

# A kvarkanyag vizsgálata nehéz kvarkokkal a CERN LHC **ALICE** kísérletében

Varga Zoltán, Vértesi Róbert

[vertesi.robert@wigner.hu](mailto:vertesi.robert@wigner.hu)

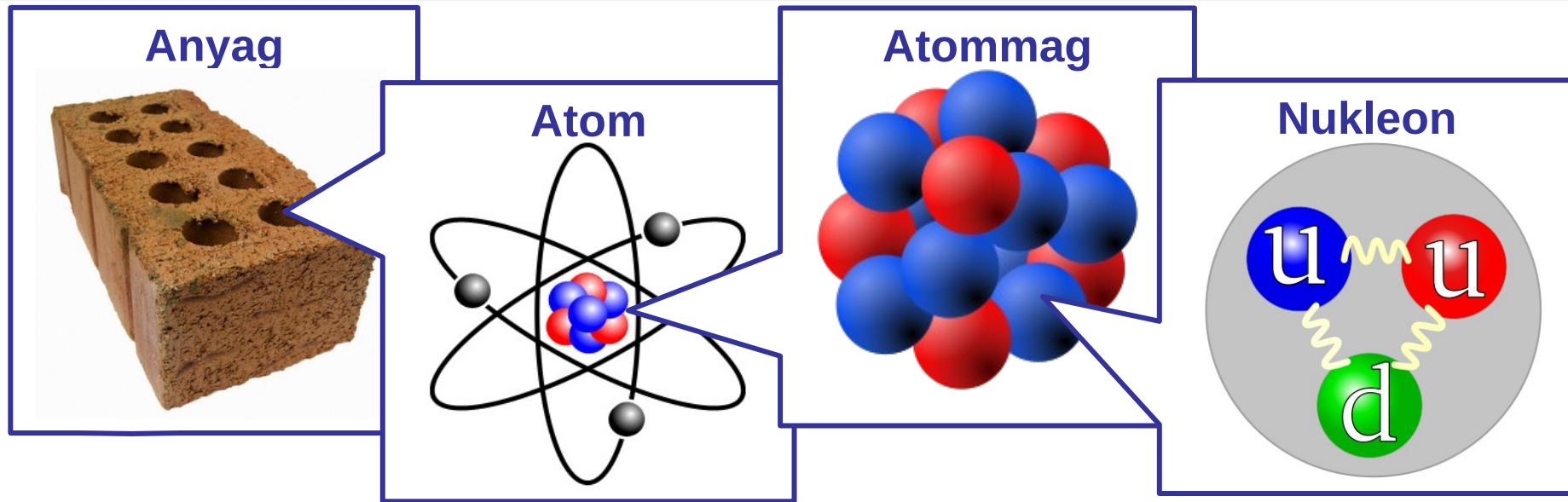
Wigner Fizikai Kutatóközpont  
Részecske- és Magfizikai Intézete

ALICE-Budapest csoport  
<http://alice.wigner.hu>



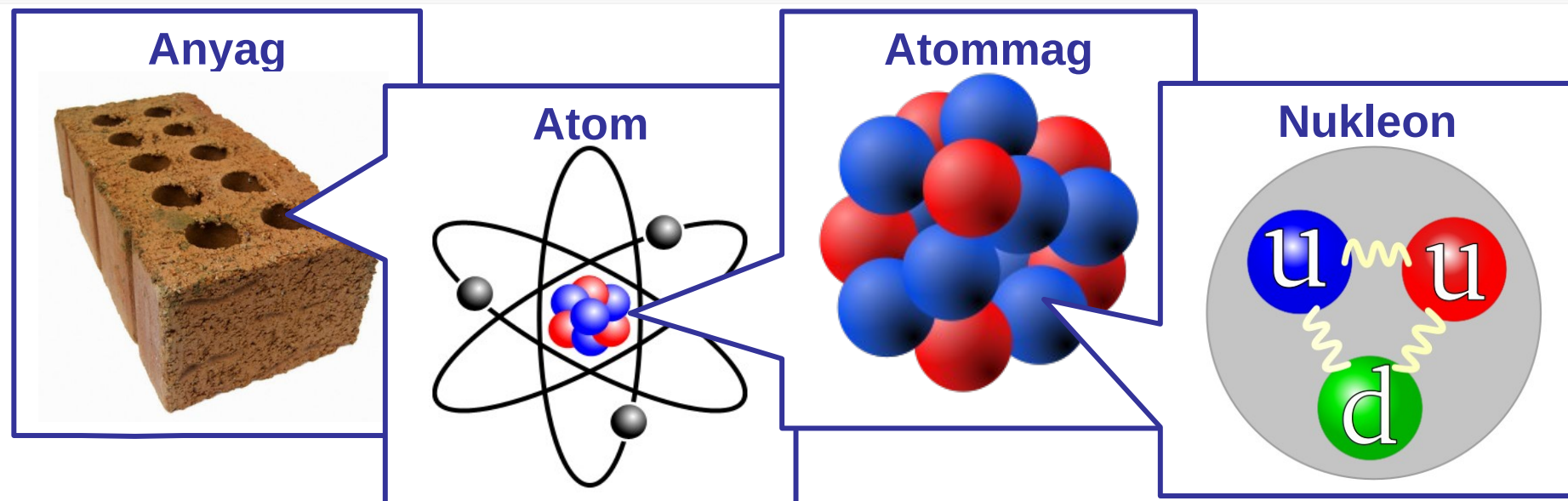
ALICE

# Világunk építőkövei



- **Kvarkok**: az atommag elemi részecskéi
- **Gluonok**: A magot összetartó **erős kölcsönhatás** közvetítői
- **Kvarkbezárás**: nincs magányos kvark! Hadronokat alkotnak
- **Kvantumszín dinamika**: az erős kölcsönhatás elmélete
  - A kvarkbezárás tartományát analitikusan nem tudjuk számolni!

# Világunk építőkövei

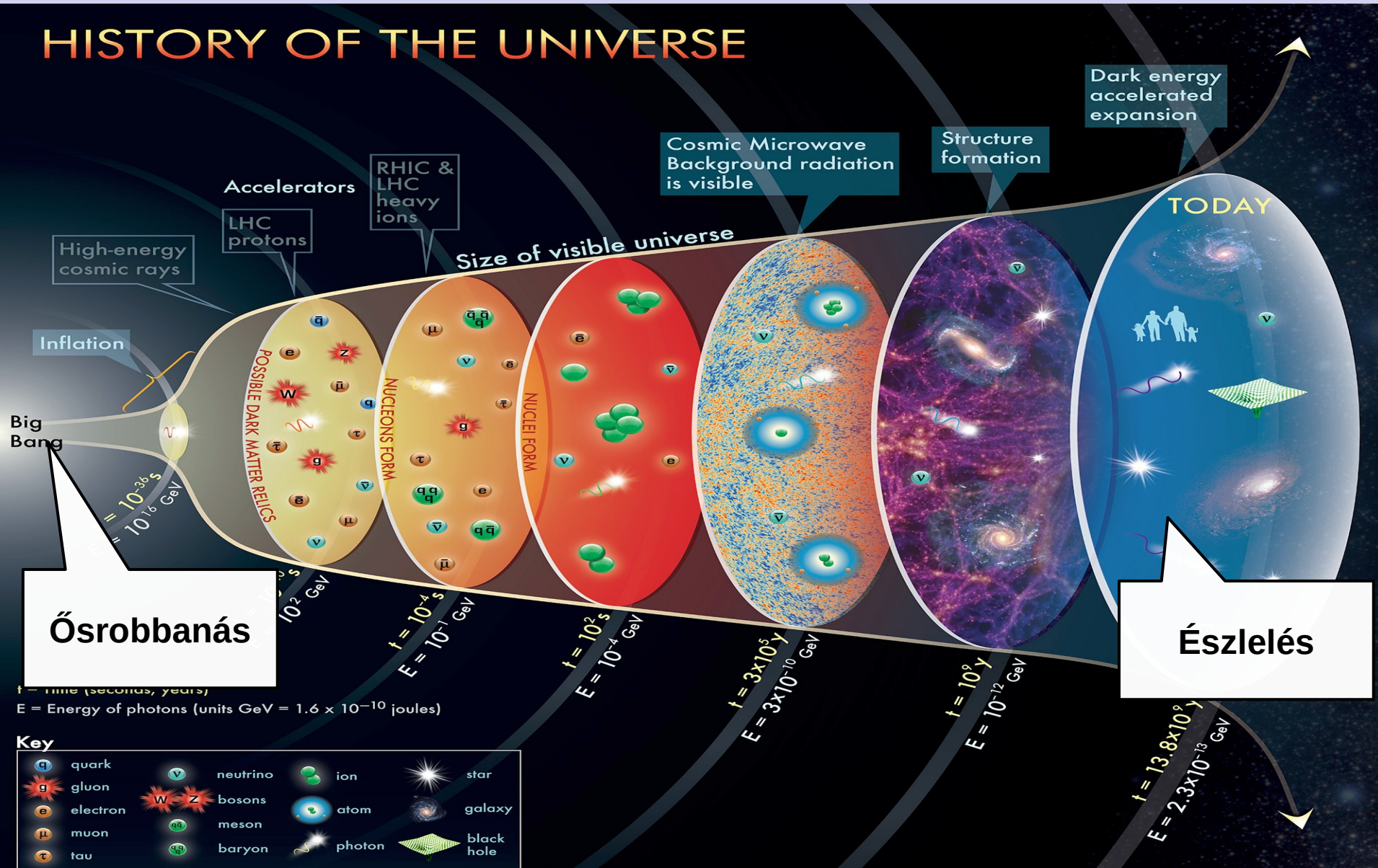


- **Kvarkok**: az atommag elemi részecskéi
- **Gluonok**: A magot összetartó **erős kölcsönhatás** közvetítői
- **Kvarkbezárás**: nincs magányos kvark! Hadronokat alkotnak
- **Kvantumszín dinamika**: az erős kölcsönhatás elmélete
  - A kvarkbezárás tartományát analitikusan nem tudjuk számolni!

Hogyan tudhatunk meg többet róluk?

# A kezdet: "nagy bummm"

## HISTORY OF THE UNIVERSE



Ősrobbanás

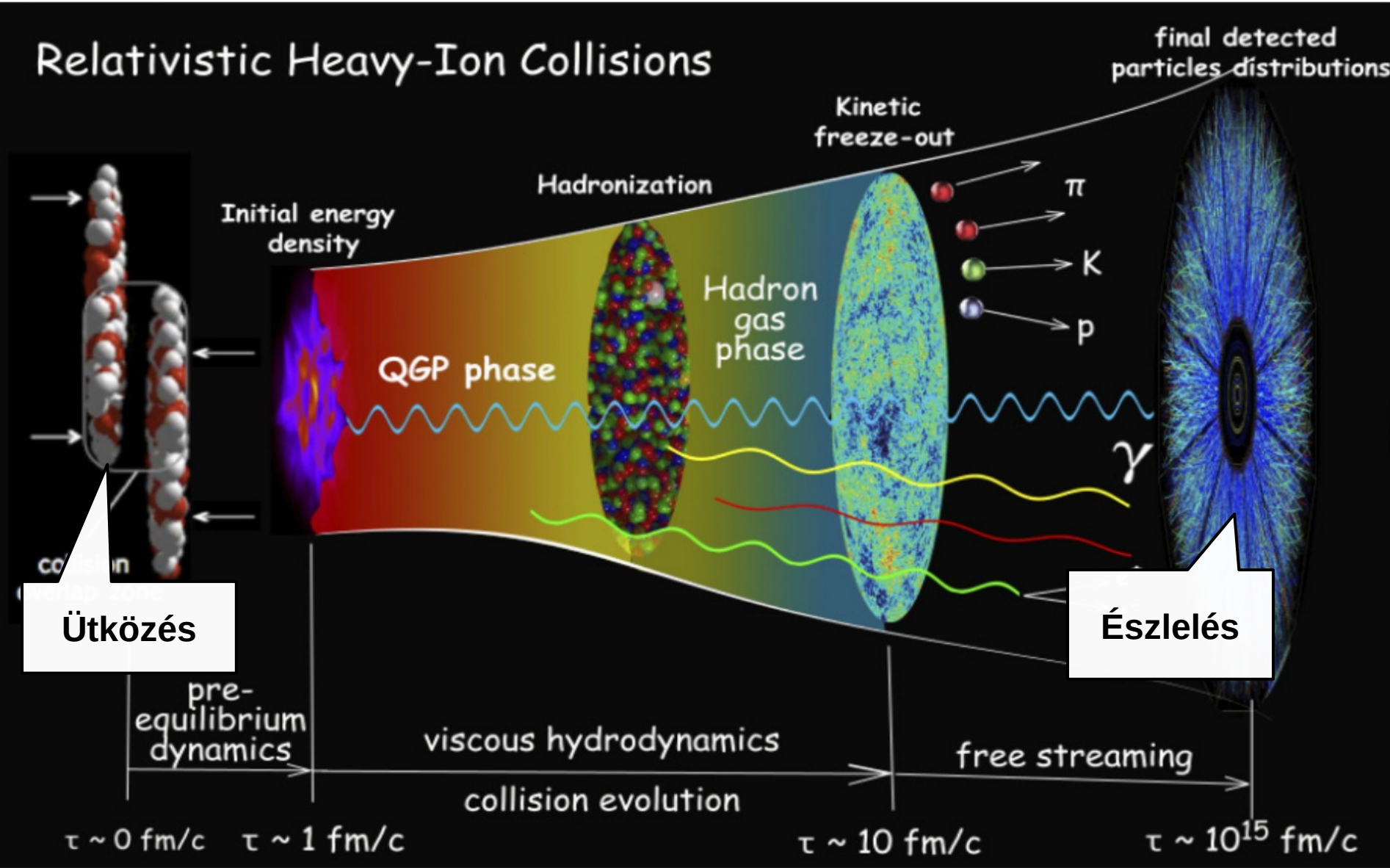
Észlelés

t = time (seconds, years)  
E = Energy of photons (units GeV = 1.6 x 10<sup>-10</sup> joules)

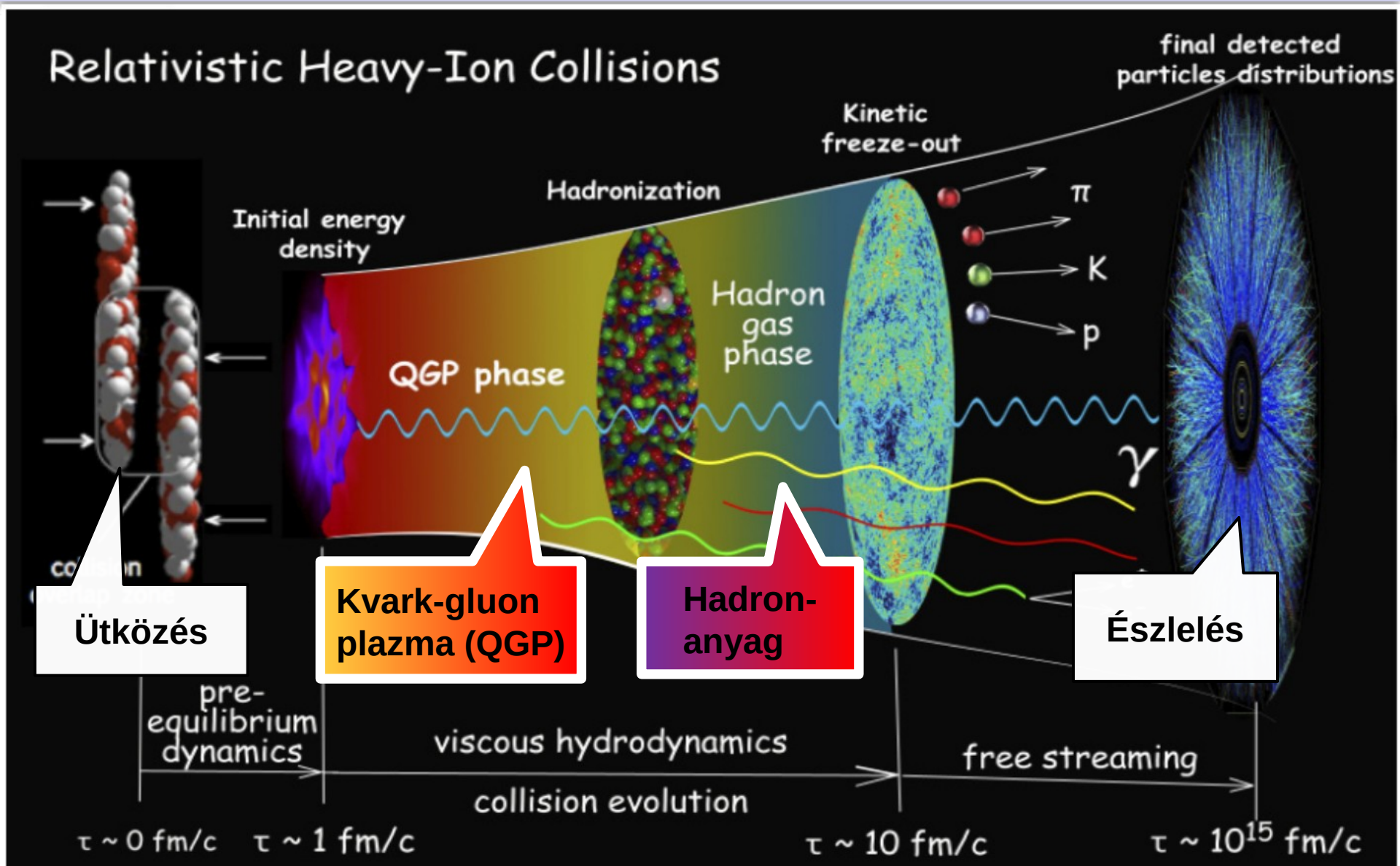
The concept for the above figure originated in a 1986 paper by Michael Turner.

# Nehézion-ütközések: "kis bumm"

## Relativistic Heavy-Ion Collisions



# Nehézion-ütközések: "kis bumm"

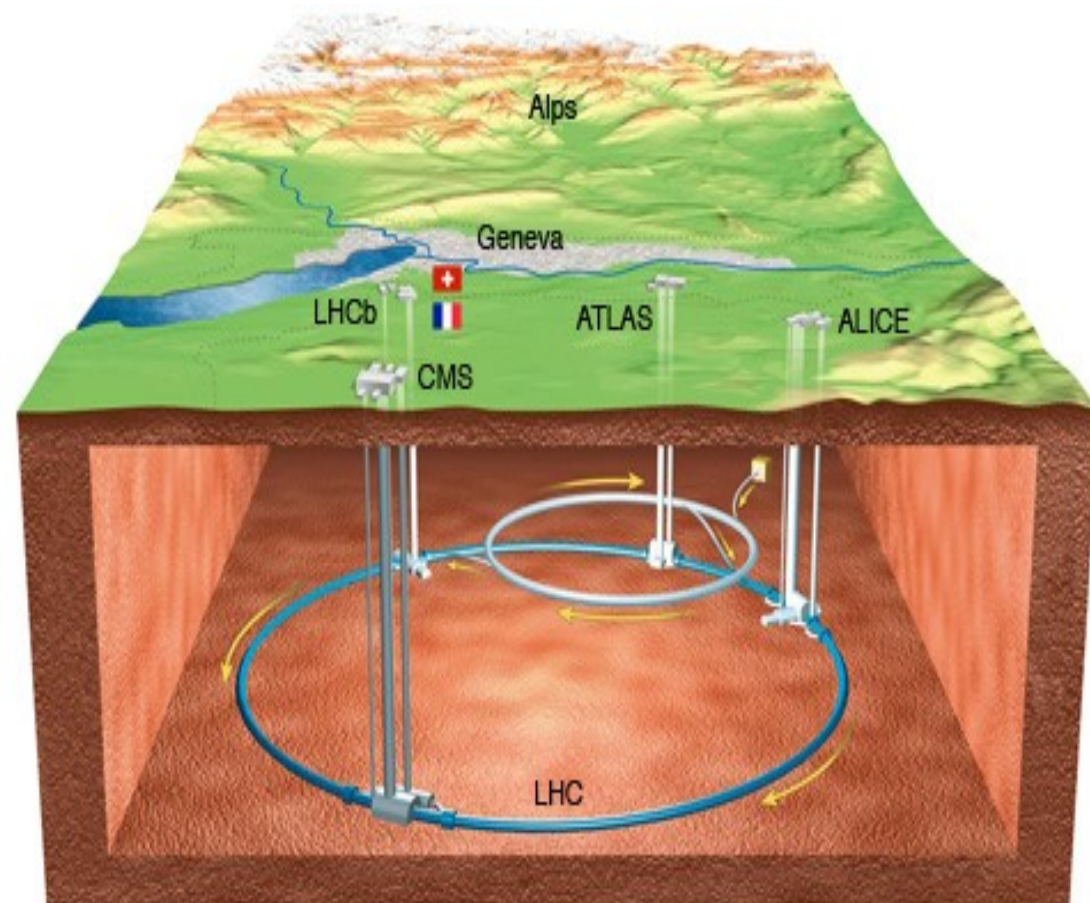


# A Nagy Hadronütköztető (LHC)

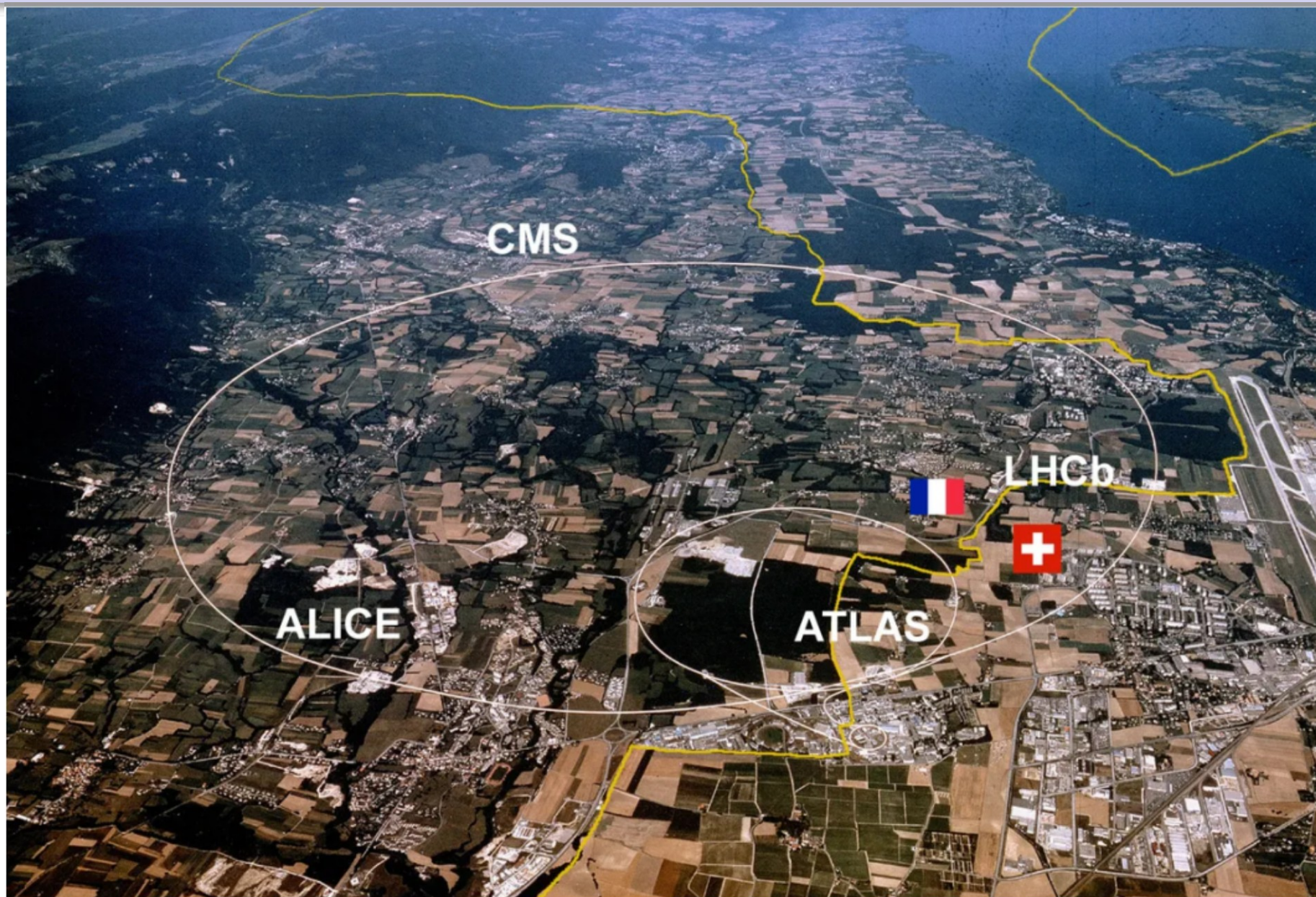


- CERN: Közös európai kutatóközpont
- 22 tagország együttműködése

- LHC: 27 km hosszú gyorsítógyűrű
  - Elektromos tér gyorsít (közel fénysebességre)
  - Mágneses tér pályán tart
- Legnagyobb energia
  - p-p: 13 TeV
  - Pb-Pb: 5.02 TeV

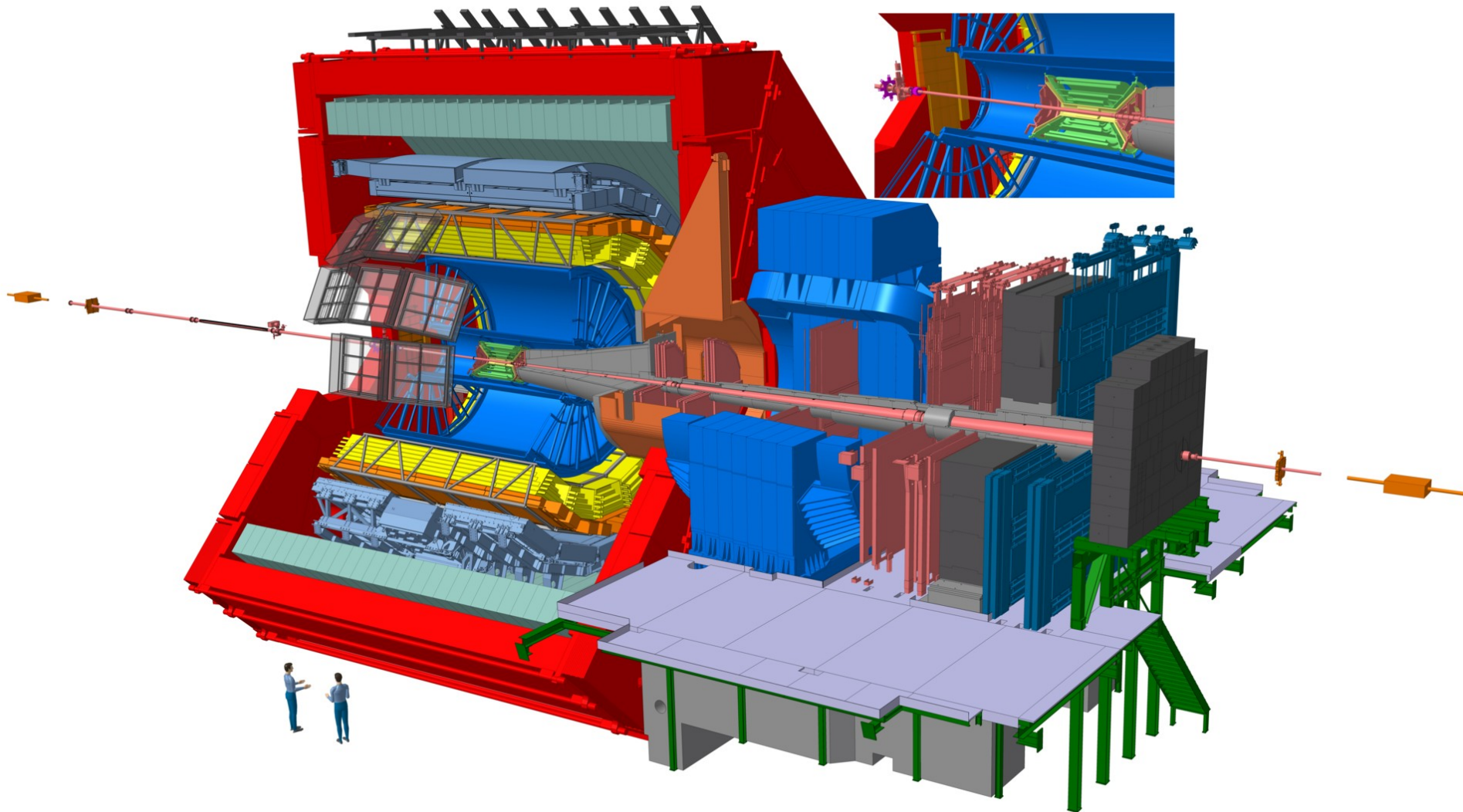


# A Nagy Hadronütköztető (LHC)





# ALICE



- Kifejezetten nehézion-fizikára tervezett detektor

# ALICE

**EMCal:** kaloriméter  
elektromágneses részecskék  
energia

**ITS:** félvezető detektor  
töltött részecskék nyomkövetése  
másodlagos vertex

**TOF:** szcintillátor  
repülési idő mérése

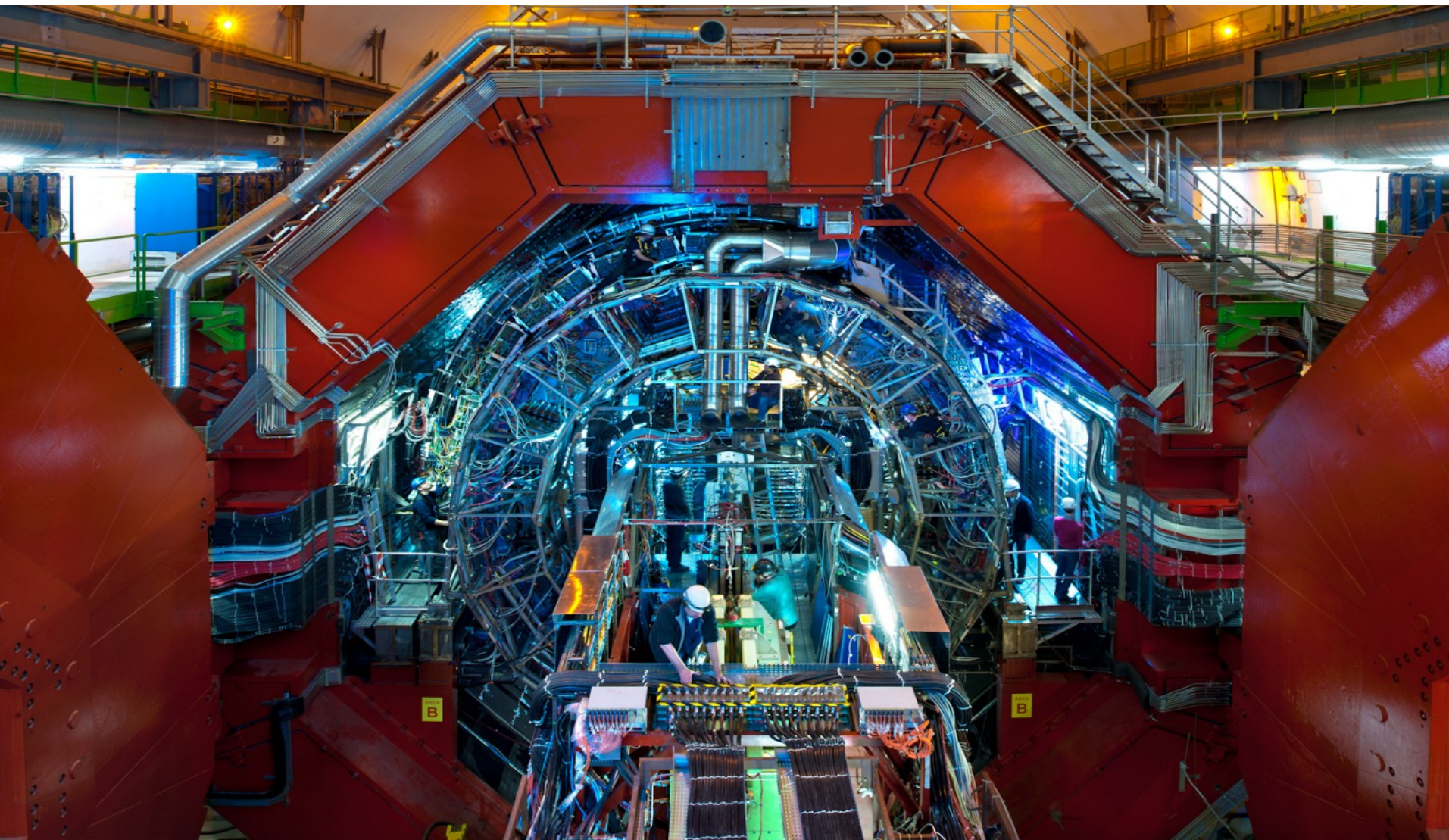
**TPC:** gázdetektor  
töltött részecskék nyomkövetése  
azonosítás, impulzusmérés

**mágnes**

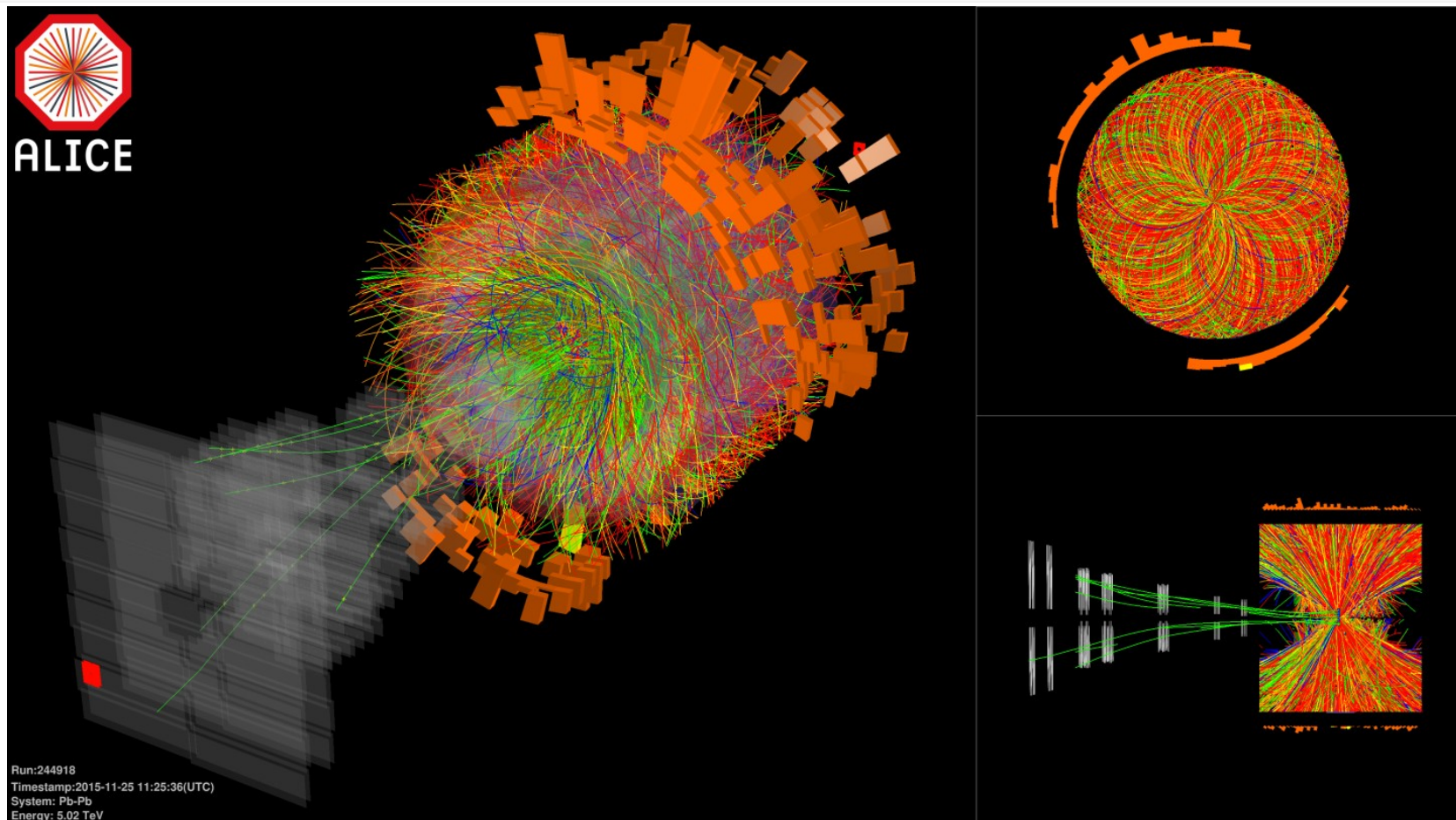
**MCH:** spektrométer  
műonok azonosítása, nyomkövetés  
(Előreszórási tartomány)

- Kifejezetten nehézion-fizikára tervezett detektor

# ALICE



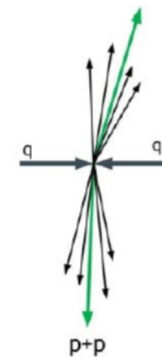
# Rekonstruált nehézion-esemény



- Másodpercenként akár 600 millió ütközés
- Akár több ezer részecske jeleinek azonosítása, értelmezése, feldolgozása
- 2-4 GB adat másodpercenként

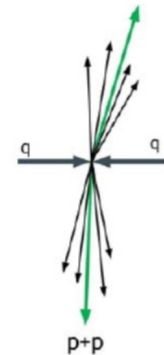
# Ütköző rendszerek

- **pp:** a QCD vákuum
  - Kvantumszindinamikai elméletek tesztje
  - Nehézion-ütközések referenciája

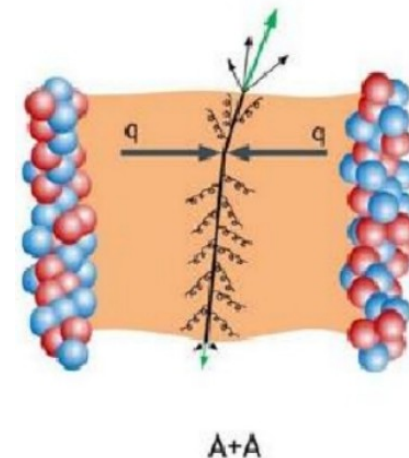


# Ütköző rendszerek

- **pp:** a QCD vákuum
  - Kvantumszindinamikai elméletek tesztje
  - Nehézion-ütközések referenciája

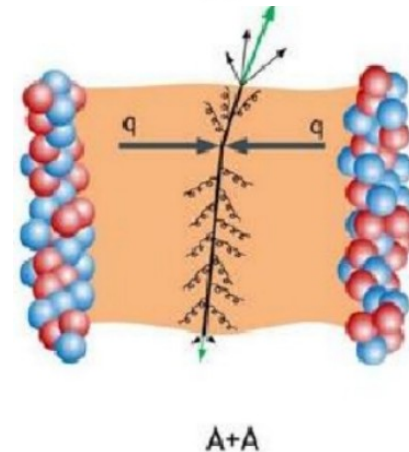
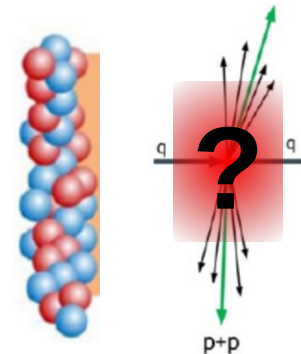
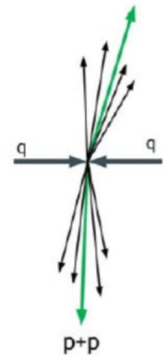


- **A-A: "forró" (+hideg) maganyag hatásai**  
(*"forró": kvark-gluon plazma jelenléte*)
  - Energiaveszteség a forró maganyagban
  - Kollektív viselkedés



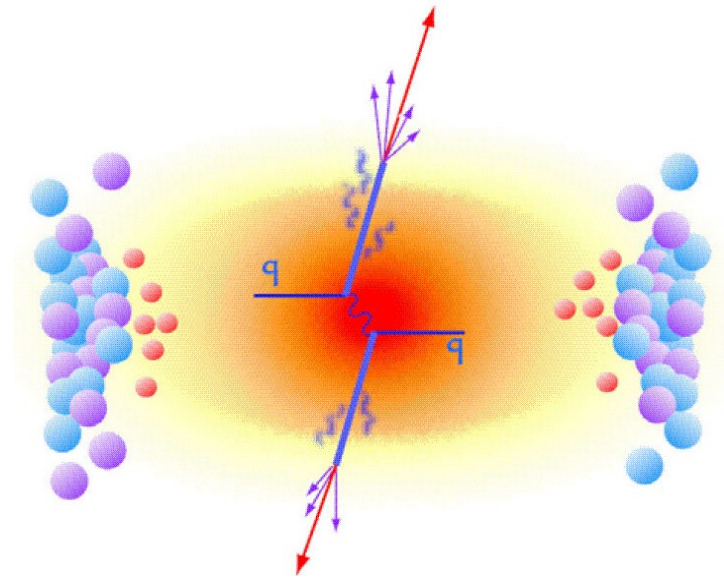
# Ütköző rendszerek

- **pp:** a QCD vákuum
  - Kvantumszindinamikai elméletek tesztje
  - Nehézion-ütközések referenciája
  
- **p-A:** "hideg" maganyag hatásai  
 ("hideg": *elsősorban hadronos*)
  - Kezdeti állapottól való függés
  - Partoneloszlások, árnyékolás
  - Energiaveszteség a hideg maganyagban
  
- **A-A:** "forró" (+hideg) maganyag hatásai  
 ("forró": *kvark-gluon plazma jelenléte*)
  - Energiaveszteség a forró maganyagban
  - Kollektív viselkedés



# Mérési módszerek

- **"Kemény" folyamatok**
  - kevés nagy impulzú részecske
  - korai keletkezés, jól ismert folyamatokban
  - nagy áthatólképesség
  - **Plazma átvilágítása,**
  - **Közegbeli módosulás vizsgálata**

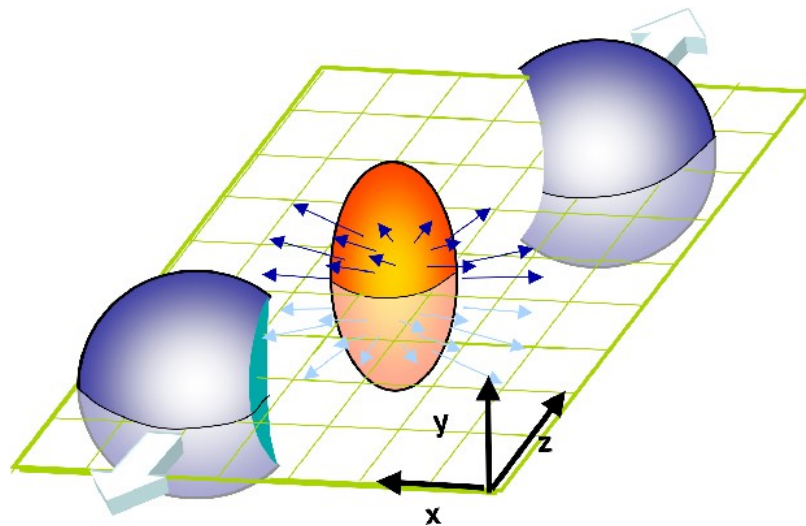
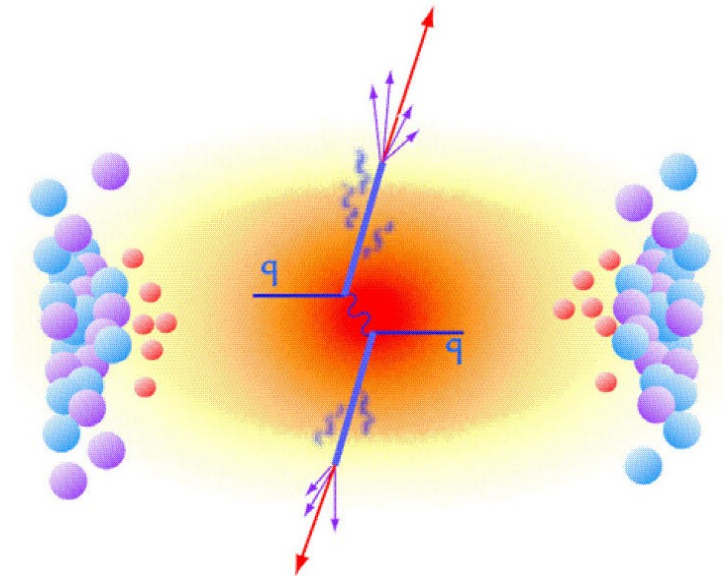




# Mérési módszerek

## ▪ "Kemény" folyamatok

- kevés nagy impulzú részecske
- korai keletkezés, jól ismert folyamatokban
- nagy áthatolóképesség
- **Plazma átvilágítása,**
- **Közegbeli módosulás vizsgálata**

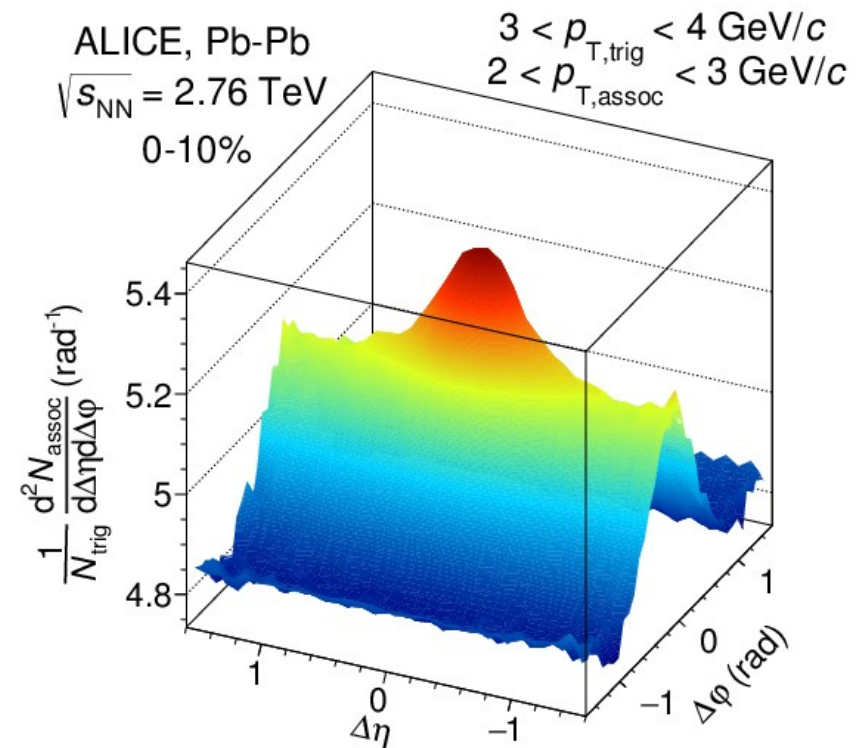
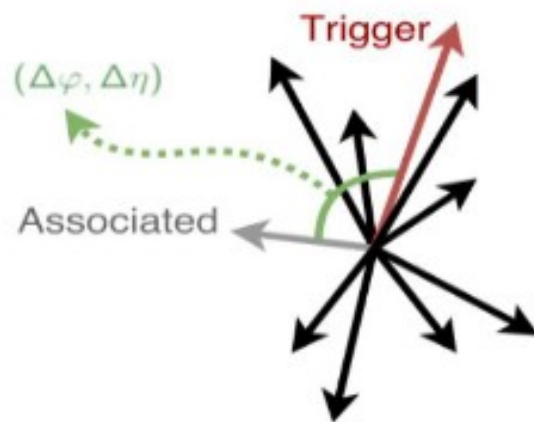


## ▪ "Lágy" folyamatok

- Sok, kis impulzusú részecske
- késői állapotokból
- **Kollektív dinamika ("folyás"),**
- **termikus viselkedés**

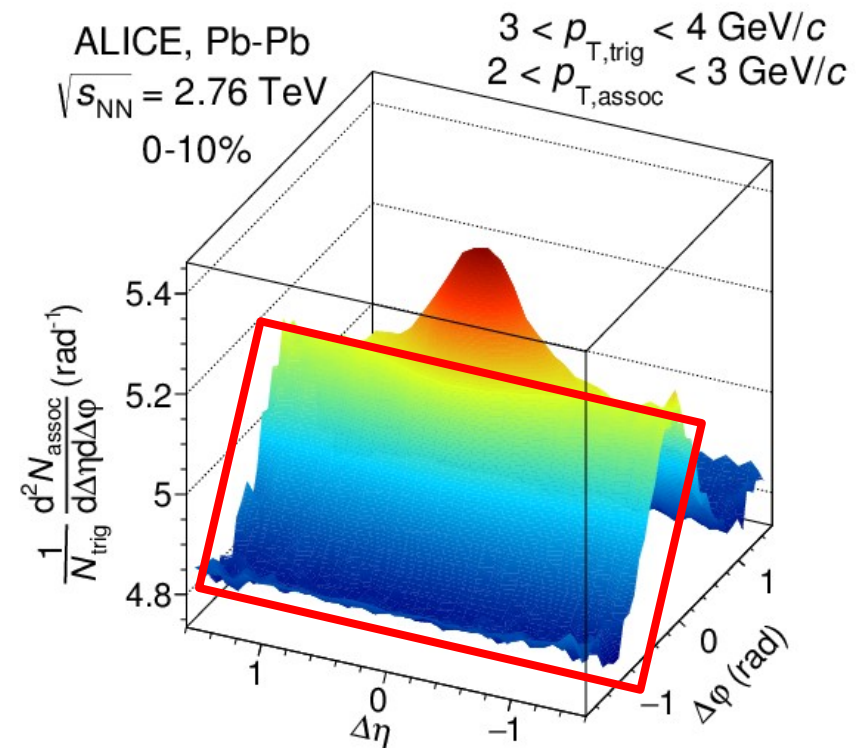
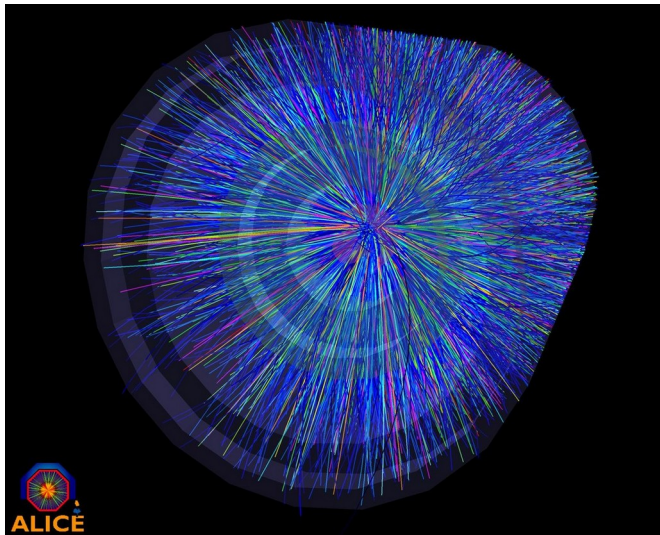
# A QGP megismerése korrelációkkal

- Részecsképarok vizsgálata a köztük lévő szög függvényében



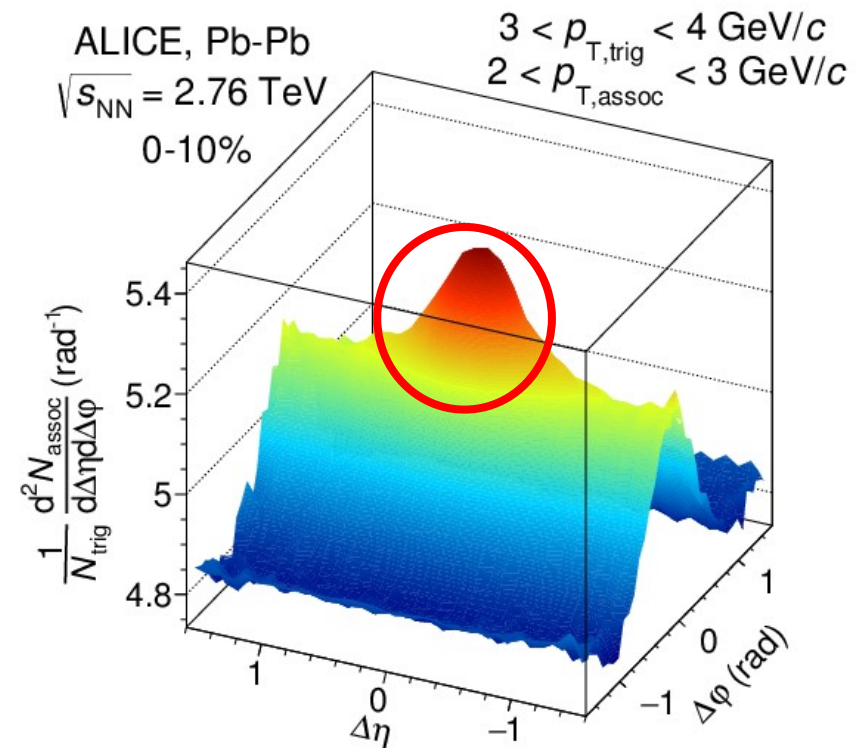
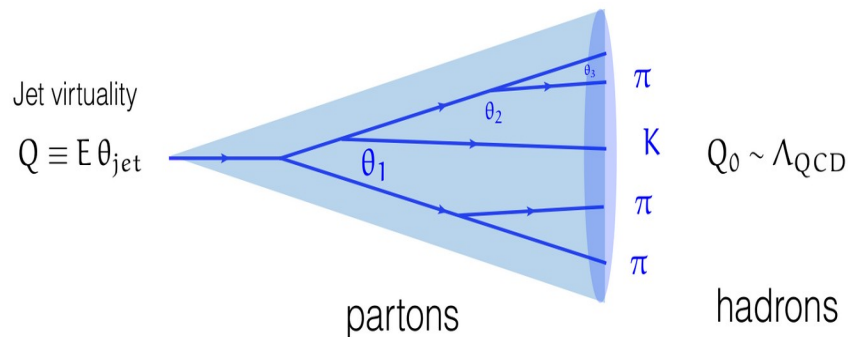
# A QGP megismerése korrelációkkal

- Részecskepárok vizsgálata a köztük lévő szög függvényében
  - Háttér: a folyó közeg korrelációs képe



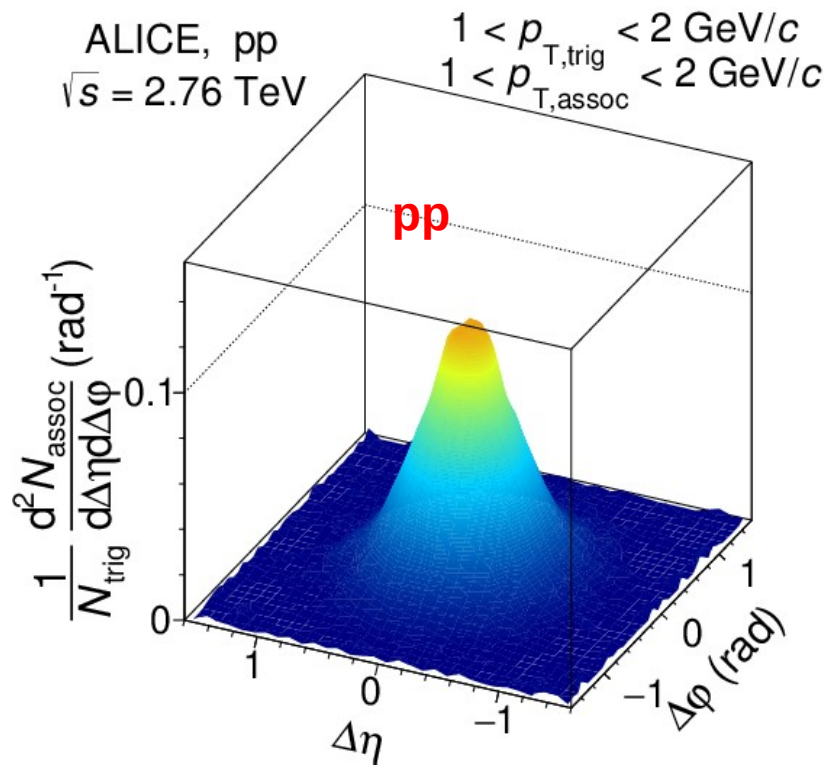
# A QGP megismerése korrelációkkal

- Részecskepárok vizsgálata a köztük lévő szög függvényében
  - Háttér: a folyó közeg korrelációs képe
  - Jel: kvarkokból létrejövő hadronok kollimált zápora, **jetek**



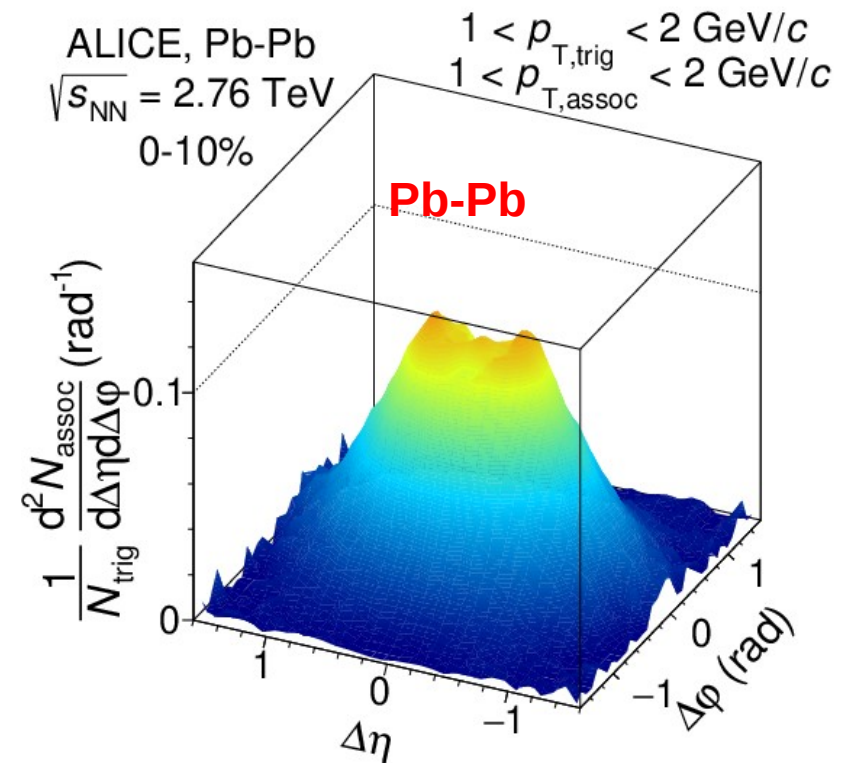
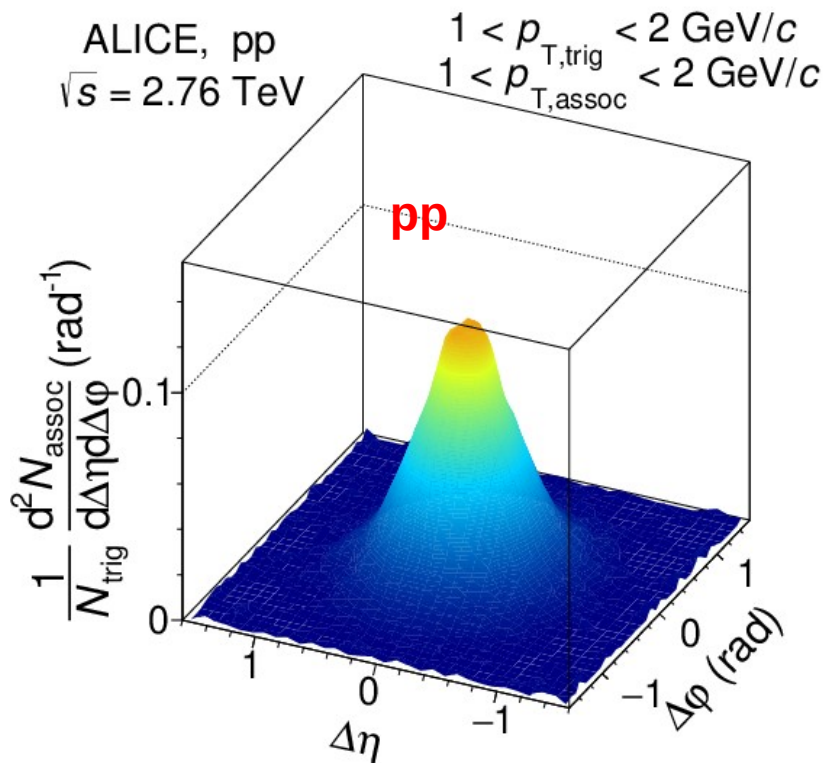
# A jet-csúcsok változása

- proton-proton ütközések: referencia (tiszta jetcsúcs)



# A jet-csúcsok változása

- proton-proton ütközések: referencia (tiszta jetcsúcs)
- nehézion-nehézion ütközések: a közeg hatása a jetekre (a háttér levonása után)

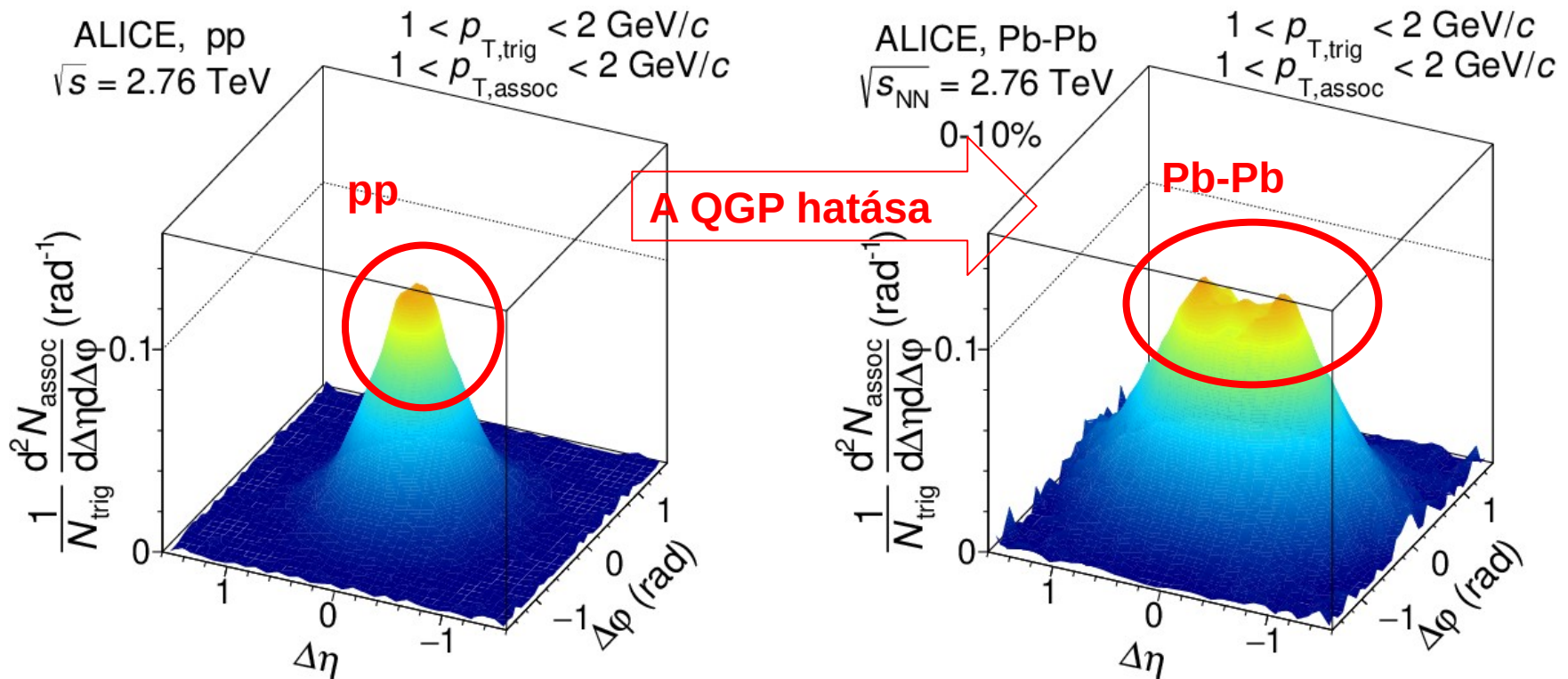


Phys.Rev.Lett.119,102301(2017)

Phys.Rev.C96,034904(2017)

# A jet-csúcsok változása

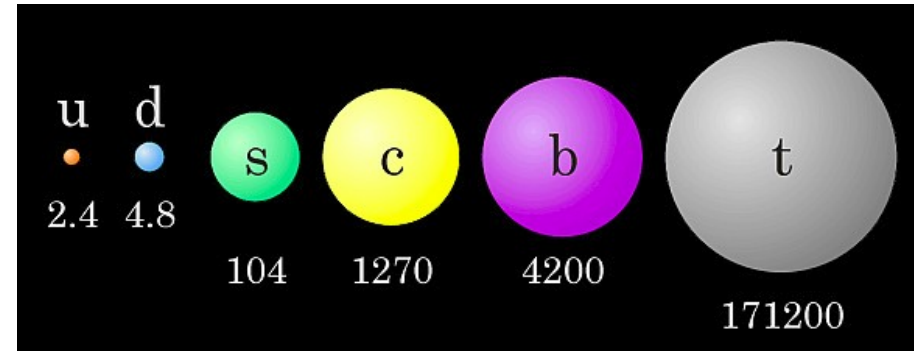
- proton-proton ütközések: referencia (tiszta jetcsúcs)
- nehézion-nehézion ütközések: a közeg hatása a jetekre (a háttér levonása után)



A csúcs kiszélesedik, megjelenik egy kiürített tartomány

# Mire jók a nehéz kvarkok?

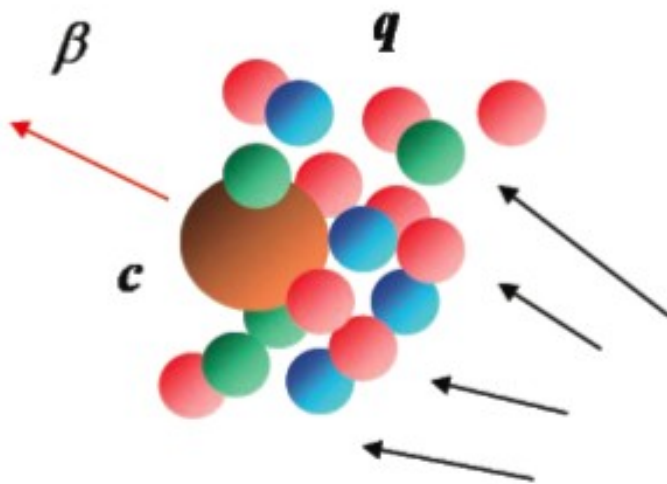
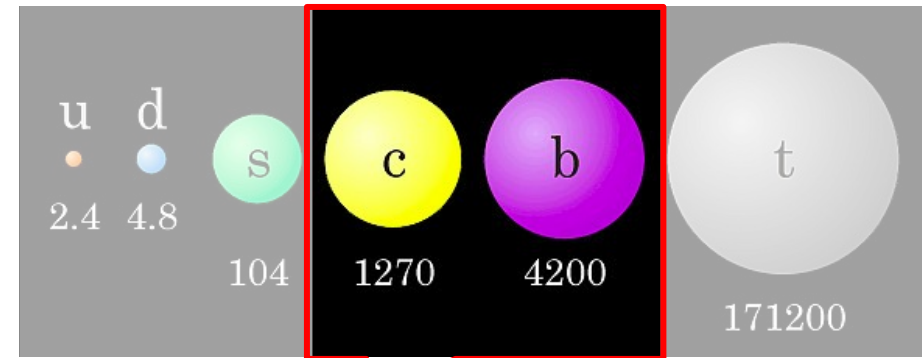
- Az összes hagyományos anyagot a két könnyű kvark alkotja
- Nehéz kvarkok csak instabil részecskékben fordulnak elő
  - nehezebb kelteni
  - hamar elbomlik





# Mire jók a nehéz kvarkok?

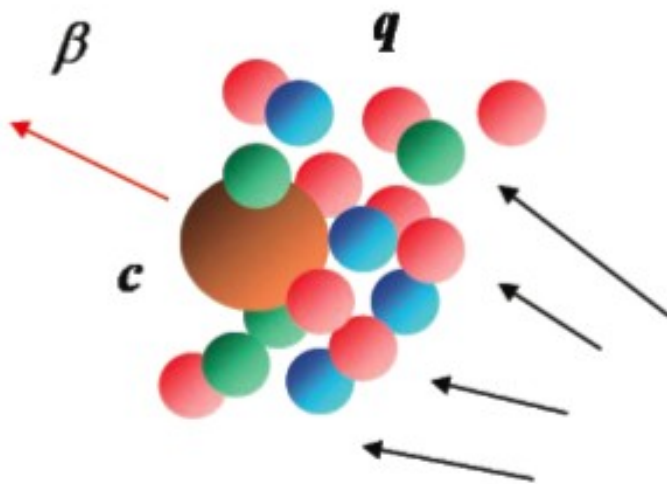
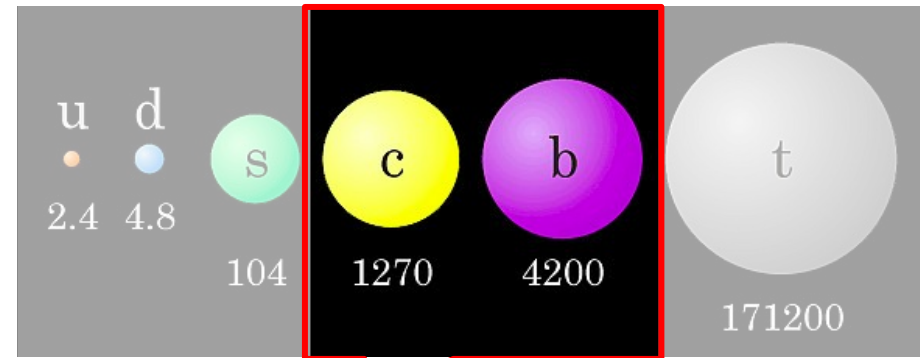
- Az összes hagyományos anyagot a két könnyű kvark alkotja
- Nehéz kvarkok csak instabil részecskékben fordulnak elő
  - nehezebb kelteni
  - hamar elbomlik



- **Charm, beauty:** "pont jó" tömeg
- Kezdeti, kemény folyamatokban keletkeznek
- A reakció során mindvégig megmaradnak
  - Impulzustól függetlenül
- Közben kölcsönhatnak a plazmával
  - Kinematika, transzport, hőmérséklet

# Mire jók a nehéz kvarkok?

- Az összes hagyományos anyagot a két könnyű kvark alkotja
- Nehéz kvarkok csak instabil részecskékben fordulnak elő
  - nehezebb kelteni
  - hamar elbomlik

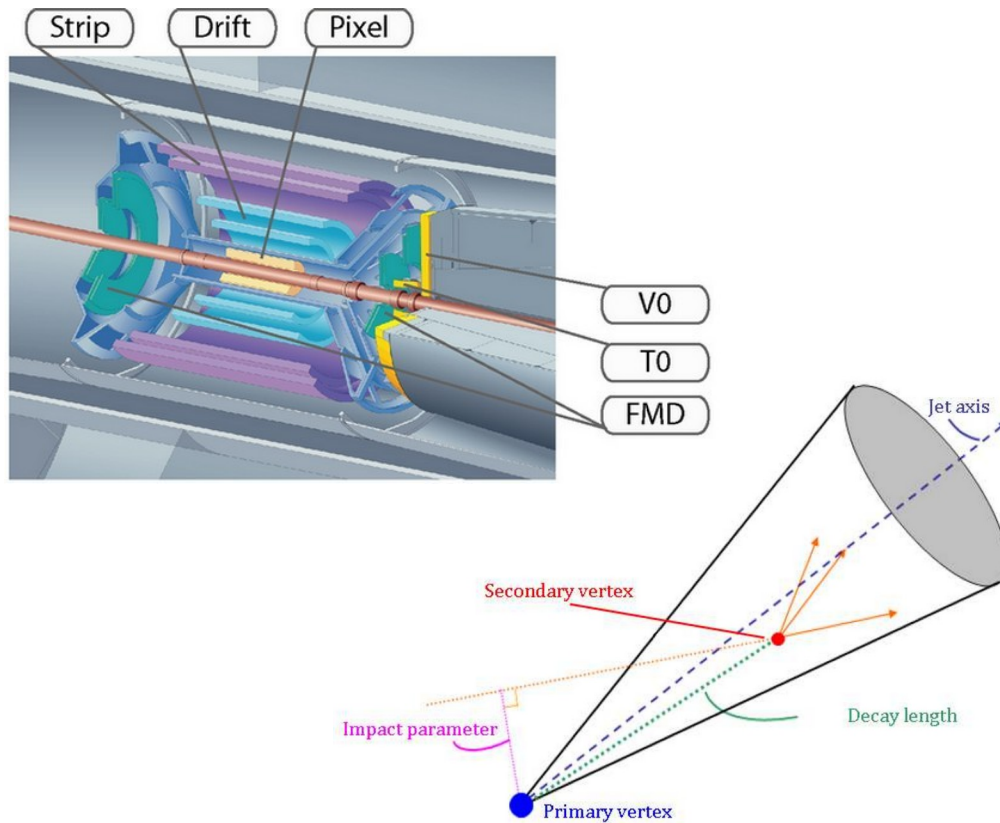


- **Charm, beauty:** "pont jó" tömeg
- Kezdeti, kemény folyamatokban keletkeznek
- A reakció során mindvégig megmaradnak
  - Impulzustól függetlenül
- Közben kölcsönhatnak a plazmával
  - Kinematika, transzport, hőmérséklet

Az erős kölcsönhatás és a QGP megértésére ideális

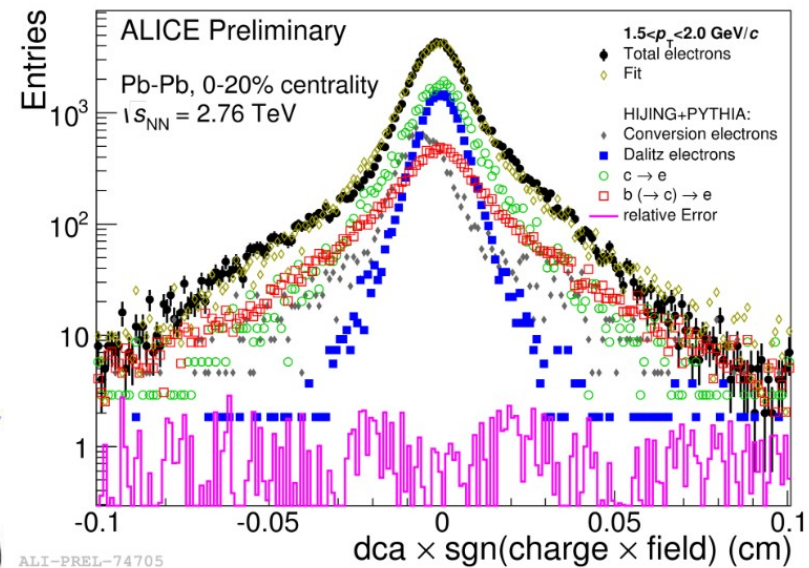
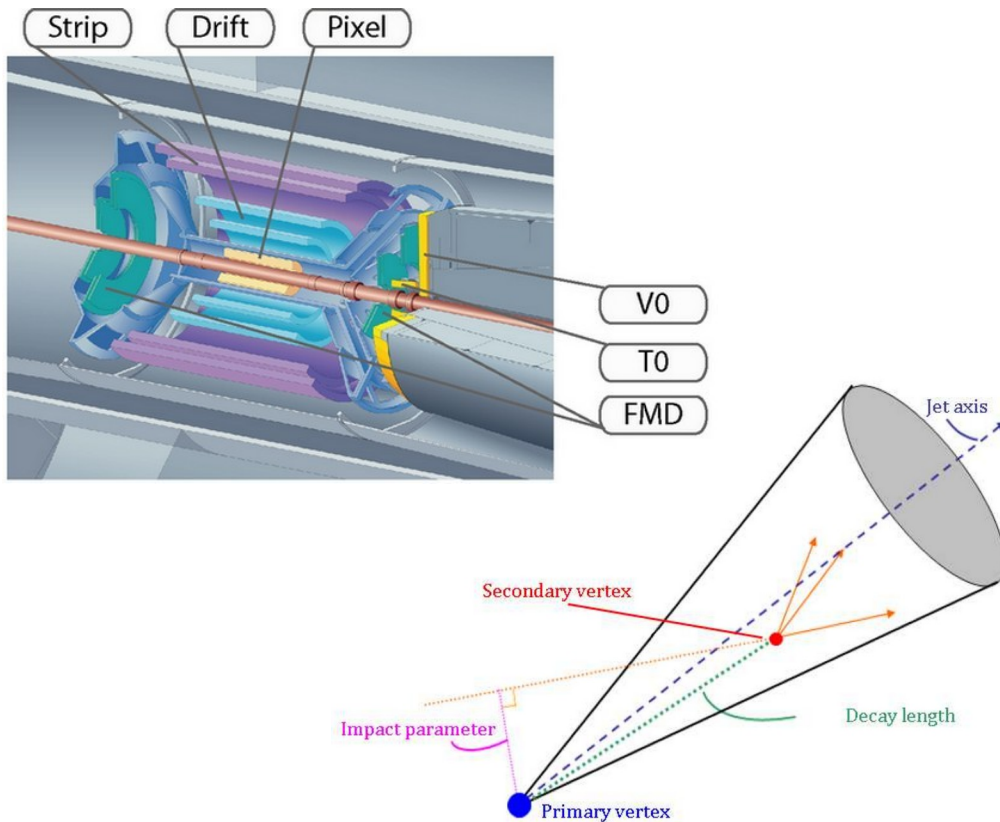
# beauty (b) jetek mérése

- Nehéz-kvarkot tartalmazó jetek azonosítása a **másodlagos vertex** keresésével



# beauty (b) jetek mérése

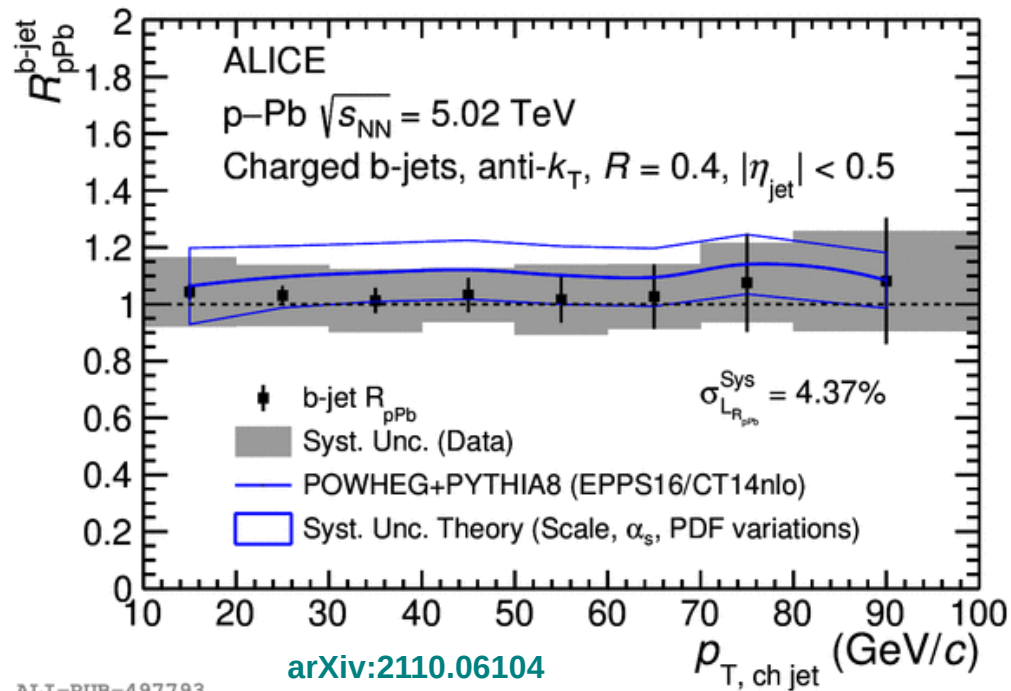
- Nehéz-kvarkot tartalmazó jetek azonosítása a **másodlagos vertex** keresésével



- b-jetek**
- c-jetek**
- könnyűkvark-jetek**

- Az ALICE ITS széles impulzus-tartományban képes a b-jeteket elkülöníteni

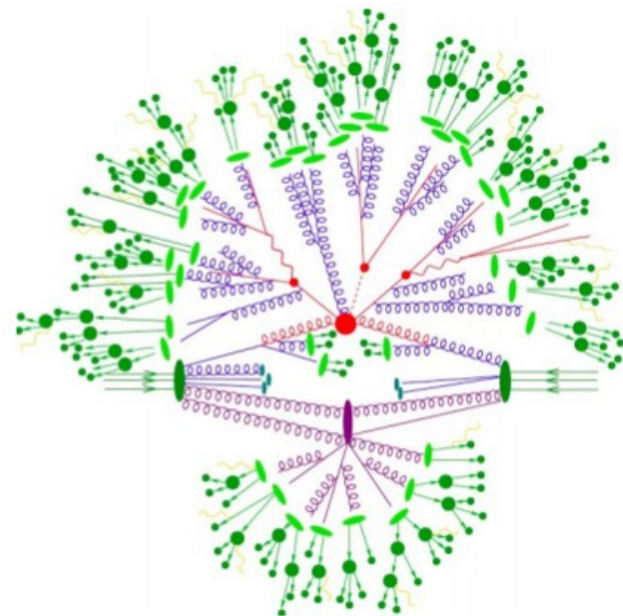
# b-jetek keletkezése p-Pb ütközésben



- A jelenlegi pontosság mellett nincs jele a jetek módosulásának a hideg maganyagban
- Elméleti modellel összhangban van az eredmény

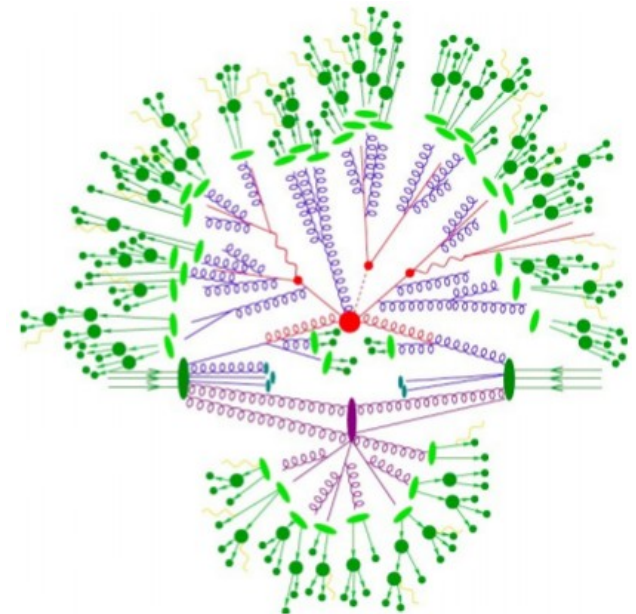
# pp : mégsem olyan egyszerű?

- Megfigyelés az LHC-nél: nagy multiplicitású pp eseményekben kollektív viselkedés, a Pb-Pb eseményekhez hasonlóan
  - Multiplicitás: végállapotú részecskék száma
- Nem az ütköző rendszer az érdekes, hanem elsősorban a multiplicitás?
  - Létrejöh-e QGP a pp ütközésekben?
  - Esetleg egyszerűbb QCD jelenségek...
  - Pl. **sokparton-kölcsönhatások (MPI)?**



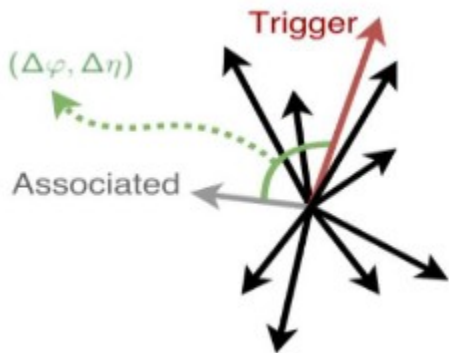
# pp : mégsem olyan egyszerű?

- Megfigyelés az LHC-nél: nagy multiplicitású pp eseményekben kollektív viselkedés, a Pb-Pb eseményekhez hasonlóan
  - Multiplicitás: végállapotú részecskék száma
- Nem az ütköző rendszer az érdekes, hanem elsősorban a multiplicitás?
  - Létrejöh-e QGP a pp ütközésekben?
  - Esetleg egyszerűbb QCD jelenségek...
  - Pl. **sokparton-kölcsönhatások (MPI)?**

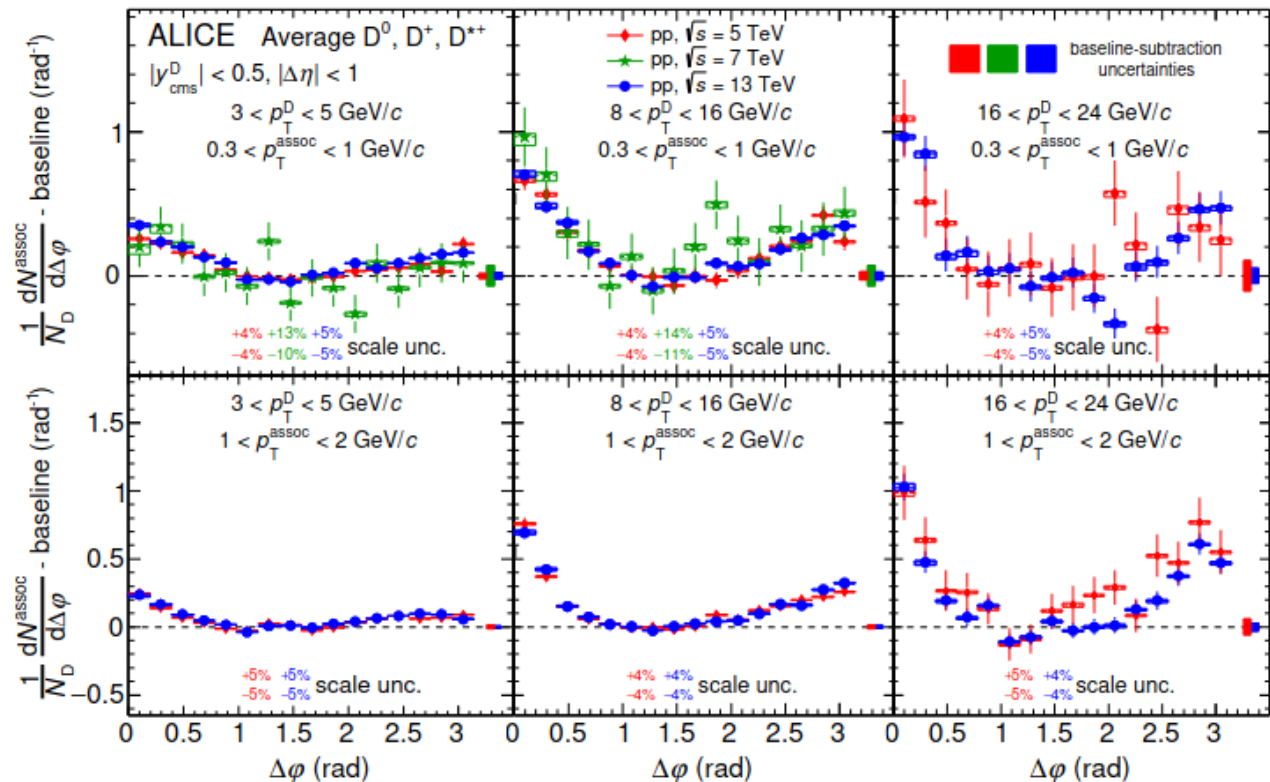


Még nem tudjuk a biztos választ!

# Nehéz kvarkok korrelációi



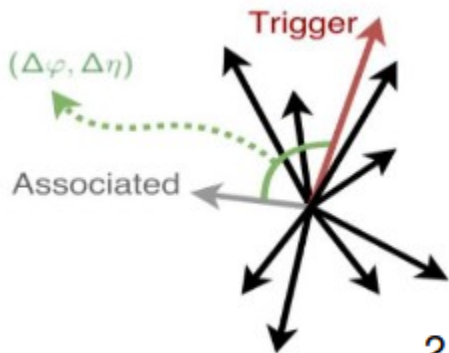
<https://arxiv.org/pdf/2110.10043.pdf>



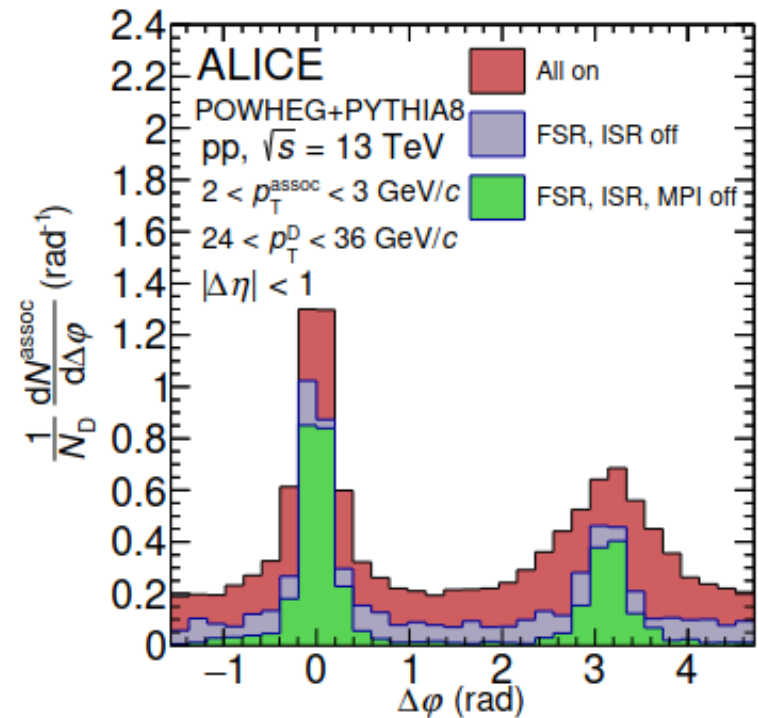
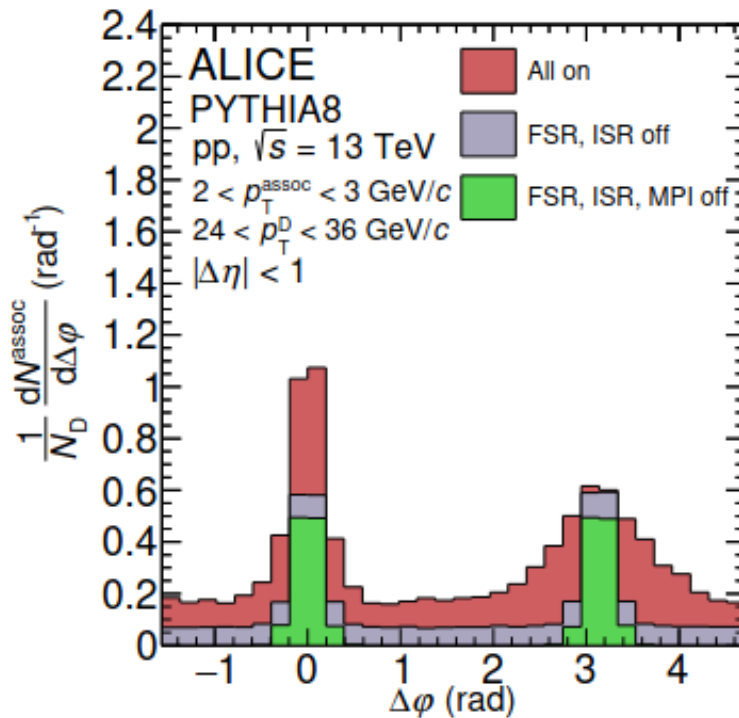
- D-h korreláció:  
jet-fragmentáció jetrekonstrukció nélkül



# Nehéz kvarkok korrelációi



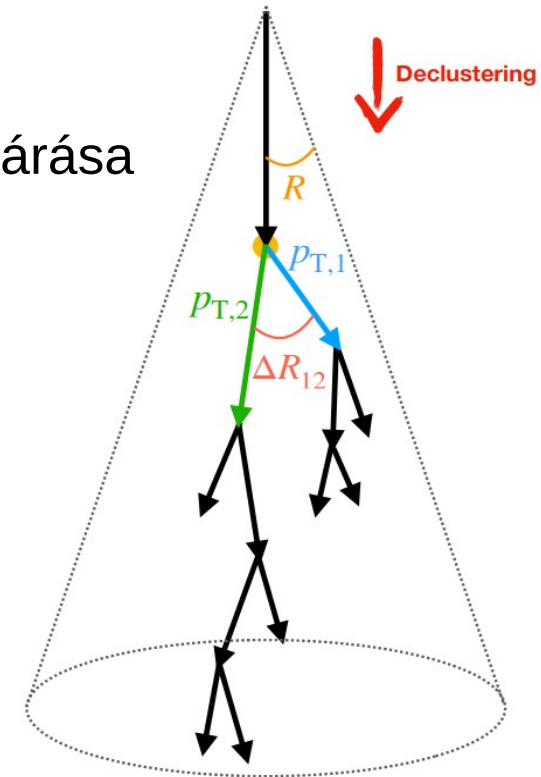
<https://arxiv.org/pdf/2110.10043.pdf>



- Értelmezés modellekkel: az MPI szerepe

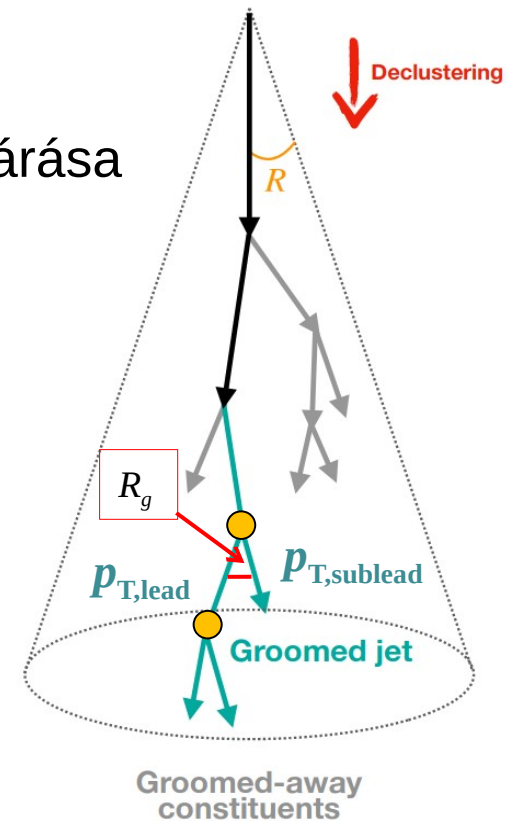
# Nehézkvark-jetek szerkezete

- A kemény partonzápor megismerése
  - A háttéreseemény és hadronizáció hatásainak kizárása
  - Közvetlen összehasonlíthatóság az elméleti számításokkal



# Nehézkvark-jetek szerkezete

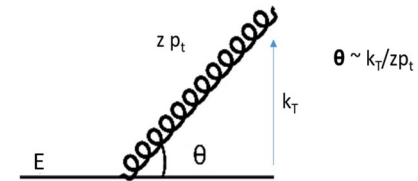
- A kemény partonzápor megismerése
  - A háttéreseemény és hadronizáció hatásainak kizárása
  - Közvetlen összehasonlíthatóság az elméleti számításokkal
- “Grooming” algoritmusok:
  - Jet időfejlődésének rekonstruálása
  - lágy sugárzás eltávolítása



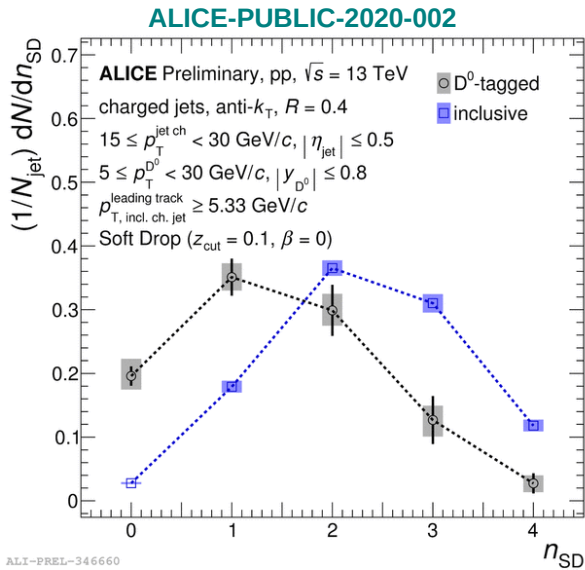
# Nehézkvark-jetek: a tiltott kúp

- Nehéz részecske nem sugároz kis szögben

$$\theta < \theta_{\text{DC}} = \frac{m_q}{E_q}$$

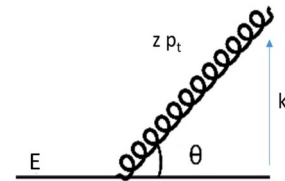


# Nehézkvark-jetek: a tiltott kúp



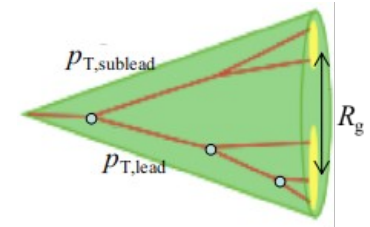
- Nehéz részecske nem sugároz kis szögben

$$\theta < \theta_{DC} = \frac{m_q}{E_q}$$

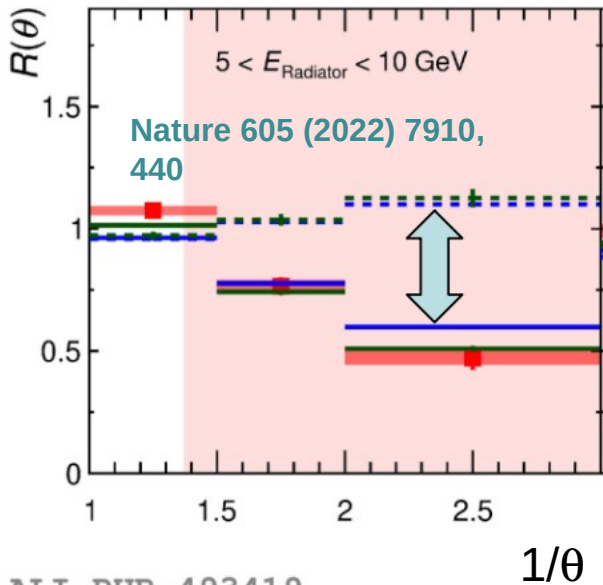
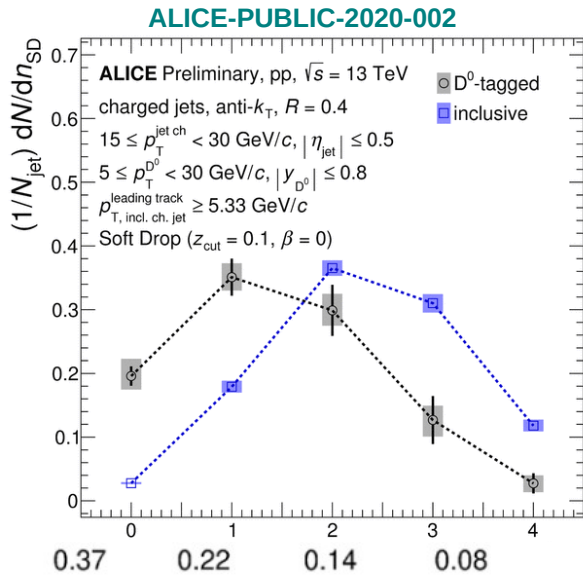


$$\theta \sim k_T / z p_t$$

- Elágazások száma: nehéz kvarkok esetén kevesebb

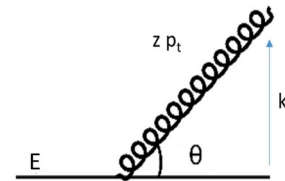


# Nehézkvark-jetek: a tiltott kúp

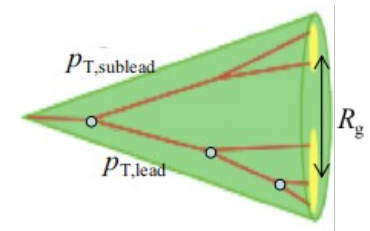


- Nehéz részecske nem sugároz kis szögben

$$\theta < \theta_{DC} = \frac{m_q}{E_q}$$

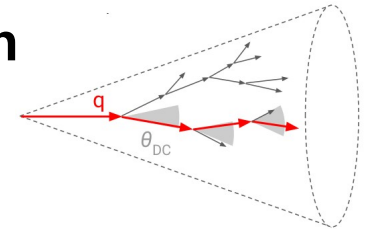


$$\theta \sim k_T / z p_t$$

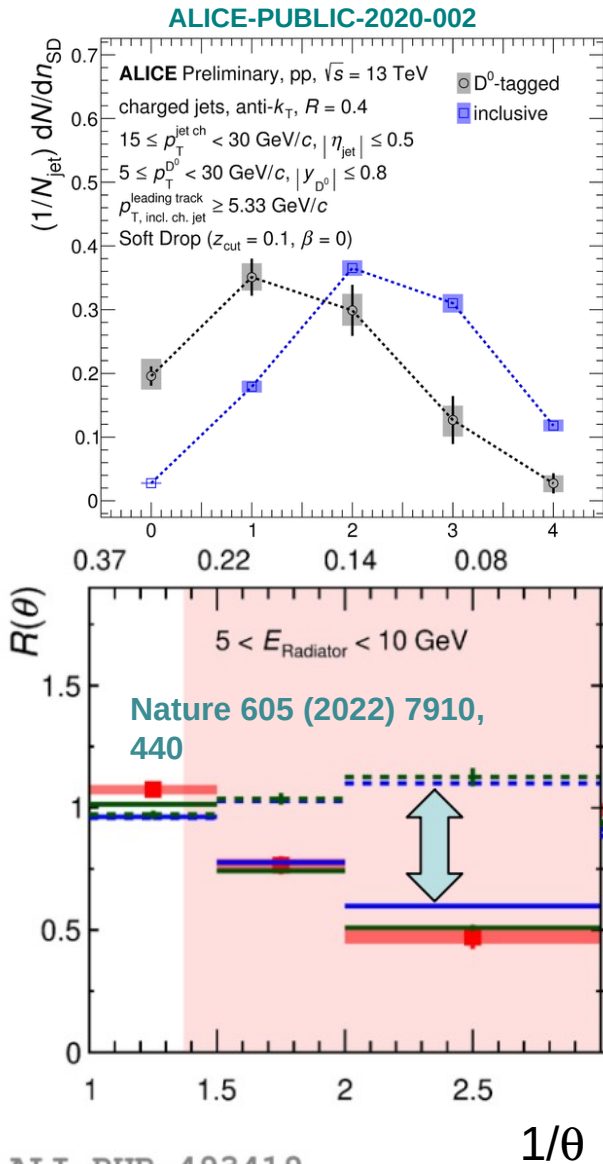


- Elágazások száma: nehéz kvarkok esetén kevesebb

- Összes elágazás szögeloszlása:  
**A tiltott kúp első közvetlen kísérleti bizonyítéka**

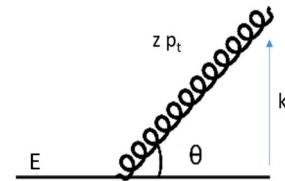


# Nehézkvark-jetek: a tiltott kúp

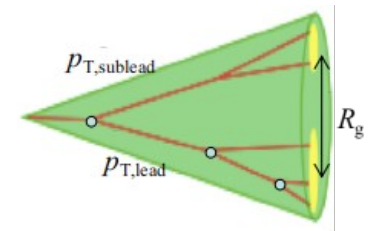


- **Nehéz részecske nem sugároz kis szögben**

$$\theta < \theta_{\text{DC}} = \frac{m_q}{E_q}$$

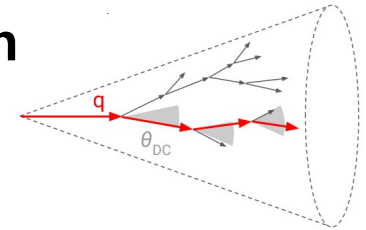


$$\theta \sim k_T/zp_t$$

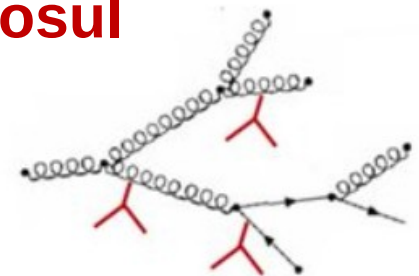


- Elágazások száma: nehéz kvarkok esetén kevesebb

- **Összes elágazás szögeloszlása: A tiltott kúp első közvetlen kísérleti bizonyítéka**



- **Kérdés: Hogyan módosul a QGP-ben?**



# Run 3 - A TPC fejlesztése

EXPECTED **50kHz** (5 pileup during drift time)

Space point distortions up to 1 m



Continuous readout with GEMs  
(Gas Electron Multiplier)

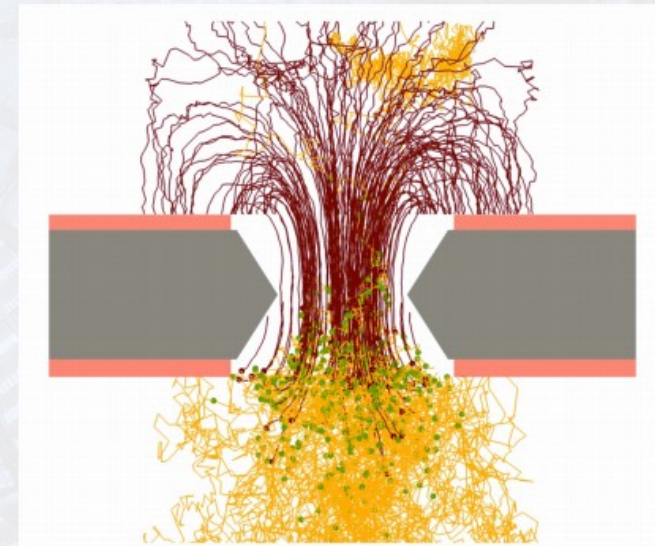
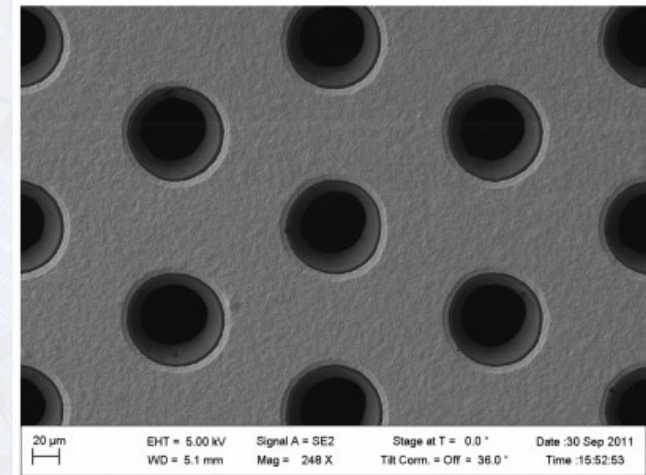
GEM has advantages in:

- Reduction of ion backflow (IBF)
- High rate capability
- No ion tail

Requirement:

- $IBF < 1\%$  at Gain = 2000
- $dE/dx$  resolution  $< 12\%$  for  $^{55}\text{Fe}$
- Stable operation under LHC condition

Dia: Vargyas Márton



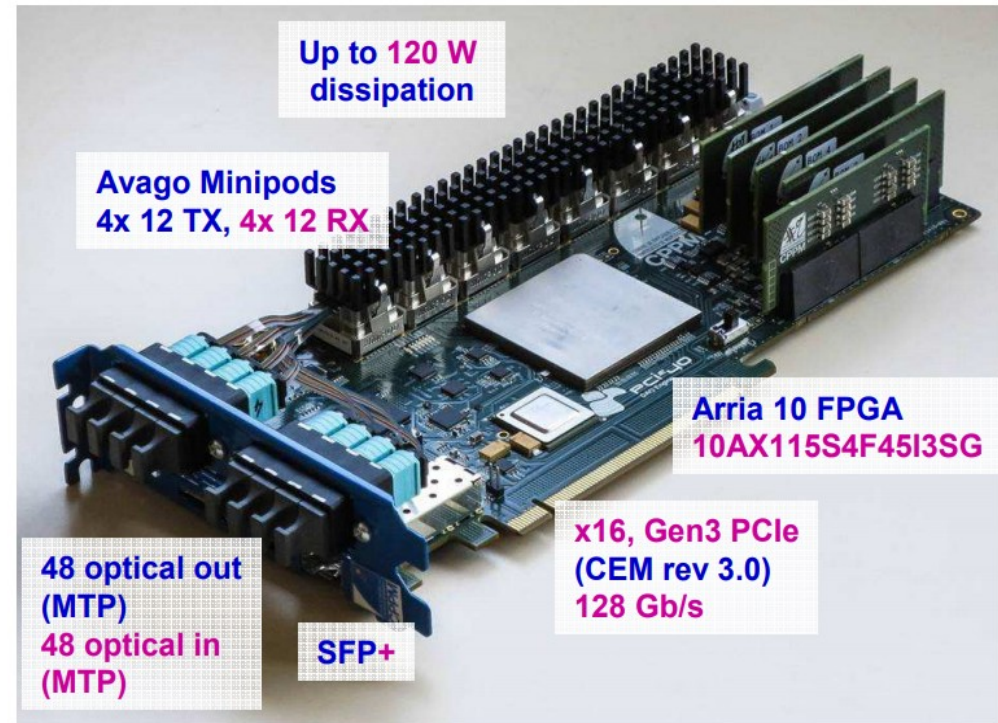


# Run 3 - Adatgyűjtő rendszer fejlesztése

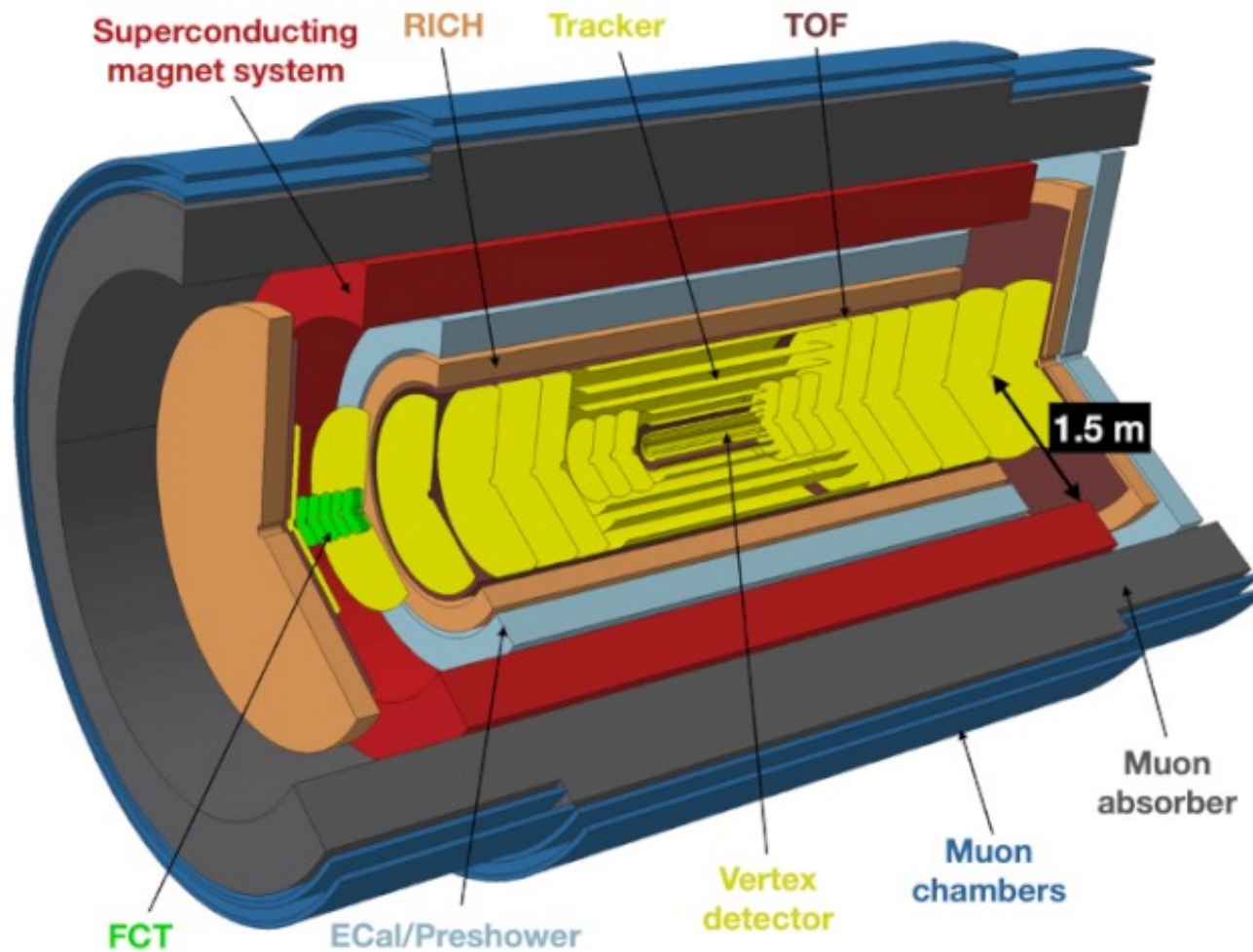
## The CRU project

Dia: Kiss Tivadar

- **Project started in Jan 2014**
  - responsible inst.: Wigner RCP, VECC, CERN
- **Hardware: PCIe40 card of LHCb**
  - x16, Gen3 custom designed PCIe card
  - Developed by CPPM (Marseille) for LHCb
  - ALICE CRU team collaborates with LHCb in HW testing and FW development (e.g. testing of low level interfaces)
- **ALICE specific CRU firmware is developed by the central CRU team**
  - responsible inst. for CERN: Wigner RCP
- **ALICE detector specific firmware modules are developed by detectors' CRU teams**
- **CRUs for ALICE are to be produced in India**
  - responsible inst. for CERN: VECC, Kolkata



# ALICE 3



- MAPS félvezető technológia
- További 20-50x luminozításnövekedés

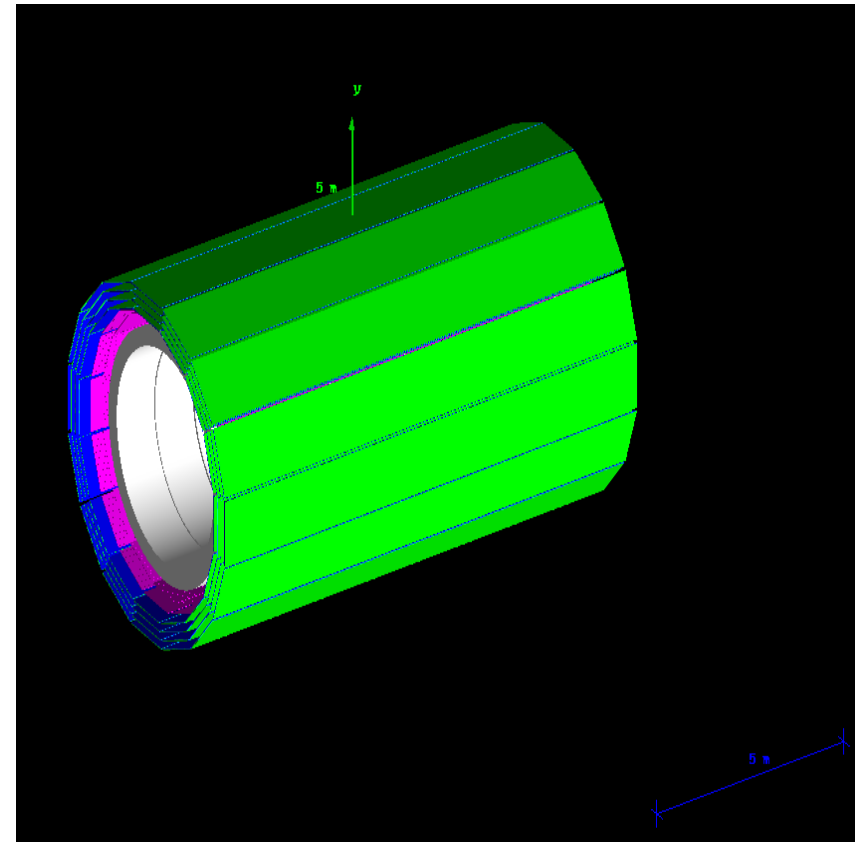
## Modelling for MID with Geant4 -- Detector model

### ALICE3 components (modelled so far)

- Absorber (Fe)
- Scintillators (2 layers, 16 sectors)
- MWPC (4 layers, 16 sectors)
- **Realistic magnetic field** (*thanks Jesus*)

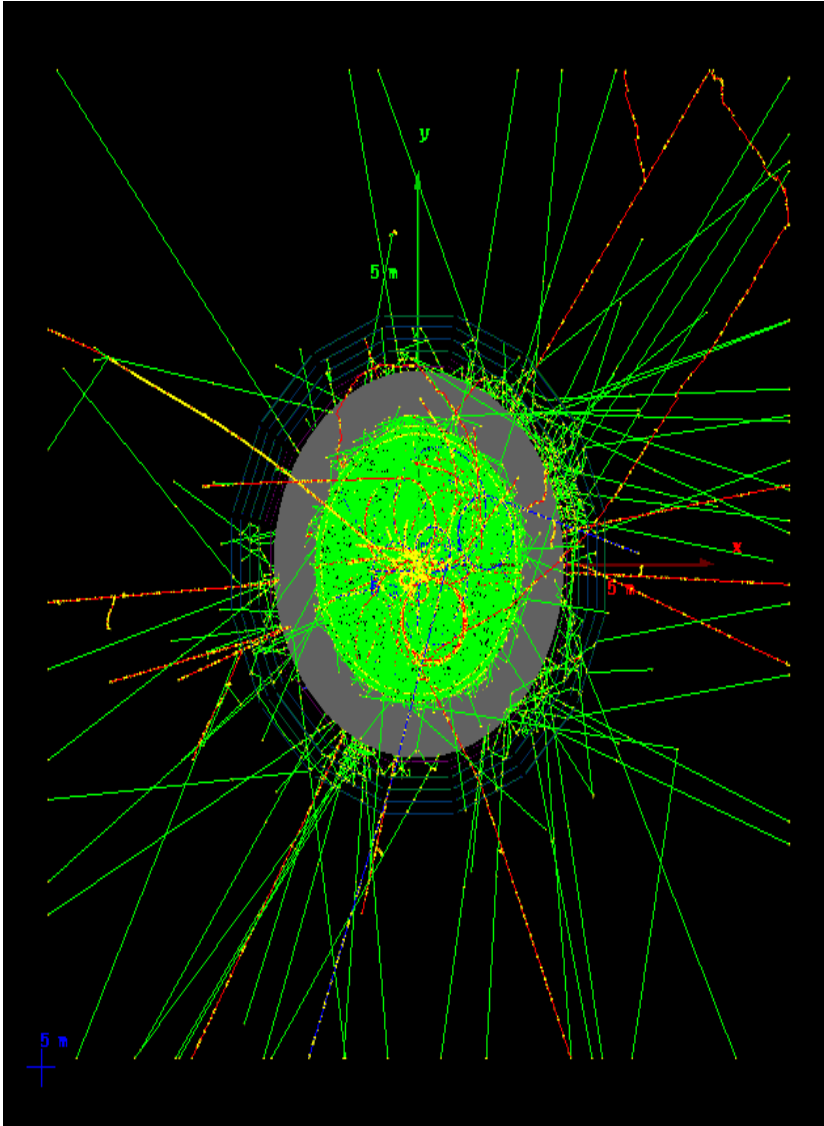
### MWPC

- 16 sectors
- 4 layers
  - Innermost layer at  $R = 305$  cm
  - 15 cm spacing
- Sensitive volume
  - 2 cm thick
  - gas: Ar+CO<sub>2</sub> (82:18)
  - Pads: 0.5 cm wide, z-direction
  - Wires: 0.8 cm spacing, perpendicular to z
- Walls:
  - FR4 (0.528 SiO<sub>2</sub> + 0.472 epoxy)
  - inner: 0.2 cm
  - outer: 0.1 cm

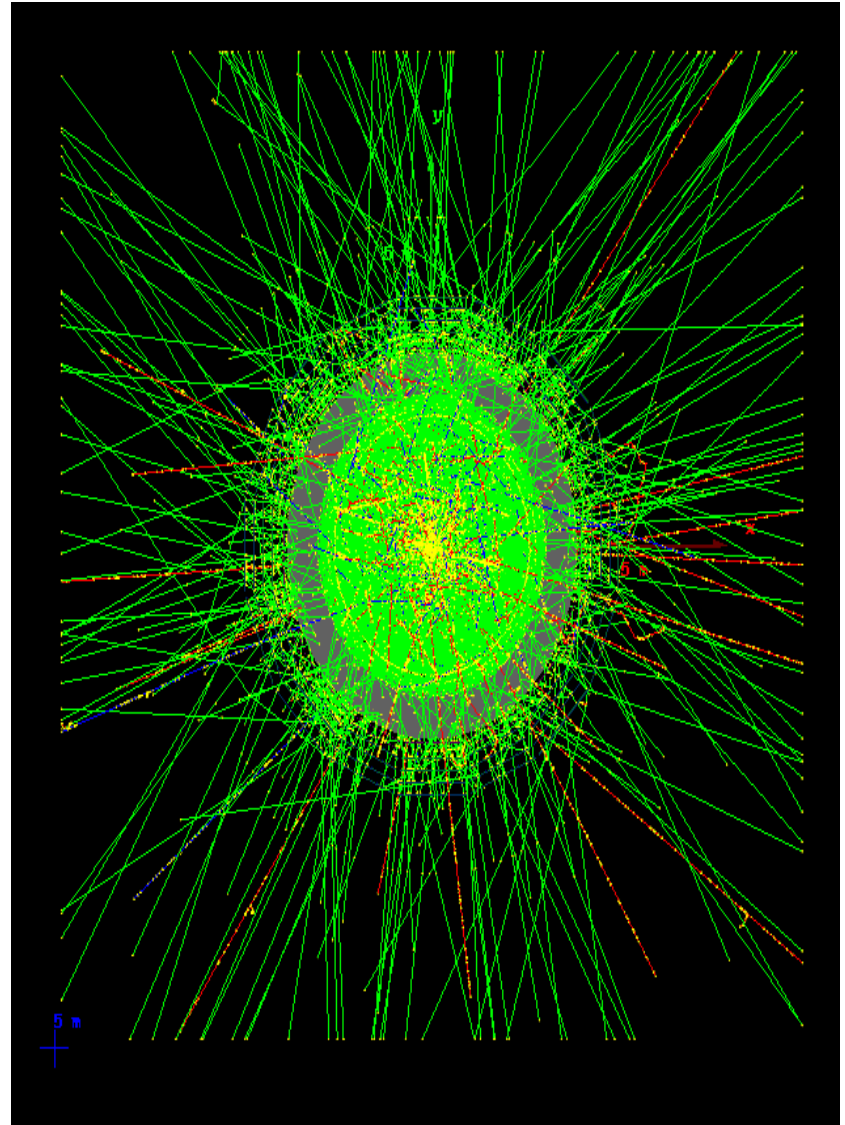


# Realistic events

- PYTHIA8 pp 14 TeV
  - 10 muons embedded



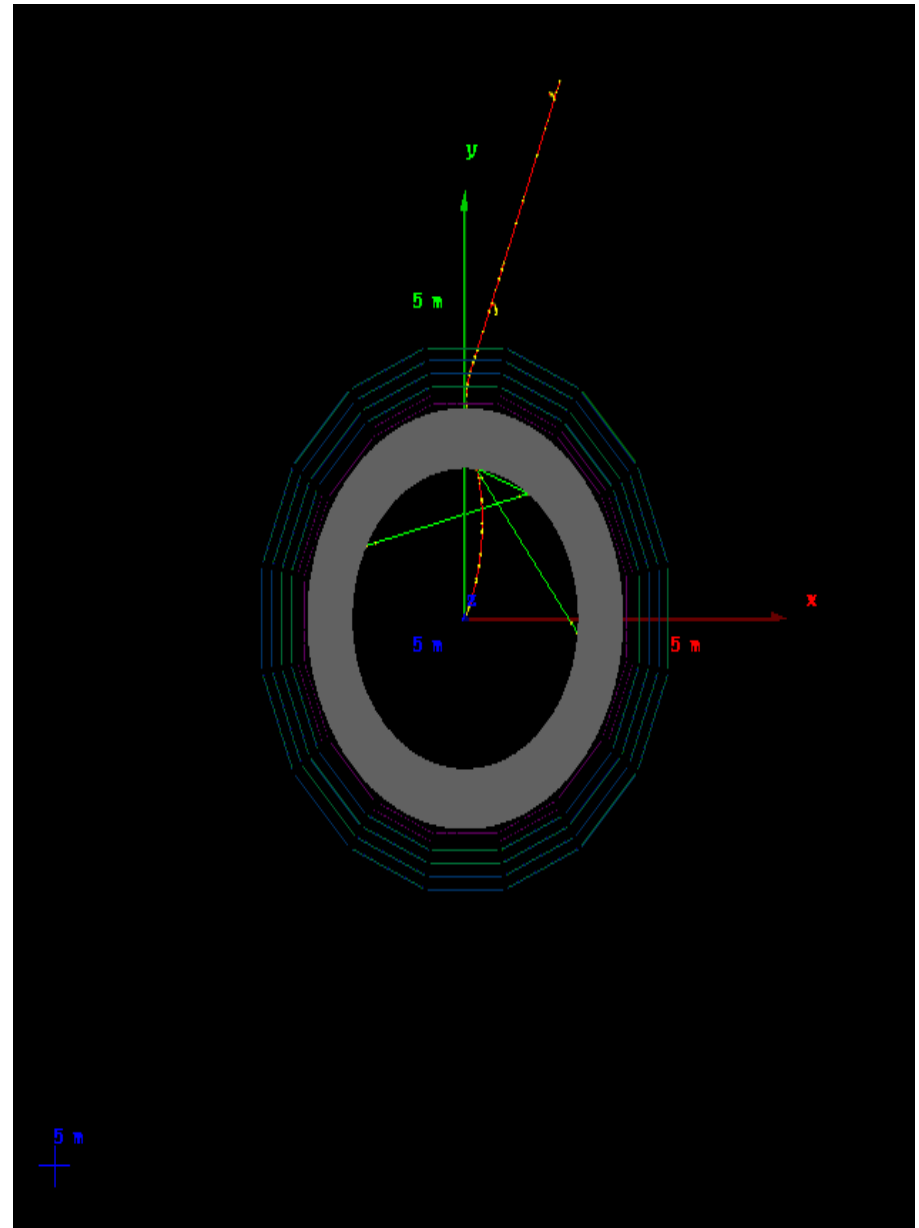
- PYTHIA8/Angantyr Pb-Pb 5.02 TeV
  - 10 muons embedded



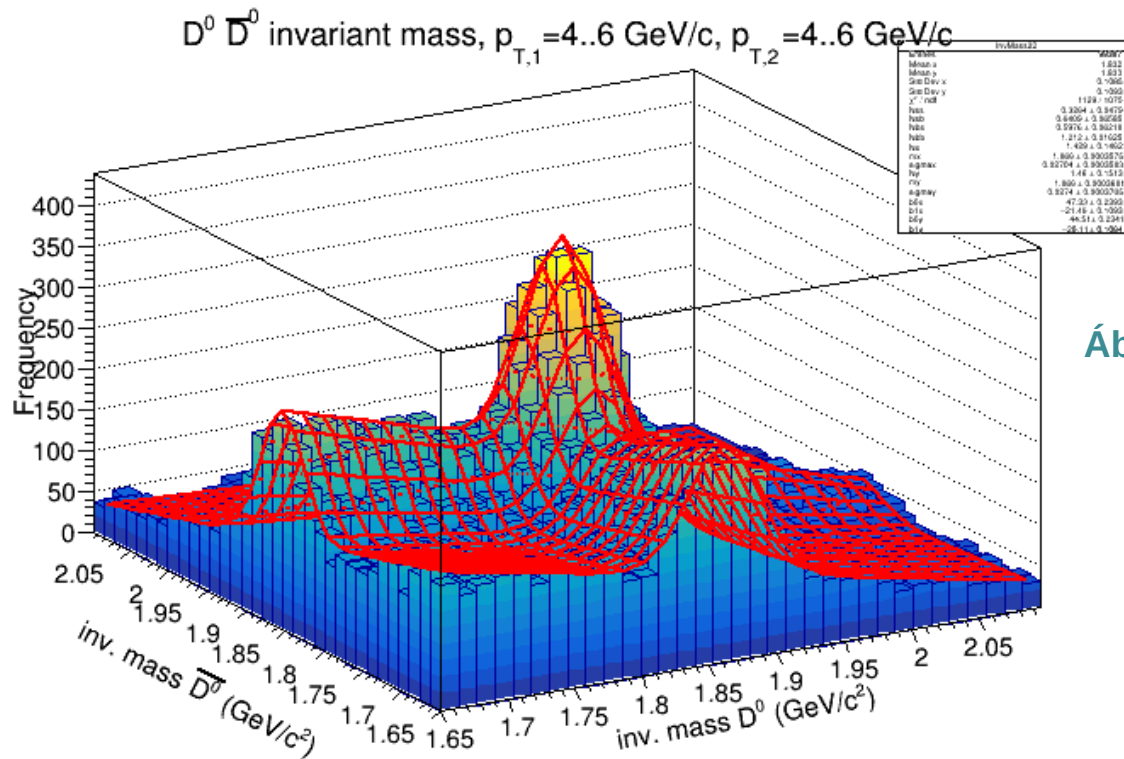
# Single particle response

## Particle Gun

- Goal
- Take a step back
- Focus on single muons
- Understand response in details
- => Muon detection vs. pion contamination
  
- Method
- Shoot many (10000) times with the same momentum
- Compute expected muon response
- Compare muon and pion response
- Single-particle efficiencies
  
- Potential
- Optimize layers
- Evaluate effect of granularity



# ALICE 3

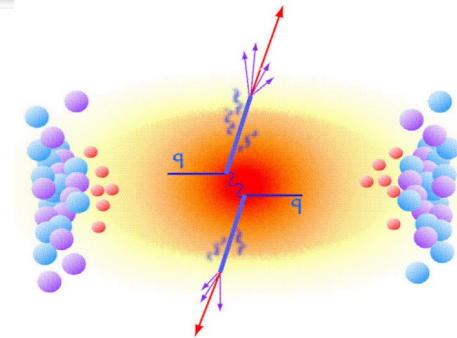


Ábra: Frajna Eszter

- $D^0$  és anti- $D^0$  korrelációi
- ALICE3 : Mérhető pp és A-A ütközésben is
  - pp: jet-fragmentáció, gluonhasadás
  - A-A: jetek módosulása, kölcsönhatás a QGP-val

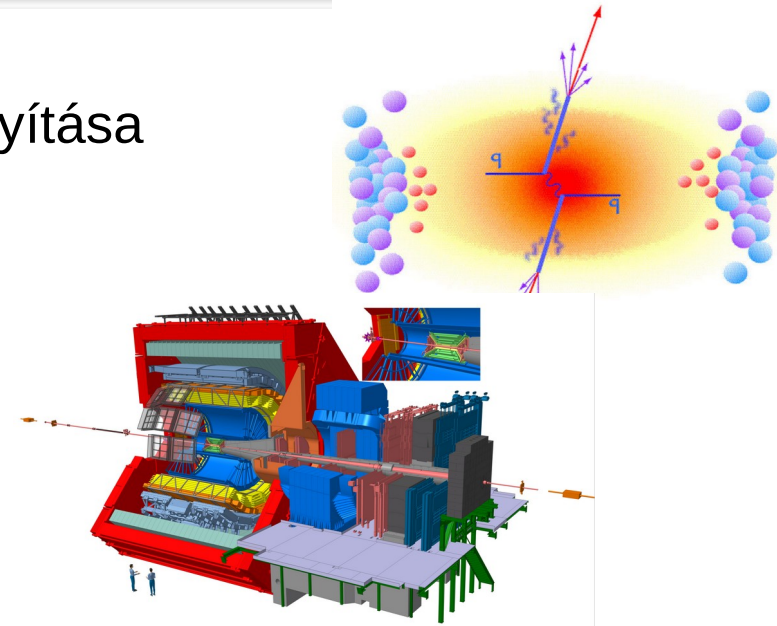
# A nehéz kvarkok korszaka

- RHIC, SPS, LHC-1 (2000-2012)
  - a Kvark-gluon plazma létének bebizonyítása
  - alapvető tulajdonságainak megértése



# A nehéz kvarkok korszaka

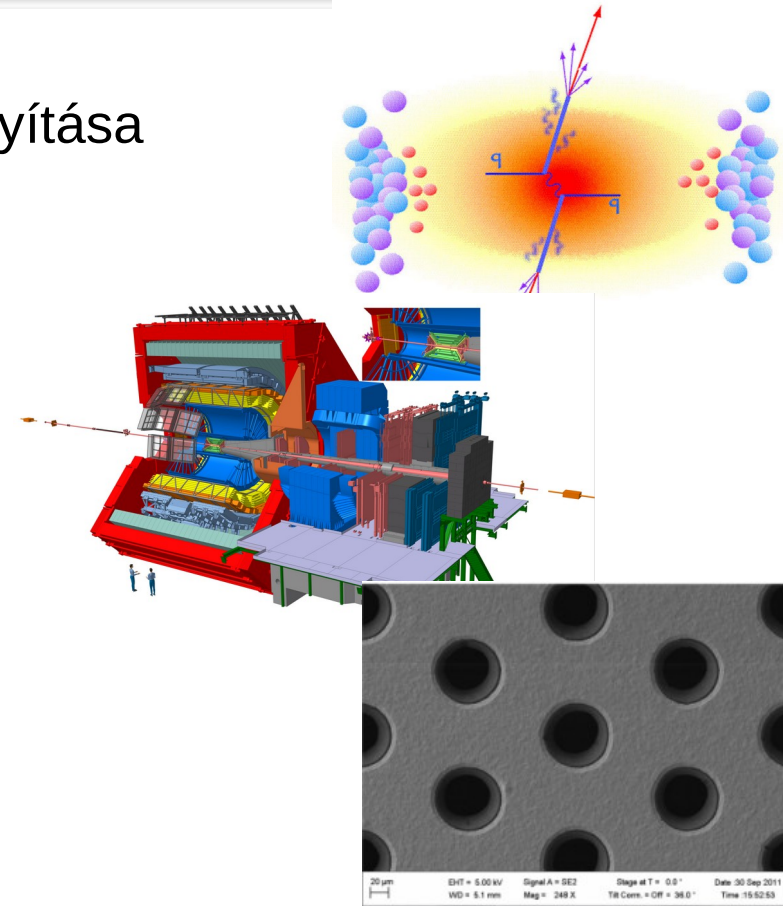
- RHIC, SPS, LHC-1 (2000-2012)
  - a Kvark-gluon plazma létének bebizonyítása
  - alapvető tulajdonságainak megértése
- LHC-2, RHIC BES-II (2010-2020)
  - Magasabb energia, ütközésszám
  - Precíziós könnyűkvark-mérések
  - Nehézkvark-mérések
  - Részletes jetszerkezeti vizsgálatok





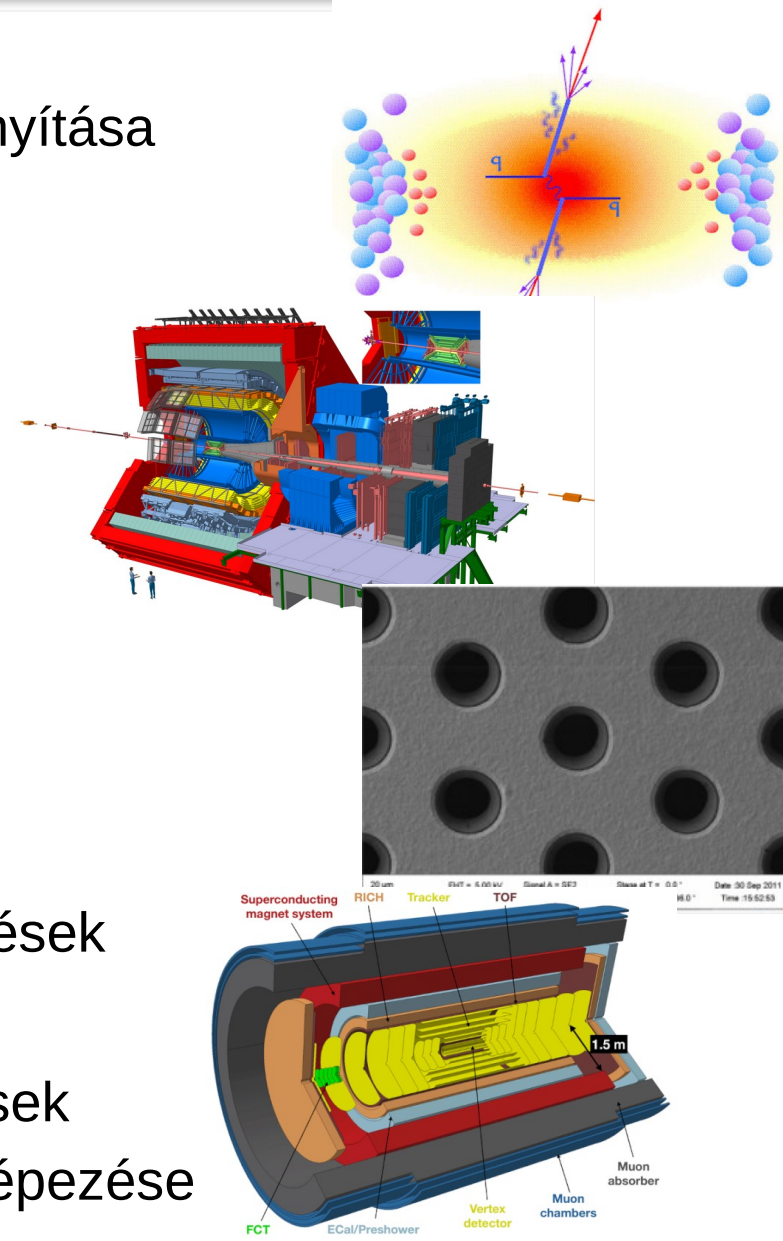
# A nehéz kvarkok korszaka

- **RHIC, SPS, LHC-1 (2000-2012)**
  - a Kvark-gluon plazma létének bebizonyítása
  - alapvető tulajdonságainak megértése
- **LHC-2, RHIC BES-II (2010-2020)**
  - Magasabb energia, ütközésszám
  - Precíziós könnyűkvark-mérések
  - Nehézkvark-mérések
  - Részletes jetszerkezeti vizsgálatok
- **LHC-3 (2022-)**
  - Tovább növelt ütközésszám
  - TPC, ITS, DAQ fejlesztése
  - Precíziós beauty és jetszerkezet-mérések



# A nehéz kvarkok korszaka

- **RHIC, SPS, LHC-1 (2000-2012)**
  - a Kvark-Gluon plazma létének bebizonyítása
  - alapvető tulajdonságainak megértése
- **LHC-2, RHIC BES-II (2010-2020)**
  - Magasabb energia, ütközésszám
  - Precíziós könnyűkvark-mérések
  - Nehézkvark-mérések
  - Részletes jetszerkezeti vizsgálatok
- **LHC-3 (2022-)**
  - Tovább növelt ütközésszám
  - TPC, ITS, DAQ fejlesztése
  - Precíziós beauty és jetszerkezet-mérések
- **ALICE-3 (~ 2030+)**
  - Magasan differenciált precíziós mérések
  - Nehézion-ütközések részletes feltérképezése



# Az ALICE-Budapest csoport

## Analízis

Wigner FK Hadronfizika

<http://hadronphysics.wigner.hu>

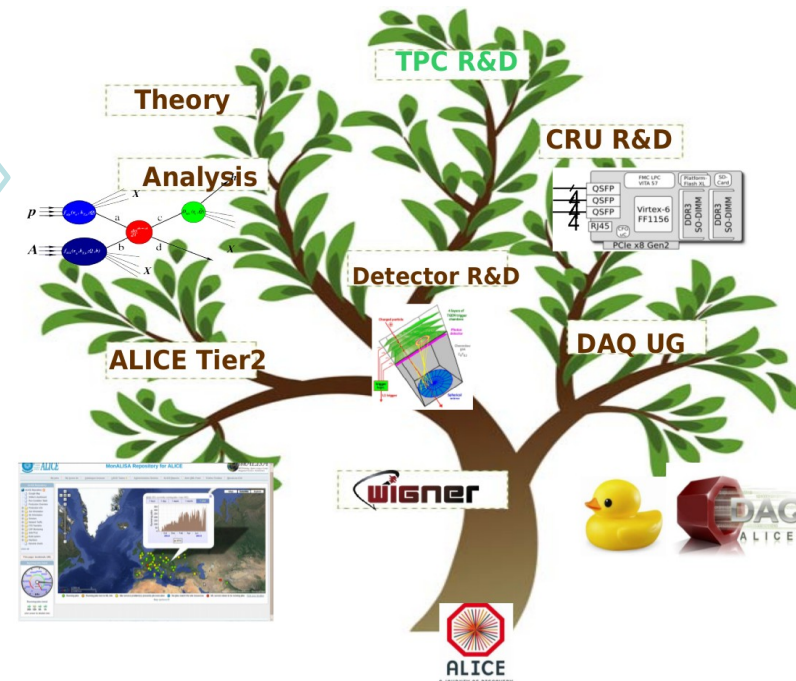
## Kísérlet & fenomenológia

- Nehéz kvarkok: jetszerkezet, korrelációk, mezonok és barionok fragmentációja
- Kis ütköző rendszerek: QCD kemény-lágy átmeneti tartománya, QCD kis cseppjei, háttéresemény
- Nagy impulzusú részecskekeltés

## Tagjaink

- Vértesi Róbert
- Varga-Kőfaragó Mónika
- Aditya Nath Mishra
- Bencédi Gyula
- Gyulai László
- Varga Zoltán
- Frajna Eszter
- Sudár Ákos
- Horváth Anikó
- Futó Endre
- Misák Anett

<http://alice.kfki.hu>



G.G. Barnaföldi: Wigner ALICE Group

kapcsolat:  
Barnaföldi Gergely Gábor  
Lévai Péter  
Vértesi Róbert

# Az ALICE-Budapest csoport

## Analízis

Wigner FK Hadronfizika

<http://hadronphysics.wigner.hu>

## Kísérlet & fenomenológia

- Nehéz kvarkok: jetszerkezet, korrelációk, mezonok és barionok fragmentációja
- Kis ütköző rendszerek: QCD kemény-lágy átmeneti tartománya, QCD kis cseppjei, háttéresemény
- Nagy impulzusú részecskekeltés

## Tagjaink

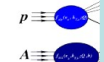
- |                         |                 |
|-------------------------|-----------------|
| • Vértesi Róbert        | • Sudár Ákos    |
| • Varga-Kőfaragó Mónika | • Horváth Anikó |
| • Aditya Nath Mishra    | • Futó Endre    |
| • Bencédi Gyula         | • Misák Anett   |
| • Gyulai László         |                 |
| • Varga Zoltán          |                 |
| • Frajna Eszter         |                 |

<http://alice.kfki.hu>

## Elmélet & Számítástechnika

Barnaföldi Gergely Gábor  
Lévai Péter, Bíró Gábor,  
A.N. Mishra, Sudár Á.

- ALICE Grid Tier 2, 500 CPU
- Analysis facility
- Phenomenology



## Adatgyűjtő rendszer

Kiss Tivadar, Dávid Ernő

- CRU (folytonos kiolvasórendszer)

## Detektorfejlesztés

Varga Dezső, Boldizsár László,  
Hamar Gergő, Gera Ádám

- Gázdetektorok: TPC fejlesztése

# Köszönöm a figyelmet!

Varga Zoltán, Vértesi Róbert

[vertesi.robert@wigner.hu](mailto:vertesi.robert@wigner.hu)

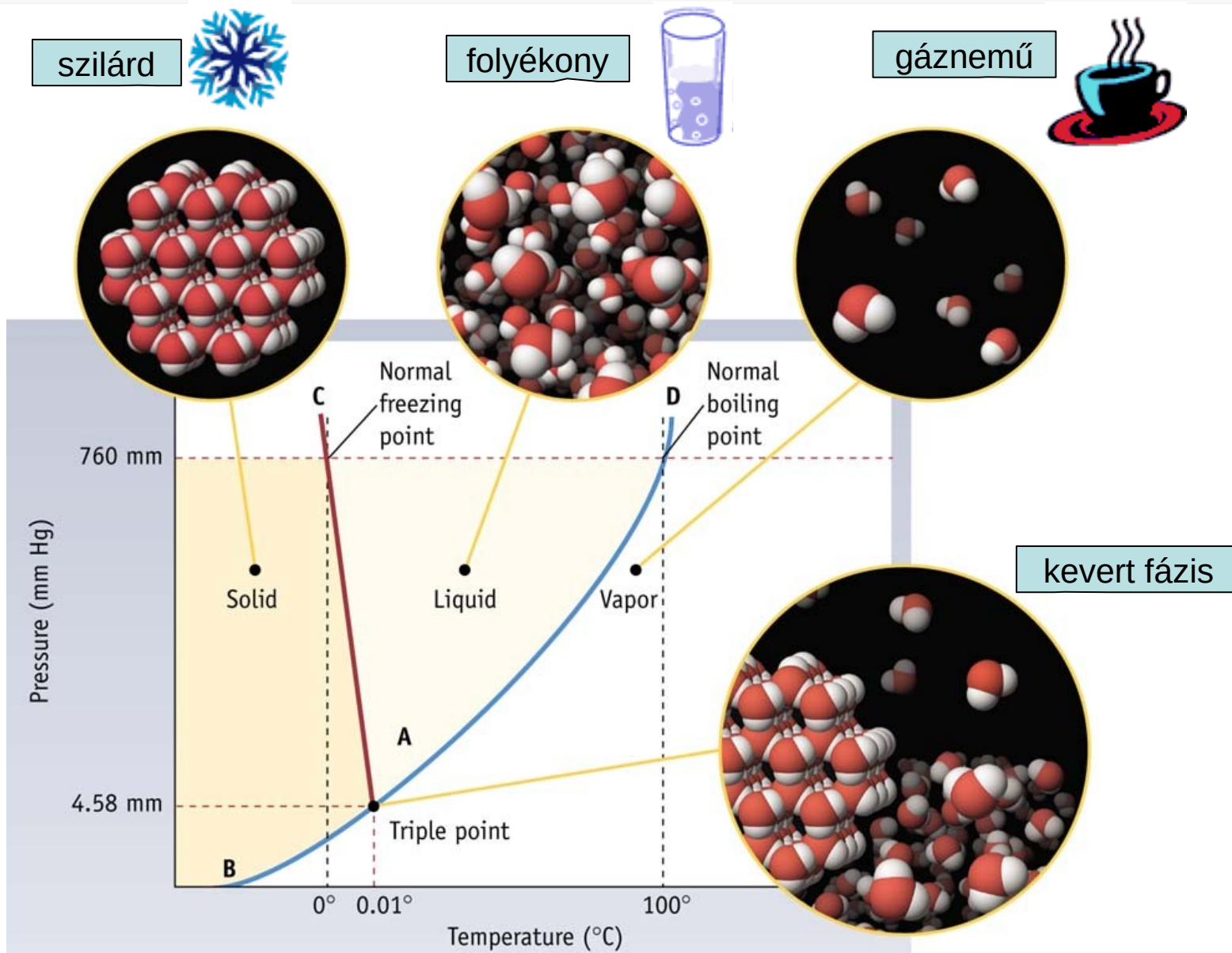
MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont  
Részecske- és Magfizikai Intézete

ALICE-Budapest csoport  
<http://alice.wigner.hu>

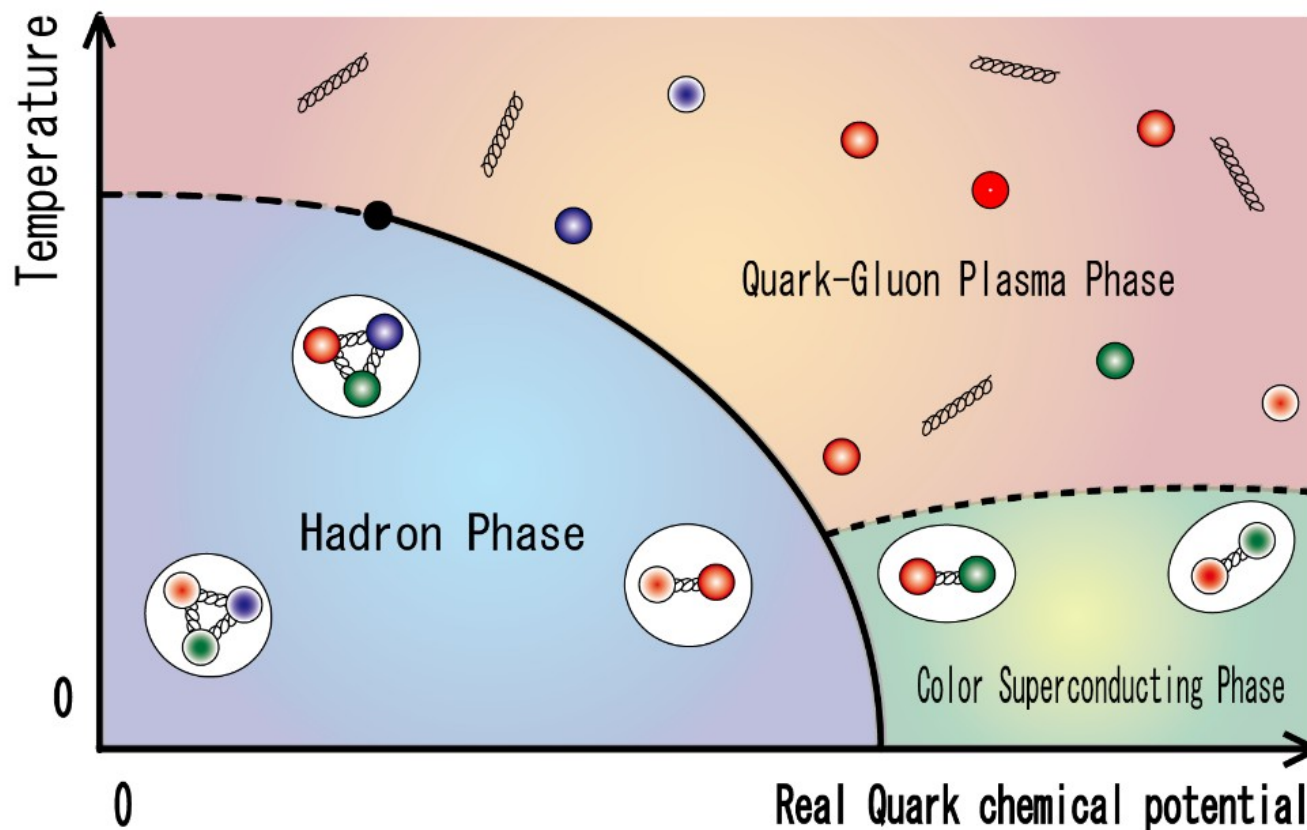


ALICE

# A víz fázisdiagramja

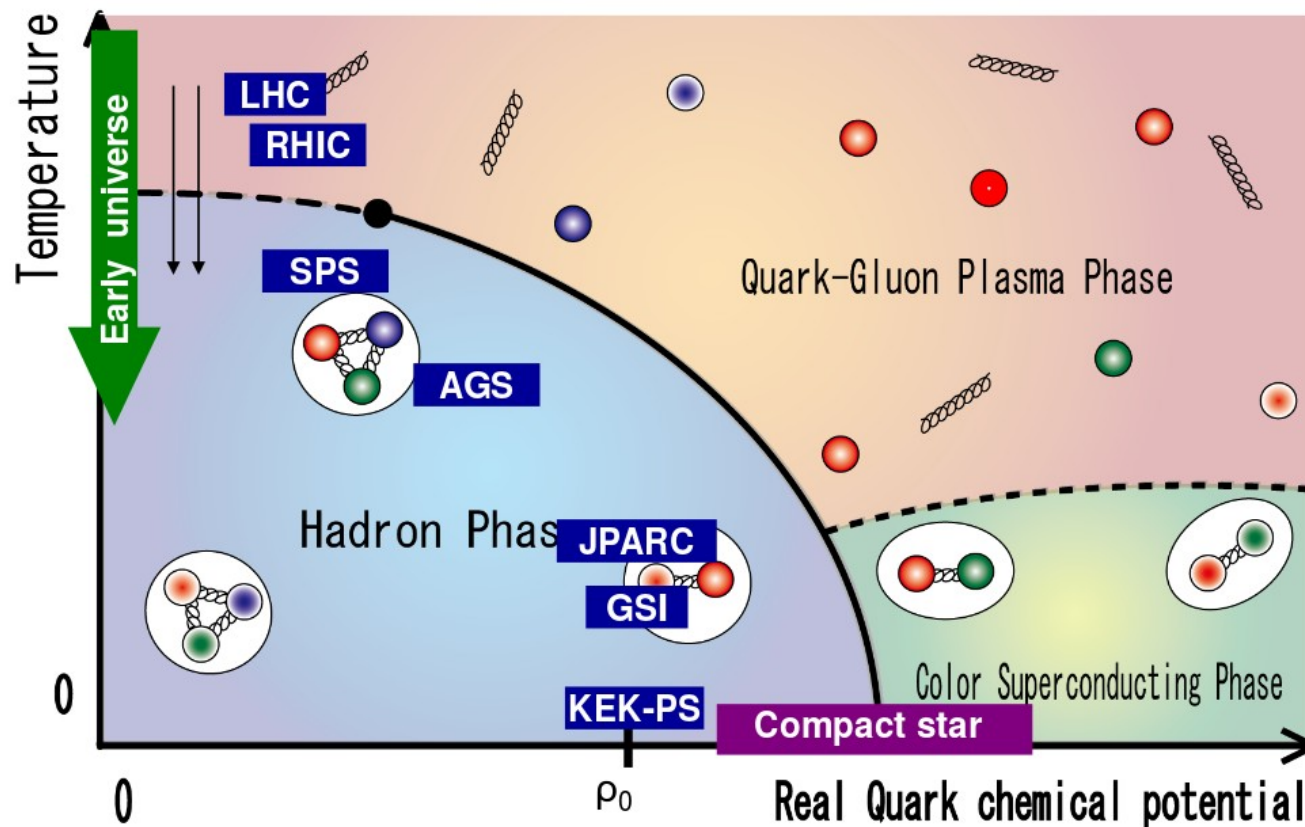


# A QCD fázisdiagramja



- Cél: a QCD fázisainak feltérképezése, megértése

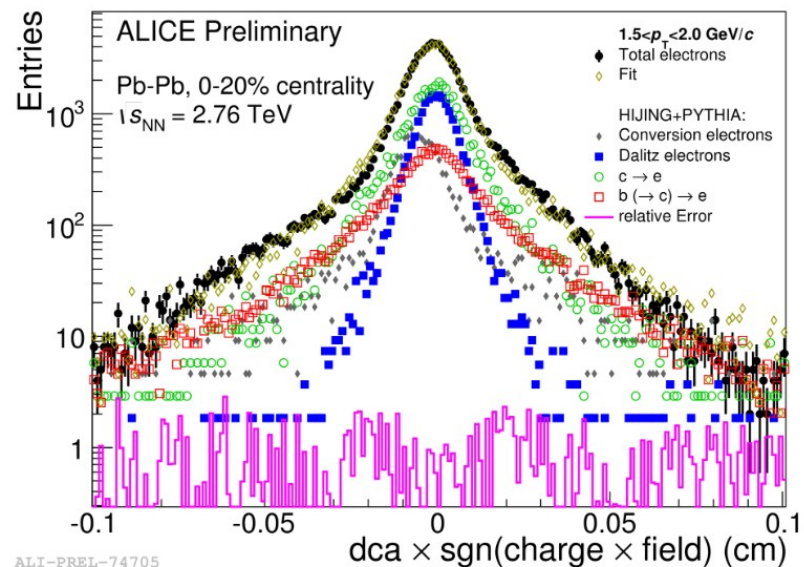
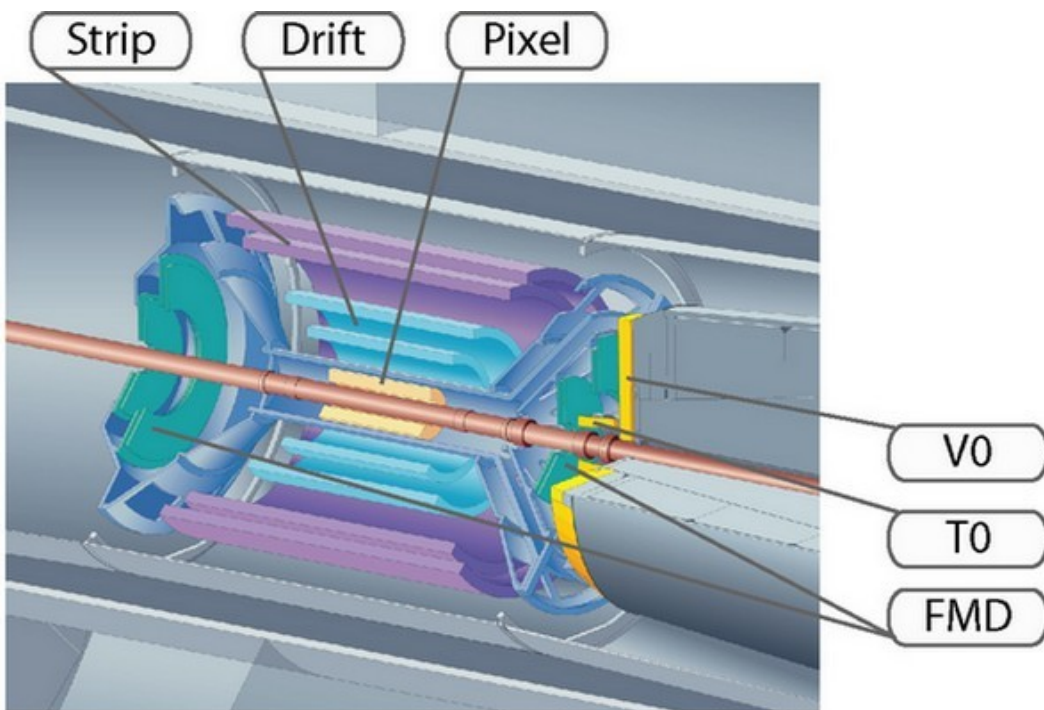
# A QCD fázisdiagramja



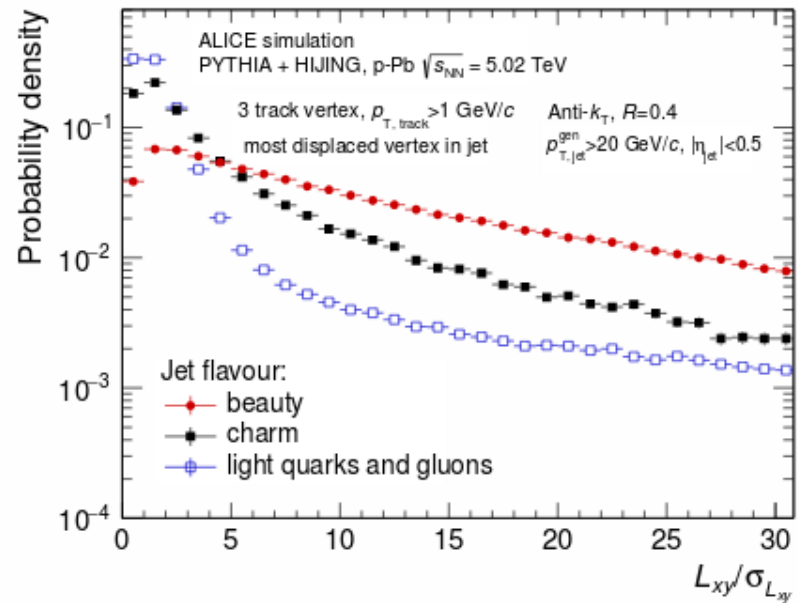
- Cél: a QCD fázisainak feltérképezése, megértése
  - A kvark-gluon plazma megismerése
  - Látjuk-e a fázisátalakulást? Milyen a jellege?
  - Van-e kritikus pont?



# Másodlagos vertex keresése



ALI-PREL-74705



ALI-SIMUL-95610

# Maganyag-módosulás - RHIC

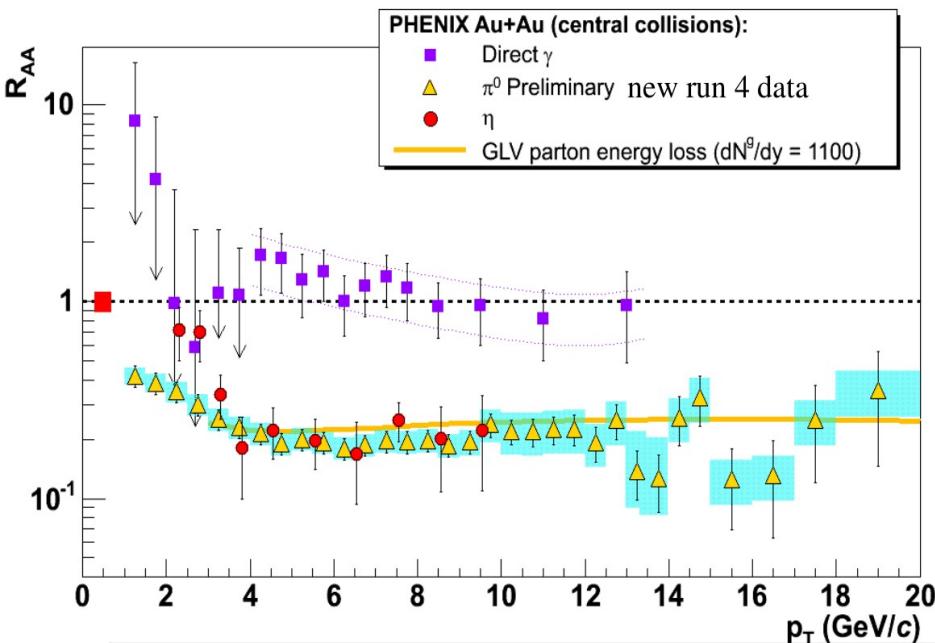
- A+A hozam összevetése a p-p ütközésekével
- $R_{AA} = 1$  : a maganyagnak nincs hatása
- $R_{AA} < 1$  : impulzusvesztés a maganyagban

$$R_{AA} = \frac{1}{\langle N_{coll} \rangle} \frac{dN/dy^{AuAu}}{dN/dy^{pp}}$$

Hozam nehézion-  
ütközésekben

Elemi nukleon-nukleon  
ütközések száma  
nehézion-  
reakcióban

Hozam p-p  
ütközésekben



**BNL RHIC  $R_{AA}$  mérések** NPA 757 (2005)

**Gyulassy-Lévai-Vitev modell** NPB 571 (2000)

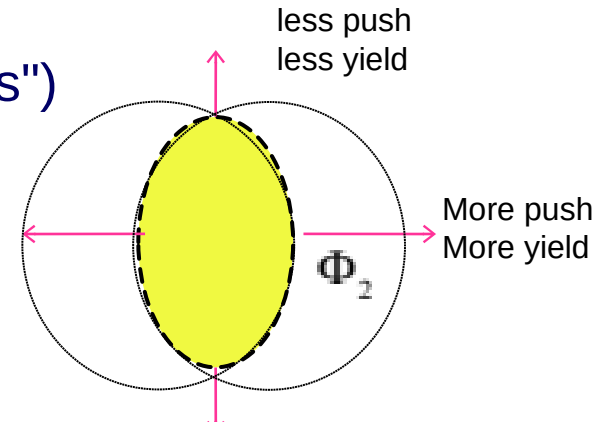
- Könnyű hadronok kb. azonos mértékben nyomódnak el ( $R_{AA}^h \sim 0.2$ )
- Foton-elnyomódás nem tapasztalható ( $R_{AA}^\gamma \sim 1$ )
  - A csak EM kölcsönható részecske számára a közeg átlátszó

Az erősen kölcsönható QGP első meggyőző bizonyítéka

# Azimutális anizotrópia

- Impulzus-eloszlás ellipticitása ("elliptikus folyás")

$$\frac{dN}{d\phi} \approx 2v_2 \cos(\phi - \Phi_1)$$



- Rendkívül erős kollektivitás!

**=> Erősen csatolt QGP**

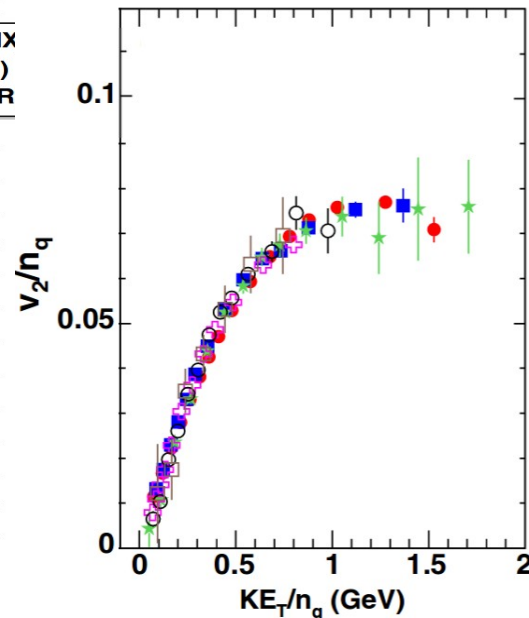
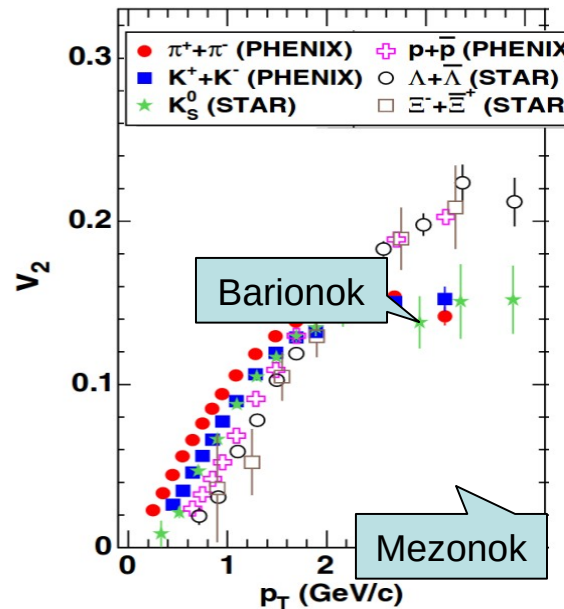
- Hidrodinamikai modellek jól leírják
- Viszkozitása rendkívül kicsi  
=> "Tökéletes" folyadék

**Aszimptotikus szabadság?**

- Konstituens kvarkok számával való skálázás

**=> Szabadsági fokok:  $k_{\text{val}} \kappa_{\text{UK}}$**

- Megj.: LHC-energiákon a skálázás nem tökéletes

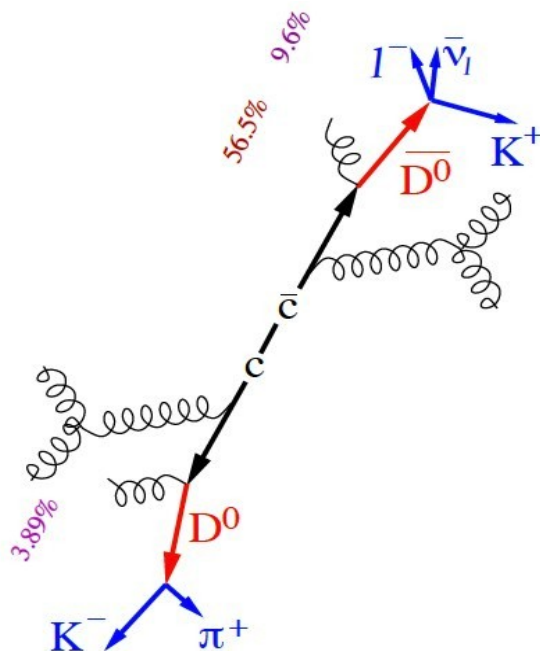


# A nehéz kvarkok észlelése

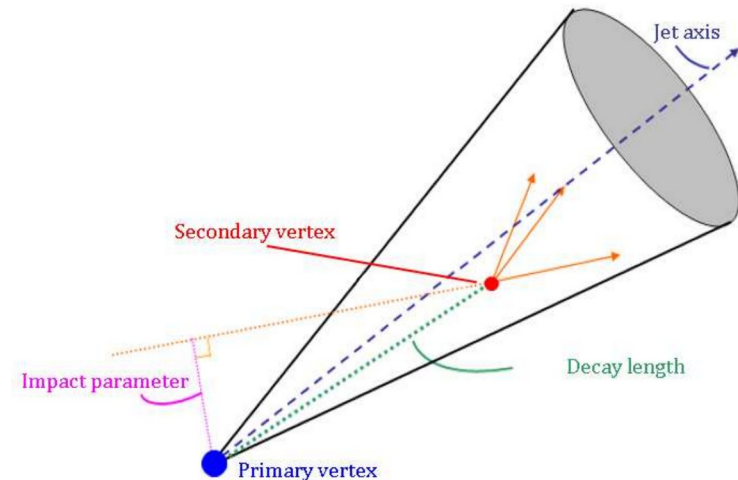
- Kvarkbezárás: **c** és **b** közvetett kimutatás lehetséges csak
- Hadronizáció során mezonokká (**D**, **B**) alakul

- Kimutatás:

**bojlástermékek azonosítása**



**a bojlás helyének visszakövetése**  
(másodlagos vertex rekonstrukciója)



Élettartamok:  $c\tau(D) \sim 100\text{-}300 \mu\text{m}$

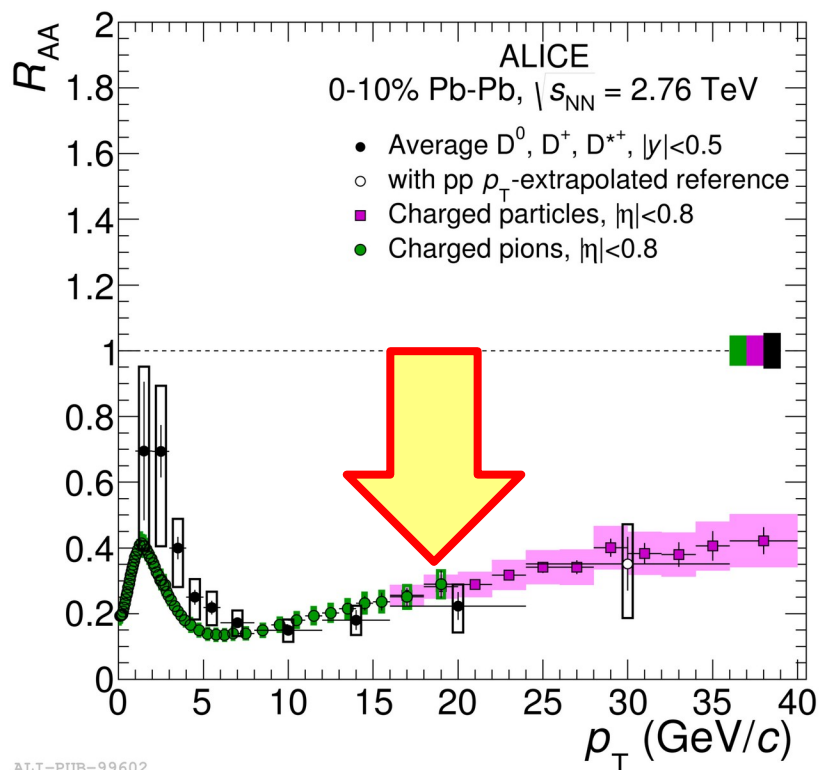
$c\tau(B) \sim 400\text{-}500 \mu\text{m}$

Másodlagos vertex felbontás:  $< 100 \mu\text{m}$

# D-mezonok nukleáris módosulása

- Pb-Pb hozam összevetése a p-p ütközésekével
- $R_{AA} = 1$  : a maganyagnak nincs hatása
- $R_{AA} < 1$  : impulzusvesztés a maganyagban

**A nehéz kvarkra hat a forró maganyag!**



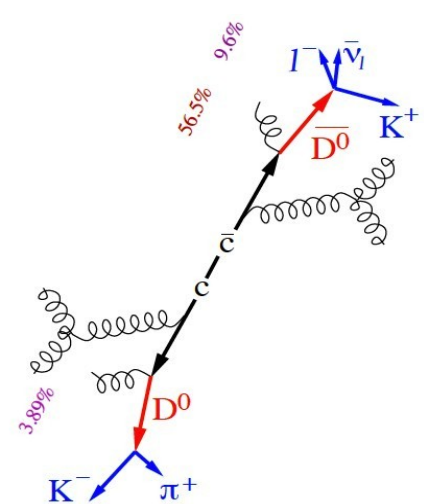
ALI-PUB-99602

$$R_{AA}(p_T) = \frac{1}{\langle N_{coll} \rangle} \frac{dN_{AA}/dp_T}{dN_{pp}/dp_T}$$

Hozam nehézion-  
ütközésekben

Elemi nukleon-nukleon  
ütközések száma  
nehézion- reakcióban

Hozam p-p  
ütközésekben



# D-mezonok nukleáris módosulása

- Pb-Pb hozam összevetése a p-p ütközésekével
- $R_{AA} = 1$  : a maganyagnak nincs hatása
- $R_{AA} < 1$  : impulzusvesztés a maganyagban

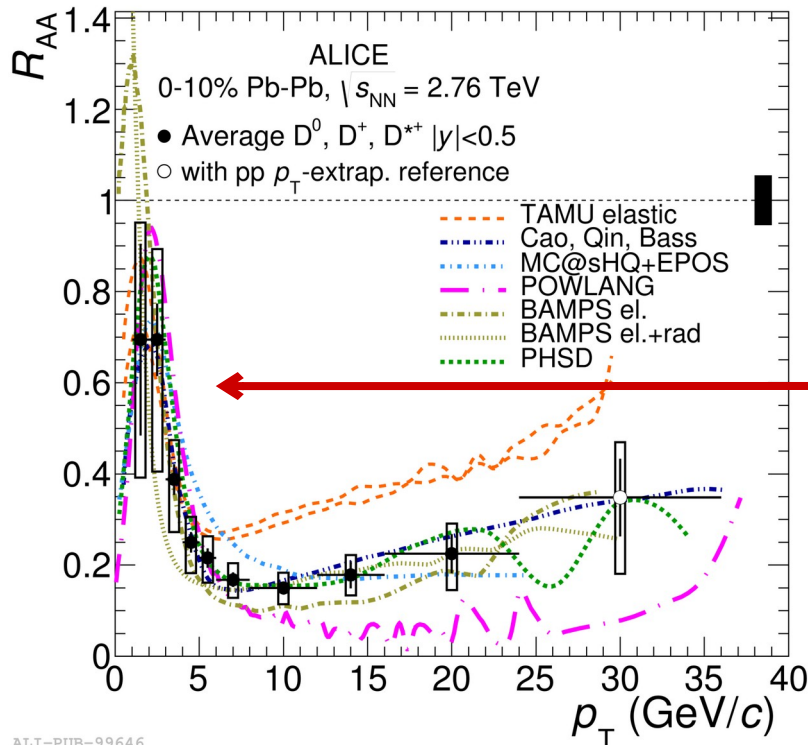
Hozam nehézion-  
ütközésekben

$$R_{AA}(p_T) = \frac{1}{\langle N_{coll} \rangle} \frac{dN_{AA}/dp_T}{dN_{pp}/dp_T}$$

Elemi nukleon-nukleon  
ütközések száma  
nehézion- reakcióban

Hozam p-p  
ütközésekben

**A nehéz kvarkra hat a forró maganyag!**



- **Összevetés modellekkel:**
  - **Transzportjellemzők**
  - **Kollektív dinamika**
  - **Termikus jellemzők**
  - **Energiaveszteség**
  - **Hadronképződés**

# D-mezonok nukleáris módosulása

- Pb-Pb hozam összevetése a p-p ütközésekével
- $R_{AA} = 1$  : a maganyagnak nincs hatása
- $R_{AA} < 1$  : impulzusvesztés a maganyagban

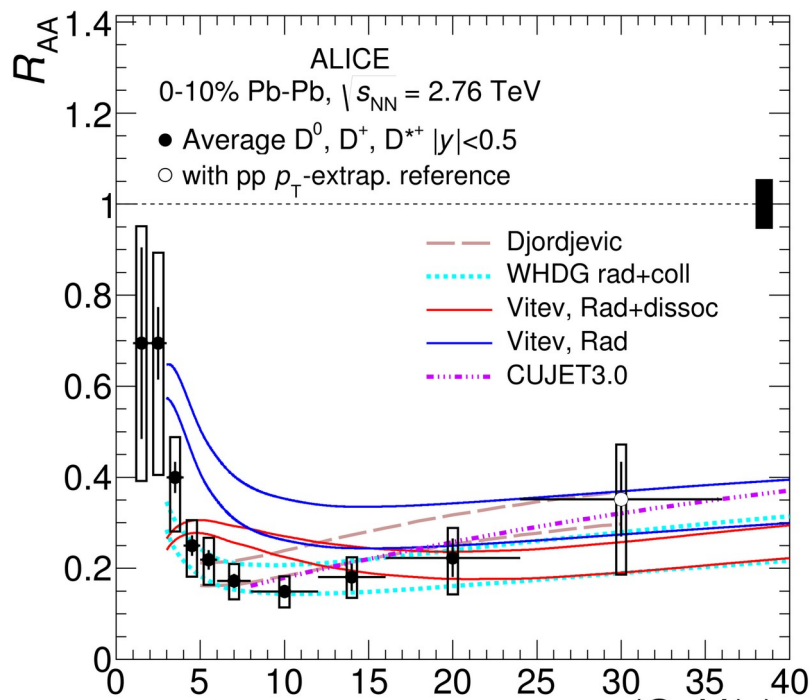
Hozam nehézion-  
ütközésekben

$$R_{AA}(p_T) = \frac{1}{\langle N_{coll} \rangle} \frac{dN_{AA}/dp_T}{dN_{pp}/dp_T}$$

Elemi nukleon-nukleon  
ütközések száma  
nehézion- reakcióban

Hozam p-p  
ütközésekben

**A nehéz kvarkra hat a forró maganyag!**



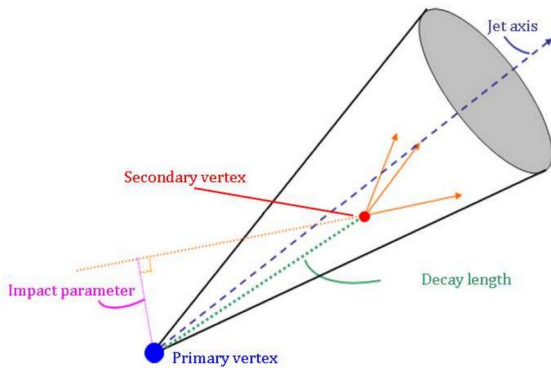
## Összevetés modellekkel:

- **Transzportjellemzők**
- **Kollektív dinamika**
- **Termikus jellemzők**
- **Energiaveszteség**
- **Hadronképződés**

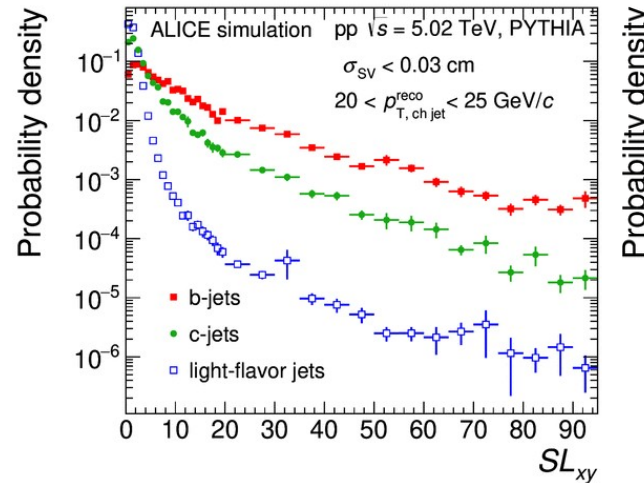
Megszorítások az erős kölcsönhatás jellemzőire

# b-jetek mérése

- Nehéz-kvarkot tartalmazó jetek azonosítása a **másodlagos vertex** keresésével

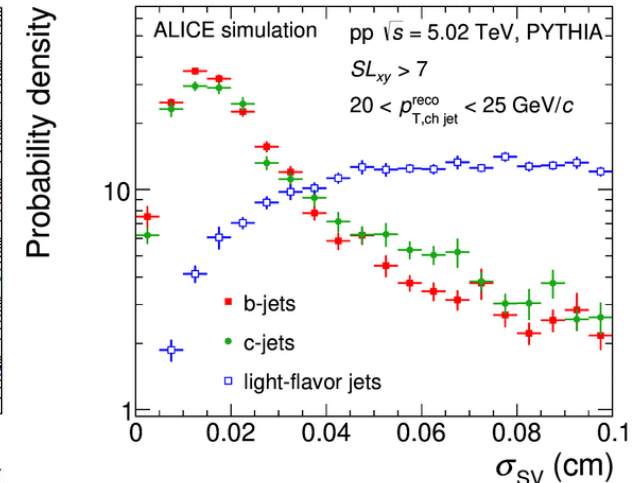


**elhelyezkedés**



I-PUB-497693

**diszperzió**



-PUB-497698

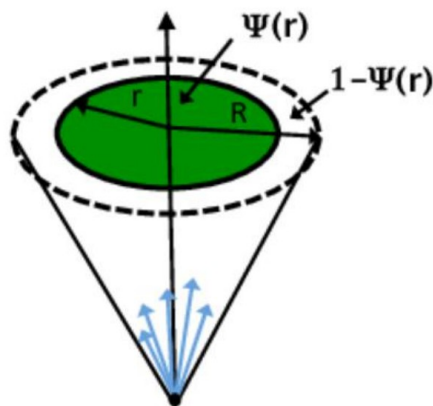
- **b-jetek**
- **c-jetek**
- **könnyűkvark-jetek**

- Az ALICE széles impulzus-tartományban képes a b-jeteket elkülöníteni

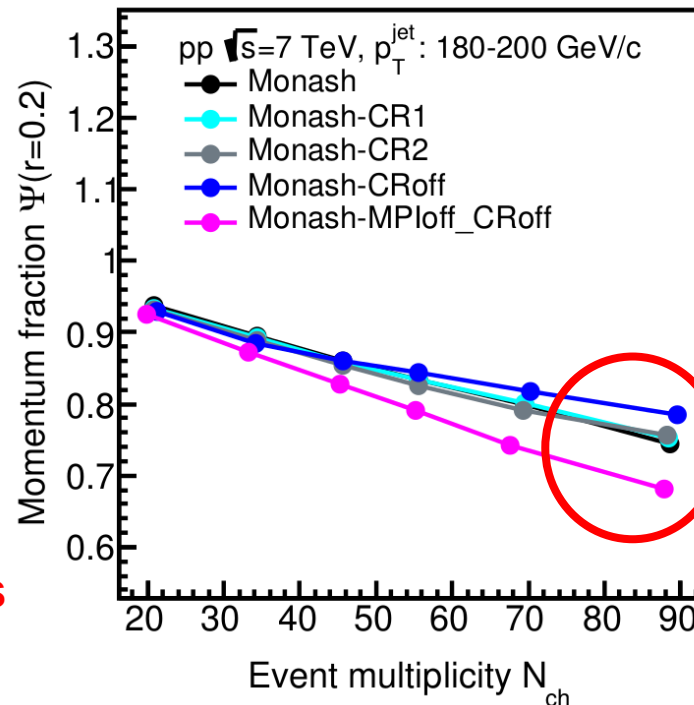


# Jetek módosulása p+p-ben

- Szimulációk arra utalnak, hogy módosulhat a jetek szerkezete nagy multiplicitású p+p ütközésekben is
- Ezt a sokparton-kölcsönhatások (MPI) okozzák



**p+p**  
**kis multiplicitás**

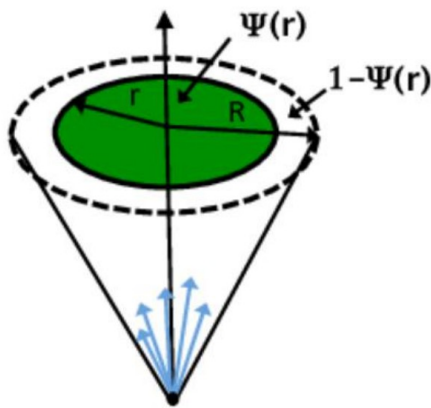


**<- van MPI**  
**<- nincs MPI**

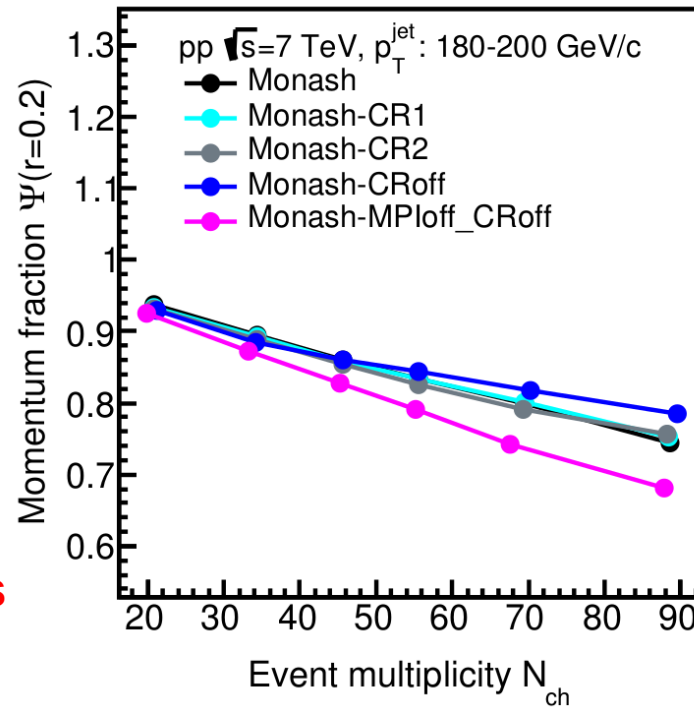
**p+p**  
**nagy multiplicitás**

# Jetek módosulása p+p-ben

- Szimulációk arra utalnak, hogy módosulhat a jetek szerkezete nagy multiplicitású p+p ütközésekben is
- Ezt a sokparton-kölcsönhatások (MPI) okozzák



**p+p**  
**kis multiplicitás**



**<- van MPI**  
**<- nincs MPI**

**p+p**  
**nagy multiplicitás**

**Mit mutat majd a kísérlet?**