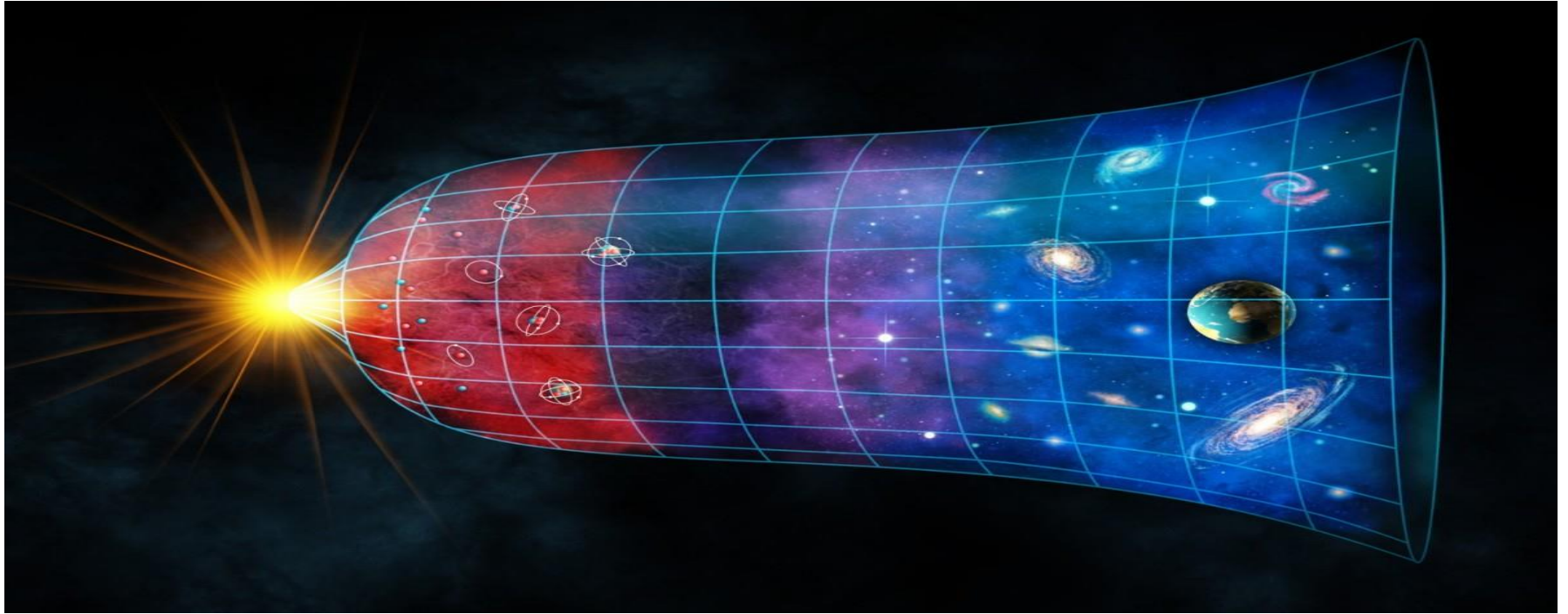


# Út a következő generációs nehézion-fizikai kísérlet felé

Barnaföldi Gergely Gábor, Wigner FK, CERN ALICE



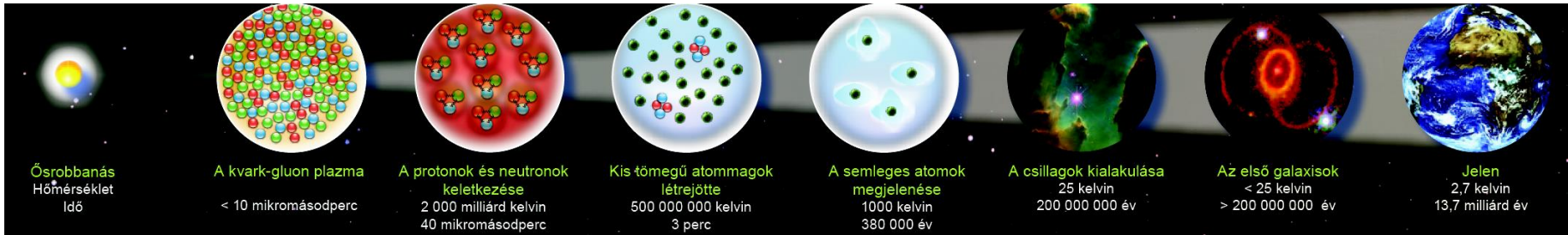
# A Világegyetem fejlődése



Világegyetem 13,8 milliárd éves.

Mi volt az anyaga a Nagy Bumm után az első milliomod másodpercekben?

# Az Univerum első pillanatai



Az Ősrobbanás után az anyag tágult és folyamatosan lehűlt. Eközben a szerkezete megváltozott. Ma a látható (barionos) anyag alkot minket, a földi életet, bolygókat, csillagokat, galaxisokat...

Az első milliomod-másodpercekben a „kvarkleves” alkotta a Világegyetemet ez a forró és sűrű anyag a kvarkokból és gluonokból álló kvark-gluon plazma.

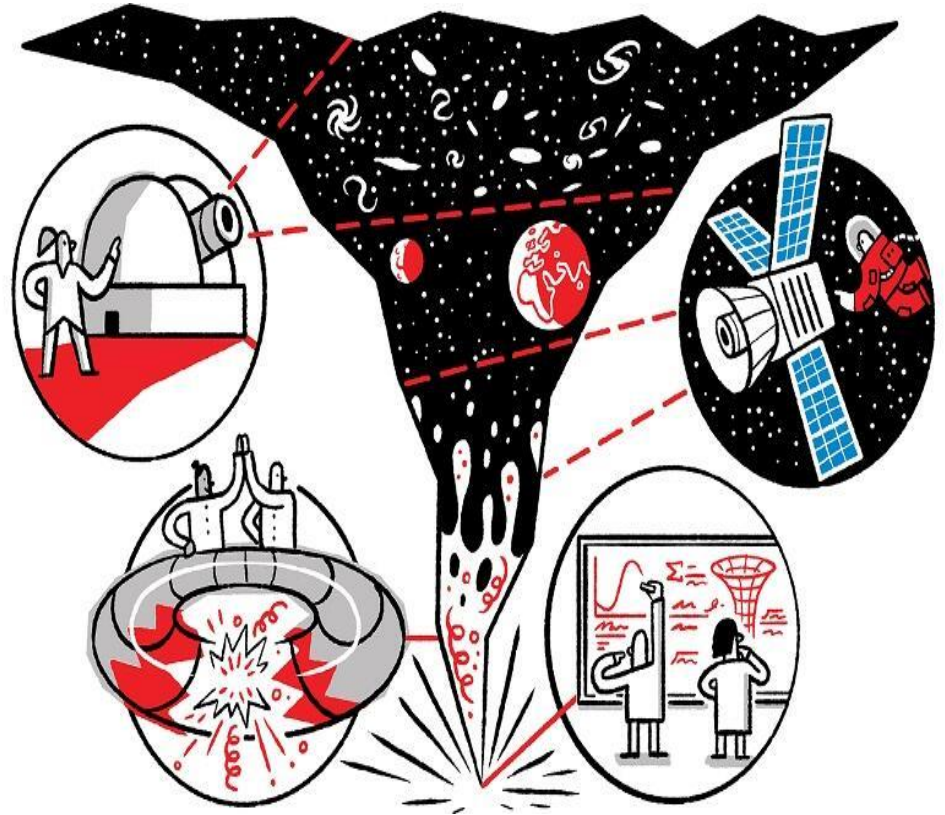
Előállíthatjuk-e a kvarklevest, azaz az Univerum őanyagát, a kvark-gluon plazmát földi laboratóriumban?

# A Világegyetem fejlődésének kutatása

A Világegyetem múltját és fejlődését kutatjuk:

- csillagászati megfigyelésekkel,
- részecskegyorsítókkal,
- szuper-számítógépes szimulációkkal.

Minél régebbre akarunk visszamenni annál több a kérdőjel!



# Nagy kérdések a korai Univerzum témában...



**Az atommagok építőelemeit a protonokat és neutronokat kvarkok alkotják. Ezeket az erős kölcsönhatás tartja össze gluonok által: milyen ez a hatás?**



**Nehéz atommagok nagy energiás, ultra-relativisztikus ütközéseiben létrejöhet-e olyan anyagi állapot ami az Univerzum korai állapotában volt jelen nem sokkal az Ősrobbanás (Nagy Bumm) után?**



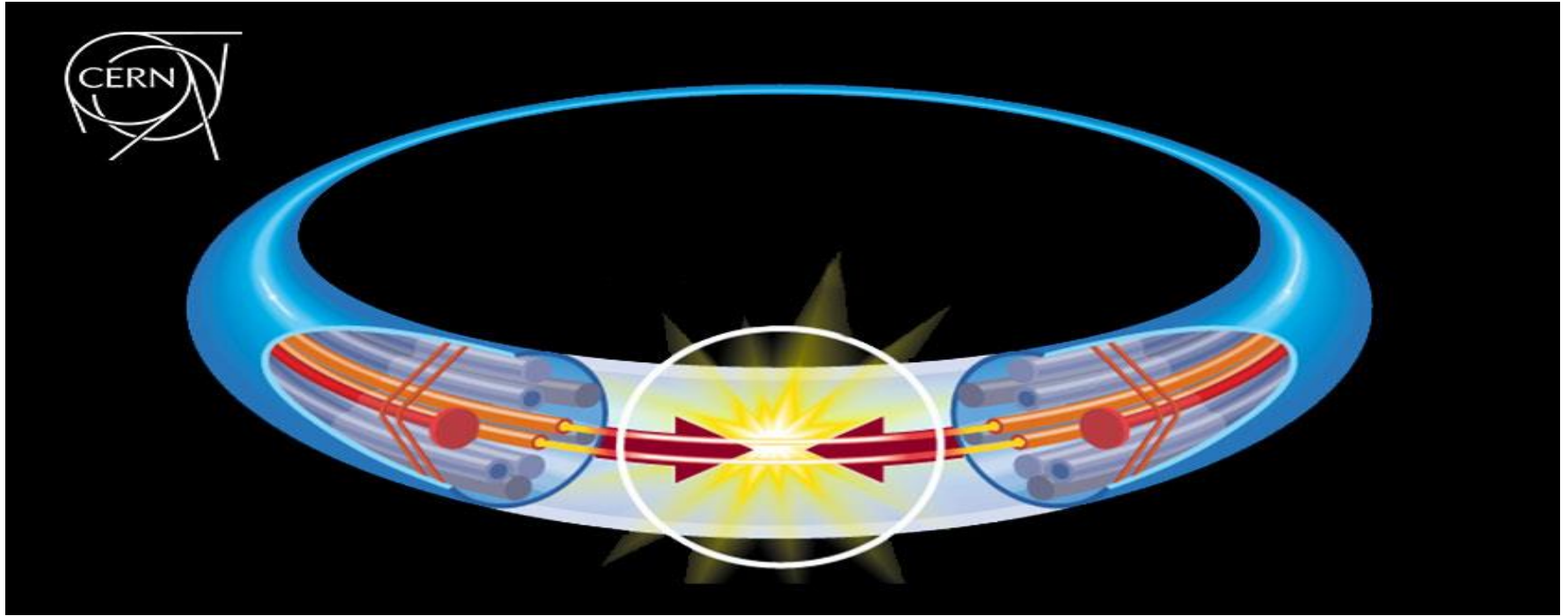
**A kvarkok természete: nem létezhetnek szabadon, csak bezárt állapotban: hármásban (barionok) és kvark-antikvark párban (mezonok). Miért 100-szor nehezebb a proton és a neutron mint az alkotó kvarkok?**



**Milyen anyag a kvark-gluon plazma, ami szupersűrű és a hőmérséklete 2 milliárd fok, azaz 100 000-szer melegebb mint a Nap. Vajon ez lenne az Univerum Ősanyaga?**

**Hogyan válaszolhatjuk meg ezeket a kérdéseket?**

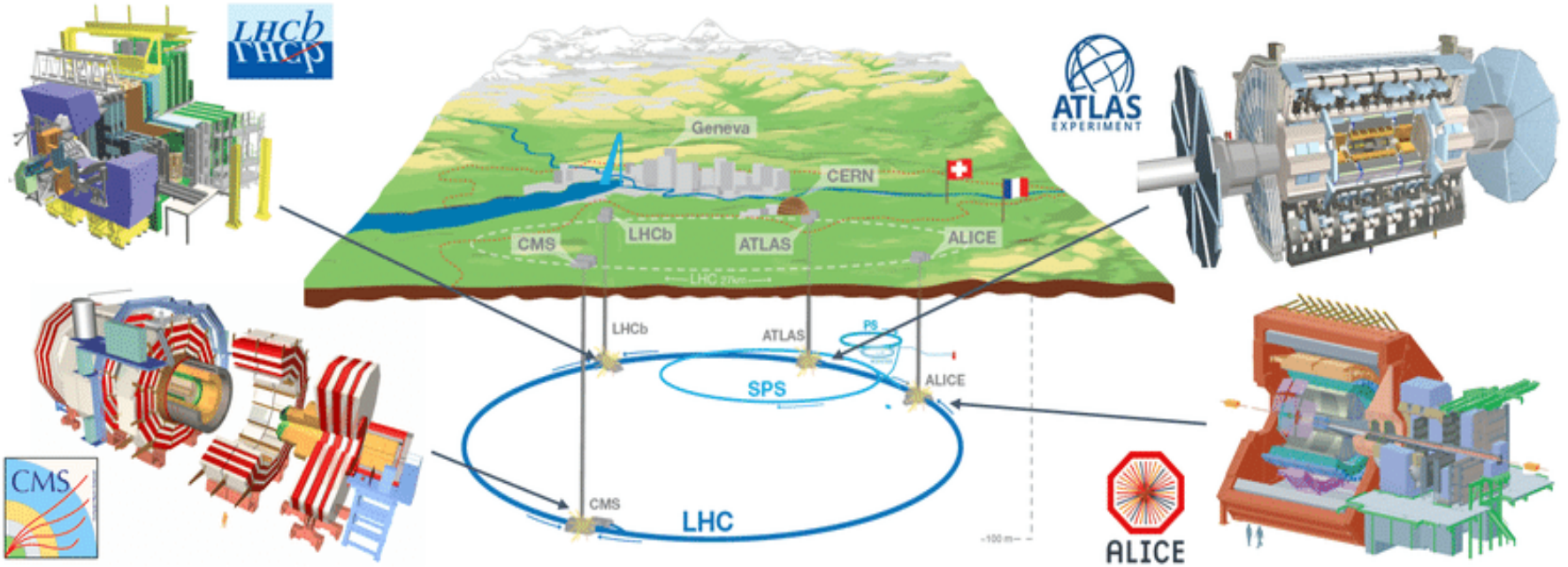
# Nagy Hadronütköztető – CERN LHC



A korai Univerzum állapotait állíthatjuk elő: (nehéz) atommagokat felgyorsítunk, majd ütköztetünk: 14 000 000 000 000 eV energián.



# Nagy Hadronütköztető óriásdetektorai



A CERN Nagy Hadronütköztetője (LHC) és az óriásdetektorok 27 km kerületű körgyűrű a föld alatt 50-100 méterrel.

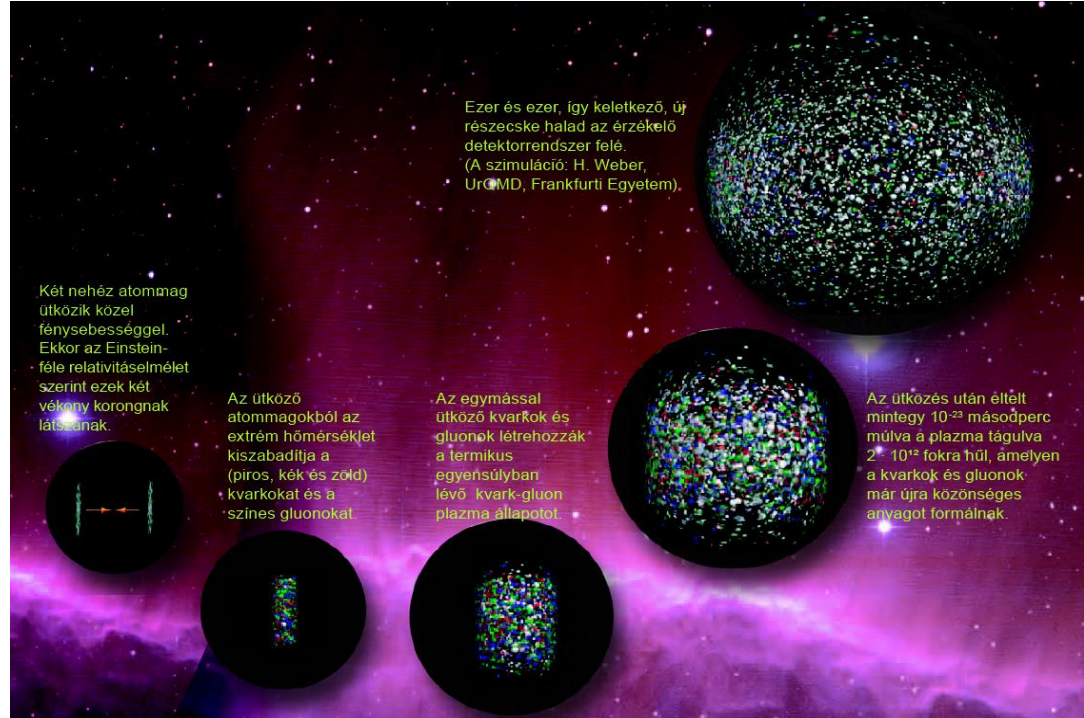
# A kvark-gluon plazma előállítása

## Így készül a kvarkleves...

Atommagokat gyorsítunk az LHC gyűrűben, majd összeütköztetjük az ALICE kísérletben.

Ólom atommagokat szembeütköztetve olyan sűrű és forró állapot jöhet létre, mint az Ősrobbanás után.

Az ütközésben millió új részecske keletkezik, amelyeket megmérünk, és meghatározzuk a „kvarkleves”, azaz a kvark-gluon plazma tulajdonságait.



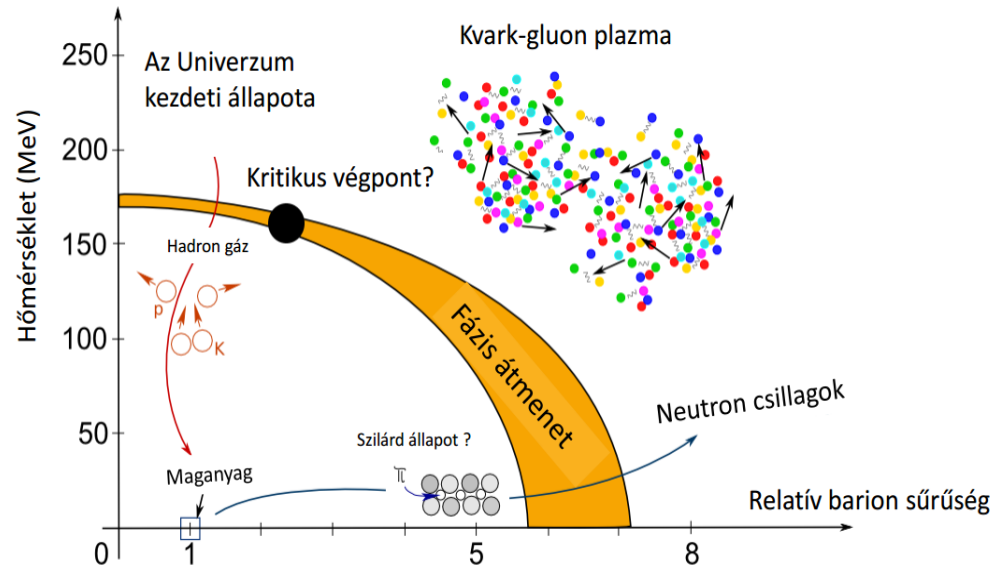


# A kvark-gluon plazma előállítása

**Cél: az erősen kölcsönható anyag fázisszerkezetének feltérképezése.**

**Ez azonban nem egyszerű, mert a színes kvark és gluon szabadsági fokok közvetlenül nem figyelhetők meg, csak jeleik (szignatúráik) által.**

**Végállapoti szín-semleges hadronokat tudunk csak mérni a detektorokkal.**

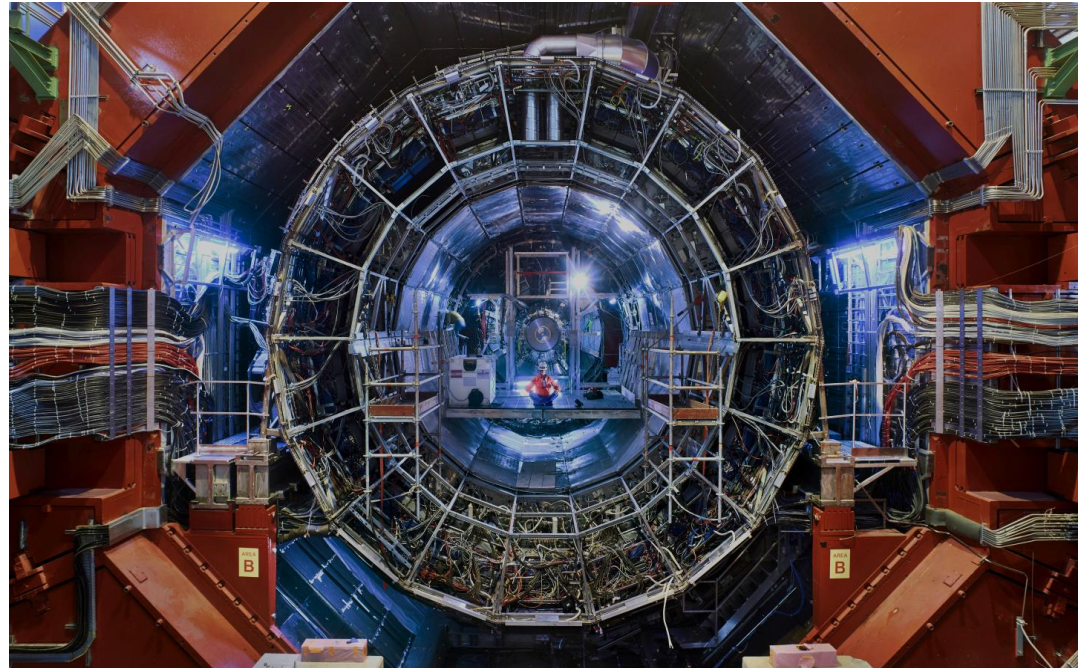


**Az ALICE kísérlet a CERN dedikált berendezése erre a célfeladatra!**

# ALICE – A Nagy Ion-ütköztető Kísérlet

**Az ALICE kísérleti berendezés**

- 13 méter átmérőjű
- 26 méter hosszú
- 0,5 Teslás óriásmágnes



# ALICE – A Nagy Ion-ütköztető Kísérlet

Az ALICE kísérleti berendezés

- 13 méter átmérőjű
- 26 méter hosszú
- 0,5 Teslás óriásmágnes
- nyomkövető detektorok: ITS, TPC
- részecskeazonosító detektorok
- Müon spekrométer



# ALICE – A Nagy Ion-ütköztető Kísérlet

**Az ALICE kísérleti berendezés**

- 13 méter átmérőjű
- 26 méter hosszú
- 0,5 Teslás óriásmágnes
- nyomkövető detektorok: ITS, TPC
- részecskeazonosító detektorok
- Müon spekrométer



**A résztvevő kutatók**

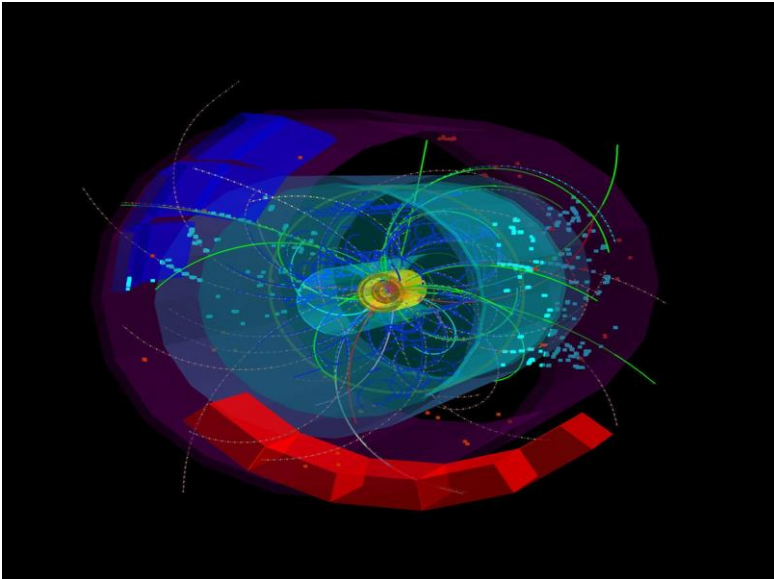
- 39 ország
- 175 kutatóintézet
- 1927 nemzetközi kutató
- 34 magyar kutató, mérnök, diák



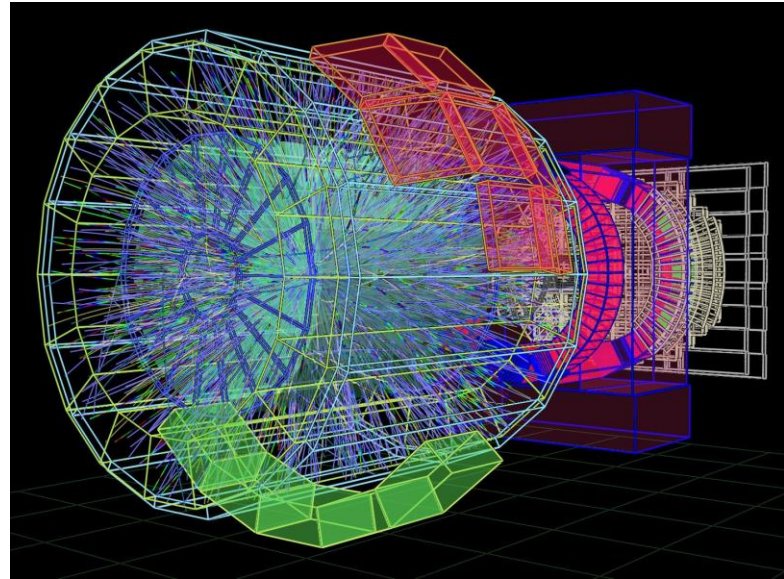


# Atommagok ütközései az ALICE kísérletben

## PROTON-PROTON ÜTKÖZÉS



## ÓLOM-ÓLOM ÜTKÖZÉS

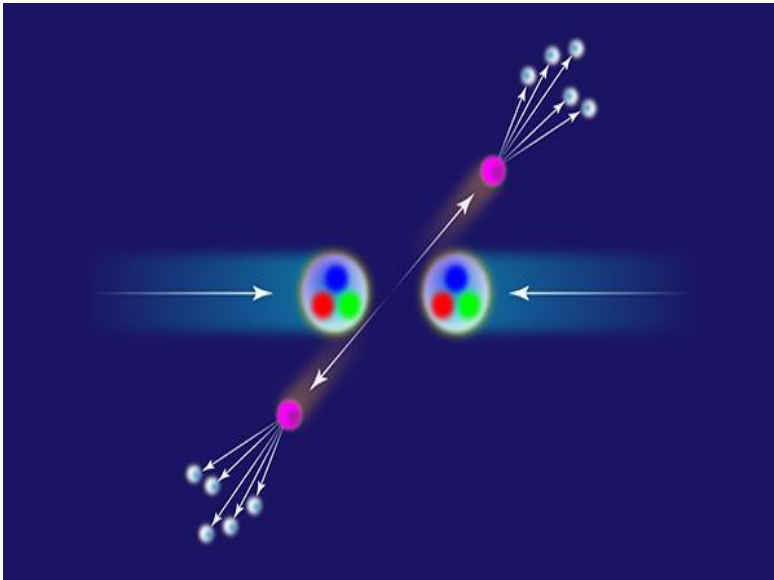


**Az ALICE másodpercenként 200 000 proton vagy 50 000 ólom atommag ütközés minden részecskéjének pályáját méri 2021-től.**

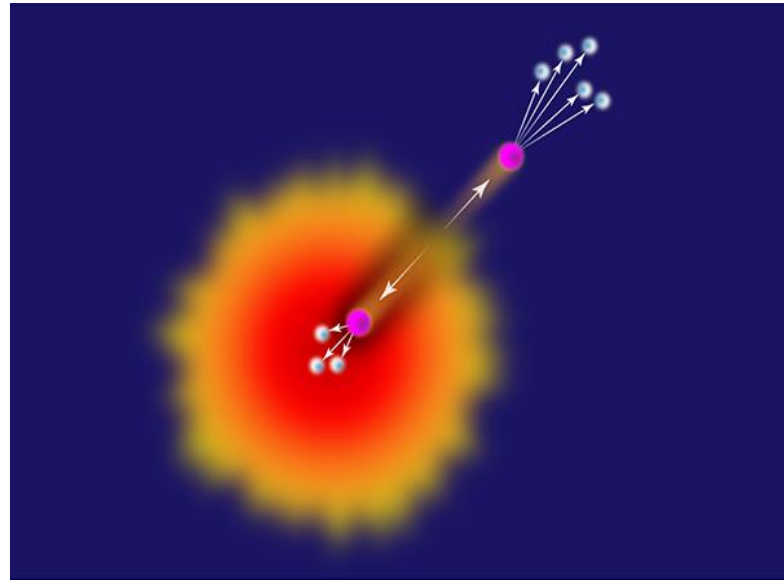


# Atommagok ütközései az ALICE kísérletben

PROTON-PROTON ÜTKÖZÉS



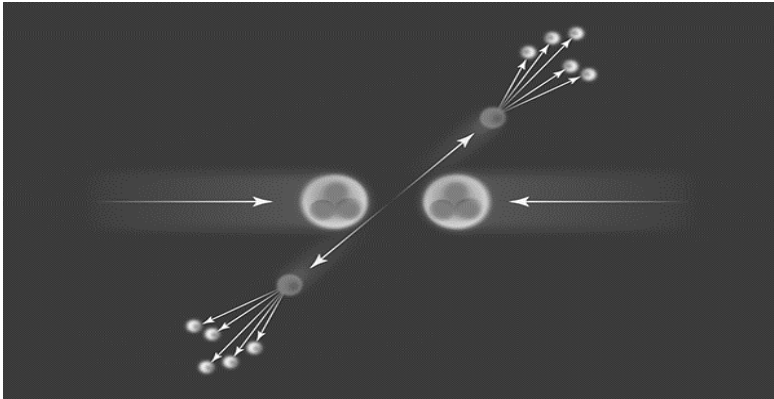
ÓLOM-ÓLOM ÜTKÖZÉS



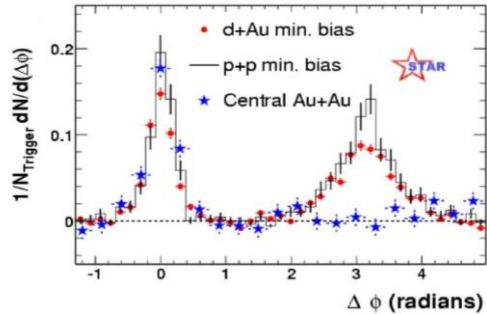
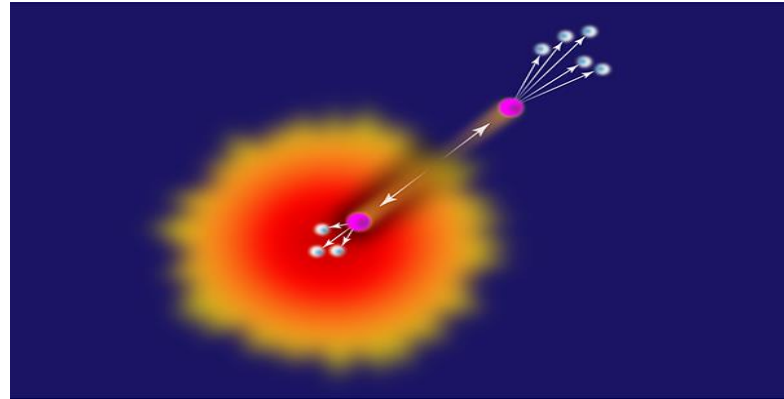
Az ALICE másodpercenként 200 000 proton vagy 50 000 ólom atommag ütközés minden részecskéjének pályáját méri 2021-től.

# Atommagok ütközései az ALICE kísérletben

## PROTON-PROTON ÜTKÖZÉS

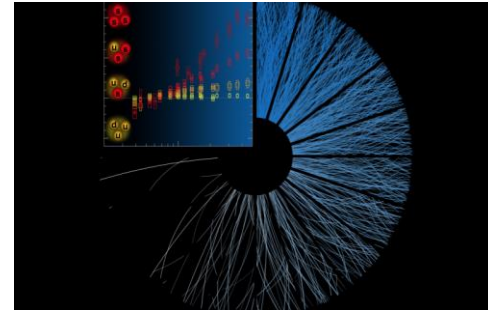


## ÓLOM-ÓLOM ÜTKÖZÉS



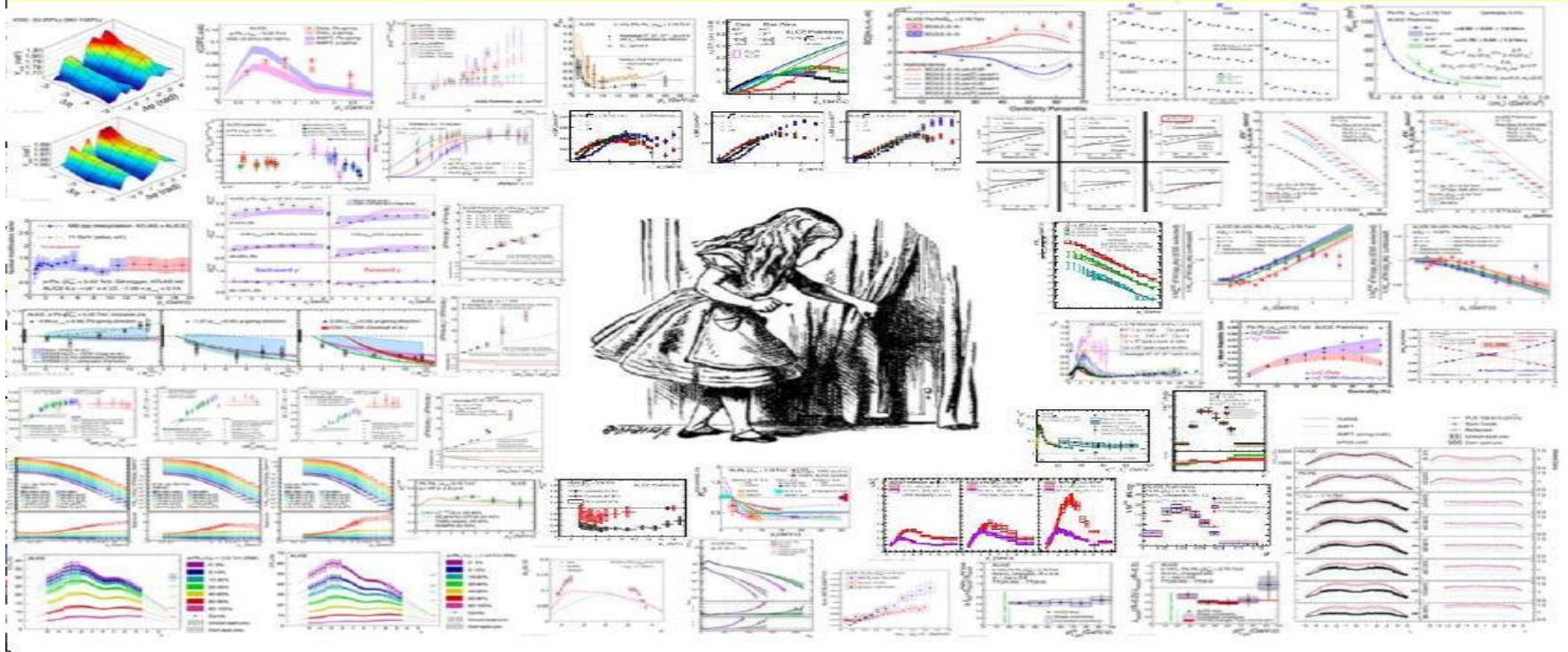
Csak egy irányban jönnek  
a részecskezáporkok

Ólom-ólom ütközésekben,  
létrejön a kvarkleves!



A ritka részecskék nagyobb  
számban keletkeznek.

# Az ALICE-adatok feldolgozása



A mérésekből mintegy 4 TB adat keletkezik másodpercenként, amelyet eltárolunk és feldolgozunk → ezt a rendszert mi terveztük.

# Legutóbbi érdekes ALICE eredmény

nature

Article | Published: 09 December 2020

## Unveiling the strong interaction among hadrons at the LHC

ALICE Collaboration

Nature 588, 232–238(2020) | Cite this article

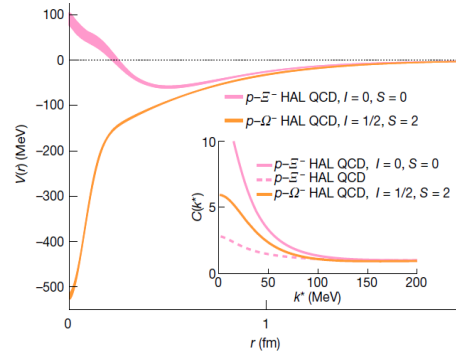
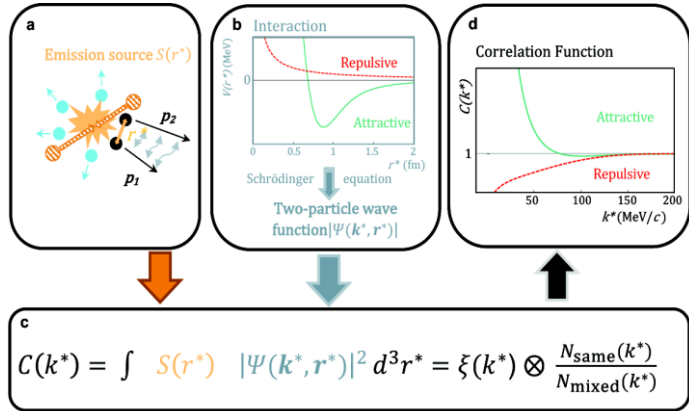
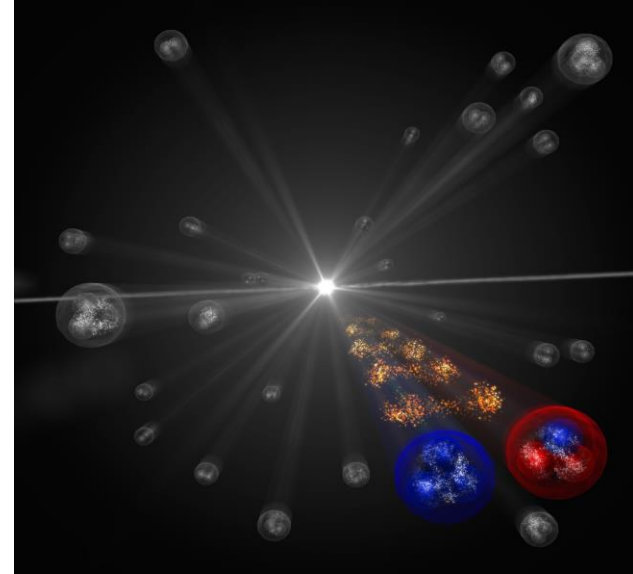
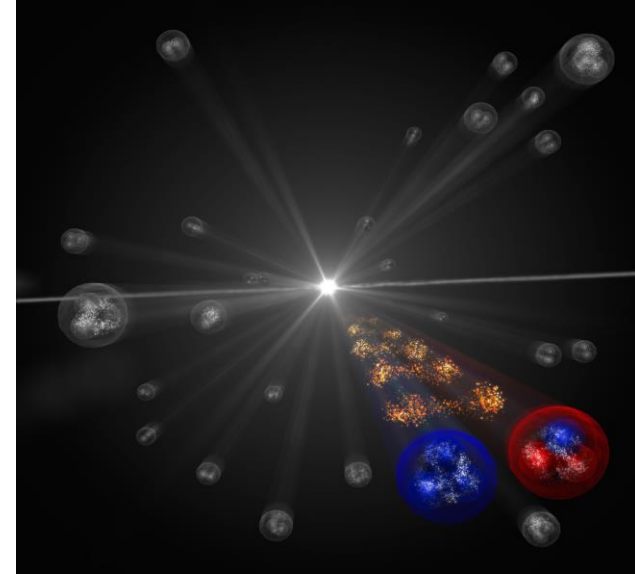
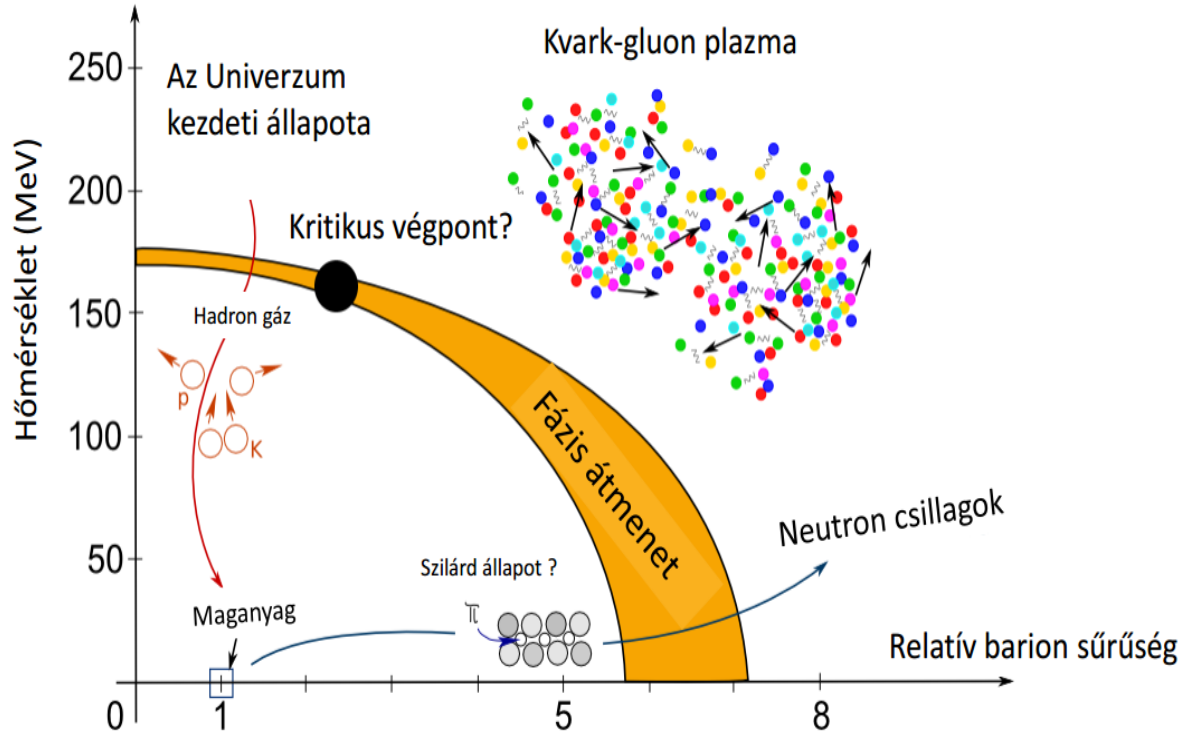


Fig. 4 | Potentials for the  $p-\Xi^-$  and  $p-\Omega^-$  interactions.  $p-\Xi^-$  (pink) and  $p-\Omega^-$

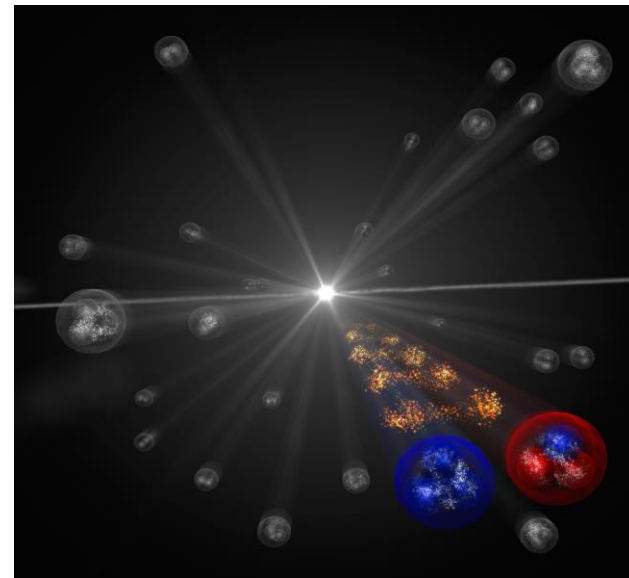
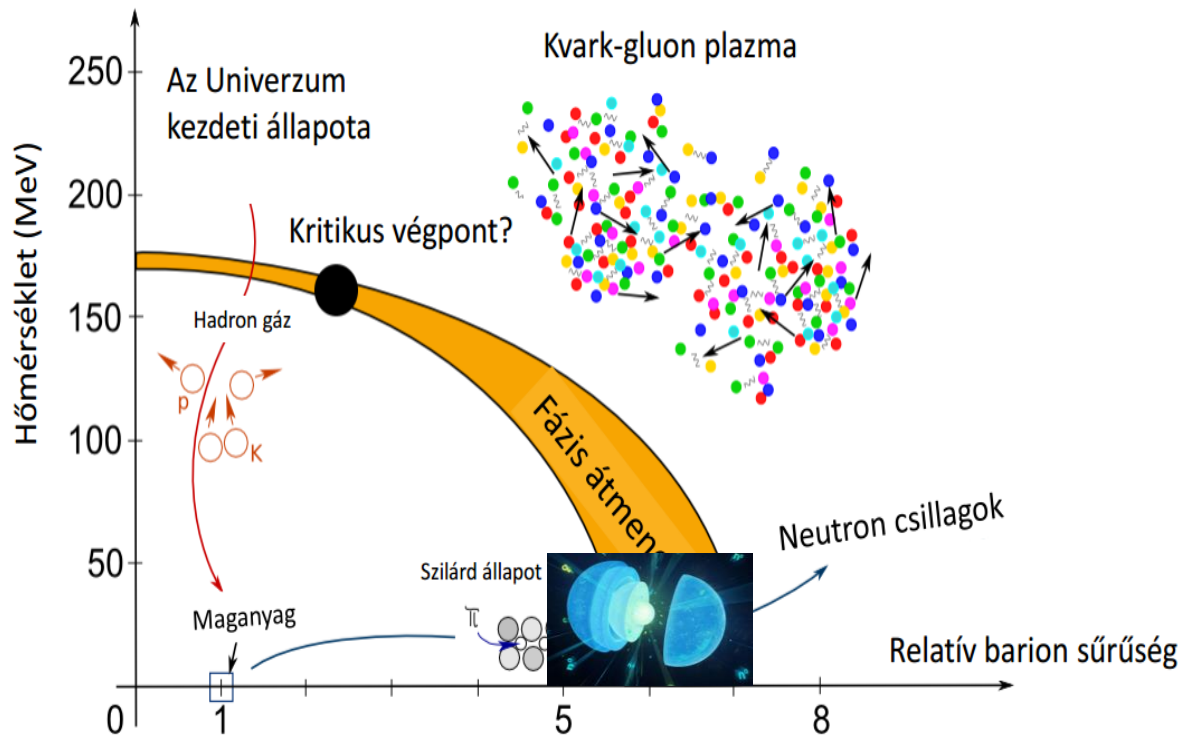


# Legutóbbi érdekes ALICE eredmény





# Legutóbbi érdekes ALICE eredmény



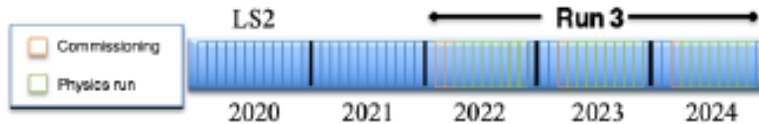
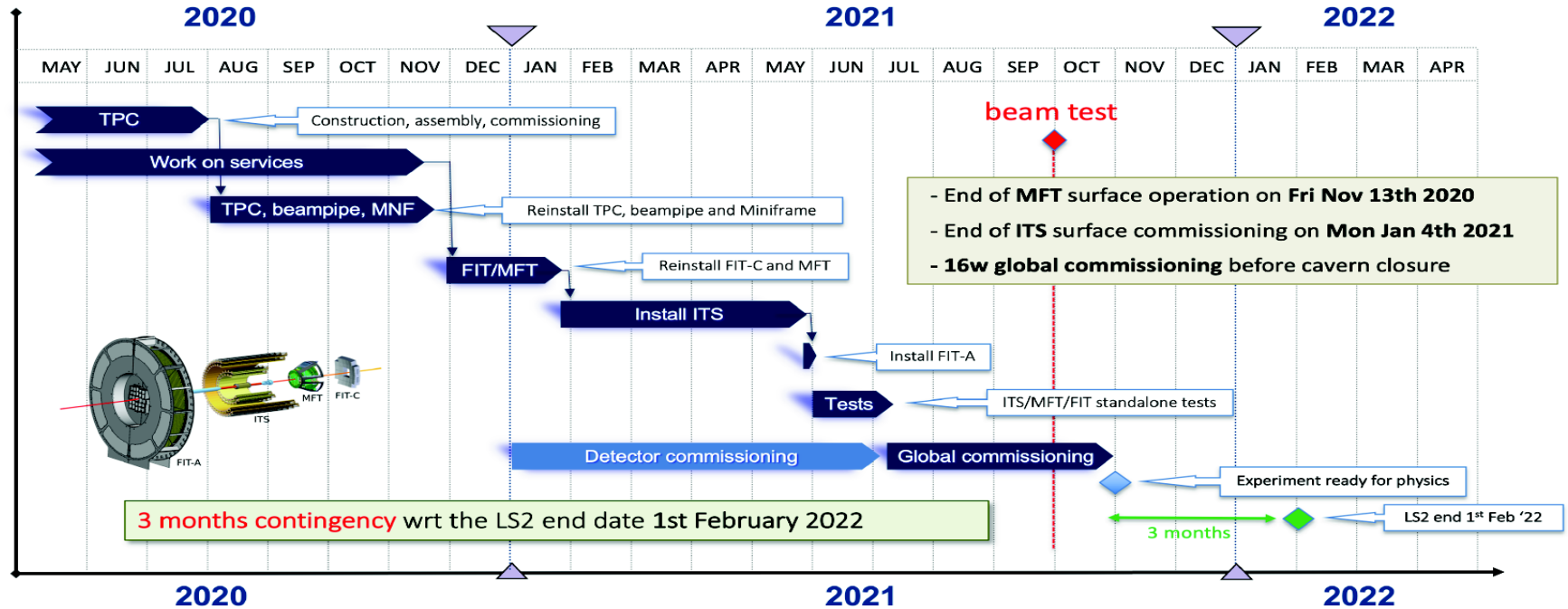
# Hogyan, és merre futnak a nehézion-fizikai kutatások

**Célok és tervek a következő évtizedre:**

- **LS2 utáni Run 3 mérések**
- **K+F az LS3 időszakra**
- **Az ALICE3 javaslat Run 4 & 5**
- **FCC-hh nehézion-fizikai jövőkép**

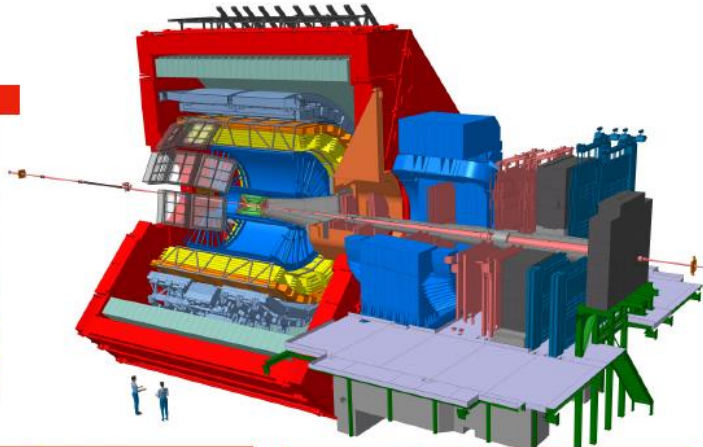
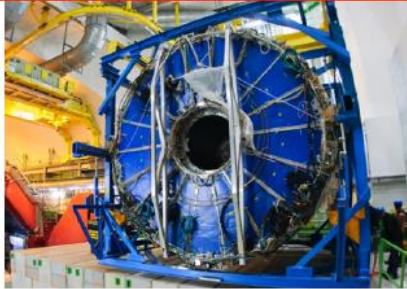


# LS2 és Run3: ALICE jelenlegi fejlesztései



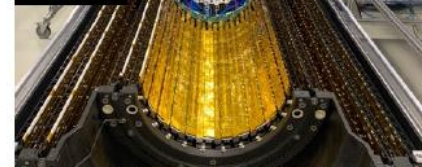
# LS2 és Run3: ALICE jelenlegi fejlesztései

GEM-based TPC

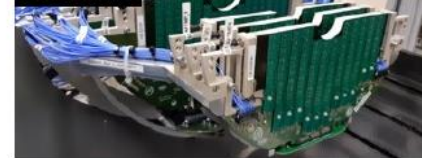


ALPIDE-based Monolithic Silicon Detectors

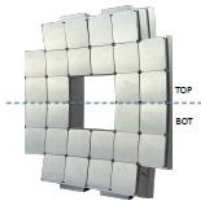
Barrel: ITS2



Forward: MFT



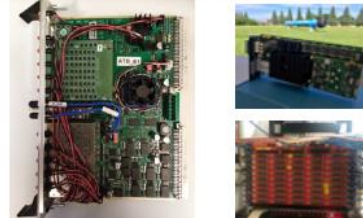
Fast interaction trigger (FIT)



Muon Spectrometer

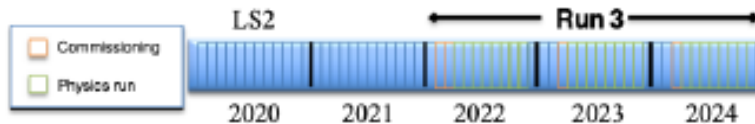


New Central Trigger System  
new RDO for EMCal, PHOS, TRD, HMPID, ZDC



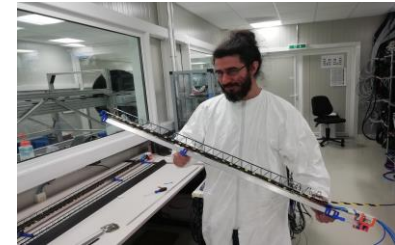
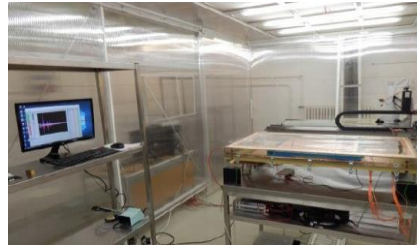
New computing infrastructure and framework: O2

Farm at P2



# LS2 és Run 3: Magyar K+F a jelenlegi fejlesztésekben

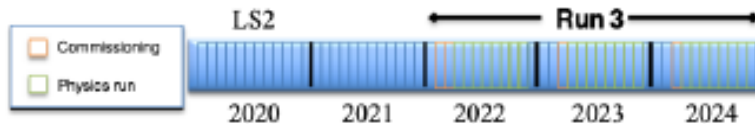
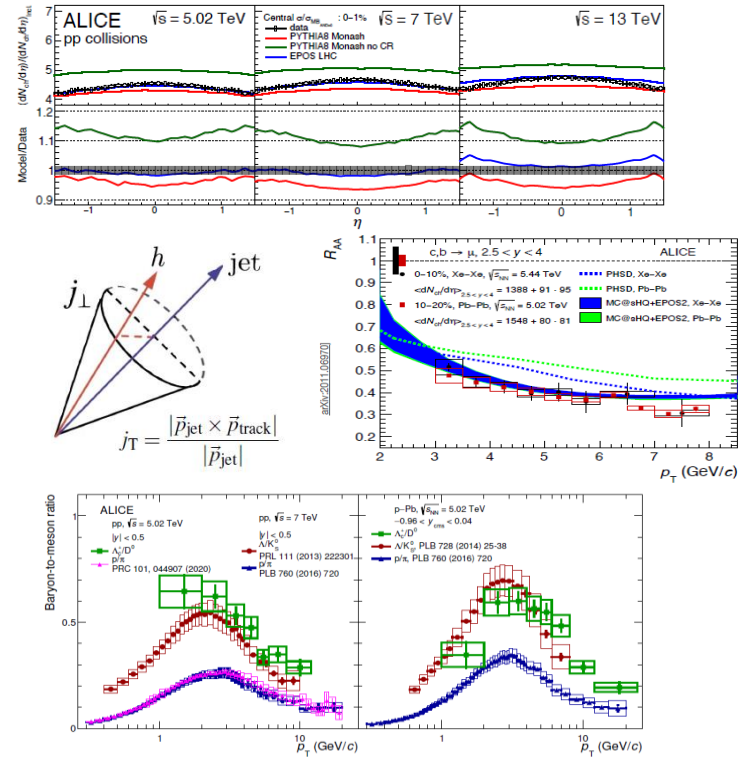
1. Az ALICE detektor adatgyűjtő és adattovábbító (DAQ) rendszerének fejlesztése → **4TB/s sebesség**
2. Az ALICE TPC, azaz az időprojekciós kamra K+F → **Világrekord: 90m<sup>3</sup>**
3. A belső nyomkevető (ITS) szilícium-pixel detektor K+F → **10m<sup>2</sup> & 13Gpixel**
4. Big Data feldolgozása MI módszerekkel → **100 PB adat**
5. Adatelemzés, szimulációs szoftver fejlesztése → **100 000 soros programok**





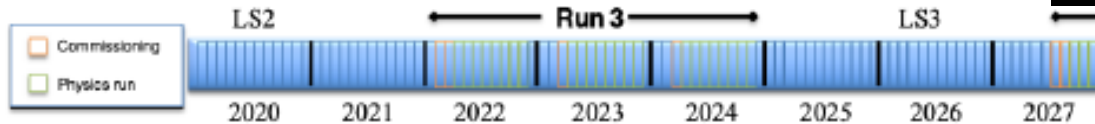
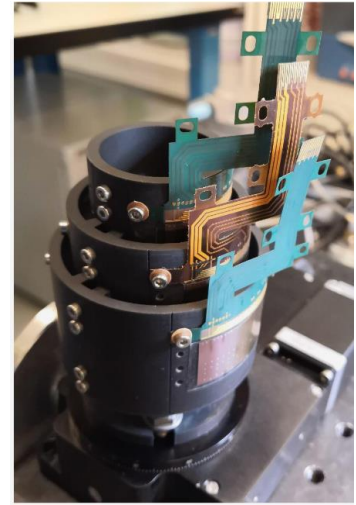
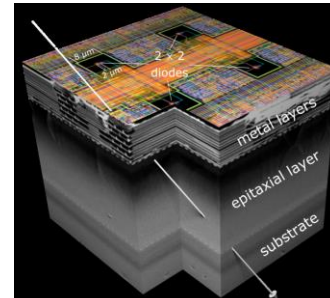
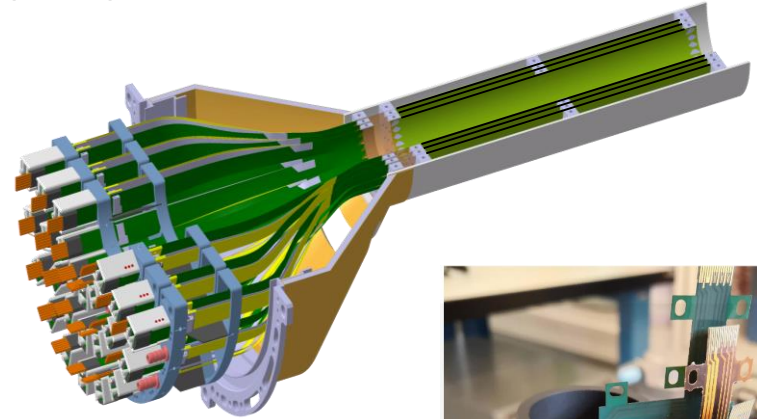
# LS2 és Run3: ALICE jelenlegi elemzései

- Pontosabb pszeudo-rapidity eloszlás mérés, **PID hadronspektrumok**
- **Részecskezáporok szerkezetvizsgálata, jet-fragmentáció, hadronizáció, pp, pPb**
- Deutérium-keltés: koaleszcencia modell tesztelése
- **Bájos-hadronok keletkezésének vizsgálata ( $\Lambda_c/D$  arány)**
- **Nehéz hadronok keltése XeXe és PbPb ütközésekben**



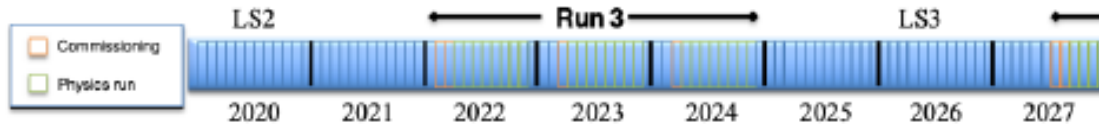
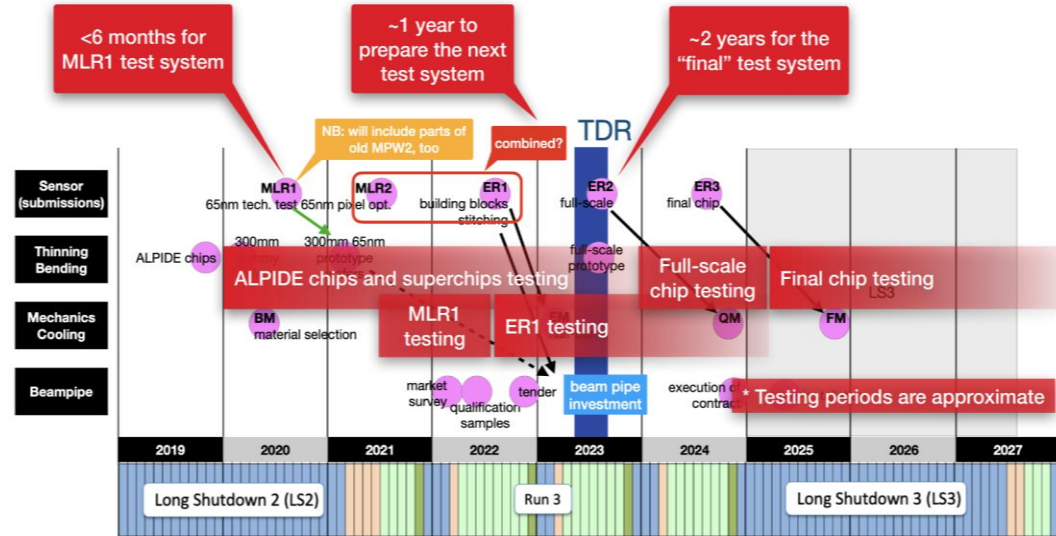
# Kutatás-fejlesztések az LS3 időszakra

- FOCAL és **ITS3** K+F az ALICE-ban
- ITS3: hajlékony szilícium alapú MAPS detektor sikeresen tesztelve a DESY gyorsítóban. (**Hűtési szimulációk**)



# Kutatás-fejlesztések az LS3 időszakra

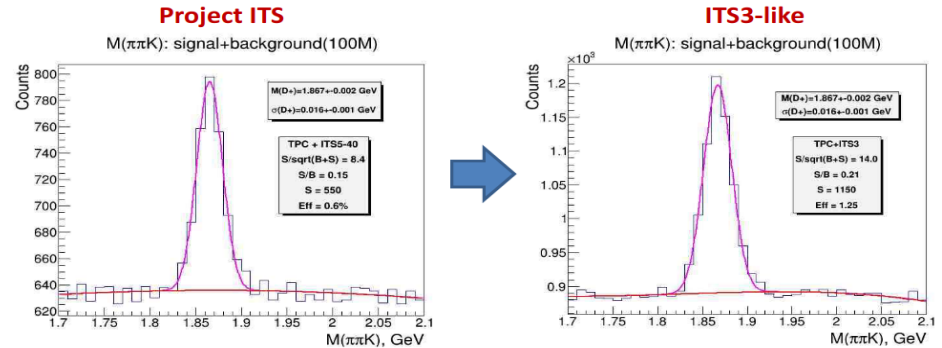
- FOCAL és **ITS3** K+F az ALICE-ban
- ITS3: hajlékony szilícium alapú MAPS detektor sikeresen tesztelve a DESY gyorsítóban. (**Hűtési szimulációk**)
- Detektor-elem tesztek + adatgyűjtő rendszer tervezés



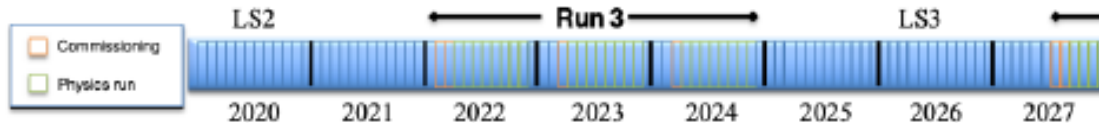
# Kutatás-fejlesztések az LS3 időszakra

- FOCAL és **ITS3** K+F az ALICE-ban
- ITS3: hajlékony szilícium alapú MAPS detektor sikeresen tesztelve a DESY gyorsítóban. (**Hűtési szimulációk**)
- Detektor-elem tesztek + adatgyűjtő rendszer tervezés
- 2x pontosabb nehéz kvark mérések, jobban mérhető a részecskezápорок belső szerkezete: fragmentáció és hadronizáció megértése mérése

## D<sup>+</sup> reconstruction efficiency with ITS3-like model

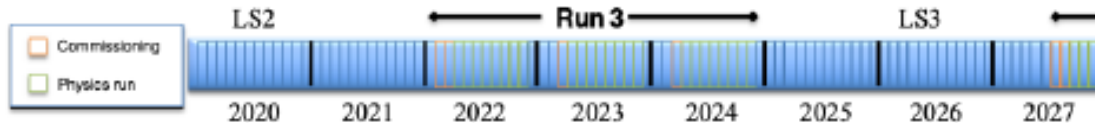
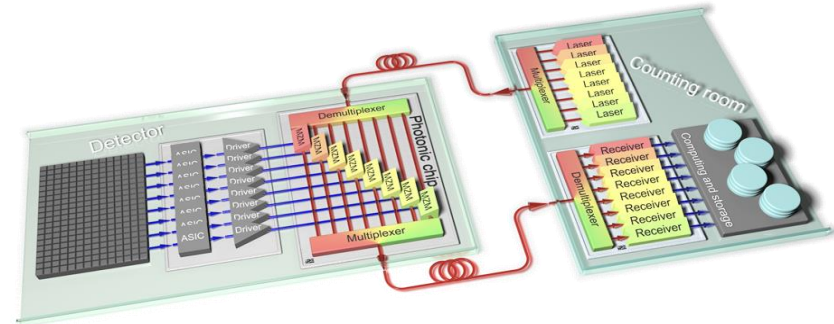
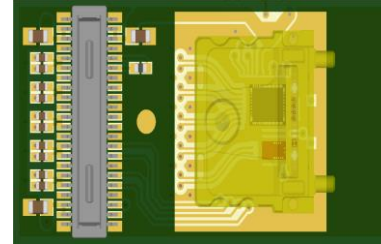


| ITS       | S    | S/B  | $S/\sqrt{S+B}$ | Eff,% |
|-----------|------|------|----------------|-------|
| Project   | 550  | 0.15 | 8.4            | 0.60  |
| ITS3-like | 1150 | 0.21 | 14.0           | 1.26  |



# Kutatás-fejlesztések az LS3 időszakra

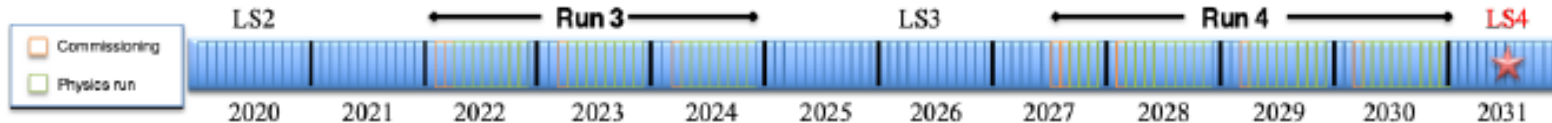
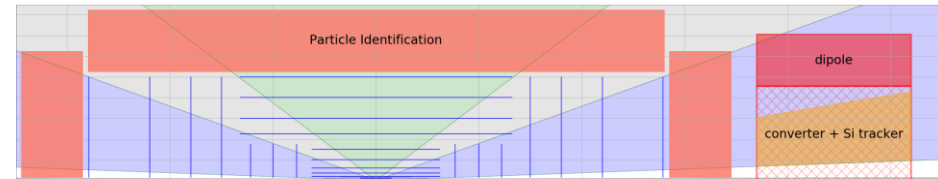
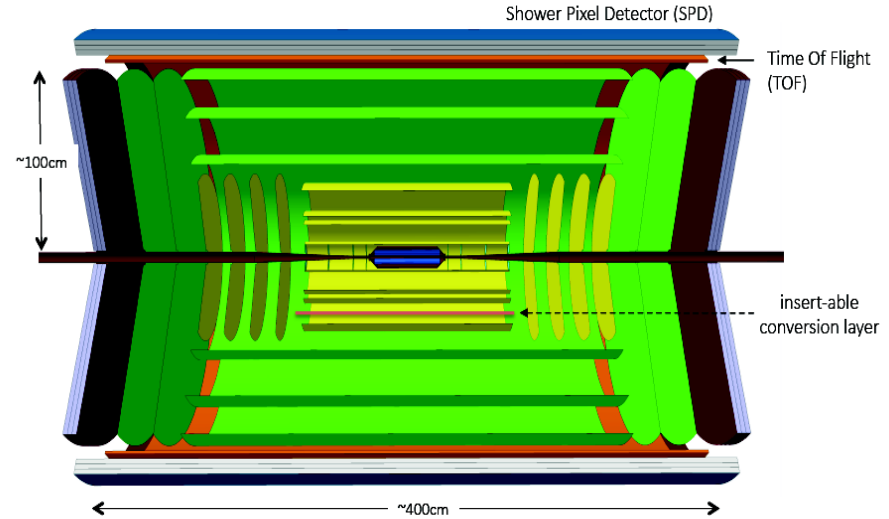
- Új típusú sugárzástűrő adatgyűjtő (DAQ) rendszerek fejlesztése
- Versatile+ link optikai vevő
  - 20x10x2,5 mm
  - 4x5-10 Gb/s letöltés + 1x2,5 Gb/s feltöltés
  - -35 és 60 C közötti működés
  - Sugárzásállóság: 1 M Gy vagy 1000+hadron/cm<sup>2</sup>
- Optoelektronikai adatátvitel: 28/56 Gb/s





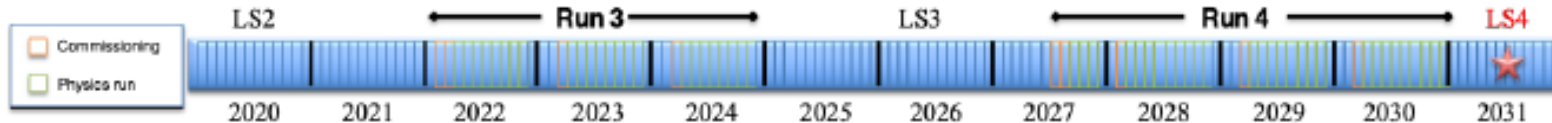
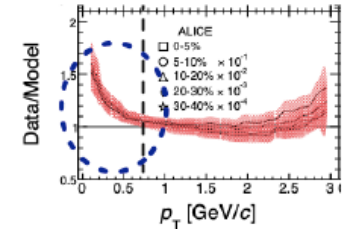
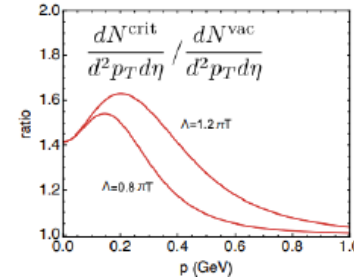
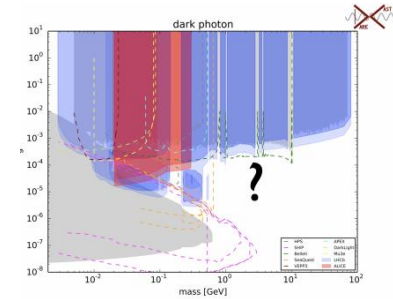
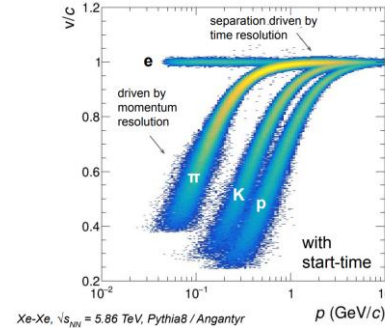
# Az ALICE3 javaslat – előkészület alatt

- **Fizika:** A kvantum-térelméletek alapvető tulajdonságának tesztelése (QCD chiral symmetry restoration).
- **Nagy akceptancia:**  $\Delta\eta = 8$
- **PID:** TOF 20 ps időfelbontással, RICH aerogéllal
- **Zéró momentum detektor:**  $p_T \lesssim 50$  MeV/c (közép-rapiditásban);  $\lesssim 10$  MeV/c (előre)
- **MAPS detektorrendszer:** 12 rétegben + CMOS-diszkek + Cserenkov detektorok



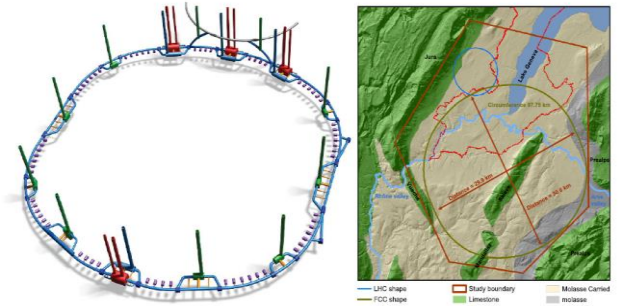
# Az ALICE3 javaslat – előkészület alatt

- **Elektron ID:** Alacsony tömegű di-elektron spektrum:  $50 \text{ MeV}/c < p_T < 3 \text{ GeV}/c$
- **Hadron ID:** Nehéz kvark (HF) bomlási láncolatok  $50 \text{ MeV}/c < p_T < 5 \text{ GeV}/c$ ,  $\pi/K/p$  3-szigmára
- **Foton detektálás:** nagyon kis energiájú fotonok,  $10 \text{ MeV}/c < p_T < 100 \text{ MeV}/c$ , energiamérés
- **Primer vertex:** meghatározás mm pontossággal
- **Müon azonosítás:** Kvarkoniumok & egzotikus hadronok keresése: pontosabb müon detektálás az  $\sim 1 \text{ GeV}/c$  tartományban



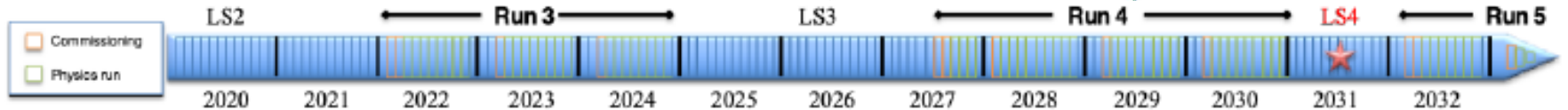
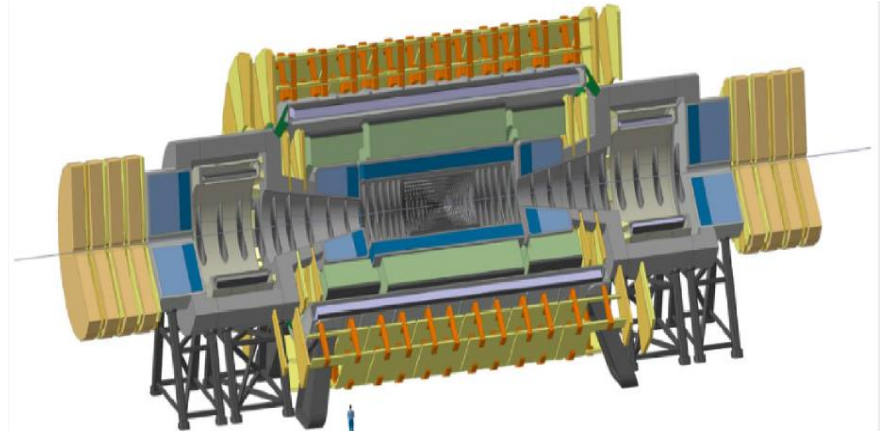
# FCC-hh nehézion-fizikai jövőkép

- **Az FCC-hh:** A 100km kerületű, cirkuláris hadronütköztető általános célú detektorral, nehézion-fizikára (is) optimalizálva.



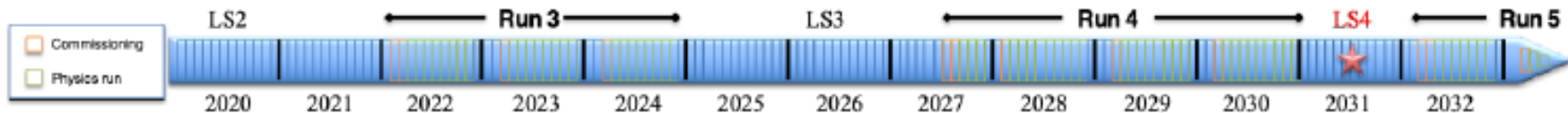
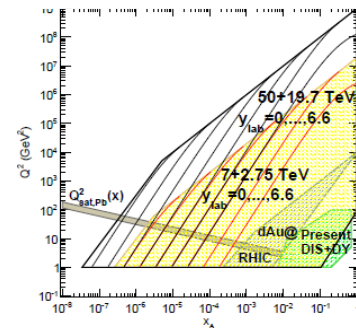
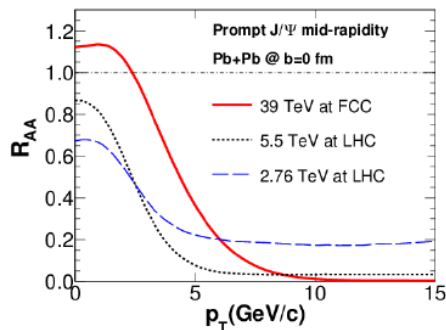
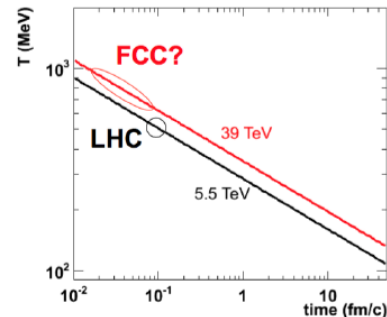
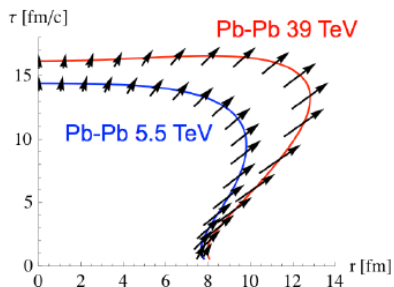
| System | $\sqrt{s_{NN}}$ | $\mathcal{L}_{int}$ | $t\bar{t} \rightarrow b\bar{b}l\ell\nu\nu$ | $tW \rightarrow b\ell\nu\nu$ |
|--------|-----------------|---------------------|--|------------------------------|
| Pb–Pb  | 39 TeV          | 33 nb <sup>-1</sup> | $3.1 \times 10^5$                          | $8.6 \times 10^3$            |
| p–Pb   | 63 TeV          | 8 pb <sup>-1</sup>  | $8 \times 10^5$                            | $2.1 \times 10^4$            |

| Quantity                         | Pb–Pb 2.76 TeV            | Pb–Pb 5.5 TeV             | Pb–Pb 39 TeV              |
|----------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| $dN_{ch}/d\eta$ at $\eta = 0$    | 1600                      | 2000                      | 3600                      |
| Total $N_{ch}$                   | 17000                     | 23000                     | 50000                     |
| $dE_T/d\eta$ at $\eta = 0$       | 1.8–2.0 TeV               | 2.3–2.6 TeV               | 5.2–5.8 TeV               |
| Homogeneity volume               | 5000 fm <sup>3</sup>      | 6200 fm <sup>3</sup>      | 11000 fm <sup>3</sup>     |
| Decoupling time                  | 10 fm/c                   | 11 fm/c                   | 13 fm/c                   |
| $\varepsilon$ at $\tau = 1$ fm/c | 12–13 GeV/fm <sup>3</sup> | 16–17 GeV/fm <sup>3</sup> | 35–40 GeV/fm <sup>3</sup> |



# FCC-hh nehézion-fizikai jövőkép (arXiv:1605.01389)

- **Egy nagyságrenddel nagyobb energia:**  
Az állapotegyenlet tesztelése soha nem látott energiasűrűségeken
- **Nehéz hadronok:** a szép és bájos hadronok mellett a top vizsgálata is szerepet kap.
- **Kis-x fizika:** Ismeretlen kinematikai tartományok feltérképezése: PDF/FF.
- **Nukleáris effektusok:** korrelációk és részecskezápör-szerkezet pontos vizsgálata



# Összegzés

**Nehézion-fizikai célok és tervek a következő évtizedre, és tovább...**

- **Jól definiált fizikai program**
- **Erős hazai K+F részvétel**
- **Új technológiai kihívások**
- **Erős magyar csapat**
- **Elméleti és komputációs háttér**



*To infinity and beyond! - Buzz Lightyear*



# A Magyar ALICE Csoport



Támogatás: NKFIH/OTKA K120660, FK131979, K135515, NEMZ\_KI-2019-00011

Web: <http://alice.wigner.hu>, <http://alice.web.cern.ch>