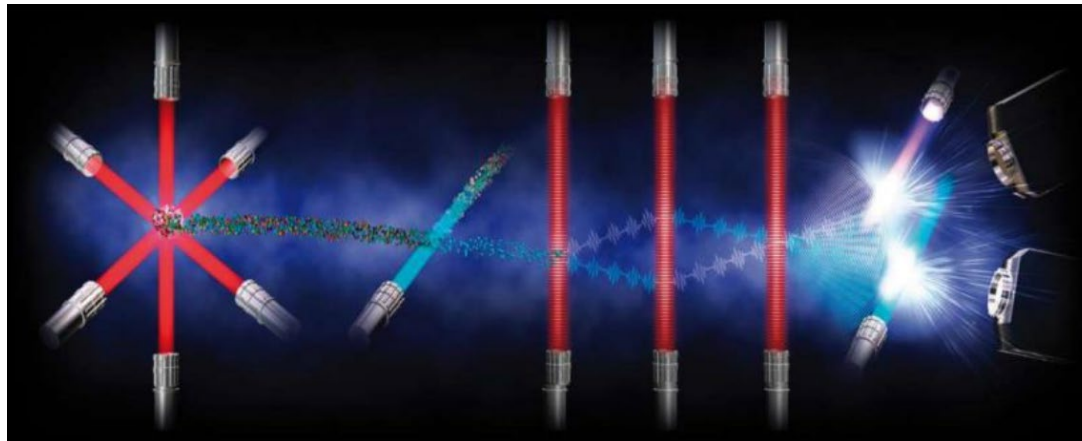


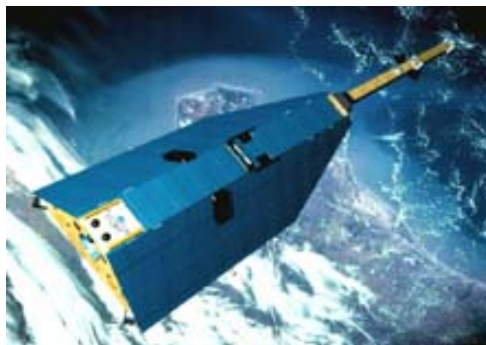
Űr-kvantumgravimetria



Földváry Lóránt

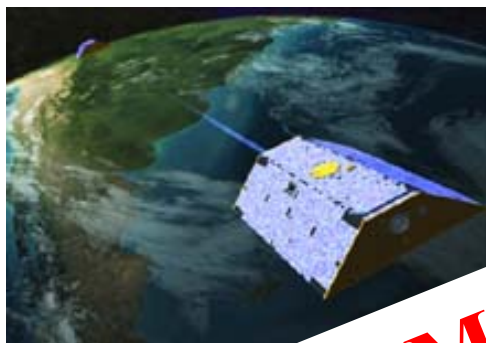
BME, Általános- és Felsőgeodézia Tanszék

A műholdas gravimetria története



CHAMP műhold (2000-2010)

- az első gravimetriai célú műhold



GRACE műhold (2002-2017)

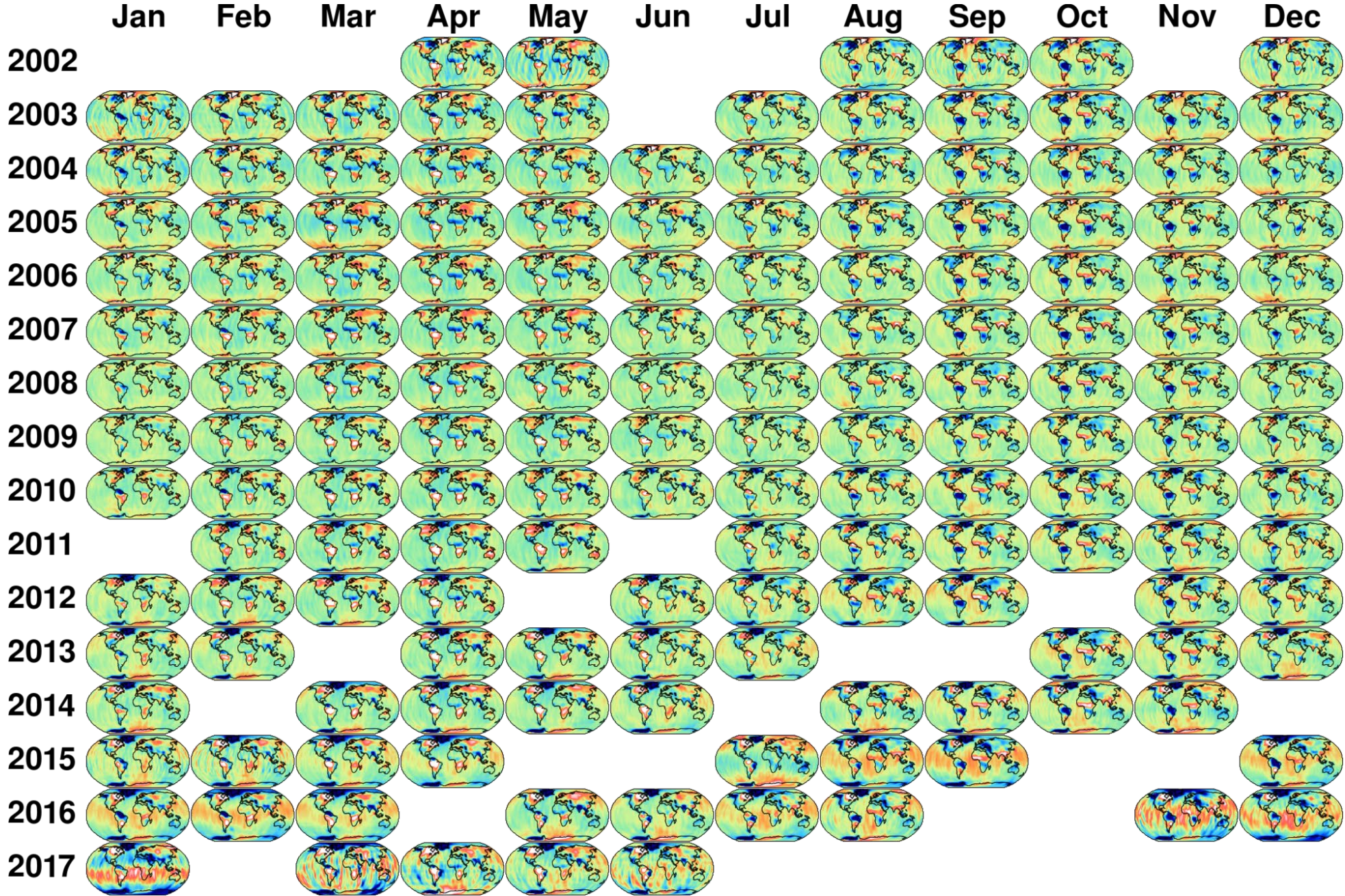
- a Föld tömegeloszlásának és a jég- és víztömeg változásainak mérését is lehetővé tette



GOCE műhold (2009-2013)

- nagyon részletes felbontású képét adta a Föld gravitációs terének

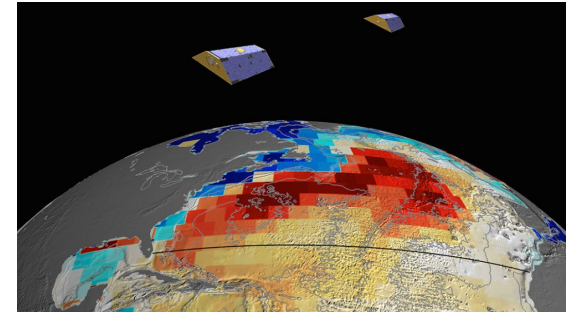
VALAMENNYI KÜLDETÉS LEZÁRVA!



GRACE-FO

A nehézségi erőter időbeni változásai

A GRACE 2002 áprilisa és 2017 júniusa között
hónapos nehézségi erőter modelleket szolgáltatott.



GRACE-FO:

- első modell: 2018 június

Hogyan tovább
a GRACE-FO után?



A GRACE-FO után

Eddigi megoldások

- műholdpályák alapján (High-Low SST)
- műholdak közötti távolságváltozás mérésével (Low-Low SST)
- űrgradiometria (SGG)

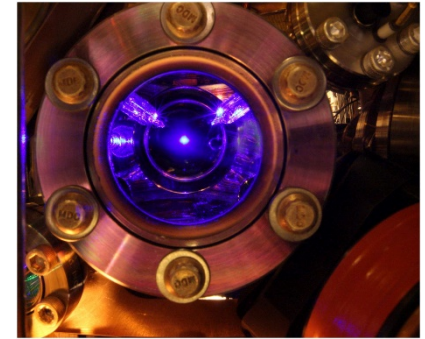
Jövőbeni megoldások

- optikai órák
- hideg atom interferometria

Optikai órák

Optikai órák

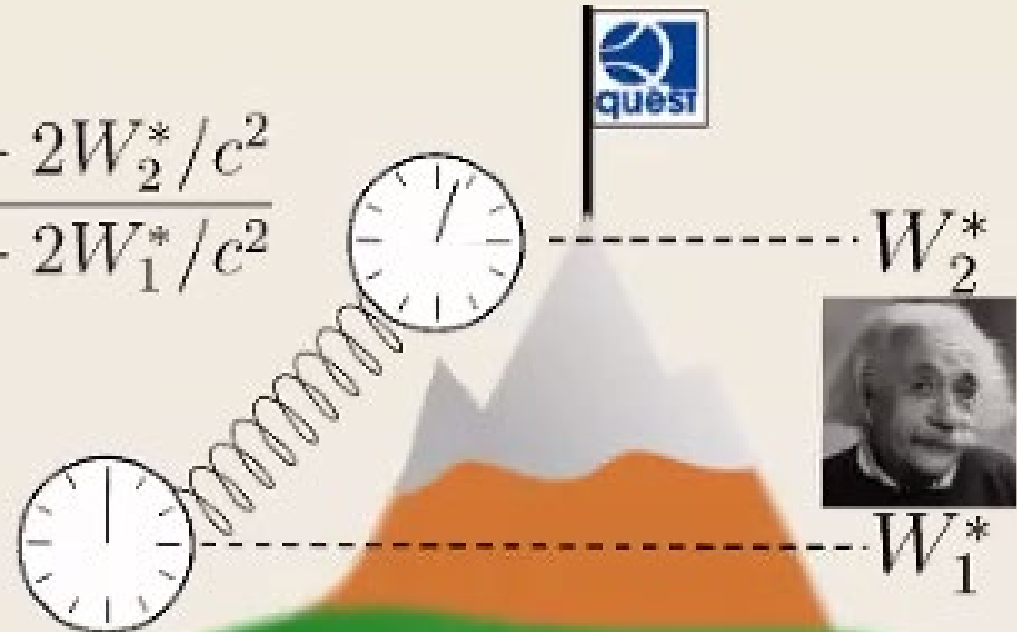
- frekvenciaetalon: atomi elektron átmenet frekvenciája az elektromágneses spektrum optikai tartományában



Relativisztikus (kronometrikus) szintezés

- alapelv: az optikai óra frekvenciája függ a potenciáltól

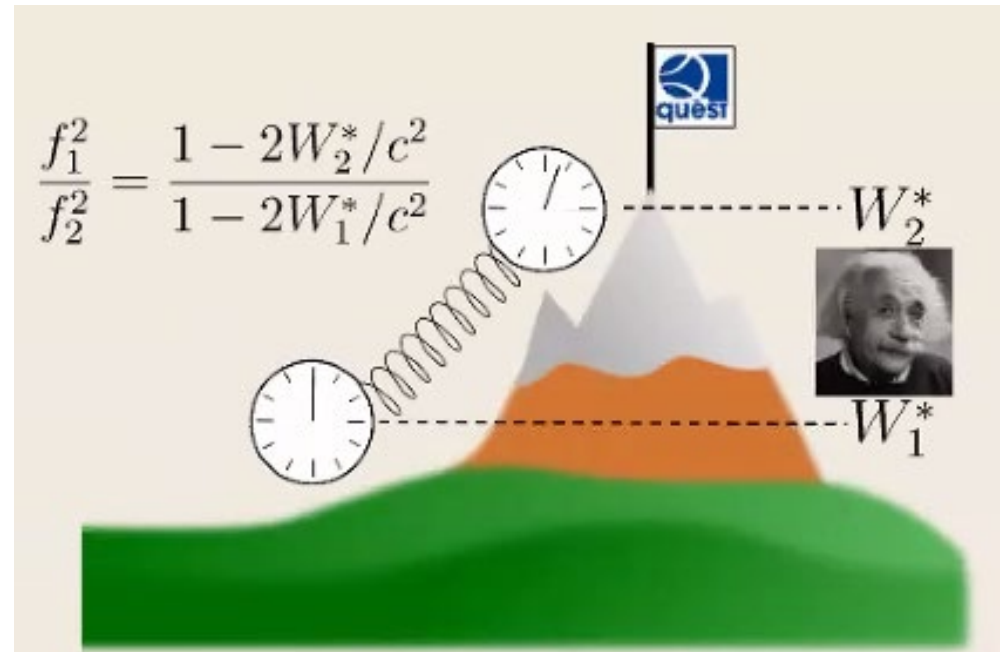
$$\frac{f_1^2}{f_2^2} = \frac{1 - 2W_2^*/c^2}{1 - 2W_1^*/c^2}$$



Optikai órák

Relativisztikus szintezés

- alapelv: az optikai óra frekvenciája függ a potenciáltól
- frekvencia átvitel
 - optikai üvegszál
 - mikrohullám
 - lézersugár
- lineáris kapcsolat ΔW és Δf között

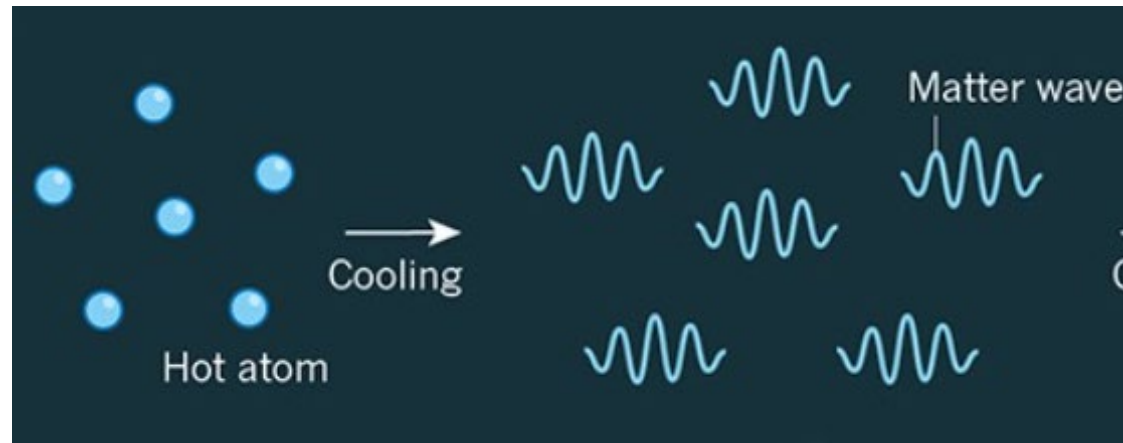


$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{f_B - f_A}{f_A} = \frac{\Delta W}{c^2} + O(c^{-4})$$

CAI interferometria

Hideg atomok

- néhány μK hőmérséklet
- minimális mozgás
- hullámtermészetű (anyag hullámok)
- az anyag hullámok a fényc hullámoknál sokkal rövidebbek
- az anyag hullámok terjedés sebessége sokkal kisebb



CAI interferometria

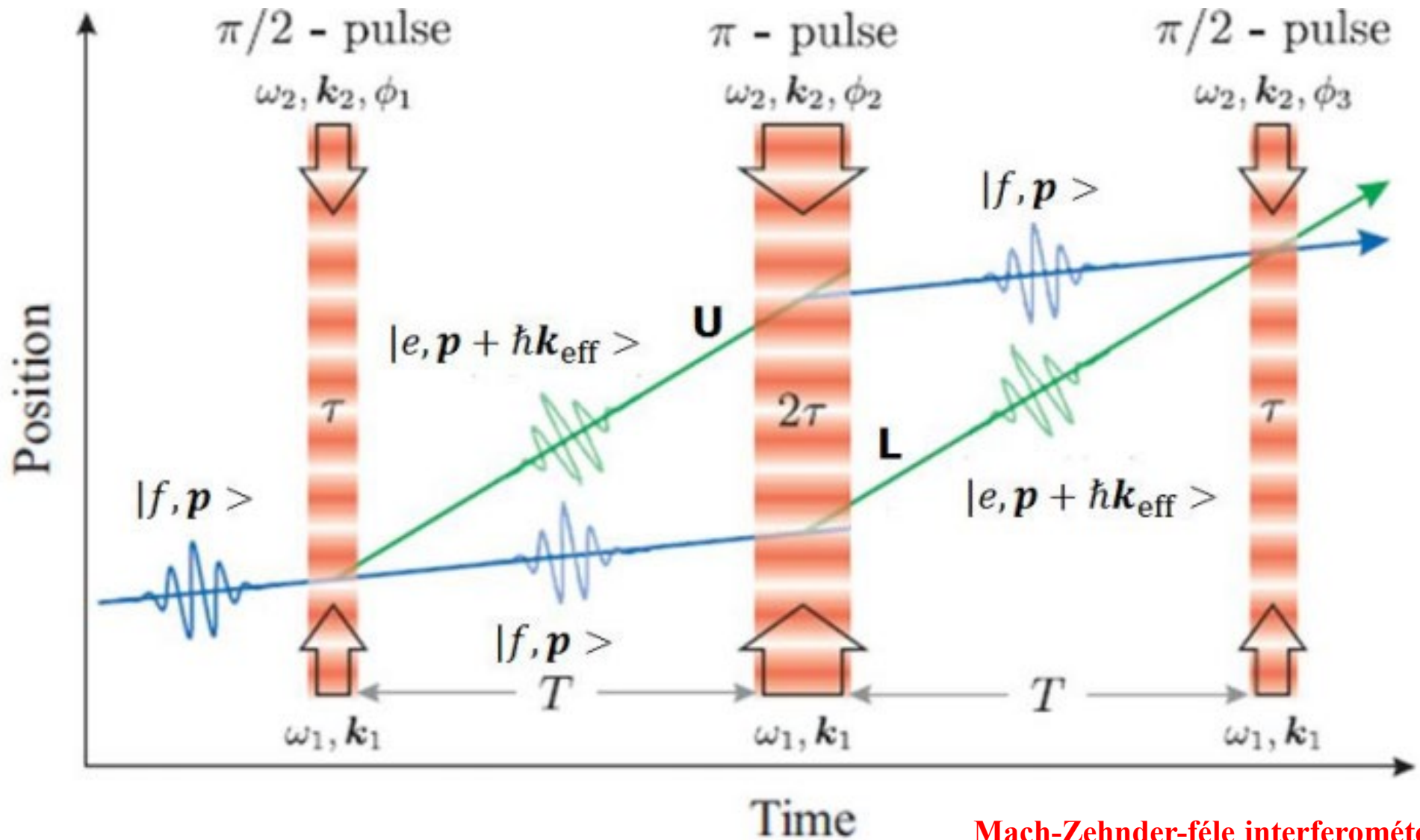
Lézer interferométer

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

Hideg atom interferométer (Cold Atom Interferometry)

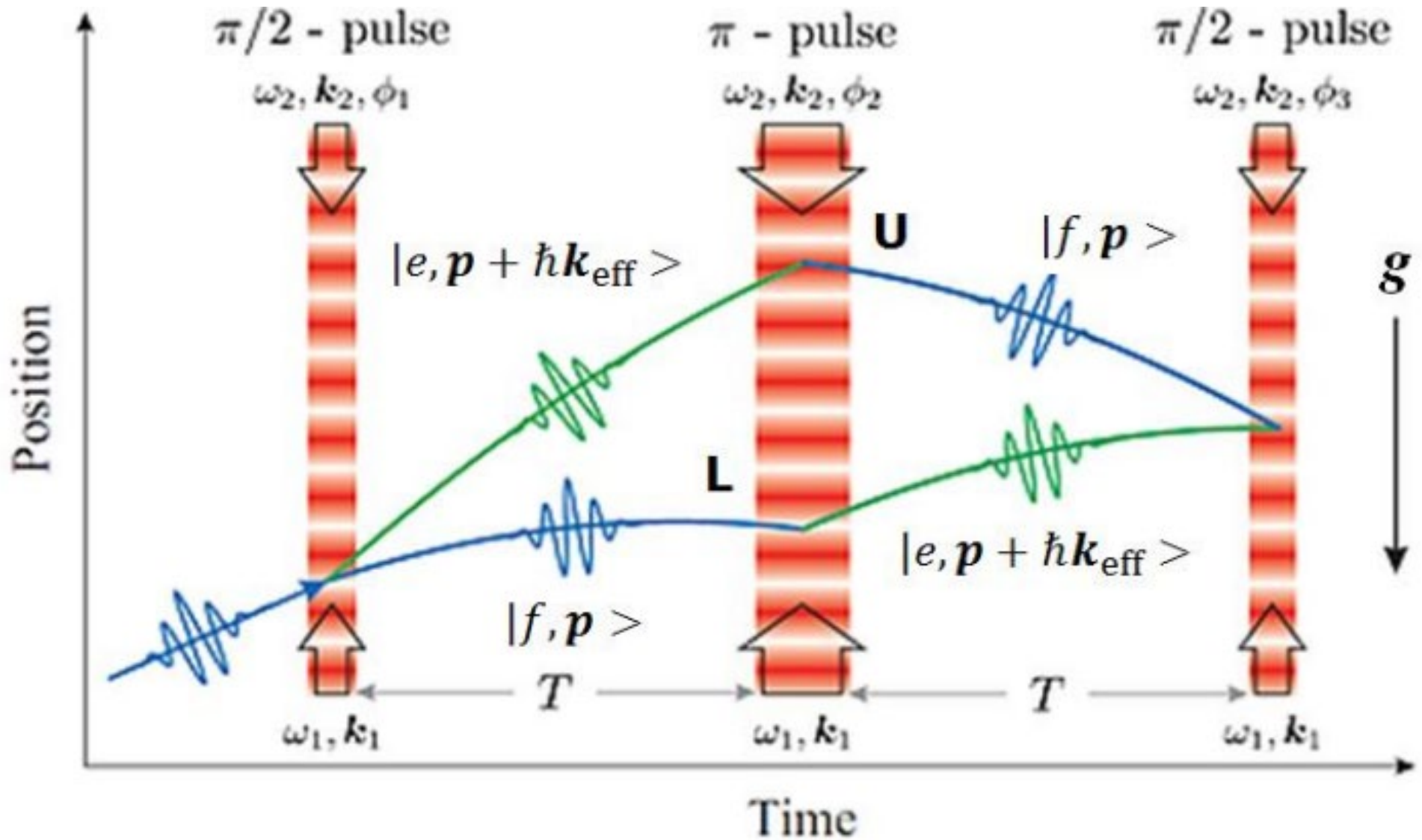
- egy hideg atom mozgásának trajektóriája (út) gerjesztés hatására megváltozik, ami az atom hullámfüggvényének fázisában megjelenik

CAI interferometria



Mach-Zehnder-féle interferométer

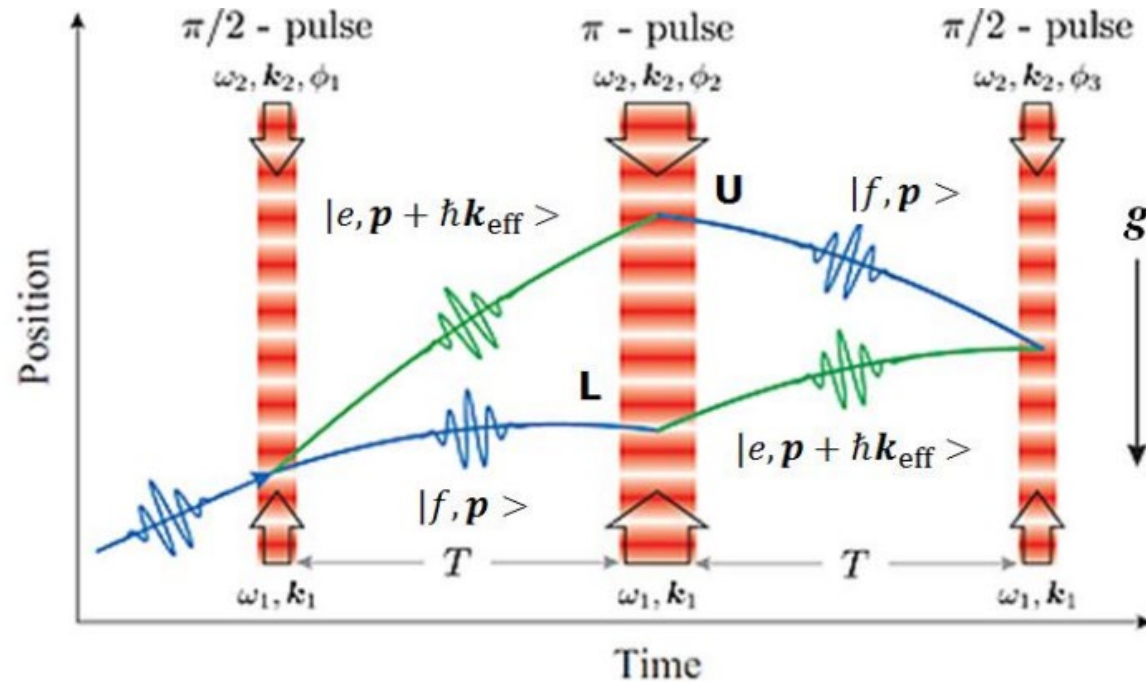
CAI graviméter



CAI graviméter

CAI graviméter (Quantum Gravimeter)

- CAI interferométer nehézségi erőterben

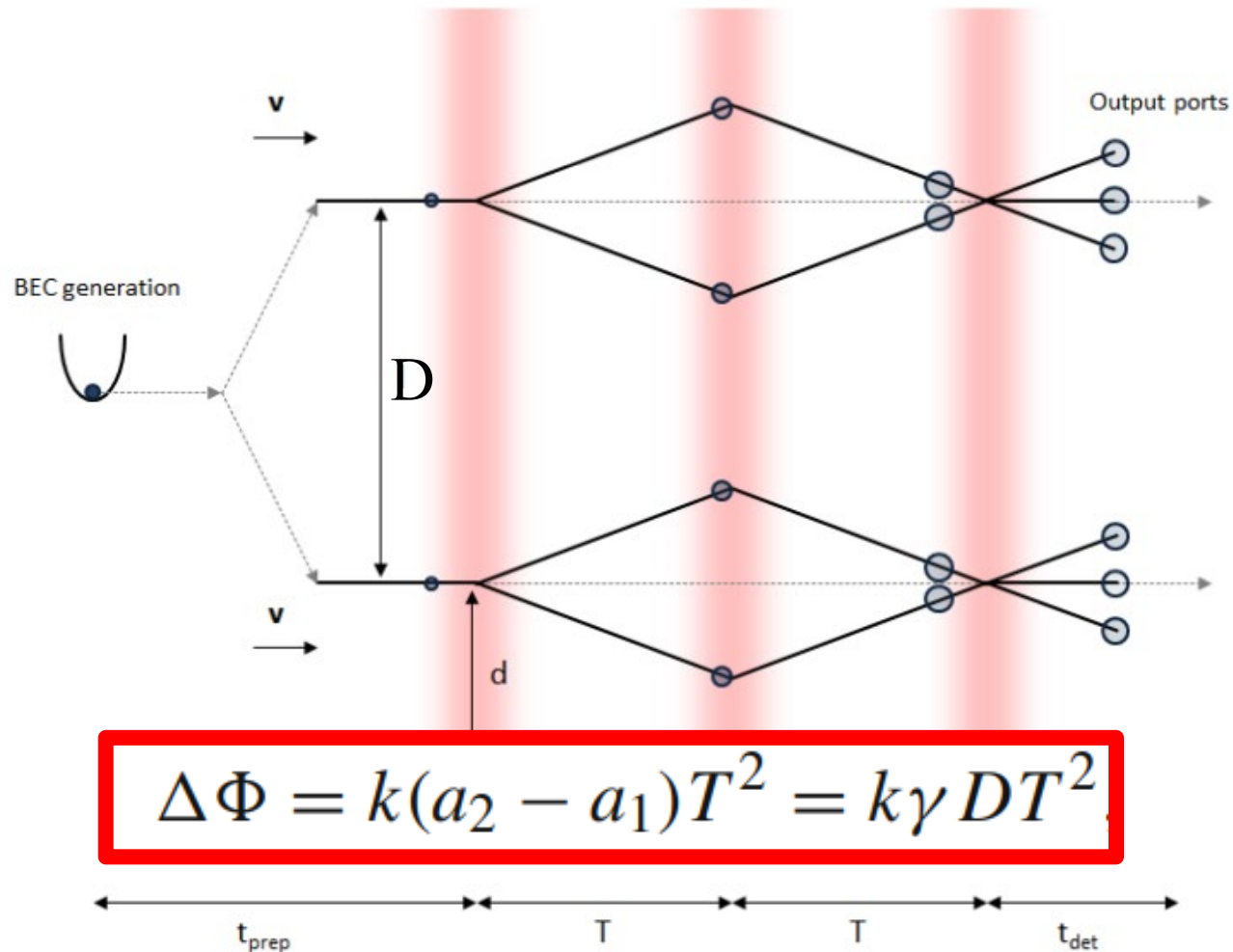


$$\Delta\Phi = k_{\text{eff}} \cdot g T^2 + (\varphi_1 - 2\varphi_2 + \varphi_3)$$

CAI gradiométer

CAI gradiométer (Quantum Gravity Gradiometer)

- differenciálisan elhelyezett CAI graviméterek



A GRACE-FO után

Eddigi megoldások

- műholdpályák alapján (High-Low SST)
- műholdak közötti távolságváltozás mérésével (Low-Low SST)
- űrgradiometria (SGG)

Jövőbeni megoldások

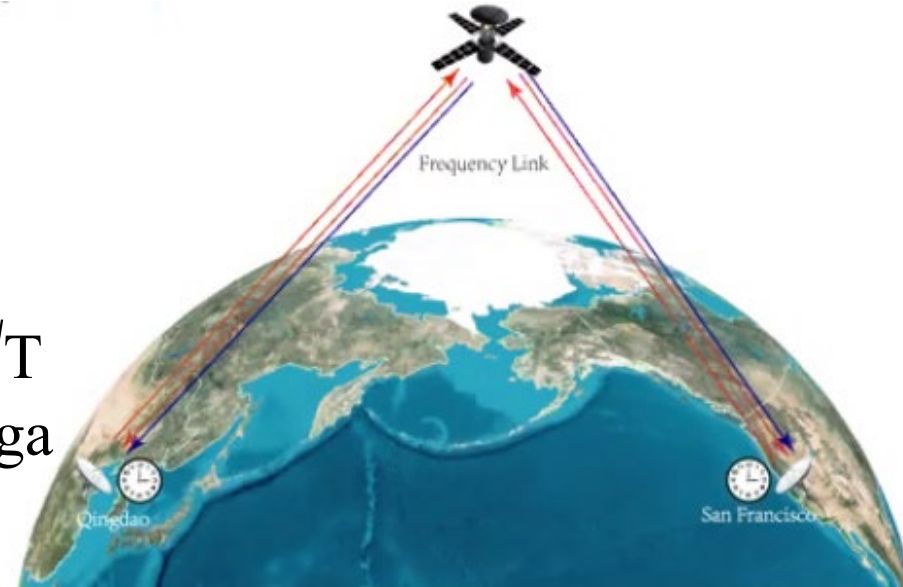
- optikai órák
- hideg atom interferometria

Műholdas megoldások kidolgozás alatt

Optikai órák

Optikai órák műholdas alkalmazása

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



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

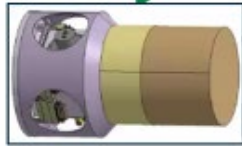
Műholdas alkalmazás esetén szükséges megbízhatóság

- optikai órák relatív megbízhatósága: 10^{-18}
- frekvencia átvitel relatív megbízhatósága: 10^{-18}

CAI graviméter / gradiométer

CAI graviméter / gradiométer

- nagy működési stabilitás, kicsi műsterjárás, kedvező zajspektrum
- különböző elrendezéseket szimulálnak
- CAI gradiométer megbízhatósága: 1-3 E/ $\sqrt{\text{Hz}}$
- Szimulációk alapján a megbízhatóság űrben nagyságrendekkel jobb, akár 5 mE/ $\sqrt{\text{Hz}}$ is elérhető



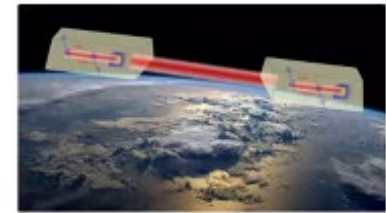
Quantum Pathfinder Mission

$$\Delta\Phi = k_{\text{eff}} \cdot g T^2$$



Enhanced Quantum Gradiometer Mission

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



Quantum SST Mission

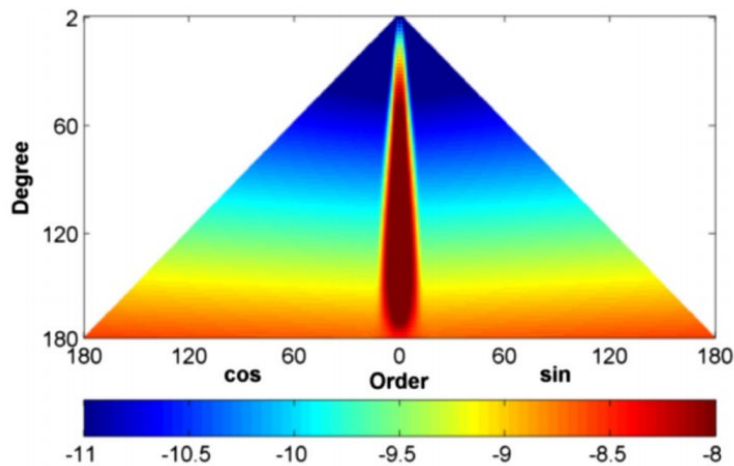
$$\Delta\Phi = k(a_2 - a_1)T^2$$

Szimulációk

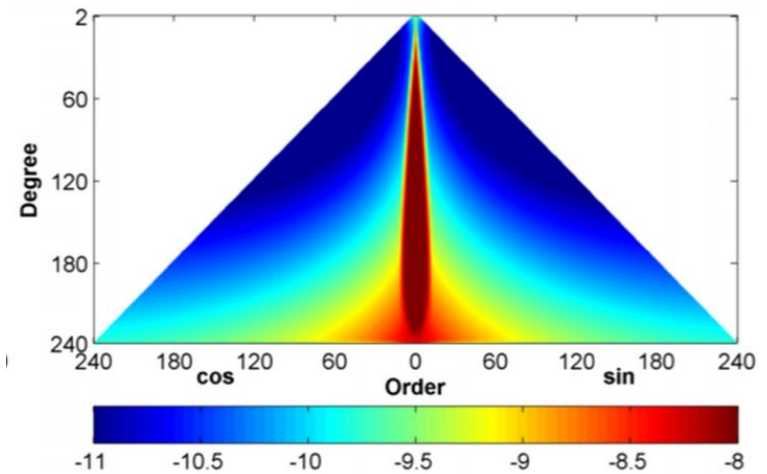
Eredmények:

- globális geoid meghatározás céljából a CAI gradiométerek a legjobbak
- a kvantum- és a hagyományos módszereket érdemes kombinálni
- az egyes technológiák a nehézségi erőter más-más formáinak a meghatározására alkalmas

a nehézségi erőter meghatározásának hibái



optikai óra

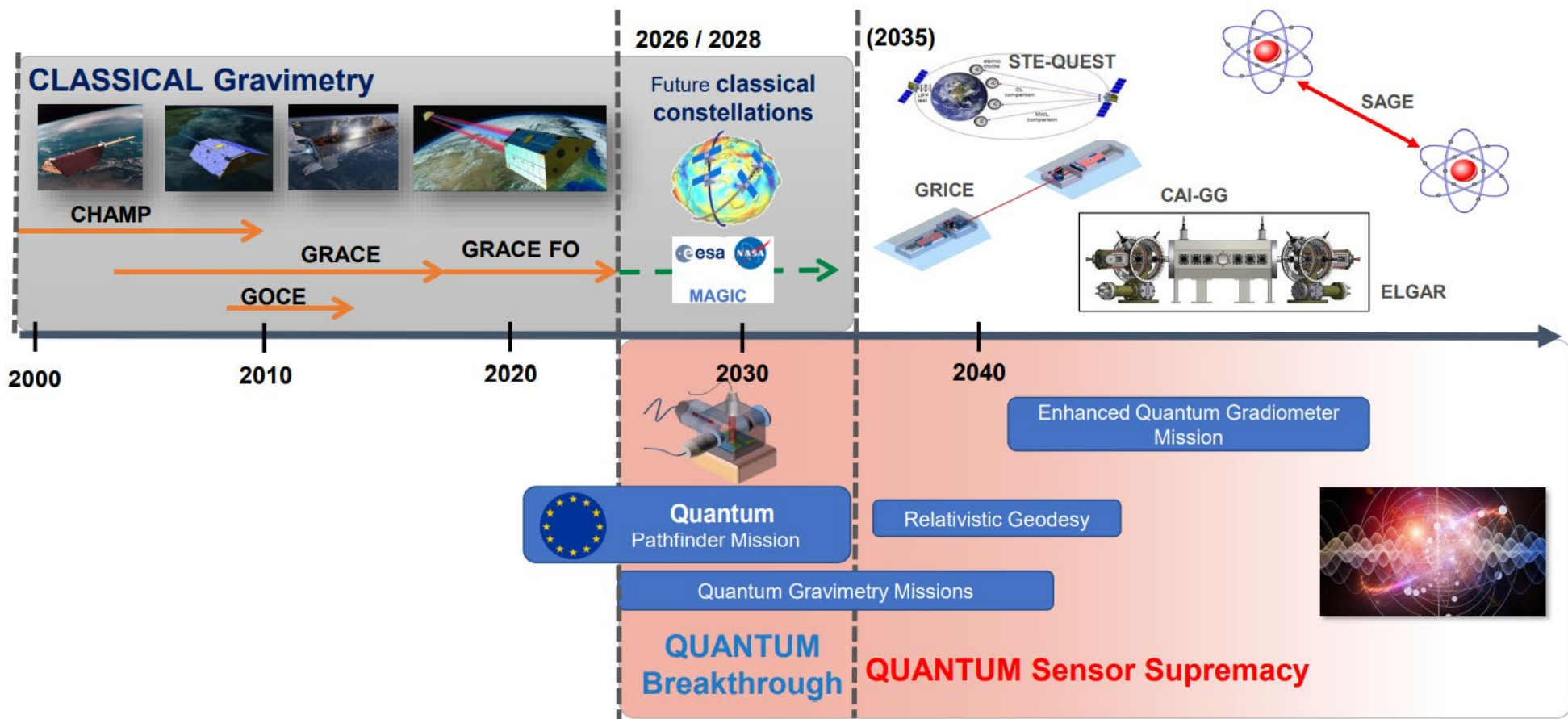


egykarú CAI gradiométer

ESA

ESA:

- Quantum Satellite Gravimetry (QSG) munkacsoport alakult



KÖSZÖNÖM A FIGYELMET!

