

# Bevezetés a nehézion-fizikába

## (Introduction to heavy ion physics)



CMS Experiment at LHC, CERN  
Data recorded: Mon Nov 8 11:30:53 2010 CEST  
Run/Event: 150431 / 630470  
Lumi section: 173

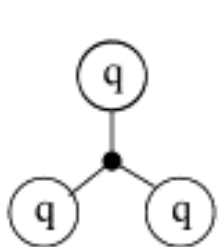
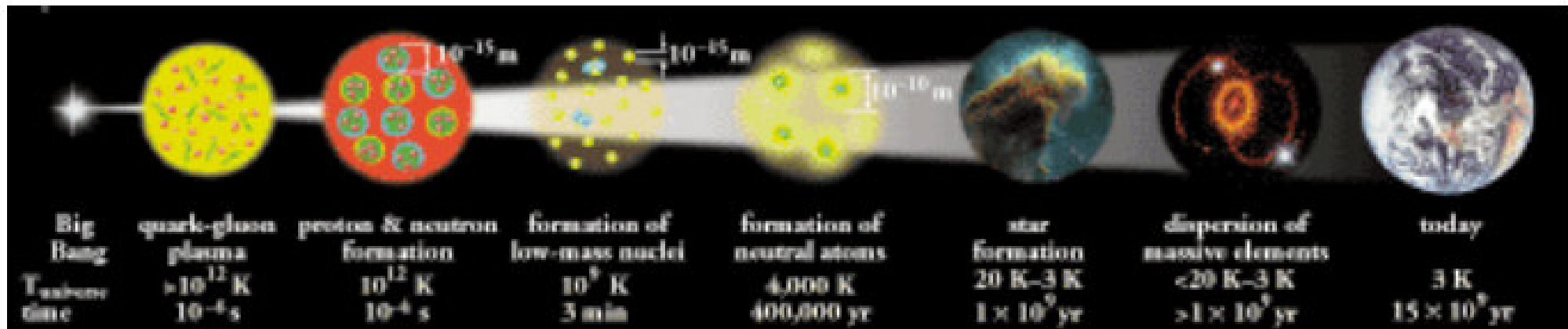
Veres Gábor  
(CERN-EP és ELTE)

**Hungarian Teachers Programme**  
**Magyar Fizikatanári Program**  
CERN, 2016. augusztus 16.



# Miért kutatunk nehézionokat?

- A legnagyobb energiájú, legkomplexebb (0.1 mJ)
- Kvark-bezárás tanulmányozása
- Mikromásodpercekkel az Ősrobbanás után...



barionok



mezonok

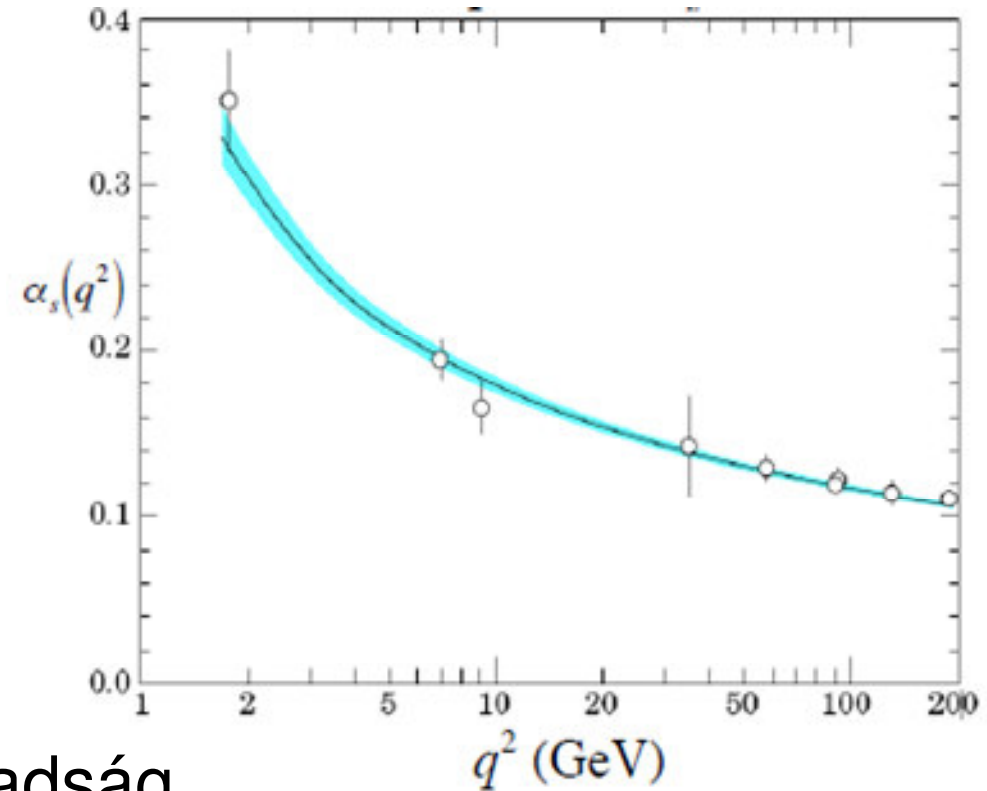
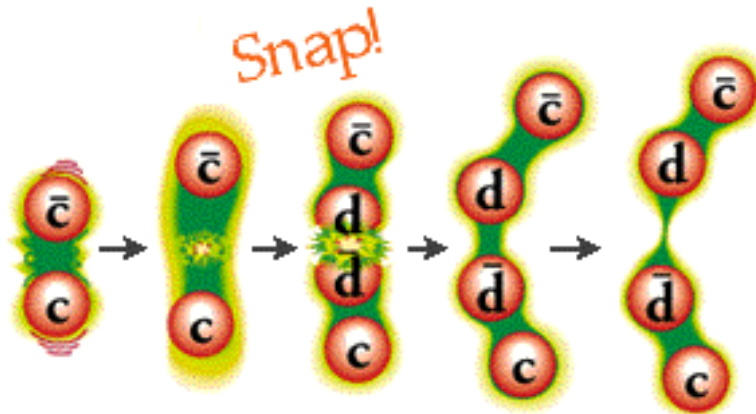
Erős kölcsönhatás közvetítője: gluon

QCD: kvantum-színdinamika



# QCD

- A kölcsönhatás erőssége az impulzus-átadáástól (méretskálától) függ:



Nagy impulzusok:  
aszimptotikus szabadság

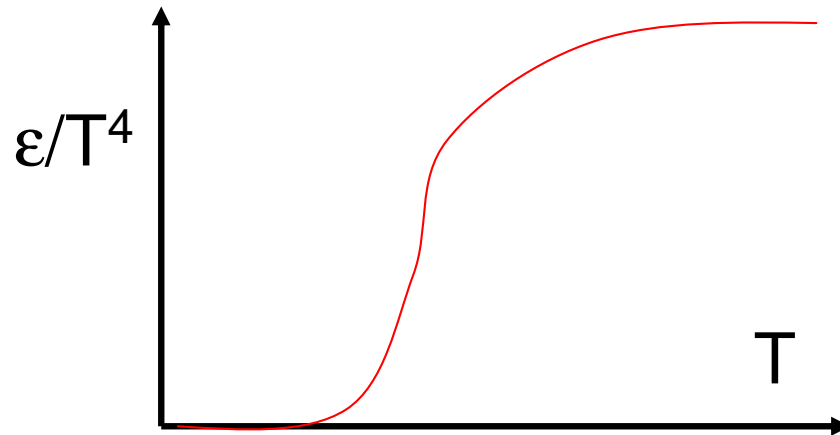
Nagy távolságok:  
nagyon erős, kvarkbezárás

Színes húrok...

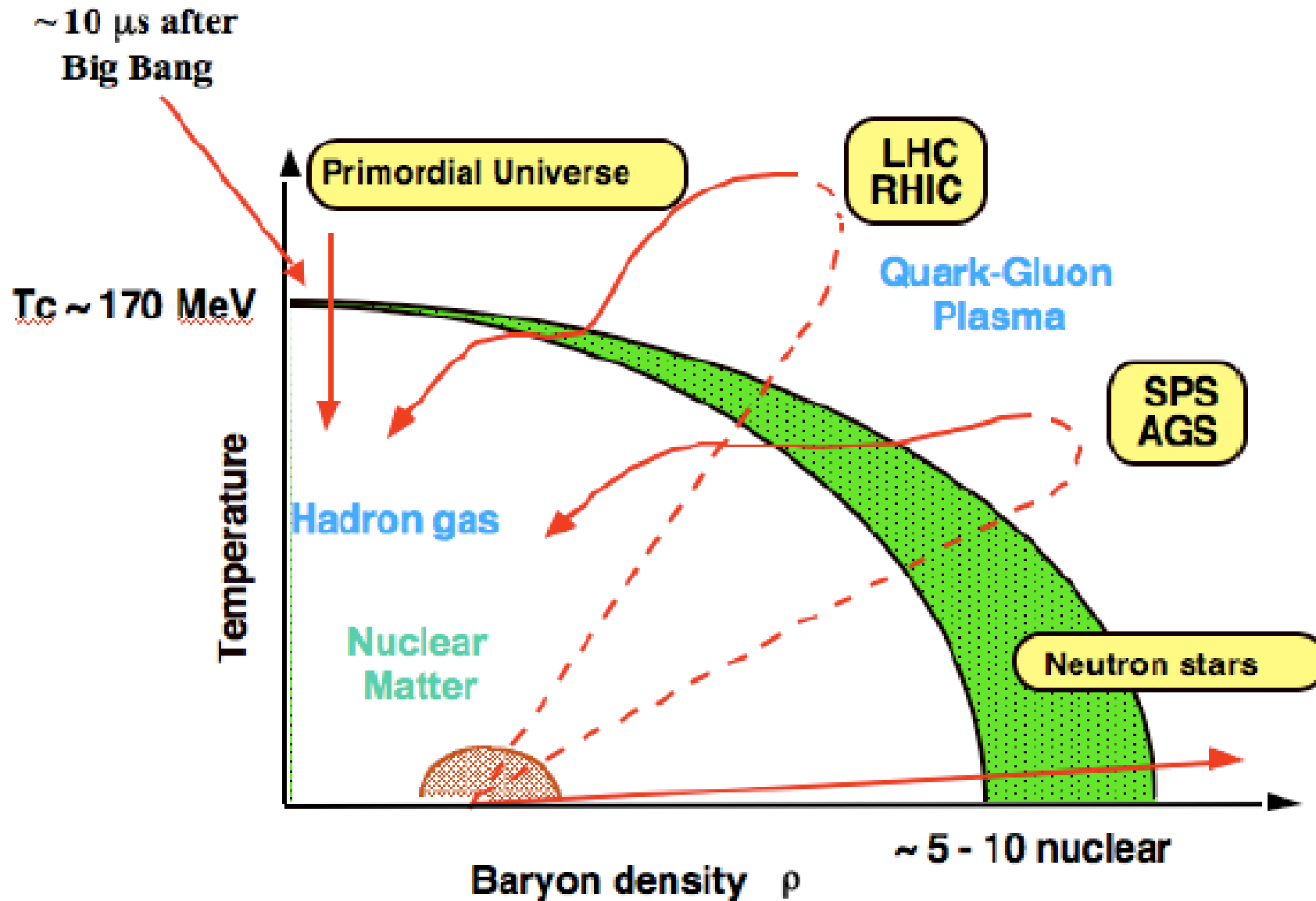


# Kvark-gluon plazma

- Nagy hőmérsékleten vagy nagy sűrűségnél a kvarkok közötti kölcsönhatás gyengül !!!
- A kvarkok és gluonok ekkor kiszabadulhatnak a barionokból és mezonokból
- Ehhez szükséges
  - Energiasűrűség: kb.  $1 \text{ GeV}/\text{fm}^3$   
vagy
  - Barionsűrűség: kb.  $1 \text{ barion}/\text{fm}^3$  (magsűrűség ötszöröse)
- Rács-QCD

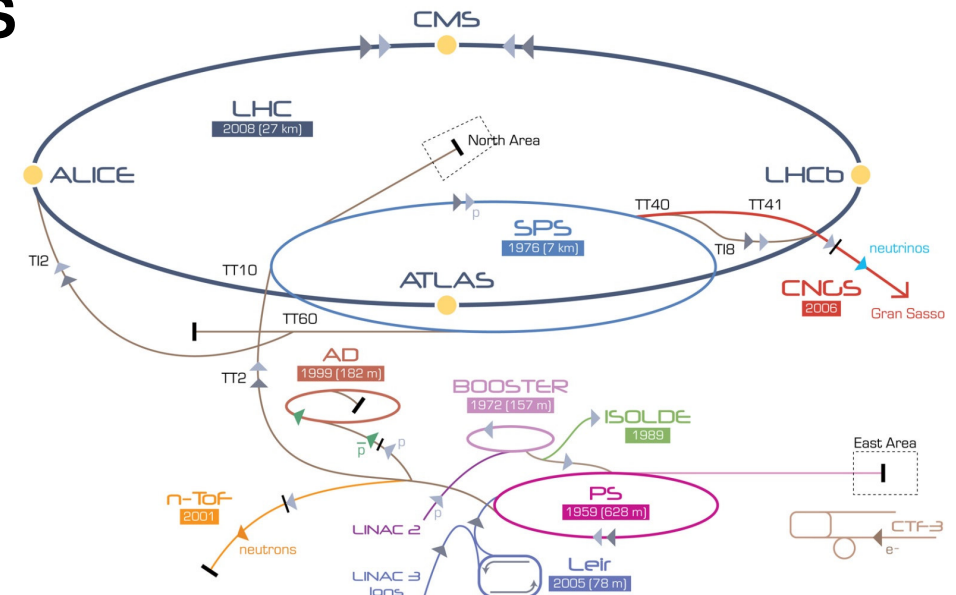


# Fázisdiagram: erősen kölcsönható anyag

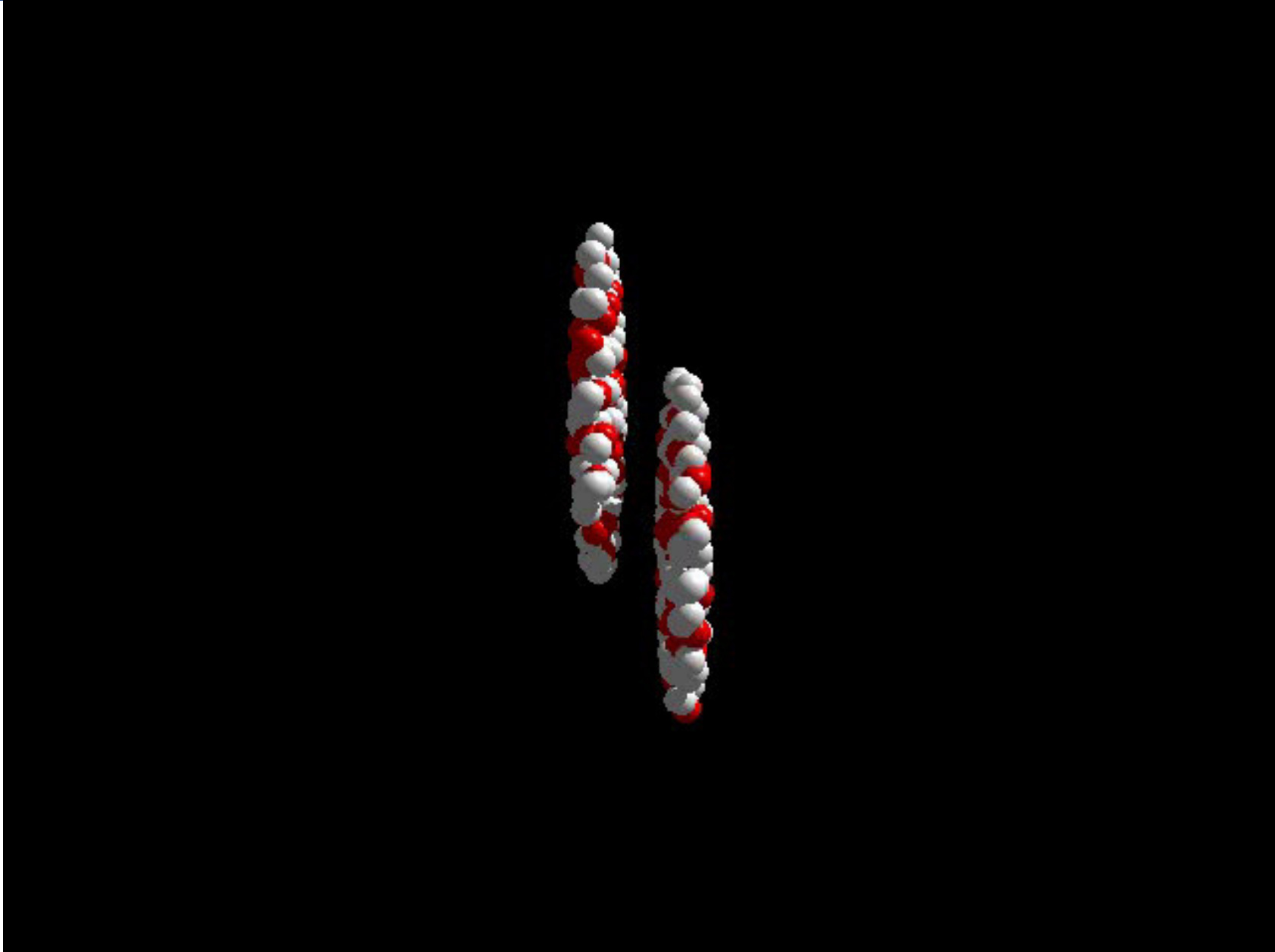


# Nehézion-ütközések - laboratóriumok

- BNL (USA), AGS: p (33 GeV), Au (14.6 GeV), fix céltárgy
- CERN (CH), SPS: p (450 GeV), Pb (158 GeV), fix céltárgy
  - Kísérletek: **NA49**, **NA61**,...
- BNL, RHIC: Au (200 GeV)
  - Kísérletek: STAR, **PHENIX**, **PHOBOS**, BRAHMS
- CERN, LHC: Pb (2760 GeV)
  - Kísérletek: **ALICE**, ATLAS, **CMS**



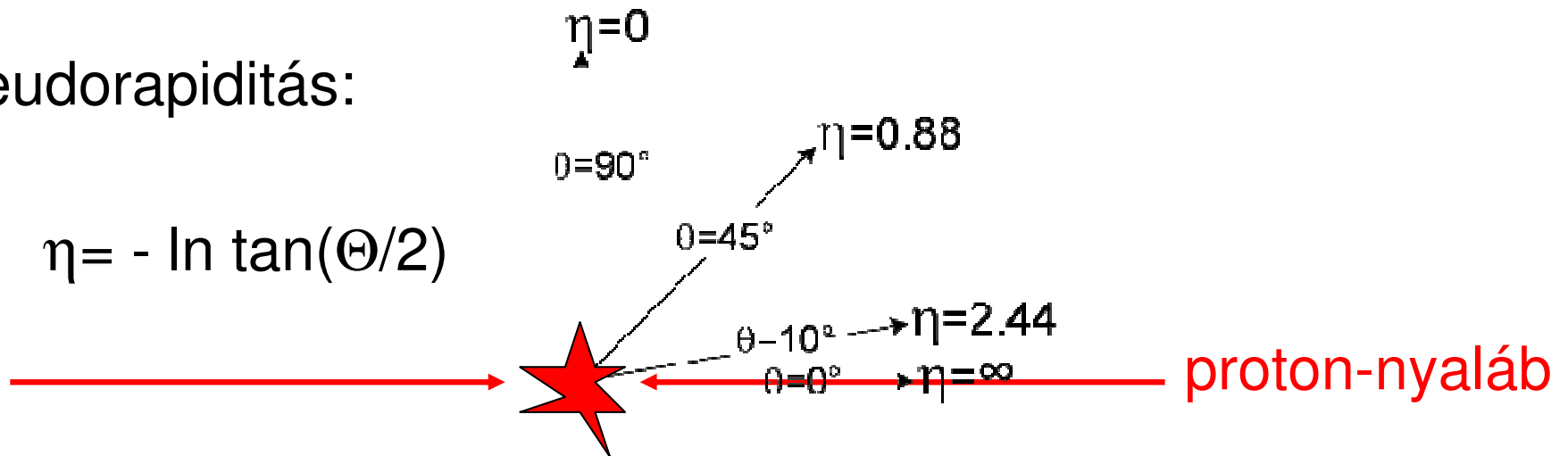
# Nehézion-ütközés laboratóriumban



# Milyen változókat használunk?

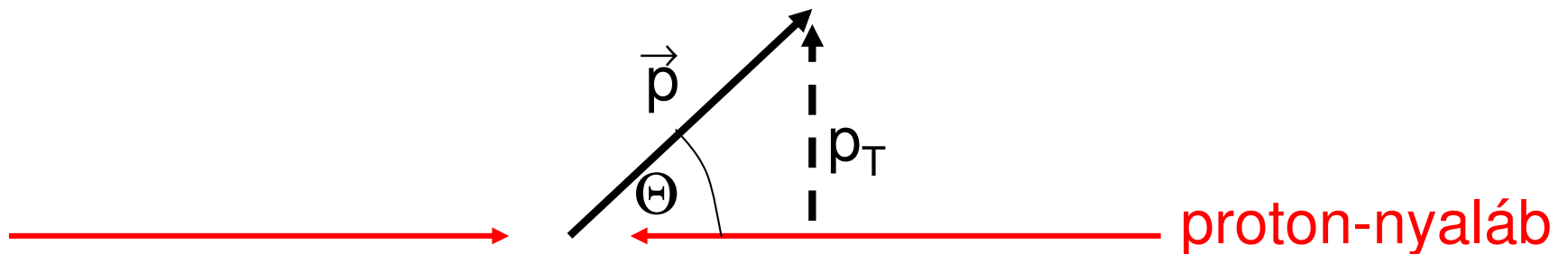
Pseudorapiditás:

$$\eta = -\ln \tan(\Theta/2)$$



Transzverzális impulzus:  $p_T$

Henger-koordináták:  
azimutszög:  $\varphi$



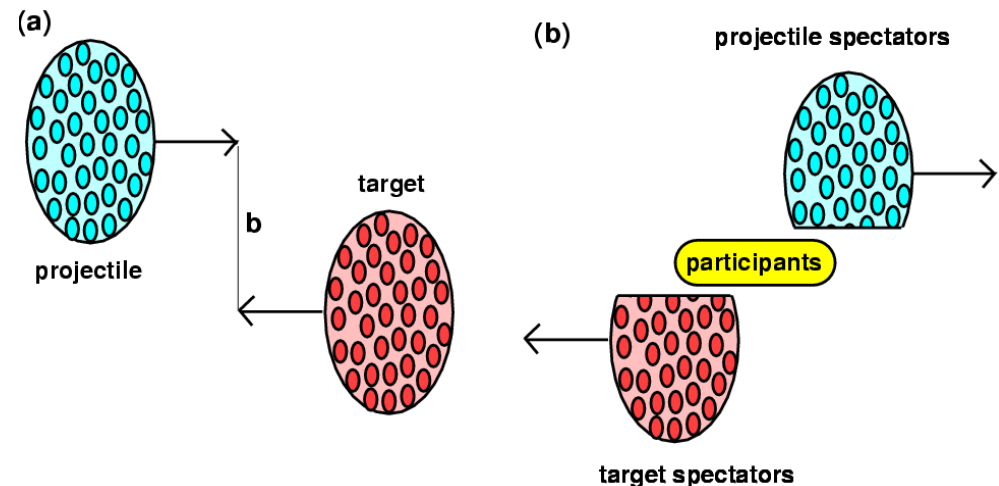
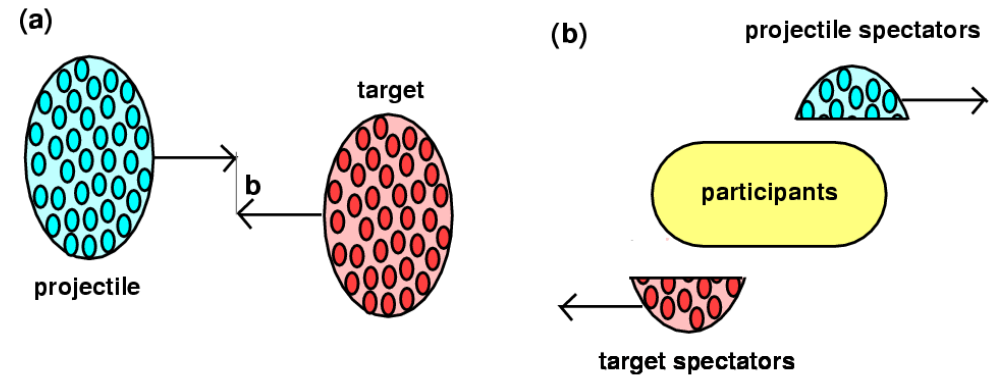


# Centralitás

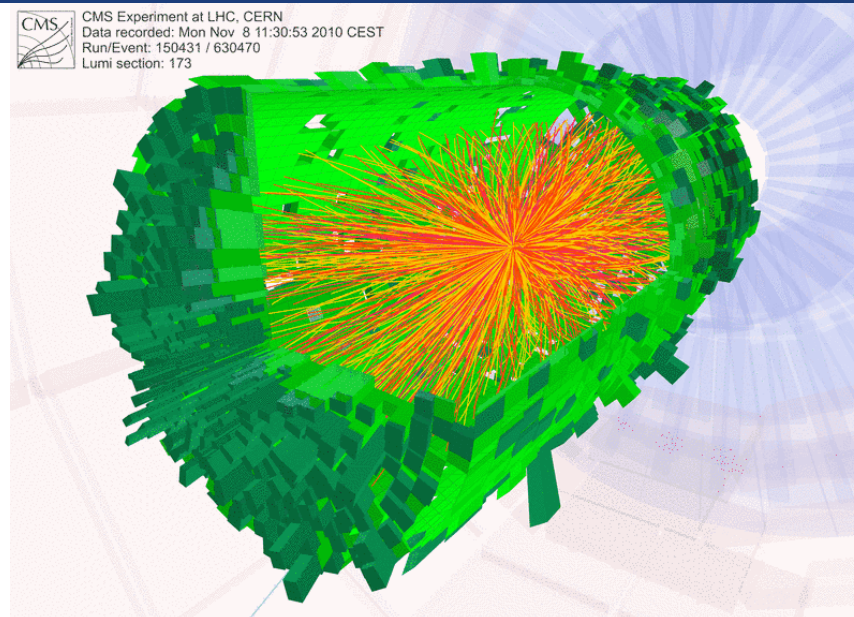
$N_{\text{part}}$ : résztvevő nukleonok száma

$N_{\text{coll}}$ : páronkénti nukleon-nukleon ütközések száma

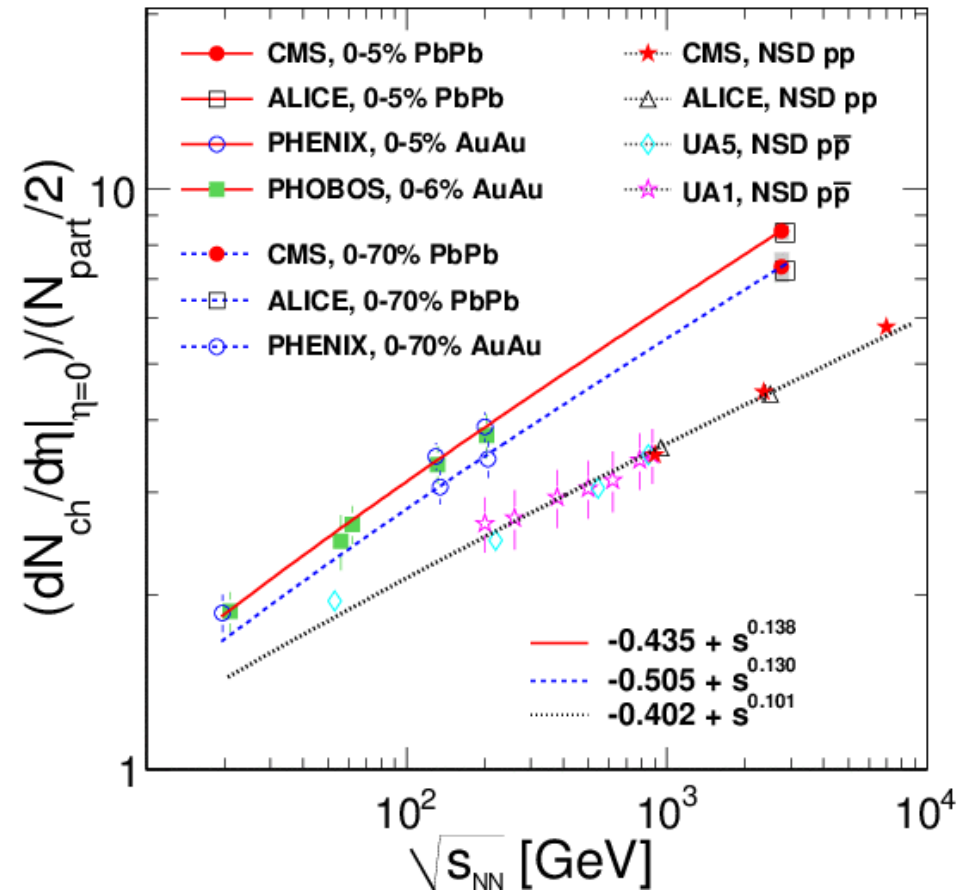
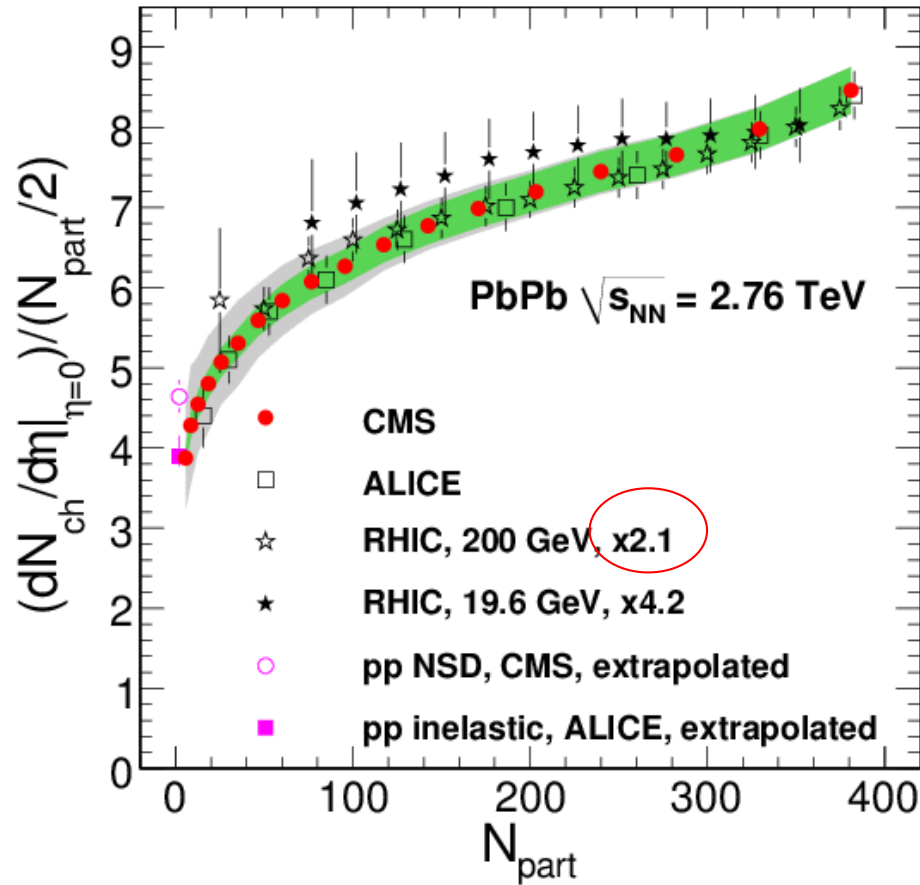
Gyakran a teljes hatáskeresztmetszet százalékában adjuk meg



# A nehézion-ütközések globális jellemzői



# Töltött részecskék száma



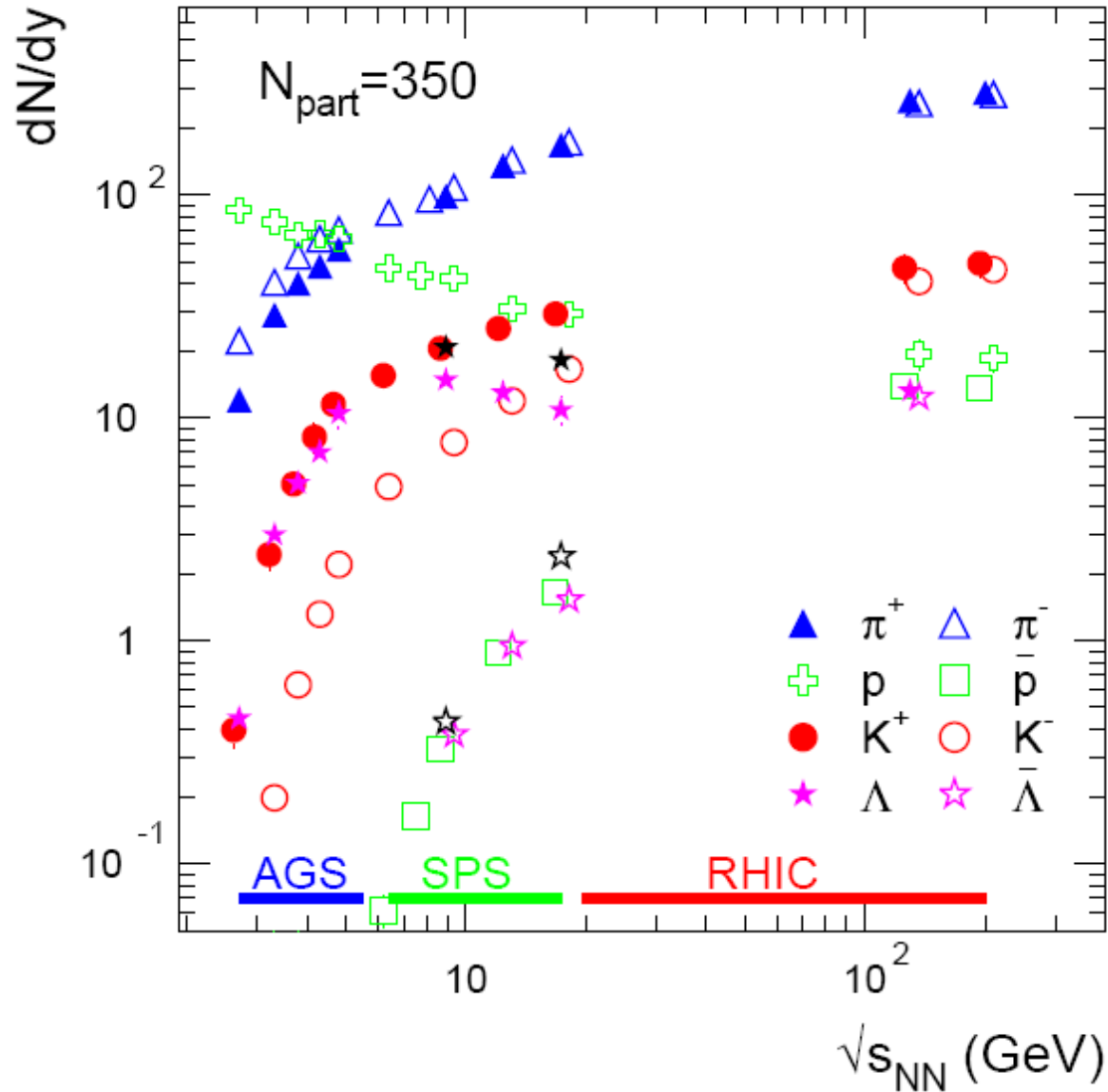
- Centralitás-függés:  
- Hasonló a RHIC eredményeihez

- $\sqrt{s}$ -függés:  
- p+p, Pb+Pb: hatványfüggvény

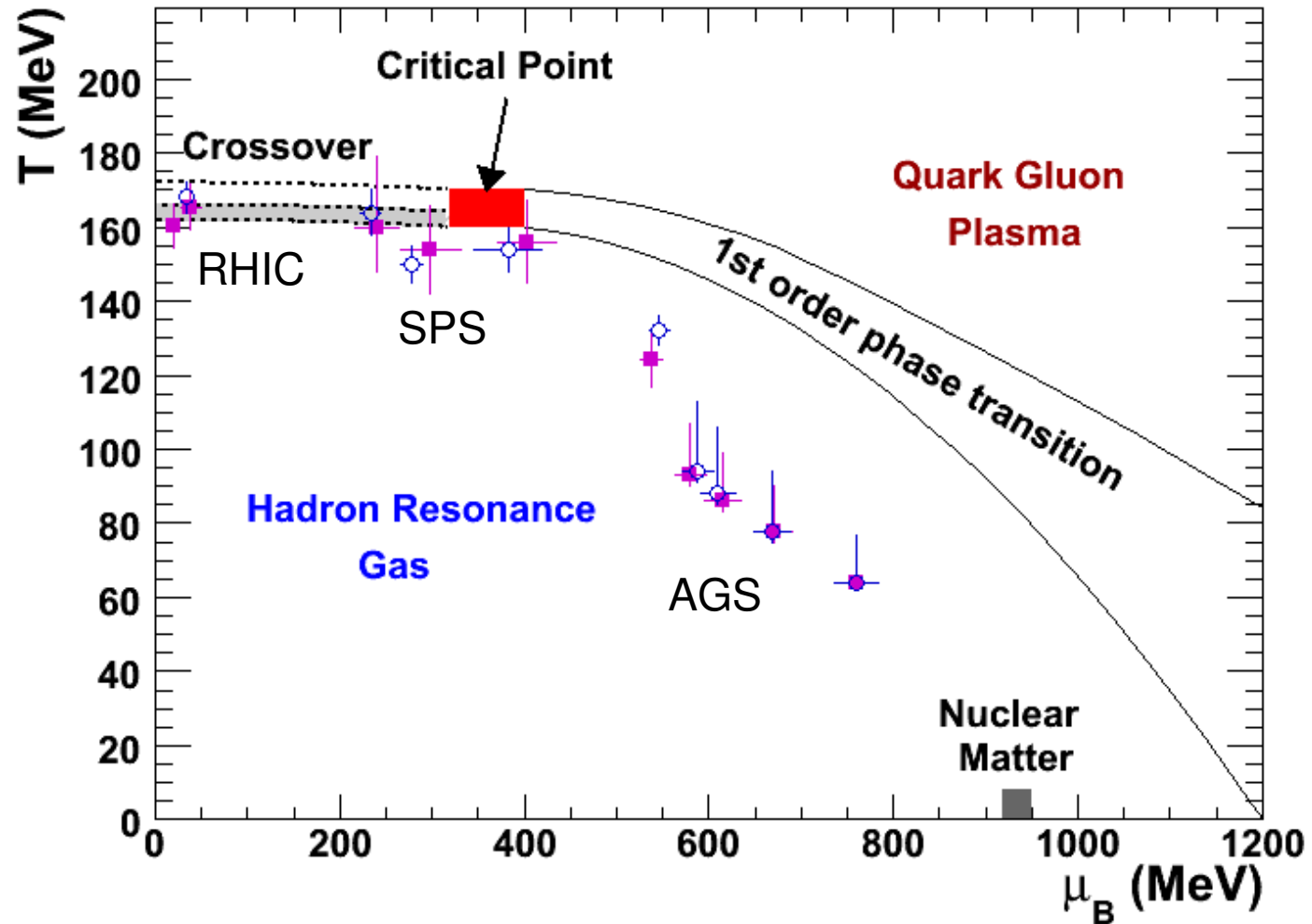
Energiasűrűség becsülhető, kb. 15 GeV/fm<sup>3</sup>!



# „Kémiai” összetétel



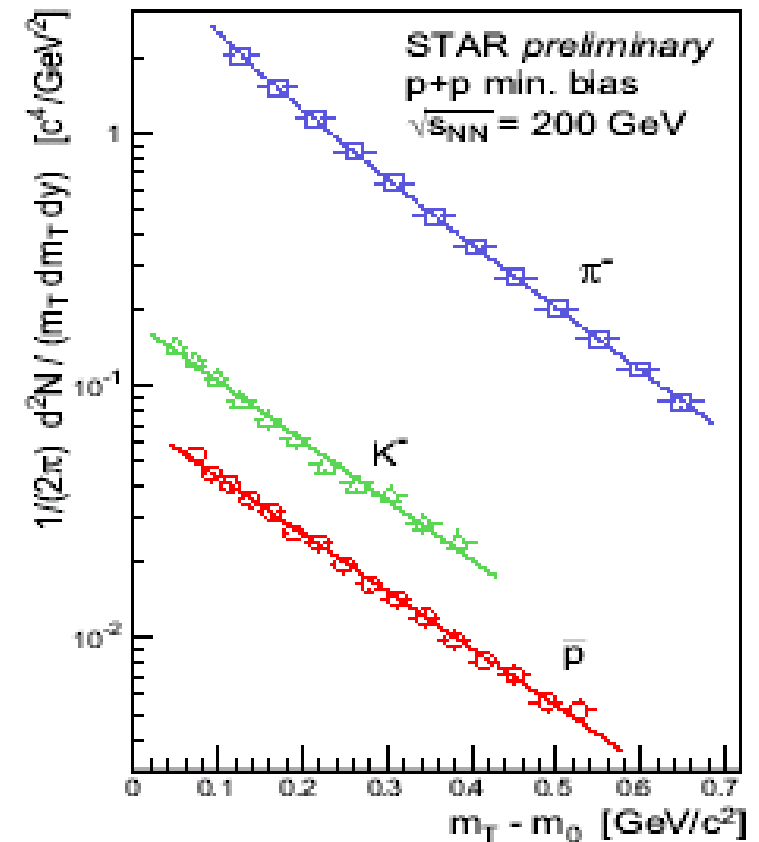
# Fázisdiagram



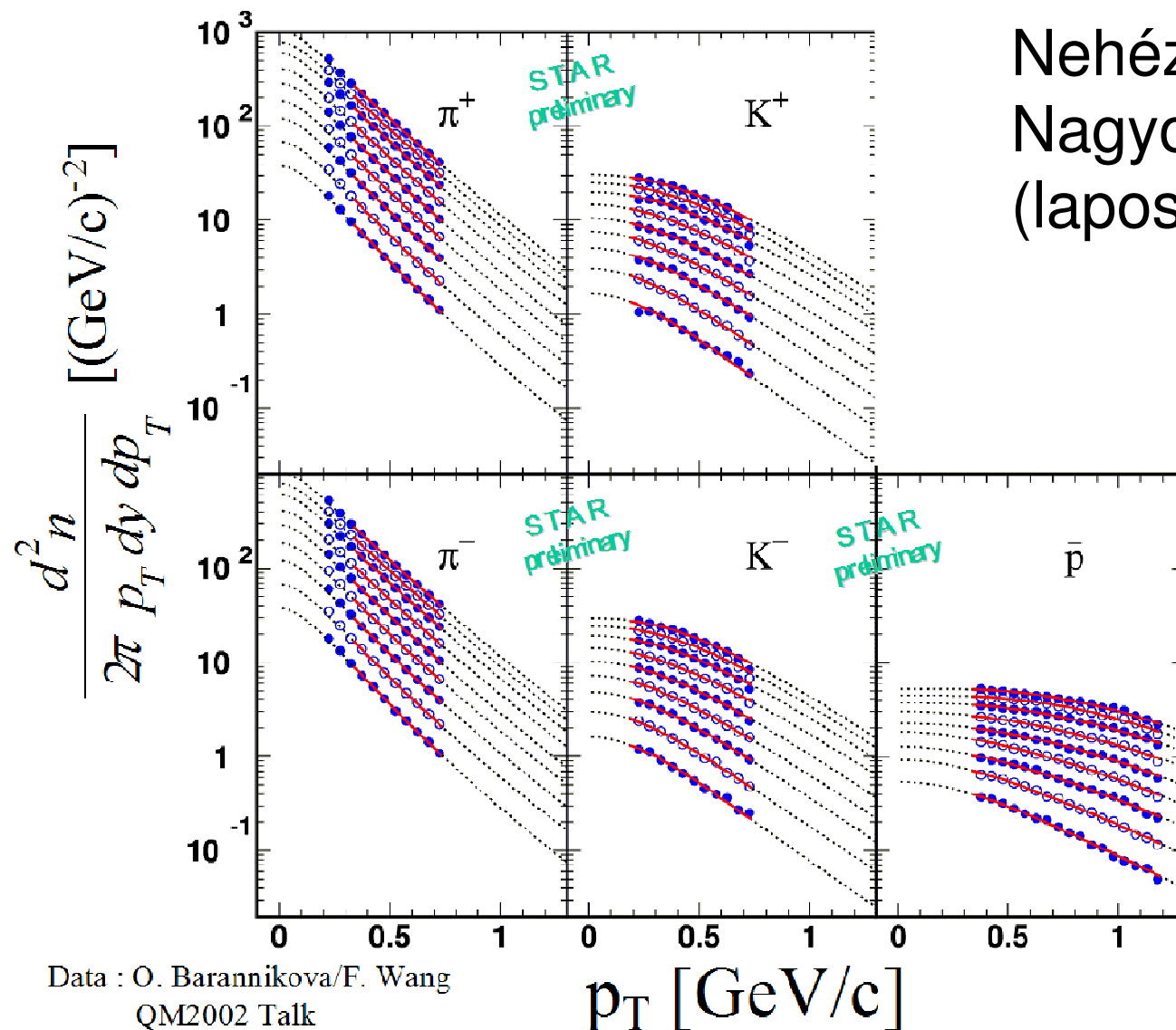
# Hőmérséklet

- Kis transzverzális impulzusnál termális spektrumokat látunk (proton-proton ütközésekben)

$$\frac{dN}{m_T dm_T} \propto e^{-\frac{m_T}{T_{slope}}} \Rightarrow \frac{dN}{dm_T} \propto m_T e^{-\frac{m_T}{T_{slope}}}$$



# Hőmérséklet+radiális folyás



Data : O. Barannikova/F. Wang  
QM2002 Talk

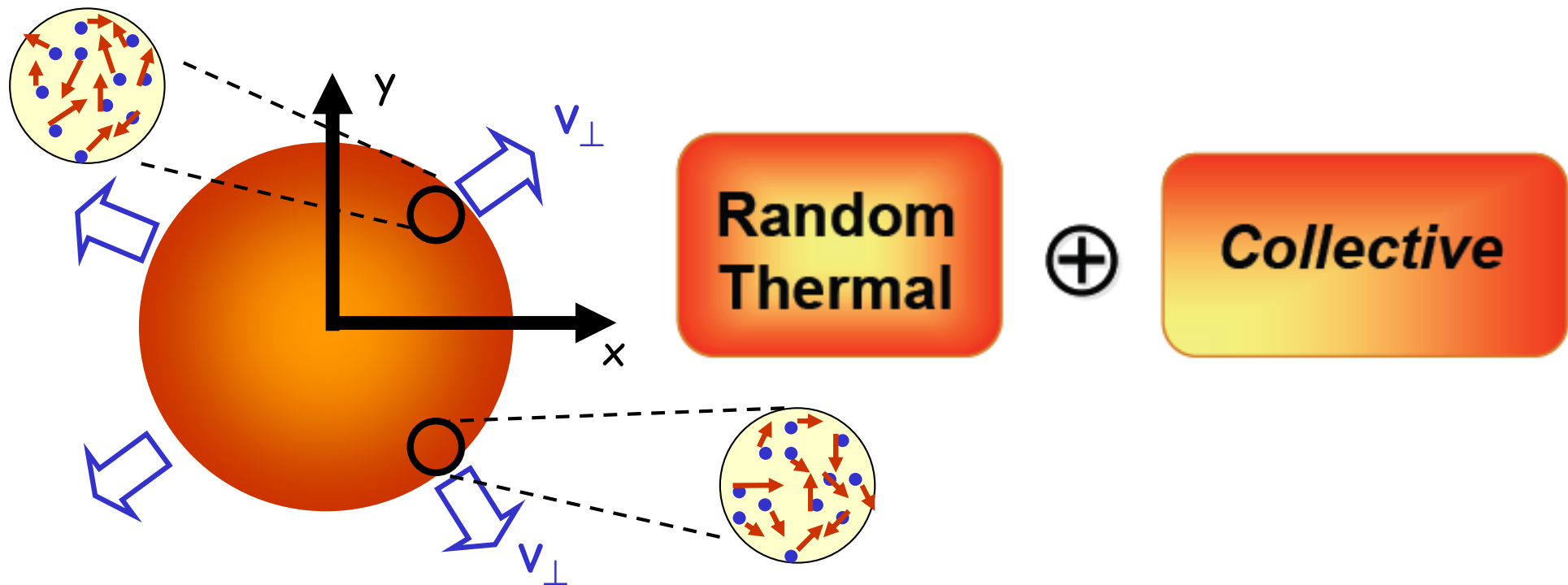
Nehézionok ütközésénél:  
Nagyobb  $m \rightarrow$  nagyobb  $T$   
(laposabb spektrumok)

$$T_{slope} = T_{fo} + \frac{1}{2} m v_{\perp}^2$$

Centrality  
0-5%  
5-10%  
10-20%  
20-30%  
30-40%  
40-50%  
50-60%  
60-70%  
70-80%



# Értelmezés



A kollektív mozgás ráakódik a termális mozgásra

A kialakuló nagy nyomás miatt

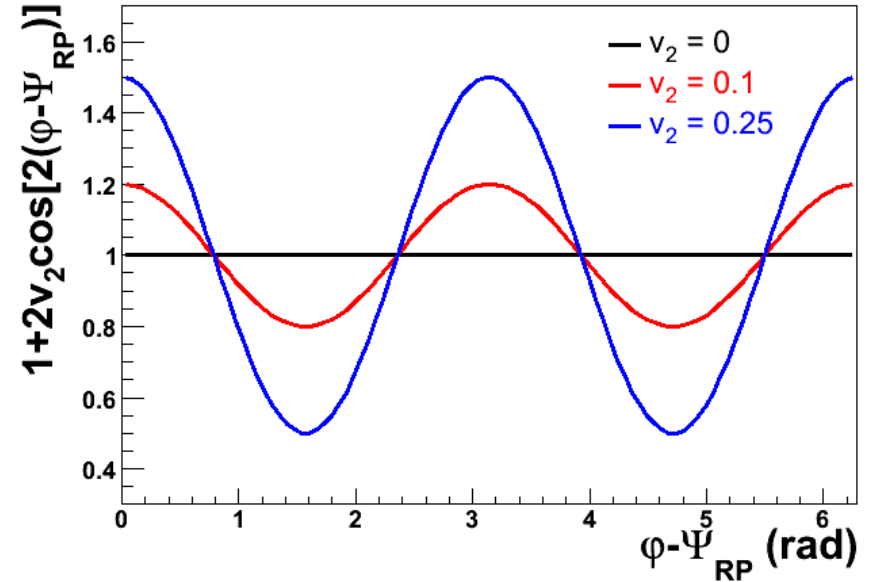
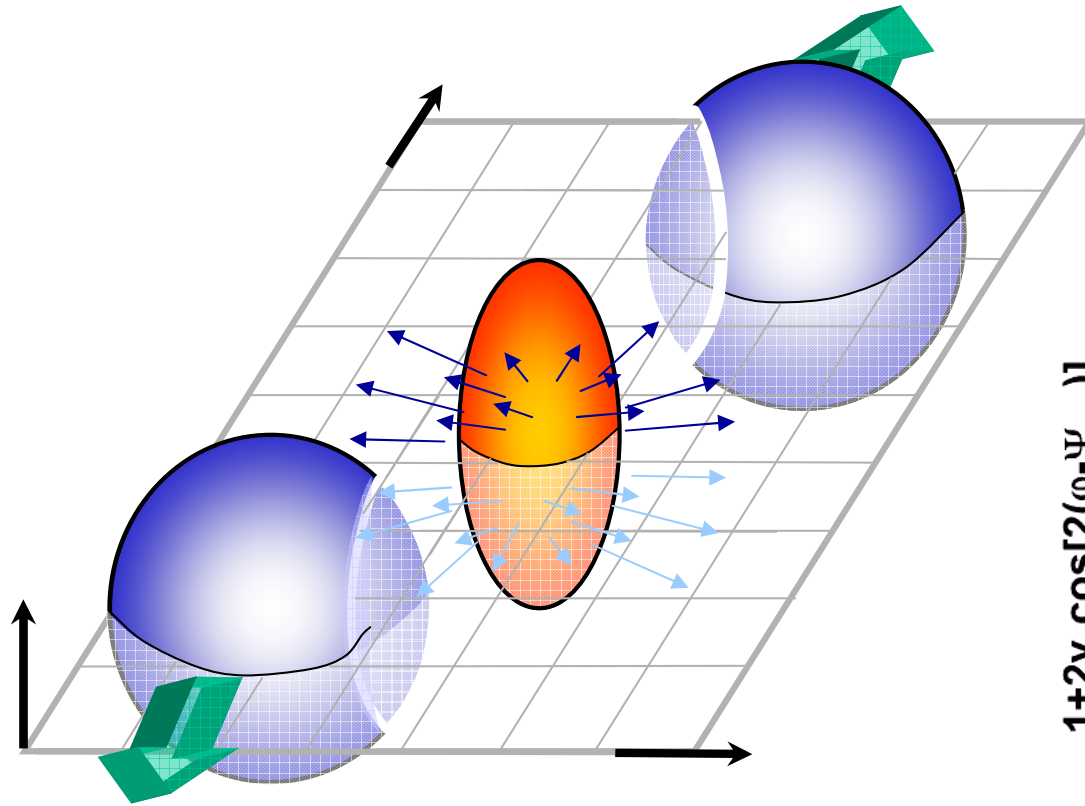
Tehát fontos a különböző tömegű részecskék mérése

Ütközési energiával nő a radiális folyás sebessége (0.5-0.7c)





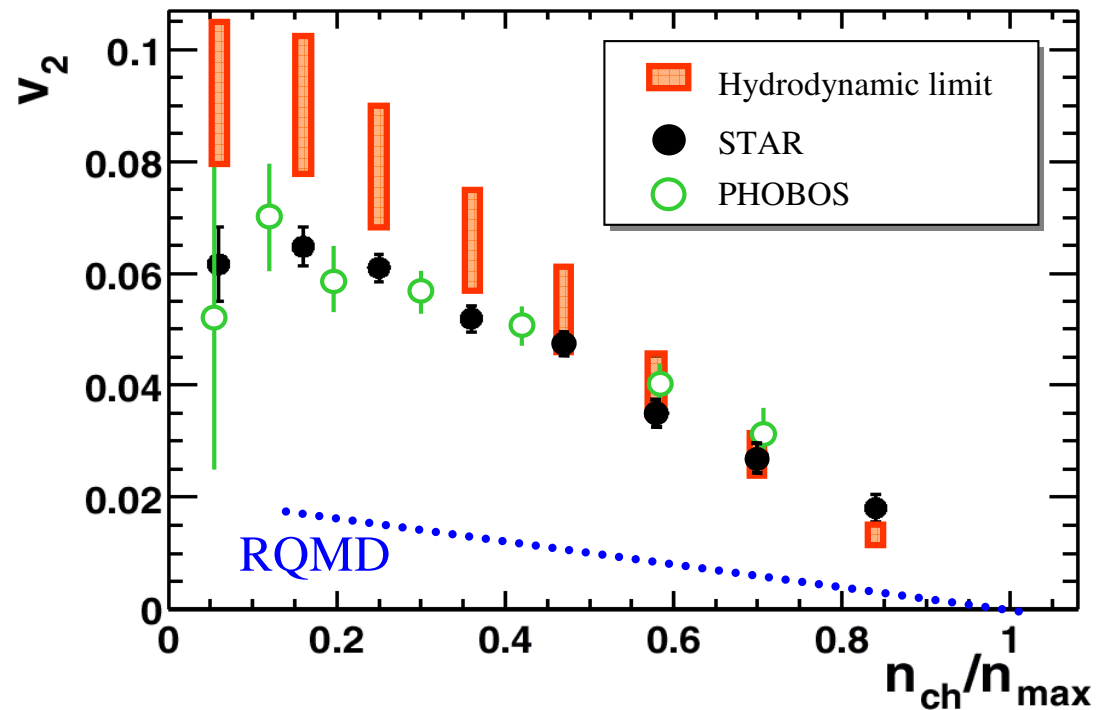
# Elliptikus folyás



$$\frac{dN}{d(\varphi - \Psi_{RP})} = \frac{N_0}{2\pi} (1 + 2v_1 \cos(\varphi - \Psi_{RP}) + 2v_2 \cos(2(\varphi - \Psi_{RP})) + \dots)$$



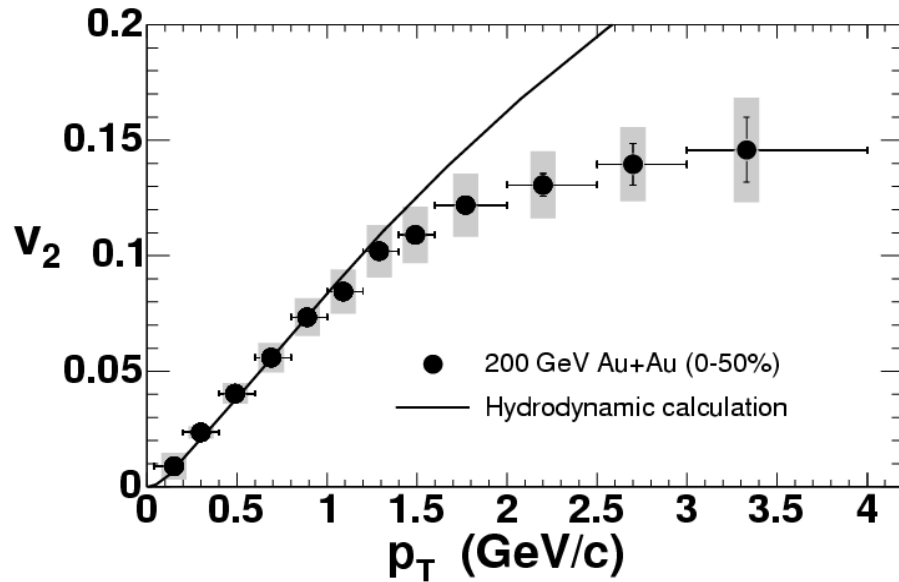
# Hidrodinamikai értelmezés



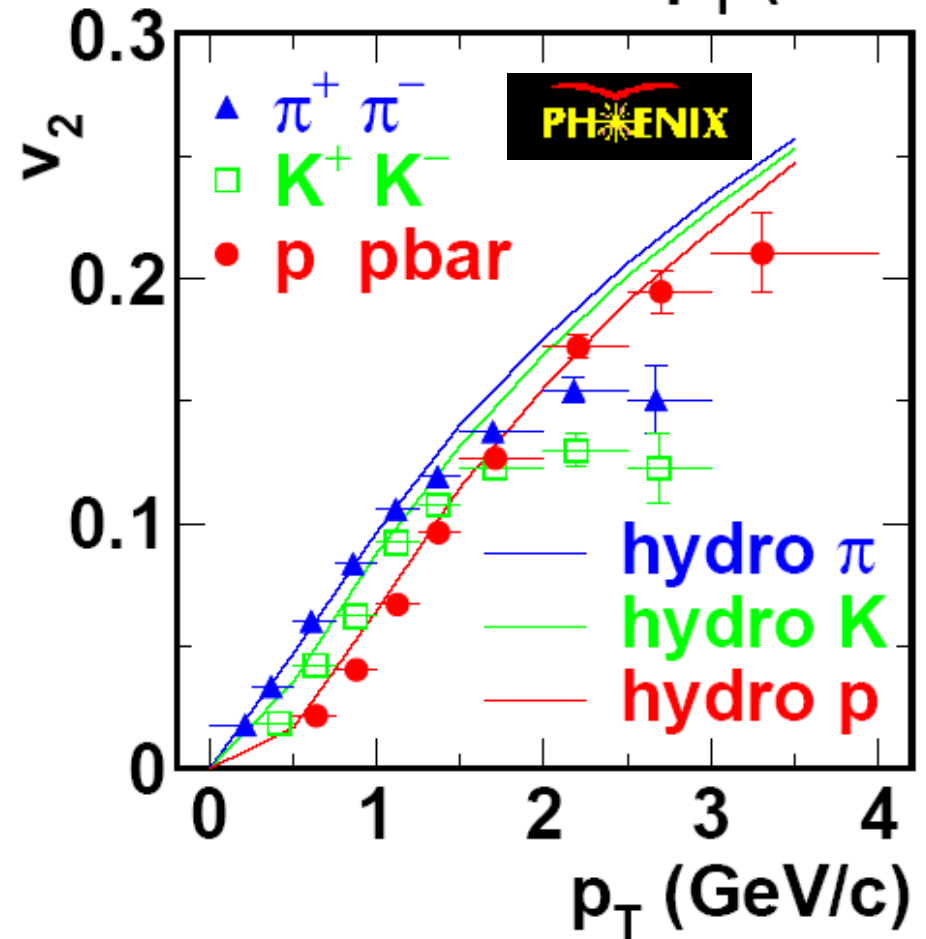
Centrális ütközések: gyors termalizáció, tökéletes folyadék  
Periférikus ütközések: nem teljes termalizáció  
Hadronikus modell nem tudja leírni (RQMD)



# Elliptikus folyás



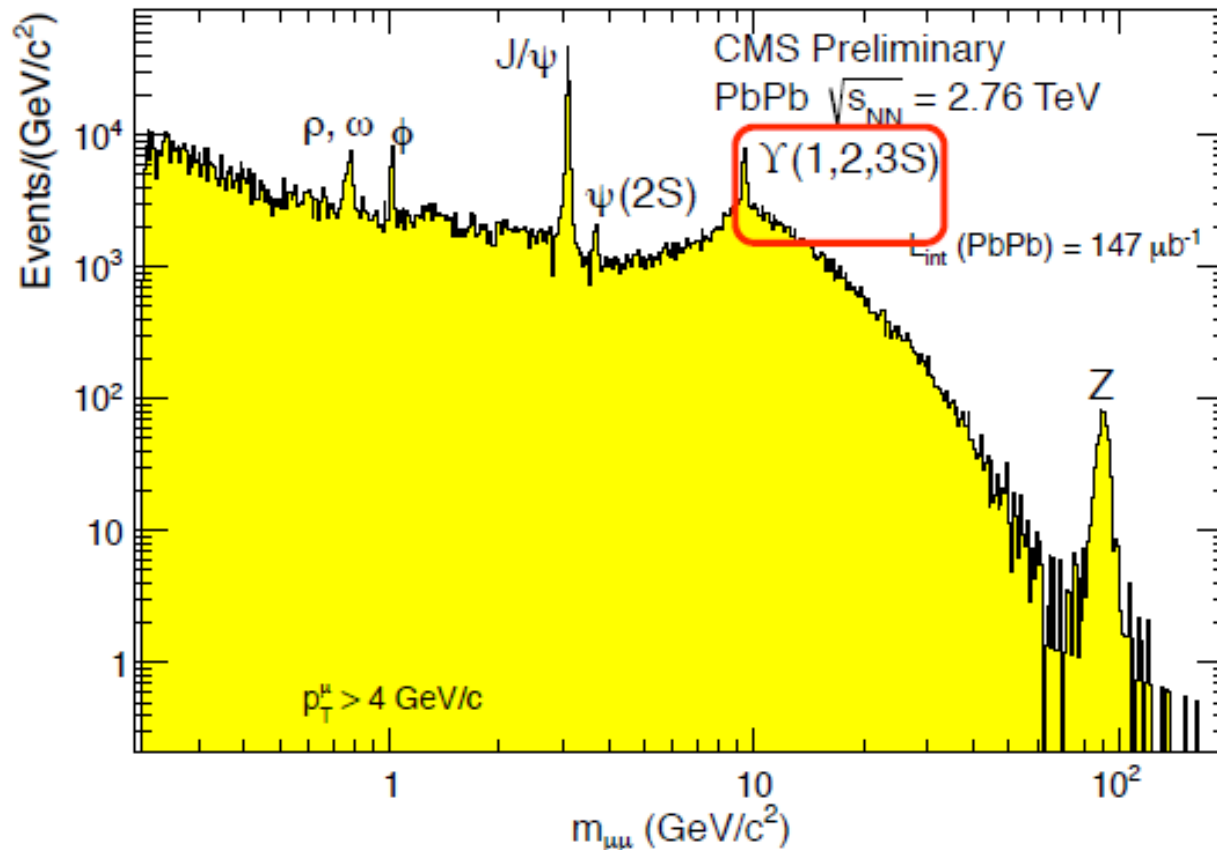
Nagy  $p_T$ : a részecskék gyorsan kiszöknek, nincs termalizáció



A hidrodinamikai modellek jól leírják a tömegfüggést is



# Dileptonok



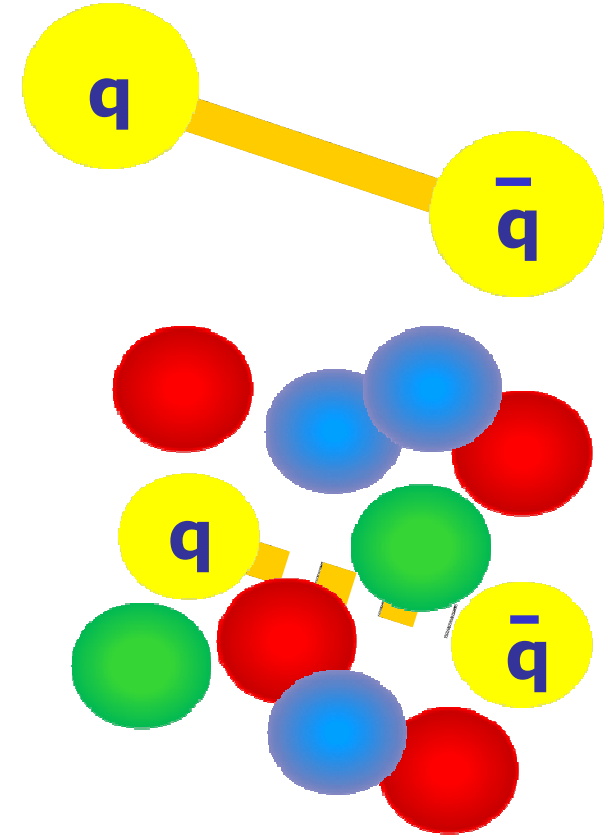
Az ütközés korai szakasza  
Nem hatnak erősen kölcsön



# Kvarkónium: szín-árnyékolás

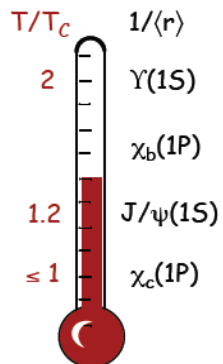
Vákuum:

$$V(r) = -\frac{\alpha}{r} + kr$$



QGP:

$$V(r) = -\frac{\alpha}{r} e^{-r/\lambda_D}$$



$\lambda_D$ : a kötött állapot maximális mérete,  
Hőmérséklet növelésével csökken  
(de: regeneráció)



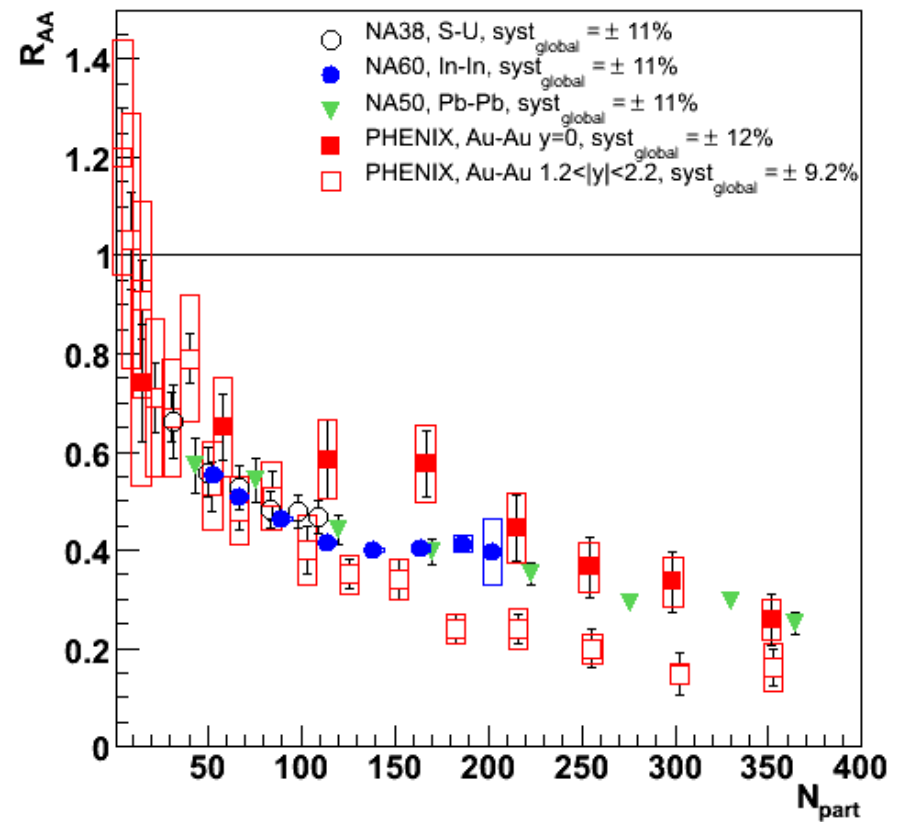
# Enyomás mérése

- Összehasonlítás p+p ütközésekkel:

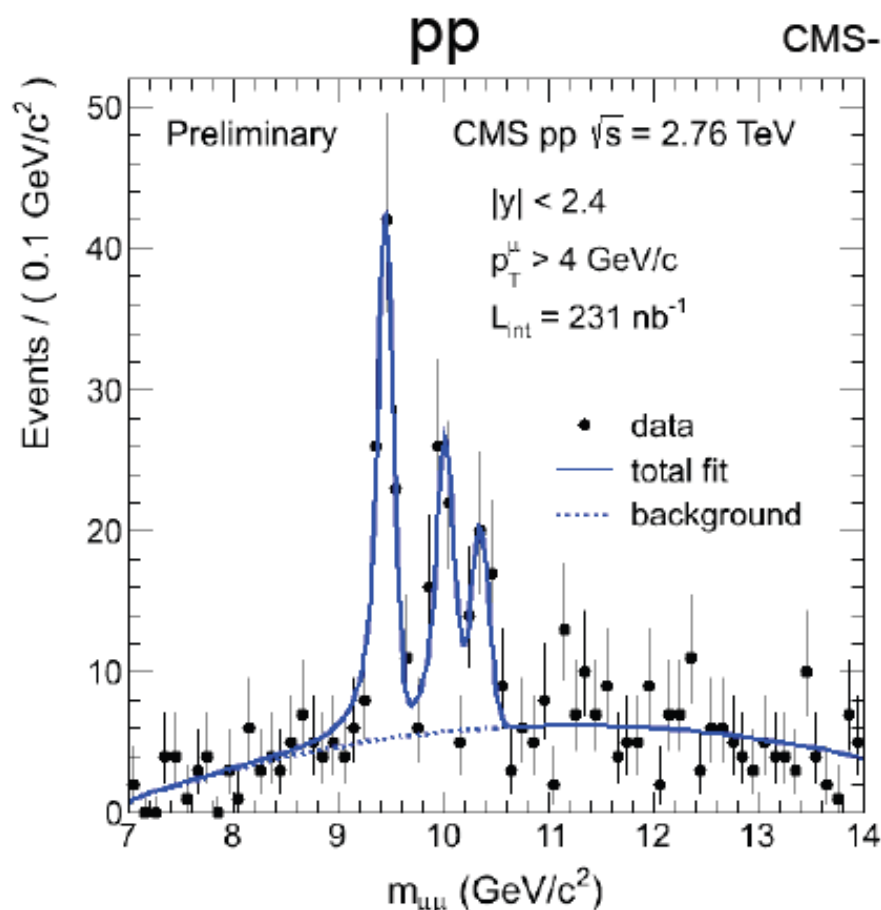
$$R_{AA} = \frac{dN_{AA}^P}{\langle N_{coll} \rangle dN_{NN}^P}$$

Ha nincs módosulás,  
akkor  $R_{AA}=1$

SPS  $\approx$  RHIC...  
rekombináció?

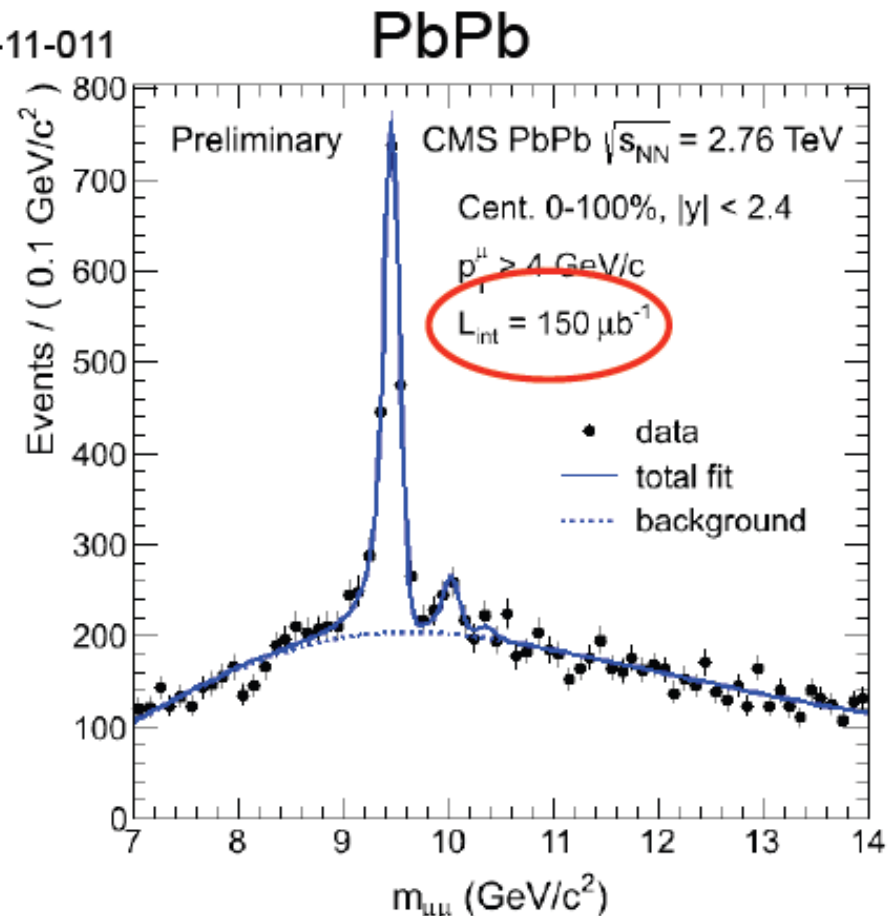


# Y elnyomás



$$N_{R(2S)}/N_{R(1S)}|_{pp} = 0.56 \pm 0.13 \pm 0.01$$

$$N_{R(3S)}/N_{R(1S)}|_{pp} = 0.21 \pm 0.11 \pm 0.02$$

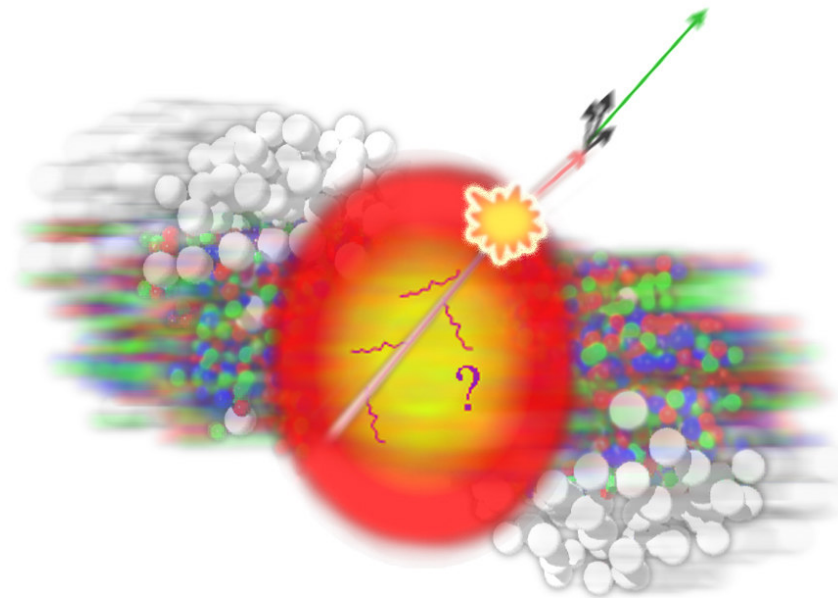


$$N_{R(2S)}/N_{R(1S)}|_{PbPb} = 0.12 \pm 0.03 \pm 0.01$$

$$N_{R(3S)}/N_{R(1S)}|_{PbPb} < 0.07$$



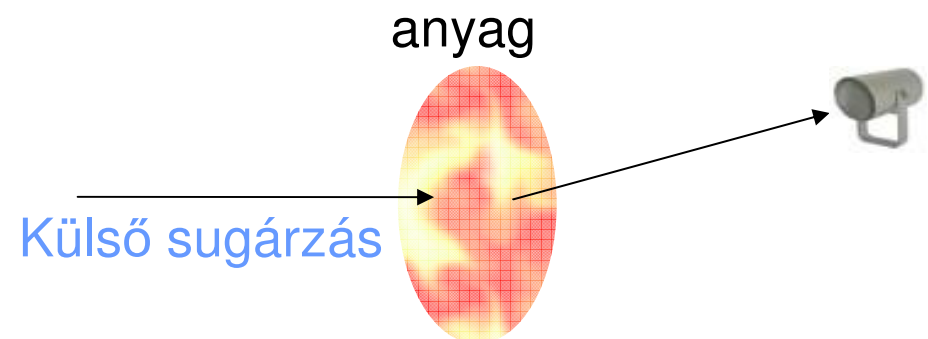
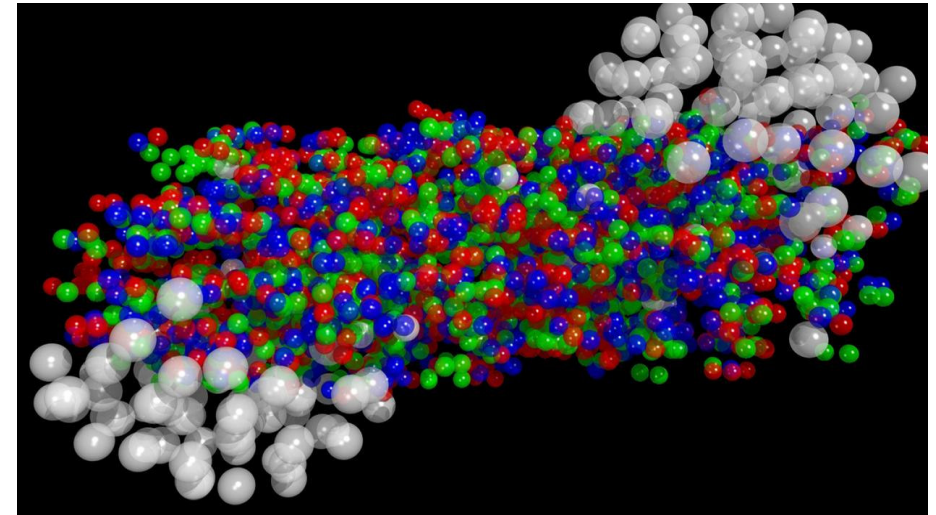
# Kemény szórások felhasználása





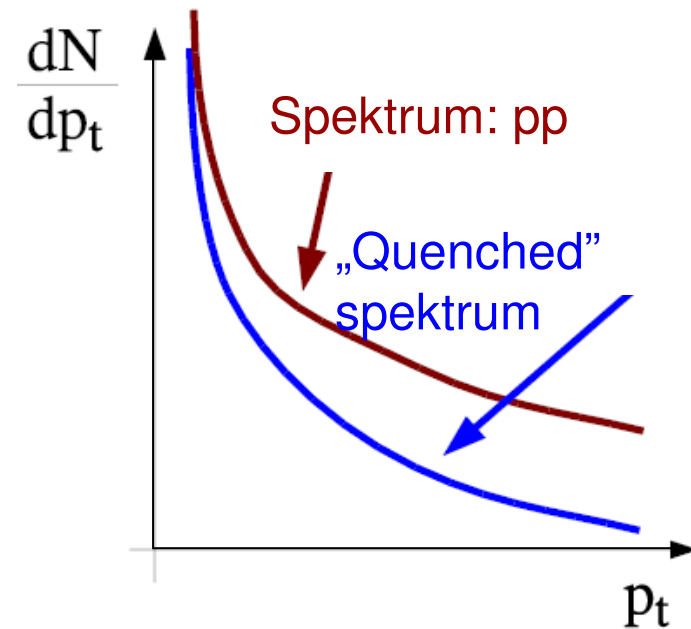
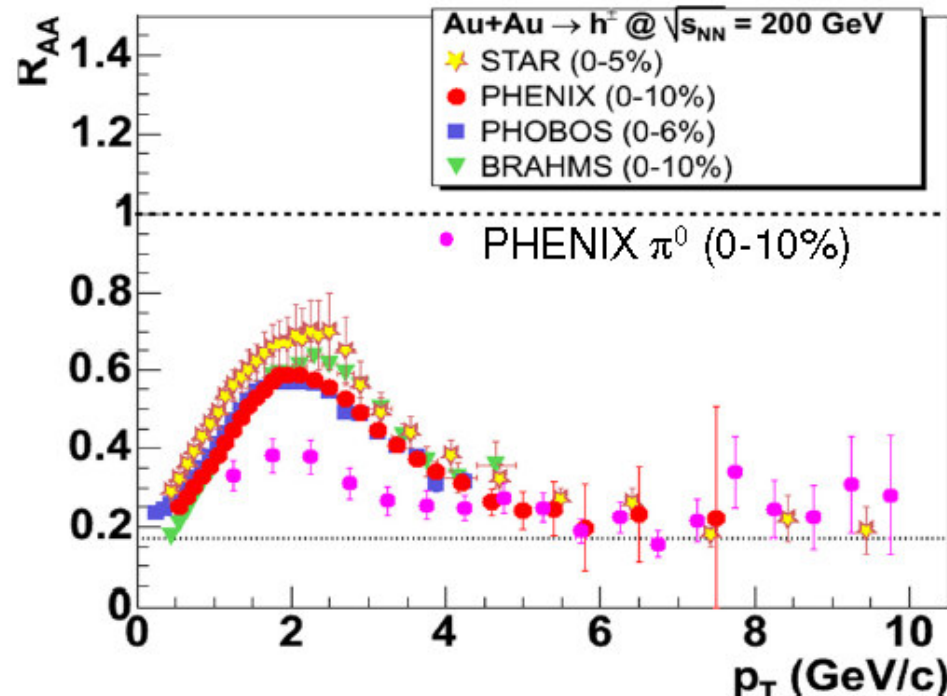
# Kemény szórások nehézion-ütközésekben

- Cél: a létrejött folyadék állapot (közeg) tulajdonságait vizsgálni
- Probléma: a közeg élettartama nagyon rövid ( $O(\text{fm}/c)$ ), nem használhatunk külső „sugárforrást” a vizsgálatához
- Megoldás: kihasználjuk a nagy  $p_T$  *jet*-ek,  $\gamma/W/Z$ , kvarkónium állapotok nagy hatáskeresztmetszetét az LHC energián, és felhasználjuk ezeket **magukban az ütközésekben.**



# Energiaveszteség

- A plazmán áthaladó partonok energiát veszíthetnek
  - Többszörös szórással
  - Gluon sugárzással



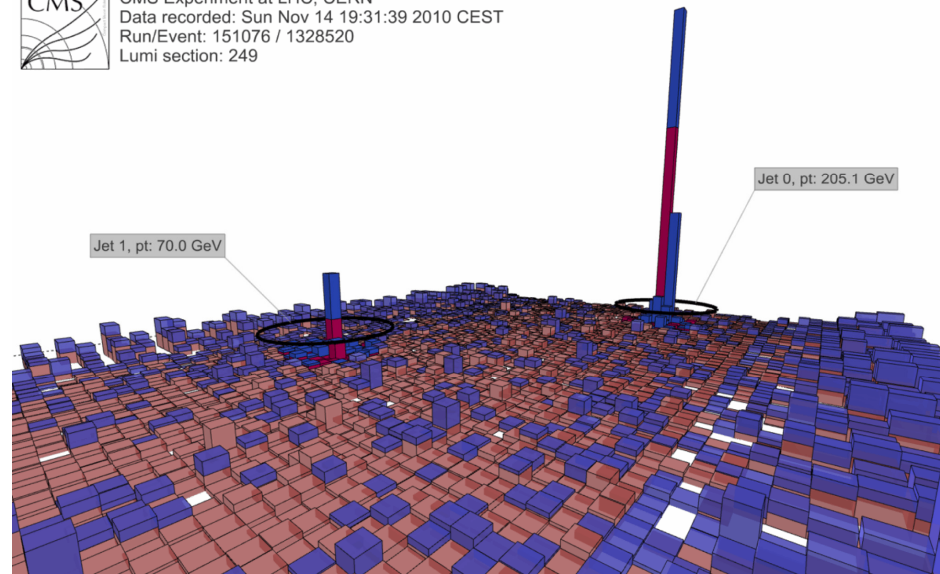
$$R_{AA}(p_T) = \frac{1}{\langle N_{coll} \rangle} \frac{dN_{AA} / dp_T}{dN_{pp} / dp_T}$$



# Jet-ek: mennyire erősen kölcsönható ez az anyag?

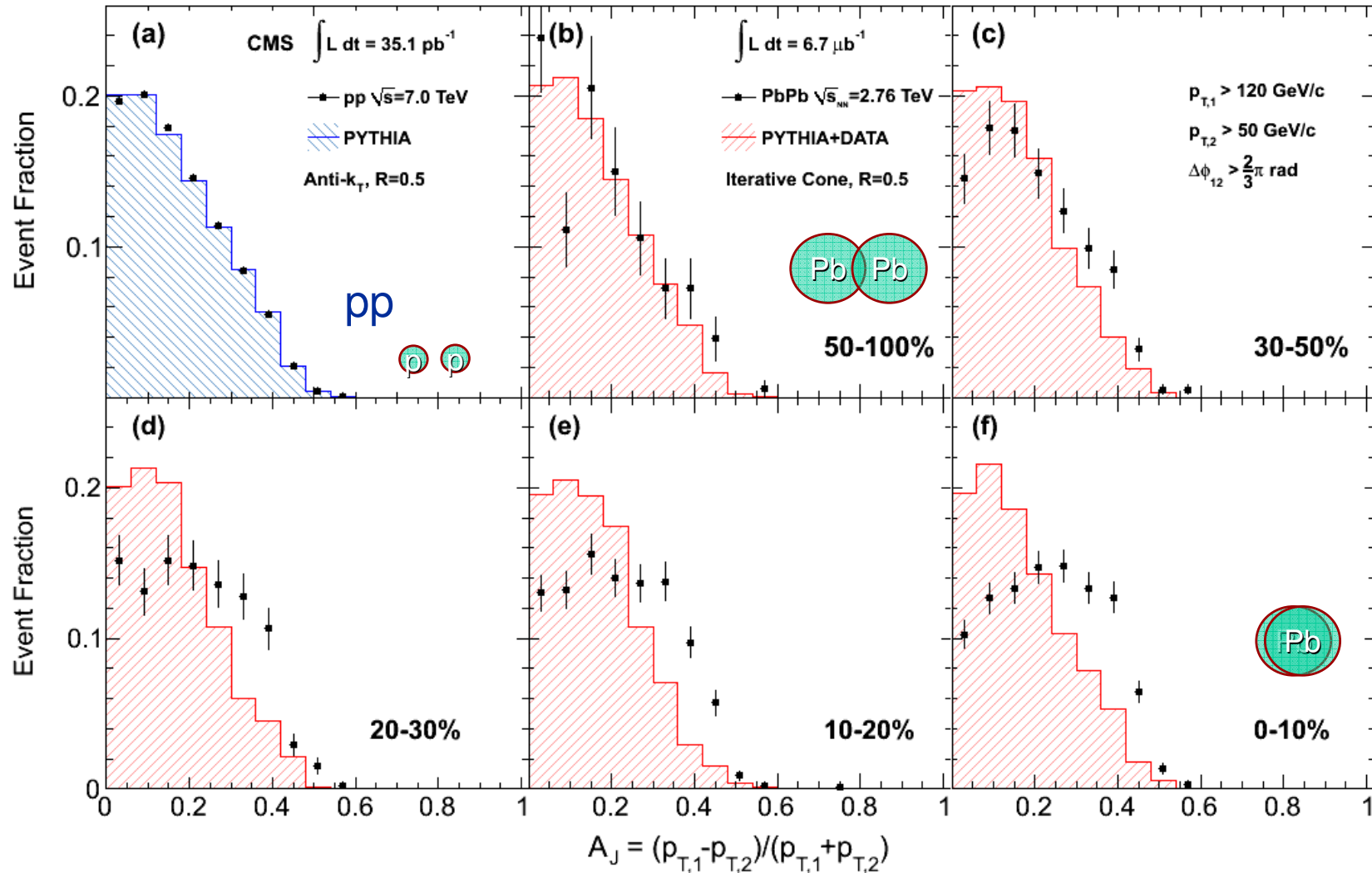


CMS Experiment at LHC, CERN  
Data recorded: Sun Nov 14 19:31:39 2010 CEST  
Run/Event: 151076 / 1328520  
Lumi section: 249

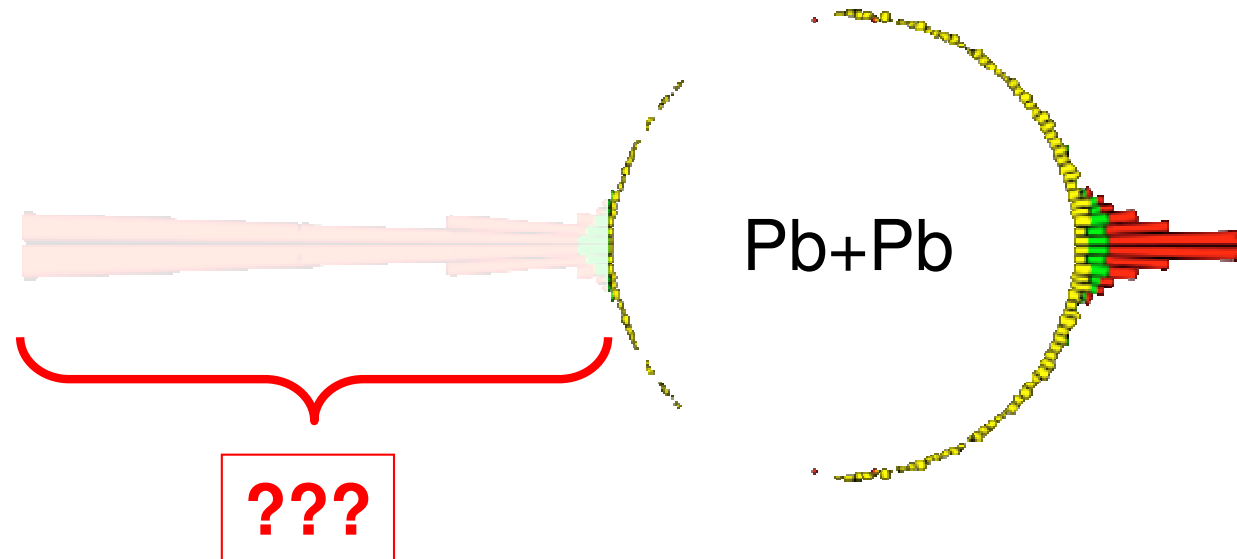


# Jet energia aszimmetria

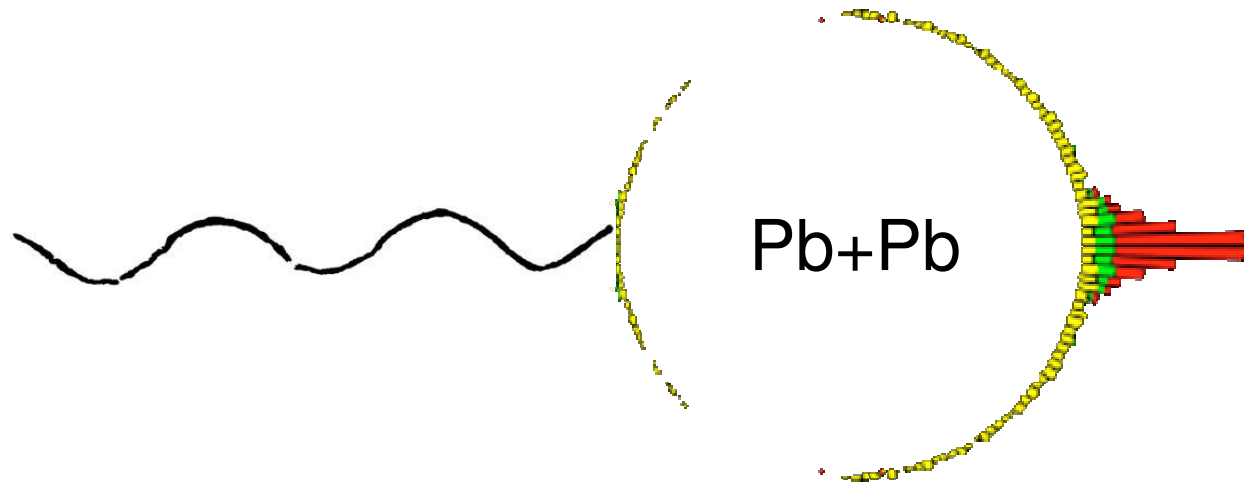
- A partonok energiavesztesége a *jet*-párok energia-egyensúlyának felborulásában jelenik meg, centrális Pb+Pb ütközésekben



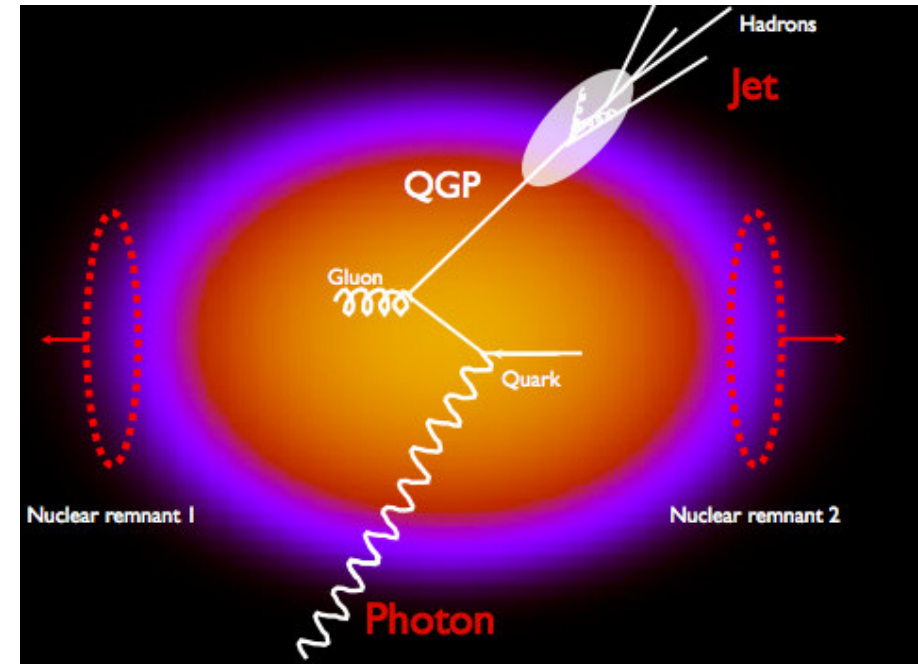
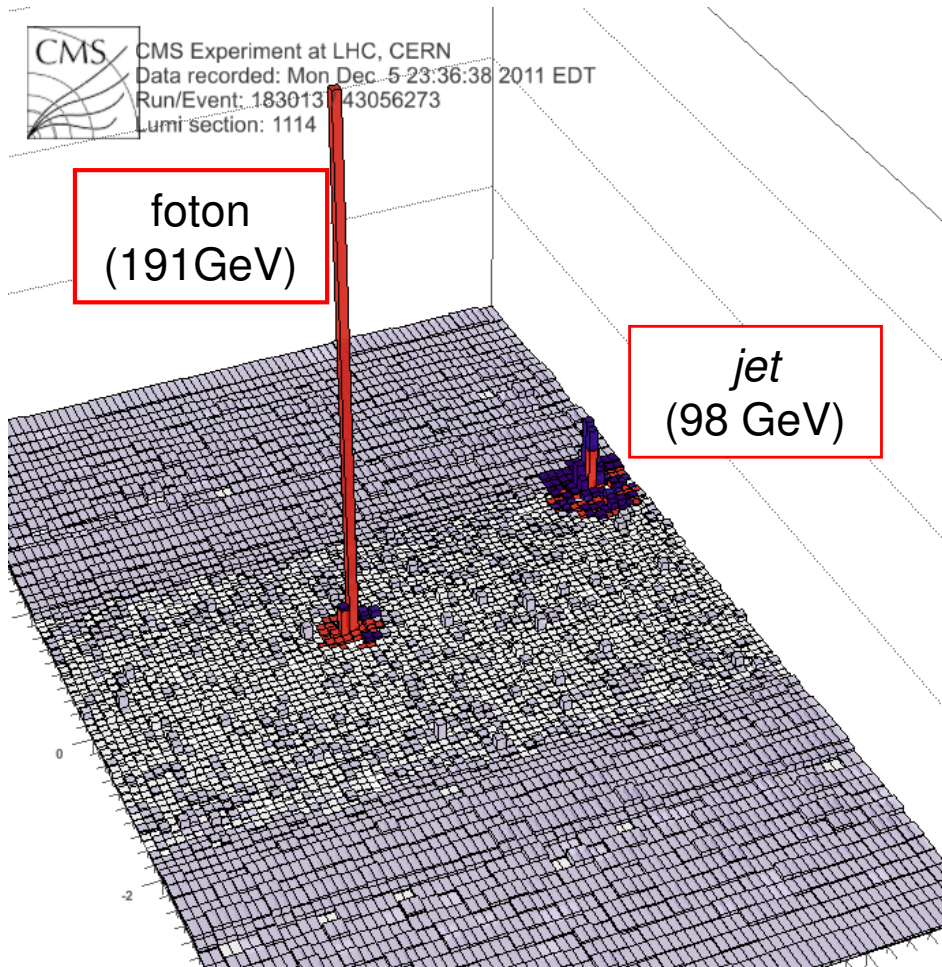
# Hogyan jellemezhető a *jet*-ek energiavesztesége „kalibrált” módon?



# Hogyan jellemezhető a *jet*-ek energiavesztesége „kalibrált” módon?



# $\gamma$ -jet: u, d kvark energiavesztesége



A foton szerepe:

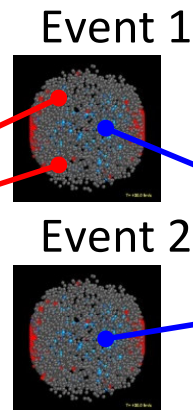
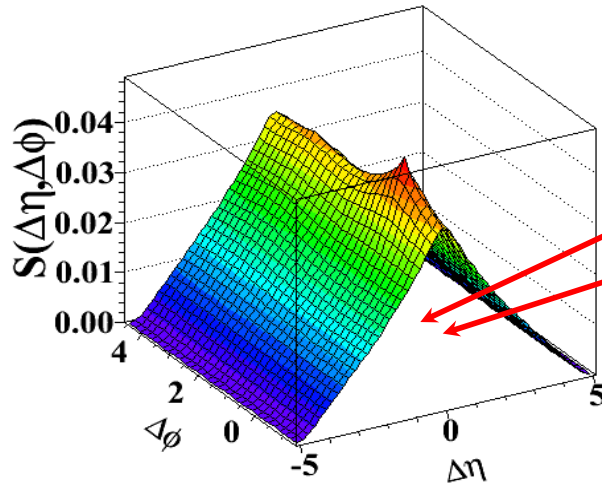
- Azonosítja a *jet*-et: u,d kvark *jet*
- Megadja az eredeti kvark mozgási irányát
- Megadja a kvark kezdeti energiáját



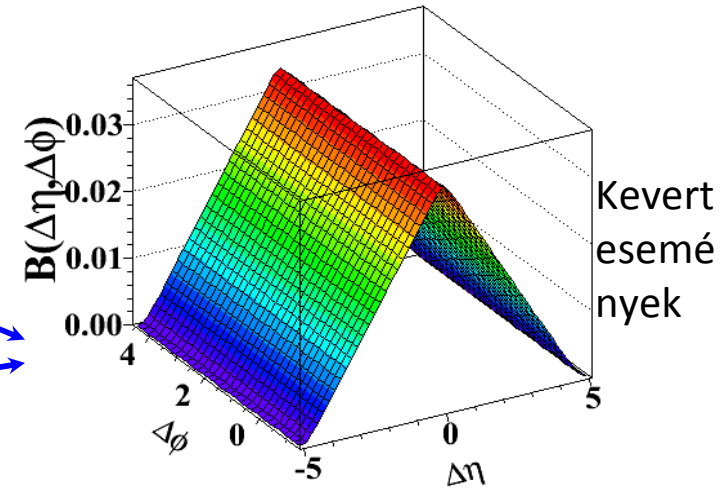
# Kétrészecske-korrelációk definiálása

Jel-párok eloszlása:

Párok egyazon eseményből



Háttér-párok eloszlása



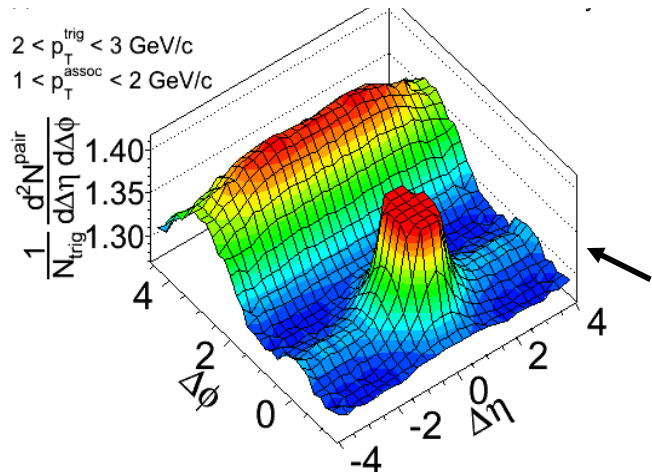
Kevert események

$$S(\Delta\eta, \Delta\phi) = \frac{1}{N_{trig}} \frac{d^2 N^{same}}{d\Delta\eta d\Delta\phi}$$

$$B(\Delta\eta, \Delta\phi) = \frac{1}{N_{trig}} \frac{d^2 N^{mix}}{d\Delta\eta d\Delta\phi}$$

High multiplicity pp ( $N > 110$ )  $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$

$\Delta\eta = \eta_1 - \eta_2$   
 $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$



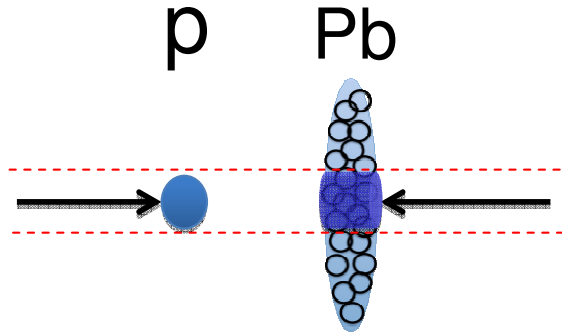
Az asszociált hadronok triggerenkénti száma:

$$\frac{1}{N_{trig}} \frac{d^2 N^{pair}}{d\Delta\eta d\Delta\phi} = B(0,0) \times \frac{S(\Delta\eta, \Delta\phi)}{B(\Delta\eta, \Delta\phi)}$$





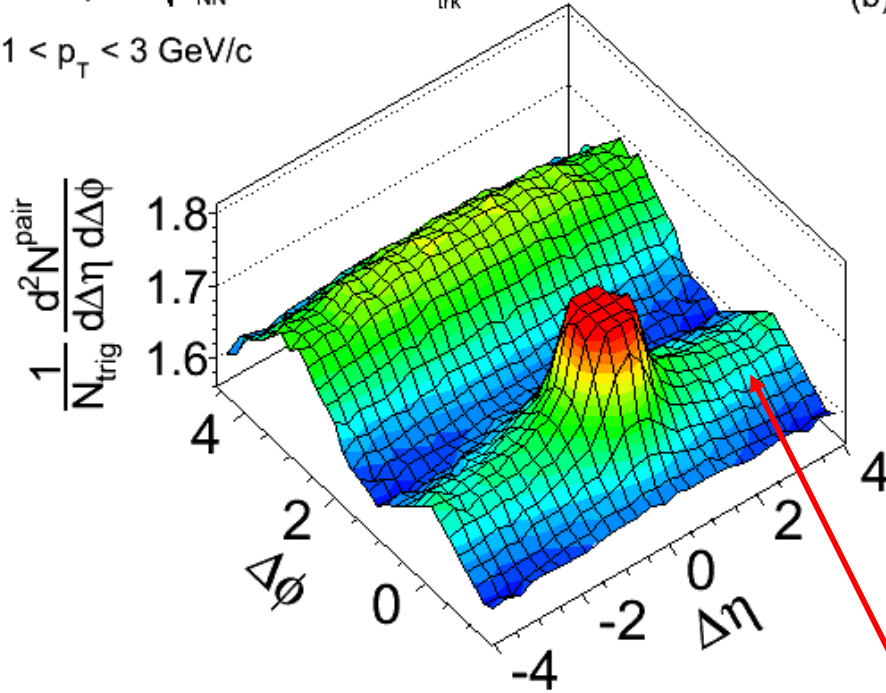
# p+Pb: a “hegygerinc” újra felbukkant!



A fizikai magyarázat még nem teljesen tisztázott

CMS pPb  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV,  $N_{trk}^{offline} \geq 110$   
 $1 < p_T < 3$  GeV/c

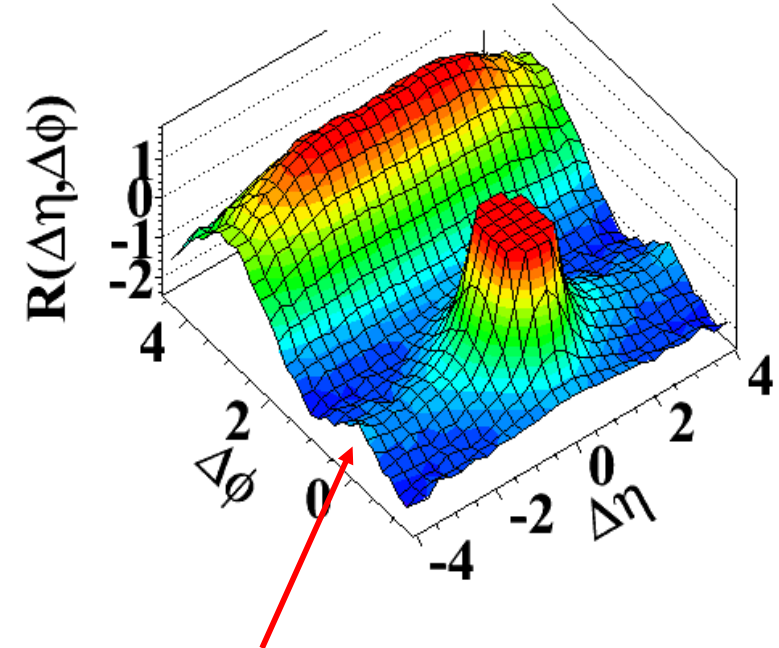
(b)



$N \equiv$  a töltött részecskék száma ( $p_T > 0.4$  GeV/c)

p+p 7 TeV

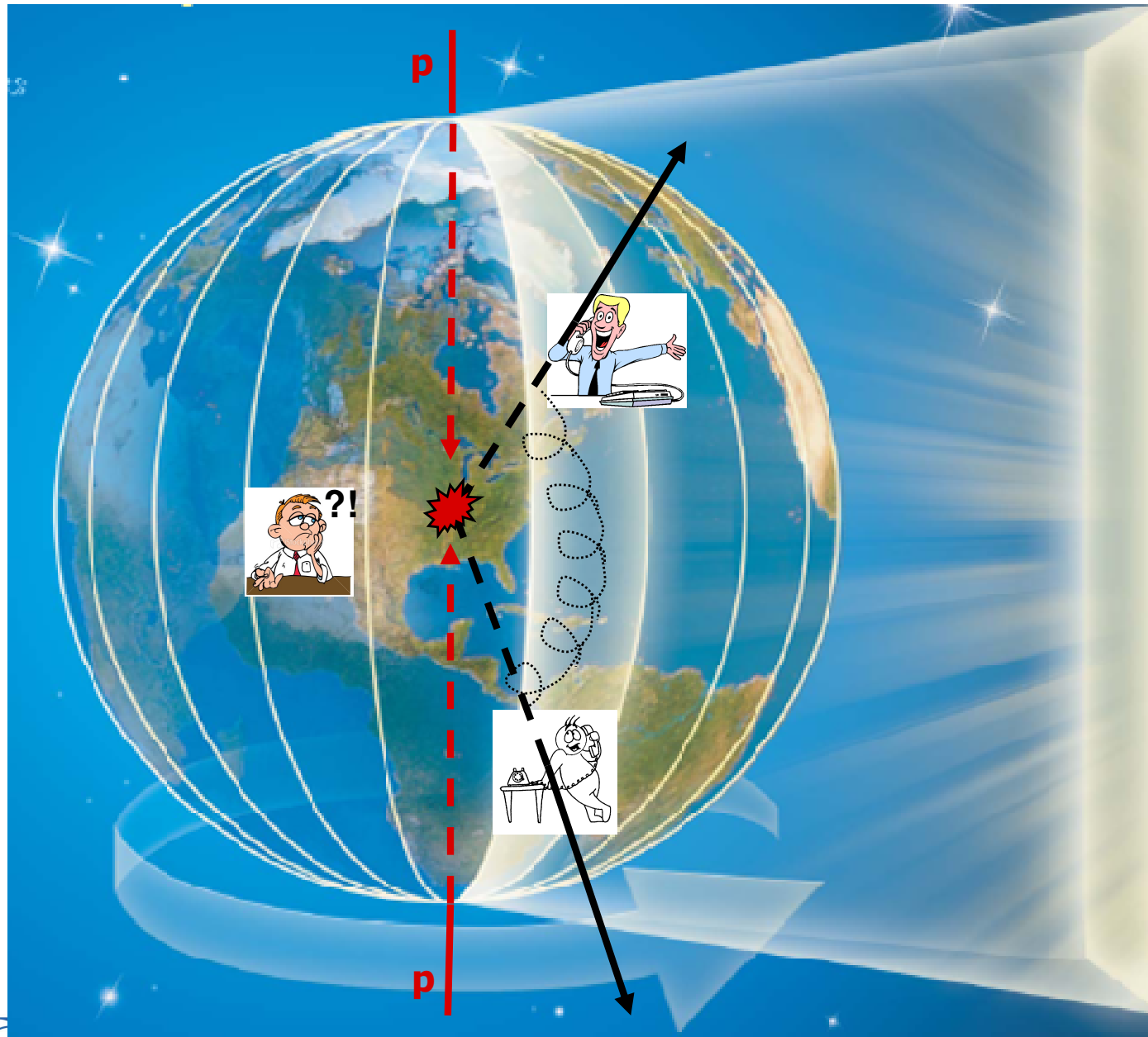
(d)  $N > 110$ ,  $1.0 \text{ GeV}/c < p_T < 3.0 \text{ GeV}/c$



Sokkal nagyobb mint p+p ütközésekben



# Az effektus szemléltetése



**Azok a részecskék,  
amelyek ugyanabban az  
időzónában vannak, de  
nagyon távoli szélességi  
körök mentén,  
kapcsolatban vannak!**

**...Milyen mechanizmus  
lehet a telefonzsinór?**

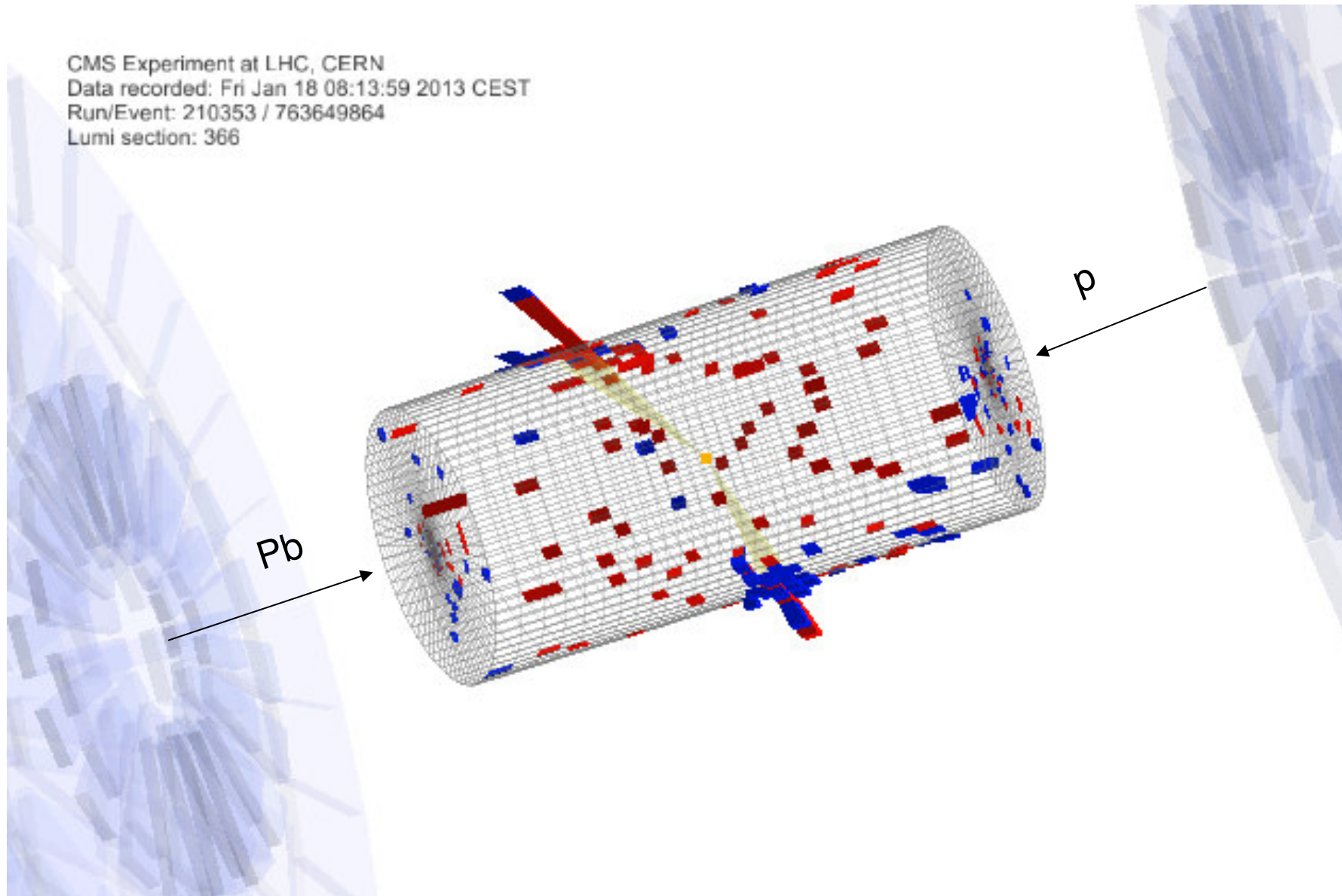


# p+Pb ütközések: 2016. nov-dec. Referencia-mérés (?)



# Jet-pár egy p+Pb ütközésben, $\sqrt{s_{NN}} = 5 \text{ TeV}$

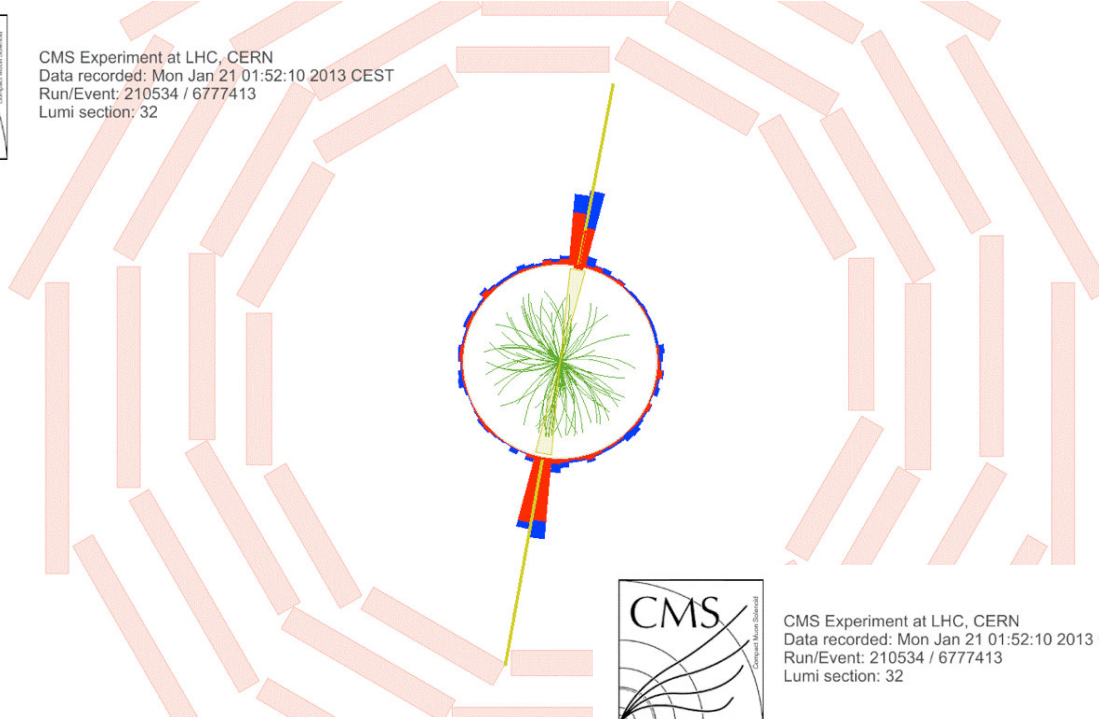
CMS Experiment at LHC, CERN  
Data recorded: Fri Jan 18 08:13:59 2013 CEST  
Run/Event: 210353 / 763649864  
Lumi section: 366



# Jet-pár egy p+Pb ütközésben, $\sqrt{s_{NN}} = 5 \text{ TeV}$



CMS Experiment at LHC, CERN  
Data recorded: Mon Jan 21 01:52:10 2013 CEST  
Run/Event: 210534 / 6777413  
Lumi section: 32



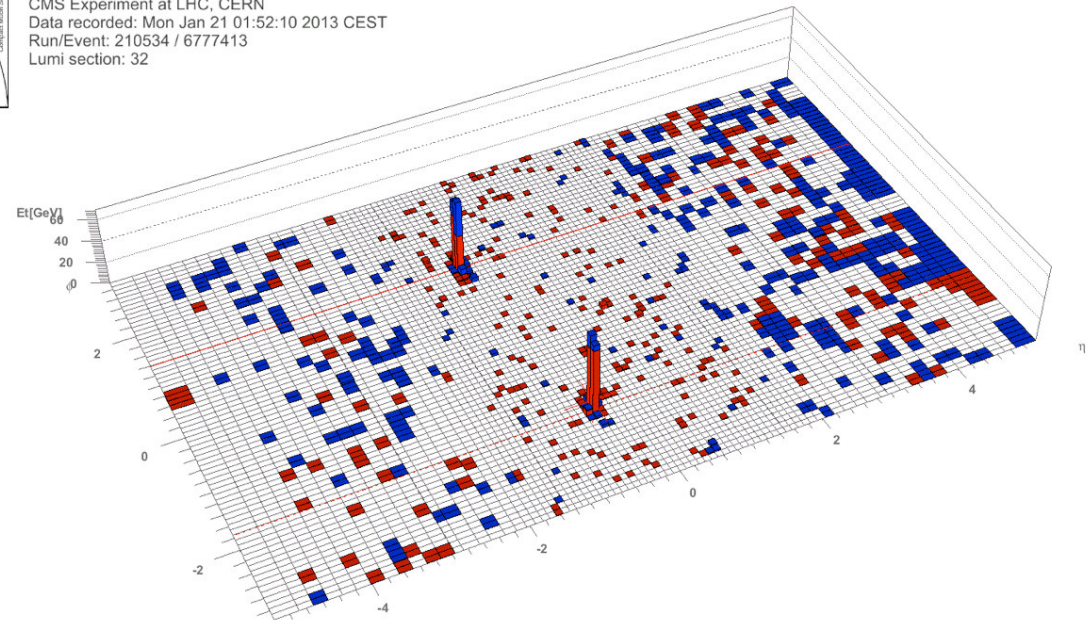
CMS Experiment at LHC, CERN  
Data recorded: Mon Jan 21 01:52:10 2013 CEST  
Run/Event: 210534 / 6777413  
Lumi section: 32

vezető jet:

$$E_T = 170.3 \text{ GeV}$$

Jet párja:

$$E_T = 166.9 \text{ GeV}$$



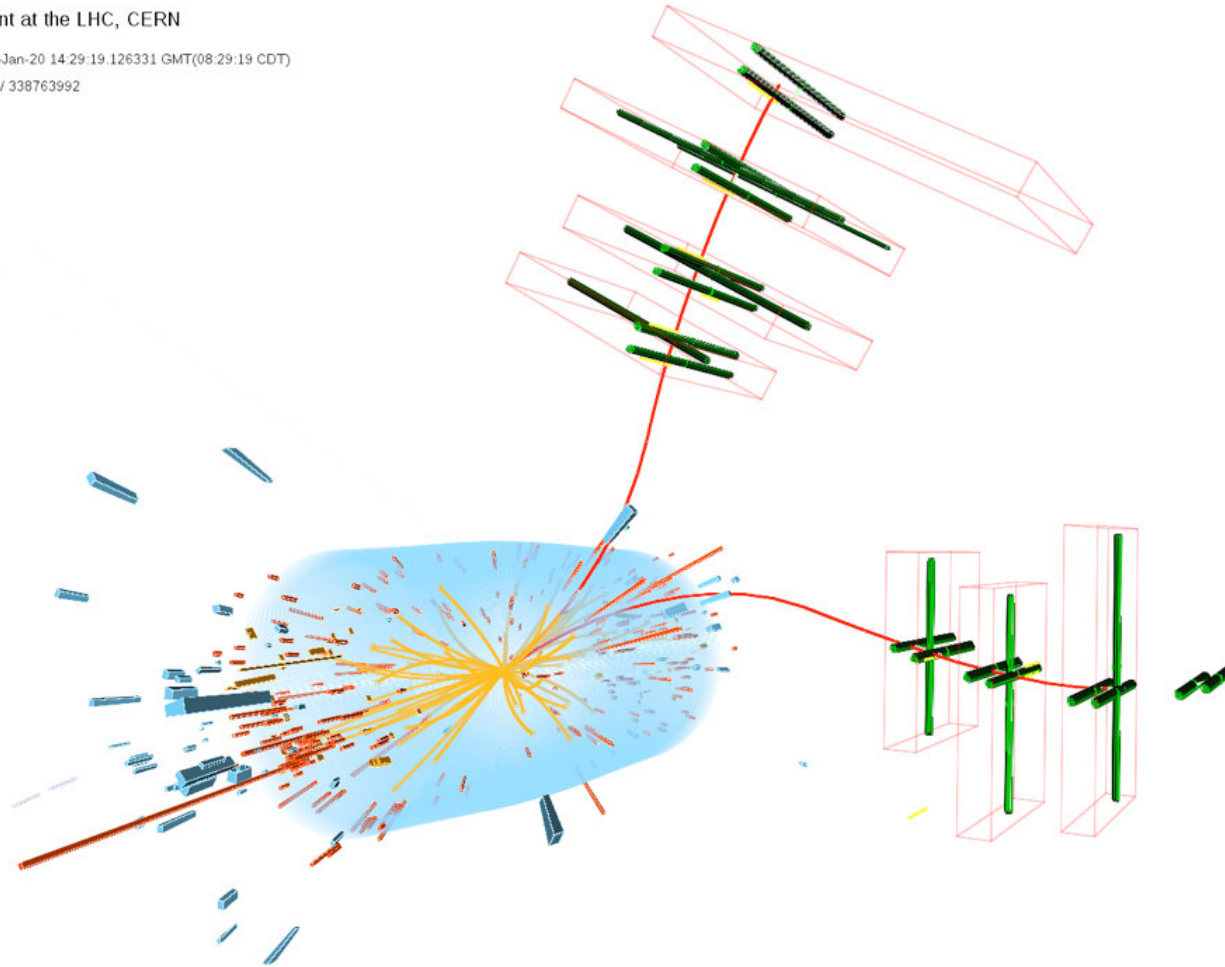
# J/ $\psi$ jelölt p+Pb ütközésben, $\sqrt{s_{NN}} = 5$ TeV



CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2013-Jan-20 14:29:19.126331 GMT(08:29:19 CDT)

Run / Event: 210498 / 338763992



© CERN. All rights reserved.

<http://cern.ch/lego>



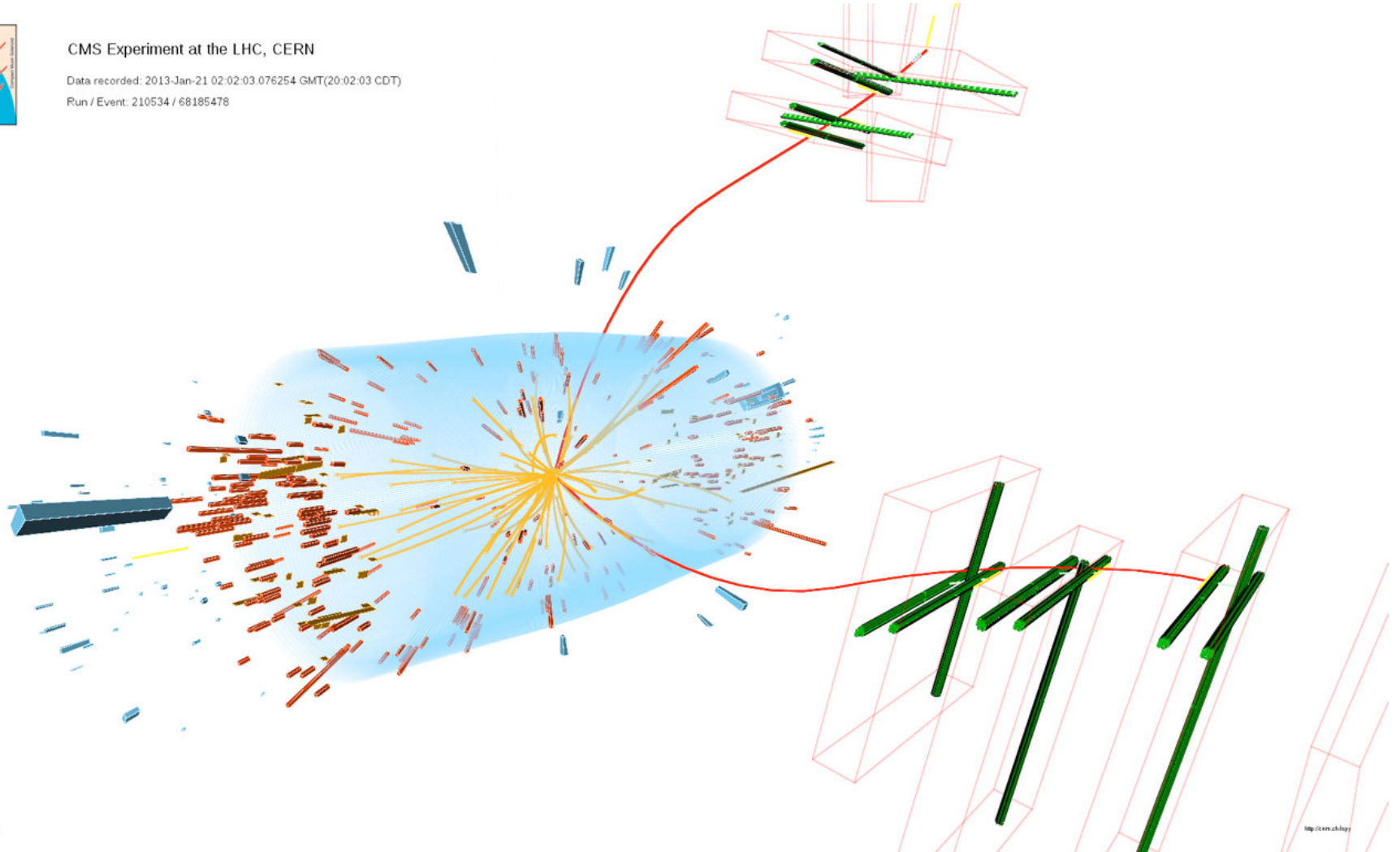
# $\Upsilon(1S)$ jelölt p+Pb ütközésben, $\sqrt{s_{NN}} = 5$ TeV



CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2013-Jan-21 02:02:03.076254 GMT(20:02:03 CDT)

Run / Event: 210534 / 68185478



© CERN. All rights reserved.

http://cms.cern.ch



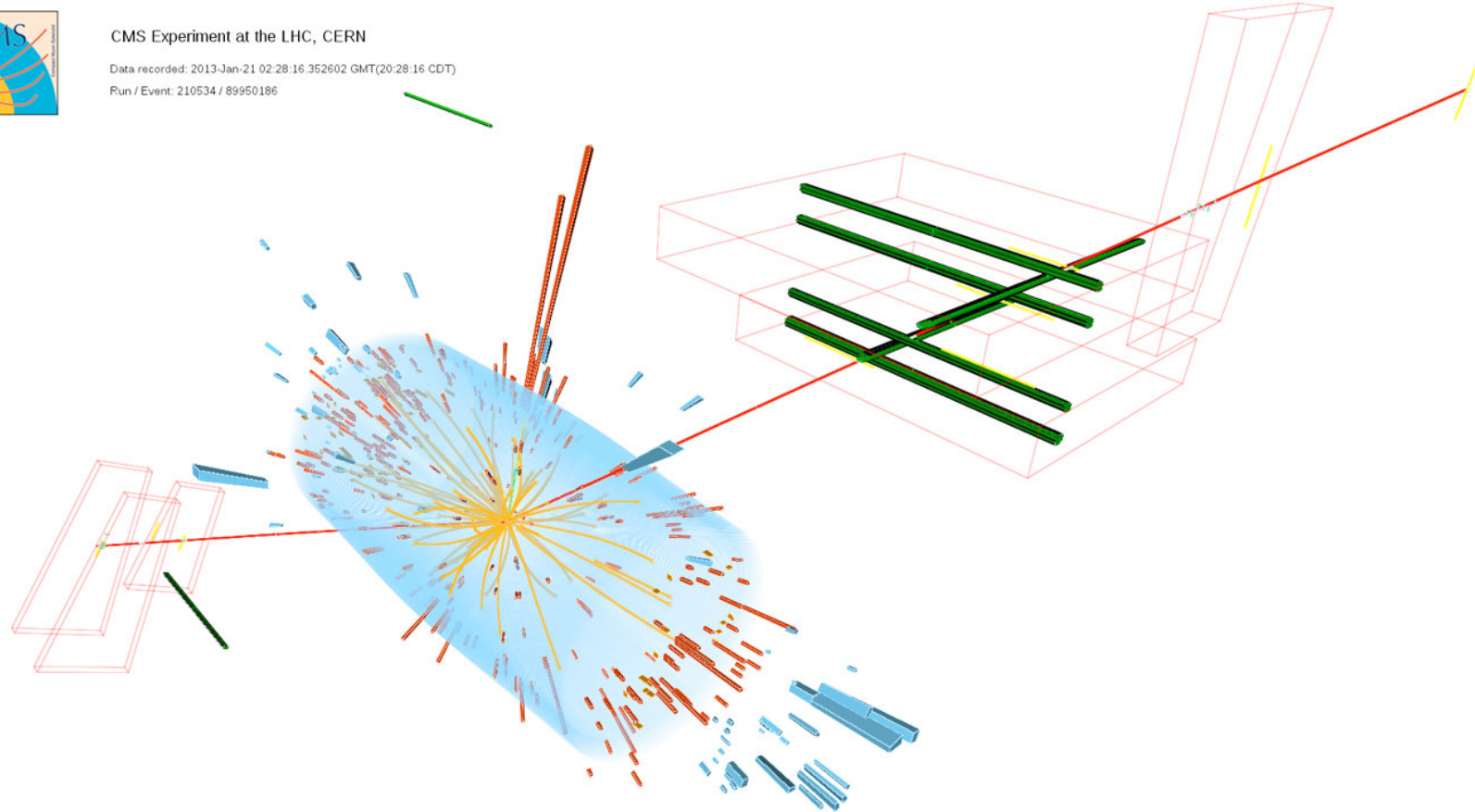
# Z jelölt (+jet) p+Pb ütközésben, $\sqrt{s_{NN}} = 5 \text{ TeV}$



CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2013-Jan-21 02:28:16.352602 GMT(20:28:16 CDT)

Run / Event: 210534 / 89950186



© CERN. All rights reserved.

<http://cms.cern.ch>





# Magyar részvétel

- NA61, SPS gyorsító:
  - kritikus pont keresése, kvark-kiszabadulás kutatása
- PHENIX, RHIC gyorsító:
  - tökéletes folyadék vizsgálata, energia-scan, stb.
- ALICE, LHC gyorsító:
  - kiváló részecske-azonosítás
- CMS, LHC:
  - kiváló jet, (di)müon, foton, korrelációs mérési lehetőségek



# Összefoglalás

- A nehézionfizika az anyag új fázisával foglalkozik
- Az elméleti fizikai kevesebb támpontot ad, mint a részecskefizikában általában – de épp ez a szépsége
- A kísérleti eredmények sokszor okoznak meglepetést (a jóslatokhoz képest)
- A magyar részvétel nemzetközi szinten is jelentős

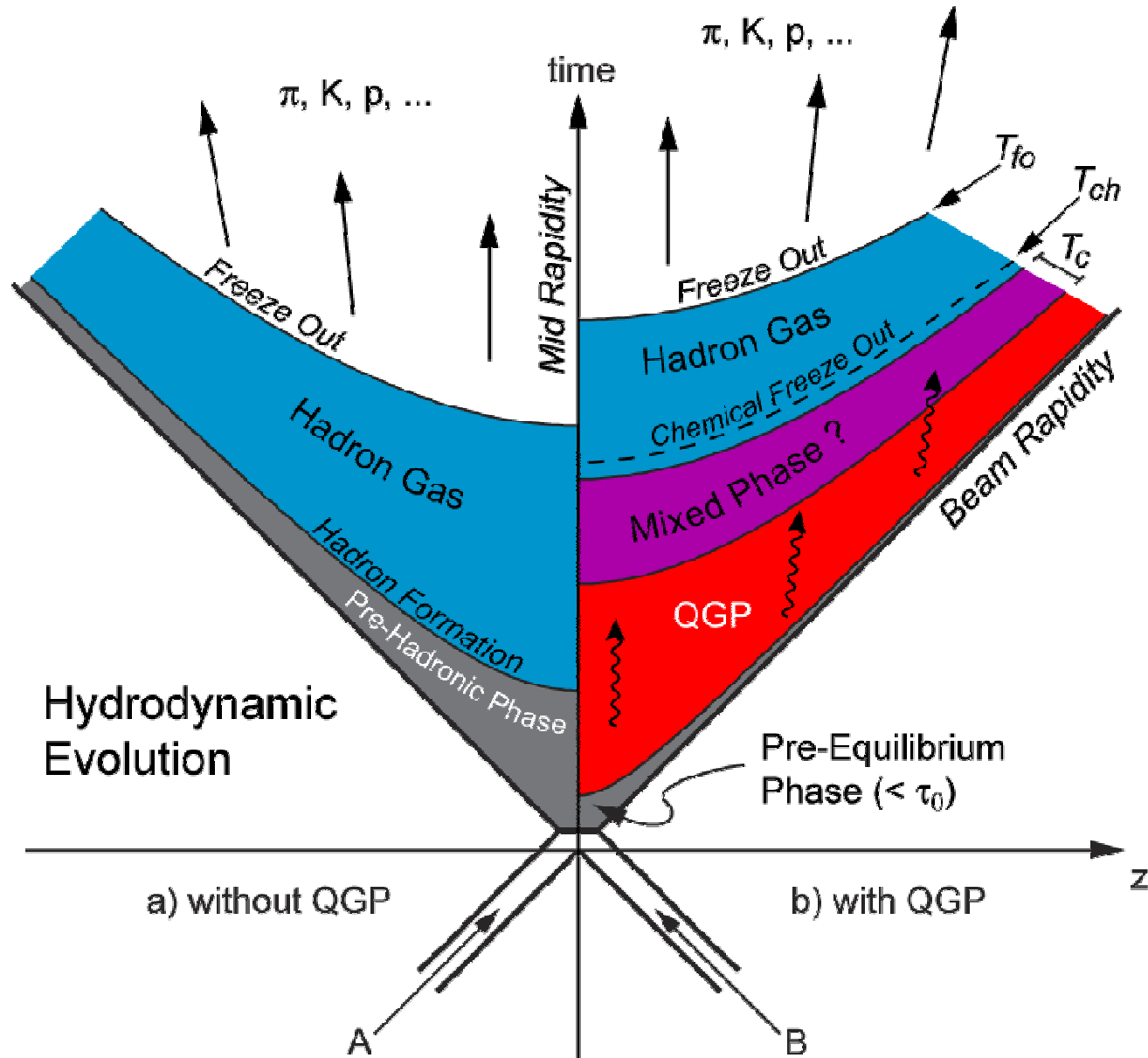
Köszönöm a figyelmet!



# EXTRA



# Időfejlődés

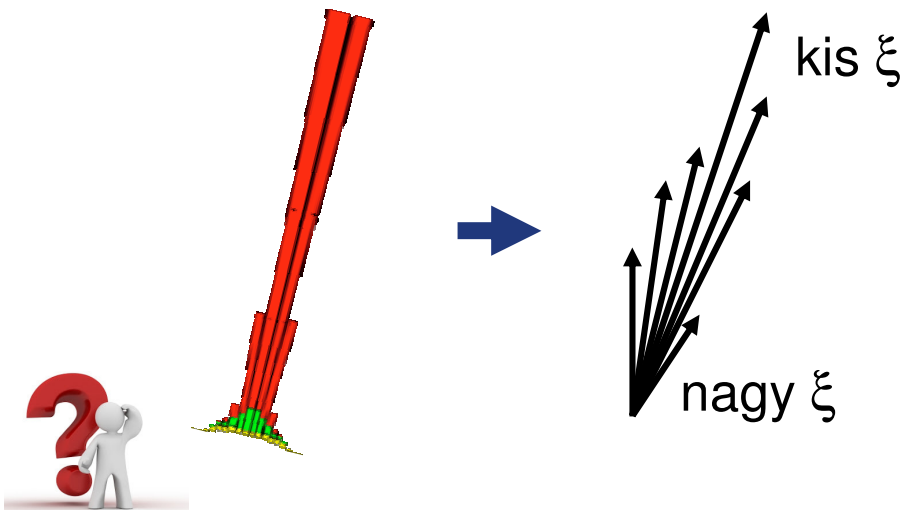


# Hogyan módosulnak a *jetek*? Megváltozik az alakjuk vagy a fragmentációjuk?

## **Jet fragmentációs függvény:**

A részecskék impulzusának eloszlása a jet tengelyére vetítve, a  $\xi$  változót használva:

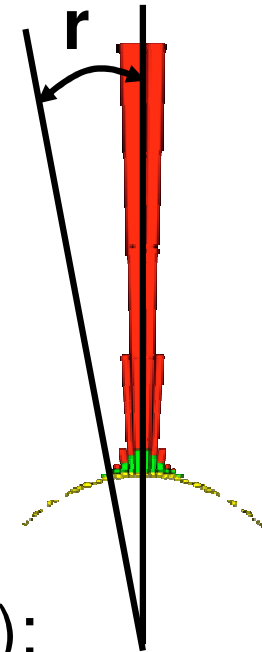
$$\xi = \ln(p^{\text{jet}}/p_{\parallel}^{\text{track}}):$$



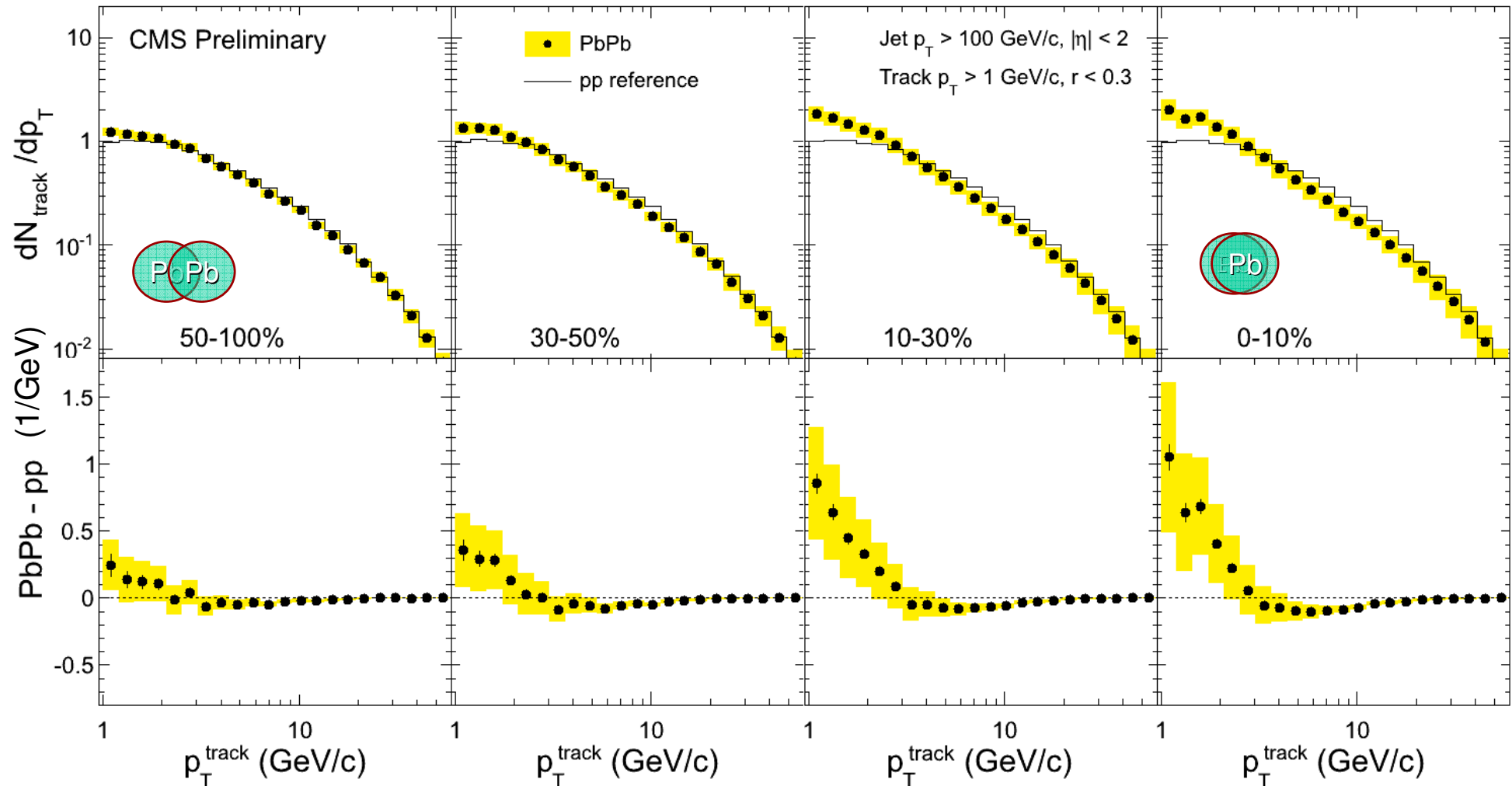
## **Jet alak:**

$p_T$ -eloszlás az  $\eta$ - $\phi$  távolság függvényében a jet tengelyétől ( $r$ ):

$$\rho(r) \sim \frac{1}{\delta r} \frac{1}{N_{\text{jet}}} \sum_{\text{jets}} \frac{p_T(r - \delta r/2, r + \delta r/2)}{p_T^{\text{jet}}}$$



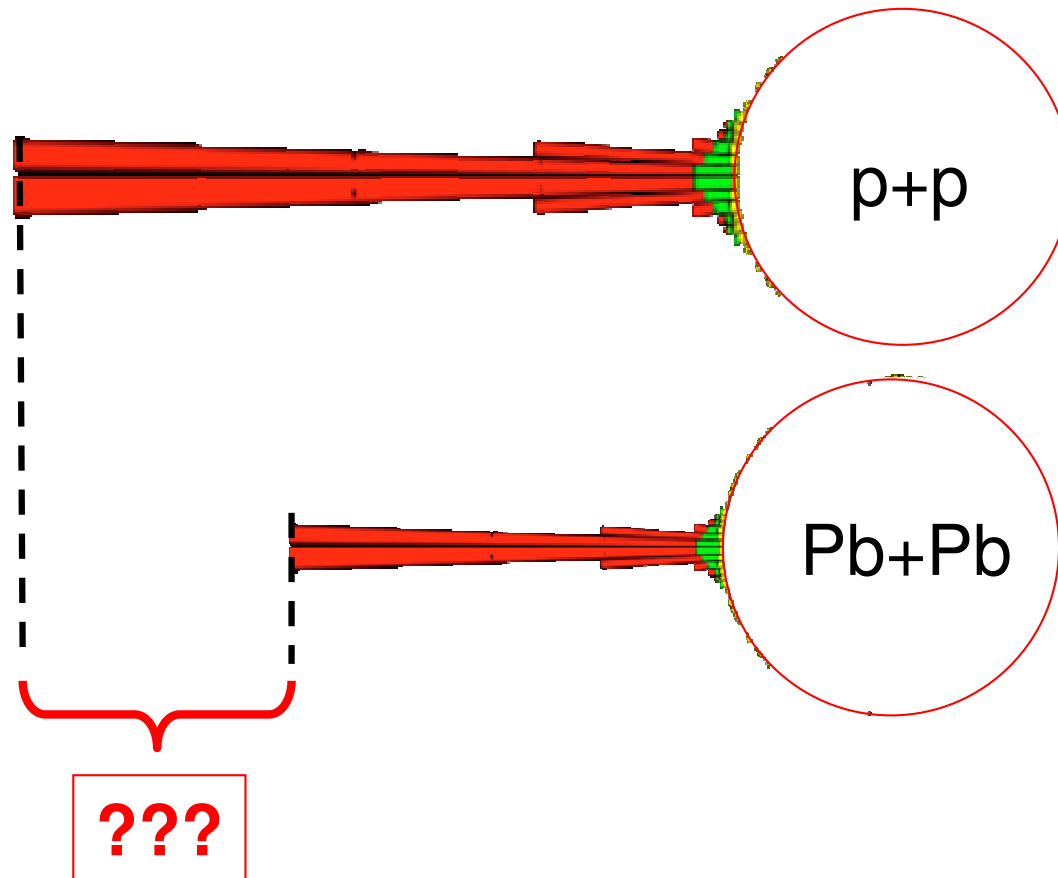
# Részecskék $p_T$ -eloszlása *jet*-eken belül



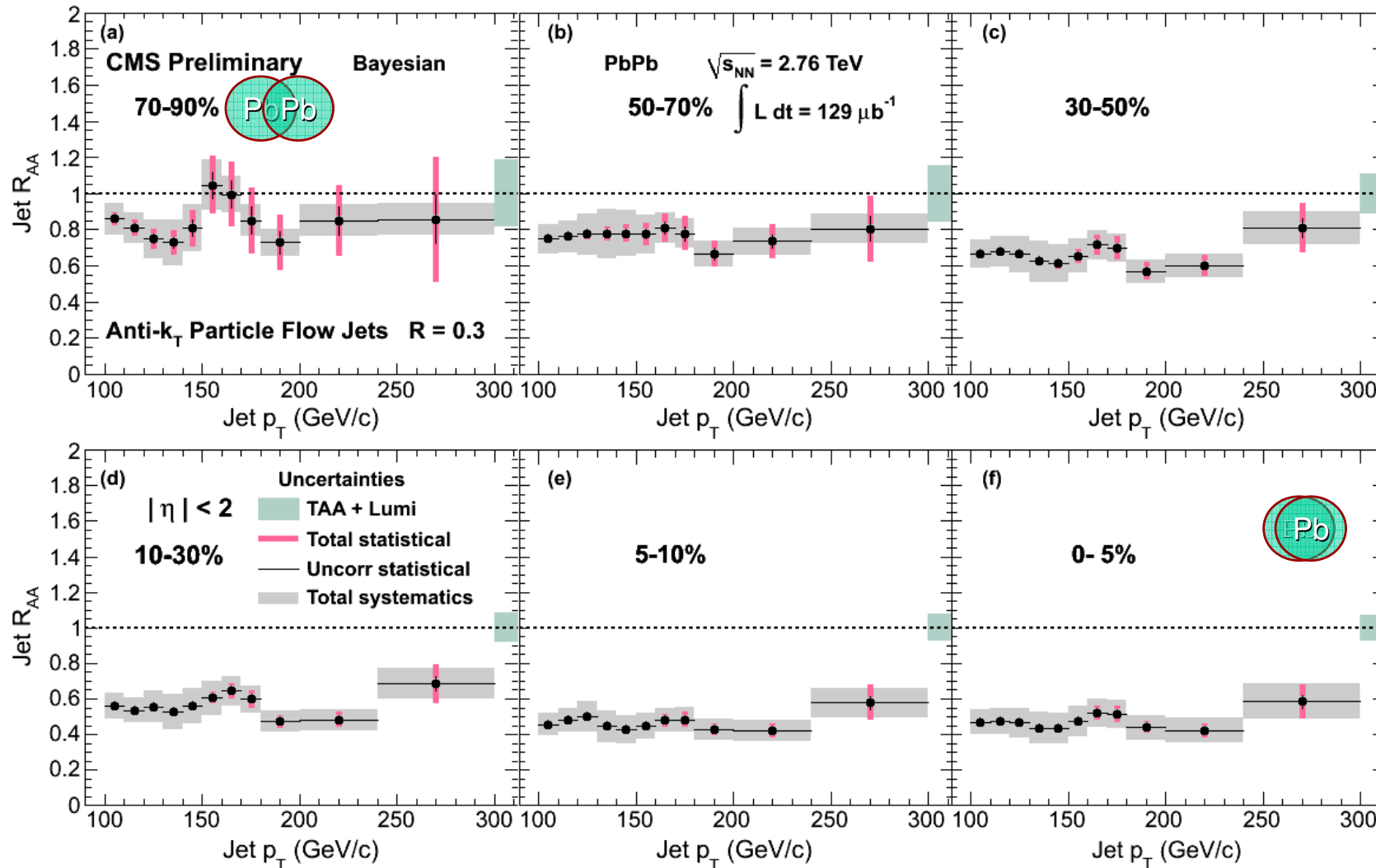
Nagy  $p_T$  (kis  $\xi$ ): **nincs változás** a p+p ütközésekhez képest  
 Centrális Pb+Pb: részecskék **többlete** p+p-hez képest (nagy  $\xi$ )



# Mennyi energiát vesztenek a *jet*-ek?



# Jet-ek nukleáris módosulási faktora

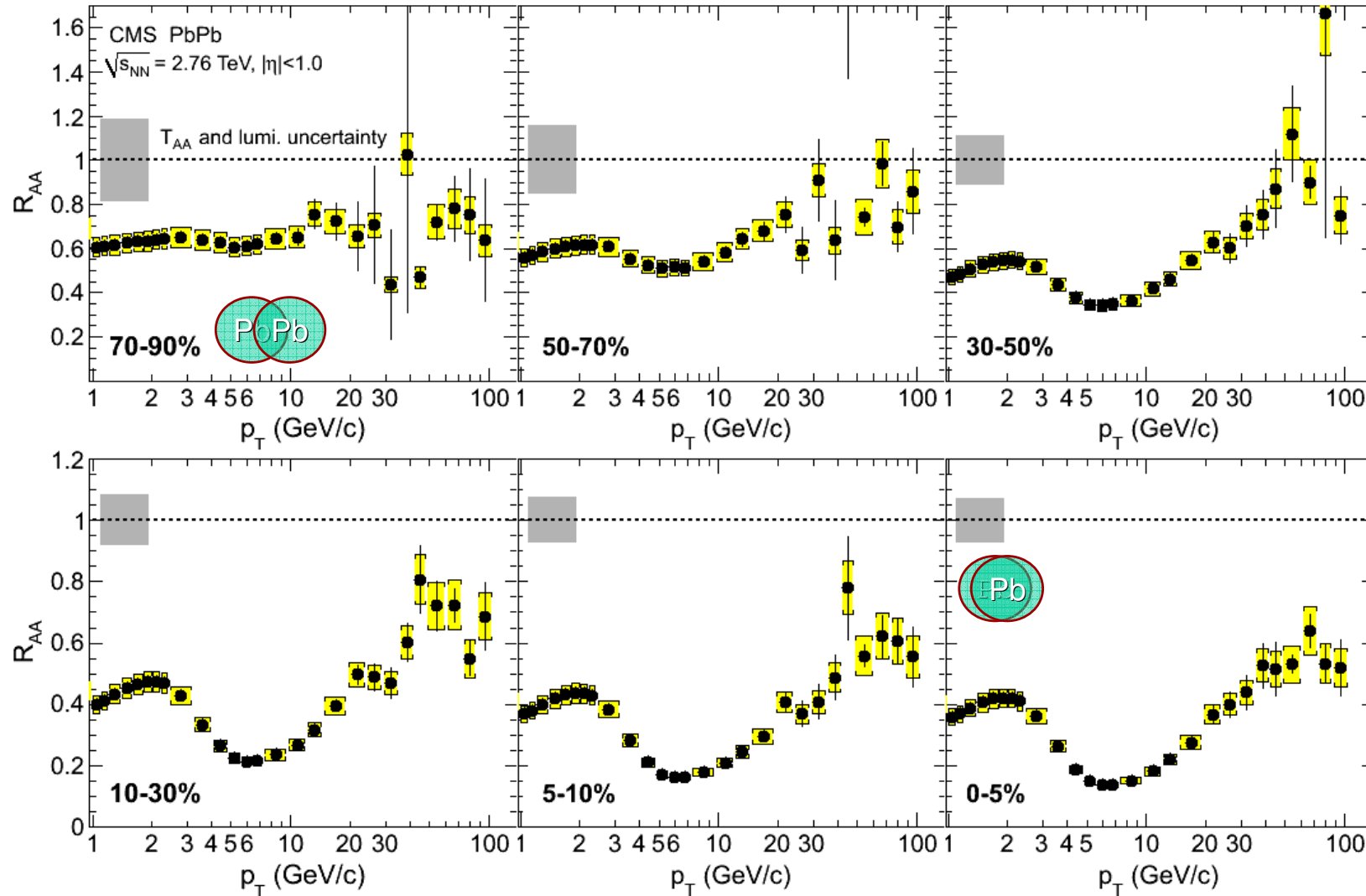


Elyomás: **nincs** szignifikáns  $p_T$ -függés

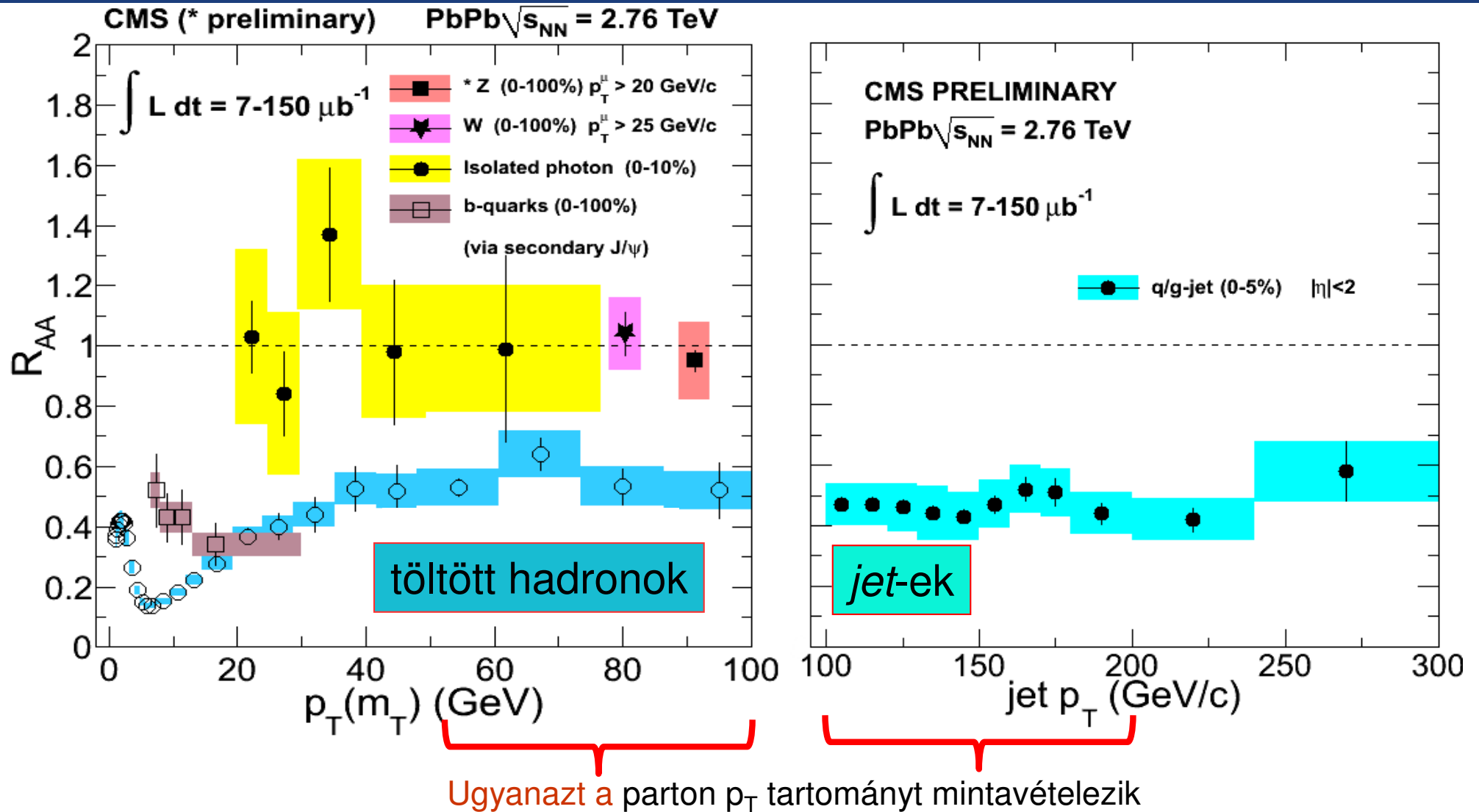




# Töltött hadronok, $R_{AA}$



# Nukleáris módosulási faktorok

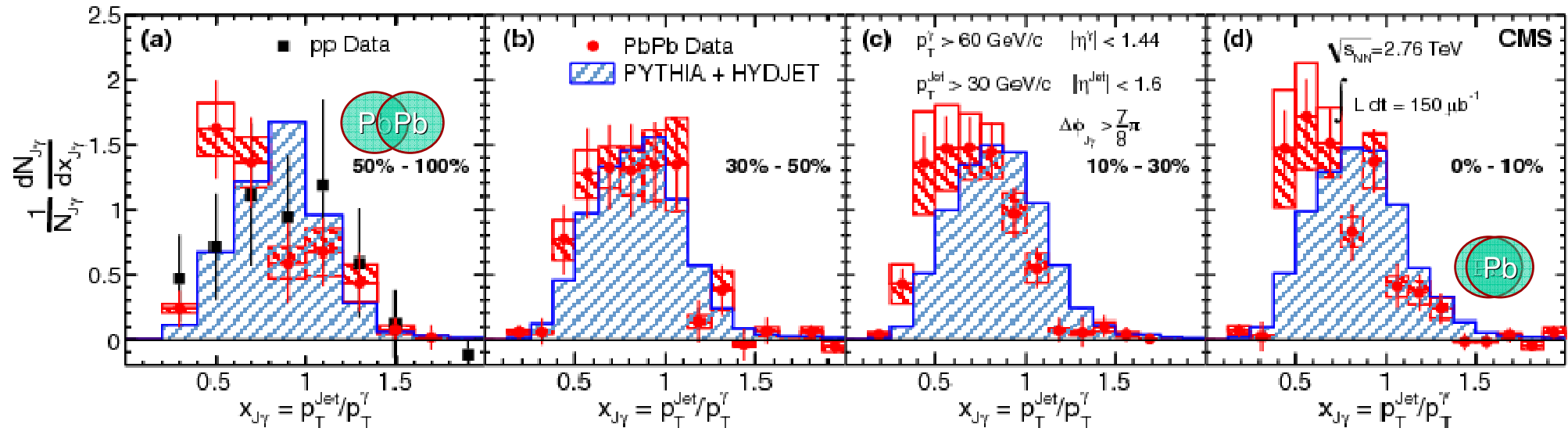


**Megj:** a *jet*-ek p+p és Pb+Pb ütközésekben hasonlóan fragmentálódnak (ld. később)



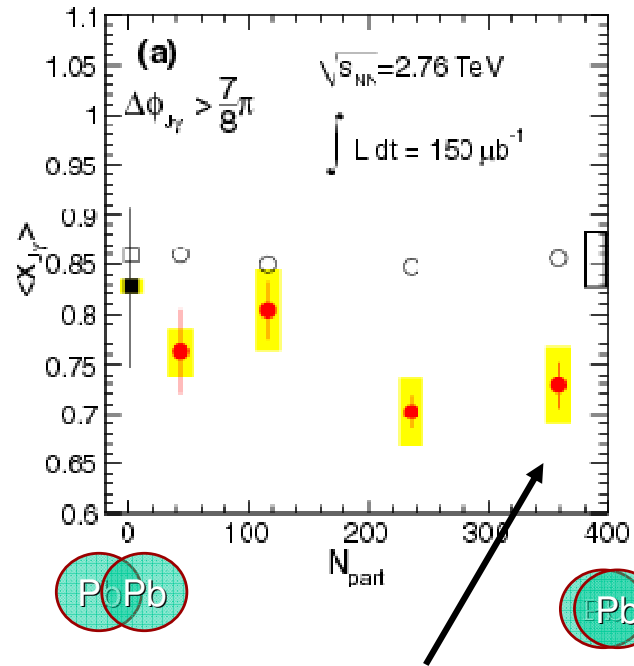
# $\gamma$ -jet korrelációk

- A fotonok **nem módosulnak**, így energiamérést biztosítanak
- A *jet*-ek és fotonok  $p_T$ -aránya ( $x_{J\gamma} = p_T^{\text{jet}}/p_T^\gamma$ ) a *jet* energia-veszteségét közvetlenül méri
- Az  $x_{J\gamma}$  eloszlás fokozatos **centralitásfüggését** tapasztaljuk  $x_{J\gamma}$



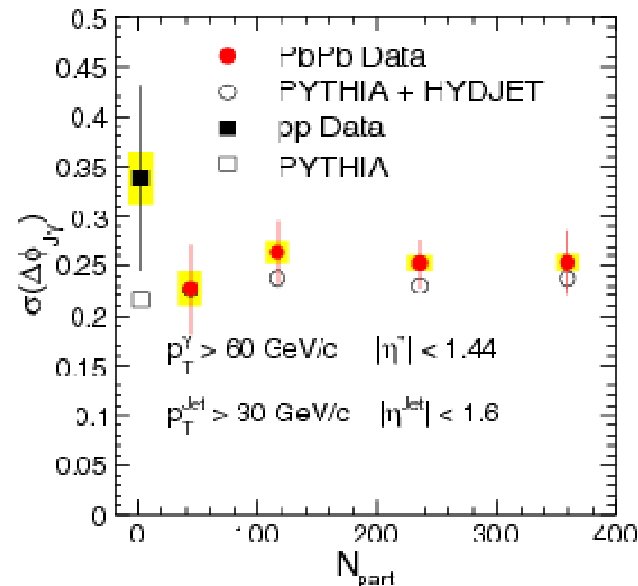
# $\gamma$ -jet korrelációk

$$x_{J\gamma} = p_T^{\text{jet}} / p_T^{\gamma}$$



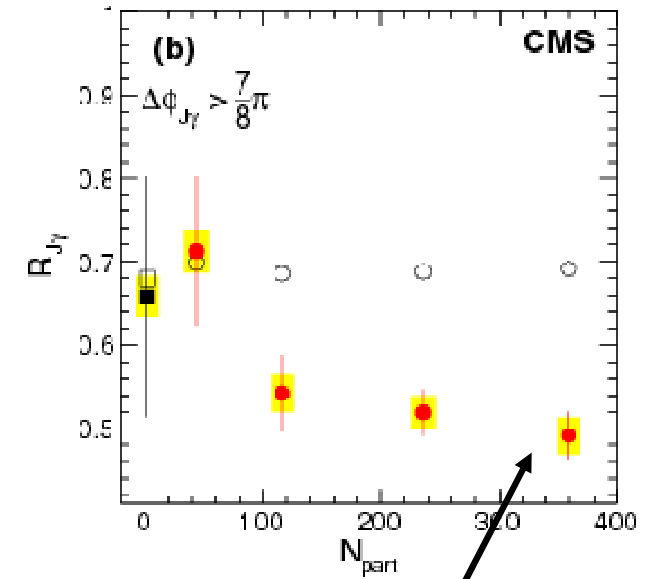
Növekvő  $p_T$ -aszimmetria

A *jet*-ek energiájuk  
~14%-át veszítik el



Nincs  $\phi$ -dekorreláció

$R_{J\gamma}$  = a *jet* partnerrel  
( $>30 \text{ GeV}/c$ ) rendelkező  
fotonok aránya

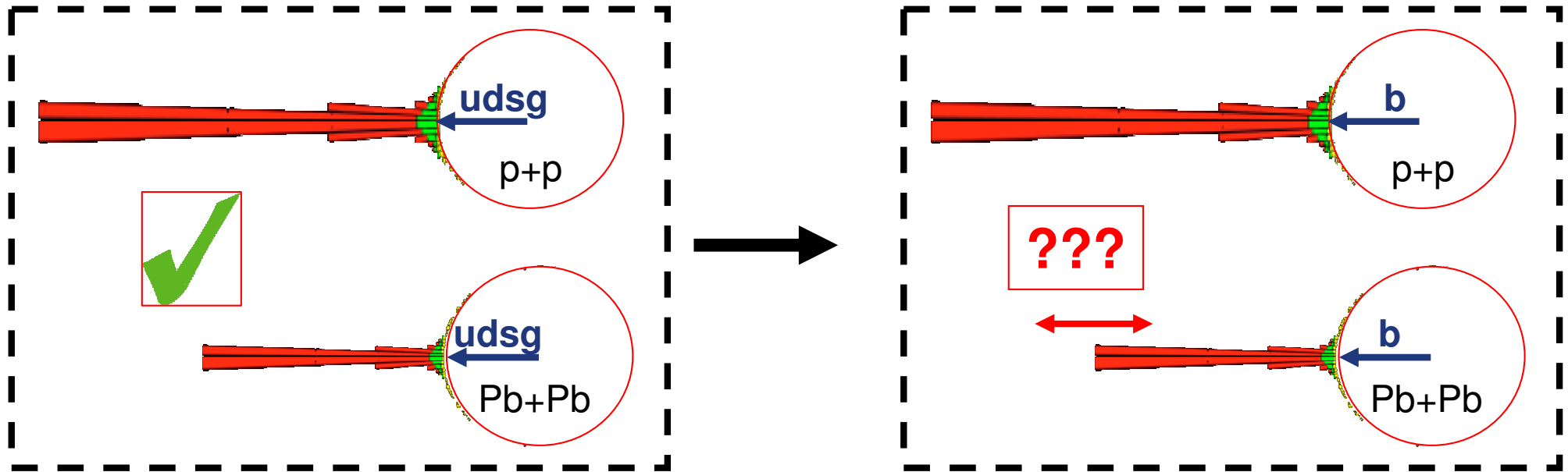


Kevesebb *jet* partner

A fotonok ~20%-a  
elveszti a *jet* partnerét

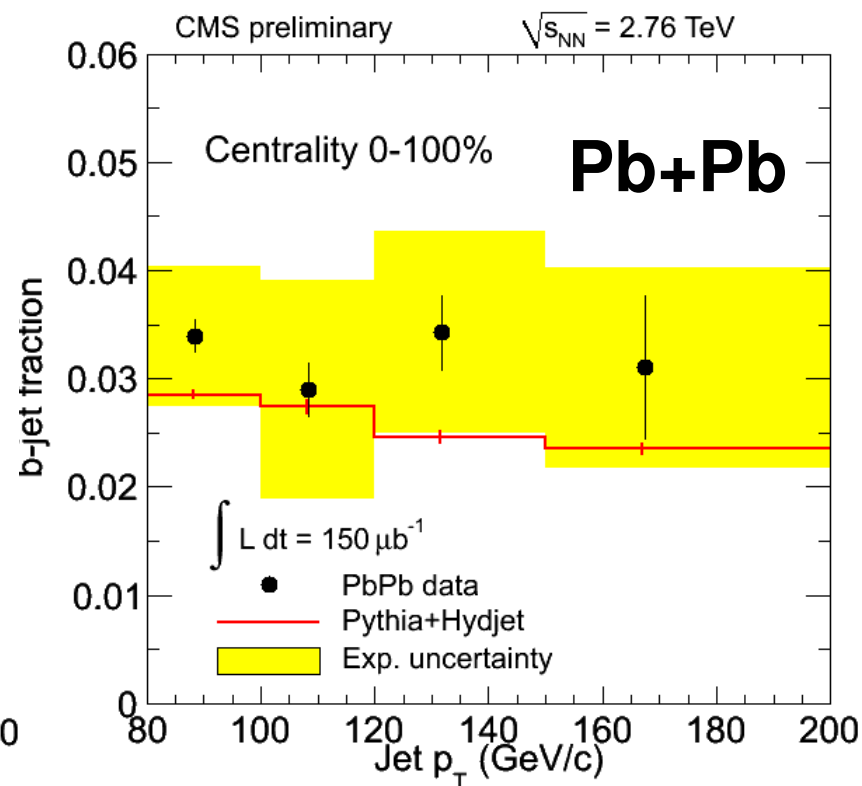
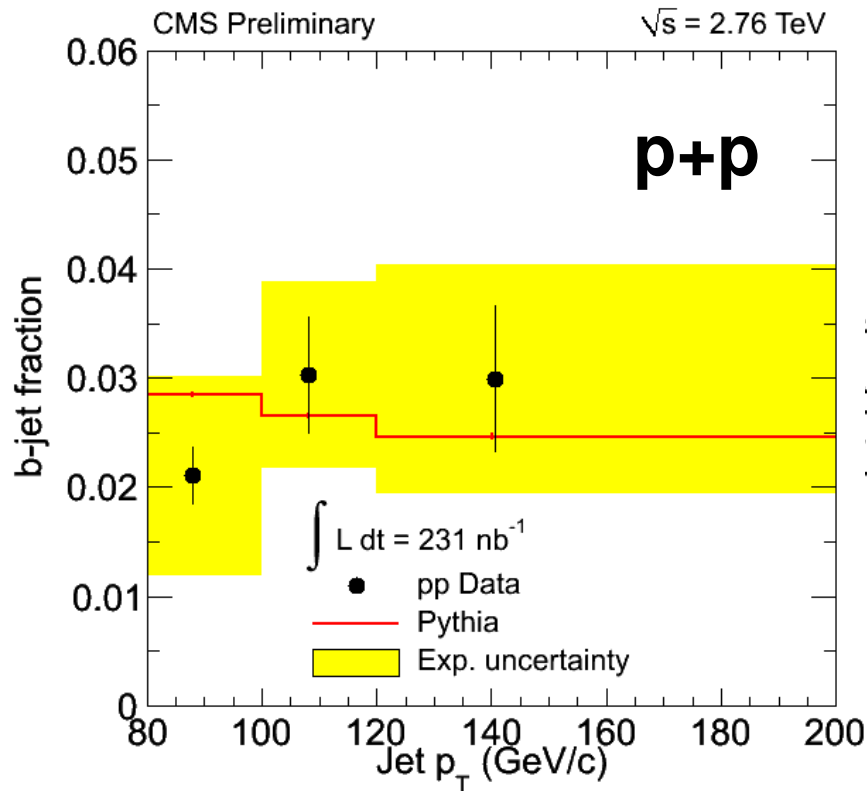


# A nehéz kvark-*jetek* is vesztenek energiát?



# A *b-jetek* aránya az összes *jet*hez képest

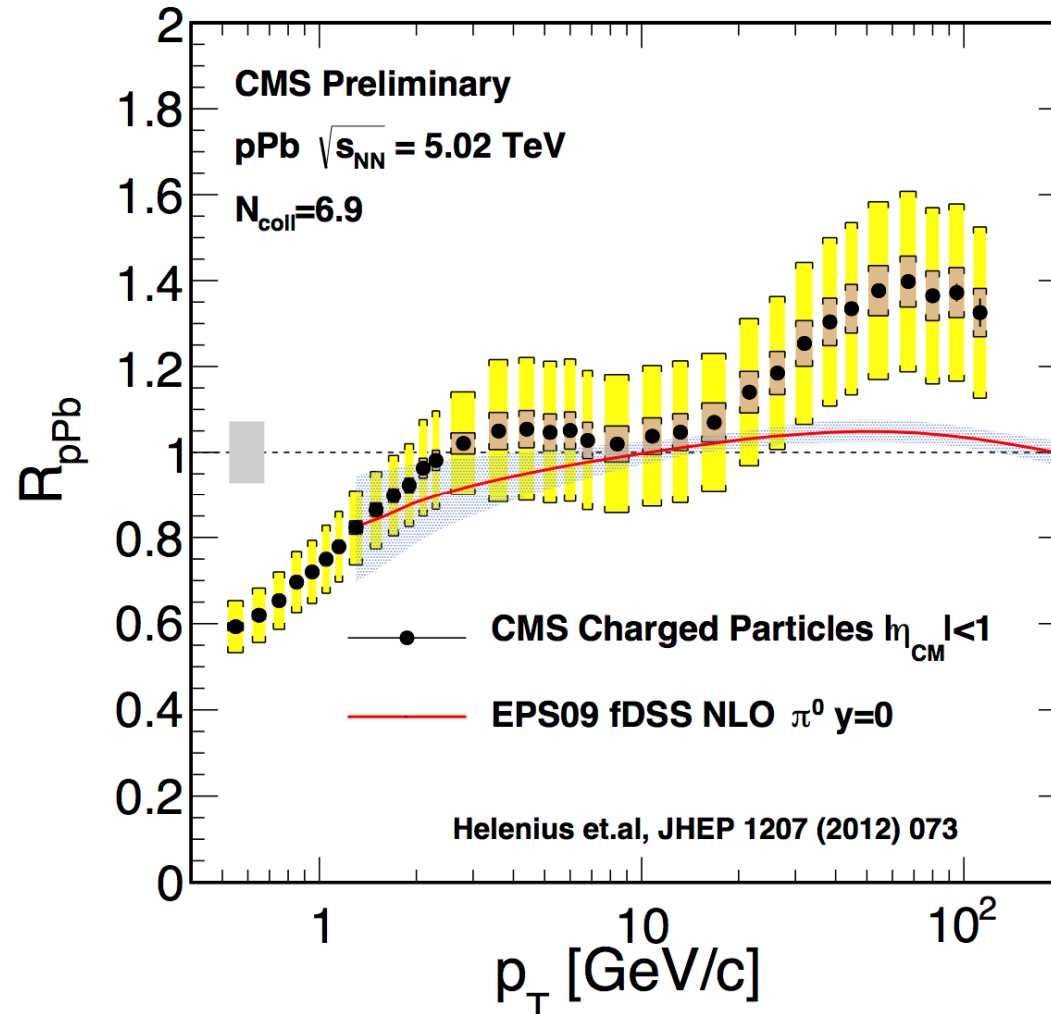
*b-jet* részarány: **hasonló érték** p+p és Pb+Pb ütközésekben  
→ *b-jet* energiaveszteség tehát **hasonló** a könnyű kvarkok energiaveszteségéhez ( $R_{AA} \approx 0.5$ ), egyelőre nagy szisztematikus hibával.



CMS PAS HIN-12-003



# Újabb meglepetés p+Pb ütközésekben



Nagy  $p_T$ : több részecske keletkezett,  
mint amit a proton-proton ütközésekből várunk.  
Semmilyen modell nem reprodukálja.

