

# Kollektivitás kis rendszerekben az ALICE kísérletben

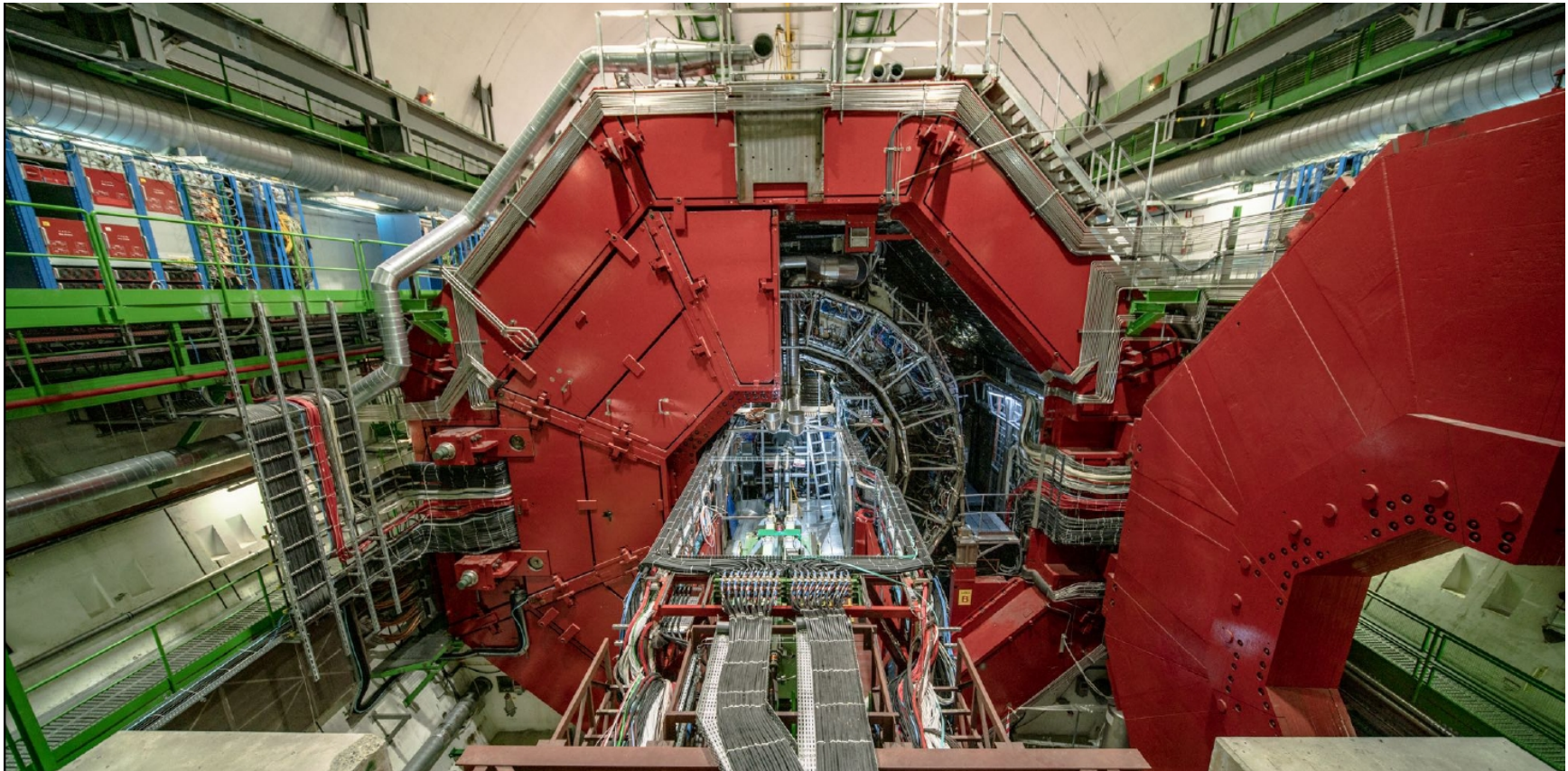
Bencédi Gyula

Wigner Fizikai Kutatóközpont  
*Nagyenergiás Fizikai Osztály*  
*Hadronfizikai Kutatócsoport*

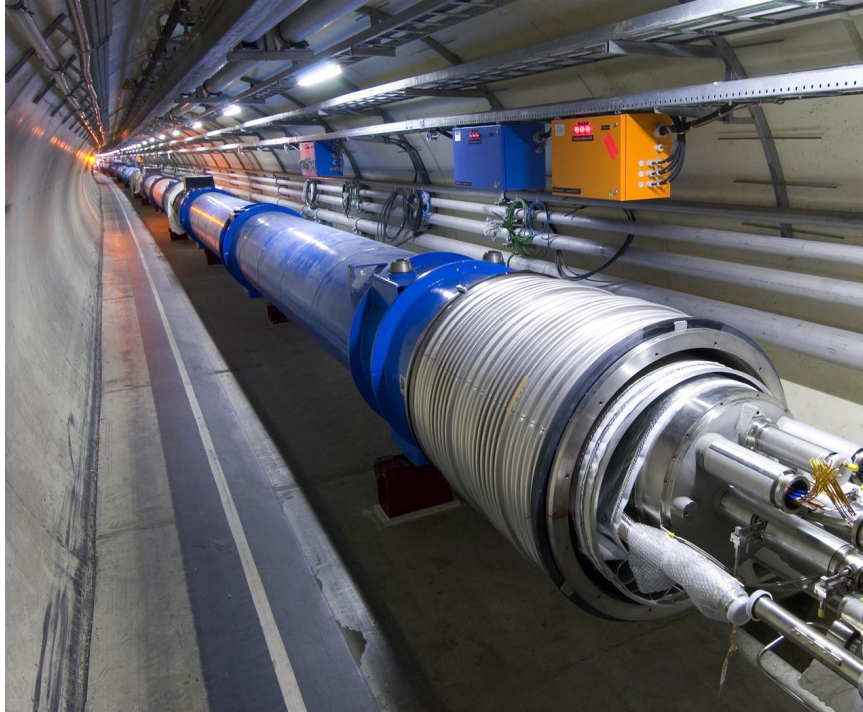
*Simonyi-Nap, MTA Díszterem*

2022. október 18.

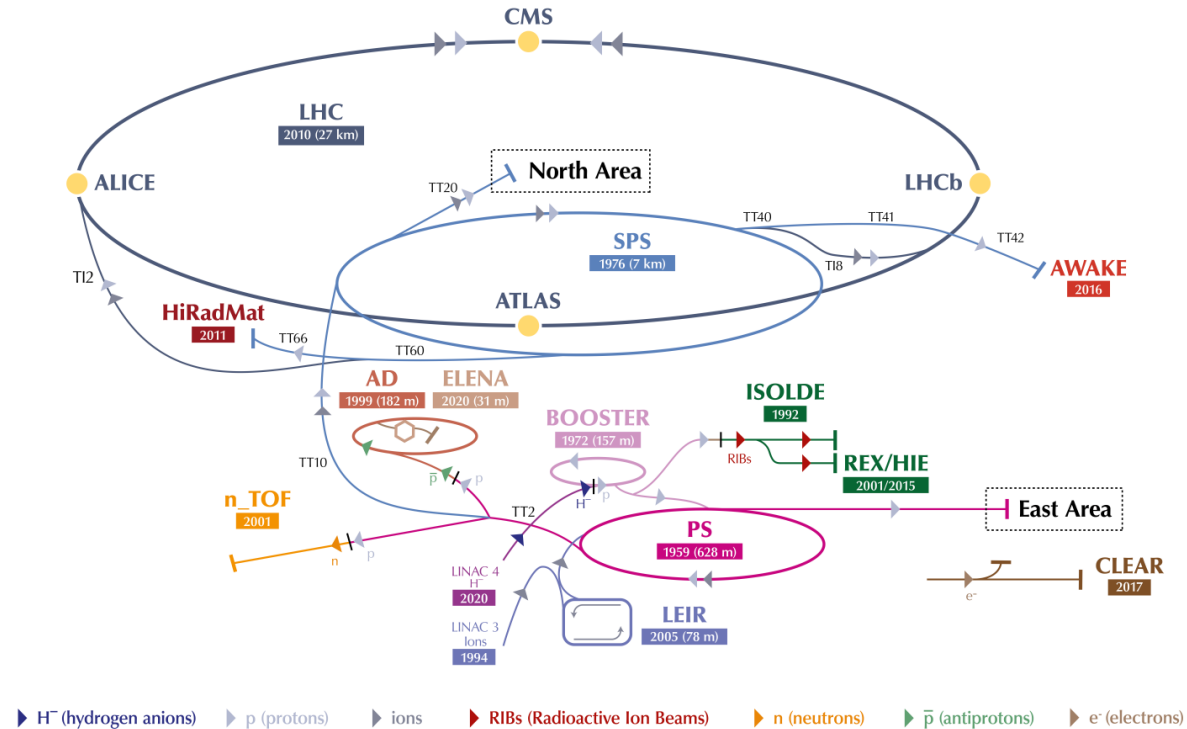
# 1. ALICE – A Nagy Ion-Ütköztető Kísérlet



# ALICE a Nagy Hadronütköztetőnél (LHC)



The CERN accelerator complex  
Complexe des accélérateurs du CERN



LHC - Large Hadron Collider // SPS - Super Proton Synchrotron // PS - Proton Synchrotron // AD - Antiproton Decelerator // CLEAR - CERN Linear Electron Accelerator for Research // AWAKE - Advanced WAKEfield Experiment // ISOLDE - Isotope Separator OnLine // REX/HIE - Radioactive Experiment/High Intensity and Energy ISOLDE // LEIR - Low Energy Ion Ring // LINAC - LiNear ACcelerator // n\_TOF - Neutrons Time Of Flight // HiRadMat - High-Radiation to Materials

Protonok és nehezebb atommagok ütköztetése (ólom,  $^{208}_{82}\text{Pb}$ ,  $^{129}\text{Xe}$ , tervben O oxigén)

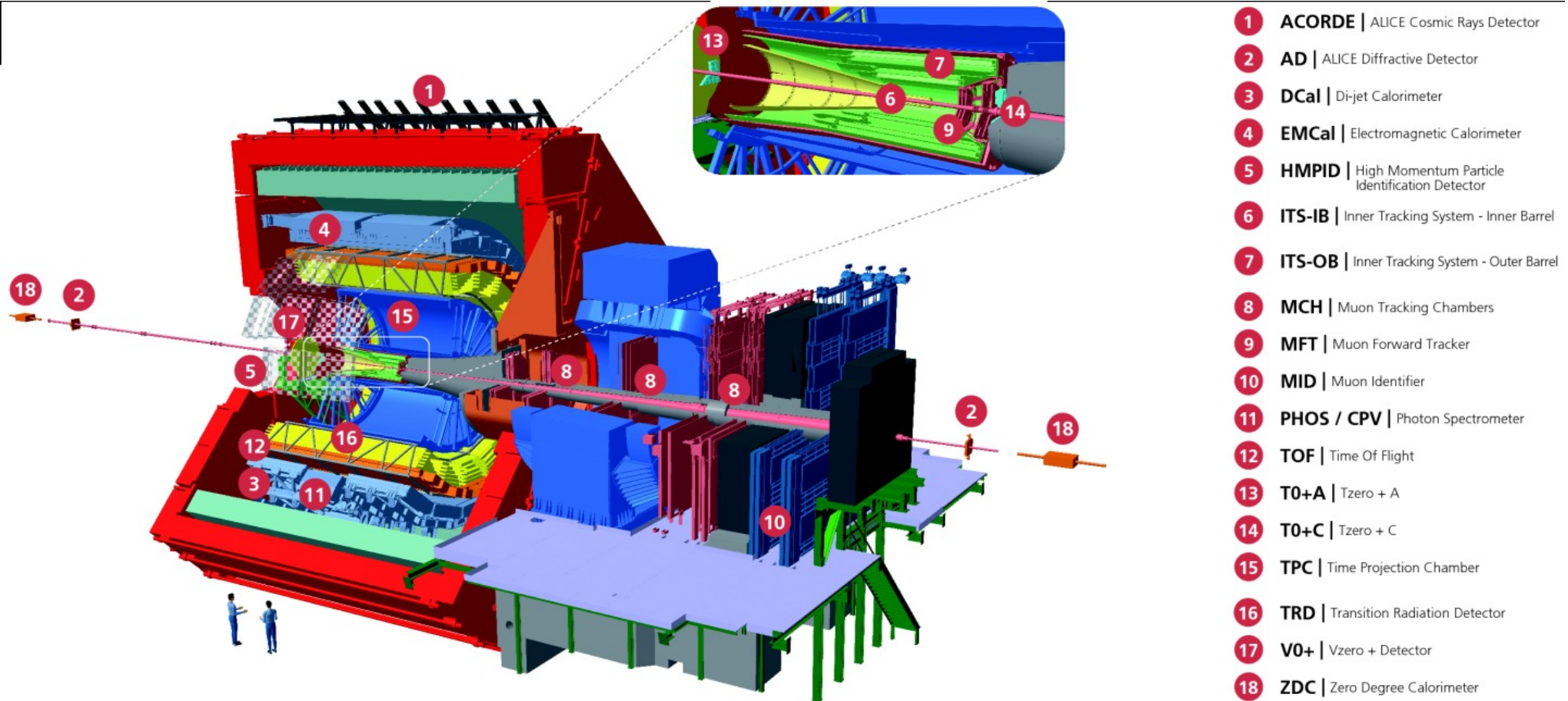
→ Példa:

→ nukleononkénti nyalábenegia  $E_{\text{PbPb}} = 82/208 \cdot 3.5 \text{ TeV} = 1.38 \text{ TeV}$

→ ütközési energia:  $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76 \text{ TeV}$  (nyalábenegia 3.5 TeV proton esetében)

→ A főbb kísérleteknek van nehézion kutatási programja, de az ALICE egy dedikált kísérlet

# ALICE – A Nagy Ion-Ütköztető Kísérlet

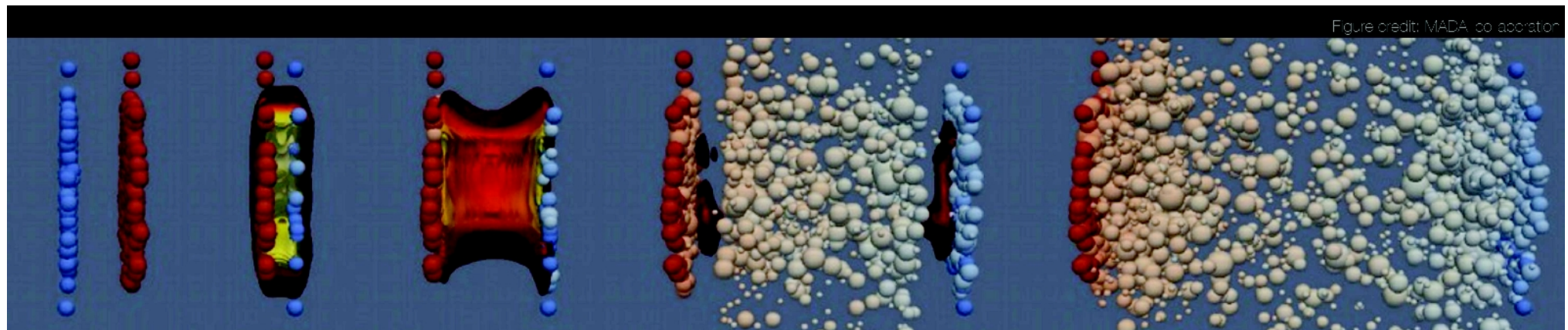


→ **Nehézion (ólom)** ütközésekre **optimalizált** kísérlet

→ **Célja** az erősen kölcsönható **kvark-gluon plazma (QGP)** tulajdonságainak **tanulmányozása**

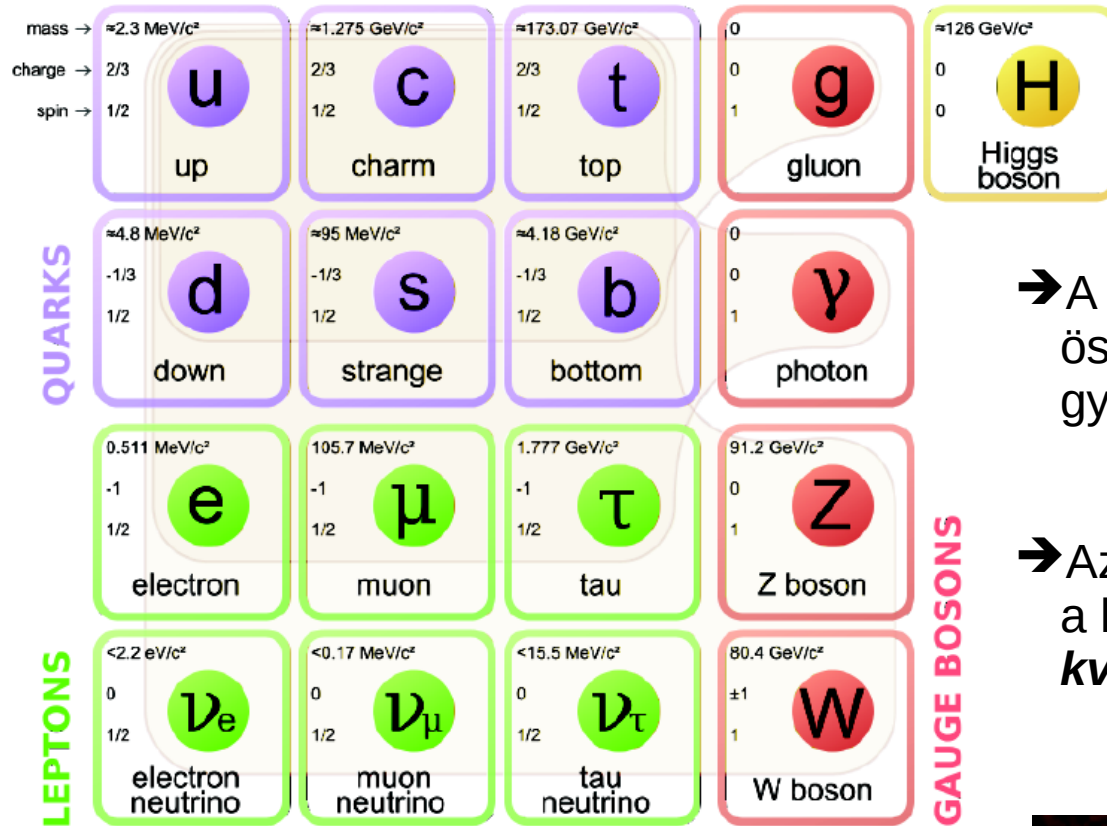
→ **Egyedülálló** részecske-nyomkövetési és azonosítási tulajdonságok

## 2. Nehézion ütközések és a kvark-gluon plazma



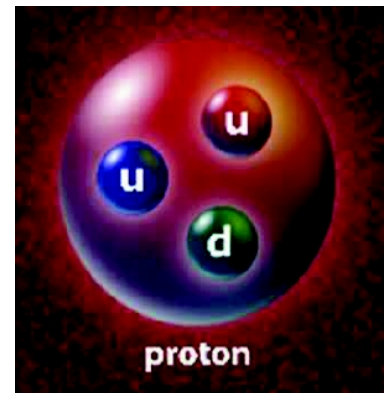
# Nehézion ütközések és a Kvantumszíndinamika (QCD)

*A közönséges anyag építőköveinek és kölcsönhatásainak leírása: Standard modell*



→ A természet alapvető kölcsönhatásait foglalja össze:  
gyenge, elektromagneses, **erős**, gravitációs

→ Az erős kölcsönhatás alapelmélete a **kvantumszíndinamika (QCD)**, mely a **kvarkok és a gluonok kölcsönhatásait** írja le



Méretskála: ~1fm = 10<sup>-15</sup>m

# Nehézion ütközések és a Kvantumszíndinamika (QCD)

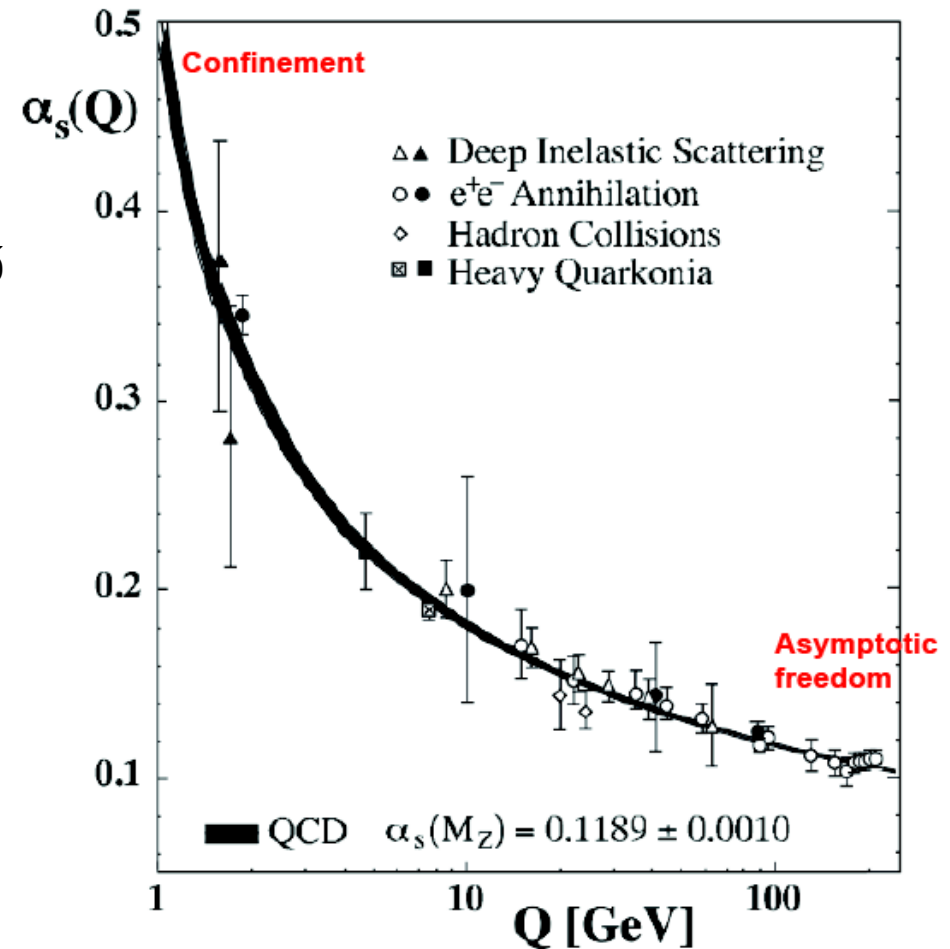
## A nehézion fizika a nagyenergiás QCD fizikája:

### A QCD főbb tulajdonságai:

- **Színbezárás:** a kvarkok a természetben csak szín-szinglett állapotban (hadronokba „zárva”: mezonok  $q$ -anti- $q$ , barionok  $qqq$ ) fordulhatnak elő
- **Aszimptotikus szabadság:** a futó csatolási állandó csökken az impulzusátadás ( $Q$ ) növekedésével

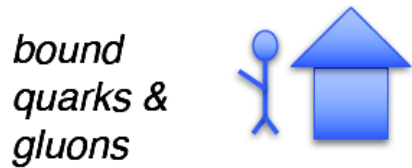
### Ab-initio számolások:

- **nagy  $Q$  érték:** a QCD perturbatív leírása alkalmazható
- **alacsony  $Q$  érték:** rács (“Lattice”) QCD alkalmazása



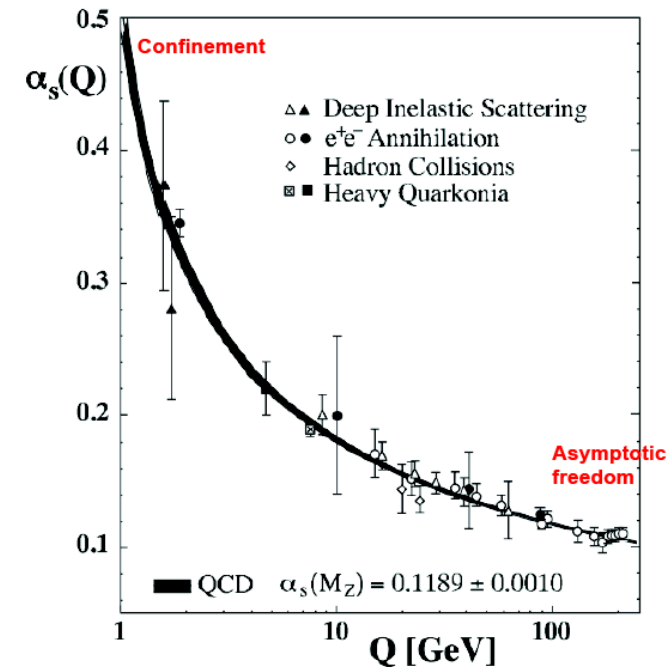
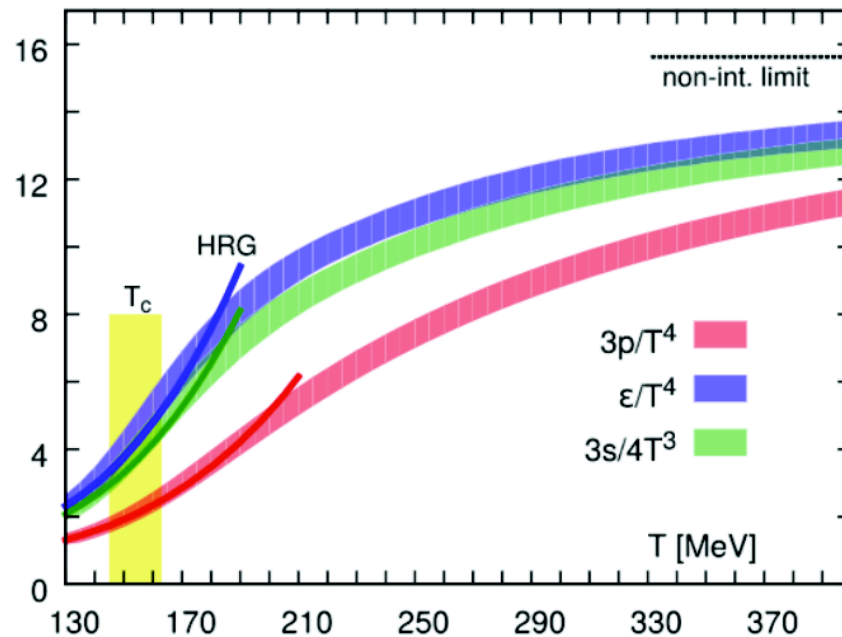
# Nehézion ütközések és a Kvantumszíndinamika (QCD)

*Quark-gluon plazma: extrém magas energiasűrűségnél és hőmérsékletnél a kvarkok és gluonok "szabadokká" válnak*



Where is the phase transition?  
→ Lattice QCD

Asymptotic freedom: free quarks & gluons



Összehasonlítás:

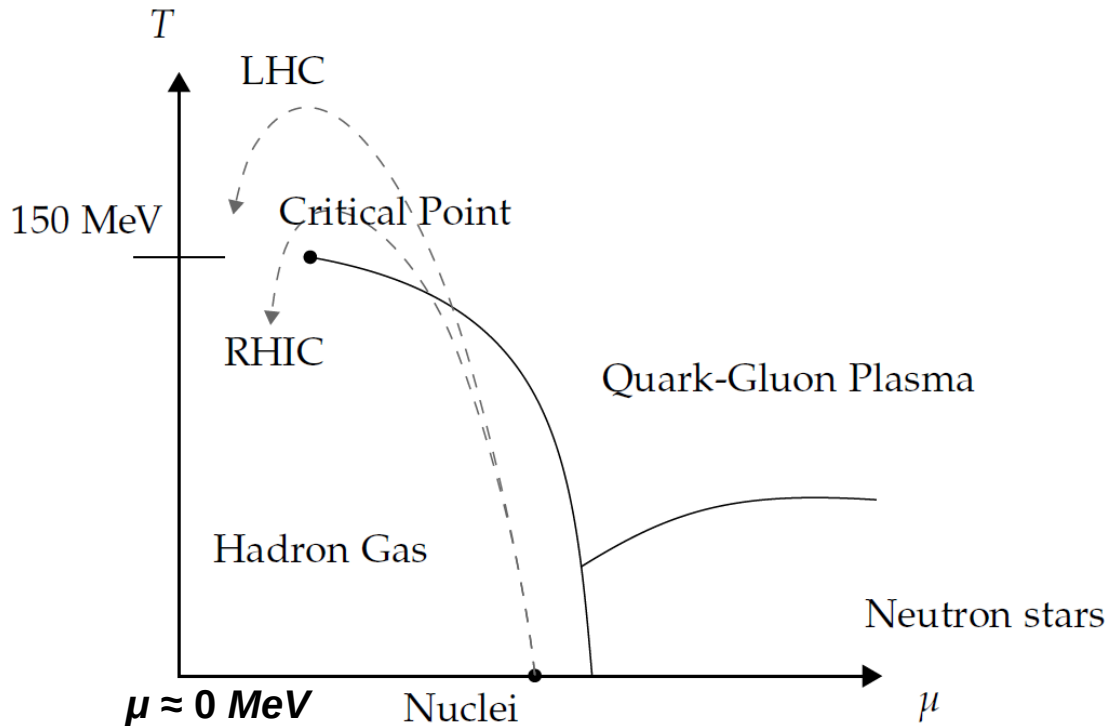
$T_c = 156 \text{ MeV} \approx 10^{12} \text{ K}$   
Nap magja:  $T \approx 10^7 \text{ K}$   
Nap felszíne:  $T \approx 5800 \text{ K}$

Termodinamikai mennyiségek markáns emelkedése  
→ **Hadron-parton** szabadsági fokok **fázisátmenete**

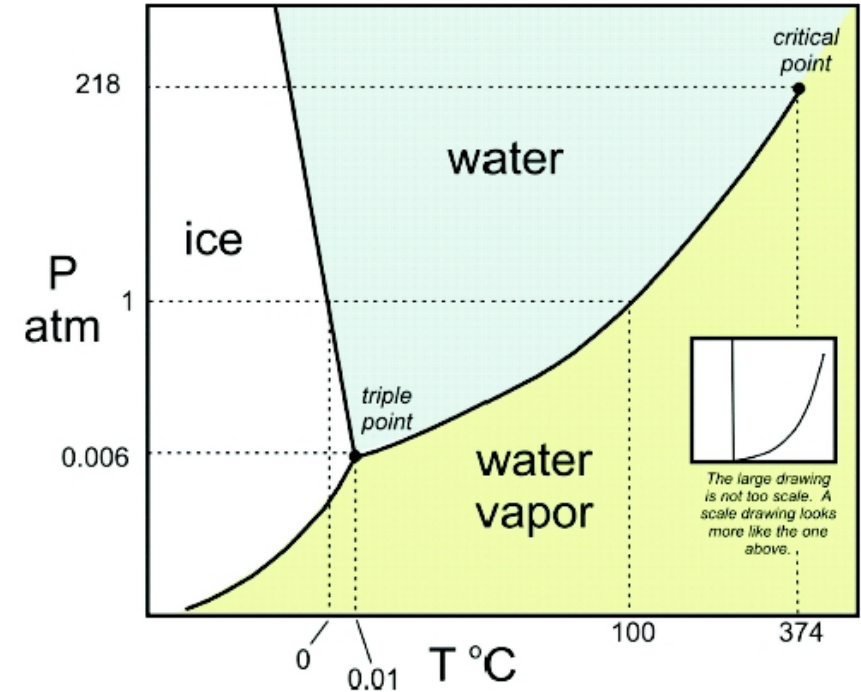


# Nehézion ütközések és a Kvantumszíndinamika (QCD)

## A QCD aszimptotikus állapota: kvark-gluon plazma (QGP)

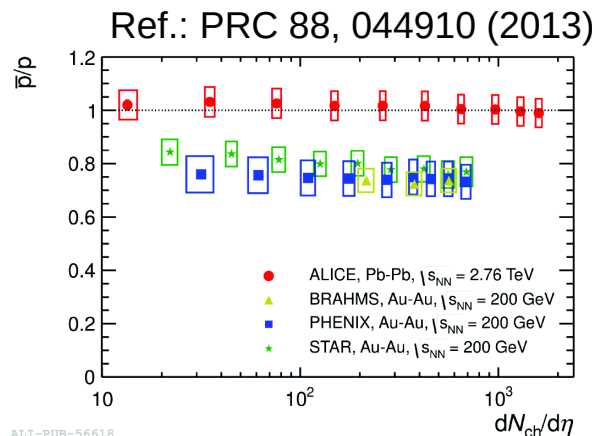


Ábra: A QCD fázisdiagrammja



Ábra: A víz fázisdiagrammja

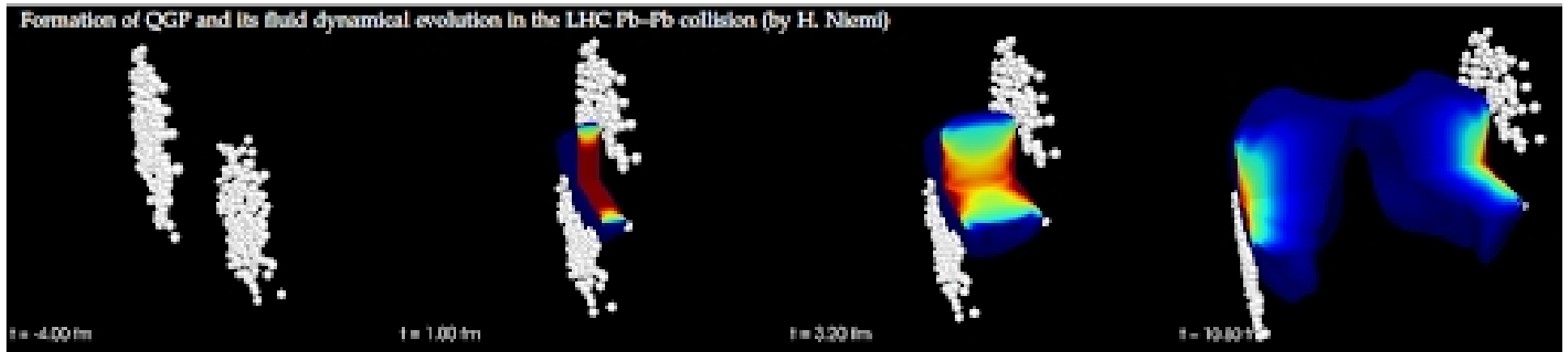
- Konroll paraméterek:  
 $T$  hőmérséklet,  
 $\mu$  bariokémiai potenciál  
 = barionok és anti-barionok számának különbsége





# Nagy bumm a Világegyetemben, kis bumm a laboratóriumban

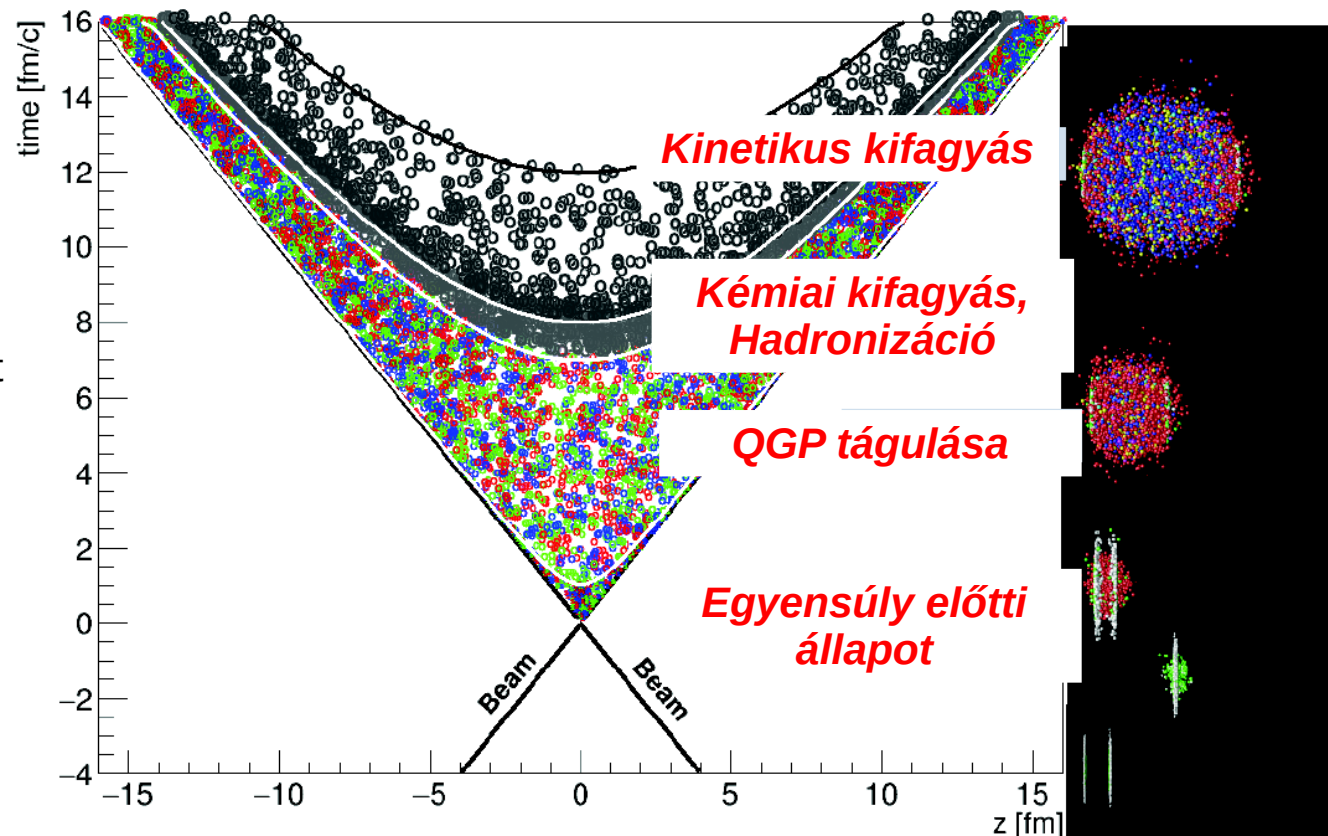
## A kvark-gluon plazma (QGP) teridő fejlődése



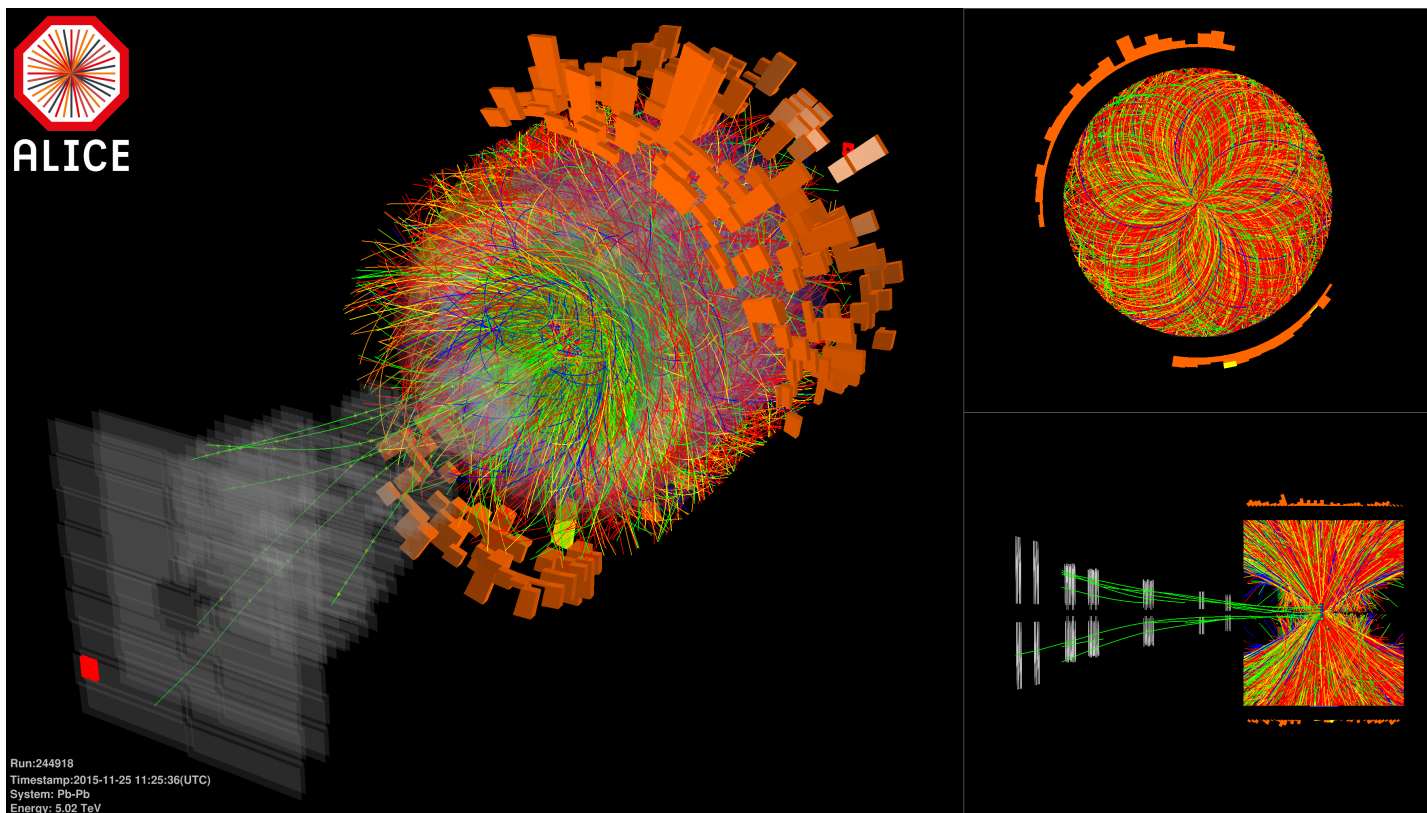
Kvark-gluon plazma keletkezése nehéz (ólom) ionok ütköztetésével

→ Forró:  $T \sim 300$  MeV kezdeti hőmérséklet  
Kísérletből:  $T = 304 \pm 11 \pm 40$  MeV  
Ref.: Phys. Lett. B 754 (2016) 235-248

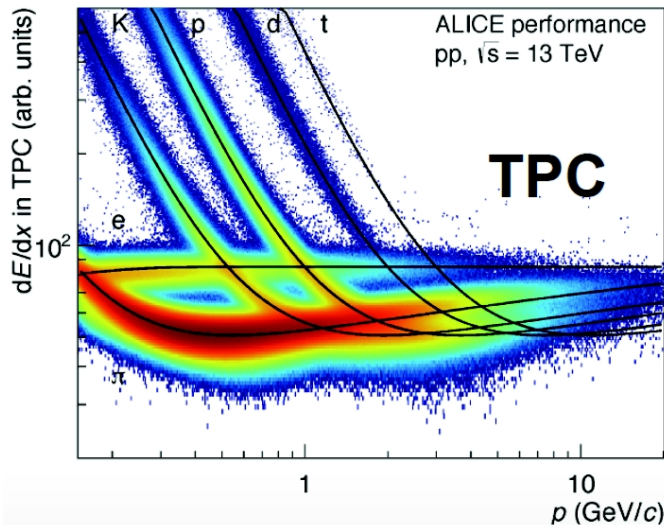
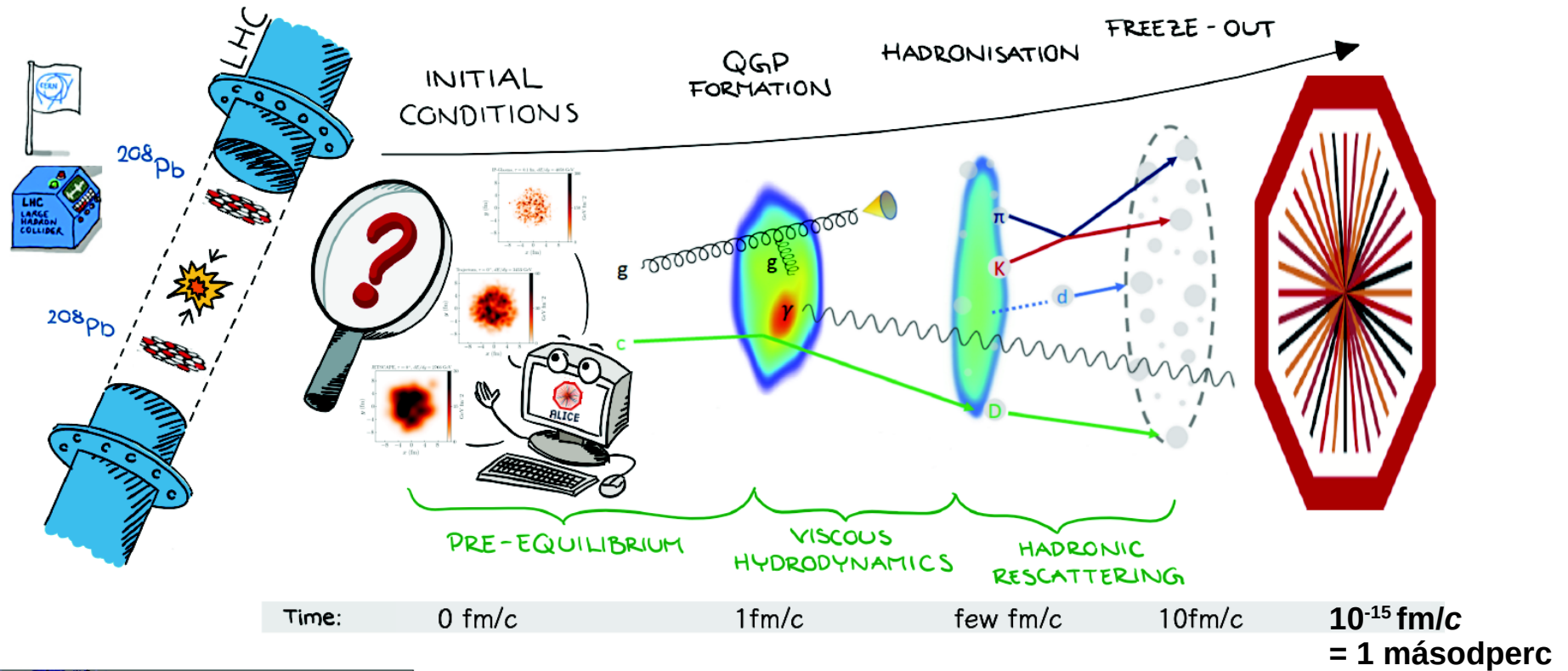
→ Rövid élettartam:  $\sim 10^{-23}$  másodperc



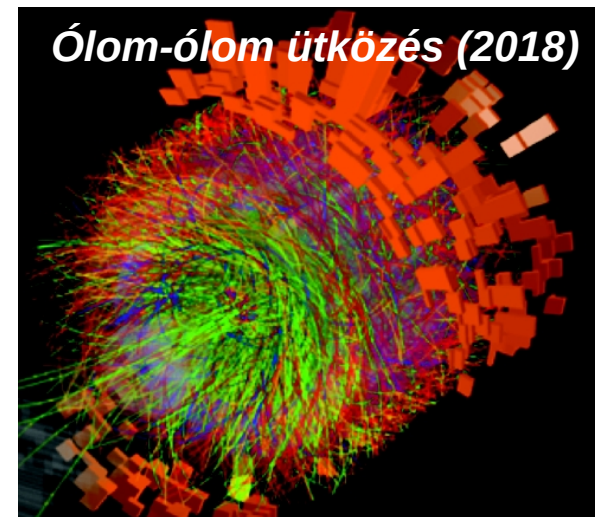
### 3. “Kifagyott” állapot: A részecskék mérése



# “Kifagyott” állapot: A részecskék mérése



**A töltött részecskék irány- és impulzuseloszlásainak mérései információt adnak a QGP állapotáról**



Ábra: Töltött részecskék energialeadása az Időprojekciós kamrában

# “Kifagyott” állapot: A keletkező részecskék számának mérése

→ Egy centrális ólom-ólm ütközésben  
~2000 részecske keletkezik

→ A részecskék lokális termális  
egyensúlyban vannak:

→ **Hidrodinamikai modellek** leírják a  
részecskék impulzus és irányeloszlásait  
(radiális és elliptikus “folyás”)

→ **kinetikus egyensúly**

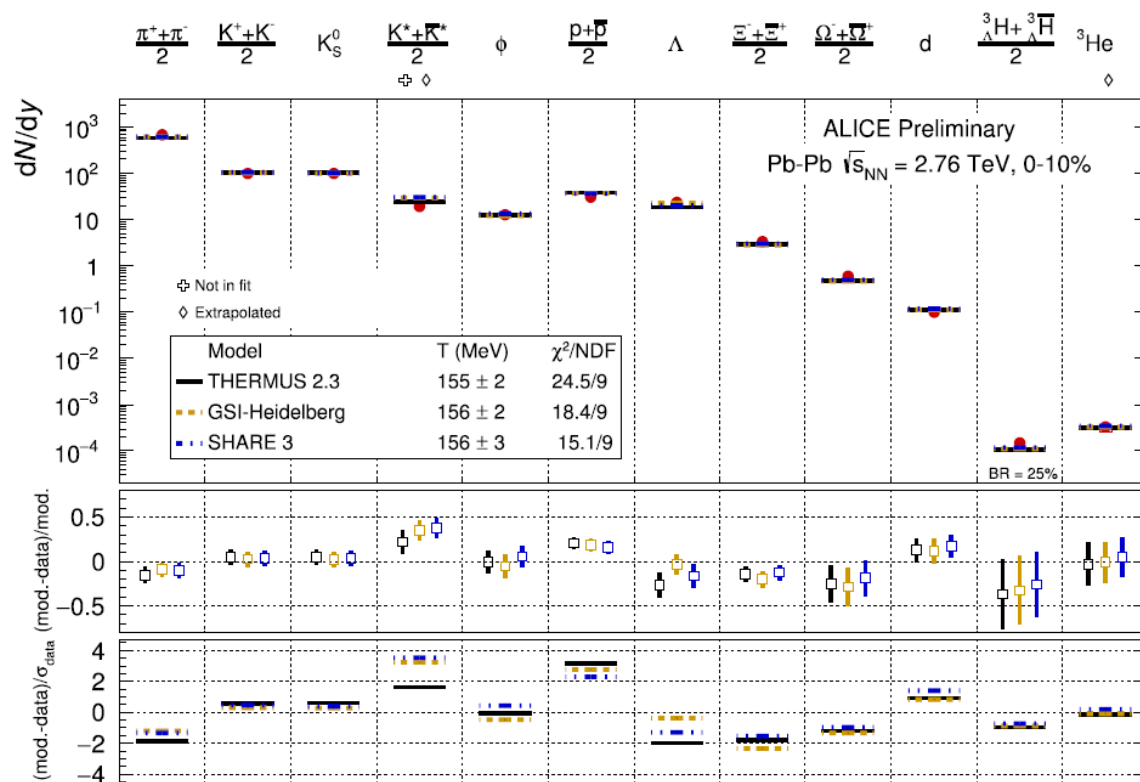
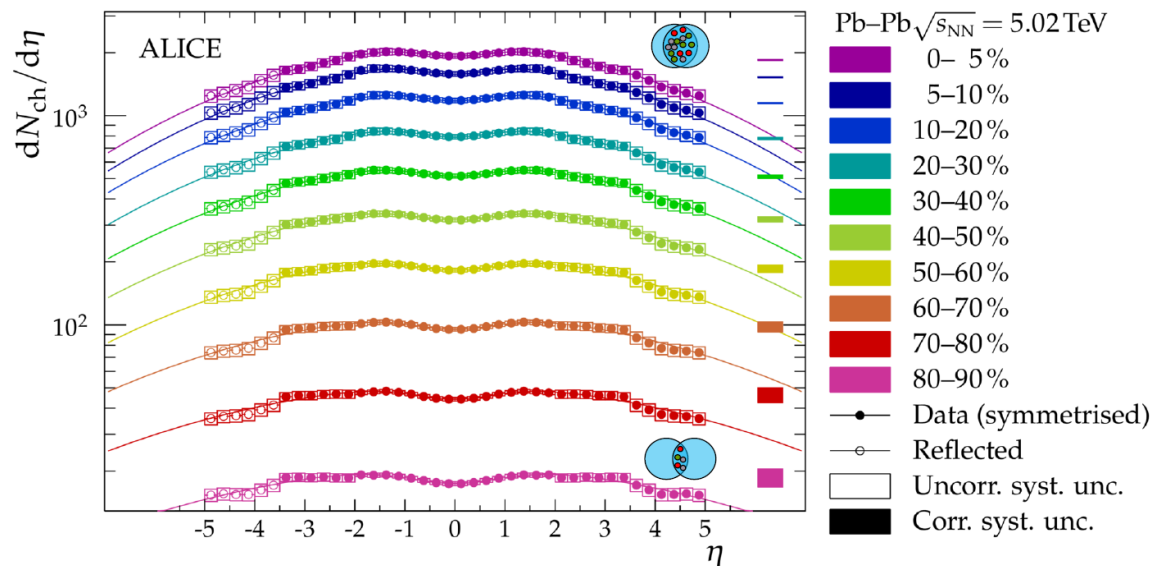
kísérletből:  $T_{kin} \approx 80 \text{ MeV}$

→ **Termális modellek** leírják a könnyű  
kvarkokat (u,d,s) tartalmazó hadronok  
hozamait

→ **kémiai egyensúly**

kísérletből:  $T_{kin} \approx 156 \text{ MeV}$

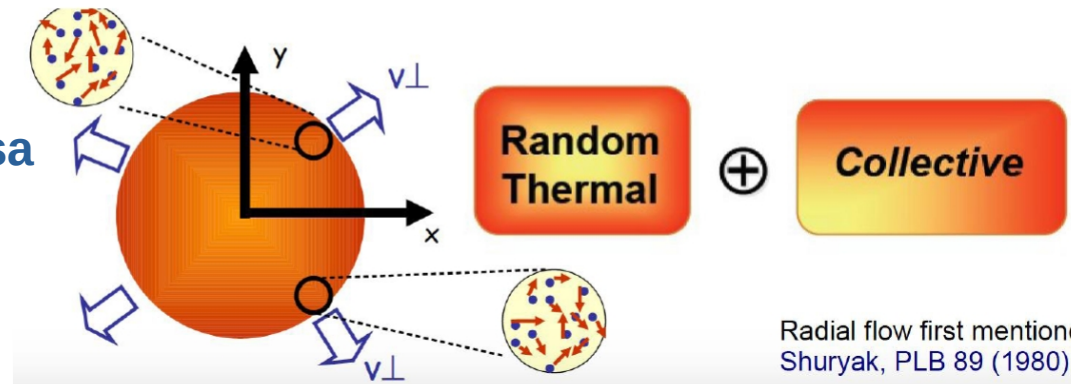
(jó egyezés a rács QCD számolással)



# A kvark-gluon plazma (QGP) kísérleti tanulmányozása

## “Lágy próbák”: a “folyás” (flow)

Folyási kép: részecskék kollektív mozgása



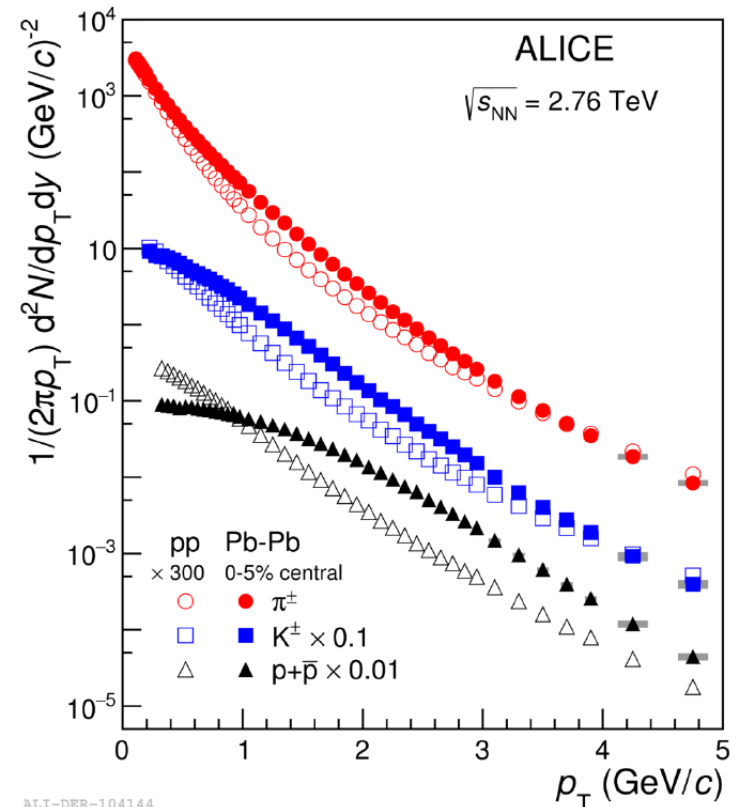
Radial flow first mentioned:  
Shuryak, PLB 89 (1980) 253

**Radiális folyás** (nyomásgradiensek hatására radiális hidrodinamikai tágulás):

→ természetes következménye a kölcsönható rendszer vákuumba történő tágulásakor

→ A  $p_T$  spektrumok alakjának változása függ a részecske tömegétől  $p = \beta\gamma \cdot m$

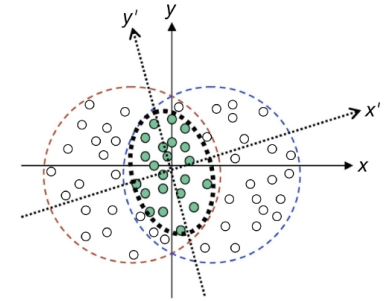
→ A töltött hadronok 95%-a 2 GeV/c alatti (transzverzális) impulzuseloszlással keletkezik → “lágy” folyamat → pQCD nem alkalmazható



# A kvark-gluon plazma (QGP) kísérleti tanulmányozása

## “Lágy próbák”: a “folyás” (flow)

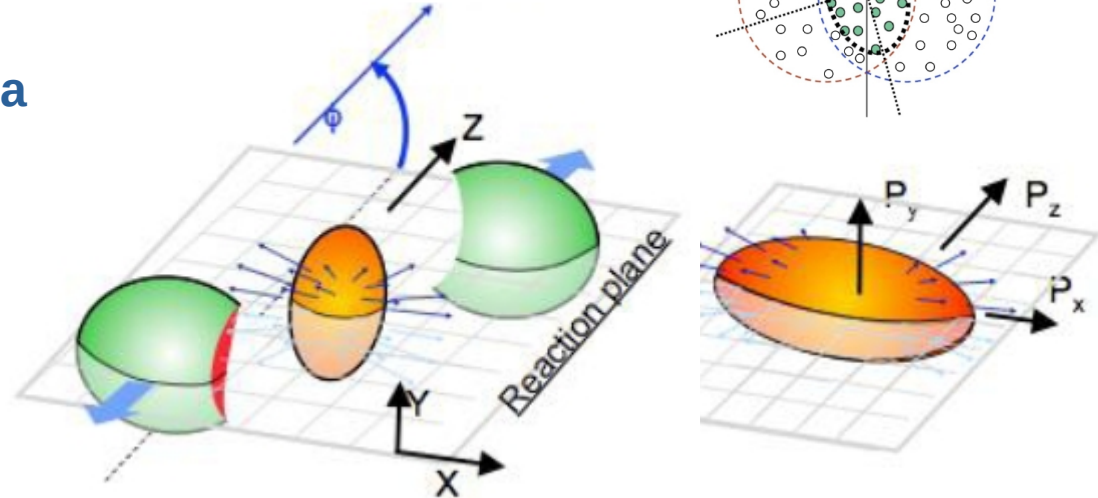
Térbeli deformáció



Folyási kép: részecskék kollektív mozgása

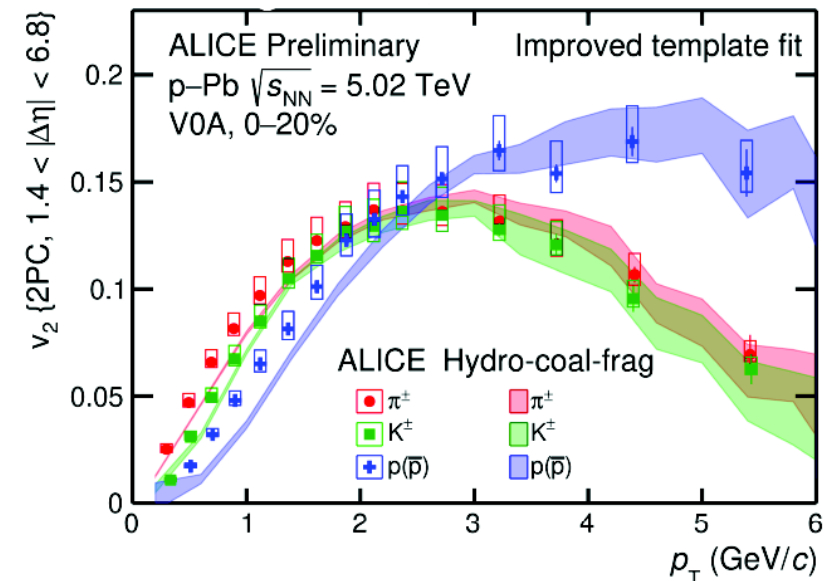
Elliptikus folyás:

- Kezdeti állapotban térbeli anizotrópia  
→ végállapotú impulzus anizotrópia
- A QGP kölcsönható közeg kezdeti feltételekre adott válasza érződik a végállapotú részecskék szögeloszlásán



$$E \frac{d^3 N}{d^3 p} = \frac{1}{2\pi} \frac{d^2 N}{p_t dp_t dy} \left( 1 + \sum_{n=1}^{\infty} 2v_n \cos[n(\phi - \Psi_R)] \right)$$

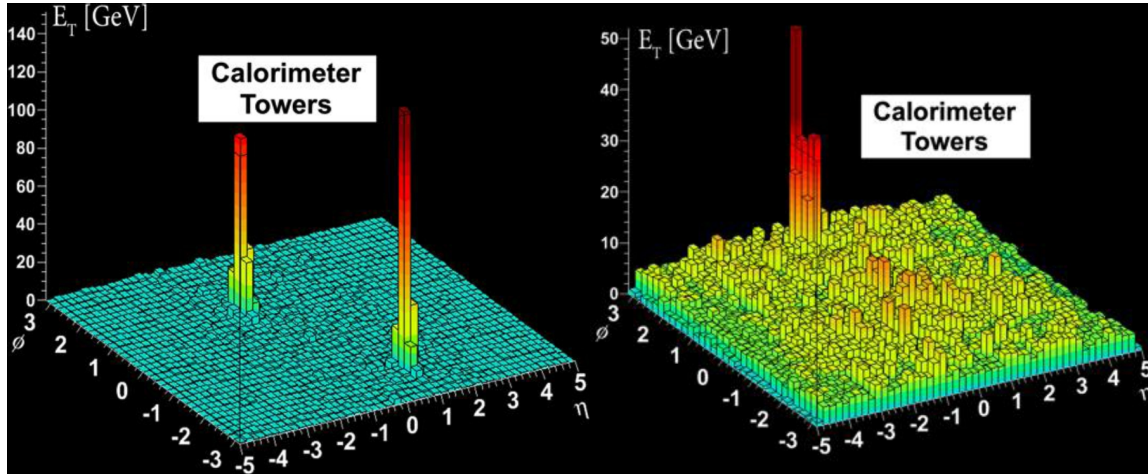
Radiális folyás,  $v_1$  – direkt folyás,  $v_2$  – elliptikus, ...





# A kvark-gluon plazma (QGP) kísérleti tanulmányozása

“Kemény próbák”: nagy  $p_T$ -s hadronok, jetek

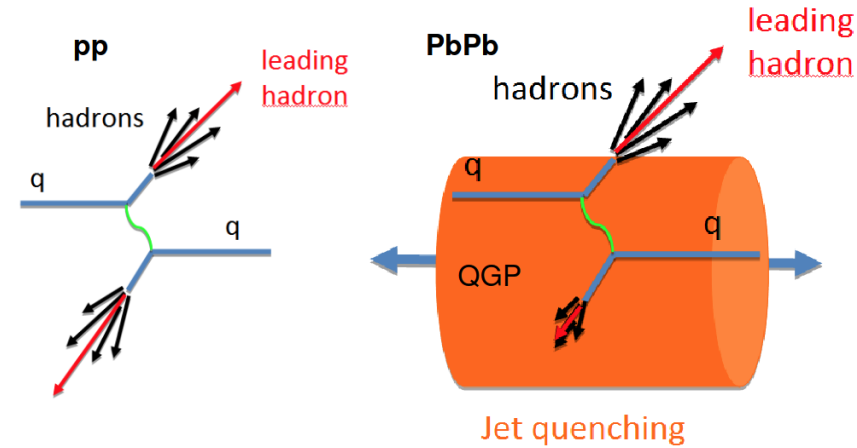


Peripheral Pb-Pb

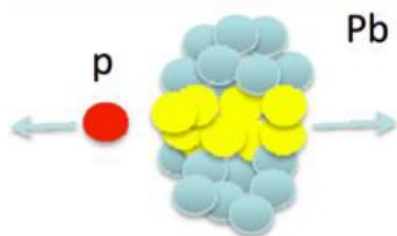


[PRL105:252303,2010]

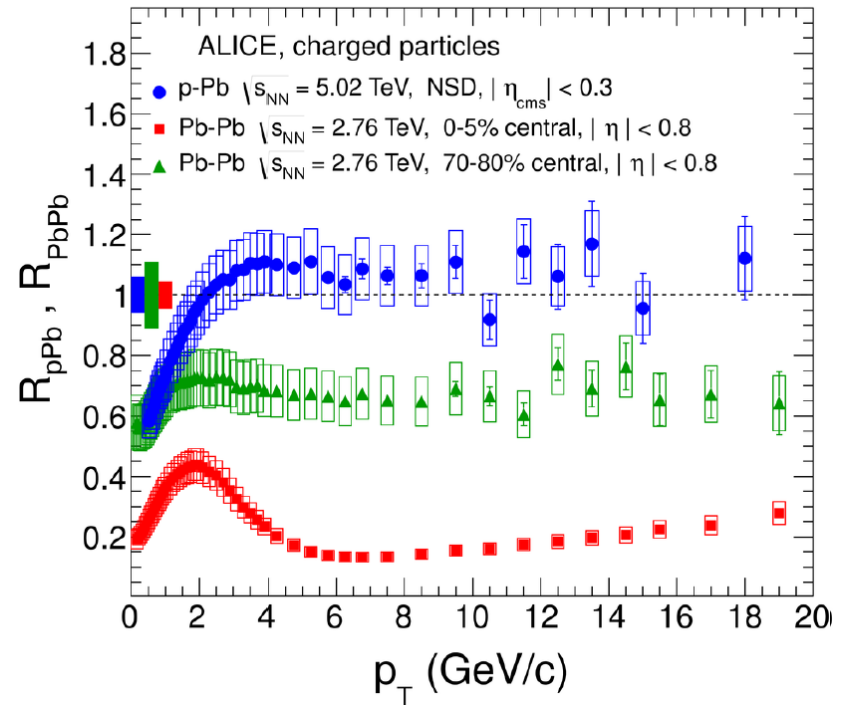
Central Pb-Pb



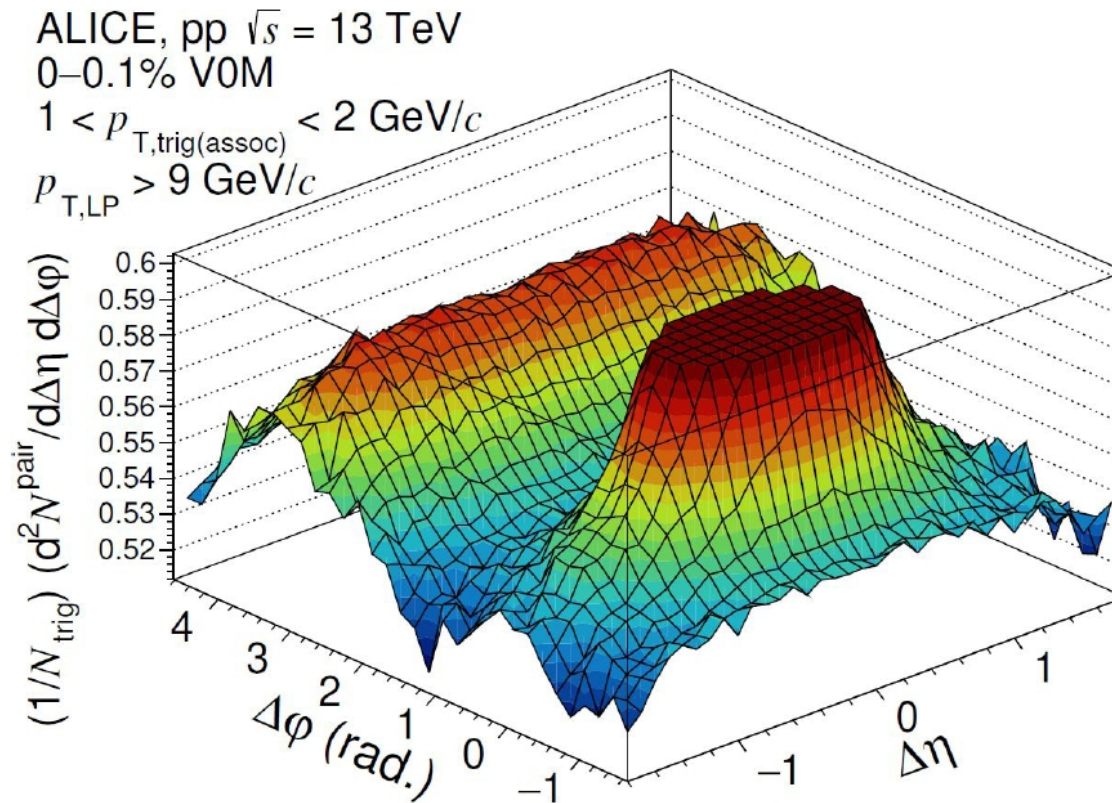
- perturbatív QCD leírás alkalmazható:  
 $p_T \gg \Lambda_{\text{QCD}}$  ( $\tau \approx 1/p_T \approx 0.1$  fm/c),
- nagy  $p_T$ -jű töltött hadronok hozamának csökkenése



$$R_{pA} = \frac{dN_{pA} / dp_T}{\langle N_{\text{coll}} \rangle dN_{pp} / dp_T}$$



# 4. Főbb kollektív jelenségek a kísérletekben



ALI-PUB-496472

# Főbb kollektív jelenségek a kísérletekben

## A) Kétrészecske korrelációk

1) Kollektív folyás szignatúrája: a végállotti részecskék azimutális eloszlásának anizotrópiája

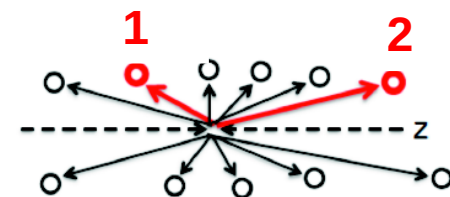
2) Szögeloszlás megadható:

$$E \frac{d^3 N}{d^3 p} = \frac{1}{2\pi} \frac{d^2 N}{p_t dp_t dy} \left( 1 + \sum_{n=1}^{\infty} 2v_n \cos[n(\phi - \Psi_R)] \right)$$

Radiális folyás,  $v_1$  – direkt folyás,  $v_2$  – elliptikus, ... folyás, ... stb.

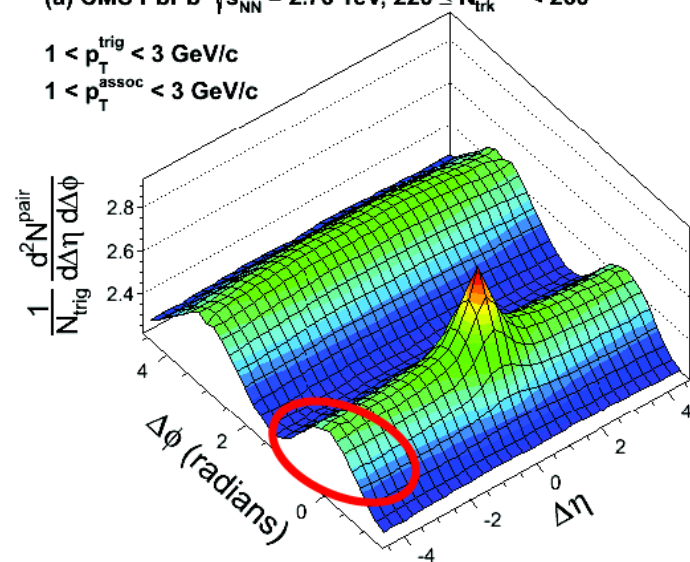
3) Két részecske esetében:

$$\frac{dN^{\text{pair}}}{d\Delta\phi} = \frac{N^{\text{pair}}}{2\pi} \left( 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} V_{n\Delta} \cos n\Delta\phi \right)$$



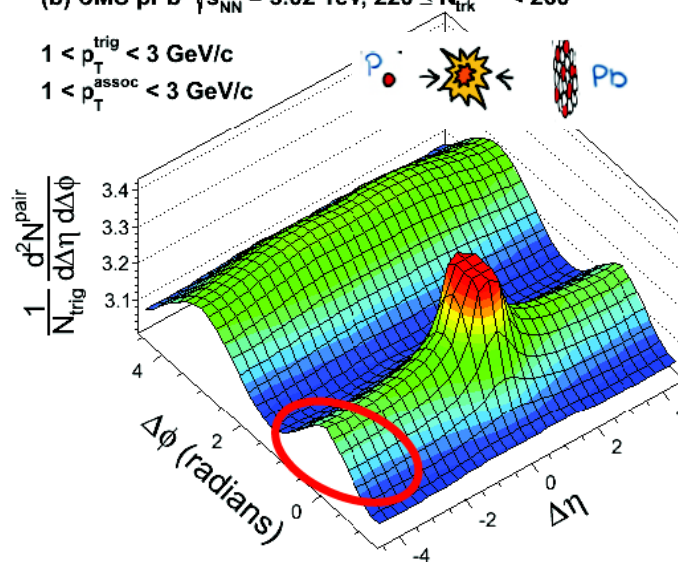
(a) CMS PbPb  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV,  $220 \leq N_{\text{trk}}^{\text{offline}} < 260$

$1 < p_T^{\text{trig}} < 3$  GeV/c  
 $1 < p_T^{\text{assoc}} < 3$  GeV/c



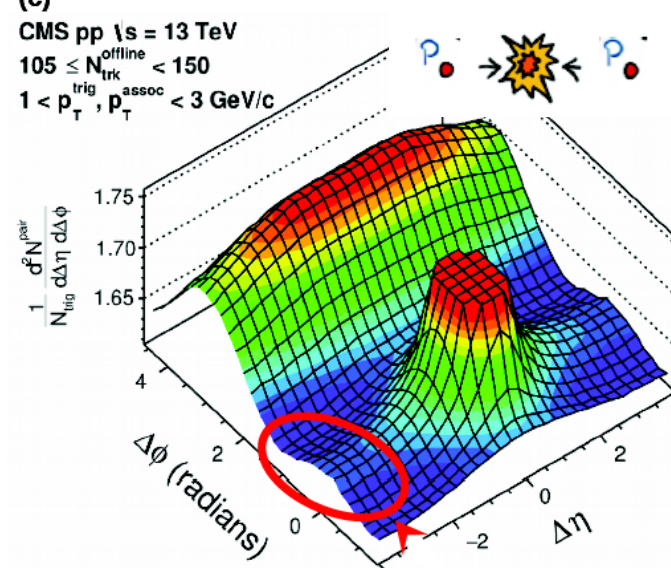
(b) CMS pPb  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV,  $220 \leq N_{\text{trk}}^{\text{offline}} < 260$

$1 < p_T^{\text{trig}} < 3$  GeV/c  
 $1 < p_T^{\text{assoc}} < 3$  GeV/c



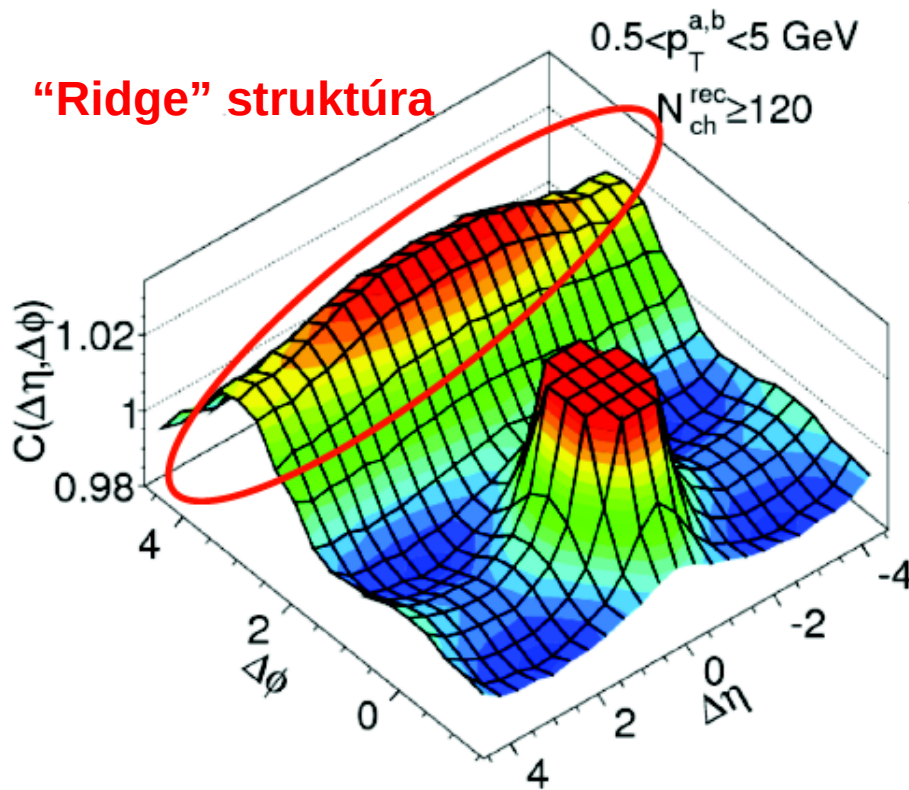
(c)

CMS pp  $\sqrt{s} = 13$  TeV  
 $105 \leq N_{\text{trk}}^{\text{offline}} < 150$   
 $1 < p_T^{\text{trig}}, p_T^{\text{assoc}} < 3$  GeV/c

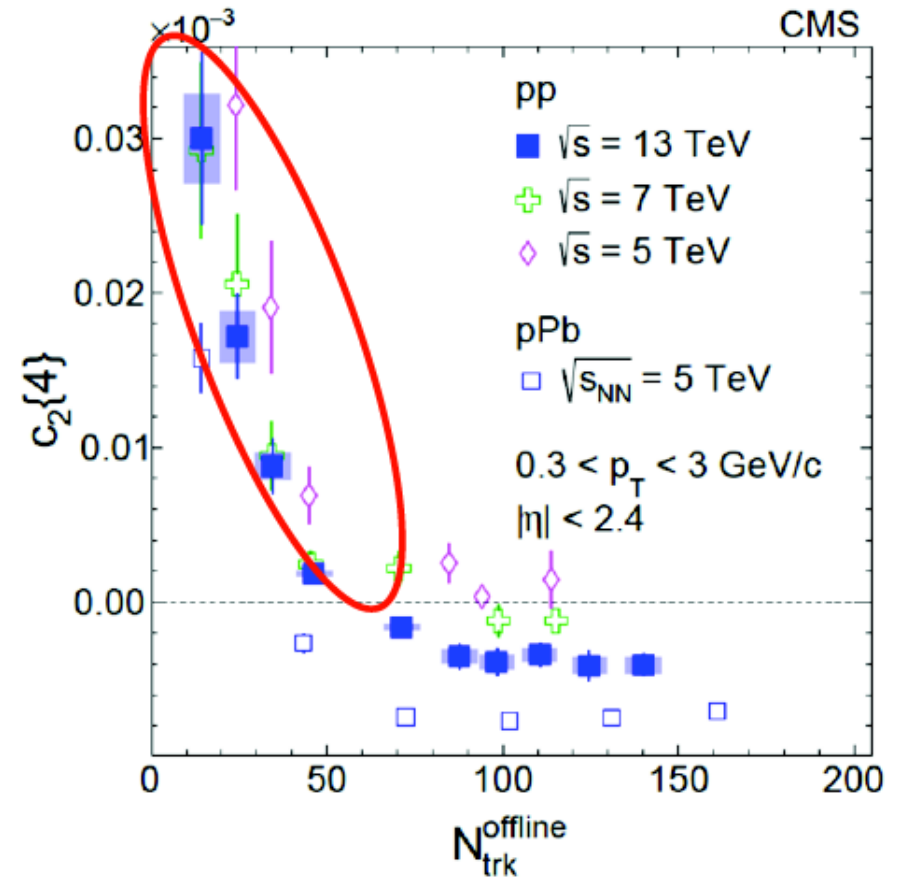


# Főbb kollektív jelenségek a kísérletekben

## A) Kétrészecske korrelációk



pp



**Hosszútávú korrelációs struktúra**

**Sokrészecske jel: folyási együtthatók**

→ Kollektív jelenségek kis rendszerekben is megfigyelhetők

→ **“Ridge” struktúra:** első kísérleti bizonyítéka a folyásszerű jelenségeknek proton-proton ütközésekben nagy végállapotú részecskeszám mellett

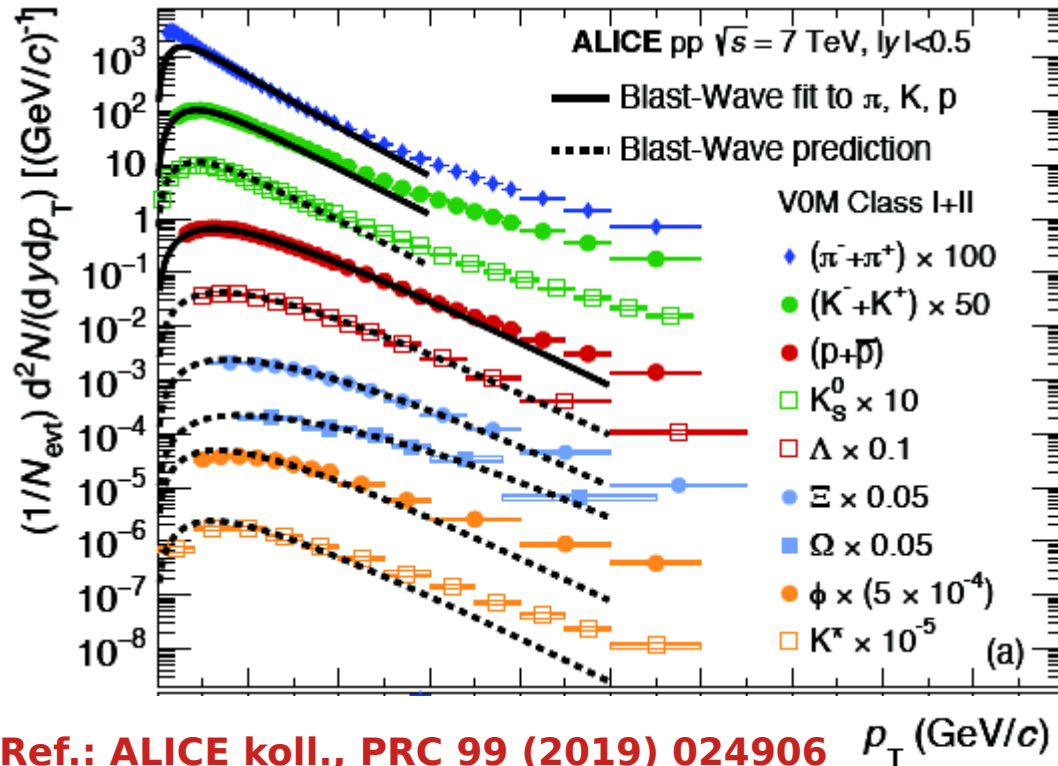
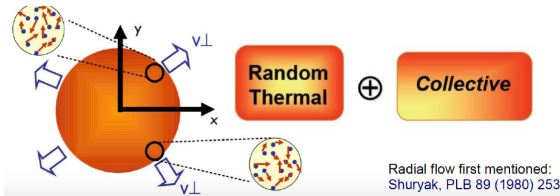
# Főbb kollektív jelenségek a kísérletekben

## B) Radiális folyás mérése részecske $p_T$ eloszlásokon

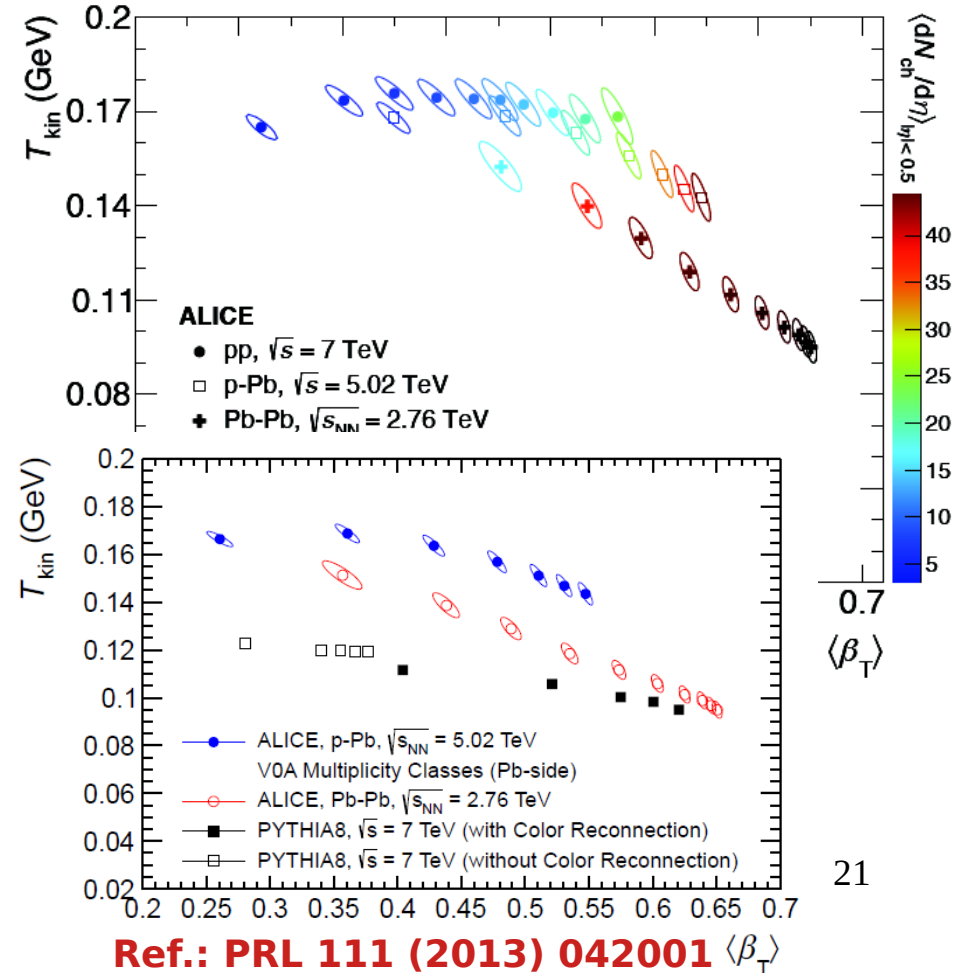
### Kvantifikálás Blast-Wave modellel: egyszerűsített hidrodinamikai modell

szabad paraméterek: kinetikus kifagyási hőmérséklet  $T_{\text{kin}}$  és a tágulási sebesség  $\beta_T$

$$\frac{dN}{p_T dp_T} \propto \int_0^R r dr m_T I_0 \left( \frac{p_T \sinh \rho}{T_{\text{kin}}} \right) K_1 \left( \frac{m_T \cosh \rho}{T_{\text{kin}}} \right) \quad \rho = \tanh^{-1}(\beta_T)$$



Ref.: ALICE koll., PRC 99 (2019) 024906



Ref.: PRL 111 (2013) 042001  $\langle \beta_T \rangle$

# Kis rendszerek kollektivitása – Jelenlegi képünk

## Nyitott kérdések:

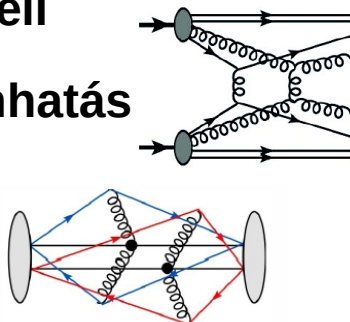
- Hidrodinamikai modellek nem írják le a többrészesekés korrelációs mennyiségeket
- Részecskezápörök (jetek) energiavesztését nem figyelték meg

## A megfigyelt kollektív effektusok eredete nem tisztázott:

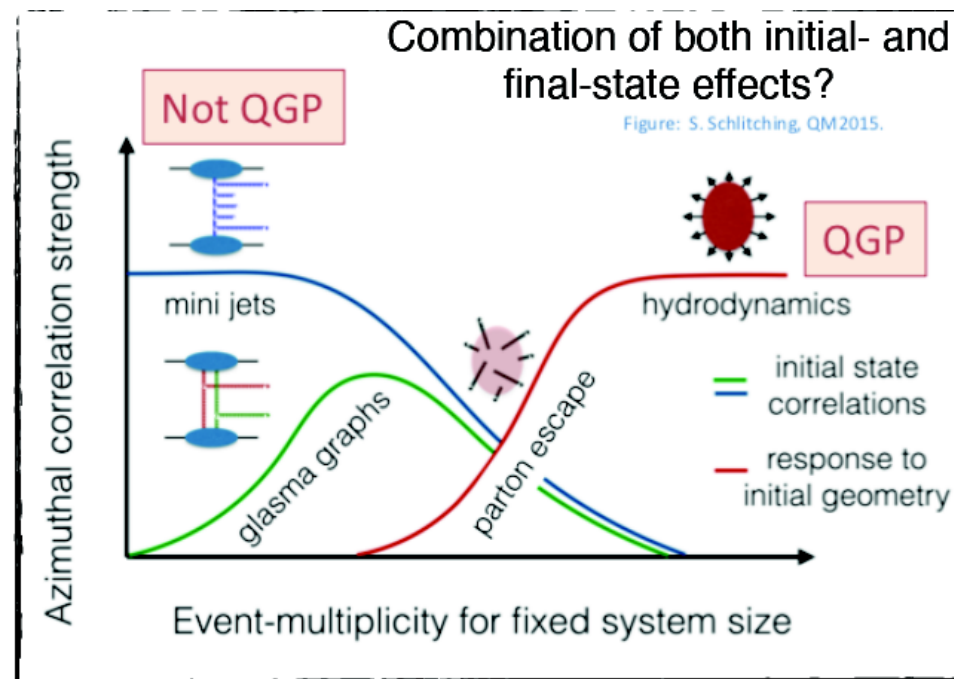
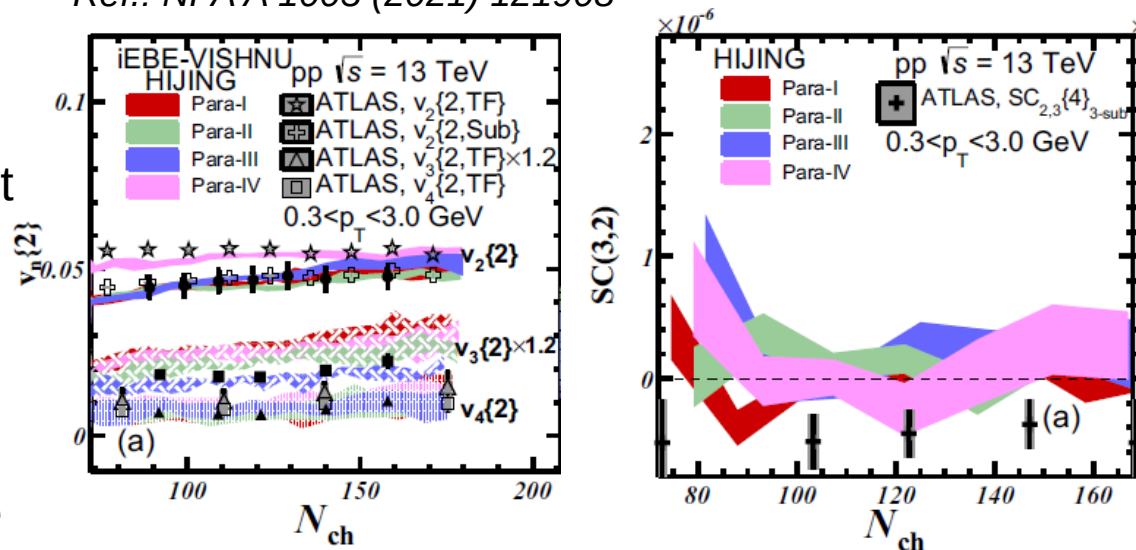
A kollektív viselkedéshez nem szükséges feltétel a QGP, **vákuum-QCD effektusok** produkálhatnak ilyet:

Például a PYTHIA modell

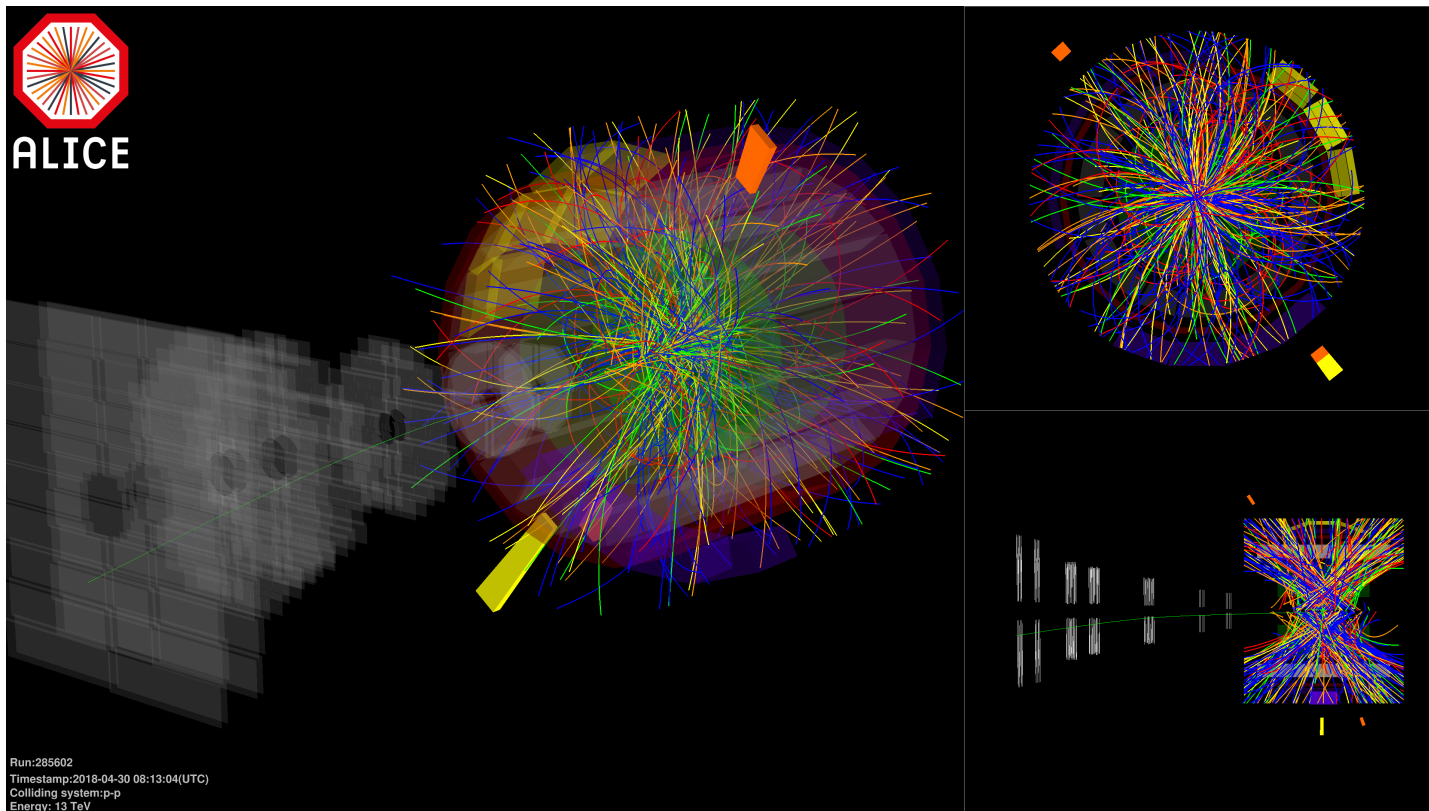
- Sokparton-kölcsönhatás
- Szín-újrarendezés



Ref.: NPA A 1005 (2021) 121908



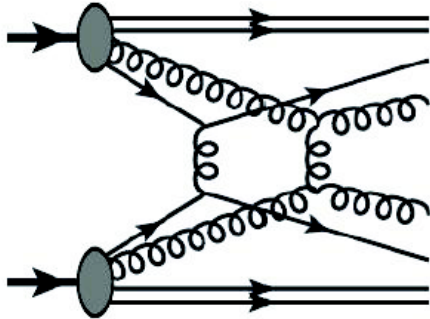
# 5. A proton-proton ütközések “kisebbek”, de nem egyszerűbbek



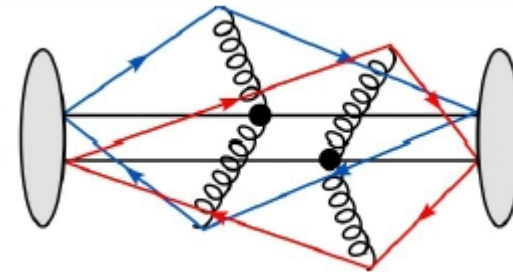
# Proton-proton ütközések modellezése

## Monte Carlo eseménygenerátorokkal

**PYTHIA modell: standard eszköz a proton-proton ütközések fizikájának leírására (vezető rendű QCD folyamatok, nem tartalmaz QGP leírást)**



**1) Sokparton kölcsönhatás:**  
több kemény folyamat egy pp ütközésben



**2) Szín-újrarendezés:**

- hadronizáció előtt a színhúrok "rövidre zárása"
- kísérleti adatok helyes leírása: átlag  $p_T$  és folyás

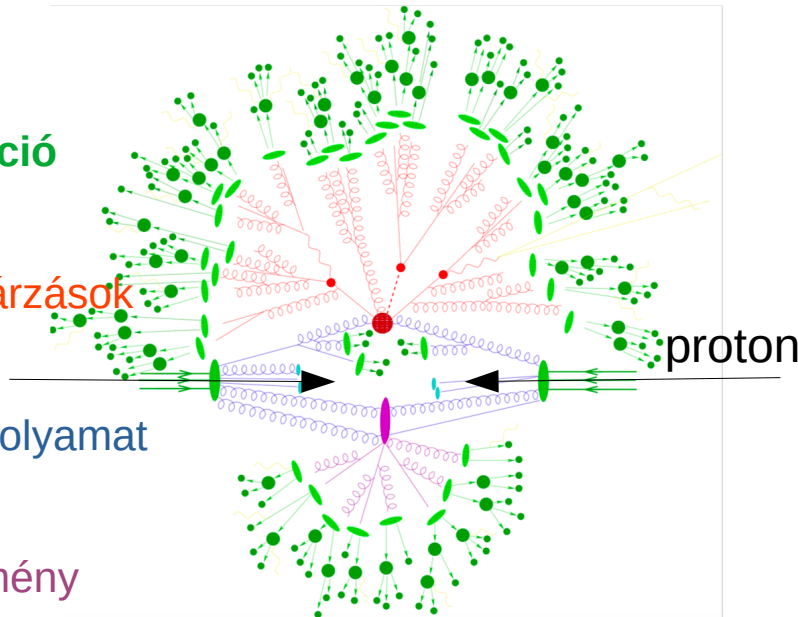
**Ref.: PRL 111, 042001 (2013)**

**1. Hadronizáció**

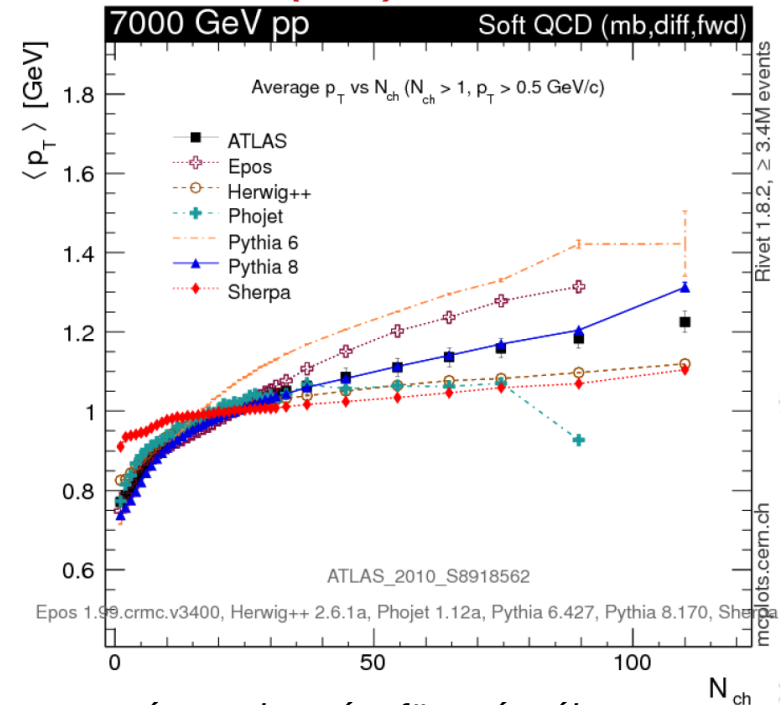
**2. Gluon sugárzások**

**3. "Kemény" folyamat**

**4. Háttéreseemény**



Ábra: Sematikus proton-proton ütközés a szimulációban



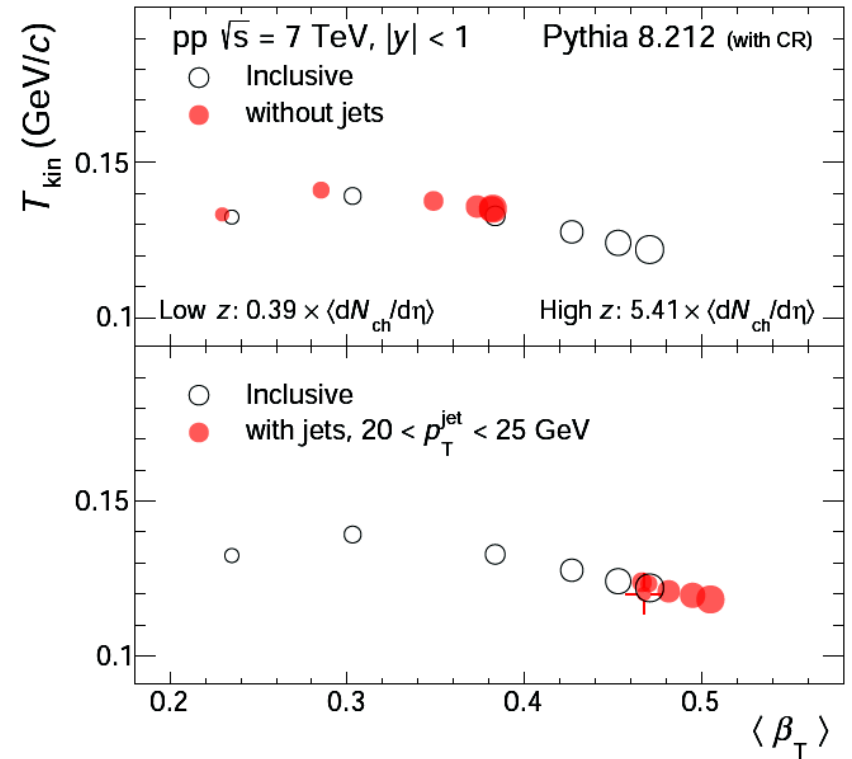
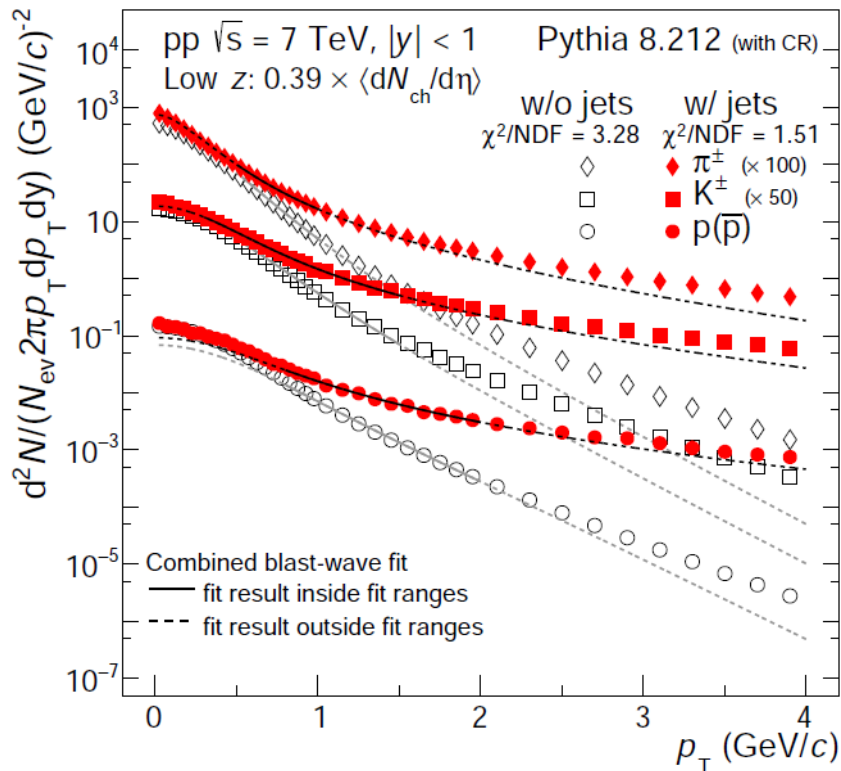
Ábra: átlag  $p_T$  a részecskeszám függvényében



# “Radiális folyás”-szerű viselkedések tanulmányozása a PYTHIA modell segítségével

**Módszer:** Részecskezáporok (*jetek*) figyelembevétele és a Boltzmann–Gibbs **blast wave** modell használata

Részecskeszám: alacsony  $\longrightarrow$  magas



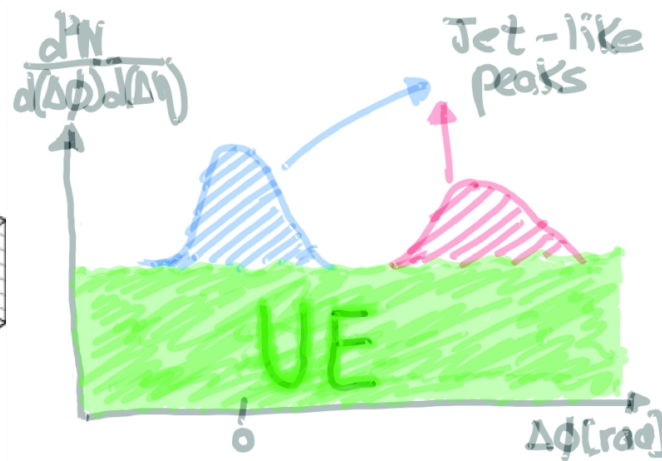
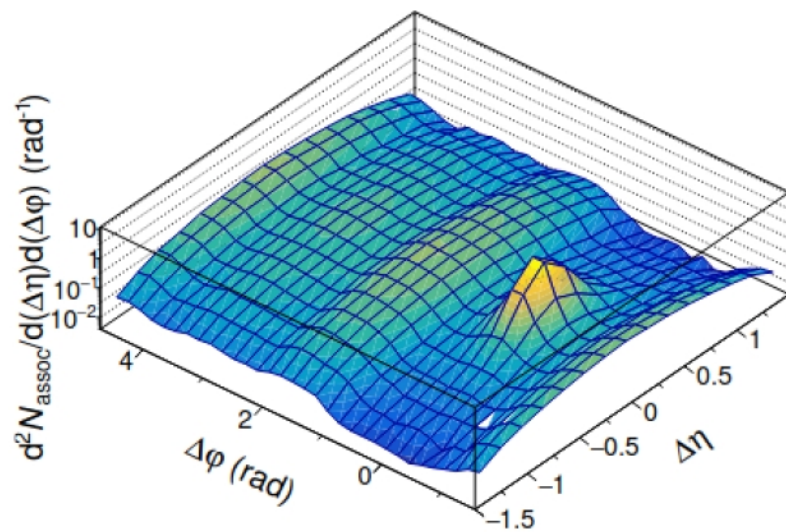
(1) Az átlagos radiális sebesség markánsan függ a jetek  $p_T$ -jétől

(2) A multiplicitás függés hasonló a nehézion ütközésekben tapasztaltakkal  $\rightarrow$  **radiális folyás** jelenségével magyarázható

# Az eseményaktivitás jelentősége kollektív effektusok keresésében pp ütközésekben

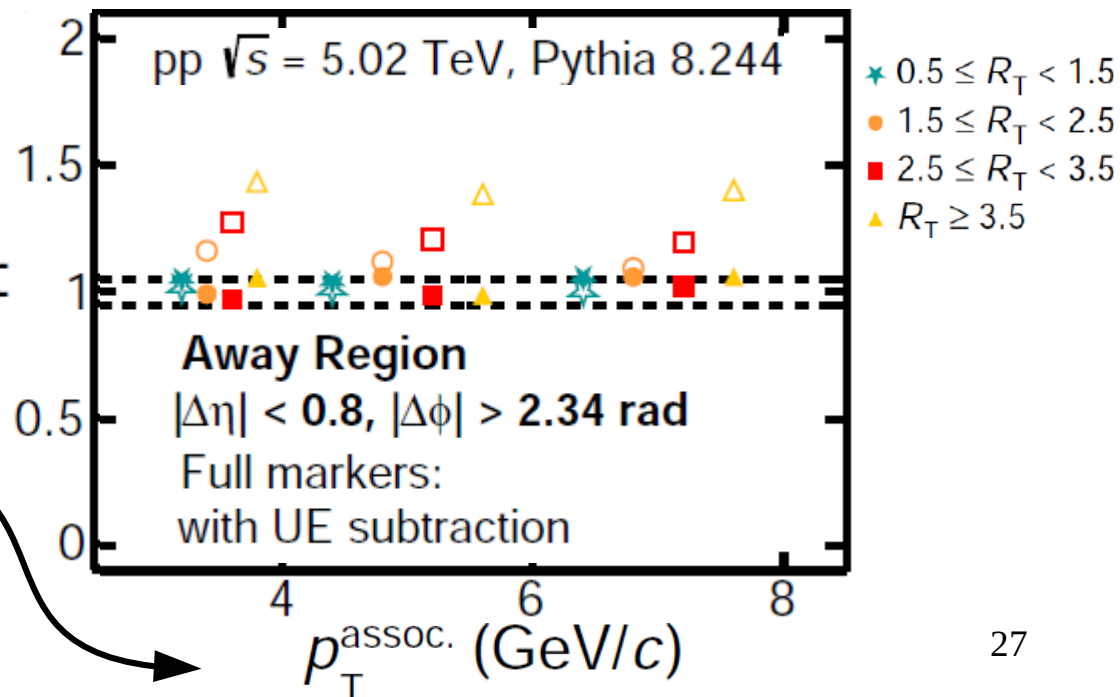
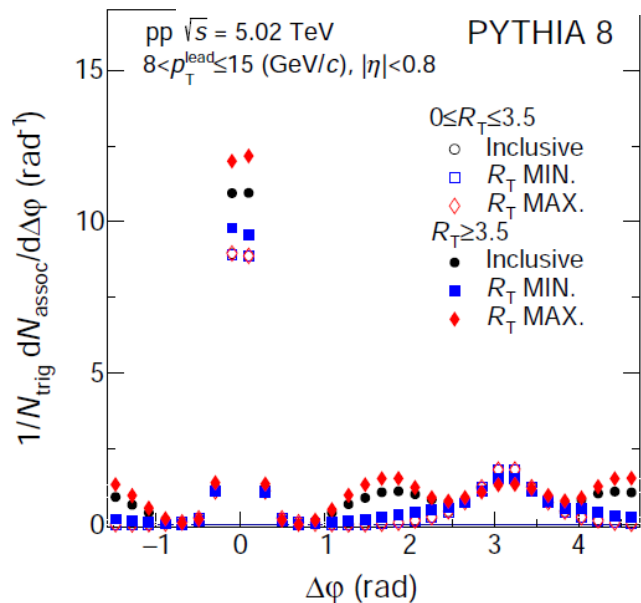
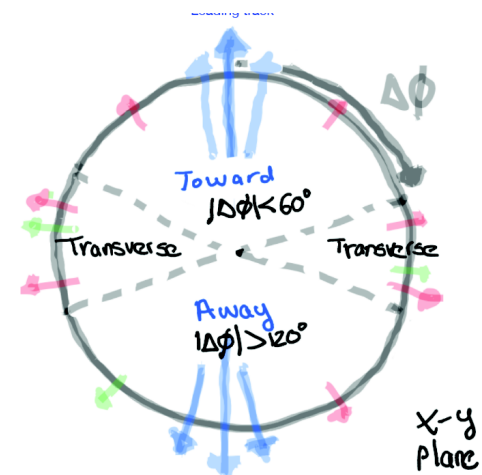
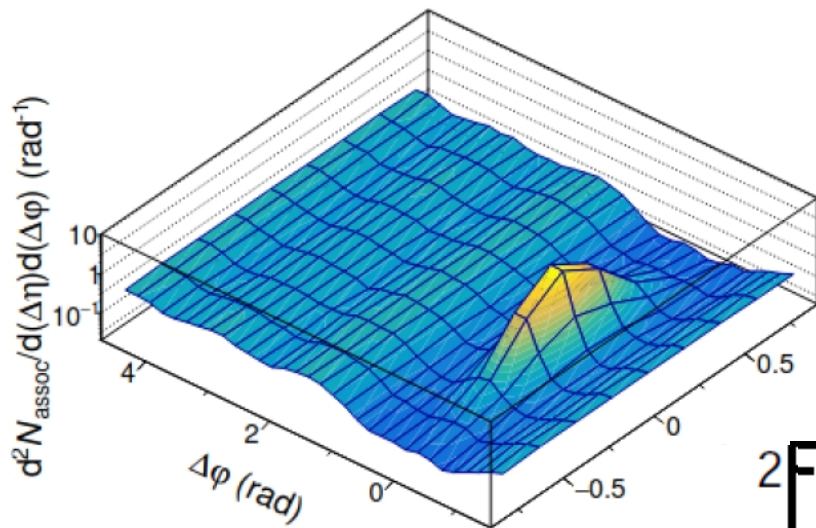
Kollektivitáshoz szükséges végállapotú effektus → jetek energiavesztését okozzák  
→ eddig nem megfigyelt: *ALICE koll. Nucl.Phys.A 1005 (2021) 121924*

- 1) **Jelenlegi probléma:** A mért jelek kísérletileg torzítottak a “kemény” folyamatokban
- 2) **Cél:** A torzítás csökkentése új típusú eseményselekcióval: **háttéresemények (UE)** járulékanak kiküszöbölése
- 3) **Módszer:** Kétrészecske korrelációk + **eseményaktivitás** háttéresemények segítségével



# Az eseményaktivitás jelentősége kollektív effektusok keresésében pp ütközésekben

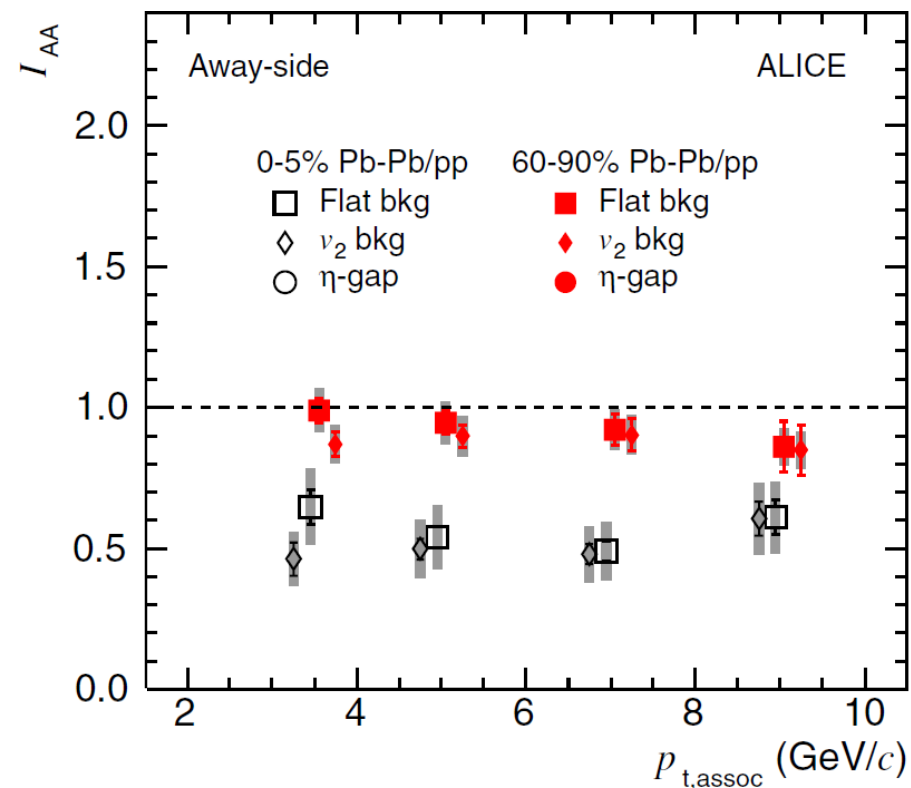
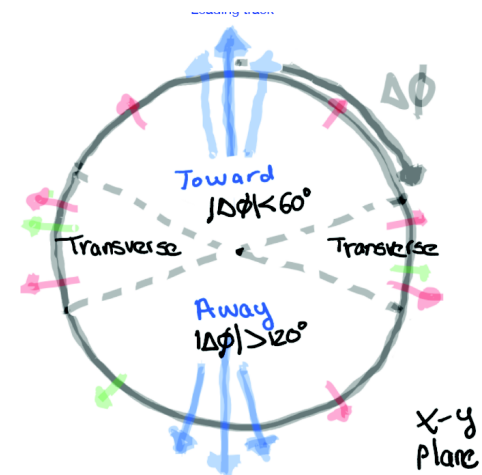
**Eseményaktivitás:** a részecskék száma egy eseményben a “jet”-től távoli (“oldalsó régió”)



# Az eseményaktivitás jelentősége kollektív effektusok keresésében pp ütközésekben

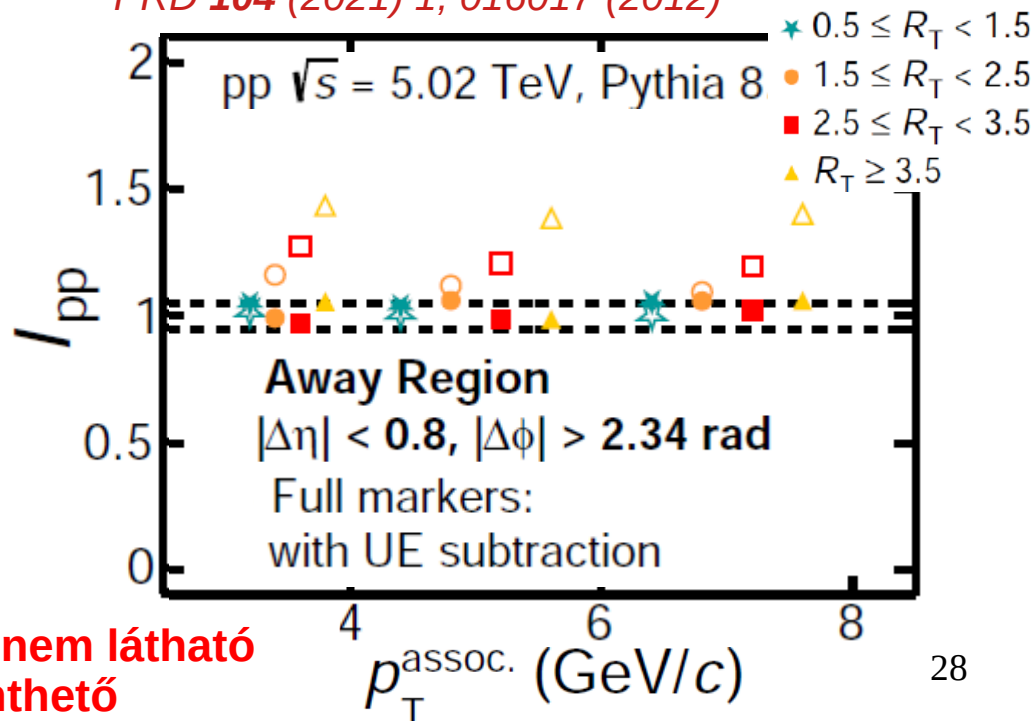
➔ Kísérletből (ólom-ólom ütk. → Quark-gluon plazma!)

Ref.: ALICE koll., PRL 108, 092301 (2012)



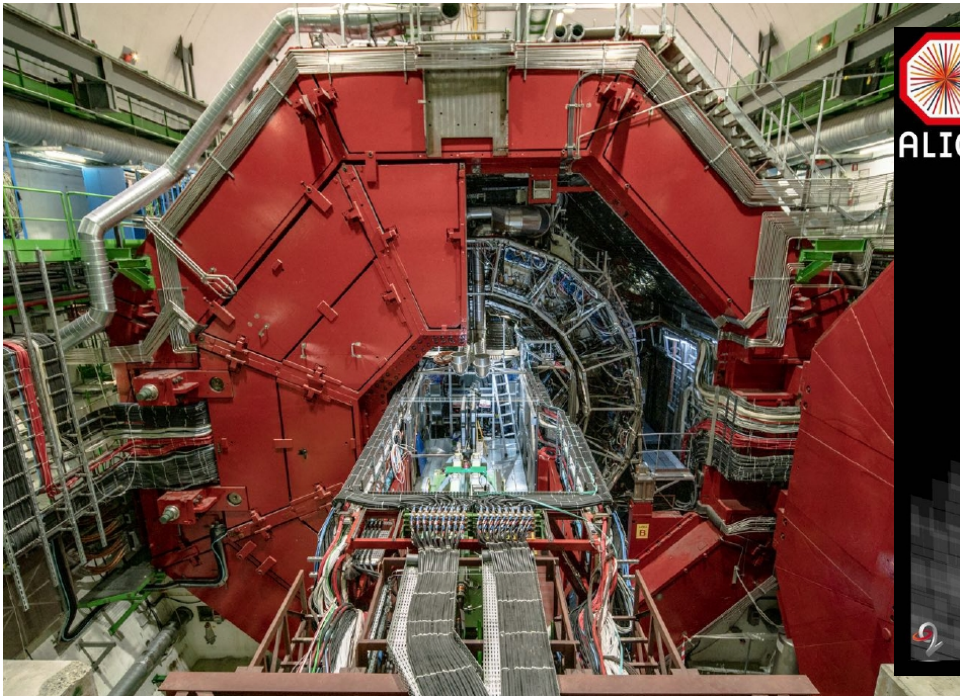
Ref.: JPhysG 48 (2020) 1, 015007

PRD 104 (2021) 1, 016017 (2012)



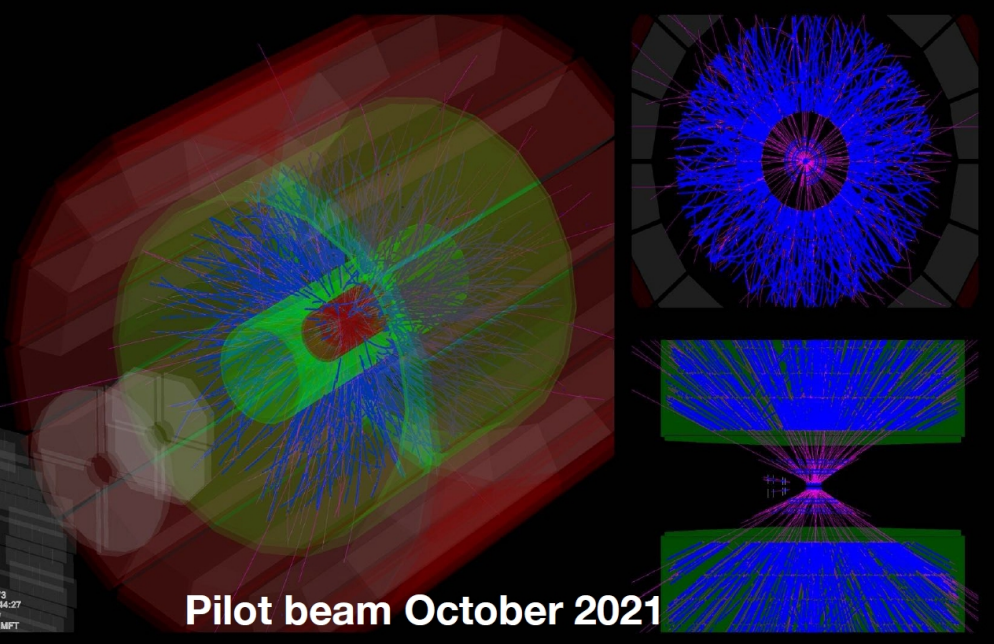
➔ A "távoli" oldalon a részecskék elnyomása nem látható

➔ Gluon sugárzások általi jel torzítás csökkenthető



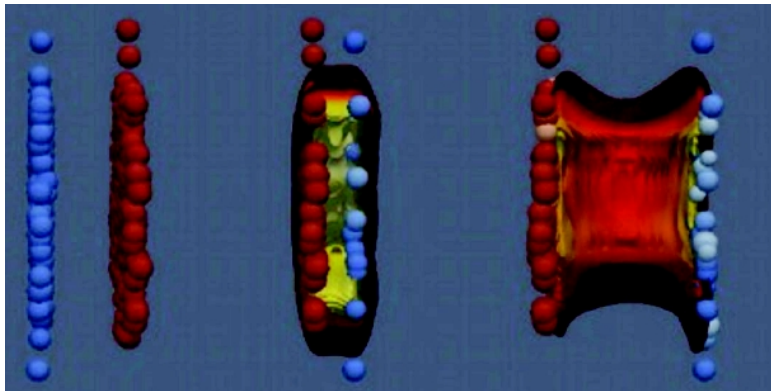
ALICE

Run Number: 50673  
 Date: 2021-10-31 8:44:27  
 pp: ECM = 900 GeV  
 Detectors: ITS,TPC,MFT



Pilot beam October 2021

# Köszönöm a figyelmet!



ALICE, pp  $\sqrt{s} = 13$  TeV  
 0–0.1% V0M  
 $1 < p_{T, \text{trig(assoc)}} < 2$  GeV/c  
 $p_{T, \text{LP}} > 9$  GeV/c

