Eötvös-inga az űrben

Földváry Lóránt

BME Általános- és Felsőgeodézia Tanszék

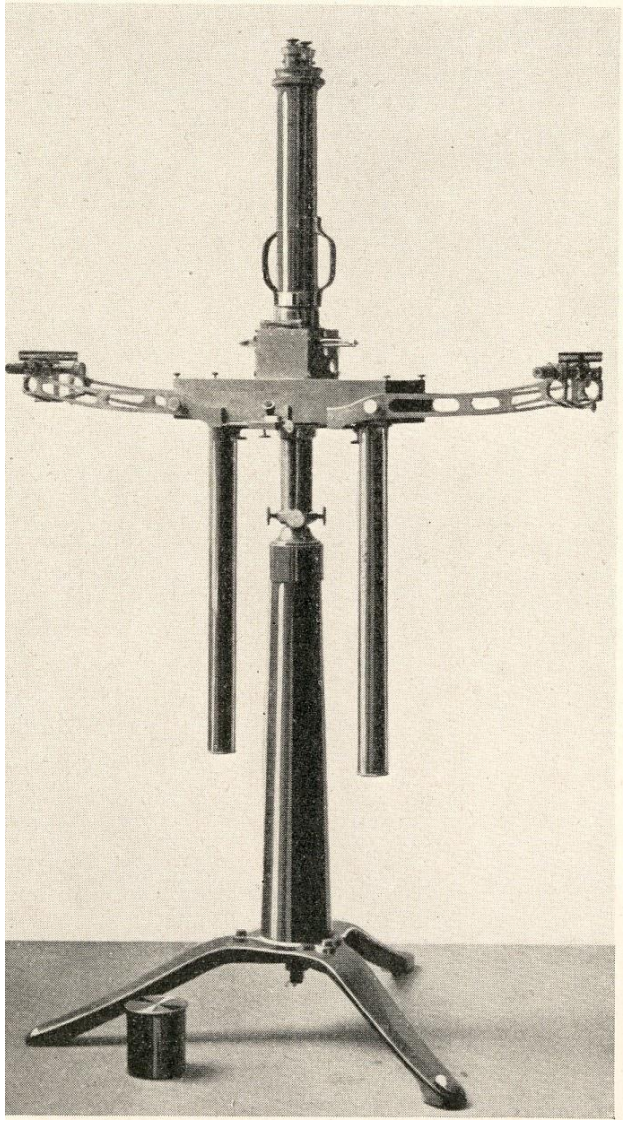
EÖTVÖS 175

Eötvös 175 Tudományos Emlékülés
MTA, 2023. szeptember 20.

BUDAPESTI MŰSZAKI
ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
Építőmérnöki Kar - építőmérnöki képzés 1782 óta
Általános és Felsőgeodézia Tanszék

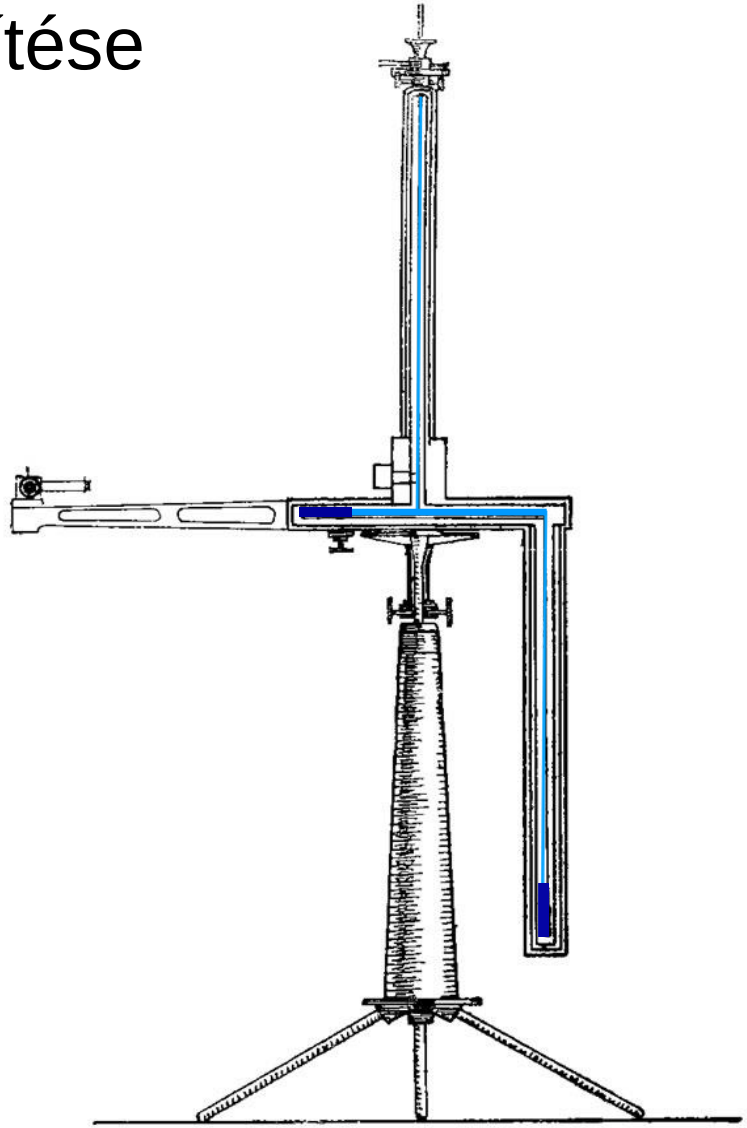
Eötvös jubileumi év

Eötvös Loránd
(1848-1919)



Eötvös-inga

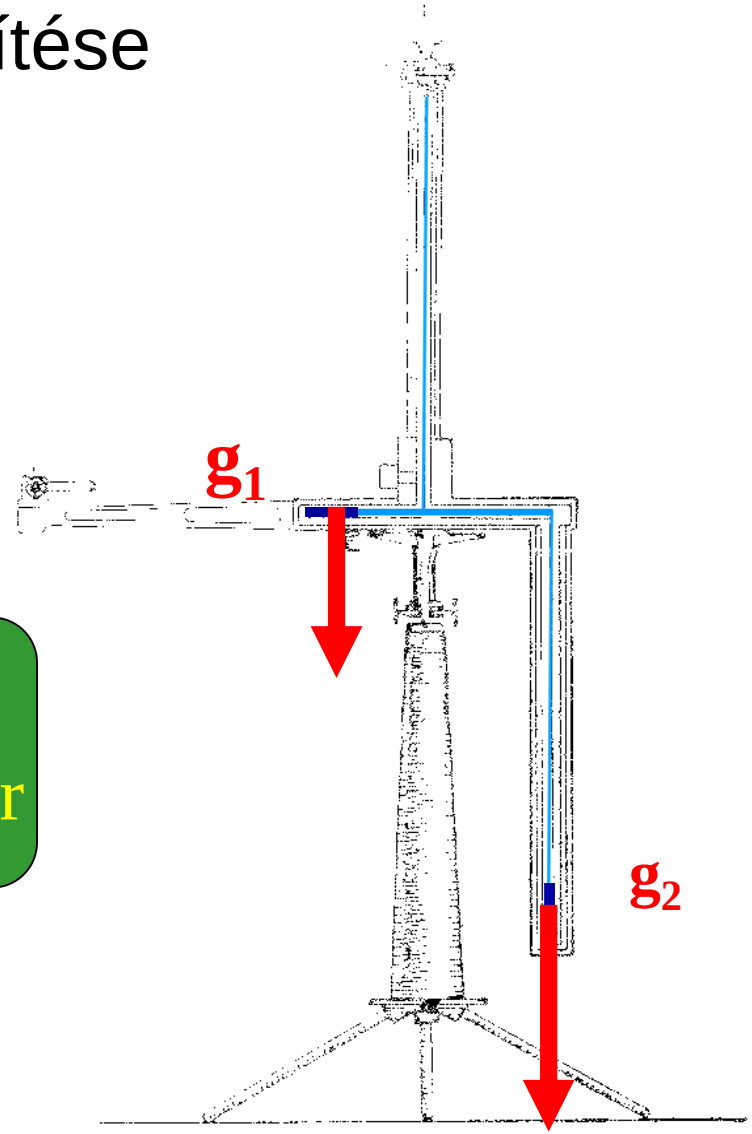
Az Eötvös-inga felépítése



Eötvös-inga

Az Eötvös-inga felépítése

$g_1 \neq g_2$

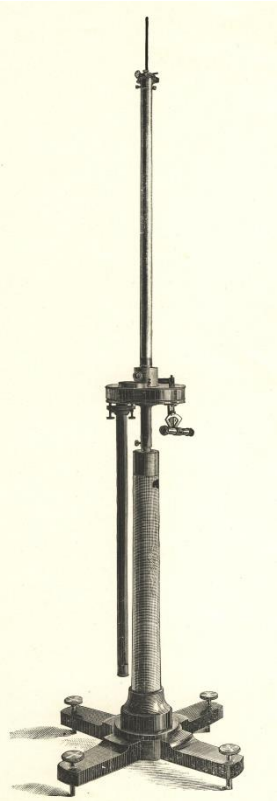


$\Delta g = g_2 - g_1$

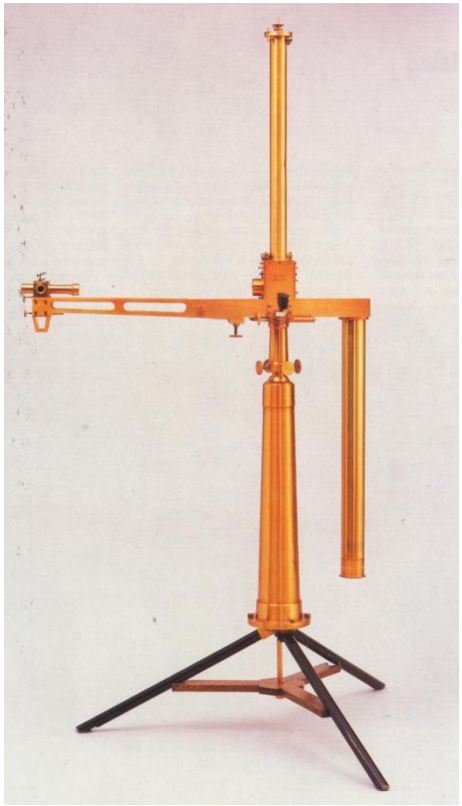
gradiens = Δg / r

Eötvös-inga

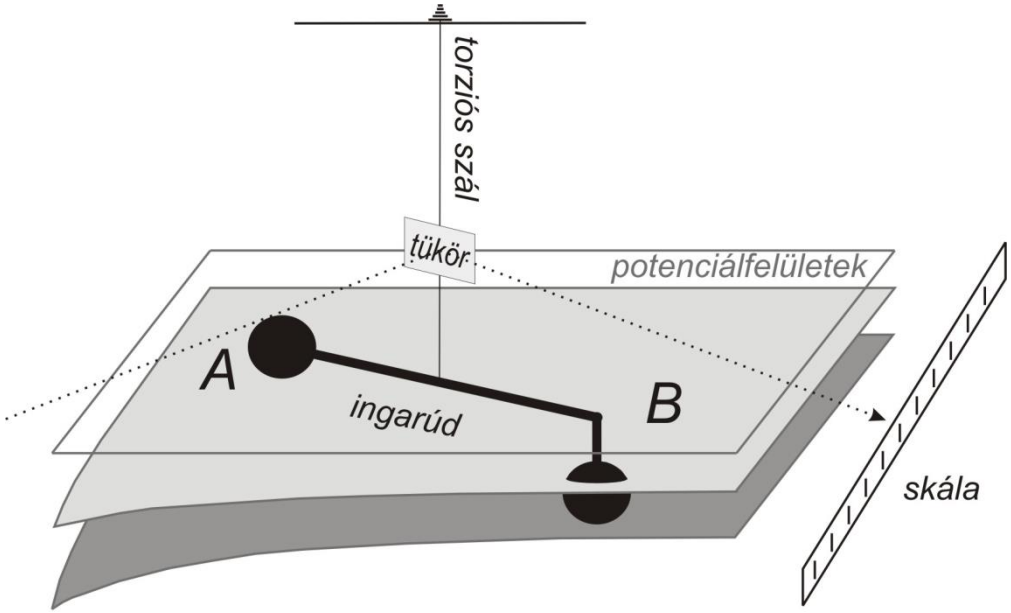
Eötvös Loránd torziós ingái és mérési alapelve



horizontális variométer
1890



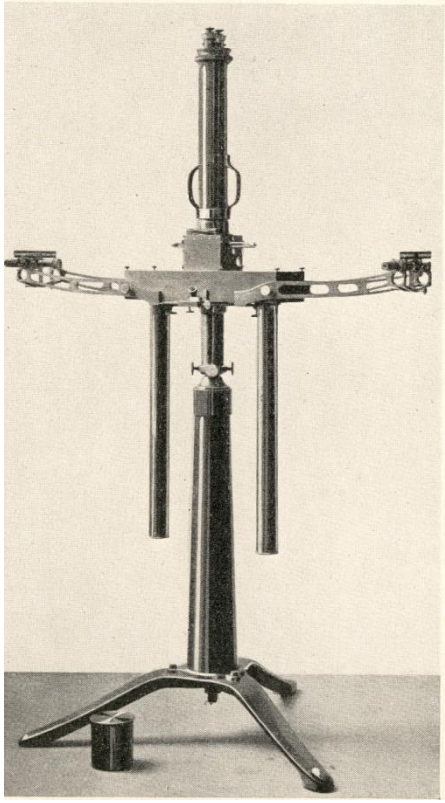
balatoni inga
1898



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

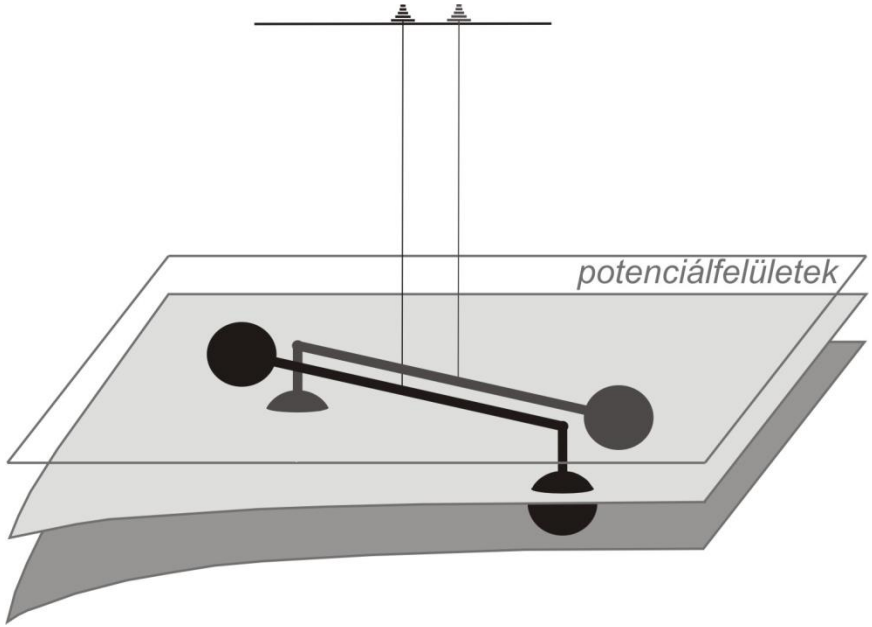
Eötvös-inga

Eötvös Loránd torziós ingái és mérési alapelve



kettős nagy eszköz
1902

kettős kis eszköz
1908

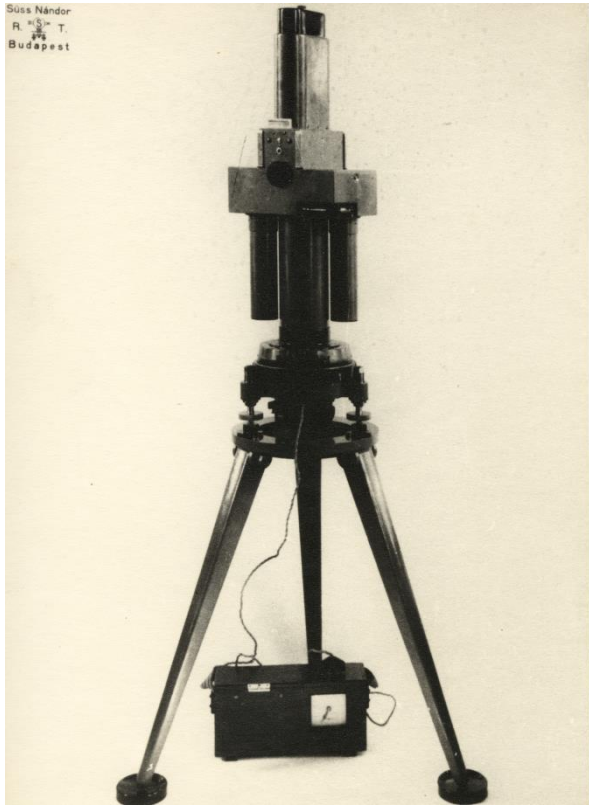


Alapelv: Eötvös két ingát egymás mellé helyezett, egymáshoz képest 180 fokkal elfordított helyzetben.

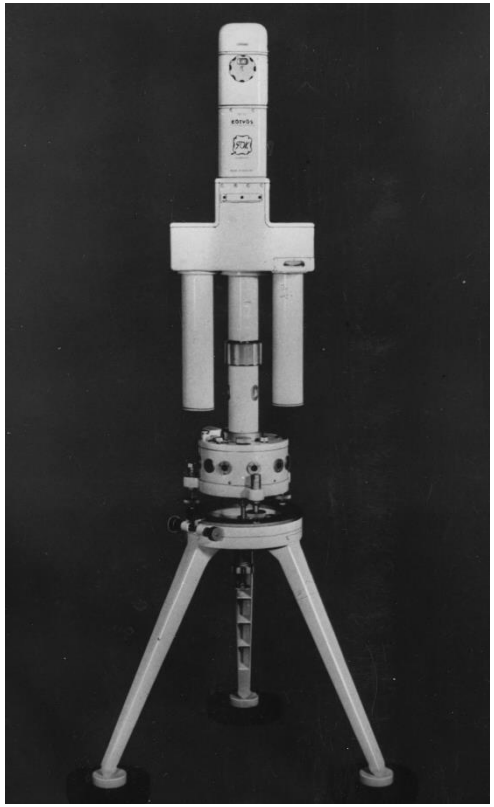
Eötvös-inga

Későbbi híresebb fejlesztések

Eötvös-Pekár
1926



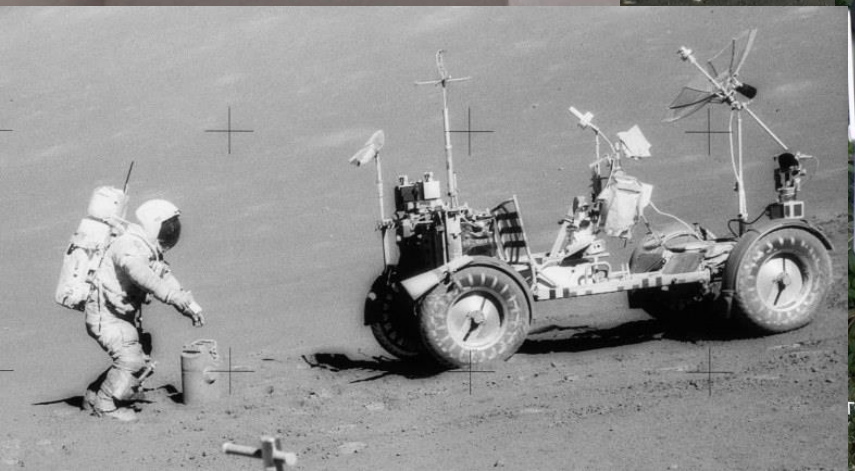
Auterbal
1928

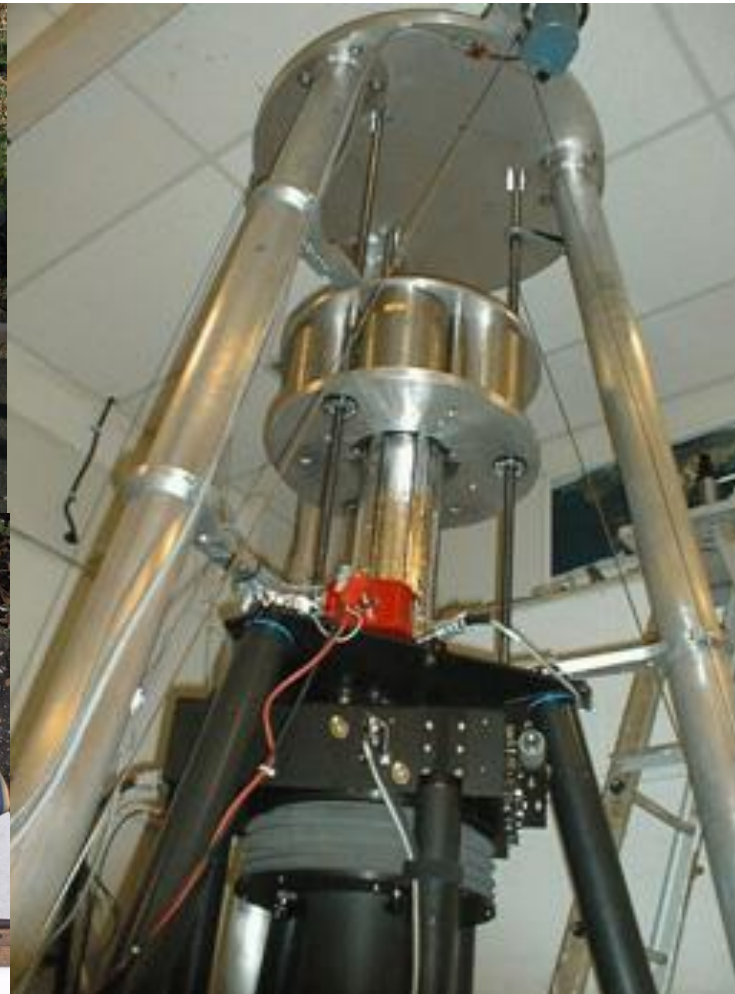


E-54
1954

Graviméterek

Az Eötvös-inga gyakorlati használata a 60-as évekre megszűnt. Szerepét a graviméterek (a „g”-t mérik) vették át.





GOCE

Mérési alapelv:

- a műholdas gradiometria megvalósulása

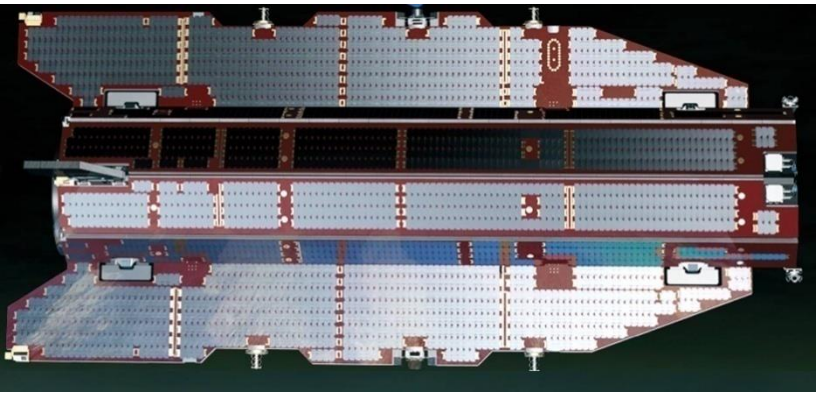
Pálya:

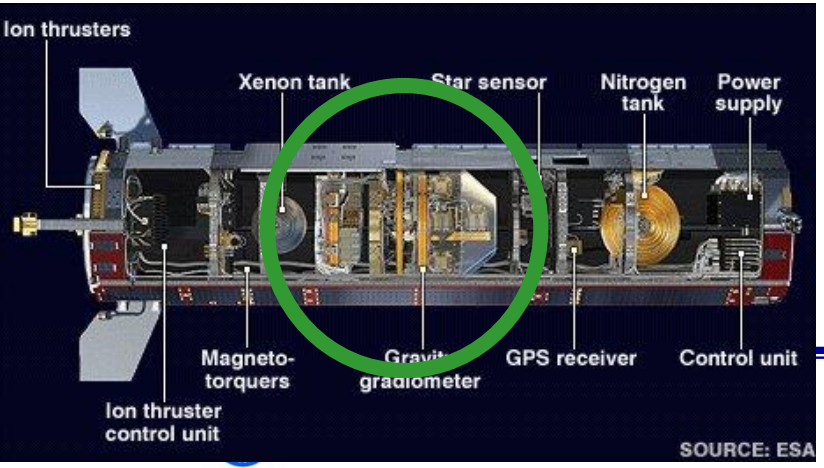
- közel köralakú
- magasság: 260 km
- inklináció: 96,7°

Működési időszak:

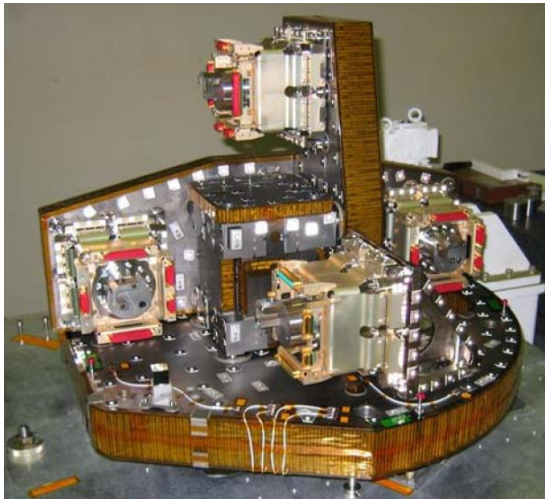
- 2009. március 17. és 2013. november 19. között

GOCE





A GOCE űrgradiométer

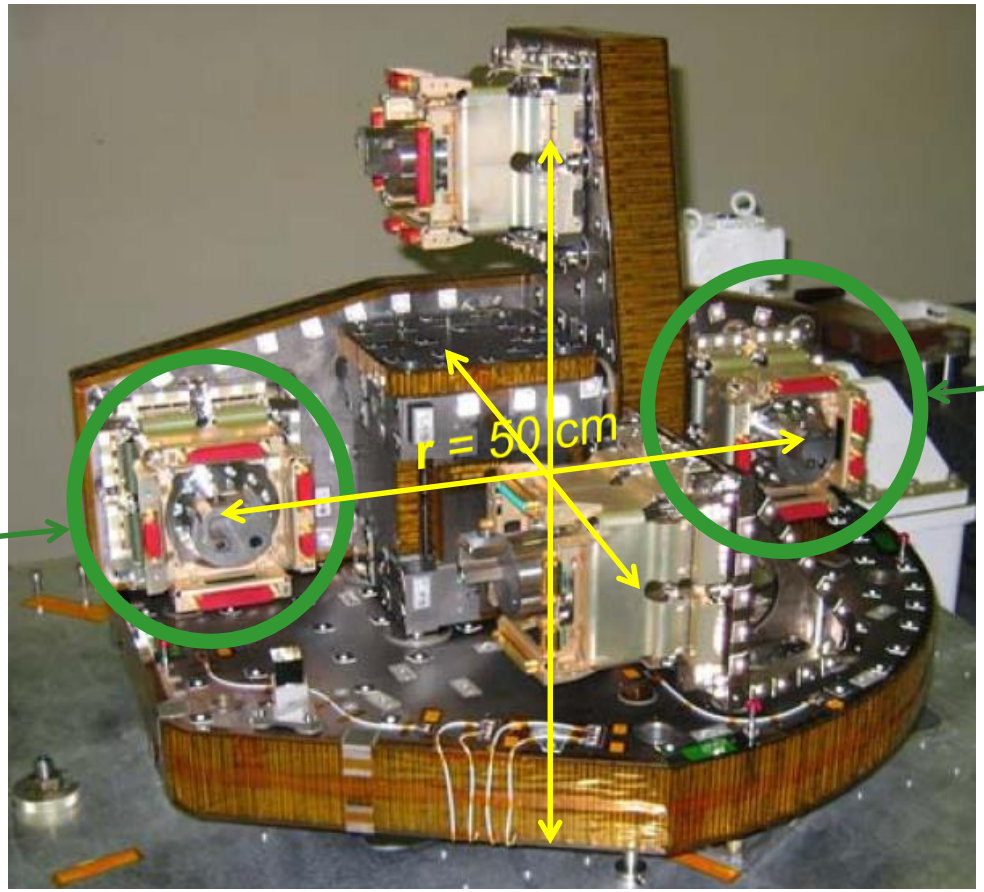


GOCE

Űrgradiométer mérési alapelve

$\Delta g = g_2 - g_1$

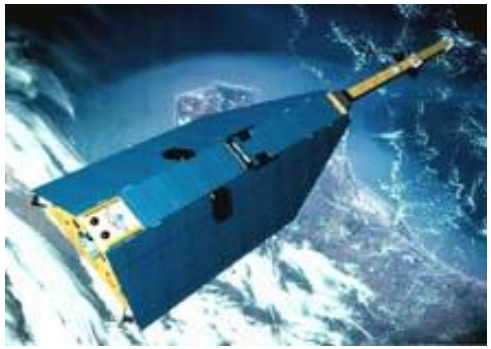
gradiens = Δg / r



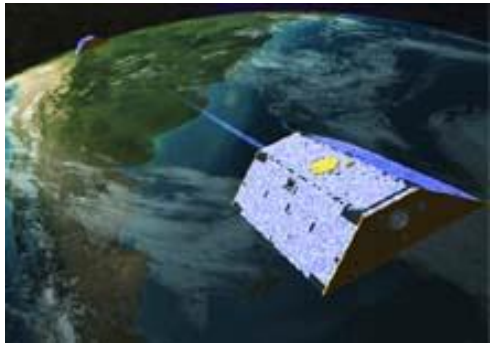
2. gyorsulásmérő

1. gyorsulásmérő

Műholdas gravimetria az ezredfordulón



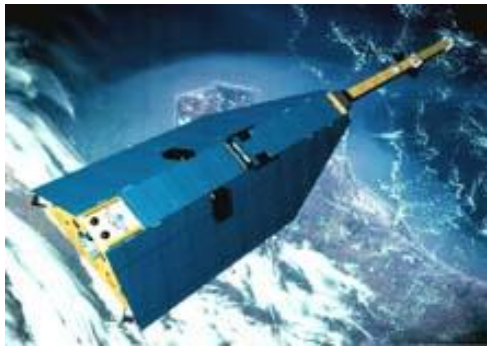
CHAMP műhold (2000-2010)

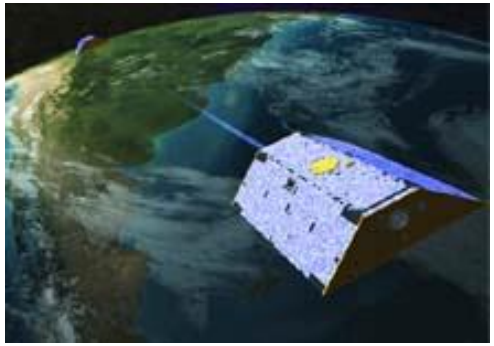


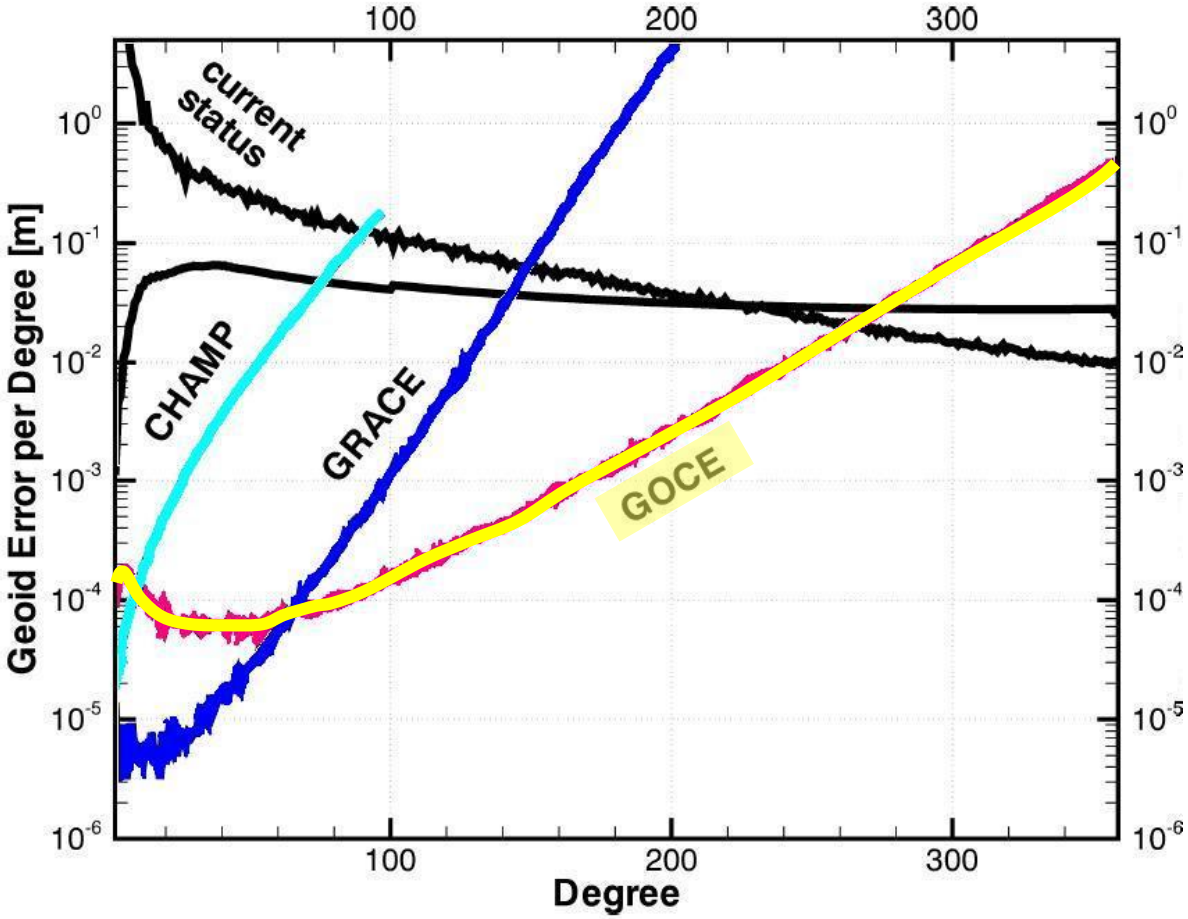
GRACE műholdpár (2002-2017)

GOCE műhold (2009-2013)

Műholdas gravimetria az ezredfordulón







A műholdas gravimetria jövője

Eddigi megoldások

- CHAMP: műholdpályák alapján (High-Low SST)
- GRACE: műholdak közötti távolságváltozás mérése (Low-Low SST)
- GOCE: űrgradiometria; gradiensek közvetlen mérése (SGG)
- GRAIL: Hold körül Low-Low SST

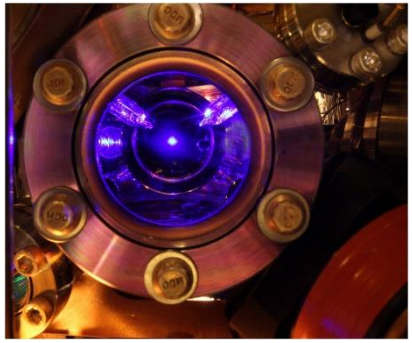
Jelenleg üzemelő megoldás

- GRACE-FO: a GRACE folytatása, Low-Low SST, 2017-től

Jövőbeni megoldások

- optikai órák
- hidegatom-interferometria

Optikai órák

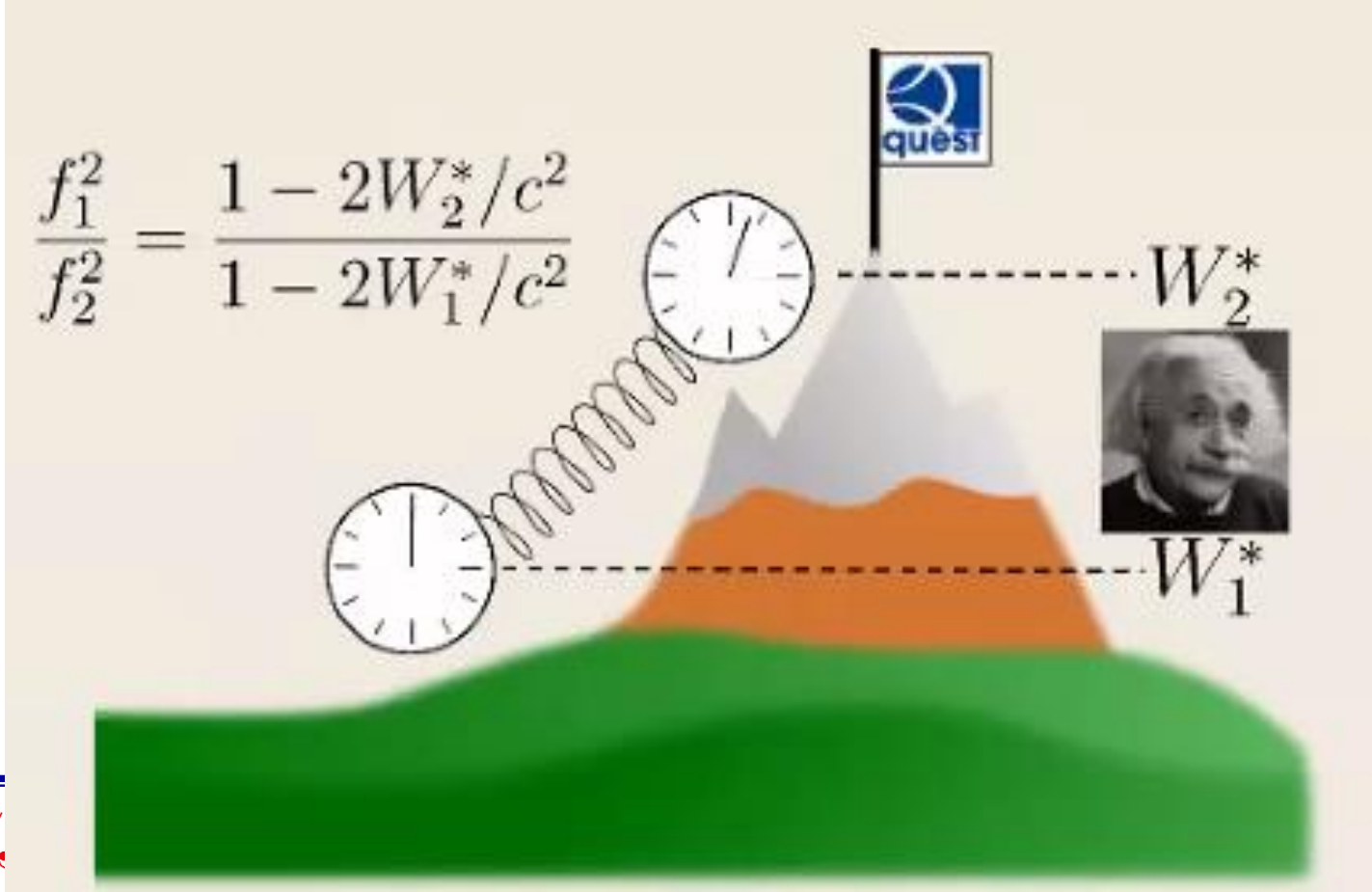


Optikai órák

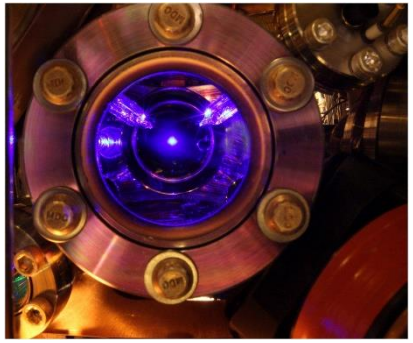
- frekvenciaetalon: atomi elektronátmenet frekvenciája az elektromágneses spektrum optikai tartományában

Relavitisztikus (kronometrikus) szintezés

- alapelv: az optikai óra frekvenciája függ a potenciáltól



Optikai órák

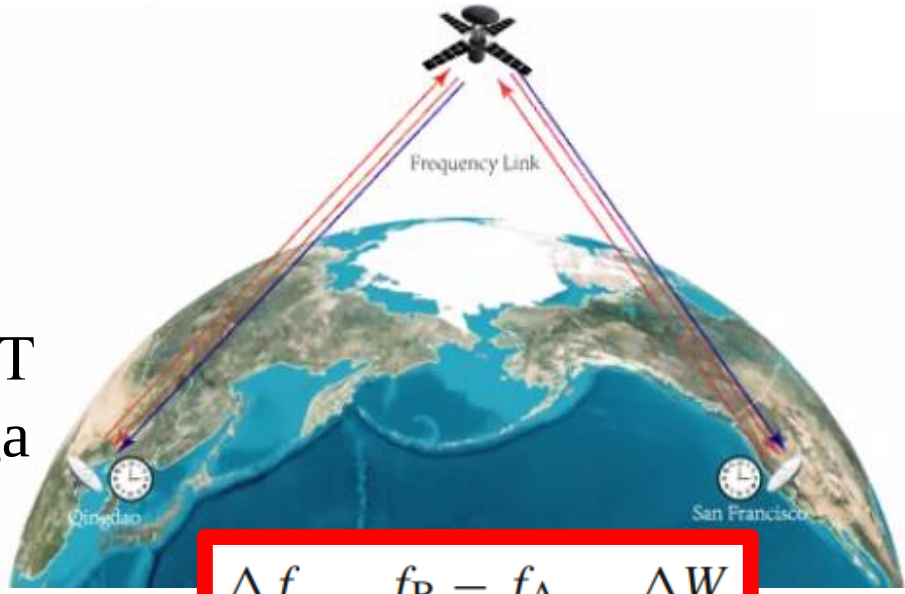


Optikai órák

- frekvenciaetalon: atomi elektronátmenet frekvenciája az elektromágneses spektrum optikai tartományában

Optikai órák műholdas alkalmazása

- különböző elrendezéseket szimulálnak
- optikai órák relatív megbízhatósága
  - itterbium optikai rácsóra: $1{,}4*10^{-18}$
  - egyionos óra: $9{,}4*10^{-19} + 1{,}5*10^{-15}/\sqrt{T}$
- frekvenciaátvitel relatív megbízhatósága
  - mikrohullám: 10^{-16}
  - optikai lézer: 10^{-18}

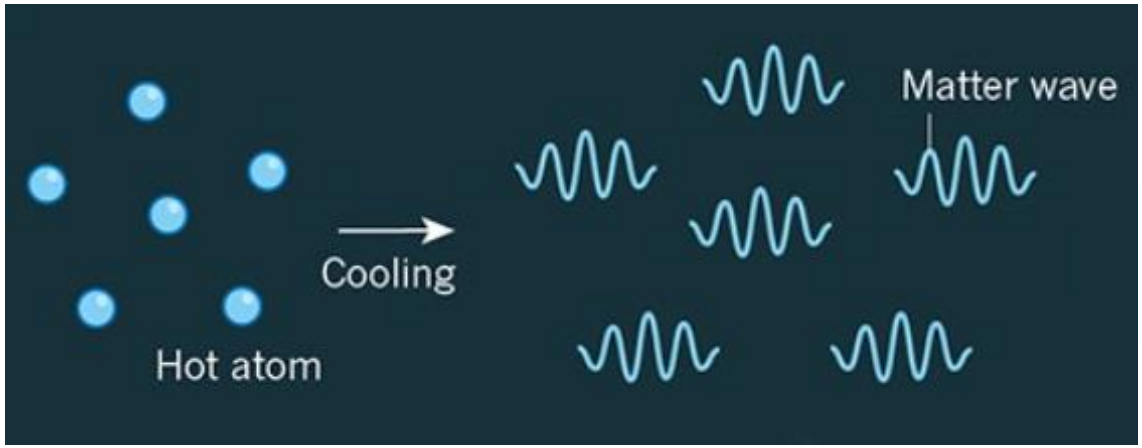


$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{f_B - f_A}{f_A} = \frac{\Delta W}{c^2}$$

Hidegatom interferometria

Hidegatomok

- néhány μK hőmérséklet
- minimális mozgás
- hullámtermészetű (anyaghullámok)
- az anyaghullámok a fényhullámoknál sokkal rövidebbek
- az anyaghullámok terjedési sebessége sokkal kisebb

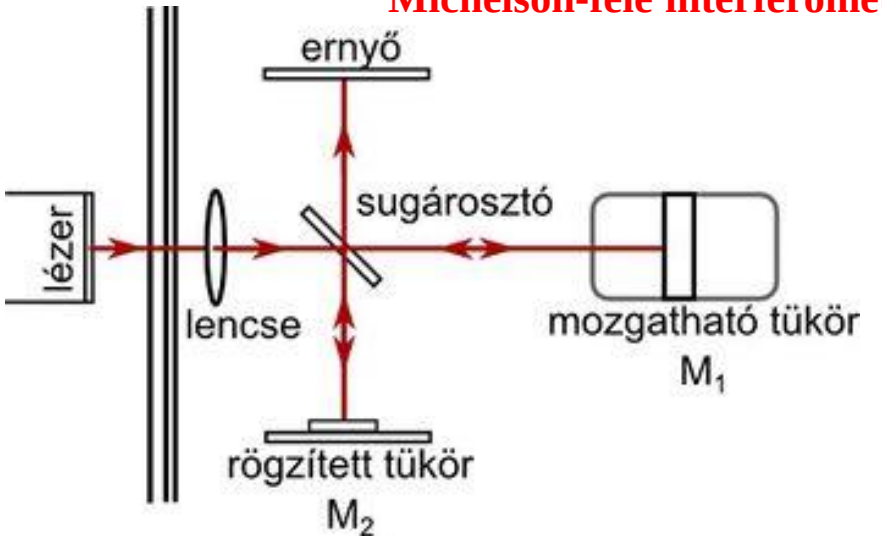


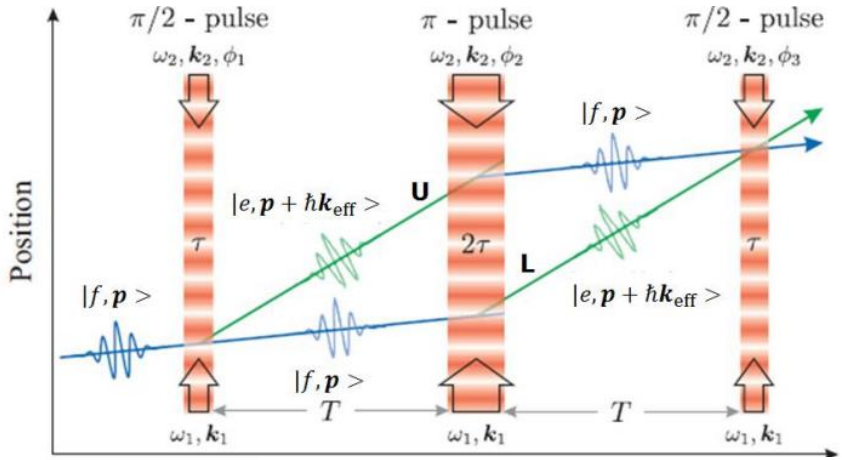
Hidegatom-interferometria

Lézer-interferométer
- optikai (lézer) sugár a mérendő úton a fázis megváltozását hasonlítja össze a kibocsájtott jel fázisával

Hidegatom-interferométer (Cold Atom Interferometry)
- egy hideg atom mozgásának trajektóriája (út) gerjesztés hatására megváltozik, ami az atom hullámfüggvényének fázisában megjelenik

Michelson-féle interferométer



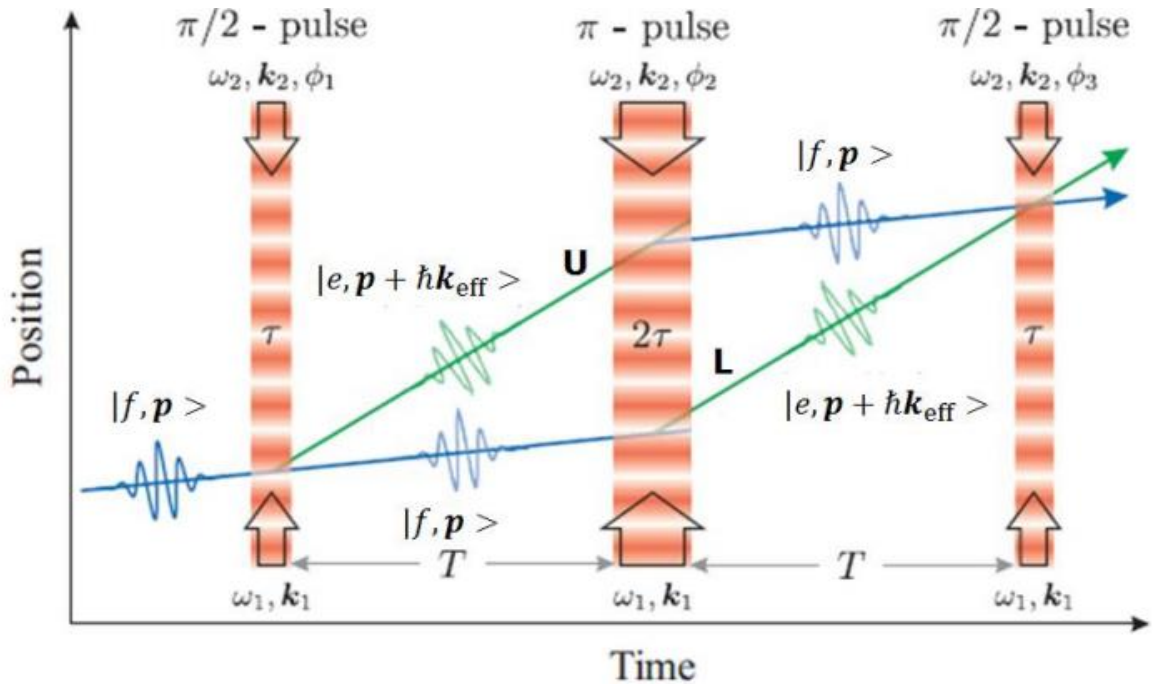


Mach-Zehnder-féle interferométer

Hidegatom-graviméter

CAI graviméter (Quantum Gravimeter)

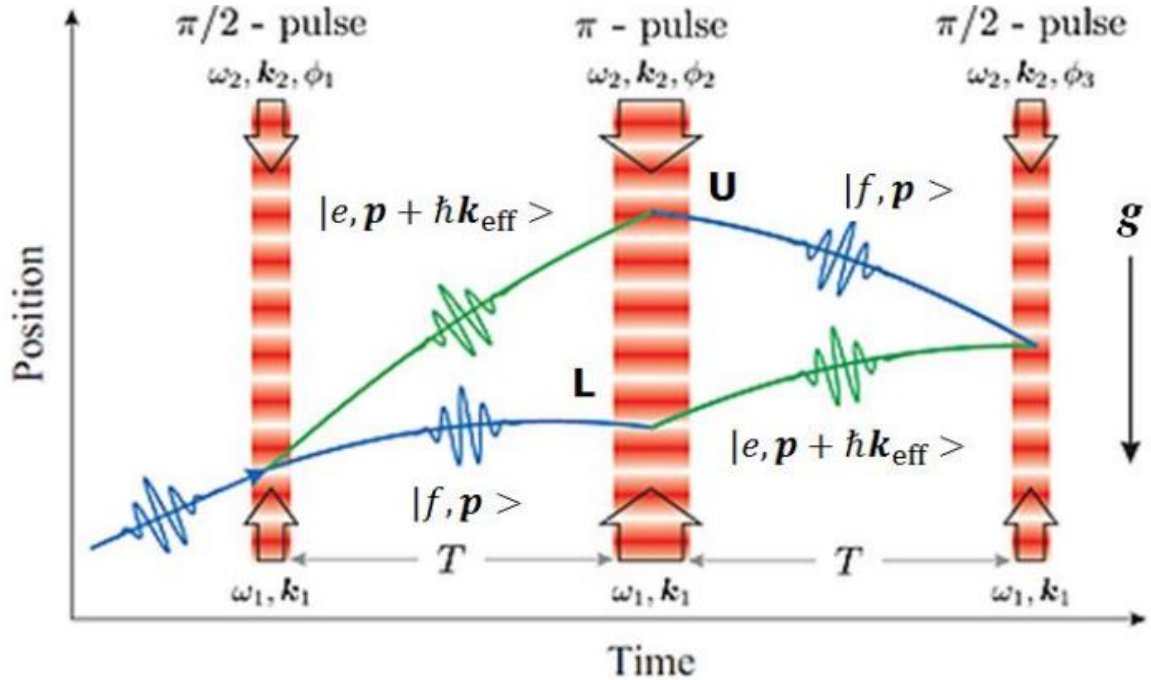
- CAI interferométer



Hidegatom-graviméter

CAI graviméter (Quantum Gravimeter)

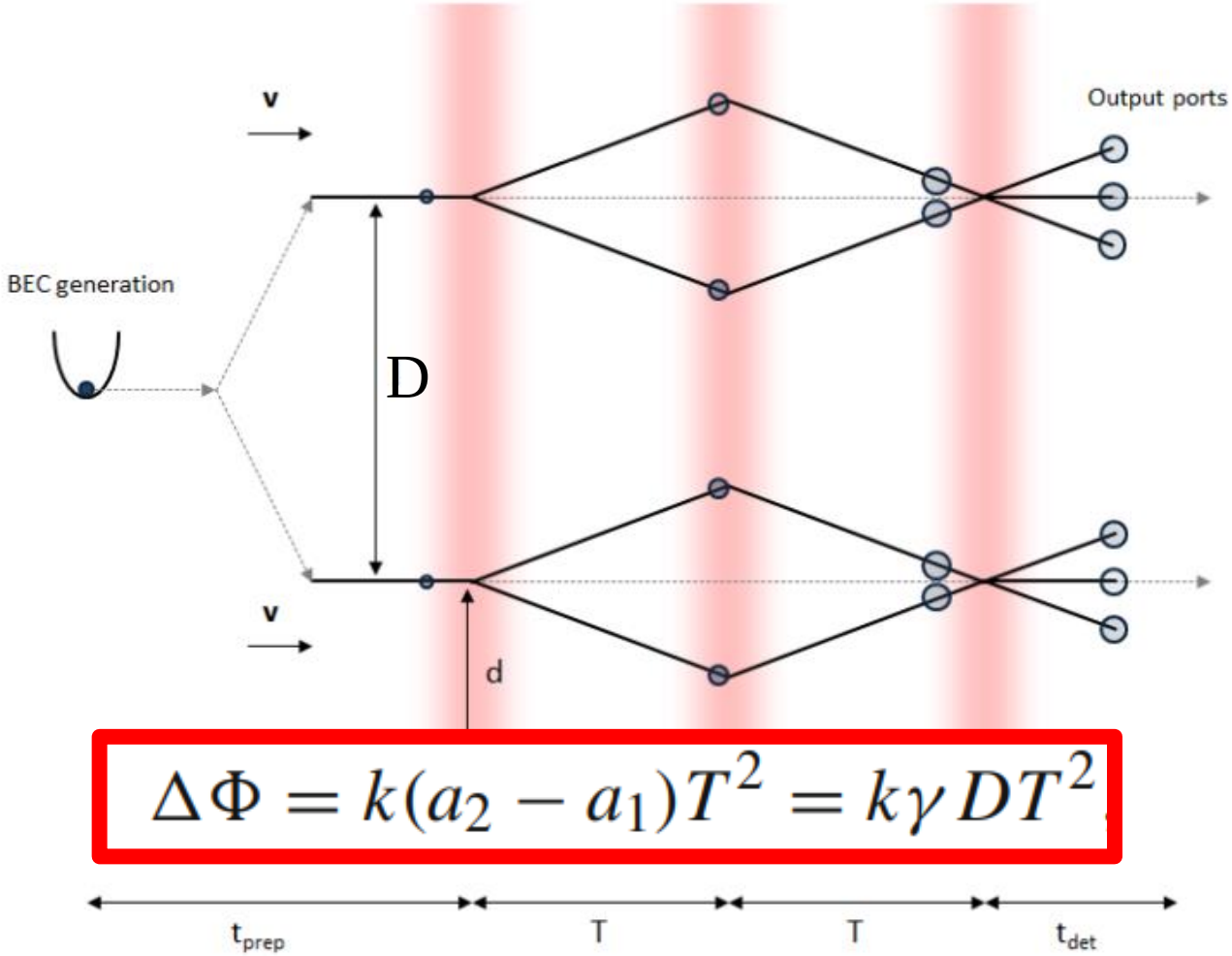
- CAI interferométer nehézségi erőtérben



$$\Delta\Phi = \boldsymbol{k}_{\text{eff}} \cdot \boldsymbol{g}\, T^2 + (\varphi_1 - 2\varphi_2 + \varphi_3)$$

Hidegatom-gradiométer

CAI gradiométer (Quantum Gravity Gradiometer)
- differenciálisan elhelyezett CAI graviméterek

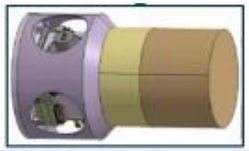


$$\Delta\Phi = k(a_2 - a_1)T^2 = k\gamma DT^2$$

Hidegatom-graviméter / gradiométer

CAI graviméter / gradiométer

- nagy működési stabilitás, kicsi műszerjárás, kedvező zajspektrum
- különböző elrendezéseket szimulálnak
- CAI graviméterek érzékenysége: 5-100 μGal/√Hz
- CAI gradiométerek érzékenysége : 1-3 E/√Hz
- Szimulációk alapján az érzékenység űrben nagyságrendekkel jobb, akár néhány mE/√Hz is elérhető

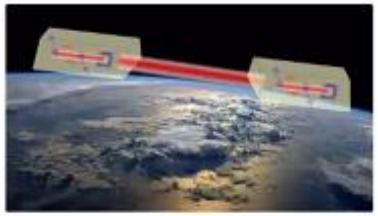


Quantum Pathfinder Mission

$$\Delta\Phi = \boldsymbol{k}_{\mathrm{eff}} \cdot \boldsymbol{g}\, T^2$$

Enhanced Quantum Gradiometer Mission

$$\Delta\Phi = k(a_2 - a_1)T^2$$



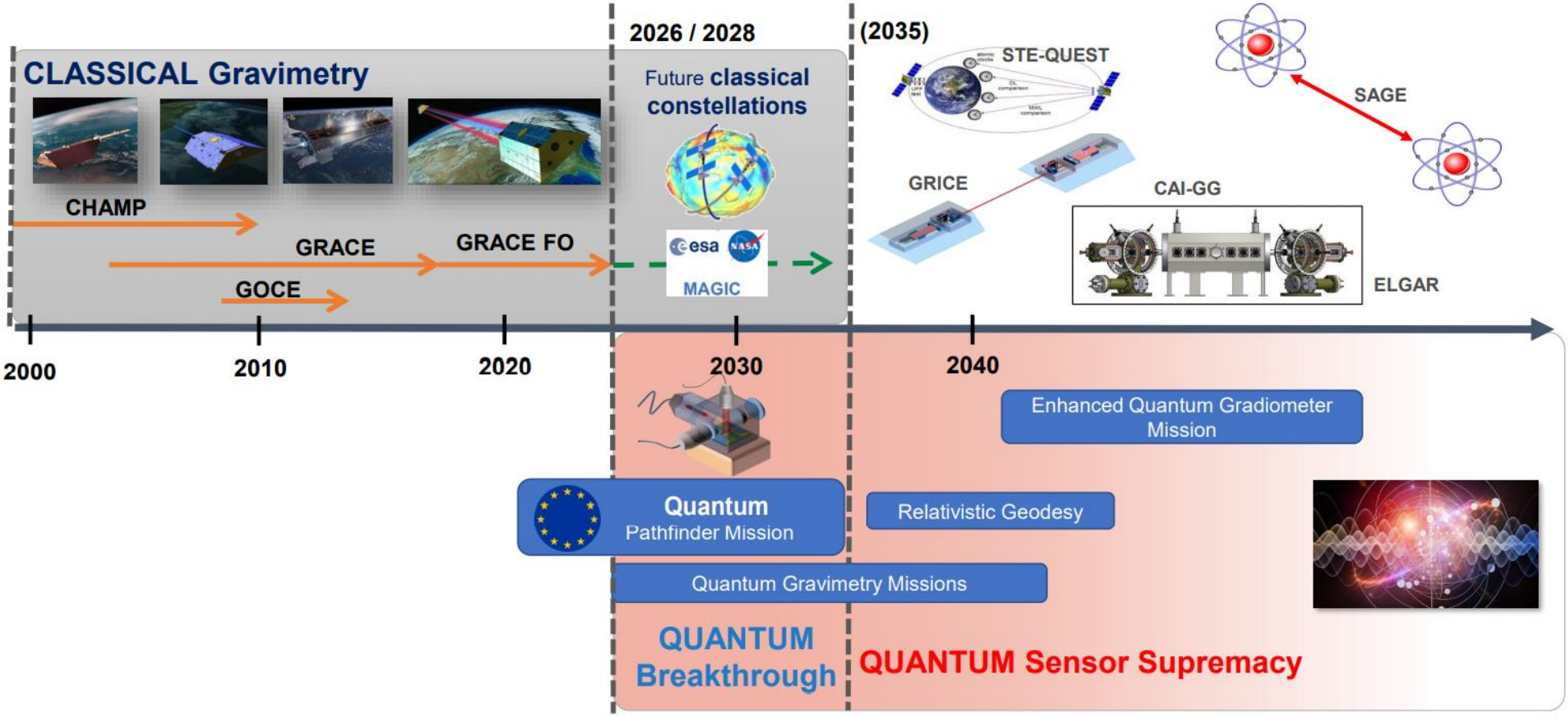
Quantum SST Mission

$$\Delta\Phi = k(a_2 - a_1)T^2$$

Műholdas gravimetria

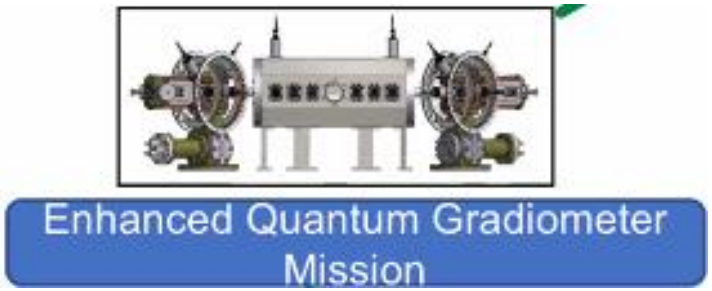
ESA:

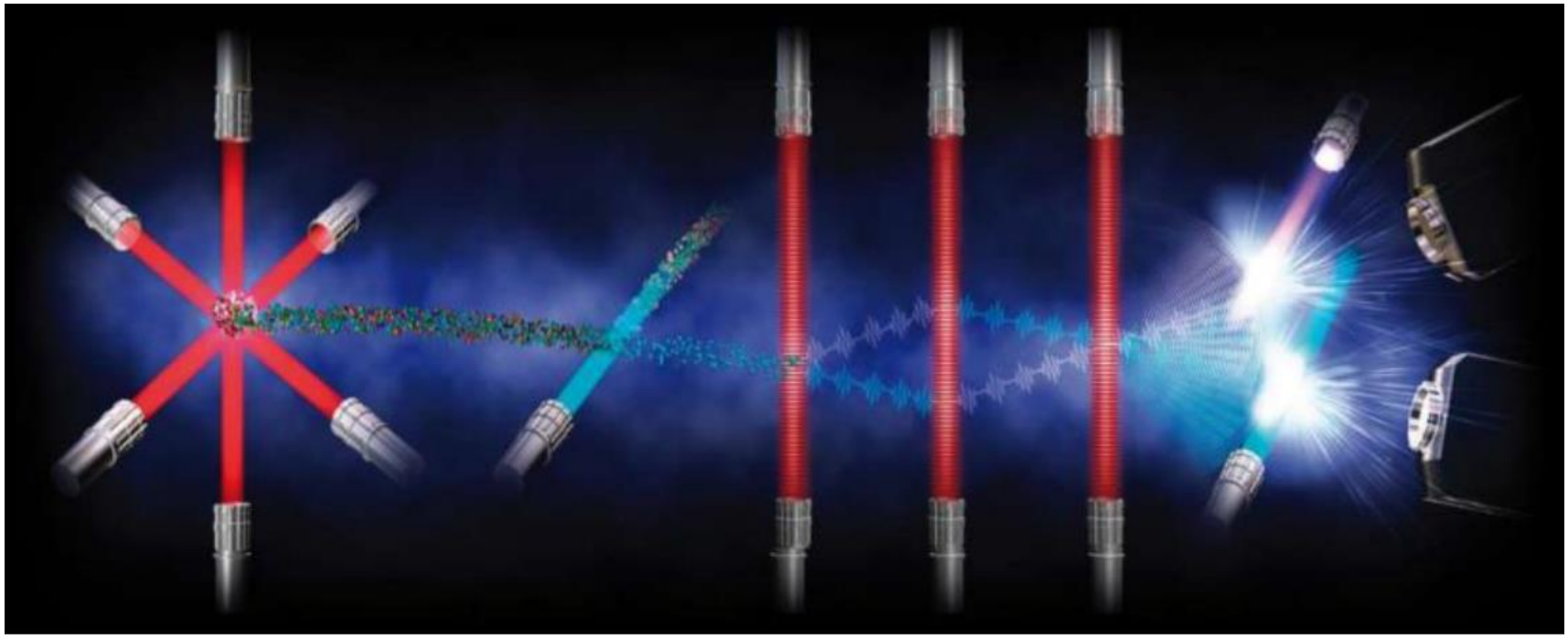
- Quantum Satellite Gravimetry (QSG) munkacsoport



Gradiometria

múlt **jelen** **jövő**



1900 **2010** **2050**

KÖSZÖNÖM A FIGYELMET!