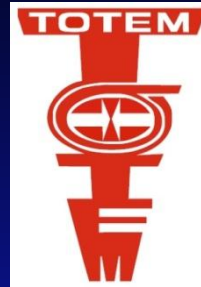


# Élenjáró protonok a CERN LHC TOTEM kísérletében



**Sziklai János**

**MTA Wigner FK**

**Részecske és Magfizikai Kutatóintézet**

**A TOTEM kísérlet képviselőjeként**

**INFN Sezione di Bari and Politecnico di Bari, Bari, Italy**

**MTA Wigner FK, RMI, Budapest, Hungary**

**Case Western Reserve University, Cleveland, Ohio, USA**

**CERN, Geneva, Switzerland**

**Estonian Academy of Sciences, Tallinn, Estonia**

**Università di Genova and Sezione INFN, Genova, Italy**

**Università di Siena and Sezione INFN-Pisa, Italy**

**University of Helsinki and HIP, Helsinki, Finland**

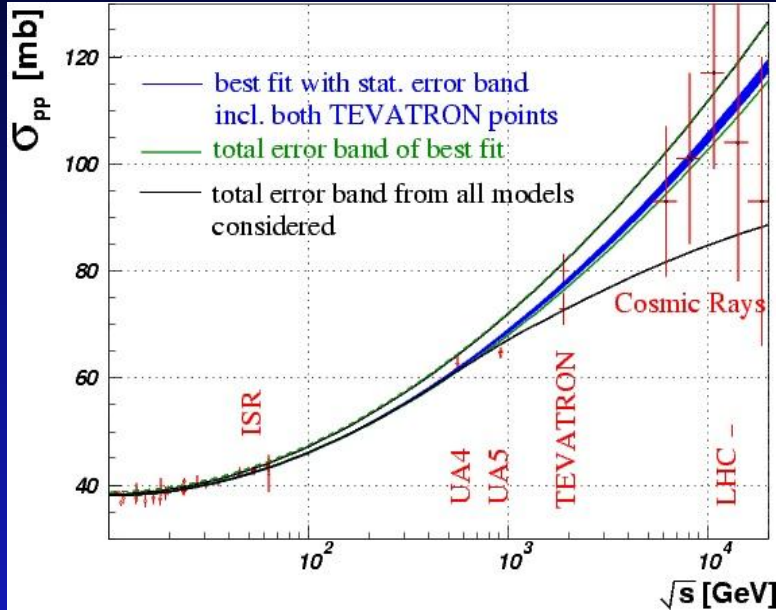
**Academy of Sciences, Praha, Czech Republic**

**(7 ország, 9 intézet, ~ 80 kutató)**

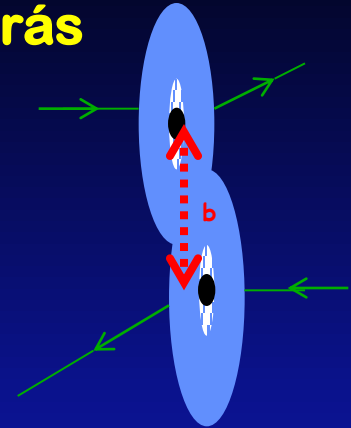
# TOTEM Fizikai Célok Áttekintése:



## Teljes hatáskeresztmetszet

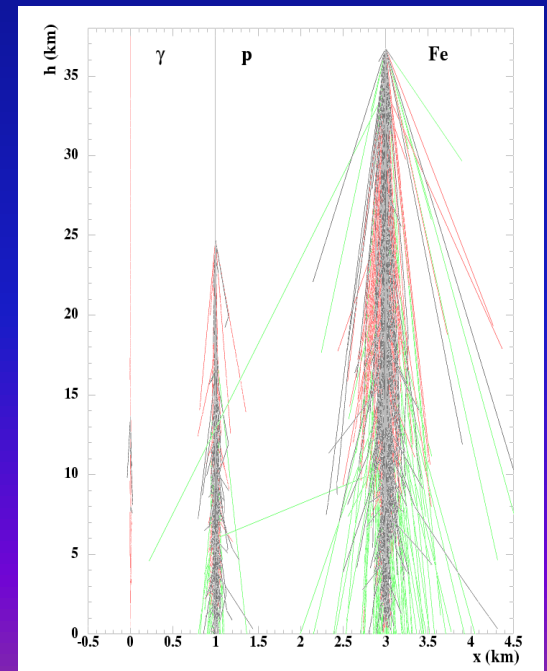
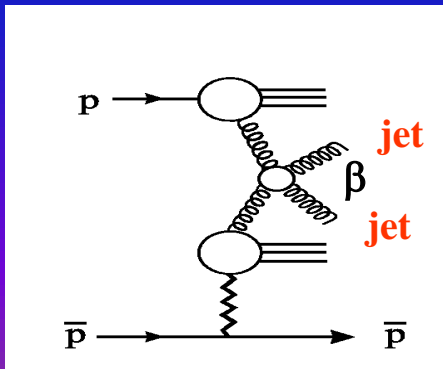


## Rugalmas szórás



## Élenjáró protonok

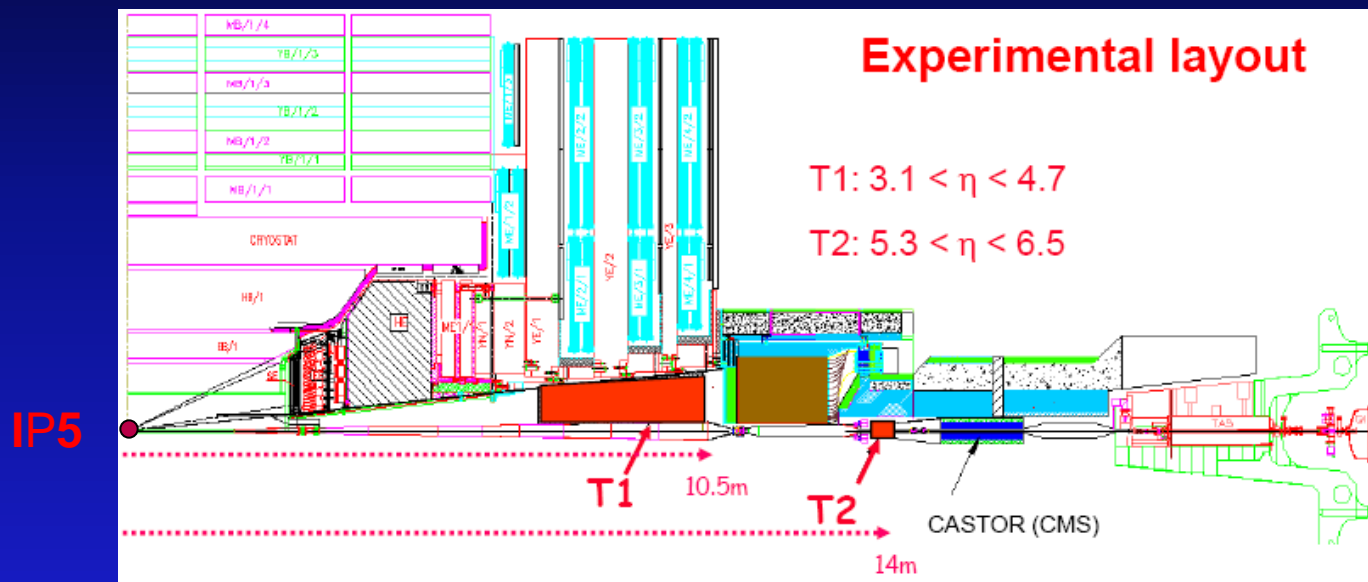
## Lágy és kemény diffrakció



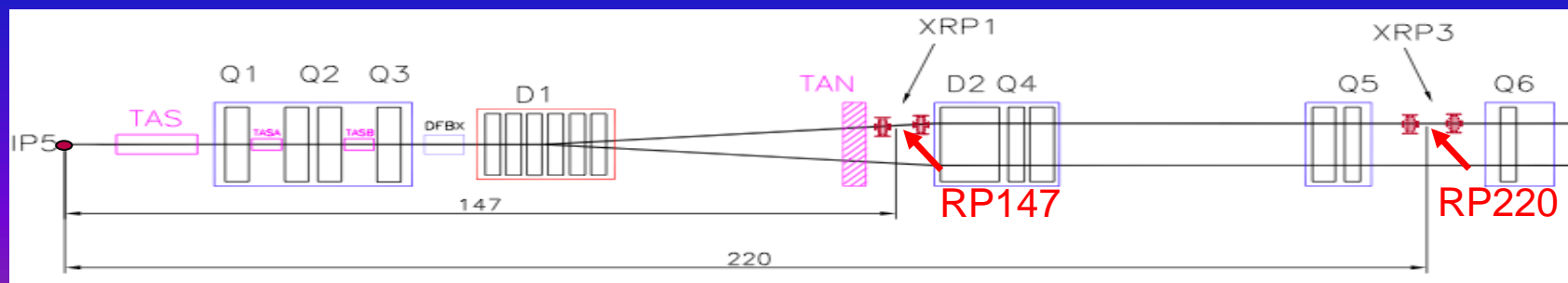
# TOTEM Detektorok Elhelyezése az LHC IP5-nél (a CMS mellett)

Inelasztikus detektor konfigurációk az IP5 mindkét oldalán: mindegyik képes részecskenyomok azonosítására és triggerelésre is

Feladat: töltőttrészecske azonosítás inelasztikus eseményekben & vertex rekonstrukció



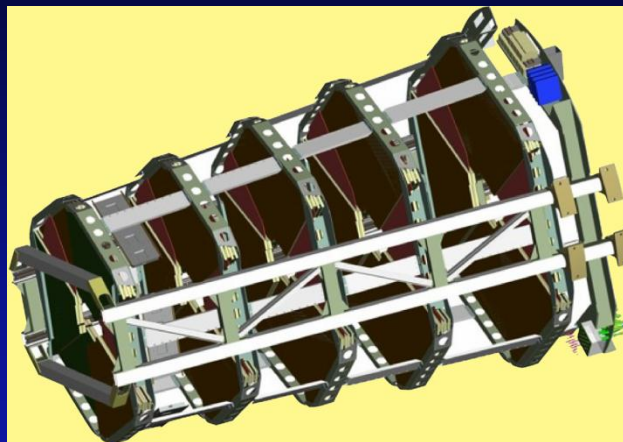
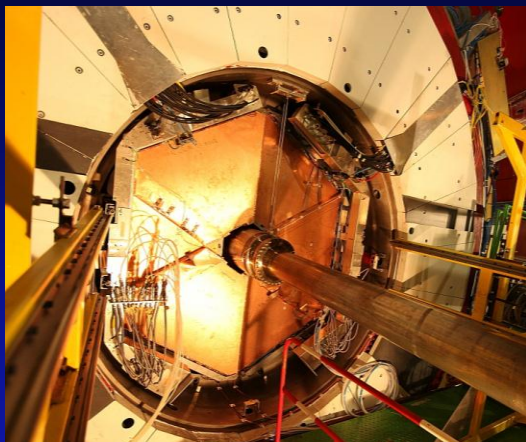
24 Roman Pot a CMS mindkét oldalán: nyálábhoz közeli rugalmas és rugalmatlan protonok mérése



# TOTEM Előreszögű nyomkövető inelasztikus teleszkópjai

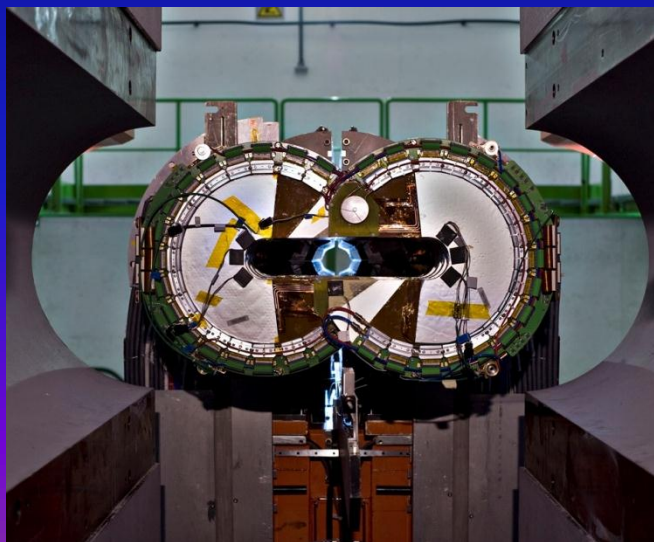


## T1 teleszkóp CSC (Chatode Strip Chambers) 5 rétegű



Akceptancia:  
 $3.1 < |\eta| < 4.7$

## T2 teleszkóp GEM (Gas Electron Multiplier) 5 rétegű



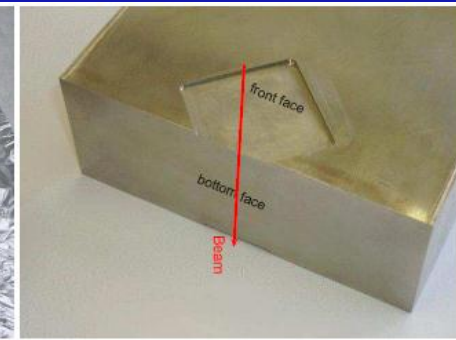
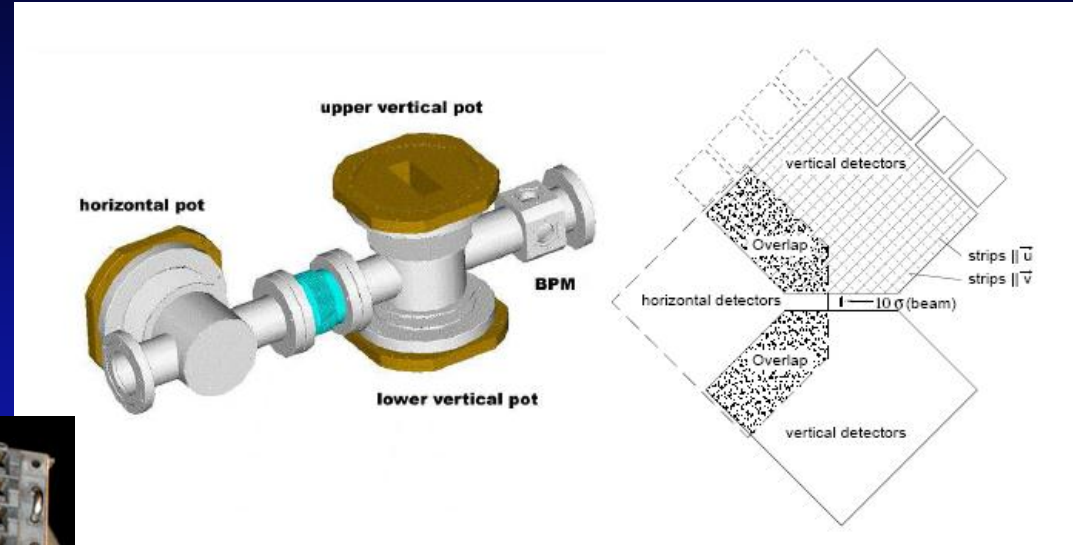
- töltött részecske detektálás
- vertex rekonstrukció
- trigger

Akceptancia:  
 $5.3 < |\eta| < 6.5$



# "Római Fazék" detektorok

- Különleges mozgatható detektoregyüttes, saját vákuumtérben
- Roman Pot párok 5 méterre 147 és 220 méterre az IP5-től

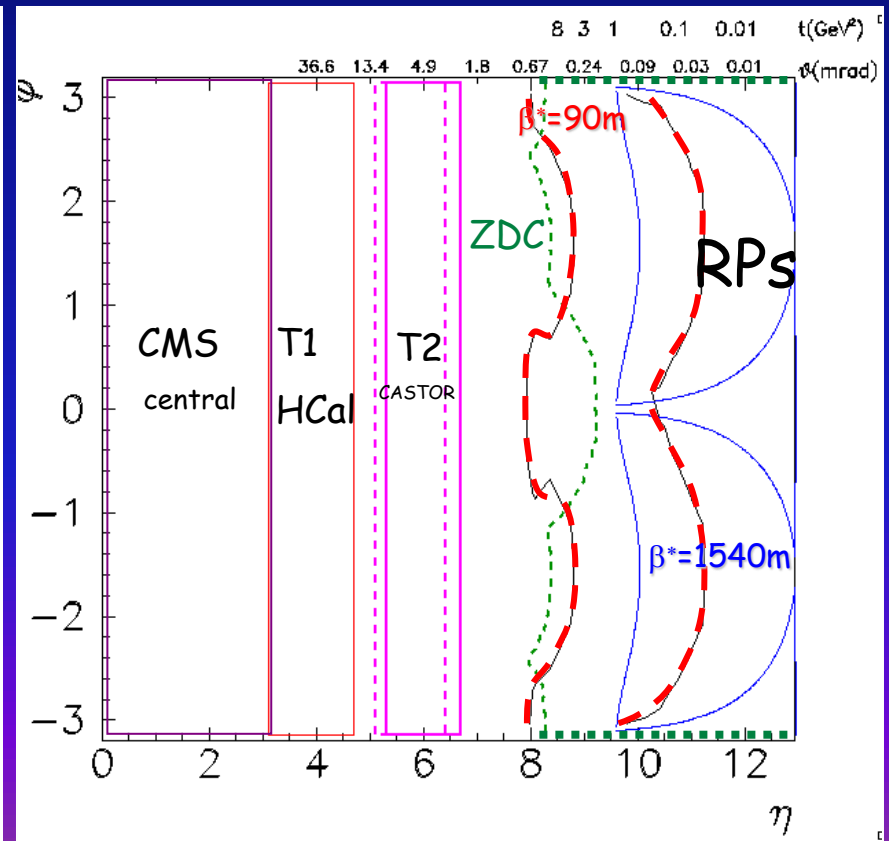
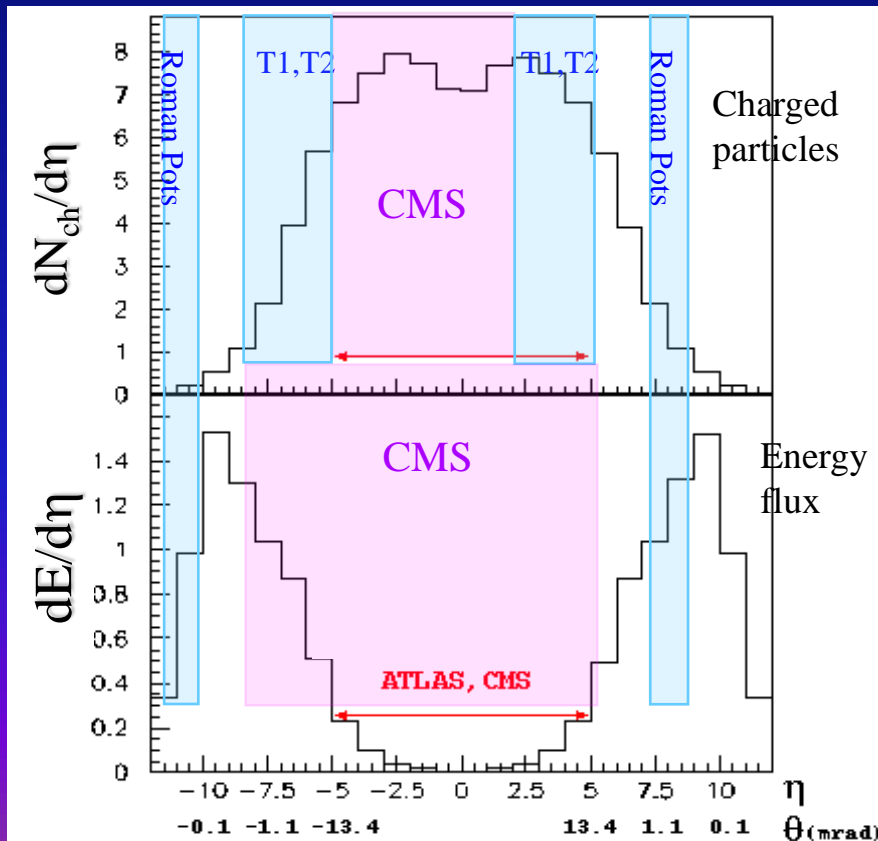


- detektálja az IP5-ből szórt protonokat
- nyalábközeleli mozgatható eszközök
- peremnélküli szilícium microstrip detektor
- ~16μm-es felbontás
- triggerelési képesség az FPGA processzálassal

# TOTEM képességek



**CMS +TOTEM = A legnagyobb akceptanciájú detektor amely valaha épült hadronütköztetőnél**  
 $\beta^* = 1540$  (90) m esetén 90% (65%) diffraktív proton detektálása



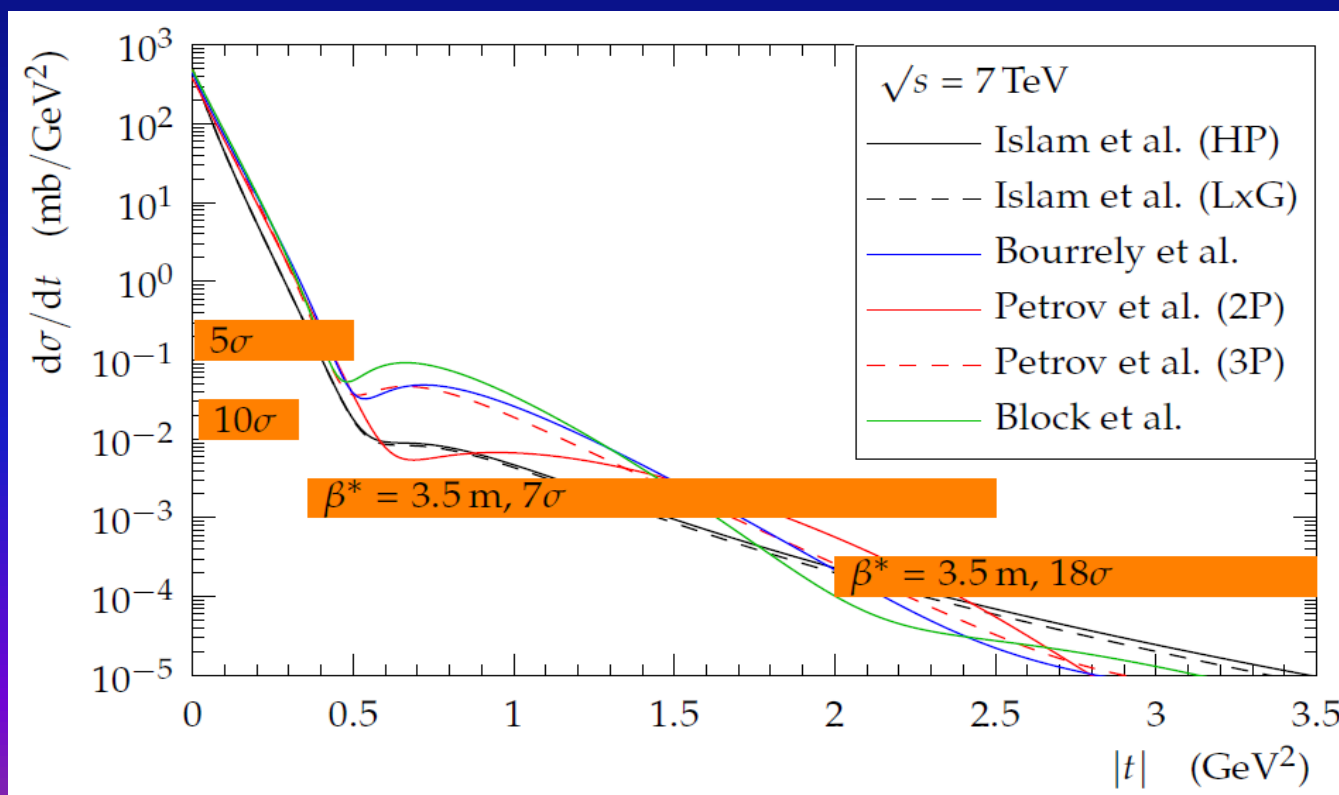


# Rugalmas pp Hatáskeresztszmetzet: Adatmintavétel

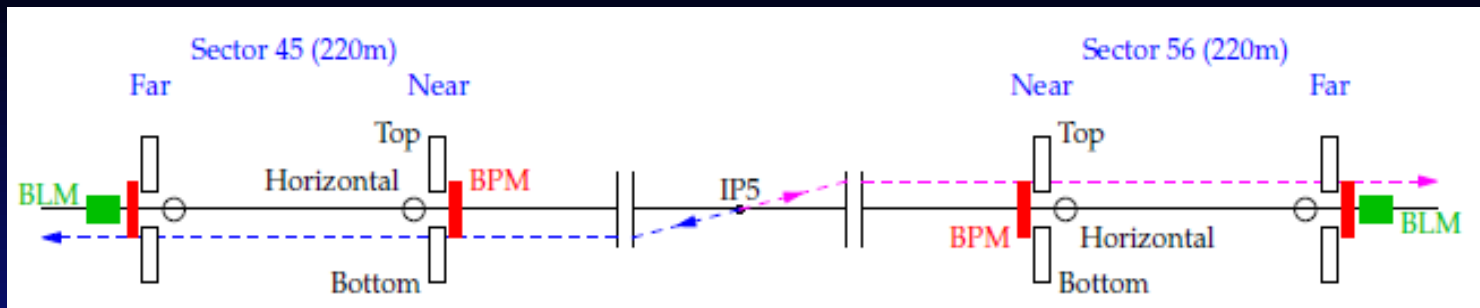
$$7 \times 10^{-3} \text{ GeV}^2 < |t| < 3.5 \text{ GeV}^2$$

Átfogó  $|t|$  tartományú mérések változatos LHC konfigurációkban

Set	$\beta^*$ (m)	RP approach	$\mathcal{L}_{int}$ ( $\mu\text{b}^{-1}$ )	$t$ range ( $\text{GeV}^2$ )	Elastic events
1	90	4.8-6.5 $\sigma$	83	$7 \cdot 10^{-3}$ - 0.5	1M
2	90	10 $\sigma$	1.7	0.02 - 0.4	14k
3	3.5	7 $\sigma$		0.36 - 3	66k
4	3.5	18 $\sigma$		2 - 3.5	10k



# Rugalmas pp szórás a Roman Pot-okban

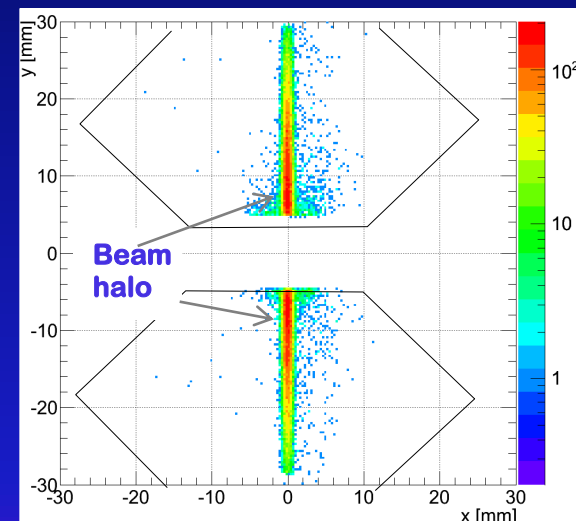
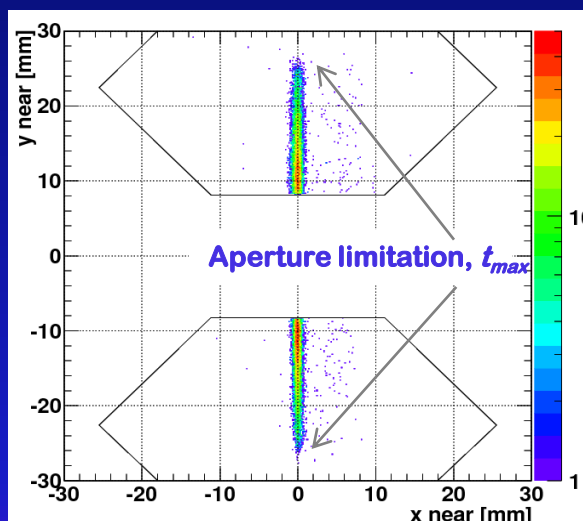
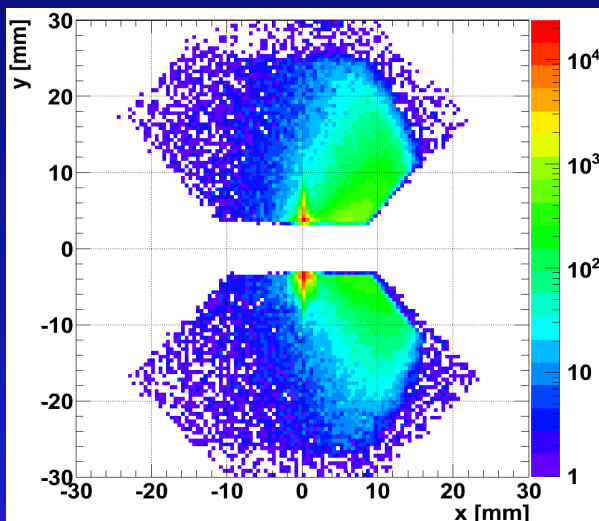


$\beta^* = 3.5\text{m} (7\sigma)$

$\beta^* = 90\text{m} (10\sigma)$

$\beta^* = 90\text{m} (5\sigma)$

Sector 56  
Sector 45



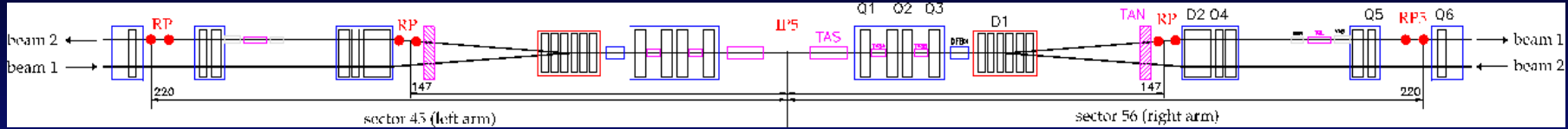
$$t_y = -p^2 \Theta_y^2$$

Impulzus veszteség  $\xi = \Delta p/p$

IP5 bal felsőtől → IP5 jobb alsóig  
 IP5 bal alsótól → IP5 jobb felsőig  
 Diagonálisok egymástól függetlenül analizálva



# LHC optika röviden



Egy adott RP  $(x, y)$  proton koordináta az IP5-ben mért  $(x^*, y^*)$  és a  $(\Theta_x^*, \Theta_y^*)$  szögek függvénye:

**A Roman Pot-okban mérve**

$$\begin{pmatrix} x \\ \Theta_x \\ y \\ \Theta_y \\ \Delta p/p \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} v_x & L_x & 0 & 0 & D_x \\ v'_x & L'_x & 0 & 0 & D'_x \\ 0 & 0 & v_y & L_y & 0 \\ 0 & 0 & v'_y & L'_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\text{Proton transzport mátrix}} \begin{pmatrix} x^* \\ \Theta_x^* \\ y^* \\ \Theta_y^* \\ \Delta p/p \end{pmatrix}_{\text{IP5}}$$

**rekonstruált**

## Rugalmas proton rekonstrukció:

- Szórási szög mindkét irányú rekonstrukciója
  - Magas  $\Theta^*$  - rekonstrukciós határfok
- $\sigma(\Theta_y^*) = 1.7 \mu\text{rad}$  a  $\beta^* = 90 \text{ m}$  és alacsony  $t$ -tartományra  
 $\sigma(\Theta_y^*) = 12.5 \mu\text{rad}$  a  $\beta^* = 3.5 \text{ m}$  és magas  $t$ -tartományra

$$\begin{cases} \Theta_x^* = \left( \Theta_{x,RP} - \frac{dv_x}{ds} x^* \right) / \frac{dL_x}{ds}, & \frac{\Delta p}{p} = 0 \\ \Theta_y^* = (y_{RP} - v_y y^*) / L_y \end{cases}$$

**Szükséges a nyaláboptika kalibrációja és beállítása!**

# beam fill-enkénti kalibráció



**Optika meghatározása** Speciális TOTEM run-ok, nyaláboptika változhat beam fill-enként !!

Új módszer a TOTEM-nek

- Transzport mátrix érzékenysége az LHC tökéletlenségeire (MADX optics model)
- Gép méret tűrések és a mért hibák kombinációja
  - mágnes áramok
  - mágnes konverziós görbék, tér tökéletlenségek
  - mágnes elmozdulások
- RP proton nyomok eloszlása alapján mért optikai korlátok
- Optikai illesztés a MADX-szel
- Folyamatok ellenőrzés MC szimulációval

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\delta dL'_x}{dL'_x} < 1\% \\ \frac{\delta L_y}{L_y} < 1\% \end{array} \right. \Rightarrow \frac{\delta t}{t} \approx 0.8\% - 2.6\% \text{ for } \beta^* = 90\text{m}$$

Optics related systematic errors

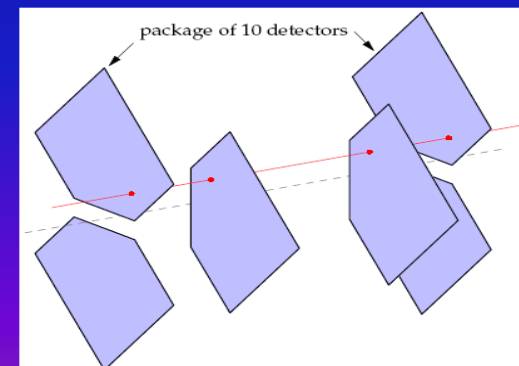
H. Niewiadomski, *Roman Pots for beam diagnostic*, OMCM, CERN, 20-23.06.2011

H. Niewiadomski, F. Nemes, *LHC Optics Determination with Proton Tracks*, IPAC'12, Louisiana, USA, 20-25.05.2012

## A Roman Pot-ok beállítása -> Mozgatható eszközök!!

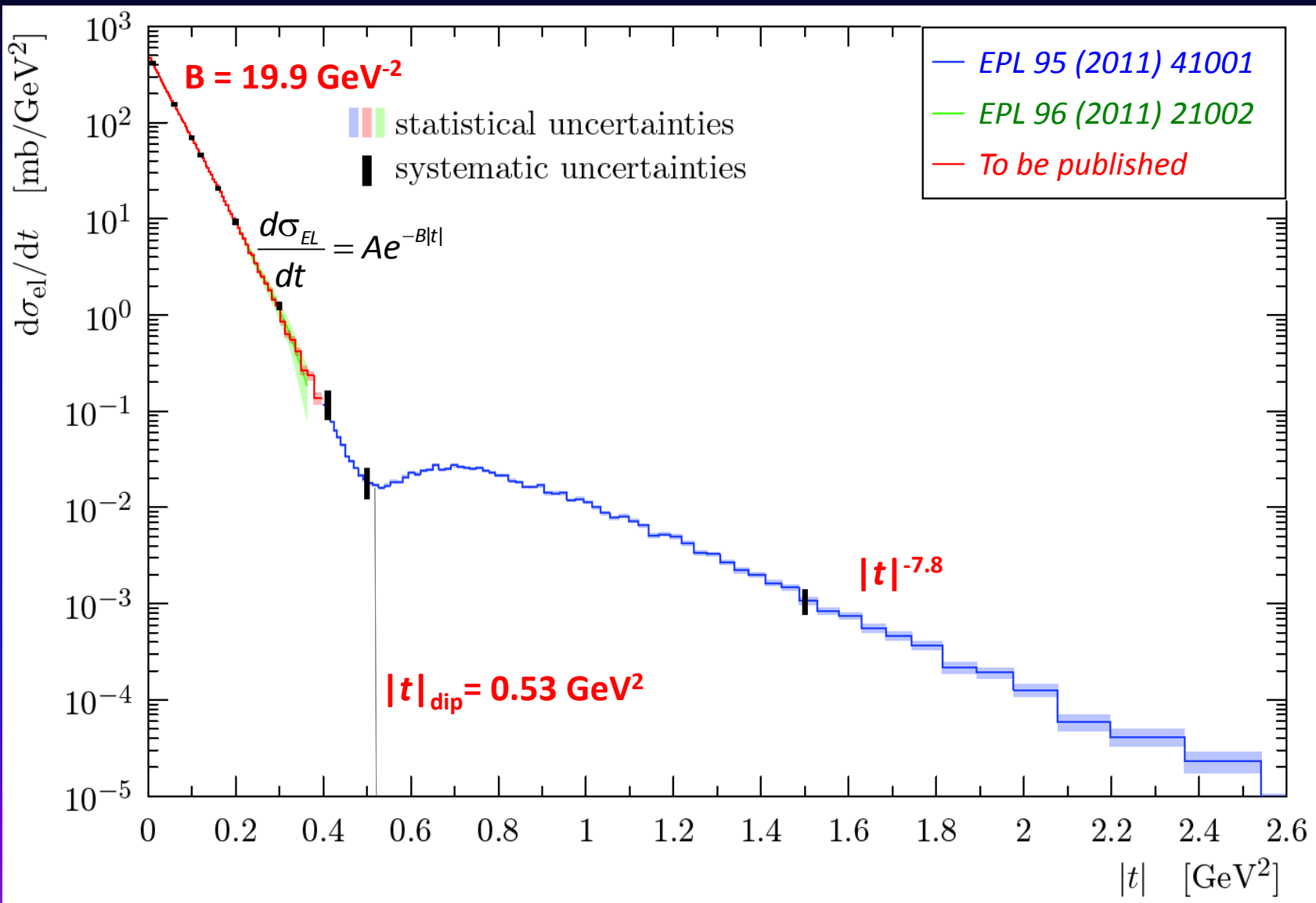
- Belső komponensek: mérés és részecske nyomvonal
- LHC nyalábhoz viszonyítva: nyaláb érintési teszt (<200  $\mu\text{m}$ )
- RP-k közötti relatív: átfedő részecske nyomvonalk (néhány  $\mu\text{m}$ )
- Fizika alapú: rugalmasan szórt protonok kollinearitását kihasználva az IP5 két oldalán való korlátokat (néhány  $\mu\text{m}$ )

**Elért végső teljes pontosság 10  $\mu\text{m}$ !**



Track based alignment

# Rugalmas hatáskeresztmetszet

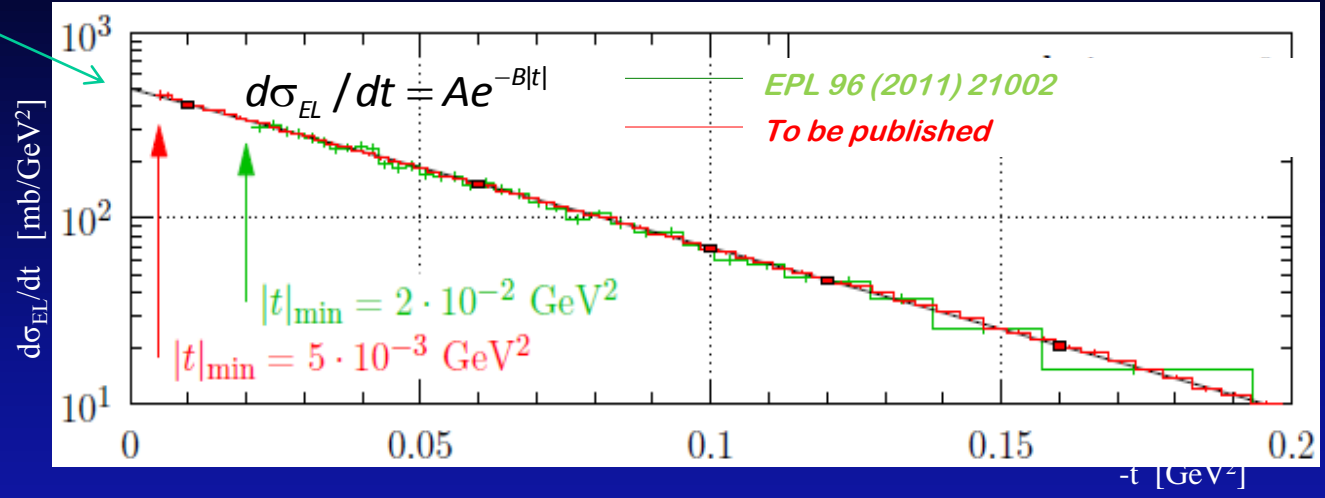




# Rugalmas hatáskeresztmetszet

## Extrapoláció $t=0$ -ig

$$A = \left. \frac{d\sigma_{EL}}{dt} \right|_{t \rightarrow 0}$$



$$\left. \frac{d\sigma_{EL}}{dt} \right|_{t \rightarrow 0} =$$

$A = 506 \pm 22.7^{\text{syst}} \pm 1.0^{\text{stat}} \text{ mb/GeV}^2$  **Tengelymetszet**

$A = 503 \pm 26.7^{\text{syst}} \pm 1.5^{\text{stat}} \text{ mb/GeV}^2$

$B = 19.9 \pm 0.26^{\text{syst}} \pm 0.04^{\text{stat}} \text{ GeV}^{-2}$  **meredekség**

$B = 20.1 \pm 0.3^{\text{syst}} \pm 0.2^{\text{stat}} \text{ mb/GeV}^2$

### Rugalmas hatáskeresztmetszet

$$\sigma_{EL} = \sigma_{EL,extrapol.} + \sigma_{EL,meas} =$$

$25.4 \pm 1.0^{\text{lumi}} \pm 0.3^{\text{syst}} \pm 0.03^{\text{stat}} \text{ mb}$  (90% közvetlen mérés)

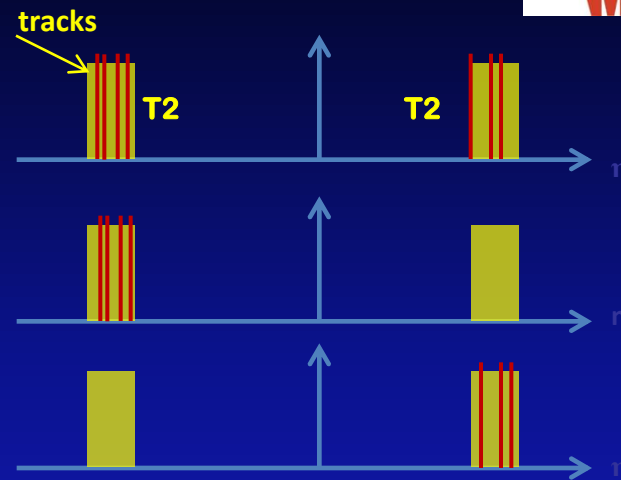
$24.8 \pm 1.0^{\text{lumi}} \pm 0.2^{\text{syst}} \pm 0.2^{\text{stat}} \text{ mb}$  (50% közvetlen mérés)

# Inelasztikus hatáskeresztmetszet: Közvetlen T1 and T2 mérés



## Inelasztikus események osztályozása a T2-ben:

- részecske nyomvonalak mindkét oldalon  
*nem-diffraktív minimum bias  
dupla diffrakció*
- részecske nyomvonalak csak az egyik oldalon  
*főként szimpla diffrakció*  
 $M_{diff} \geq 3.4 \text{ GeV}$  ( $|\eta| \leq 6.5$ )



## T2 látható eseményeinek korrekciói

- Trigger Hatásfok: **2.3 %**
- Részecske nyomvonalak rekonstrukciós hatásfoka: **1 %**
- Nyaláb-gáz háttér: **0.54 %**
- Pile-up ( $\mu = 0.03$ ): **1.5 %**

$$\sigma_{inelastic, T2 \text{ visible}} = 69.7 \pm 0.1^{\text{stat}} \pm 0.7^{\text{syst}} \pm 2.8^{\text{lumi}} \text{ mb}$$



# Teljes hatáskeresztmetszet : 4 közelítés



## 1. CMS Luminozitás (small bunches) + Rugalmas szórás+ Optikai Theoréma

*függ a CMS luminozitástól alacsony-L bunches & rugalmas hatásfokoktól &  $\rho$  paramétertől*

$$\sigma_{TOT} = 98.3 \text{ mb} \pm 2.0 \text{ mb} \quad \text{EPL 96 (2011) 21002}$$

## 2. CMS Luminozitás (large bunches) + Rugalmas szórás+ Optikai Theorem

*függ a CMS luminozitástól nagy-L bunches vs. alacsony-L bunches esetekre*

$$\rho = 0.14 \pm 0.09 \quad (\text{Compete})$$

$$\sigma_{tot}^2 = \frac{16\pi}{(1 + \rho^2)} \frac{1}{\mathcal{L}} \left( \frac{dN_{el}}{dt} \right)_{t=0} \quad \sigma_{TOT} = 98.6 \text{ mb} \pm 2.3 \text{ mb}$$

## 3. CMS Luminozitás (large bunches) + Rugalmas szórás + Rugalmatlan szórás

*minimalizálja a rugalmas hatásfokoktól való függést és független a  $\rho$  paramétertől*

$$\sigma_{tot} = \sigma_{el} + \sigma_{inel}$$

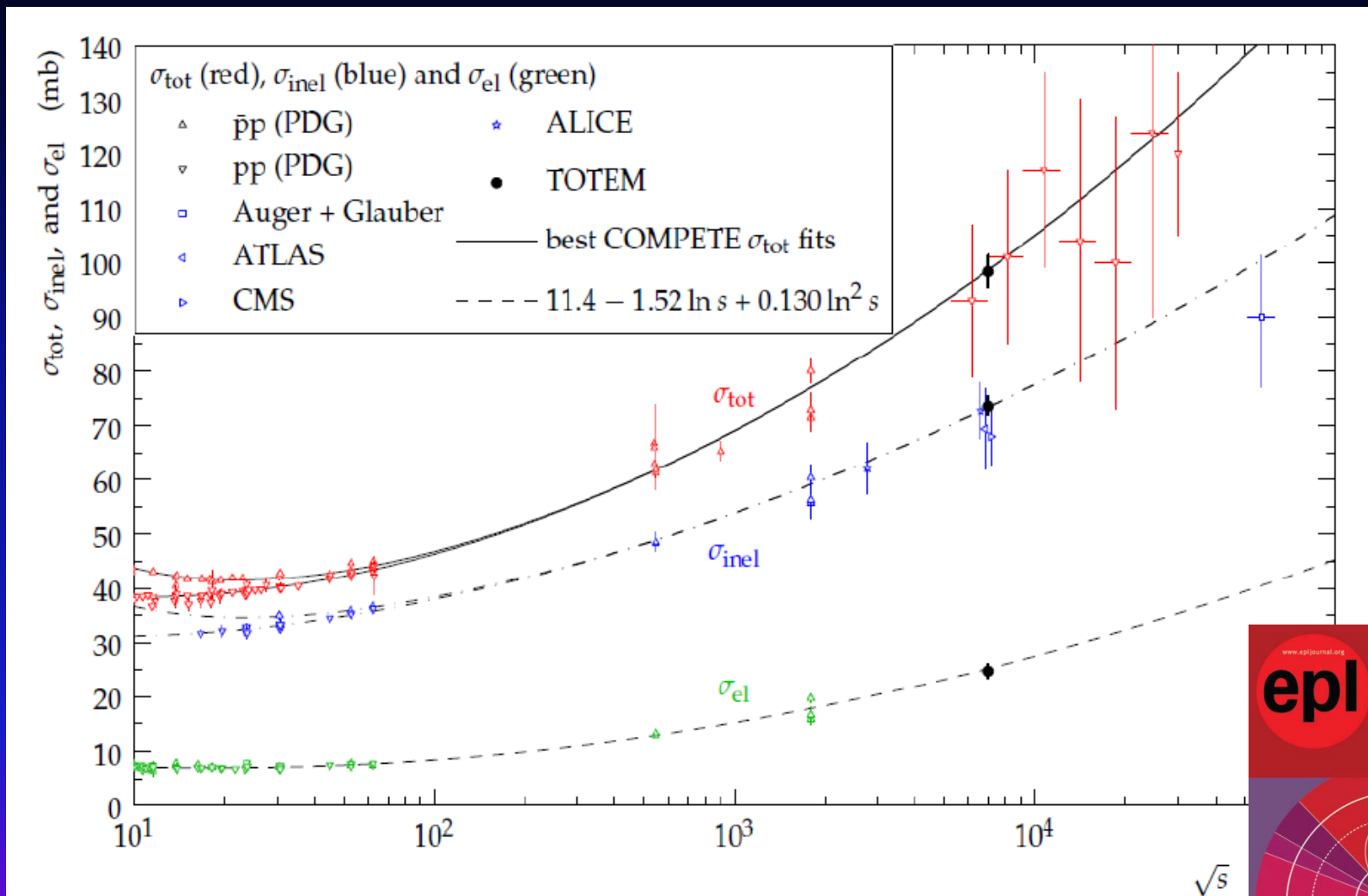
$$\sigma_{TOT} = 99.1 \text{ mb} \pm 4.4 \text{ mb}$$

## 4. (L-független) + Rugalmas szórás + Rugalmatlan szórás + Optikai Theorem

*nincs luminozitástól való függés*

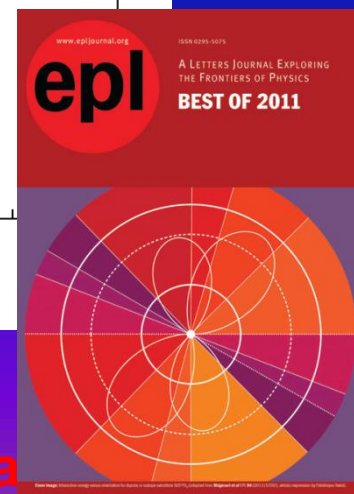
$$\sigma_{tot} = \frac{16\pi}{(1 + \rho^2)} \frac{(dN_{el}/dt)_{t=0}}{(N_{el} + N_{inel})} \quad \sigma_{TOT} = 98.1 \text{ mb} \pm 2.4 \text{ mb}$$

# Teljes hatáskeresztmetszet : Összegzés



A proton effektív felülete kétszeresre nő LHC energián!

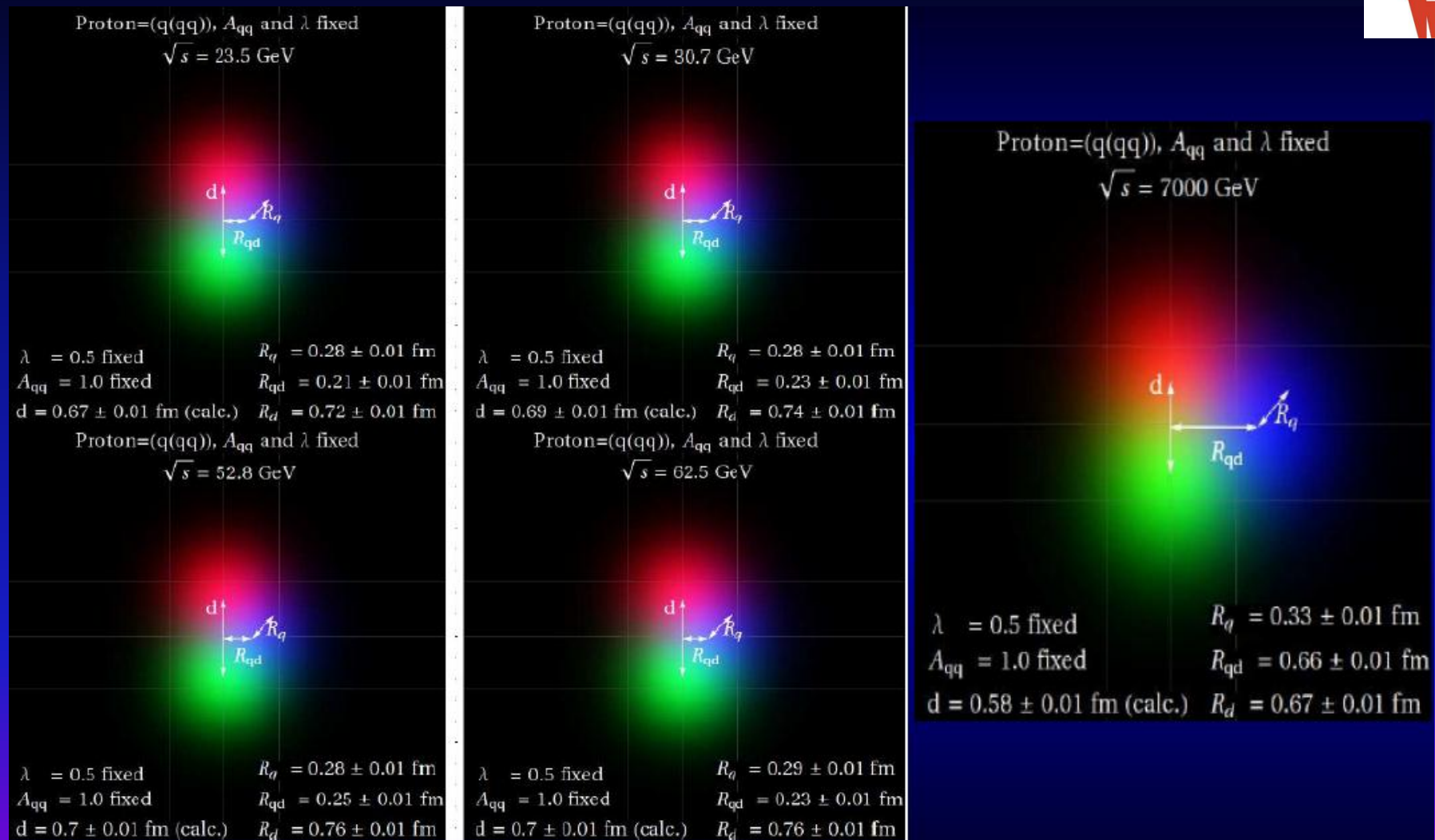
Ez a TOTEM cikk bekerült a "Best of 2011" EPL válogatásba





# Proton a szub-femtométer skálán

(Bialas-Bzdak modell , F. Nemes és T. Csörgő, arXiv:1204.5617 )



Increasing proton size

mainly (q, d) distance grows

# Előreszögű töltöttrészecske pszeudorapiditás sűrűség mérése a T2 detektorral



$dN_{ch}/d\eta$  az  $5.3 < \eta < 6.5$  tartományban a  $\sqrt{s} = 7$  GeV LHC energián

**Adatminta:** kis luminozitású események alacsony pile-up-al, T2-vel triggerelve

**Kiválasztás:** legalább egy részecskenyom rekonstruálása

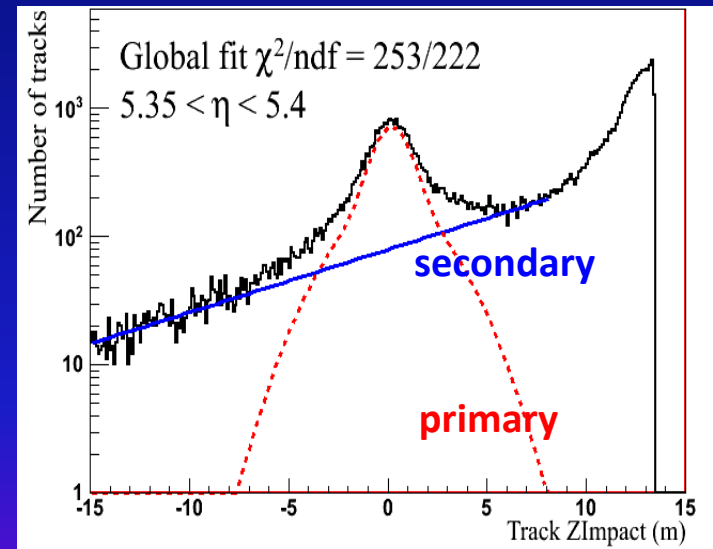
**Primér részecske definíciója:** töltött részecskék  $\tau > 0.3 \times 10^{-10}$  s élettartammal és  $p_t > 40$  MeV/c transzverz impulzussa

**Primér részecske kiválasztása:**

- primér/másodlagos diszkrimináció a primér vertex rekonstrukció alapján

**Primér részecske nyom rekonstrukciós hatások**

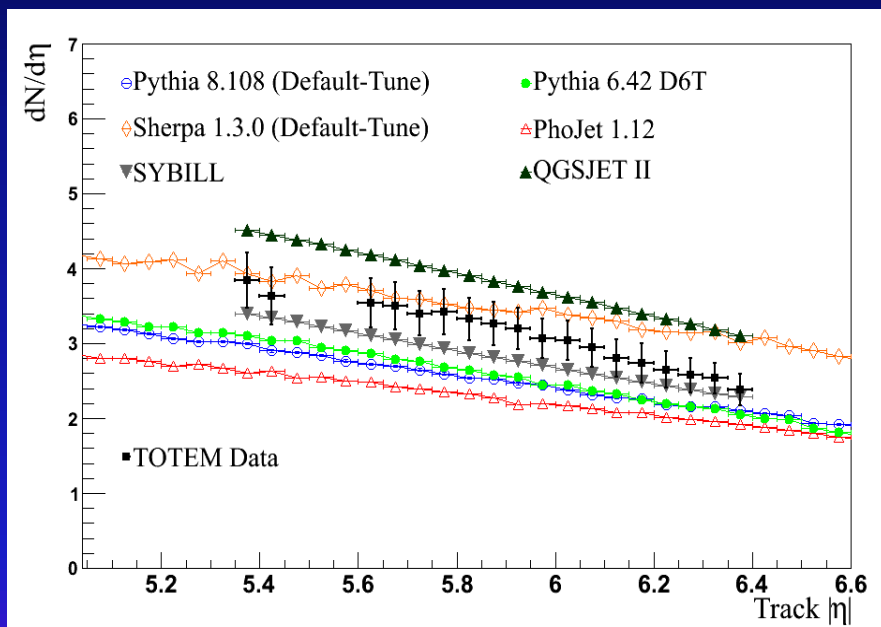
- a részecske nyom  $\eta$  és a multiplicitás függvényeként kiértékelve
- 80% hatások
- primér részecske nyomok töredéke a 75% – 90% ( $\eta$  függő) vágásokon belül



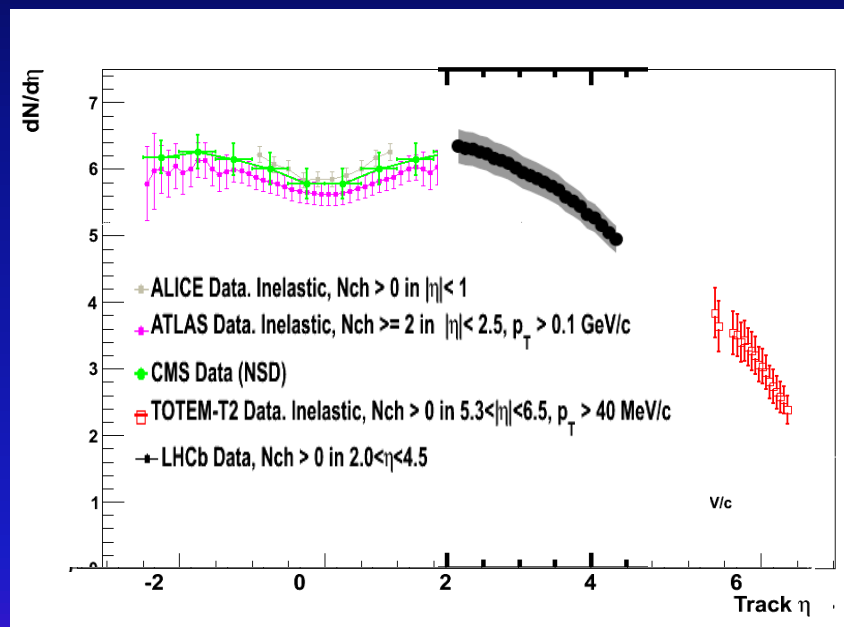
# $dN_{ch}/d\eta$ a T2-ben : eredmények



TOTEM mérések különféle MC jóslatokkal hasonlítva



TOTEM mérések a többi LHC kísérlet eredményeivel kombinálva



EPL 98 (2012) 31002



# Adatgyűjtés 2012-ben a $\sqrt{s} = 8$ TeV LHC energián



$\beta^* = 90\text{m}$ , 2 bunches (megtörtént)

rugalmas szórás és hatáskeresztmetszet

$\beta^* = 90\text{m}$ , 156 bunches (megtörtén, együtt a CMS-sel)

diffraktív 2 jet események tesztjei

kemény diffrakció, 2 jet ( $p_t > 20$  GeV) és protonok

proton lefedettség:  $\xi$  teljes tartományára,  $-t > 0.02$  GeV<sup>2</sup>

integrált luminozitás:  $6\text{nb}^{-1}/\text{h}$ , 10 órás adatgyűjtés

több millió esemény

$\beta^* = 0.6\text{m}$ ,  $\sim 1400$  bunches, teljes luminozitás (néhány run a CMS-sel)

diffraktív 2 jet események tesztjei nagy luminozitáson

proton lefedettség:  $\xi > 2-3\%$ ,  $t$  teljes tartományára

a jövő szempontjából fontos tesztek

kemény diffrakció, 2 jet ( $p_t > 20$  GeV) és protonok

$\beta^* \sim 1000\text{m}$

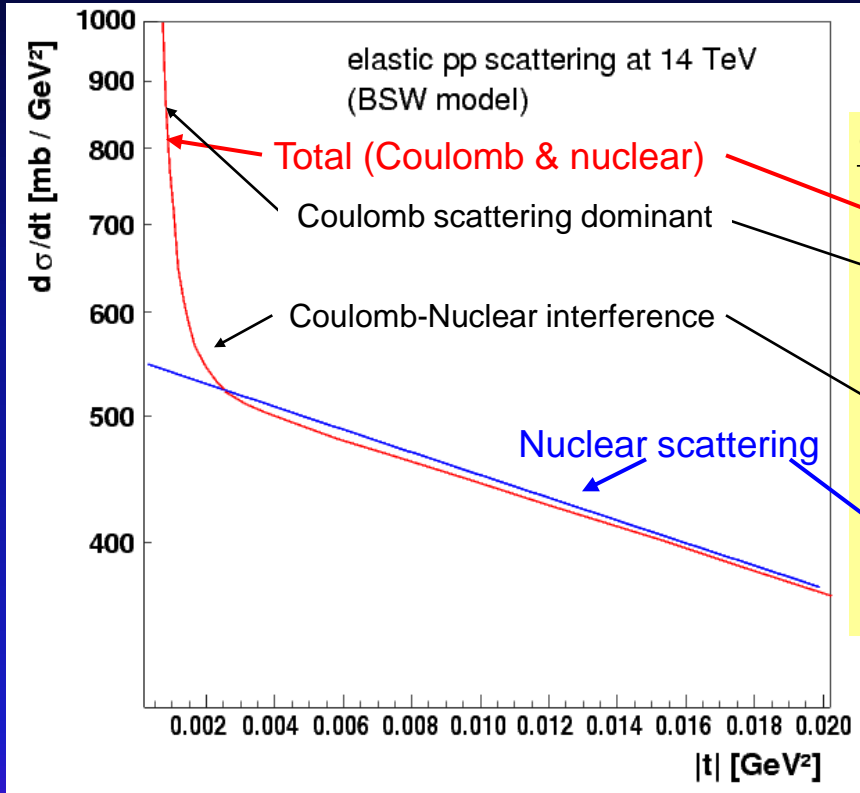
$t > 5 \cdot 10^{-4}$  GeV<sup>2</sup>

a  $\rho$  paraméter megmérése

$p$  A run-okat 2013. év elejére tervezzük



# $\rho$ paraméter mérése: Rugalmas Szórás alacsony $|t|$ tartomány



Optikai Theorem:

$$\sigma_{tot} = \frac{4\pi}{s} \Im(T_{elastic,nuclear}(t=0))$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{4\pi\alpha^2 (\hbar c)^2 G^4(t)}{|t|^2} + \frac{\alpha(\rho - \alpha\phi)\sigma_{tot} G^2(t)}{|t|} e^{-B|t|/2} + \frac{\sigma_{tot}^2 (1 + \rho^2)}{16\pi(\hbar c)^2} e^{-B|t|}$$

$\alpha$  = finomszerkezeti állandó

$\phi$  = relatív Coulomb-nuclear fázis

$G(t)$  = nucleon el.-mag. form faktor =  $(1 + |t| / 0.71)^{-2}$

$\rho = \Re / \Im [T_{elastic,nuclear}(t=0)]$

A  $\rho$  mérése a Coulomb – Nukleáris interferencia tartományban

$t \sim 5 \cdot 10^{-4} \text{ GeV}^2$

**Ez elérhető a  $\beta^* \sim 1000$  m értékével még 2012 folyamán!**

# Köszönetnyilvánítás



Köszönet az  
OTKA 74458, NKTH HA07-C  
OTKA NK 73143 (2008-2011)  
OTKA NK 101438 (2012-)  
pályázati támogatásokért

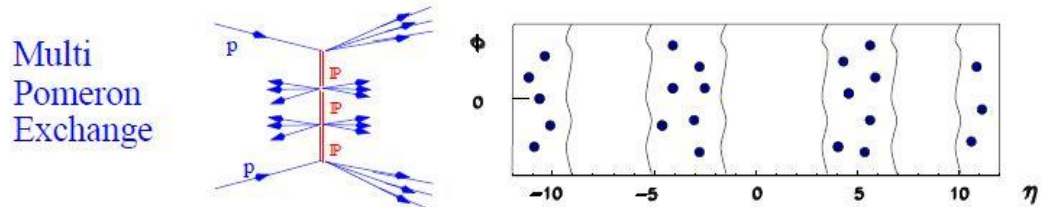
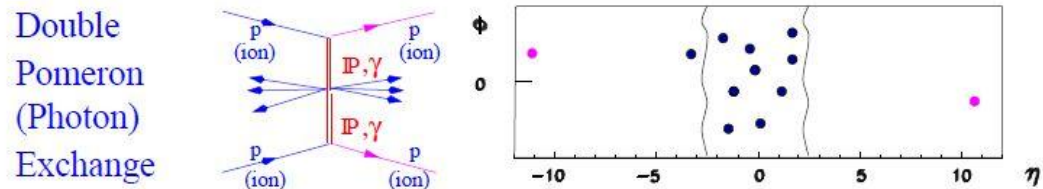
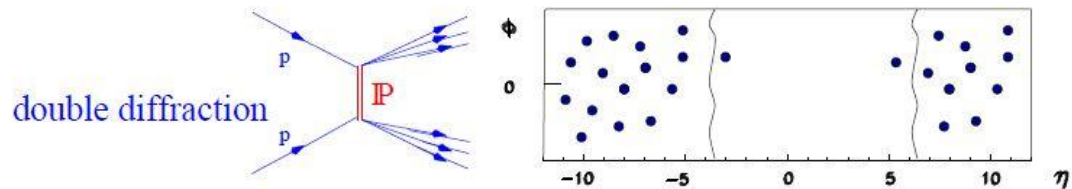
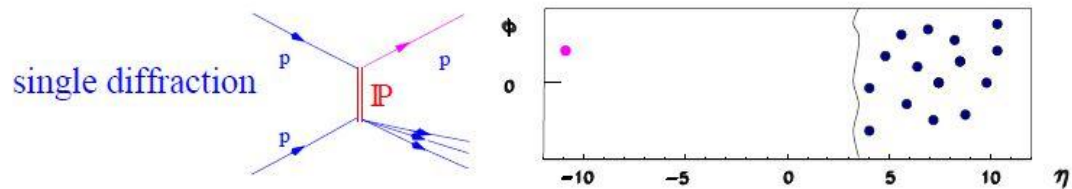
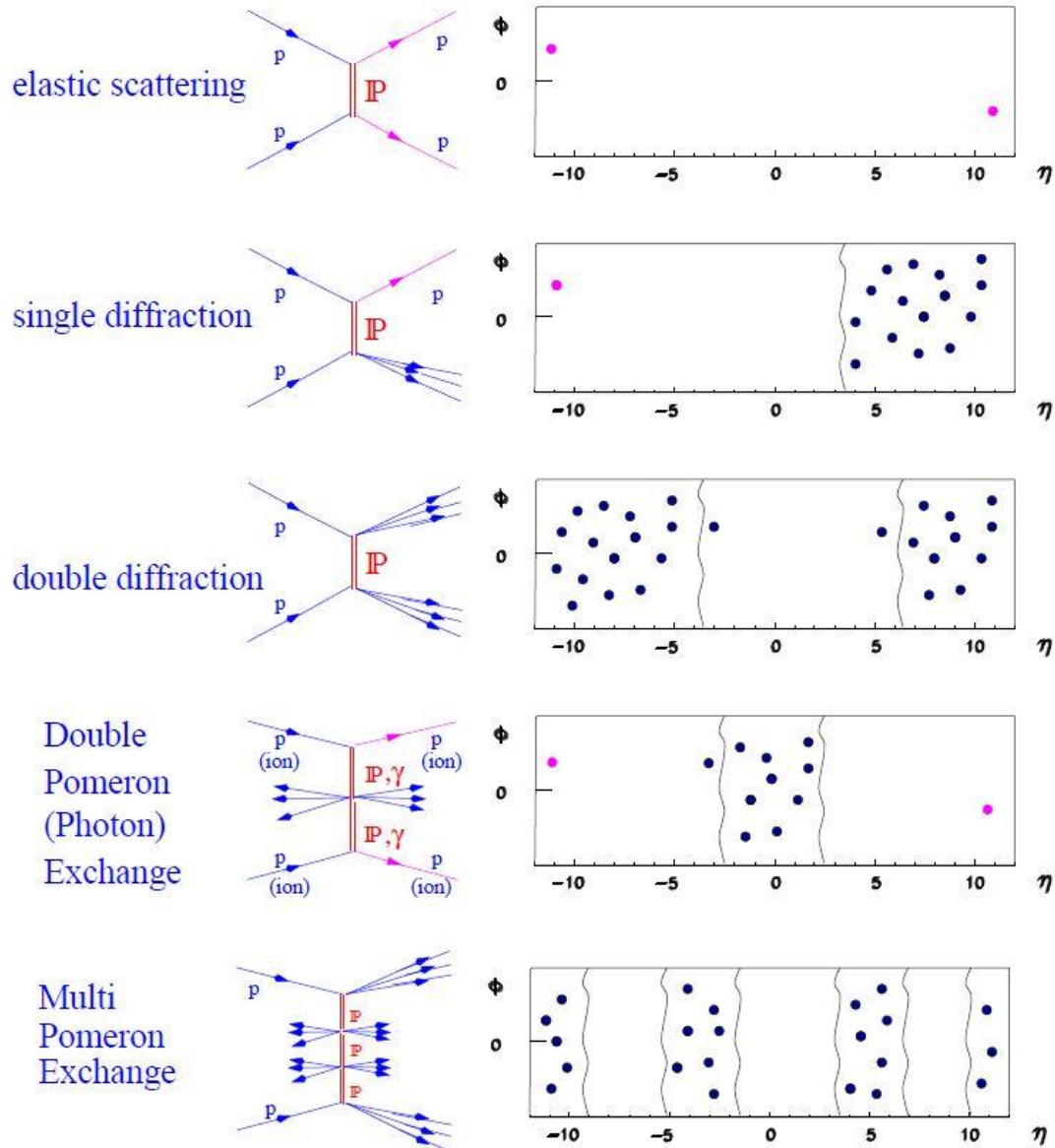
Köszönet Prof. Glauber-nek a kitartó  
támogatásért





# Backup Slides

# Diffraktív folyamatok



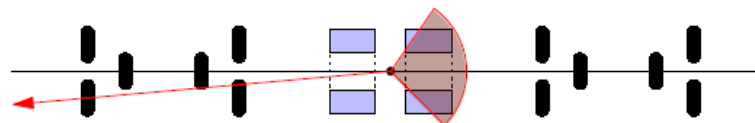


# Szimple diffrakció, alacsony $\xi = \Delta p/p$

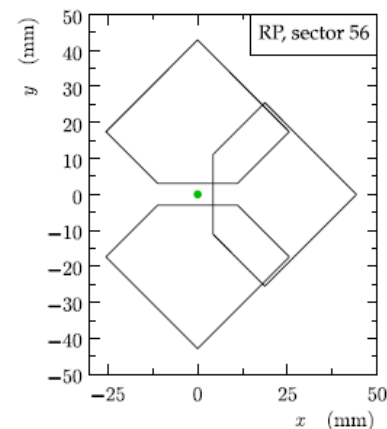
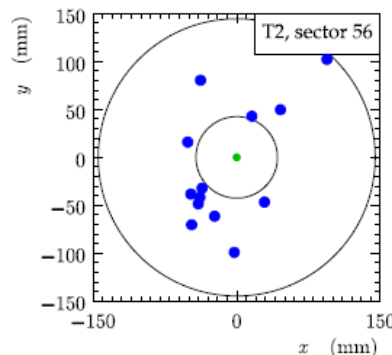
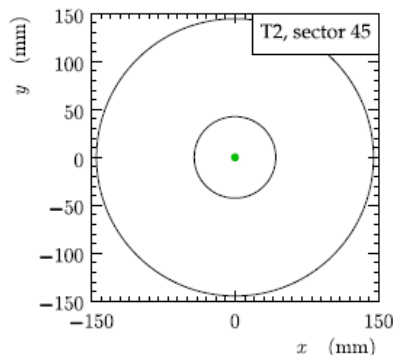
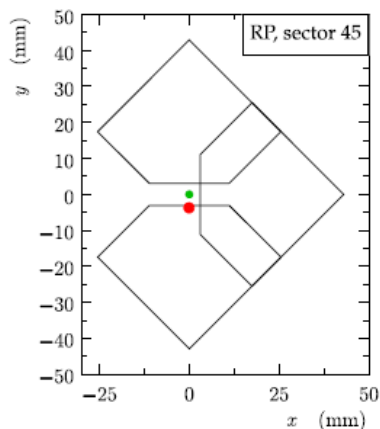


sector 45 IP sector 56

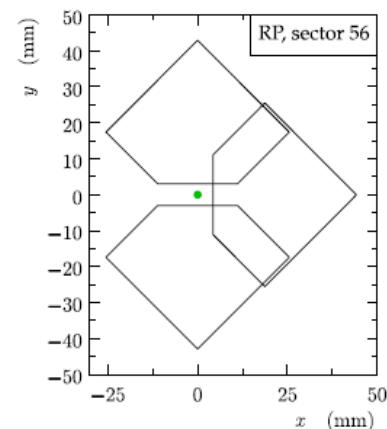
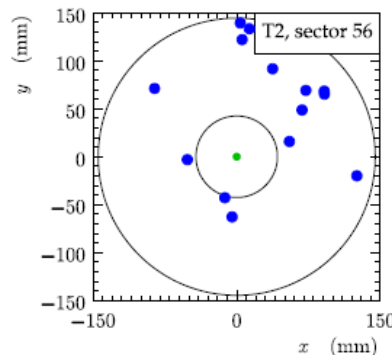
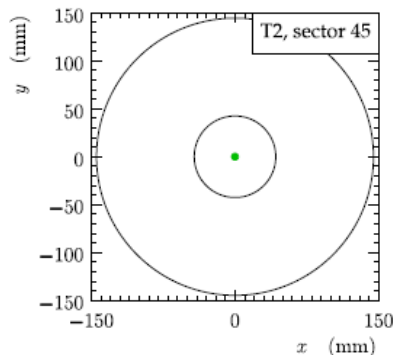
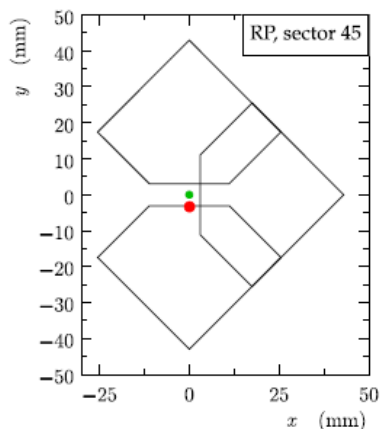
RP T2 T2 RP



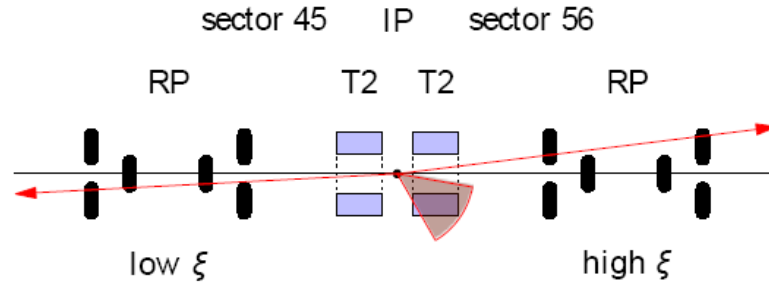
run: 37280003, event: 3000



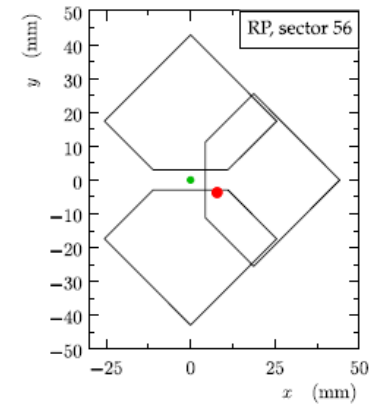
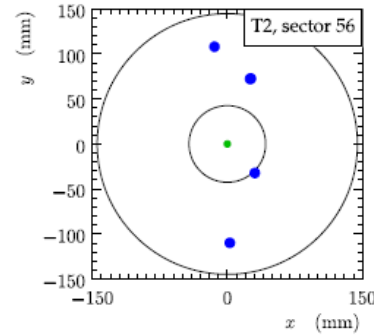
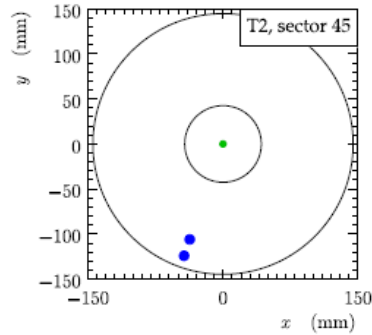
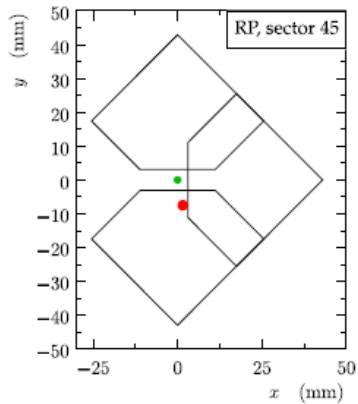
run: 37280004, event: 22784



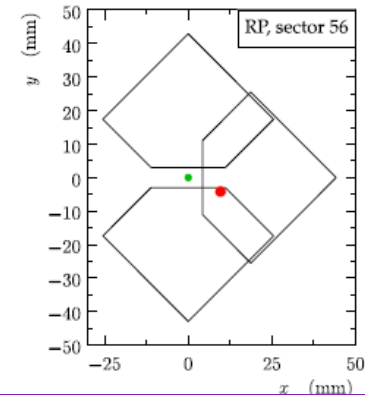
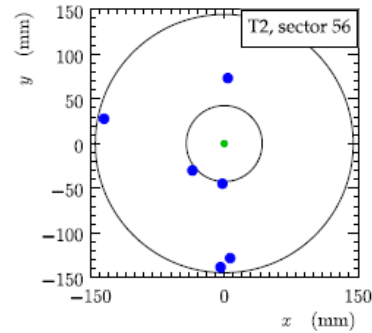
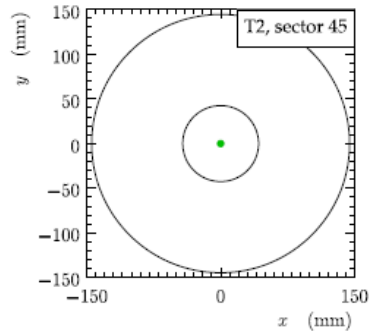
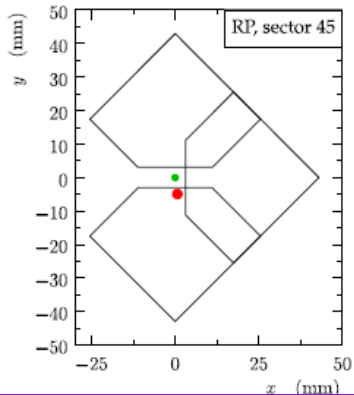
# Dupla POMERON kicserélődés



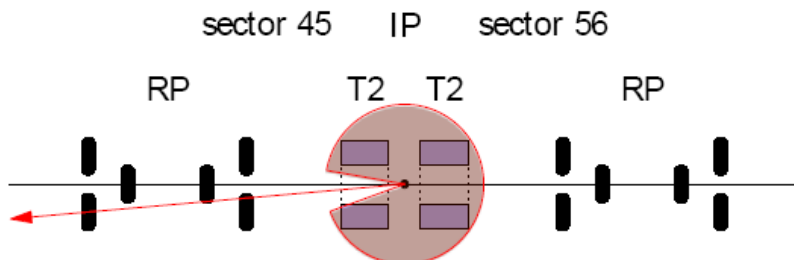
run: 37250009, event: 14125



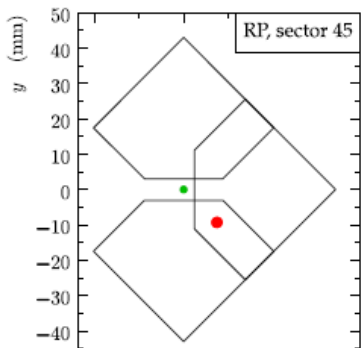
run: 37220007, event: 9904



# Szimple diffrakció, nagy $\xi = \Delta p/p$



run: 37280006, event: 9522



run: 37280006, event: 6074

