

# Merre tovább a Második Nagy Leállás után ALICE?

Barnaföldi Gergely Gábor, CERN LHC ALICE, MTA Wigner FK RMI,  
Magyar Magfizikus Találkozó, Jávorkút, Bükk 2018. augusztus 30.

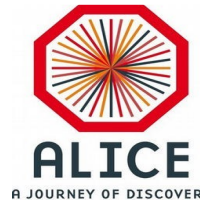
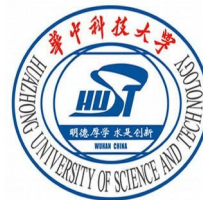
Web: <http://alice.kfki.hu>

Résztevők:

Kísérlet: Gy. Bencédi, L. Boldizsár, E. Dávid, L. Gáll, **Á. Gera**, G. Hamar, J. Imrek, T. Kiss, K. Kapás,  
M. Varga-Kófaragó, P. Lévai, T.M. Nguyen, B. Szilágyi, D. Varga, M. Vargyas, O. Visnyei, R. Vértesi

Elmélet: D. Berényi, G. Bíró, T.S. Biró, Sz. Karsai, P. Lévai, P. Pósfay, D. Nagy, M. Németh, Á. Takács,  
M. Gyulassy, G.Y. Ma, G. Papp, K.M. Shen, X.N. Wang, B.W. Zhang.

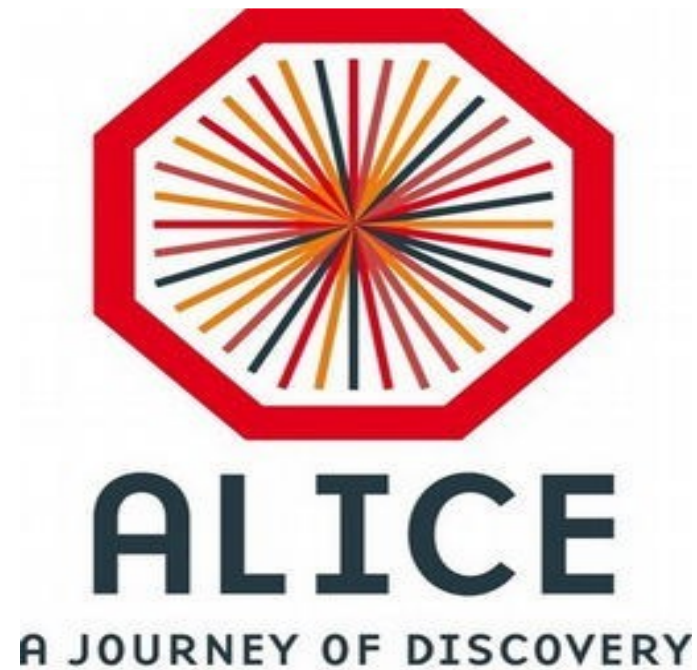
Támogatás: TET 12 CN-1-2012-0016, K120660 (2016-2020)



# TARTALOM

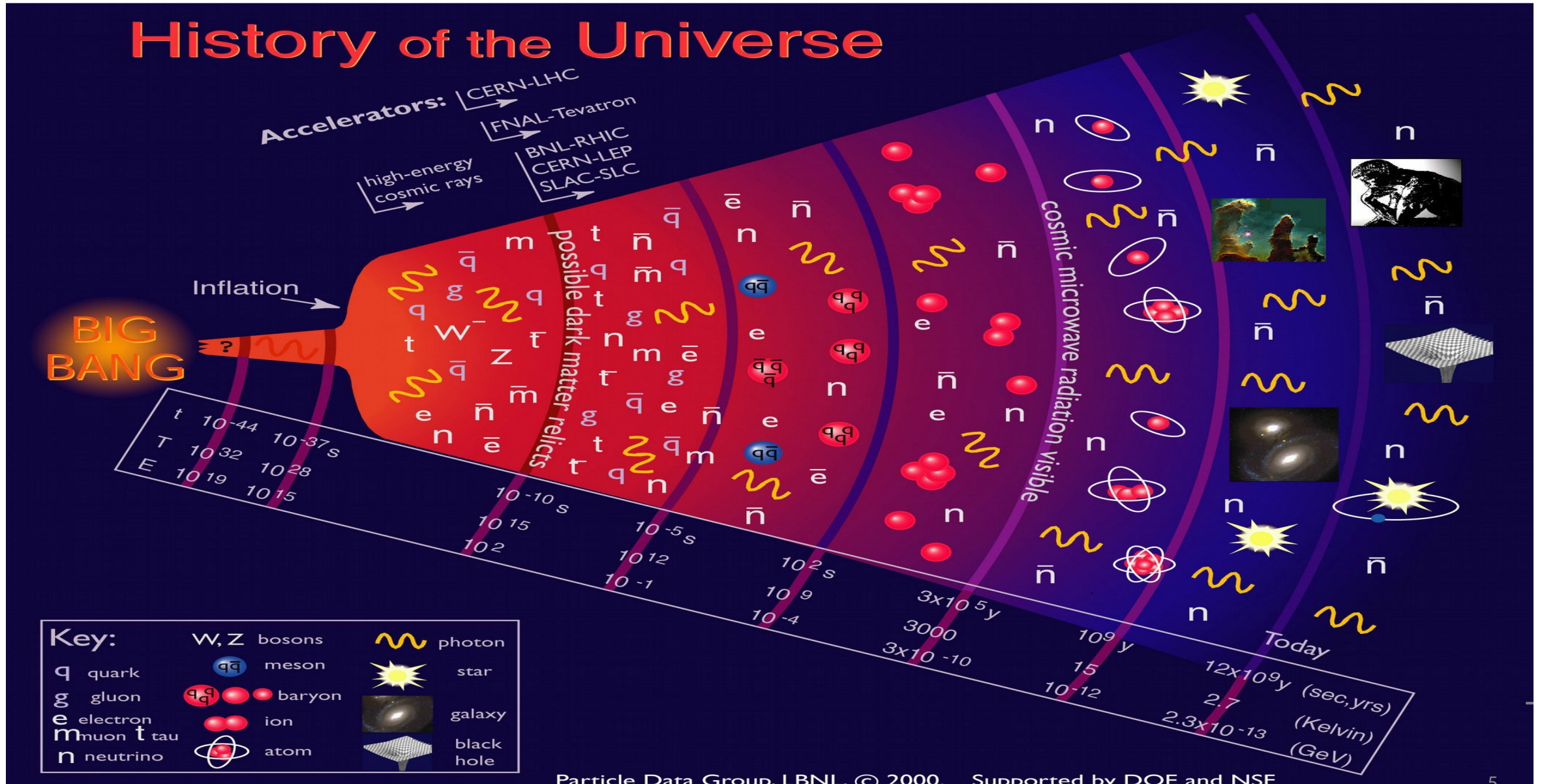
Jelen

Jövő

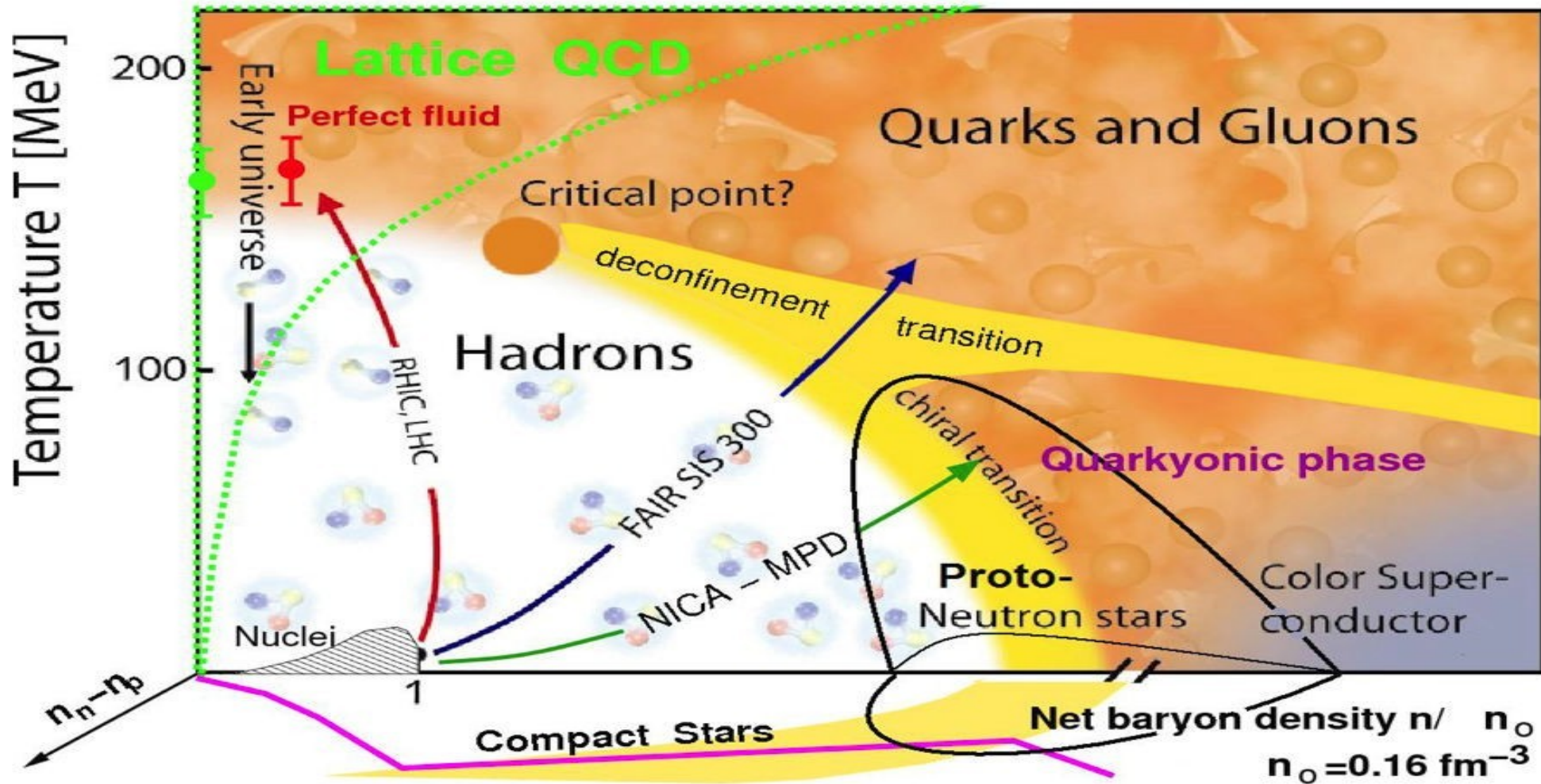


**JELÉN...**

# A korai Univerzum anyaga: forró sűrű ösanyag

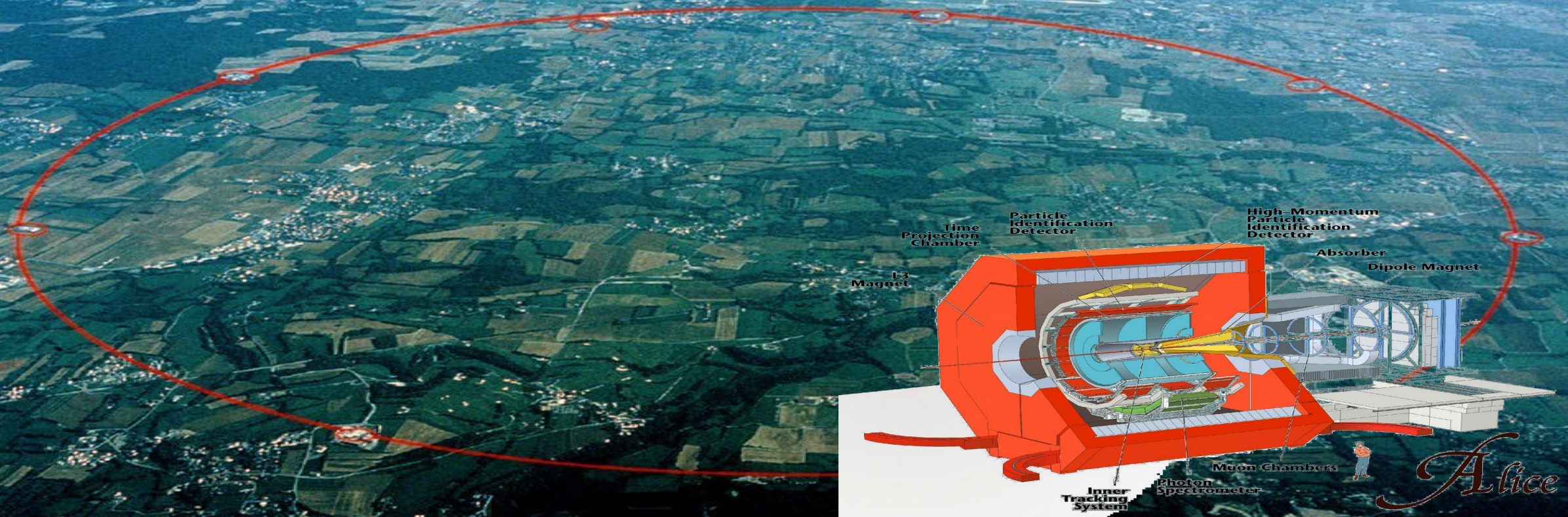


# A korai Univerzum anyaga: forró sűrű ösanyag



# Az ALICE kísérleti együttműködés

# ALICE – A Nagy Ionütköztető Kísérlet



# ALICE – A Nagy Ionütköztető Kísérlet

1200 fő, 36 ország, 151 kutatóintézet, 160kCHF





Szolenoid mágnes 0.5 T

Kozmikus sugárzás trigger

„Forward” detektorok

- PMD
- FMD, T0, V0, ZDC

Specializált detektorok

- HMPID
- PHOS

- 
- 

Központi nyomkövető rendszer

- ITS
- TPC
- TRD
- TOF

MUON Spektrométer

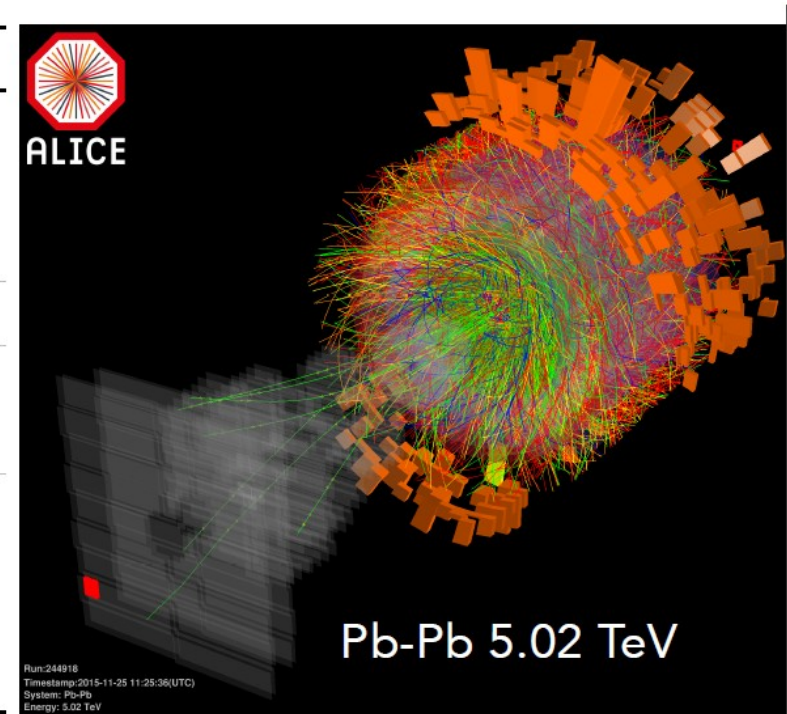
- elnyelő anyagok
- nyomkövetők
- trigger kamrák
- dipól mágnes



# Az ALICE jelen kutatási irányai

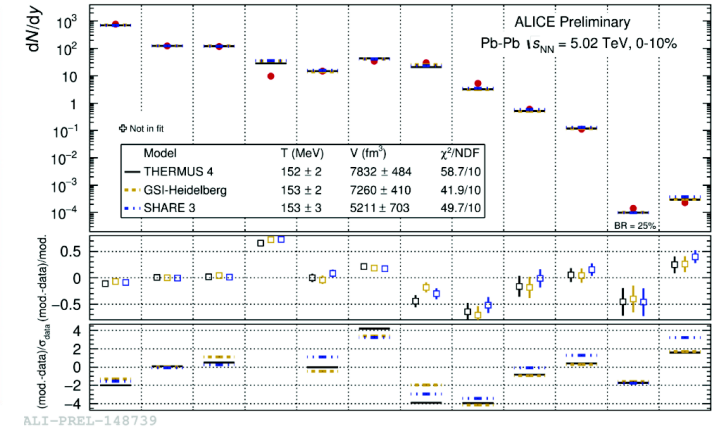
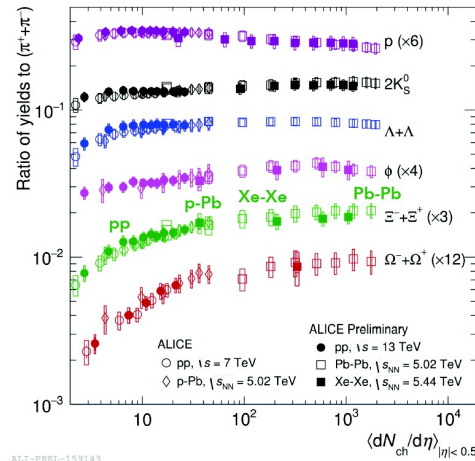
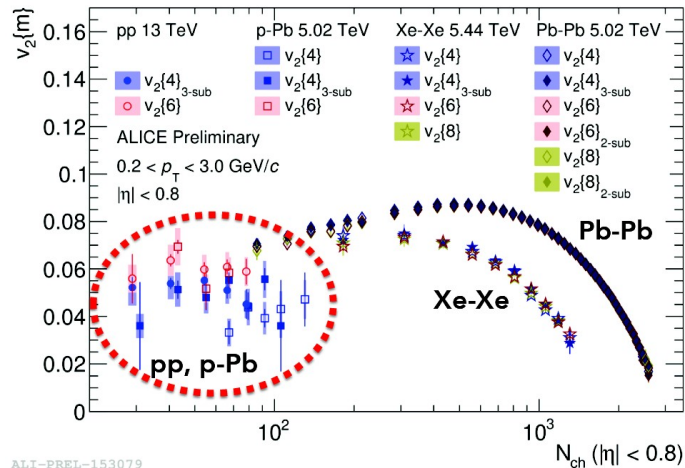
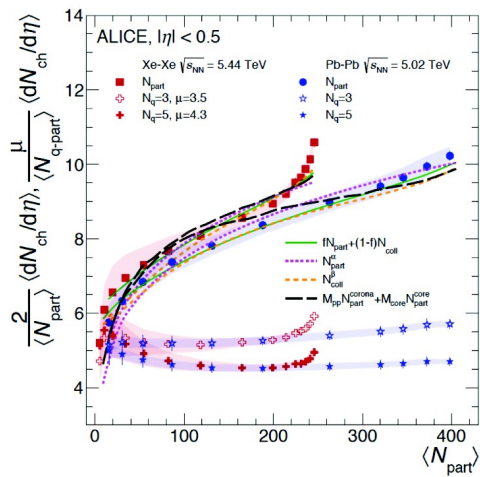
- 1) Kollektív viselkedés és hadronkémia
- 2) Jet-anyag kölcsönhatás
- 3) Elektromágneses próbák
- 4) Nehéz hadronok vizsgálata

System	Year(s)	$\sqrt{s_{NN}}$ (TeV)	$L_{int}$
Pb-Pb	2010-2011	2.76	$\sim 75 \mu\text{b}^{-1}$
	2015	5.02	$\sim 250 \mu\text{b}^{-1}$
	by end of 2018	5.02	$\sim 1 \text{nb}^{-1}$
Xe-Xe	2017	5.44	$\sim 0.3 \mu\text{b}^{-1}$
p-Pb	2013	5.02	$\sim 15 \text{nb}^{-1}$
	2016	5.02, 8.16	$\sim 3 \text{nb}^{-1}, \sim 25 \text{nb}^{-1}$
pp	2009-2013	0.9, 2.76, 7, 8	$\sim 200 \mu\text{b}^{-1}, \sim 100 \text{nb}^{-1}, \sim 1.5 \text{pb}^{-1}, \sim 2.5 \text{pb}^{-1}$
	2015, 2017	5.02	$\sim 1.3 \text{pb}^{-1}$
	2015-2017	13	$\sim 25 \text{pb}^{-1}$



# Az ALICE jelen kutatási irányai

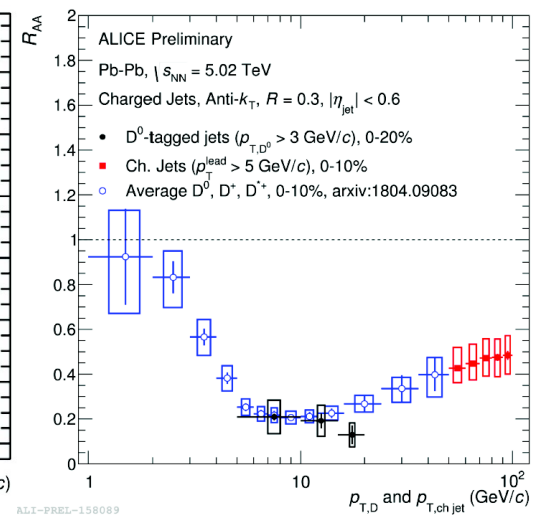
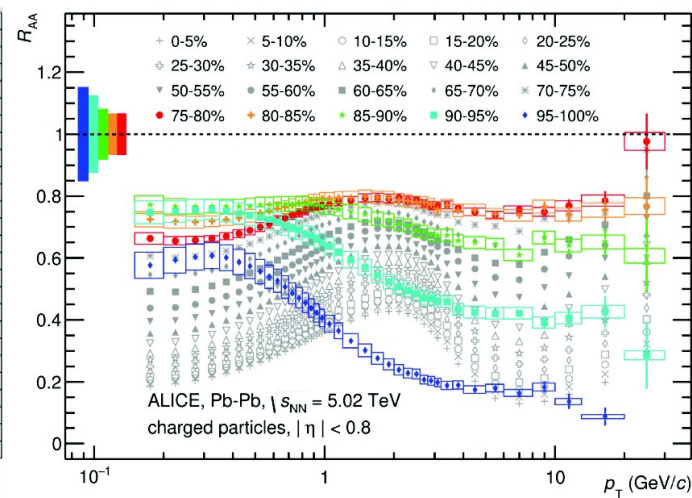
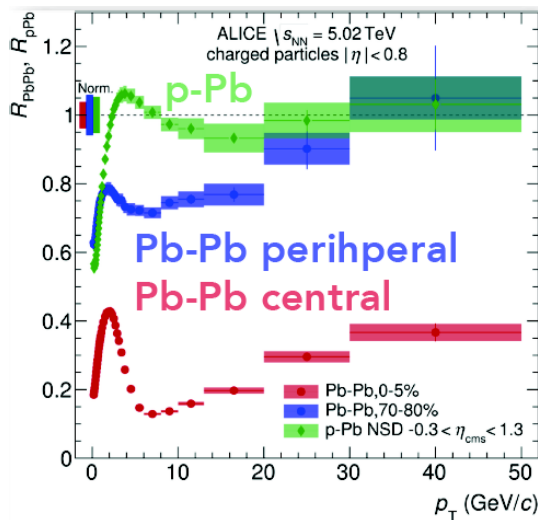
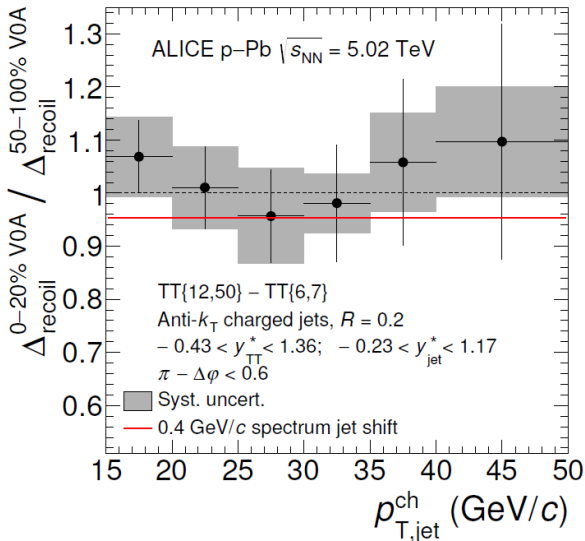
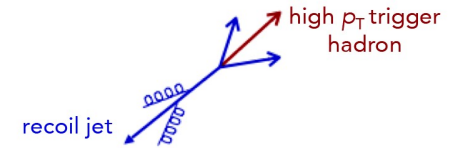
- 1) Kollektív viselkedés és hadronkémia
  - XeXe  $\rightarrow$  Npart skálásértés
  - Elliptikus folyás vizsgálata
  - Hadrokémia tesztje (termális modellek jól működnek TeV-en is)



# Az ALICE jelen kutatási irányai

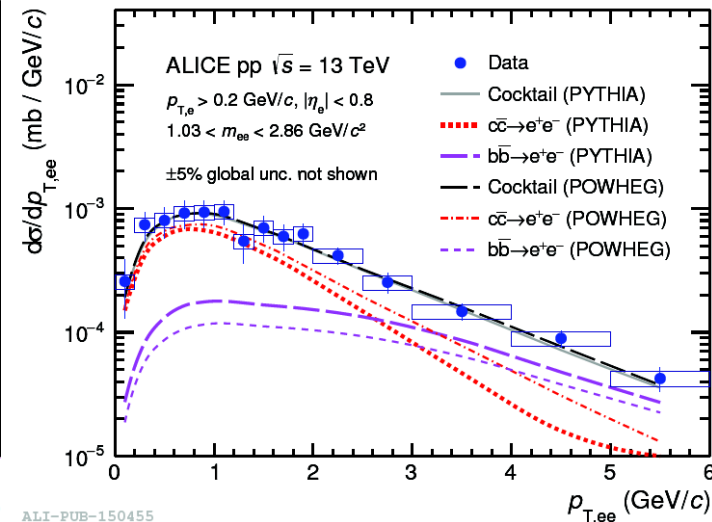
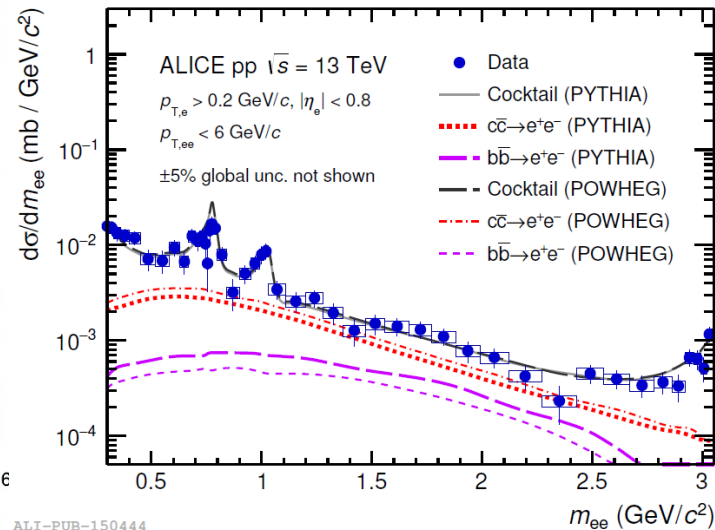
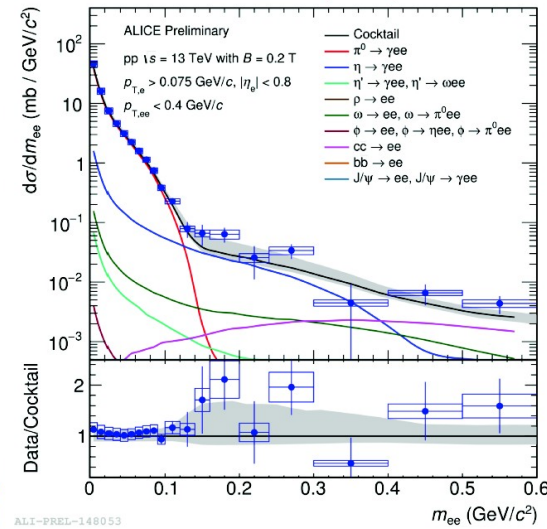
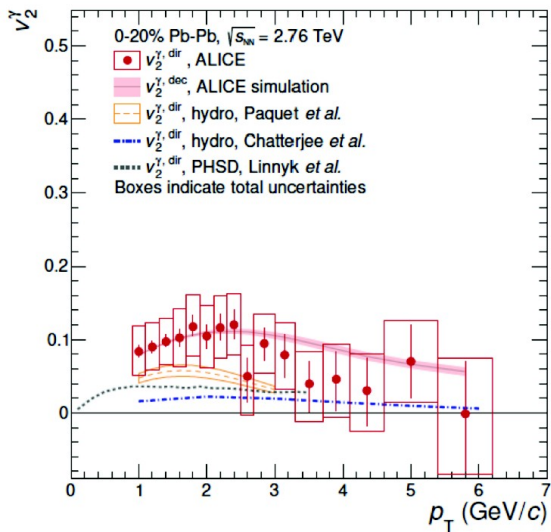
## • 2) Jet-anyag kölcsönhatás

- A pPb meghatározza a jet elnyomást → ha van is, gyenge elnyomás várható
- R\_AA Ultra-periférikus rendszerek és XeXe vizsgálata
- Jet-szerkezet elemzés, D-tagged jetek



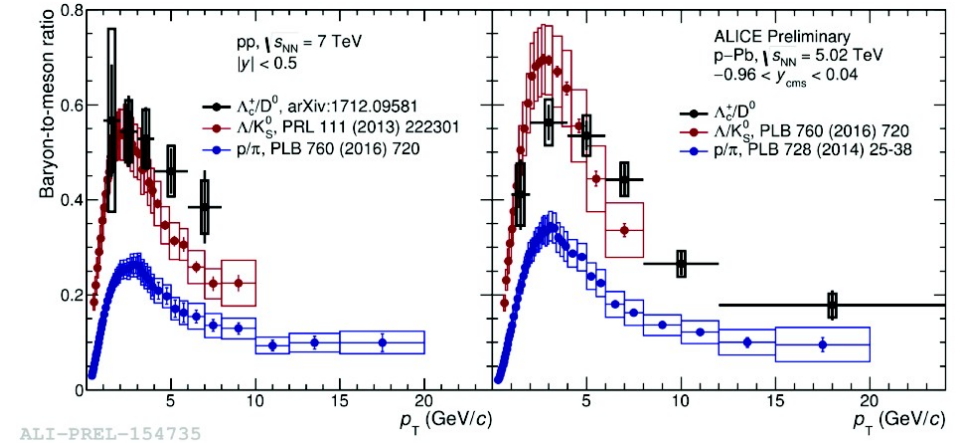
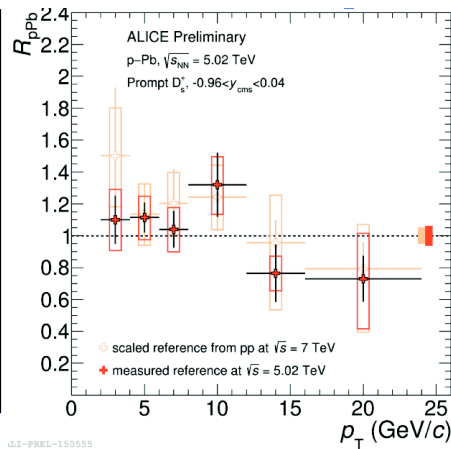
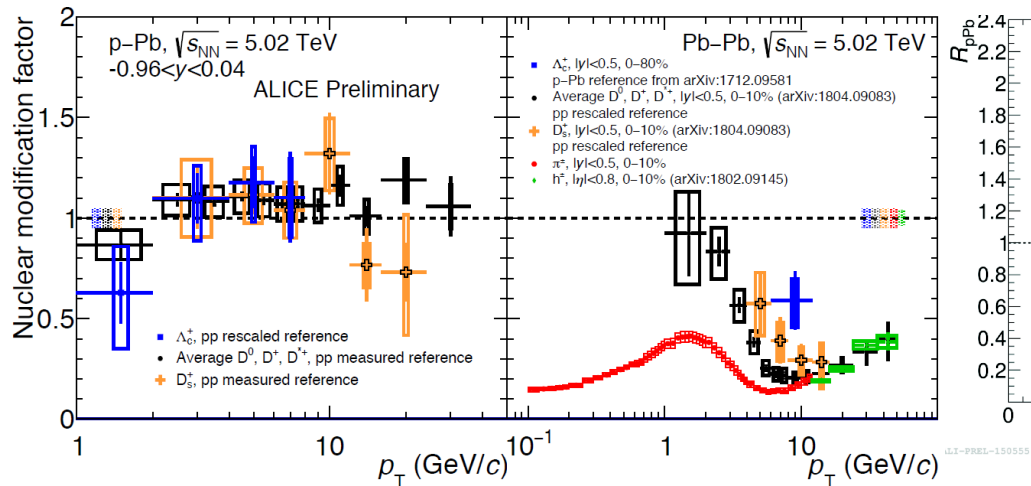
# Az ALICE jelen kutatási irányai

- 3) Elektromágneses próbák
  - Direkt foton elliptikus folyás (traszport modellel való egyezés)
  - Kis tömegű di-leptonok mérése pp ütközésekben
  - Nehéz hadronok mérése di-leptonokkal, pontosabb hátterek



# Az ALICE jelen kutatási irányai

- 4) Vizsgálatok nehéz hadronokkal
  - J/psi produkció → pontosabb nPDF
  - Upszilon elnyomás mérése
  - Rekombinációs modellek ellenőrzése XeXe és PbPb ütközésekben
  - D mezon produkció
  - Barion/mezon arány a c-szektorban hasonló





ALICE  
2018

---

*25 years*  
**ANNIVERSARY**  
**1993-2018**

# A magyar ALICE részvétel története

- 1990 Prehisztorikus idők
- 1992 Magyarország @ CERN (J. Zimányi, G. Vesztergombi)
- 1996 Magyarország @ ALICE (G. Vesztergombi)

Name	E-Mail address	Institute/Mail address
J. Schukraft	SMS CERNVM	CERN/EP
H. Satz	SATZ@ CERNVM	CERN-TH
J. Zimányi	H747.ZIM@ ELLA.WWCP	Central Research Institute for Physics H-1525 Budapest 114, POB 70, Hungary
J. Osterlund	GARBOLO@ SELDG52	DEP. OF PHYSICS, UNIV. OF LUND, SÖLVEGATAN 17, S-223 62 LUND, SWEDEN
S. Nilsson	SN@SESHFI SN@VAND-PH	Stockholm University, Fysikum Vanadisvägen 9, 11346 STOCKHOLM Sweden
J. M. GAGO	GAGO@ CERNVM	LIP - Av. Elias Garcia, 14 - 1000 Lisbon
P. Bordalo	PAULA@UXL	LIP - Av. Elias Garcia, 14 - 1000 Lisbon
L. Kluberg	KLUBERG@ CERNVM	LPNHE Ecole Polytechnique 91128 Palaiseau FRANCE
F. Vazeille	VAZEILLE CERNVM	LPCCF - Clermont-Ferrand 63177 AUBIERE France
B. Chaurand	CHAURAND @FACPMTH	LPNHE Ecole Polytechnique 91128 Palaiseau FRANCE
-	CASTOR	LPC CERN.out - Ferrara





# A magyar ALICE részvétel története

- 2005 Csatlakoztunk az ALICE HMPID csoporthoz
  - BGG, Lévai P, Varga D, Hamar G, Novitzky N
- 2006 egy hónap ösztöndíj 'PostDoc' a mexikói UNAM-on (HELEN)
  - Az AliROOT alapú HMPID és VHMPID elemzések
  - Jet elemzések, jet quenching: S. Pochybová, Bencédi Gy, Agócs A, Molnár L
- 2009-2013 VHMPID (proto) kollaboráció
  - Egy UG javaslat az ALICE HMPID detektorra
  - Mexikói-Magyar bilaterális pályázat 2 évre
- 2015- Új generáció (HMPID és TPC analízis & TPC UG & ITS UG)
  - M. Varga-Kőfaragó, Gy. Bencédi (ePLANET) Vértesi R, Harangozó Sz, Bíró G, Berényi D
  - ALICE Analízis: 13 TeV pp és 14 TeV adat, b-tagging, hadron-korrelációk

JÖVŐ...

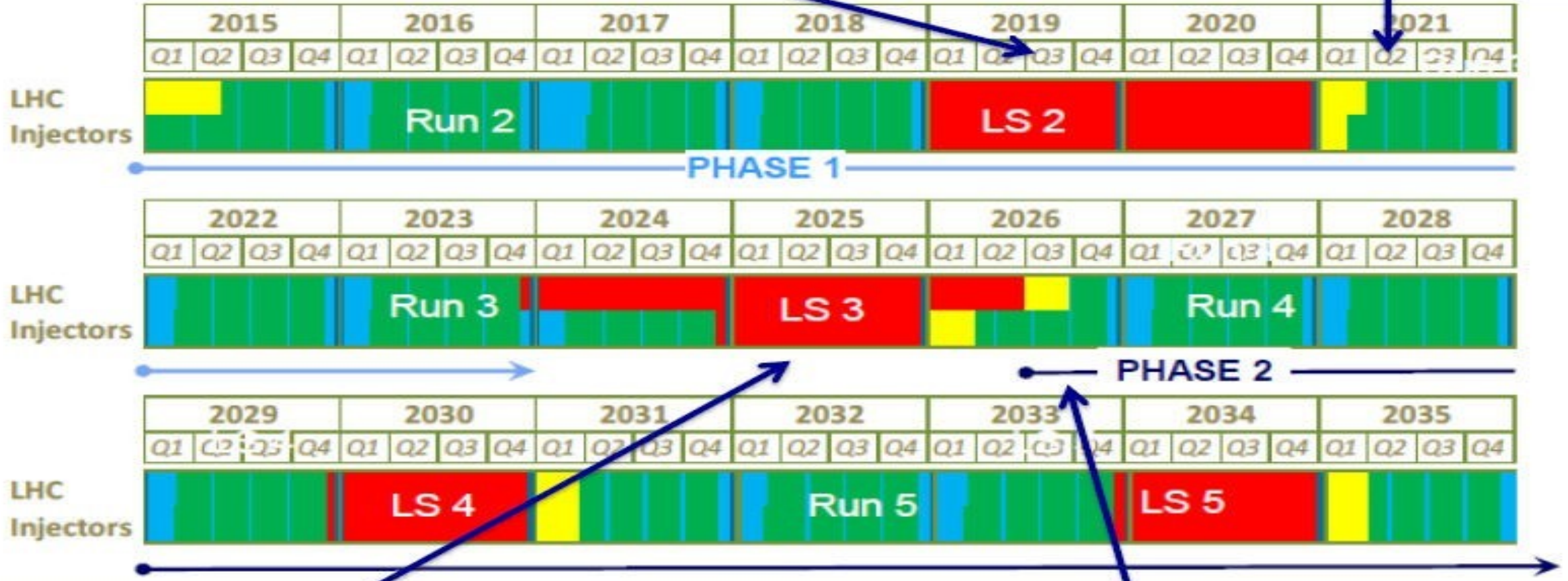
# Az LHC Második Nagy Leállás (LS2)

# A Nagy Hadronütköztető (LHC) fejlesztési terve

## PHASE I Upgrade

ALICE, LHCb major upgrade  
ATLAS, CMS 'minor' upgrade

Heavy Ion Luminosity  
from  $10^{27}$  to  $7 \times 10^{27}$



## PHASE II Upgrade

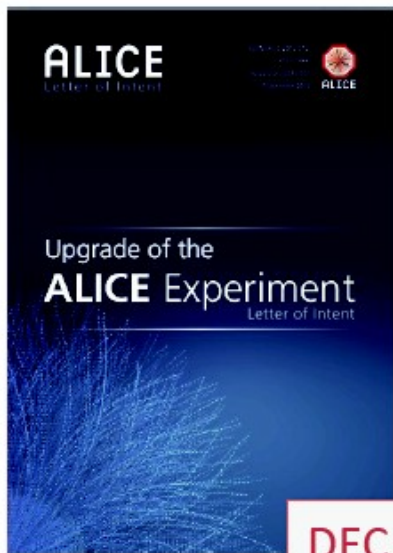
ATLAS, CMS major upgrade

HL-LHC, pp luminosity

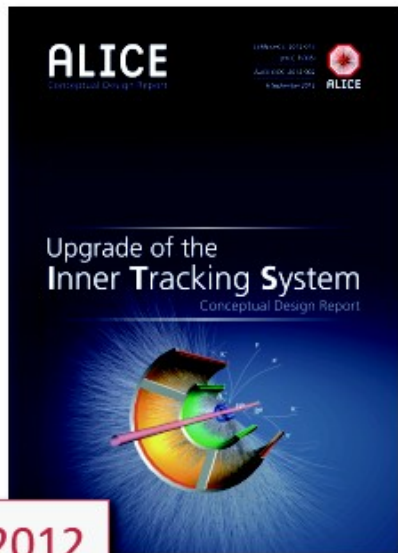
from  $10^{34}$  (peak) to  $5 \times 10^{34}$  (levelled)

# Kutatófejlesztések a CERN ALICE kísérletben

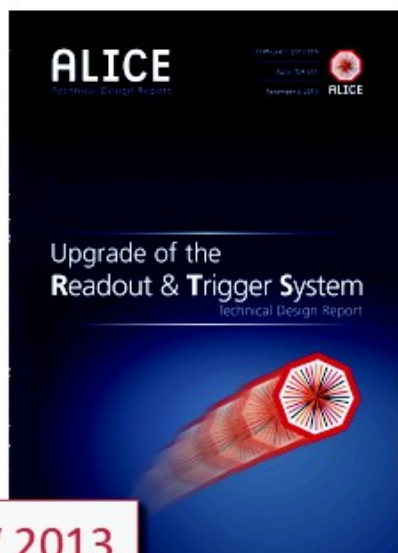
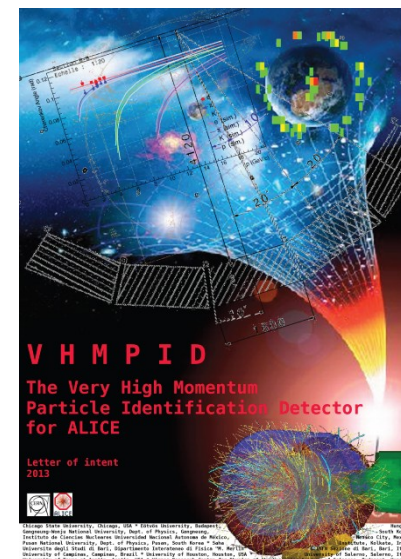
# ALICE fejlesztések



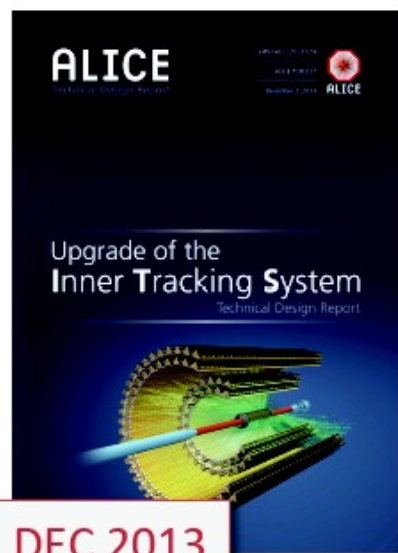
DEC 2012



SEP 2013



NOV 2013



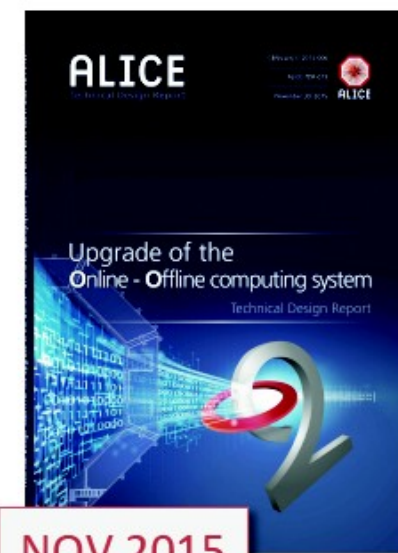
DEC 2013



MAR 2014



MAY 2015

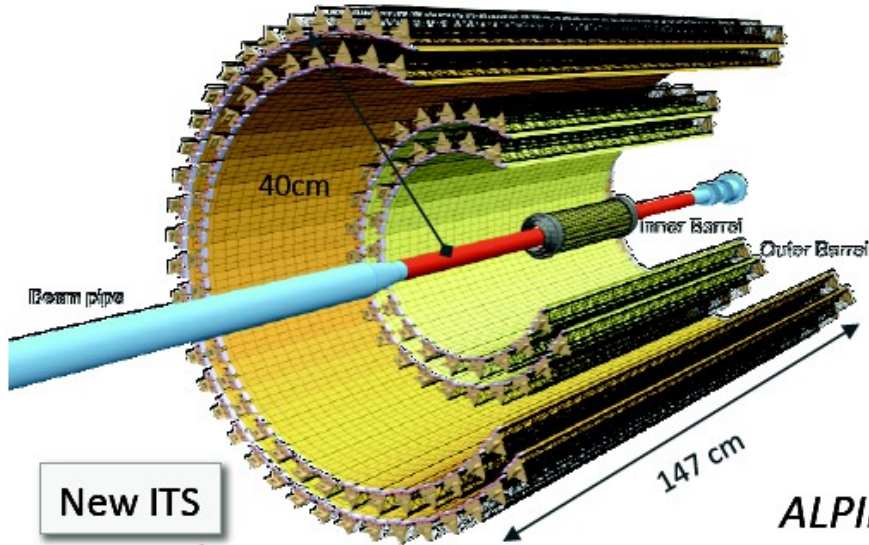


NOV 2015

# A new ITS: closer to IP, thinner, higher position resolution



ALICE



New ITS

$1.5 \leq \eta \leq 1.5$

Closer to IP: 39mm → 22mm

Thinner:  $\sim 1.14\% \rightarrow \sim 0.3\%$  (for inner layers)

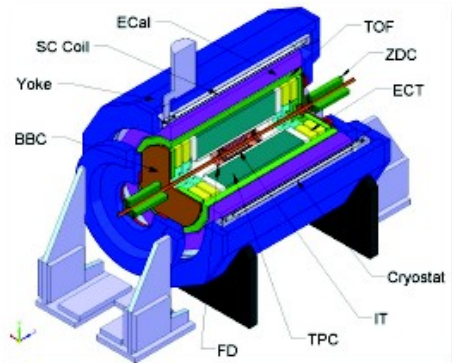
Smaller pixels:  $50\mu\text{m} \times 425\mu\text{m} \rightarrow 27\mu\text{m} \times 29\mu\text{m}$

Increase granularity ( $\times 10^3$ ): 20 chan/cm<sup>3</sup> → 2k pixel/cm<sup>3</sup>

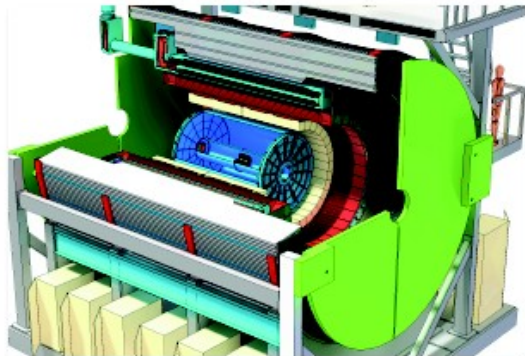
10 m<sup>2</sup> active silicon area: 12.5 G-pixels,  $\sigma \approx 5\mu\text{m}$

*ALPIDE (ALICE Pixel Detector) - Developed for the ALICE upgrade (ITS and MFT) will be used (or it is proposed) for several other HEP detectors and non HEP applications*

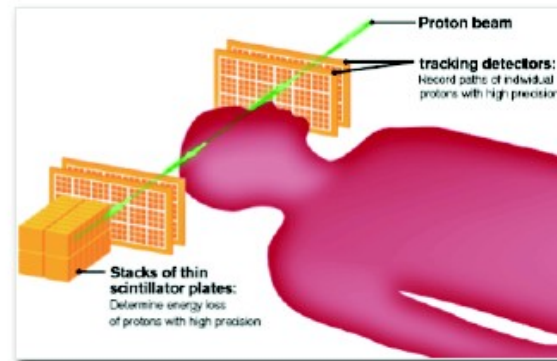
NICA MPD (@JINR)



sPHENIX (BNL)



proton CT (tracking)



CSES – HEPD2



...

# ALICE fejlesztések: Új szilikon-pixel detektor

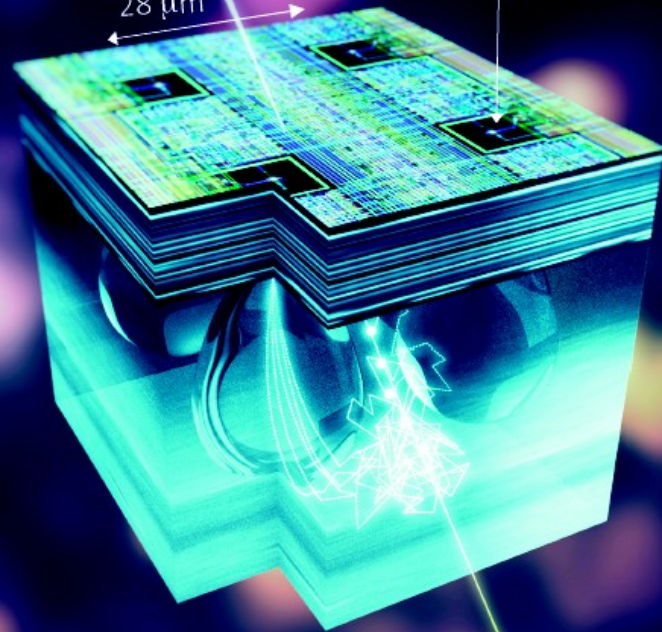
R&D: CERN, CCNU, IPHC, INFN, IRFU, NIKHEF, Yonsey

2 x 2 pixel volume

0.3 pJ / bit

28  $\mu\text{m}$

collection electrode



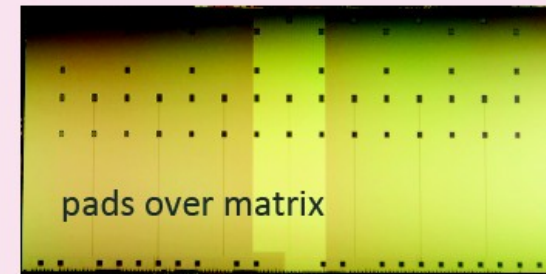
$C_{in} \approx 5 \text{ fF}$

$Q_{in} \text{ (MIP)} \approx 1300 \text{ e} \Rightarrow V \approx 40 \text{ mV}$

ALPIDE

30mm

IB: 50 $\mu\text{m}$  thick



15mm

130,000 pixels /  $\text{cm}^2$  27x29x25  $\mu\text{m}^3$

spatial resolution  $\sim 5 \mu\text{m}$

max particle rate  $\sim 100 \text{ MHz} / \text{cm}^2$

fake-hit rate:  $< 10^{-9}$  pixel / event

ALPIDE with modified CERN/Tower process:

$\Rightarrow 10^{15} \text{ n/cm}^2$  (HL LHC, 2000/fb,  $r > 15 \text{ cm}$ )

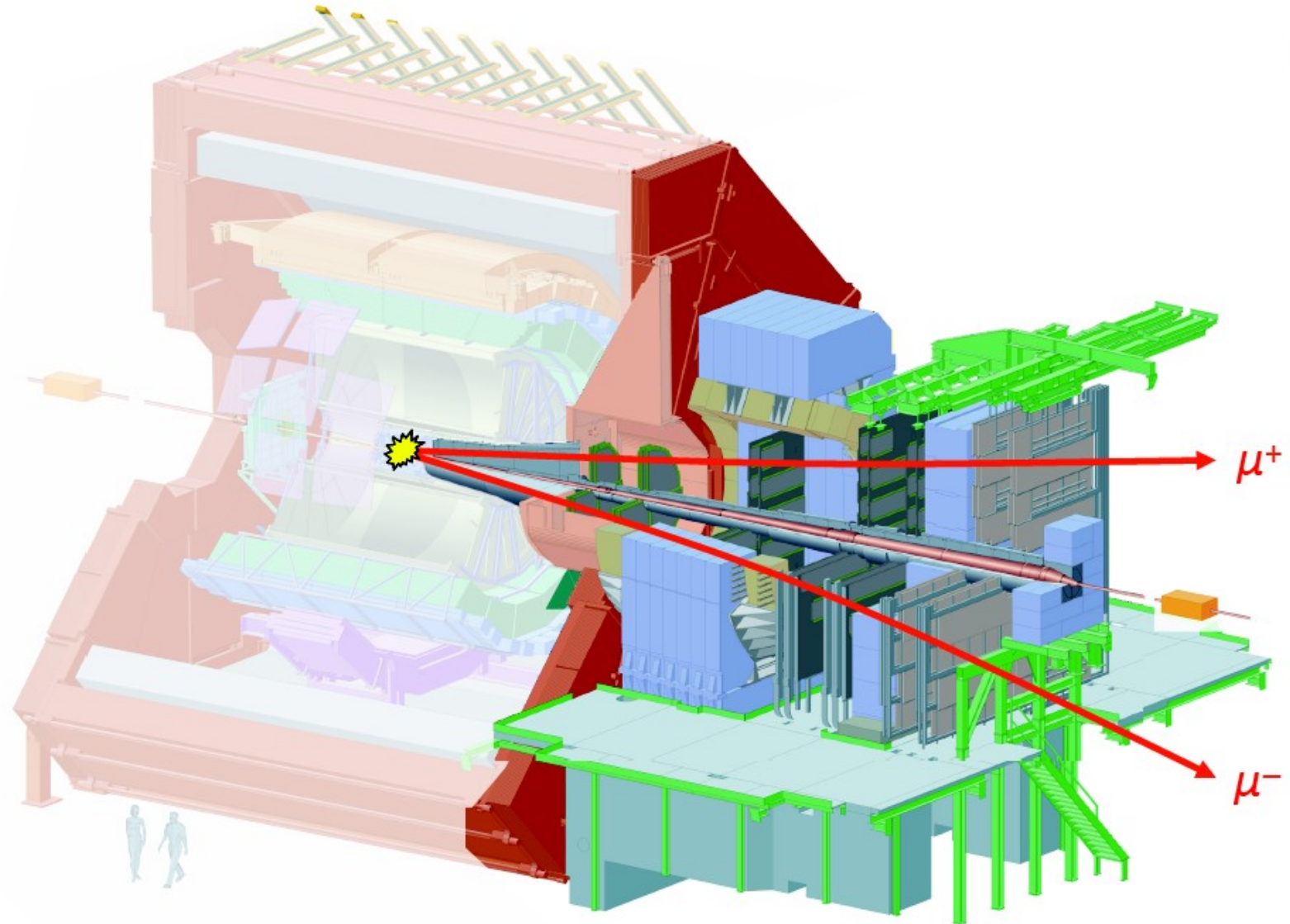




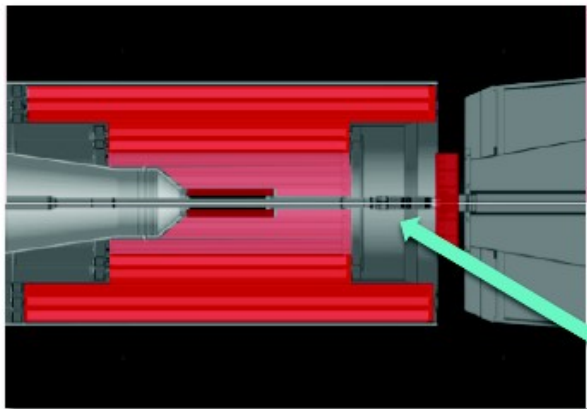
## Muon Spectrometer

- Hadron Absorber
- Dipole Magnet
- 10 tracking chambers
- Iron wall
- 4 trigger chambers

$$-2.5 < \eta < 4.0$$

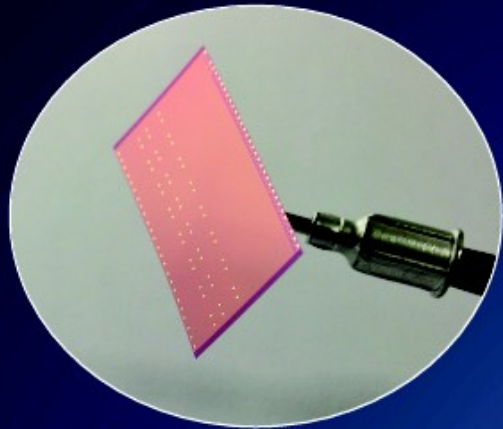


.... add a silicon pixel telescope



# MFT development ... a strong “synergy” with the ITS

5% of the ITS surface, twice the ITS inner barrel



same pixel chip

... and much more

$B^+$

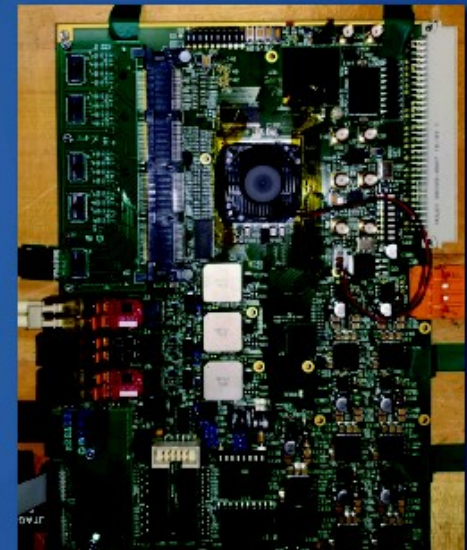
$J/\psi$

$K^+$

$\mu^-$

$\mu^+$

same readout





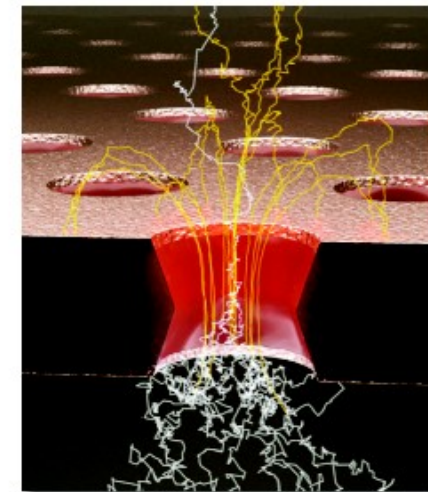
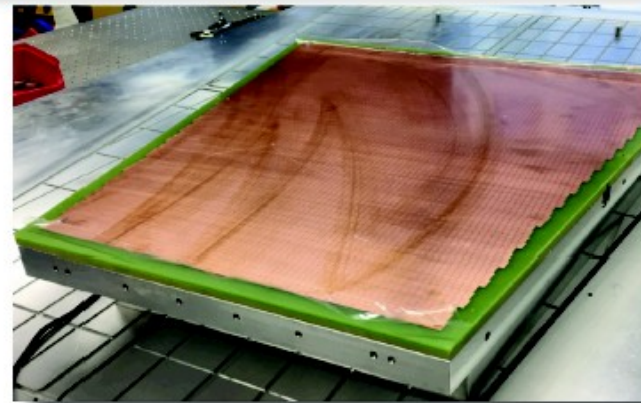
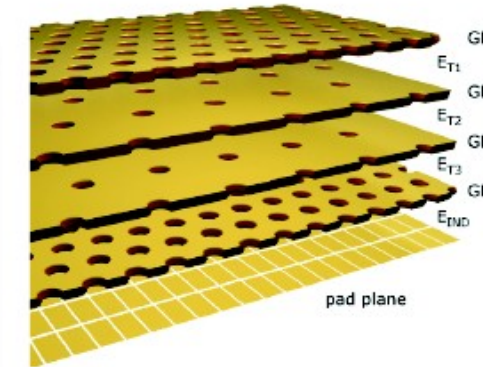
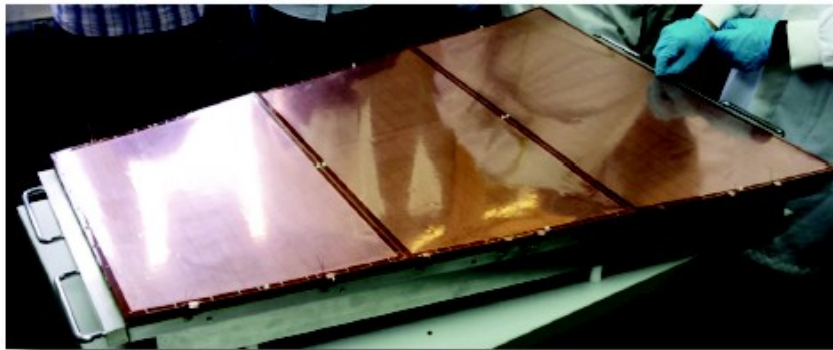
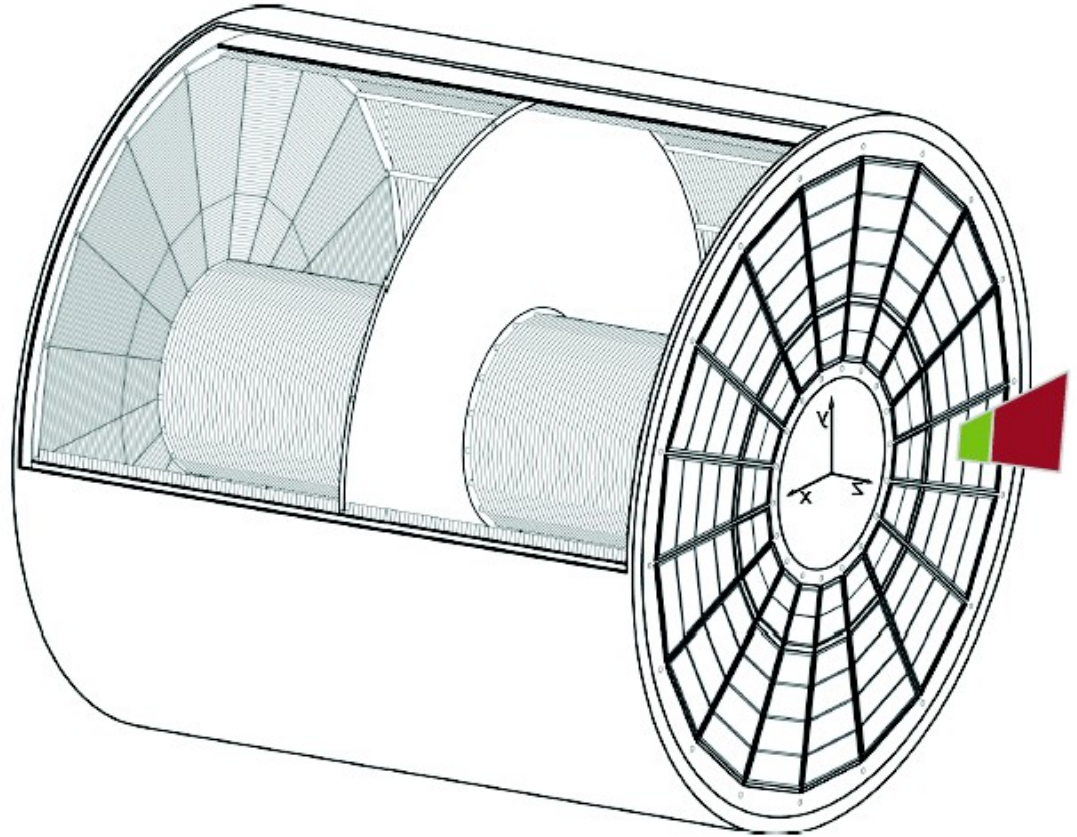
## Gate-less TPC for continuous readout

Operate TPC at 50 kHz  $\Rightarrow$  no gating grid

Need to minimize IBF  $\Rightarrow$  Replace MWPC with 4-GEMs

100 m<sup>2</sup> single-mask foils GEM production

### Read Out Chamber

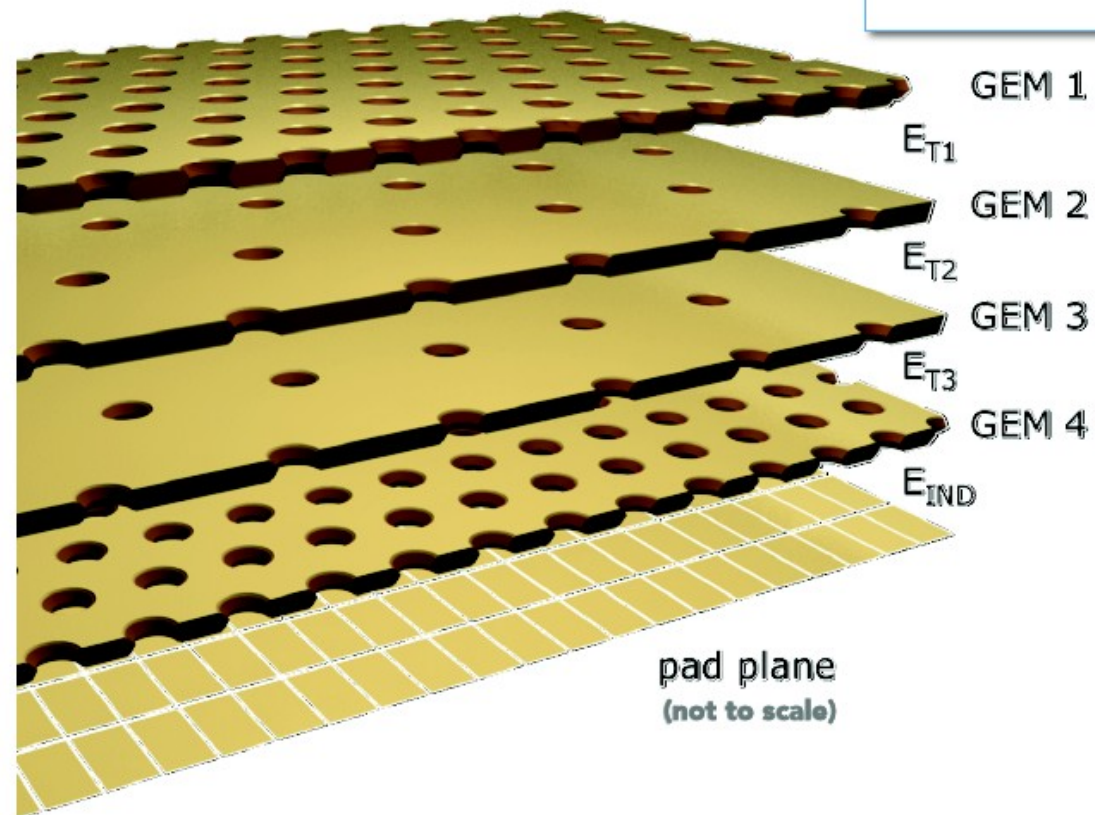
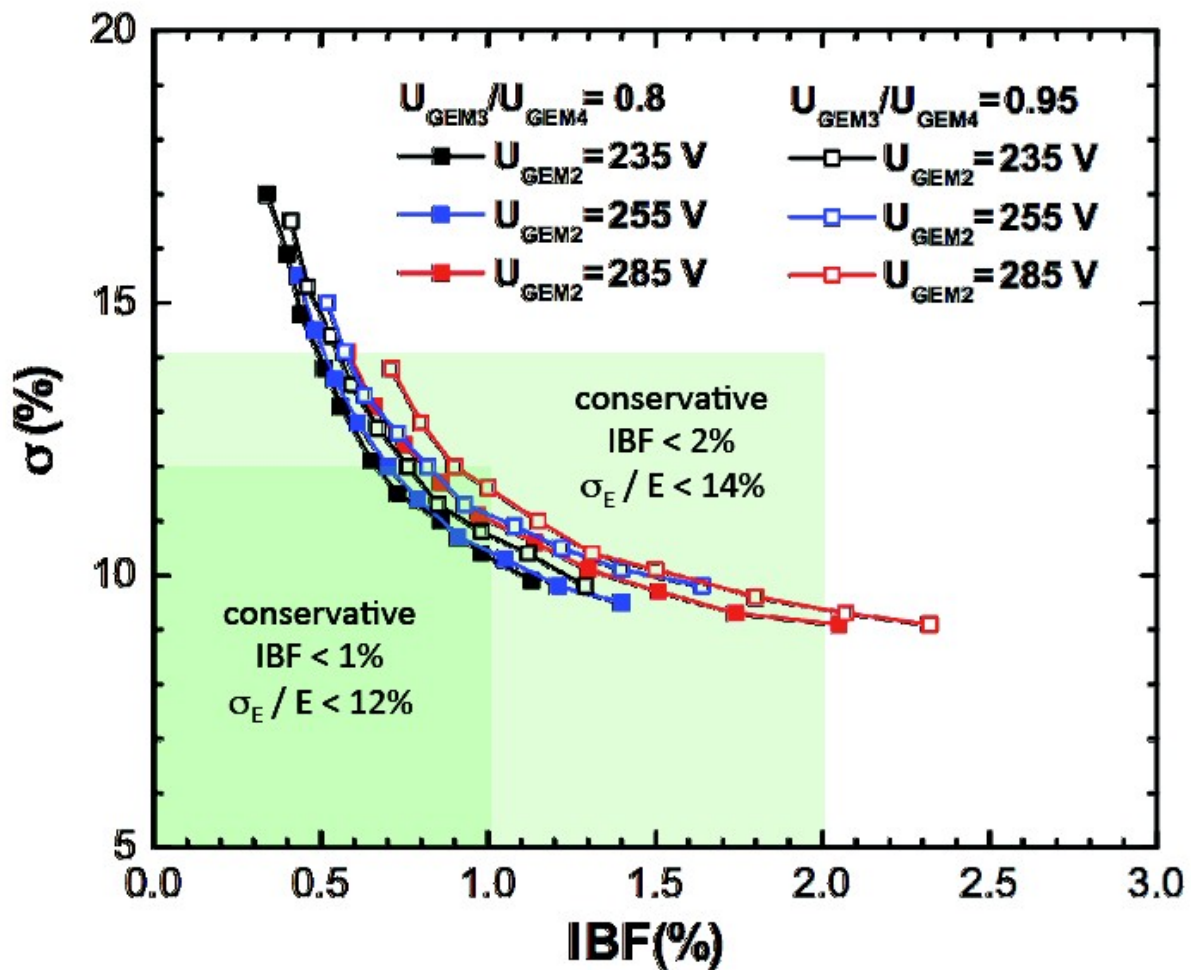
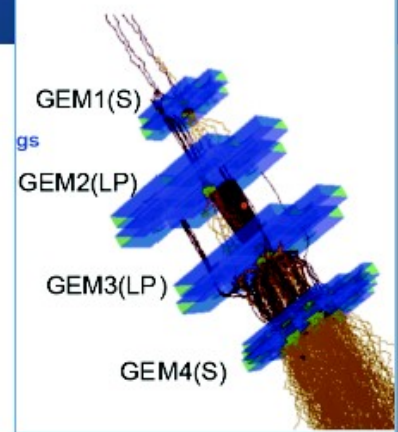


$\Rightarrow$  GEM provides ion backflow suppression to  $< 1\%$

$\Rightarrow$  524 000 pads readout continuously (10bit x 5MSPS) via 6552 links  $\Rightarrow$  3.4 TByte/sec

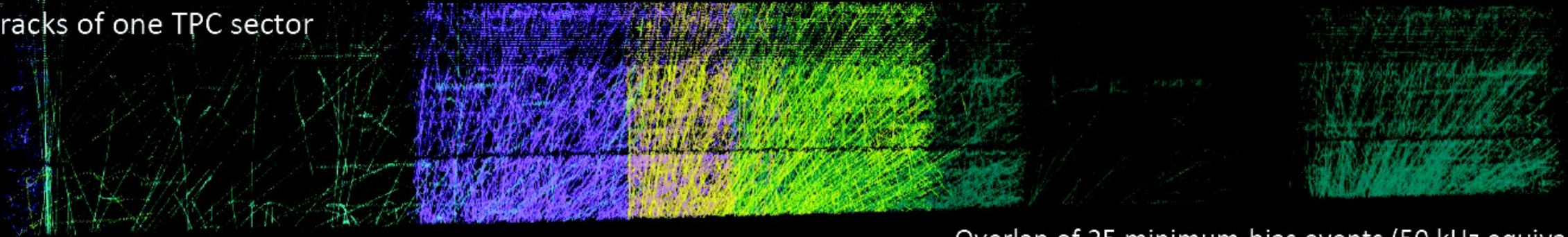
# Quadruple GEM Stack (S-LP-LP-S configuration)

To get IBF < 1% (on a real device) is very tricky !





Tracks of one TPC sector



Overlap of 25 minimum-bias events (50 kHz equivalent rate)

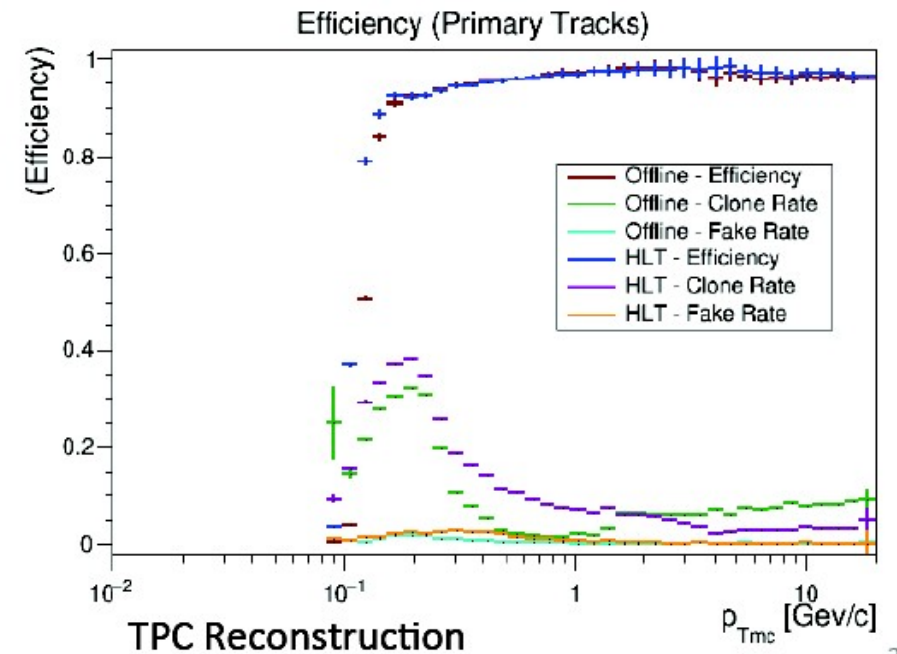
R&D and software framework mostly driven by online/offline calibration, reconstruction and compression of TPC data

## Continuous stream of triggerless data

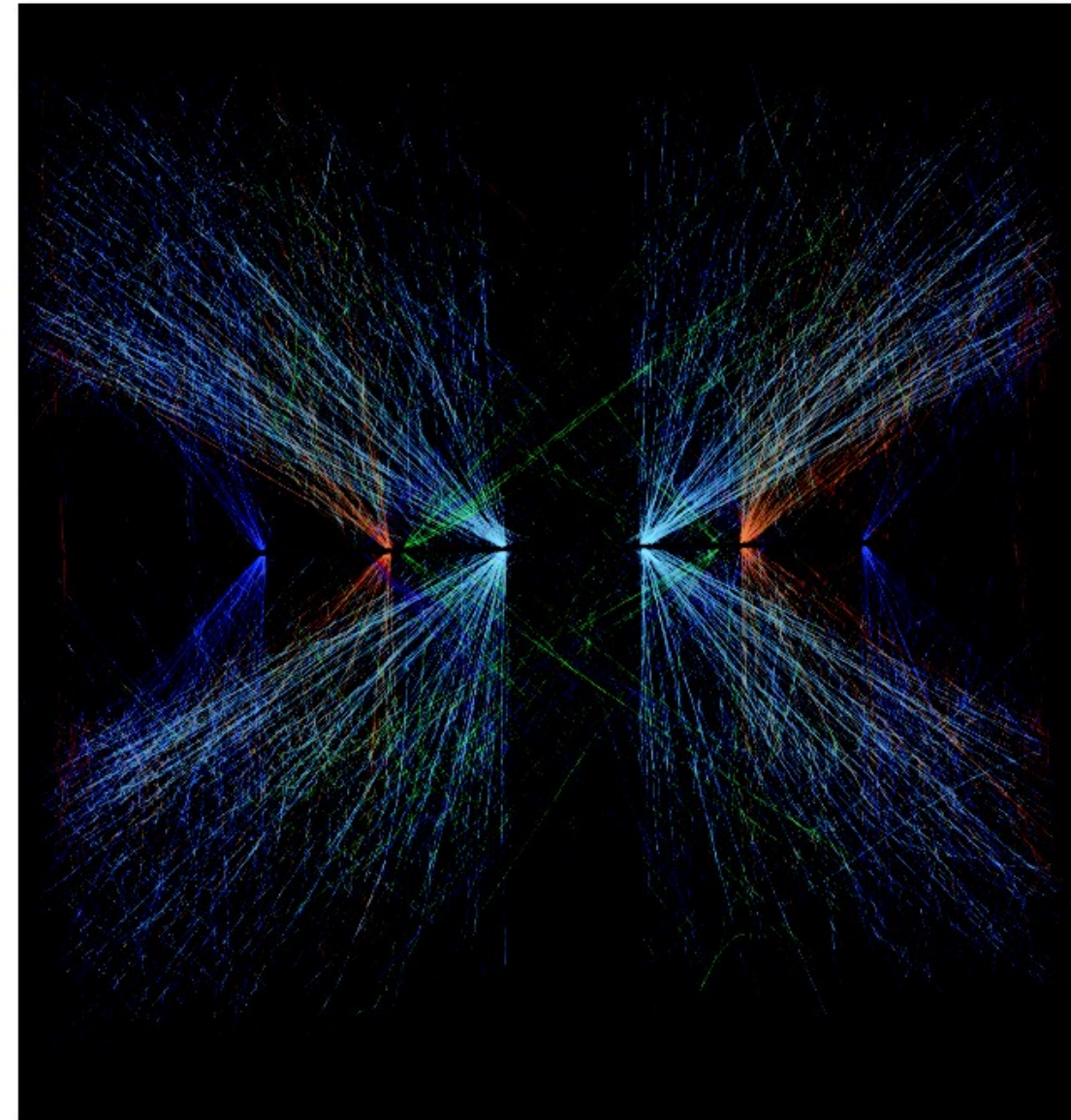
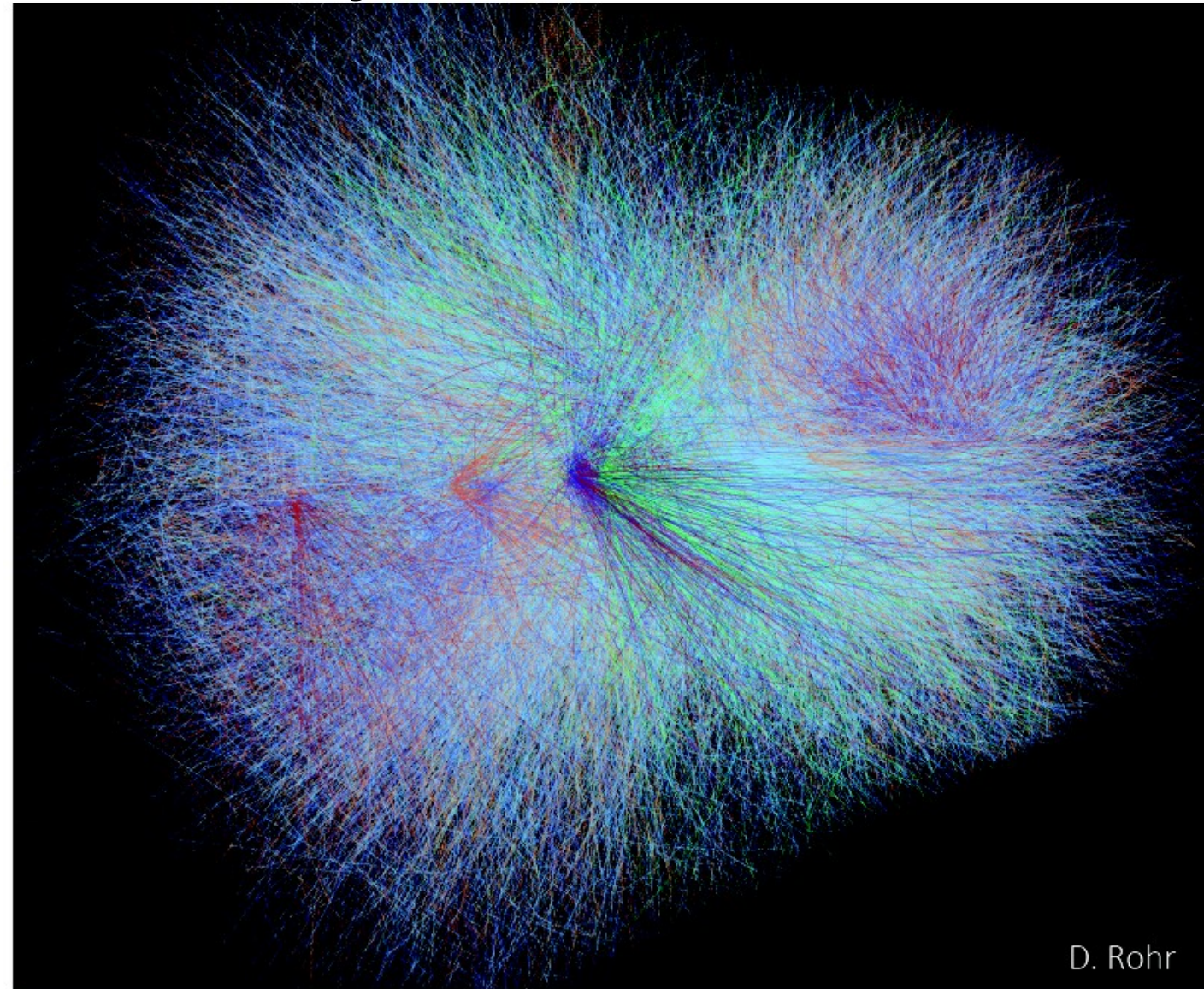
- High pile-up and occupancy
- Absence of T0 to convert TPC drift time into z coordinate
- Correction of large drift field distortions due to space-charge

⇒ Very complex calibration and reconstruction tasks

⇒ Very demanding in terms of computing resources



# ALICE fejlesztések: 30kHz PbPb felbontás

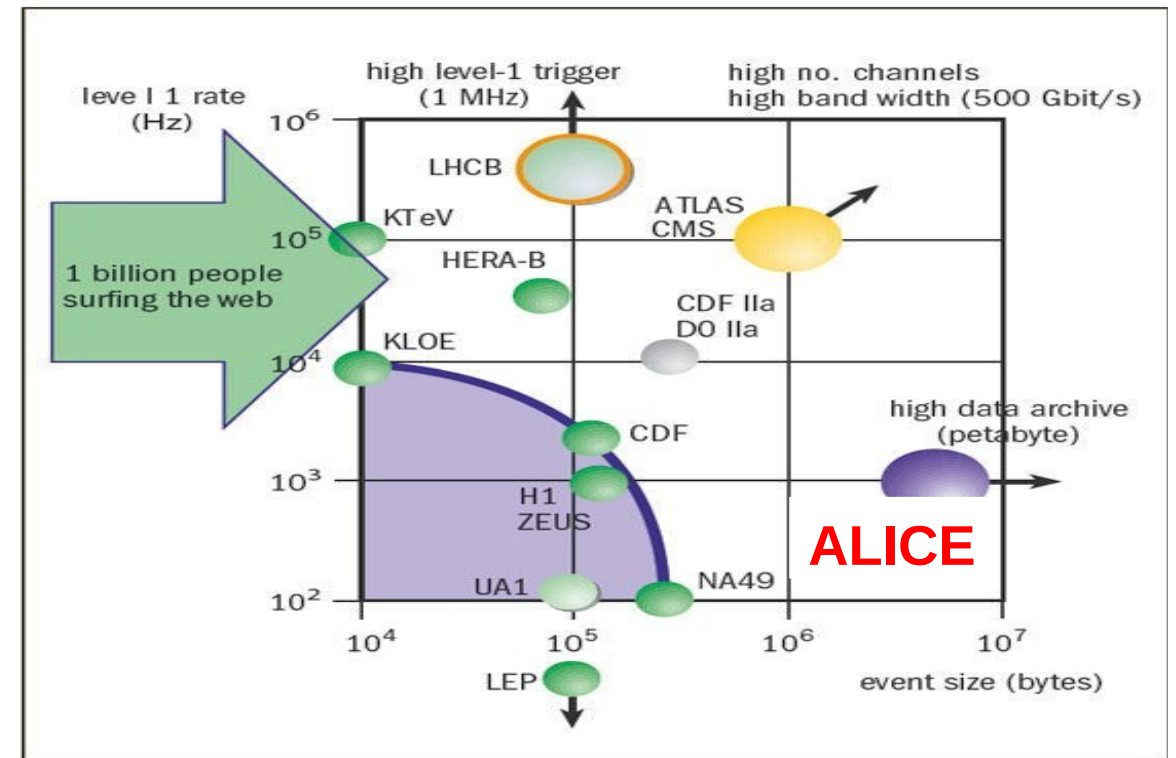
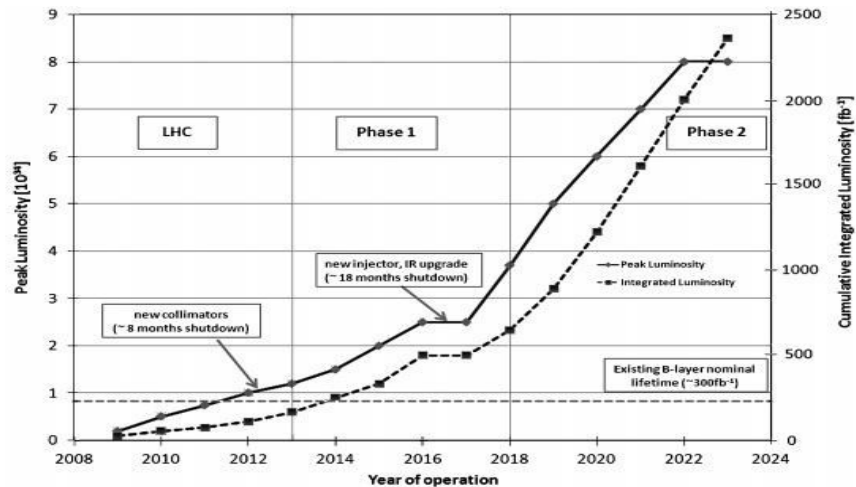


# Megnövekedett luminozítás DAQ fejlesztés

- ALICE adatgyűjtő rendszere K+F:

Nehézion események

- sok adat, nagy eseményméret
- komplex, diverz aldetektorok
- Nagyobb luminozítás → több adat



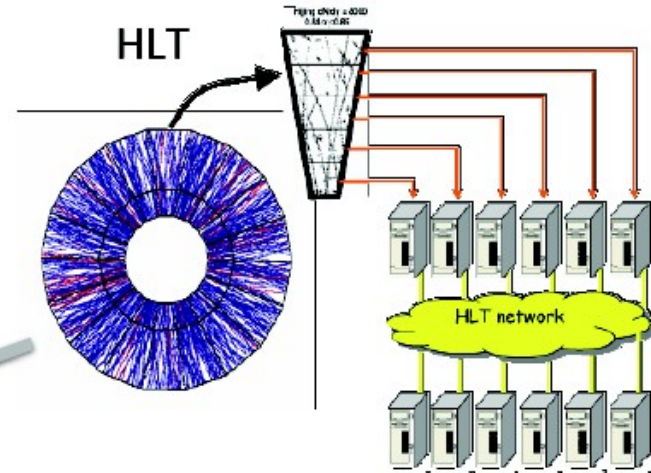
# DAQ, HLT and Offline merge into a single project



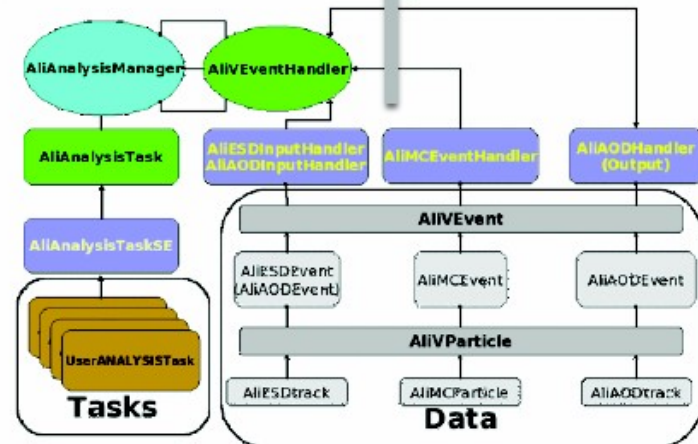
ALICE



Online



Offline



ALIROOT



ALFA



# Online-offline ( $O^2$ ) – A new concept for new requirements

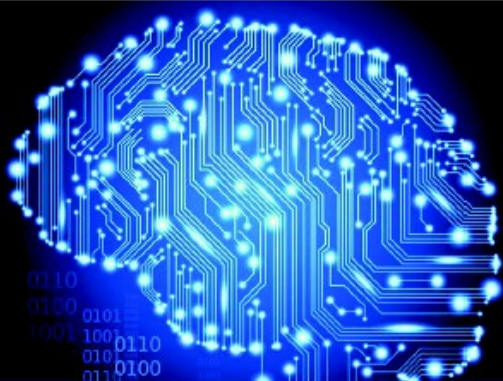


ALICE



## New computing system

- Read-out the data of all interactions
- Compress data intelligently after online reconstruction
- One common online-offline system:  $O^2$
- Online farm integrated in the Grid



x 100 data readout and processing

Raw data to online farm in continuous mode

HI run 3.4 TByte/s

Data reduction by zero (cluster) suppression.  
No event discarded

500 GByte/s

Data reduction after online tracking  
Only reconstructed data to storage

100 GByte/s

Data Storage - 1 year of compressed data

Tier0, Tier 1 and  
Analysis Facilities

Asynchronous event  
reconstruction with  
final calibration

Detector FEE  
8500 GBT links

270 First-Level  
Processors (FLPs)

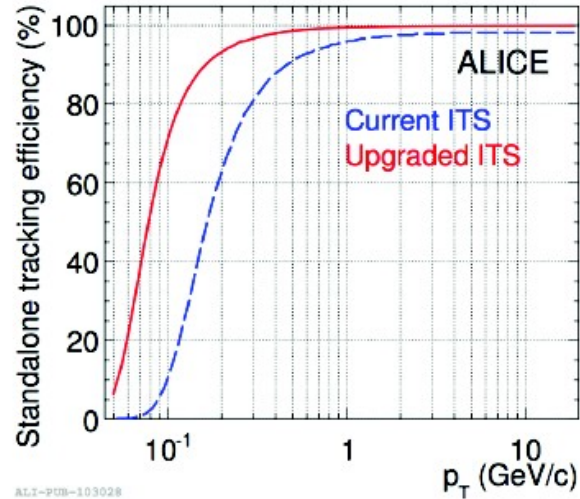
Switching Network

1500 Event Proc.  
Nodes (EPNs)

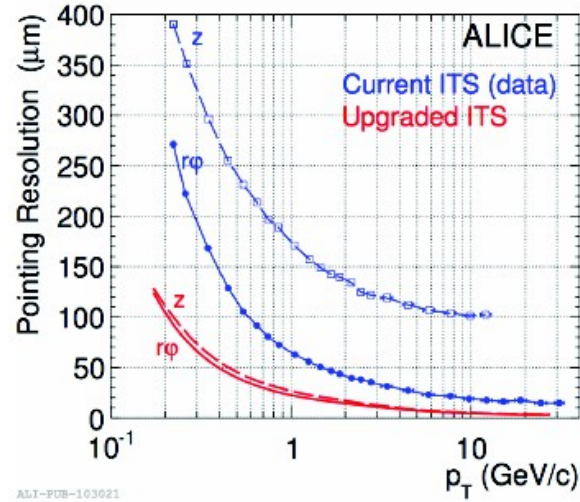
Switching Network

Write 120 GB/s  
Read 45-75 GB/s  
Capacity: tbd

# A detektor-hatásfok javulása



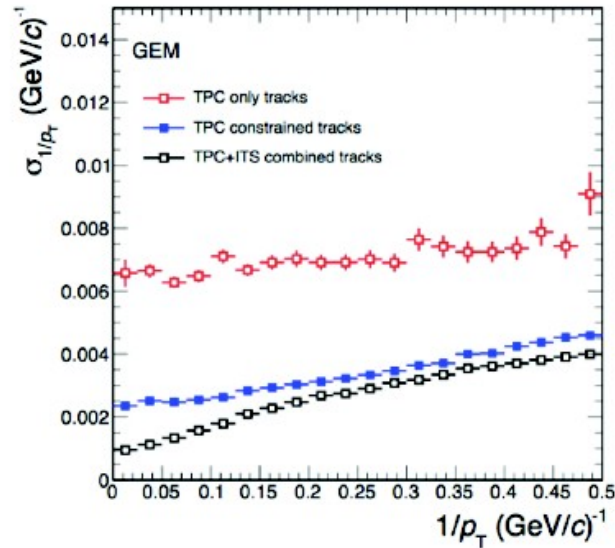
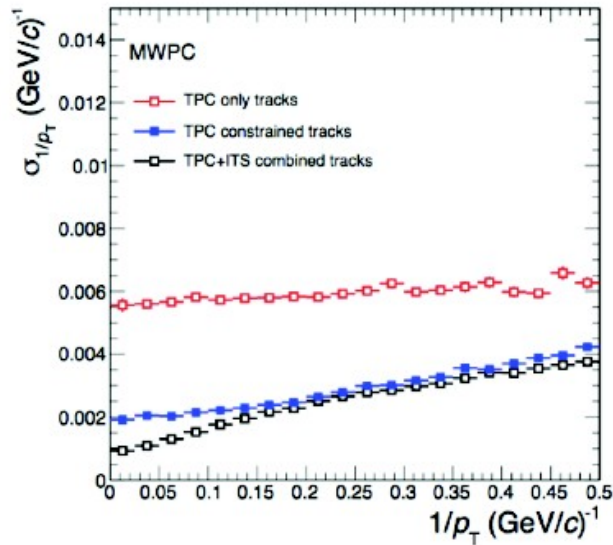
ALICE-PHB-103028



ALICE-PHB-103021

- **New ITS**

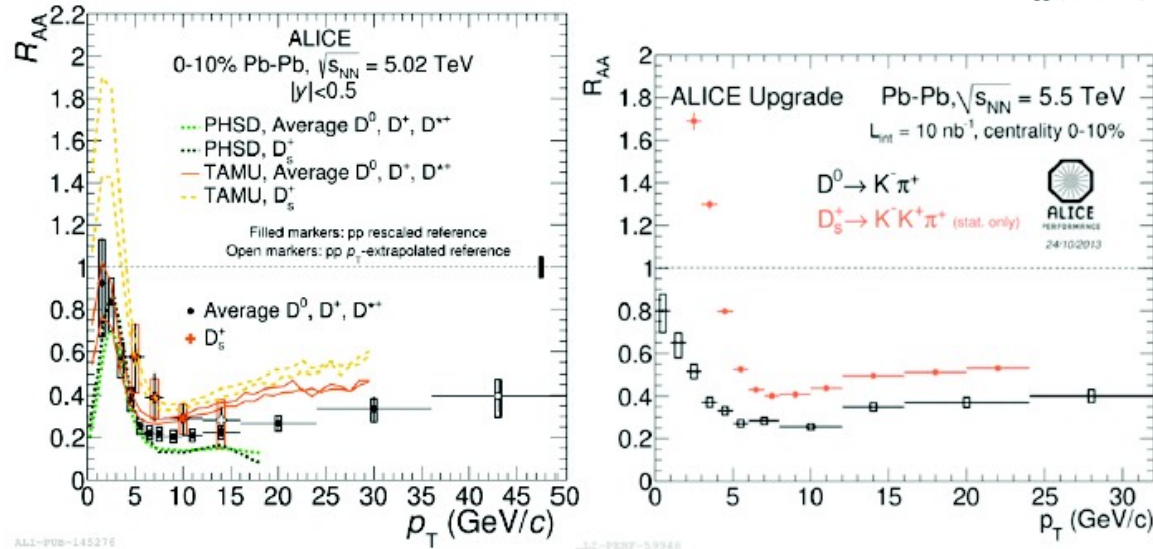
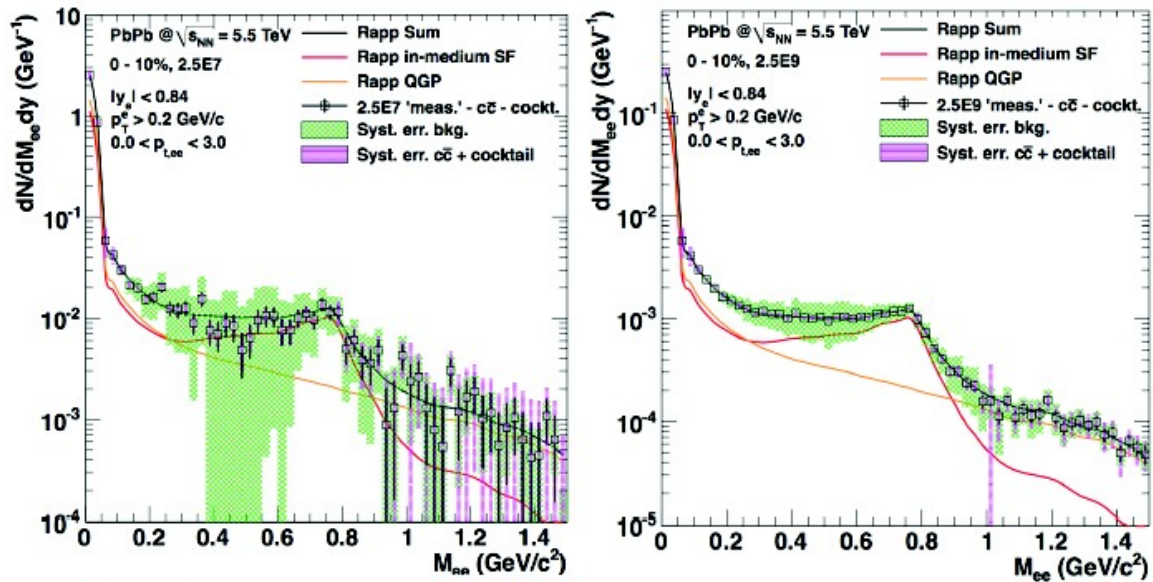
- Improved tracking efficiency
- Improved tracking resolution
- Pointing resolution  $\times 3$  better in transverse plane ( $\times 6$  along beam)



- **New TPC Readout Chambers (GEM):**

- Preserve momentum resolution for TPC + ITS tracks
- Preserve particle identification via  $dE/dx$  ([arXiv:1805.03234](https://arxiv.org/abs/1805.03234), submitted to NIM A)

# A fizikai mérések pontosságának javulása



- **Low Mass di-electrons**

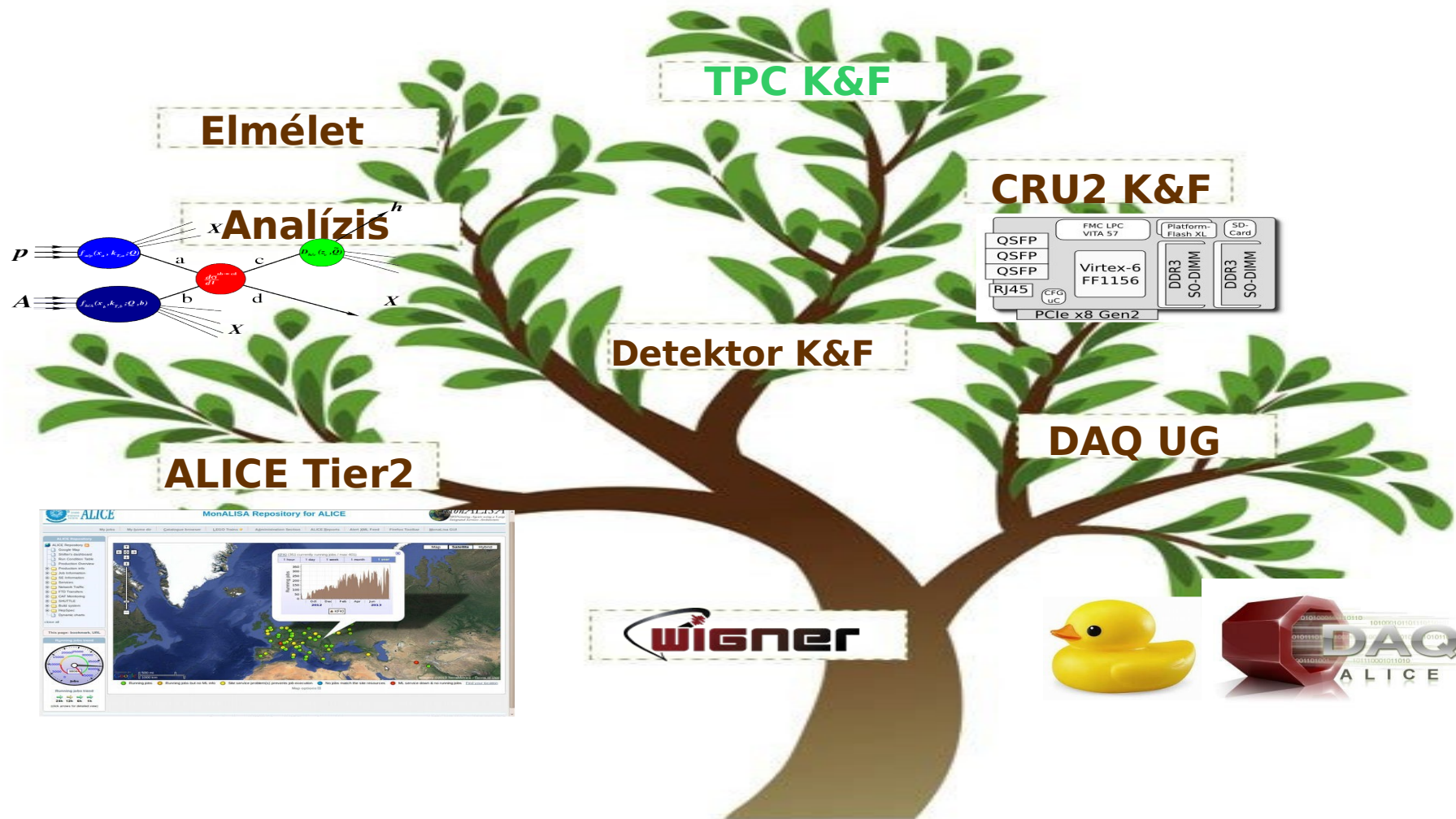
- Initial temperature from EM radiation
- Cocktail-subtracted distributions  $|\eta| < 0.9$
- Improved uncertainty figures in Run 3 and 4

- **$D^0, D^+, D_s$  production**

- Measure  $R_{AA}$  with percent-level precision down to low  $p_T$
- Precise comparison between strange and non-strange D mesons

# Részvétel az ALICE detektor fejlesztésében (2016-2020)

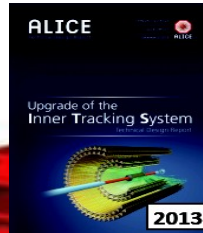
# A Magyar részvétel az ALICE kísérletben



# Magyar hozzájárulás az LS2 ALICE fejlesztésekhez

## New Inner Tracking System (ITS)

- improved pointing precision
- less material -> thinnest tracker at the LHC



## TPC

- Micropattern gas detector technology
- continuous readout



New Central Trigger Processor (CTP)

## Data Acquisition (DAQ)/ High Level Trigger (HLT)

- new architecture
- on line tracking & data compression
- 50kHz PbPb event rate

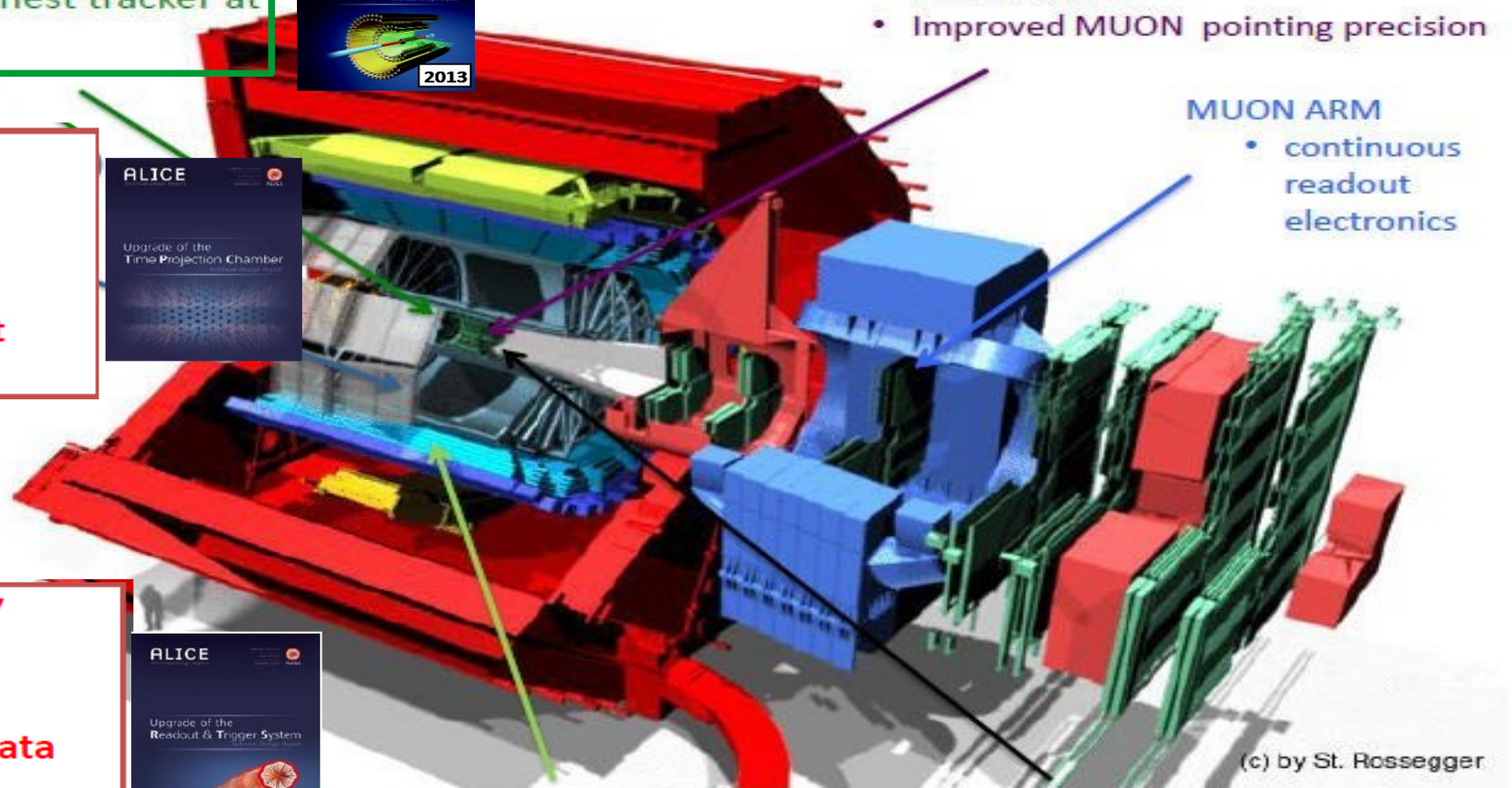


## Muon Forward Tracker (MFT)

- new Si tracker
- Improved MUON pointing precision

## MUON ARM

- continuous readout electronics



## TOF, TRD

- Faster readout

## New Trigger Detectors (FIT)

(c) by St. Rossegger

# A világ legnagyobb GEM-alapú időprojekciós kamrájának (TPC) kutatásfejlesztése és építése

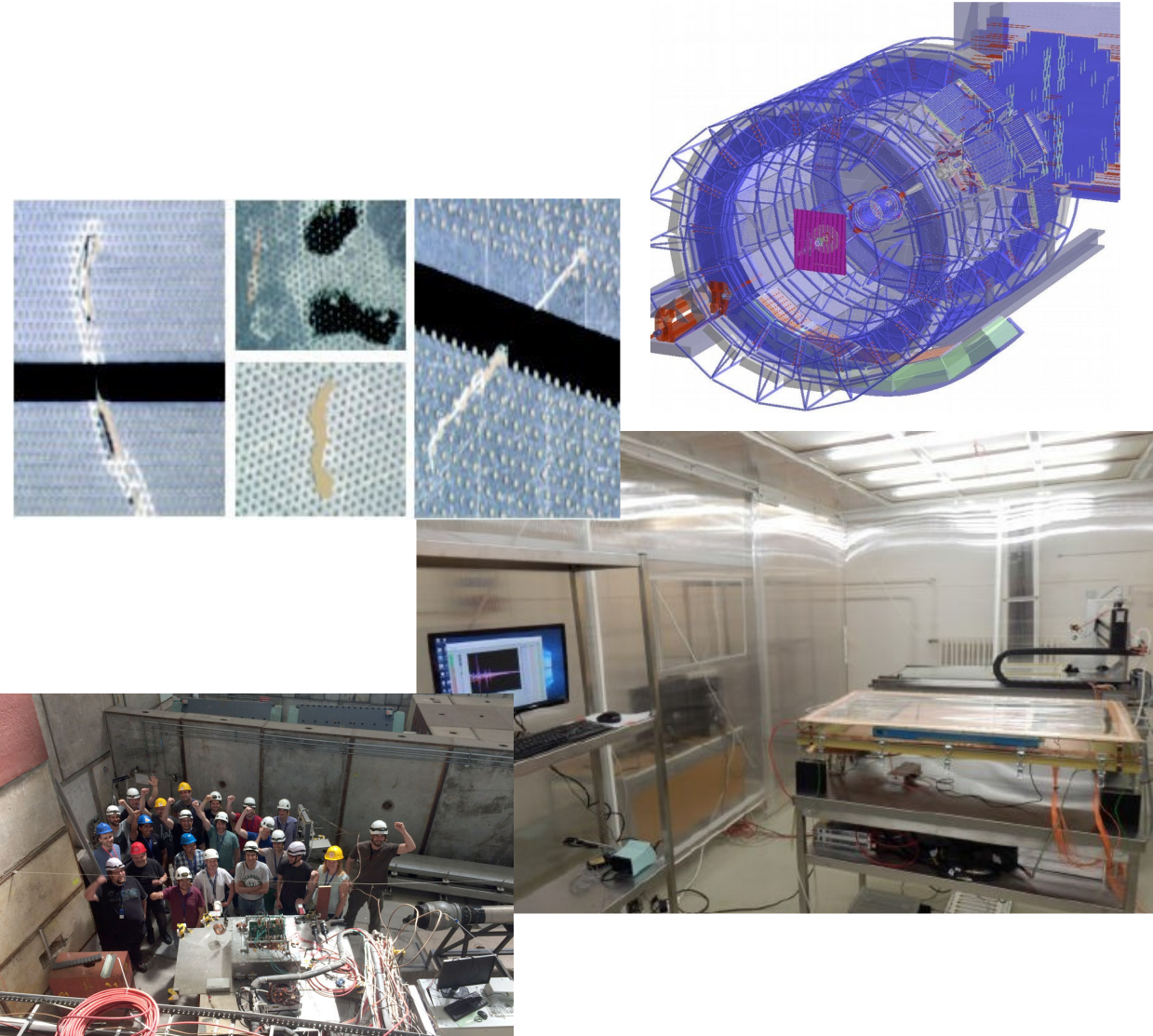
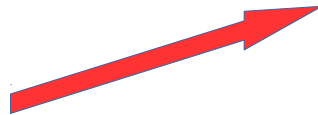
ReGaRD & Innovatív Gázdetektorok “Lendület” Kutatócsoport

Varga D (PI) Boldizsár L, Hamar G, Oláh L, Gera Á, Kapás K, Vargyas M.



# Magyar részvétel az ALICE kísérletben: Időprojekciós kamra K+F (TPC)

- GEM: Gázelektron Sokszorozó  
Varga Dezső: ReGaRD & Lendület  
Innovatív Gázdetektorok Kutatócsoport
- Magyar ALICE Csoport:
  - Fóliák minőség-ellenőrzése
  - Tárolás, tisztítása, dobozolása
  - GEM optikai szkennelés
  - Erősítés vizsgálata (R&D)
- **2018 Szeptember...**  
**CERN nyalábtesztek**  
**Összeszerelés a CERNben**

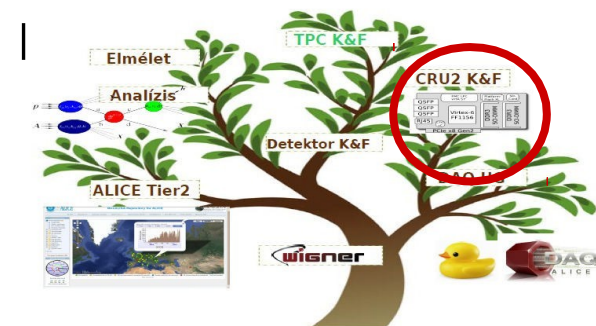




# Új adatgyűjtő és -feldolgozó (DAQ) rendszer fejlesztése ALICE O<sup>2</sup> CRU2 projekt

Wigner DAQ Csoport & Wigner GPU Laboratory

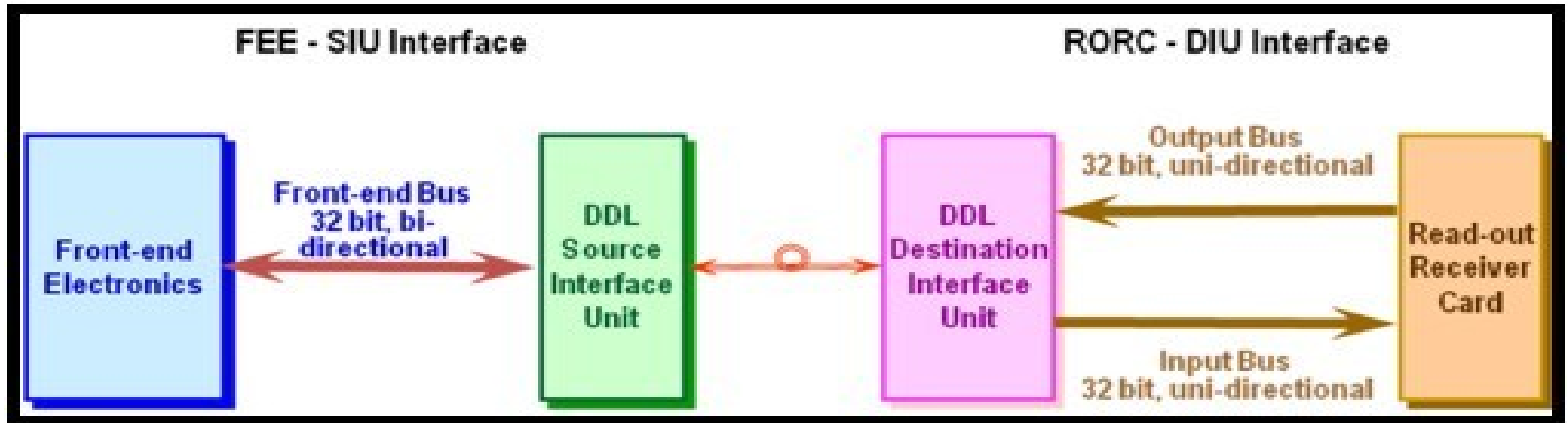
Imrek J, Dávid E, Kiss T, Biró G, Nguyen TM, Tölyhi T,



# Magyar részvétel az ALICE kísérletben: Adatgyűjtő rendszer (DAQ)

## ALICE DAQ/DDL adatgyűjtő/továbbító rendszer

A frontend elektronikák (FEE) és a adatgyűjtő számítógépek közötti kapcsolat a Detektor Data Link (DDL) és a Read-Out Receiver Card (RORC)



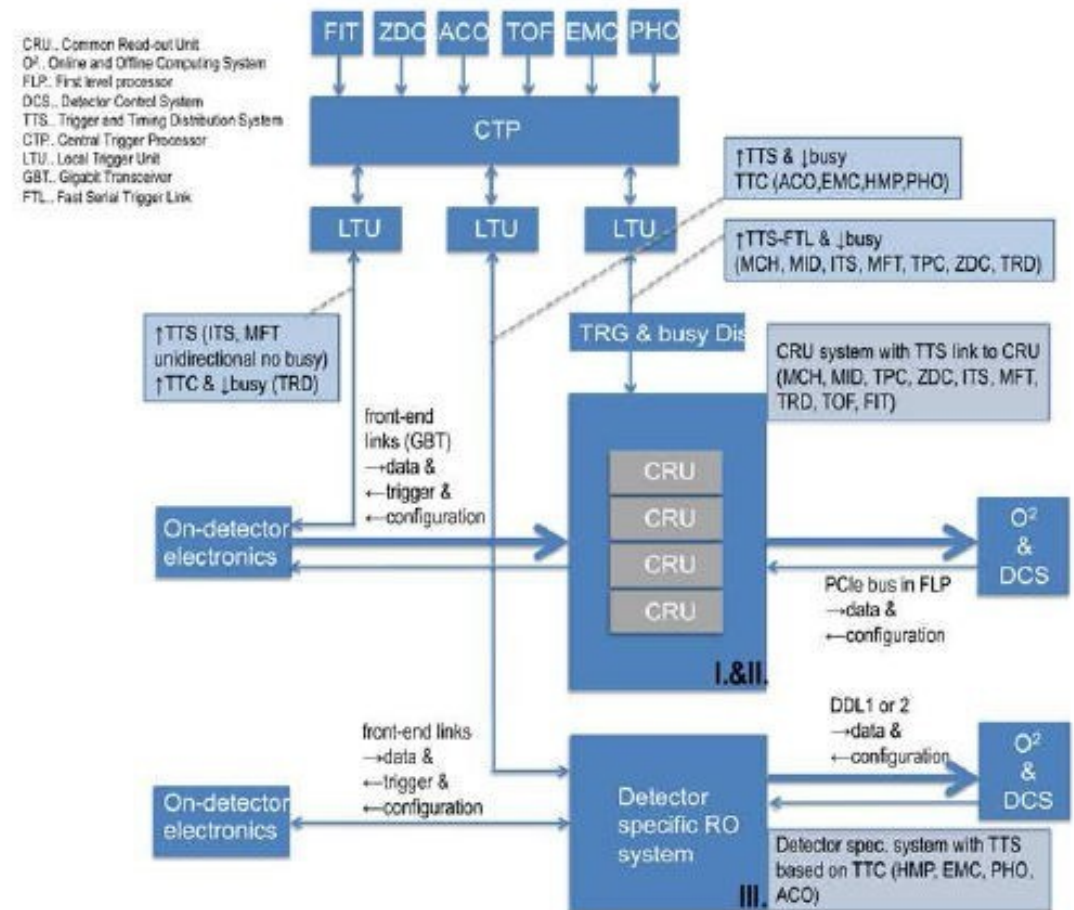
# Magyar részvétel az ALICE kísérletben: Adatgyűjtő rendszer (DAQ)

- ALICE új adatgyűjtő CRU2 K+F:

- CRU – Common Readout Unit
- Nincs „igazi” trigger, nem várnak a detektorelemek egymásra, utólagosan is eldönthető, hogy kell-e az esemény, ill. mire használható → gyorsaság.

Jelenleg: 500 Hz PbPb upgrade után  
– 50 kHz PbPb és 200 kHz pp

Standard GBTx linkek használata  
3,2 Gb/s vagy akár 4,48 Gb/s  
kétirányú sáv szélesség.



# Magyar részvétel az ALICE kísérletben: Adatgyűjtő rendszer (DAQ)

- ALICE új adatgyűjtő CRU2 K+F:

- CRU – Common Readout Unit
- Nincs „igazi” trigger, nem várnak a detektorelemek egymásra, utólagosan is eldönthető, hogy kell-e az esemény, ill. mire használható → gyorsaság.

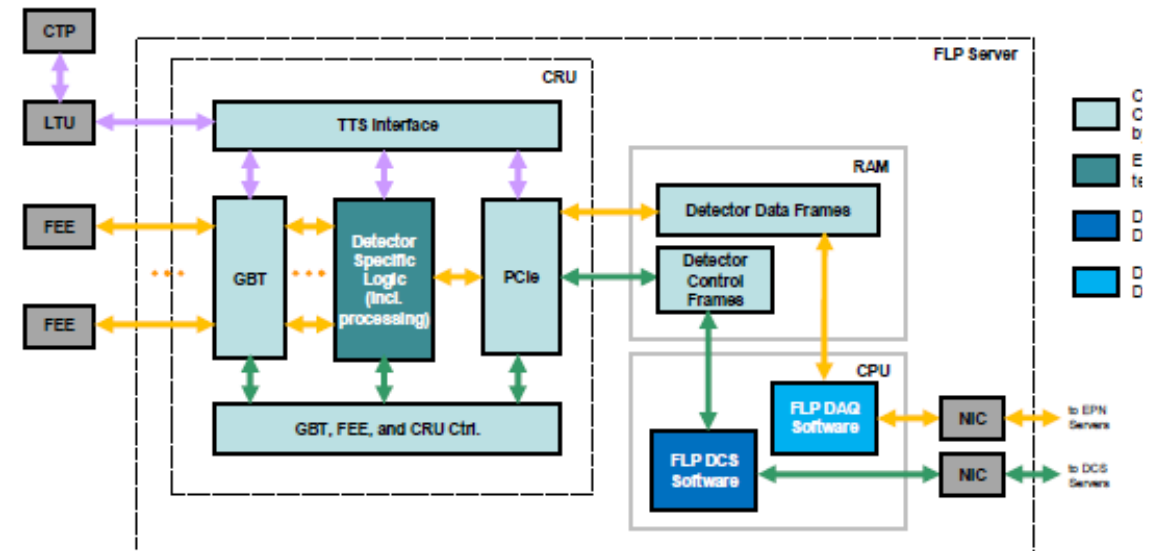
Jelenleg: 500 Hz PbPb upgrade után  
– 50 kHz PbPb és 200 kHz pp

Standard GBTx linkek használata

3,2 Gb/s vagy akár 4,48 Gb/s

- kétirányú sávzélesség.

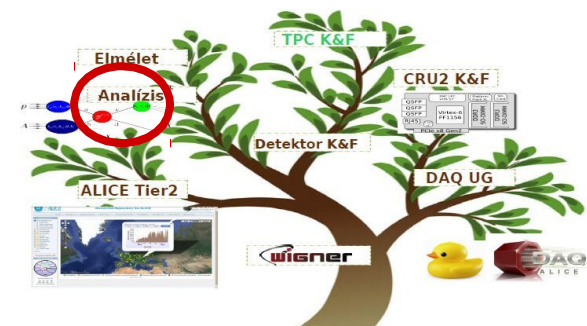
FPGA-alapú technológia, ami még tud gyorsabb is lenni



# ALICE adatok elemzése

Wigner ALICE analízis csoport & Wigner GPU Laboratory

Imrek J, Dávid E, Kiss T, Biró G, Nguyen TM, Tölyhi T,



# ALICE adatok elemzése – azonosított hadronok vizsgálata

- Feladat: Hadronok spektrumának mérése részecske azonosítással (pion, kaon, proton)

- Nehéz feladat, több detektor végzi:

TPC+TOF – Időprojekciós kamra+repülési idő

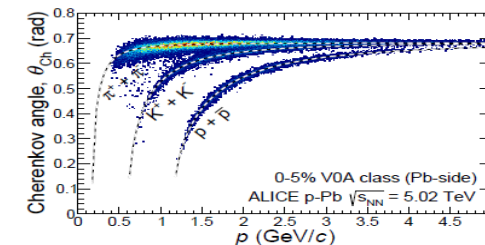
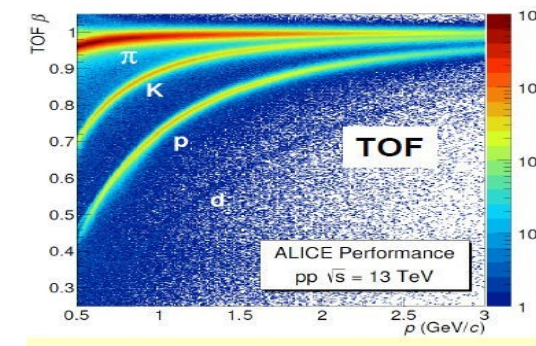
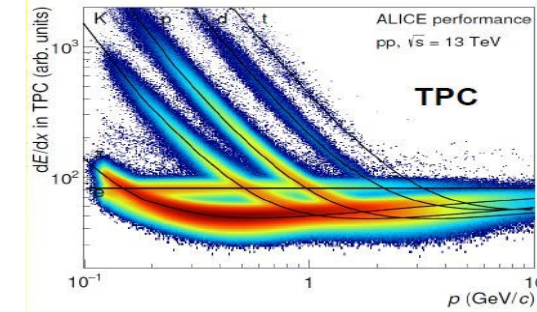
- kicsi  $p_T < 1$  GeV/c és  $p_T > 5$  GeV/c nagy impulzusú tartományban

HMPID – RICH, Cserenkov detektor

- $1 \text{ GeV/c} < p_T < 5 \text{ GeV/c}$  közepes impulzusú tartományban

ITS – másodlagos vertex módszer

- Azonosított hadronspektrumok  
→ tömeg és ízfüggés, triggerelt korrelációk



# ALICE adatok elemzése – azonosított hadronok vizsgálata

- Eredmények:

TPC+TOF – Bencédi Gy.

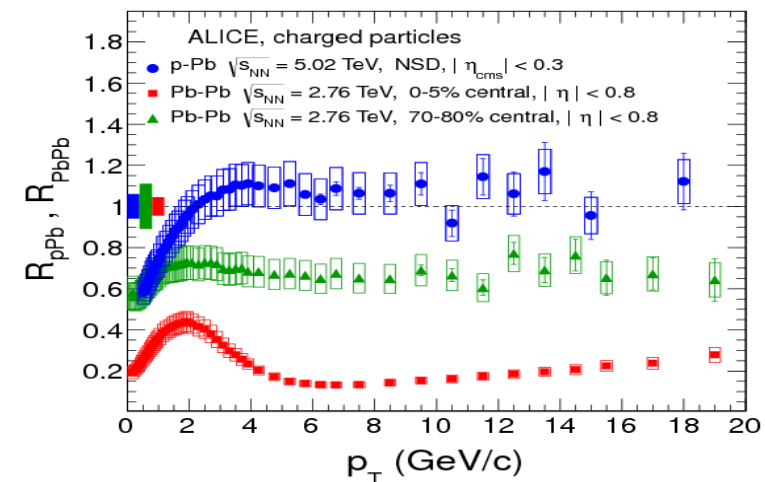
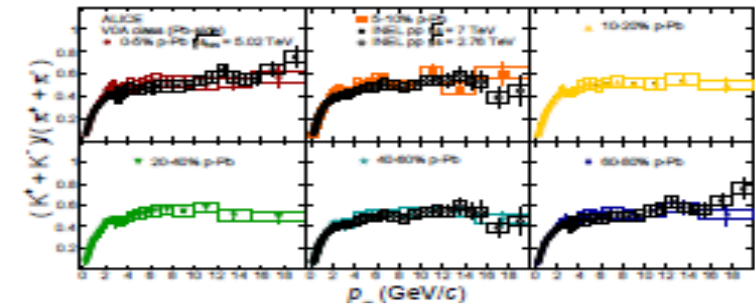
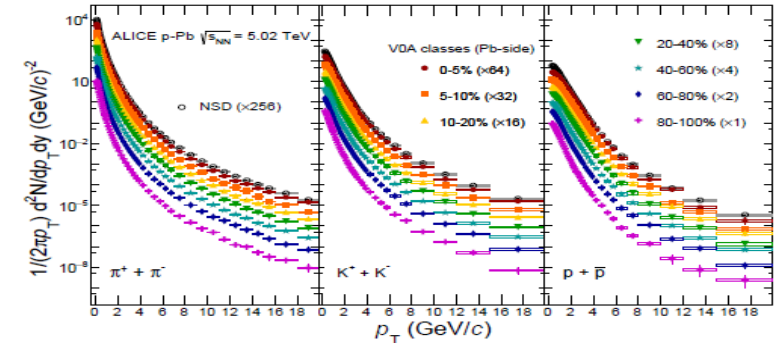
- Pion, kaon, proton spektrumok, hadronarányok, nukleáris módosulás faktor: pp 7 TeV (pp 13 TeV), PbPb 5 TeV, pPb 2.7 TeV

HMPID & ALICE IF – Visnyei O

- Pion, kaon proton spektrumok, hadronarányok, kvark/gluon jetek szeparációja
- HMPID Cserenkov radiátor öregedés-vizsgálata

- ITS – Vértesi R, Kőfaragó M, Szigeti B

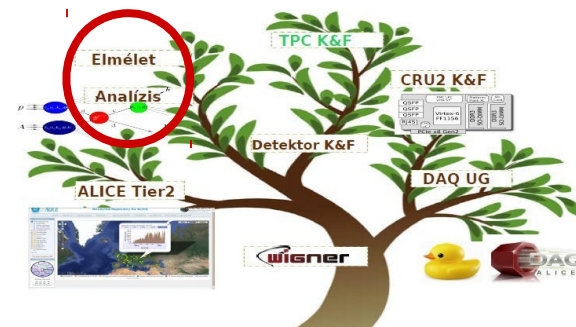
- B-jetek vizsgálata, tagged bomlások
- Részecskekorrelációk vizsgálata



# Jövő: nehézionfizikai modellek és detektorszimulációk fejlesztése

Wigner GPU Laboratórium, Wigner Datacenter, ELTE, CCNU, LBNL

BGG, Bíró G, Biró TS, Futó E, SzM Harangozó, Gyulassy M, GY Ma, Levai P,  
Nagy D, Németh M, Papp G, XN Wang BW Zhang

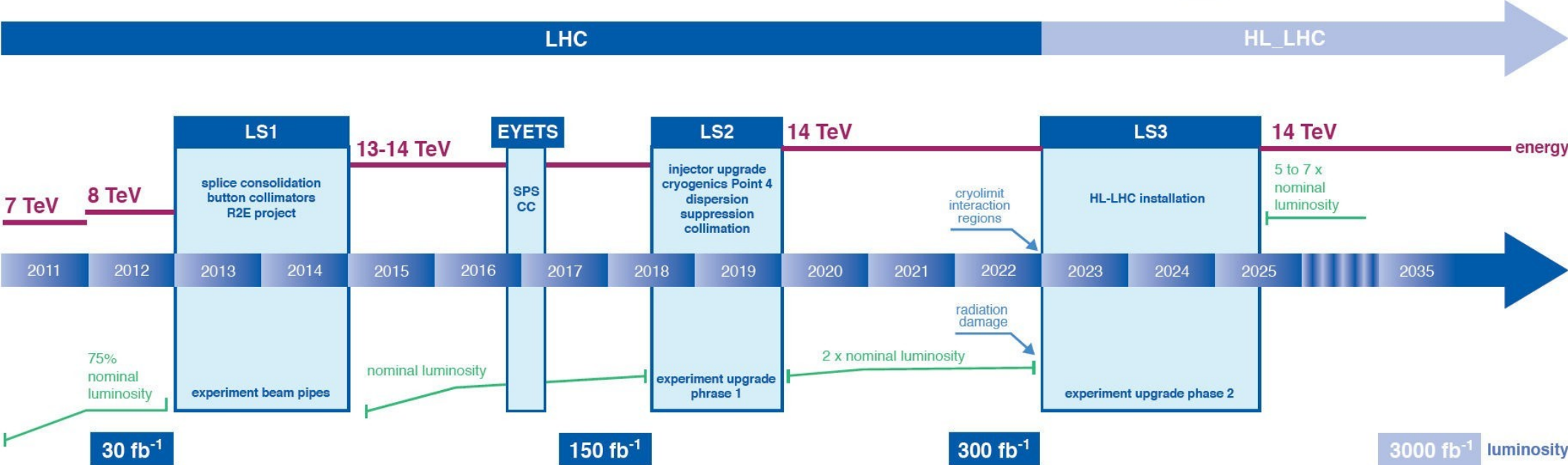




# Elméleti szimulációk fejlesztése a távolabbi jövőbe...

- Még több adat, jobb statisztika....

## LHC / HL-LHC Plan

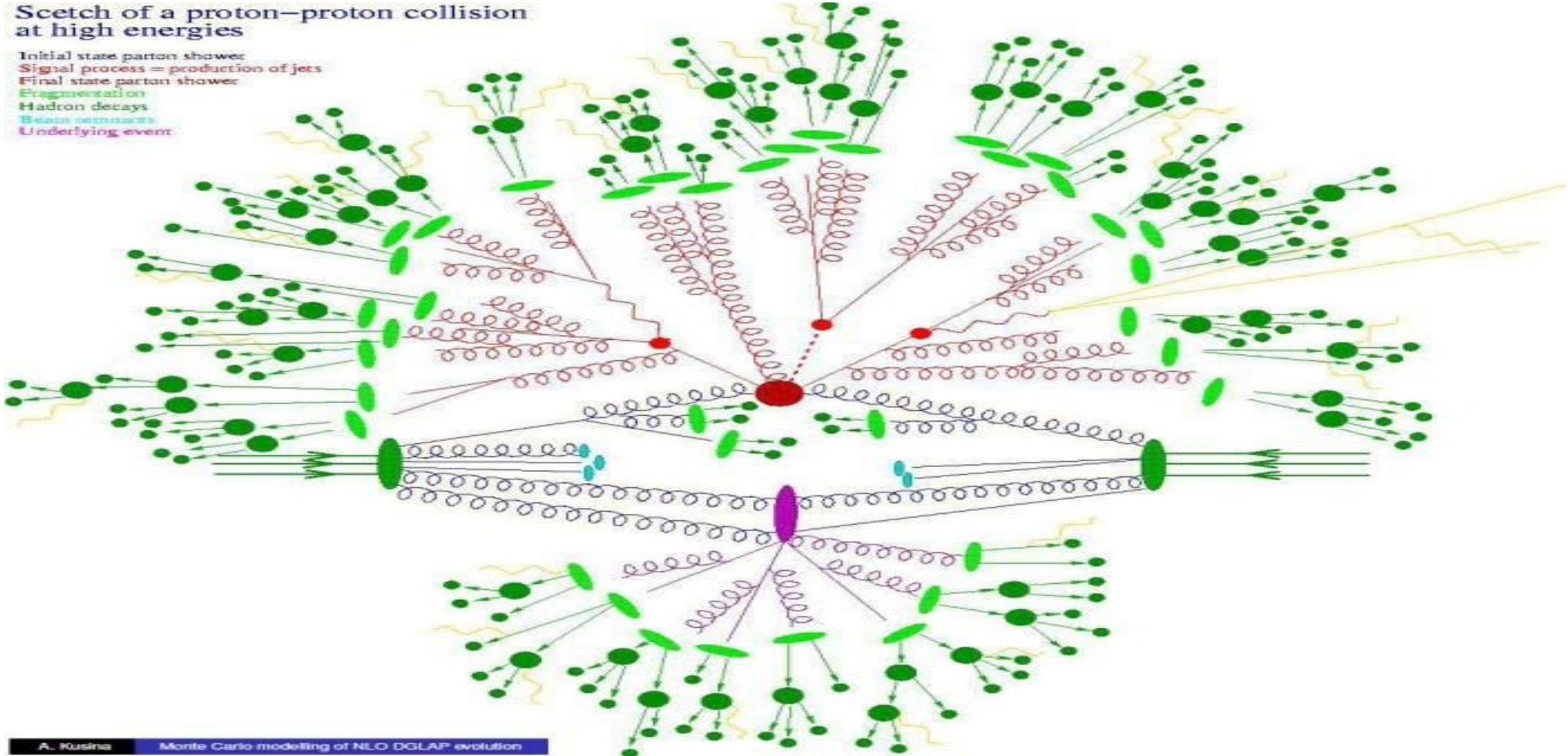


# Elméleti szimulációk fejlesztése a távolabbi jövőbe...

- Pontosabb mérések → pontosabb elmélet → nagy számítások

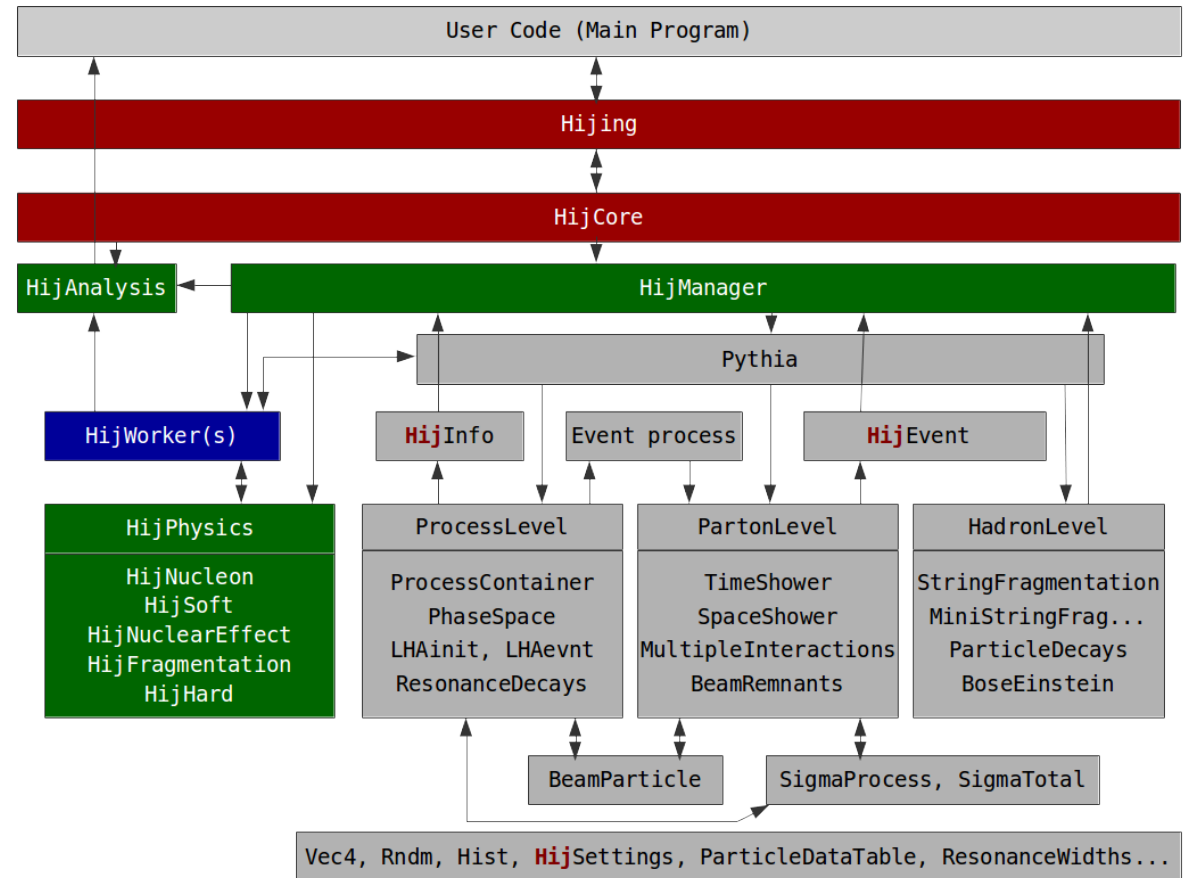
Sketch of a proton-proton collision at high energies

Initial state parton shower  
Signal process = production of jets  
Final state parton shower  
Fragmentation  
Hadron decays  
Beam remnants  
Underlying event



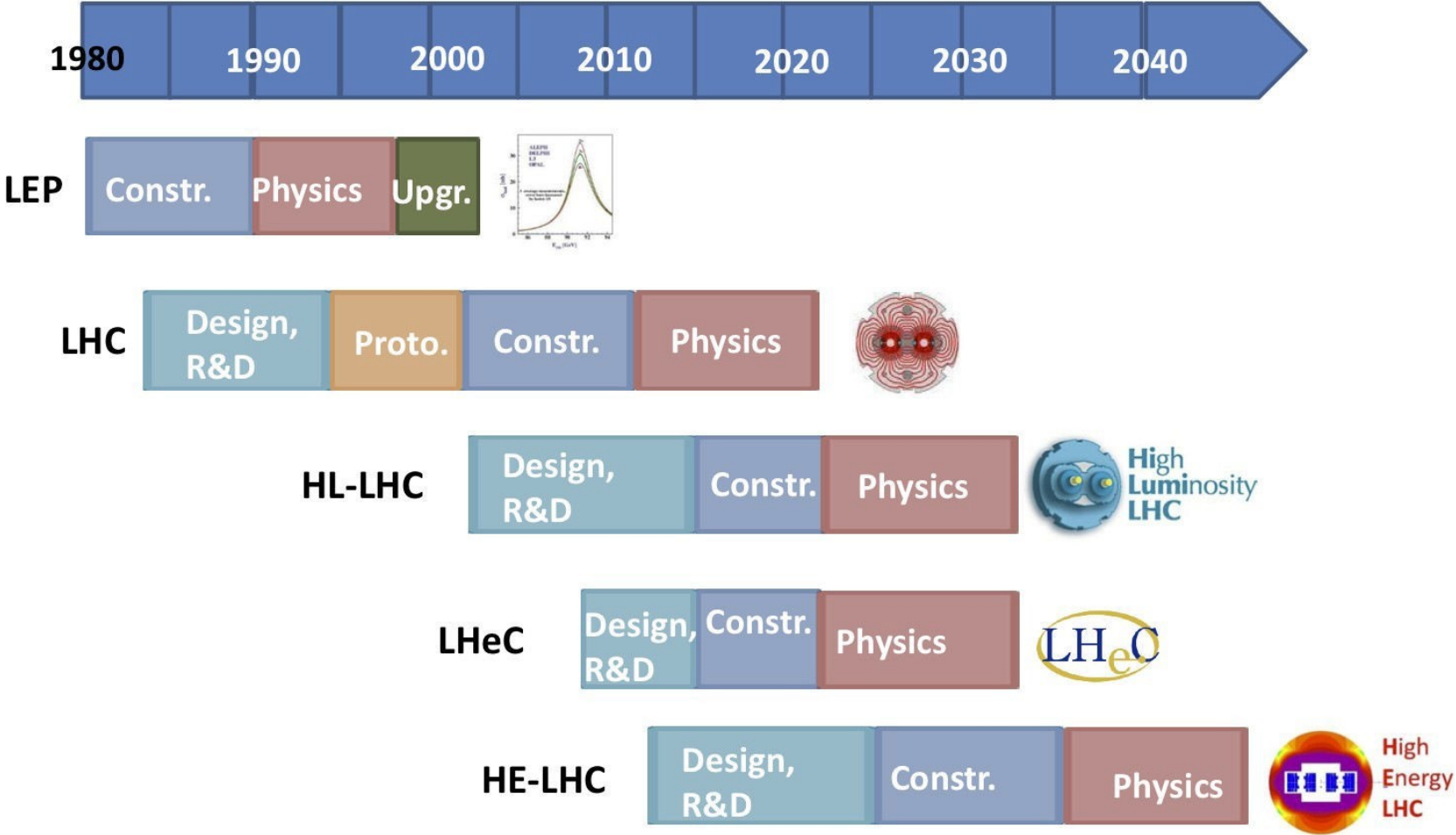
# A nehézionfizikai részecske és jet szimulátor: HIJING++

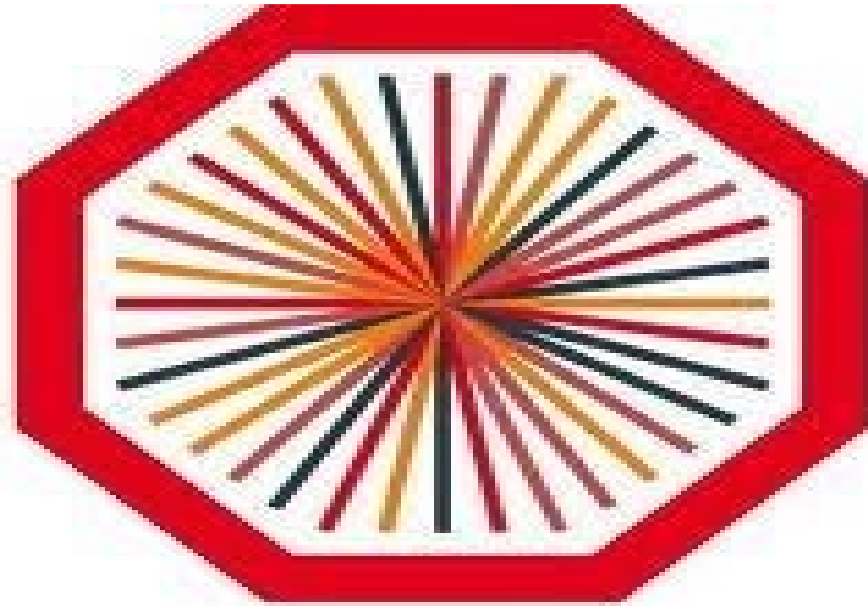
- HIJING++ (HIJING3.0)
  - PYTHIA 8 namespace megmaradt
  - PYTHIA-típusú hisztogramok OK
  - „HIJING main” alá van beillesztve
  - Standard C++ libek használata
  - Fizika:
    - PYTHIA8: Parton szint, szoft folyamatok, LUND modell, ARIADNE, fragmentáció
    - HIJING2: Nukleáris effektusok: többszörös szórás, árnyékolás
  - Új fizika:
    - Javított árnyékolás, GLV jet elnyomás, LHAPDF6, GLVB?



# Elméleti szimulációk fejlesztése a távolabbi jövőbe...

- Még több adat, jobb statisztika....





**ALICE**

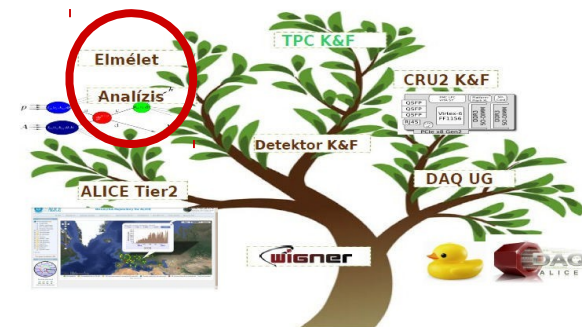
A JOURNEY OF DISCOVERY



# Az erősen kölcsönható anyag fázisainak elméleti vizsgálata

Nehézionfizika Kutatócsoport, Wigner GPU Laboratórium,  
ELTE, CCNU, LBNL

T.S. Biro, G. Biró, A. Jakovác, Sz. Karsai, P. Pósfay, T. Takács



# Az erősen kölcsönható anyag fázisai

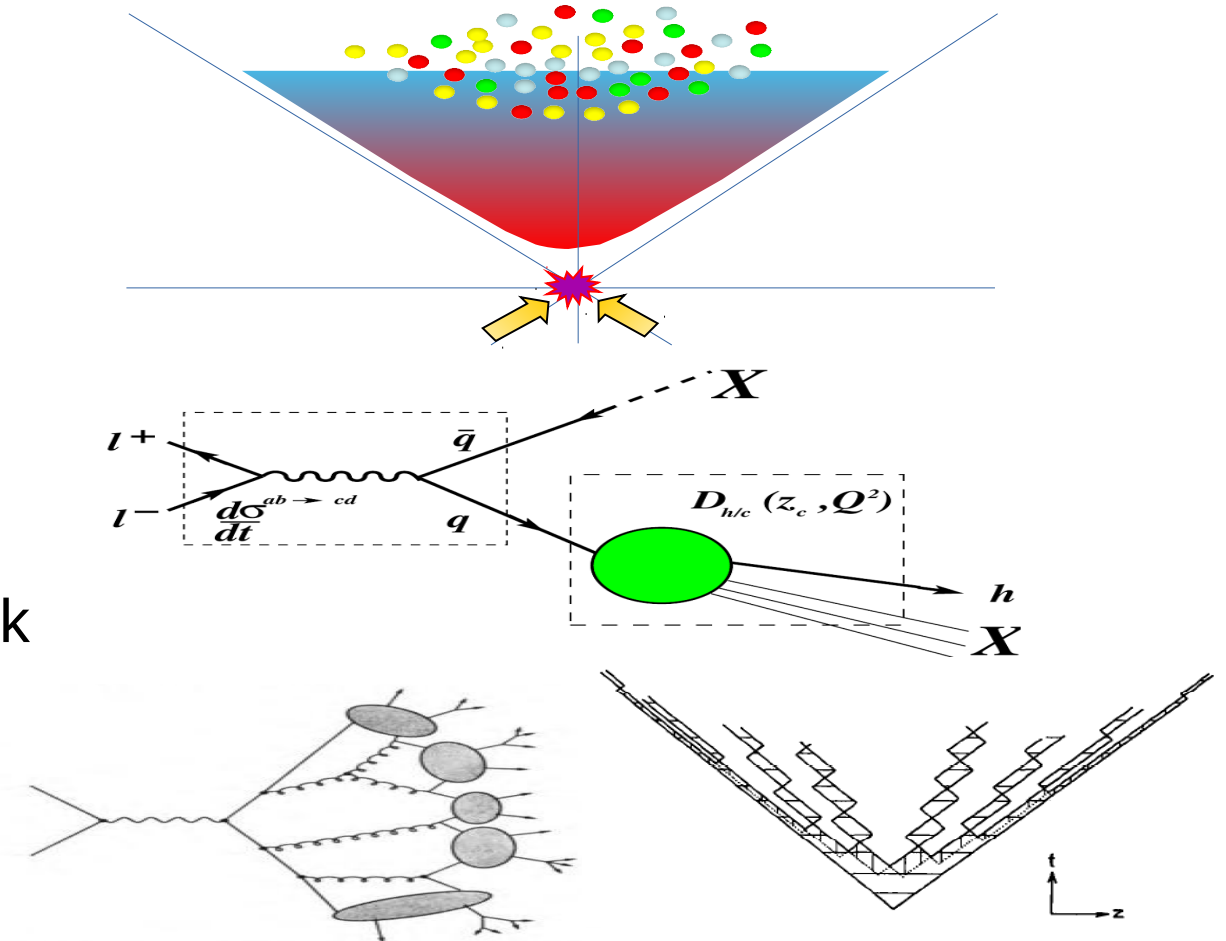
- Extrém sűrű és FORRÓ anyag: hadronizáció vizsgálata

Nagyenergiás ütközésben partonikus (q,g) folyamatokban a végállapotban hadronok keletkeznek.

A parton → hadron átmenet a hadronizáció elméleti leírása mindmáig nem tiszta → Fenomenologikus modellek

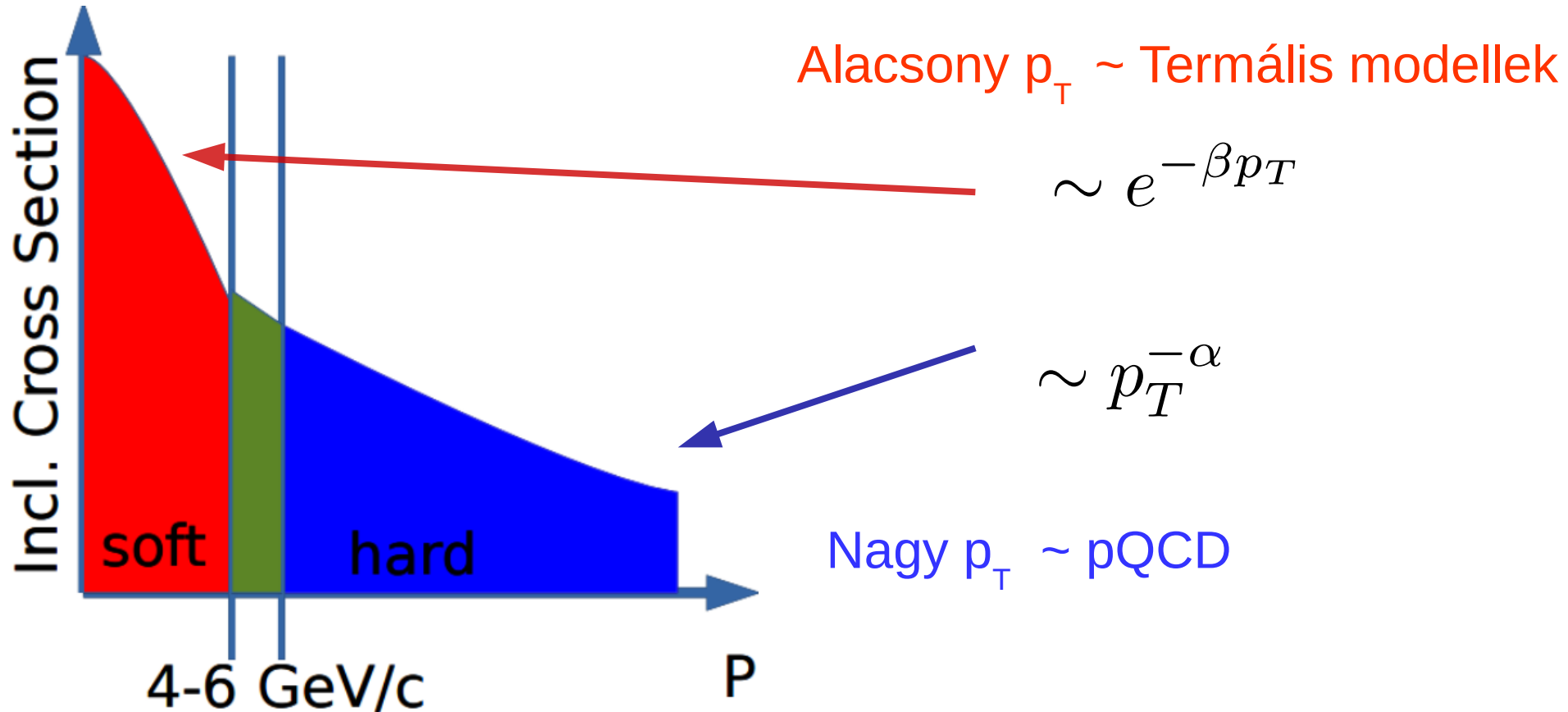
Fragmentációs modellek:

Feynman, Lund, string ,cluster, stb.



# A hadronizáció vizsgálata Tsallis-Pareto alapú eloszlásokkal

## Proton-proton ütközések azonosított, Inkluzív hadronspektruma





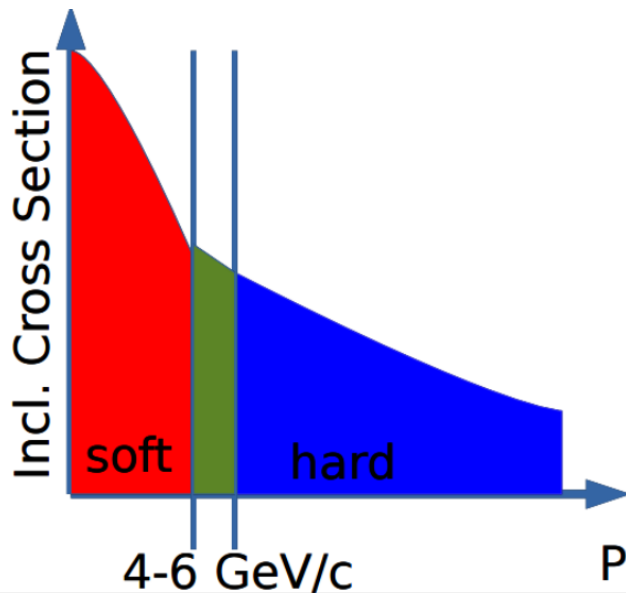
# A hadronizáció vizsgálata Tsallis-Pareto alapú eloszlásokkal

Kísérleti tapasztalat: Tsallis-Pareto eloszlás

$$\frac{d\sigma}{dp_T} \sim \left[ 1 + \frac{q-1}{T} \varepsilon \right]^{-\frac{1}{q-1}}$$

Kis  $p_T$ :  $\sim e^{-\varepsilon/T}$

Nagy  $p_T$ :  $\sim \varepsilon^{-\frac{1}{q-1}}$



T – paraméter (body): Soft  $p_T$

q – paraméter (tail): Hard  $p_T$

# A hadronizáció vizsgálata Tsallis-Pareto alapú eloszlásokkal

Extenzív statisztika:  $S_{12} = S_1 + S_2$

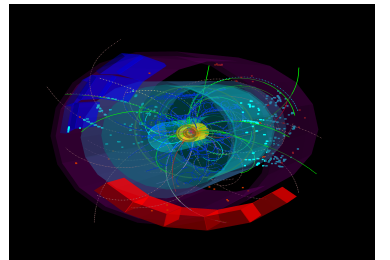
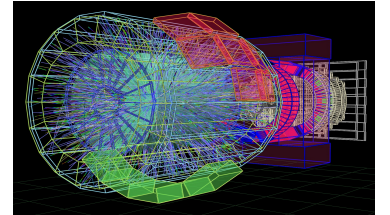
$S_S = - \sum_i p_i \ln p_i$  Boltzmann-Gibbs eloszlás:  $\sim e^{-\beta \varepsilon}$

Nem-extenzív statisztika:  $S_{12} = S_1 + S_2 + (q - 1)S_1 S_2$

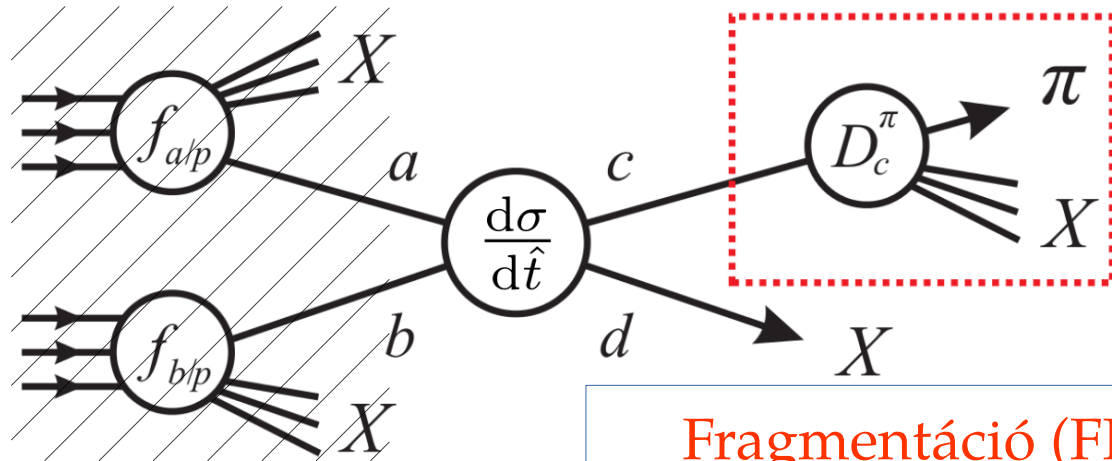
q-entrópia:  $S_q = \frac{1}{q - 1} \left( 1 - \sum_i p_i^q \right)$

Tsallis-Pareto eloszlás:

$$\sim \left[ 1 + \frac{q - 1}{T} \varepsilon \right]^{-\frac{1}{q-1}}$$



# A hadronizáció vizsgálata Tsallis-Pareto alapú eloszlásokkal



Fragmentáció (FF)

$$\sim (1 - z) \left[ 1 - \frac{q - 1}{T} \frac{\sqrt{s}}{2} \log(1 - x) \right]^{-\frac{1}{q-1}}$$

