

# Mennyivel tudunk többet az erős kölcsönhatásról?

**Siklér Ferenc**

*MTA Wigner FK Részecske- és Magfizikai Intézet  
Budapest*



Magyar Fizikus Vándorgyűlés  
Debrecen, 2013. augusztus 22.

# Tartalom

---

- Bevezető
  - Részecskék, kölcsönhatások, detektorok

# Tartalom

---

- Bevezető
  - Részecskék, kölcsönhatások, detektorok
- Alapvető mérések
  - A proton hatásos felülete
  - Hiányzó eszközök
    - \* kis impulzusú, alacsony tévesztésű nyomkövetés
    - \* kölcsönhatási pontok keresése
  - Töltött hadronok eloszlásai

# Tartalom

---

- Bevezető
  - Részecskék, kölcsönhatások, detektorok
- Alapvető mérések
  - A proton hatásos felülete
  - Hiányzó eszközök
    - \* kis impulzusú, alacsony tévesztésű nyomkövetés
    - \* kölcsönhatási pontok keresése
  - Töltött hadronok eloszlásai
- Azonosított részecskék eloszlásai
  - Energiaveszteség-ráta
    - \* egy egyszerű parametrizáció és használata
  - Kölcsönhatások összehasonlítása: univerzalitás, gluon-telítés

# Tartalom

---

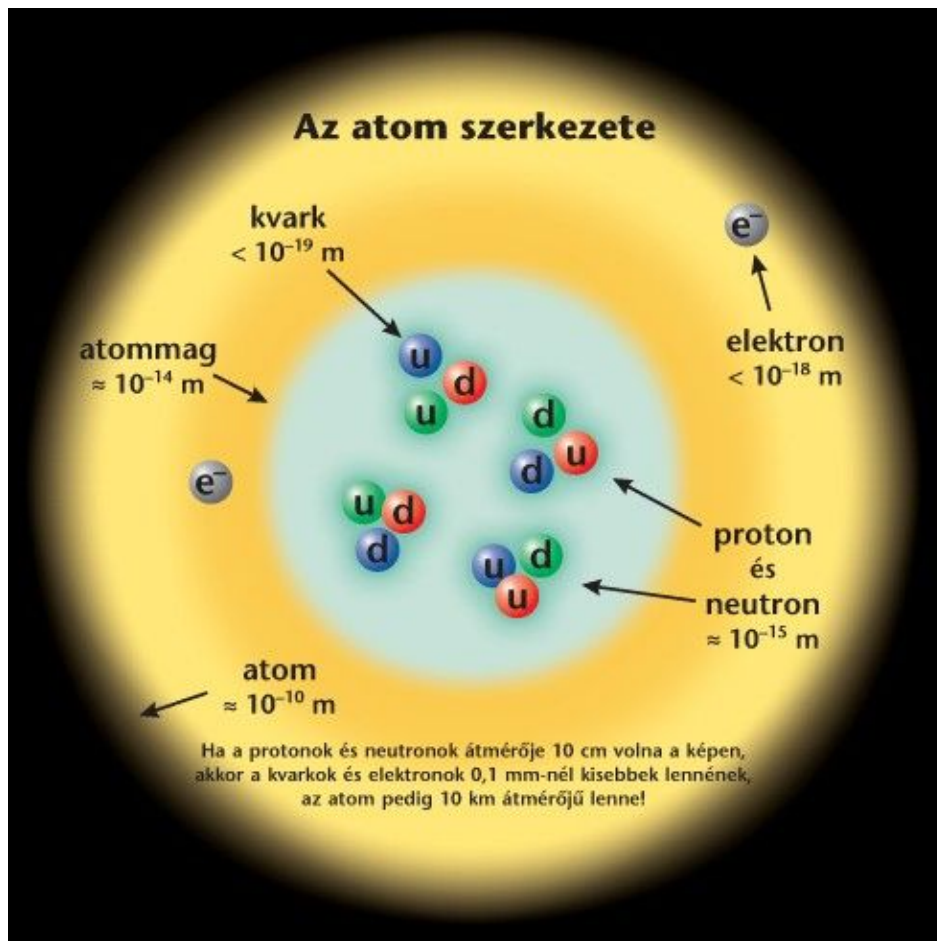
- Bevezető
  - Részecskék, kölcsönhatások, detektorok
- Alapvető mérések
  - A proton hatásos felülete
  - Hiányzó eszközök
    - \* kis impulzusú, alacsony tévesztésű nyomkövetés
    - \* kölcsönhatási pontok keresése
  - Töltött hadronok eloszlásai
- Azonosított részecskék eloszlásai
  - Energiaveszteség-ráta
    - \* egy egyszerű parametrizáció és használata
  - Kölcsönhatások összehasonlítása: univerzalitás, gluon-telítés
- Nehézionok fizikája

# Tartalom

---

- Bevezető
  - Részecskék, kölcsönhatások, detektorok
- Alapvető mérések
  - A proton hatásos felülete
  - Hiányzó eszközök
    - \* kis impulzusú, alacsony tévesztésű nyomkövetés
    - \* kölcsönhatási pontok keresése
  - Töltött hadronok eloszlásai
- Azonosított részecskék eloszlásai
  - Energiaveszteség-ráta
    - \* egy egyszerű parametrizáció és használata
  - Kölcsönhatások összehasonlítása: univerzalitás, gluon-telítés
- Nehézionok fizikája

# Elemi részecskék és kölcsönhatások



Az anyagi részecskék három családja (fermionok)

	I	II	III	
tömeg	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
töltés	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
név	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b><math>\gamma</math></b> foton
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
<b>Kvarkok</b>	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluon
	$< 2.2$ eV	$< 0.17$ MeV	$< 15.5$ MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b><math>\nu_e</math></b> elektron-neutrínó	<b><math>\nu_\mu</math></b> műon-neutrínó	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau-neutrínó	<b>Z</b> Z-bozon
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	$\pm 1$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
<b>Leptonok</b>	<b>e</b> elektron	<b><math>\mu</math></b> műon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b>W<math>^\pm</math></b> W bozon

Bozonok (kölcsönhatások)

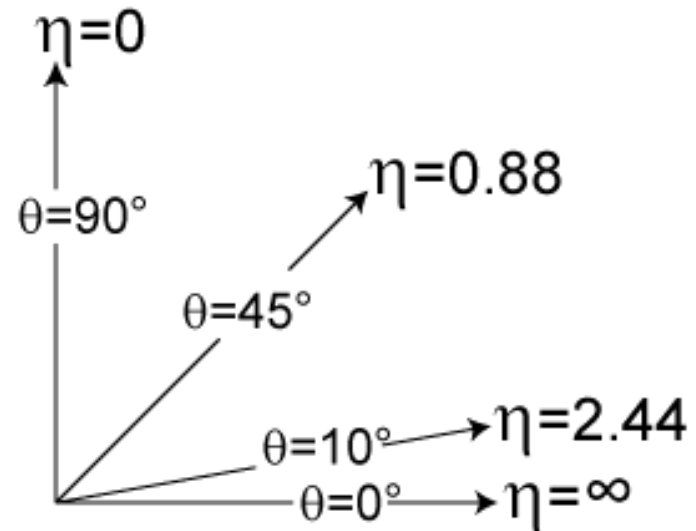
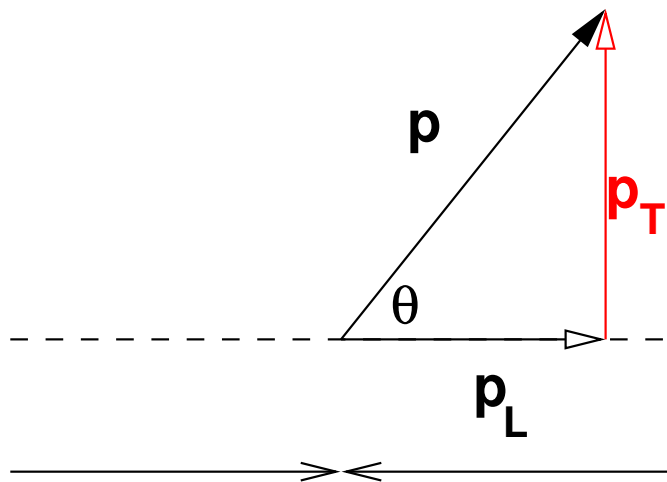
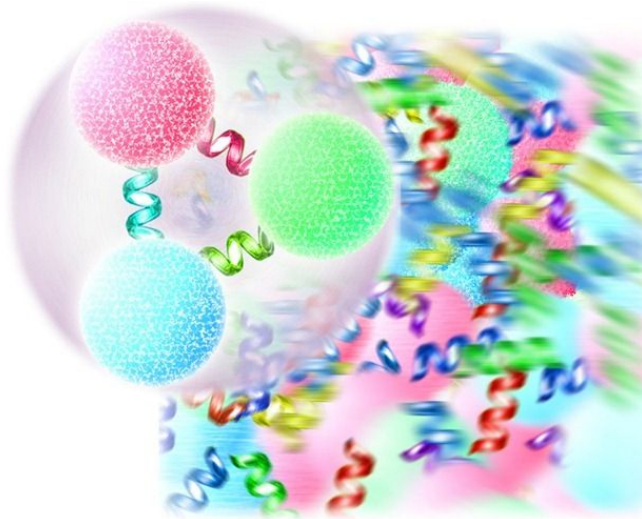
Elektromágneses, gyenge, erős; tömegvonzás  
A részecskefizika Standard Modellje



# Proton-proton ütközések

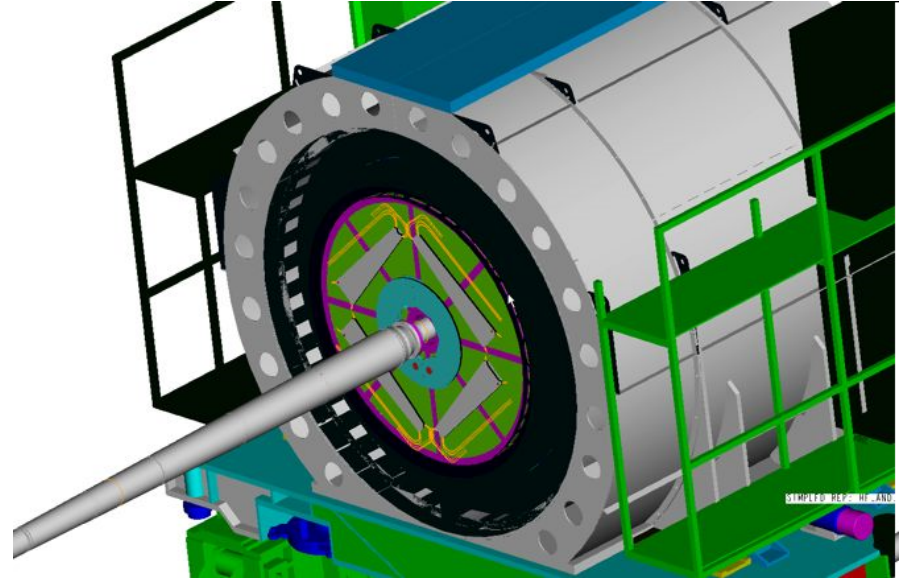
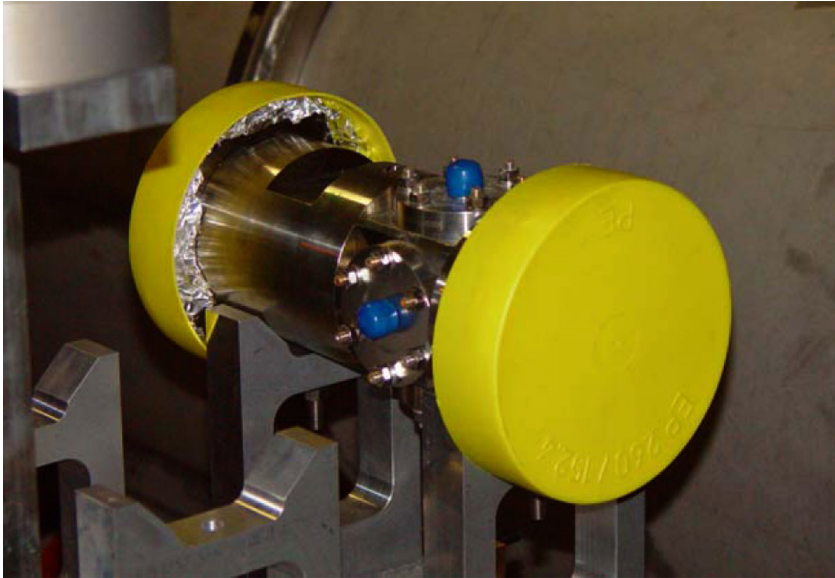
Gyors eredmények? Kvarok és gluonok  $\Rightarrow$  erős kölcsönhatás

(A látható világ, az atommagok tömegük javát a kvarkokat bezáró erőkből nyerik)





# A kölcsönhatás észlelése



Szcintillációs számlálók (BSC)

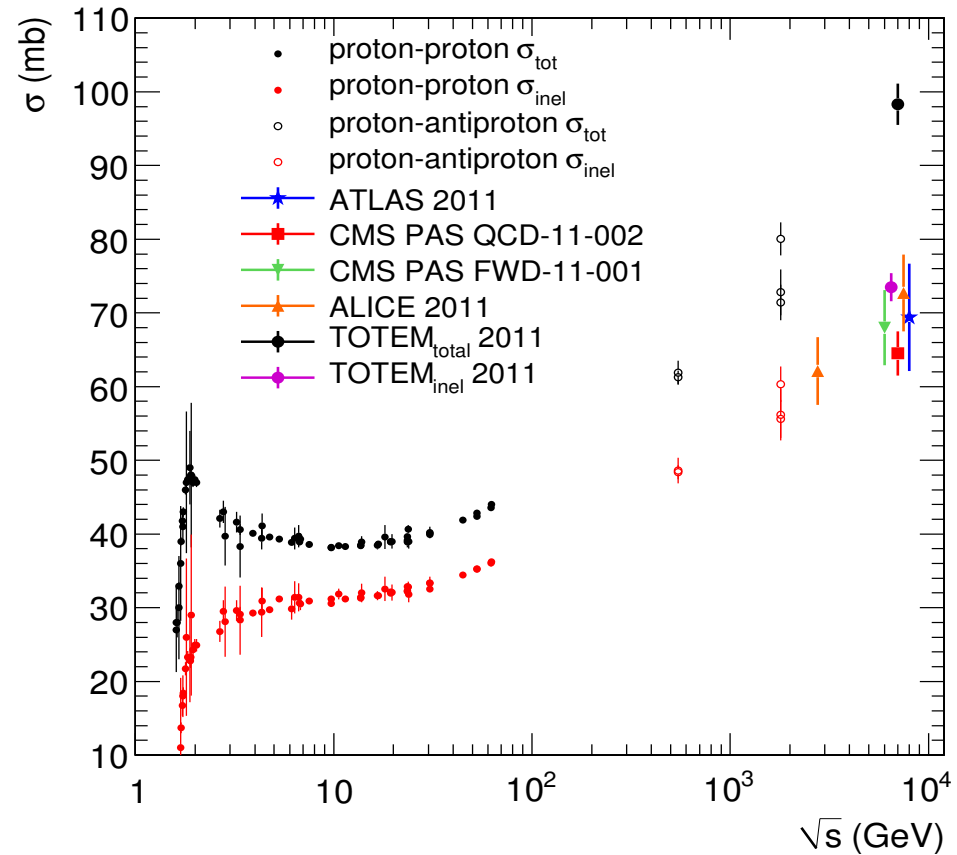
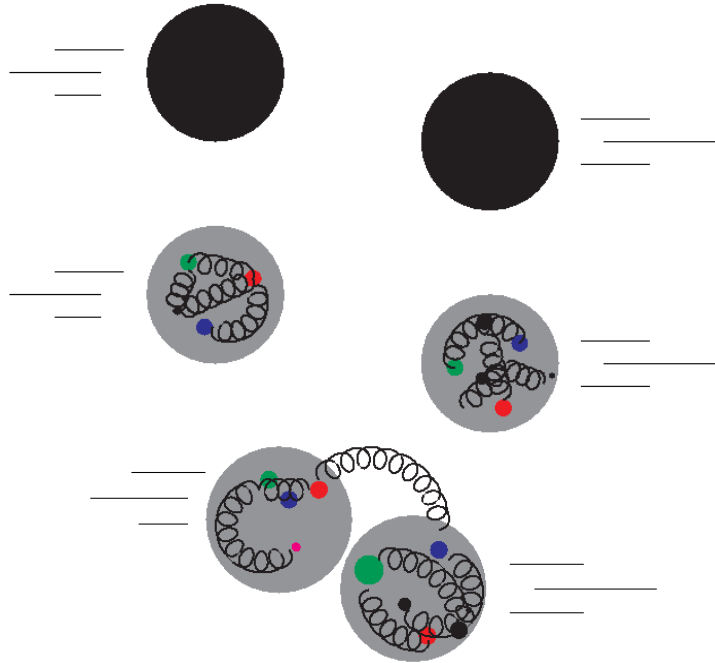
[CMS DN-2010/018]



Kisszögű kaloriméterek (HF)

A rugalmatlan ütközések 80-90%-át látjuk  
Mérjük meg a kölcsönhatás valószínűségét!

# A proton határos felülete



PLB 722 (2013) 5 [CMS AN-2011/061]

## • Hatáskeresztmetszet

- Más forrásból tudjuk, megmértük a protoncsomagok intenzitását, alakját
- Számoljuk meg, hogy hány ütközés történik; kétféle módszer
  - \* alacsony ütközési valószínűség: vannak-e keltett részecskék (HF)
  - \* magas ütközési vszég: a kölcsönhatási pontok számeloszlása (nyomkövető)

Eredmény =  $7 \text{ fm}^2 \gg r^2_{\pi}$ , és növekszik

## Study of the inclusive production of charged pions, kaons, and protons in pp collisions at $\sqrt{s} = 0.9, 2.76, \text{ and } 7 \text{ TeV}$

The CMS Collaboration\*  
CERN, Geneva, Switzerland

Received: 19 July 2012 / Revised: 5 September 2012























© CERN for the benefit of the CMS collaboration 2012. This article is published with open access at Springerlink.com

**Abstract** Spectra of identified charged hadrons are measured in pp collisions at the LHC for  $\sqrt{s} = 0.9, 2.76, \text{ and } 7 \text{ TeV}$ . Charged pions, kaons, and protons in the transverse-momentum range  $p_T \approx 0.1\text{--}1.7 \text{ GeV}/c$  and for rapidities  $|y| < 1$  are identified via their energy loss in the CMS silicon tracker. The average  $p_T$  increases rapidly with the mass of the hadron and the event charged-particle multiplicity, independently of the center-of-mass energy. The fully corrected  $p_T$  spectra and integrated yields are compared to various tunes of the PYTHIA 6 and PYTHIA 8 event generators.

energy deposits in silicon detectors, in pp collisions at  $\sqrt{s} = 0.9, 2.76, \text{ and } 7 \text{ TeV}$ . In certain phase space regions, particles can be identified unambiguously while in other regions the energy loss measurements provide less discrimination power and more sophisticated methods are necessary.

This paper is organized as follows. The Compact Muon Solenoid (CMS) detector, operating at the Large Hadron Collider (LHC), is described in Sect. 2. Elements of the data analysis, such as event selection, tracking of charged particles, identification of interaction vertices, and treatment of

# Nagy együttműködések – szerzőség?

Correlations between forward and central jets	 FSQ-12-008	2010	TOP2013	www	hn	ARC-GreenLight	show 4 members	no IRC		show
<b>Journal: JHEP</b>   <i>Investigation of BFKL, DGLAP, non-global and super-leading logs effects</i>   <b>Notes: AN-2011/199</b>										
Study of exclusive Z photoproduction and high-mass e+e- & mu+mu- ...	 FSQ-12-009	2011			hn	AWG	no ARC	no IRC		show
<b>Journal: PLB</b>   <i>Study of exclusive channels gamma-gamma -&gt; e+e-, mu+mu- and gamma-Pomeron -&gt; Z</i>										
Study of exclusive gamma-gamma -> W W	 FSQ-12-010	2011	Moriond2013	www	hn	PUB	show 5 members	show 3 readers	 	show
<b>Journal: JHEP</b>   <i>Study of exclusive high-mass gamma-gamma -&gt; e,mu channels: QED di-tau &amp; anomalous quartic-gauge couplings in gamma-gamma-&gt;W W</i>   <b>Notes: AN-2012/112</b>   <b>CDS Record: 1518733</b>   <b>CERN preprint: CERN-PH-EP-2013-084</b>										
Measurement of exclusive chi_c production	 FSQ-12-011	2010			hn	AWG	no ARC	no IRC		show
<b>Journal: PRL</b>   <i>Measurement of exclusive chi_c production</i>										
Double-Parton-Scattering in Z->mumu events at 7 TeV	 FSQ-12-012	2010		www	hn	AWG	no ARC	no IRC		show
<b>Journal: EPJC</b>   <i>Double-Parton-Scattering in Z-&gt;mumu events at 7 TeV</i>   <b>Notes: AN-2010/280</b>										
Double-Parton-Scattering in 4j and 2b2j events at 7 TeV	 FSQ-12-013	2010	LP2013	www	hn	PAS-PUB	show 4 members	no IRC		show
<b>Journal: PRD</b>   <i>Double-Parton-Scattering in 4j and 2b2j events at 7 TeV</i>   <b>Notes: AN-2013/092</b>										
Spectra of identified charged hadrons at sqrt(s) = 0.9, 2.76 and ...	 FSQ-12-014	2010		www	hn	PUB	show 5 members	show 5 readers	 	show
<b>Journal: EPJC</b>   <i>Spectra of identified charged hadrons at sqrt(s) = 0.9, 2.76 and 7 TeV via tracker energy loss</i>   <b>Notes: AN-2010/143</b>   <b>CDS Record: 1434724</b>   <b>CERN preprint: CERN-PH-EP-2012-202</b>										
Forward-backward multiplicity correlations	 FSQ-12-015	2010			hn	Inactive	no ARC	no IRC		show
<i>Forward-backward multiplicity correlations</i>										
Charged particle multiplicities in inelastic pp collisions	 FSQ-12-016	2010		www	hn	AWG	no ARC	no IRC	 	show
<b>Journal: EPJC</b>   <i>Charged particle multiplicities in inelastic pp collisions</i>   <b>Notes: AN-2011/493</b>										
Double Parton Scattering in 3jet + gamma events at 7 TeV	 FSQ-12-017			www	hn	AWG	no ARC	no IRC		show
<i>Double Parton Scattering in 3jet + gamma events at 7 TeV</i>   <b>Notes: AN-2013/017</b>										
Measurement of exclusive Upsilon photoproduction	 FSQ-12-018	2011	TOP2013	www	hn	AWG	show 4 members	no IRC		show
<i>Measurement of exclusive Upsilon photoproduction</i>   <b>Notes: AN-2013/147</b>										
EWK production of Z bosons with Forward/Backward Jets	 FSQ-12-019	NONE		www	hn	SUB	show 5 members	show 6 readers	 	show
<b>Journal: JHEP</b>   <i>EWK production of Z bosons with Forward/Backward Jets (including VBF Z production)</i>   <b>Notes: AN-2012/092, AN-2012/263</b>   <b>CDS Record: 1493475</b>   <b>CERN preprint: CERN-PH-EP-2013-060</b>										
Measurement of the UE activity using leading tracks in p-p at 7 TeV	 FSQ-12-020	2010		www	hn	PAS-PUB	show 4 members	no IRC		show
<b>Journal: JHEP</b>   <i>Measurement of the underlying event activity using leading tracks in p-p at 7 TeV</i>   <b>Notes: AN-2011/349</b>   <b>CDS Record: 1478982</b>										

# Nagy együttműködések – szerzőség?

Name	Code	Data	Conference	URL	HN	Status	ARC_Member
Spectra of identified charged hadrons at $\sqrt{s} = 0.9, 2.76$ and ...	FSQ-12-014	2010		www	hn	PUB	show 5 members
<b>Journal: EPJC</b>   Spectra of identified charged hadrons at $\sqrt{s} = 0.9, 2.76$ and 7 TeV via tracker energy loss   Notes: AN-2010/143   CDS Record: 1434724   CERN preprint: CERN-EP-2012-202							
<b>Journal: PRL</b>   Study of exclusive channels gamma-gamma --> e+e-, mu+mu- and gamma-Pionium --> e+e-							
Study of exclusive gamma-gamma --> W W	FSQ-12-010	2011	Moriond2013	www	hn	PUB	show 5 members show 3 readers   show
<b>Journal: JHEP</b>   Study of exclusive high-mass gamma-gamma --> e, mu channels: QED di-tau & anomalous quartic-gauge couplings in gamma-gamma-->W W   Notes: AN-2012/112   CDS Record: 1518733   CERN preprint: CERN-PH-EP-2013-084							
Measurement of exclusive $\chi_c$ production	FSQ-12-011	2010			hn	AWG	no ARC no IRC show
<b>Journal: PRL</b>   Measurement of exclusive $\chi_c$ production							
Double-Parton-Scattering in Z-->mu mu events at 7 TeV	FSQ-12-012	2010		www	hn	AWG	no ARC no IRC show
<b>Journal: EPJC</b>   Double-Parton-Scattering in Z-->mu mu events at 7 TeV   Notes: AN-2010/280							
Double-Parton-Scattering in 4j and 2b2j events at 7 TeV	FSQ-12-013	2010	LP2013	www	hn	PAS-PUB	show 4 members no IRC  show
<b>Journal: PRD</b>   Double-Parton-Scattering in 4j and 2b2j events at 7 TeV   Notes: AN-2013/092							
Spectra of identified charged hadrons at $\sqrt{s} = 0.9, 2.76$ and ...	FSQ-12-014	2010		www	hn	PUB	show 5 members show 5 readers   show
<b>Journal: EPJC</b>   Spectra of identified charged hadrons at $\sqrt{s} = 0.9, 2.76$ and 7 TeV via tracker energy loss   Notes: AN-2010/143   CDS Record: 1434724   CERN preprint: CERN-EP-2012-202							
Forward-backward multiplicity correlations	FSQ-12-015	2010			hn	Inactive	no ARC no IRC show
<i>Forward-backward multiplicity correlations</i>							
Charged particle multiplicities in inelastic pp collisions	FSQ-12-016	2010		www	hn	AWG	no ARC no IRC   show
<b>Journal: EPJC</b>   Charged particle multiplicities in inelastic pp collisions   Notes: AN-2011/493							
Double Parton Scattering in 3jet + gamma events at 7 TeV	FSQ-12-017			www	hn	AWG	no ARC no IRC show
<i>Double Parton Scattering in 3jet + gamma events at 7 TeV</i>   Notes: AN-2013/017							
Measurement of exclusive Upsilon photoproduction	FSQ-12-018	2011	TOP2013	www	hn	AWG	show 4 members no IRC  show
<i>Measurement of exclusive Upsilon photoproduction</i>   Notes: AN-2013/147							
EWK production of Z bosons with Forward/Backward Jets	FSQ-12-019	NONE		www	hn	SUB	show 5 members show 6 readers   show
<b>Journal: JHEP</b>   EWK production of Z bosons with Forward/Backward Jets (including VBF Z production)   Notes: AN-2012/092, AN-2012/263   CDS Record: 1493475   CERN preprint: CERN-PH-EP-2013-060							
Measurement of the UE activity using leading tracks in p-p at 7 TeV	FSQ-12-020	2010		www	hn	PAS-PUB	show 4 members no IRC  show
<b>Journal: JHEP</b>   Measurement of the underlying event activity using leading tracks in p-p at 7 TeV   Notes: AN-2011/349   CDS Record: 1478982							



# Nagy együttműködések – szerzőség?

Name	Code	Data	Conference	URL	HN	Status	ARC_Member
<b>Analysis Information:</b>							
Analysis Name:	Spectra of identified charged hadrons at sqrt(s) = 0.9, 2.76 and 7 TeV via tracker energy loss						
Code:	FSQ-12-014						
Description:	Spectra of identified charged hadrons at sqrt(s) = 0.9, 2.76 and 7 TeV via tracker energy loss						
URL:	<a href="https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMS/IdentifiedSpectraViaDedx">https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMS/IdentifiedSpectraViaDedx</a>						
Status:	PUB (Published)						
Contact:	<a href="#">Ferenc Sikler (BUDAPEST)</a>						
ARC:	<a href="#">Michele Arneodo (TORINO)</a> (LE), <a href="#">Giacomo Bruno (LOUVAIN)</a> , <a href="#">Matthew Timothy Jones (PURDUE)</a> , <a href="#">Hannes Jung (DESY)</a> (Chairperson), <a href="#">Kevin Matthew Stenson (COLORADO)</a>						
PAS:	<a href="http://cms-physics.web.cern.ch/cms-physics/public/FSQ-12-014-pas.pdf">http://cms-physics.web.cern.ch/cms-physics/public/FSQ-12-014-pas.pdf</a>						
target Date Pre_App:	02/02/2012						
target Date Phy_App:	19/03/2012						
target Conference:							
target Journal:	EPJC						
target Date Pub:							
Awg Name:	FSQ						
CDS Record:	<a href="#">1434724</a>						
CERN preprint:	CERN-PH-EP-2012-202						
samples:							
notes:	<a href="#">2010/143</a>						
Remarks:							

# Nagy együttműködések – szerzőség?

Name	Code	Data	Conference	URL	HN	Status	ARC_Membe		
Analysis Information:							in	PUB	show 5 mem
Analysis	<b>CMS AN-2010/143</b>							-2010/143   CDS Re	
Code:									
Descript	<b>Title:</b> Spectra of identified charged hadrons at $\sqrt{s} = 0.9, 2.76$ and 7 TeV via tracker energy loss								
URL:	<b>Most Recent File Version:</b> <a href="#">AN2010_143_v10.pdf</a>								
Status:	<b>URL:</b> <a href="#">AN2010_143_v5.pdf</a>								
Contact:	<a href="#">AN2010_143_v1.pdf</a>								
ARC:	<a href="#">AN2010_143_v7.pdf</a>								
PAS:	<a href="#">AN2010_143_v6.pdf</a>								
target Da	<a href="#">AN2010_143_v10.pdf</a>								
target Da	<a href="#">AN2010_143_v2.pdf</a>								
target Da	<a href="#">AN2010_143_v9.pdf</a>								
target Da	<a href="#">AN2010_143_v4.pdf</a>								
target Da	<a href="#">AN2010_143_v3.pdf</a>								
target Da	<a href="#">AN2010_143_v8.pdf</a>								
target Co	<b>Submitter:</b> Ferenc Sikler								
target Jo	<b>Authors:</b> Ferenc Sikler								
target Da	<b>Abstract:</b> Measured spectra of identified charged hadrons produced in double-sided pp collisions at $\sqrt{s} = 0.9, 2.76$ and 7 TeV are presented. The charged pions, kaons and protons are identified with help of their energy loss in the silicon tracker (pixels and strips), and using their track fit $\chi^2$ . The obtained $p_T$ spectra and integrated yields are compared to models. The multiplicity and energy dependence of the above quantities are also studied.								
Awg Nar									
CDS Re									
CERN p	<b>Status:</b> DRAFT								
samples	<b>Registered on:</b> 2010/05/26 13:50:07								
notes:	<b>Last updated on:</b> 2012/03/06 09:18:05								
Remarks:	<a href="#">2010/143</a>								

# Nagy együttműködések – szerzőség?

Name	Code	Data	Conference	URL	HN	Status	ARC_Membe		
<b>Analysis Information:</b>							in	PUB	show 5 mem
Analysis	<b>CMS AN-2010/143</b>							-2010/143   CDS Re	
Code:									
Descript	<b>Title:</b> Spectra of identified charged hadrons at $\sqrt{s} = 0.9, 2.76$ and 7 TeV via tracker energy loss								
URL:	<b>Most Recent File Version:</b> AN2010_143_v10.pdf								
Status:	<b>URL</b>								
Contact:	Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 691 (2012) 16–29								
ARC:	Contents lists available at SciVerse ScienceDirect								
PAS:	 <b>Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A</b>								
target Da	journal homepage: <a href="http://www.elsevier.com/locate/nima">www.elsevier.com/locate/nima</a>								
target Da									
target Co	<b>Subn</b>								
target Jo	<b>Auth</b>								
target Da	<b>Abstr</b>								
Awg Nar	0.9, 2								
CDS Re	loss in								
CERN p	integr								
samples	studie								
notes:	<b>Statu</b>								
Remarks:	<b>Regis</b>								
	<b>Last</b>								

## A parametrization of the energy loss distributions of charged particles and its applications for silicon detectors

Ferenc Siklér\*

*Wigner RCP Institute for Particle and Nuclear Physics, Budapest, Hungary*

---

**ARTICLE INFO**

*Article history:*  
 Received 4 June 2012  
 Received in revised form 27 June 2012  
 Accepted 27 June 2012  
 Available online 7 July 2012

---

*Keywords:*  
 Energy loss  
 Silicon

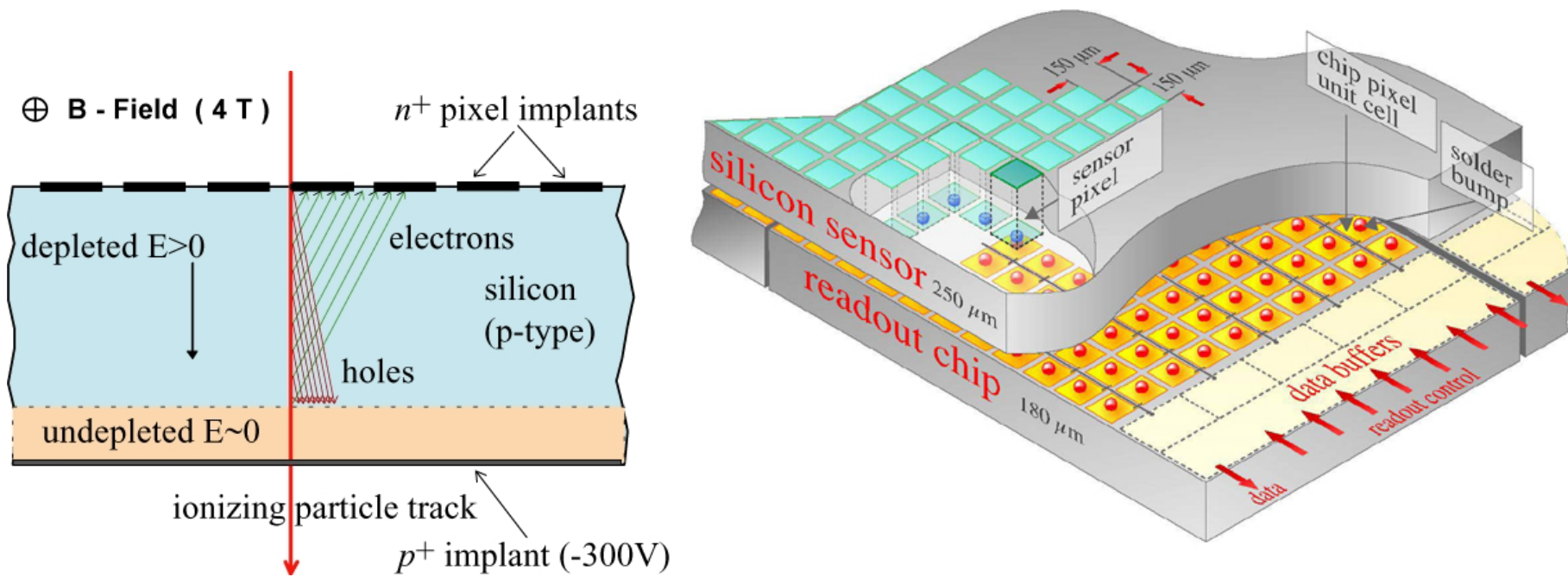
**ABSTRACT**

The energy loss distribution of charged particles in silicon is approximated by a simple analytical parametrization. Its use is demonstrated through several examples. With the help of energy deposits in sensing elements of the detector, the position of track segments and the corresponding deposited energy are estimated with improved accuracy and less bias. The parametrization is successfully used to estimate the energy loss rate of charged particles, and it is applied to detector gain calibration tasks.

© 2012 Elsevier B.V. All rights reserved.



# Nyomkövető detektor



- Szilícium alapú nyomkövető rendszer

- Pixel detektor: n-on-n; három hordó-réteg (4, 7 és 10 cm-es sugarakkal), és két végsapka-korong mindkét oldalán; 300 μm vastag  
1440 modul; 150 μm × 100 μm pixelek
- Strip detektor: p-in-n; néhány rétege dupla; 300 és 500 μm vastag  
15 148 modul; a csíkok változó szélességűek (80–150 μm)

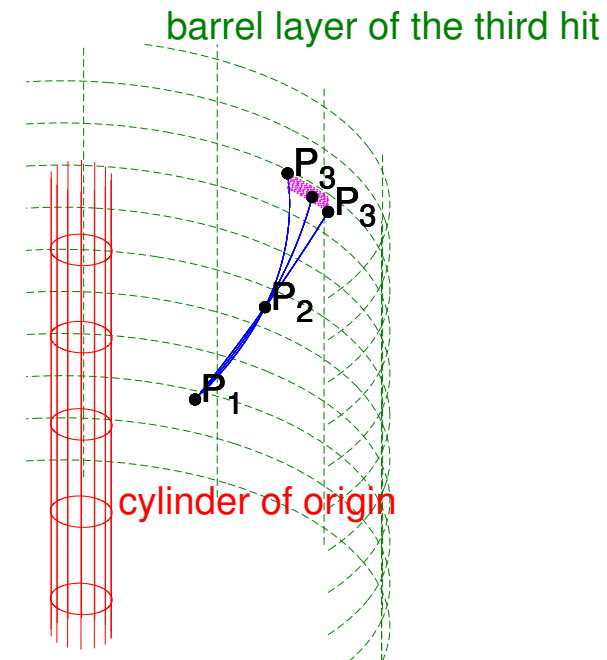
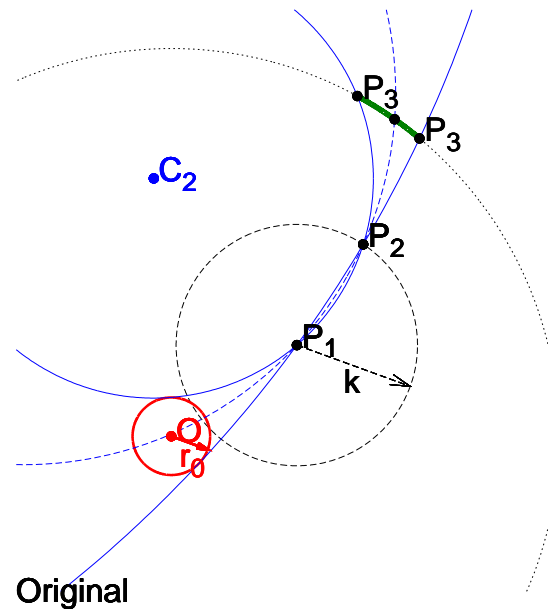
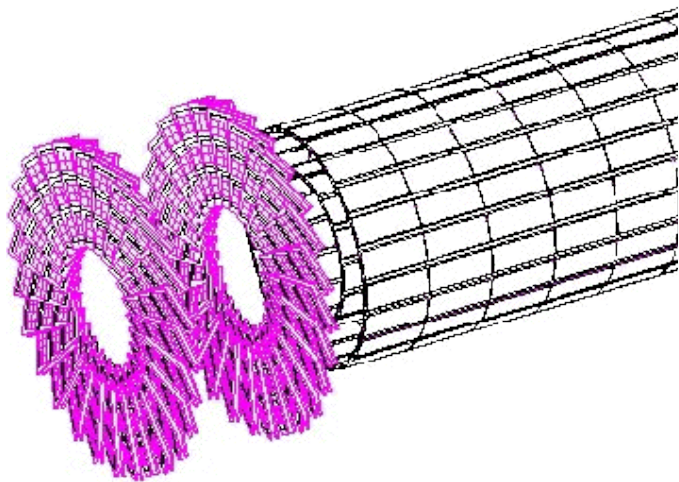
Klaszterek: szomszédos, számottevő energialeadású pixelek/csíkok csoportjai

# Kis impulzusú nyomkövetés

Vannak érdekes részecskék  $1 \text{ GeV}/c$  alatt? Persze. . .

- Ponthármasok keresése

- vegyünk pontokat az első és a második hengerről ( $P_1$  és  $P_2$ )
- két határoló kört keresünk, melyek átmennek  $O$ ,  $P_1$  és  $P_2$ -n
- inverzió  $P_1$  középponttal és  $k = P_1P_2$  sugárral
- megoldás a  $P_3 - P_3$  íven



Int J Mod Phys E 16 (2007) 1819, J Phys G 35 (2008) 104150 [CMS AN-2006/100]

Működik egészen  $0,1$ ,  $0,2$  és  $0,3 \text{ GeV}/c$ -ig pionokra, kaonokra és protonokra

# Alacsony tévesztésű nyomkövetés

- Probléma

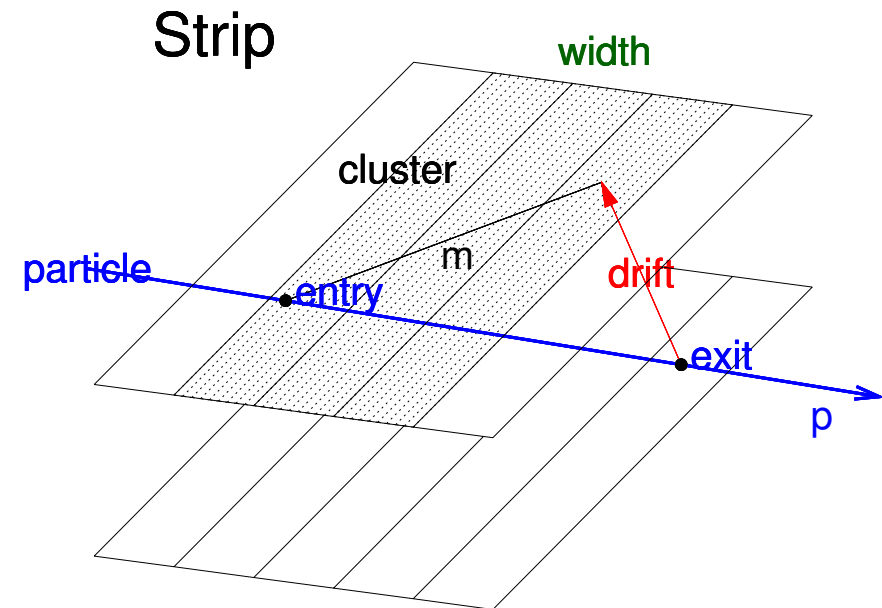
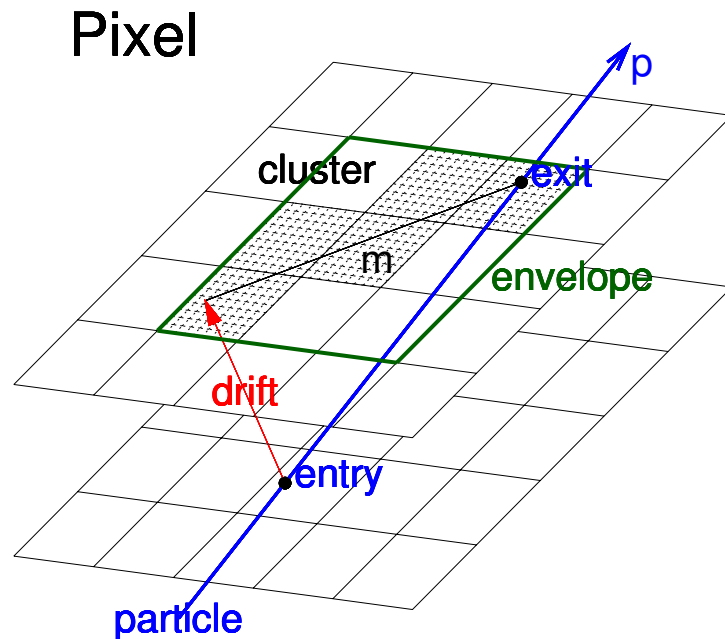
- túl sok beütés, melyik pont melyik részecskéhez tartozik?

- Segítség

- töltött részecske  $\rightarrow$  leadott energia  $\rightarrow$  klaszter

- a szilícium vastag ( $\approx 300 \mu\text{m}$ ), a pixelek méretei  $150 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$

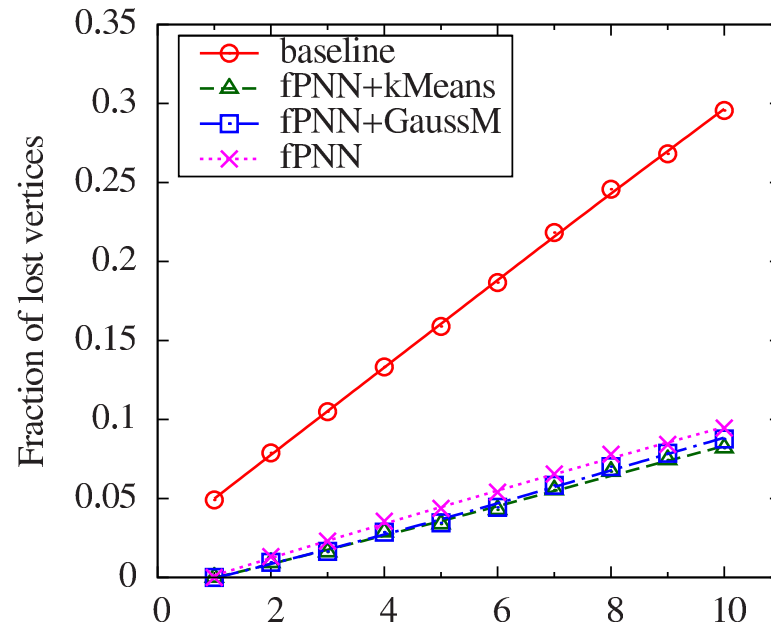
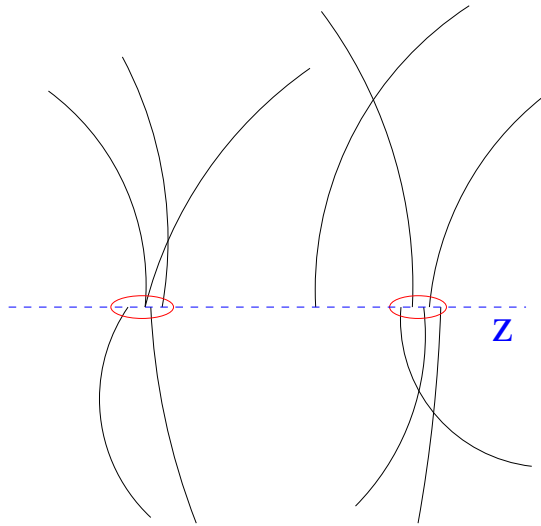
- a klaszterek alakja szoros kapcsolatban van a bejövő részecske irányával



Int J Mod Phys E 16 (2007) 1819, J Phys G 35 (2008) 104150 [CMS AN-2006/100]

Hatékony szűrő

# Kölcsönhatási pontok javított keresése



Nucl Instrum Meth A 621 (2010) 526

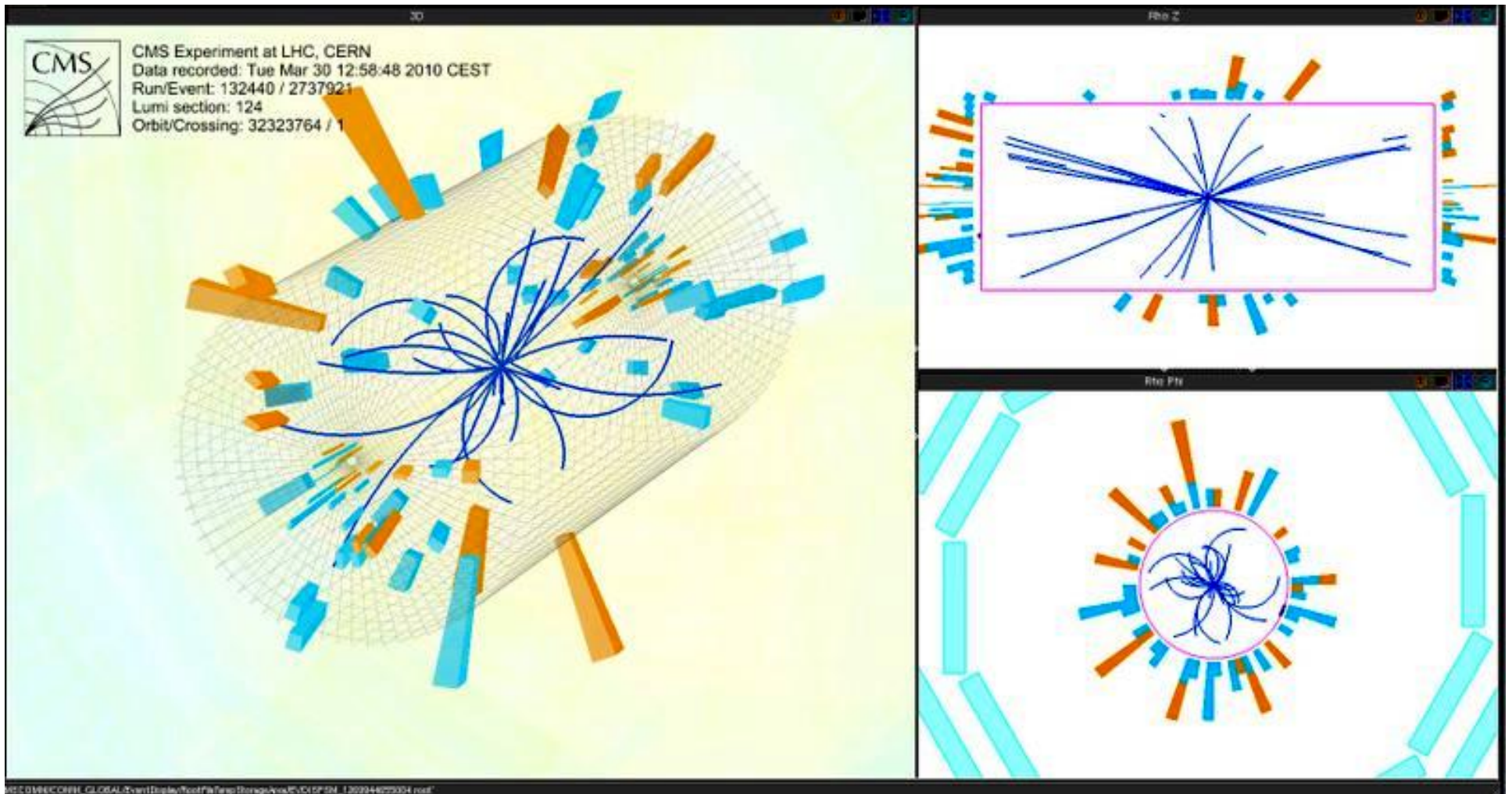
A részecskék nyalábközpontjának  $z$  koordinátáját és annak becsült  $\sigma_z$  hibája

- **Összevonó klaszterezés**

- két részecske  $d$  távolsága:  $d^2 = (z_i - z_j)^2 / (\sigma_i^2 + \sigma_j^2)$
- minden lépésben megkeressük a két legközelebbi klasztert ( $d_{\min}$ ) és egyesítjük
- az új klaszter  $z$ -je és  $\sigma$ -ja a két klaszter súlyozott átlaga
- addig folytatjuk, amíg  $d_{\min}$  túl nagy nem lesz

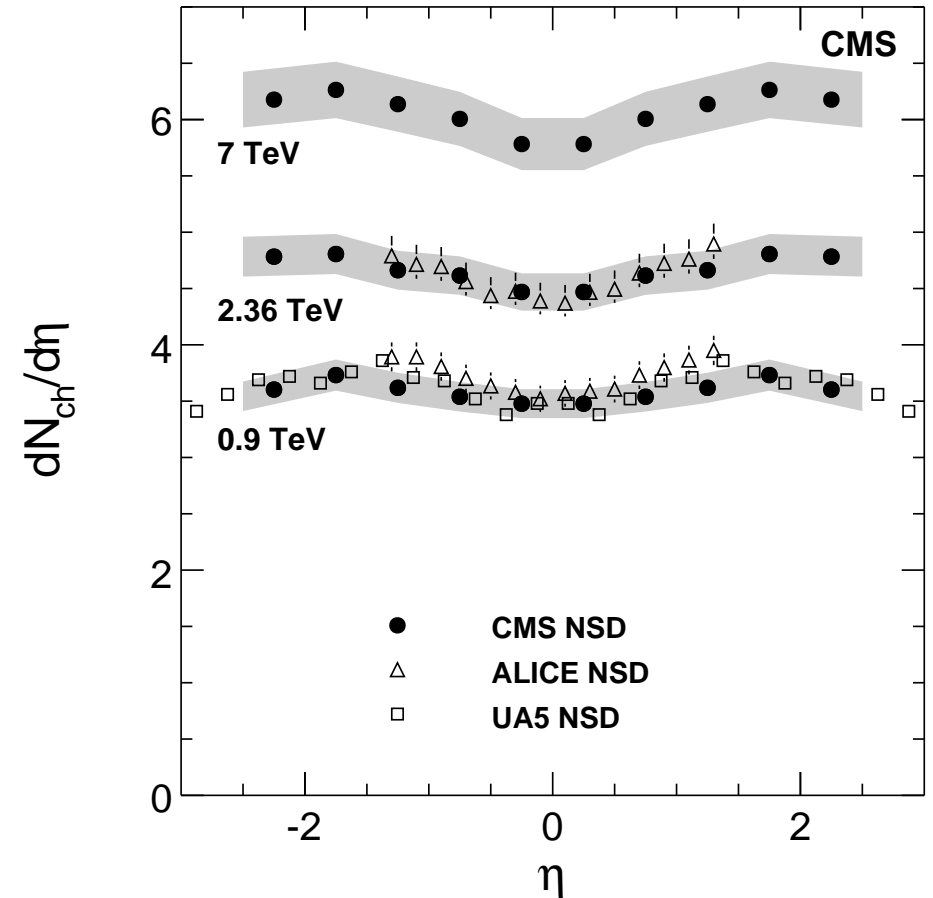
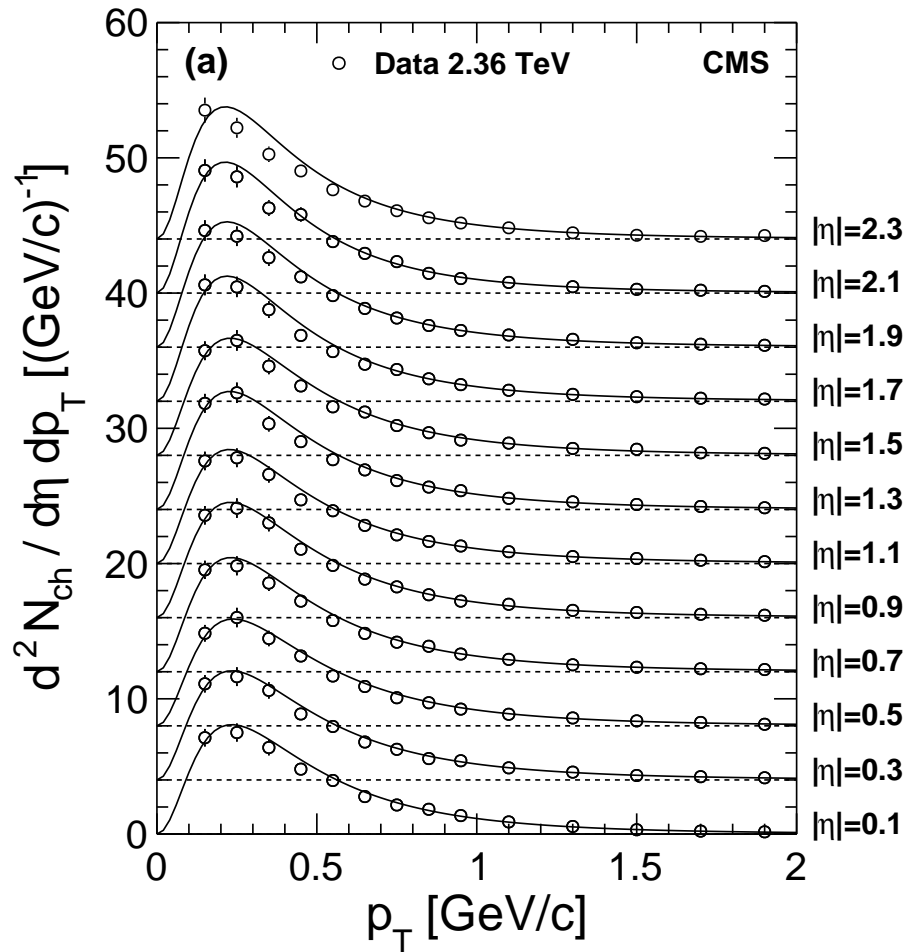
Jobb hatásfok, kisebb tévesztés

# Töltött hadronok eloszlásai



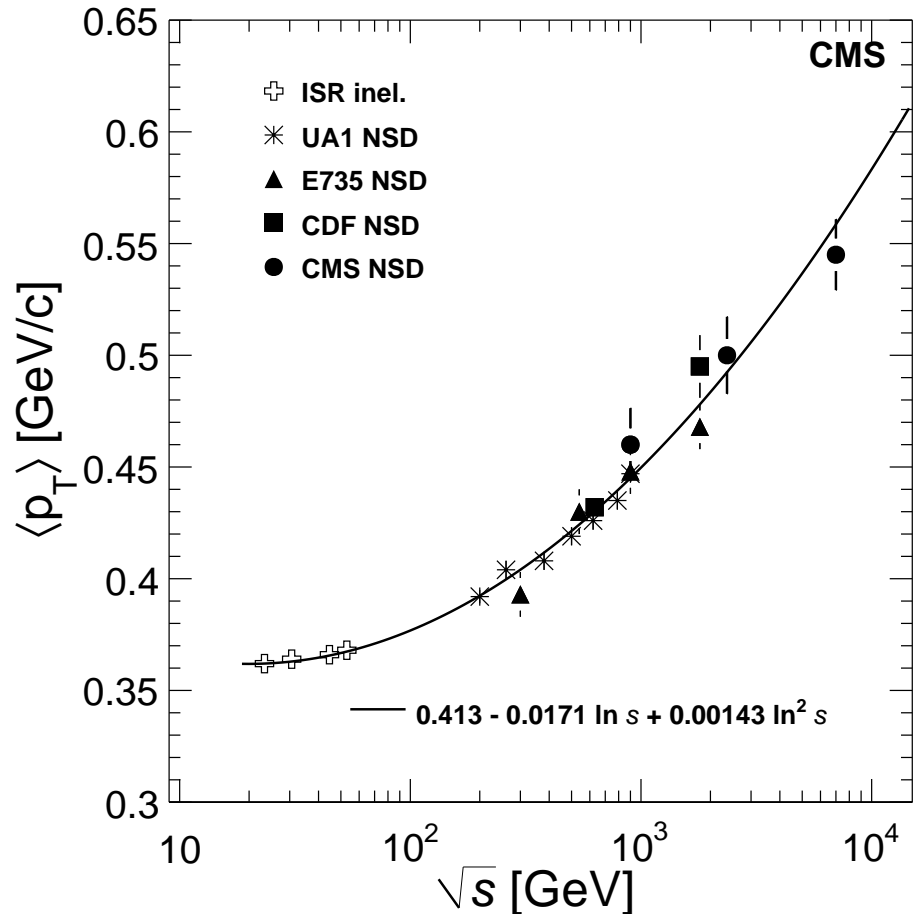
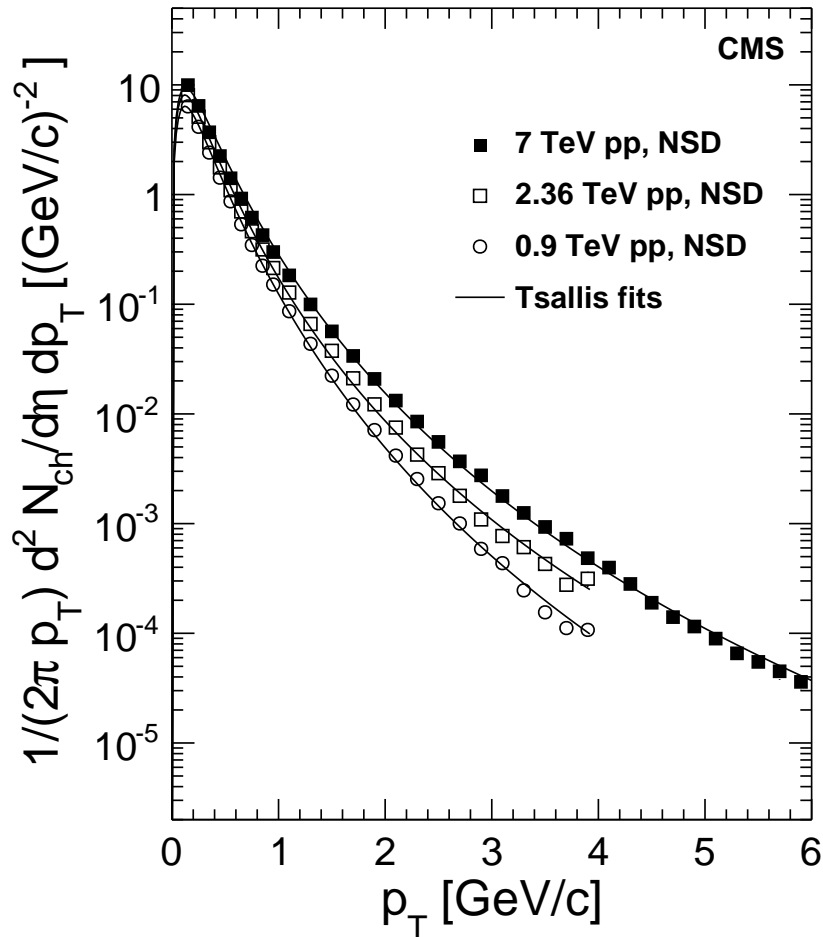
Egy rekonstruált  $\sqrt{s} = 7$  TeV-es proton-proton ütközés

# Töltött hadronok eloszlásai



Gyors kiértékelés, differenciális spektrumok, 3 módszer  
Kis  $p_T$ -n is működő nyomkövetés, vertexek keresése  
Mérések 0,9, 2,36 és 7 TeV-en

# Töltött hadronok eloszlásai

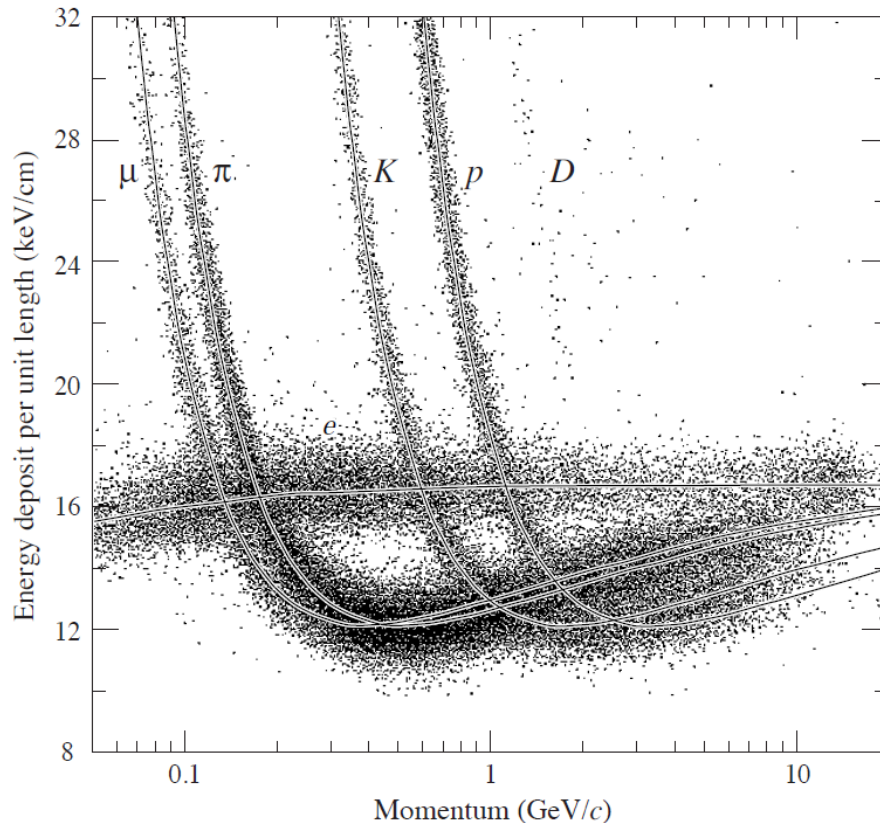


Első impulzusmérés, első 2,36 TeV-es mérés

A vártnál meredekebb energiafüggés:  $dN/d\eta$  és  $\langle p_T \rangle$

Eseménygenerátorok javítása, gluon-telítéses modellek sikere

# Részecskeazonosítás – energiaveszteség



- Miért érdekes, mit tudunk?

- milyen részecske?
- a leadott energia sebességfüggő
- Bethe-Bloch görbe
- egy részecskét több pontban mérünk, sok  $m_i = \Delta E_i / \Delta x_i$  érték, nagy szórással

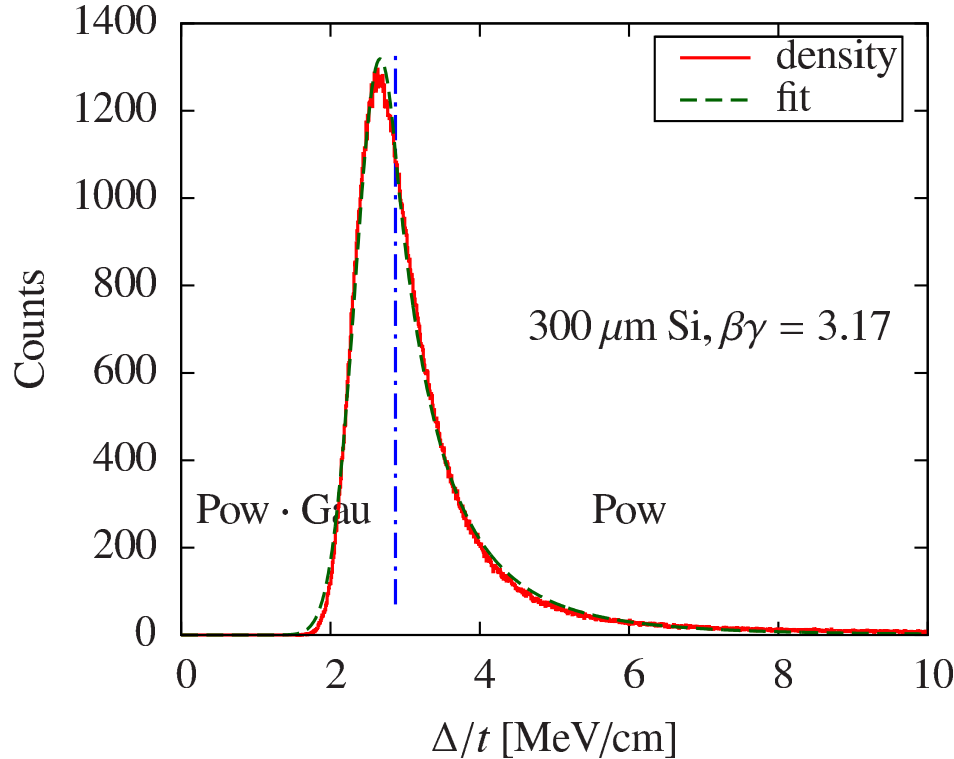
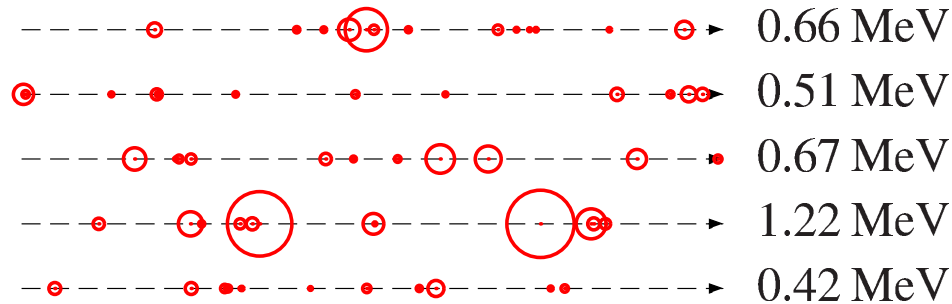
- Hogyan?

- nézzük a sorbarendezett  $m_i$  értékek ( $m_i \leq m_{i+1}$ ) súlyozott átlagát
- levágott átlagolás: eldobjuk a nagy energialeadásokat

Lehet okosabban? Keressünk olyan  $w_i$  súlyokat, ahol a relatív felbontás a legkisebb!



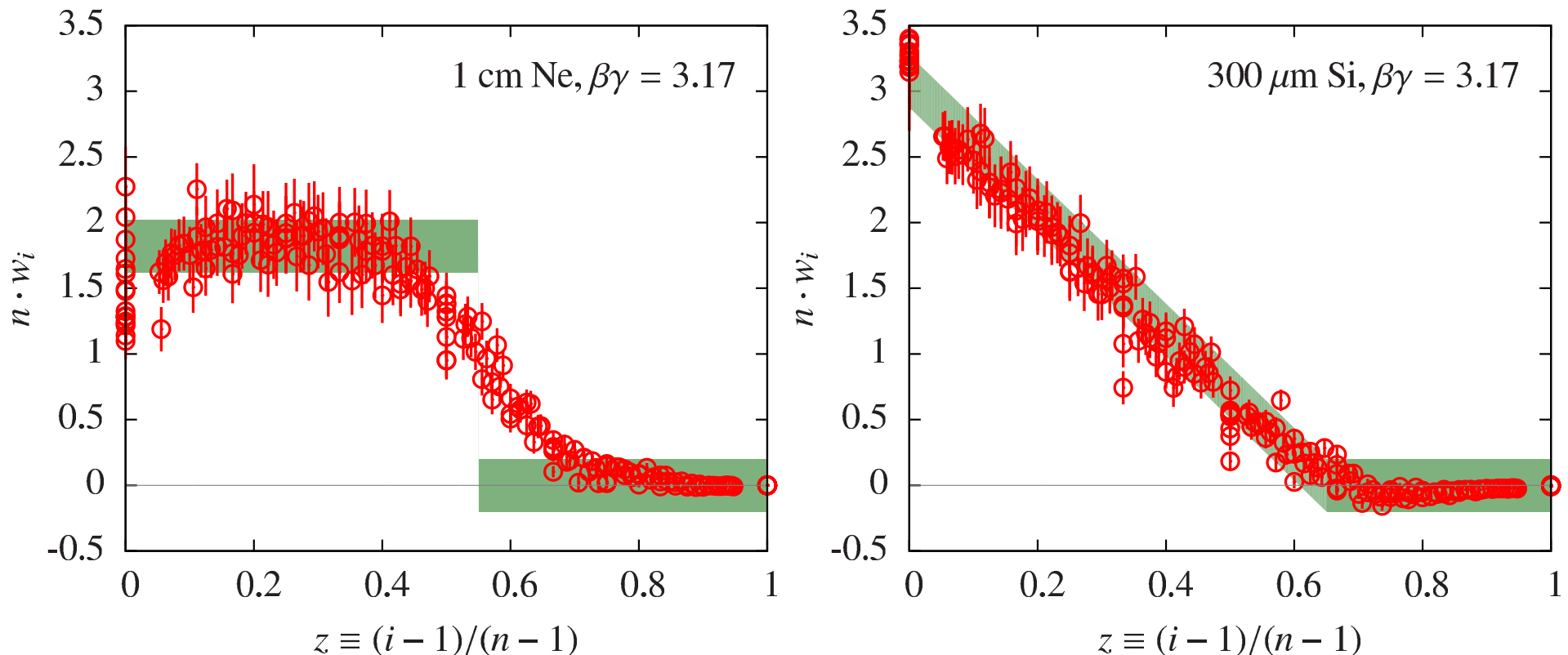
# Energiavesztés-ráta becslése – lineáris kombináció



Melyek az optimális súlyok? Si és Ne,  $\beta\gamma$ , vastagság

- Töltött részecske áthaladása anyagon
  - Bonyolult folyamat, gerjesztések, szórások,  $1/\Delta E^2$
  - Az üküzések energiaspektruma: Bethe-Fano (Si), Fermi virtuális foton (Ne) közelítés
  - Hosszú farkú eloszlás, hogyan értékeljük ki, pl kevés beütésnél?
- A pálya mentén  $\Delta E_i/\Delta x_i$  értékek
  - Levágott átlagolás, (0,50%)
  - Hatványátlagok
  - Súlyozott átlagolás
  - ⇒ Analitikus modell, MLE

# Energiaveszteség-ráta becslése – lineáris kombináció



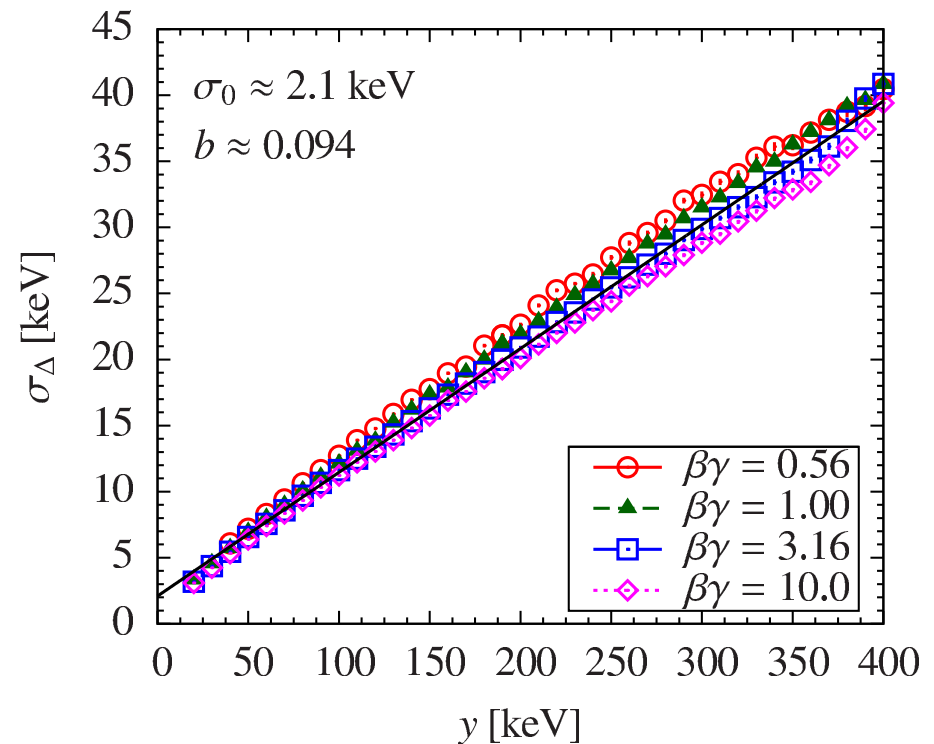
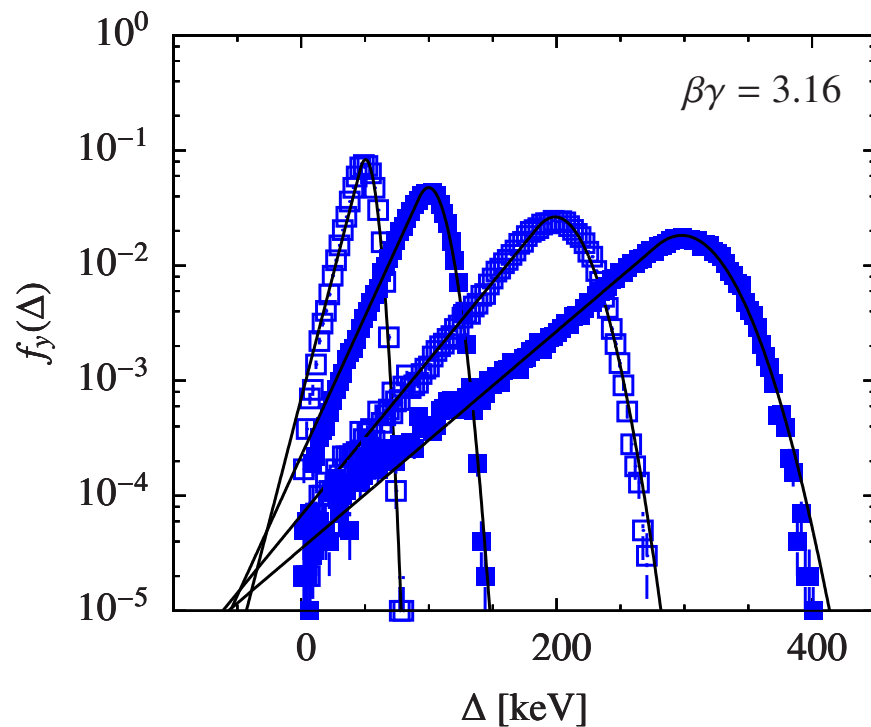
## • Optimális súlyok

- Variációs feladat, megoldása  $\mathbf{w} = \frac{\mathbf{V}^{-1}\mathbf{m}}{\mathbf{1}^T\mathbf{V}^{-1}\mathbf{m}}$ , a relatív felbontás  $\frac{1}{\sqrt{\mathbf{m}^T\mathbf{V}^{-1}\mathbf{m}}}$
- $\beta\gamma$ - és vastagság-függetlenek, a nagy energiájú beütések nem fontosak
- Si: egy 0,65 végű lineáris eloszlás a legjobb, MLE-vel sem javítható
- Szoros kapcsolat az energia eloszlások helyi alakjával  
hatvány: 0; exp\*Gauss: állandó, exp\*hatvány: lineáris

Nucl Instrum Meth A 687 (2012) 30

Kisebb javulás Ne-ra, jelentős Si-ra

# Egy energiaveszteség parametrizáció



- A legvalószínűbb  $\Delta$  energiaveszteség

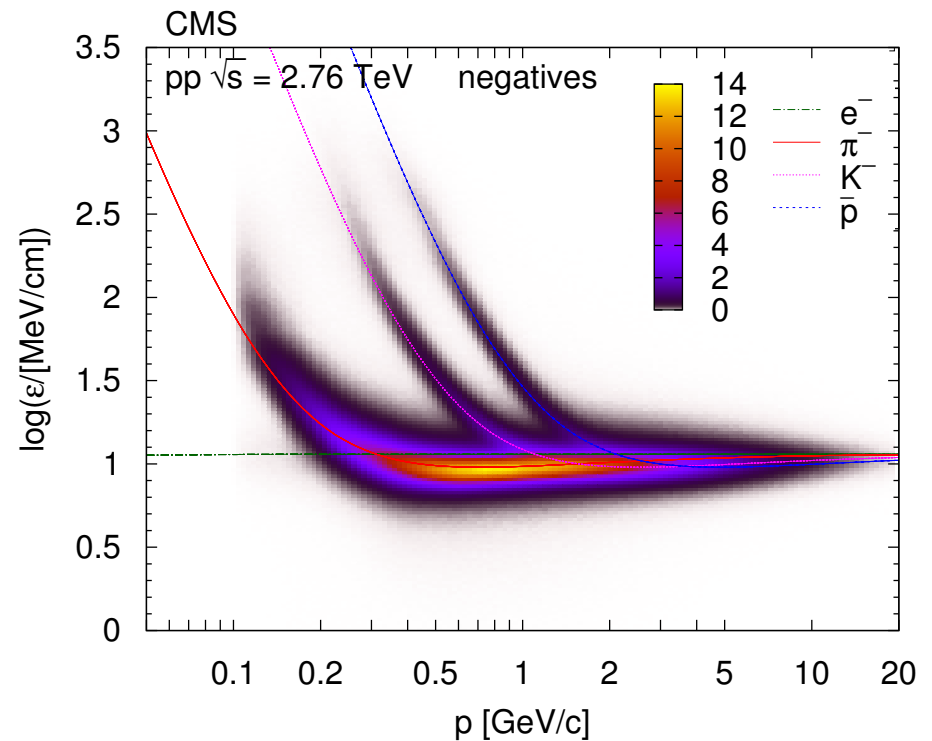
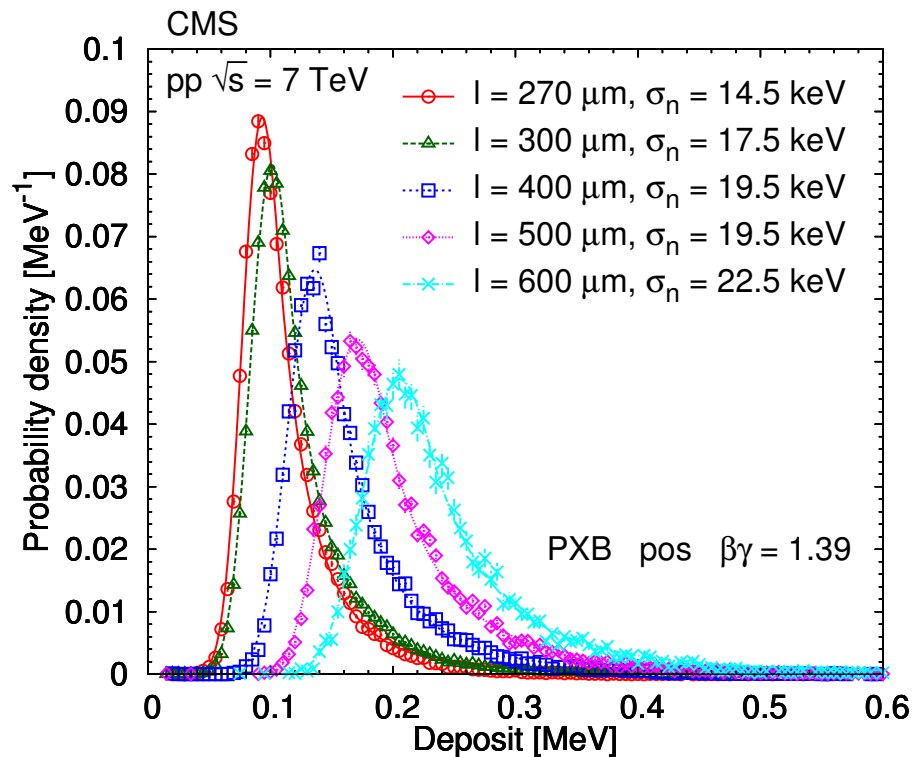
$$\Delta(l) \approx \varepsilon l [1 + a \log(l/l_0)]$$

- Annak a valószínűsége, hogy a beütés energiája  $y$ , expo és Gauss-os részek

$$p(y|\varepsilon, l) \approx \frac{1}{\sigma_{\Delta}} \cdot \begin{cases} \exp \left[ \frac{\nu(\Delta - y)}{\sigma_{\Delta}(y)} + \frac{\nu^2}{2} \right], & \text{ha } \Delta < \Delta^* \\ \exp \left[ -\frac{(\Delta - y)^2}{2\sigma_{\Delta}^2(y)} \right], & \text{ha } \Delta \geq \Delta^*. \end{cases}$$

Egyszerű, de pontos, gyors MLE alkalmazás

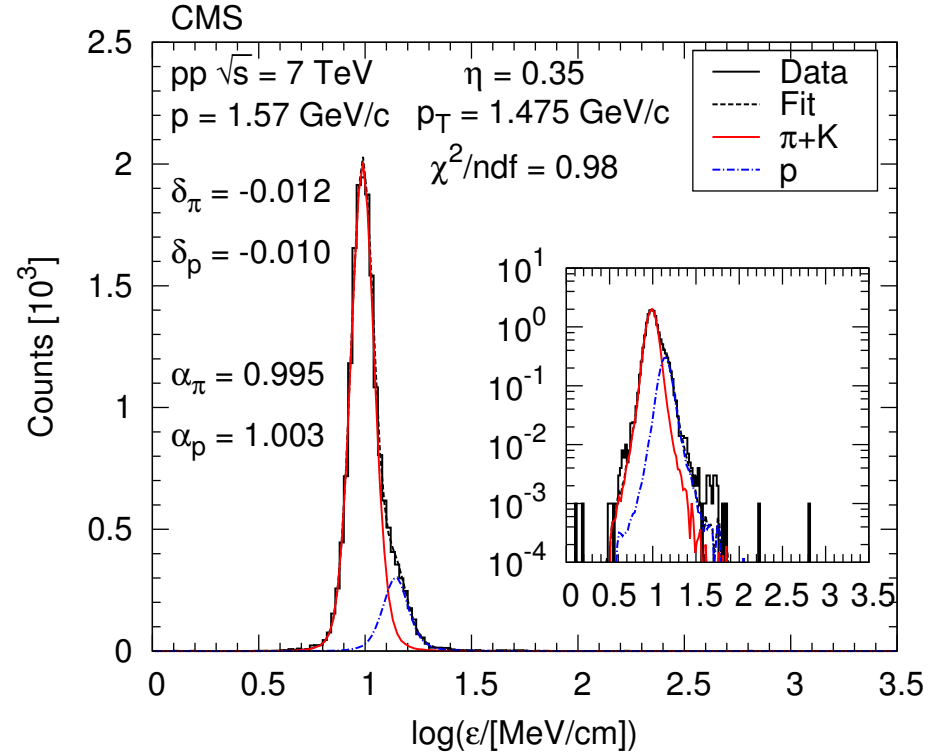
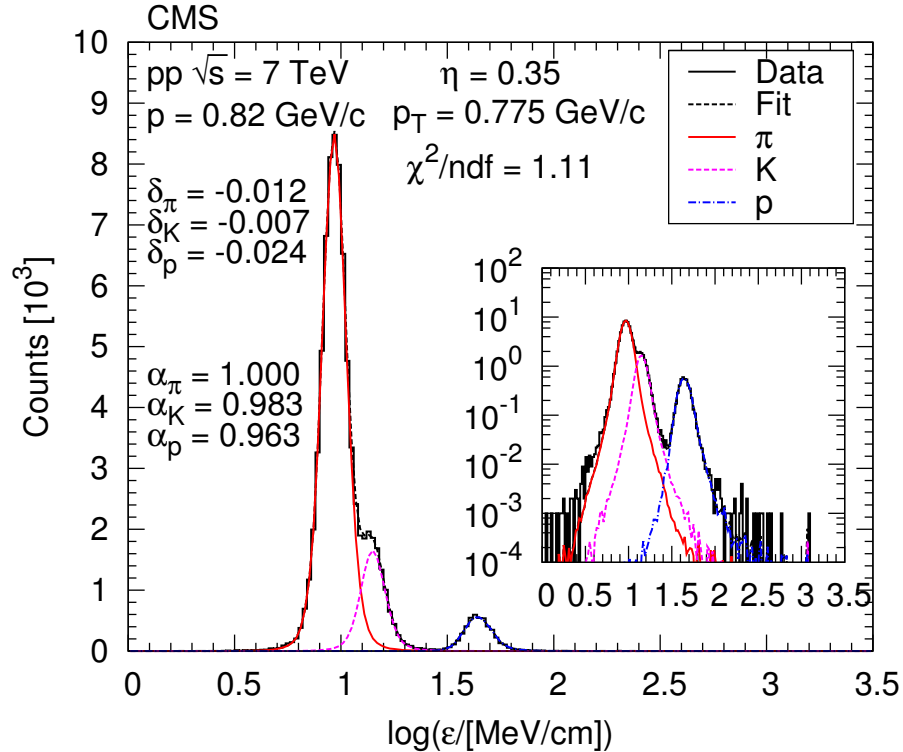
# Energiaveszteség-ráta becslése és használata



## • CMS alkalmazások

- A detektor kiolvasó chipjeinek erősítéskalibrációja
- A modell ellenőrzése mért adatokkal
  - \* az egyezés általában nagyon jó, az analitikus parametrizáció sikeres
- $\log \epsilon$  becslése mindegy egyes részecskepályára
  - \* minimalizáljuk az együttes energiaveszteség  $\chi^2$ -ét egy pályára
  - \* téves beütések eltávolítása (energiaveszteségben kilógnak)

# Energiaveszteség-ráta becslése és használata

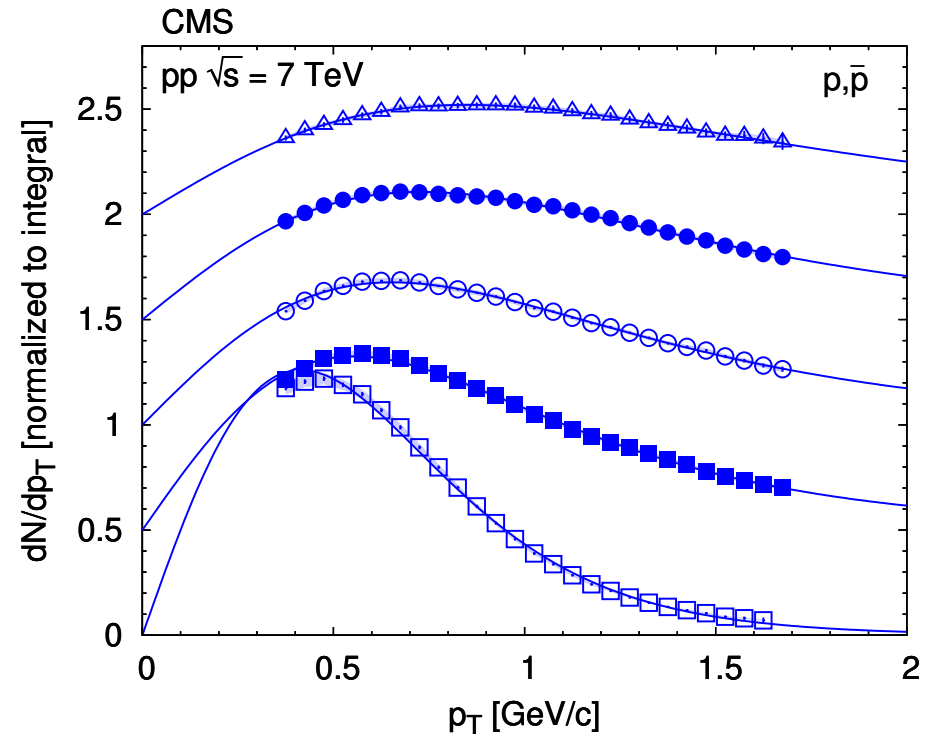
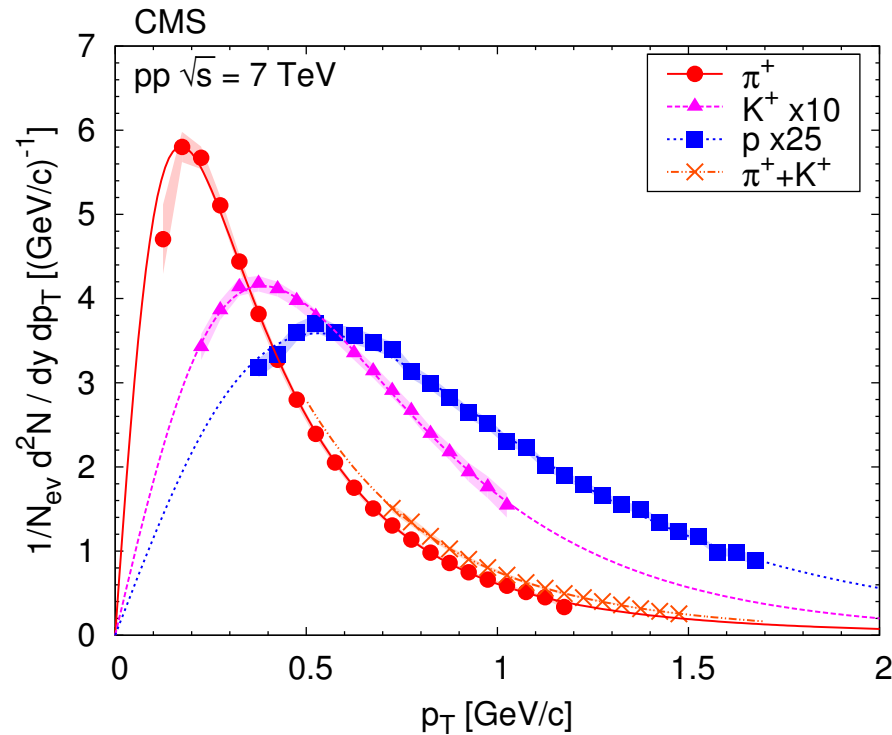


[CMS AN-2010/143]

Template illesztések

Mit mutatnak az adatok?

# Azonosított töltött hadronok – p-p



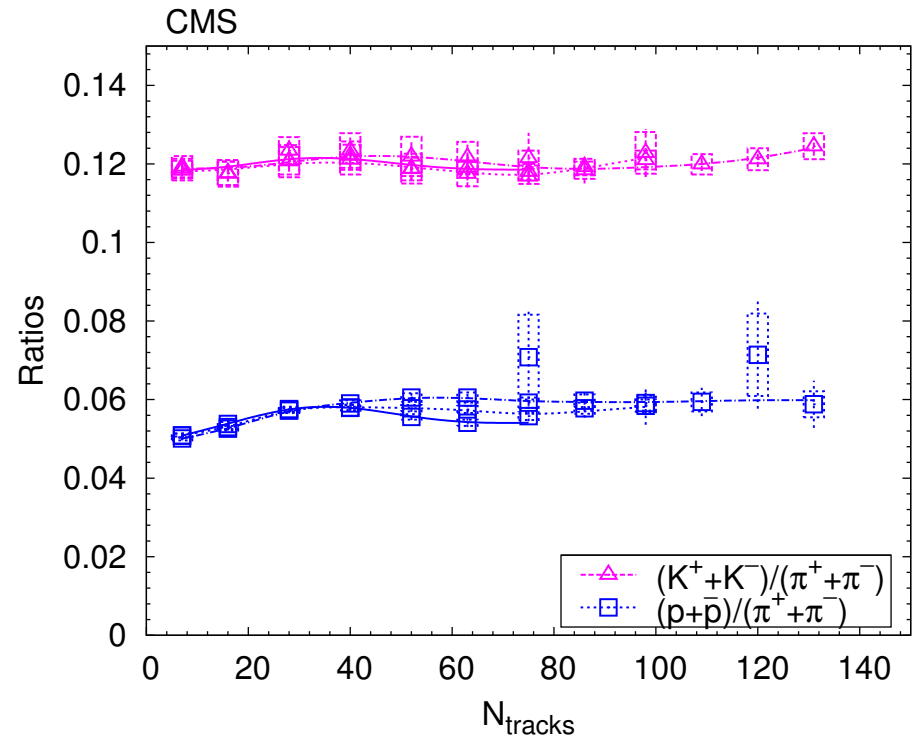
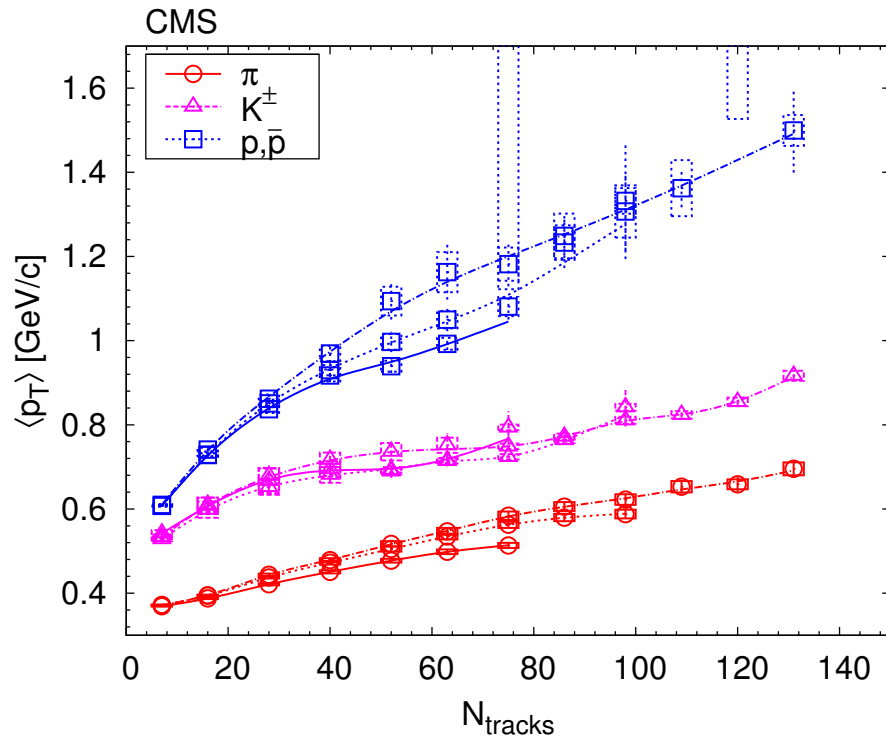
Tsallis-Pareto eloszlás:

$$\frac{d^2N}{dy dp_T} = \frac{dN}{dy} \cdot C \cdot p_T \left[ 1 + \frac{(m_T - m)}{nT} \right]^{-n}$$

Gyökerei a nem-extenzív statisztikában

$n$  – kitevő,  $T$  – meredekség reciproka,  $m$  – részecsketömeg

# Azonosított töltött hadronok – 0,9, 2.76 és 7 TeV-en

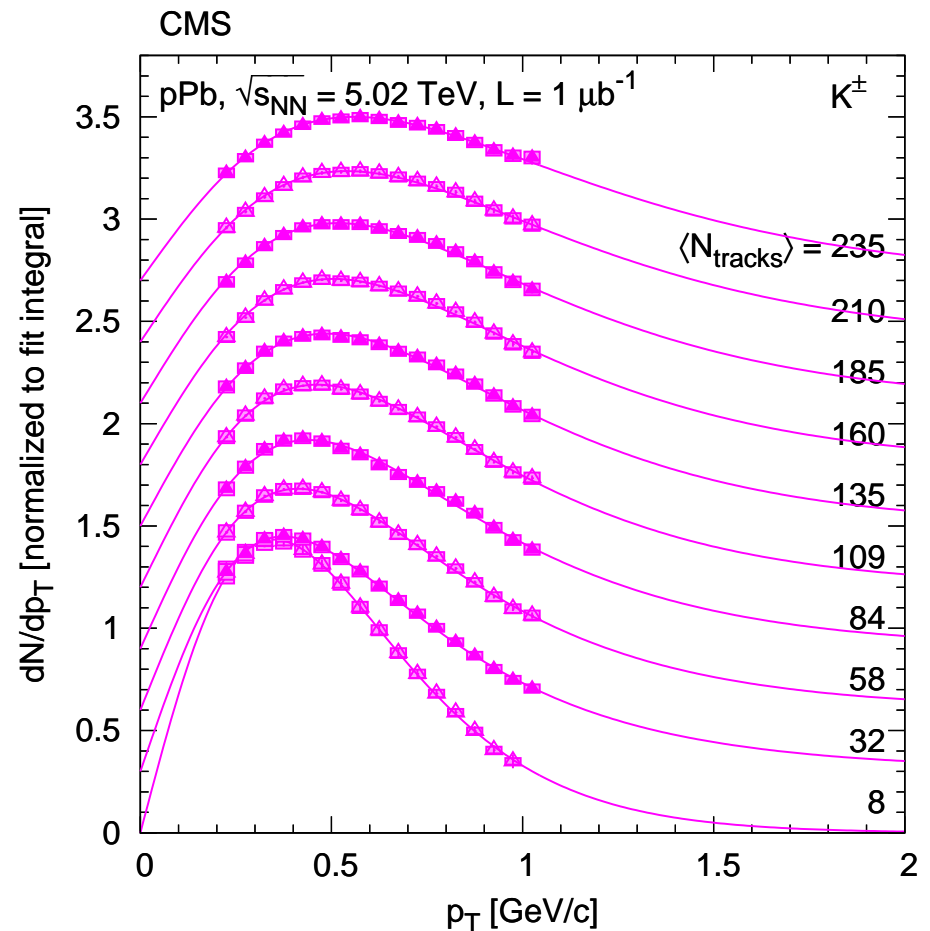
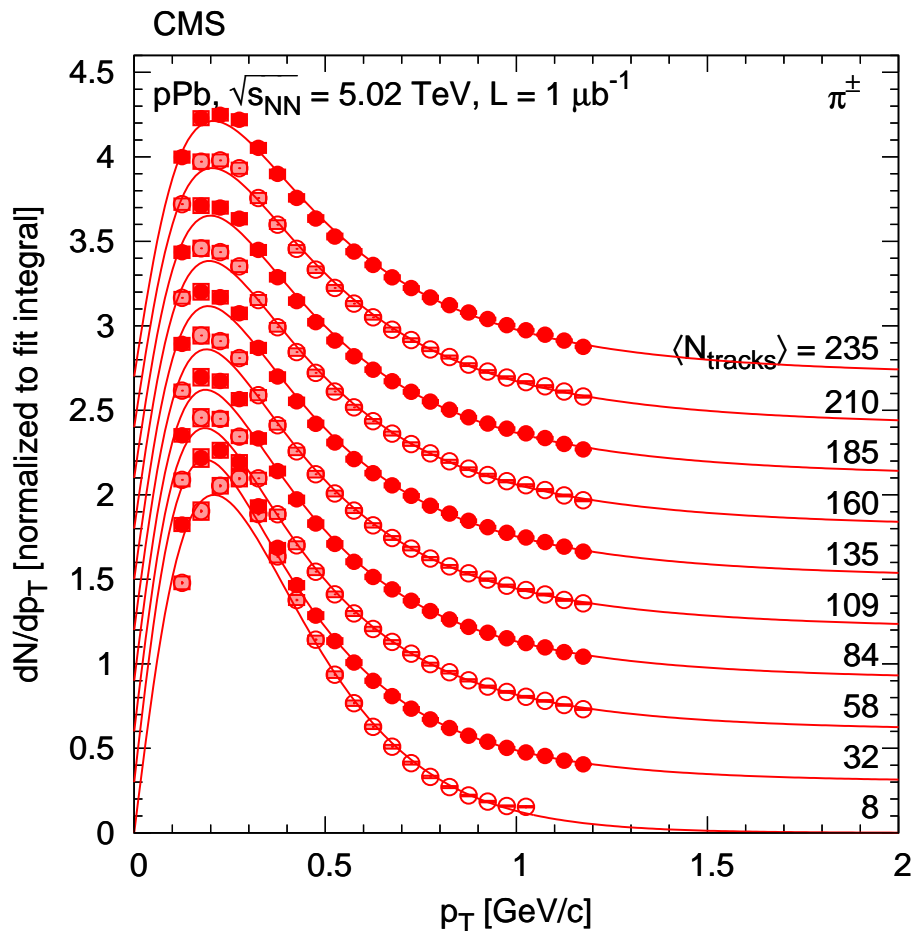


Eur Phys J C 72 (2012) 2164 [CMS AN-2010/143]

A részecskeszám-függés mindhárom energián nagyon hasonló  
Energiafüggetlen? A  $\langle p_T \rangle$  és hadron-arányok univerzális függése?

A részecskekeltés tulajdonságait a rendelkezésre álló  
partonok kezdeti energiája határozza meg

# Bonyolítsuk: p-Pb ütközések



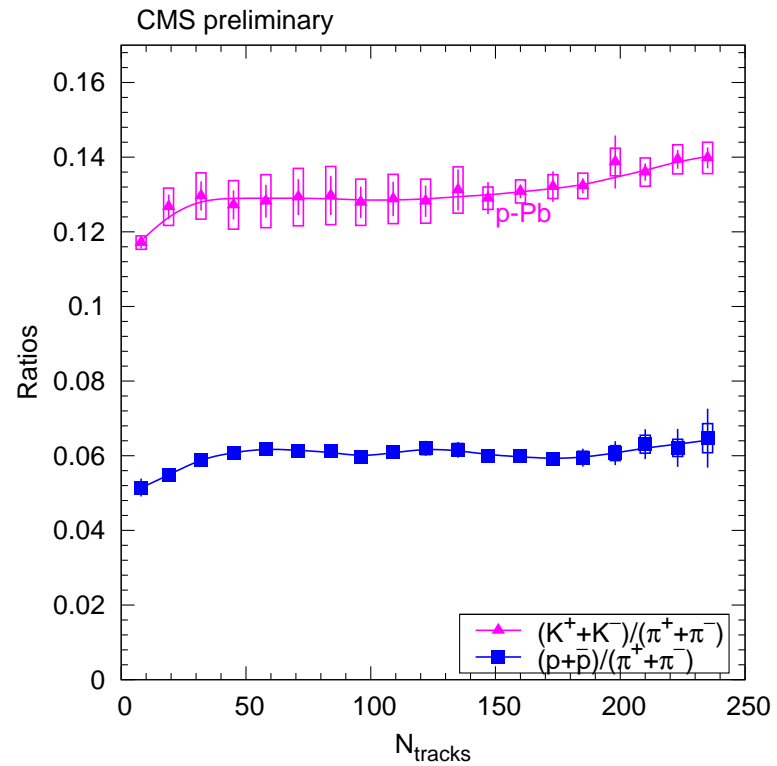
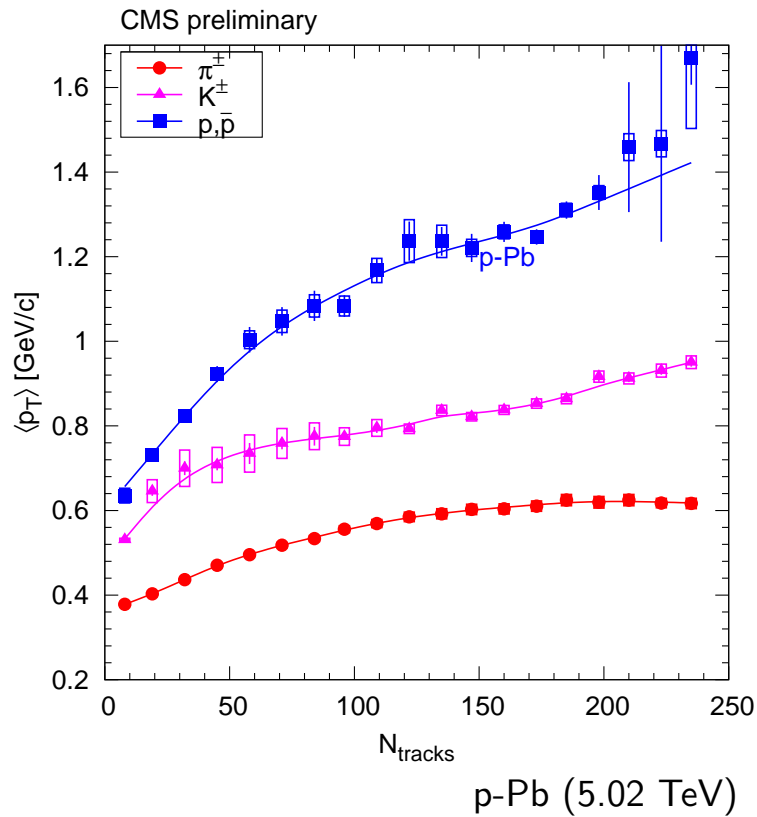
arXiv:1307.3442, submitted to Eur Phys J C [CMS AN/2010-404]

Sokkal magasabb részecskeszámok elérhetőek, átlagban p-Pb = 3,5 p-p

Mennyire hasonlít egy p-p és egy p-Pb ütközés?



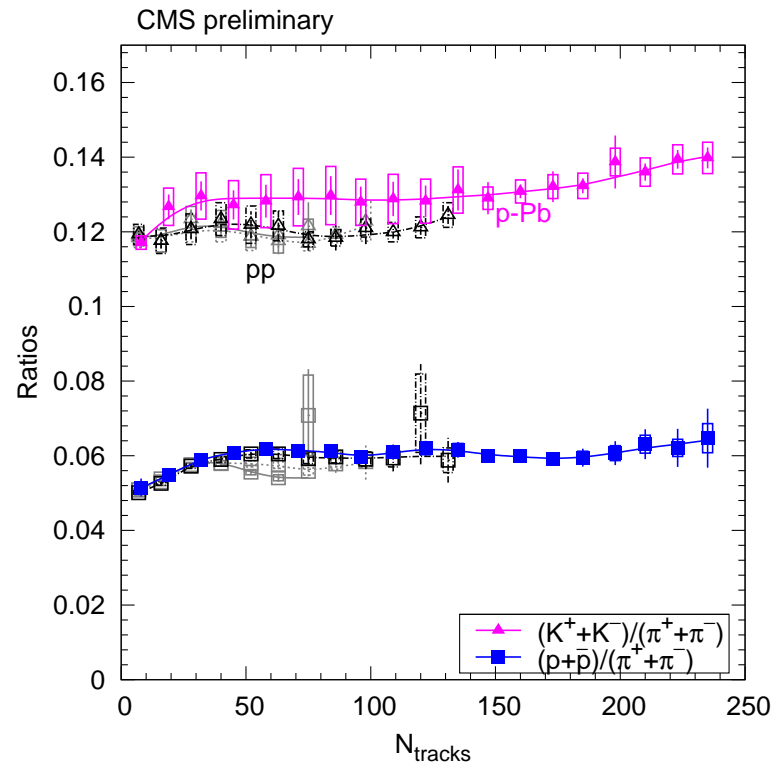
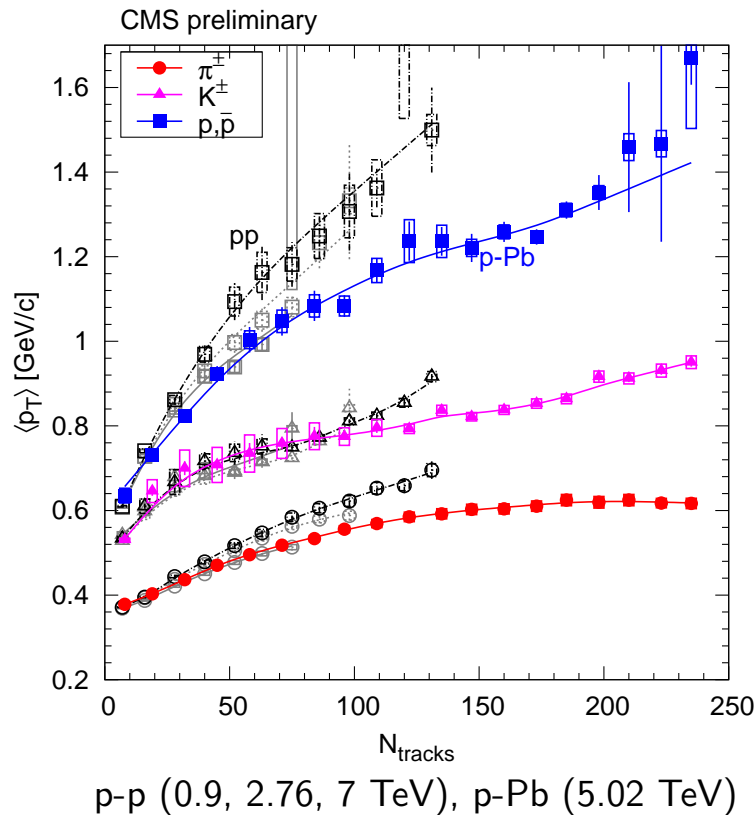
# Összehasonlítás – $\sqrt{s}$ függés – p-Pb



Differenciáltan növekvő merőleges impulzus,  
már p-Pb-ben is folyik a keltett anyag?

A ritkaság aránya kissé emelkedik

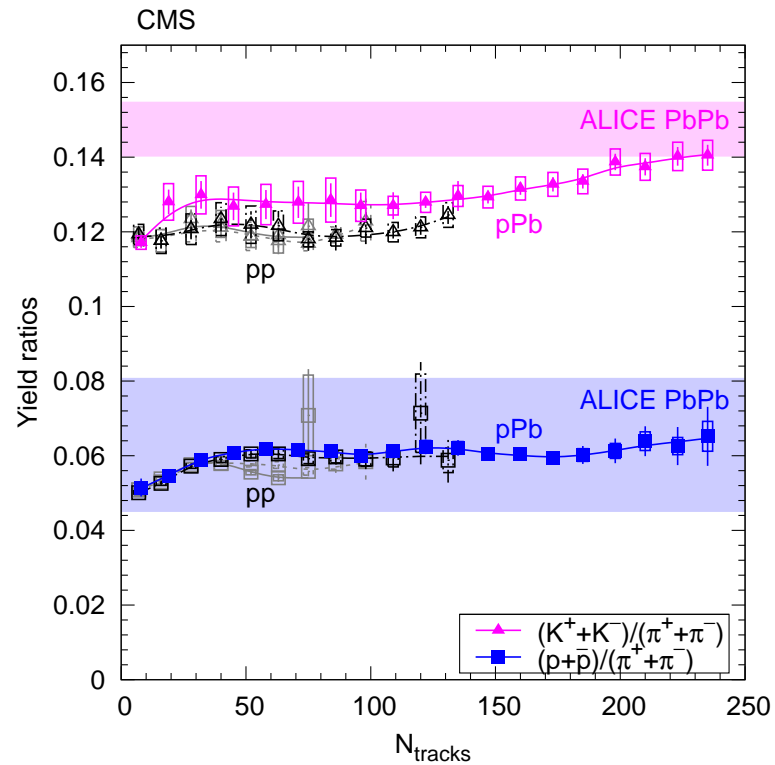
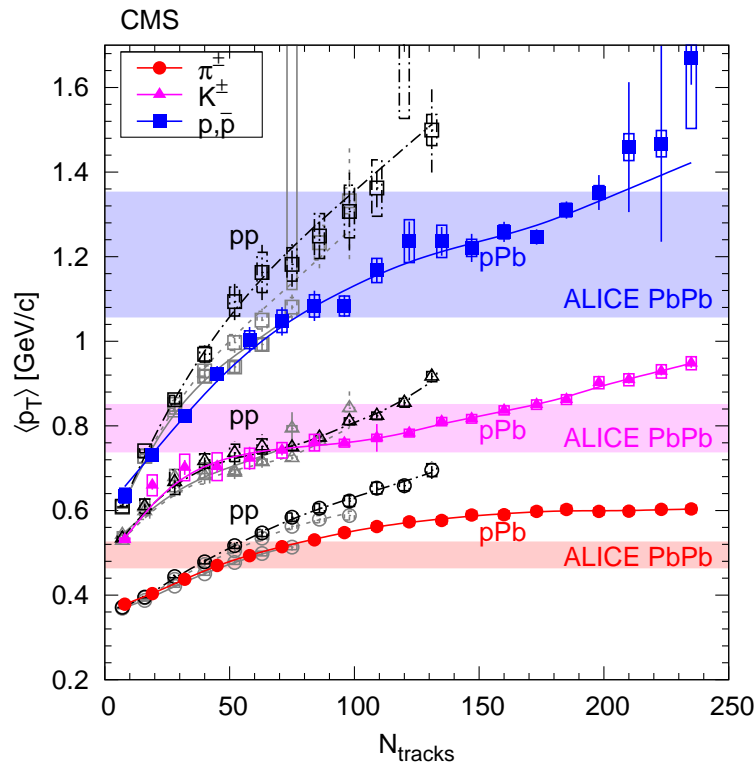
# Összehasonlítás – $\sqrt{s}$ függés – p-p vs p-Pb



Alacsony részecskeszámnál p-Pb nagyon hasonló p-p-hez

Nagy részecskeszám: p-Pb esetben kevert proton-nukleon,  
ugyanakkor p-p-ben heves ütközések

# Összehasonlítás – $\sqrt{s}$ függés – p-p vs p-Pb vs Pb-Pb



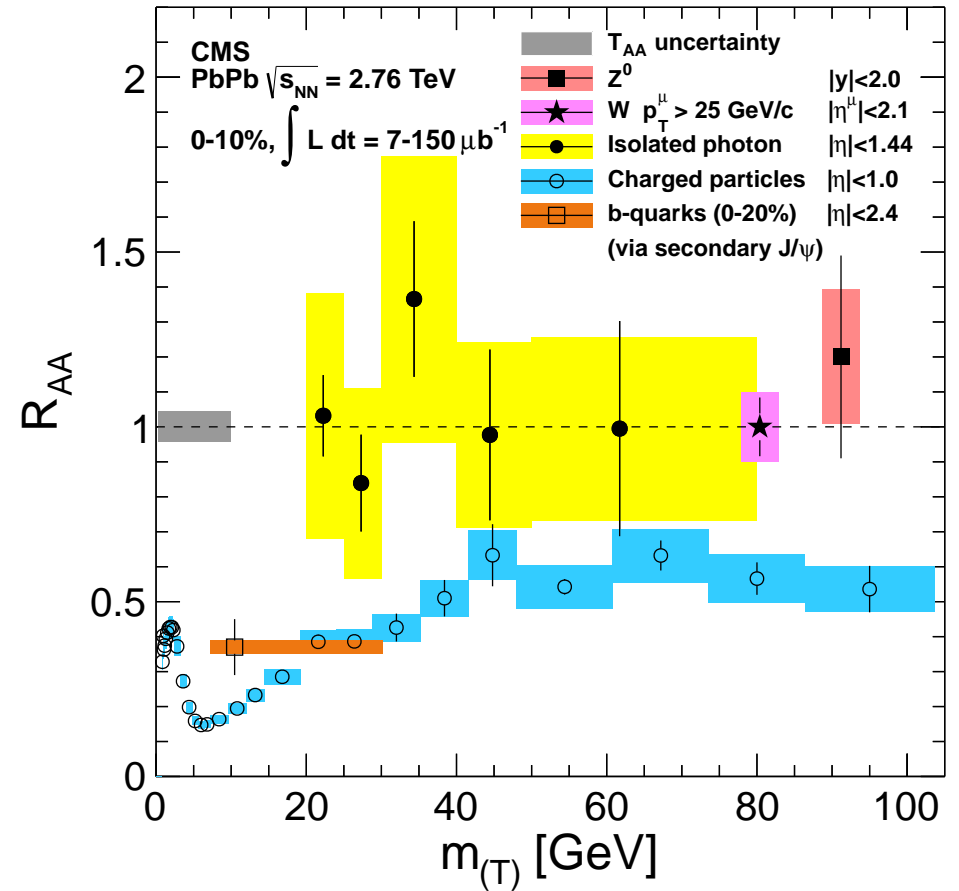
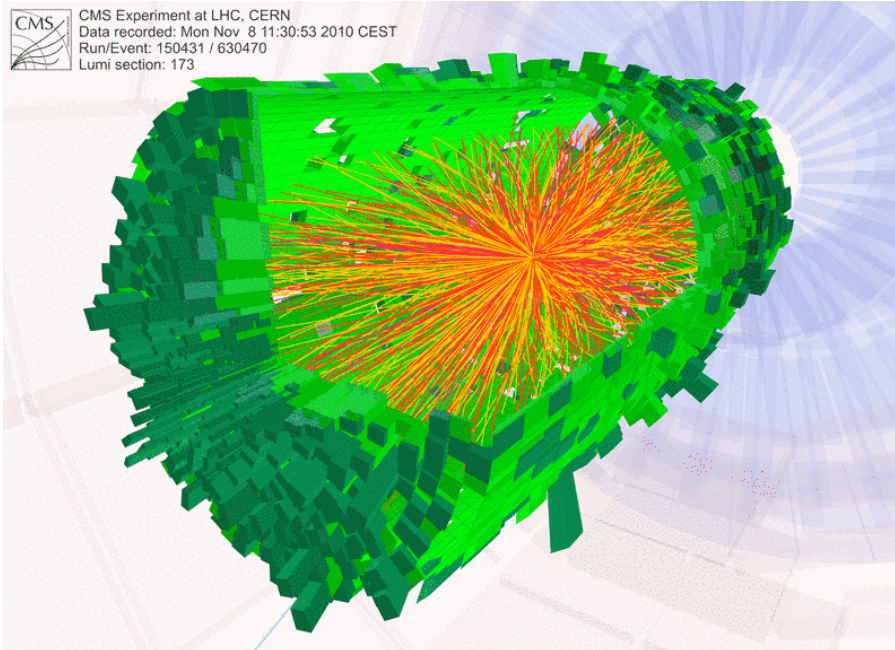
p-p (0.9, 2.76, 7 TeV), p-Pb (5.02 TeV), Pb-Pb (2.76 TeV, periph to central bands)

p-p és p-Pb esetén a leghevesebb ütközéseket válogatjuk

Ezek Pb-Pb-ben periférikus ütközéseknek felelnek meg

# Nehézionok ütközései – a keltett részecskék

Kis Bumm



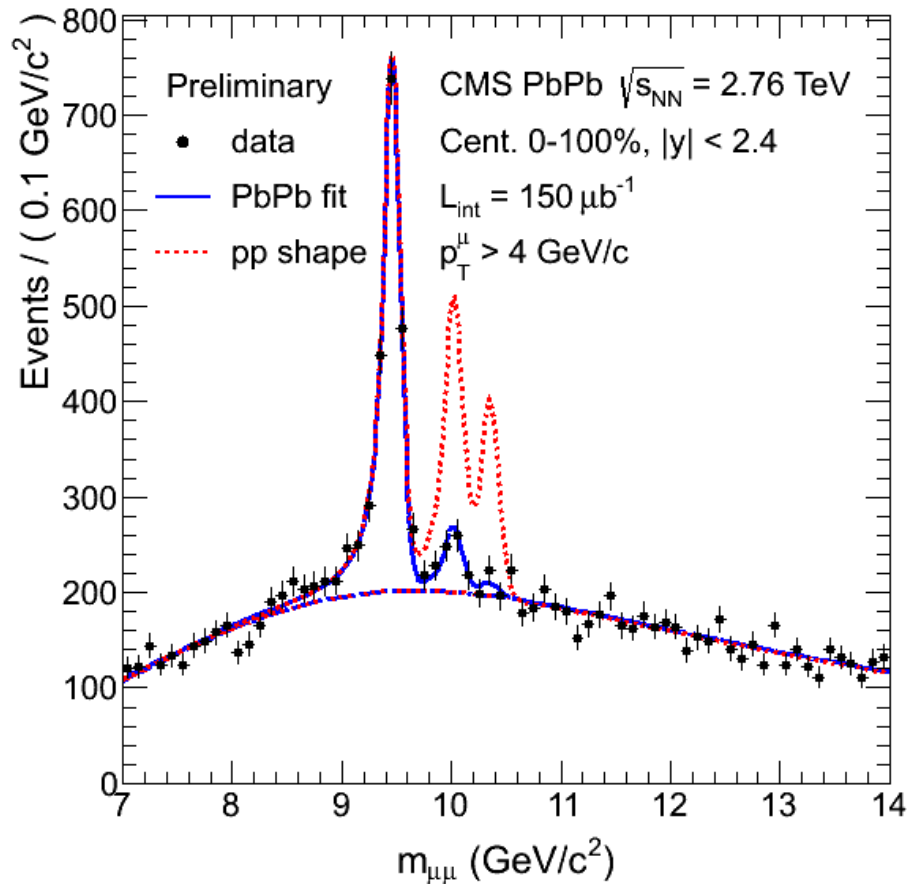
CMS PAS HIN-12-008 [CMS AN-2012/085]

A forró és sűrű maganyagban az erősen kölcsönható részecskék lelassulnak

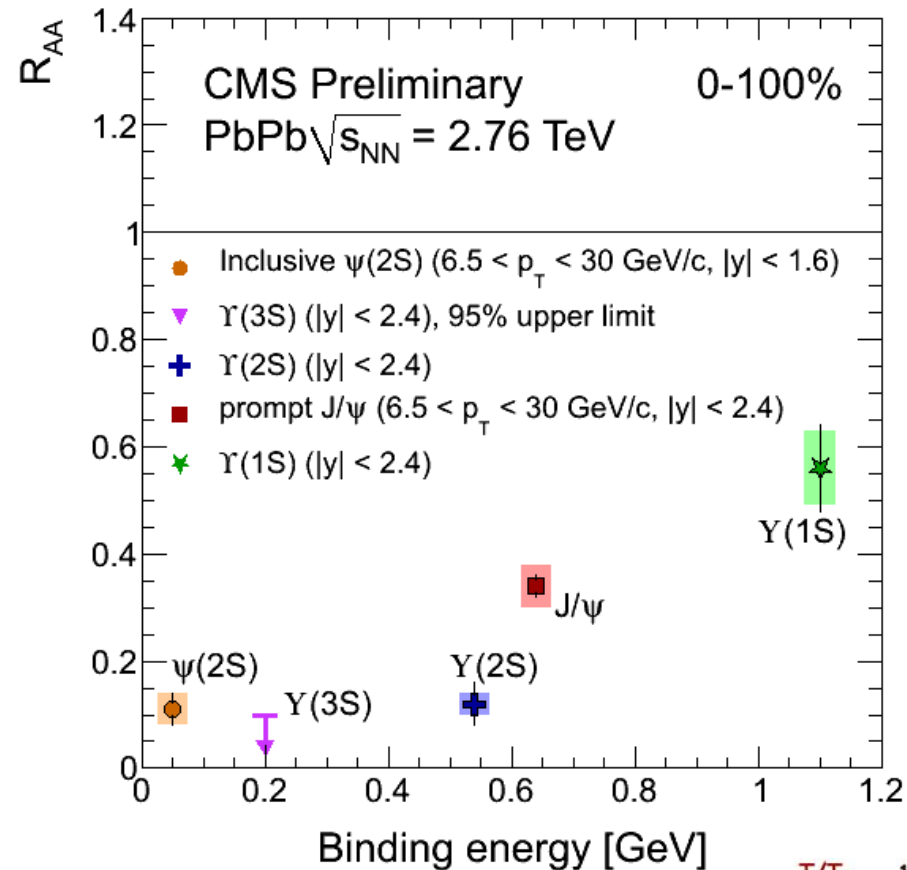
Az elektrogyenge bozonok ( $W^\pm$ ,  $Z^0$ , foton) változatlanok

# Nehézionok ütközései – müonpárra bomló rezonanciák

## $\Upsilon$ család



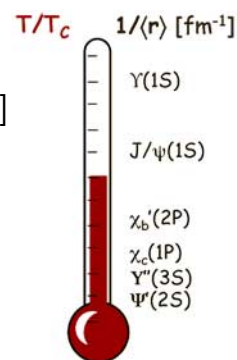
## Rezonanciák elnyomása



Phys Rev Lett 109 (2012) 222301 [CMS AN-2011/455]

A forró és sűrű maganyagban a gyengébben kötött rezonanciák eltűnnek

Meg tudjuk mérni a keletkezett anyag hőmérsékletét



# Összefoglalás

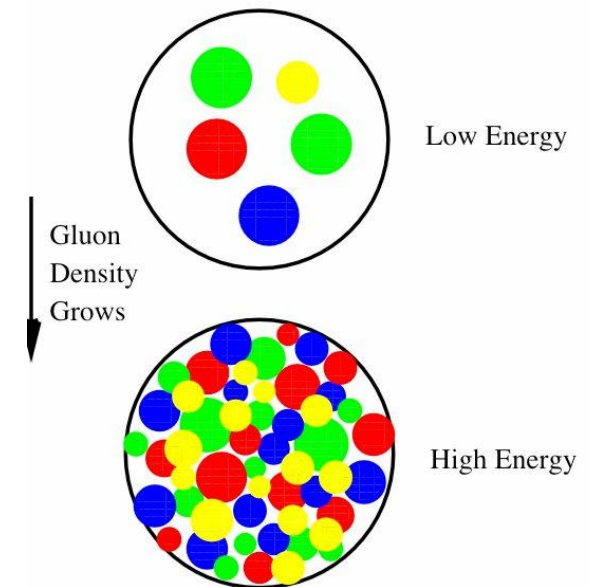
---

- Kiértékelési eszközök
  - matematika, algoritmusok, modellezés

# Összefoglalás

---

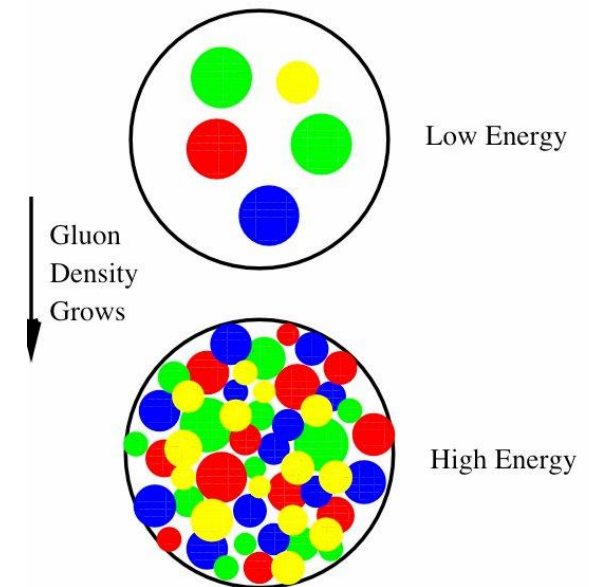
- Kiértékelési eszközök
  - matematika, algoritmusok, modellezés
- Kölcsönhatások összehasonlítása
  - Tsallis-Pareto eloszlások sikere
    - \* alkalmasak fraktálszerkezetű, valamint kaotikus jellegű dinamikai rendszerek leírására
    - \* a rendelkezésre álló fázisteret véletlenszerűen, nagyon rövid idő alatt kell betölteni
  - Gluon-telítés, skálázás
    - \* a mérhető mennyiségek a keltett részecskék számával erősen korrelálnak



# Összefoglalás

---

- Kiértékelési eszközök
  - matematika, algoritmusok, modellezés
- Kölcsönhatások összehasonlítása
  - Tsallis-Pareto eloszlások sikere
    - \* alkalmasak fraktálszerkezetű, valamint kaotikus jellegű dinamikai rendszerek leírására
    - \* a rendelkezésre álló fázisteret véletlenszerűen, nagyon rövid idő alatt kell betölteni
  - Gluon-telítés, skálázás
    - \* a mérhető mennyiségek a keltett részecskék számával erősen korrelálnak
- Nehézion-ütközések fizikája





# Összefoglalás

---

- Kiértékelési eszközök
  - matematika, algoritmusok, modellezés
- Kölcsönhatások összehasonlítása
  - Tsallis-Pareto eloszlások sikere
    - \* alkalmasak fraktálszerkezetű, valamint kaotikus jellegű dinamikai rendszerek leírására
    - \* a rendelkezésre álló fázisteret véletlenszerűen, nagyon rövid idő alatt kell betölteni
  - Gluon-telítés, skálázás
    - \* a mérhető mennyiségek a keltett részecskék számával erősen korrelálnak
- Nehézion-ütközések fizikája

