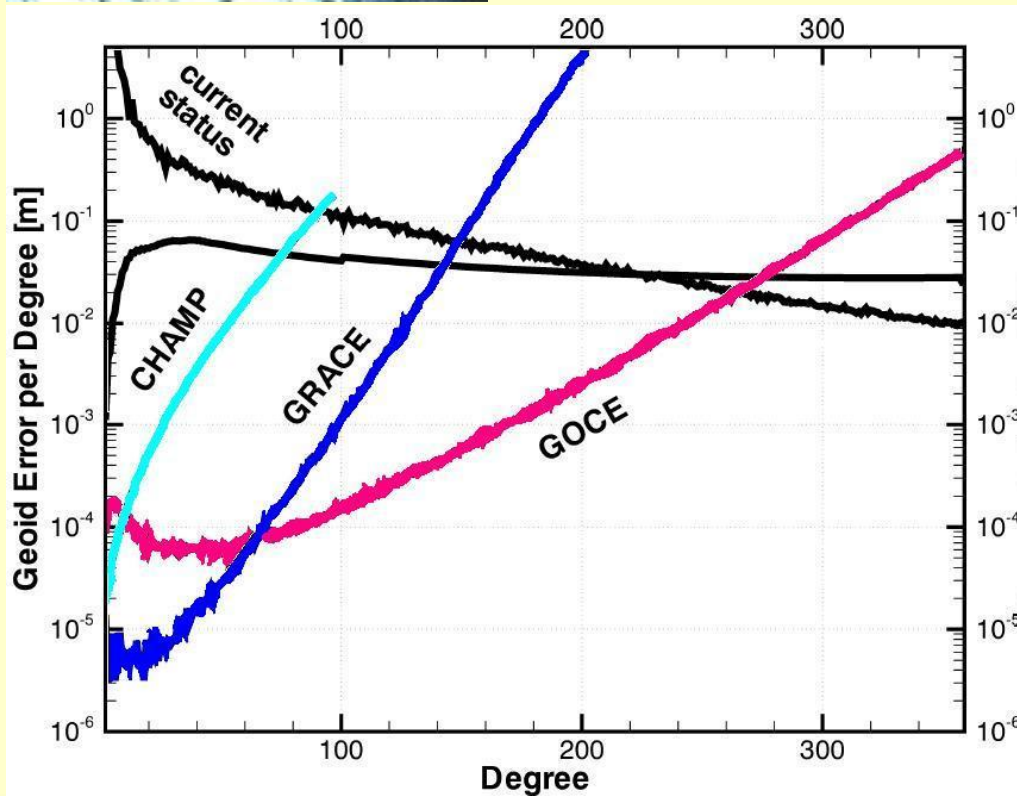
$$V(r, \varphi, \lambda) = \frac{GM}{R} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{R}{r} \right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (C_{nm} \cos m \lambda + S_{nm} \sin m \lambda) P_{nm}(\sin \varphi)$$

Előzmények: CHAMP



erőssége:

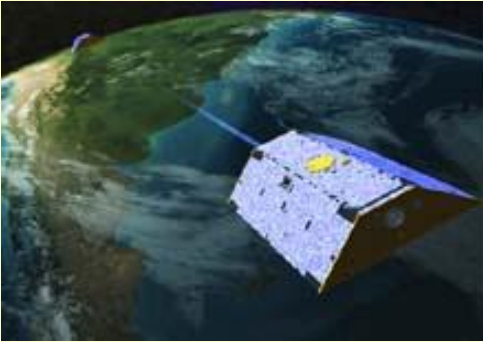
statikus geoid hosszúhullámú komponense



eredmény:

Az első CHAMP modell (2 év mérés alapján) jobbnak bizonyult, mint az összes korábbi műhold adatai alapján meghatározott geoid.

Előzmények: GRACE



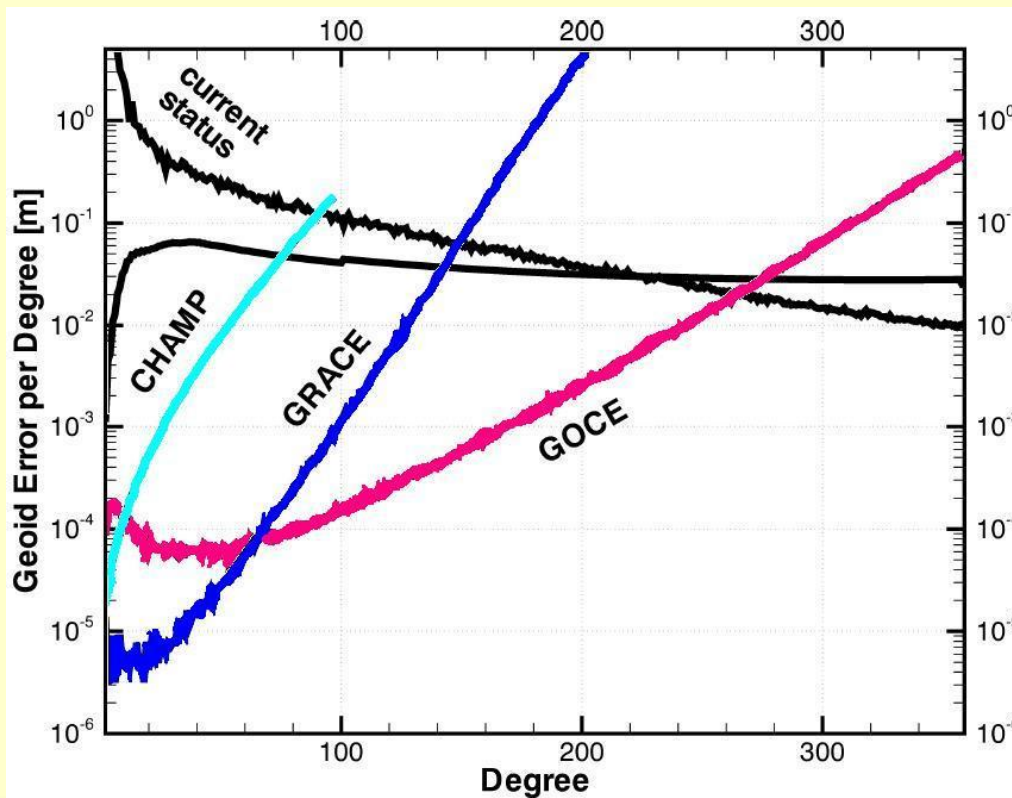
erőssége:

a geoid középhullámú komponense
valamit az időben változó geoid

eredmény:

Az első GRACE modell
(2 hónap mérés alapján)
jobbnak bizonyult, mint az
összes korábbi műhold
adatai alapján meghatáro-
zott geoid (beleértve a
CHAMP-et is).

A mért időbeni változások
geodinamikai felhasználást
tett lehetővé.

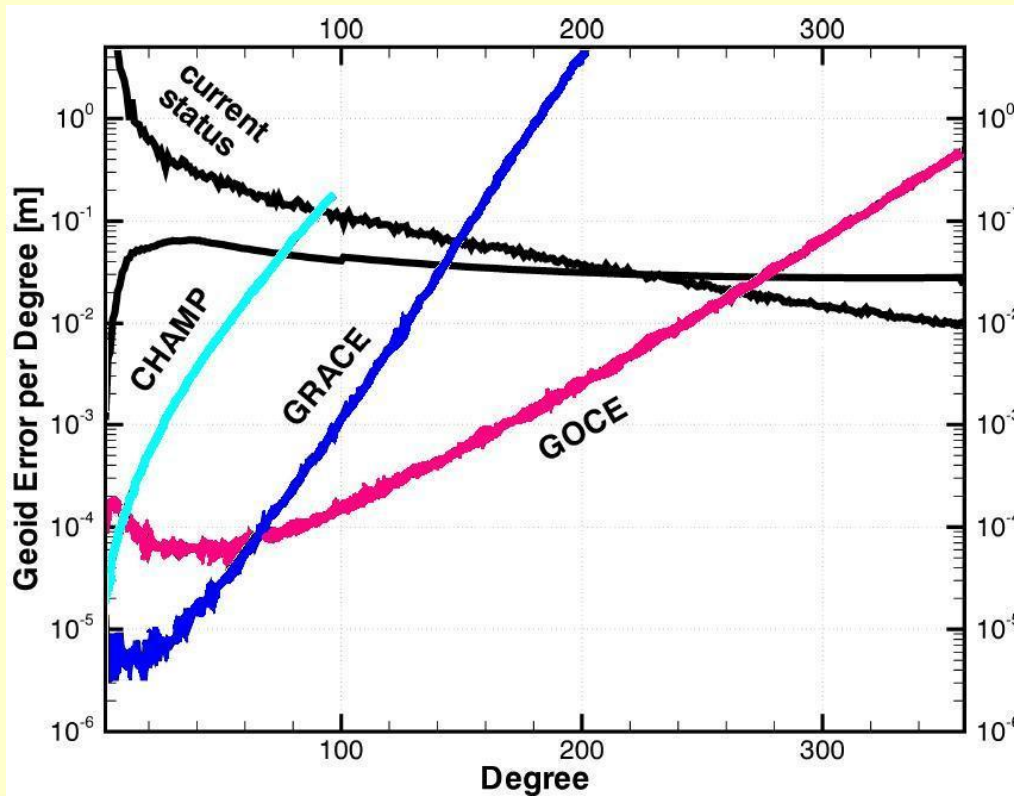


GOCE



erőssége:

statikus geoid rövidhullámú komponense



eredmény:

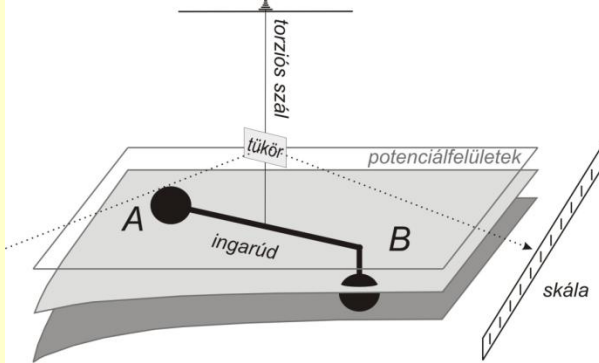
Az eredmények nagyon „jók”, különösen a GRACE mérésekkel együttesen feldolgozott modellek jók. Jelenleg GOCE mérések alapján időbeli változások meghatározásának lehetőségét vizsgálják.



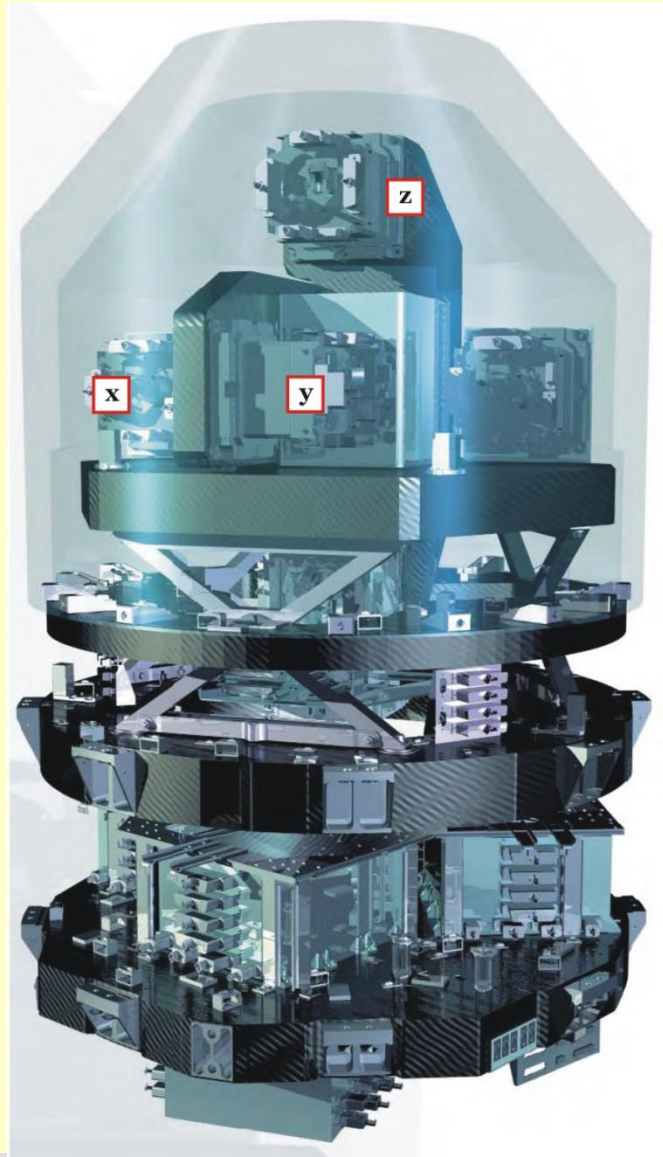
V. Eötvös-íng vs. GOCE

Eötvös-inga vs. GOCE

Gradiométer:



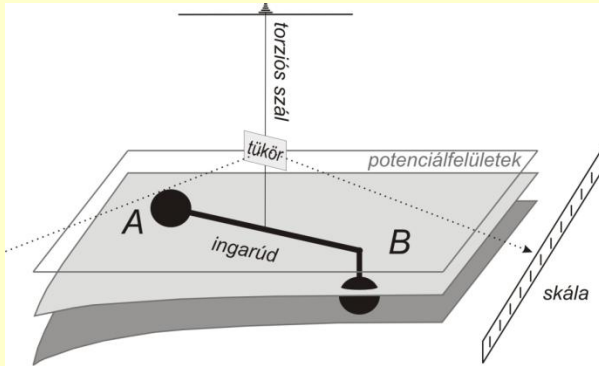
mechanikus szerkezet



kapacitív elven működik

Eötvös-inga vs. GOCE

Gradiométer:



mérési mennyiség:

nehézségi erő térbeli egyenetlenségéből adódó forgatónyomaték hatása

próbatest elmozdulását blokkoló visszacsatolási feszültség térbeli eltérései

a technológia kritikus eleme:

torziós szál:

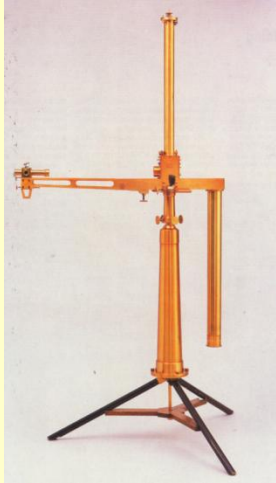
évekig edzették, hogy anyagában maradandó feszültség ne legyen.
0,02-0,03 mm vékony platina vagy wolfram szál

aranszál:

szerepe a próba test polarizálása, de nem hathat a test mozgására.
5 μ m vékony aranszál

Eötvös-inga vs. GOCE

Mérések felhasználása:



lokális

felbontás:



globális (esetleg regionális)

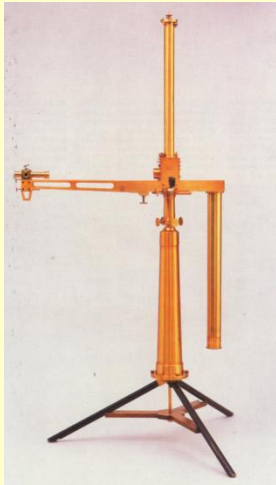
felhasználási területek:

Ipari: nyersanyag kutatás
Tudományos: geológiai és geofizikai kutatások
súlyos és tehetetlen tömeg ekvivalenciája

Ipari: műholdas technikák (különösen GPS) pontosítása
Tudományos: globális oceanográfiai és hidrológiai modellek
globális felmelegedés vizsgálata
(jégolvadás, globális tengerszint emelkedése)

Eötvös-inga vs. GOCE

Mérések felhasználása:



lokális

felbontás:



globális (esetleg regionális)

Köszönöm a figyelmet!

Ipari: nyersanyag kutatás
Tudományos: geológiai és geofizikai kutatások
súlyos és tehetetlen tömeg ekvivalenciája

Ipari: műholdas technikák (különösen GPS) pontosítása
Tudományos: globális oceanográfiai és hidrológiai modellek
globális felmelegedés vizsgálata
(jégolvadás, globális tengerszint emelkedése)