

$$\gamma g \log(2) = \lambda_g \log(2) + i_2(2i\pi)$$

Odderon a $p=(q,d)$ modellben, a Tevatron D0 és a CERN LHC TOTEM kísérletei alapján



Szanyi István¹ és Csörgő Tamás^{2,3}

¹Eötvös Loránd Tudományegyetem

²MTA WIGNER Fizikai Kutatóközpont

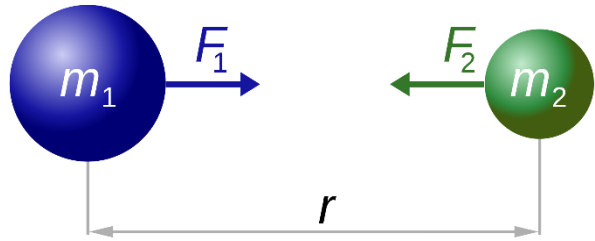
³Eszterházy Károly Egyetem

BerzeTÖK tábor

2019. július 1-5., Mátraszentimre

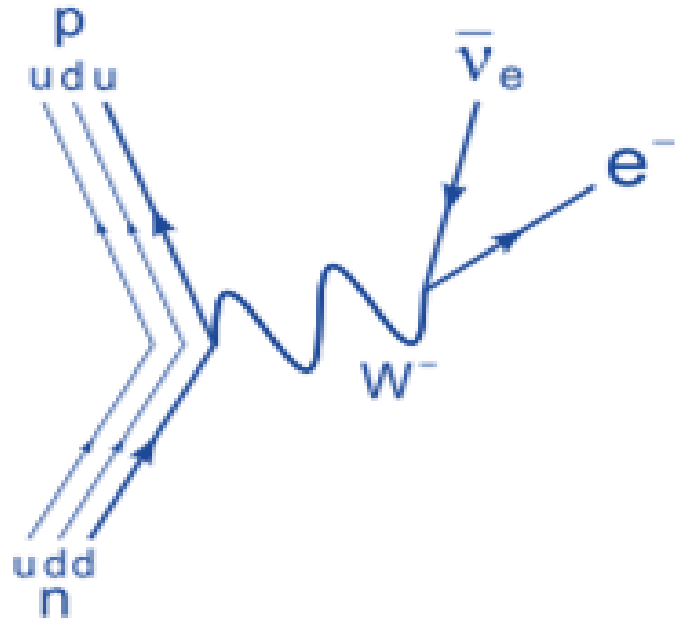
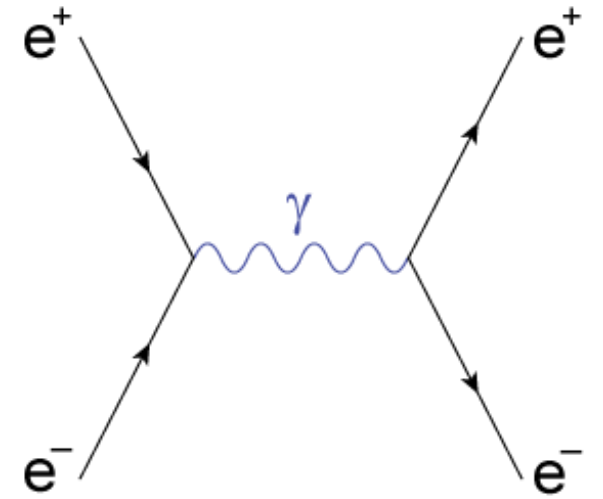


A négy alapvető kölcsönhatás



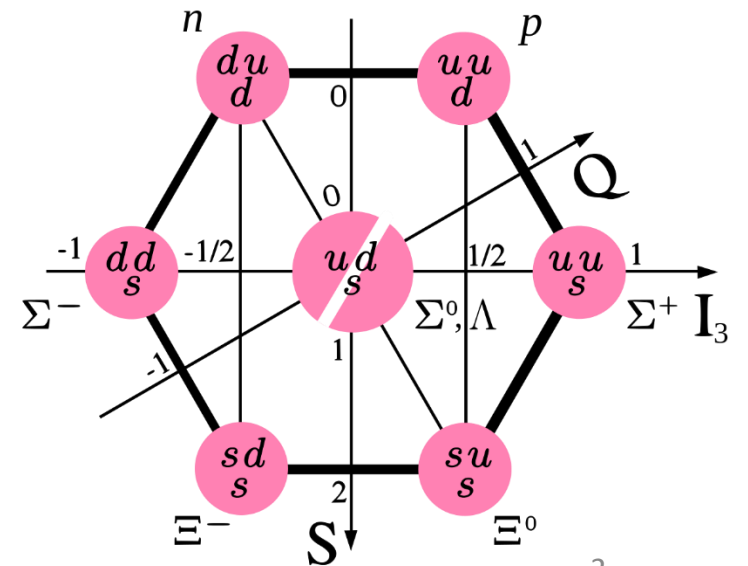
Gravitációs

Elektromágneses

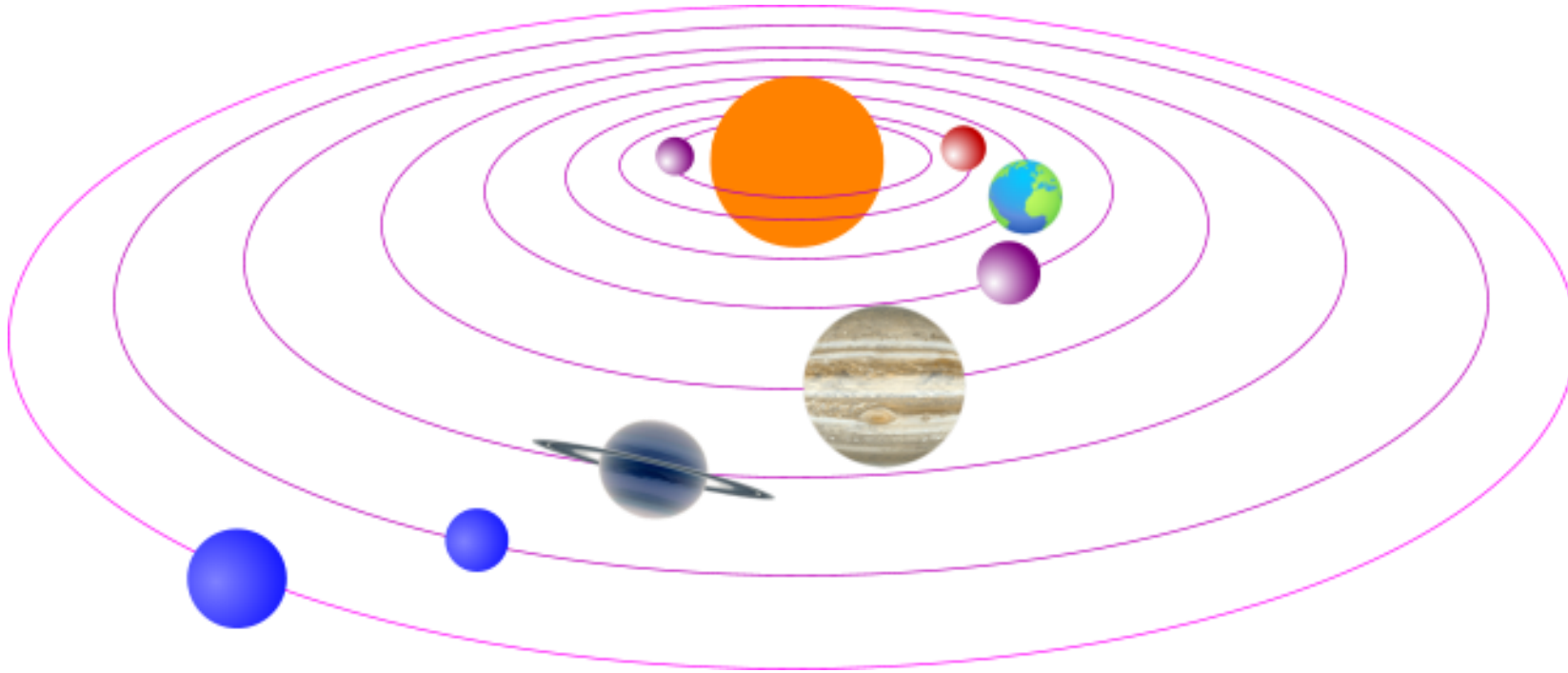


Gyenge

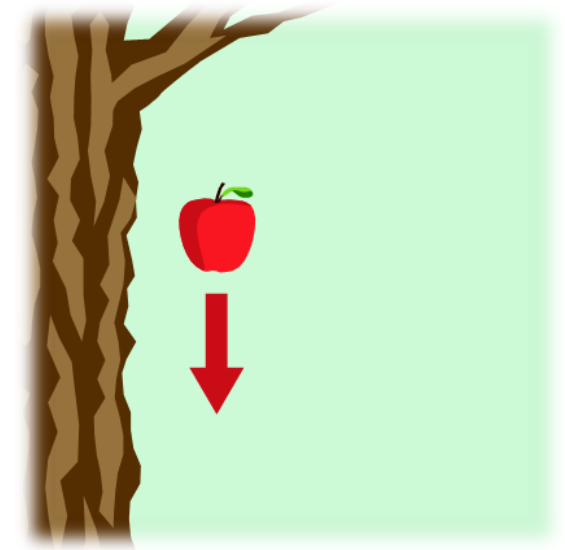
Erős



Gravitációs kölcsönhatás

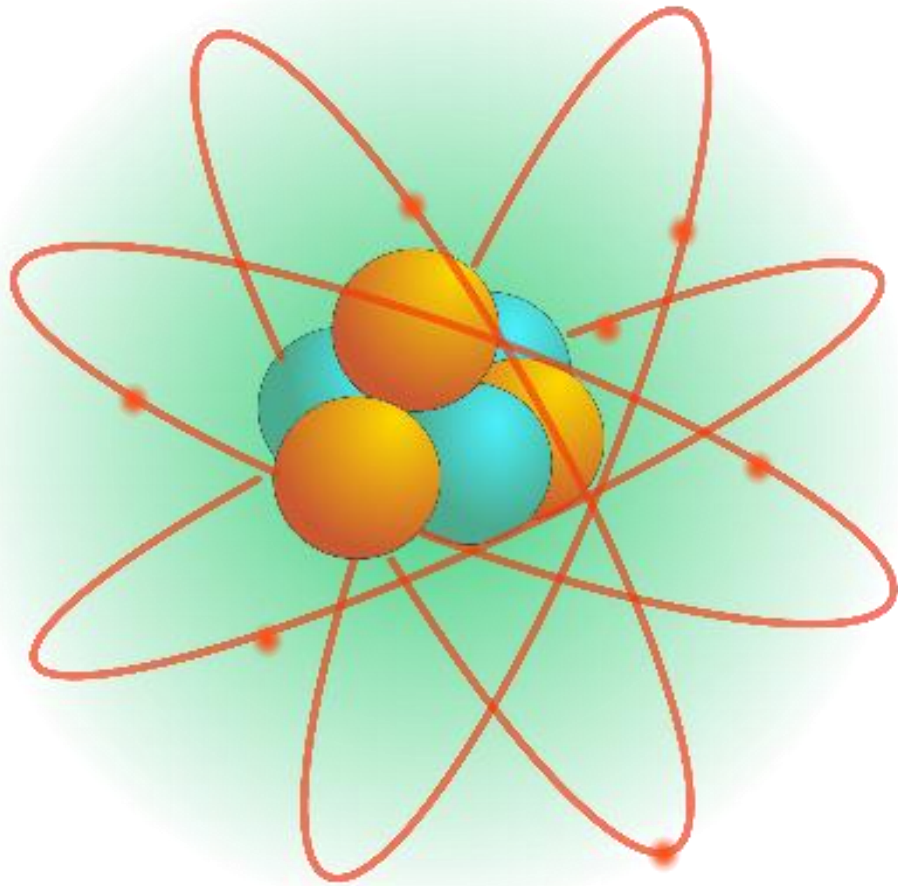


a bolygók keringése a Nap körül

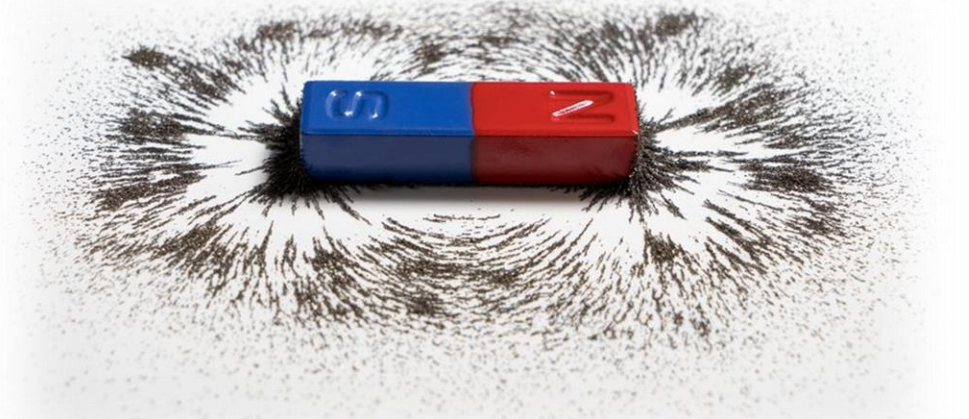


a tárgyak esése

Elektromágneses kölcsönhatás



az atom kialakulása

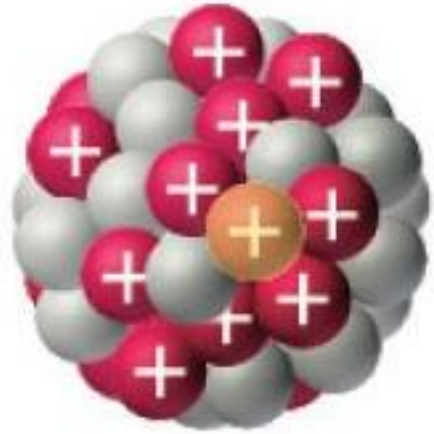


a mágnesek taszítása és vonzása

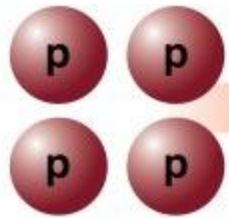


villámlás

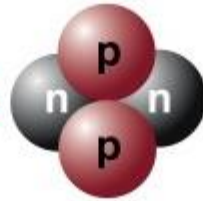
Gyenge kölcsönhatás



β -bomlás



$4\ ^1\text{H}$



$1\ ^4\text{He}$

+

energy

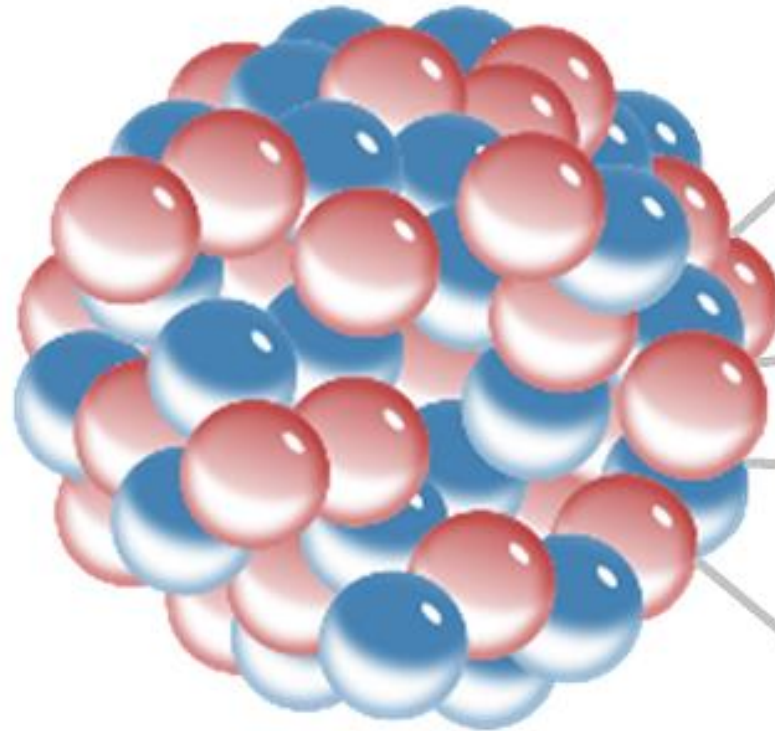
atommagok fúziója



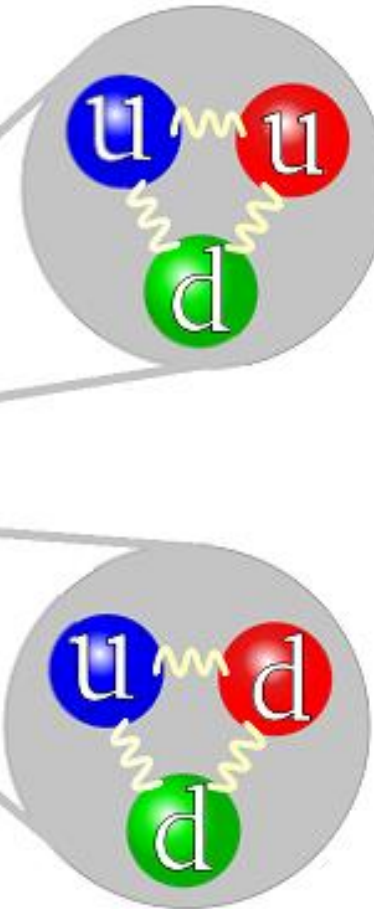
a Nap izzása

Erős kölcsönhatás

atommag



az atommag
kialakulása



proton

neutron

a hadronok
kialakulása

A kölcsönhatások közvetítő részecskéi

Gravitációs



graviton ?

Gyenge



W^\pm és Z^0 bozonok

Elektromágneses



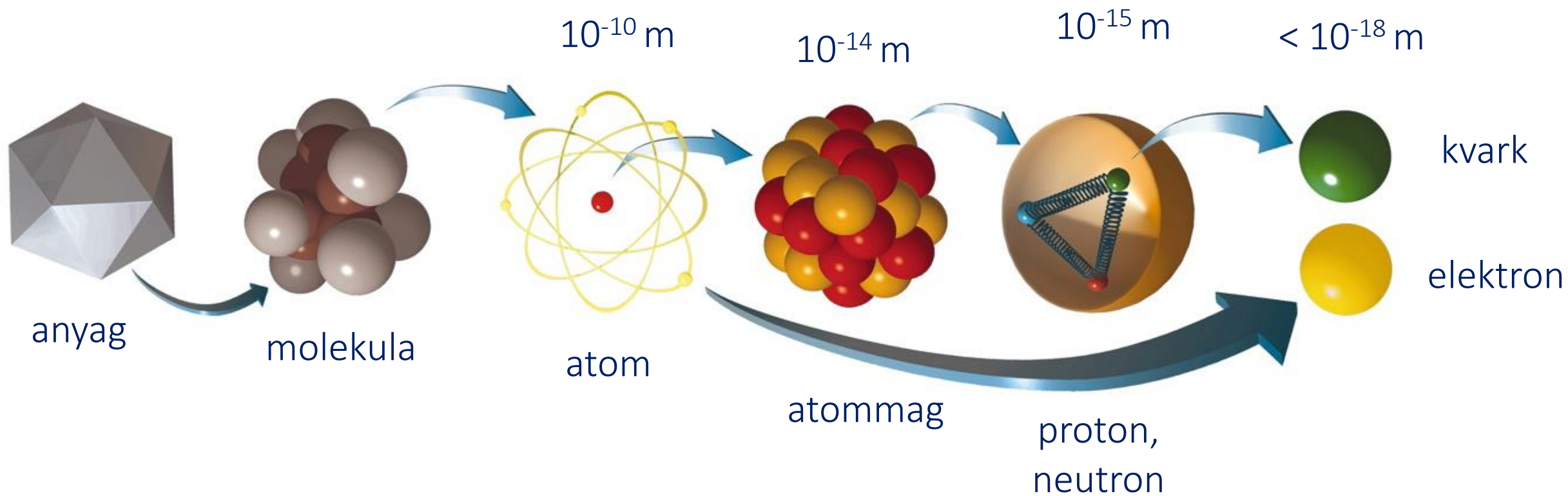
foton

Erős



gluon

Az anyag felépítése és a részecskék méretei



SI prefixumok

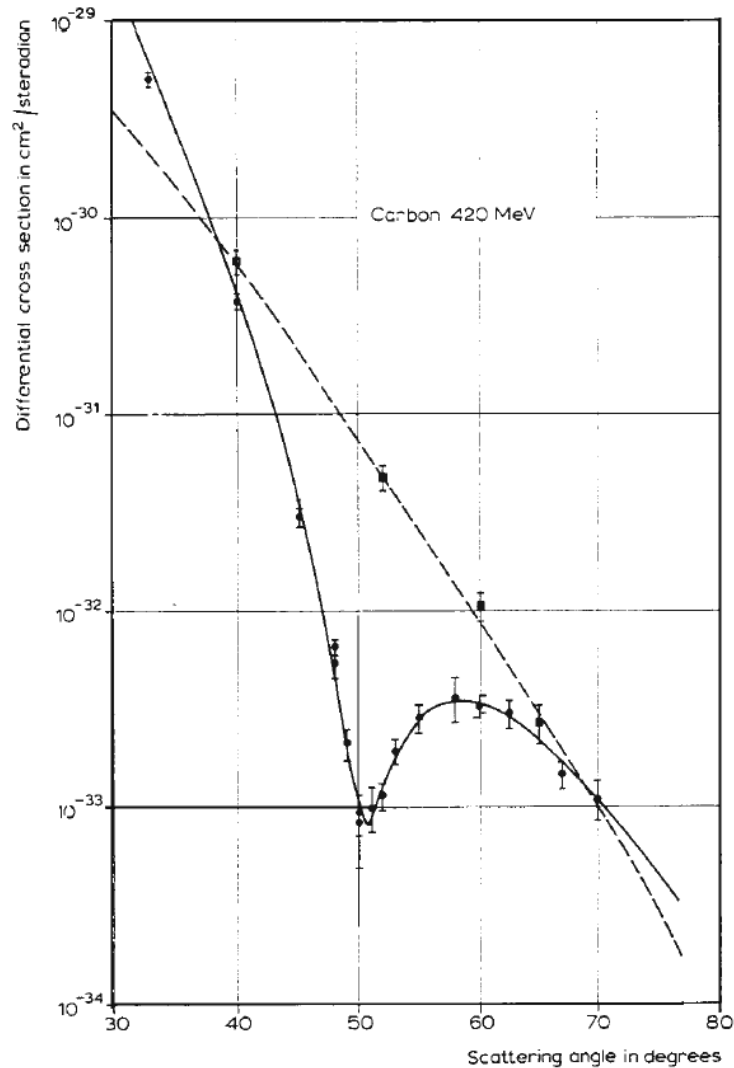
Előtag	Jele	Szorzó	
		hatvánnyal	számnévvel
yotta-	Y	10^{24}	kvadrillió
zetta-	Z	10^{21}	trilliárd
exa-	E	10^{18}	trillió
peta-	P	10^{15}	billiárd
tera-	T	10^{12}	billió
giga-	G	10^9	milliárd
mega-	M	10^6	millió
kilo-	k	10^3	ezer
hekto-	h	10^2	száz
deka-	da (dk)	10^1	tíz
–	–	10^0	egy

Előtag	Jele	Szorzó	
		hatvánnyal	számnévvel
–	–	10^0	egy
deci-	d	10^{-1}	tized
centi-	c	10^{-2}	század
milli-	m	10^{-3}	ezred
mikro-	μ	10^{-6}	milliomod
nano-	n	10^{-9}	milliárdod
piko-	p	10^{-12}	billiomod
femto-	f	10^{-15}	billiárdod
atto-	a	10^{-18}	trilliomod
zepto-	z	10^{-21}	trilliárdod
yokto-	y	10^{-24}	kvadrilliomod

A Nagy Hadronütköztető

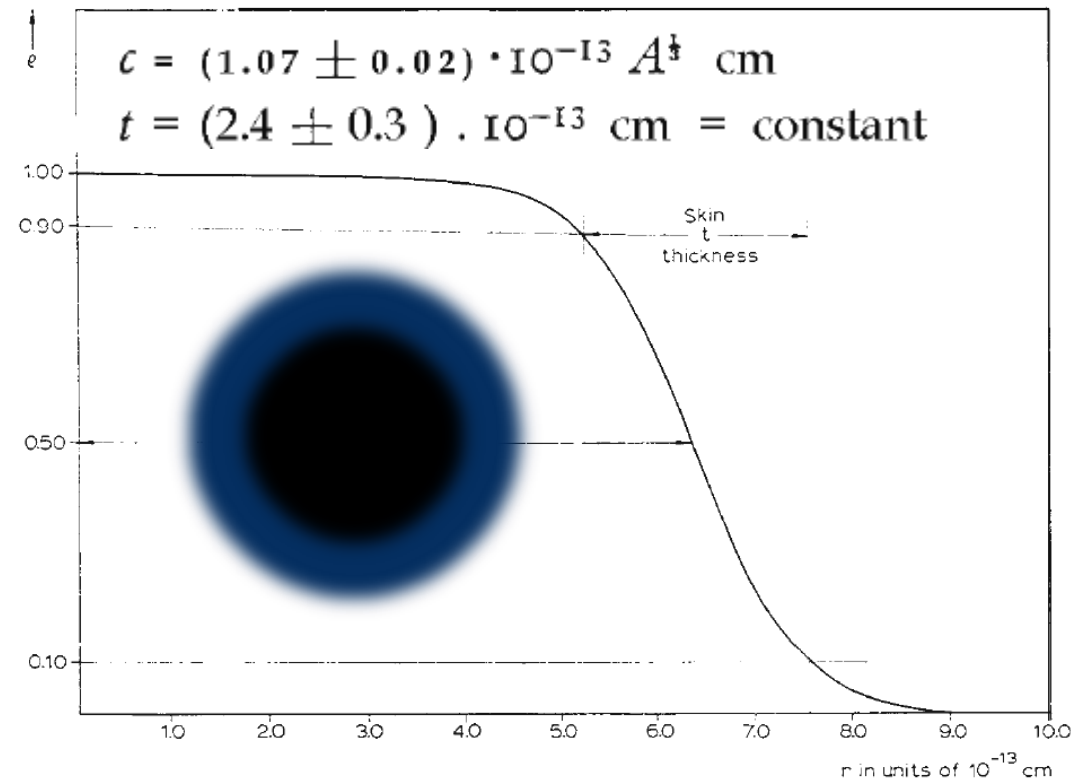


Rugalmas mag-elektron szórás – R. Hofstadter, Nobel-díj (1961)



Atommagokon szóródó elektronok szögeloszlásai

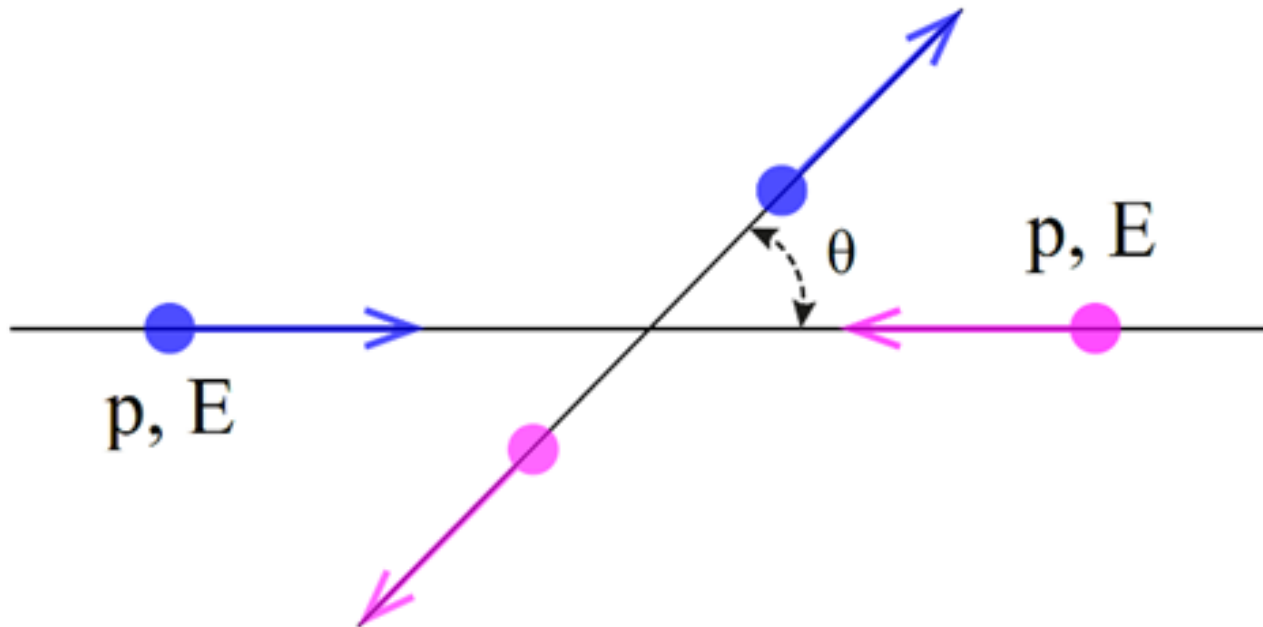
- Az atommagok mérete arányos az A-val (tömegszámmal).
- Az atommagok neutronbőre független az A-tól.
- Az atommagok központi sűrűsége független az A-tól.



Gömb alakú atommagok elektromos töltéseloszlásai

A részecskék szóródása

- **Rugalmatlan szórás:** ütközéskor a részecskék gerjesztett állapotba kerülnek vagy felbomlanak és új részecskék keletkeznek.
- **Rugalmas szórás:** ütközéskor csak impulzusátadás és irányváltás a protonok nem bomlanak fel.



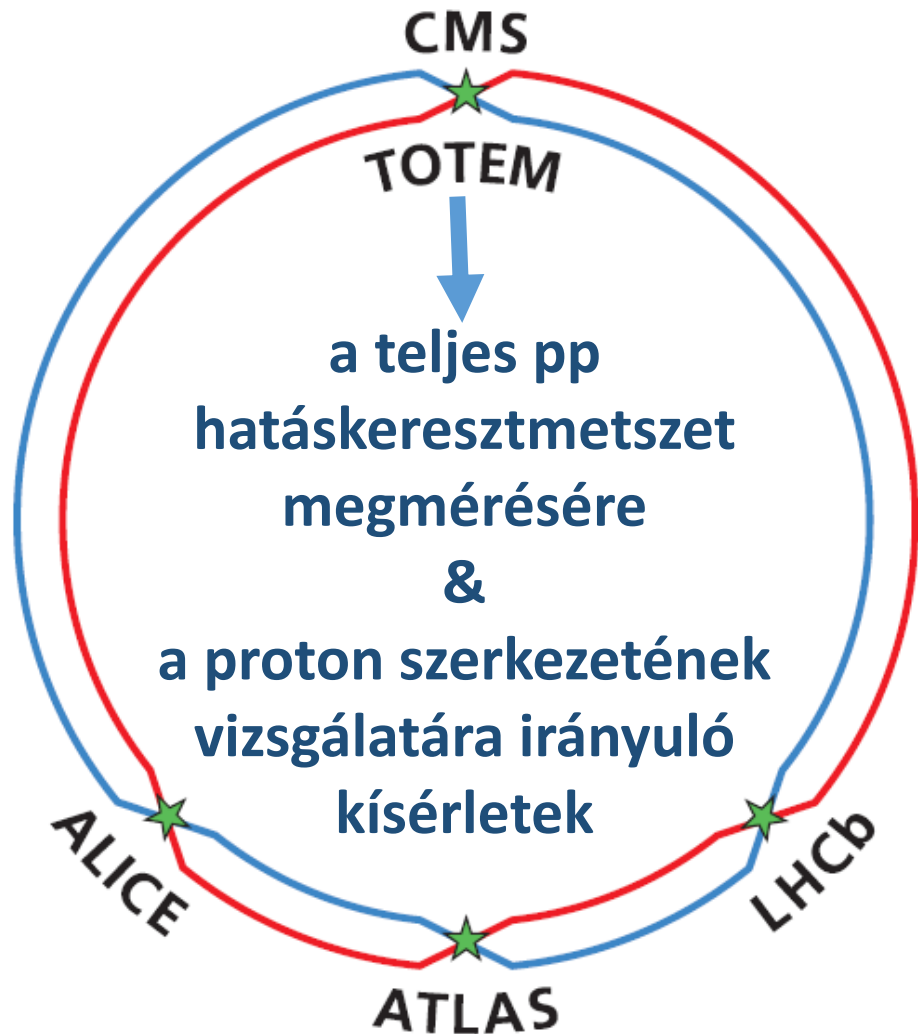
A rugalmas proton-proton szórás modellezése tömegközépponti rendszerben.

- **Mandelstam változók:**
 - átadott impulzus-négyzet:
- ütközési energia-négyzet:

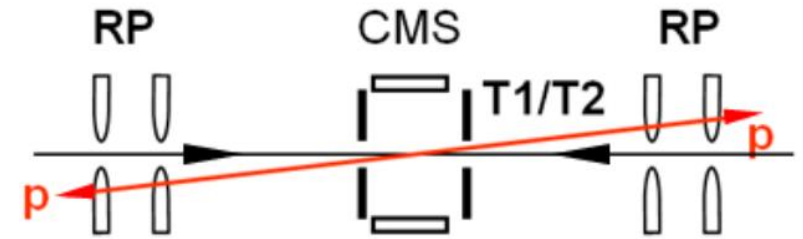
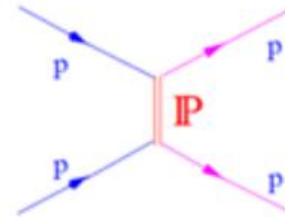
$$t = -p^2\theta^2$$

$$s = 4E^2$$

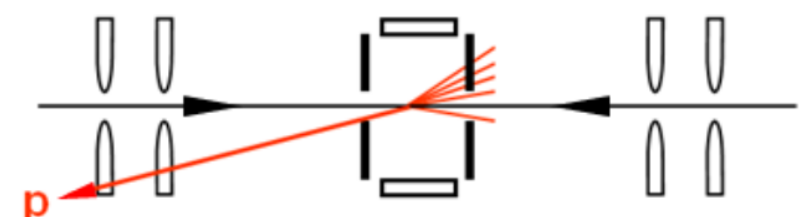
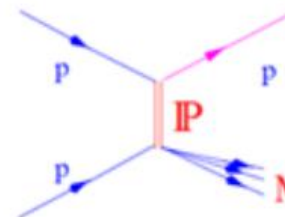
A TOTEM által vizsgált folyamatok az LHC-ben



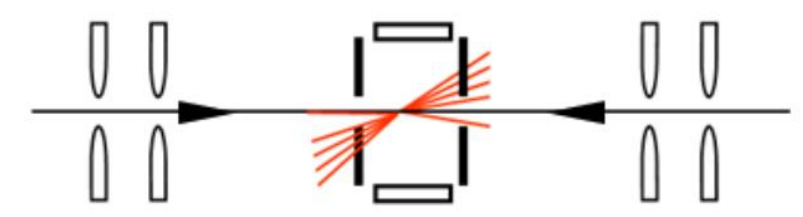
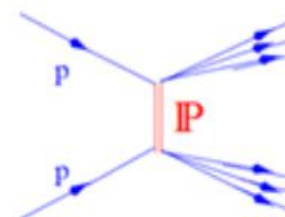
rugalmas szórás



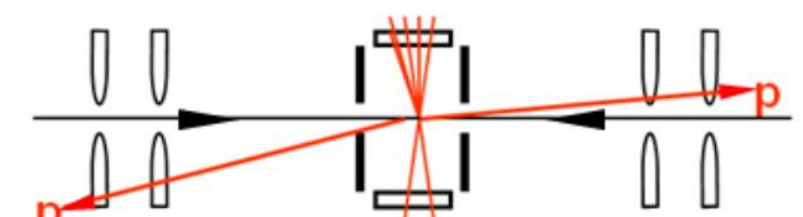
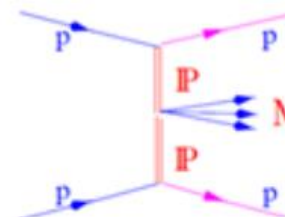
egyszeres diffrakció



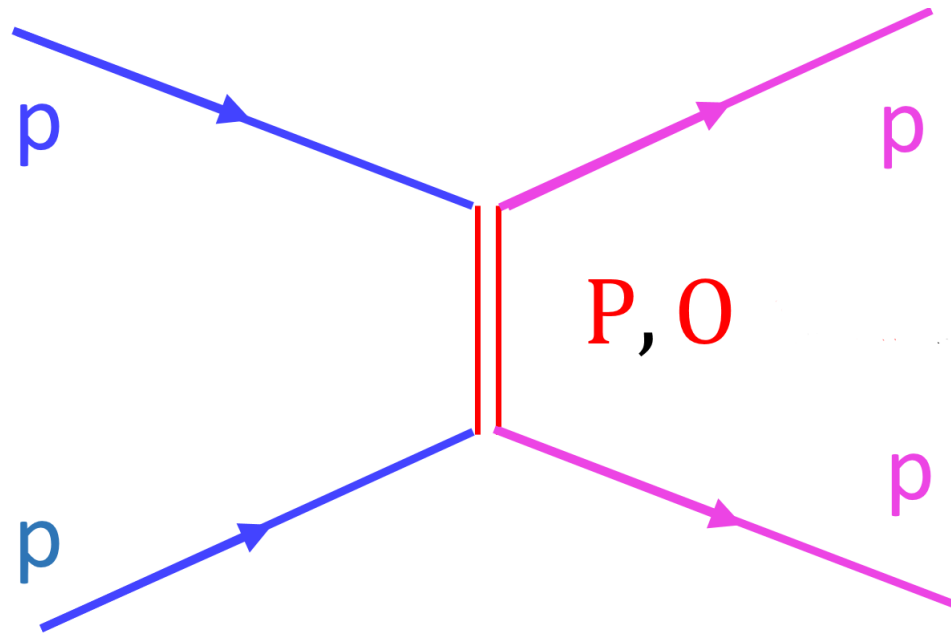
kétszeres diffrakció



centrális diffrakció



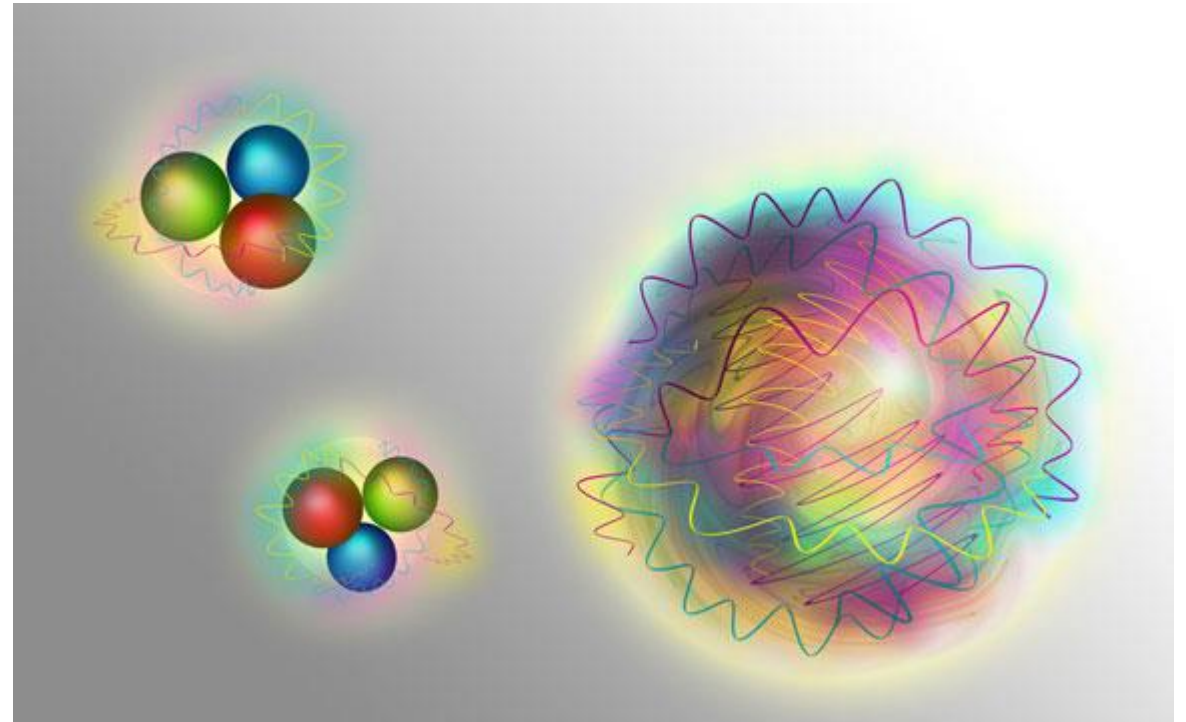
A proton-(anti)proton szórás mechanizmusa



Kölcsönhatás közvetítő részecskékkel:
pomeronnal és odderonnal.

- A **gluonikus cserék (P, O)** teljesen dominálnak TeV-es energiákon.

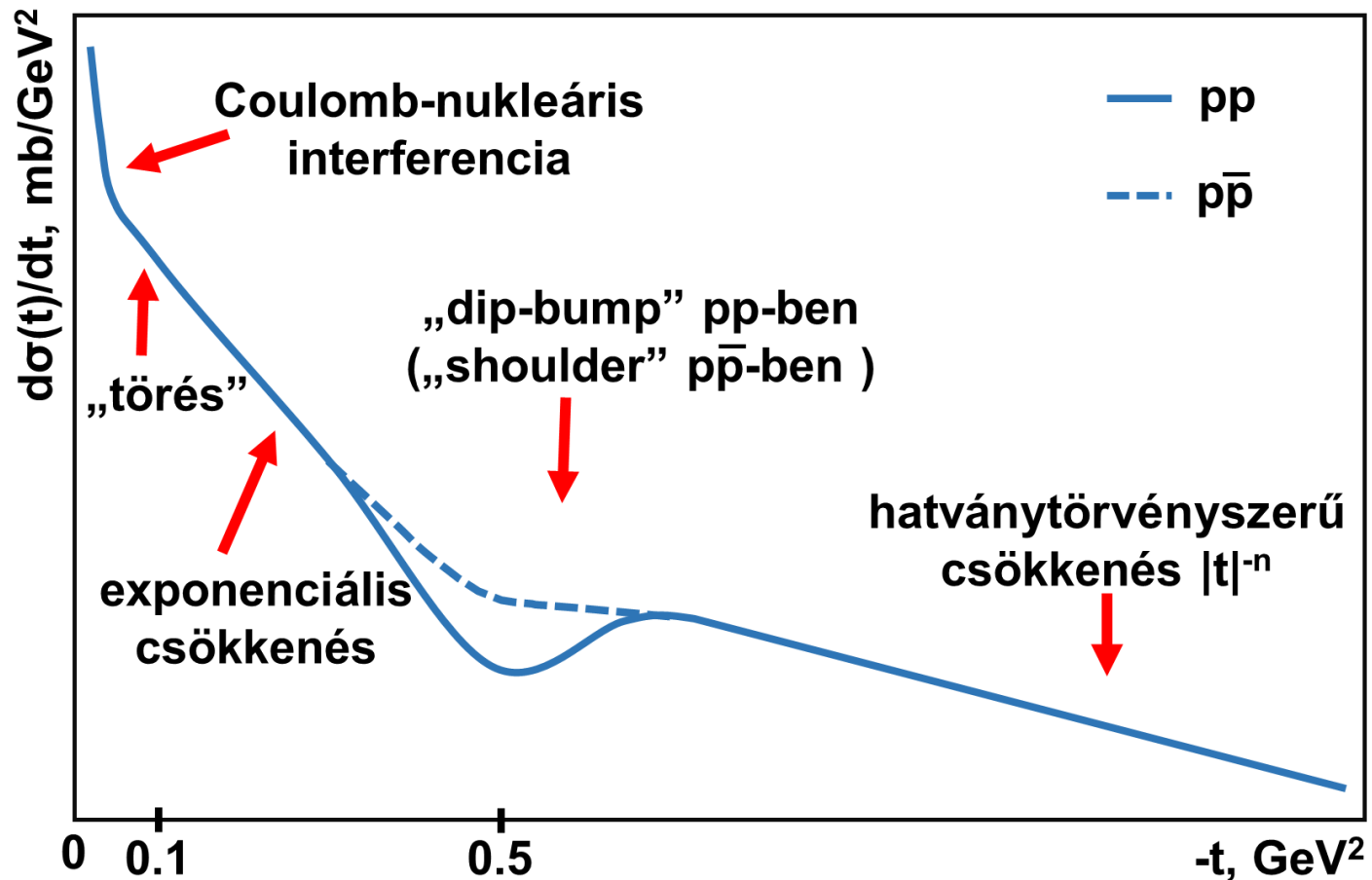
[Szanyi, Bence, Jenkovszky: J. Phys. G 46, 055002 \(2019\)](#)



A kvarkos és a kvark nélküli többgluonos
részecskék szemléltetése.

A pp és $p\bar{p}$ szórás differenciális hatáskeresztmetszete

- A különbség a pp és $p\bar{p}$ szórási folyamatok között a $C=-1$ részecskék cseréjének a hatása.



A rugalmas proton-(anti)proton szórás differenciális hatáskeresztmetszete adott energián.

Inelasztikus keresztmetszet a BB p=(q,d) modellben

$$\tilde{\sigma}_{in}(b) = \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} d^2\vec{s}_q d^2\vec{s}'_q d^2\vec{s}_d d^2\vec{s}'_d D(\vec{s}_q, \vec{s}_d) D(\vec{s}'_q, \vec{s}'_d) \sigma(\vec{s}_q, \vec{s}_d; \vec{s}'_q, \vec{s}'_d; b)$$

- A kvark-dikvark eloszlás a proton belsejében:

$$D(\vec{s}_q, \vec{s}_d) = \frac{1 + \lambda^2}{R_{qd}^2 \pi} e^{-\frac{s_q^2 + s_d^2}{R_{qd}^2}} \delta^2(\vec{s}_q + \lambda \vec{s}_d)$$

$$\lambda = \frac{m_q}{m_d}$$

$$\vec{s}_d = -\lambda \vec{s}_q$$

$$\vec{s}'_d = -\lambda \vec{s}'_q$$

[A. Bialas, A. Bzdak Acta Phys.Polon. B 38, 159-168 \(2007\)](#)

- Az alkotók kölcsönhatási valószínűsége:

$$\sigma(\vec{s}_q, \vec{s}_d; \vec{s}'_q, \vec{s}'_d; b) = 1 - \prod_a \prod_b [1 - \sigma_{ab}(\vec{b} + \vec{s}'_a - \vec{s}_b)]$$

$$\sigma_{ab}(\vec{s}) = A_{ab} e^{-s^2/S_{ab}^2}$$

$$S_{ab}^2 = R_a^2 + R_b^2$$

$$a, b \in \{q, d\}$$

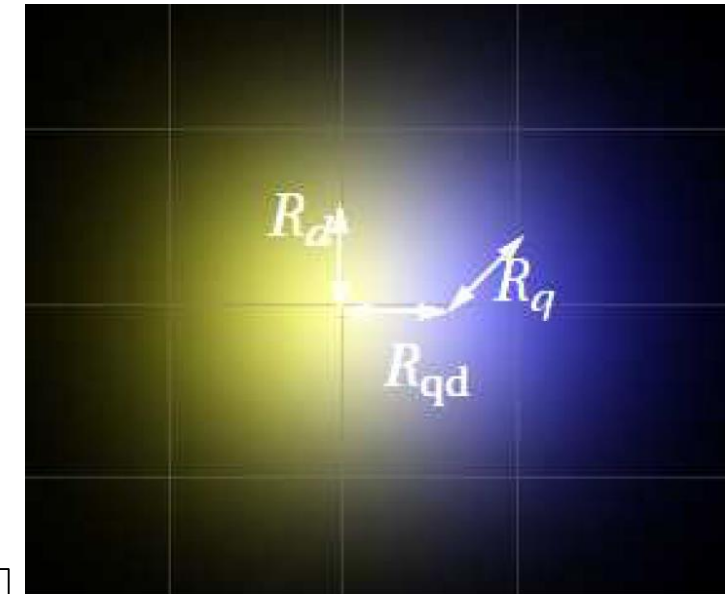
- Az alkotók inelasztikus hatáskeresztmetszetei:

$$\sigma_{ab,in} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \sigma_{ab}(\vec{s}) d^2s$$

$$\sigma_{qq,in} : \sigma_{qd,in} : \sigma_{dd,in} = 1 : 2 : 4$$

- Szabad paraméterek:

$$R_q, R_d, R_{qd}, A_{qq}, \lambda \quad (A_{qq} = 1, \lambda = 0.5 \text{ – rögzíthetőek})$$



Proton-(anti)proton a kvark-dikvark modellben.

Kibővített Bialas-Bzdak modell (reBB)

- A rugalmas szórási amplitúdó az ütközési paraméter térben:

$$t_{el}(s, b) = i[1 - e^{-\Omega(s, b)}]$$

arXiv:1505.01415

F. Nemes, T. Csörgő, M. Csanád, Int. J. Mod. Phys. A Vol. 30 (2015) 1550076

- Az opacitásfüggvény komplex:

$$Re\Omega(s, b) = -\frac{1}{2} \ln[1 - \tilde{\sigma}_{in}(s, b)]$$

$$Im\Omega(s, b) = -\alpha \tilde{\sigma}_{in}(s, b)$$

↑
új szabad paraméter

- A rugalmas szórási amplitúdó az impulzus térben:

$$T(s, t) = 2\pi \int_0^\infty t_{el}(s, b) J_0(\Delta b) b db$$

$$\sqrt{s} \rightarrow \infty, \Delta \cong \sqrt{-t}$$

Mérhető fizikai mennyiségek

- A differenciális hatáskeresztmetszet:

$$\frac{d\sigma}{dt}(s, t) = \frac{1}{4\pi} |T(s, t)|^2$$

- A teljes, rugalmas és rugalmatlan szórési hatáskeresztmetszetek:

$$\sigma_{\text{tot}}(s) = 2\text{Im}T(s, t = 0)$$

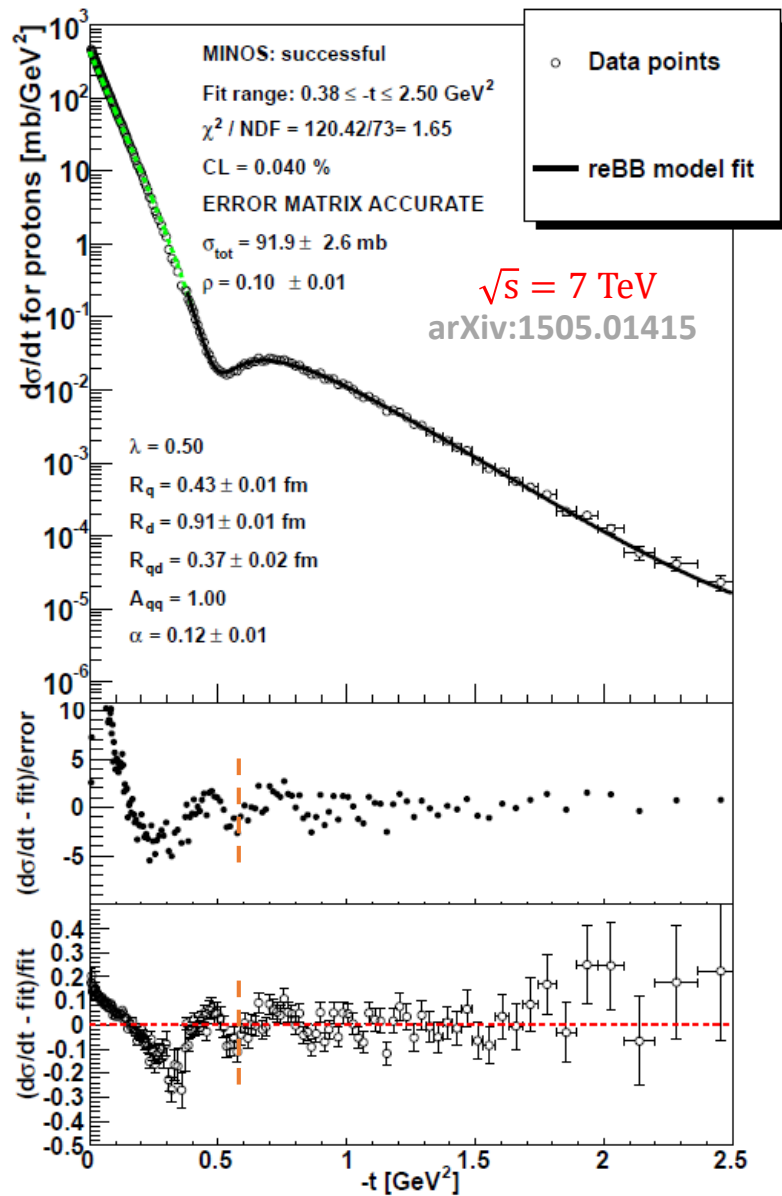
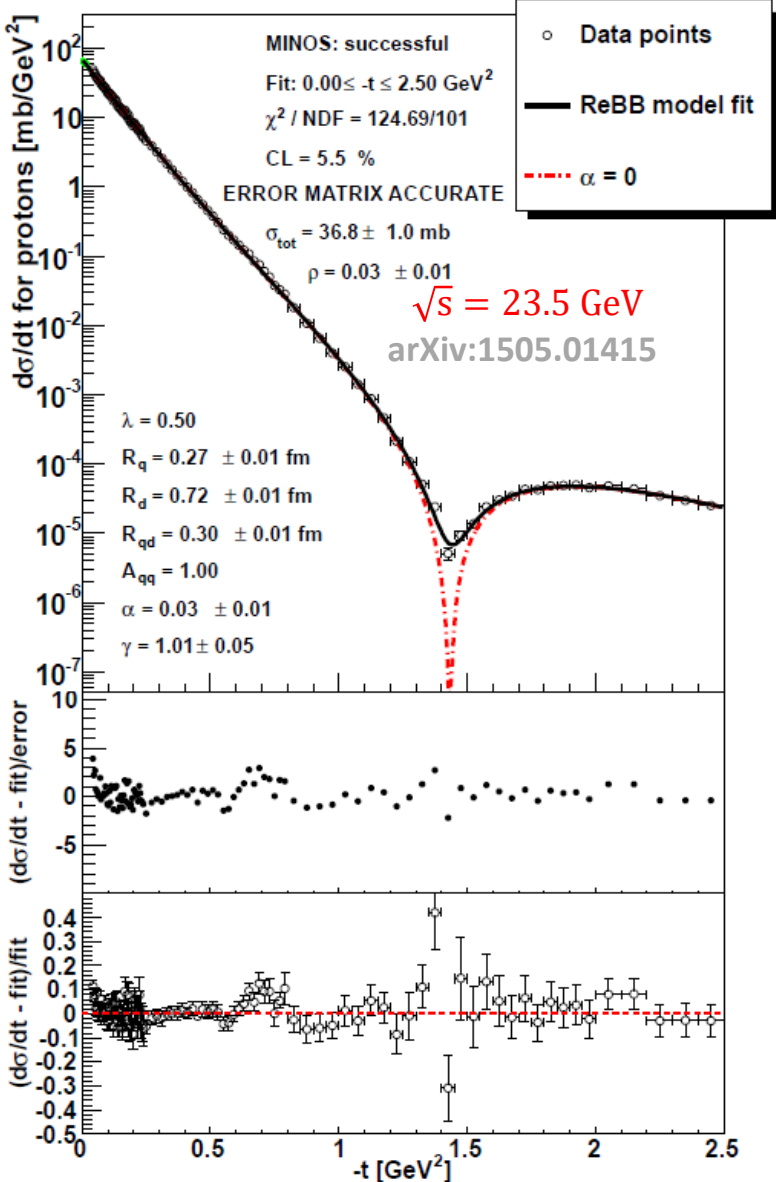
$$\sigma_{\text{el}}(s) = \int_{-\infty}^0 \frac{d\sigma(s, t)}{dt} dt$$

$$\sigma_{\text{in}}(s) = \sigma_{\text{tot}}(s) - \sigma_{\text{el}}(s)$$

- A ρ -paraméter:

$$\rho(s) = \frac{\text{Re}T(s, t = 0)}{\text{Im}T(s, t = 0)}$$

Korábbi eredmények



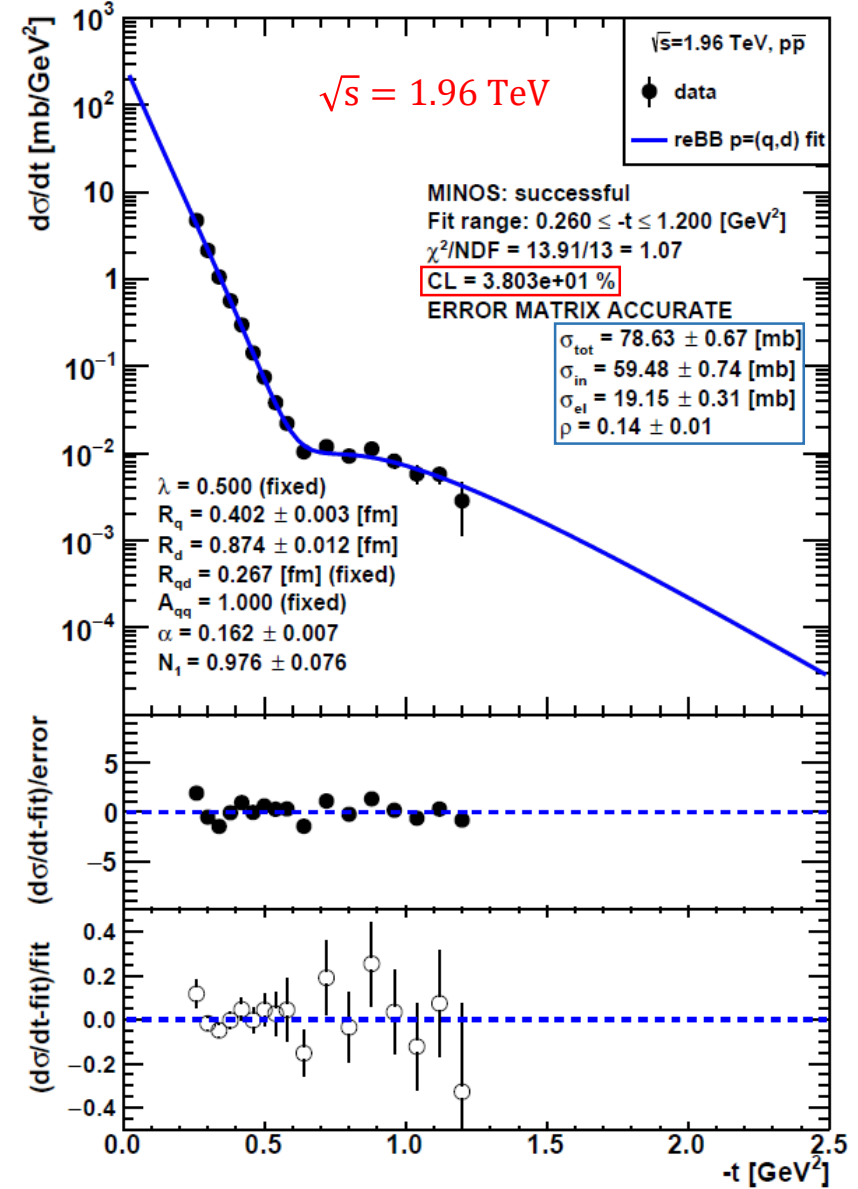
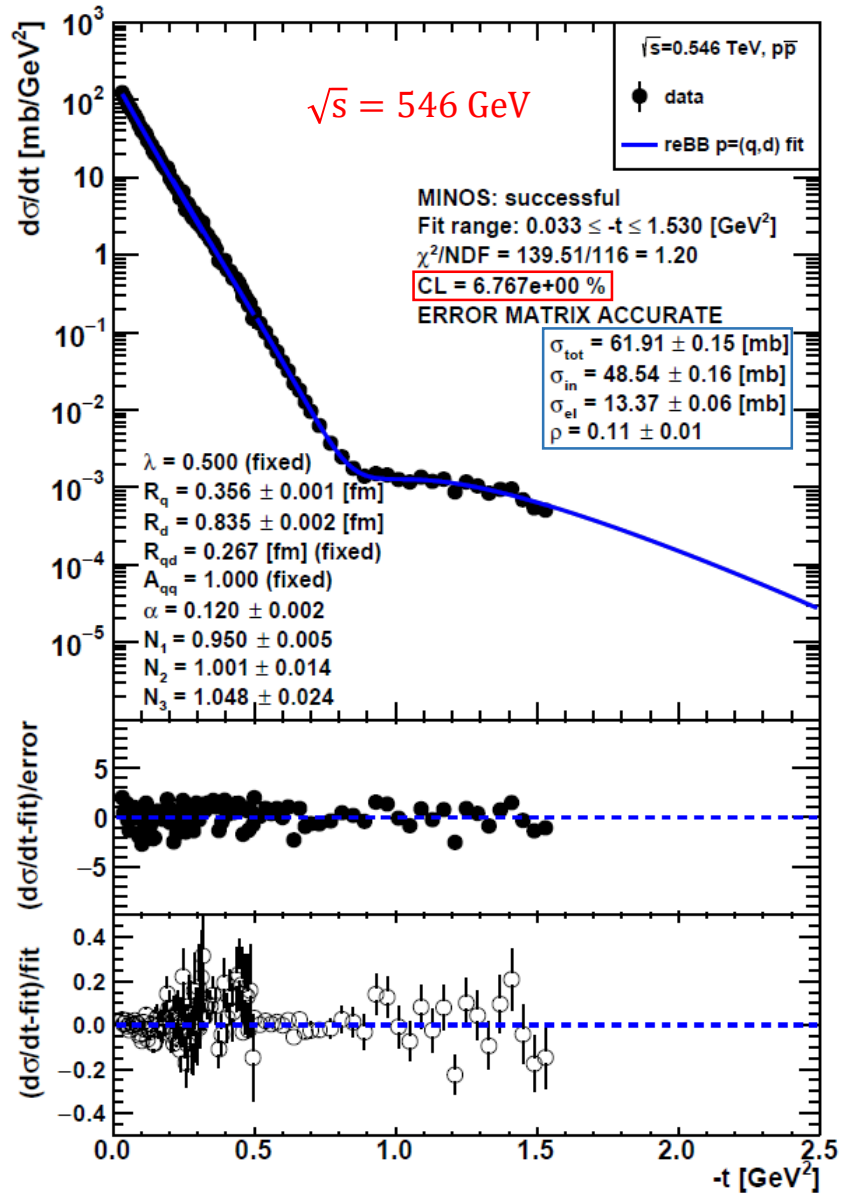
Illesztési módszer

- A legkisebb négyzetek módszere a következő khí-négyzettel:

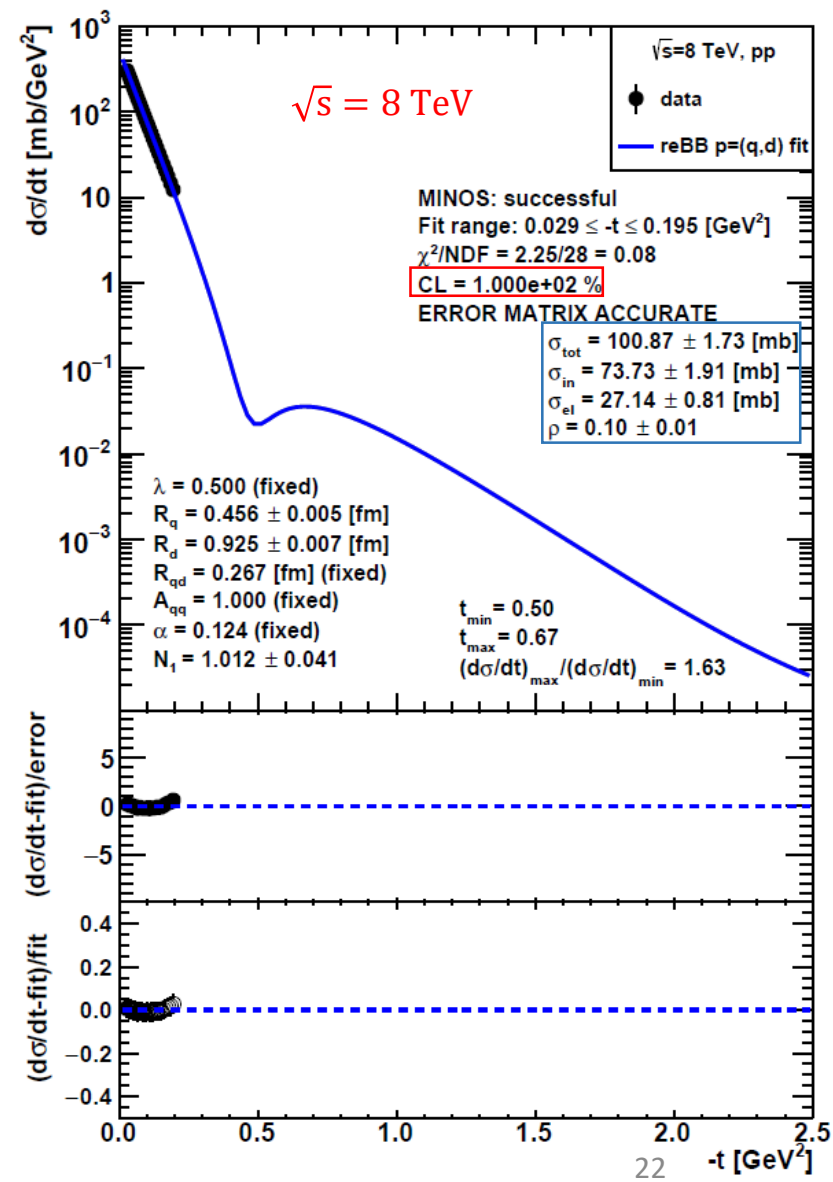
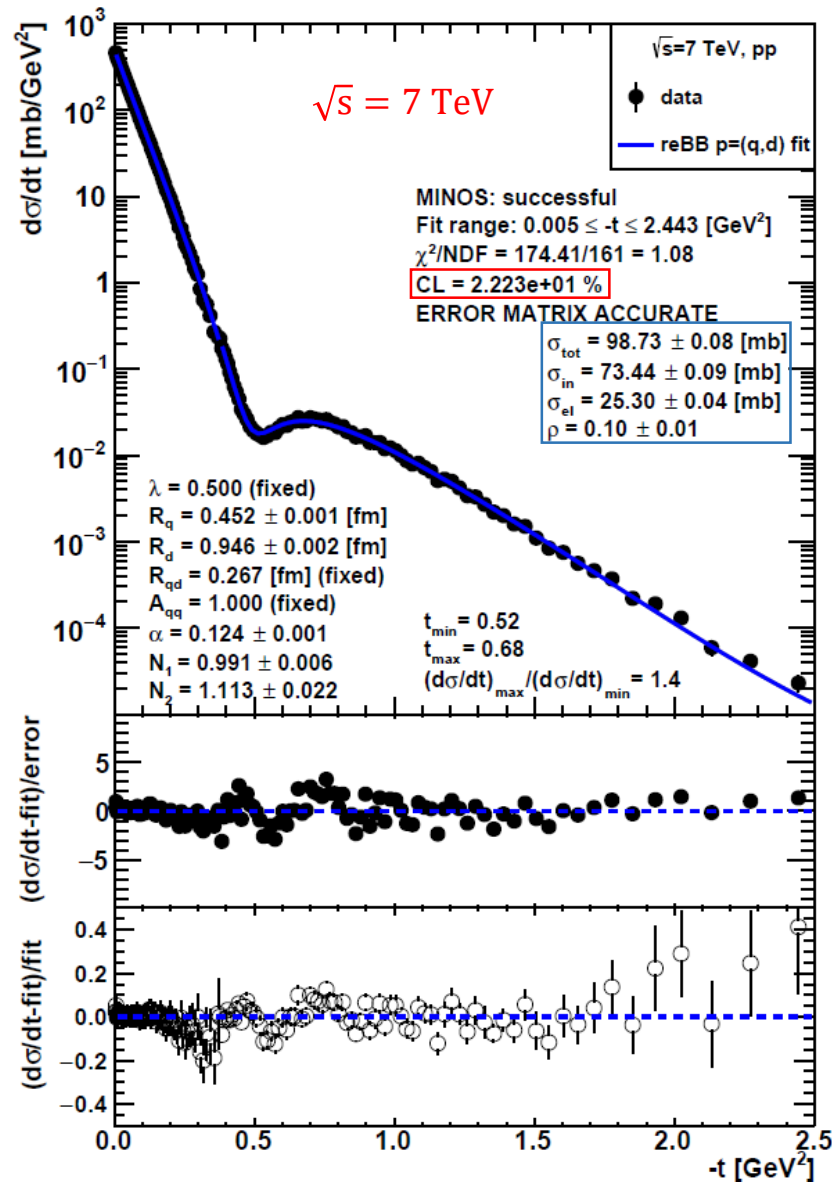
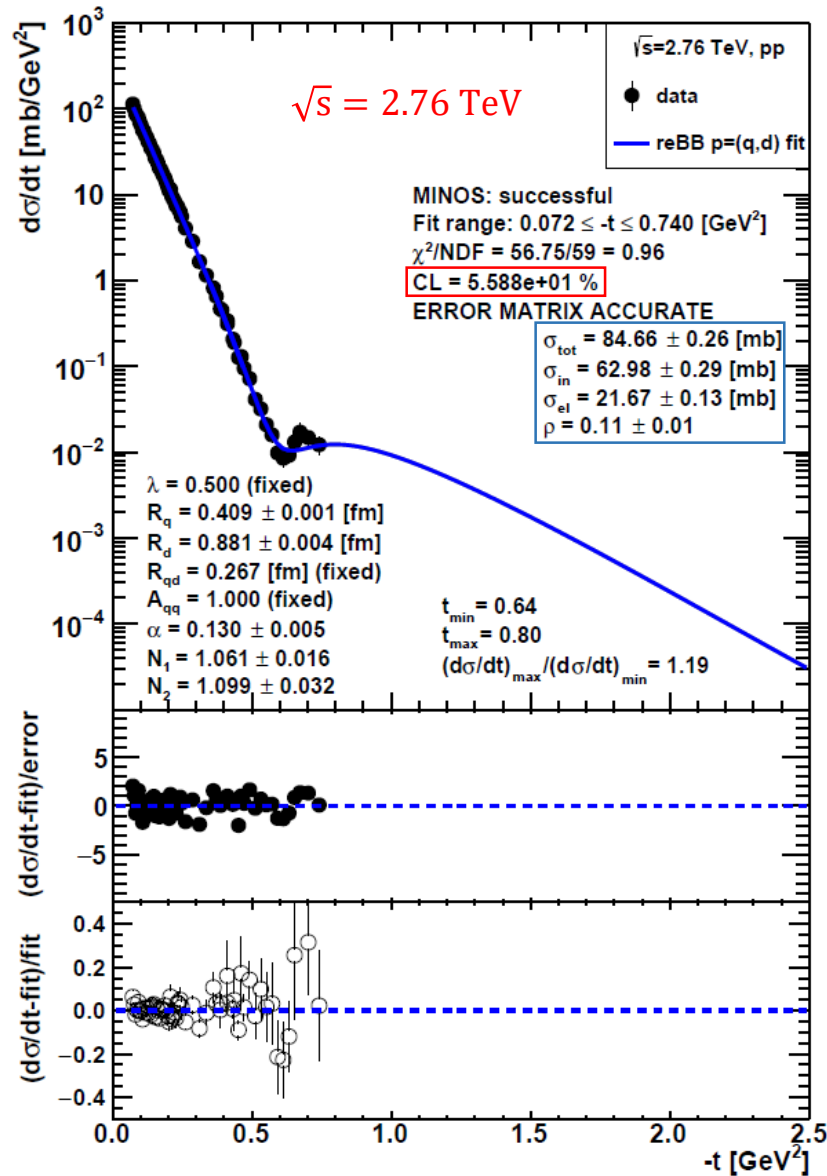
$$\chi^2 = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{n_j} \frac{(d_i - N_j th_i)^2}{e_i^2 + s_i^2} + \sum_{j=1}^M \frac{(N_j - 1)^2}{\delta N_j^2} + \frac{(\sigma_{tot} - \sqrt{N_1} \sigma_{tot,th})^2}{\delta^2 \sigma_{tot}}$$

- Ez figyelembe veszi:
 - a mért differenciális hatáskeresztmetszet adatok t-függő statisztikus és szisztematikus hibáit;
 - a normalizációból eredő bizonytalanságot $\rightarrow N_j$ paramtéterek;
 - a teljes hatáskeresztmetszet kísérleti értékét annak teljes hibájával.
- Minimalizáció a CERN Root MINUIT programmal.
- A paraméterek hibáinak becslése a MINOS algoritmussal.

Új ReBB illesztések a $p\bar{p}$ $d\sigma/dt$ adatokra



Új ReBB illesztések a TOTEM pp $d\sigma/dt$ adatokra



A reBB modell illesztett paramétere

$$A_{qq} = 1 \text{ (rögzített)}, \quad \lambda = 0.5 \text{ (rögzített)}$$

\sqrt{s} [TeV]	0.546 ($p\bar{p}$)	1.96 ($p\bar{p}$)	2.76 (pp)	7 (pp)	8 (pp)
$ t $ [GeV ²]	(0.033, 1.530)	(0.260, 1.200)	(0.072, 0.740)	(0.005, 2.443)	(0.029, 0.195)
χ^2/NDF	139.51/116	13.91/13	56.75/59	174.41/161	2.25/28
CL [%]	6.77	38.03	55.88	22.23	100
R_q [fm]	0.356 ± 0.001	0.402 ± 0.003	0.409 ± 0.001	0.452 ± 0.001	0.456 ± 0.005
R_d [fm]	0.835 ± 0.002	0.874 ± 0.012	0.881 ± 0.004	0.946 ± 0.002	0.925 ± 0.007
R_{qd} [fm]	0.267 (rögzített)				
α	0.120 ± 0.002	0.162 ± 0.007	0.130 ± 0.005	0.124 ± 0.001	0.124 (fixed)
N_1	0.950 ± 0.005	0.976 ± 0.076	1.061 ± 0.016	0.991 ± 0.006	1.012 ± 0.041
N_2	1.001 ± 0.014	–	1.099 ± 0.032	1.113 ± 0.022	–
N_3	1.048 ± 0.024	–	–	–	–

A ReBB modell illesztett paramétereinek értékei a proton-proton és proton-antiproton szórásra.

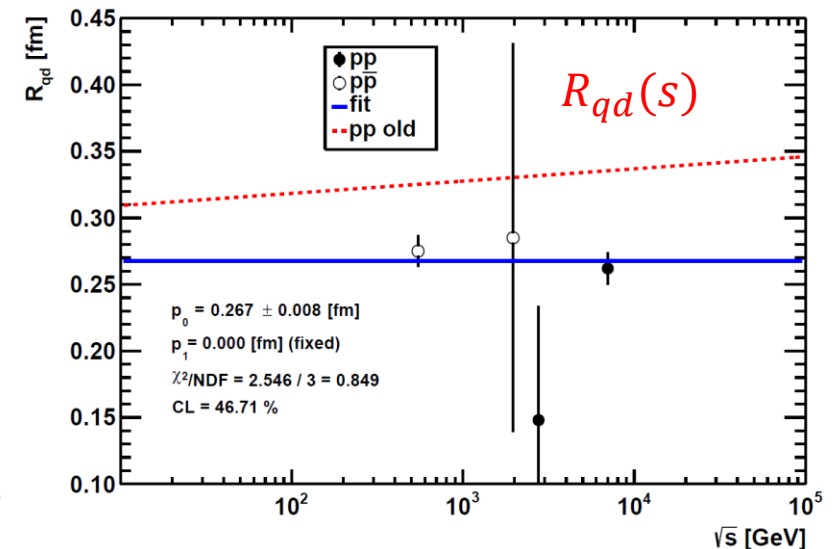
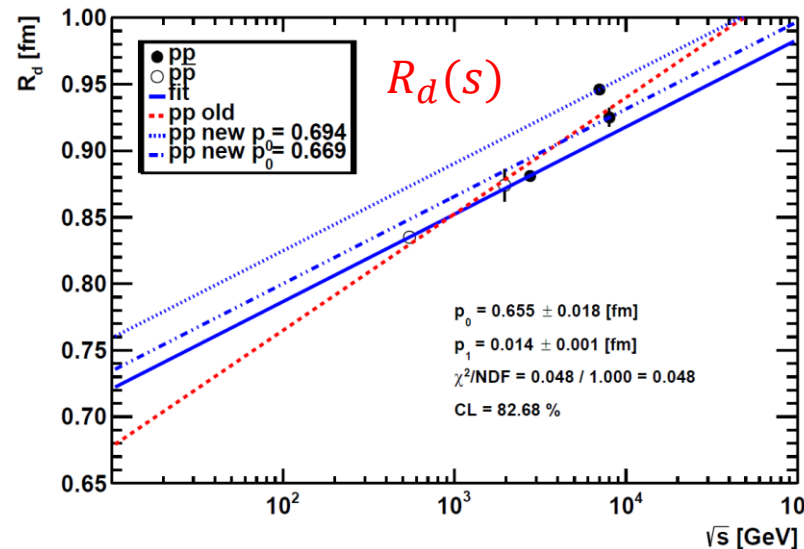
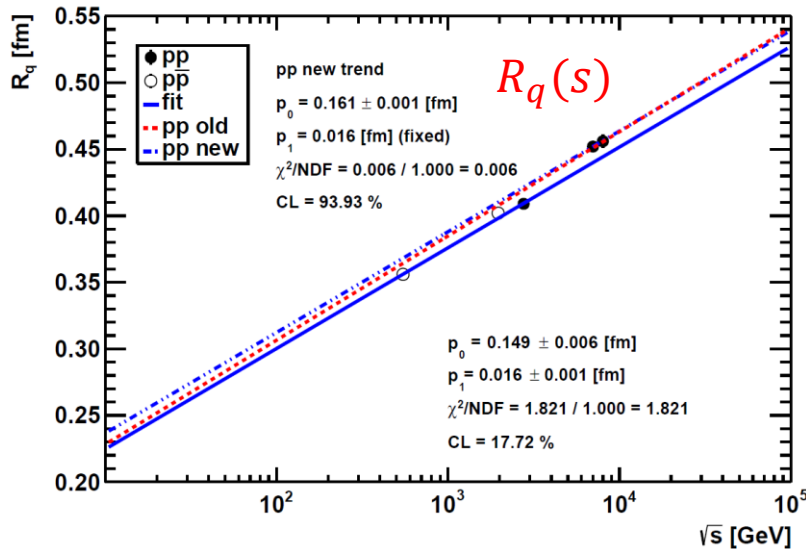
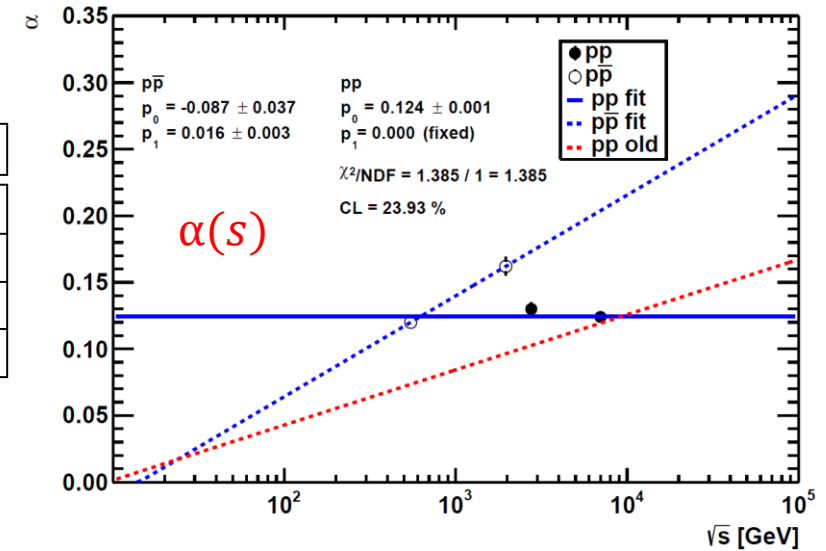
A paraméterértékek és a hibáik két értékes számjegyre vannak felkerekítve.

A paraméterek energiafüggése

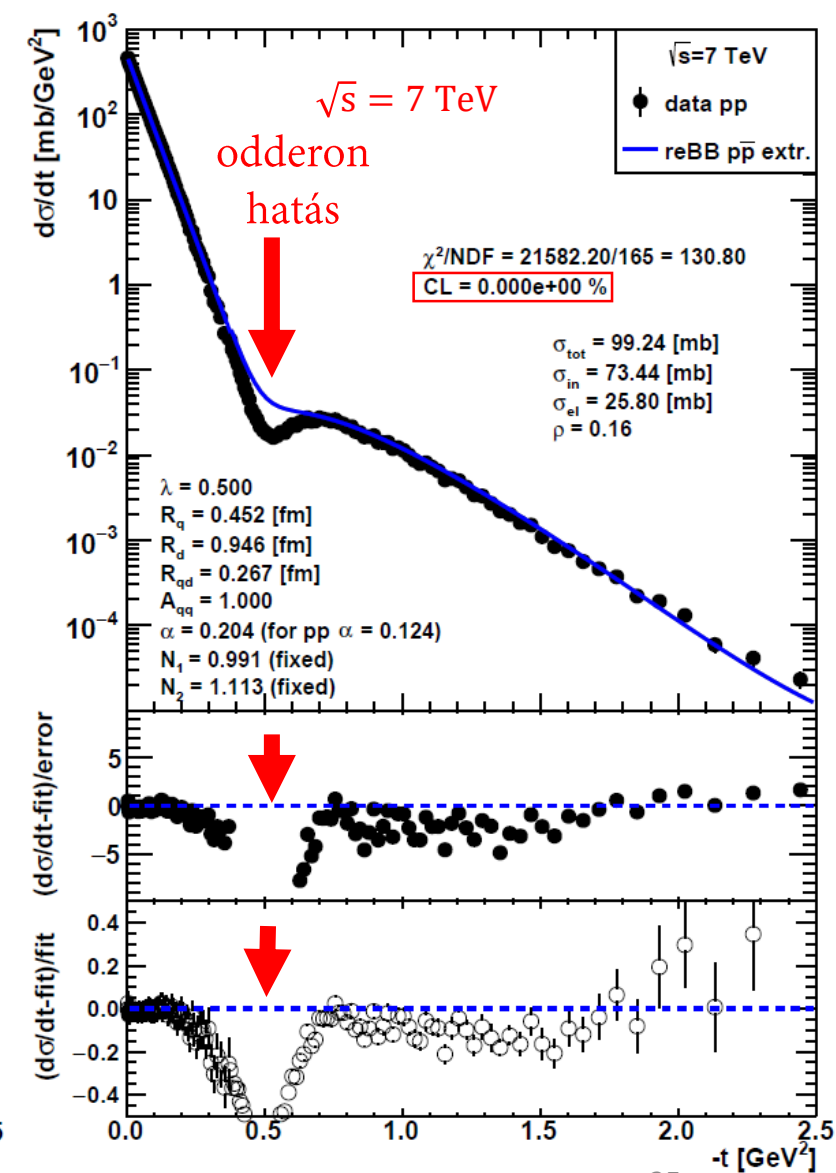
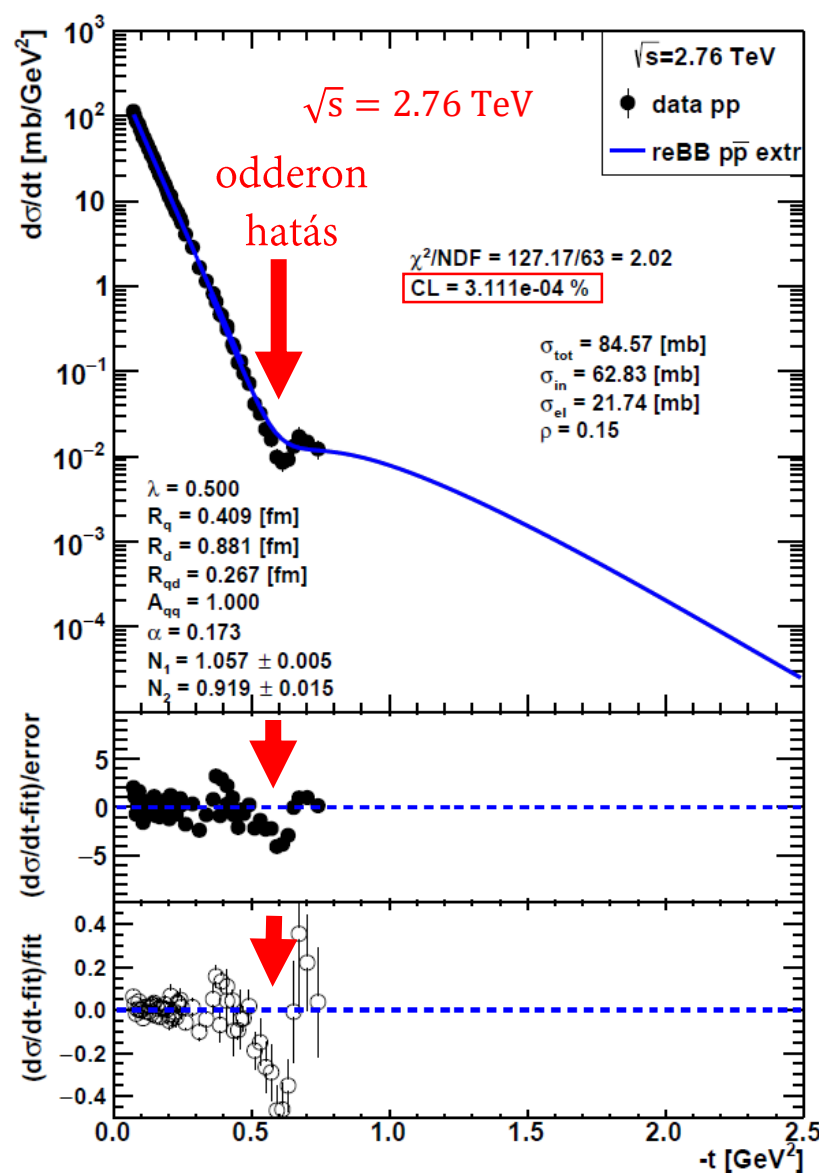
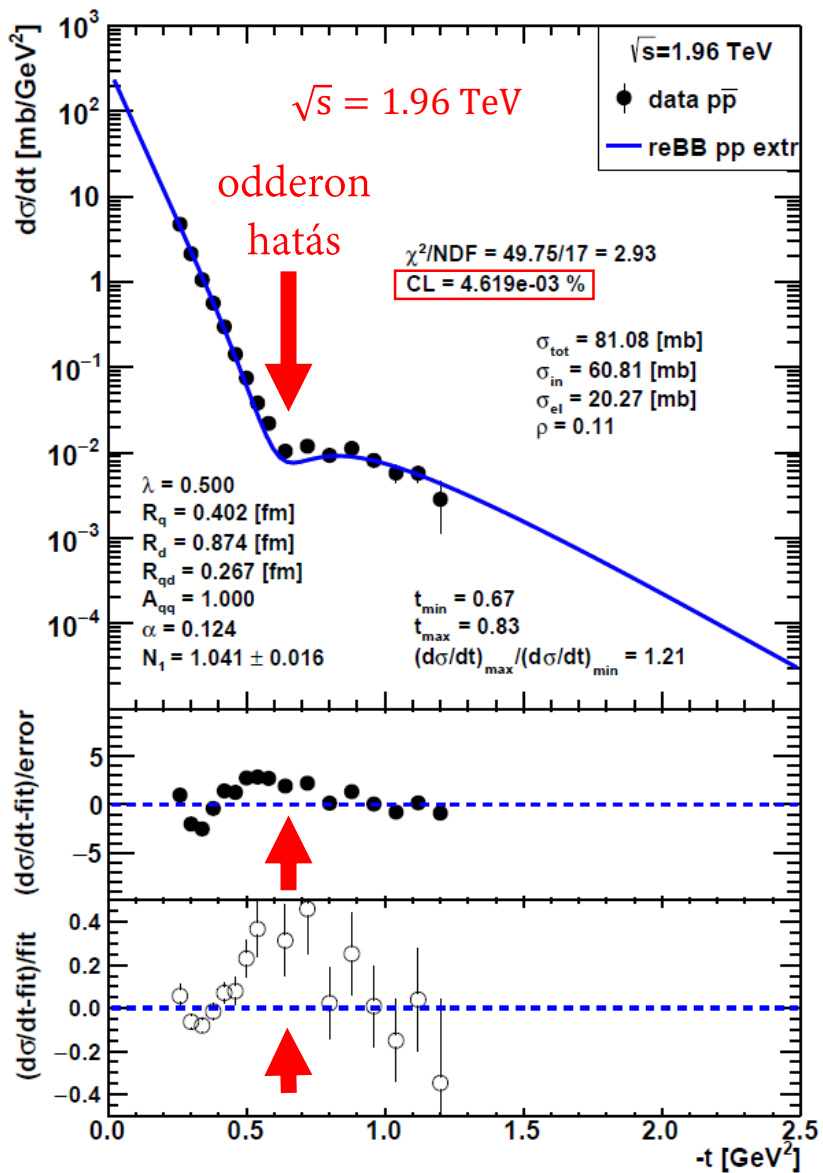
$$P(s) = p_0 + p_1 \ln(s/s_0) \quad P \in \{R_q, R_d, R_{qd}, \alpha\} \quad s_0 = 1 \text{ GeV}^2$$

Parameter	R_q [fm]	R_d [fm]	R_{qd} [fm]	α ($p\bar{p}$)	α (pp)
χ^2/NDF	1.821/1	0.048/1	2.546/3	–	1.385/1
CL [%]	17.72	82.68	46.71	–	23.93
p_0	0.149 ± 0.006	0.655 ± 0.018	0.267 ± 0.008	-0.087 ± 0.037	0.124 ± 0.001
p_1	0.016 ± 0.001	0.014 ± 0.001	0.000 (rögzített)	0.016 ± 0.003	0.000 (rögzített)

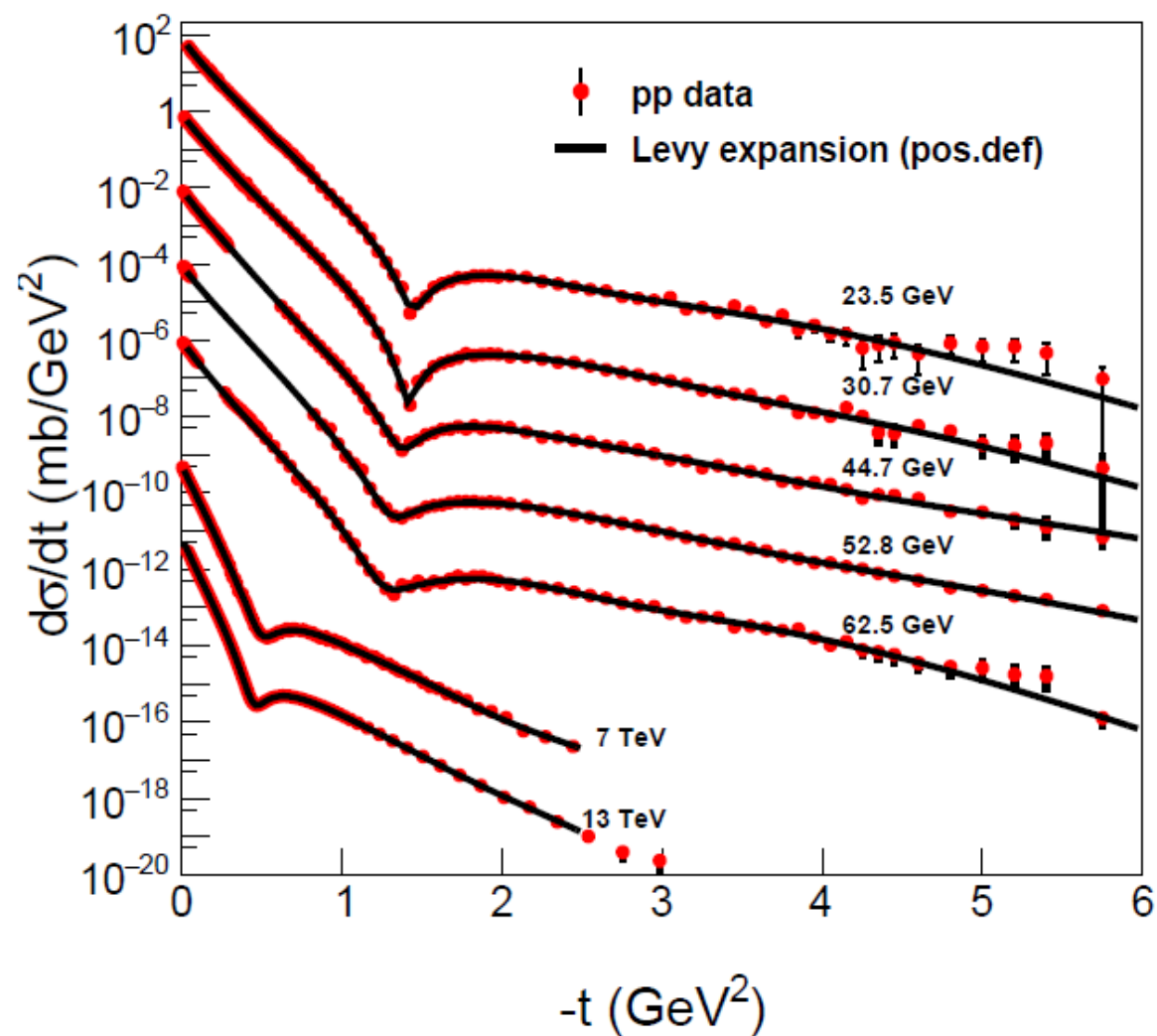
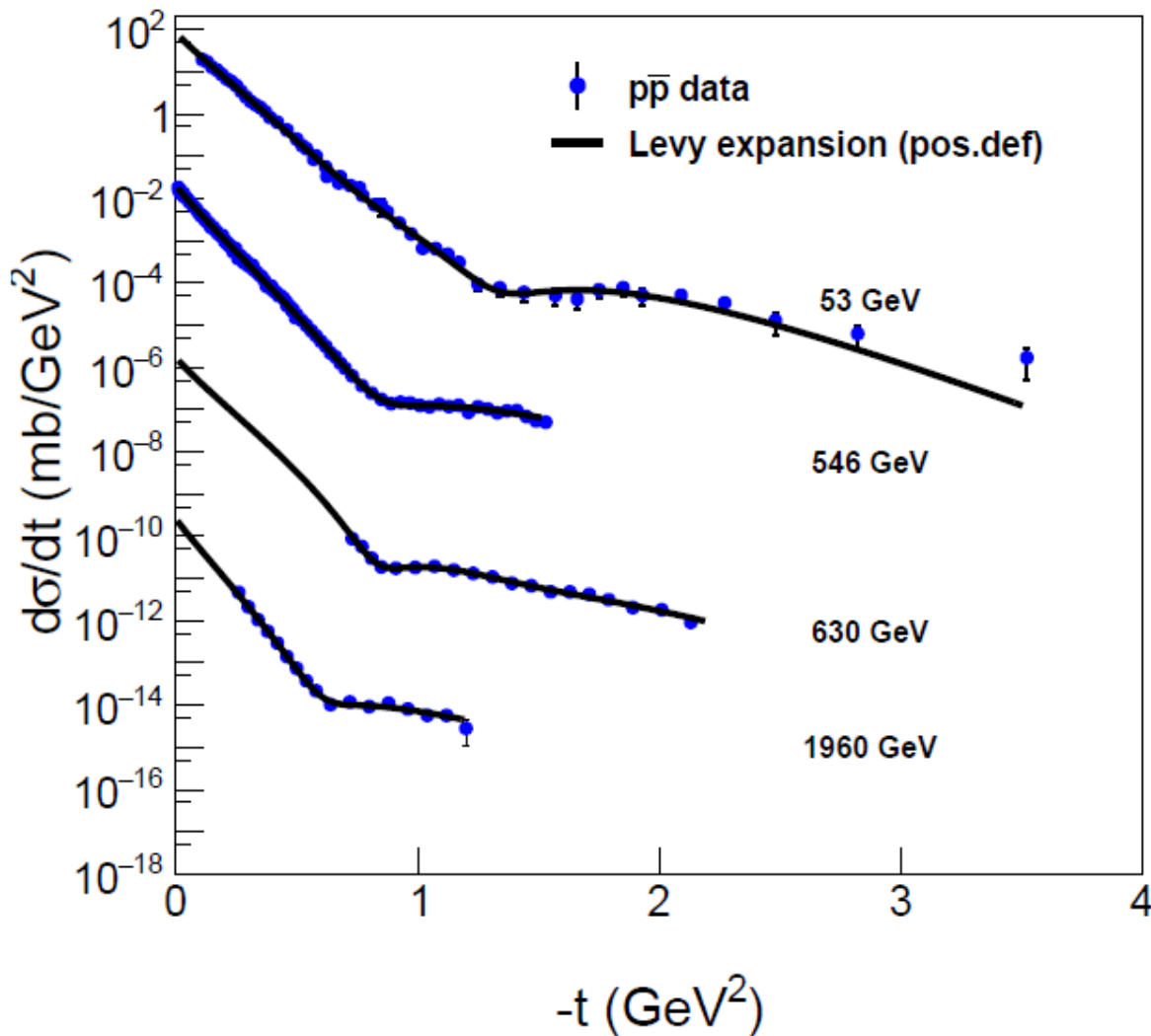
A ReBB modell energiafüggését meghatározó paraméterértékek (ezek a kék folytonos görbéknek (az $\alpha(p\bar{p})$ esetén szaggatottnak) felelnek meg)



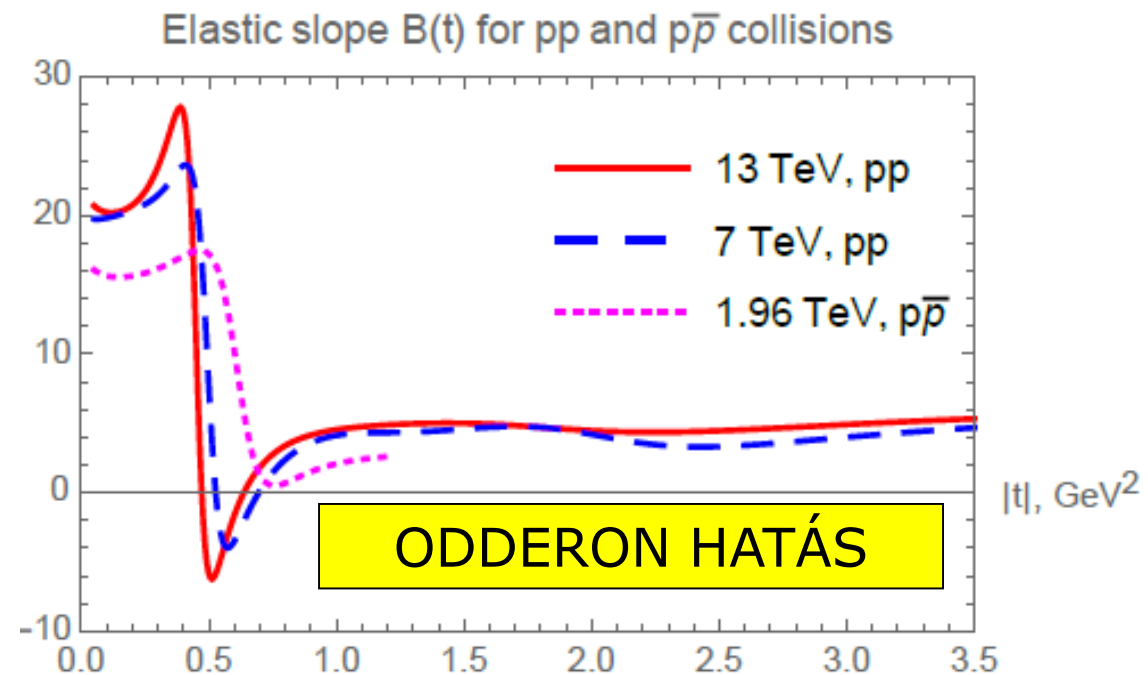
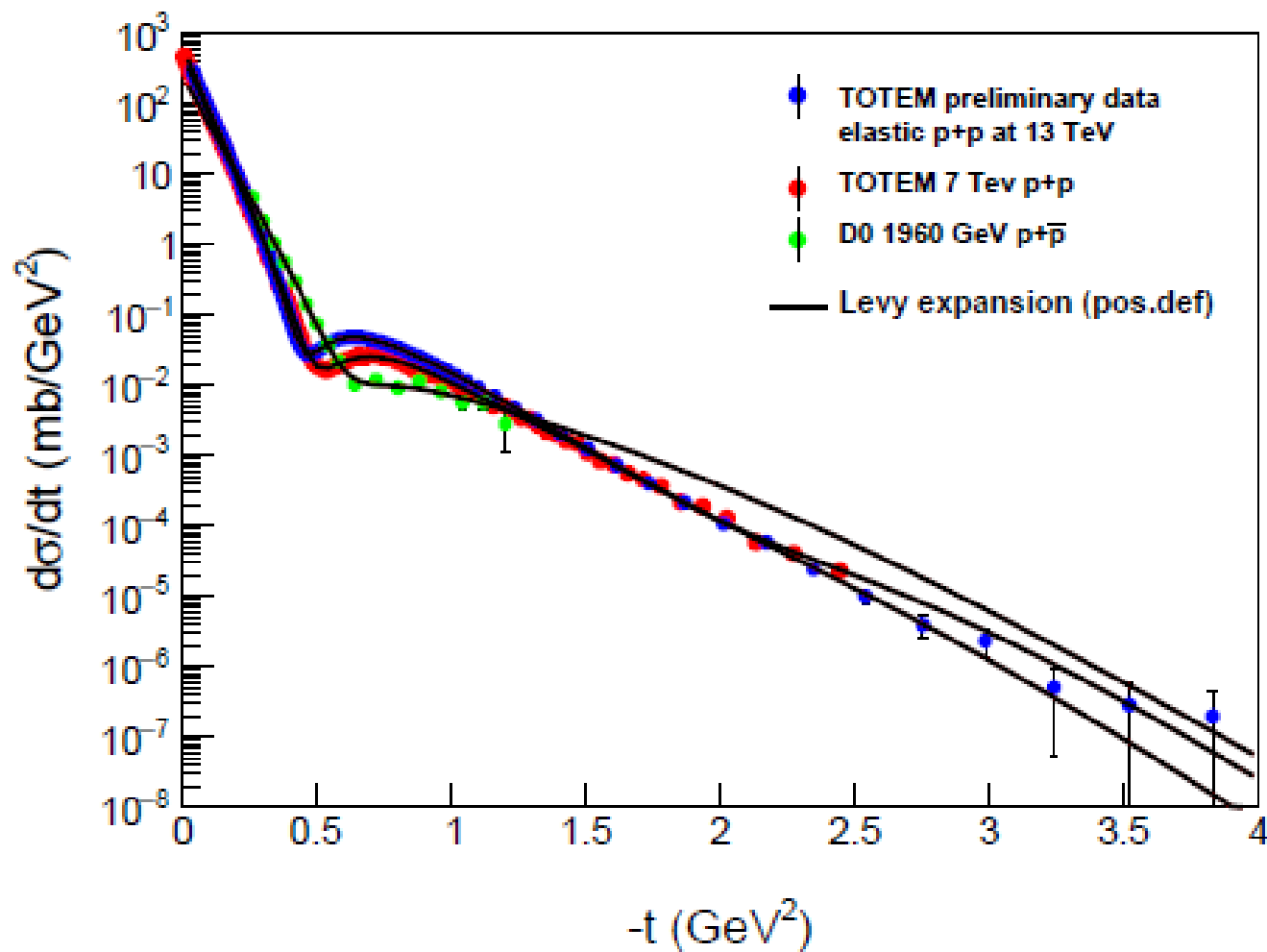
Extrapolációk: bizonyíték az Odderon kicserélődésre



Modell független Lévy sorfejtés

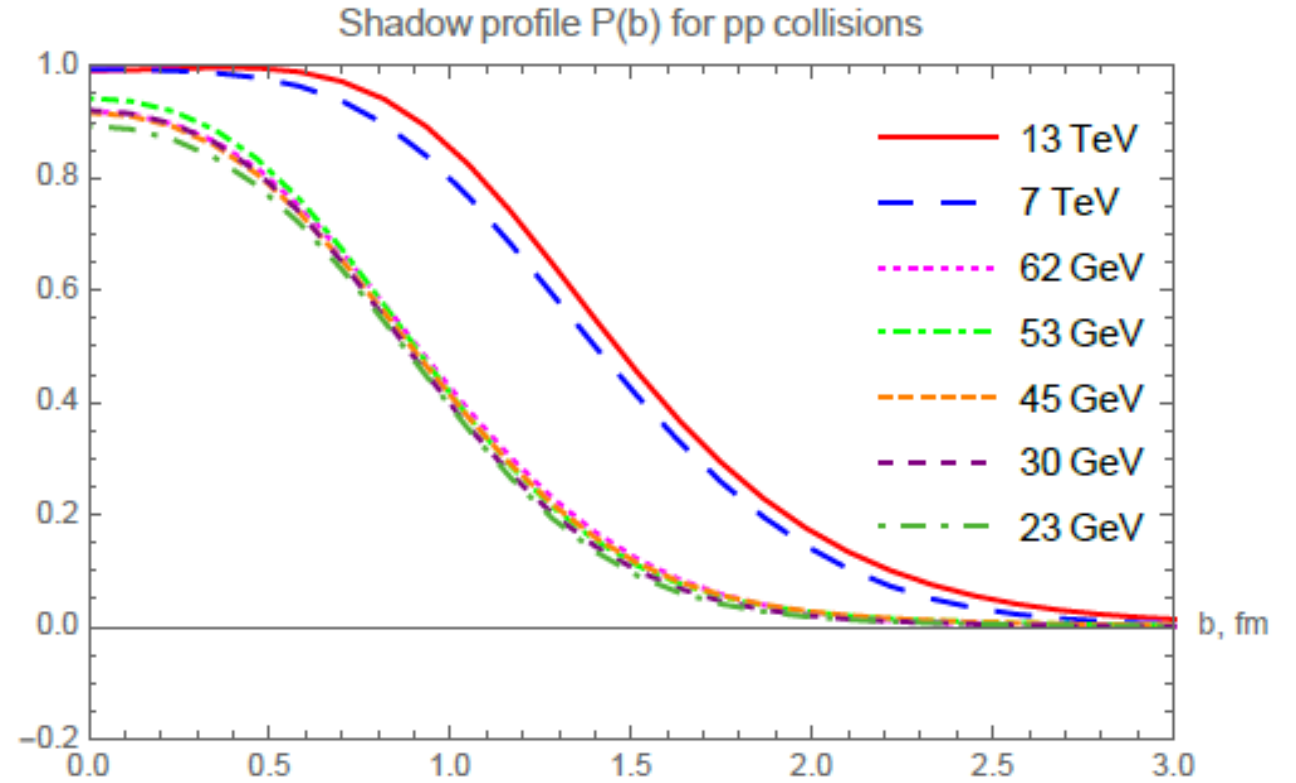
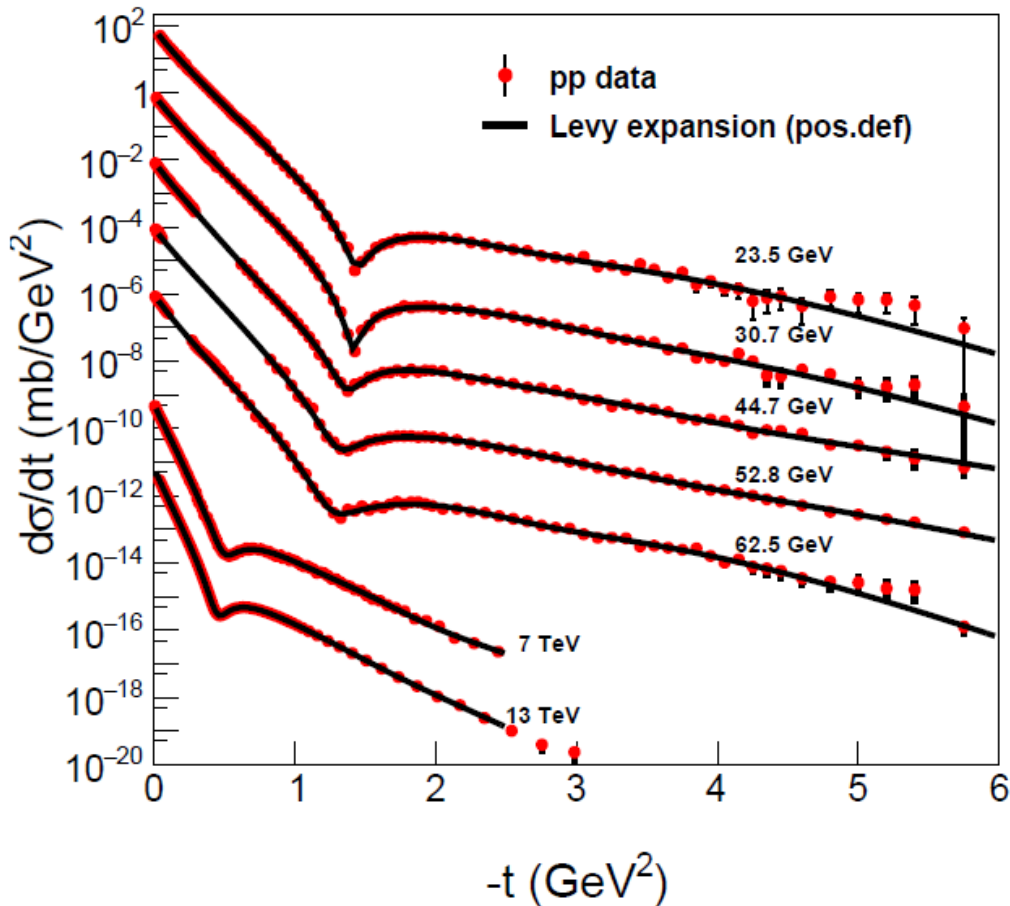


Odderon effektusok

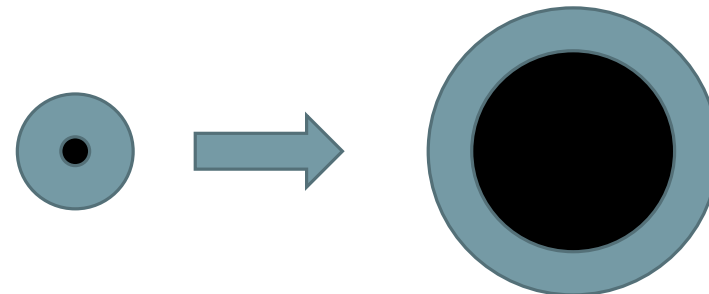


AZ ODDERON ÉS AZ
ENERGIAFÜGGŐ HATÁSOK
SZÉTVÁLASZTHATÓAK

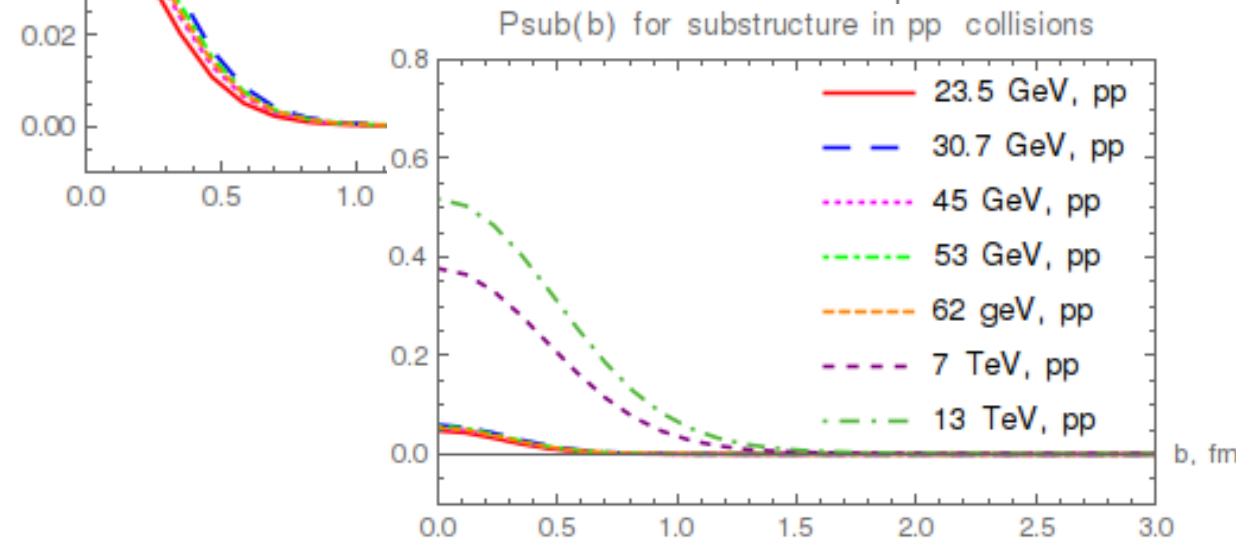
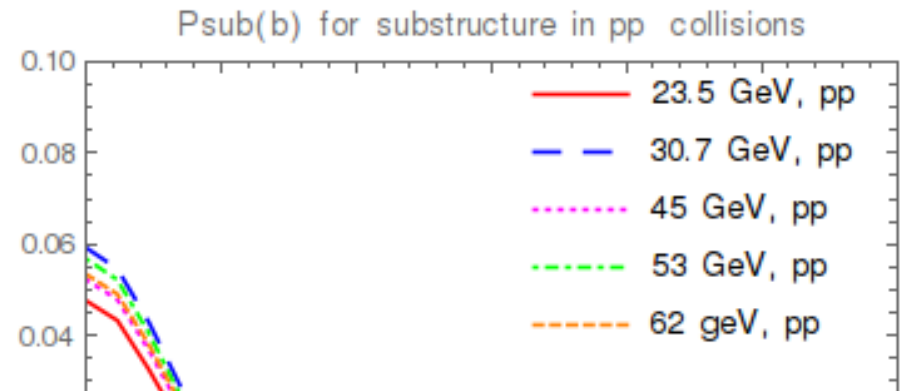
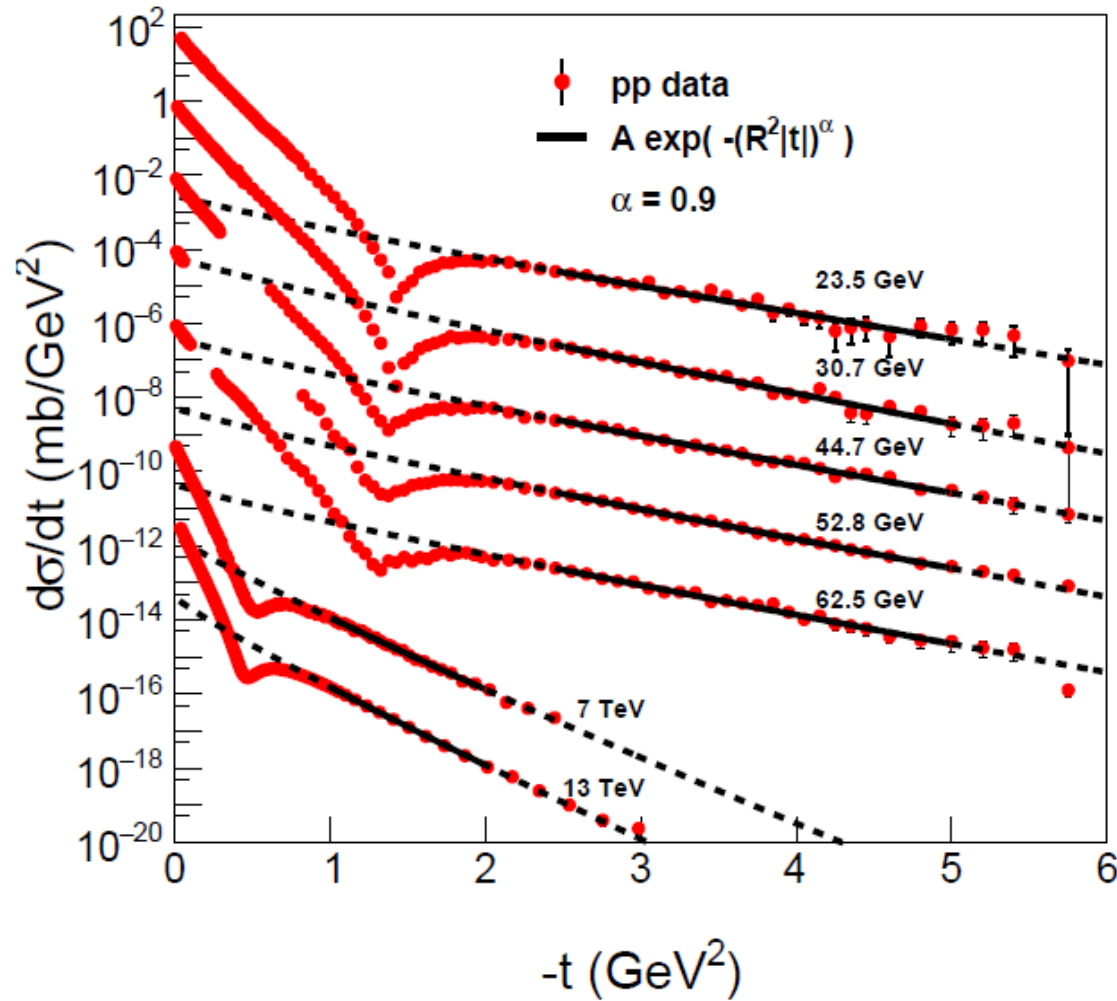
Protonszerkezet



A protonon nagyobbá és sötétebbé (abszorptívabbá) válik.

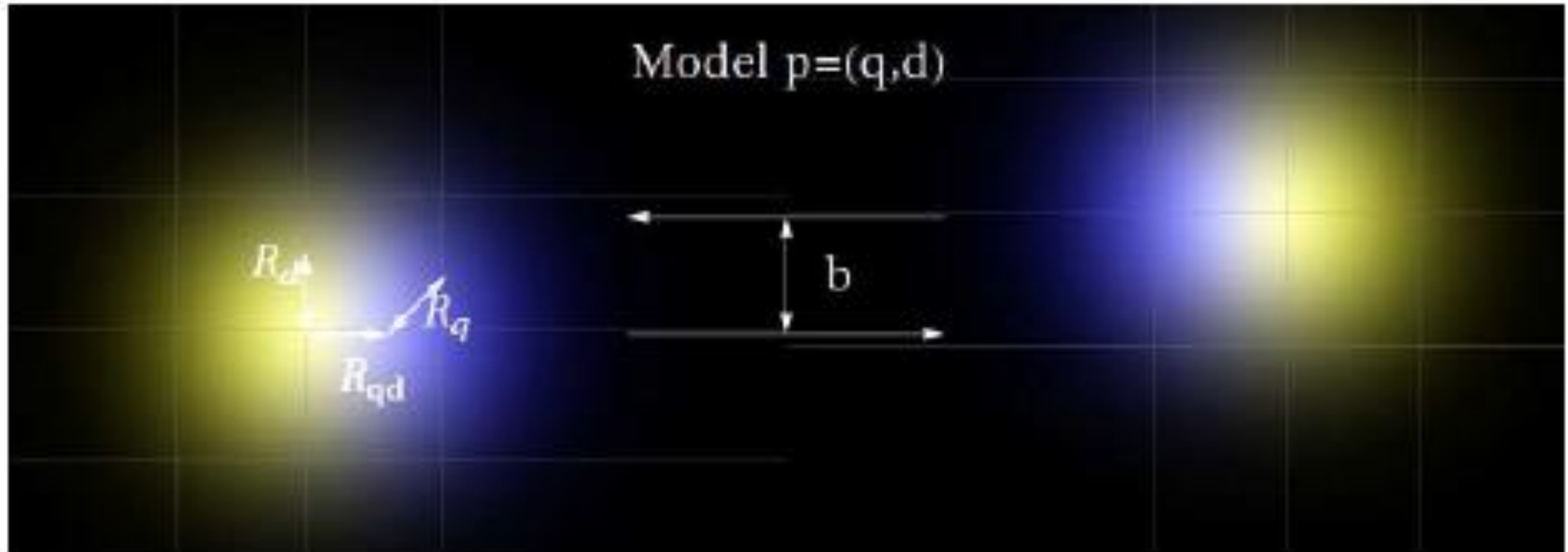


Alszerkezetek a protonban

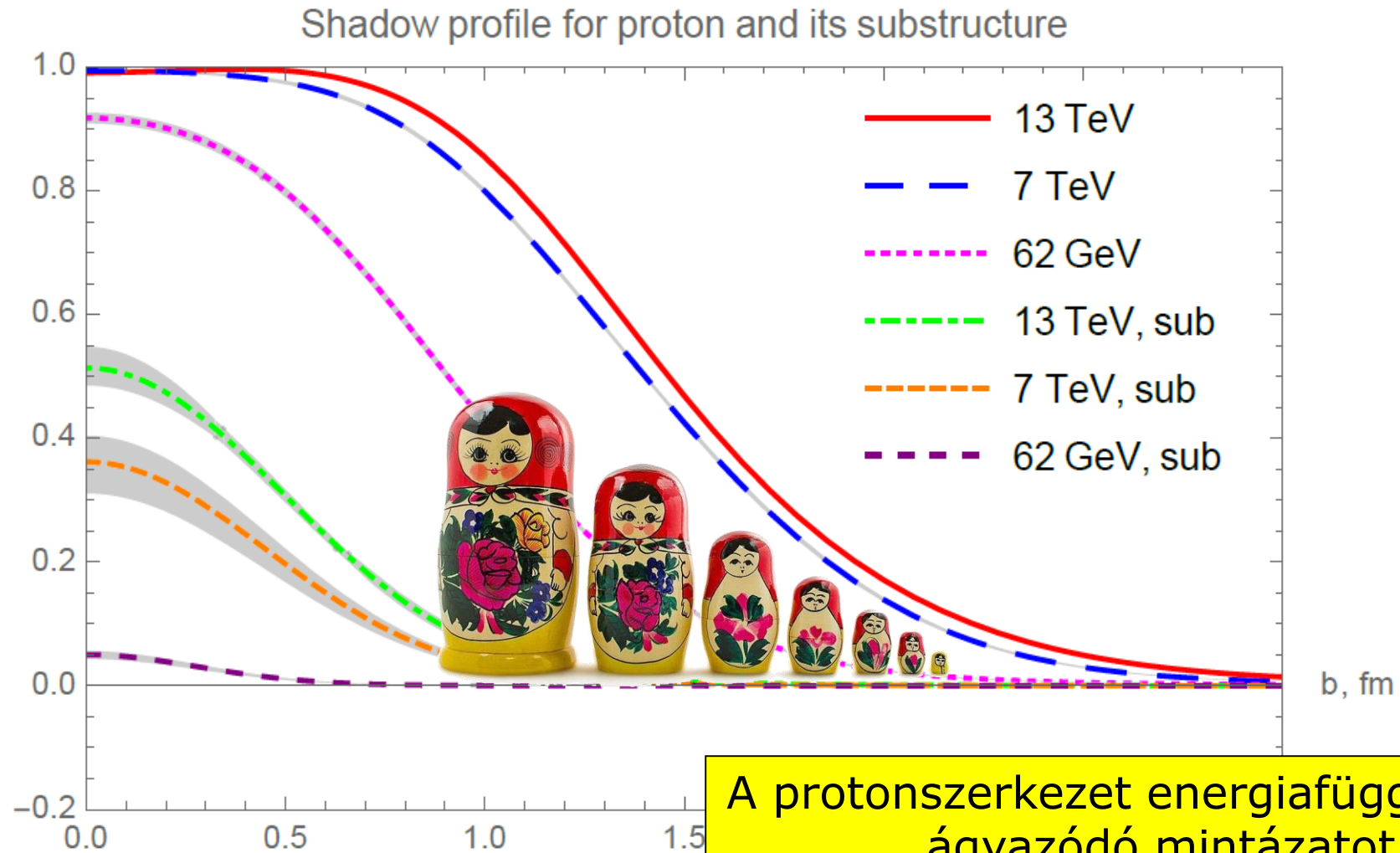


A protonon belül látható egy nagyobb (dikvark) és egy kisebb (kvark) szerkezet is!!

A proton kvark-dikvark szerkezete

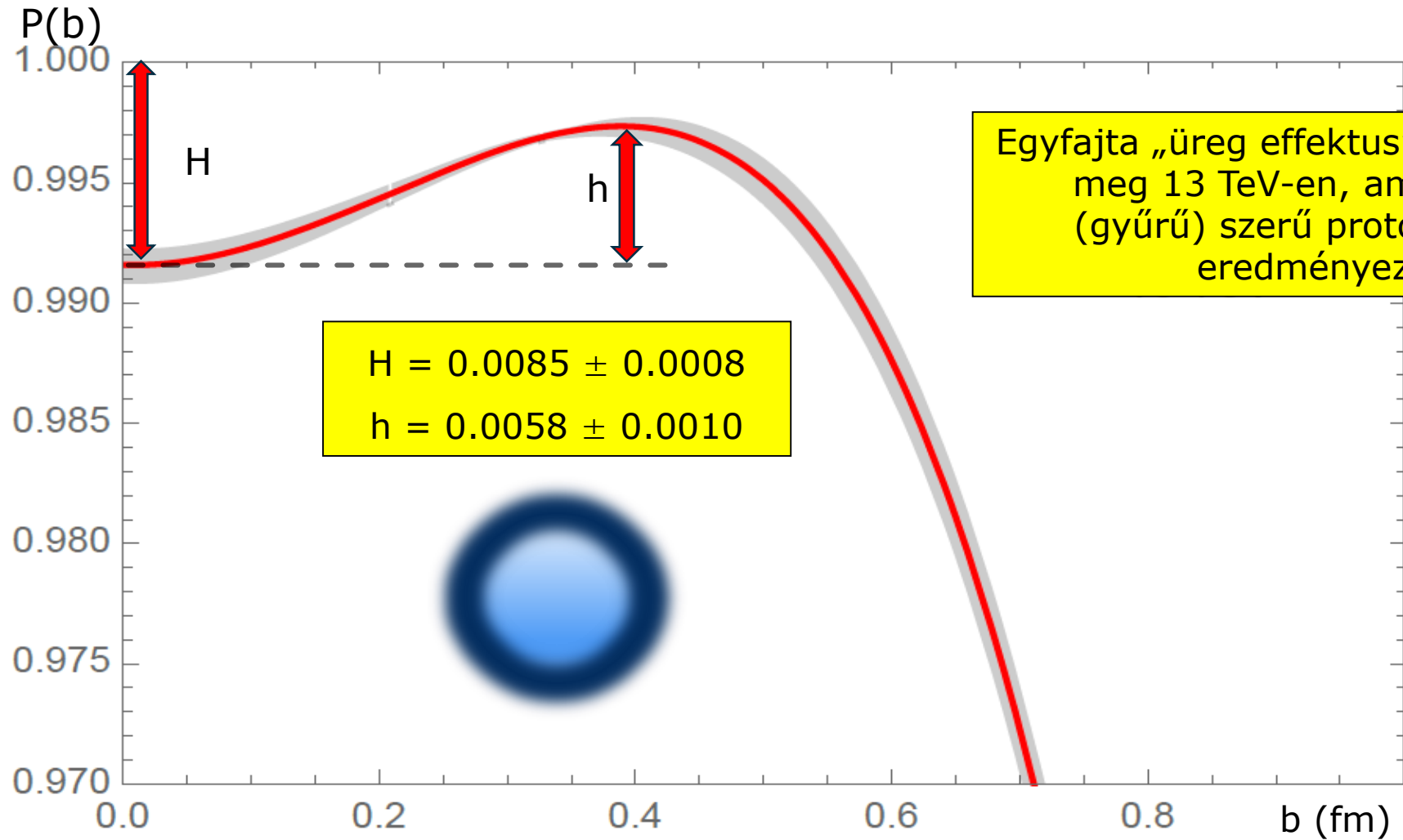


„Matrjoska effektus”



A proton szerkezet energiafüggése egymásba ágyazódó mintázatot mutat.

„Üreg effektus”



Egyfajta „üreg effektus” figyelhető meg 13 TeV-en, ami tórusz (gyűrű) szerű protonalakat eredményez!

Összefoglaló

Odderon kicserélődése az ütköző protonok és antiprotonok között.

A protonon belül két kisebb szerkezet van: egy kvak q és egy dikvark d .

A proton nagyobbá és sötétebbé (abszorptívabbá) válik a növekvő energiával, de ugyanakkor 13 TeV energián megjelenik az „üreg-effektus”.



Köszönöm a figyelmet !



EMBERI ERŐFORRÁSOK
MINISZTERIUMA

AZ EMBERI ERŐFORRÁSOK MINISZTERIUMA ÚNKP-18-2 KÓDSZÁMÚ
ÚJ NEMZETI KIVÁLÓSÁG PROGRAMJÁNAK, AZ NKFIH FK-123842 ÉS
FK-123959 KÓDSZÁMÚ KUTATÓPROGRAMOK TÁMOGATÁSÁVAL KÉSZÜLT