

Kvarkanyag vizsgálata a CERN LHC **ALICE** kísérletében

Vértesi Róbert

vertesi.robert@wigner.mta.hu

MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont
Részecske- és Magfizikai Intézete

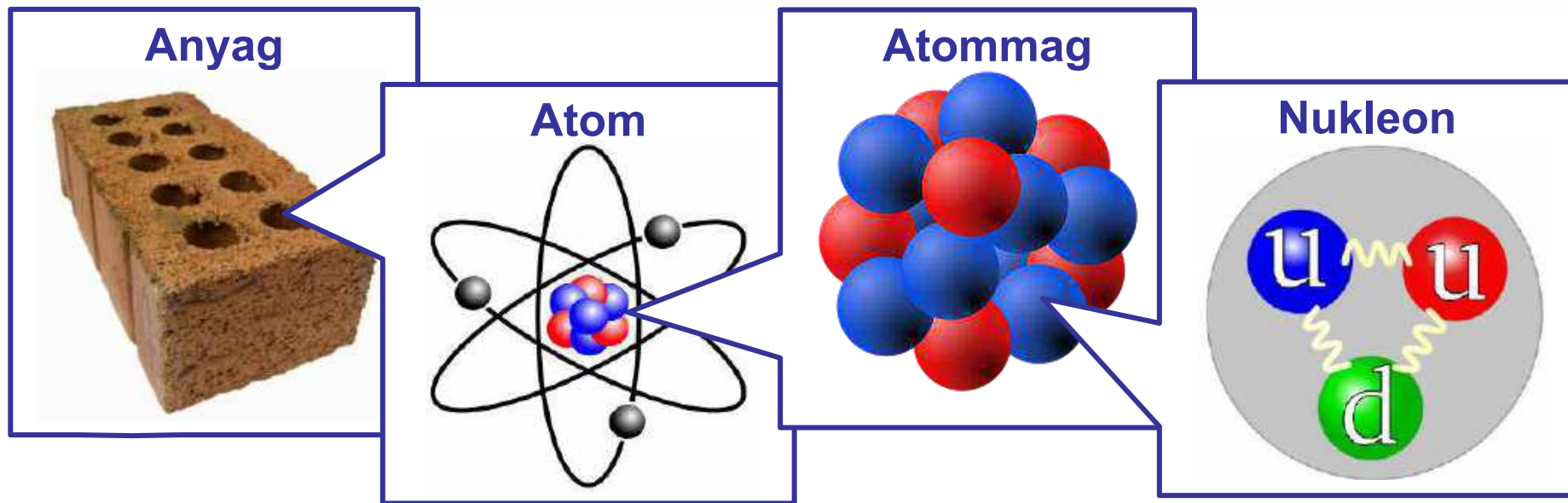
ALICE-Budapest csoport

<http://alice.wigner.mta.hu>



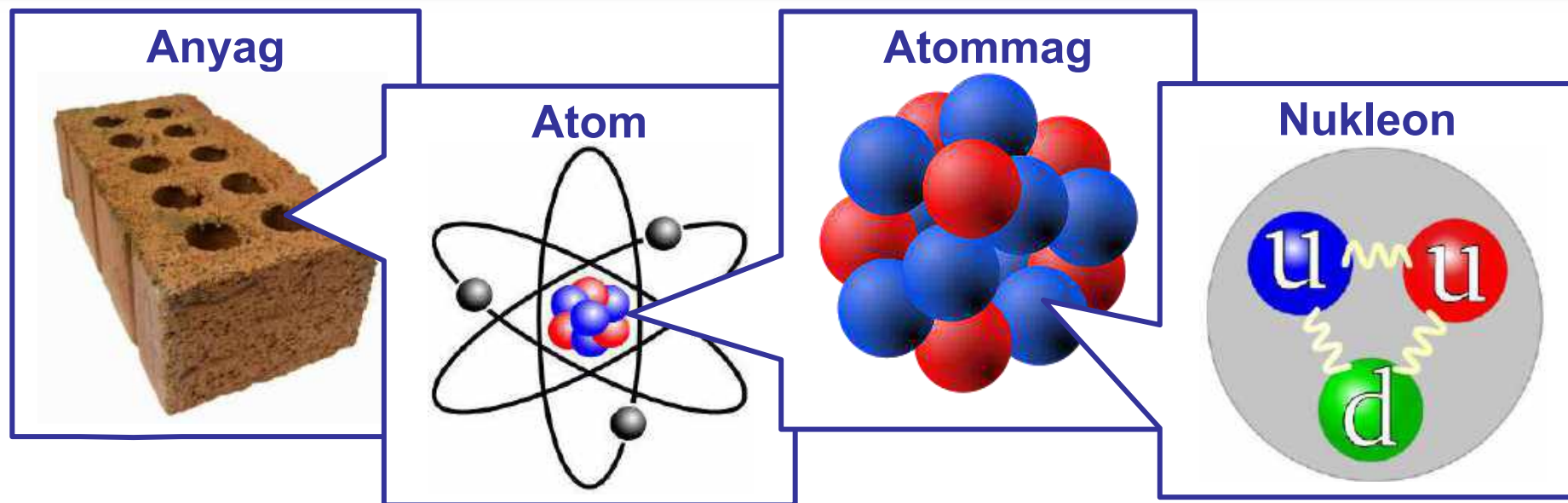
ALICE

Világunk építőkövei



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

Világunk építőkövei

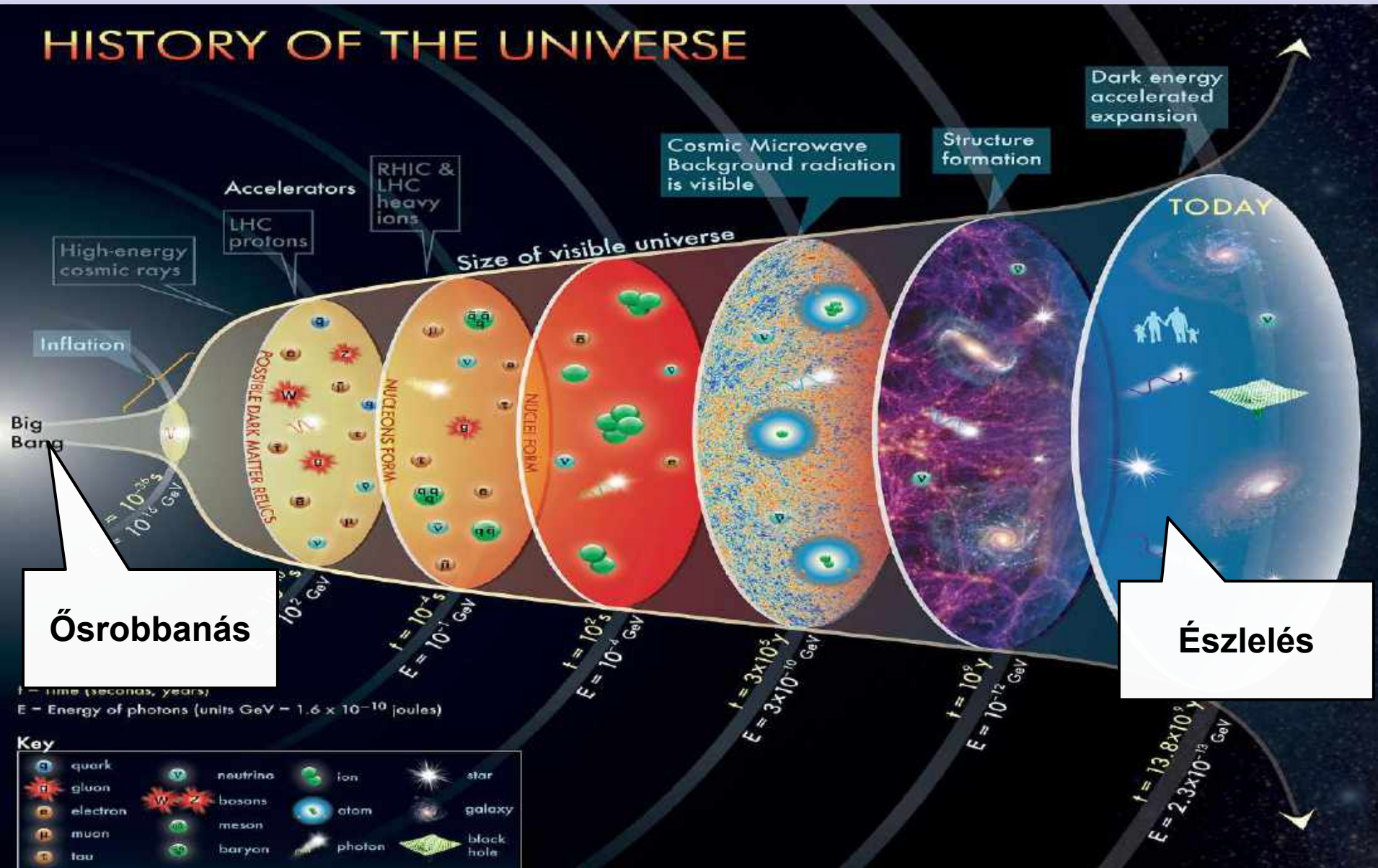


- **Kvarkok**: az atommag elemi részecskéi
- **Gluonok**: A magot összetartó **erős kölcsönhatás** közvetítői
- **Kvarkbezárás**: nincs magányos kvark! Hadronokat alkotnak
- **Kvantumszín dinamika**: az erős kölcsönhatás elmélete
 - A kvarkbezárás tartományát analitikusan nem tudjuk számolni!

Hogyan tudhatunk meg többet róluk?

A kezdet: "nagy bummm"

HISTORY OF THE UNIVERSE

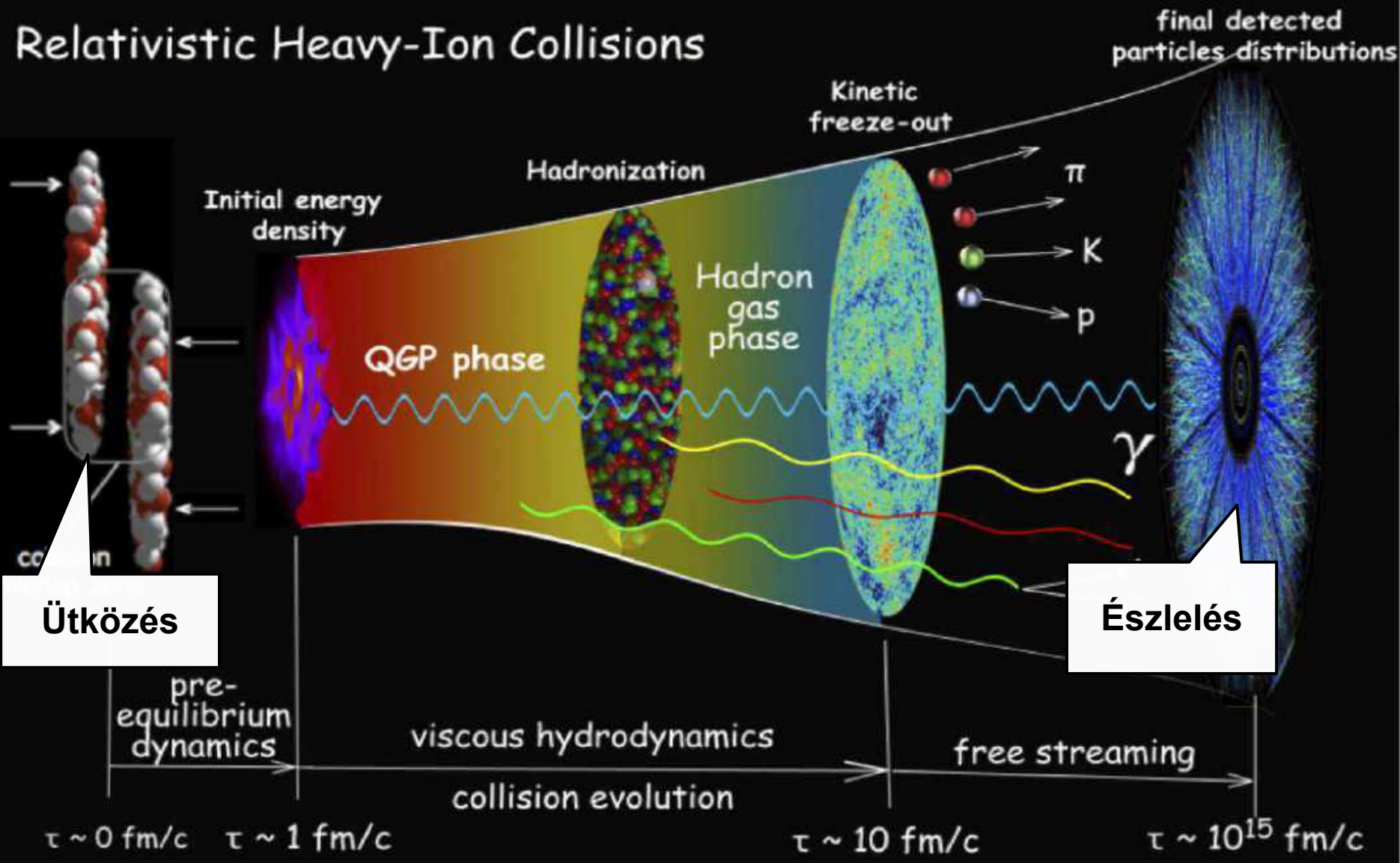


t = time (seconds, years)
E = Energy of photons (units GeV = 1.6 x 10⁻¹⁰ joules)

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

Nehézion-ütközések: "kis bumm"

Relativistic Heavy-Ion Collisions

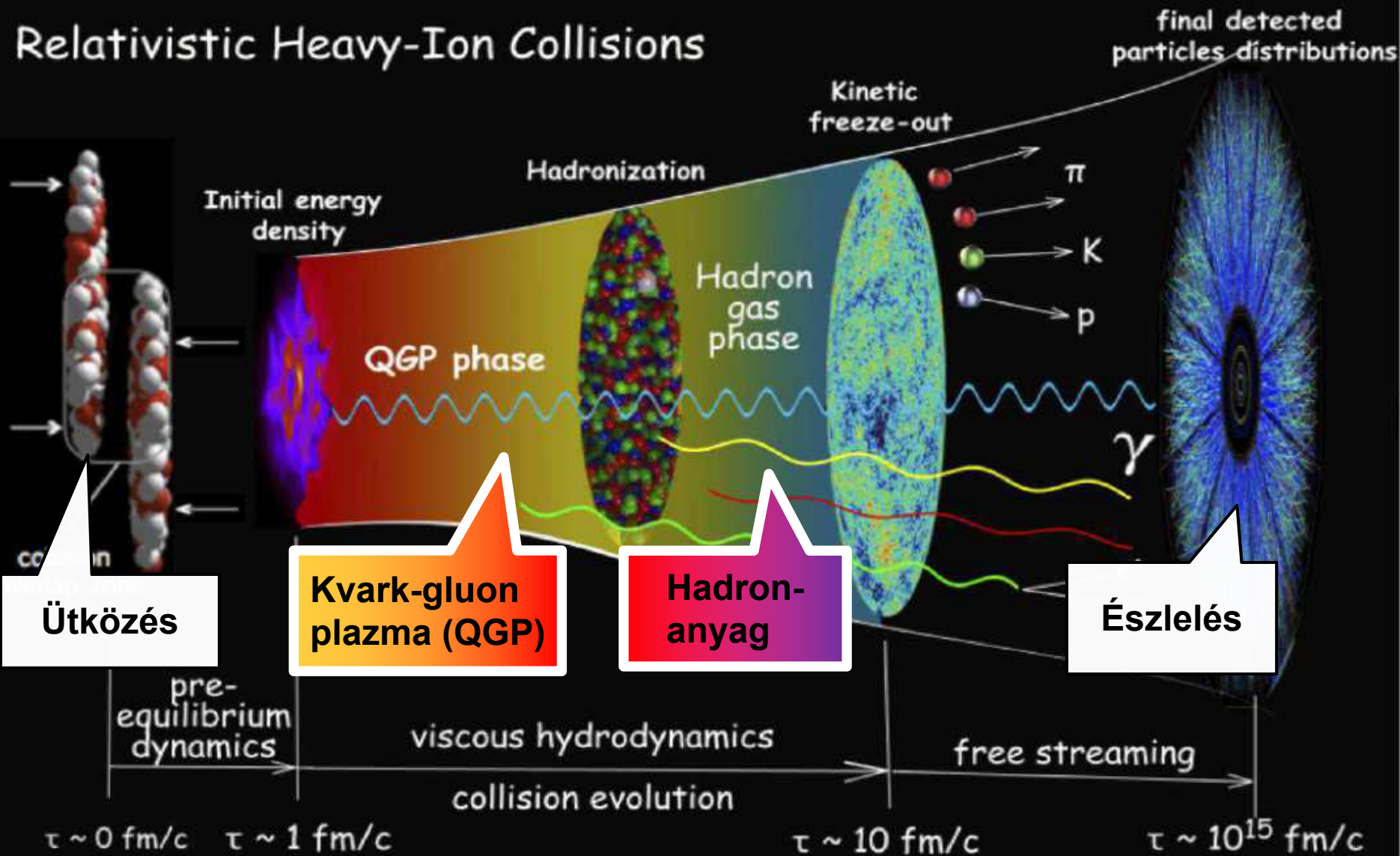


Ütközés

Észlelés

Nehézion-ütközések: "kis bumm"

Relativistic Heavy-Ion Collisions



Ütközés

Kvark-gluon plazma (QGP)

Hadron-anyag

Észlelés

A Nagy Hadronütköztető (LHC)



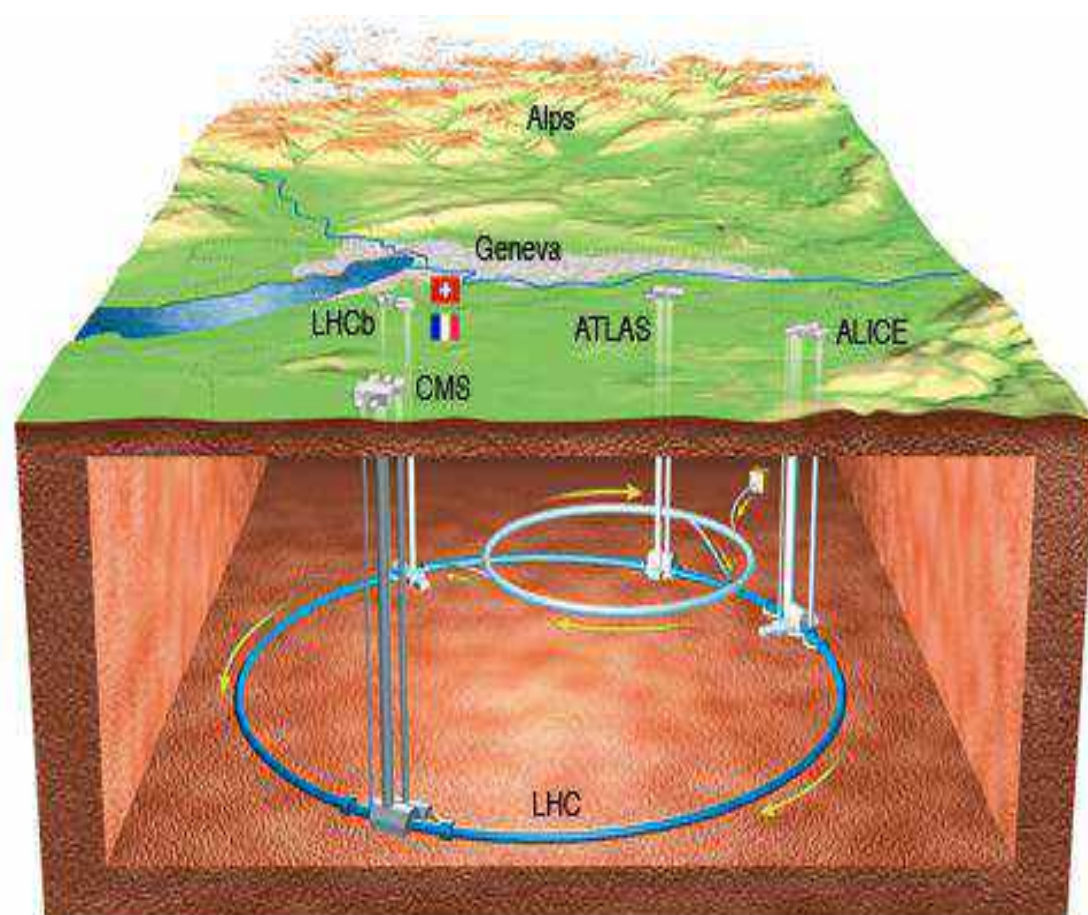
- CERN: Közös európai kutatóközpont
- 22 tagország együttműködése

- LHC: 27 km hosszú gyorsítógyűrű

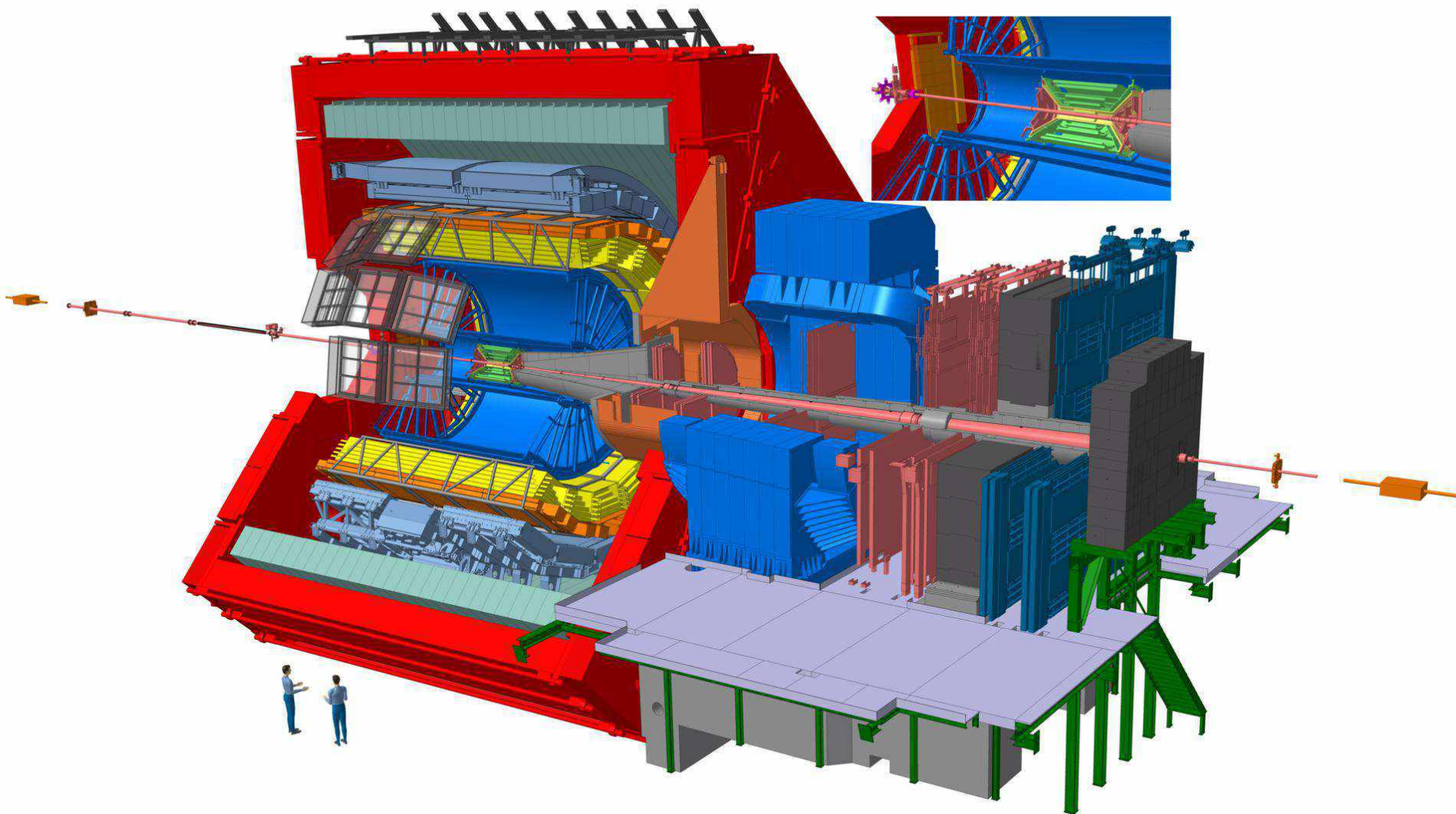
- Elektromos tér gyorsít (közel fénysebességre)
- Mágneses tér pályán tart

- Legnagyobb energia

- p-p: 13 TeV
- Pb-Pb: 5.02 TeV



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

EMCal: kaloriméter
elektromágneses részecskék
energia

ITS: félvezető detektor
töltött részecskék nyomkövetése
másodlagos vertex

→ **Varga-Kőfaragó Mónika**

TOF: szcintillátor
repülési idő mérése

TPC: gázdetektor
töltött részecskék nyomkövetése
azonosítás, impulzusmérés

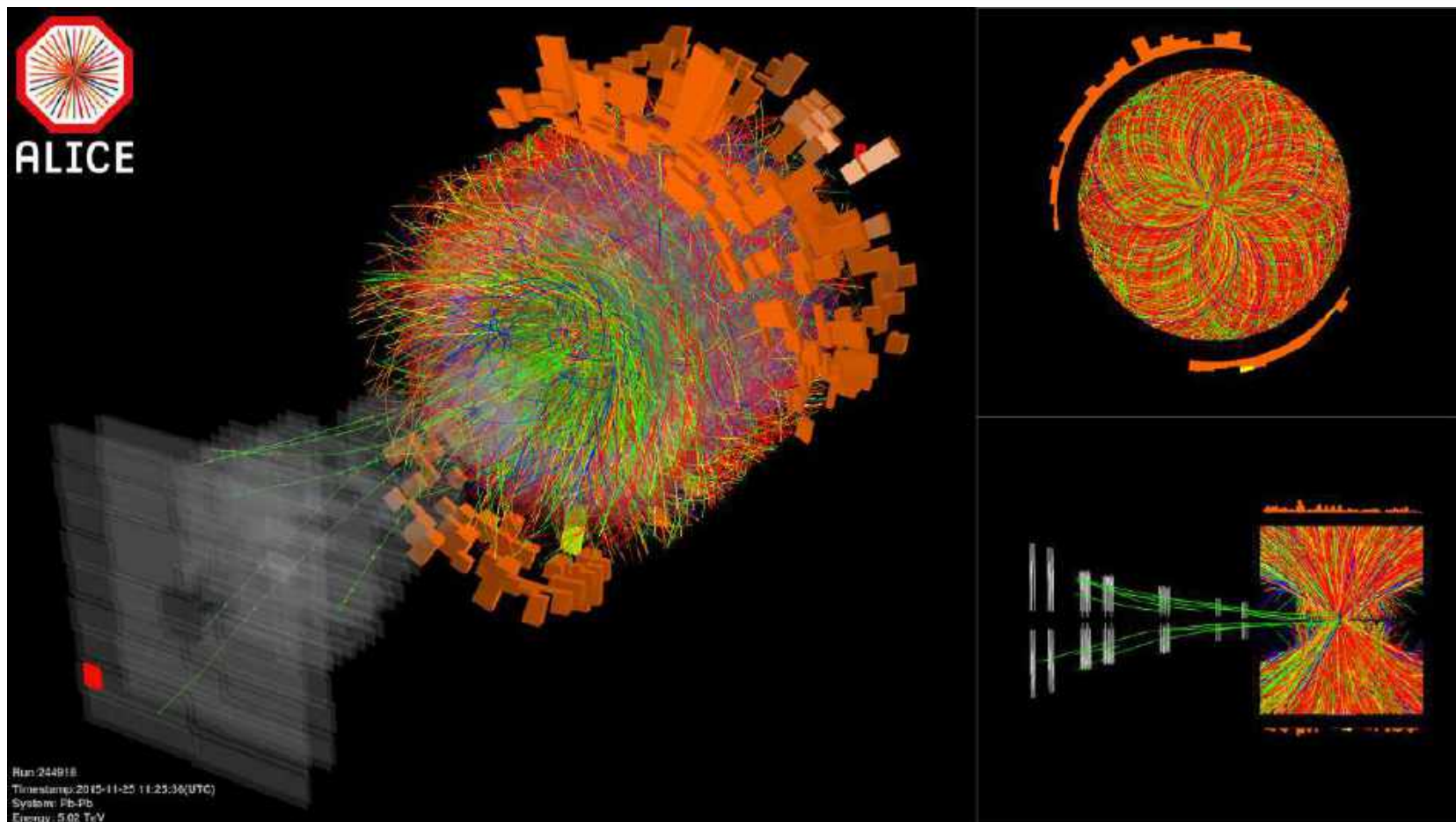
→ **Hamar Gergő**

mágnes

MCH: spektrométer
műonok azonosítása, nyomkövetés
(Előreszórási tartomány)

- Kifejezetten nehézion-fizikára tervezett detektor

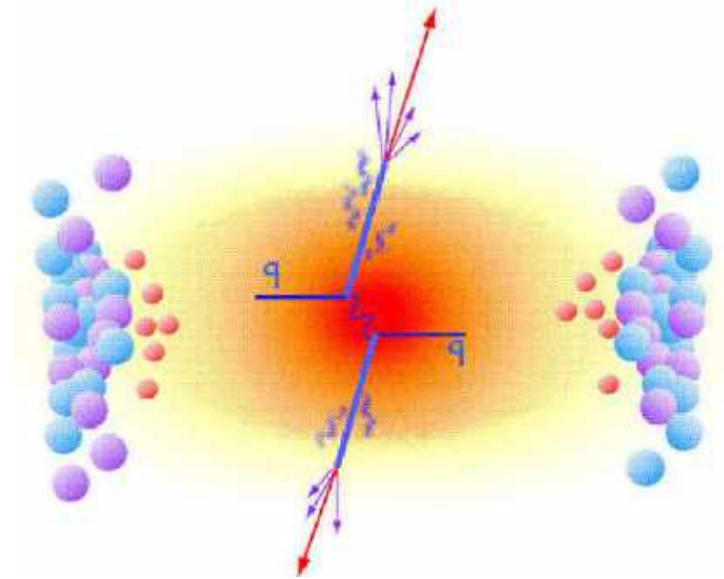
Rekonstruált nehézion-esemény



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

Mérési módszerek

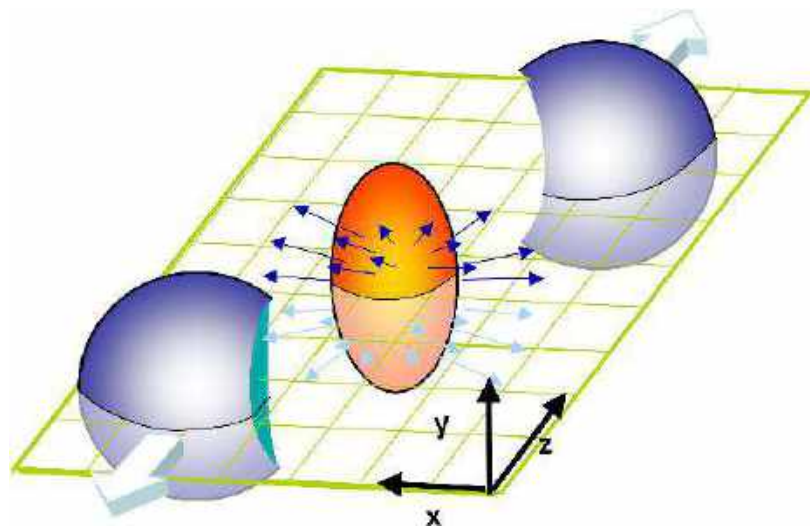
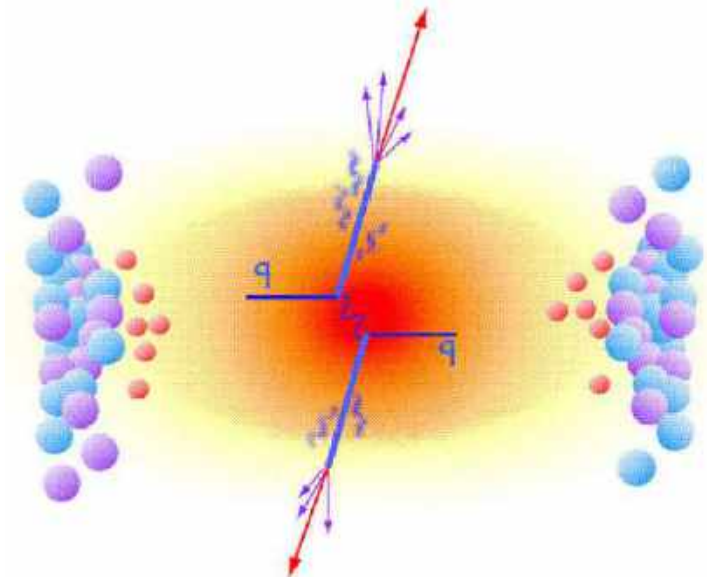
- **"Kemény" folyamatok**
 - kevés nagy impulzú részecske
 - korai keletkezés, jól ismert folyamatokban
 - nagy áthatólképesség
 - **Plazma átvilágítása, Közegbeli módosulás vizsgálata**



Mérési módszerek

▪ "Kemény" folyamatok

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

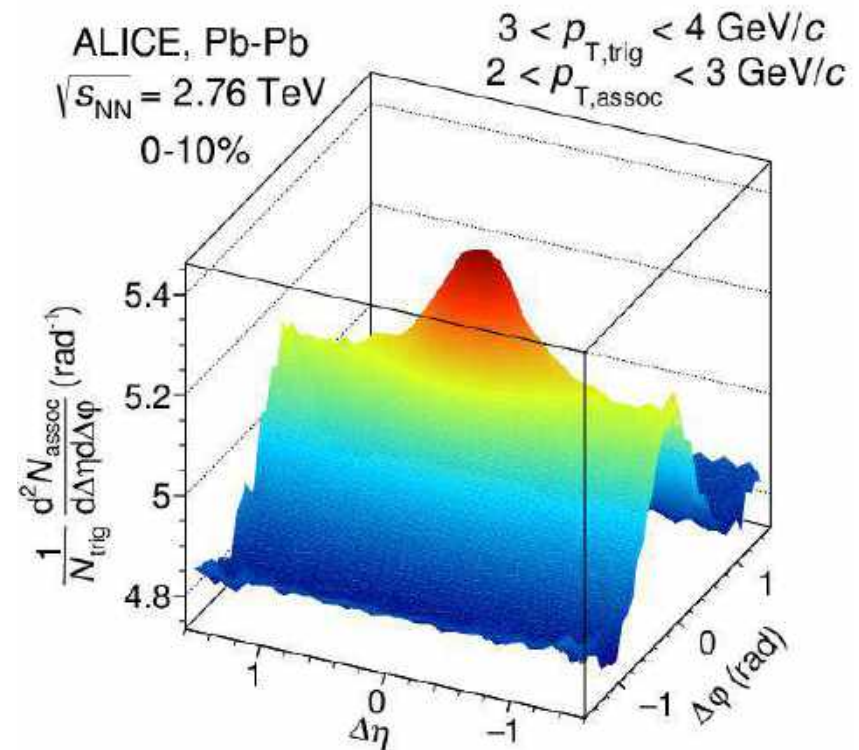
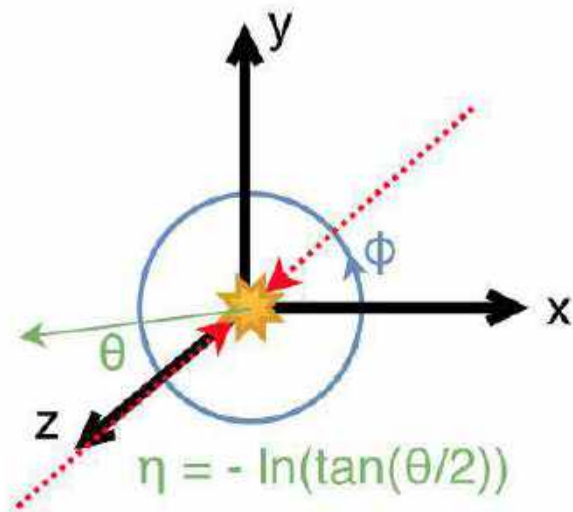


▪ "Lágy" folyamatok

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

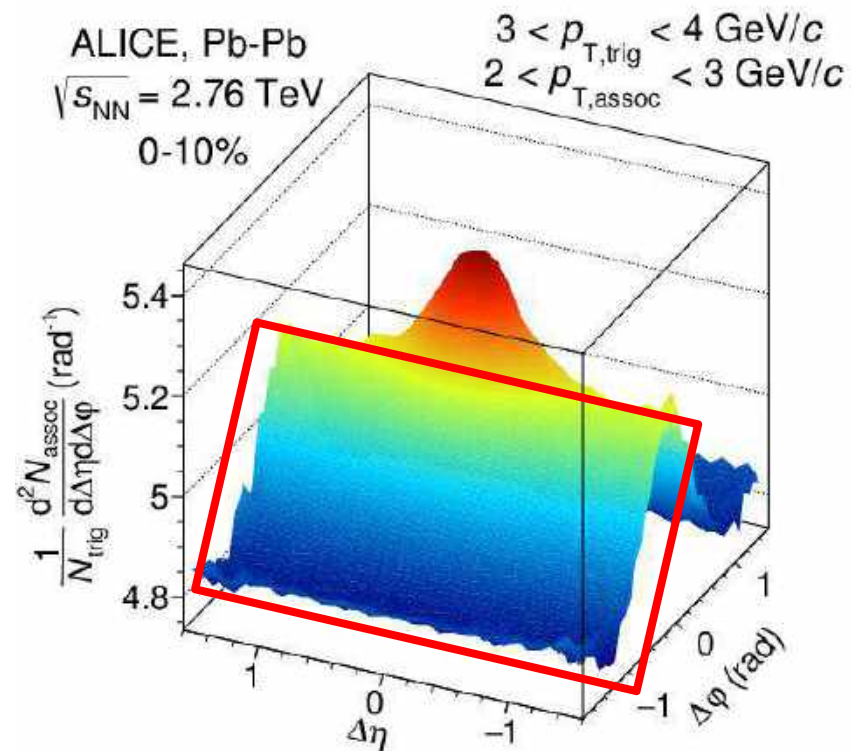
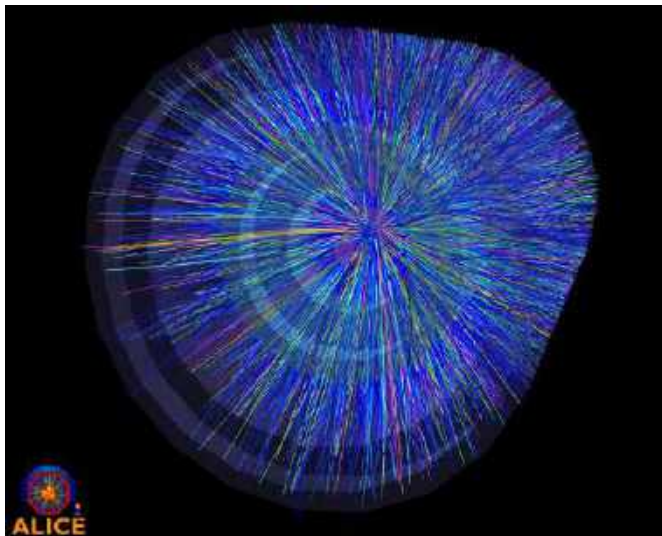
A QGP megismerése korrelációkkal

- Részecsképarok vizsgálata a köztük lévő szög függvényében



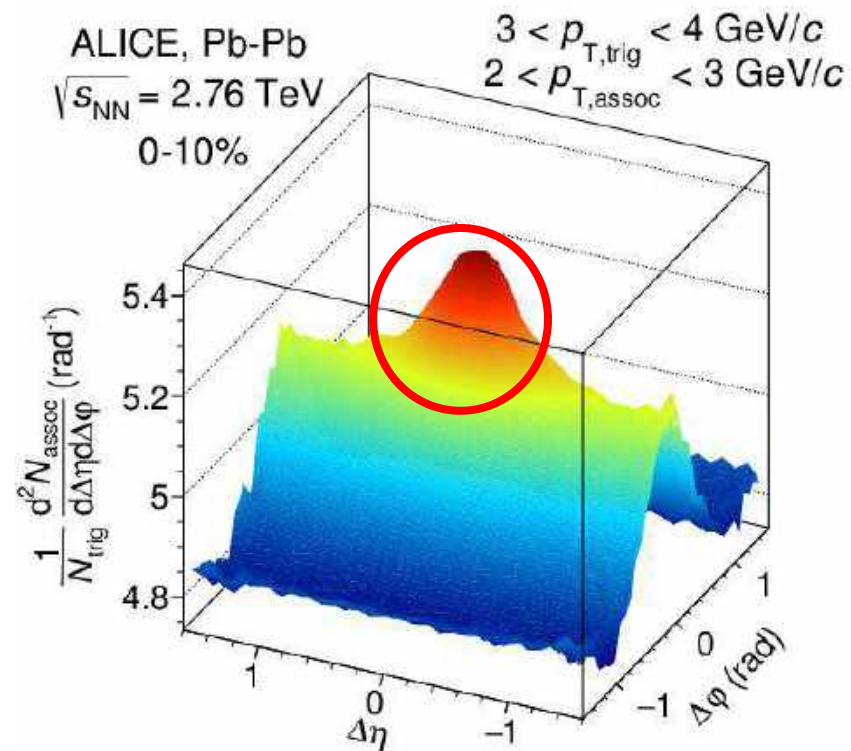
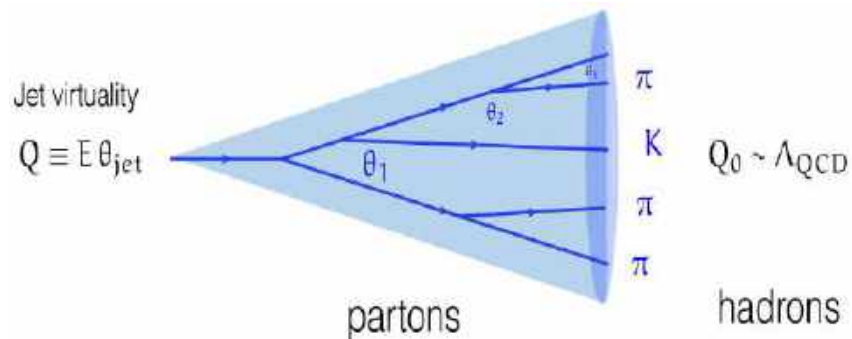
A QGP megismerése korrelációkkal

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



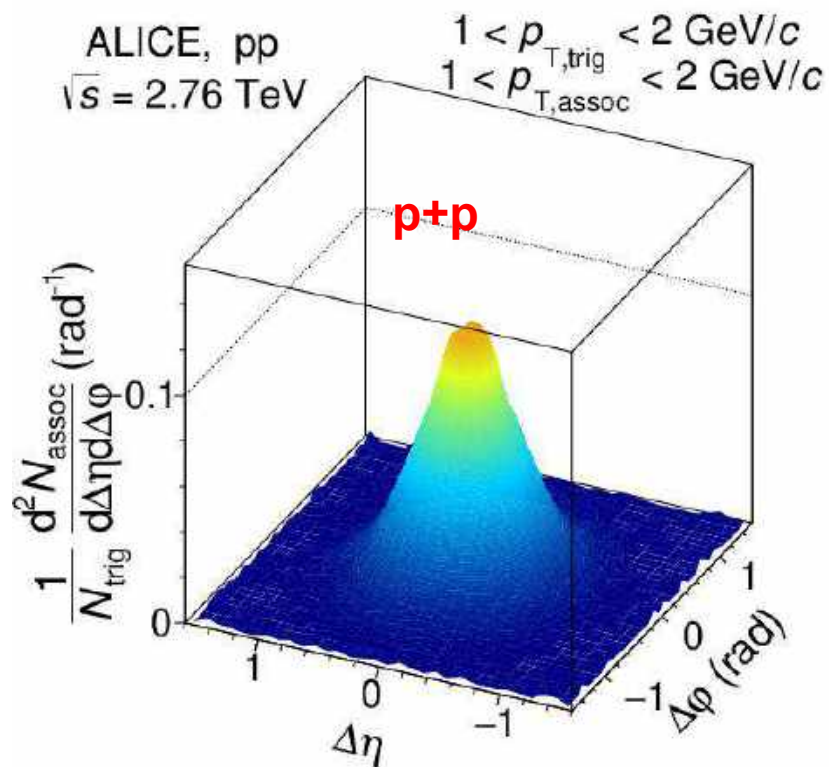
A QGP megismerése korrelációkkal

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



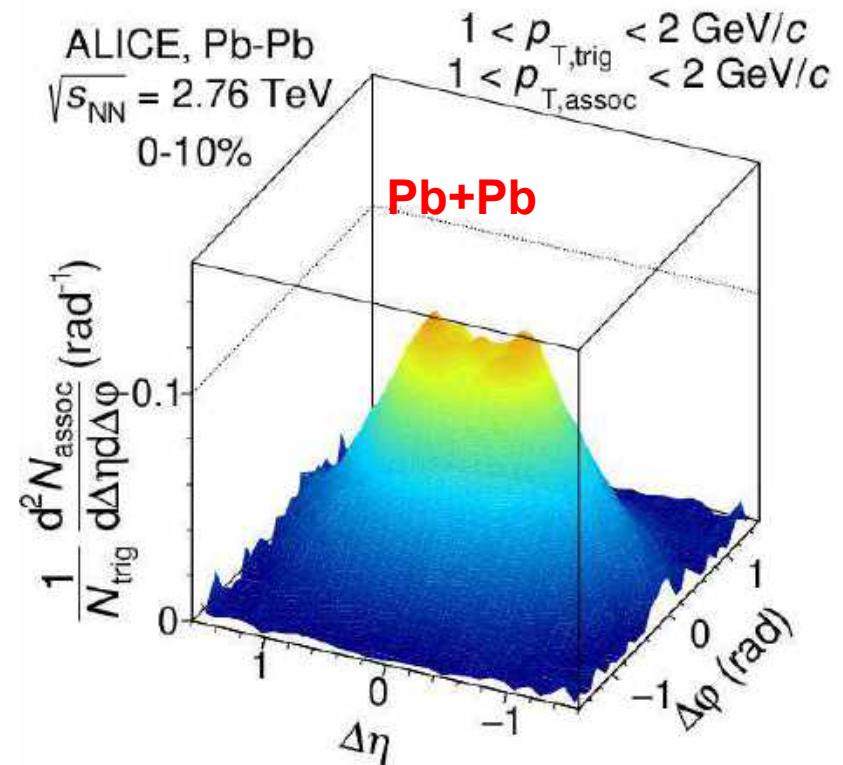
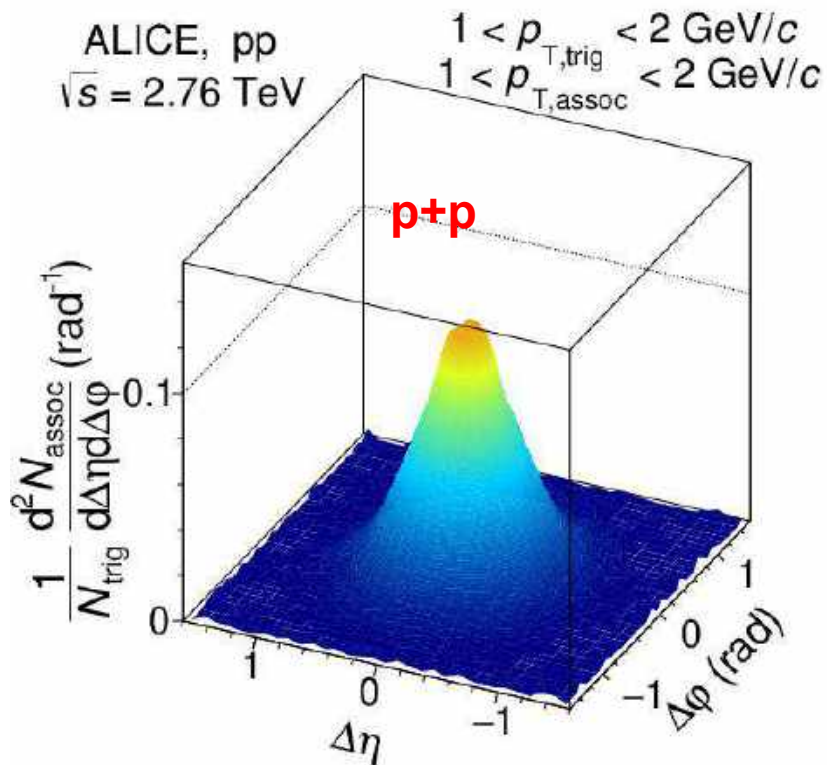
A jet-csúcsok változása

- 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)

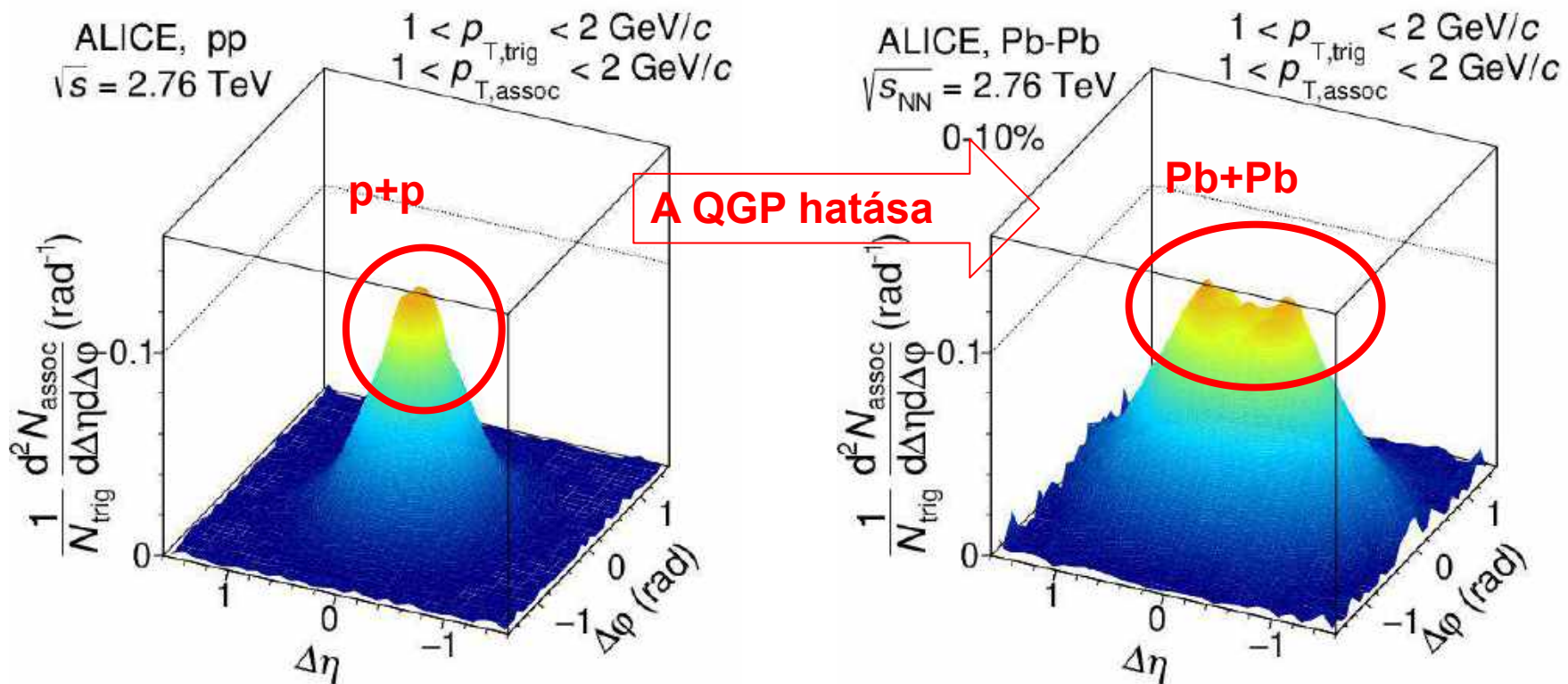


Phys.Rev.Lett.119,102301(2017)

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)

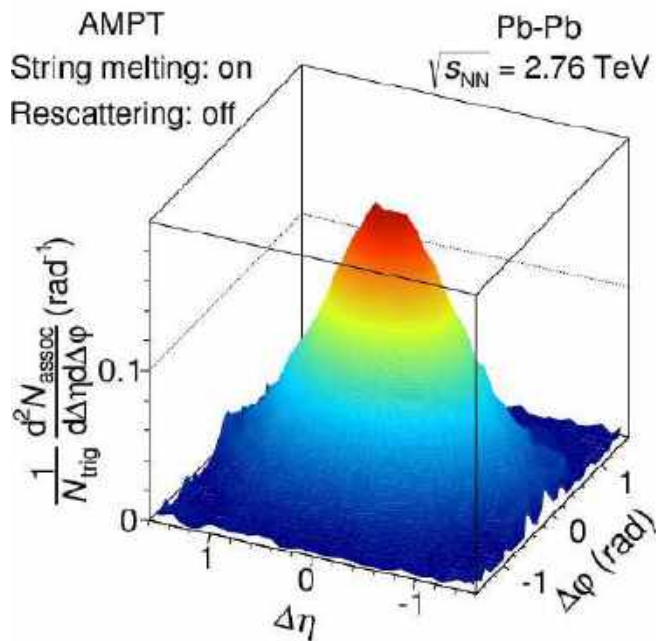


A csúcs kiszélesedik, megjelenik egy kiürített tartomány

Az eredmények megértése: modell

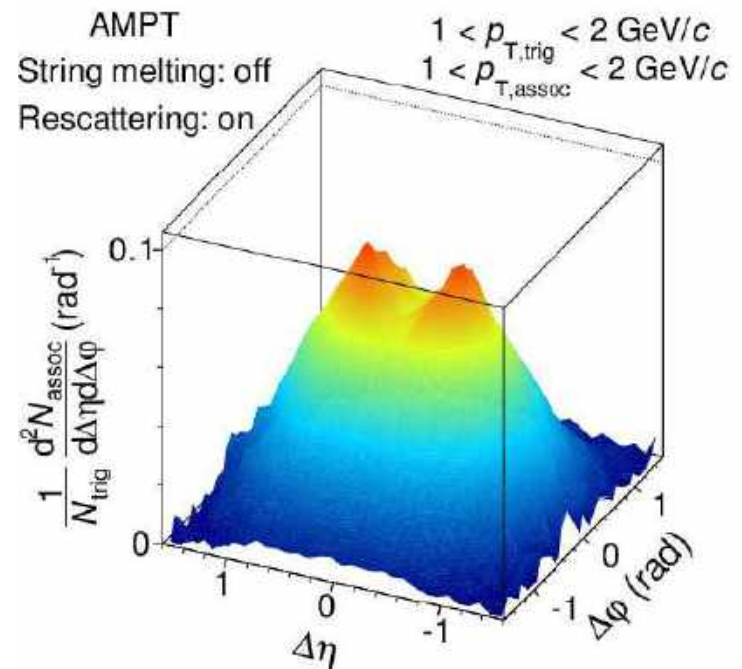
- A közeg hatását szimulációk segítségével érthetjük meg
- Szimulációk különböző alapelvek mentén / beállításokkal

Gyengén folyó eset



**AMPT
Pb+Pb
szimuláció**

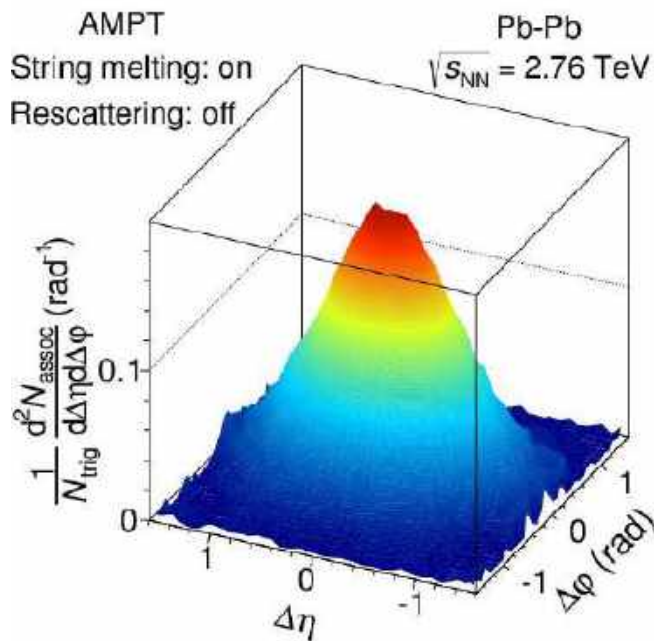
Erősen folyó eset



Az eredmények megértése: modell

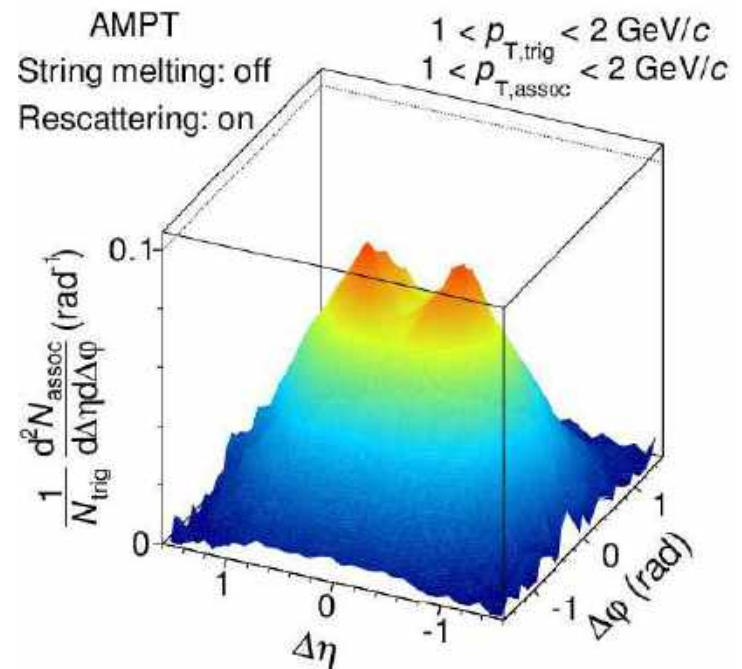
- A közeg hatását szimulációk segítségével érthetjük meg
- Szimulációk különböző alapelvek mentén / beállításokkal

Gyengén folyó eset



**AMPT
Pb+Pb
szimuláció**

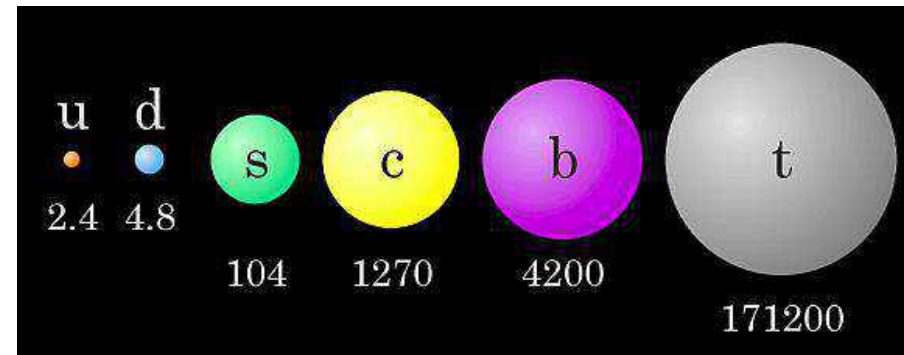
Erősen folyó eset



Az adat és modell összevetése erősen folyó QGP-re utal

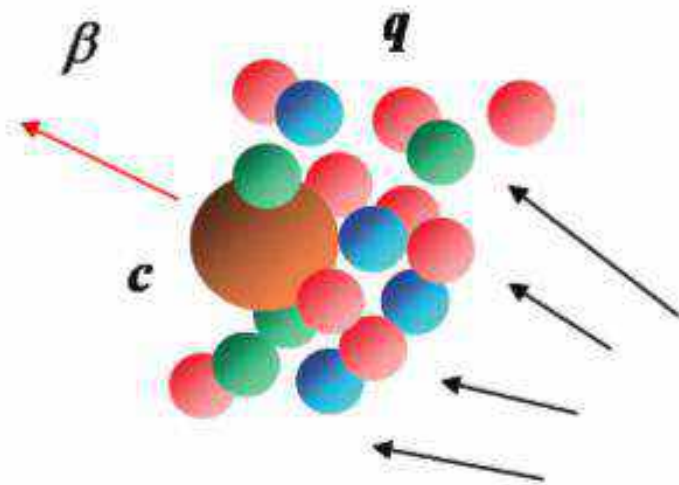
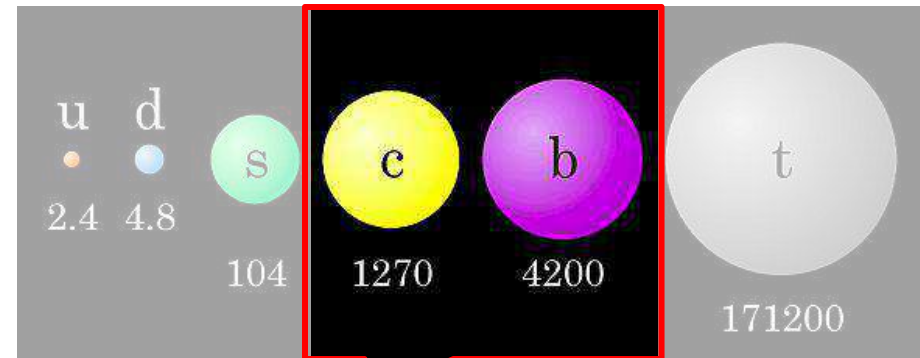
Mire jók a nehéz kvarkok?

- 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?

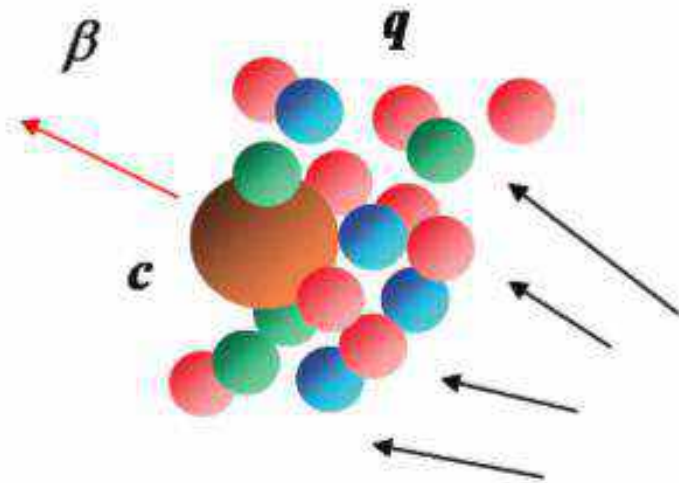
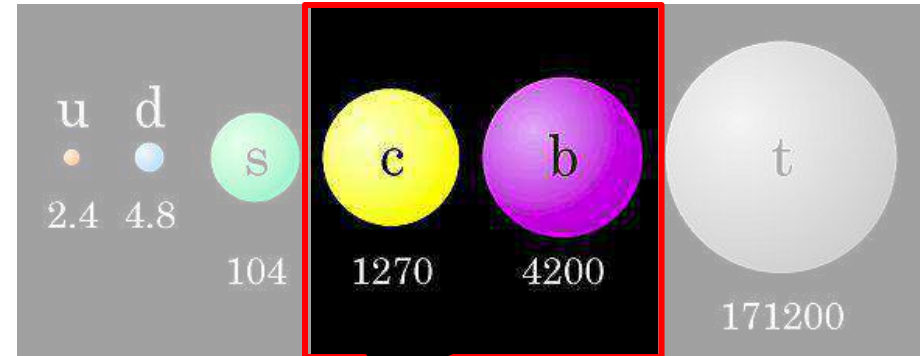
- Az összes hagyományos anyagot a két könnyű kvark alkotja
- Nehéz kvarkok csak instabil részecskékben fordulnak elő
 - nehezebb kelteni
 - hamar elbomlik



- **Charm, bottom:** "pont jó" tömeg
- Kezdeti, kemény folyamatokban keletkeznek
- A reakció során mindvégig megmaradnak
 - **Momentumtól 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

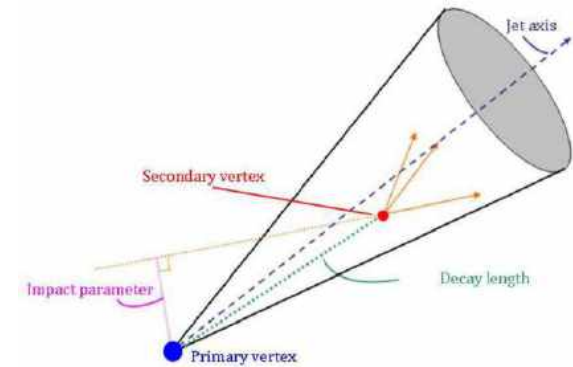


- **Charm, bottom:** "pont jó" tömeg
- Kezdeti, kemény folyamatokban keletkeznek
- A reakció során mindvégig megmaradnak
 - Momentumtól függetlenül
- Közben kölcsönhatnak a plazmával
 - Kinematika, transzport, hőmérséklet

Az erős kölcsönhatás és a QGP megértésére ideális

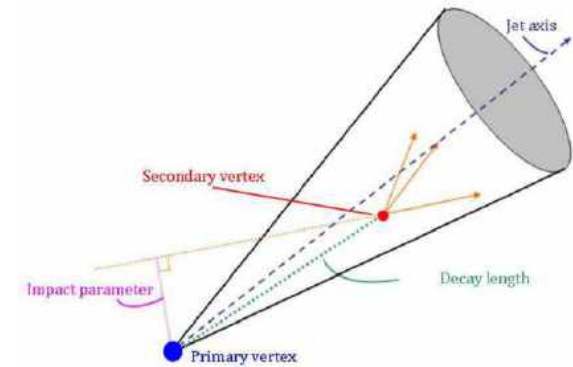
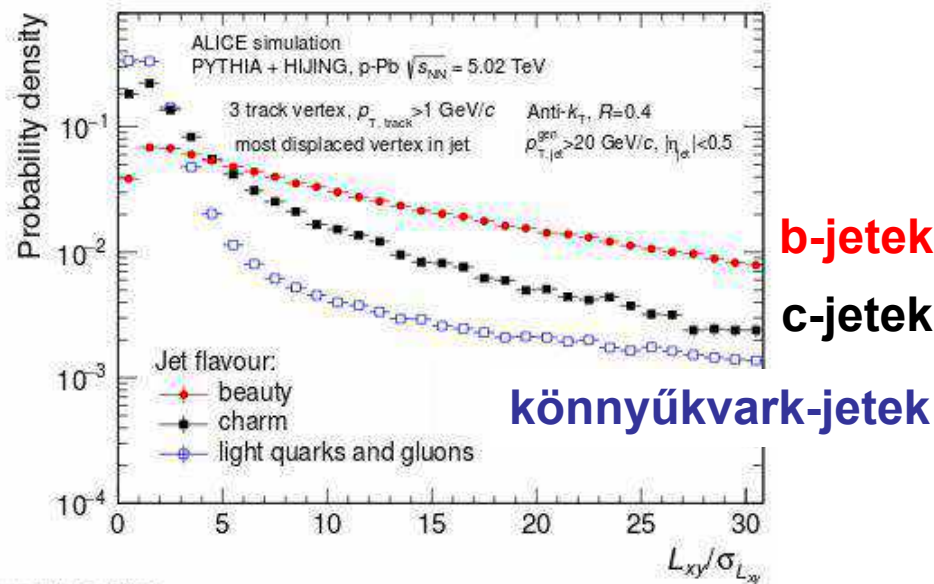
b-jetek mérése

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



b-jetek mérése

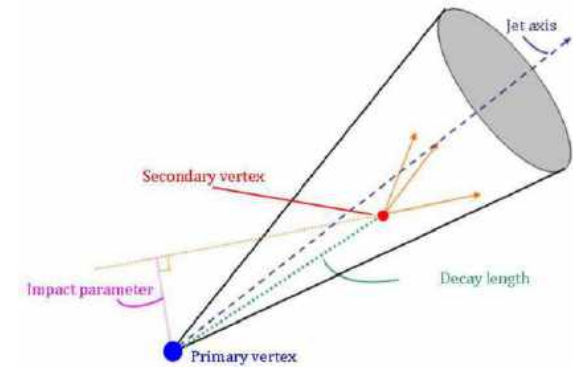
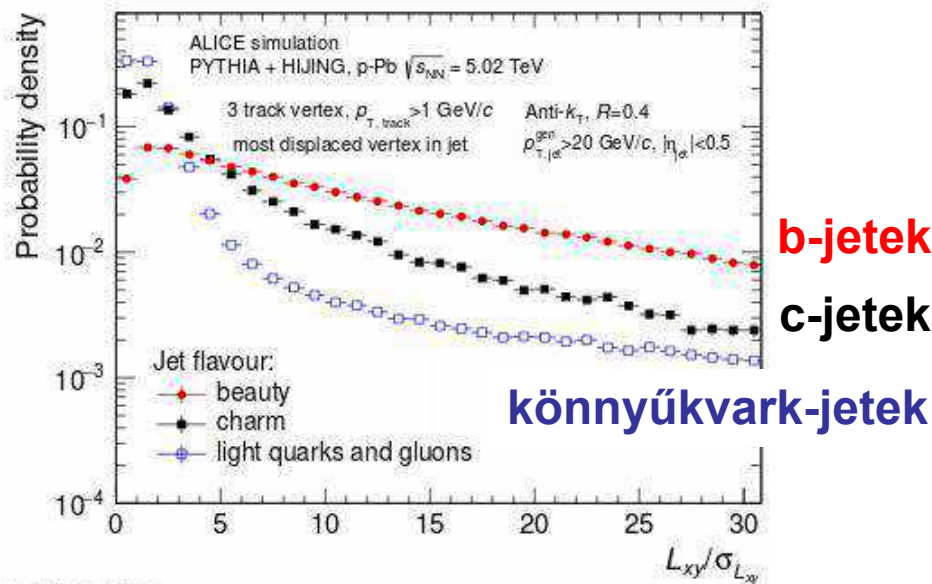
- Nehéz-kvarkot tartalmazó jetek azonosítása a **másodlagos vertex** keresésével



- Az ALICE széles impulzus-tartományban képes a b-jeteket elkülöníteni
- A mérés folyamatban van...

b-jetek mérése

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

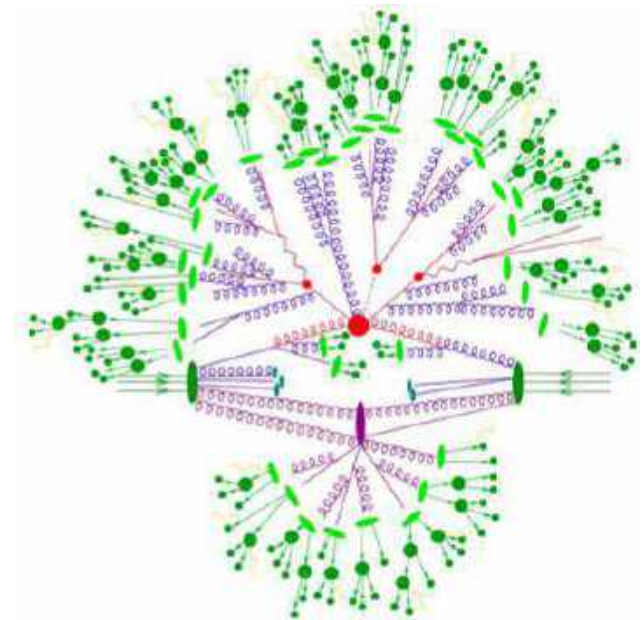


- Az ALICE széles impulzus-tartományban képes a b-jeteket elkülöníteni
- A mérés folyamatban van...

Transzport és hadronképződés függése a kvarktömegtől

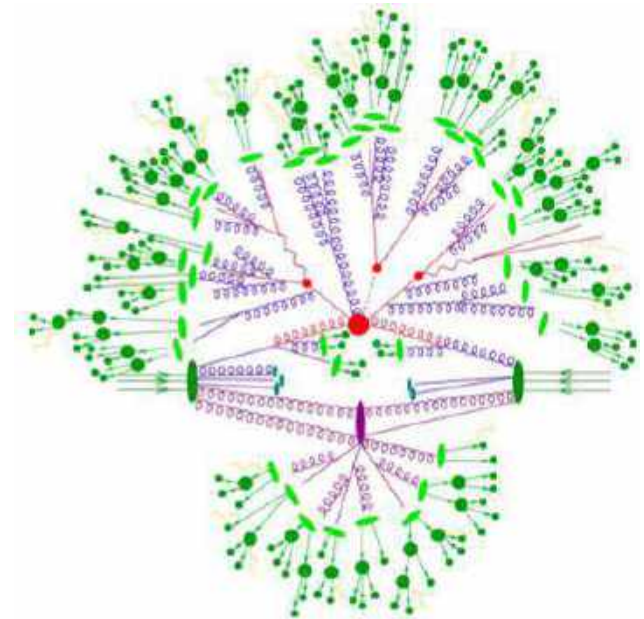
p+p : mégsem olyan egyszerű?

- Megfigyelés az LHC-nél: nagy multiplitású p+p 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 p+p ütközésekben?
 - Esetleg egyszerűbb QCD jelenségek...
 - Pl. **sokparton-kölcsönhatások?**



p+p : mégsem olyan egyszerű?

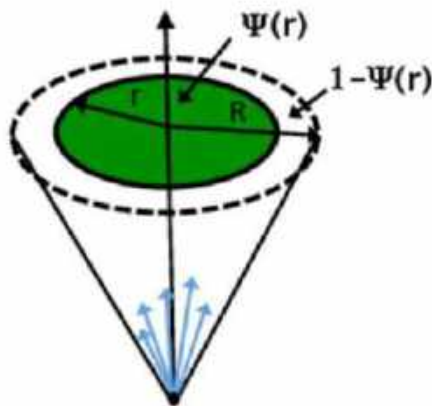
- Megfigyelés az LHC-nél: nagy multiplitású p+p eseményekben kollektív viselkedés, a Pb+Pb eseményekhez hasonlóan
 - Multiplicitás: végállapotú részecskék száma
- Nem az ütköző rendszer az érdekes, hanem elsősorban a multiplicitás?
 - Létrejöh-e QGP a p+p ütközésekben?
 - Esetleg egyszerűbb QCD jelenségek...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



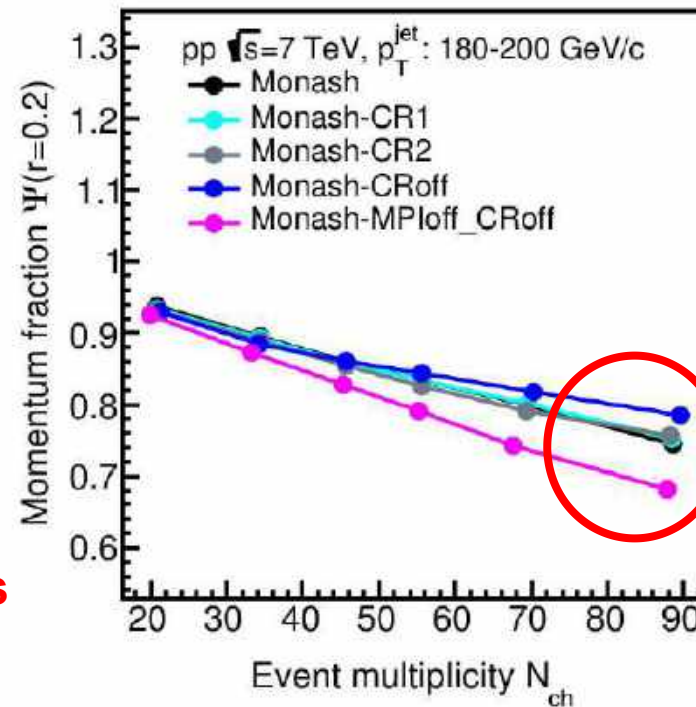
Még nem tudjuk a biztos választ!

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



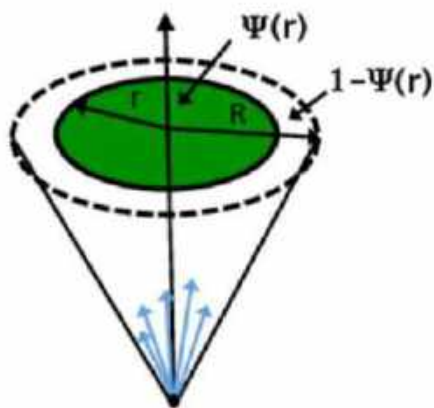
<- van MPI
<- nincs MPI

p+p
nagy multiplicitás

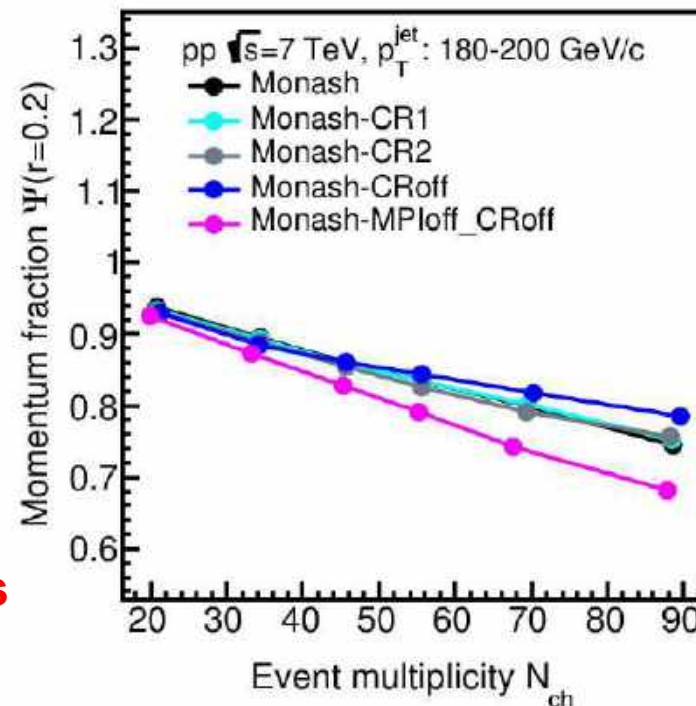
[arXiv:1805.03101](https://arxiv.org/abs/1805.03101)

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?

A TPC fejlesztése

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

Space point distortions up to 1 m



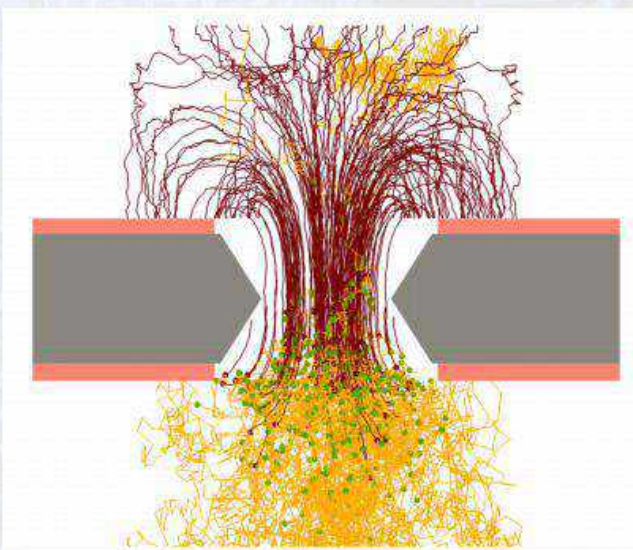
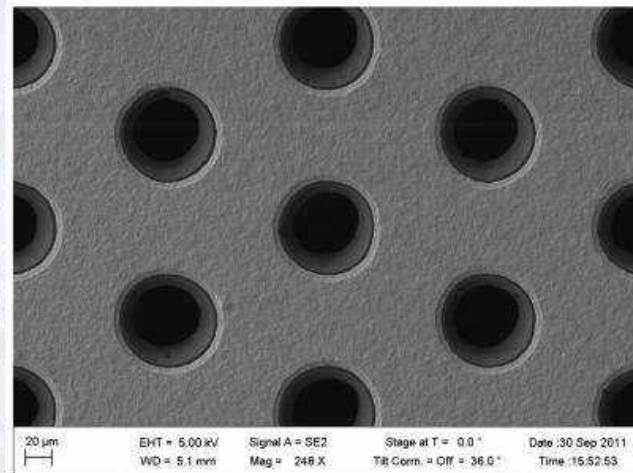
Continuous readout with GEMs
(Gas Electron Multiplier)

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}Fe
- Stable operation under LHC condition



Adatgyűjtő rendszer fejlesztése

The CRU project

• 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)

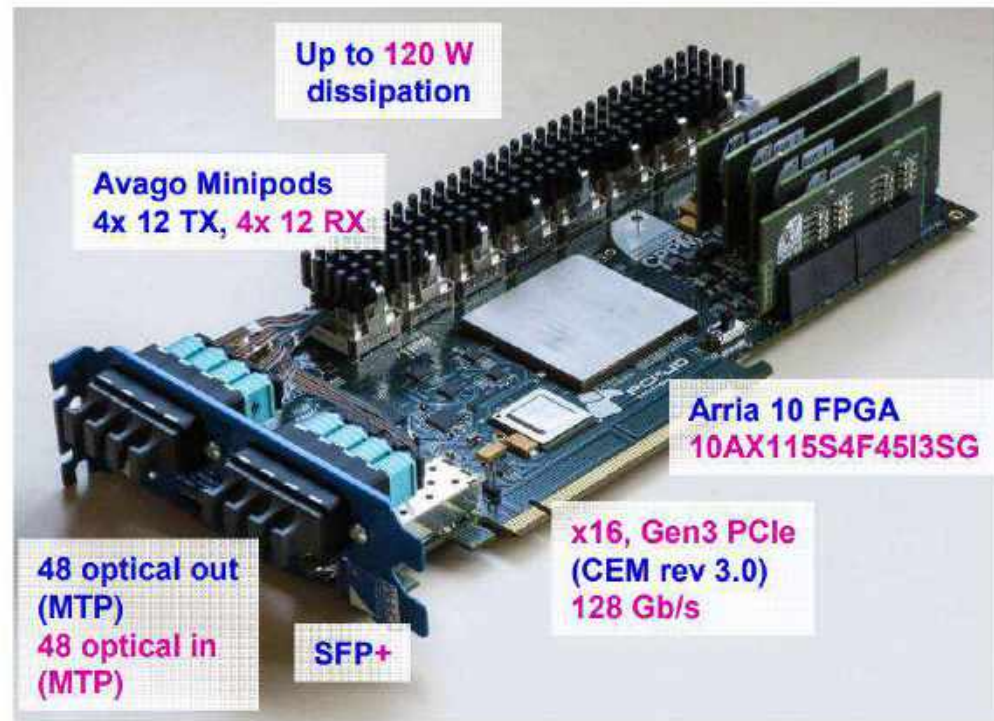
• ALICE specific CRU firmware is developed by the central CRU team

- 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



Múlt, jelen, jövő

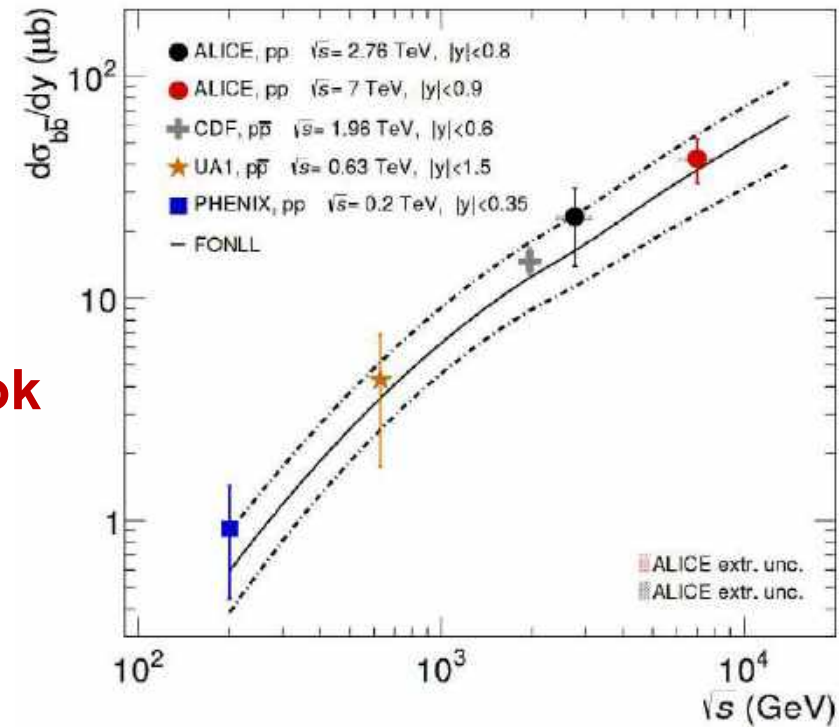
- **Múlt**: RHIC, SPS, LHC-1 (2000-)
 - a Kvar-Gluon plazma létének bebizonyítása
 - alapvető tulajdonságainak megértése
- **Jelen**: LHC-2, RHIC
 - Magasabb energia, ütközésszám
 - Precíziós könnyűkvark-mérések
 - Nehézkvark-mérések
 - Részletes jetszerkezeti vizsgálatok
- **Jövő**: LHC-3
 - Tovább növelt ütközésszám
 - TPC, ITS, DAQ fejlesztése
 - Precíziós b- és jetszerkezet-mérések

Múlt, jelen, jövő

- Múlt: RHIC, SPS, LHC-1 (2000-)
 - a Kvark-Gluon plazma létének bebizonyítása
 - alapvető tulajdonságainak megértése

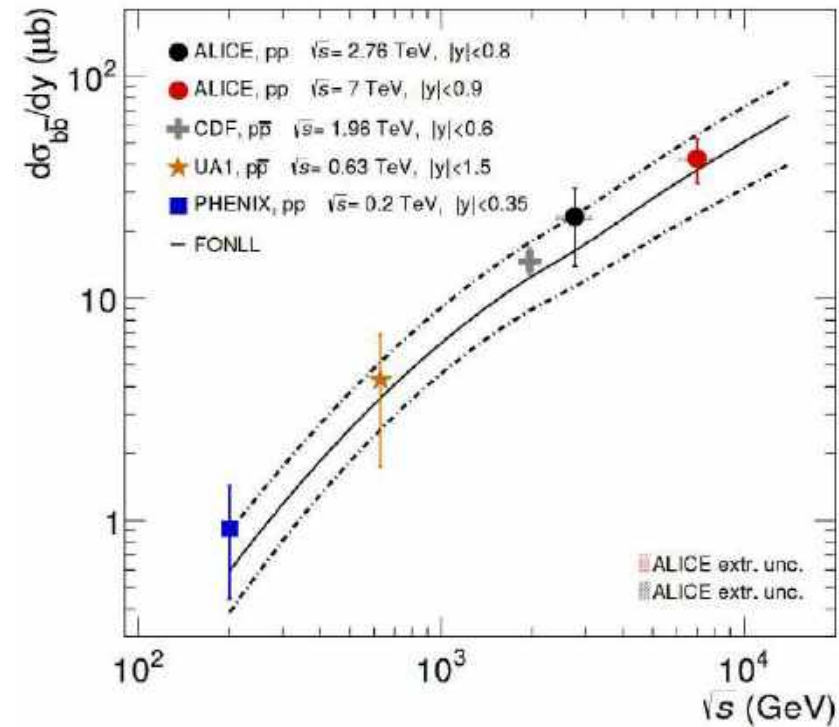
- Jelen: LHC-2, RHIC
 - Magasabb energia, ütközésszám
 - Precíziós könnyűkvark-mérések
 - **Nehézkvark-mérések**
 - **Részletes jetszerkezeti vizsgálatok**

- Jövő: LHC-3
 - Tovább növelt ütközésszám
 - TPC, ITS, DAQ fejlesztése
 - Precíziós b- és jetszerkezet-mérések



Múlt, jelen, jövő

- Múlt: RHIC, SPS, LHC-1 (2000-)
 - a Kvark-Gluon plazma létének bebizonyítása
 - alapvető tulajdonságainak megértése
- Jelen: LHC-2, RHIC
 - Nagyobb energia
 - Magasabb ütközési gyakoriság
 - Precíziós könnyűkvark-mérések
 - Nehézkvark-mérések
- Jövő: LHC-3
 - Tovább növelt ütközésszám
 - **TPC, ITS, DAQ fejlesztése**
 - **Precíziós b- és jetszerkezet-mérések**



A differenciált mérések, nehéz kvarkok korszaka

Az ALICE-Budapest csoport

■ Physics/Analysis group

- Töltött hadronok, jetek szerkezete, nehéz kvarkok, korrelációk
- *Barnaföldi GG, Bencédi Gy, Lévai P, Szigeti B, Varga Z, Varga-Kőfaragó M, Vértesi R*

■ DAQ upgrade/service group

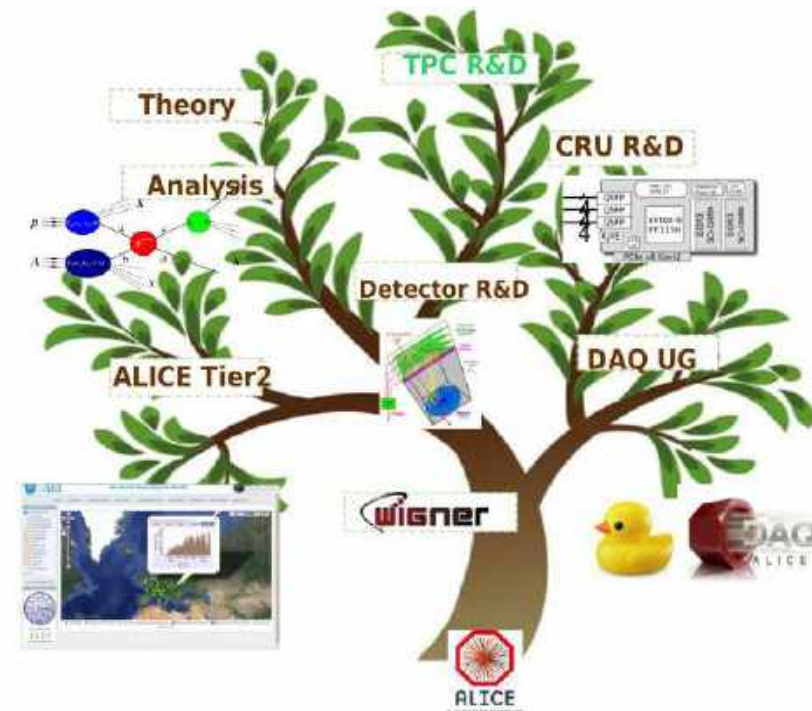
- DAQ fejlesztése: CRU tervezése, gyártási folyamat
- *Kiss T, Dávid E, Nguyen T M*

■ Detector Development Group

- Gázdetektor R&D, TPC fejlesztés
- *Boldizsár L, Endrőczy G, Gera Á, Hamar G, Varga D*
- *ITS: Varga-Kőfaragó M, Sudár Á*

■ Grid - ALICE Tier2 site

- T2 Budapest, 1000 mag, 500 TB HDD
- *Barnaföldi GG, Bíró G*



Az ALICE-Budapest csoport

■ Physics/Analysis group

- Töltött hadronok, jetek szerkezete, nehéz kvarkok, korrelációk
- *Barnaföldi GG, Bencédi Gy, Lévai P, Szigeti B, Varga Z, Varga-Kőfaragó M, Vértesi R*

■ DAQ upgrade/service group

- DAQ fejlesztése: CRU tervezése, gyártási folyamat
- *Kiss T, Dávid E, Nguyen T M*

■ Detector Development Group

- Gázdetektor R&D, TPC fejlesztés
- *Boldizsár L, Endrőczy G, Gera Á, Hamar G, Varga D*
- *ITS: Varga-Kőfaragó M, Sudár Á*

■ Grid - ALICE Tier2 site

- T2 Budapest, 1000 mag, 500 TB HDD
- *Barnaföldi GG, Bíró G*



Köszönöm a figyelmet!

Vértesi Róbert

vertesi.robert@wigner.mta.hu

MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont
Részecske- és Magfizikai Intézete

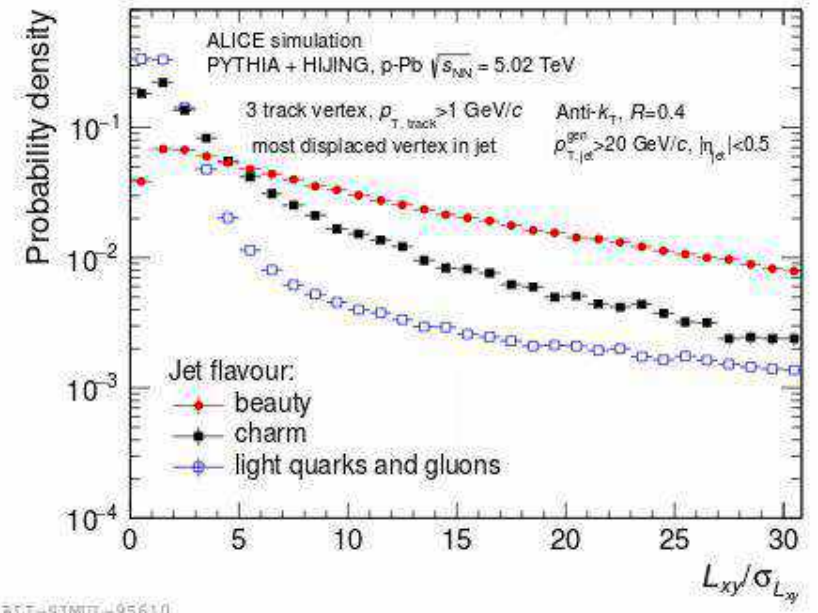
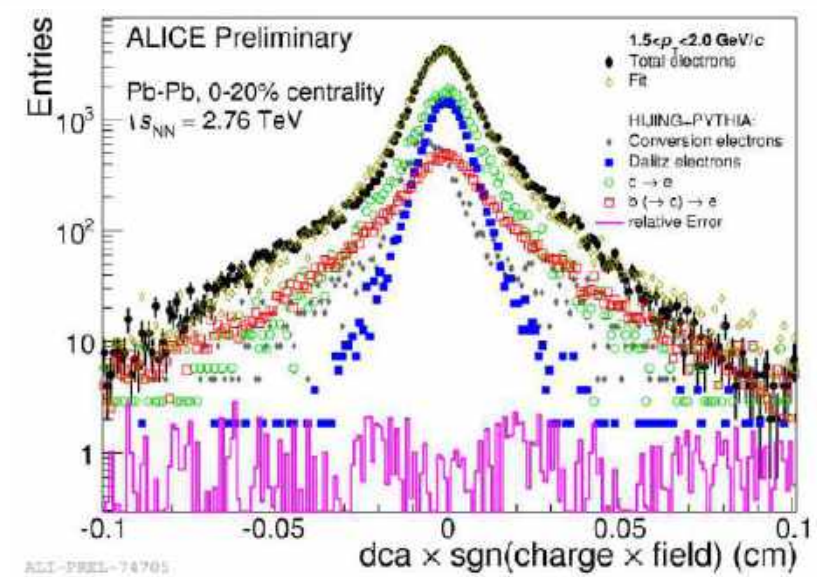
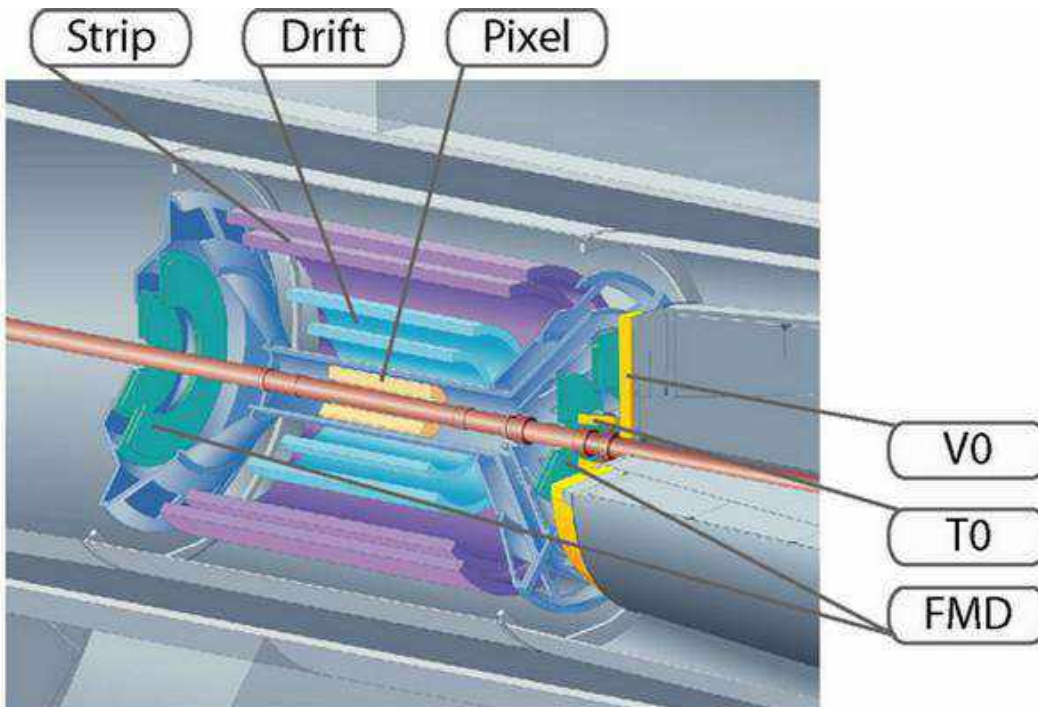
ALICE-Budapest csoport

<http://alice.wigner.mta.hu>



ALICE

Másodlagos vertex keresése



Maganyag-módosulás - RHIC

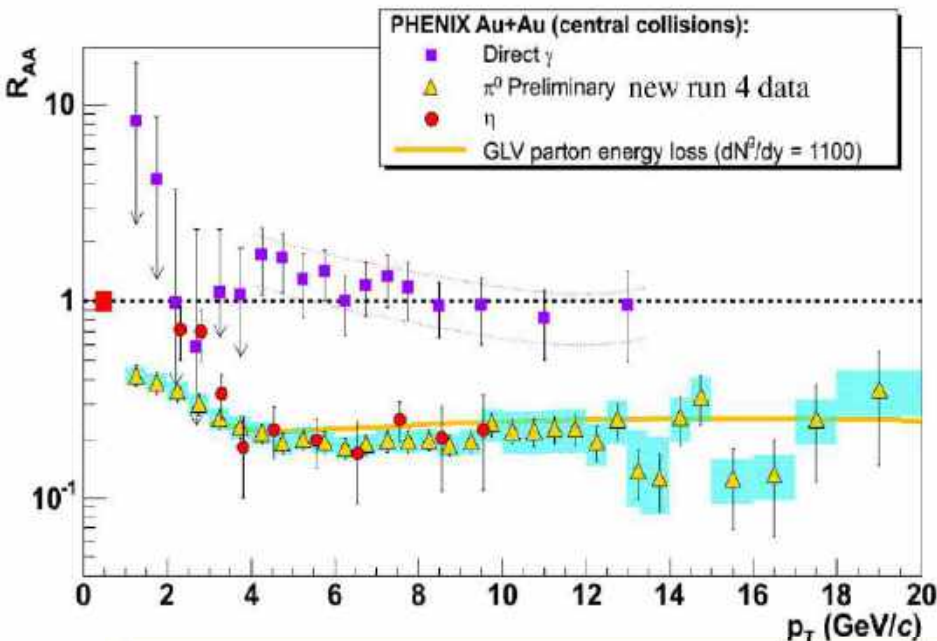
- A+A hozam összevetése a p-p ütközésekével
- $R_{AA} = 1$: a maganyagnak nincs hatása
- $R_{AA} < 1$: impulzusvesztés a maganyagban

Hozam nehézion-
ütközésekben

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

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)

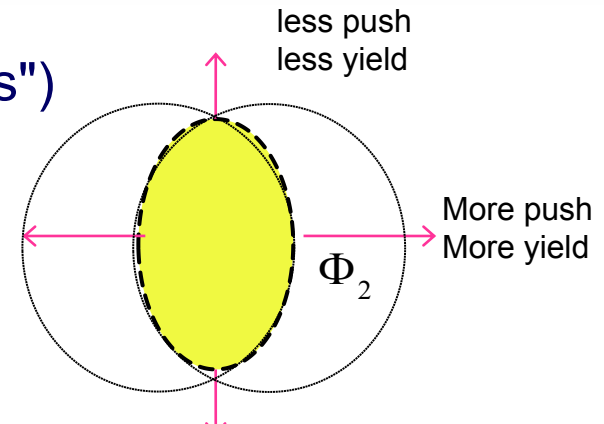
- Könnyű hadronok kb. azonos mértékben nyomódnak el ($R_{AA}^h \sim 0.2$)
- Foton-elnyomódás nem tapasztalható ($R_{AA}^\gamma \sim 1$)
 - A csak EM kölcsönható részecske számára a közeg átlátszó

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**

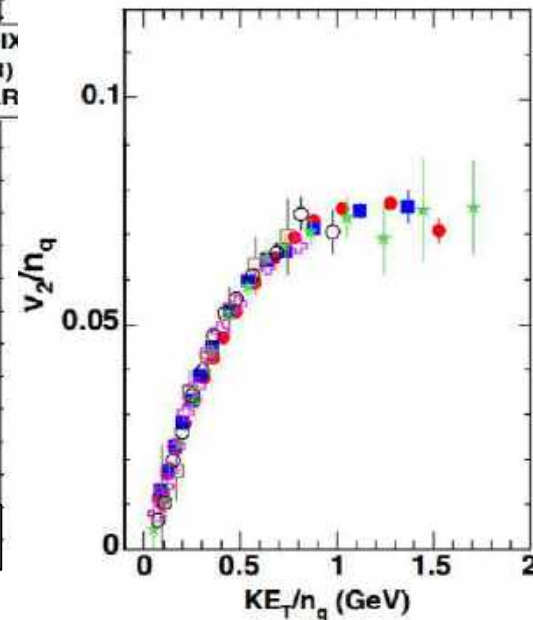
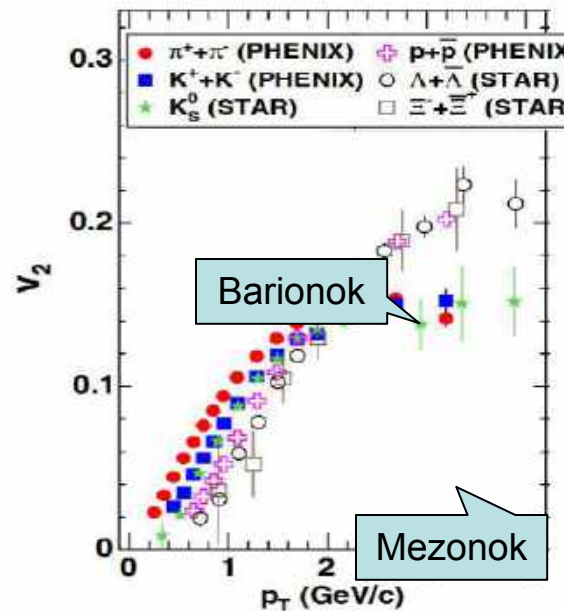
- Hidrodinamikai modellek jól leírják
- Viszkozitása rendkívül kicsi => "Tökéletes" folyadék

Aszimptotikus szabadság?

- Konstituens kvarkok számával való skálázás

=> **Szabadsági fokok: kvarkok**

- Megj.: LHC-energiákon a skálázás nem tökéletes

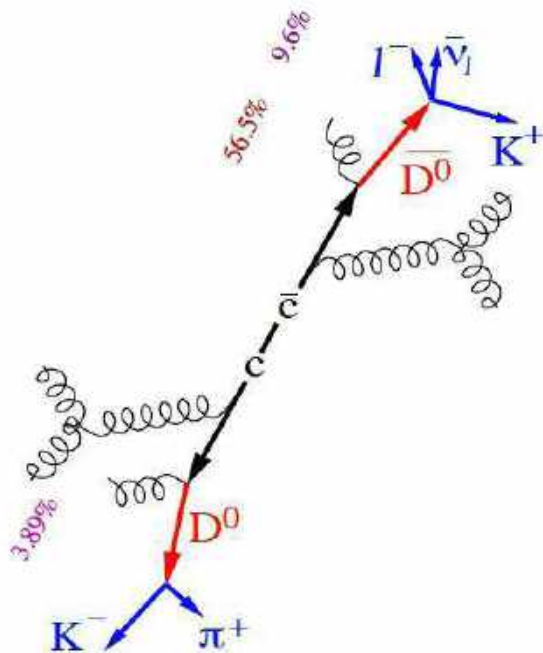


A nehéz kvarkok észlelése

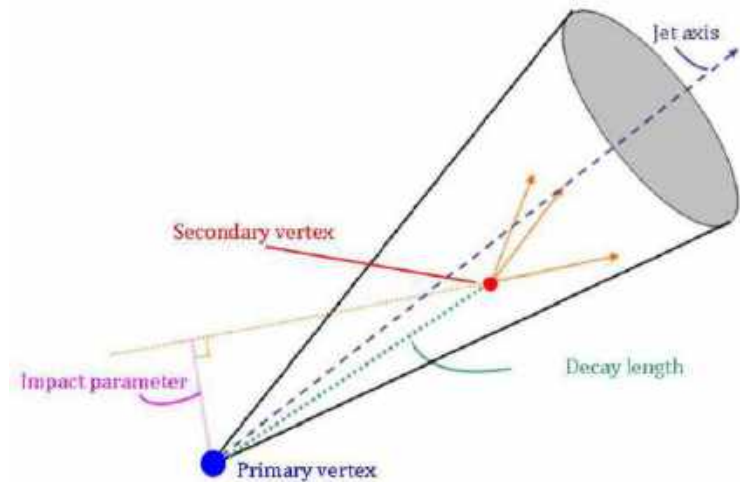
- Kvarkbezárás: **c** és **b** közvetett kimutatás lehetséges csak
- Hadronizáció során mezonokká (**D**, **B**) alakul

- Kimutatás:

bomlástermékek azonosítása



a bomlás helyének visszakövetése
(másodlagos vertex rekonstrukciója)



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

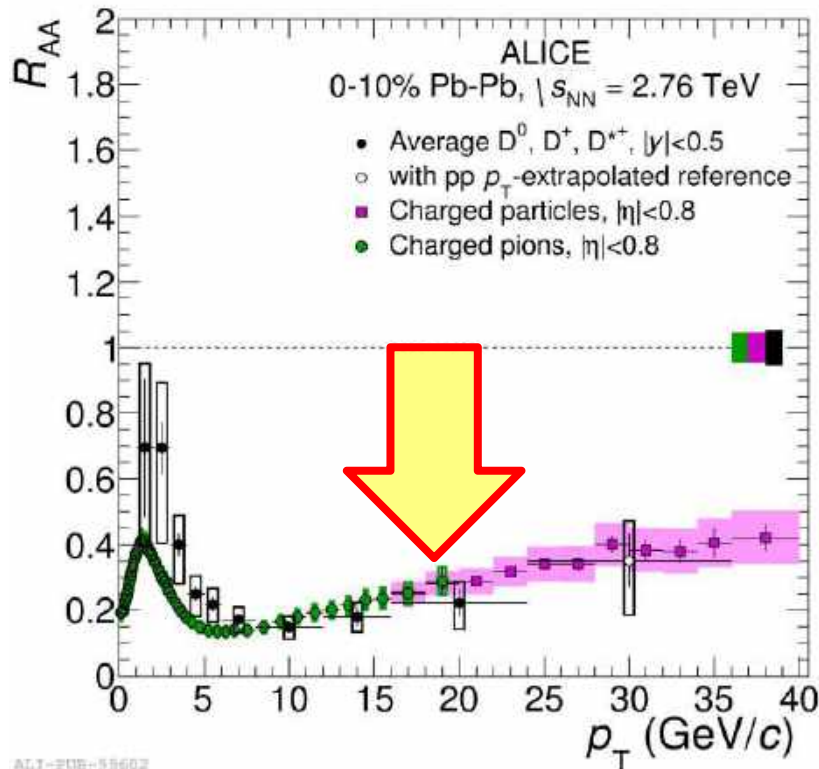
$c\tau(B) \sim 400\text{-}500 \mu\text{m}$

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!



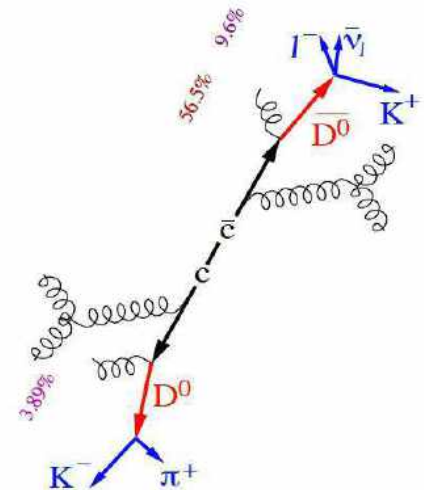
ALICE-2015-55602

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

Hozam nehézion-
ütközésekben

Elemi nukleon-nukleon
ütközések száma
nehézion- reakcióban

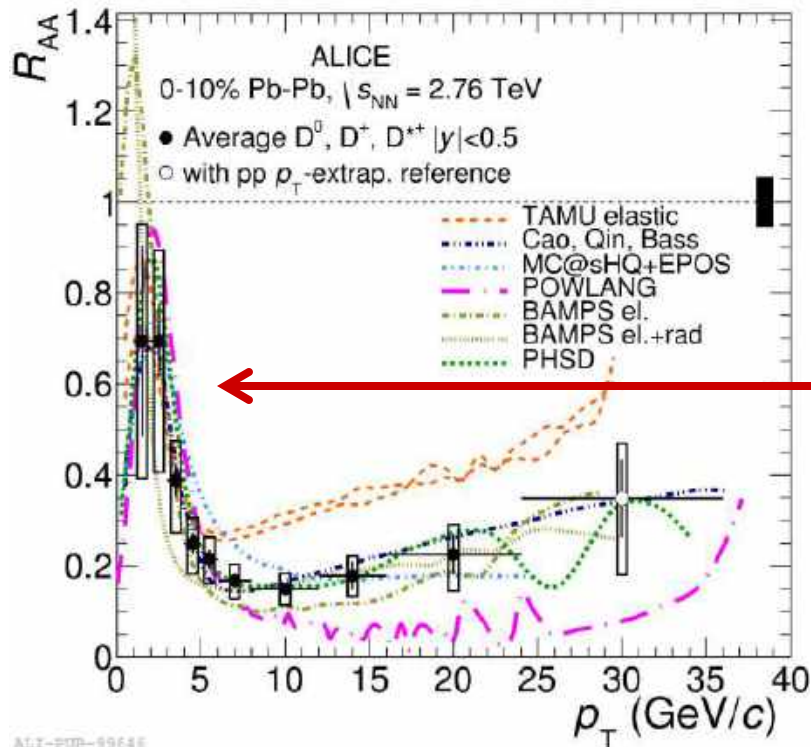
Hozam p-p
ütközésekben



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

A nehéz kvarkra hat a forró maganyag!



ALICE-P0B-99644

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

Hozam nehézion-
ütközésekben

Elemi nukleon-nukleon
ütközések száma
nehézion- reakcióban

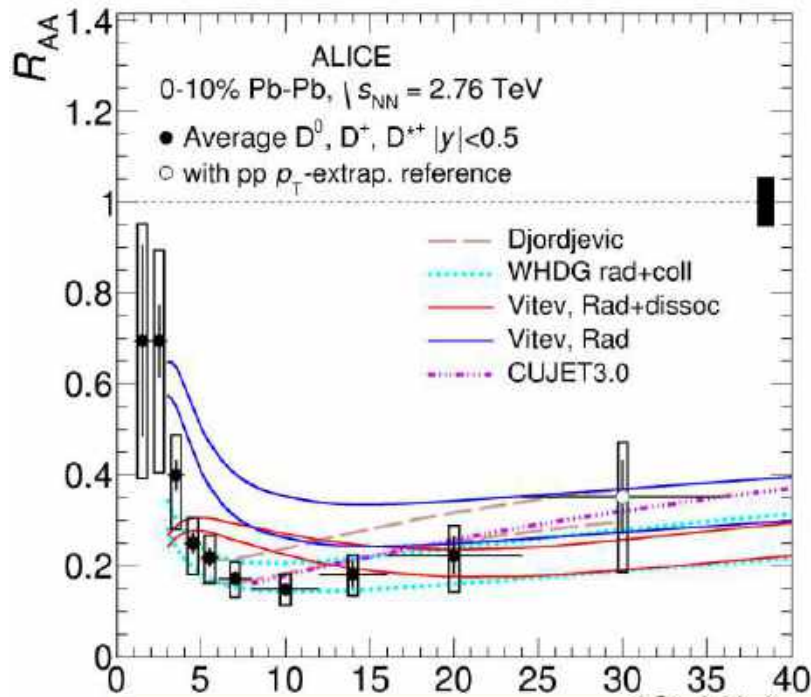
Hozam p-p
ütközésekben

- Összevetés modellekkel:
 - Transzportjellemzők
 - Kollektív dinamika
 - Termikus jellemzők
 - Energiavesztés
 - 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

A nehéz kvarkra hat a forró maganyag!



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

Hozam nehézion-
ütközésekben

Elemi nukleon-nukleon
ütközések száma
nehézion- reakcióban

Hozam p-p
ütközésekben

- **Összevetés modellekkel:**

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

Megszorítások az erős kölcsönhatás jellemzőire