

Magfizika ultrarelativisztikus energiákon a CERN LHC ALICE kísérletben



Barnaföldi Gergely Gábor, HUN-REN Wigner FK, CERN ALICE
Támogatások: NFKIK OTKA K135515, NEMZ_KI 2023-00031, FK131979



Magyar Magfizikus Találkozó, ATOMKI, Debrecen, 2024. szeptember 3.

Nehézion-fizika az ALICE kísérletben

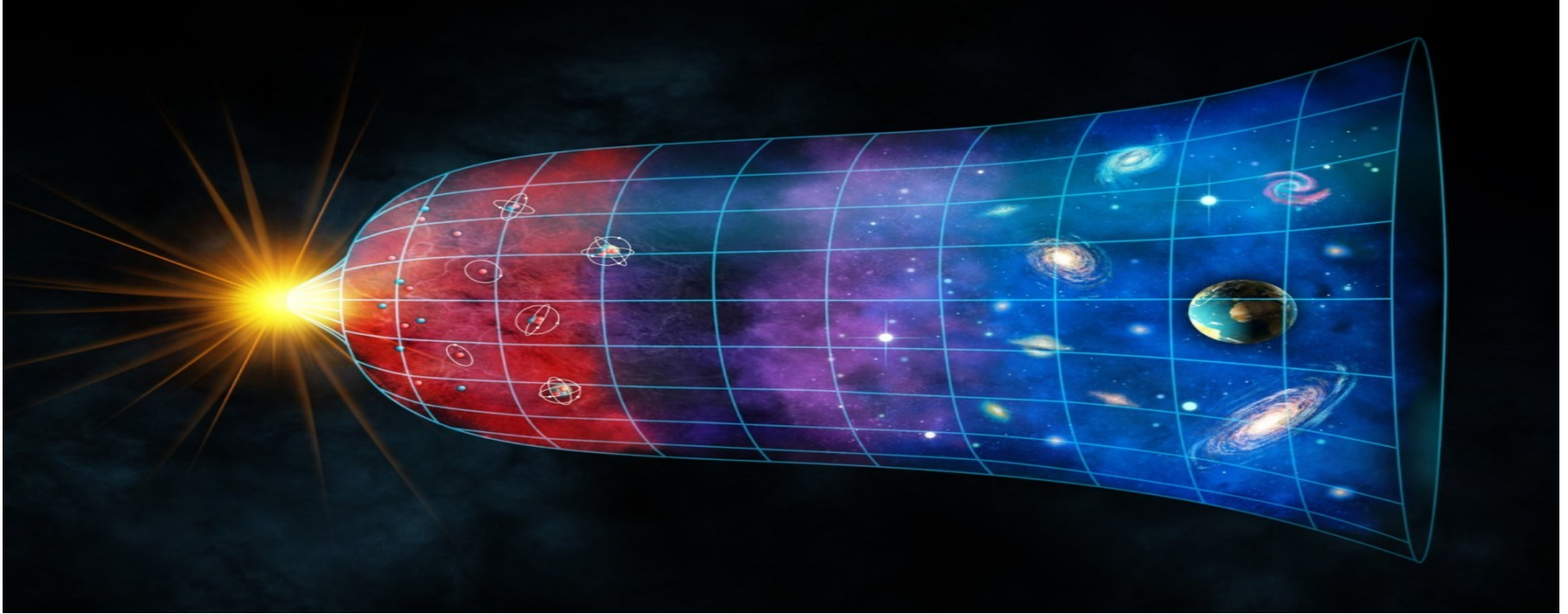
Legújabb eredmények:

- LS2 ALICE Run 3 adatgyűjtések
- ALICE Run 2 és Run 3 adat analízis (+ Bencédi Gyula)
- ALICE K+F az LS3 időszakra: ITS3, FoCal
- Vértesi Róbert: ALICE3 javaslat Run 4&5, 2030+

és a hazai főszereplők:

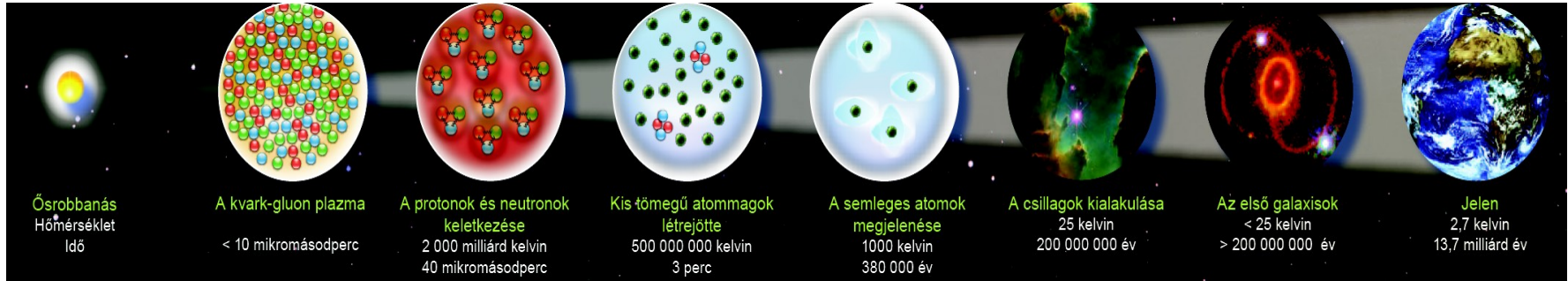
GGB, G. Bíró, **Gy. Bencédi**, L. Boldizsár, E. Dávid, **B. Dudás**, **Á. Gera**, **A. Horváth**, **L. Gyulai**, **Zs. Jólesz**, J. Imrek, T. Kiss, M. Mazzili, A. Nath Mishra, M. Varga-Kőfaragó, **P. Lévai**, B. Szigeti, D. Varga, **Z. Varga**, **O. Visnyei**, **R. Vértesi**

Cél: A korai Univerzum anyagi állapotának vizsgálata



A Világegyetem 13,7 milliárd éves most. Milyen volt az anyaga az Ősrobbanás utáni pillanatokban?

Cél: A korai Univerzum anyagi állapotának vizsgálata



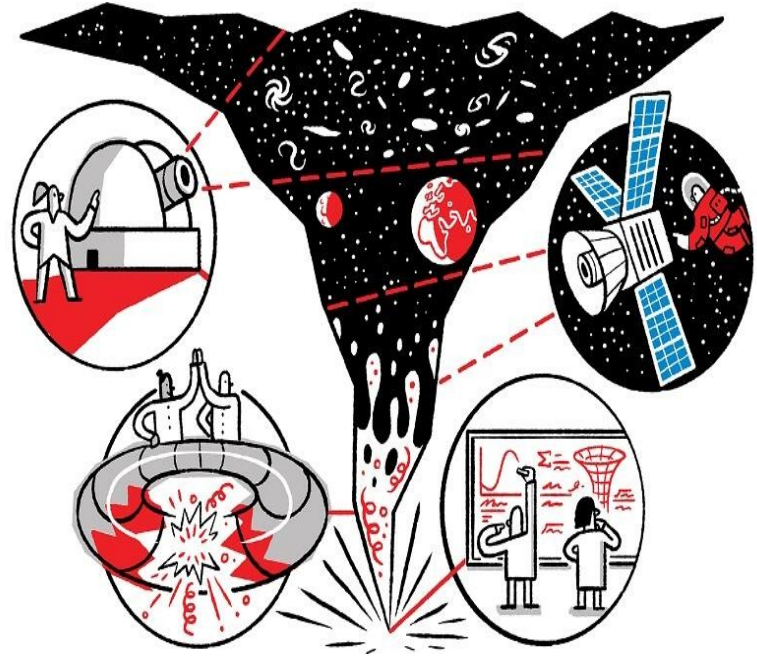
Az Ősrobbanás után az anyag tágult és folyamatosan lehűlt. Eközben a szerkezete megváltozott. Ma a látható (barionos) anyag alkot minket, a földi életet, bolygókat, csillagokat, galaxisokat...

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

A Világegyetem kutatása

A Világegyetem múltját és fejlődését kutatjuk

- csillagászati megfigyelésekkel,
- részecskegyorsítókkal,
- szuperszámítógépes szimulációkkal



Minél régebbre akarunk visszamenni annál több a kérdőjel...

A Világegyetem 13,7 milliárd éves



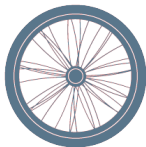
Az atommagok építőelemeit a protonokat és neutronokat kvarkok alkotják. Ezeket az erős kölcsönhatás tartja össze gluonok által: milyen ez a hatás?



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: hármasban (barionok) és kvark-antikvark párban (mezonok). Miért 100-szor nehezebb a proton és a neutron mint az alkotó kvarkok?



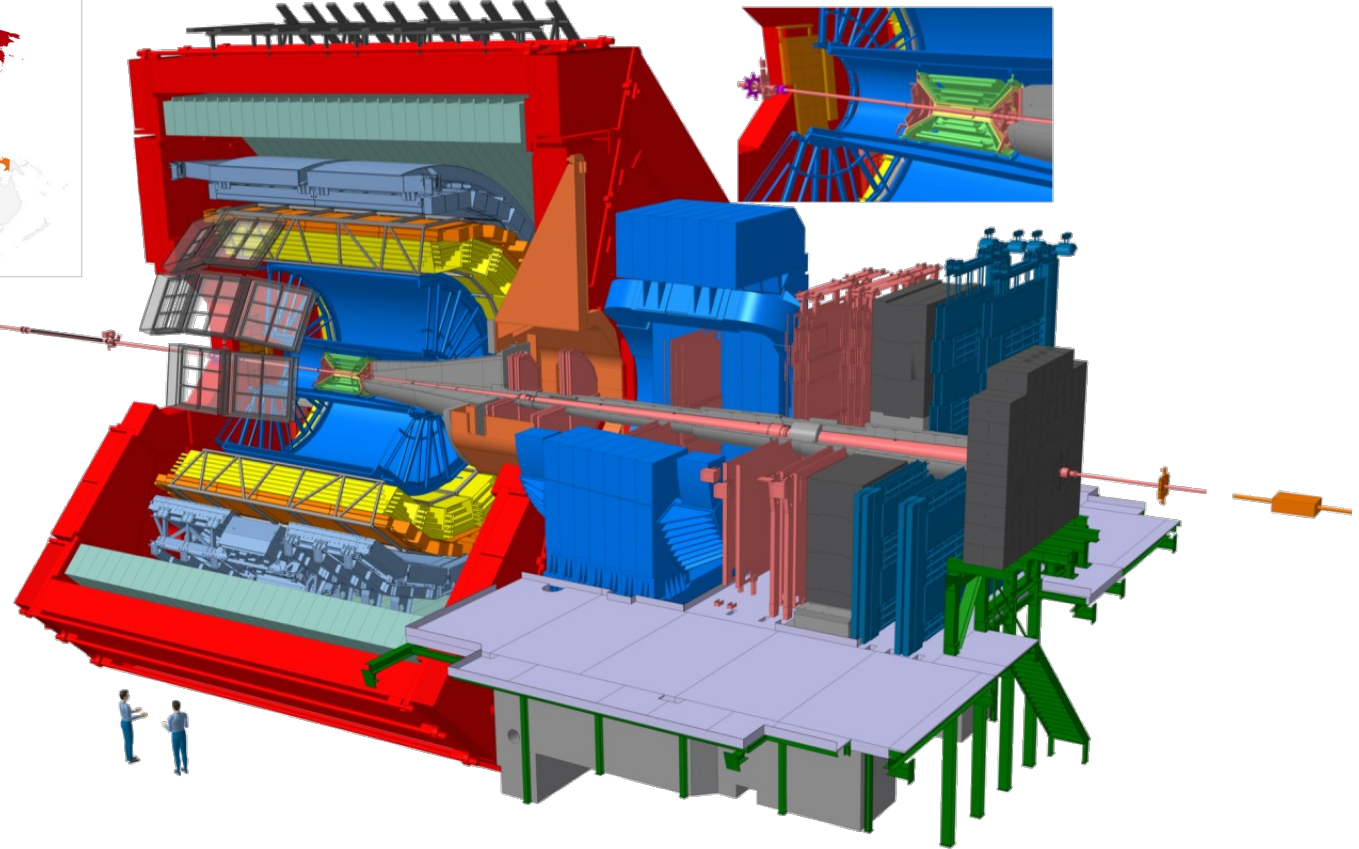
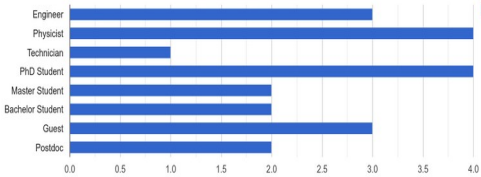
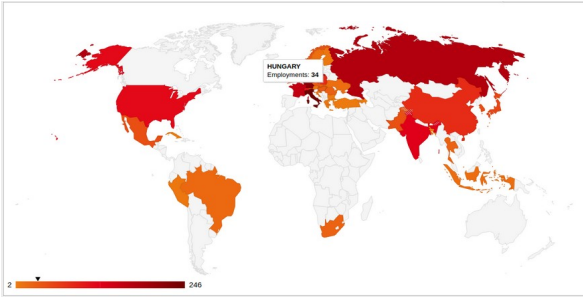
Milyen anyag a kvark-gluon plazma, ami szupersűrű és a hőmérséklete 2 milliárd fok, azaz 100 000-szer melegebb mint a Nap. Vajon ez lenne az Univerzum Ősanyaga?

Hogyan válaszolhatjuk meg ezeket a kérdéseket?

Eszköz: A Large Ion Collider Experiment, CERN LHC



Eszköz: A Large Ion Collider Experiment, CERN LHC

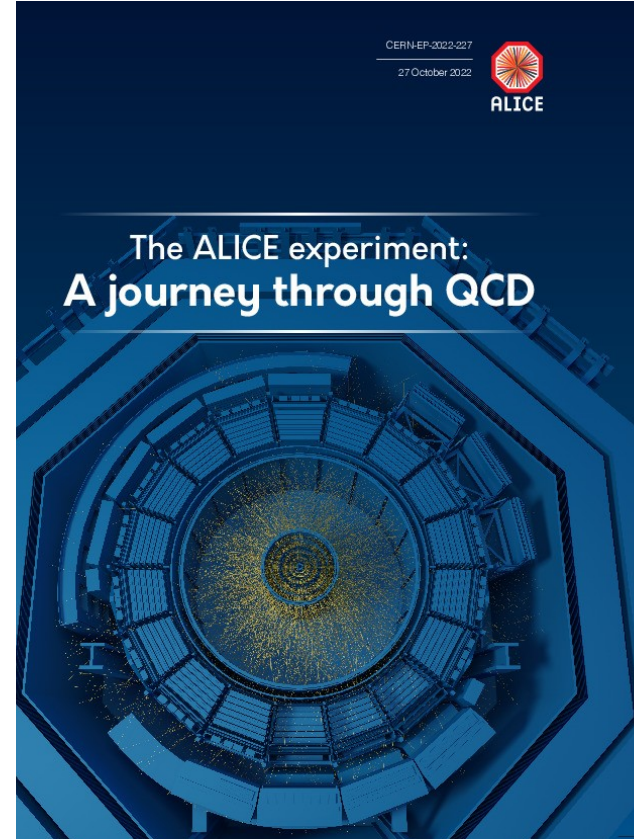


30+ éves utazás a kvantum-színdinamika világában

Születésnap 1993. március 1. 8:30 ALICE Loi

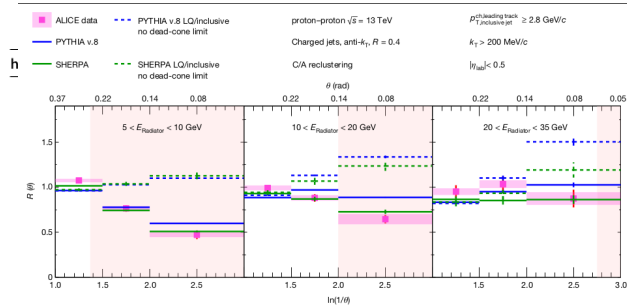


30+ éves utazás a kvantum-színdinamika világában

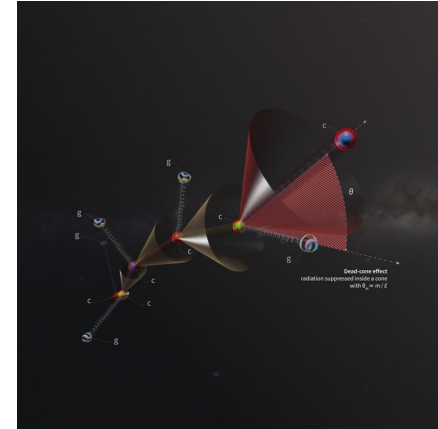


ALICE: eredmények (2022)

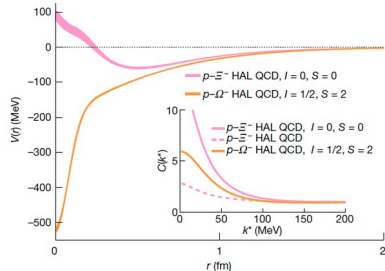
Direct observation of the dead-cone effect in quantum chromodynamics



$$R(\theta) = \frac{1}{N^{D^0 \text{ jets}}} \frac{dn^{D^0 \text{ jets}}}{d\ln(1/\theta)} \bigg/ \frac{1}{N^{\text{inclusive jets}}} \frac{dn^{\text{inclusive jets}}}{d\ln(1/\theta)} \bigg|_{k_T, E_{\text{radiator}}}$$



Unveiling the strong interaction among hadrons at the LHC



article

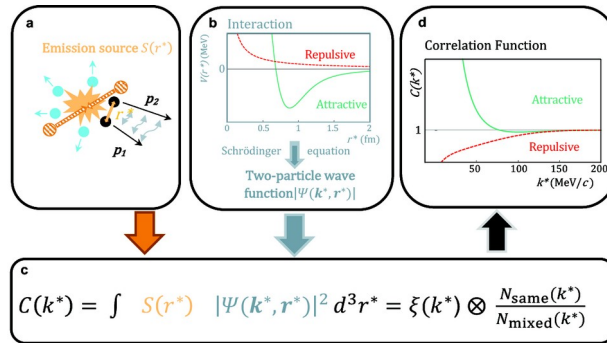
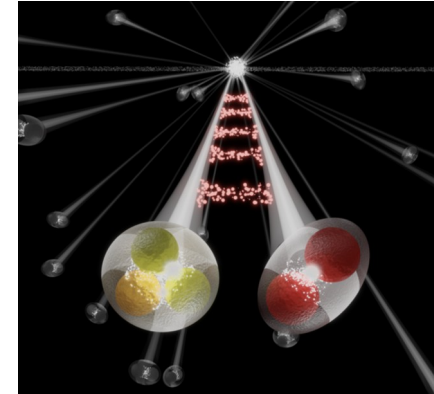


Fig. 4 | Potentials for the $p-\pi^-$ and $p-\pi^+$ interactions. $p-\pi^-$ (pink) and $p-\pi^+$



nature

ALICE: eredmények (2023)

Article | [Open Access](#) | [Published: 12 December 2022](#)

Measurement of anti- ${}^3\text{He}$ nuclei absorption in matter and impact on their propagation in the Galaxy

[The ALICE Collaboration](#)

[Nature Physics](#) 19, 61–71 (2023) | [Cite this article](#)

7609 Accesses | 2 Citations | 376 Altmetric | [Metrics](#)

Abstract

In our Galaxy, light antinuclei composed of antiprotons and antineutrons can be produced through high-energy cosmic-ray collisions with the interstellar medium or could also originate from the annihilation of dark-matter particles that have not yet been discovered. On Earth, the only way to produce and study antinuclei with high precision is to create them at high-energy particle accelerators. Although the properties of elementary antiparticles have been studied in detail, the knowledge of the interaction of light antinuclei with matter is limited. We determine the disappearance probability of ${}^3\overline{\text{He}}$ when it encounters matter particles and annihilates or disintegrates within the ALICE detector at the Large Hadron Collider. We extract the inelastic interaction cross section, which is then used as an input to the calculations of the transparency of our Galaxy to the propagation of ${}^3\overline{\text{He}}$ stemming from dark-matter annihilation and cosmic-ray interactions within the interstellar medium. For a specific dark-matter profile, we estimate a transparency of about 50%, whereas it varies with increasing ${}^3\overline{\text{He}}$ momentum from 25% to 90% for cosmic-ray sources. The results indicate that ${}^3\overline{\text{He}}$ nuclei can travel long distances in the Galaxy, and can be used to study cosmic-ray interactions and dark-matter annihilation.



ALICE: eredmények (2023)

Article | [Open Access](#) | [Published: 12 December 2022](#)

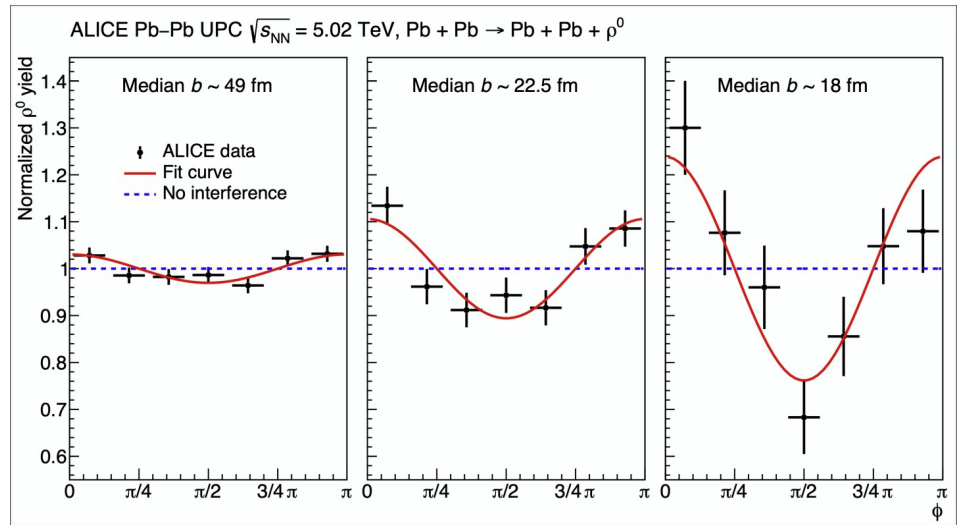
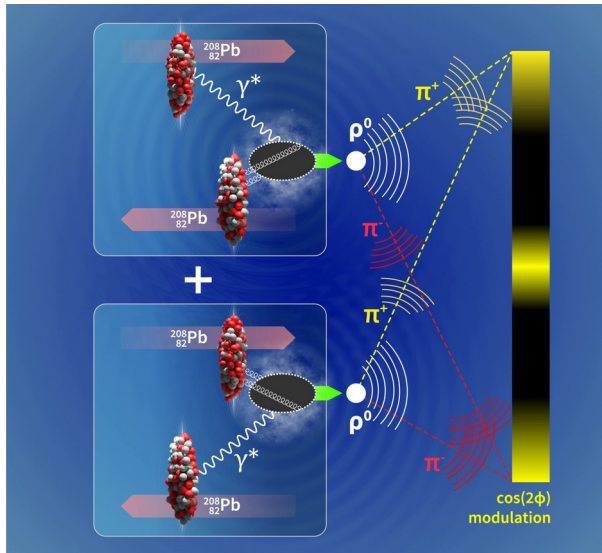
Measurement of anti- ^3He nuclei absorption in matter and impact on their propagation in the Galaxy



- **FELADAT:** Antihélium hatáskeresztmetszet meghatározása, TeV energián.
-
- **EREDMÉNY:** A Galaxisban utazó antihélium, mintegy fele éri el a Földet.
- → **Jobban becsülhető a sötét anyag mennyisége.**

ALICE: legújabb eredmények (2024)

- **Kétréses kísérlet femtoskálán**



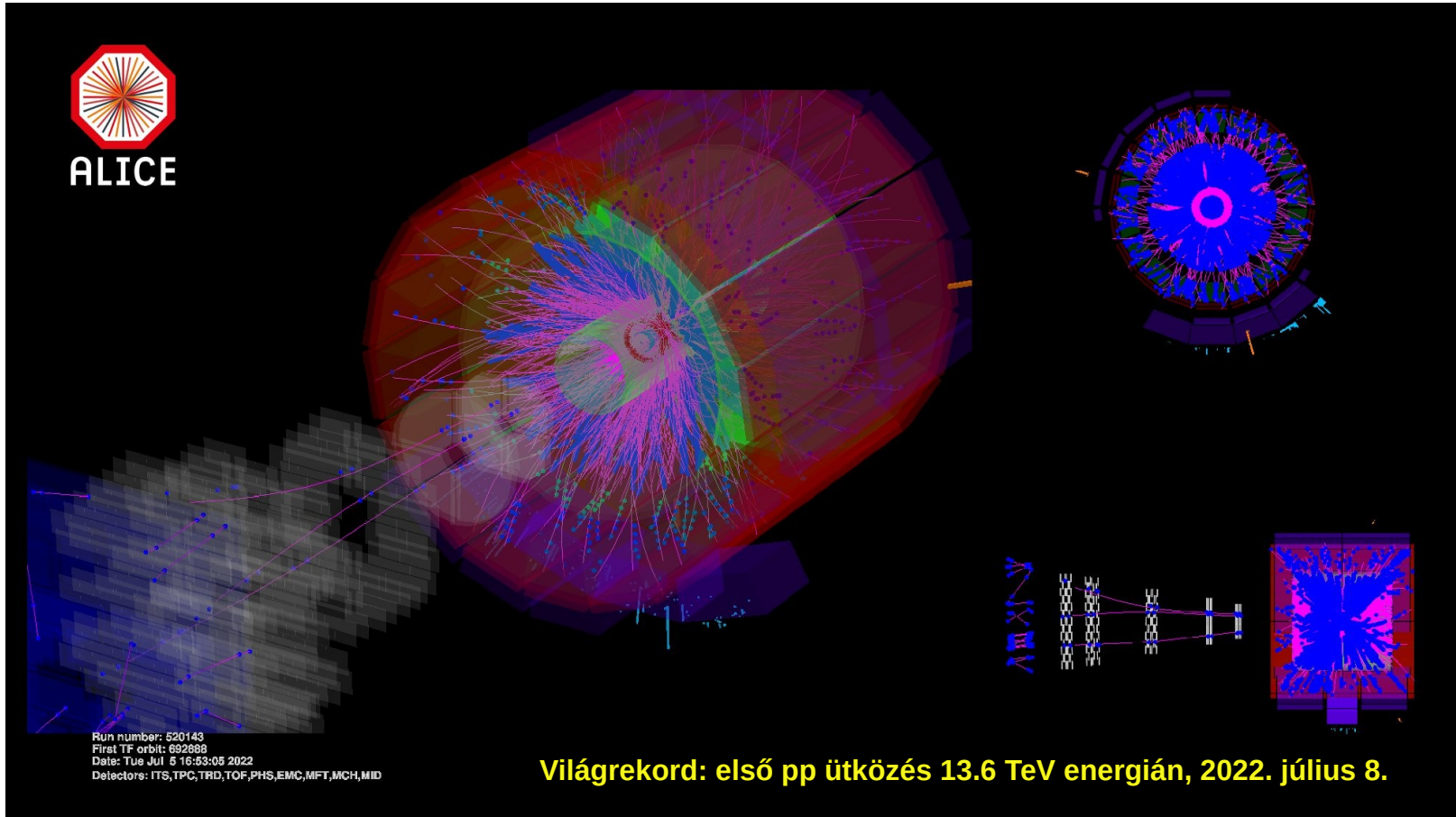
- **EREDMÉNY:** Ultraperiférikus ütközésekben interferencia effektus mérés
- **→ Kvantumeffektusok mérhetőek femtométer skálán**

Jelenidő:

ALICE Run 3

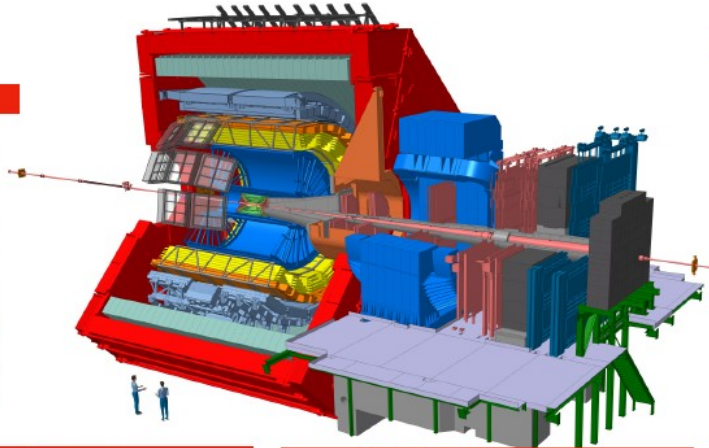
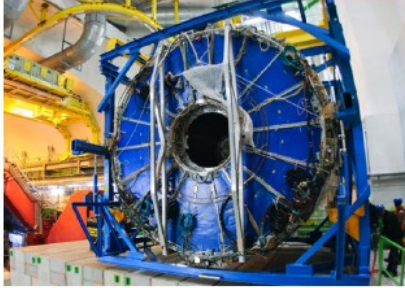


ALICE: legújabb eredmények, első Run 3 [pp@13,6](#) TeV



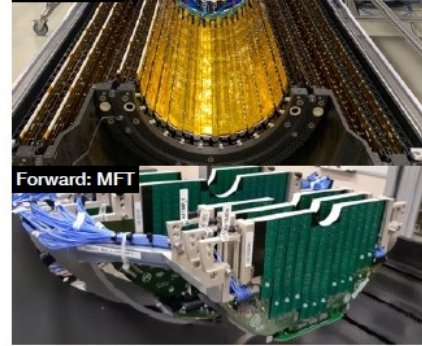
LS2 és Run3: ALICE LS2 K+F fejlesztései

GEM-based TPC



ALPIDE-based Monolithic Silicon Detectors

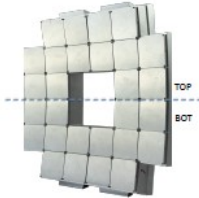
Barrel: ITS2



Forward: MFT



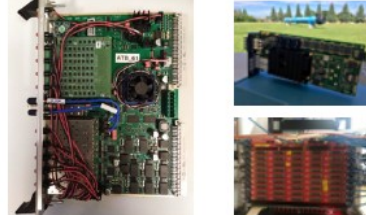
Fast interaction trigger (FIT)



Muon Spectrometer

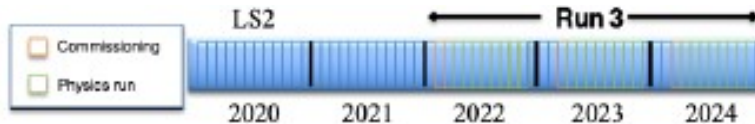


New Central Trigger System
new RDO for EMCal, PHOS, TRD, HMPID, ZDC



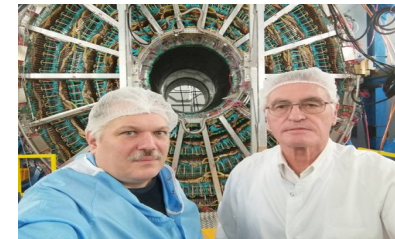
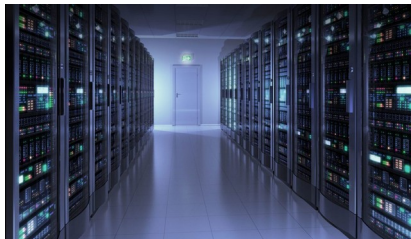
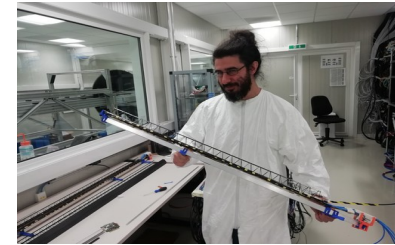
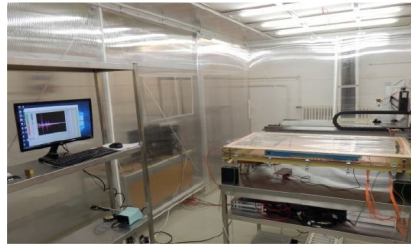
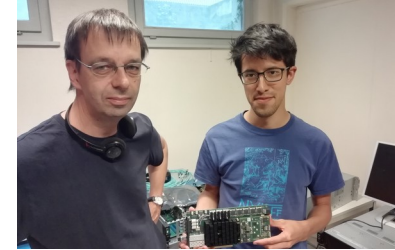
New computing infrastructure and framework: O2

Farm at P2



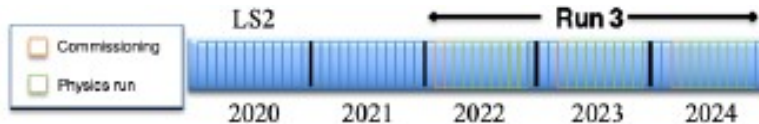
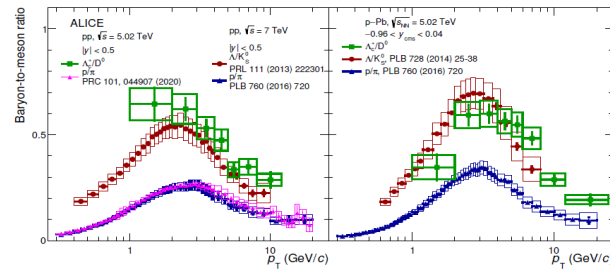
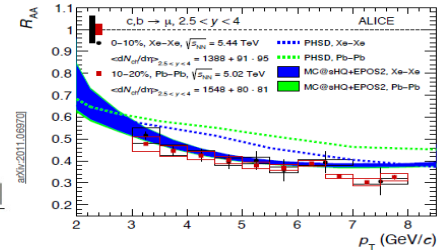
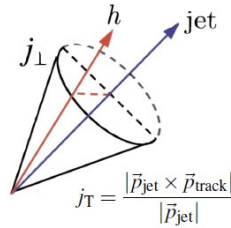
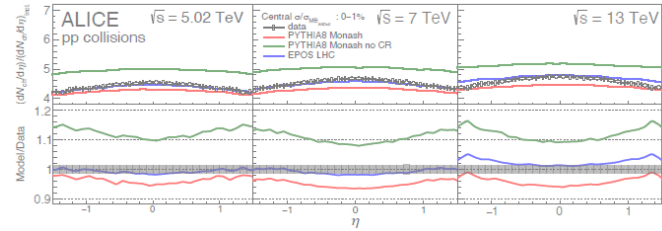
LS2 és Run 3: Magyar ALICE Csoport K+F 2018-2024

1. Az ALICE detektor adatgyűjtő és adattovábbító (DAQ) rendszerének fejlesztése → **4TB/s sebesség**
2. Az ALICE TPC, azaz az időprojekciós kamra K+F → **Világrekord: 90m³**
3. A belső nyomkevető (ITS) szilícium-pixel detektor K+F → **10m² & 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

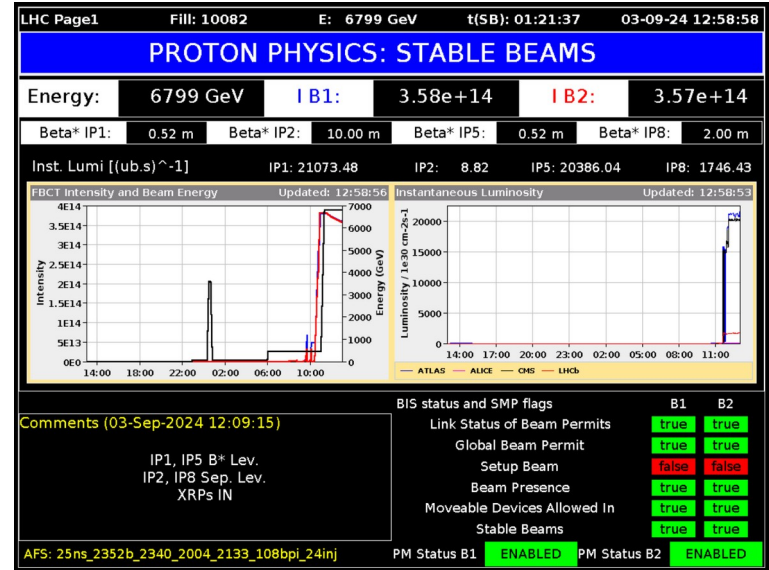
- Pontosabb pszeudo-rapidity eloszlás mérés, **PID hadronspektrumok**
- **Részecskezáporok szerkezetvizsgálata, jet-fragmentáció, hadronizáció, pp, pPb**
- Deutérium-keltés: koaleszcencia modell tesztelése
- **Bájos-hadronok keletkezésének vizsgálata (Λ_c/D arány)**
- **Nehéz hadronok keltése XeXe és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



LS2 és Run3: ALICE jelenlegi elemzései

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

• **Mai státusz?**



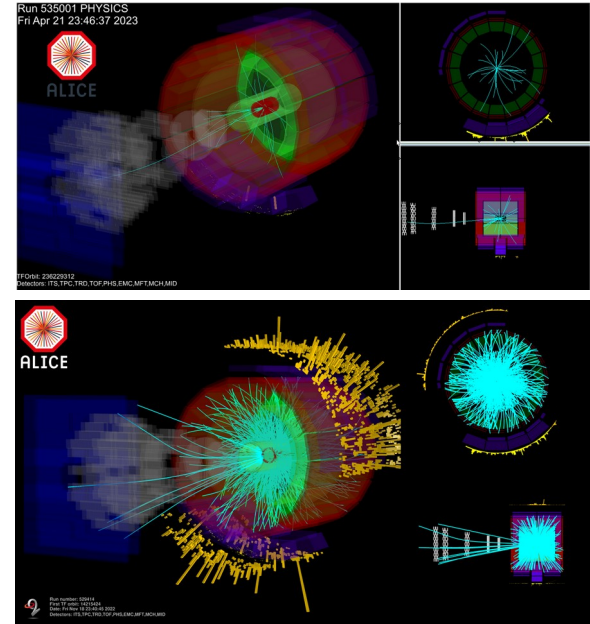
LS2 és Run3: ALICE jelenlegi elemzései

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



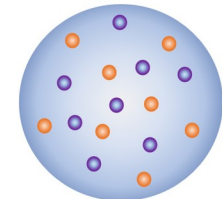
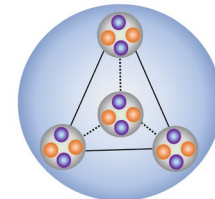
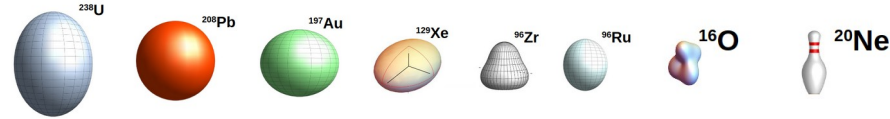
LS2 és Run3: ALICE jelenlegi elemzései

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



LS2 és Run3: ALICE tervezett mérései

- **Felkészülés p+O és O+O ütközések (érdekes magok)**
- **Vajon a Klaszter modell vagy a Woods-Saxon modell írja-e le helyesebben az atommagot?**
- **Elméleti modell alapján, lehet látni az elliptikus folyásban: BGG et al.:**



Proton Neutron α -particle
 α -clustered Oxygen (^{16}O) nucleus

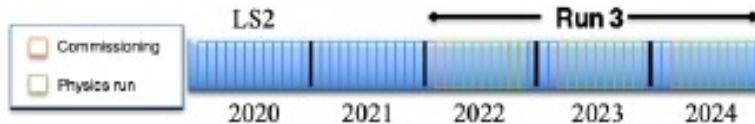
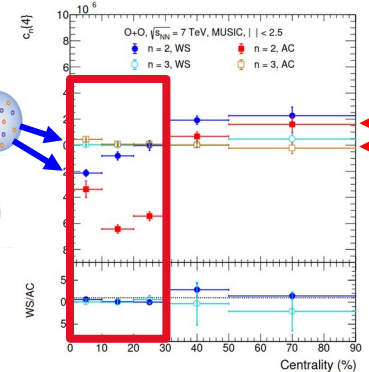
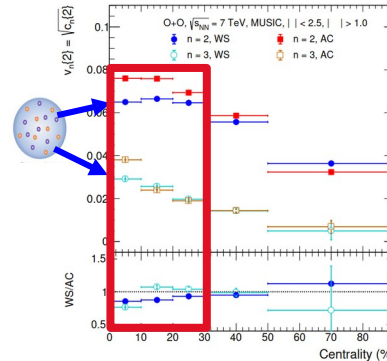
Proton Neutron
Non-clustered Oxygen (^{16}O) nucleus

$$E \frac{d^3N}{dp^3} = \frac{d^2N}{p_T dp_T dy} \frac{1}{2\pi} \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} v_n \cos[n(\phi - \psi_n)] \right)$$

$$v_n = \langle \cos[n(\phi - \psi_n)] \rangle$$

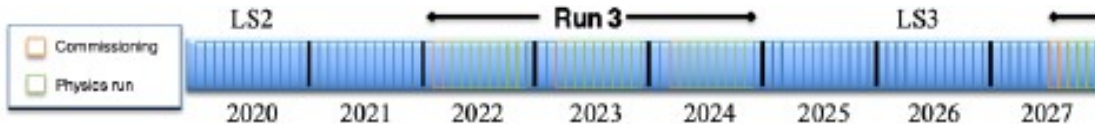
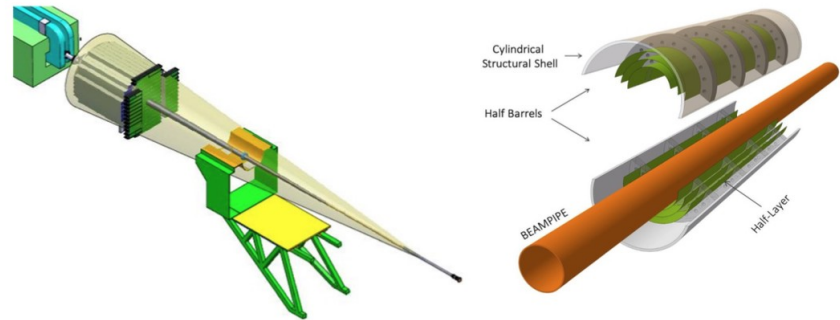
$$v_n\{2\} = \sqrt{c_n\{2\}},$$

$$v_n\{4\} = \sqrt[4]{-c_n\{4\}}.$$



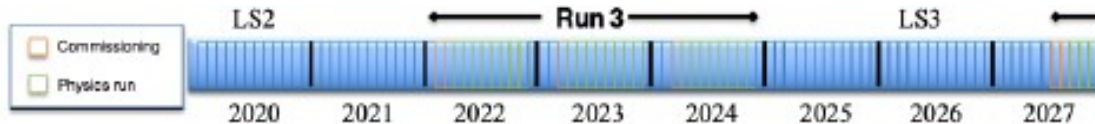
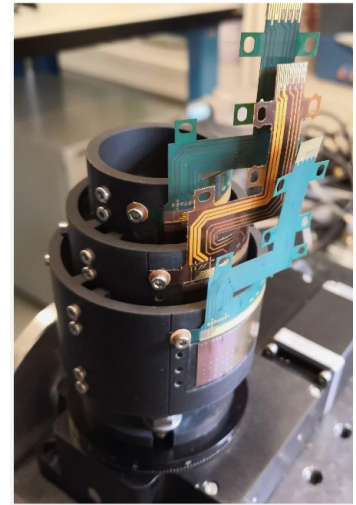
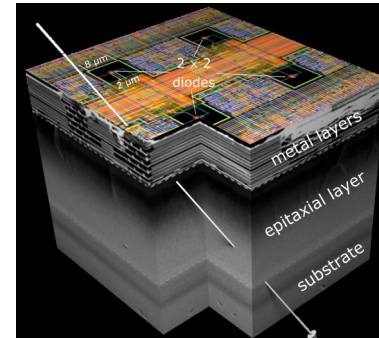
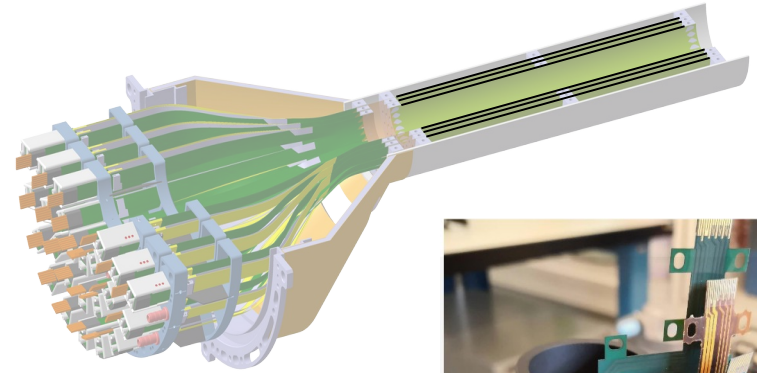
Kutatás-fejlesztések az LS3 időszakra

- **FOCAL** és **ITS3** K+F az ALICE-ban



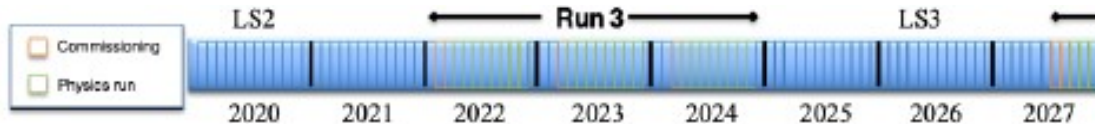
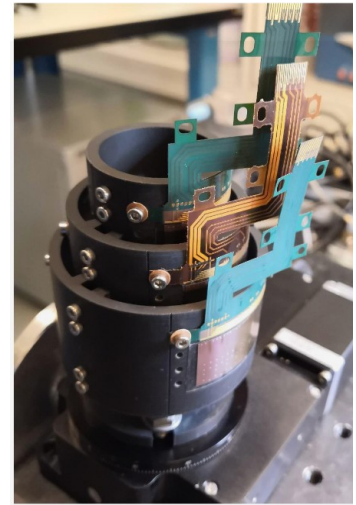
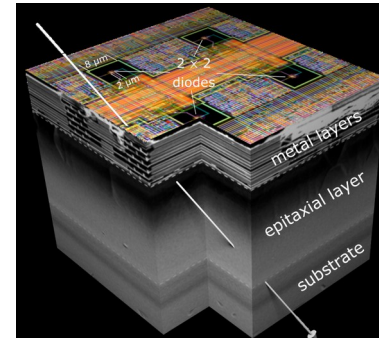
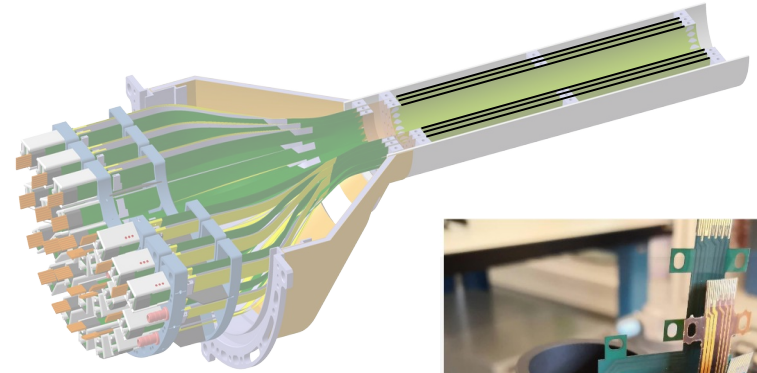
Kutatás-fejlesztések az LS3 időszakra

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



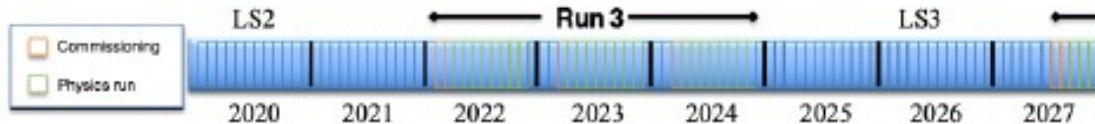
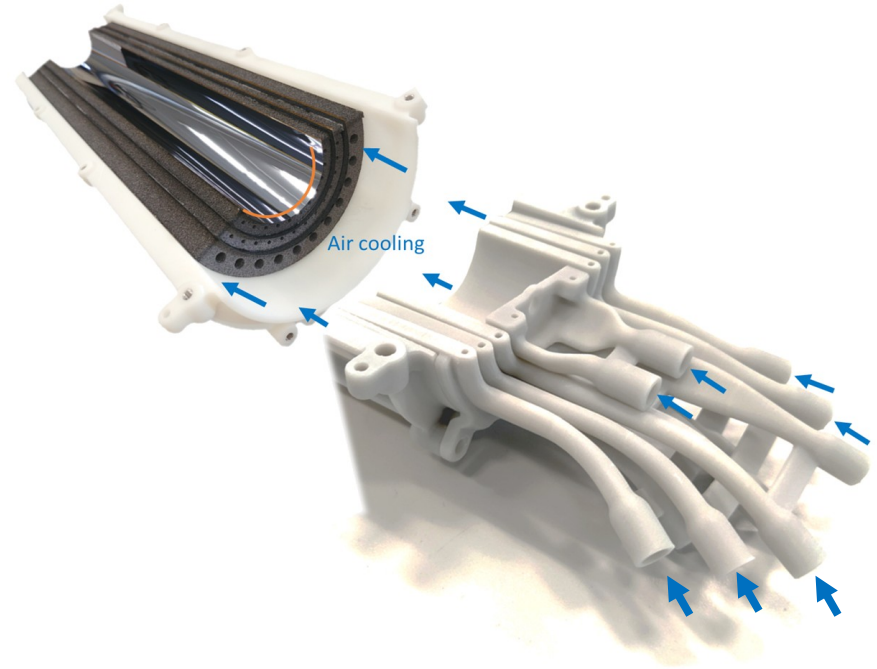
Kutatás-fejlesztések az LS3 időszakra

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



Kutatás-fejlesztések az LS3 időszakra

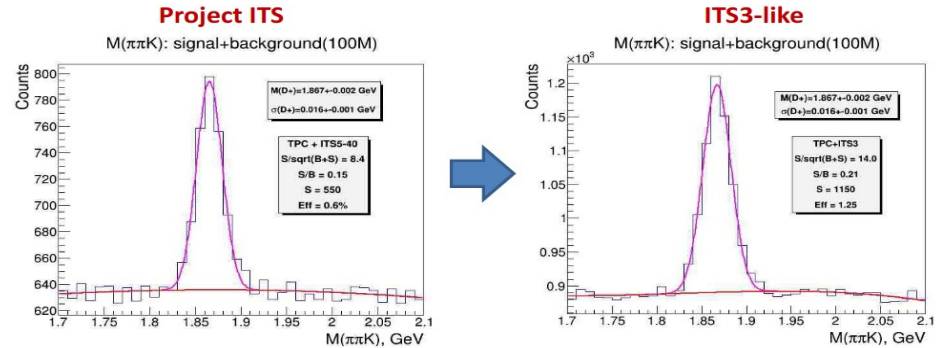
- **FOCAL** és **ITS3** K+F az ALICE-ban
- **ITS3**: hajlékony szilícium alapú MAPS detektor sikeresen tesztelve a DESY gyorsítóban. (**Hűtési szimulációk**)
- **Detektor-elem tesztek + adatgyűjtő rendszer tervezés**



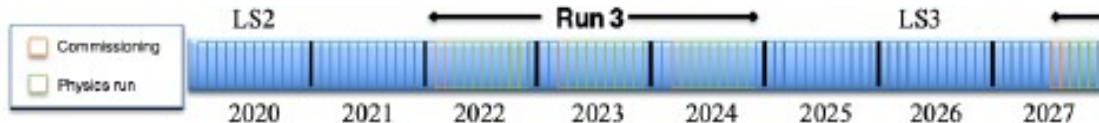
Kutatás-fejlesztések az LS3 időszakra

- **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⁺ reconstruction efficiency with ITS3-like model

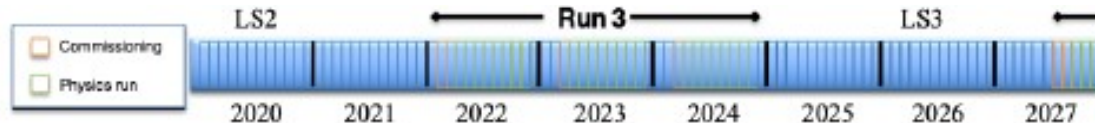
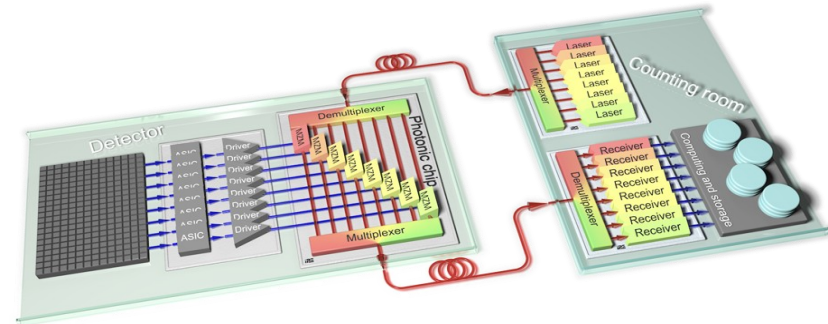
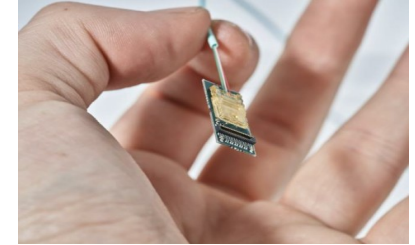
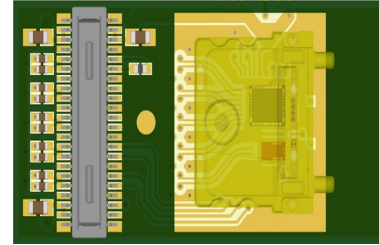


	ITS	S	S/B	$S/\sqrt{S+B}$	Eff,%
Project		550	0.15	8.4	0.60
ITS3-like		1150	0.21	14.0	1.26



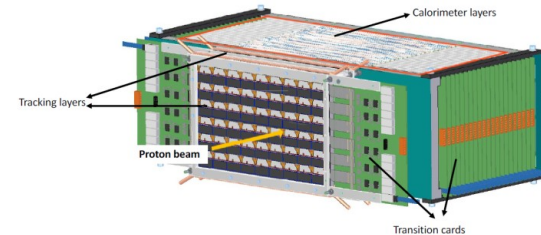
Kutatás-fejlesztések az LS3 időszakra

- Új típusú sugárzástűrő adatgyűjtő (DAQ) rendszerek fejlesztése **IpGBT+**
- **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 MGy vagy 1000+hadron/cm²
- Optoelektronikai adatátvitel: 28/56 Gb/s
- Kvantumfizikai mérőrendszerek → **QTI**



Kutatás-fejlesztések az nyúlón túl...

- ✓ **Bergen Proton CT együttműködés**
- ✓ **Orvosfizikai detektoralkalmazás (Bíró G, Jólesz Zs, Varga-Kőfaragó, GGB)**
 - **ITS3 → ALICE3 MAPS**
 - **Proton CP szimulációfejlesztés: Richerdson - Lucy módszer**
 - **pCT képalkotás meserséges intelligencia támogatással**
 - **ALICE DAQ technologia transfer**
 - **Hűtési rendszer tervezése és szimu**
 - **Új anyagok: szénhab (új hőmodellel)**

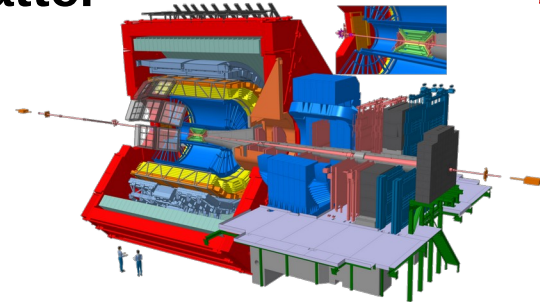
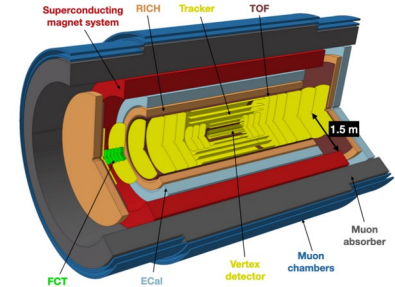
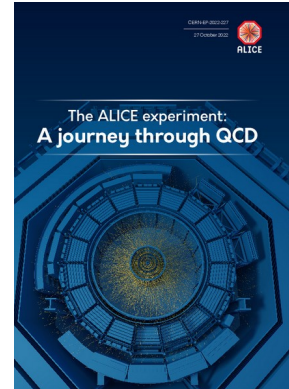


Front. in Phys. Med. Phys. Im. ID: 568243,
Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Im. ID: 162626

Összegzés

Nehézion-fizikai célok és tervek a következő évtizedre

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



A Magyar ALICE Csoport (2002-2023)



Támogatás: NKFIH/OTKA FK131979, K135515, NEMZ_KI-2022-00009
Web: <http://alice.wigner.hu>, <http://alice.web.cern.ch>



KÖSZÖNETNYILVANÍTÁS

HAZAI HOZZÁJÁRULÁS

- ✓ Jelen: 2020-2024:K135515, 2019-2023:FK131979, 2020-2022:2019-2.1.11-TÉT-2019-00050, 2020-2022:2019-2.1.11-TÉT-2019-00078, 2020-2023:2019-2.1.6-NEMZ_KI-2019-00011
- ✓ Múlt: 2016-2020:K120660, 2012-2016:NK106119, 2009-2013:NK77816, 2009-2013:CK77815, 2007-2010:H07-C 70464, 2007-2008:IN 71374, 2006-2009:NK62044

BACKUP