

A CMS kísérlet új nyomkövető detektor rendszere a Nagy Luminozitású LHC-hez

Márton Krisztina

Standard Modell és Új Fizika Keresése Kutatócsoport (RMI, NFO)

Simony-nap 2023



2023. október 17.

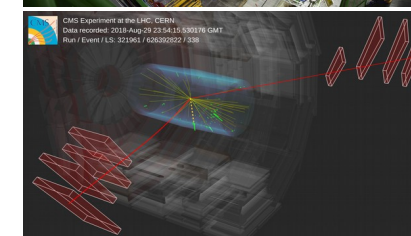
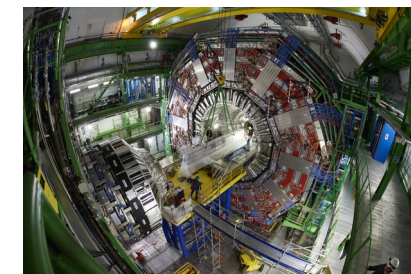
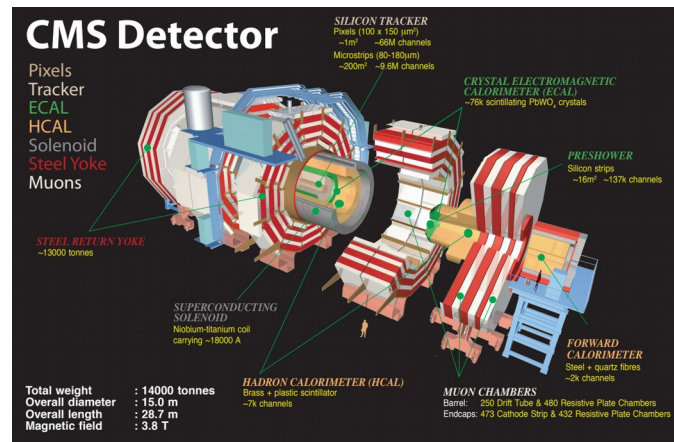
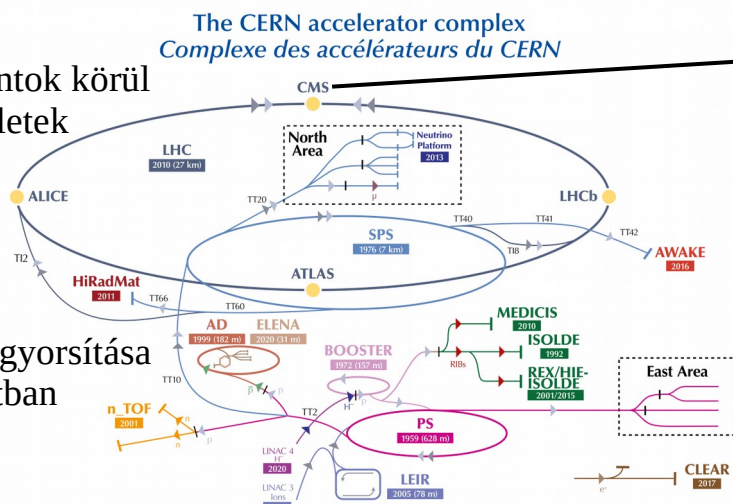
A CERN Nagy Hadronütköztetője

A CERN Nagy Hadronütköztetője (Large Hadron Collider) jelenleg a világ legnagyobb részecskegyorsítója

- másodpercenként 40 millió nyalábkeresztezés, 13.6 TeV ütközési energia
- egy nyalábkeresztezésben akár 60 darab proton-proton ütközés
- **Eddigi legnagyobb siker: Higgs-bozon felfedezése**
 - további célok: ismert részecskék tulajdonságainak pontos megmérése, az elméleti számításoktól való eltérések és új fizikai jelenségek keresése
 - **precíziós mérésekhez és ritka folyamatok megfigyeléséhez több adatra van szükség** → jóval hosszabb futási idővel vagy az **ütközési ráta (luminozitás) növelésével** érhető el

Ütközési pontok körül a nagy kísérletek detektorai

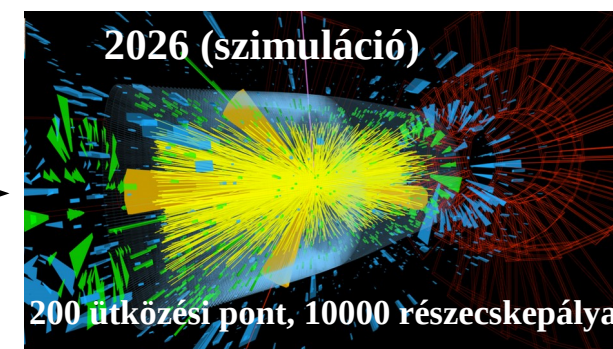
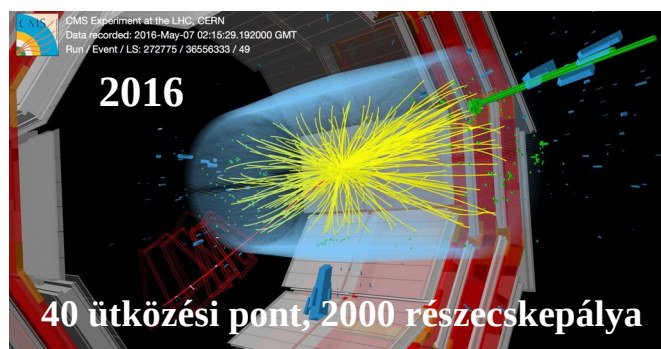
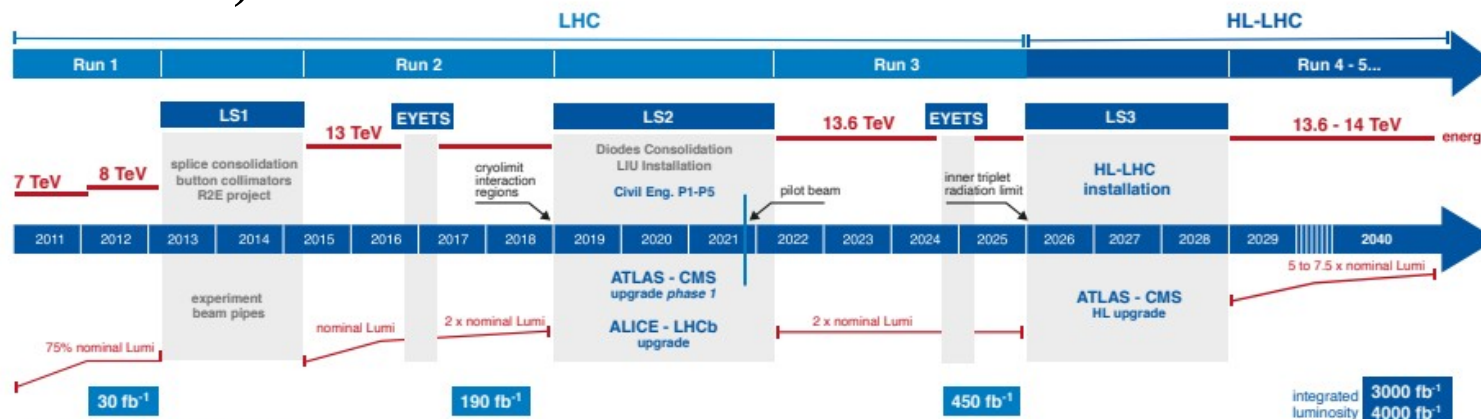
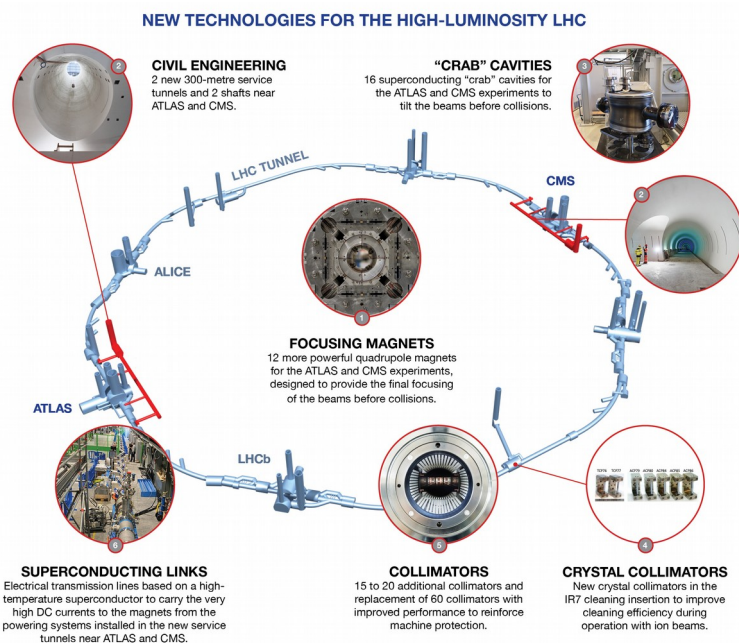
Részecskék gyorsítása több fokozatban



Higgs → Z bozon + foton

A Nagy Luminozitású LHC

- **2029-től** az LHC helyét a **Nagy Luminozitású LHC (High Luminosity LHC)** veszi át.
 - proton-proton ütközések száma egy nyalábkeresztelésben $\sim 140 - 200 \rightarrow 3 - 4 \times \text{LHC}$
 - felvett adat mennyisége (integrált luminozitás) $\sim 300 - 400 \text{ fb}^{-1} / \text{év} \rightarrow 10 \times \text{LHC}$

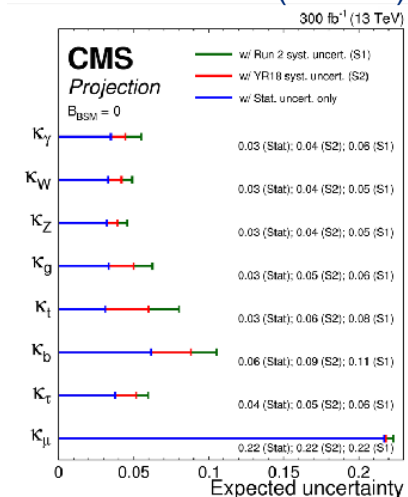


→ a kísérleteknek is fejleszteniük kell detektoraikat: megnövekedett adatmennyiség, nagy sugárterhelés, ...

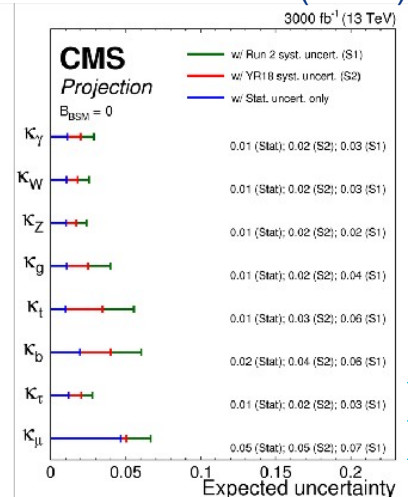
Higgs bozon tulajdonságainak vizsgálata

- HL-LHC → “Higgs – gyár”
- 150 millió Higgs bozon, 120 ezer Higgs – pár
- precíziós mérések, eddig nem megfigyelt bomlási módok és hiányzó csatolások megmérésére
 - kiváltképp érdekes lesz a Higgs – Higgs önkölcsönhatás

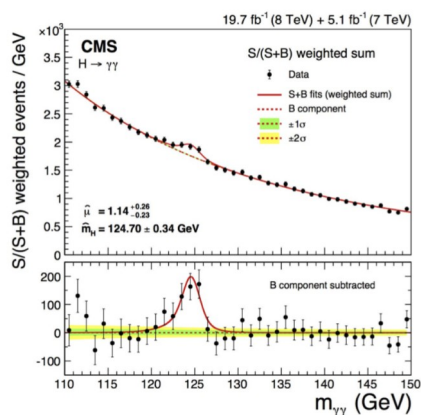
Higgs couplings after Run 3 (~2025)



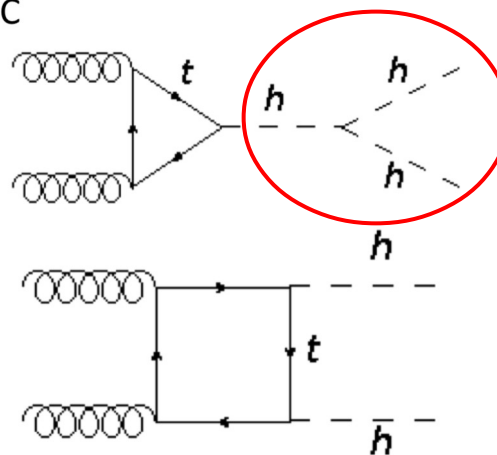
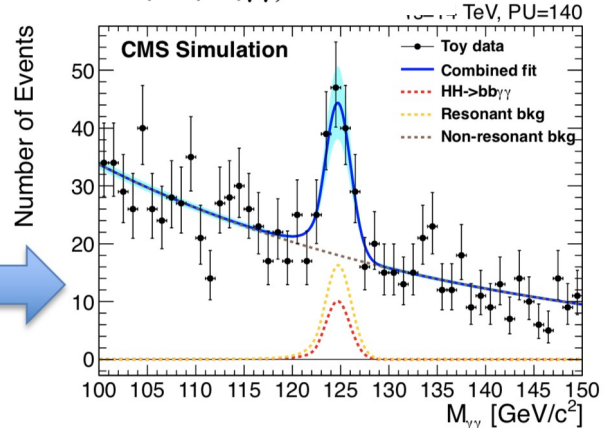
Higgs couplings after HL-LHC (3ab⁻¹)



H → γγ discovery in Run1



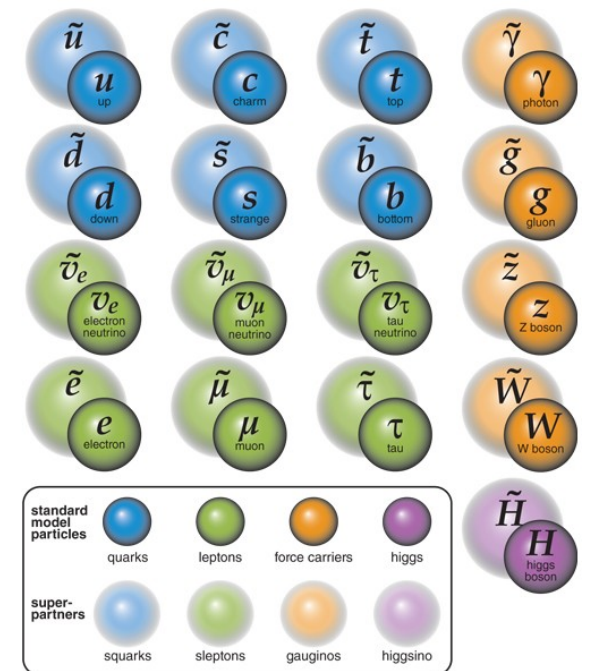
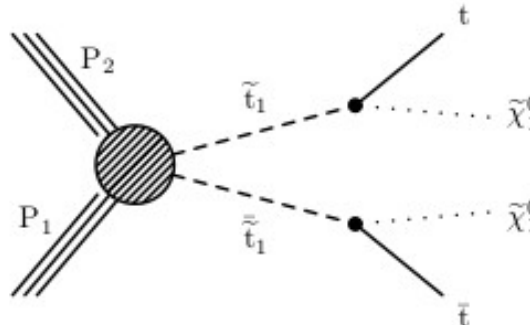
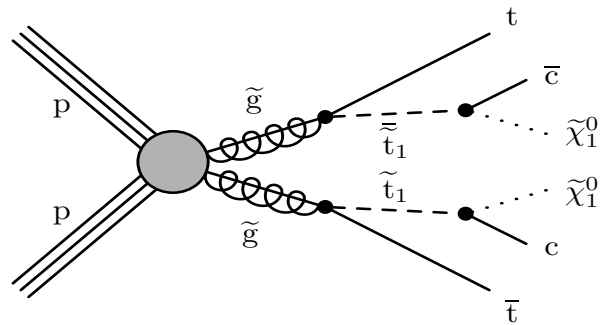
H(bb)H(γγ) evidence @ HL-LHC



→ b kvarkok felismerése különösen fontos

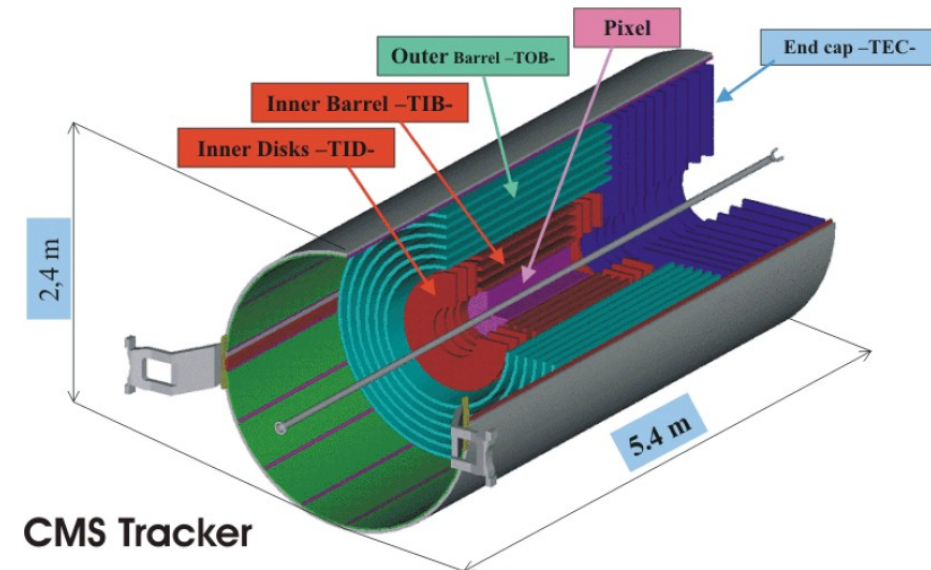
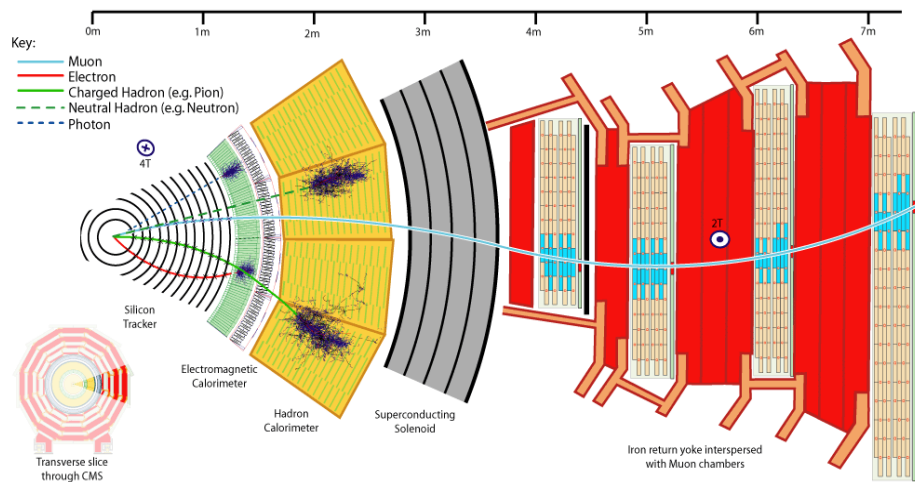
Új kölcsönhatások keresése

- pl. SUSY:
 - minden SM részecskének van egy szuperszimmetrikus párja
 - nagy tömegük miatt nem tudtuk eddig megfigyelni őket
 - sok szabad paraméter
 - minimális feltevés: a legnagyobb tömegű SM részecskéhez (top kvark) tartozik a legkisebb tömegű SUSY részecske (stop szkvark)
 - stop keletkezése esetén top kvark is megjelenik a folyamatban, ami aztán tipikusan b kvarkra bomlik
 - a b kvarkok azonosítása különös fontosságú



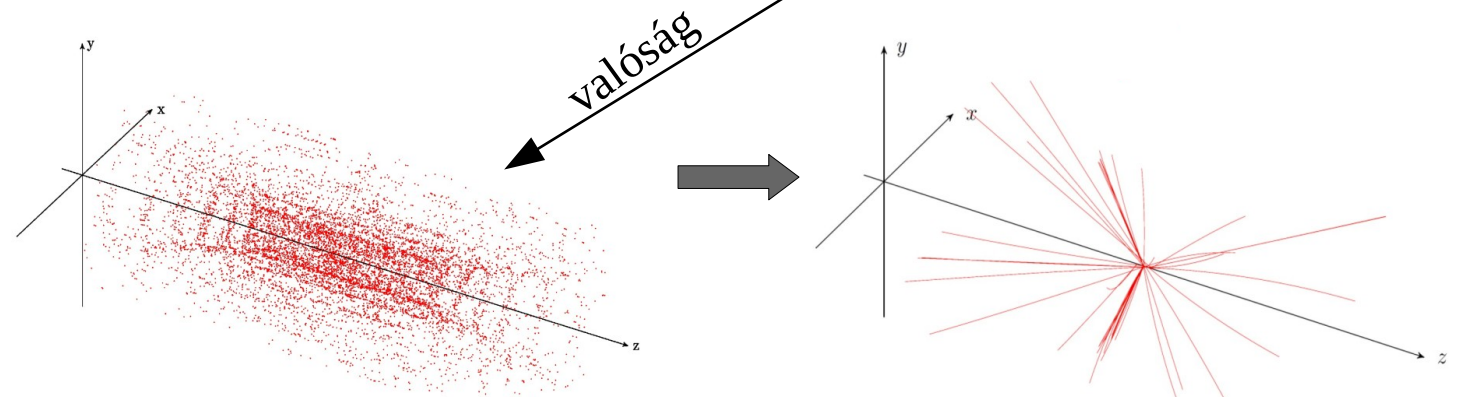
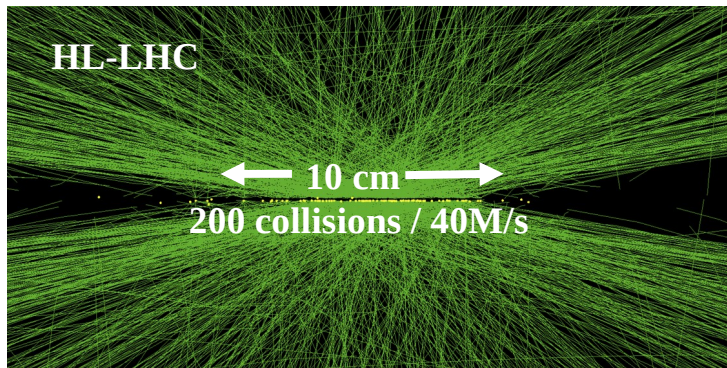
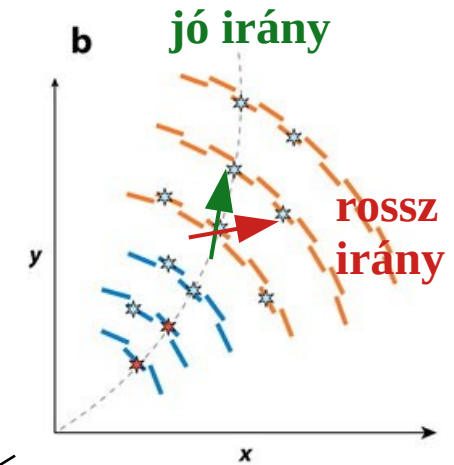
Az ütközések során zajló folyamatok megértéséhez szükségünk van a keletkezett részecskék megfigyelésére és tulajdonságaiknak megmérésére.

- **nyomkövető detektor rendszer** feladata a **töltött részecskék haladási útvonalának és keletkezési pontjának** azonosítása
 - ütközési pont körbevétele érzékelő felülettel, több rétegben
 - CMS-ben jelenleg félvezető detektorok 14 réteg koncentrikus hengerben + 15 korongban
 - közvetve a semleges részecskék (pl. fotonok) méréséhez is hozzájárul



Részecskepályák azonosítása

- a detektált beütésekből a részecskepályák visszaállítása
 - mágneses térben a töltött részecskék pályája elgörbül
→ görbületből a részecske impulzusának kiszámítása
 - a részecskepályák metszéspontjaiból az ütközési pont (elsődleges vertex) meghatározása
- egyszerre több ezer részecskepálya rekonstrukciójára is szükség lehet

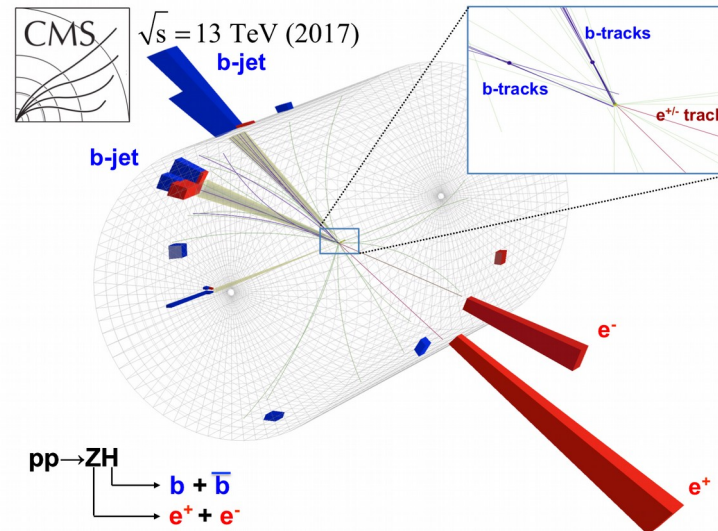
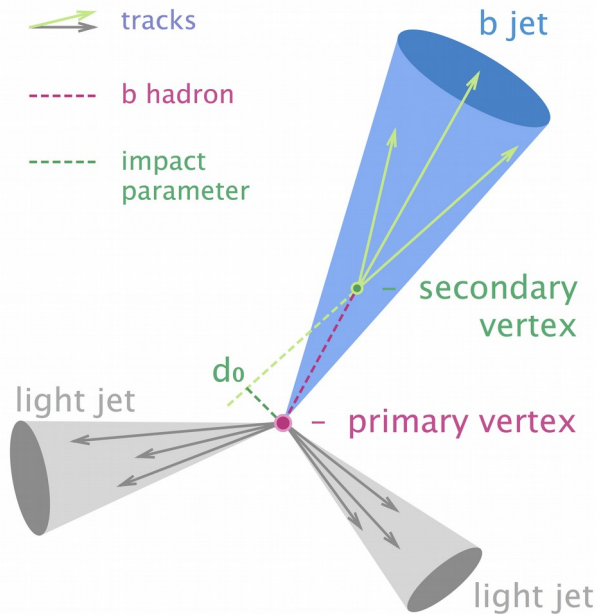


mérési pontok, részecskék által keltett beütések az érzékelési felületeken

rekonstruált részecskepályák

Mind a Higgs bozonnal kapcsolatos mérésekben, mind az SUSY keresésekben a b kvarkok felismerésének jelentős szerepe van.

- nehéz kvarkot (b vagy c) tartalmazó, “hosszú” életidejű hadronok bomlásuk előtt az ütközési ponttól több 100 μm távolságra jutnak
 - a belőlük kiinduló részecskezápörök (jet) nyomát visszakövetve a pályák nem az elsődleges vertexben fogják metszeni egymást
 - a nehéz kvarkokat tartalmazó jetek azonosítása a másodlagos vertex alapján

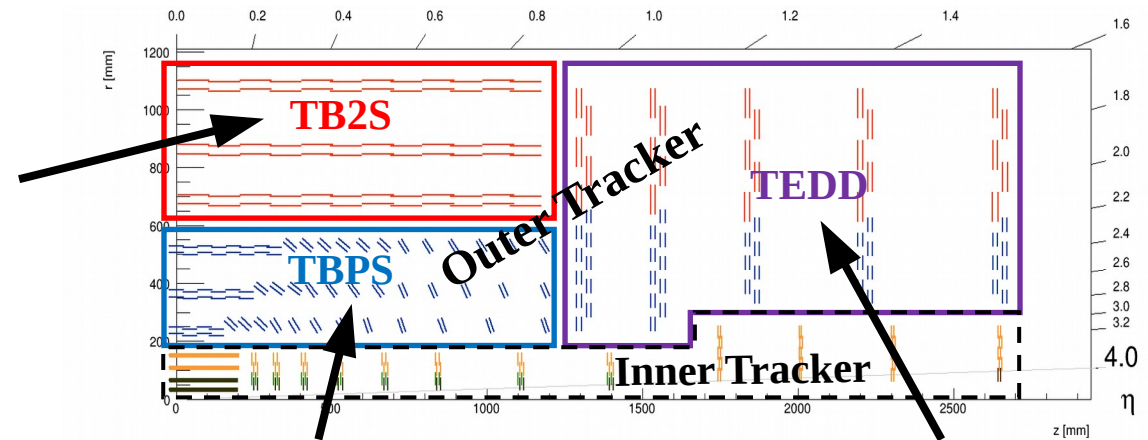
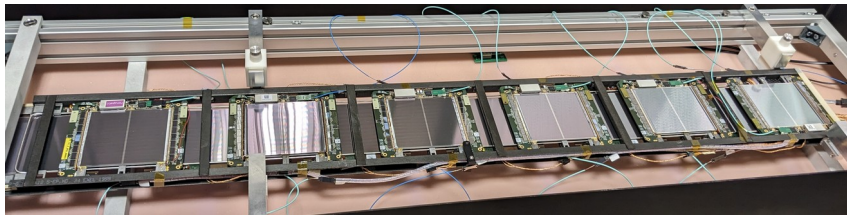


- ütközési ponthoz közel pixel detektor → elsődleges és másodlagos vertexek pontos mérése
- nyomkövető külső része → impulzus pontos mérése (alacsonyabb szegmentáltság elegendő)

A HL-LHC indulására a CMS kísérlet detektor-rendszere jelentős fejlesztéséken fog átesni (*Phase-2 Upgrade*)

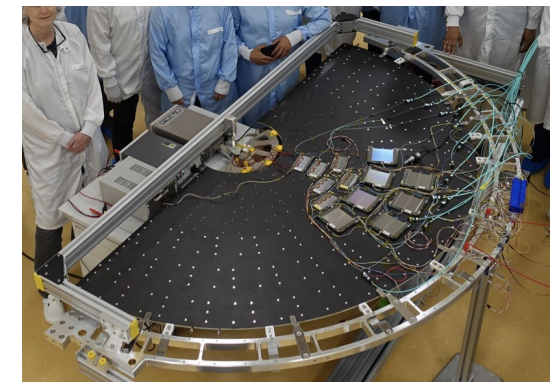
→ a teljes jelenlegi nyomkövető detektor (*Tracker*) lecserélésre kerül

- **Phase-2 Tracker** → belső (*Inner*) és külső (*Outer*) nyomkövető rendszer, különböző típusú félvezető detektor modulokból felépítve



Elvárások a Phase-2 Tracker-rel szemben:

- nagyobb lefedettség, jobb felbontás, robusztus részecskepálya-rekonstrukció
- valós idejű nyomrekonstrukció
 - információ küldése az L1 triggernek
 - melyik események legyenek elmentve?
- ellenállás a magas sugárterhelésnek



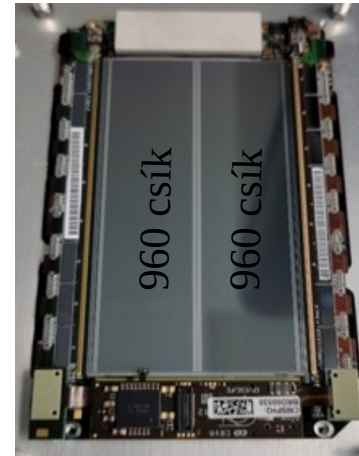
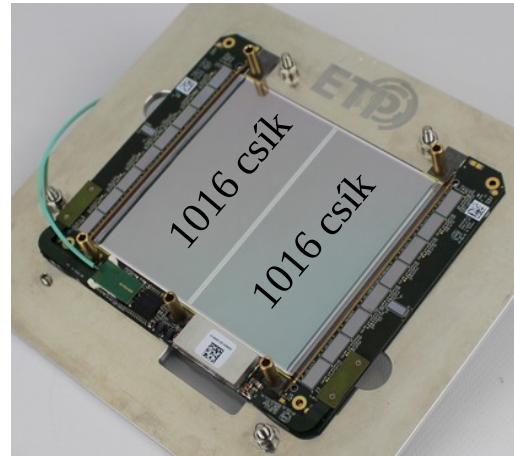
Az Outer Tracker félvezető moduljai

A Phase-2 külső nyomkövető rendszere két fajta “**p_T modulból**” fog felépülni

- önállóan is működni képes egységek, saját áramellátással és adatkiolvasással
- két félvezető szilícium szenzor, egymástól néhány mm távolságra, közös elektronikával (→ “iránymérés”)

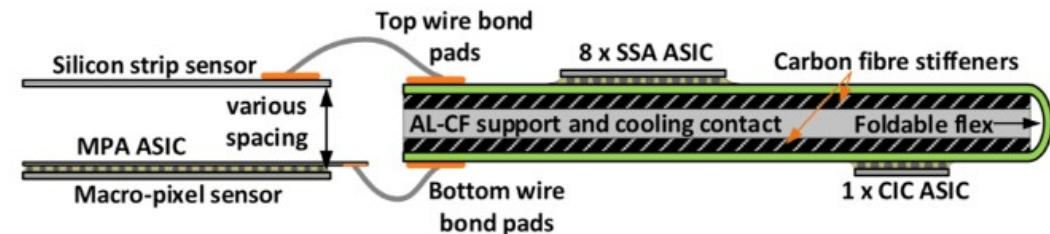
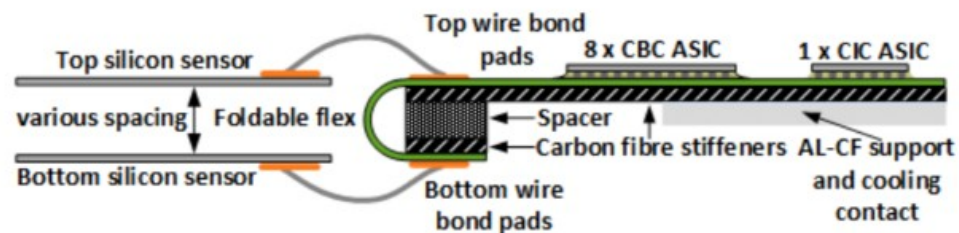
2S modul

- mindkét szenzor 2 x 1016 csíkra felosztva
- csík mérete: 5 cm * 90 μm
- front-end hibridek a két oldalon, hajszálförasztva az érzékelő csíkokhoz
- szervíz hibrid: áramellátás, vezérlés, adattovábbítás



PS modul

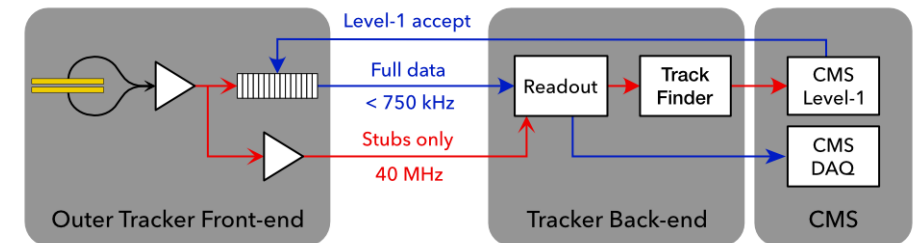
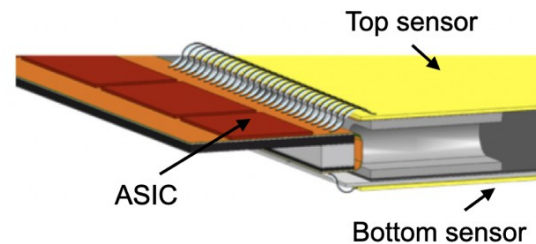
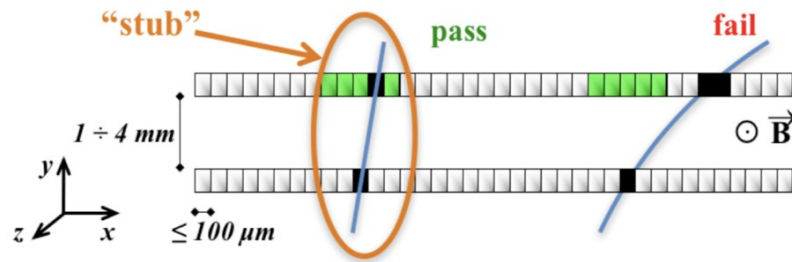
- felső szenzor 2 x 960 csíkra, alsó szenzor 32 x 960 makro-pixelre felosztva
- csík mérete: 2.4 cm * 100 μm
- makro-pixel: 1.5 mm * 100 μm
- két front-end hibrid
- külön hibrid az áramellátásnak és az adattovábbításnak



A Phase-2 Outer Tracker egyik legfontosabb újítása, hogy minden részecske-csomag kereszteződéskor (40 MHz) információt fog szolgáltatni a legalsó (L1) szintű esemény-kiválogató rendszernek.

- a modulon áthaladó töltött részecske az alsó és a felső szenzoron is beütést hoz létre
- kiolvasó front-end elektronikákon levő csipek korrelálják a két szenzor jelét, és részecskepálya-darabkákat azonosítanak
 - feltétel, hogy a keresett részecske az ütközési pont irányából érkezzon
- mágneses térben haladva a töltött részecskék pályája elgörbül, az impulzusukkal arányos mértékben
 - nagyobb transzverz impulzus esetén kisebb görbület

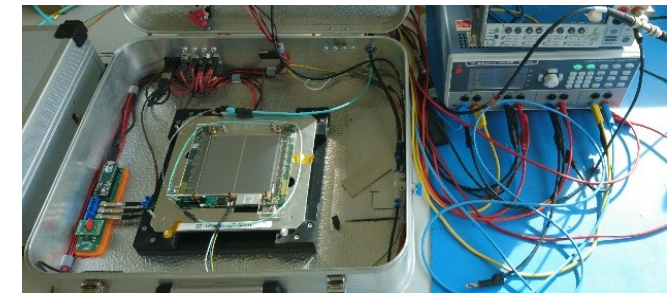
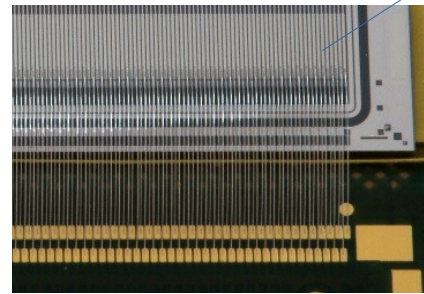
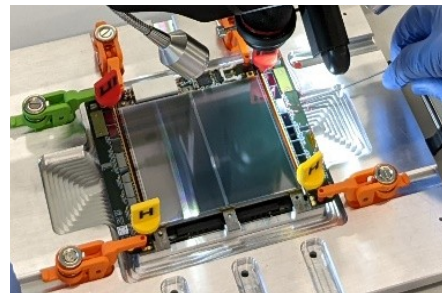
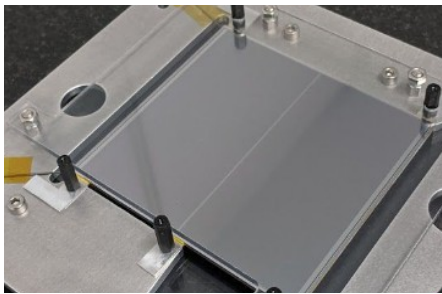
→ a modulok kiválogatják a $p_T > 2\text{GeV}$ töltött részecskéhez tartozó részecskepálya-darabkákat



Ahhoz, hogy a modulok a tervezettnek megfelelően tudják azonosítani a részecskéket, a szenzoroknak nagyon pontosan kell illeszkedniük egymáshoz

- a csíkokra merőlegesen $< 50 \mu\text{m}$
 - a csíkok irányában $< 100 \mu\text{m}$
 - a két szenzor által bezárt szög a 2S modulok esetén $< 400 \mu\text{rad}$, PS modulok esetén $< 800 \mu\text{rad}$
- nagyrészt manuális összeszerelés, a komponensek pozícionálása sablonok segítségével
 - 1) szenzor-szendvics összeragasztása, pontosság ellenőrzése
 - 2) hibrid elektronikák pozícionálása és ragasztása, vizuális ellenőrzés
 - 3) front-end hibridek hajszálforrasztása, védőbevonat felvitele
 - 4) az elkészült modul funkcionális tesztelése

4000 hajszálforrasztás / modul
→ teljes OT > 50 millió
→ automatizált forrasztás



→ 1 modul összeszerelése 1 ember egész napos munkája → az összes OT modult egy ember ~ 60 évig építené

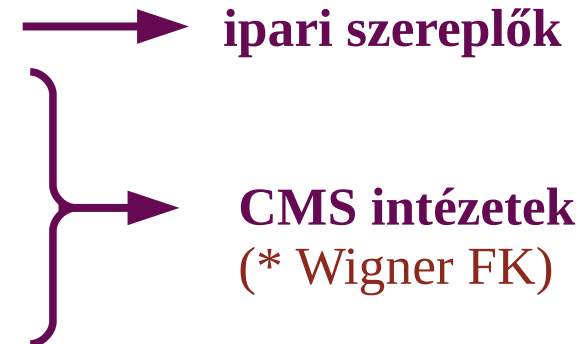
Phase-2 Tracker

- 3 aldetektor
 - ~ 5600 PS modul
 - ~ 7600 2S modul

→ megépítése hosszú folyamat (>3 év), ipari szereplők és CMS intézetek együttes munkája

A detektor megépítésének főbb lépései:

- 1) Komponensek (szenzorok, csipek, elektronikák) legyártása
- 2) **Komponensek minőség-ellenőrzése és tesztelése ***
- 3) Modulok összeszerelése és tesztelése
- 4) Aldetektorok (TBPS, TB2S, TEDD) megépítése
- 5) Detektor installálása a CMS “barlangban”



A hibrid elektronikák tesztelése

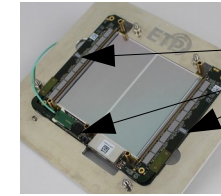
A Phase-2 Outer Trackernek extrém környezeti körülmények között kell majd működni (sugárterhelés, hőmérséklet, ...)

- a modulok cseréje vagy javítása nem lesz lehetséges

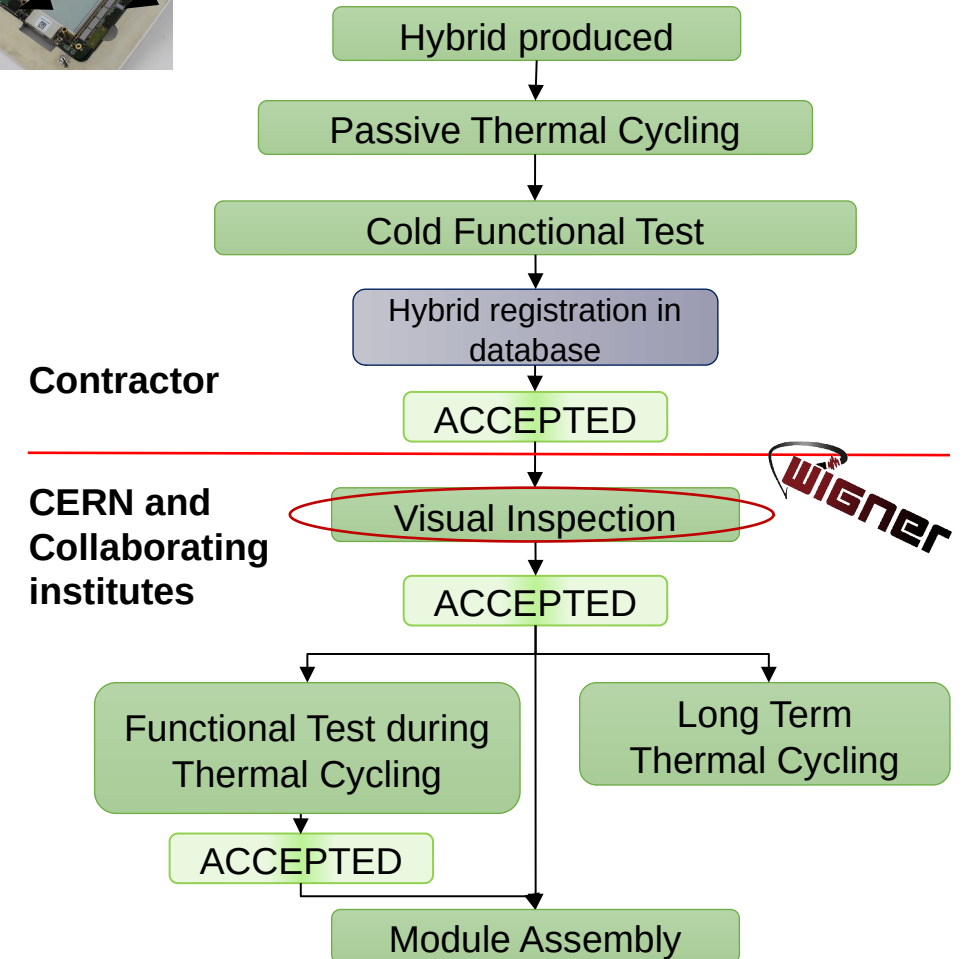
Minden egyes komponensnek alapos minőség-ellenőrzésen kell keresztülmennie, még a modulok összeszerelése előtt.

- funkcionális tesztelés csak a pillanatnyi működésről ad információt
- vizuális vizsgálat a hosszútávú működő-képesség és a modulba-szerelhetőség ellenőrzésére

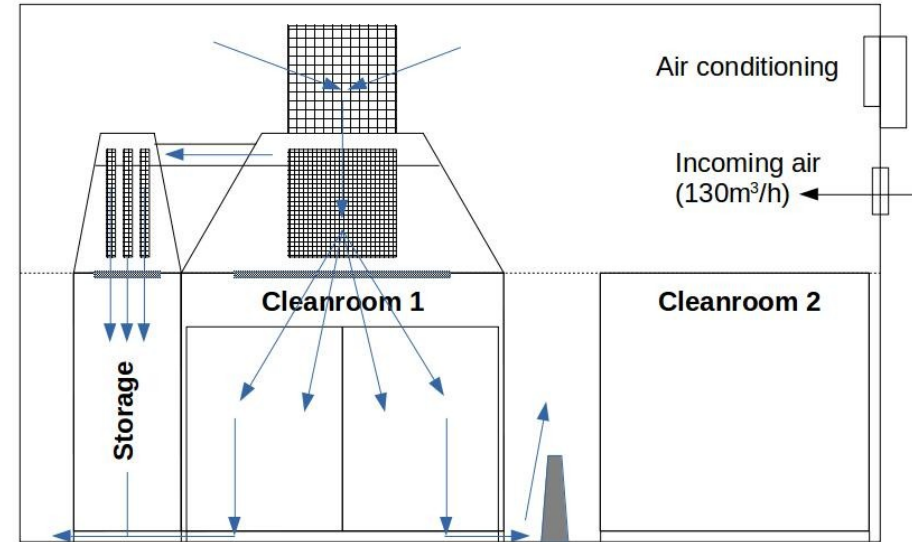
Mind a szenzorok, mind az elektronikák kezelése speciális környezetet igényel (tisztatér, ESD védelem)



Hybrid production and quality control plans



- aktív szellőzés, szűrt levegő a teljes teremben
- hőmérséklet és páratartalom szabályozás + monitorozás
 - $20\text{ °C} < T < 26\text{ °C}$
 - $35\% < RH < 60\%$
- 15 m² lamináris tisztatér
 - három fokozatú légszűrő-rendszer
 - antisztatikus kisülés elleni védelem

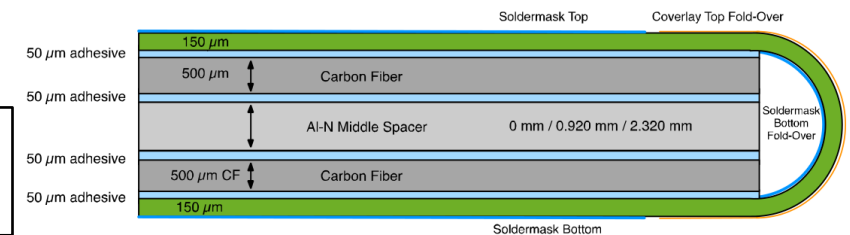
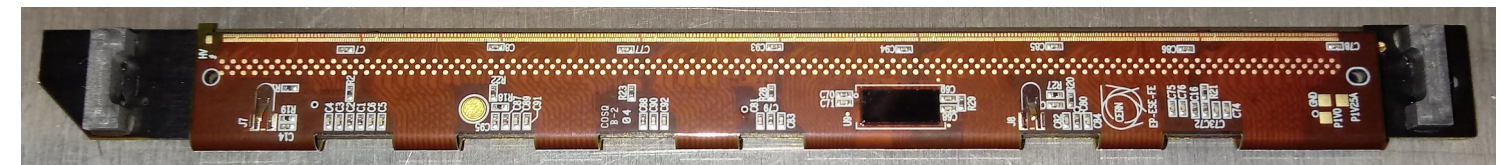
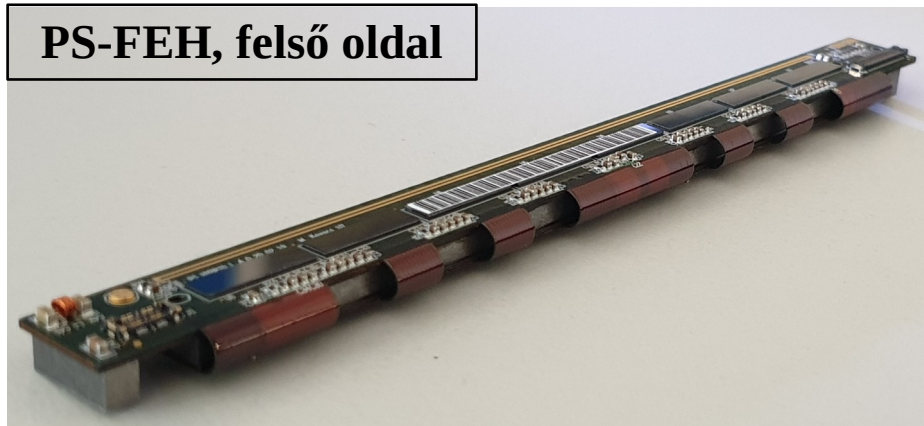
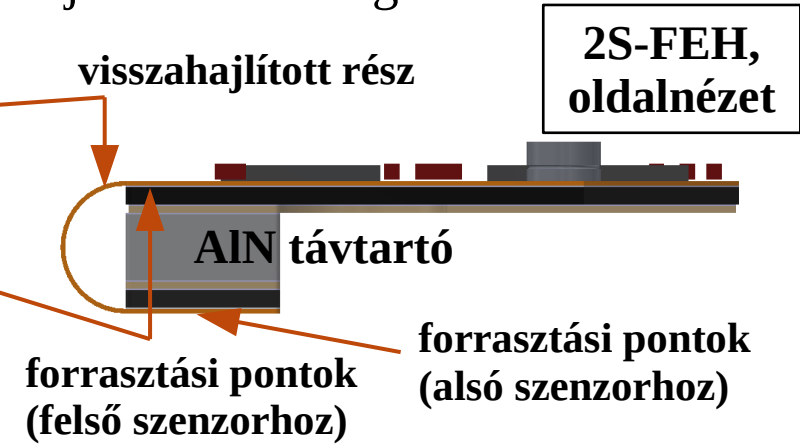
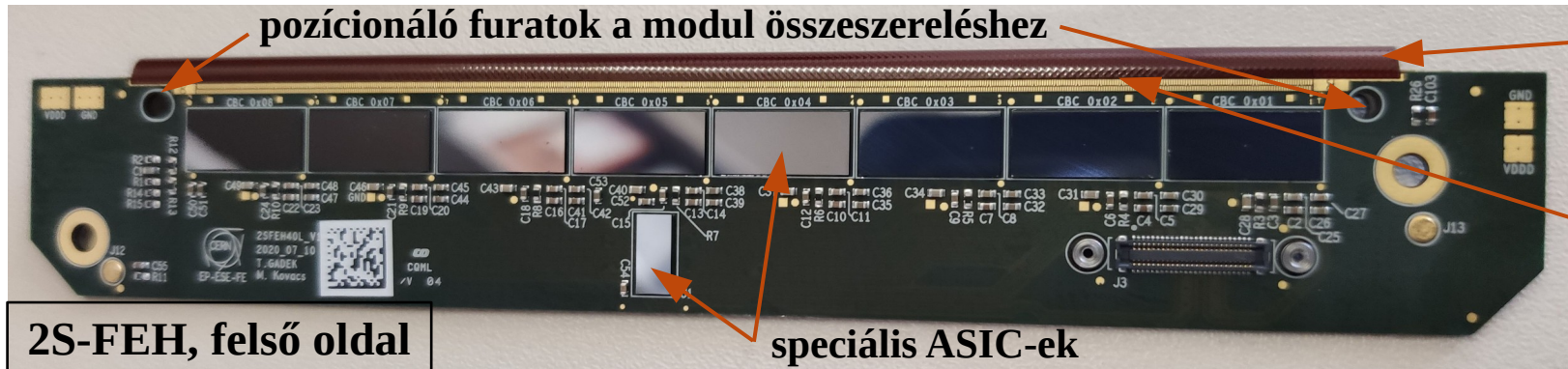


Eszközök a tisztatérben

- Leica M205C sztereó-mikroszkóp
 - 20 Megapixeles kamera, motorizált vertikális tengely, mérő- és vezérlő szoftver
- 2 x Nikon SMZ800N sztereó-mikroszkóp
 - 5 Megapixeles kamera, mérőszoftver
- Nagy felületű (50 cm x 90 cm) optikai szkener

Front-end hibrid elektronikák

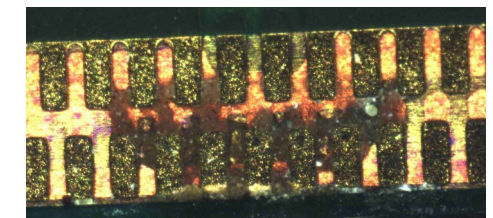
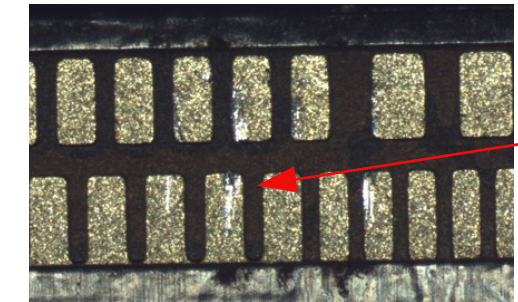
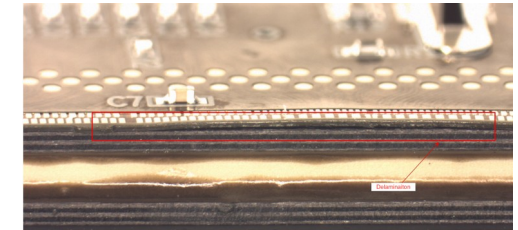
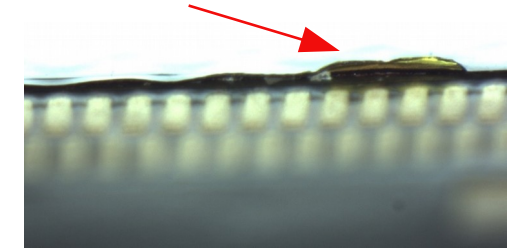
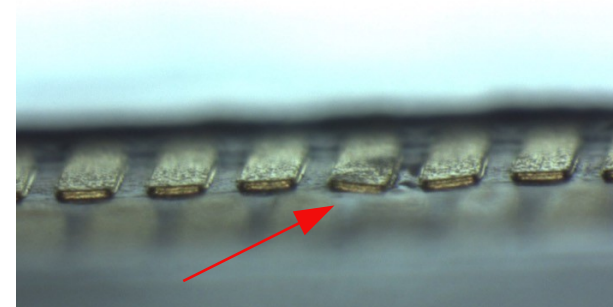
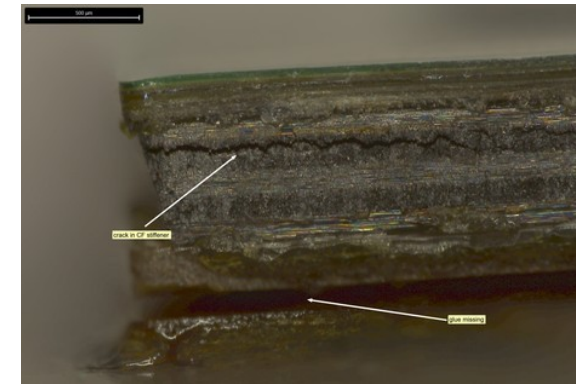
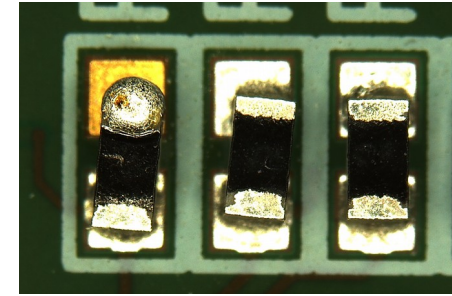
- 4 rétegű, nagy sűrűségű flexibilis áramkörök, szénszálal merevítőre laminálva
 - visszahajlítva egy távtartó körül → alsó és felső szenzorral egy síkban a forrasztási lapkák
 - speciális, egyedi (CERN/CMS) tervezésű ASIC csipek → a szenzorok jeleinek feldolgozása



A hibridek vizuális vizsgálata

Főbb ellenőrzési pontok

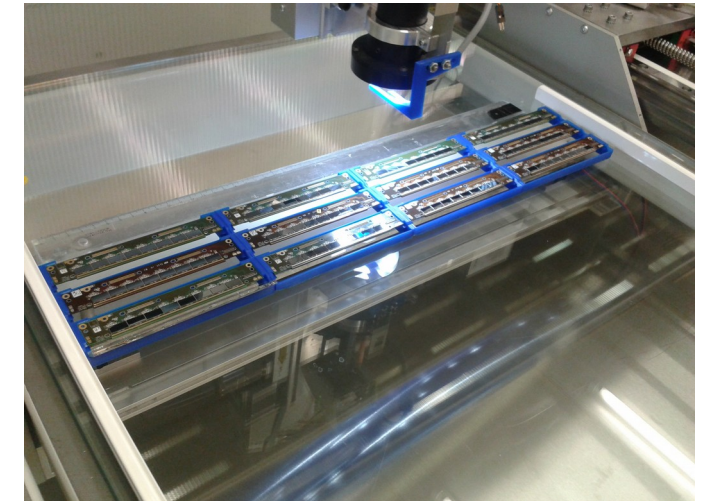
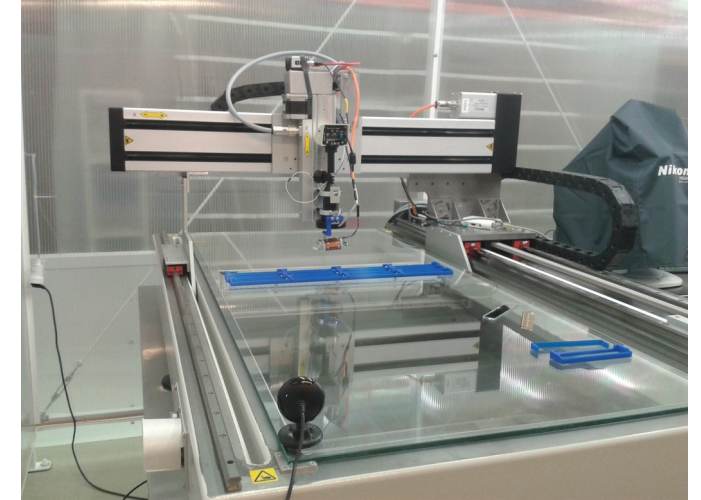
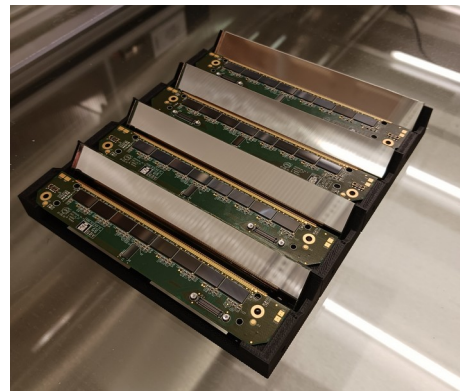
- áramkör tisztasága, forrasztások minősége
 - ujjlenyomatok a csipeken árulkodhatnak a nem megfelelő kezeléstről
- rétegek illeszkedése
 - pontatlanul legyártott elektronika nem / nehezen építhető be a modulba
- ragasztás minősége
 - hosszútávon problémát okozhat a rétegek elválása (nagy hőmérséklet-különbségek a detektor életideje során)
- sérülések keresése
- forrasztási lapkák minősége és tisztasága
 - nehéz forraszthatóság
 - gyenge forrasztás idővel elengedhet



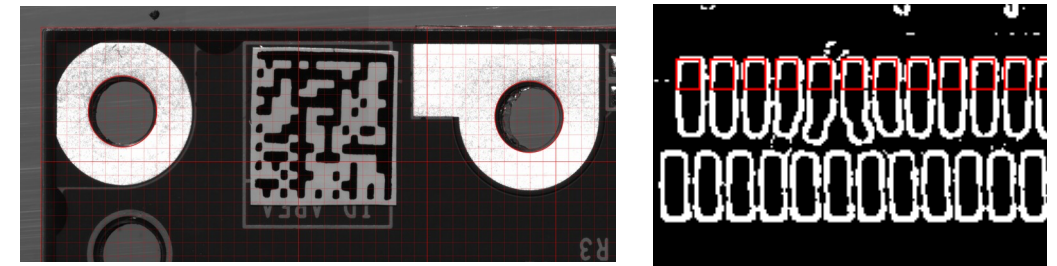
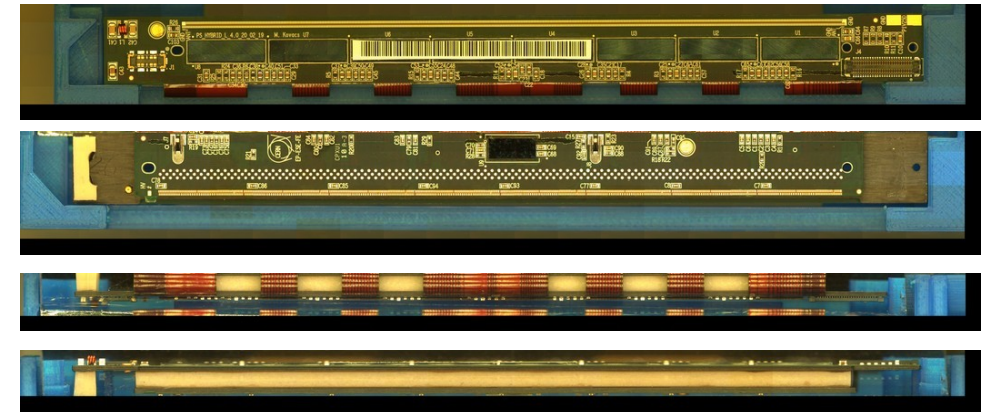
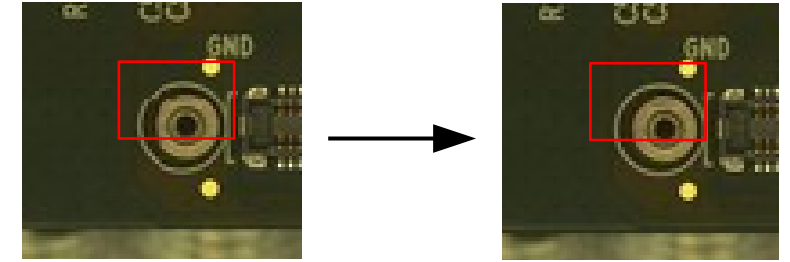
- léptető motor + 5 Megapixeles kamera
 - 1 lépés ~ 6.25 μm
 - kamera felbontása ~ 4.4 μm
 - kép mérete: 11.4 mm x 8.56 mm
- a motor a megadott x-y-z koordinátába lép, majd a kamera a megfelelő beállításokkal felvételt készít az adott területről

- 50 cm x 90 cm hasznos felület → egyszerre kb 100 hibrid elektronika
- speciális tartószerkezet tervezése az elektronikák pozícionálásához (~mm pontosság elegendő)
 - 3D nyomtatás ESD szálból
 - hibridek hosszanti éleinek lefényképezése tükör segítségével
- vezérelhető LED megvilágítás

→ **100 hibrid lefényképezése 1 éjszaka alatt**



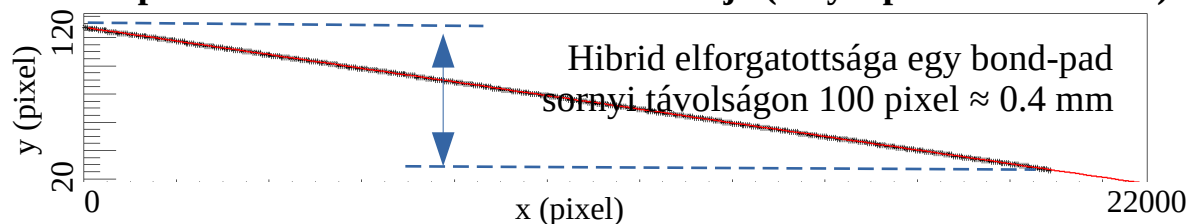
- 1) a kamera által rögzített kis területű képekből a teljes elektronika fényképének összeállítása
 - képösszeállítás a léptetőmotor pozícionálása alapján nem elég pontos
 - mozaikok illesztése a kép tartalma alapján→ 1 hibrid ~ 250MB, 150 Megapixel
- 2) hibrid típusának felismerése jellegzetes pontok alapján
- 3) hibrid elforgatásának meghatározása
- 4) vonalkód leolvasása, hibrid beazonosítása
- 5) pozícionáló furatok illesztése → átmérő ellenőrzése
- 6) forrasztási lapkák megkeresése és megmérése



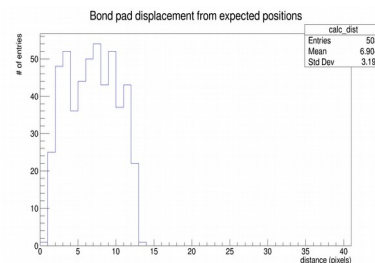
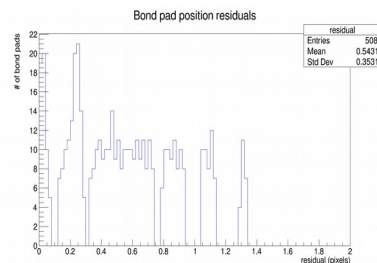
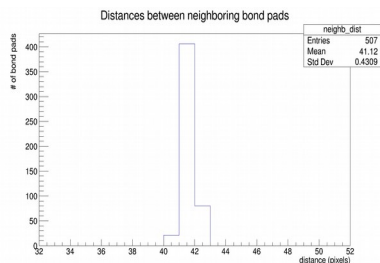
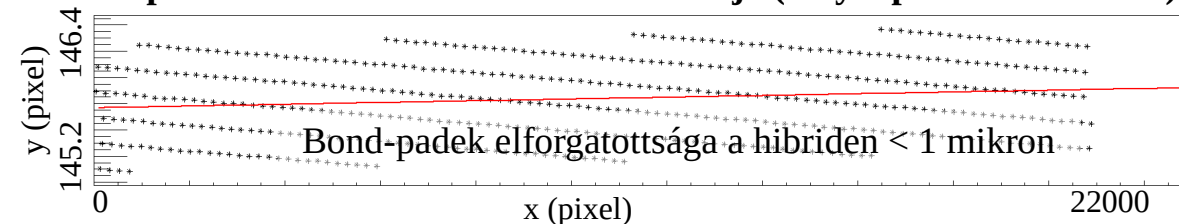
Forrasztási lapkák pozíciója és az áramkör megnyúlása

- az optikai szkennerrrel lehetőség van a hozzánk érkező összes front-end hibriden a minden egyes forrasztási lapka pozíciójának megmérésére
 - **Wigner FK egyedi hozzájárulása a vizuális teszteléshez**
 - felvételek készítése a dokumentáció és a hosszútávú trendek szempontjából is fontos
- forrasztási lapkák méretének és pozíciójának toleranciája $\pm 20 \mu\text{m}$

Bond-padek bal felső sarkának koordinátája (fénykép koordináta rsz.)



Bond-padek bal felső sarkának koordinátája (fénykép koordináta rsz.)

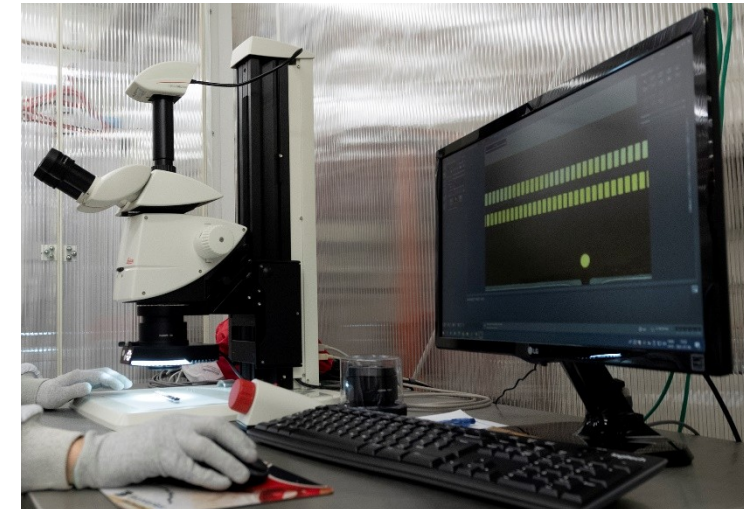


- szomszédos forrasztási lapkák távolsága $\sim 179.9 \mu\text{m}$ (nominális $180 \mu\text{m}$)
- a bond-pad sor a felbontáson belül lineáris, az egyes padek eloszlása egyenletes
- a teljes sor megnyúlása $< 60 \mu\text{m}$

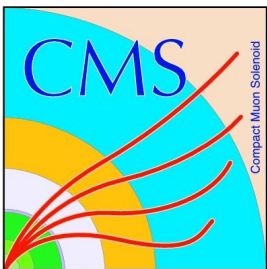
Az új külső nyomkövető rendszert felépítő modulokhoz közel **50.000 darab** hibrid elektronikára lesz szükség

- teljes mennyiség tesztelése **2 év** alatt
- vizuális ellenőrzés a **CERN** (2/3 részben) és a **Wigner FK** (1/3 részben) feladata
- 5 fő típus, összesen 15 féle változat → főbb ellenőrzési pontok azonosak, de vannak egyedi sajátosságok
- 1 hibrid mikroszkópos vizsgálatára (+dokumentáció) ~ 15-20 perc áll majd rendelkezésre
 - 1 ember 1 munkanap alatt ~ 25 hibridet tud megvizsgálni
 - + mérések + csomagolás + logisztika
 - CERN: 4 mérőhely
 - Wigner FK: 2 mérőhely

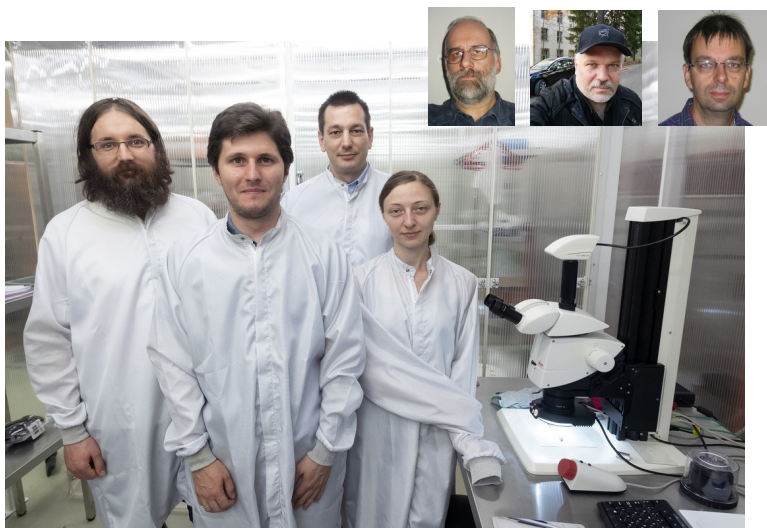
→ **első hibridek érkezése pár hónapon belül**



- 2029-től kezdi meg működését a HL-LHC
 - a megnövekedett ütközésszám → ritka folyamatok megfigyelése, új fizika keresése
- a CMS kísérlet a teljes jelenlegi nyomkövető detektorát lecseréli, hogy meg tudjon felelni az új gyorsító által támasztott követelményeknek
- Phase-2 Outer Tracker moduljainak fejlesztési szakasza 2023-ban lezárult, átléptünk a gyártási időszakba
- csoportunk a CERN-nel együttműködésben a hibrid elektronikák vizuális ellenőrzéséért felelős
 - 2 év alatt közel 20.000 áramkör mikroszkópos vizsgálata és szkennelése a Wigner FK-ban



Köszönöm a figyelmet!



A kutatást az NKFIH OTKA K143477 számú pályázat támogatta.