

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

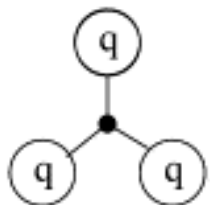
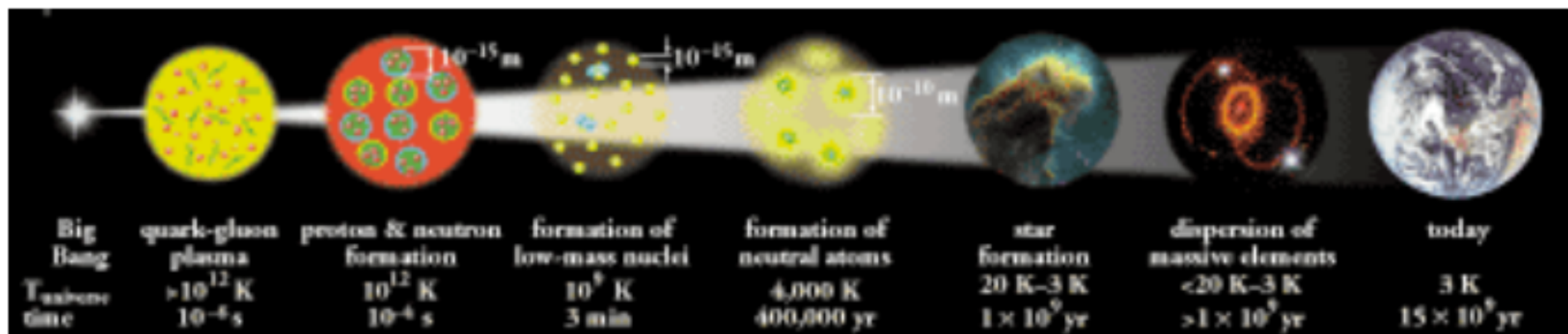
Veres Gábor
(ELTE TTK Fizikai Intézet)

**Hungarian Teachers Programme
Magyar Fizikatanári Program**
CERN, 2023. augusztus 24.



Miért kutatunk nehézionokat?

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



barionok



mezonok

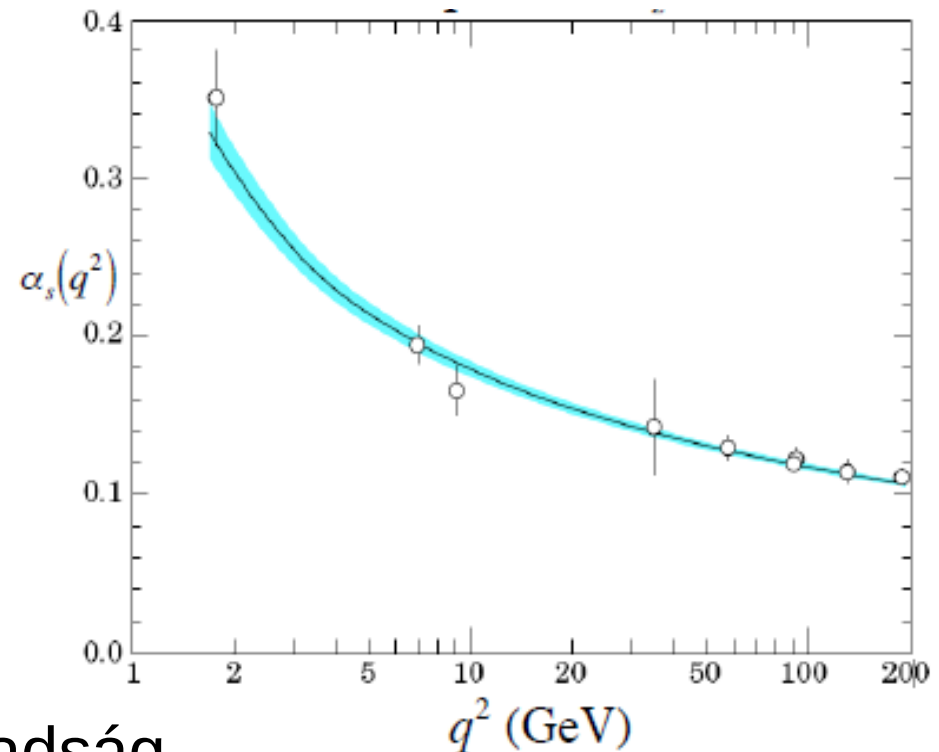
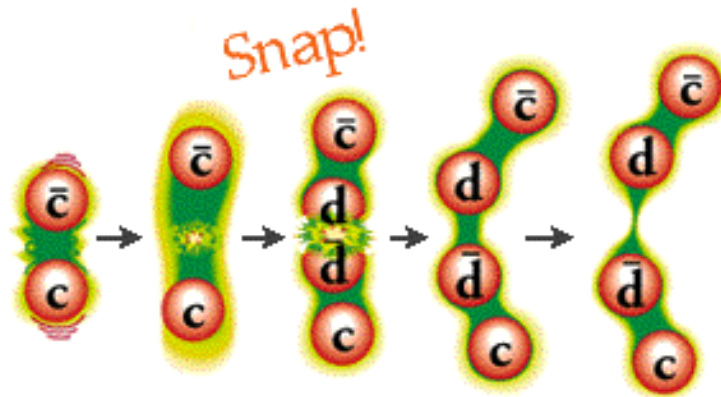
Erős kölcsönhatás közvetítője: gluon

QCD: kvantum-színdinamika



QCD

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



Nagy impulzusok:
aszimptotikus szabadság

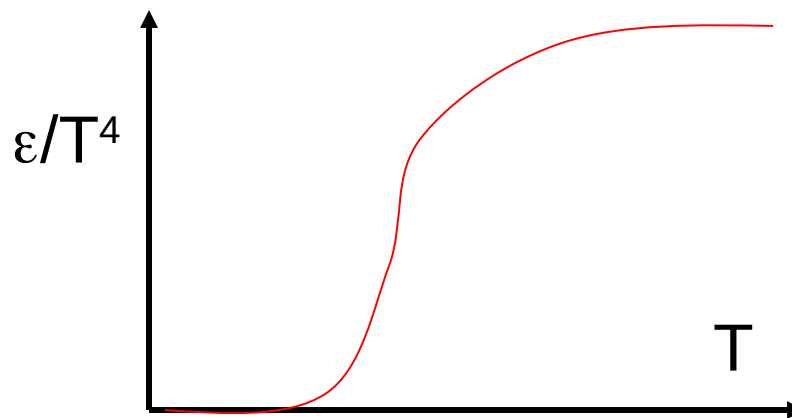
Nagy távolságok:
nagyon erős, kvarkbezárás

Színes húrok...

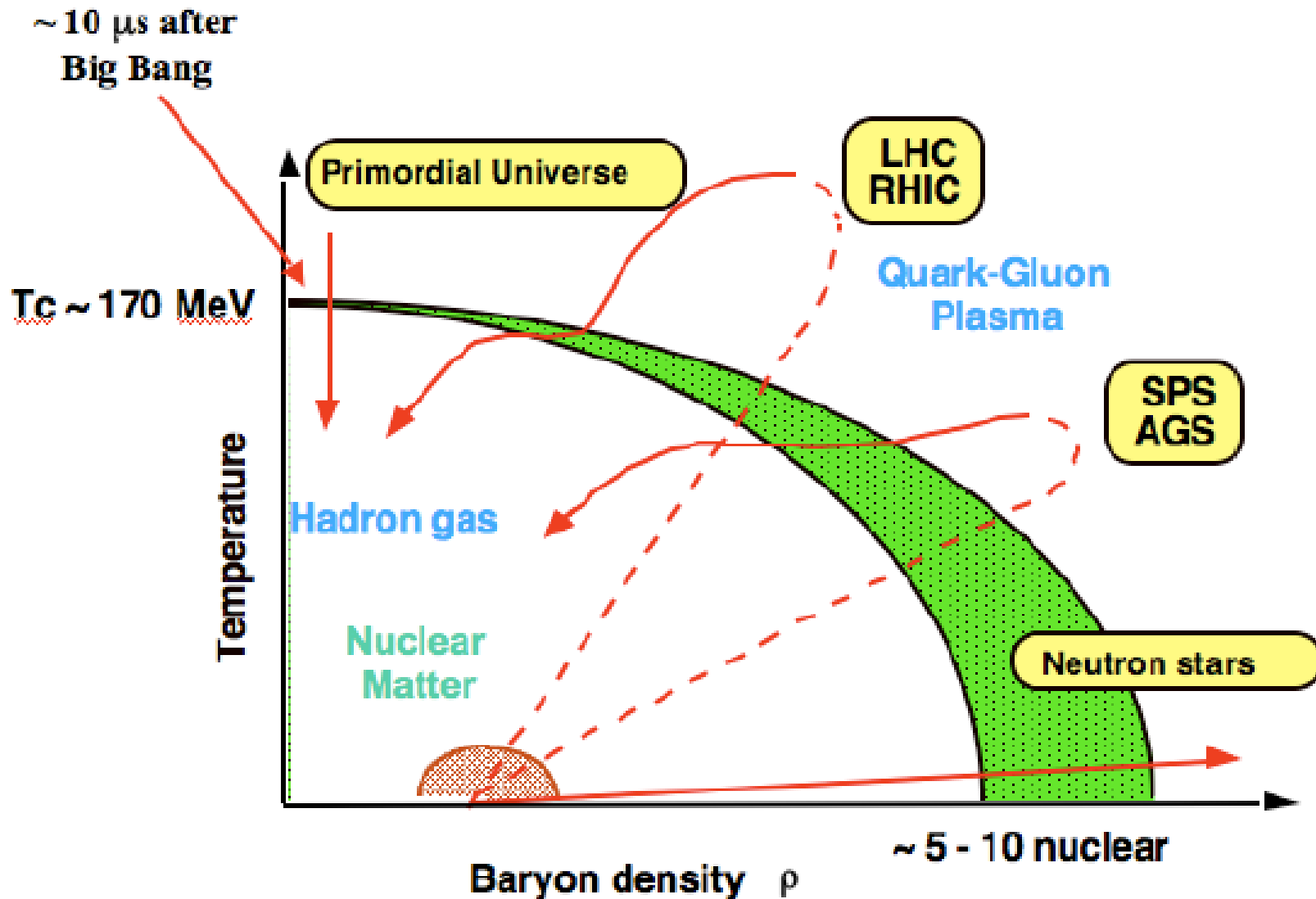


Kvark-gluon plazma

- 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

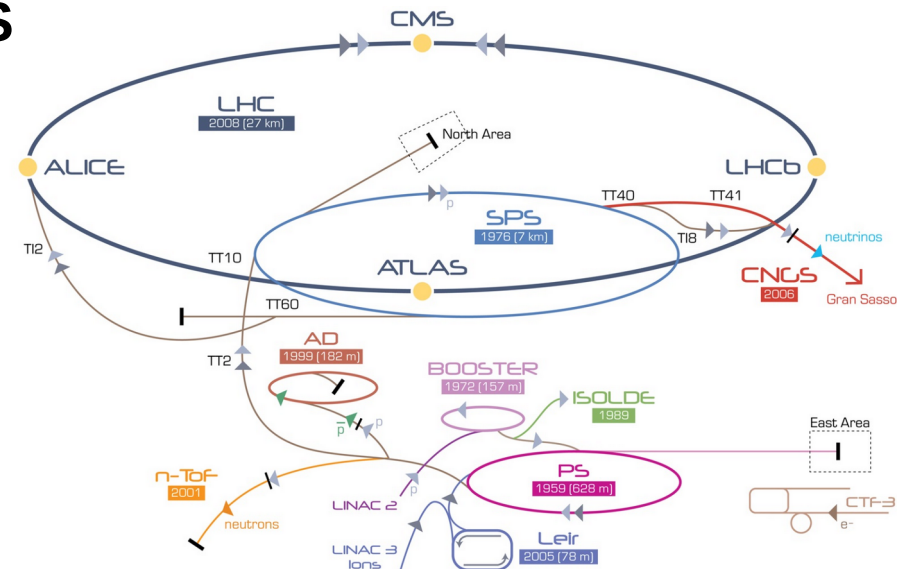


Fázisdiagram: erősen kölcsönható anyag

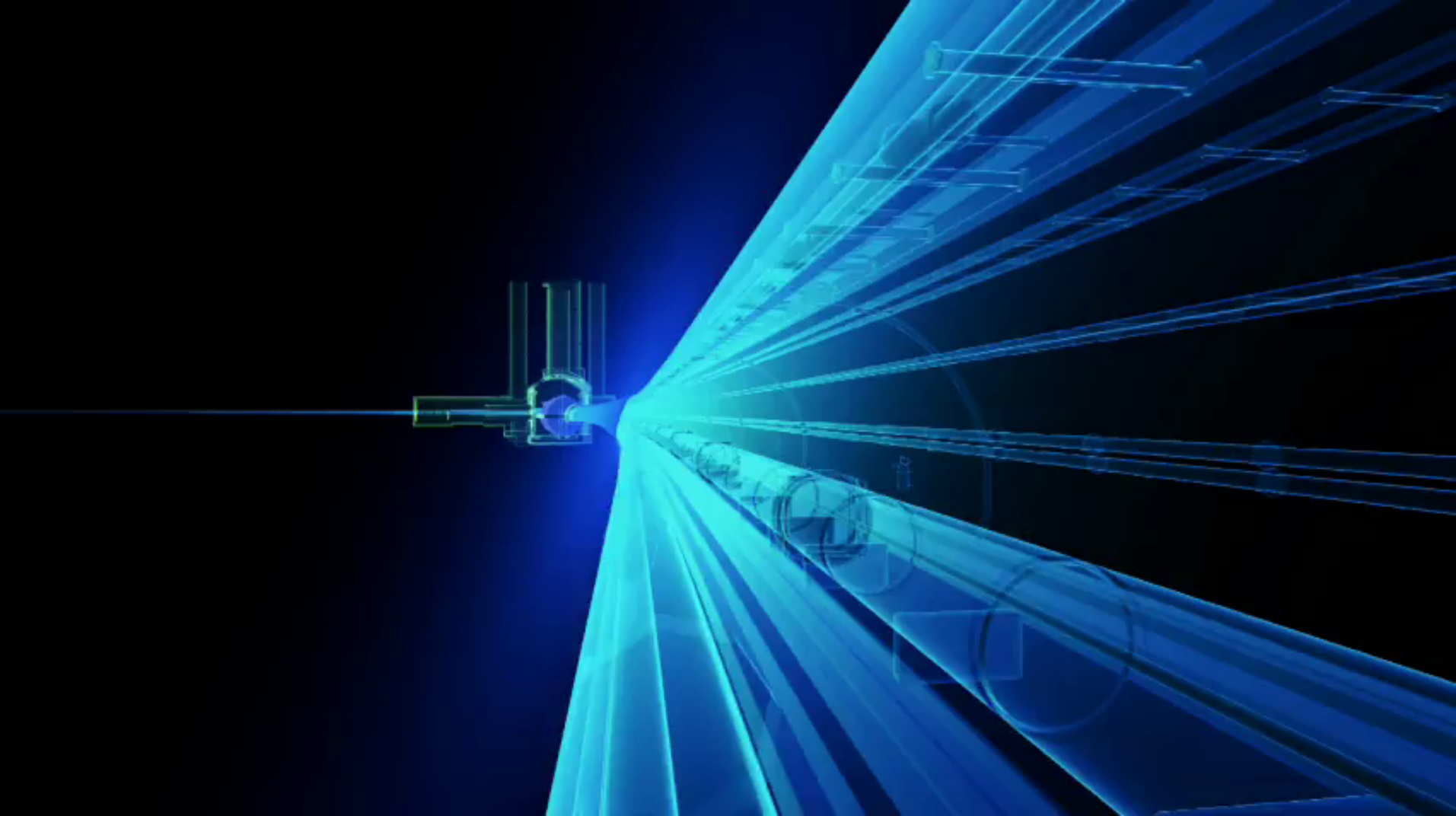


Nehézion-ütközések - laboratóriumok

- 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**



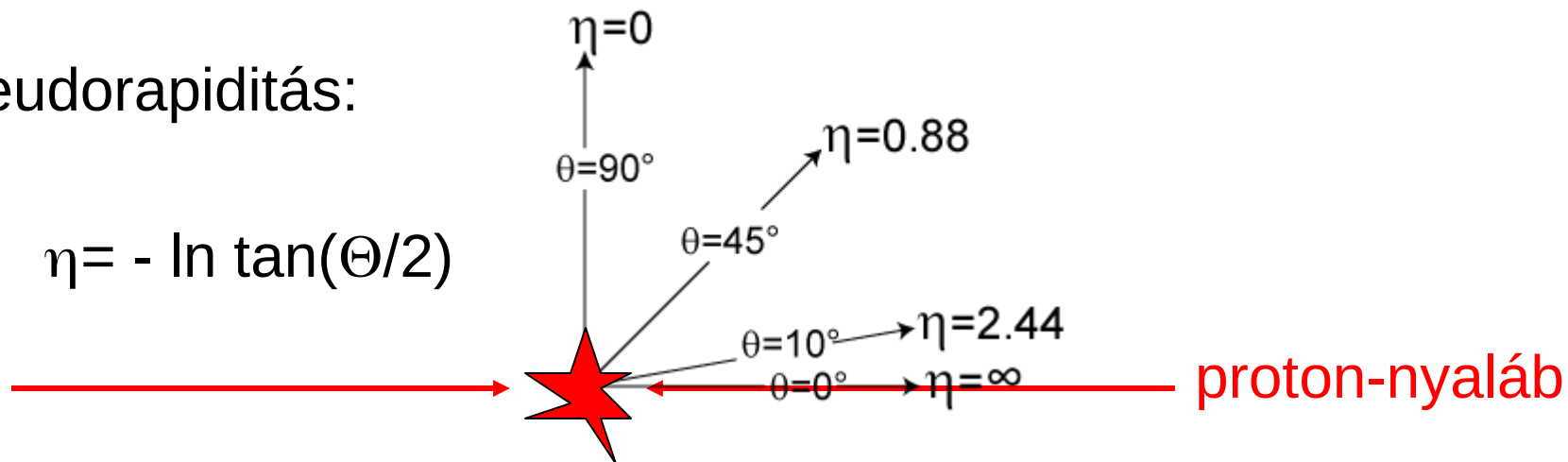
Nehézion-ütközés laboratóriumban



Milyen változókat használunk?

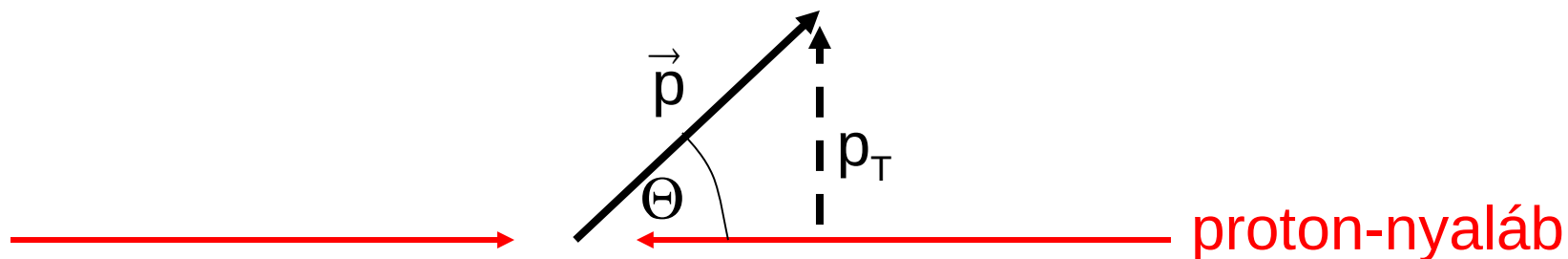
Pseudorapiditás:

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



Transzverzális impulzus: p_T

Henger-koordináták:
azimutszög: φ

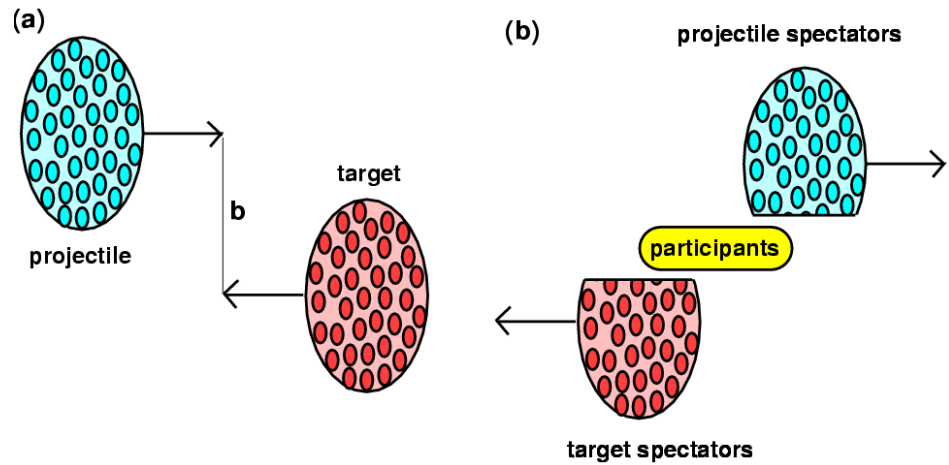
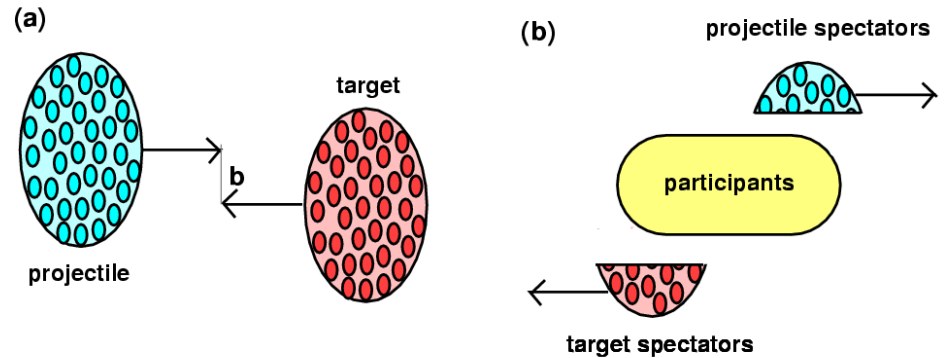


Centralitás

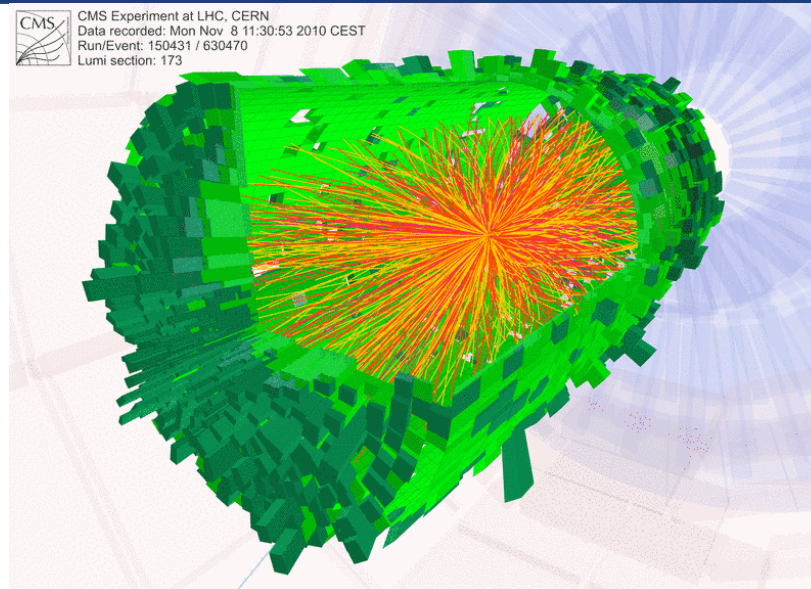
N_{part} : résztvevő
nukleonok száma

N_{coll} : páronkénti
nukleon-nukleon
ütközések száma

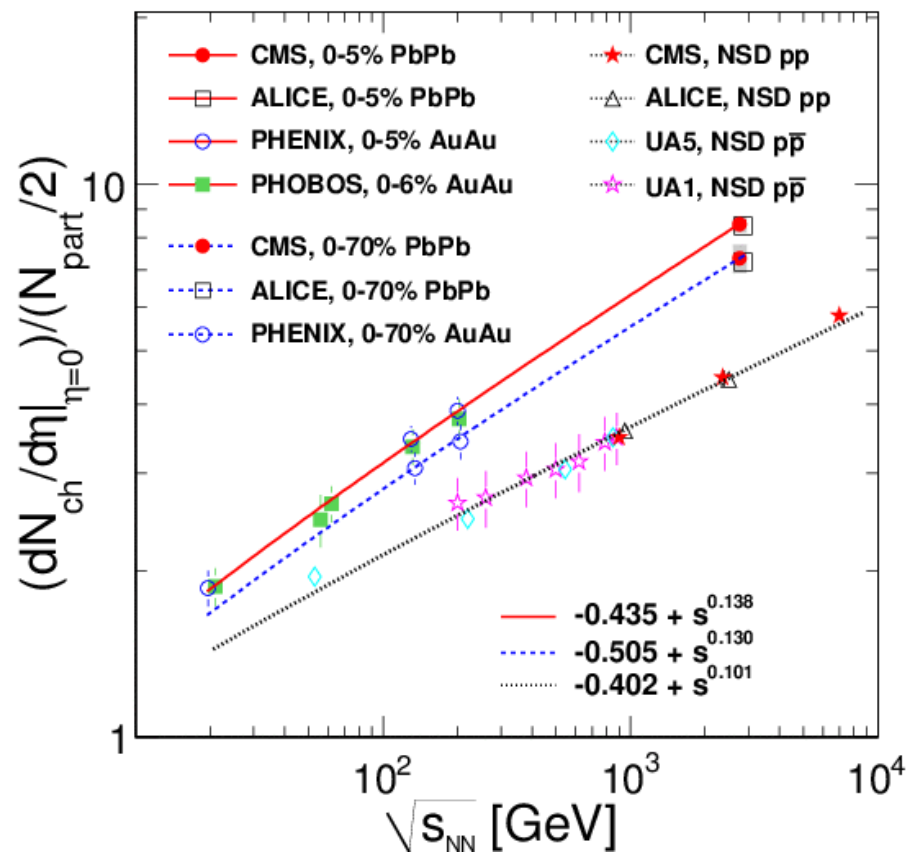
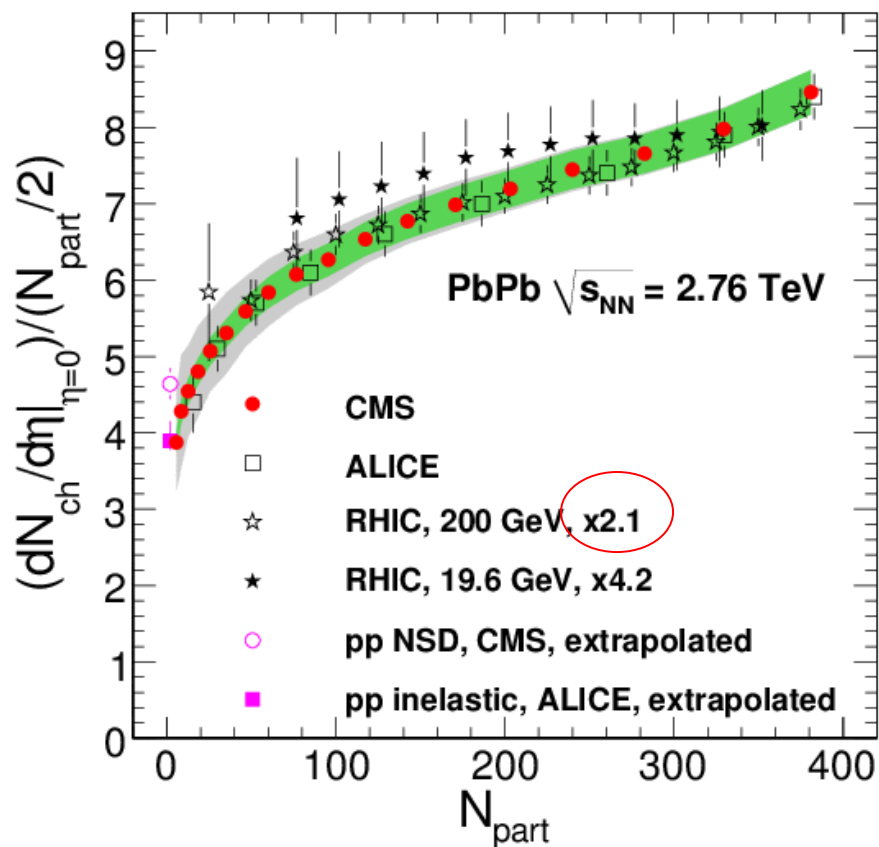
Gyakran a teljes
hatáskeresztszmet
százalékában adjuk meg



A nehézion-ütközések globális jellemzői



Töltött részecskék száma



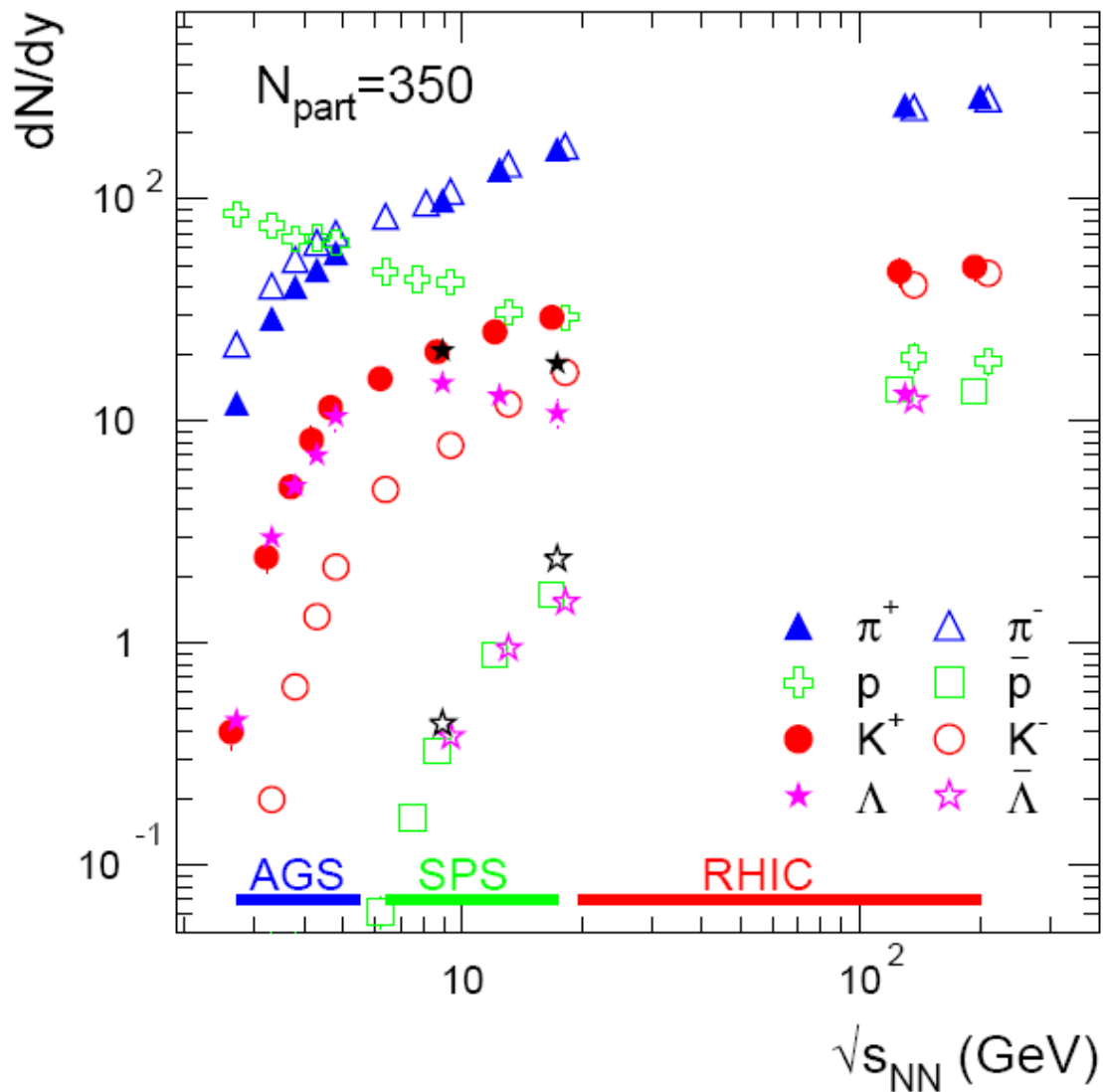
- Centralitás-függés:
 - Hasonló a RHIC eredményeihez

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

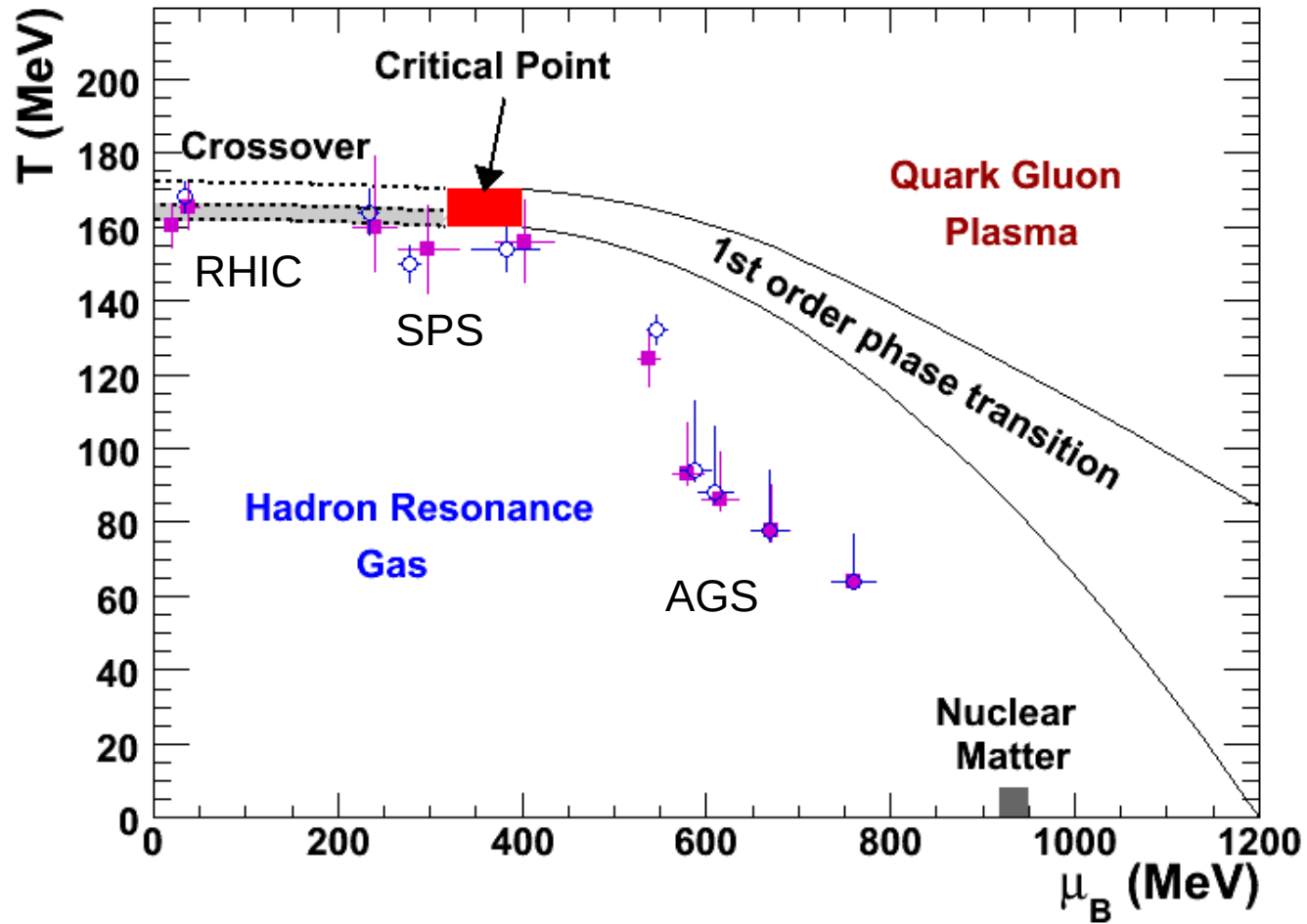
Energiasűrűség becsülhető, kb. 15 GeV/fm³!



„Kémiai” összetétel



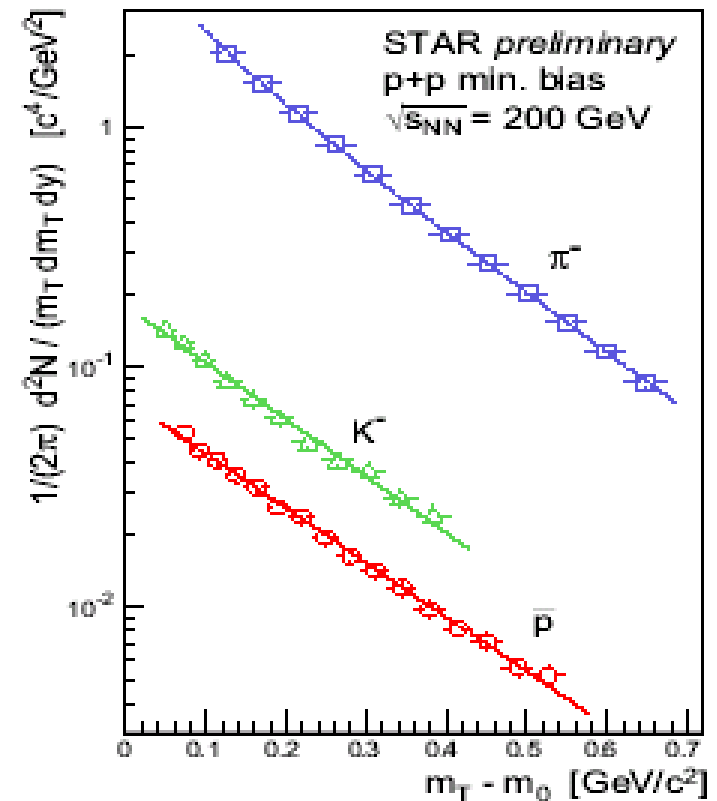
Fázisdiagram



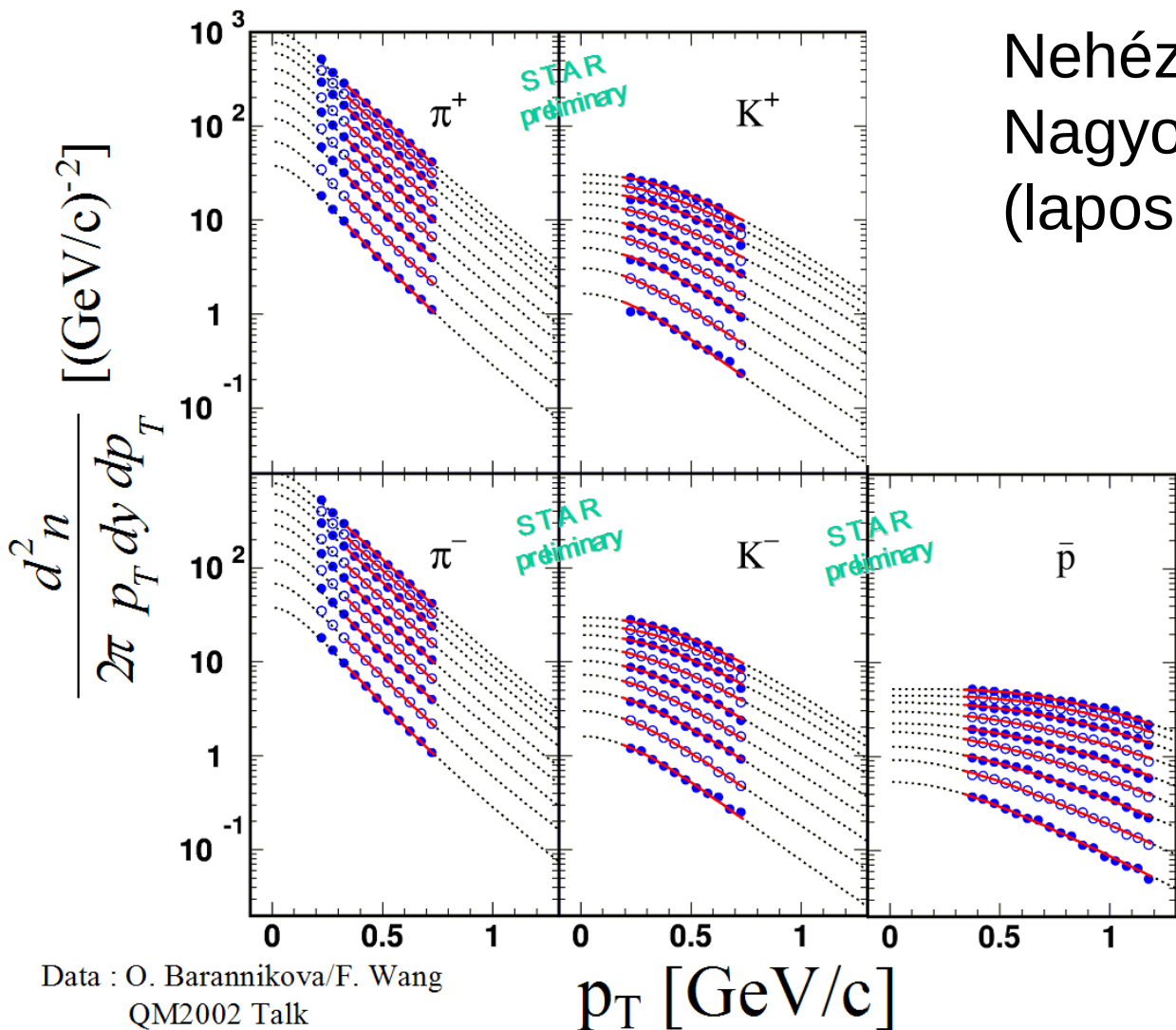
Hőmérséklet

- 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



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

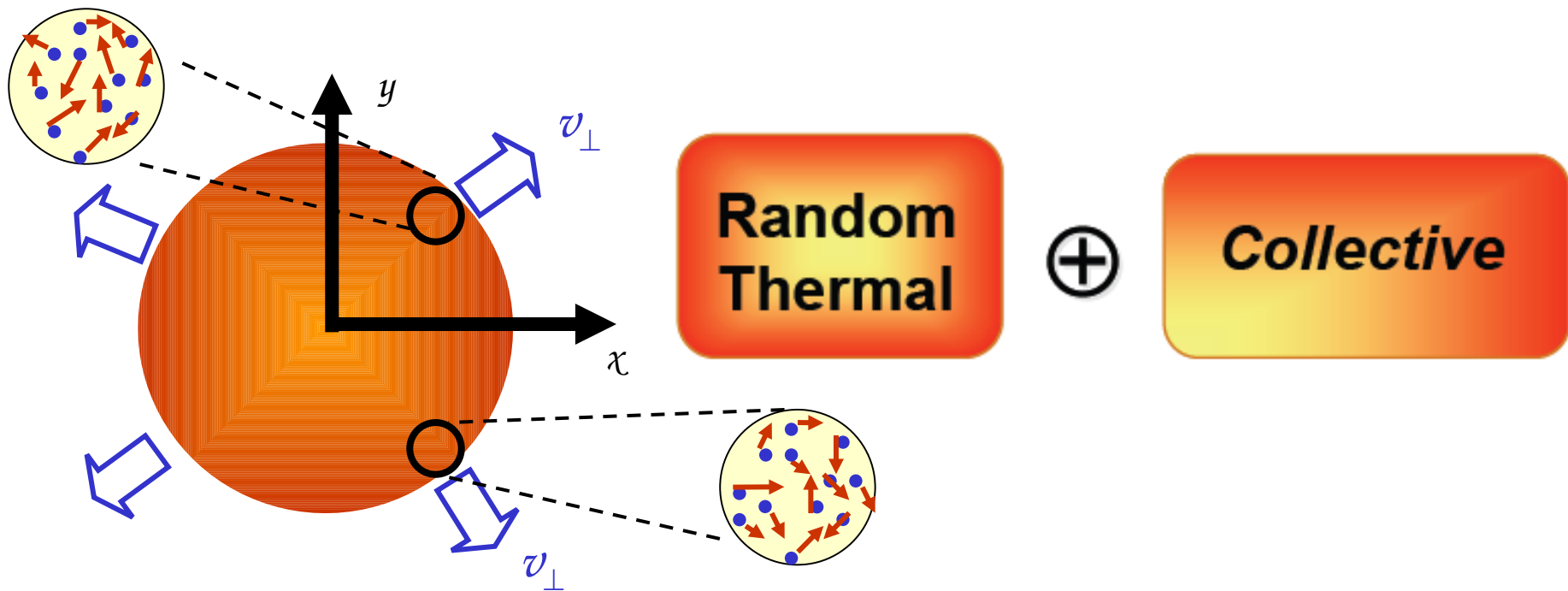
$$T_{slope} = T_{fo} + \frac{1}{2} m v_{\perp}^2$$

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

Data : O. Baramnikova/F. Wang
 QM2002 Talk



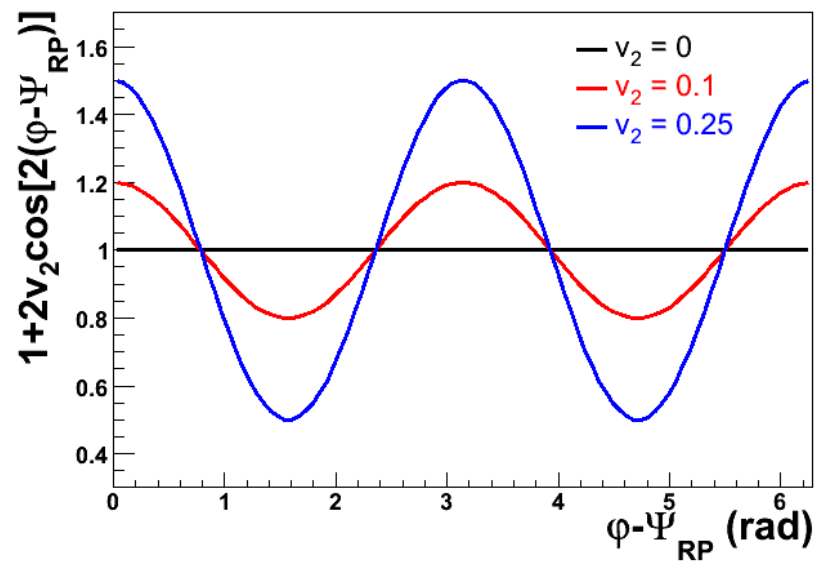
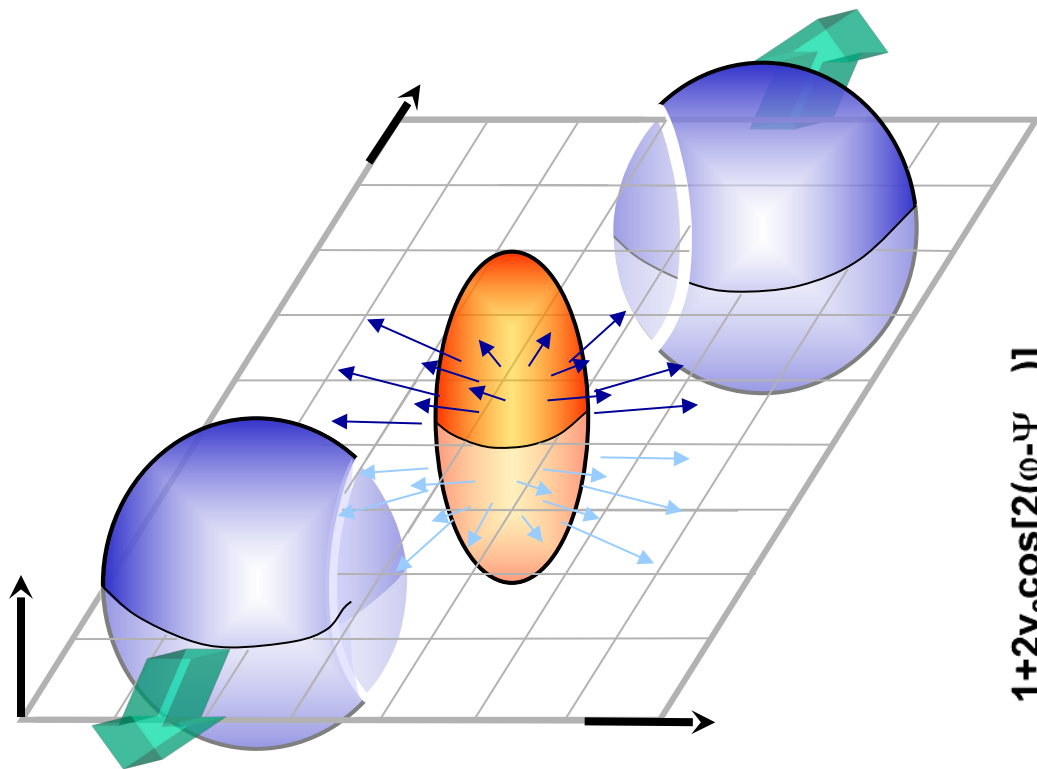
Értelmezés



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)



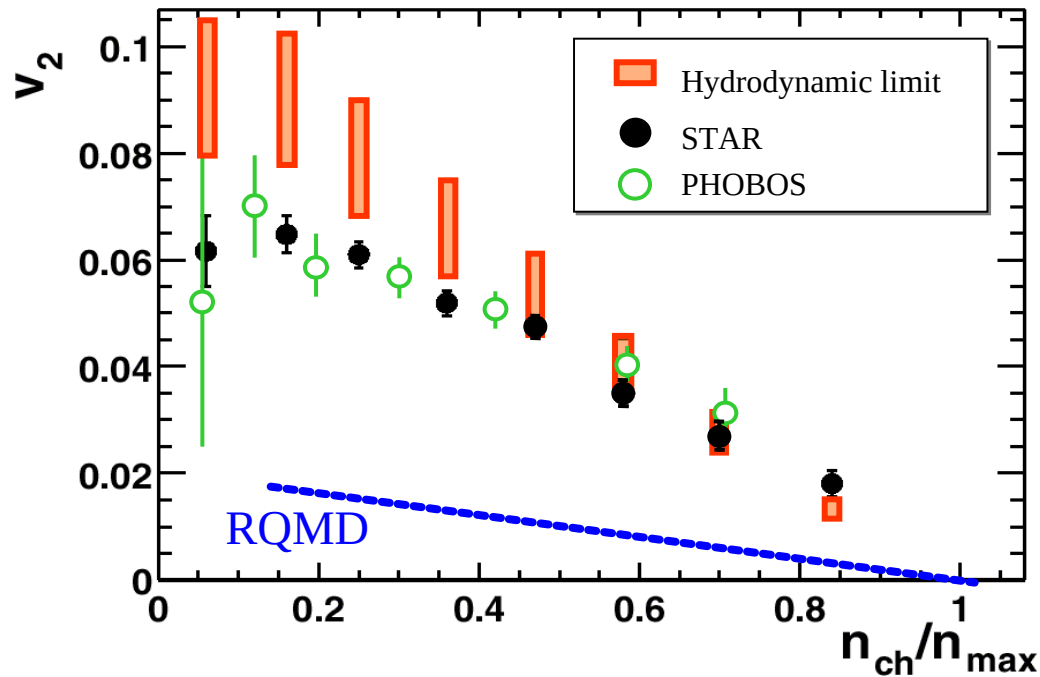
Elliptikus folyás



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



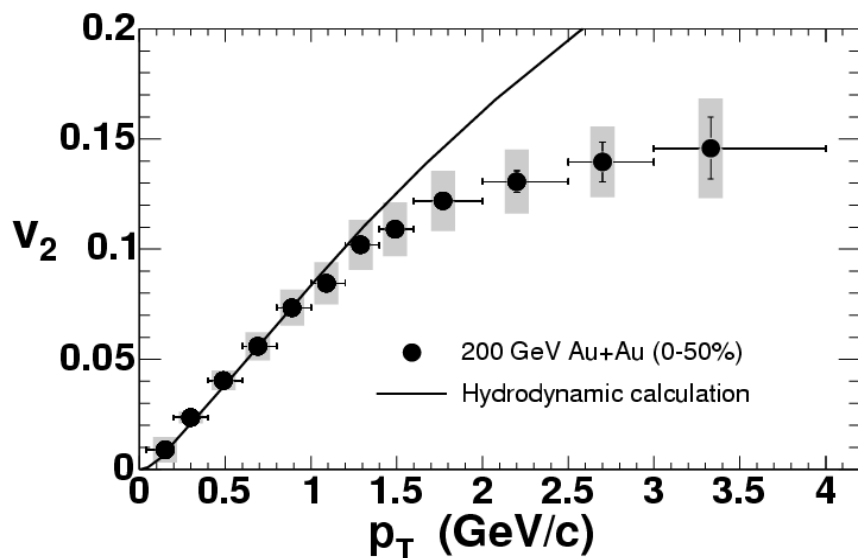
Hidrodinamikai értelmezés



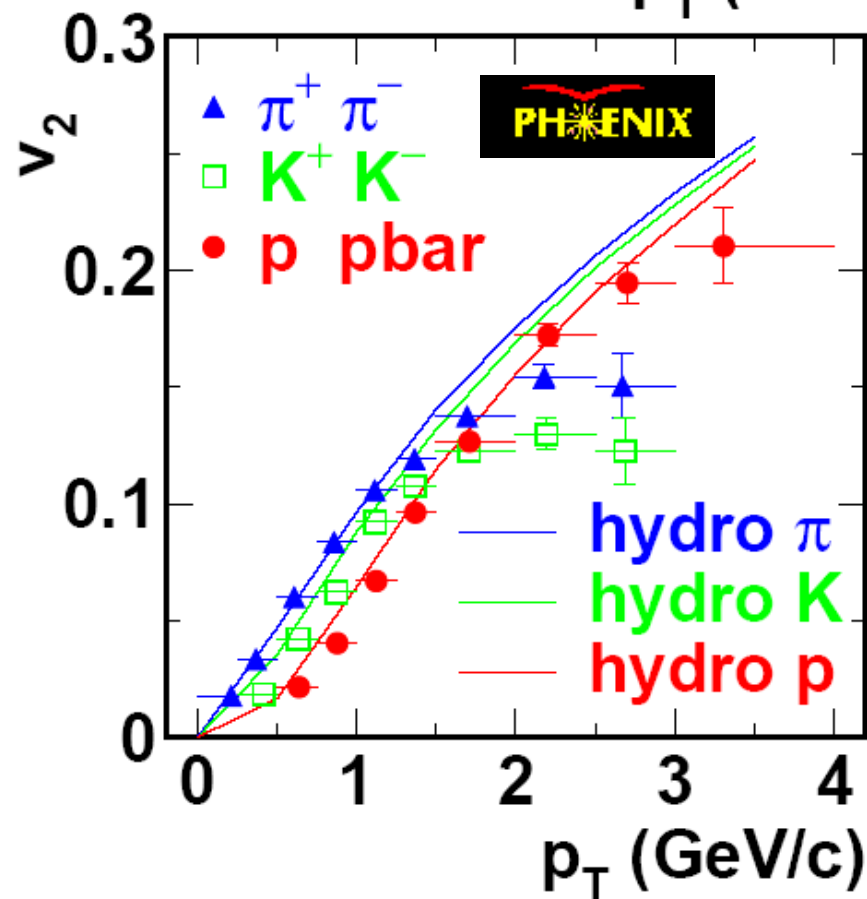
Centrális ütközések: gyors termalizáció, tökéletes folyadék
Periférikus ütközések: nem teljes termalizáció
Hadronikus modell nem tudja leírni (RQMD)



Elliptikus folyás



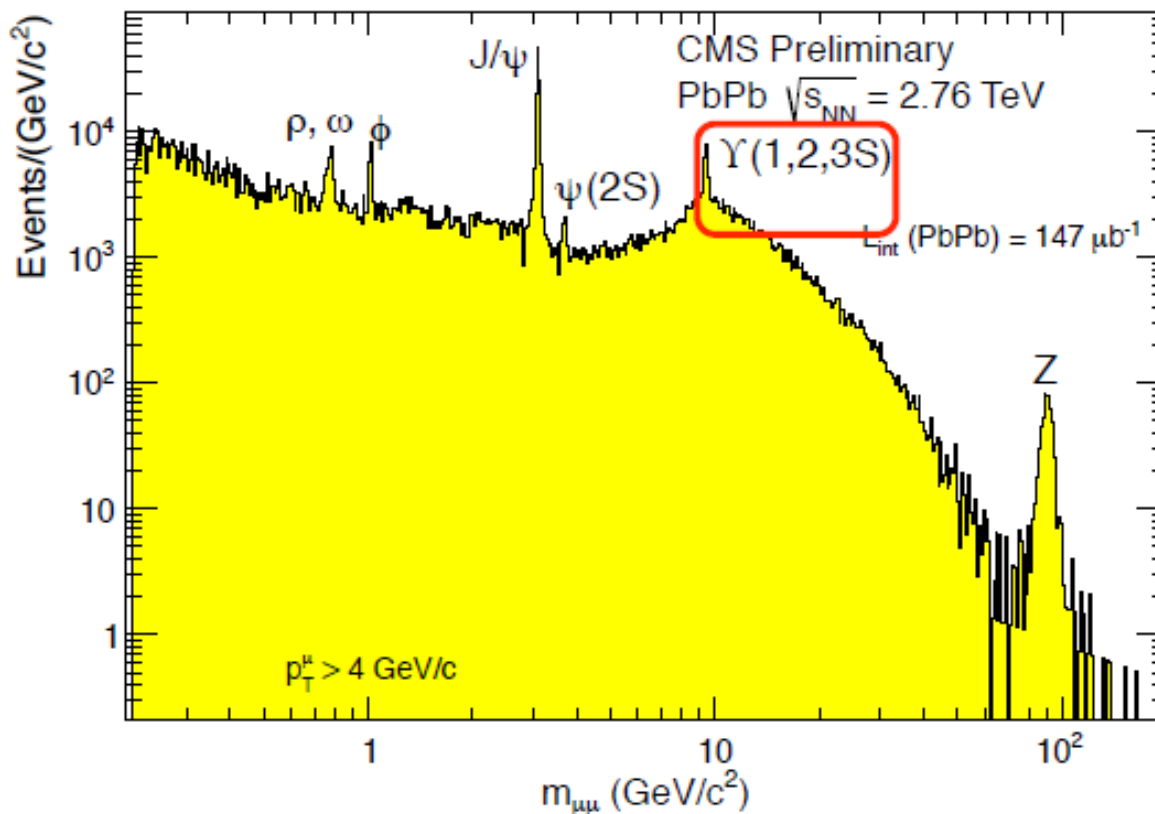
Nagy p_T : a részecskék gyorsan kiszöknek, nincs termalizáció



A hidrodinamikai modellek jól leírják a tömegfüggést is



Dileptonok



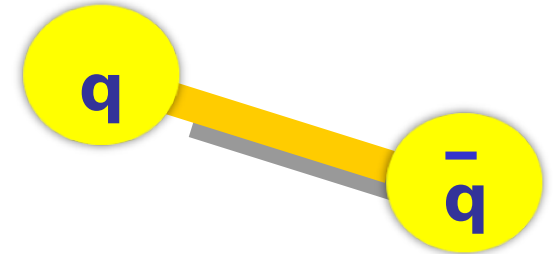
Az ütközés korai szakasza
Nem hatnak erősen kölcsön



Kvarkónium: szín-árnyékolás

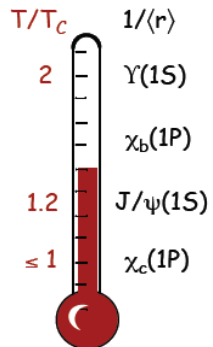
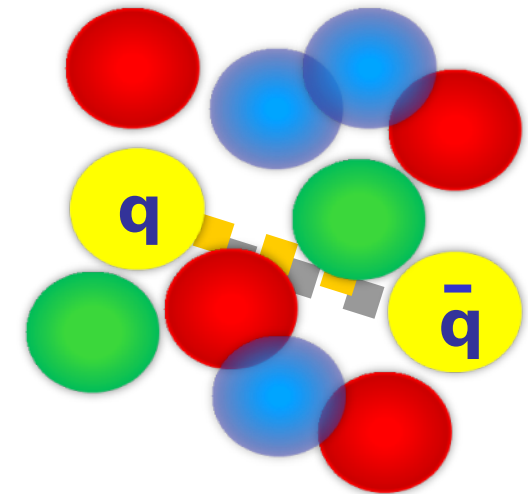
Vákuum:

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



QGP:

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



λ_D : a kötött állapot maximális mérete,
Hőmérséklet növelésével csökken
(de: regeneráció)



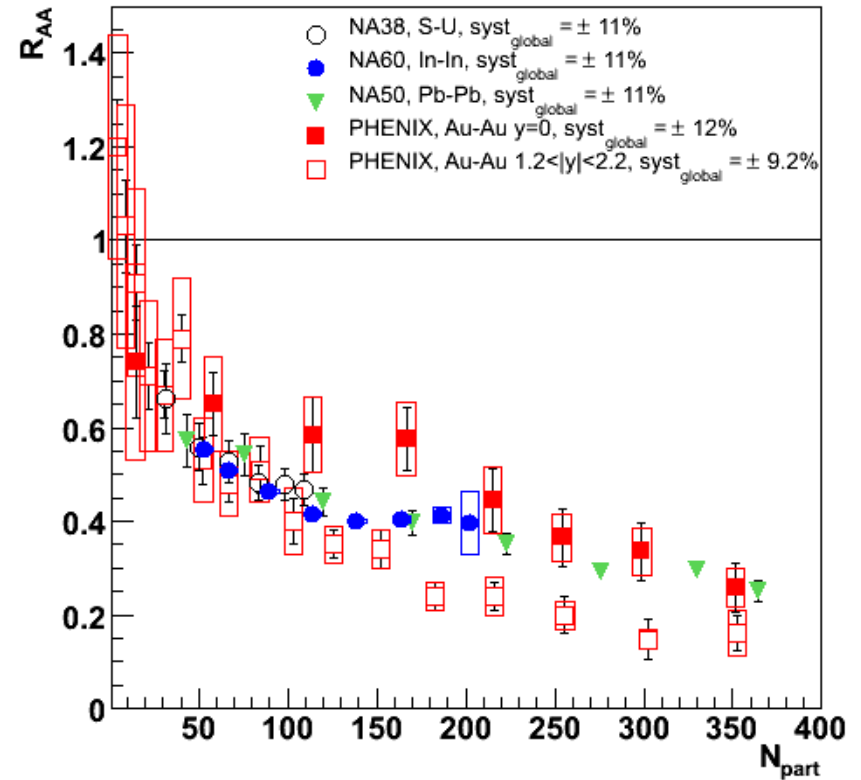
Elnyomás mérése

- Összehasonlítás p+p ütközésekkel:

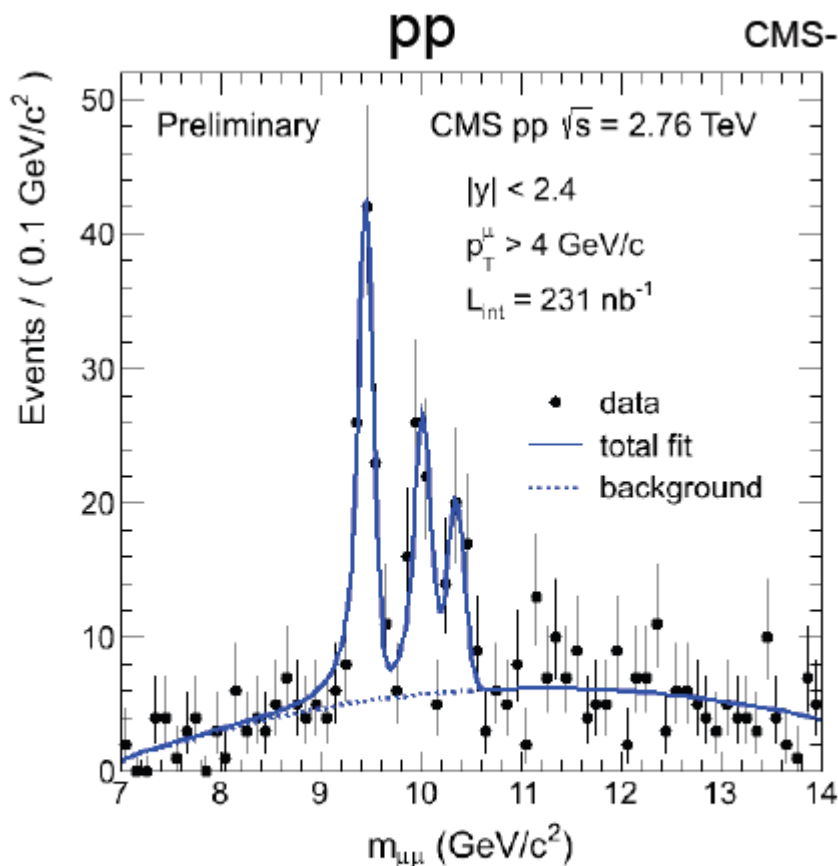
$$R_{AA} = \frac{dN_{AA}^p}{\langle N_{coll} \rangle dN_{NN}^p}$$

Ha nincs módosulás,
akkor $R_{AA}=1$

SPS \approx RHIC...
rekombináció?

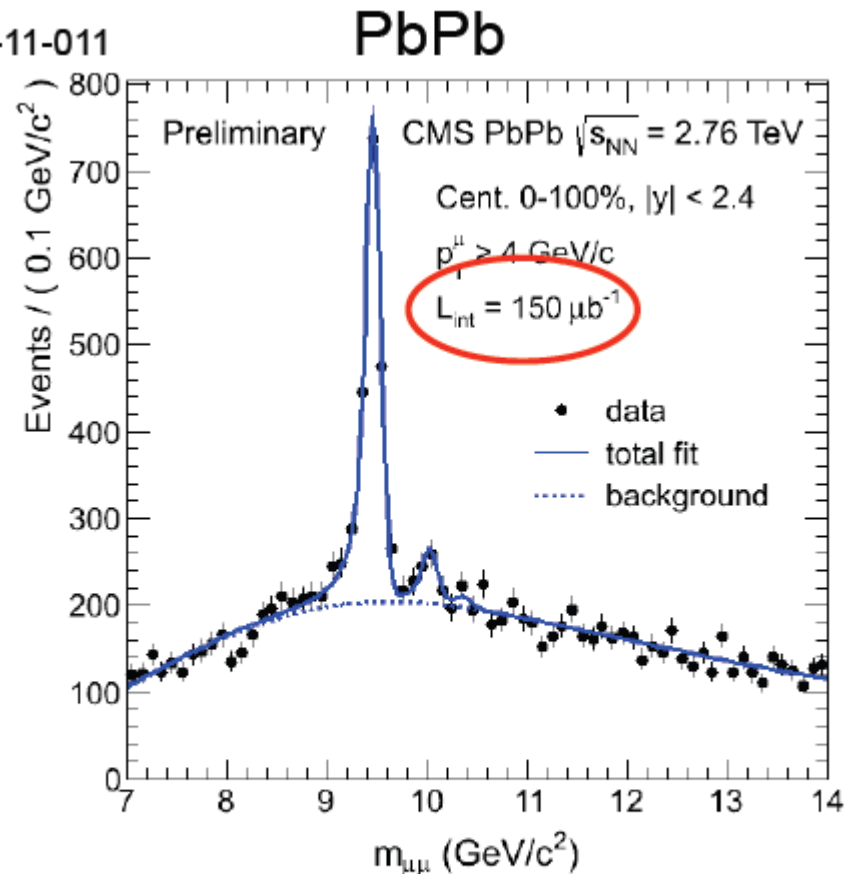


Υ elnyomás



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

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

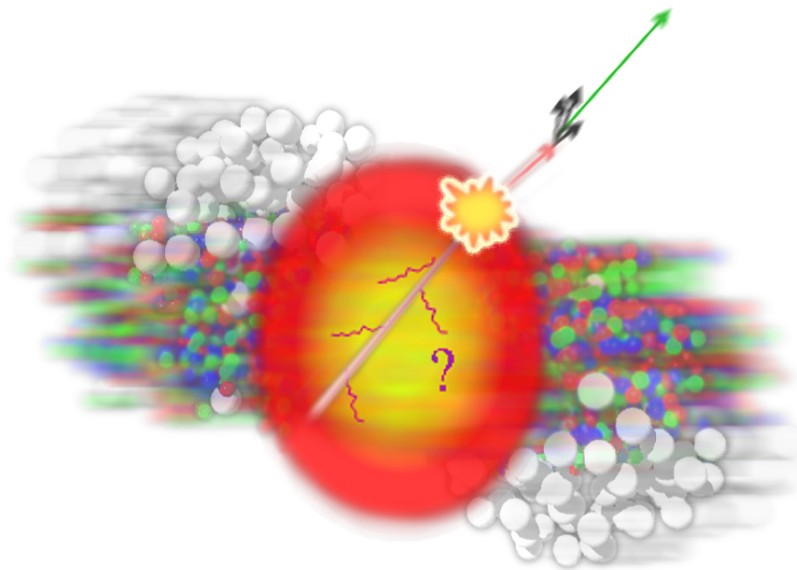


$$N_{R(2S)}/N_{R(1S)}|_{PbPb} = 0.12 \pm 0.03 \pm 0.01$$

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

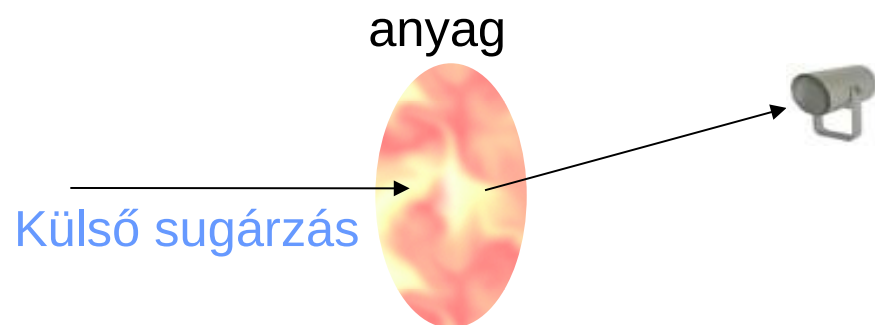
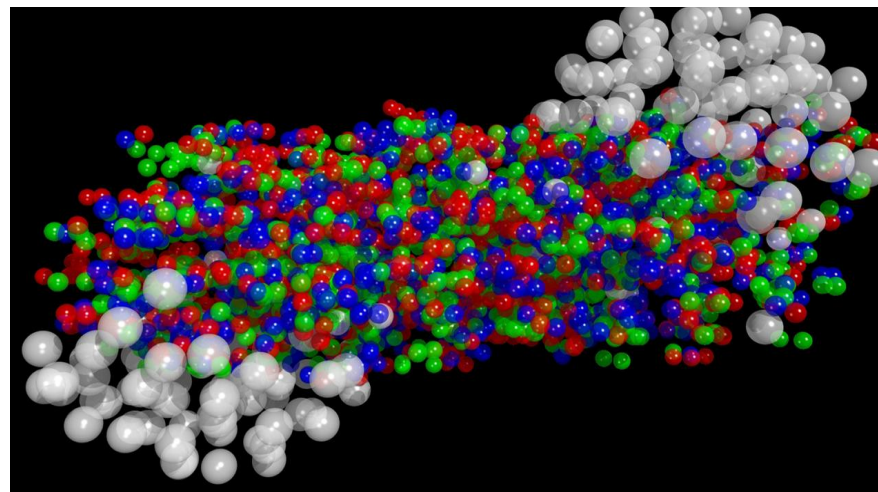


Kemény szórások felhasználása



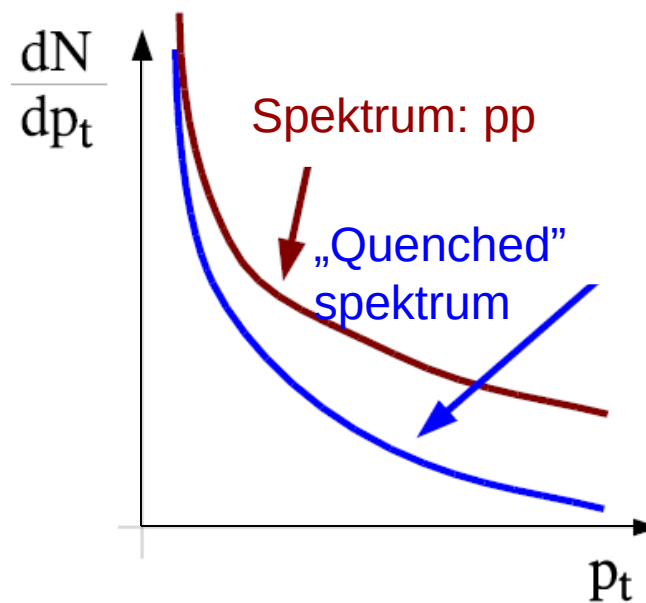
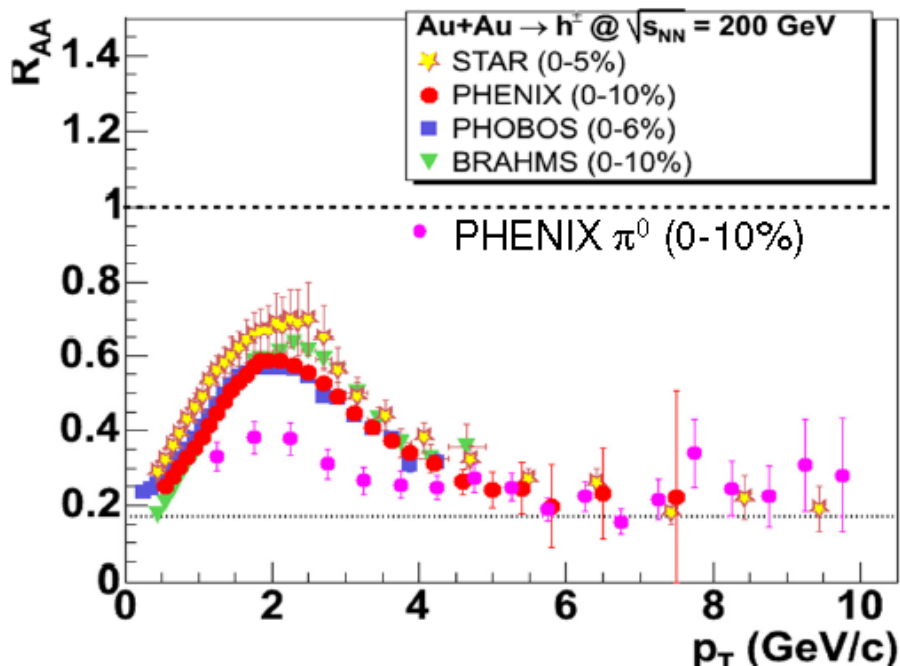
Kemény szórások nehézion-ütközésekben

- 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 hatáskeresztszámát az LHC energián, és felhasználjuk ezeket **magukban az ütközésekben.**



Energiaveszteség

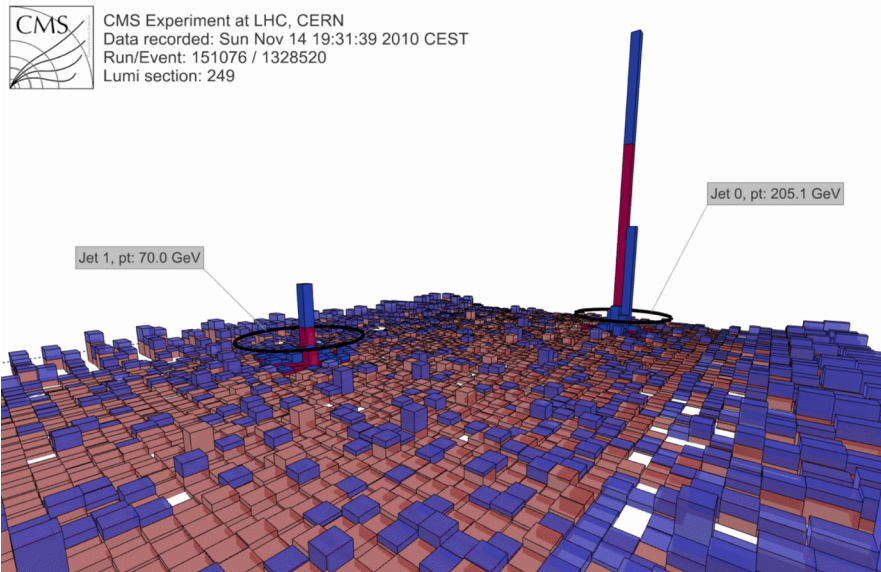
- A plazmán áthaladó partonok energiát veszíthetnek
 - Többszörös szórással
 - Gluon sugárzással



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

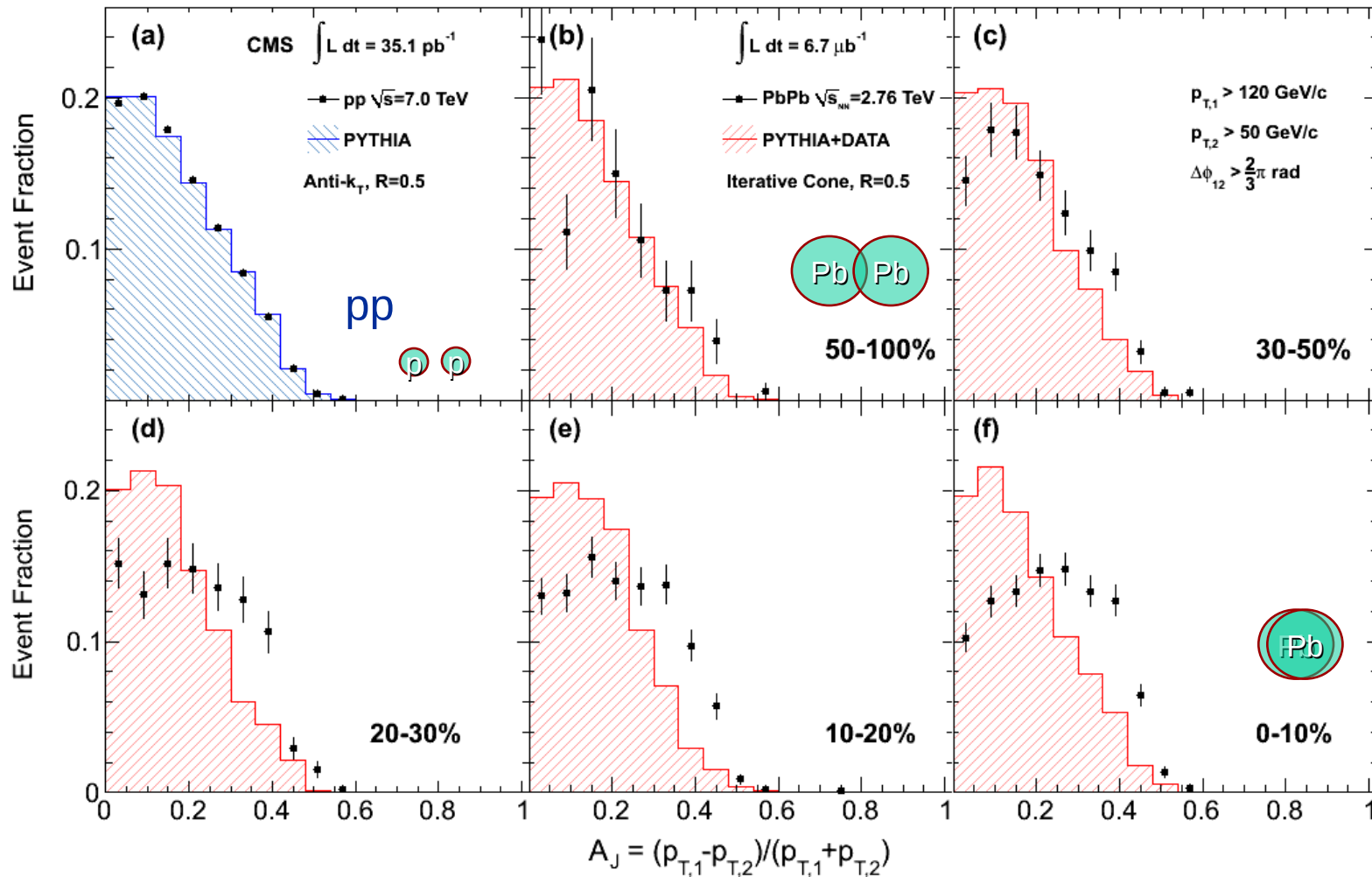


Jet-ek: mennyire erősen kölcsönható ez az anyag?

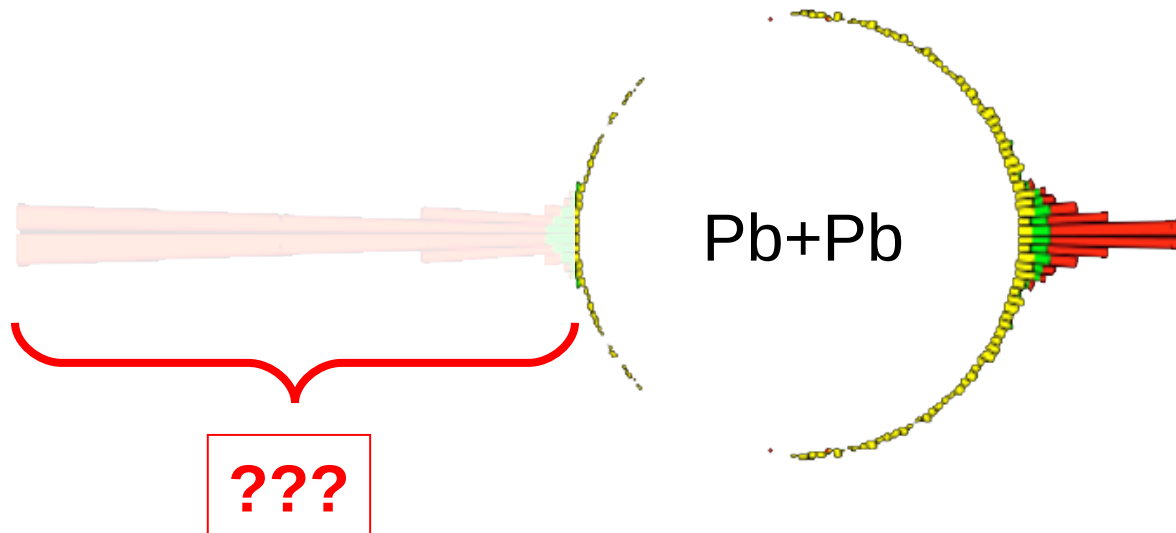


Jet energia aszimmetria

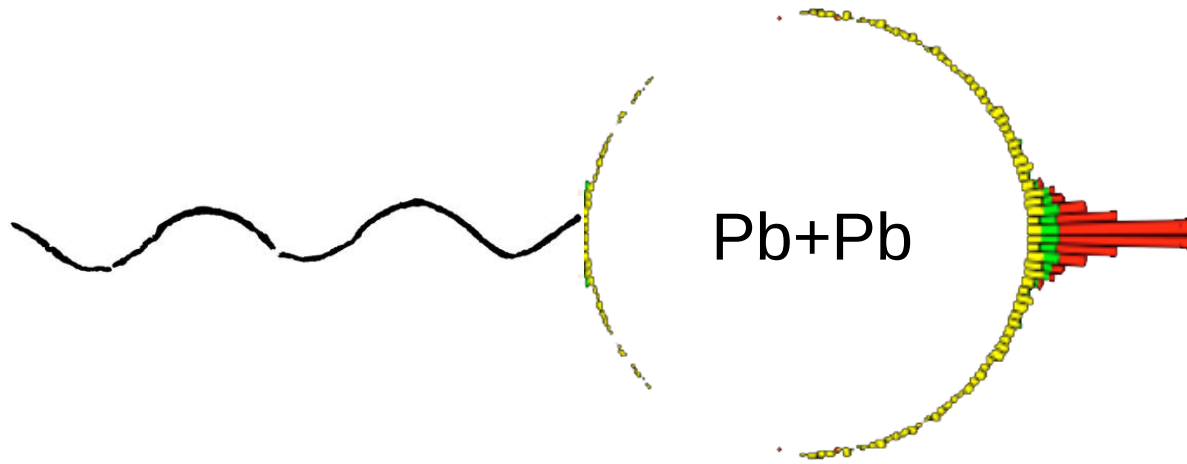
- A partonok energiavesztesége a *jet*-párok energia-egyensúlyának felborulásában jelenik meg, centrális Pb+Pb ütközésekben



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



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



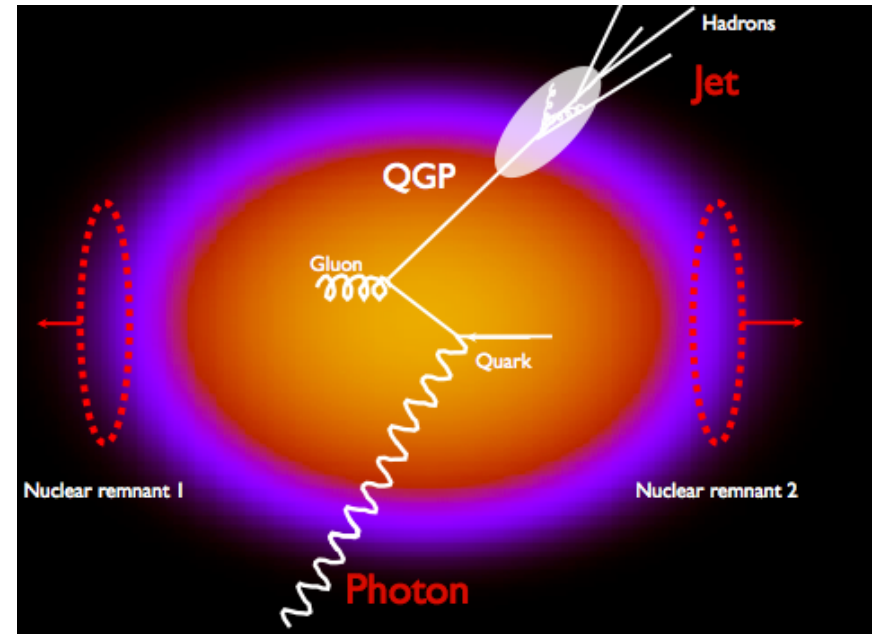
γ -jet: u, d kvark energiavesztesége



CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Mon Dec. 5 23:36:38 2011 EDT
Run/Event: 183013/43056273
Lumi section: 1114

foton
(191 GeV)

jet
(98 GeV)



A foton szerepe:

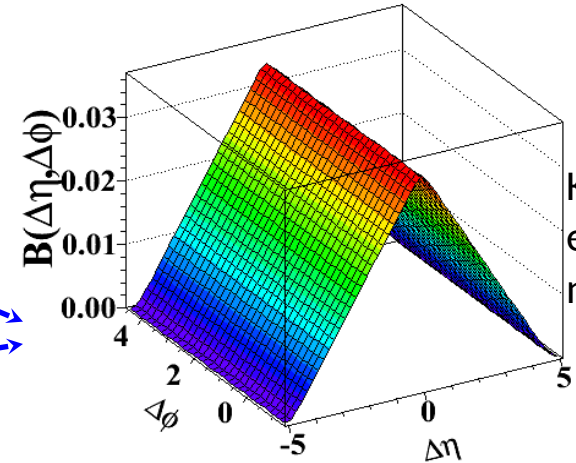
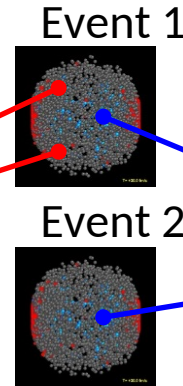
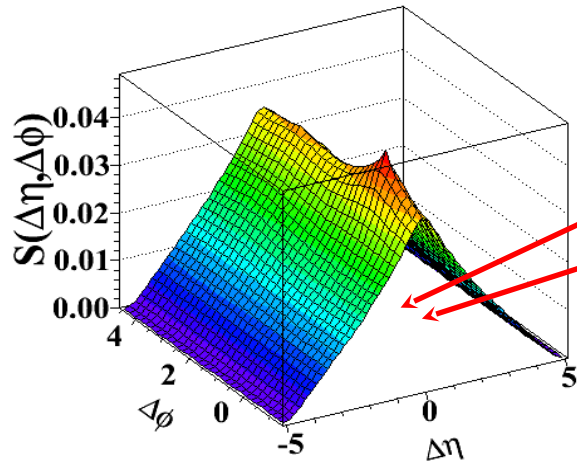
- Azonosítja a *jet*-et: u, d kvark *jet*
- Megadja az eredeti kvark mozgási irányát
- Megadja a kvark kezdeti energiáját



Kétrészecske-korrelációk definiálása

Jel-párok eloszlása:

Háttér-párok eloszlása



Párok egyazon eseményből

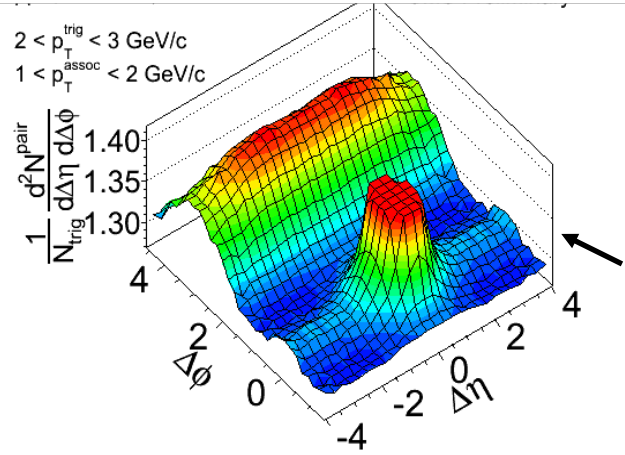
Kevert események

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

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

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

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

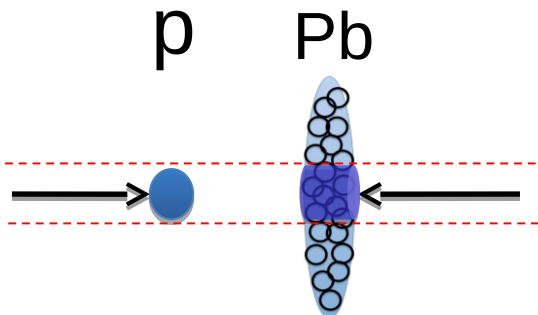


Az asszociált hadronok triggerenkénti száma:

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



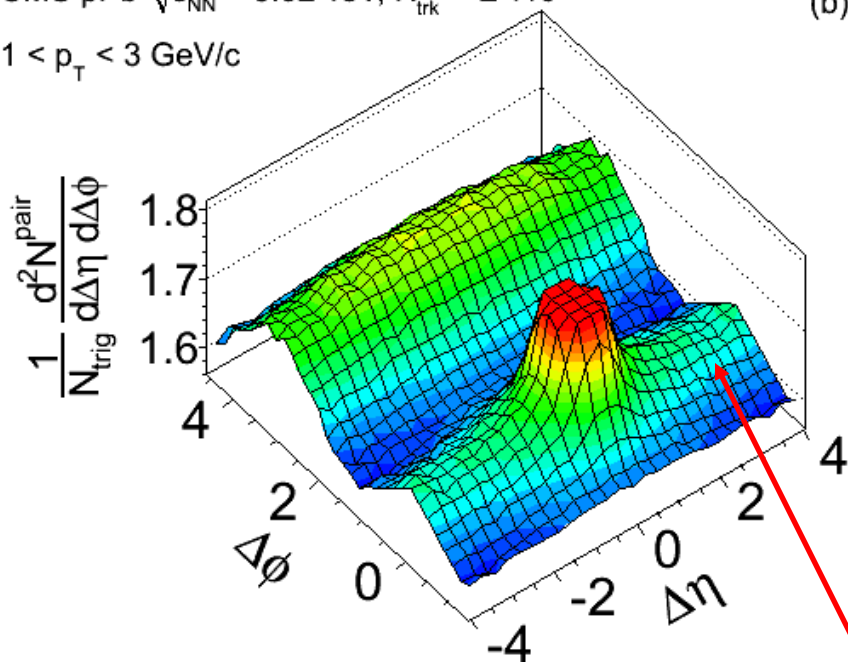
p+Pb: a "hegygerinc" újra felbukkant!



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

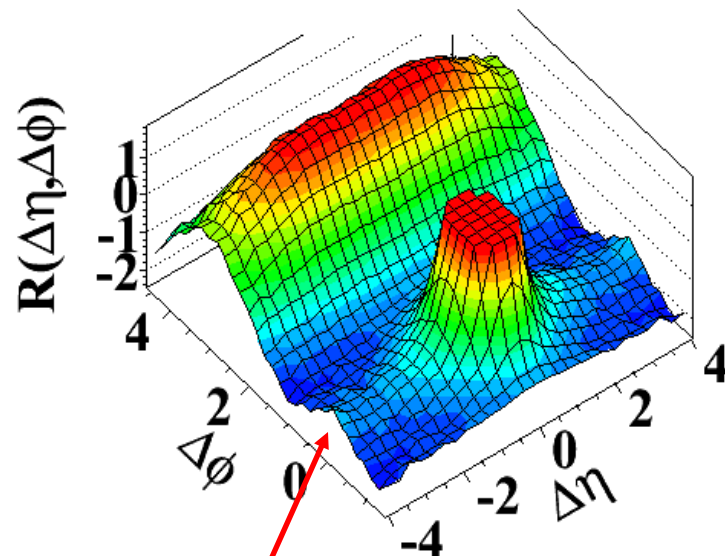
(b)



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

p+p 7 TeV

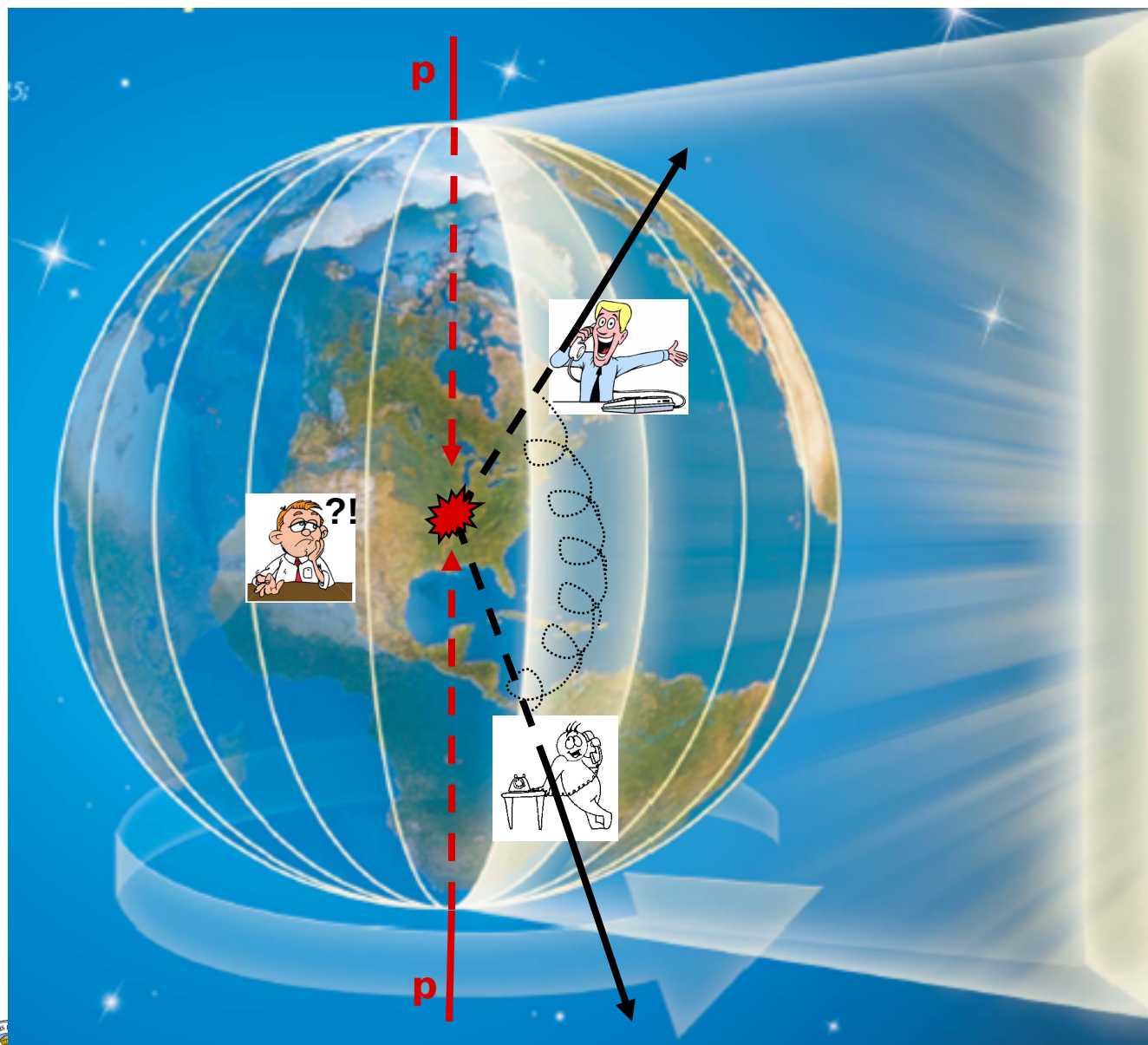
(d) $N > 110$, $1.0 \text{ GeV/c} < p_T < 3.0 \text{ GeV/c}$



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?**



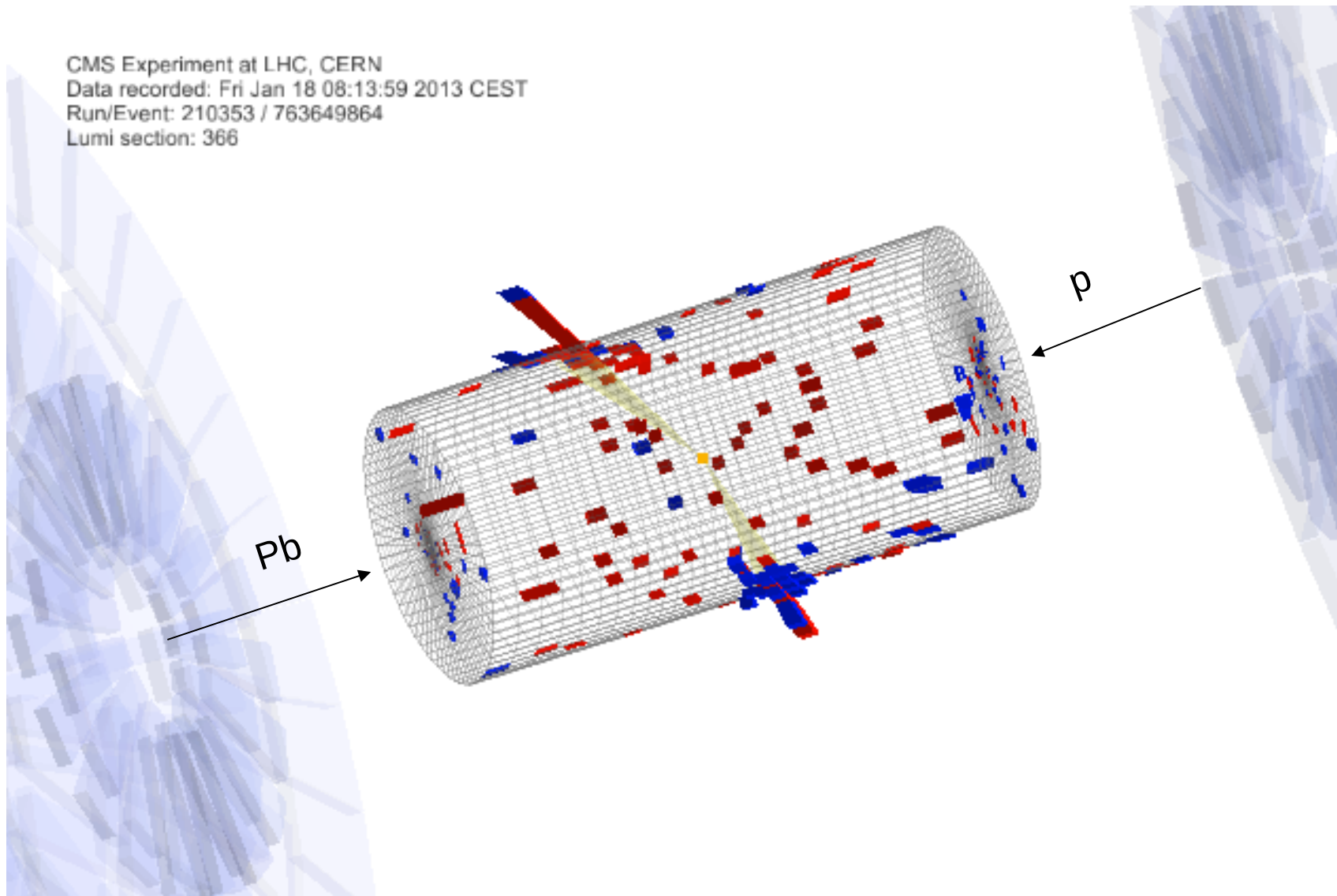
p+Pb ütközések...

Referencia-mérés (?)



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

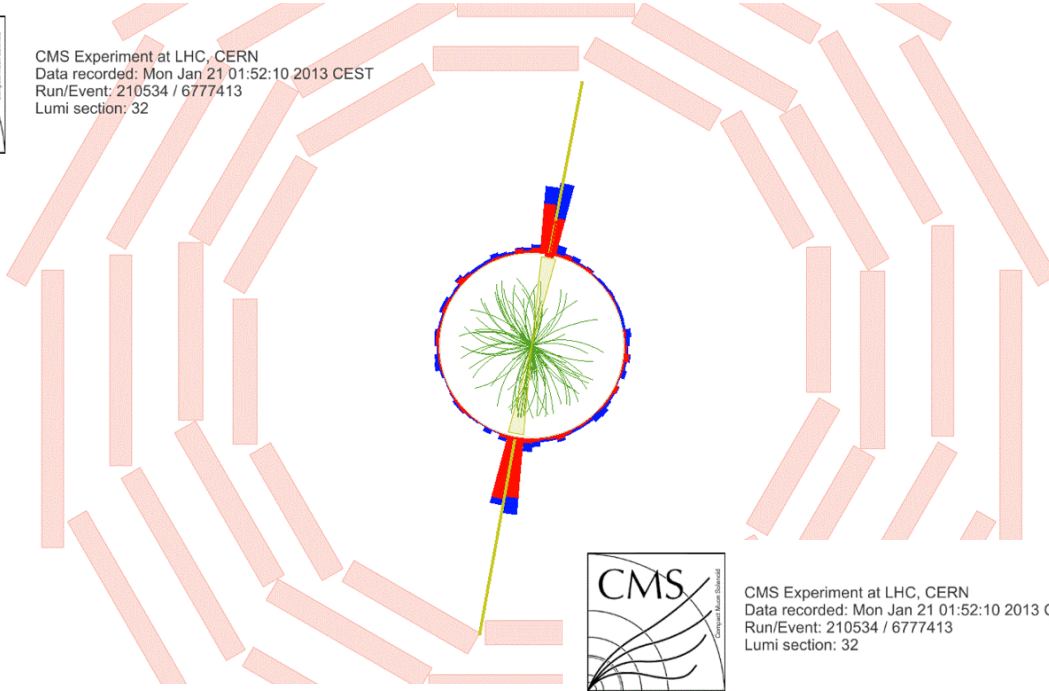
CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Fri Jan 18 08:13:59 2013 CEST
Run/Event: 210353 / 763649864
Lumi section: 366



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



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



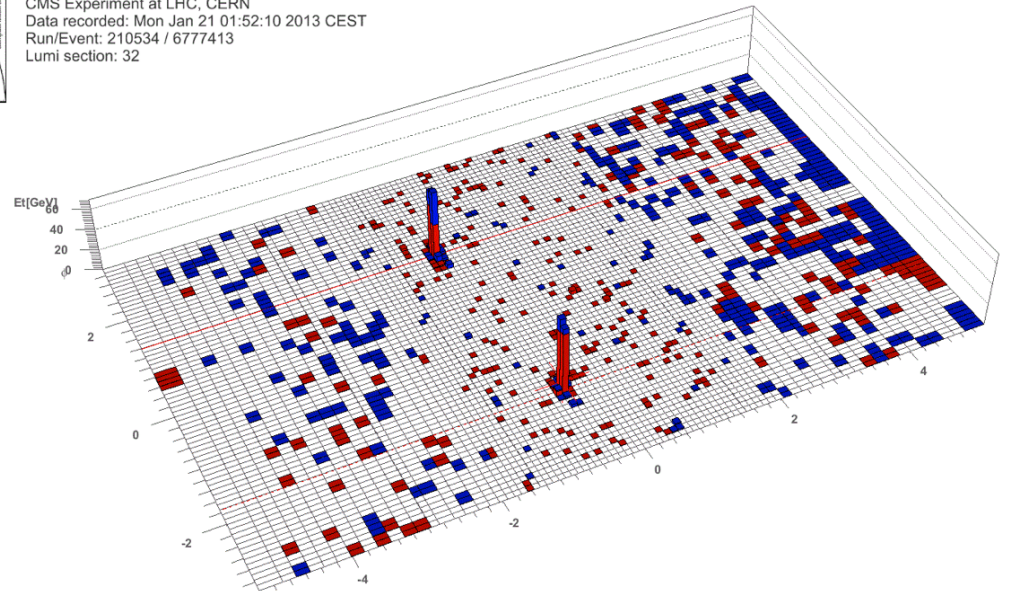
CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Mon Jan 21 01:52:10 2013 CEST
Run/Event: 210534 / 6777413
Lumi section: 32

vezető jet:

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

Jet párja:

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



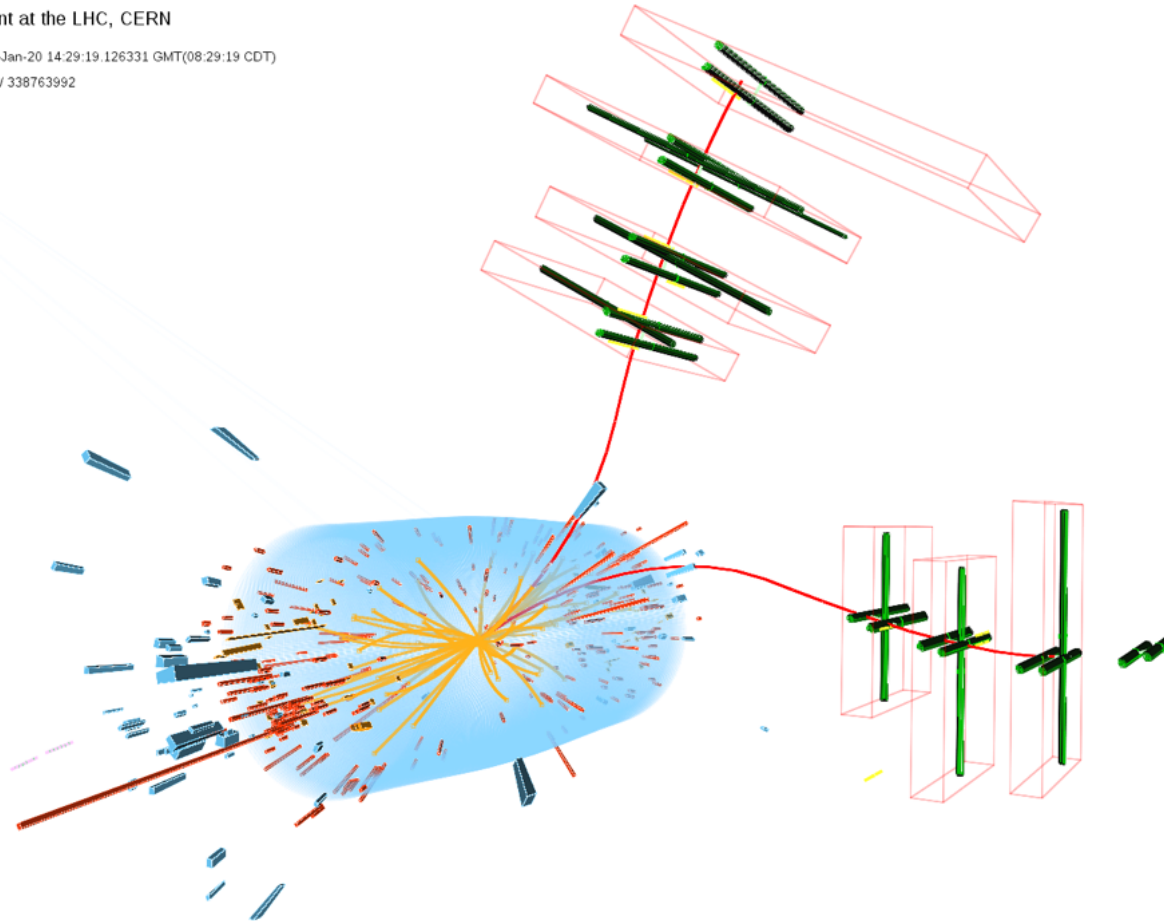
J/ψ jelölt p+Pb ütközésben, $\sqrt{s_{NN}} = 5 \text{ TeV}$



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>



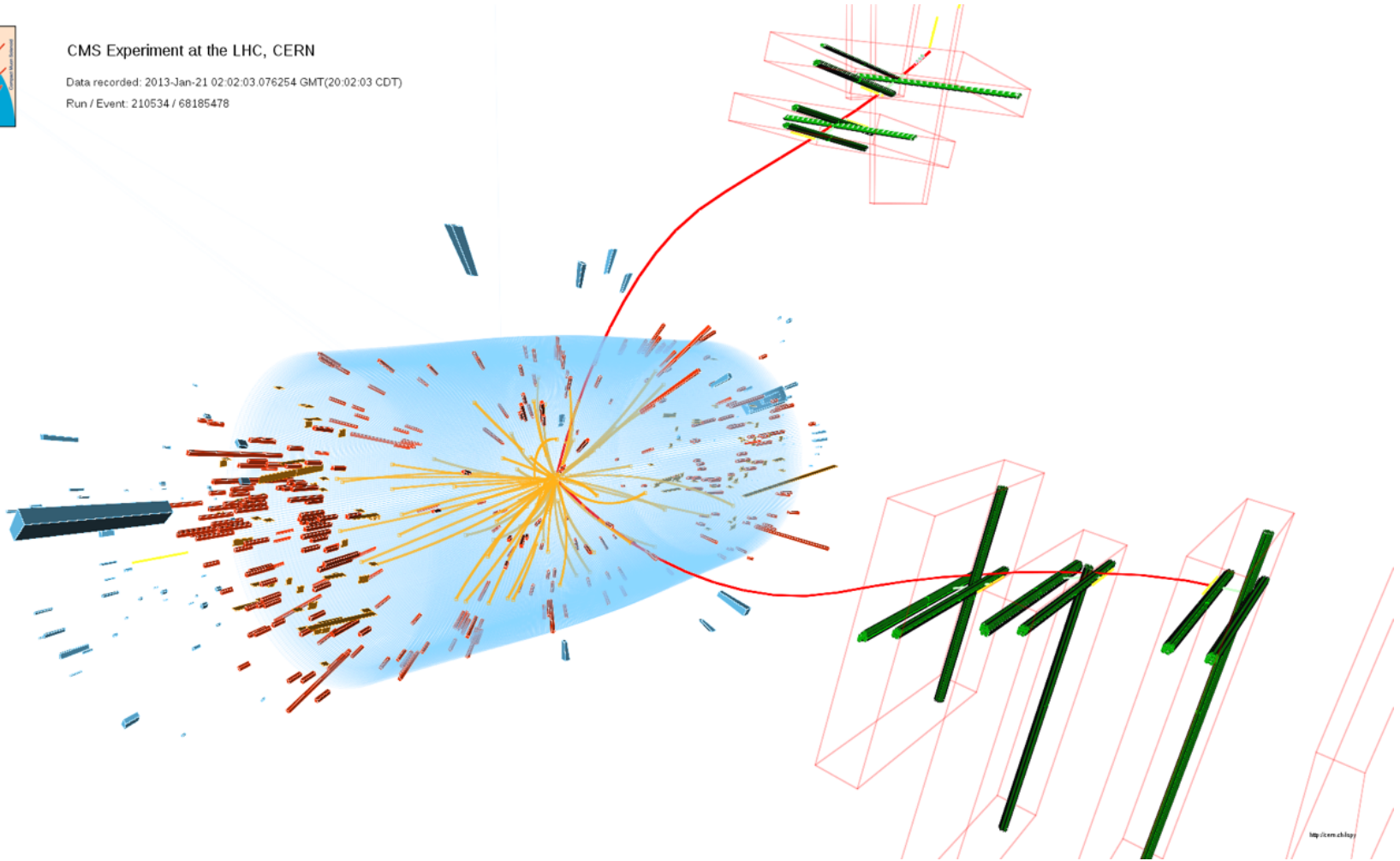
$\Upsilon(1S)$ jelölt p+Pb ütközésben, $\sqrt{s_{NN}} = 5$ TeV



CMS Experiment at the LHC, CERN

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

Run / Event: 210534 / 68185478



(c) CERN. All rights reserved.

<http://cern.ch/lcg>



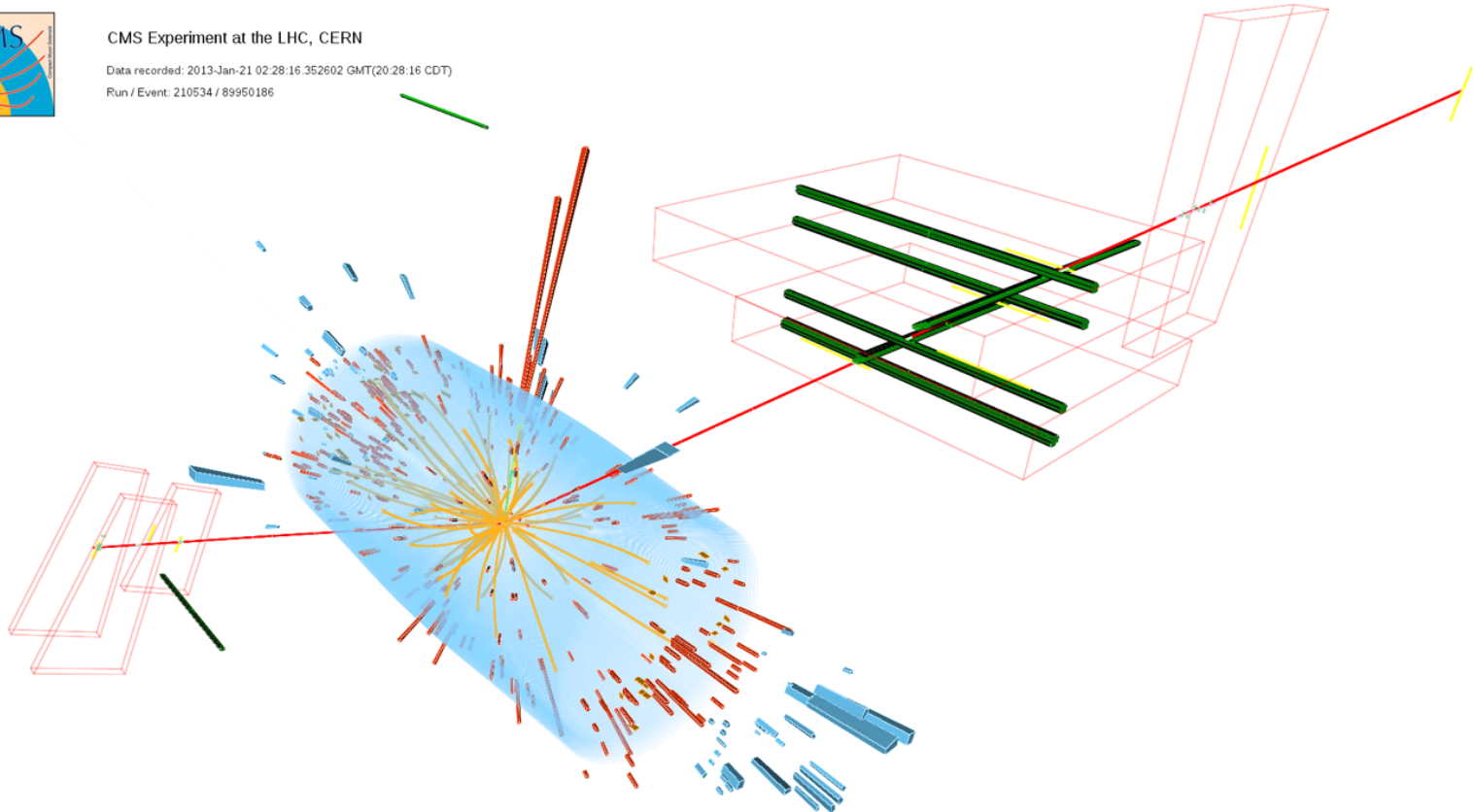
Z jelölt (+jet) p+Pb ütközésben, $\sqrt{s_{NN}} = 5$ TeV



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



ELTE TTK Fizikai Intézet

Az intézet honlapja: <https://physics.elte.hu/>



„Az atomoktól a csillagokig” előadássorozat
(élő online közvetítés)
(<http://atomcsill.elte.hu/>)

Érdekel valamelyik kutatási téma?
Gyere és csatlakozz valamelyik kutatócsoporthoz!

Nézz be laborjainkba!

Fizika tanösvény
<http://fiztanosveny.elte.hu/>



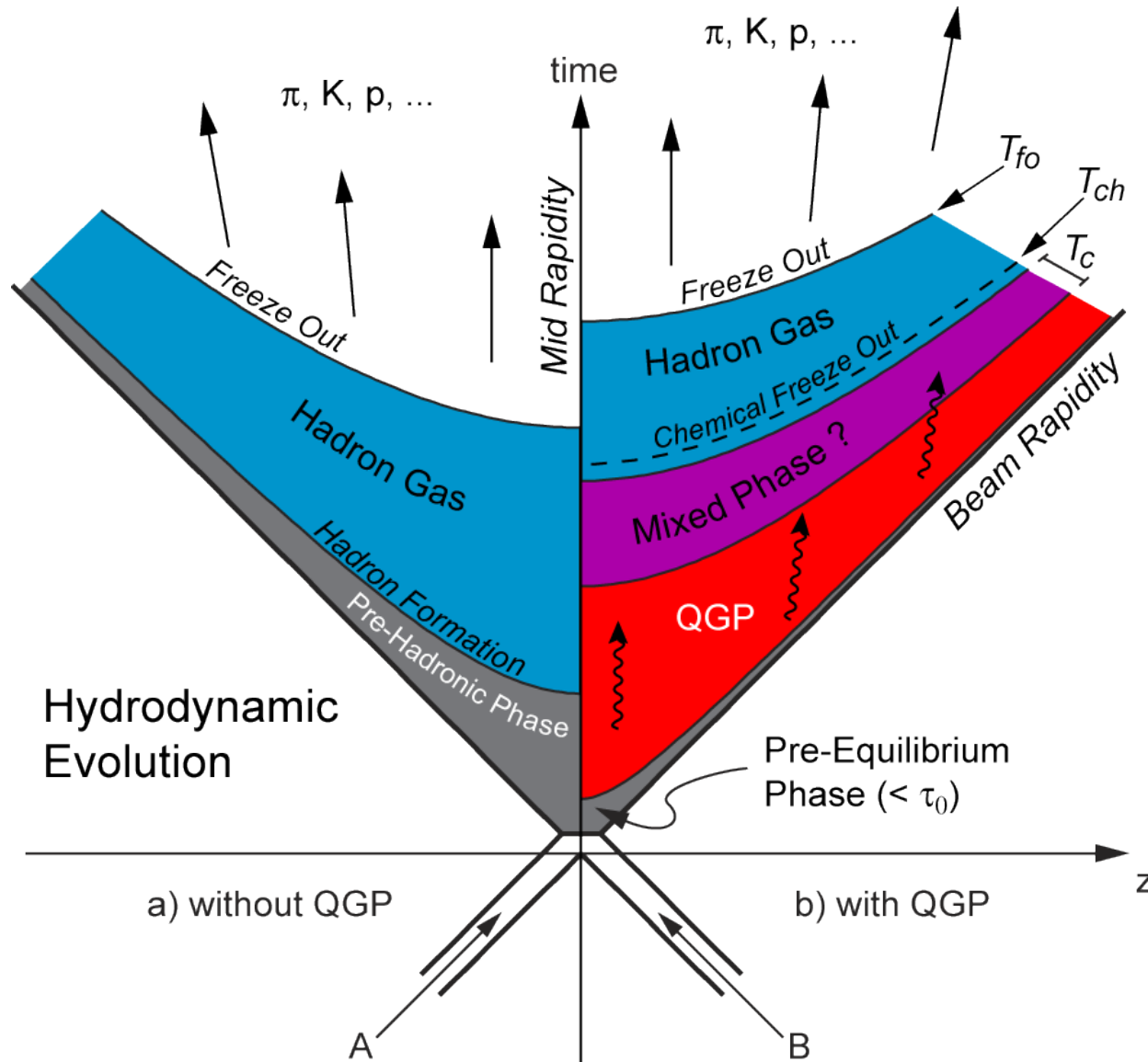
Köszönöm a figyelmet!



EXTRA



Időfejlődés

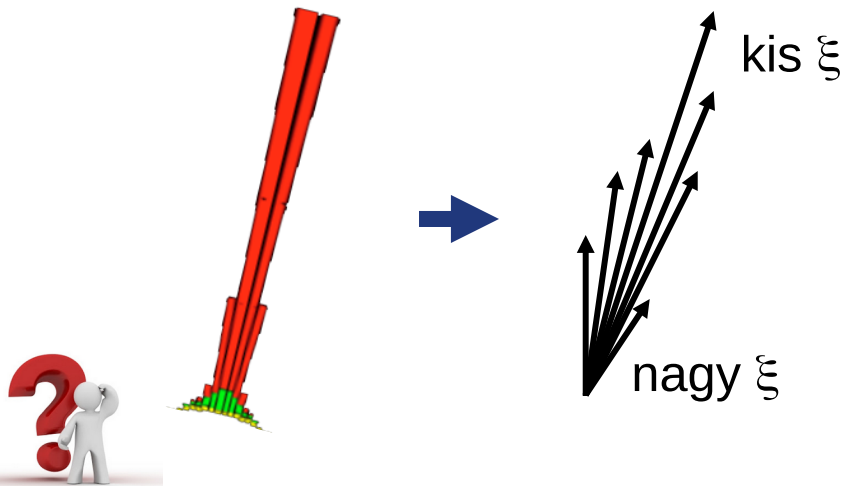


Hogyan módosulnak a *jetek*? Megváltozik az alakjuk vagy a fragmentációjuk?

Jet fragmentációs függvény:

A részecskék impulzusának eloszlása a jet tengelyére vetítve, a ξ változót használva:

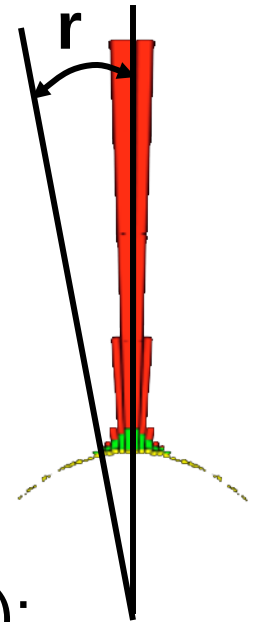
$$\xi = \ln(p^{\text{jet}}/p_{\parallel}^{\text{track}}):$$



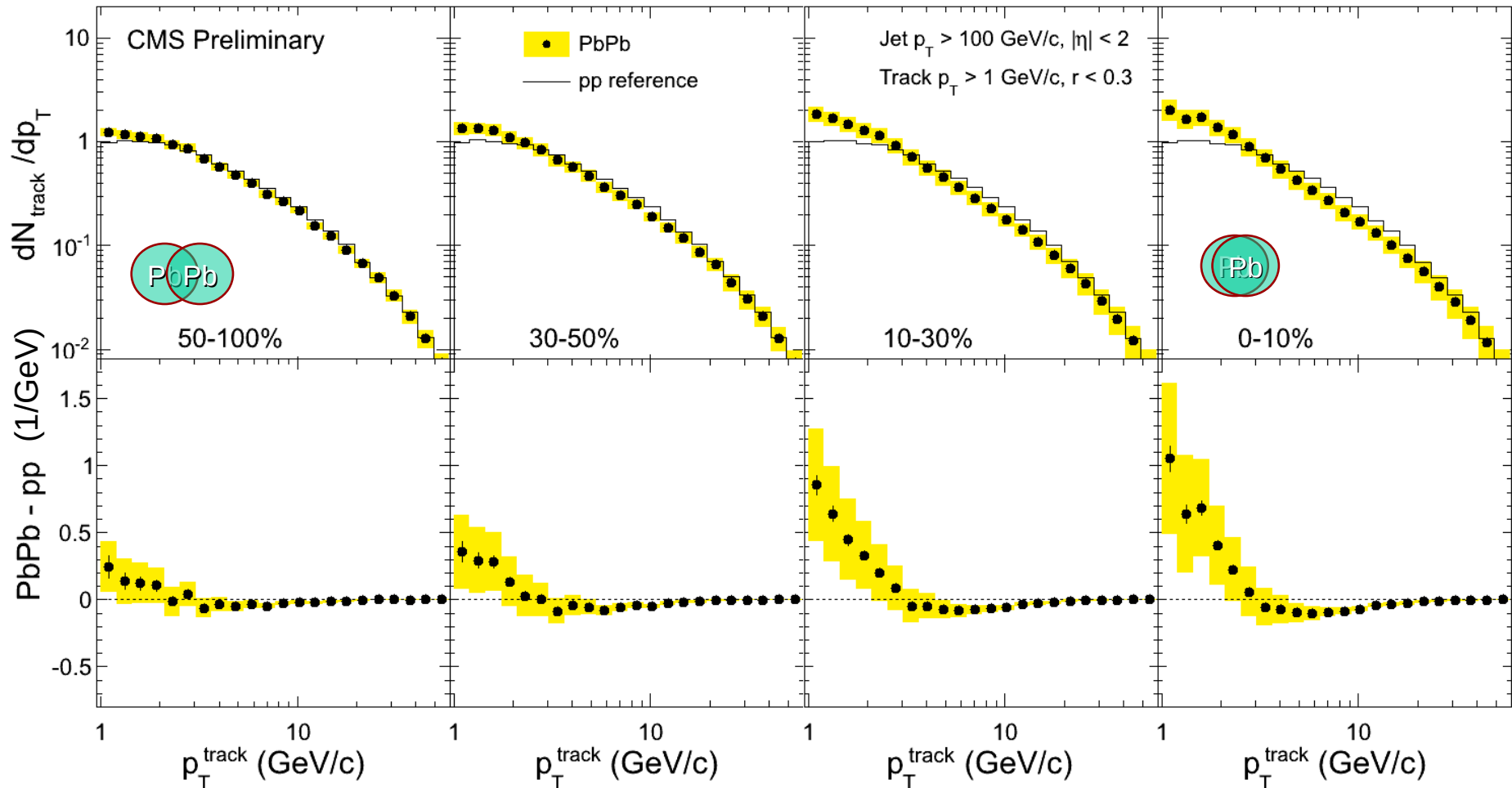
Jet alak:

p_T -eloszlás az η - φ 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

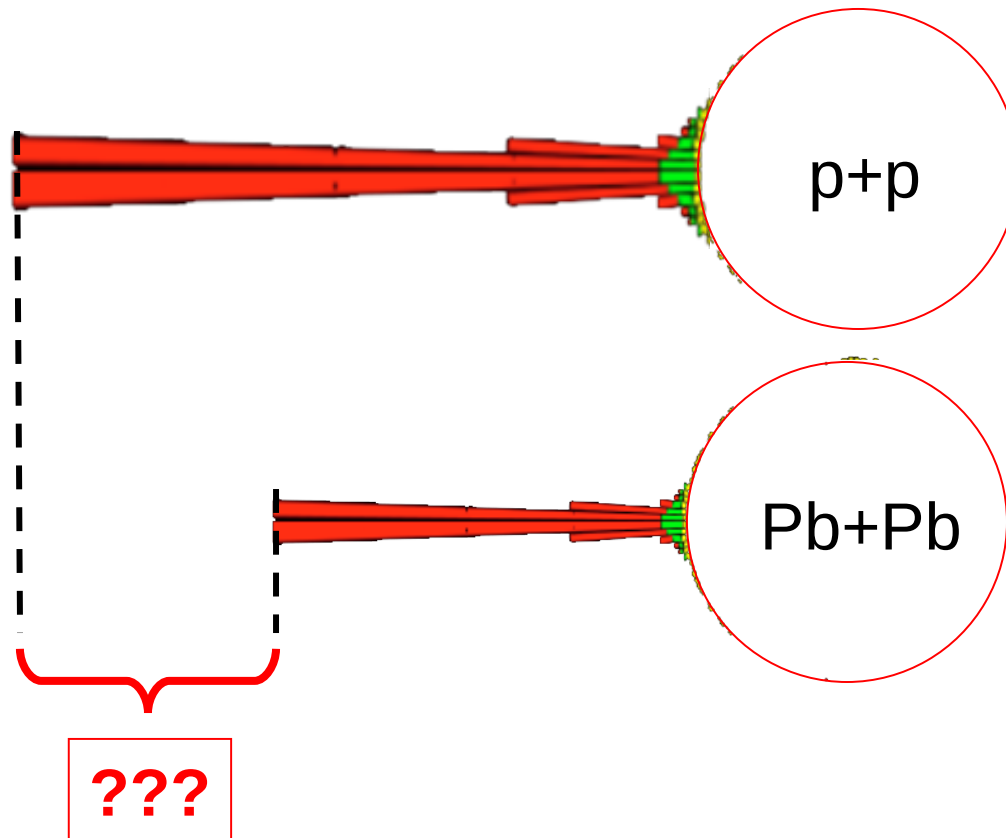


Nagy p_T (kis ξ): **nincs változás** a p+p ütközésekhez képest

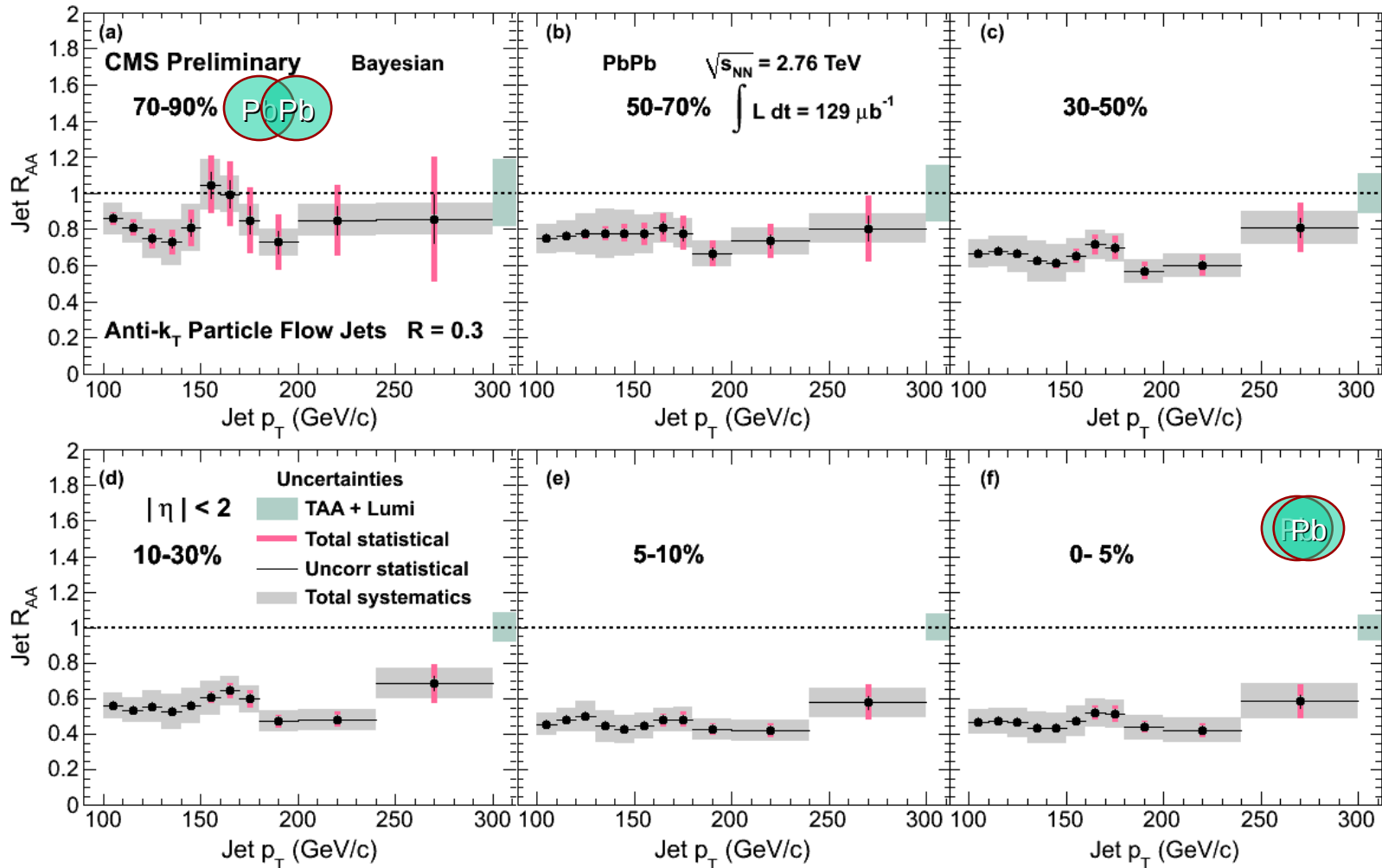
Centrális Pb+Pb: részecskék **többlete** p+p-hez képest (nagy ξ)



Mennyi energiát vesztenek a *jet*-ek?



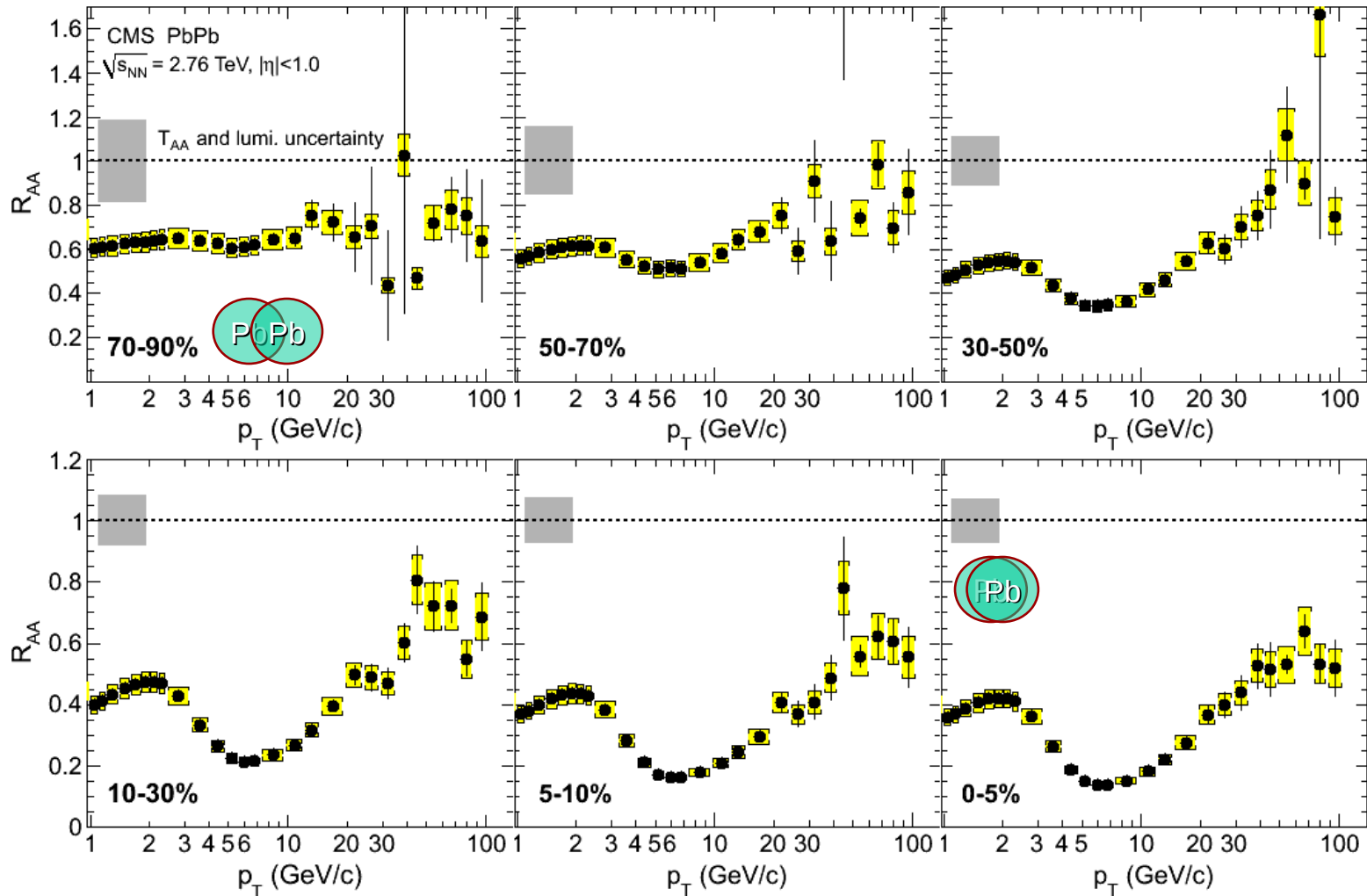
Jet-ek nukleáris módosulási faktora



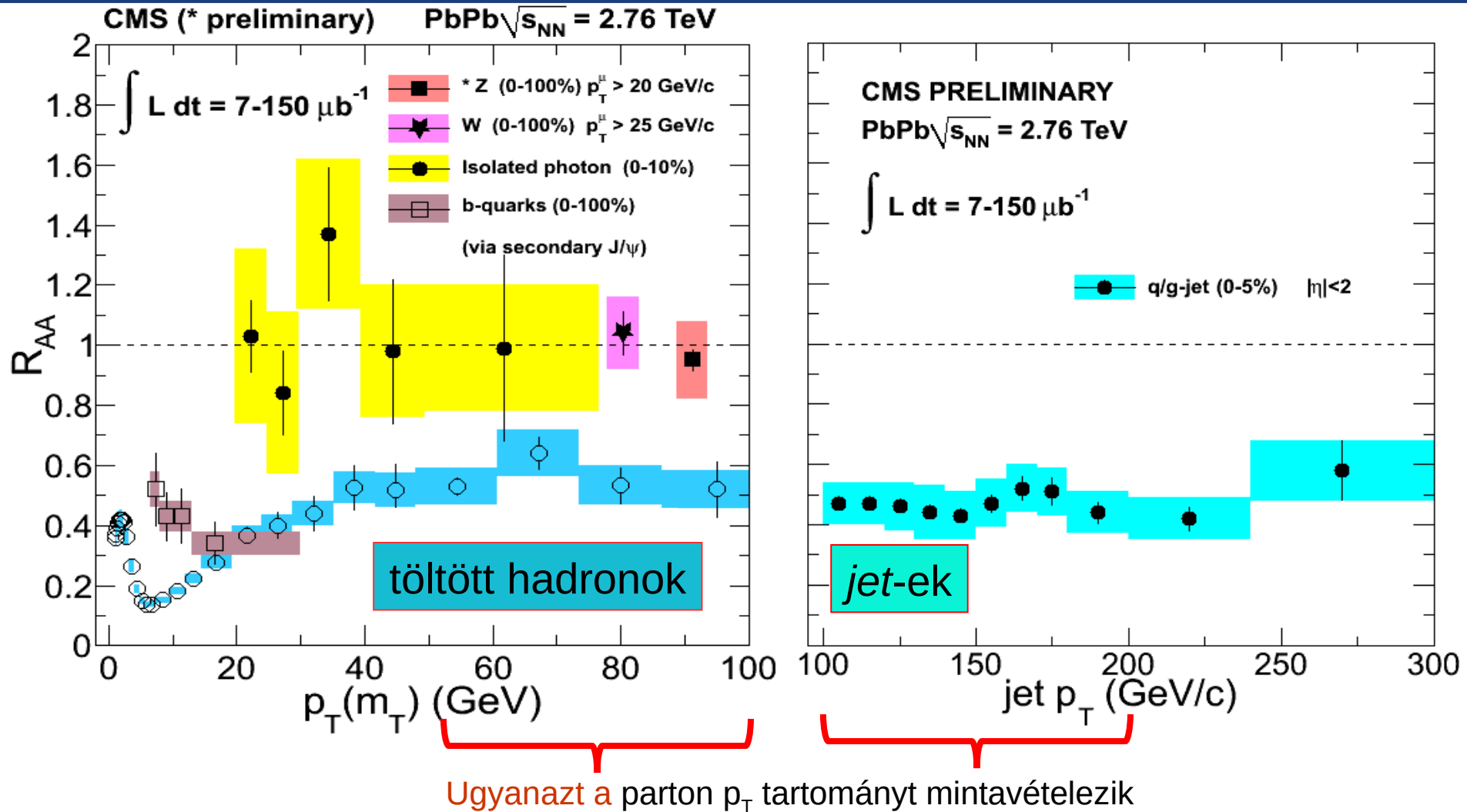
Elyomás: **nincs** szignifikáns p_T -függés



Töltött hadronok, R_{AA}



Nukleáris módosulási faktorok

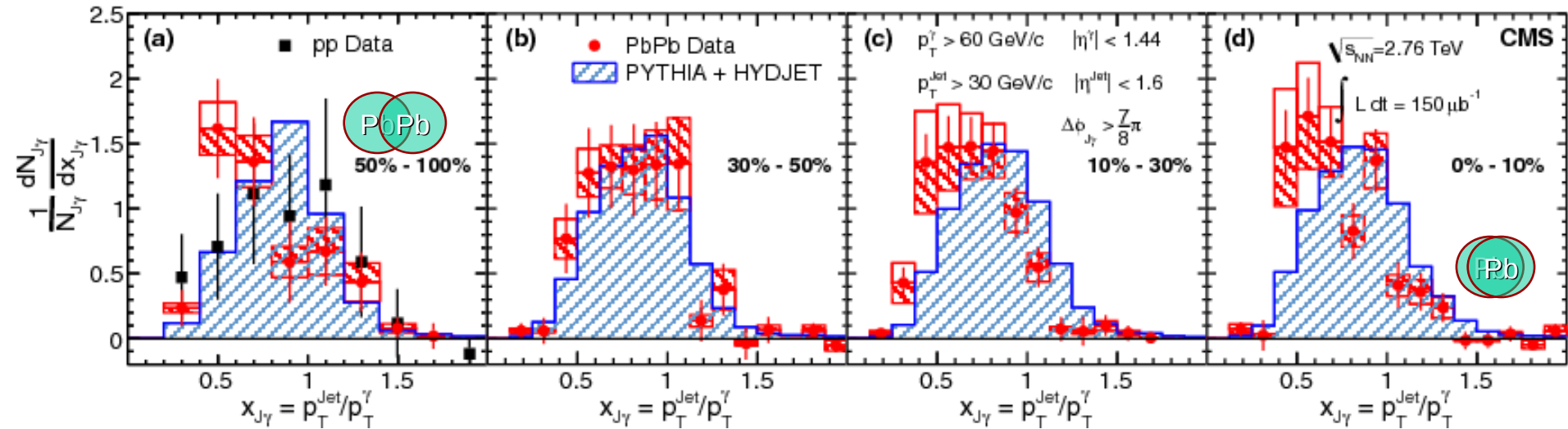


Megj: a jet-ek p+p és Pb+Pb ütközésekben hasonlóan fragmentálódnak (ld. később)



γ -jet korrelációk

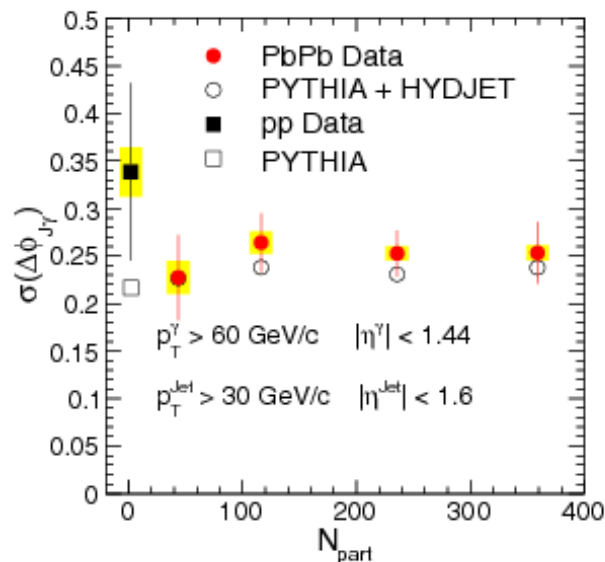
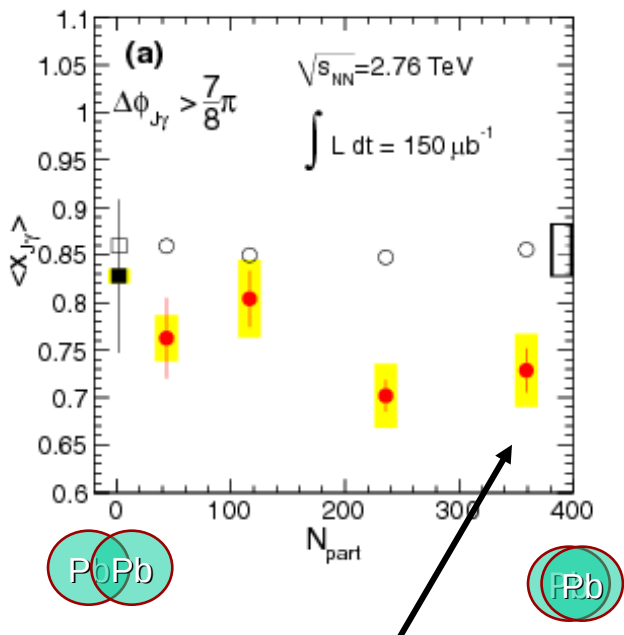
- A fotonok **nem módosulnak**, így energiamérést biztosítanak
- A *jet*-ek és fotonok p_T -aránya ($x_{J\gamma} = p_T^{\text{jet}}/p_T^\gamma$) a *jet* energia-veszteségét közvetlenül méri
- Az $x_{J\gamma}$ eloszlás fokozatos **centralitásfüggését** tapasztaljuk $x_{J\gamma}$



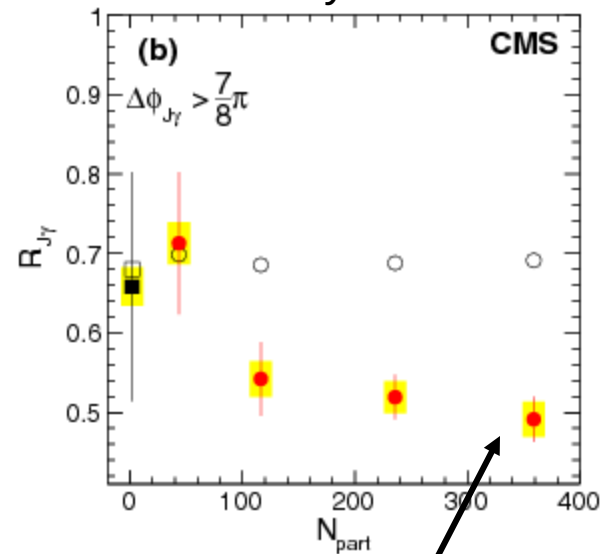
γ -jet korrelációk

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

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



Nincs ϕ -dekorreláció



Kevesebb *jet* partner

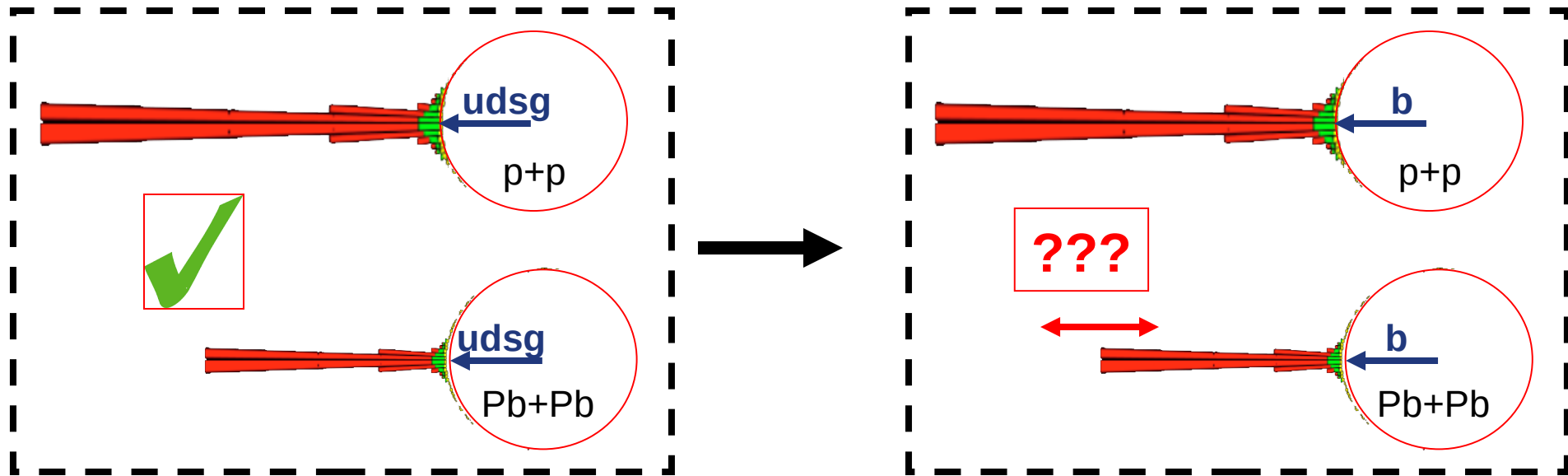
Növekvő p_T -aszimmetria

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

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

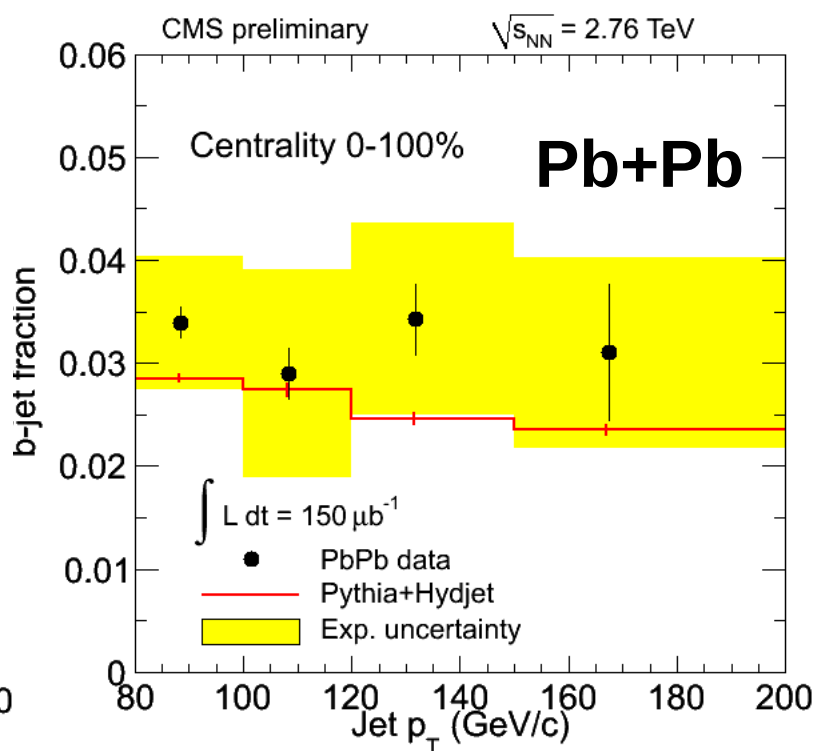
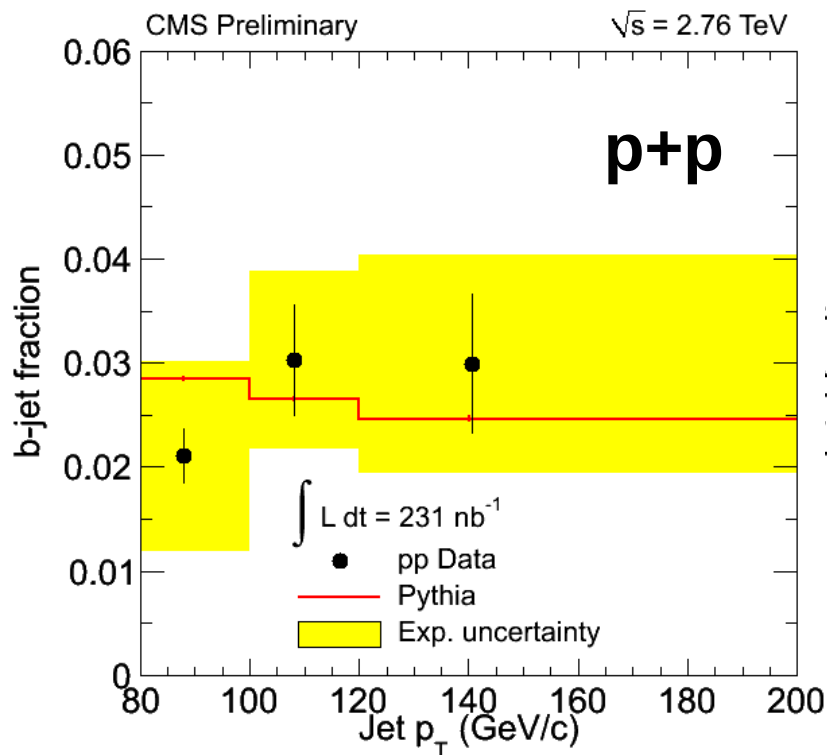


A nehéz kvark-jetek is vesztenek energiát?



A b-jetek aránya az összes jethez képest

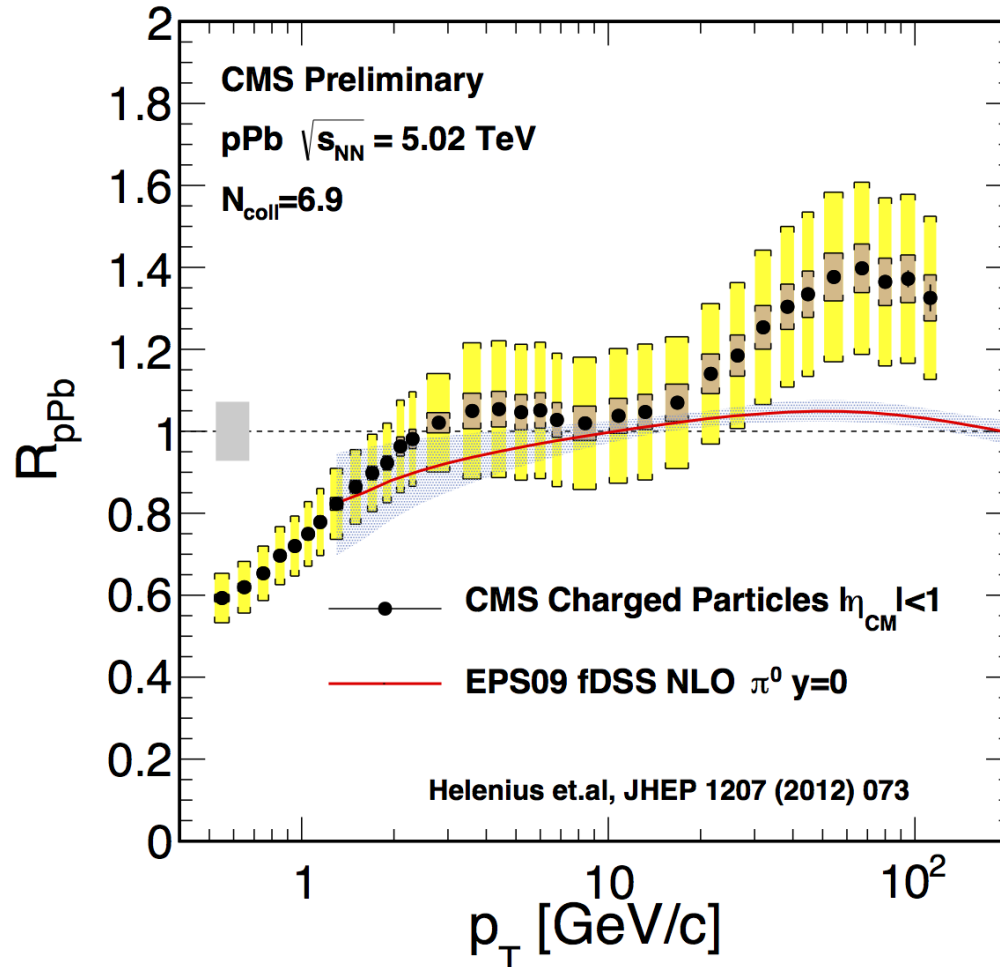
b-jet részarány: **hasonló érték** p+p és Pb+Pb ütközésekben
→ b-jet energiaveszteség tehát **hasonló** a könnyű kvarkok energiaveszteségéhez ($R_{AA} \approx 0.5$), egyelőre nagy szisztematikus hibával.



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.

