

# Szélső pontosságú geodéziai megoldások a CERN részecskegyorsítóiban

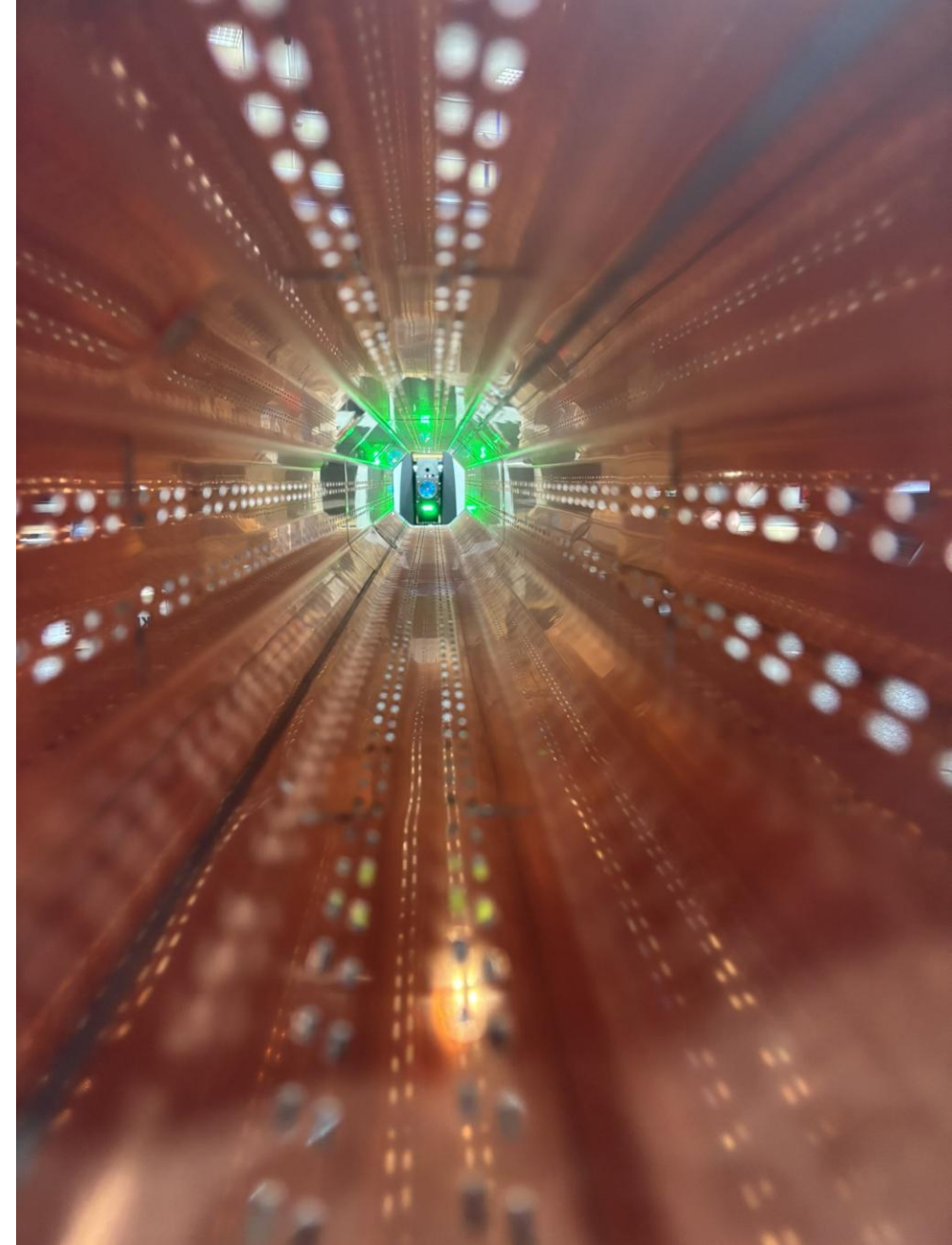
Tóth Sándor, Vivien Rude, Mateusz Sosin, Hélène Mainaud Durand

BE-GM-HPA



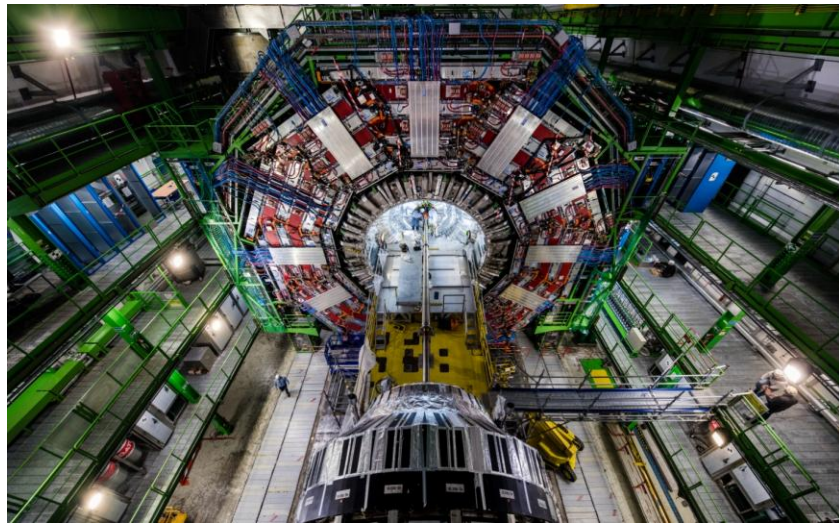
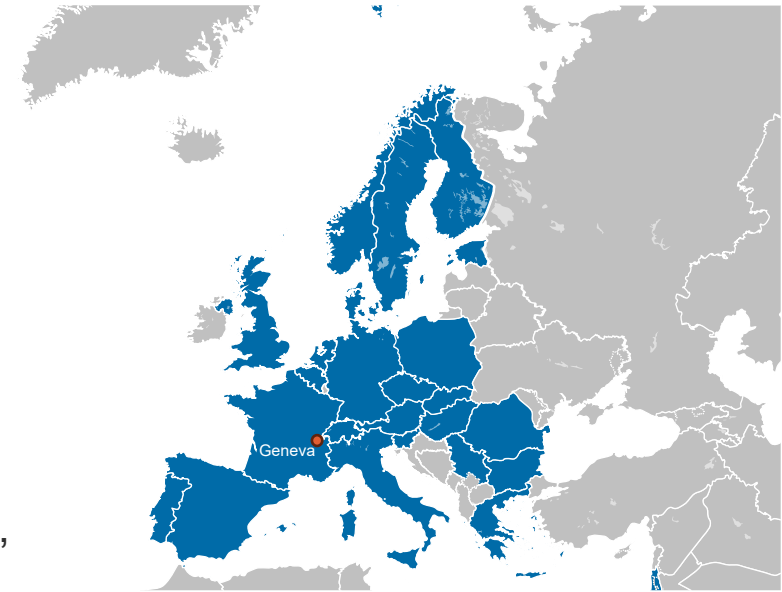
# Tartalom

- CERN
- A geodézia szerepe a részecskegyorsítók üzemeltetésében
- Hi-Lumi LHC
- Full Remote Alignment System (FRAS)
- Belső monitoring rendszer

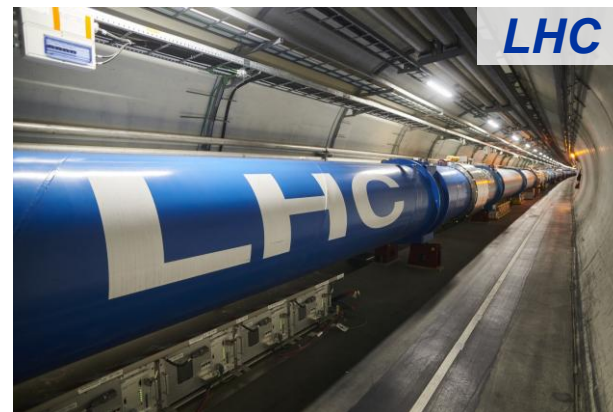
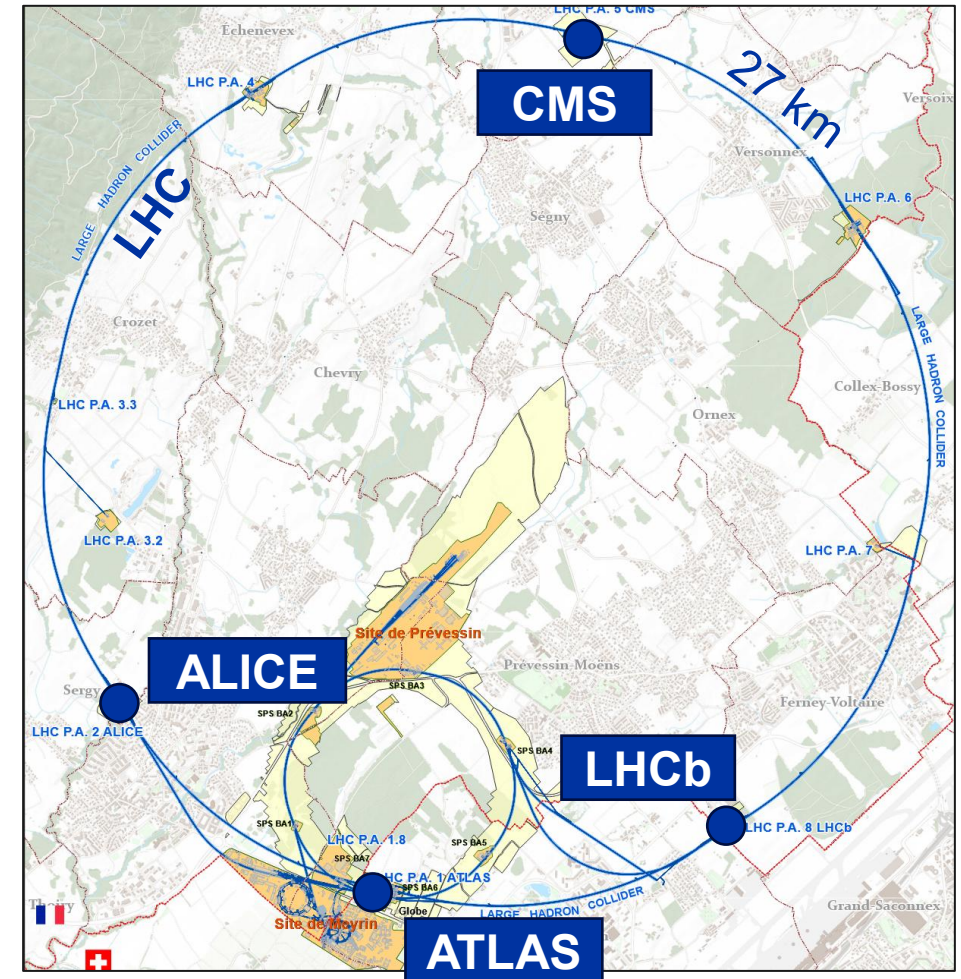
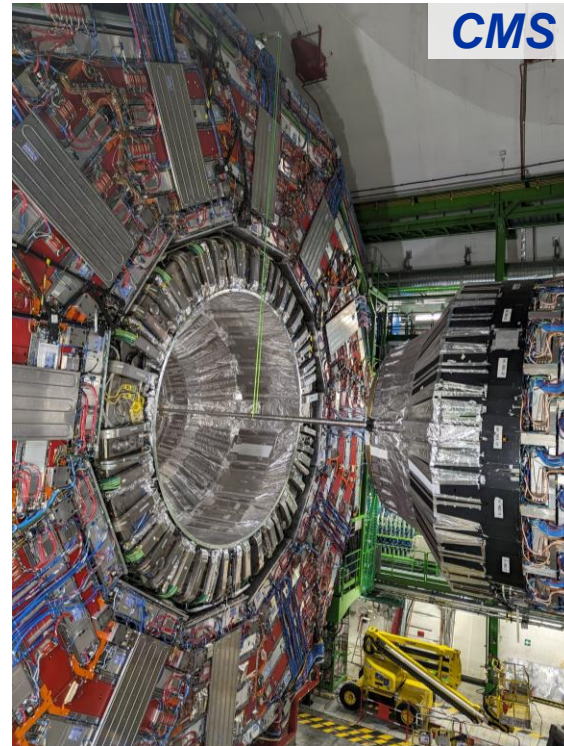
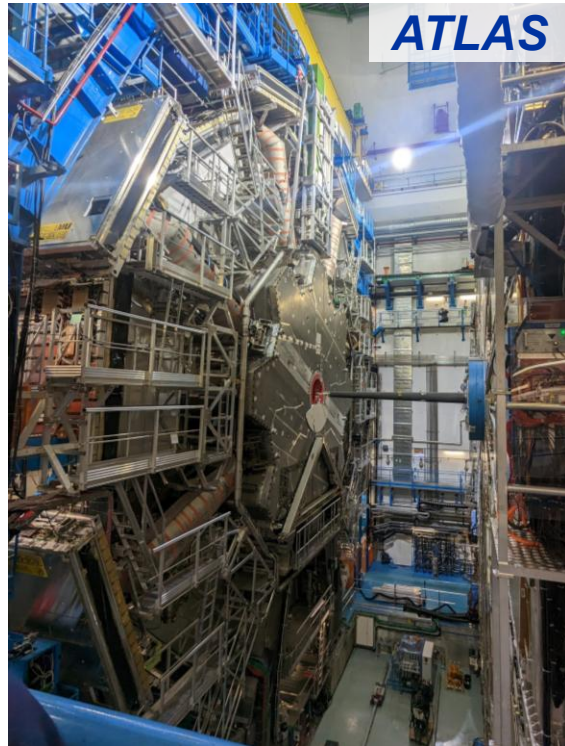


# CERN

- Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire néven 1954-ben alapították.
- Napjainkban (Európai Nukleáris Kutatási Szervezet): **az anyag alapvető építőelemeinek és az azokat irányító kölcsönhatásoknak a kutatásával foglalkozik, nagy teljesítményű részecskegyorsítók és detektorok segítségével.**
- A világ egyik legnagyobb tudományos együttműködése, amely jelentős **tudományos áttörések**hez vezetett, többek között Nobel-díjas felfedezésekhez (pl. a Higgs-bozon), a World Wide Web feltalálásához, vagy éppen az első antihidrogén atom létrehozásához.

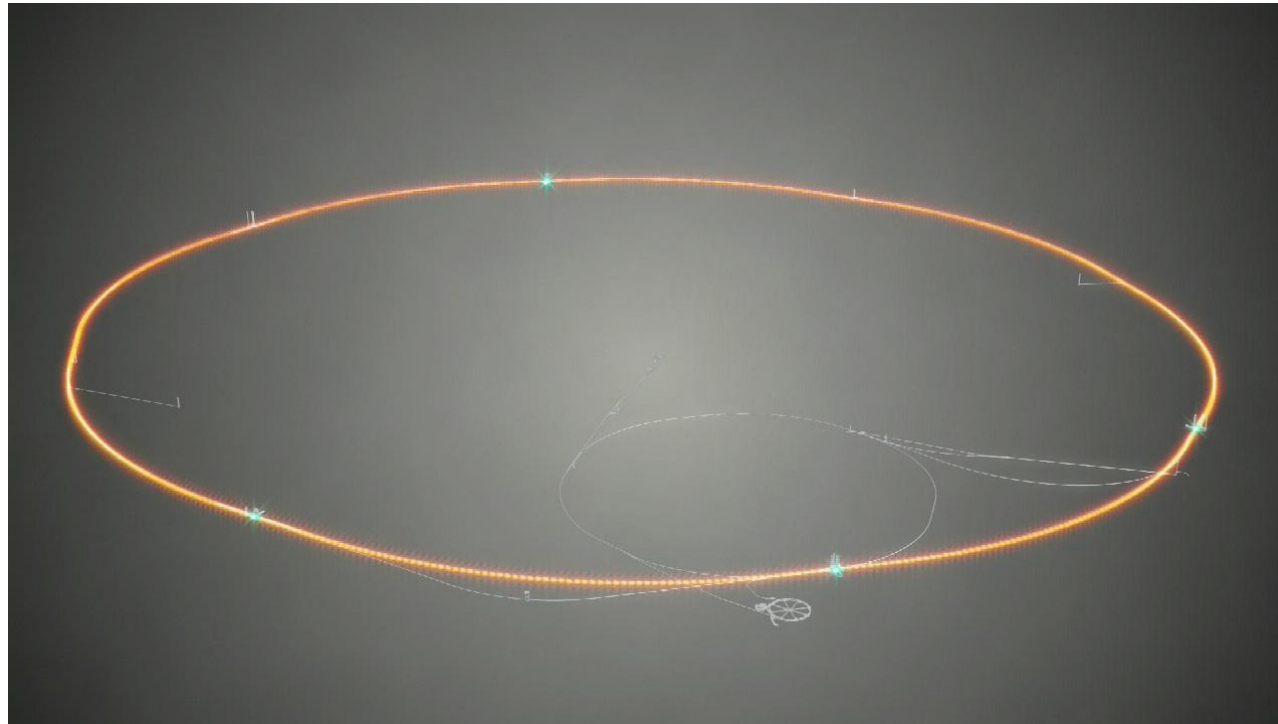


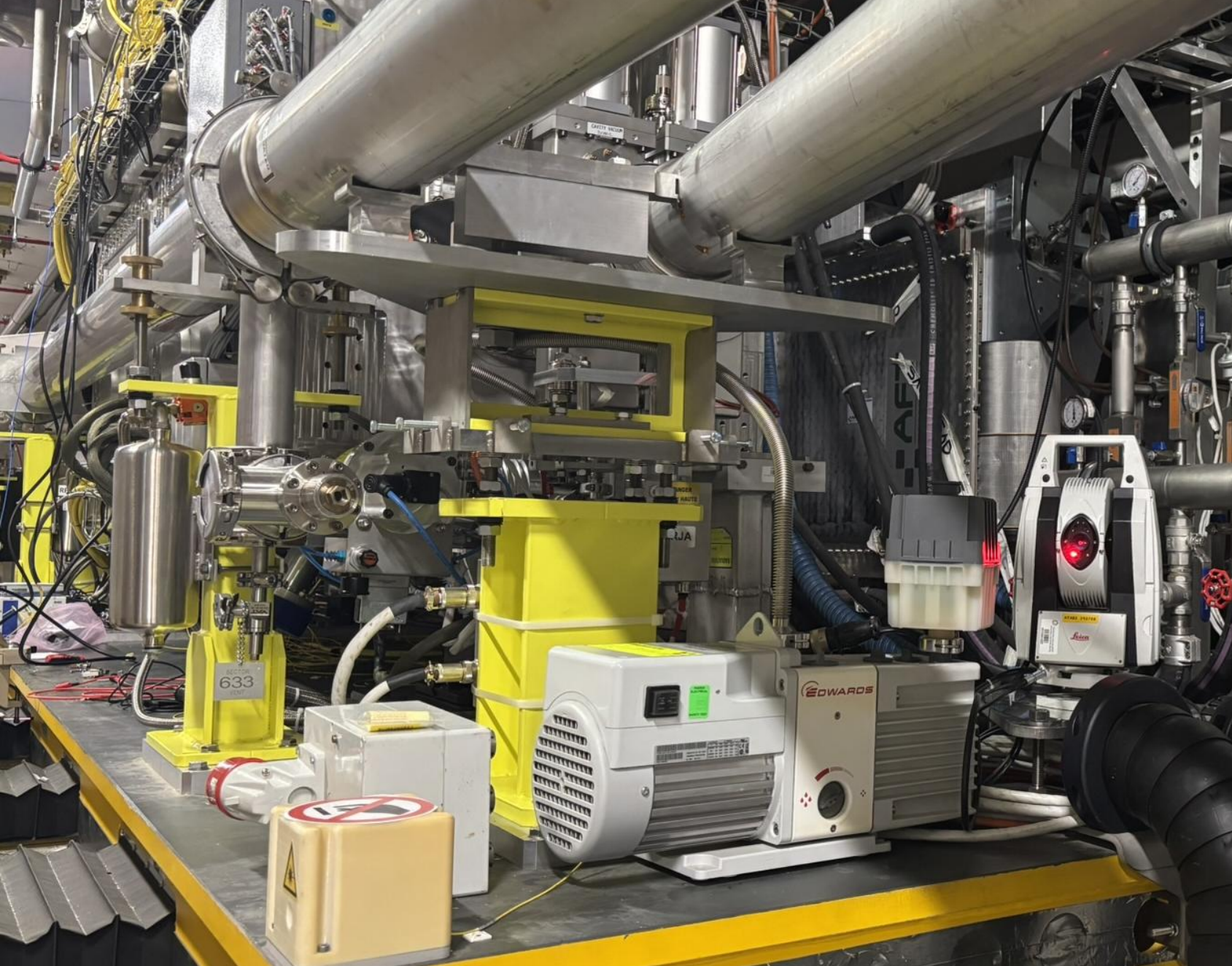
# A CERN részecskegyorsítói és detektorai



# Nagy Hadronütköztető - Large Hadron Collider (LHC)

- A két egymással ellentétes irányban felgyorsított részecskék, a detektorok (ATLAS, CMS, ALICE, LHCb) középpontjában keresztezik egymást, ahol néhányuk összeütközik.
- Mindkét sugár 2808 darab nyalábból áll, amelyek mindegyike körülbelül  $\sim 100$  milliárd protont (vagy alkalmanként ólom atommagot) tartalmaz. Amikor a két nyaláb keresztezi egymást, valójában csak körülbelül 40–60 proton ütközik össze. Ez a szám is  $\sim 1$  milliárd ütközést jelent másodpercenként.
- Az ütközések az Ősrobbanás utáni néhány mikro-szekundumban tapasztalható energiasűrűséget és hőmérsékletet hozzák létre, ezzel segítve az anyag eredetének és alapvető szerkezetének a megismerését.





# A geodézia szerepe

# A gyorsítóelemek pontos elhelyezése

Miért fontos az elemek tengelyeinek nagy pontosságú térbeli pozícionálása?

## Fizikai követelmények

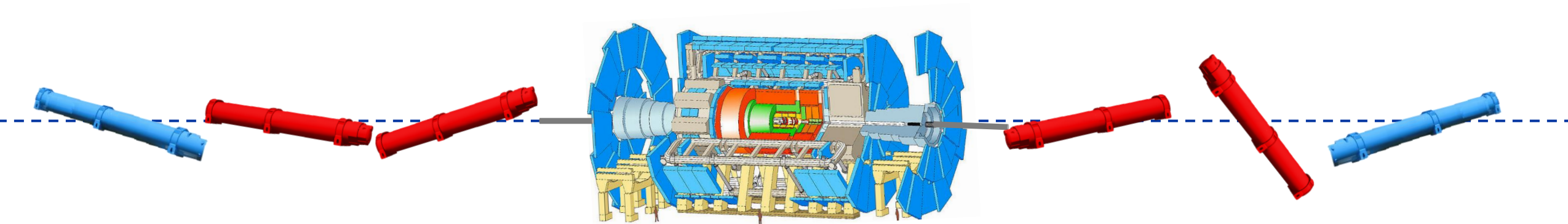
- Stabil részecskenyaláb-pálya
- Csökkentett energia-veszteség
- Maximális ütközési hatékonyság

## Kihívások

- Több ezer gyorsítóelem, néhány száz grammtól több tonnáig
- Extrém környezet (sugárzás, vákuumrendszerek, kriogenika, erős mágneses terek)
- Föld alatti több km hosszú ívek és egyenes szakaszok

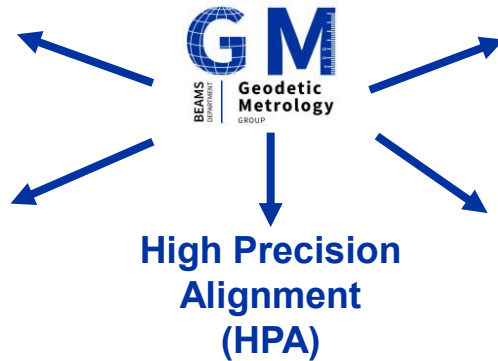
## És az elvárt pontosság

- A részecskenyalábok átmérője mindössze néhány mikrométer
- Szigorú tűrések (általában  $\pm 0,2$  mm)



# Geodetic Metrology csoport

Accelerator Survey  
and Geodetic  
Measurements  
(ASG)



Future Projects  
(FP)

Experiment  
Survey and  
Alignment  
(ESA)

Acquisition  
Processing and  
Data Control  
(APC)

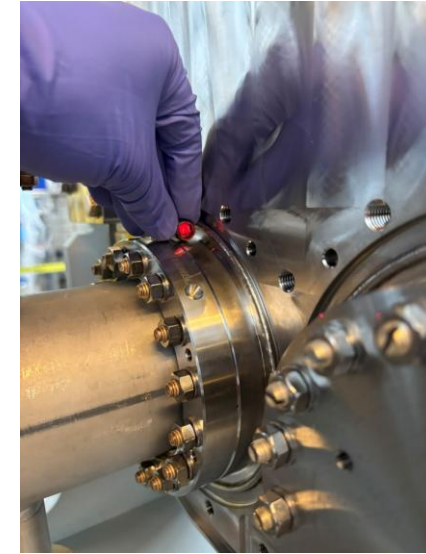
High Precision  
Alignment  
(HPA)

## Felügyelt létesítmények:

- Részecskegyorsítók (pl.: LHC, SPS, PS)
- Transzfer hálózat
- Detektorok
- Egyéb fizikai kísérletek (pl.: Antianyag gyár)

## Nagyságrend:

- Több mint 60 km gyorsító komplexum
- Több mint 40 000 elem és komponenes
- 20+ kísérlet





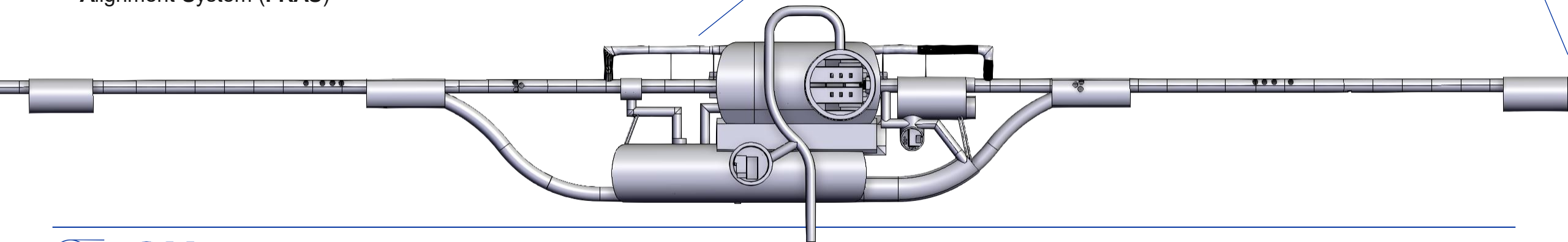
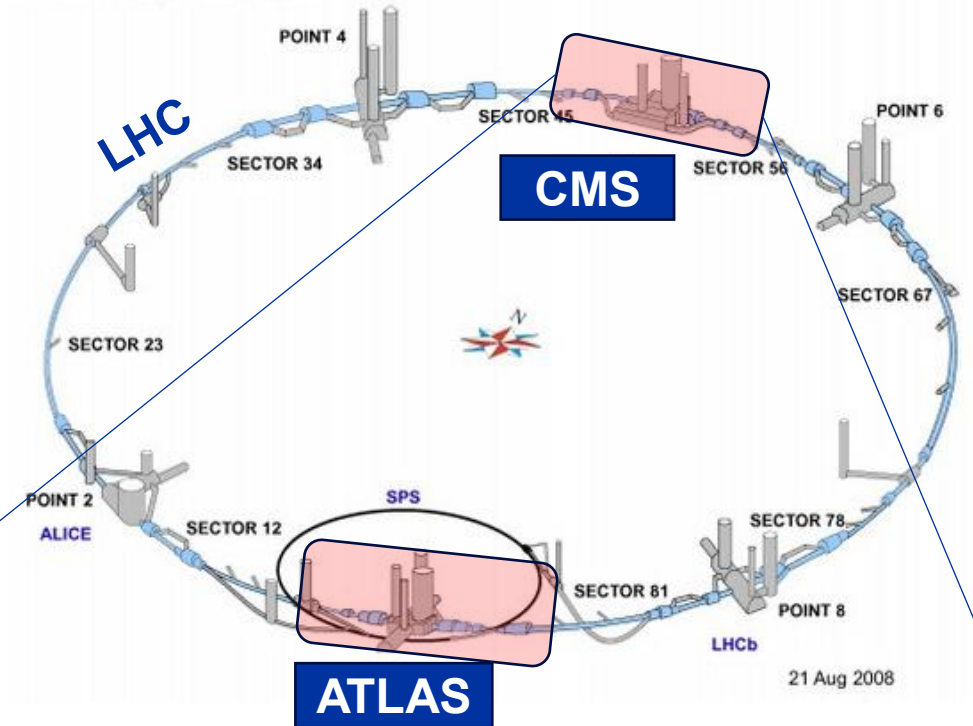
**Nagy Luminozitású LHC  
(Hi-Lumi)**

**&**

**Full Remote  
Alignment System  
(FRAS)**

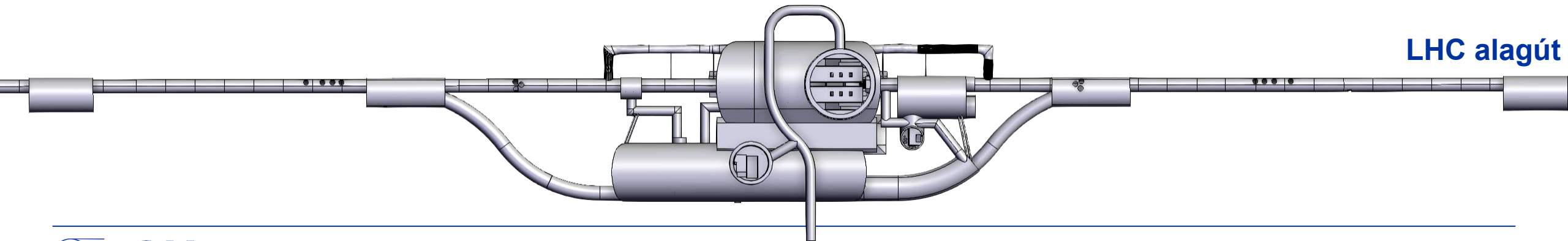
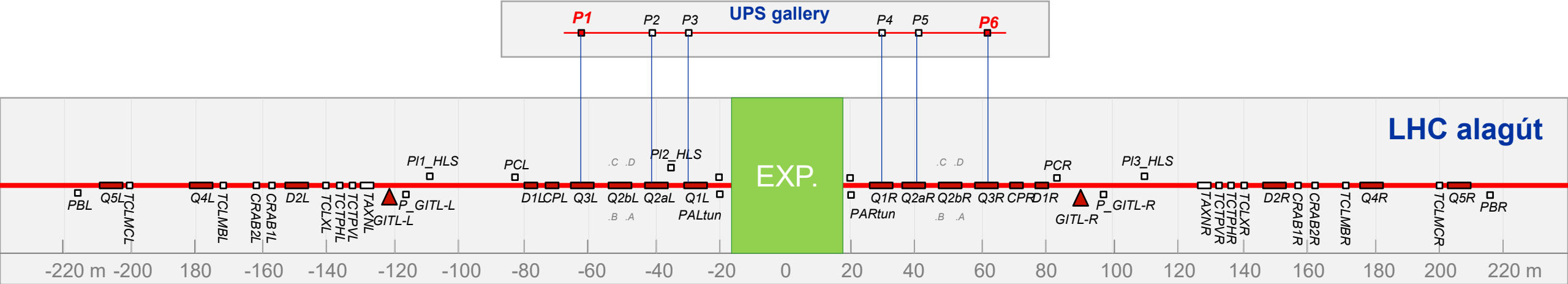
# Nagy Luminozitású LHC (Hi-Lumi LHC)

- Az LHC működése jelenlegi formájában 2026 júliusában befejeződik.
- A leállás alatt, a Hi-Lumi LHC project keretében a gyorsító két nagy szakasza a **CMS** és az **ATLAS** detektorok körül teljesen megújul.
- A project 2016-ban kezdődött (jóváhagyás), amelynek lezárultával a gyorsító 2030-ban lesz újra üzemképes.
- **Fő cél:** az integrált luminozitás növelése, amely a gyakorlatban a jelenleginél ~3-4-szer nagyobb ütközésszámot jelent.
- **Hogyan:** a részecskeszám növelésével és a nyaláb keresztmetszet csökkentésével.
- A cél elérése érdekében az alagút 1,2 km-es szakaszán új elemek kerülnek elhelyezésre (pl.: erősebb kvadrupól mágnesek, Crab Cavity).
- Kisebb nyaláb keresztmetszet -> még szigorúbb tűrések -> **Full Remote Alignment System (FRAS)**



# Hi-Lumi LHC – Tűrések

## Felülnézet



# Hi-Lumi LHC – Tűrések

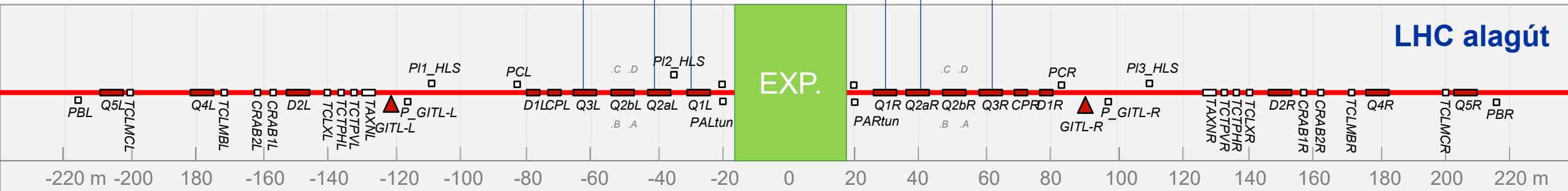
## Felülnézet

Elemek elhelyezési tűrése Q1 és Q5 között:  
Tűrés :  $\sigma$  (1 sigma) < 0.1 mm



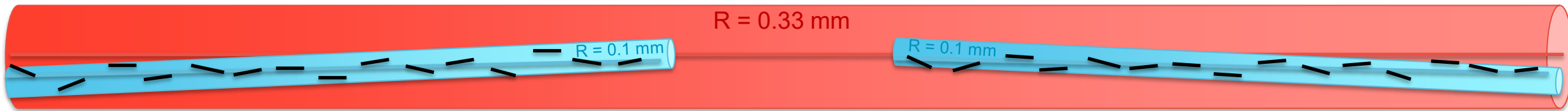
Elemek elhelyezési tűrése  
a két szélső Q5 között:

- Magassági :  $\sigma$  (1 sigma) < 0.17 mm
- Vízszintes :  $\sigma$  (1 sigma) < 0.33 mm



Bal

Jobb



### Az elemek elhelyezésre vonatkozó tűrések

- Bal és jobb oldalanként minden elem tengelye legyen: < 100  $\mu$ m ( $1\sigma$ )
- A detektor két oldalát együtt véve minden elem tengelye legyen: Magasságilag < 170  $\mu$ m ( $1\sigma$ )  
Vízszintesen < 330  $\mu$ m ( $1\sigma$ )
- Roll (hossztengely körüli elfordulás): < 150  $\mu$ rad ( $1\sigma$ )

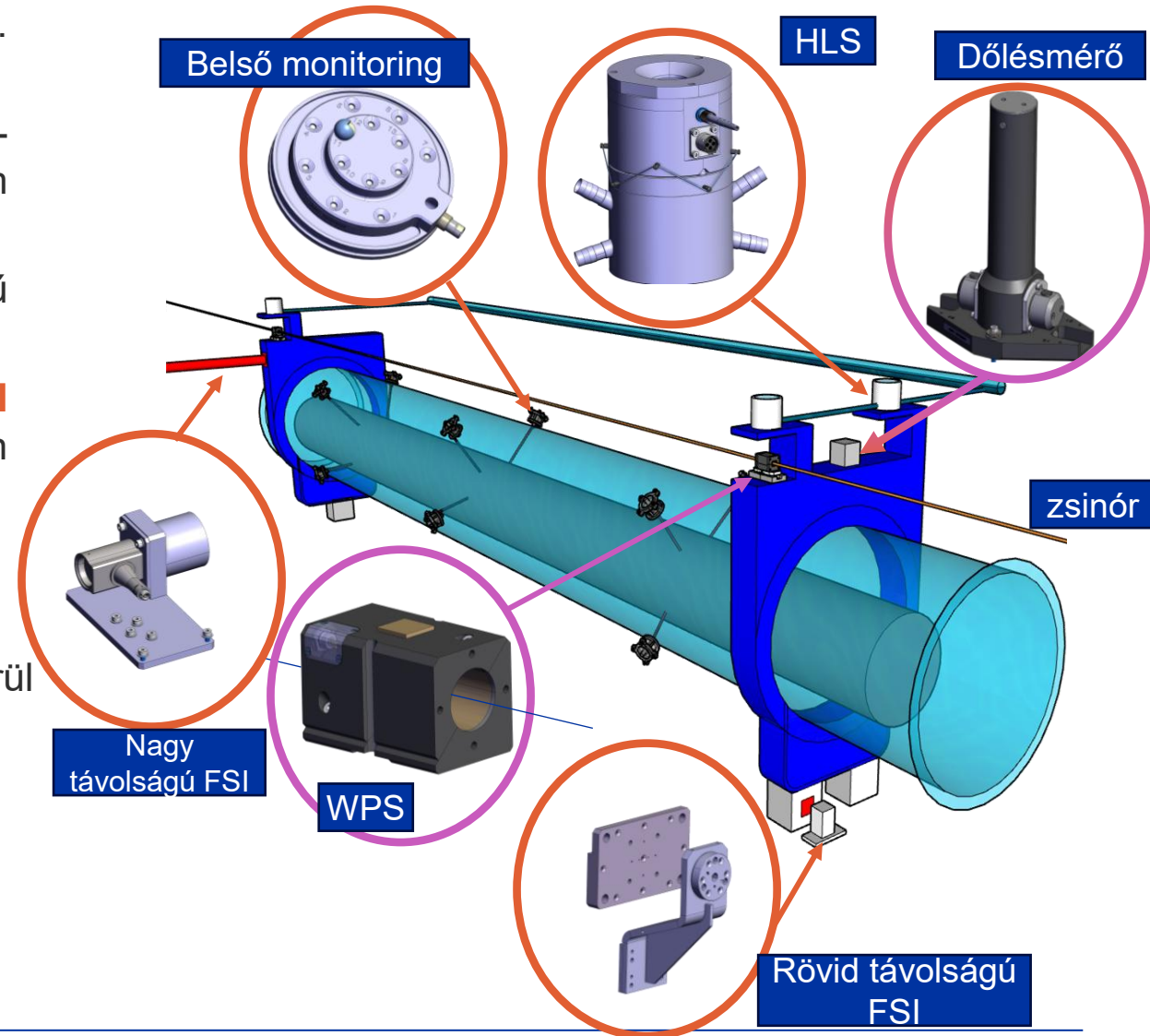
(V. Rude)

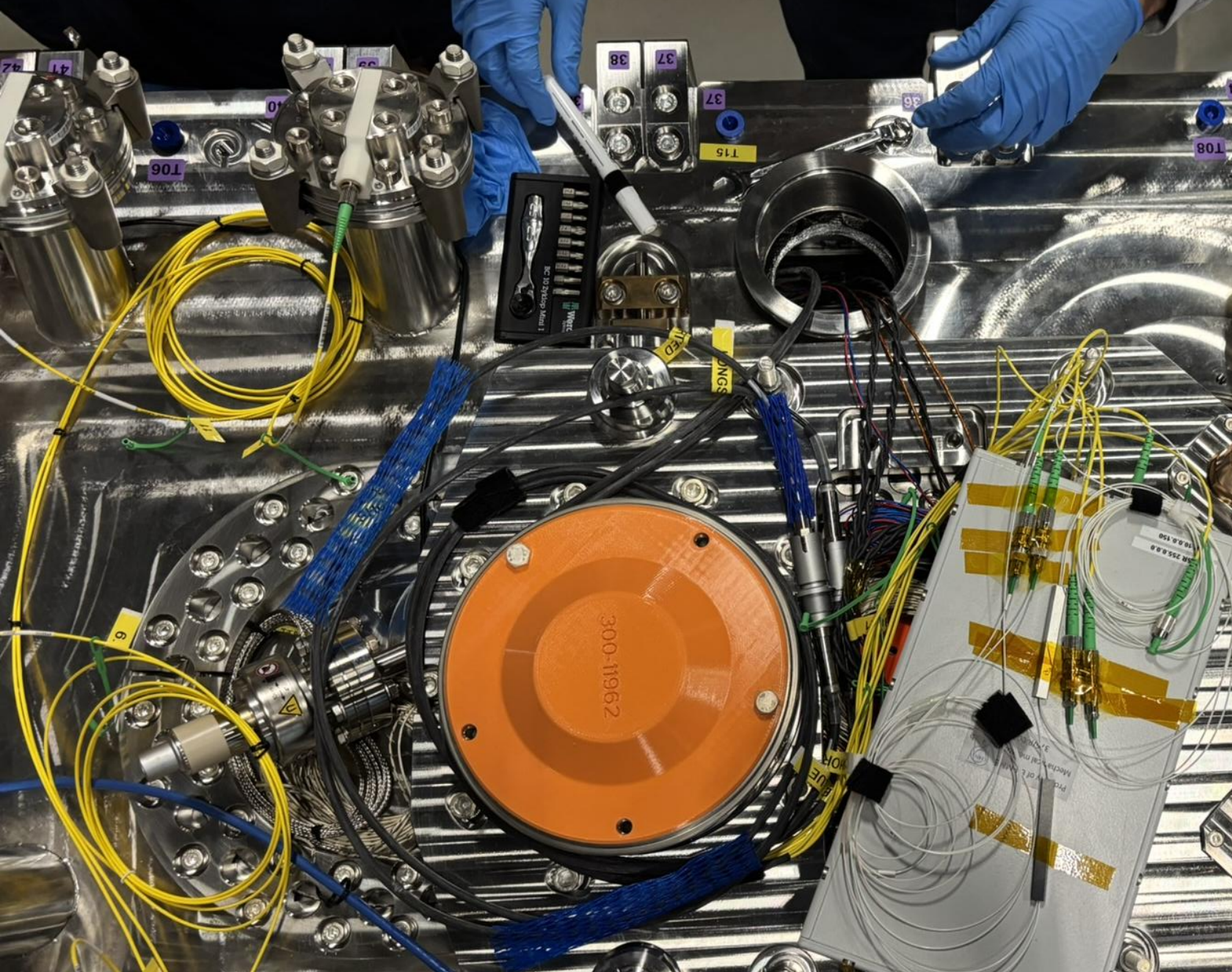
# FRAS – Szenzorok és technológiák

- A szigorú tűrések megfelelése miatt, egy új rendszer az ún. **FRAS (Full Remote Alignment System)** van fejlesztés alatt.
- A rendszer célja, hogy közel valós időben meghatározza a 200-200 méteres szakaszon elhelyezett valamennyi gyorsítóelem helyzetét és szükség esetén távolról igazítsa azokat.
- Ehhez a gyorsítóelemeket különféle saját fejlesztésű helymeghatározó szenzorokkal látjuk majd el.
- A szenzorok működése vagy **kapacitív** vagy az ún. **FSI** (Frequency Scanning Interferometry) technológiák valamelyikén alapul.

## Néhány szenzor

- **WPS (Wire Positioning Sensors):**  
Az érzékelő helyzete egy kifeszített zsinórhoz viszonyítva kerül meghatározásra. Pontosság:  $\pm 5 \mu\text{m}$
- **Dőlésmérő**  
Az adott gyorsítóelem hossz tengely körüli elfordulását határozza meg. Pontosság:  $\pm 10 \mu\text{rad}$
- **Hidrosztatikai szintező (HLS)**  
Pontosság:  $\pm 5 \mu\text{m}$



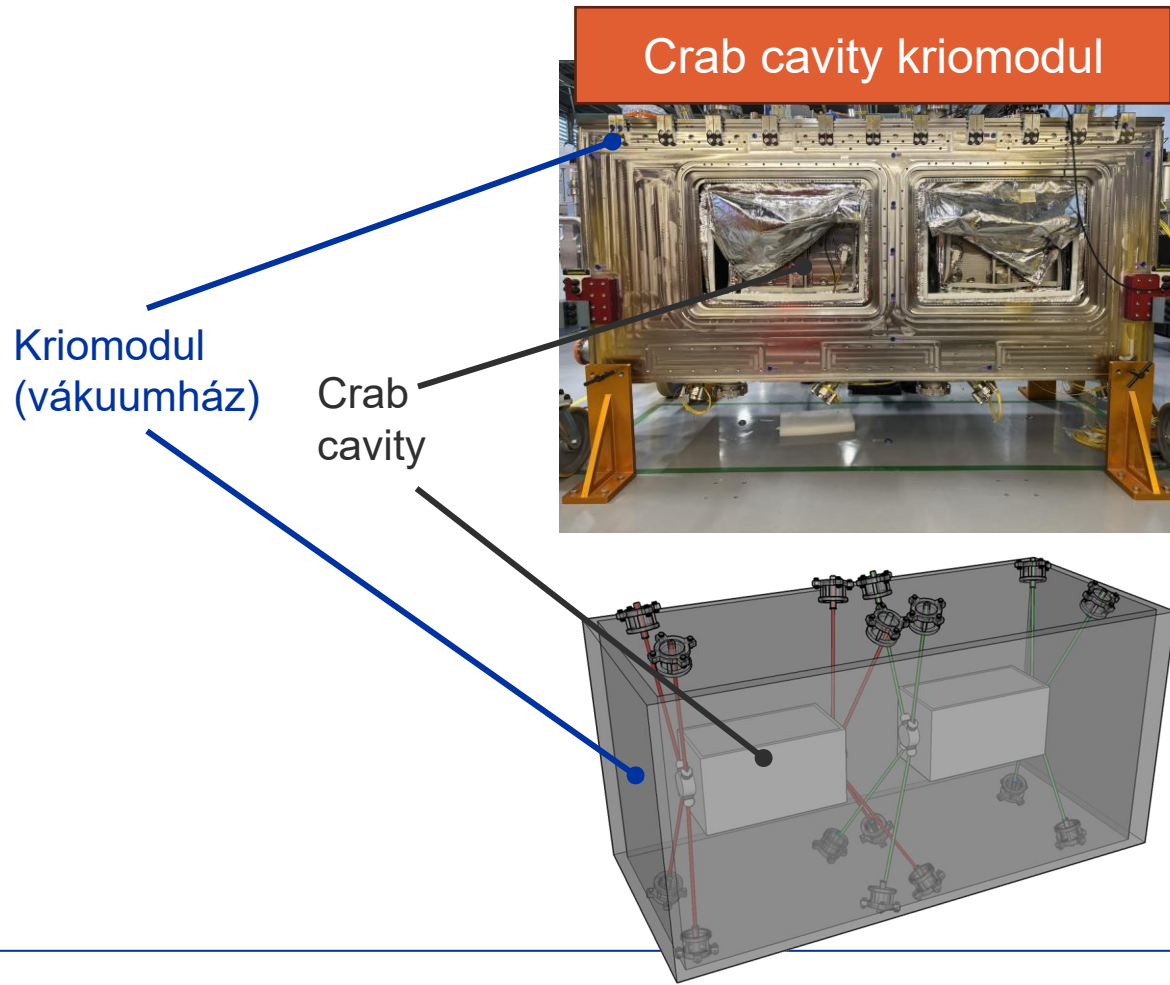
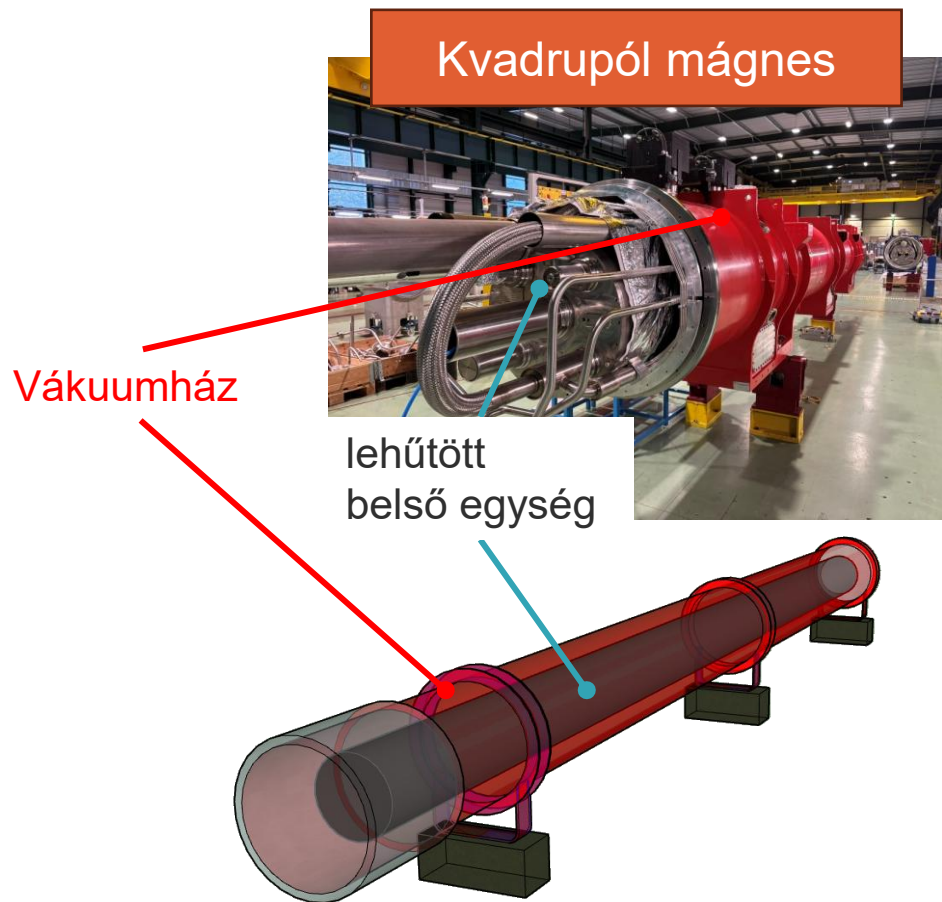


# Full Remote Alignment System

—  
Belső monitoring  
rendszer

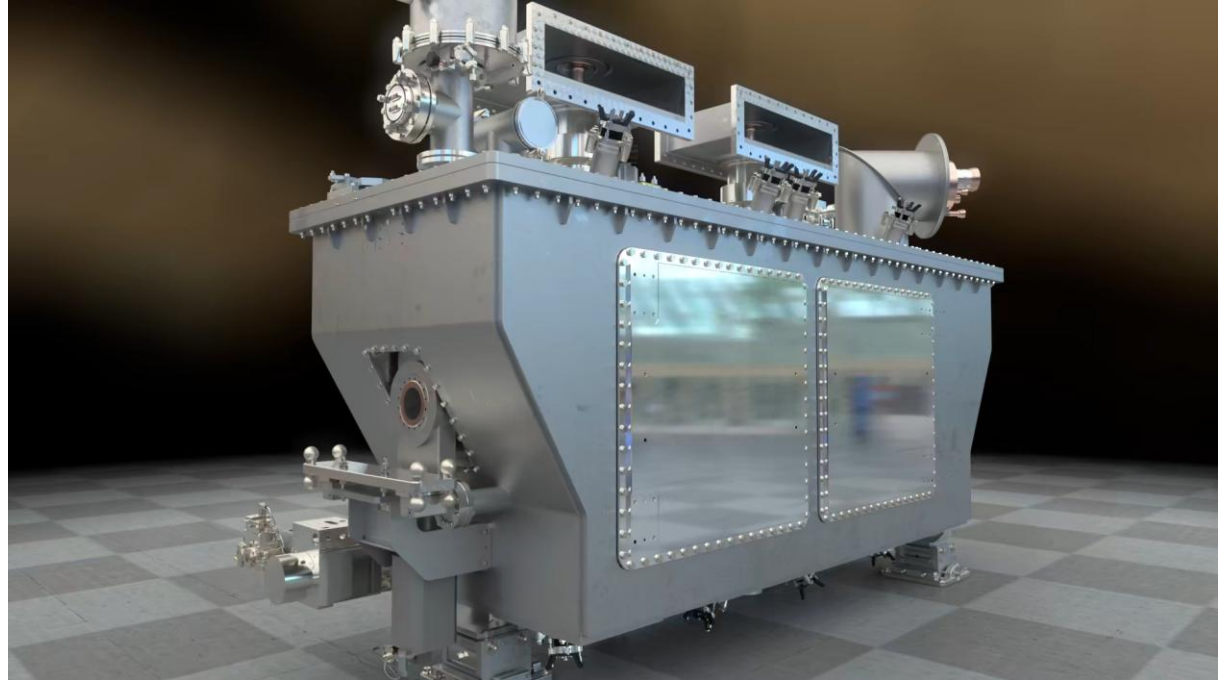
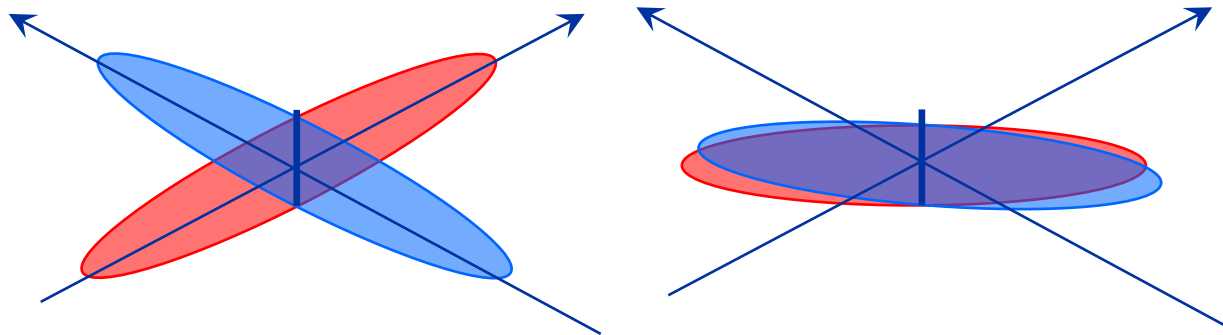
# FRAS – Belső monitoring rendszer

- A rendszer nívuma, hogy néhány gyorsítóelem esetében a belső szerkezeti elemek helyzete is meghatározásra kerül.
- Ezen belső szerkezeti részek komplex mozgáson mennek keresztül ( $\sim 10^{-10}$  mbar vákuum, 1.9 K hőmérséklet).
- A belső monitoring segítségével a működés közbeni tengely helyzet meghatározhatóvá válik.



# Crab cavity

- A gyorsító egyik új eleme (Hi-Lumi fejlesztés).
- Nemzetközi együttműködés keretében készülnek (összesen 8+2 darab).
- A részecskék az ütközési pontokon nem szemtől szembe találkoznak (HL-LHC keresztezési szög:  $500 \mu\text{rad}$ )
- A Crab Cavity a nyalábokat megdönti, így azok a keresztezés során nagyobb "felületen" találkoznak, ezzel megnövelve a részecskék ütközésének valószínűségét.



Technical design report: <https://e-publishing.cern.ch/index.php/CYRM/issue/view/127>

# FRAS – Belső monitoring rendszer – Crab cavity

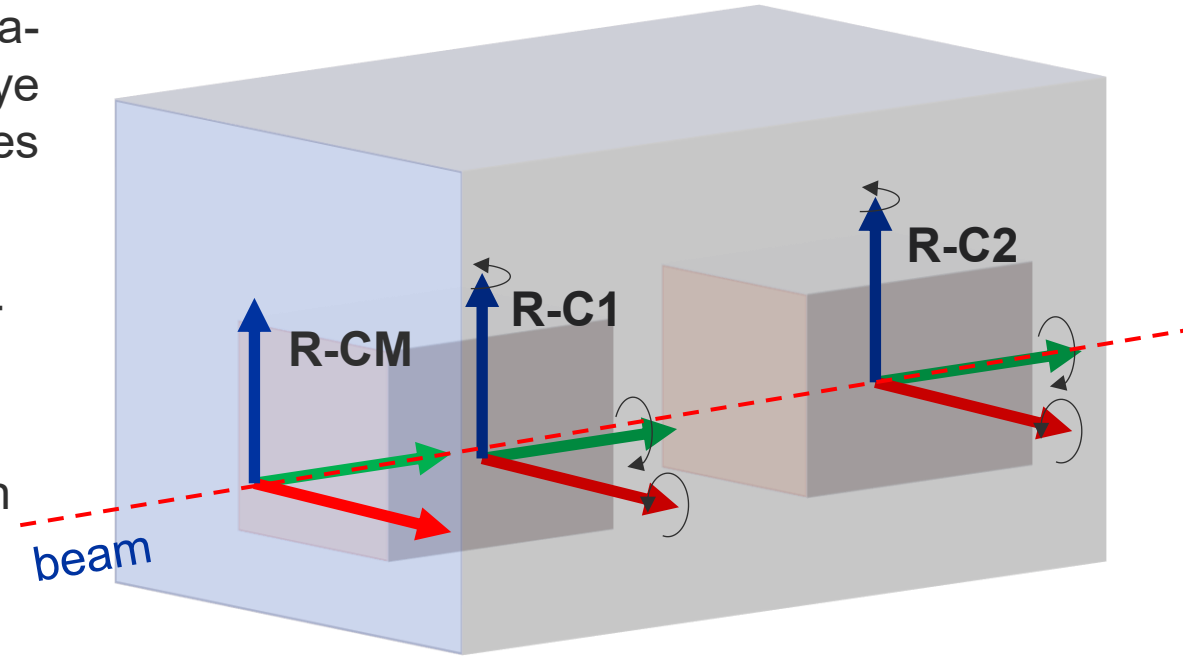
## Matematikai háttér

A matematikai modellben a külső és belső szerkezeti elemeket egy-egy merev testként és a hozzájuk tartozó koordináta-rendszerekkel írjuk le. A koordináta-rendszer egyik tengelye jellemzően az elem elhelyezéséhez szükséges mechanikai/mágneses/RF irányra illeszkedik.

A belső elemek helyzetének meghatározása ezen koordináta-rendszerek közötti transzformációs paraméterek becslésén alapul.

A paraméterek meghatározáshoz a koordináta-rendszerekben ismert helyzetű pontpárok közötti távolságmérést (FSI) használunk fel.

- **Ismeretlen** paraméterek száma elemenként: **7** (eltolás, forgatás, méretarány)
- **Mérési** eredmények száma elemenként: **8** (mikrométeres távolságmérés)

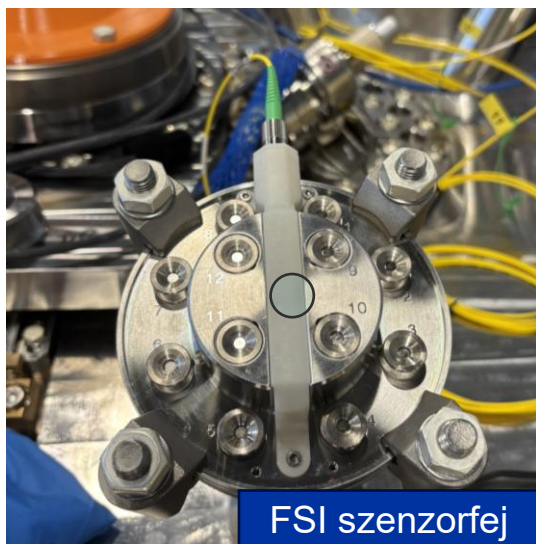


# FRAS – Belső monitoring rendszer – Crab cavity

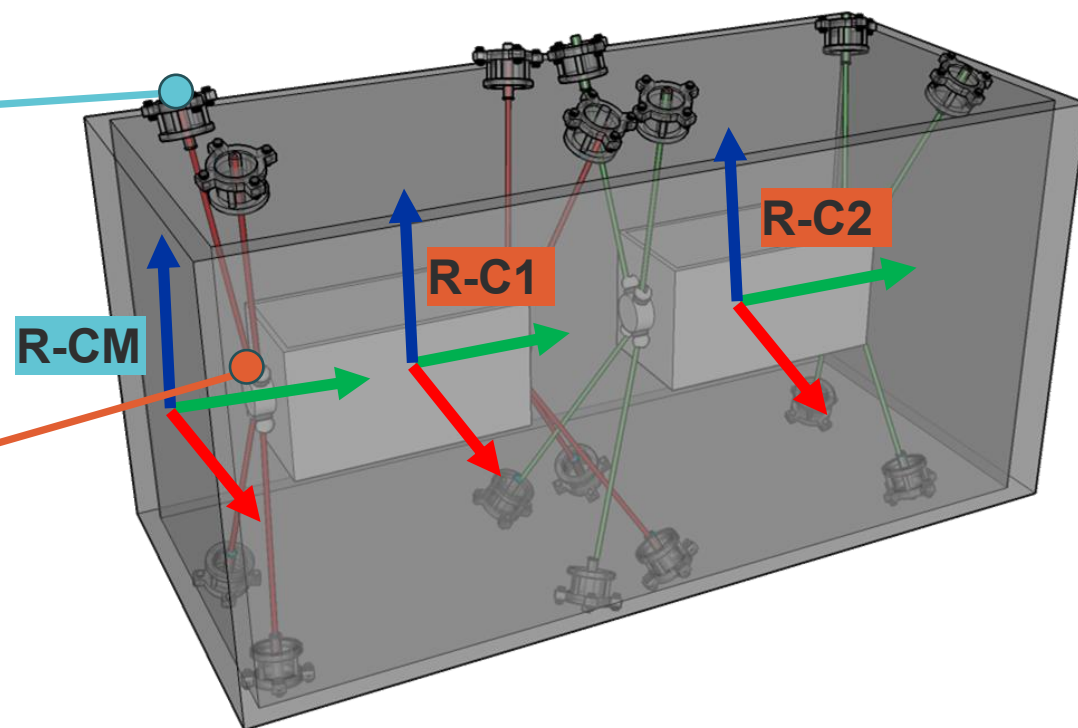
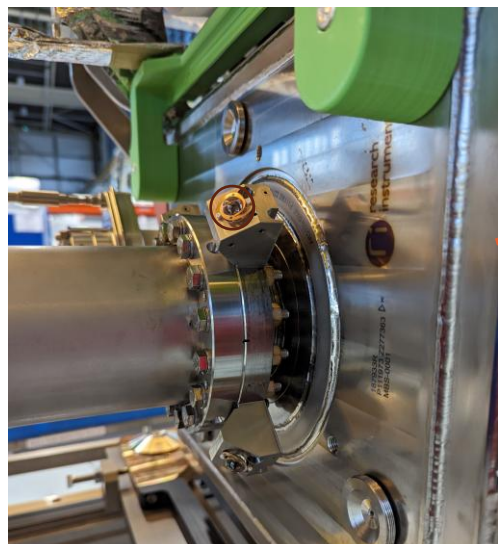
A belső monitoring rendszer megfelelő működéséhez szükséges kulcsfontosságú lépések az összeszerelés közben:

1. A távmérés végpontjául szolgáló reflektorok helyzetének a meghatározása (Lézer tracker)
2. A távmérési kezdőpont (ferrule) helyzetének a meghatározása (FSI szenzorfej kalibráció + Lézer tracker)

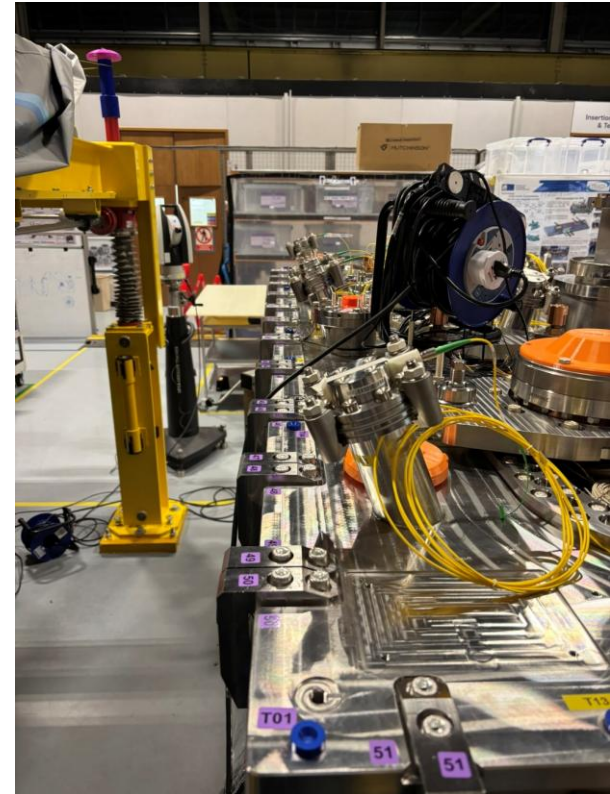
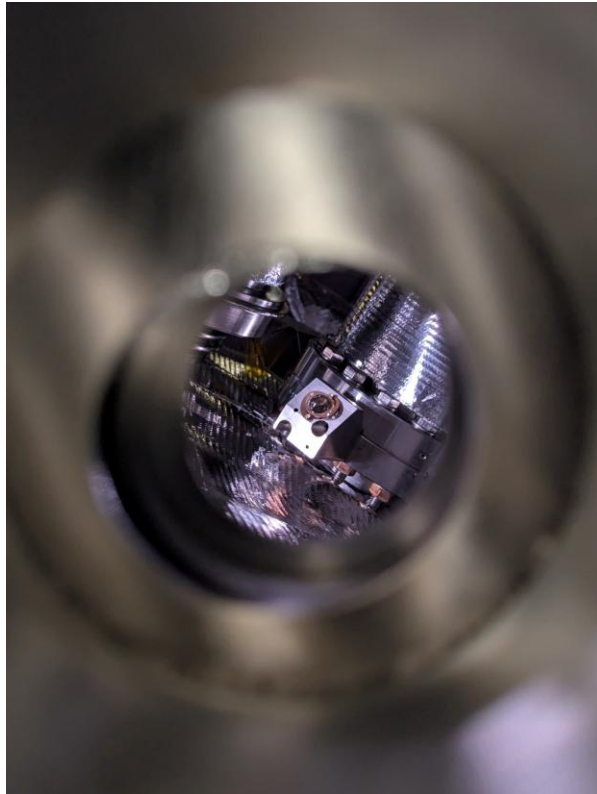
Távmérési kezdőpont  
(ferrule)



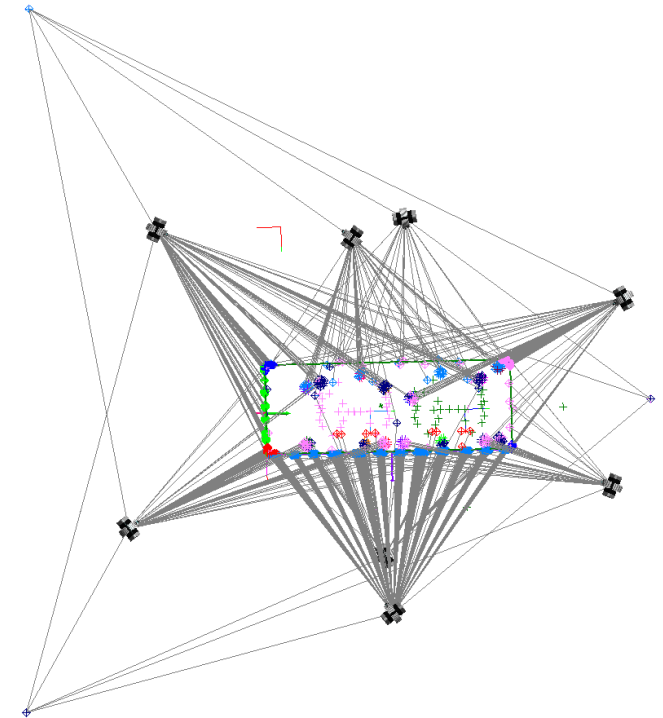
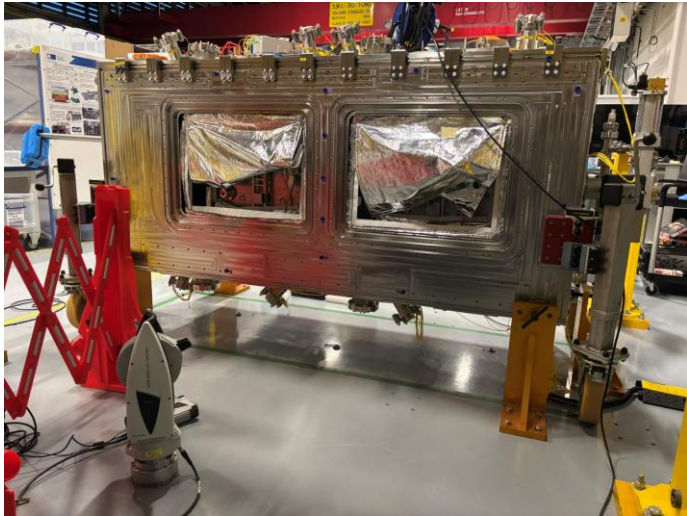
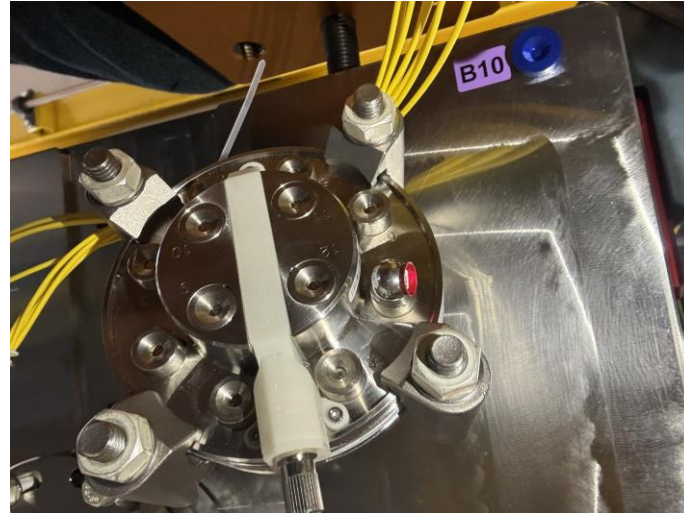
Reflektor  
(0.5" üveg gömb)



# FSI szenzorfej telepítés



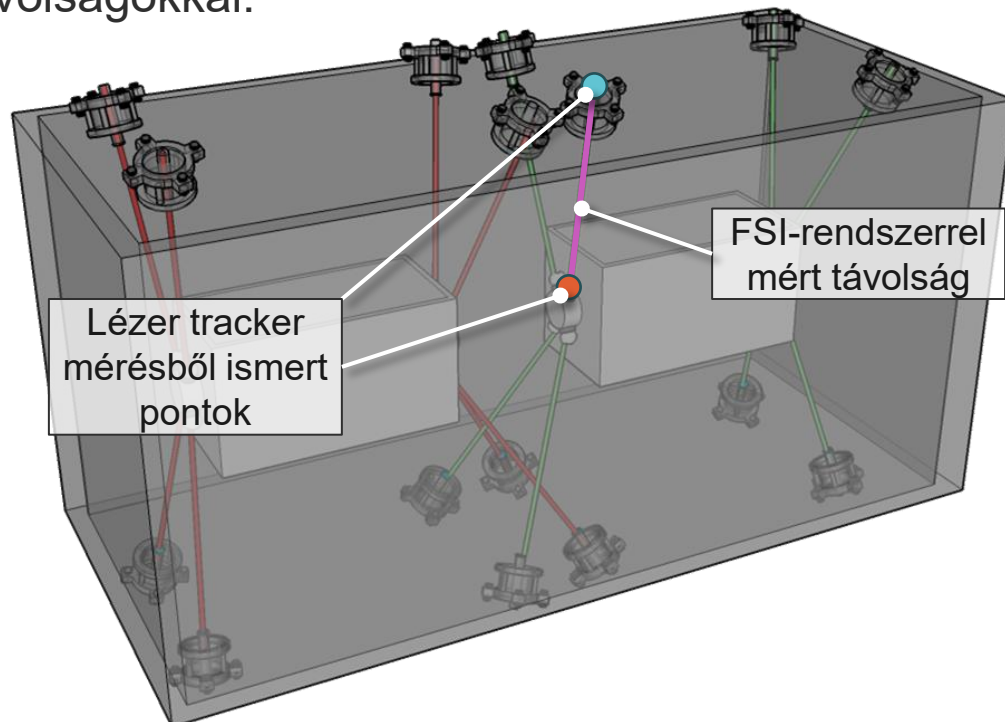
# FRAS – Belső monitoring rendszer – Felmérés



Koordináta megbízhatóság ( $1 \sigma$ ):  $\pm 15 \mu\text{m}$

# A belső monitoring rendszer validálása

- A belső monitoring rendszer validációja, két módszerrel meghatározott **független távolságok összehasonlításán** alapul.
- Az FSI-rendszerrel mért távolságokat összevetjük a lézer trackerrel mért pontokból számítható távolságokkal.



target and flange name	Head	FSI 3D distance (mm)	Tracker 3D distance (mm)	Difference (µm)
A1:C1JS1	15	601.033	601.022	11
A2:C1JS2	10	635.815	635.805	10
A3:C1JS3	8	658.815	658.793	22
A4:C1JS4	12	620.414	620.428	-14
B1:C1NJS1	18	816.059	816.070	-11
B2:C1NJS2	20	638.697	638.670	27
B3:C1NJS3	16	647.992	647.984	8
B4:C1NJS4	21	800.203	800.195	8
A1:C2JS1	17	820.156	820.150	6
A2:C2JS2	7	682.666	682.663	3
A3:C2JS3	14	655.158	655.173	-15
A4:C2JS4	23	786.268	786.289	-21
B1:C2NJS1	19	669.563	669.579	-16
B2:C2NJS2	24	636.321	636.314	7
B3:C2NJS3	11	643.881	643.858	23
B4C2NJS4	22	627.037	627.045	-8

Tolerance:  $\pm 40 \mu\text{m}$

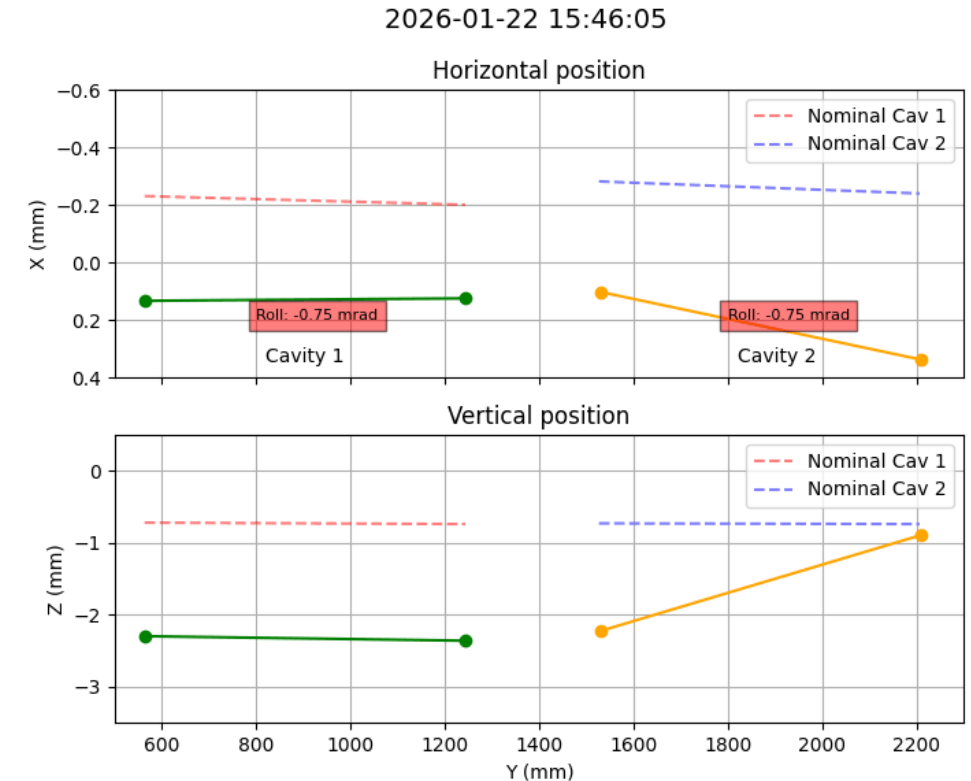
Eredmények (DQW CM#2)

# A belső elemek helyzetének beállítása az összeszerelés során

- Az összeszerelési folyamat végefelé történik a belső szerkezeti elemek (cavity) tervezett helyzetének a pontos beállítása.
- Ez a már működő belső monitoring rendszer segítségével történik.
- Fontos, hogy a beállítás normál körülmények között (szobahőmérsékleten) valósul meg, így a tervezett helyzet nem egyezik meg működéskori helyzettel (vákuum és a hűtés hatása).



Mechanikai beállító rendszer



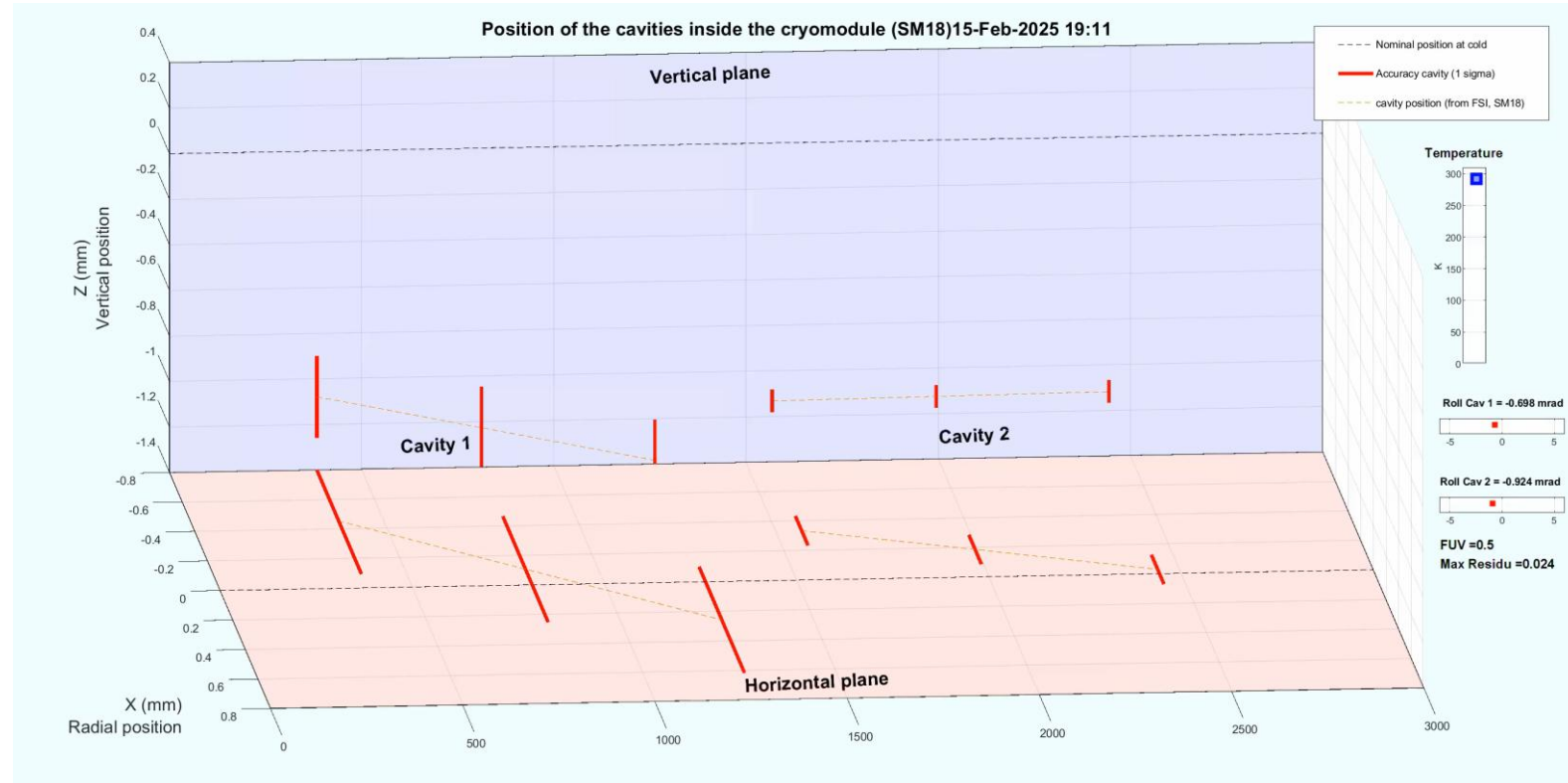
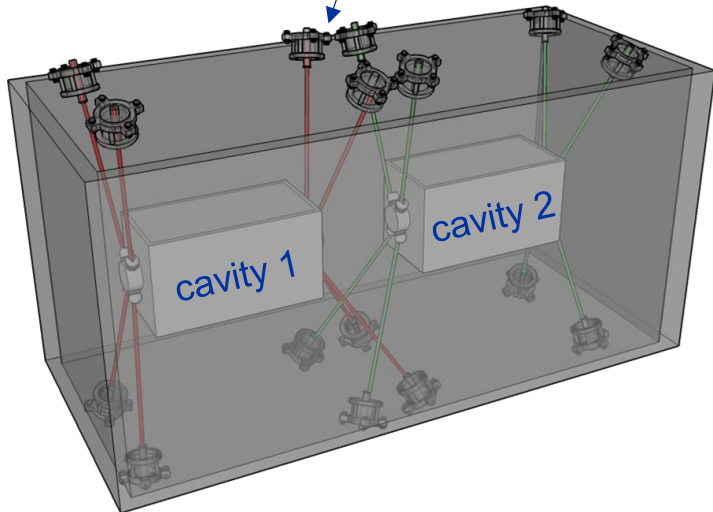
DQW CM#2

# FRAS – Belső monitoring rendszer

Crab Cavity kriomodul



FSI szenzorfej



A hűtés hatása (RFD prototípus az SPS-ben)

Legkisebb négyzetes kiegyenlítés: 8 mérés, 7 ismeretlen / cavity

(P. Sarvade)

# Lehetőségek a CERN-ben

- Jelenleg nyitott pozíciók (2026-04-22):

Survey Engineer	BE-GM-ASG-2026-80-GRAP
Junior Survey Engineer	BE-GM-ASG-2026-119-GRAE

- Jelentkezés

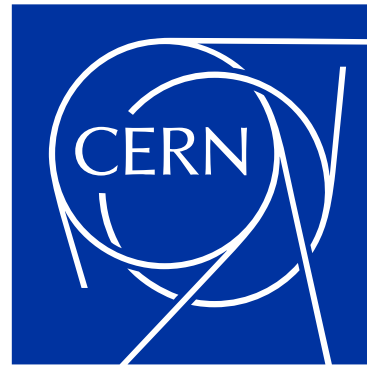
<https://careers.cern/jobs/>

- **Hallgatóknak** (földmérés a Mechanical Engineering kategóriában)

**Short-Term Internship**: Szakmai gyakorlat, 1-6 hónap. Folyamatos jelentkezési lehetőség

**Summer Studentship**: Oktatással egybekötött nyári gyakorlat, 8-13 hét. Jelentkezés minden év januárjában

**Technical Studentship**: Hosszabb szakmai gyakorlat, 4-12 hónap. Folyamatos jelentkezési lehetőség



**Köszönöm a figyelmet!**

[home.cern](http://home.cern)