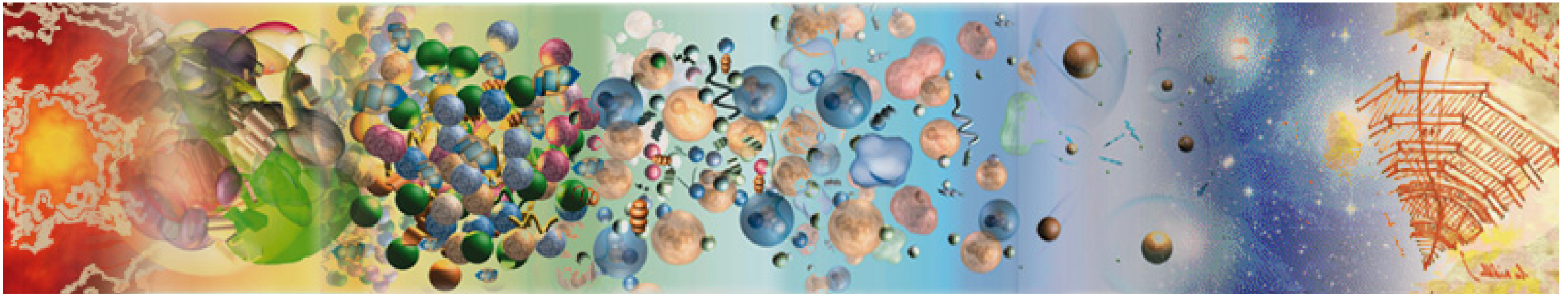


Kísérleti részecskefizika

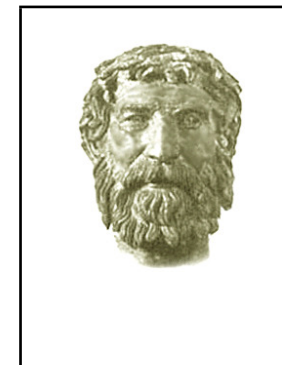
Az erős kölcsönhatás nyomában

Siklér Ferenc
MTA Wigner FK

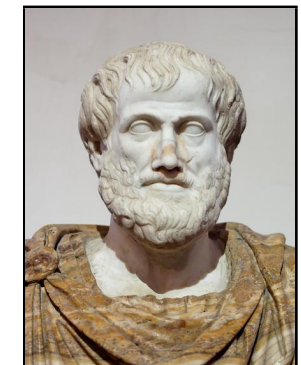


A Fizikai Tudományok Osztálya nyílt osztályülése
MTA, Budapest, 2018. december 12.

Miből áll a világ?



Empedoklész, Kr. e. V. sz.

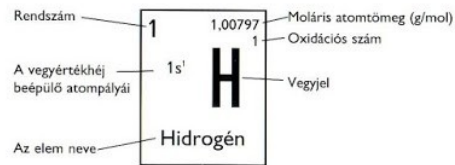


Arisztotelész, Kr. e. IV. sz.

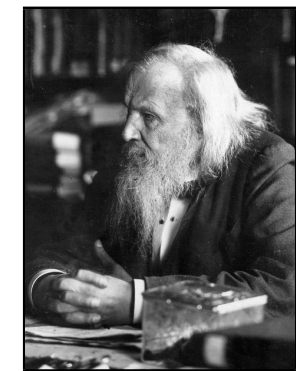
Öselemek: föld, víz, levegő, tűz

Miből áll a világ?

I.A.										II.A.										III.A.										IV.A.										V.A.										VI.A.										VII.A.										VIII.A.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
1	1	1.00797	1	1s ¹	H	Hidrogén	3	6.939	1	2s ¹	Li	Lítium	4	9.0122	2	2s ²	Be	Berillium	5	10.811	3	2p ¹	B	Bór	6	12.0115	4, 2	2p ²	C	Szén	7	14.0067	±3, 5, 4, 2	2p ³	N	Nitrogén	8	15.9994	-2	2p ⁴	O	Oxigén	9	18.9984	-1	2p ⁵	F	Fluor	10	20.179	-	2p ⁶	Ne	Neon	11	22.9898	1	3s ¹	Na	Nátrium	12	24.305	2	3s ²	Mg	Magnézium	13	26.9816	3	3p ¹	Al	Alumínium	14	28.086	4	3p ²	Si	Szilícium	15	30.9738	±3, 5, 4, 2	3p ³	P	Foszfor	16	32.064	±2, 4, 6	3p ⁴	S	Kén	17	35.453	±1, 3, 5, 7	3p ⁵	Cl	Klór	18	39.948	-	3p ⁶	Ar	Argon	19	39.102	1	4s ¹	K	Kálium	20	40.08	2	4s ²	Ca	Kalcium	21	44.956	3	4s ² 3d ¹	Sc	Szkandium	22	47.90	4, 3	4s ² 3d ²	Ti	Titán	23	50.942	5, 4, 3, 2	4s ² 3d ³	V	Vanádium	24	51.996	6, 3, 2	4s ² 3d ⁴	Cr	Króm	25	54.9380	7, 6, 4, 3, 2	4s ² 3d ⁵	Mn	Mangán	26	55.847	2, 3	4s ² 3d ⁶	Fe	Vas	27	58.9332	2, 3	4s ² 3d ⁷	Co	Kobalt	28	58.71	2, 3	4s ² 3d ⁸	Ni	Nikkel	29	63.546	2, 1	4s ² 3d ⁹	Cu	Réz	30	65.37	2, 1	4s ² 3d ¹⁰	Zn	Cink	31	69.72	3	4p ¹	Ga	Gallium	32	72.59	4	4p ²	Ge	Germánium	33	74.9216	±3, 5	4p ³	As	Arzén	34	78.96	-2, 4, 6	4p ⁴	Se	Szelén	35	79.904	±1, 5	4p ⁵	Br	Bróm	36	83.80	-	4p ⁶	Kr	Kripton	37	85.47	1	5s ¹	Rb	Rubídium	38	87.62	2	5s ²	Sr	Stroncium	39	88.905	3, 2	5s ² 4d ¹	Y	Ittrium	40	91.22	4	5s ² 4d ²	Zr	Cirkónium	41	92.06	5, 3	5s ² 4d ³	Nb	Nióbium	42	95.94	6, 5, 4, 3, 2	5s ² 4d ⁴	Mo	Molibdén	43	99	7	5s ² 4d ⁵	Tc	Technécium	44	101.07	2, 3, 4, 6, 8	5s ² 4d ⁶	Ru	Ruténium	45	102.905	2, 3, 4	5s ² 4d ⁷	Rh	Ródium	46	106.4	2, 4	5s ² 4d ⁸	Pd	Palládium	47	107.868	1	5s ² 4d ⁹	Ag	Ezüst	48	112.41	2	5s ² 4d ¹⁰	Cd	Kadmium	49	114.82	3	5p ¹	In	Indium	50	118.7	4, 2	5p ²	Sn	Ón	51	121.75	±3, 5	5p ³	Sb	Antimon	52	127.60	-2, 4, 6	5p ⁴	Te	Tellur	53	126.9044	±1, 5, 7	5p ⁵	I	Jód	54	131.30	-	5p ⁶	Xe	Xenon	55	132.905	1	6s ¹	Cs	Cézium	56	137.34	2	6s ²	Ba	Bárium	57	138.91	3	6s ² 5d ¹	La	Lantán	72	178.49	4	6s ² 5d ²	Hf	Hafnium	73	180.94	5	6s ² 5d ³	Ta	Tantál	74	183.85	6, 5, 4, 3, 2	6s ² 5d ⁴	W	Volfrám	75	186.2	5d ⁵	6s ² 5d ⁵	Re	Rénium	76	190.2	5d ⁶	6s ² 5d ⁶	Os	Ozmium	77	192.2	5d ⁷	6s ² 5d ⁷	Ir	Iridium	78	195.09	2, 4	6s ² 5d ⁸	Pt	Platina	79	196.967	3, 1	6s ² 5d ⁹	Au	Arany	80	200.59	2, 1	6s ² 5d ¹⁰	Hg	Higany	81	204.37	3, 1	6p ¹	Tl	Tallium	82	207.19	4, 2	6p ²	Pb	Ólom	83	208.980	±3, 5	6p ³	Bi	Bizmut	84	210	2, 4	6p ⁴	Po	Polónium	85	±1, 3, 5, 7	210	6p ⁵	At	Asztácium ¹⁾	86	222	-	6p ⁶	Rn	Radon	87	223	1	7s ¹	Fr	Francium	88	226	2	7s ²	Ra	Rádium	89	227	3	7s ² 6d ¹	Ac	Aktínium	104	260	6d ²	7s ² 6d ²	Ku	Kurcsatóvium	58	140.12	3, 4	5d ¹ 4f ³	Ce	Cérium	59	140.91	3, 4	5d ¹ 4f ³	Pr	Prazeodimium	60	144.24	3	5d ¹ 4f ³	Nd	Neodímium	61	147	3	5d ¹ 4f ³	Pm	Prométium	62	150.35	3, 2	5d ¹ 4f ³	Sm	Szamárium	63	151.96	3, 2	5d ¹ 4f ³	Eu	Európium	64	157.25	3	5d ¹ 4f ³	Gd	Gandolinum	65	158.924	3, 4	5d ¹ 4f ³	Tb	Terbium	66	162.5	3	5d ¹ 4f ³	Dy	Diszprózium	67	164.93	3	5d ¹ 4f ³	Ho	Holmium	68	167.24	3	5d ¹ 4f ³	Er	Erbium	69	168.934	3, 2	5d ¹ 4f ³	Tm	Túlium	70	173.04	3, 2	5d ¹ 4f ³	Yb	Itterbium	71	174.97	3	5d ¹ 4f ³	Lu	Lutécium	90	232.038	4	6d ² 5f ⁰	Th	Tórium	91	231	5, 4	6d ¹ 5f ¹	Pa	Protaktínium	92	238.03	6, 5, 4, 3	6d ¹ 5f ¹	U	Urán	93	237	6, 5, 4, 3	6d ¹ 5f ¹	Np	Neptúnium	94	243	6, 5, 4, 3	6d ¹ 5f ¹	Pu	Plutónium	95	243	6, 5, 4, 3	6d ¹ 5f ¹	Am	Americum	96	247	3	6d ¹ 5f ¹	Cm	Kúrium	97	249	4, 3	6d ¹ 5f ¹	Bk	Berkélium	98	251	3	6d ¹ 5f ¹	Cf	Kalifornium	99	254	3	6d ¹ 5f ¹	Es	Einsteinium	100	253	3	6d ¹ 5f ¹	Fm	Fermium	101	256	3	6d ¹ 5f ¹	Md	Mendelévi	102	254	3	6d ¹ 5f ¹	No	Nobélium	103	257	3	6d ¹ 5f ¹	Lr	Laurencium



d-mező



Mengyelejev, 1869

A kémiai elemek periódusos rendszere

Mi tartja össze? – kölcsönhatások

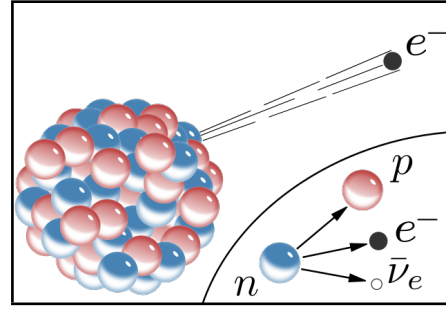
Elektromosság



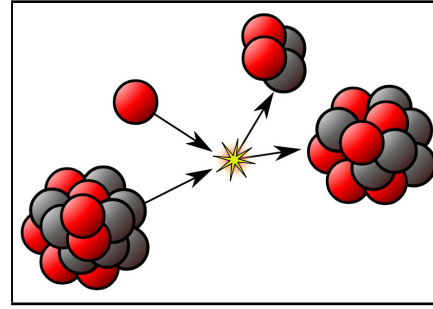
Mágnesség



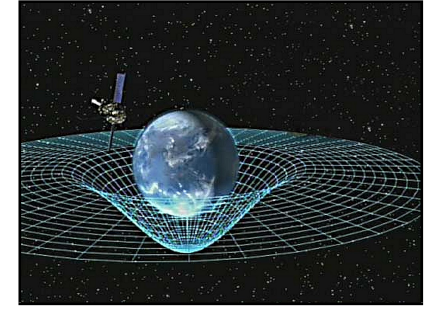
Gyengye



Erős



Tömegvonzás



Mi tartja össze? – kölcsönhatások

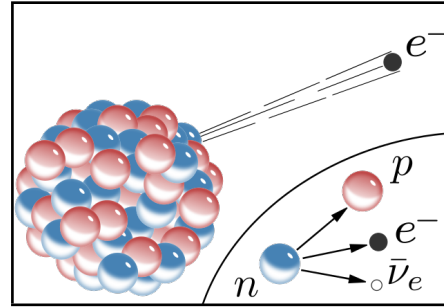
Elektromosság



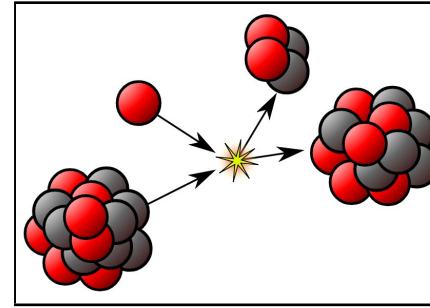
Mágnesség



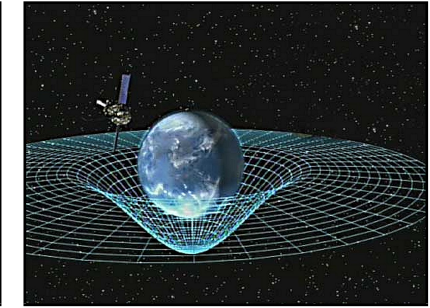
Gyengye



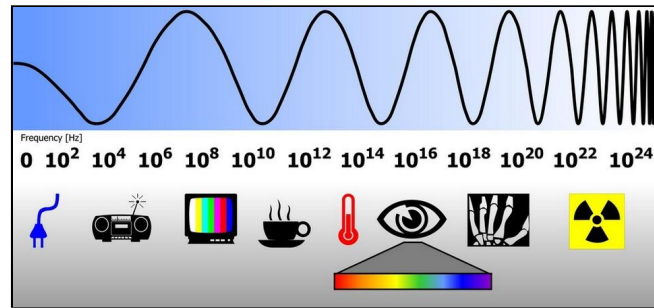
Erős



Tömegvonzás



Elektromágnesség



Mi tartja össze? – kölcsönhatások

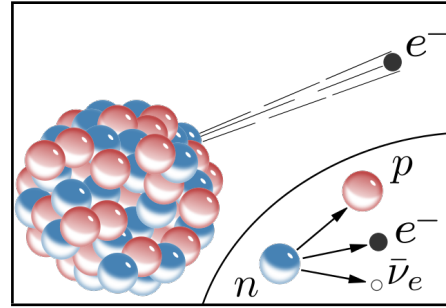
Elektromosság



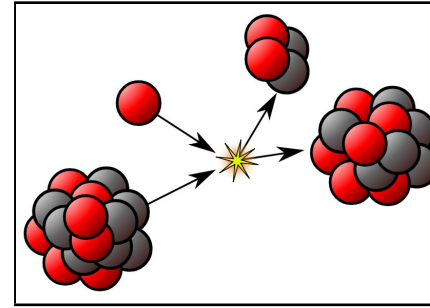
Mágnesség



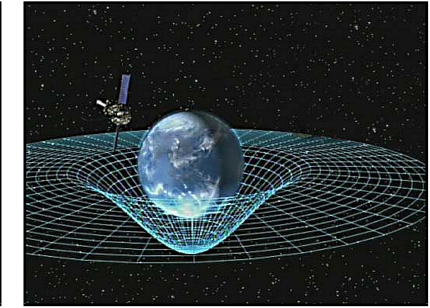
Gyengye



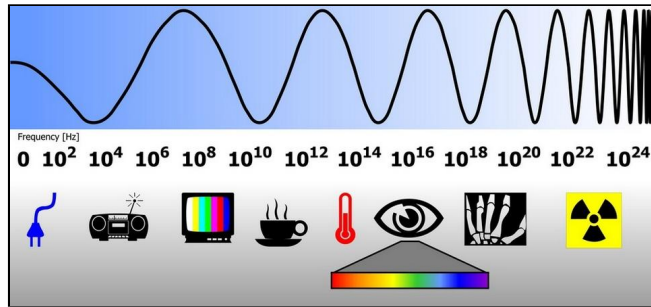
Erős



Tömegvonzás



Elektromágnesség



Elektrogyenge

Mi tartja össze? – kölcsönhatások

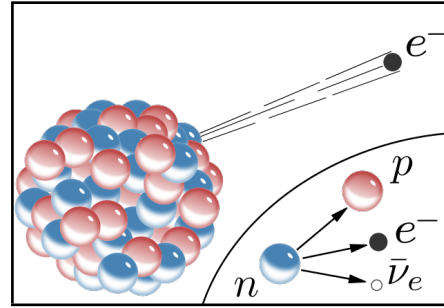
Elektromosság



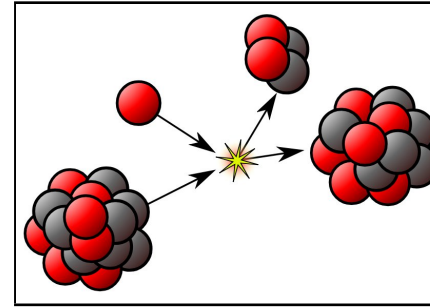
Mágnesség



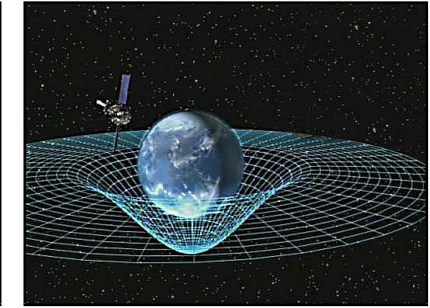
Gyengye



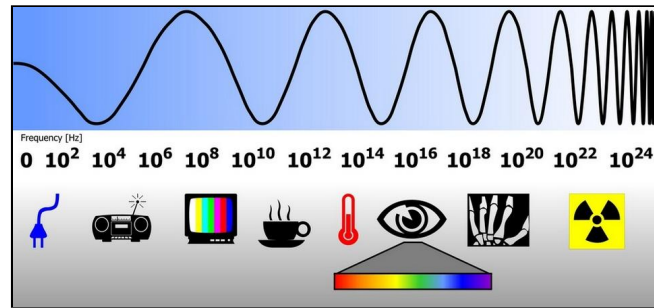
Erős



Tömegvonzás



Elektromágnesség



Elektrogyenge

foton

W^{\pm}

Z^0

gluon

?

Mi tartja össze? – kölcsönhatások

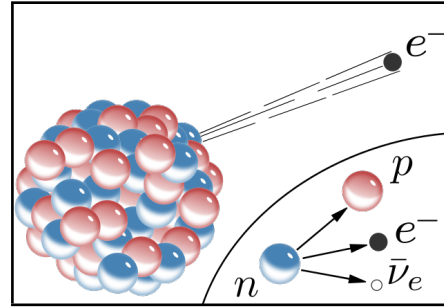
Elektromosság



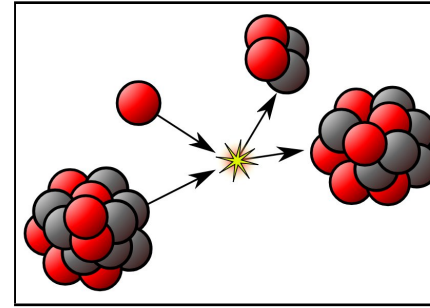
Mágnesség



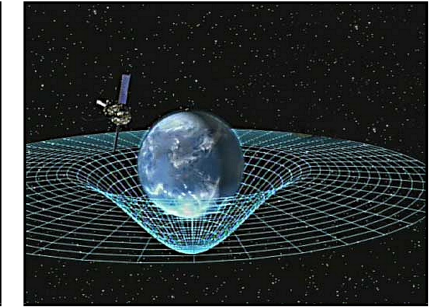
Gyengye



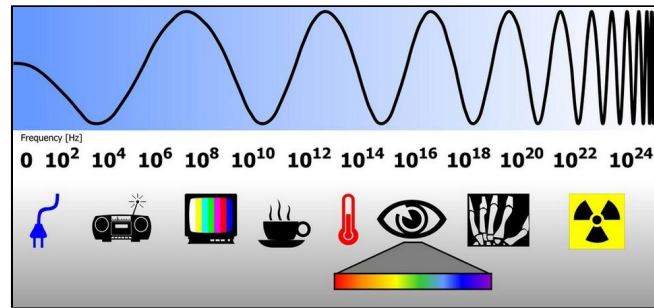
Erős



Tömegvonzás



Elektromágnesség



Elektrogyenge

foton

W^{\pm}

Z^0

gluon

?

$SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$ mértékelmélet

Szükséges: egy skalár mező, spontán szimmetriasértés

Kísérletek – felfedezések



1897

elektron



1899

alfa-részecske



1919

proton



1932

neutron

Kísérletek – felfedezések



1897 elektron
1899 alfa-részecske
1919 proton
1932 neutron
1932 pozitron
1937 müon
1947 pion
1955 antiproton

Kísérletek – felfedezések



1897 elektron



1899 alfa-részecske



1919 proton



1932 neutron



1932 pozitron



1937 müon



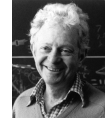
1947 pion



1955 antiproton

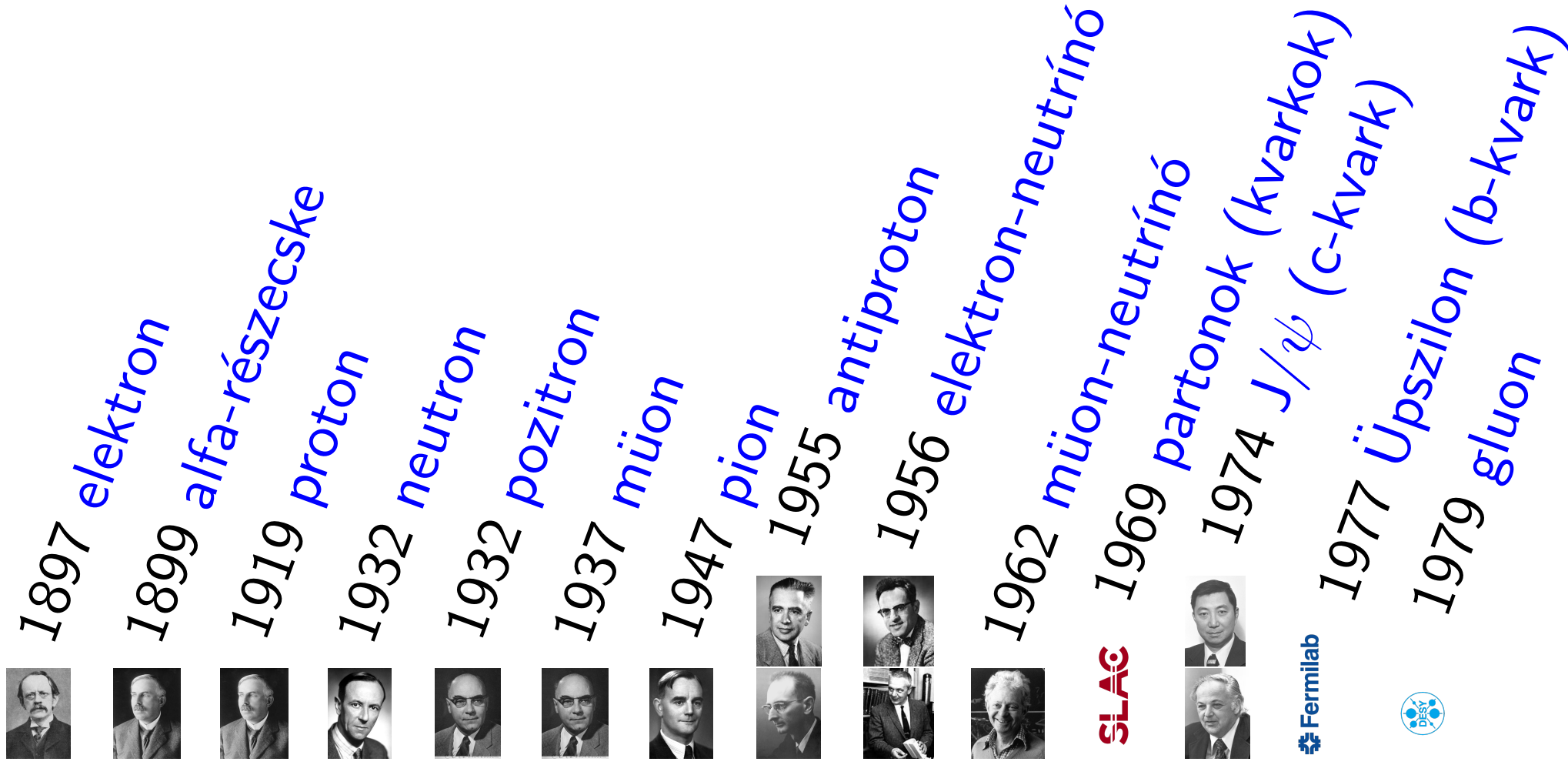


1956 elektron-neutrínó

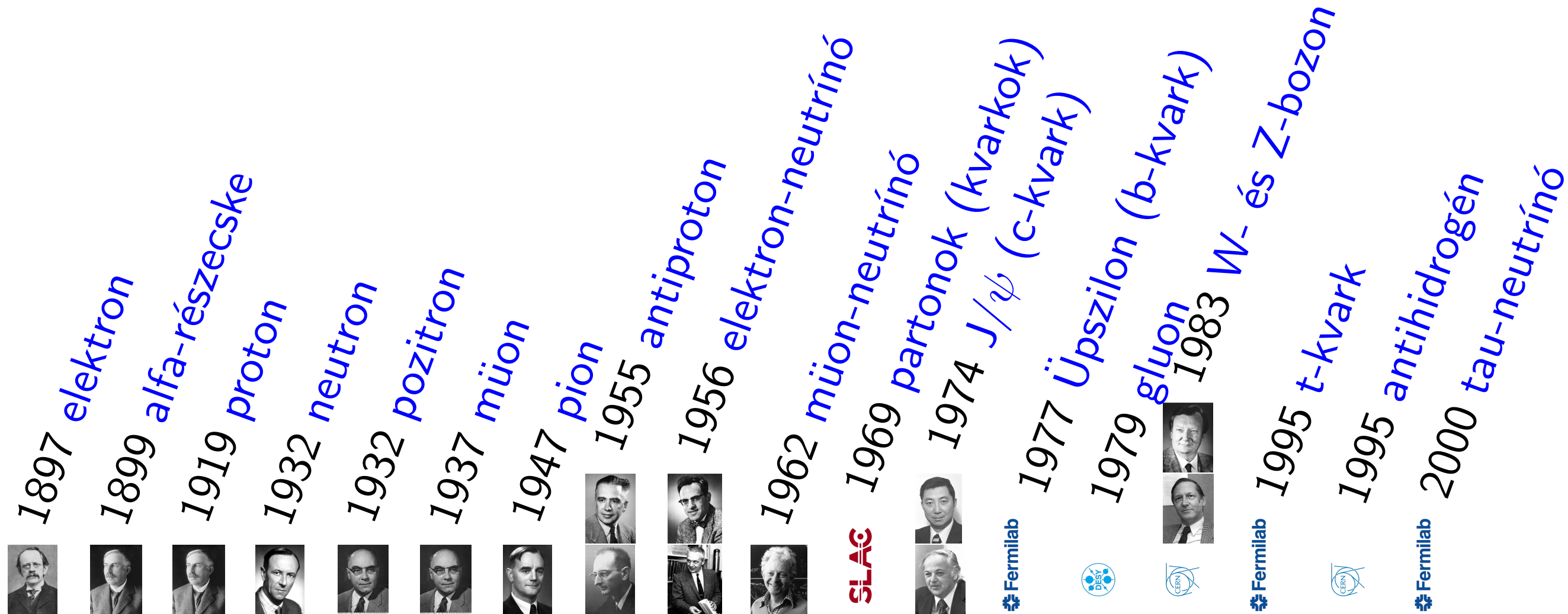


1962 müon-neutrínó

Kísérletek – felfedezések

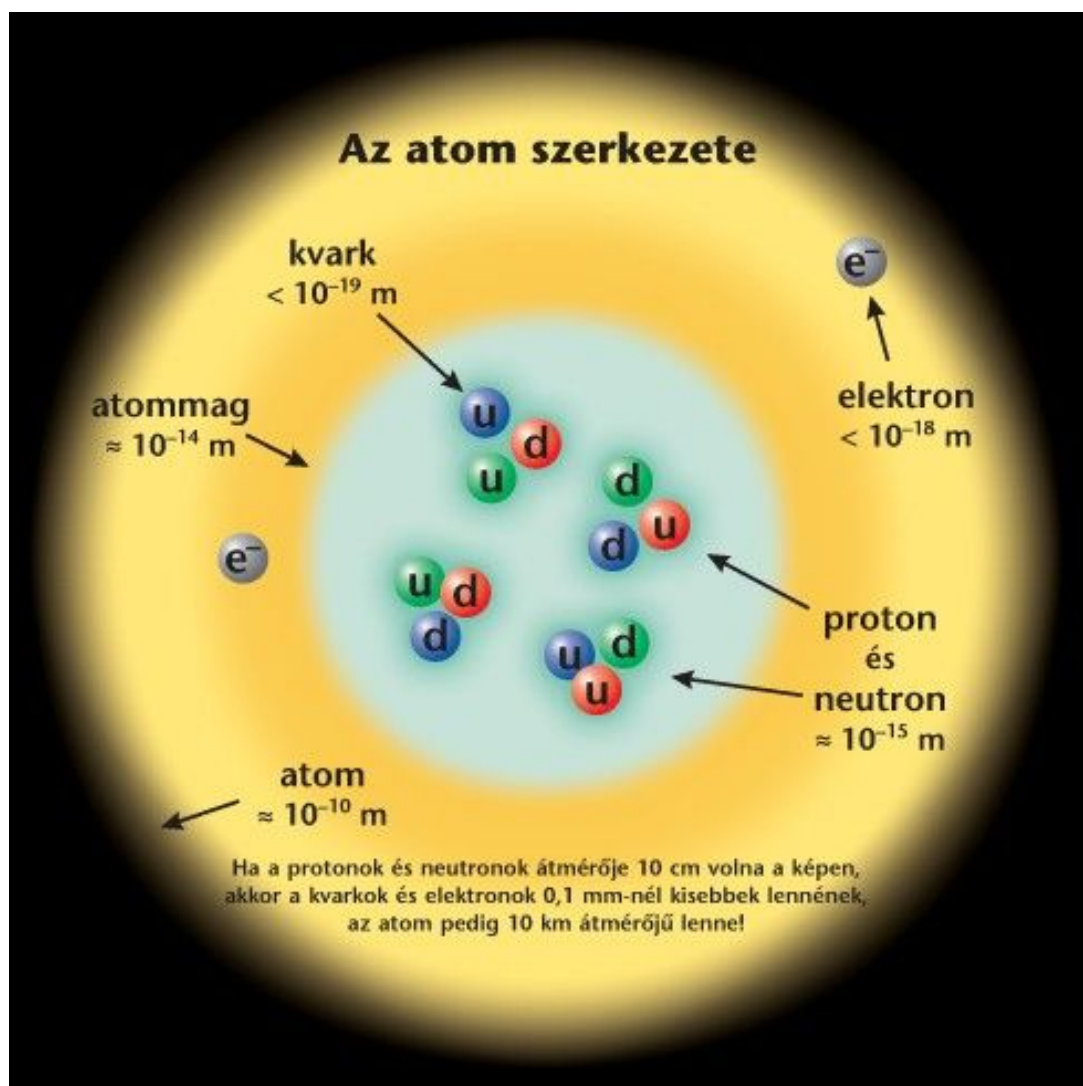


Kísérletek – felfedezések



Radioaktivitás → kozmikus sugárzás → gyorsítók
Egyéni teljesítmény és a laborok → nagy együttműködések

Miből áll a világ? – részecskék



Az anyagi részecskék három családja (fermionok)

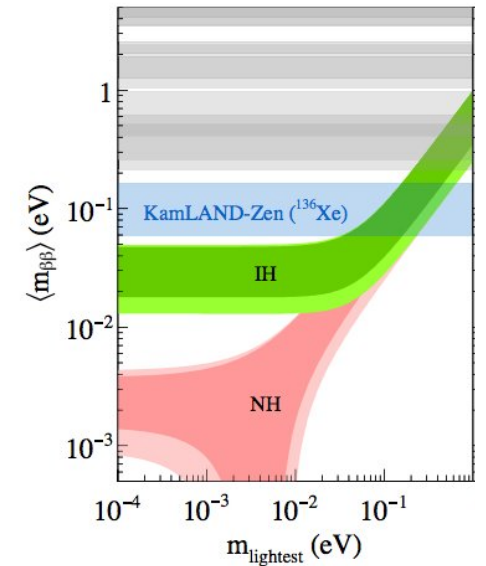
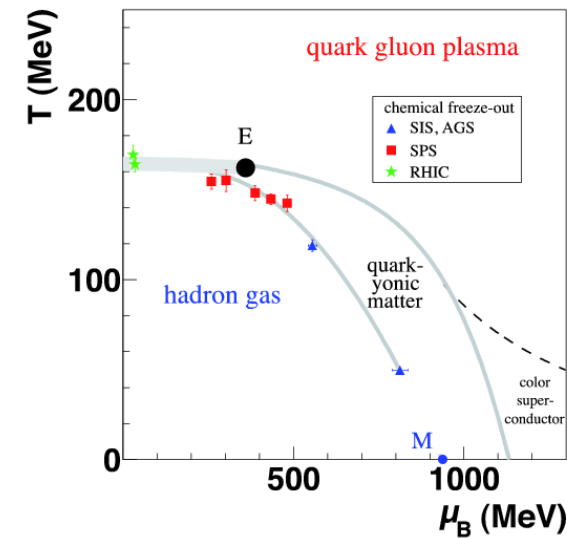
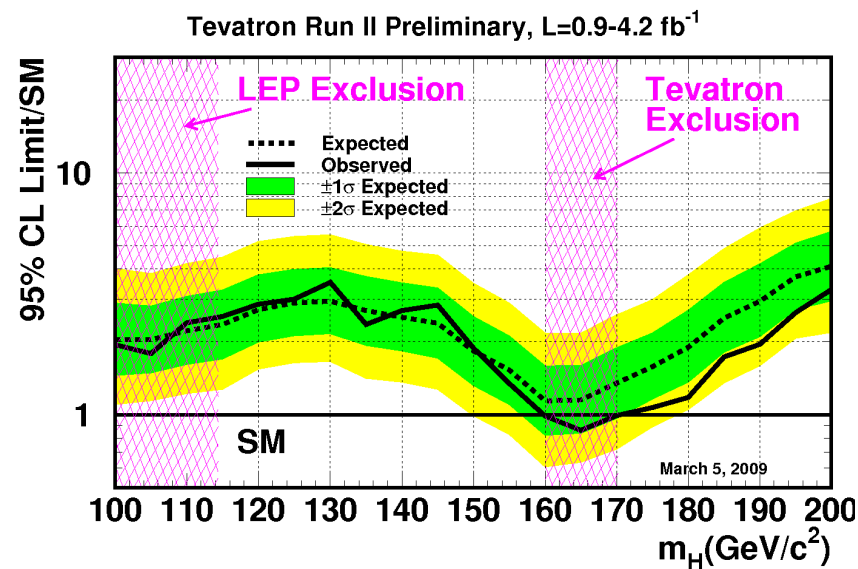
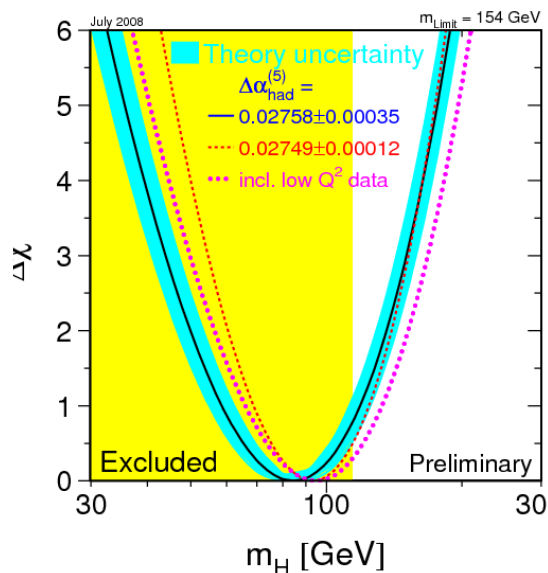
	I	II	III	
tömeg →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
töltés →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
név →	u up	c charm	t top	γ foton
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Kvarkok	d down	s strange	b bottom	g 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
	ν_e elektron-neutrínó	ν_μ műon-neutrínó	ν_τ tau-neutrínó	Z Z-bozon
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	±1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Leptonok	e elektron	μ műon	τ tau	W[±] W bozon
				Bozonok (köölcsönhatások)

A részecskefizika standard modellje a 2000-es évek elején

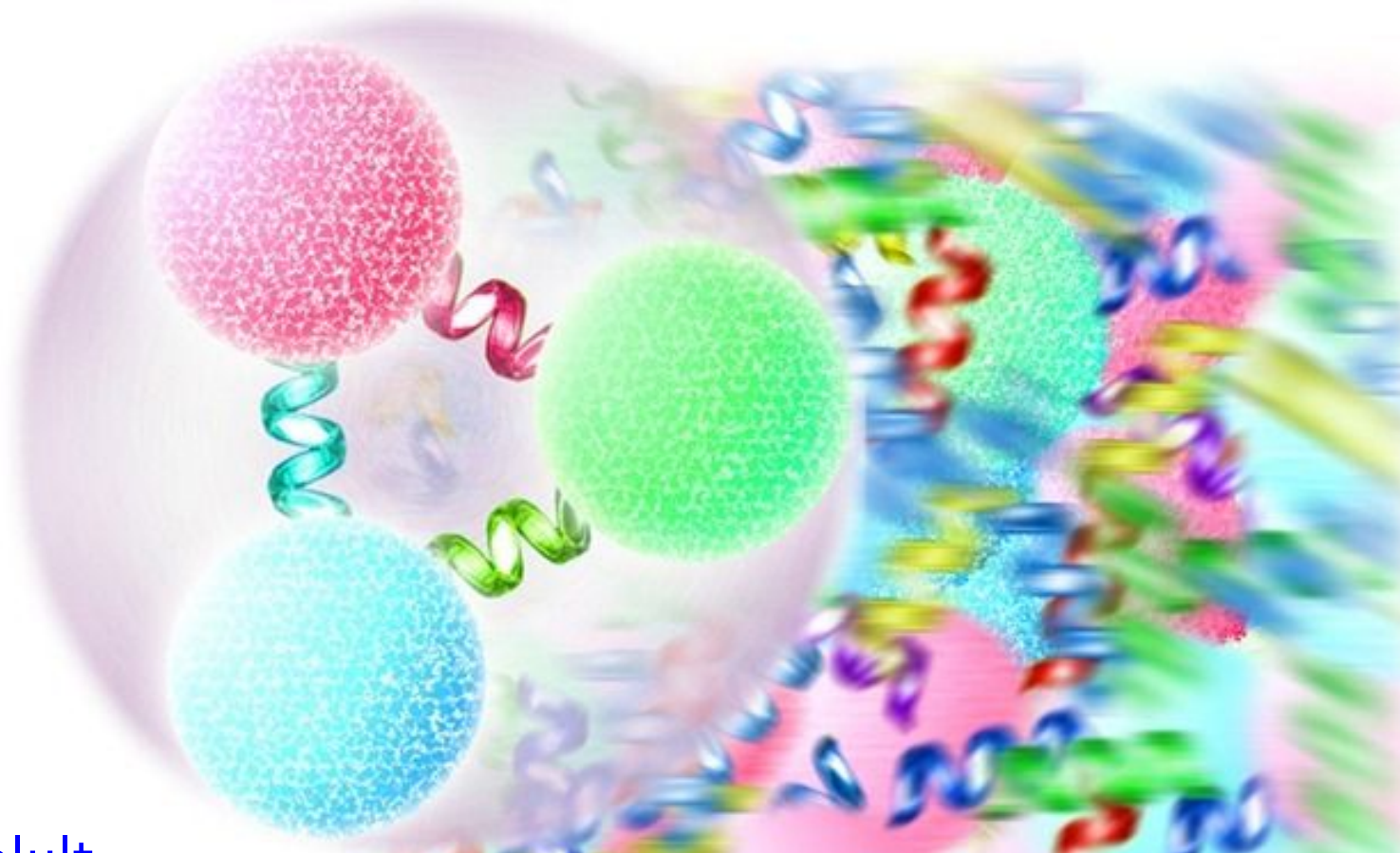
A standard modell sikeres, de . . .

- Nyitott kérdések

- Létezik-e megjósolt skalár mező? Mekkora a mezőhöz tartozó bozon tömege?
- Van-e új fizika a TeV-es skálán? Szuperszimmetria?
- Milyen az erős kölcsönhatás kis és nagy energián?
- Hogyan valósul meg a kvark-bezárás? Léteznek-e egzotikus állapotok?
- Hogyan illeszthetők be a tömeges neutrínók a modellbe?
- Hova tűnt az antianyag? Részecskés természetű-e a sötét anyag, a sötét energia?
- Folytatható-e az egyesítés? Jó úton jár-e az elmélet?



Erős kölcsönhatás



- Furcsa és bonyolult

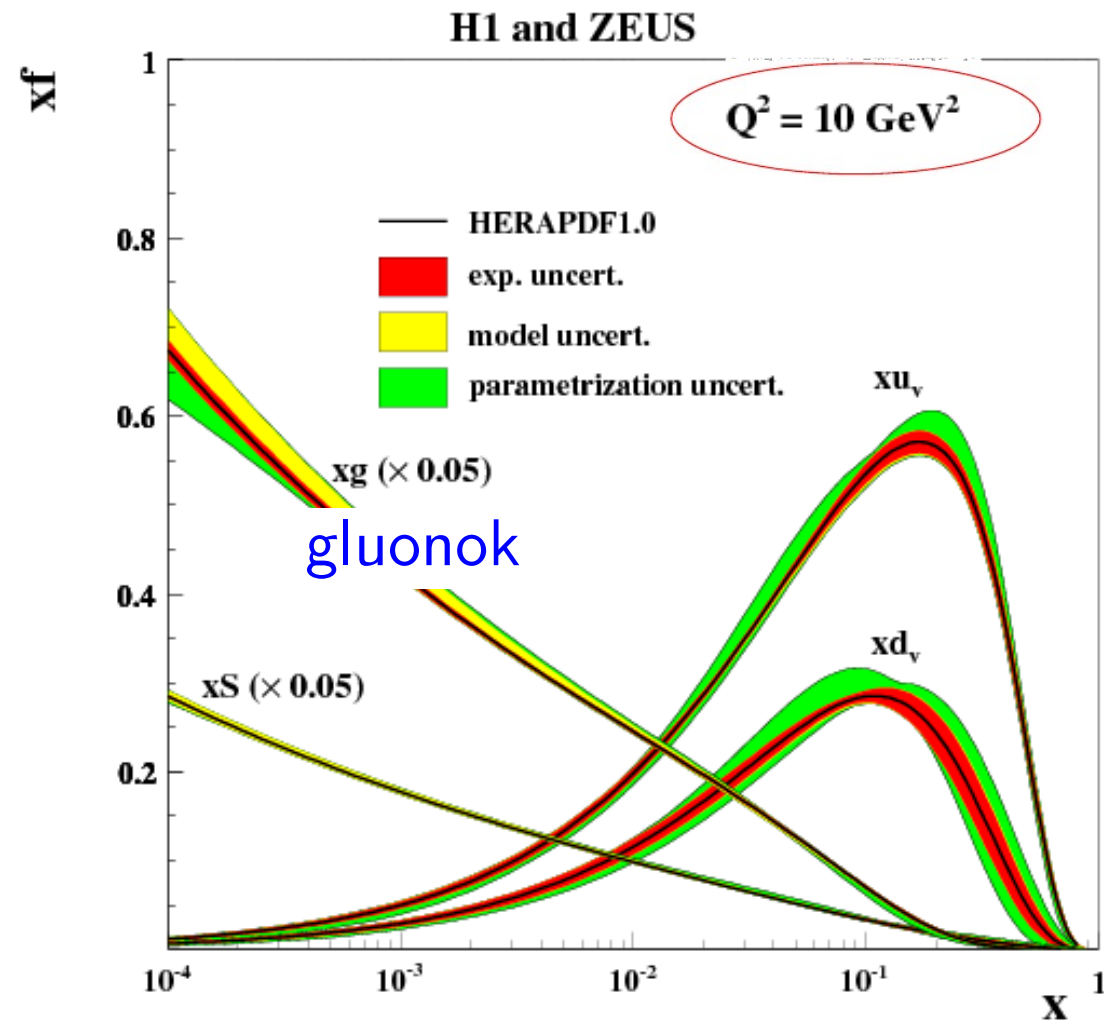
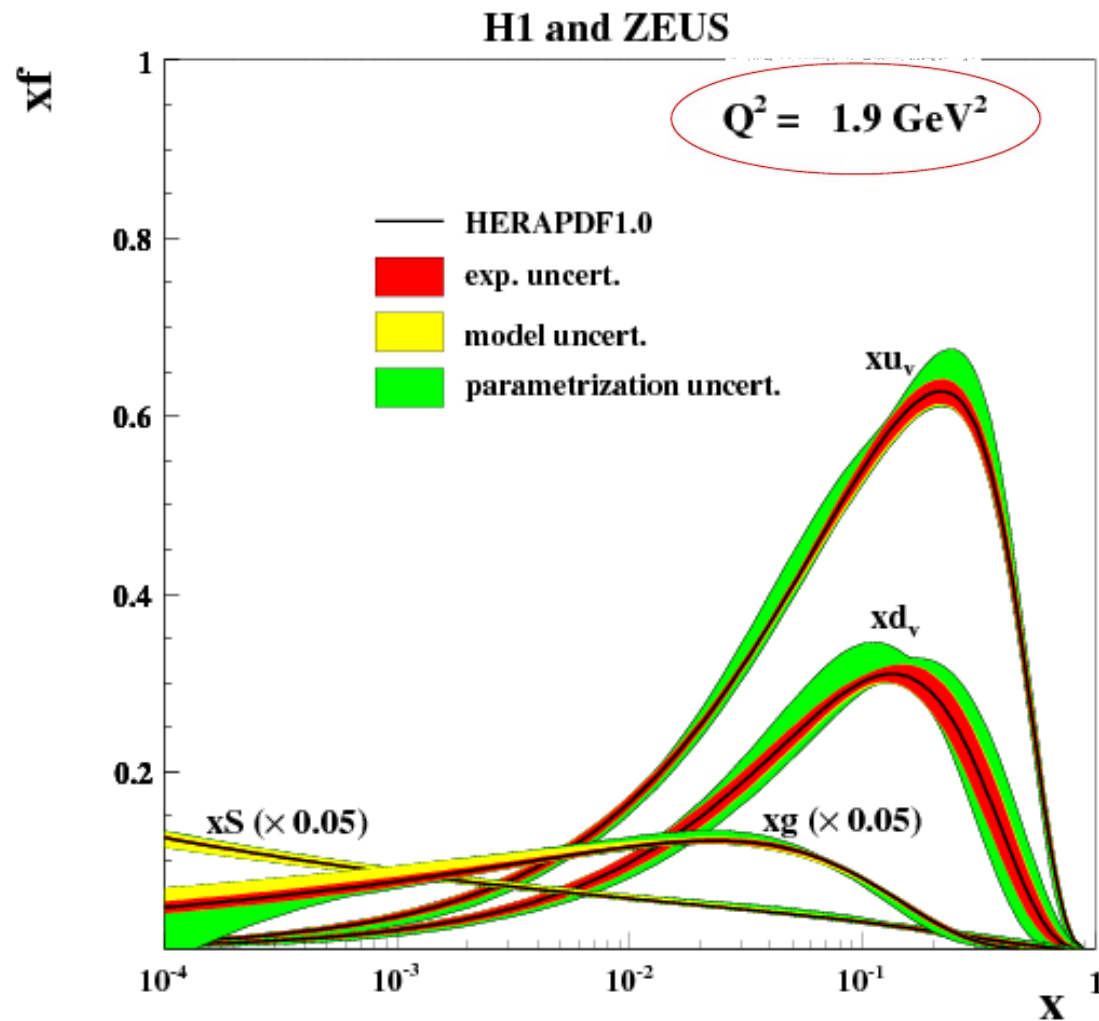
- a közvetítő részecske – a gluon –, maga is (szín)töltött
- az erős kölcsönhatás a kvarkokat bezárja a hadronok belsejébe

Nagy impulzusátadás esetén perturbatíven számolható

Nemperturbatív rácstérelméleti számítások

Van-e más út?

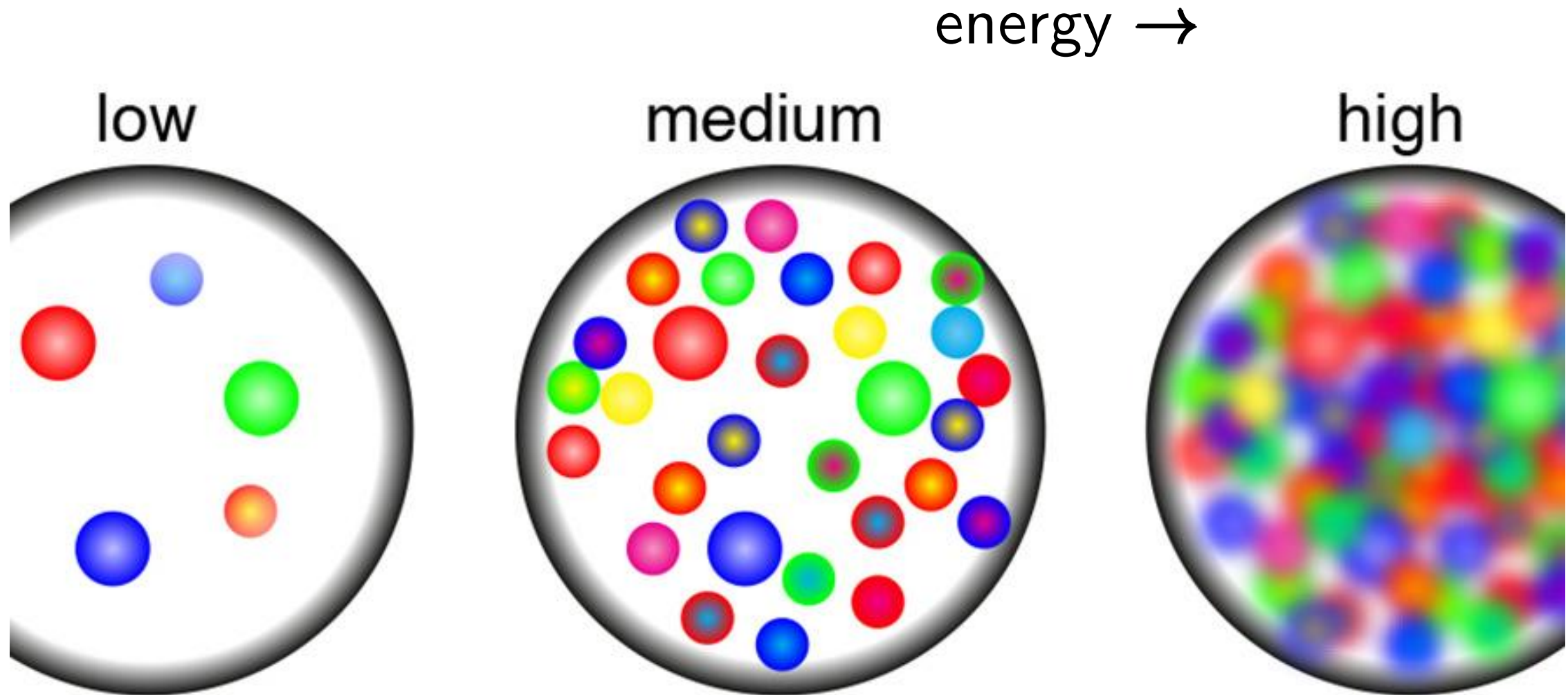
Proton



H1 and Zeus Coll's, J High Energy Phys **01** (2010) 109

Nagyobb energia \rightarrow egyre több kis impulzushányadú gluon
Meghatározó szerep az átlagos proton-proton ütközésekben?

Proton



Nagyobb energia → egyre több kis impulzushányadú gluon
Mi történik akkor, ha „betelik”, telítődik a proton?



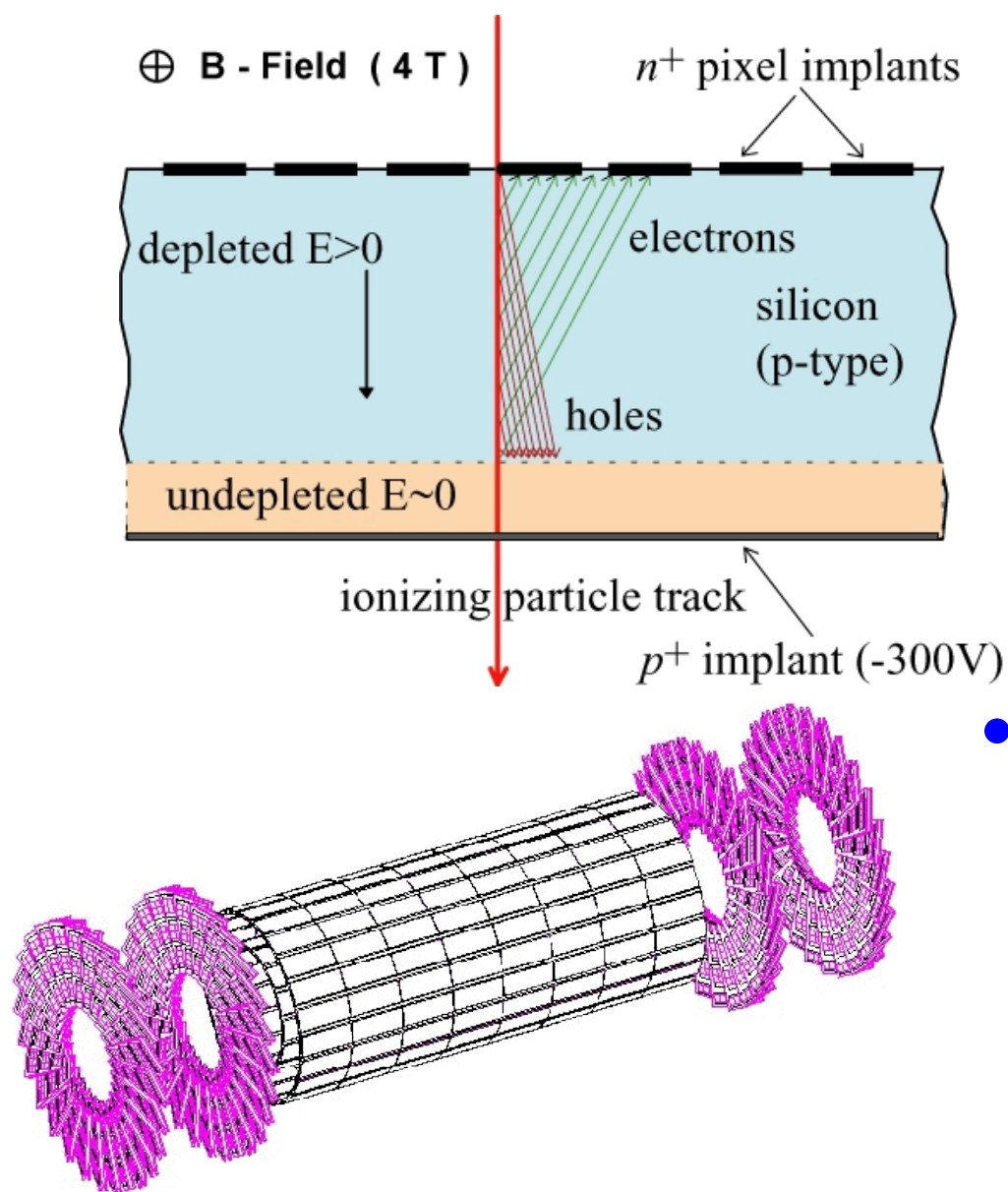
- Új eszközök? (van új a nap alatt)
 - Kis impulzusú nyomkövetés
 - Alacsony tévesztésű nyomkövetés
 - Újfajta kölcsönhatási pont keresés
 - Töltött részecskék azonosítása
 - Nagy részecskeszámú ütközések
 - Konvertált fotonok
- Érdekes fizika
 - A keltett részecskék eloszlásai és korrelációi (p-p, p-Pb és Pb-Pb)
 - 0,9, 2,76, 5,02, 7 és 13 TeV energián

Önálló eredmények alkalmazása a Nagy Hadronütköztető (LHC) CMS kísérletében

A CMS-kísérlet

A kísérleti fizikus feladatai: detektorépítés \rightarrow mérés \rightarrow kiértékelés \rightarrow fizika

Szilícium alapú nyomkövetők

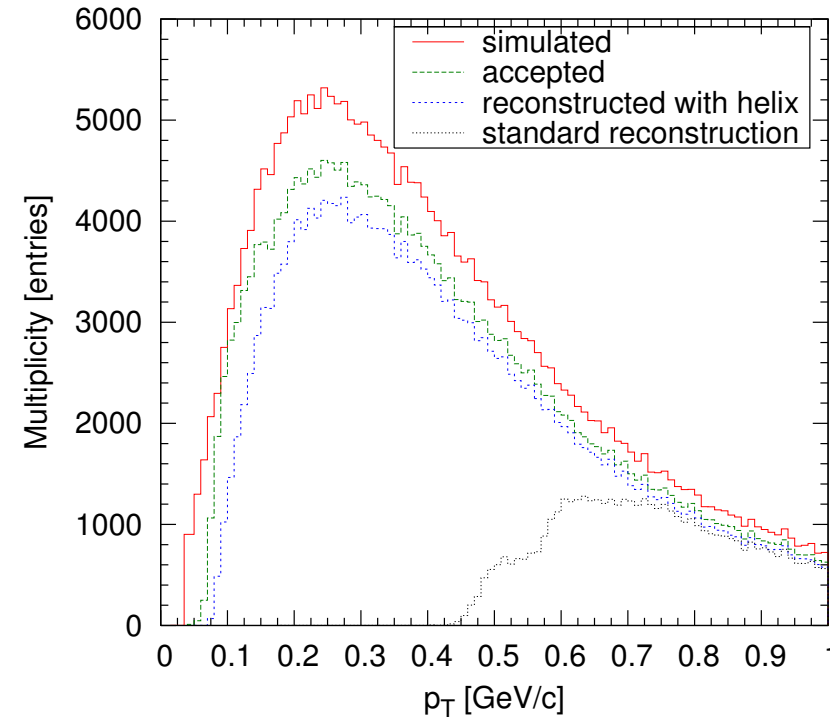
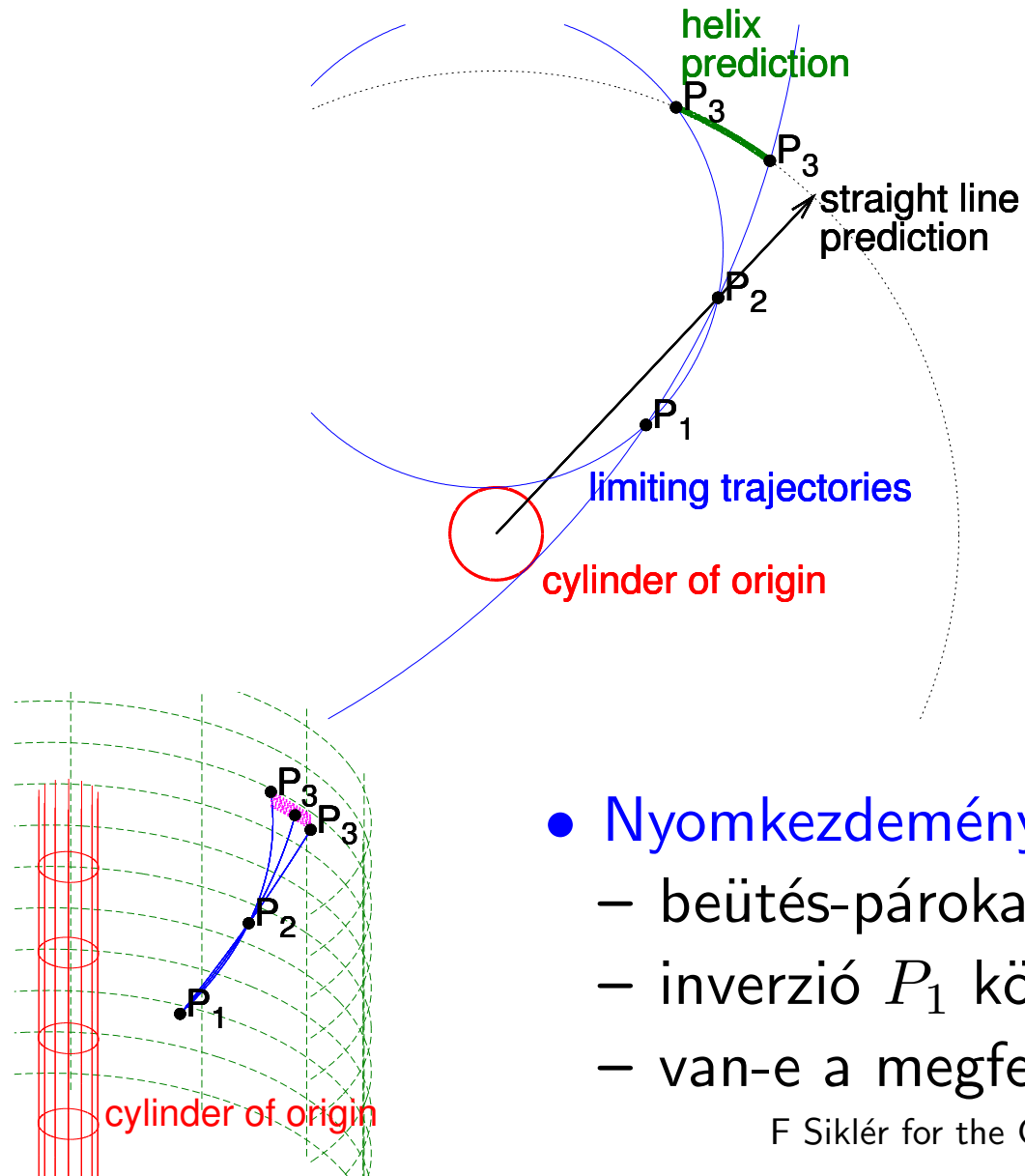


• Nyomkövető rendszer

- a töltött részecske áthalad, elektron-lyuk párok, kiolvasás elektromos térrel
- pixel detektor: $\mathcal{O}(100 \mu\text{m})$, hordó-rétegek valamint végsapka-korongok
- strip detektor: csíkok, néhány dupla réteggel

Klaszterek: szomszédos, számottevő energialeadású pixelek/csíkok csoportjai

Kis impulzusú nyomkövetés

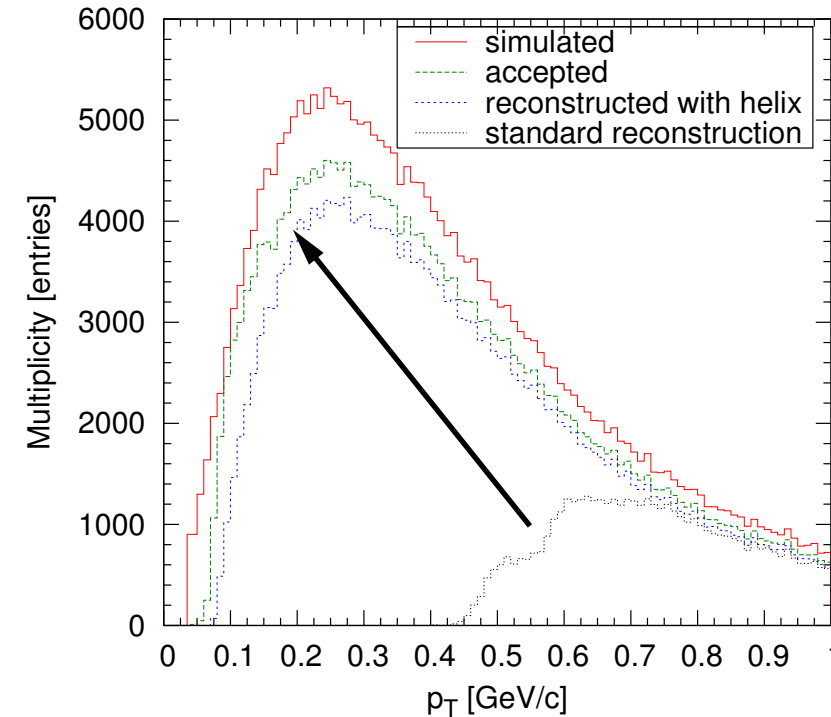
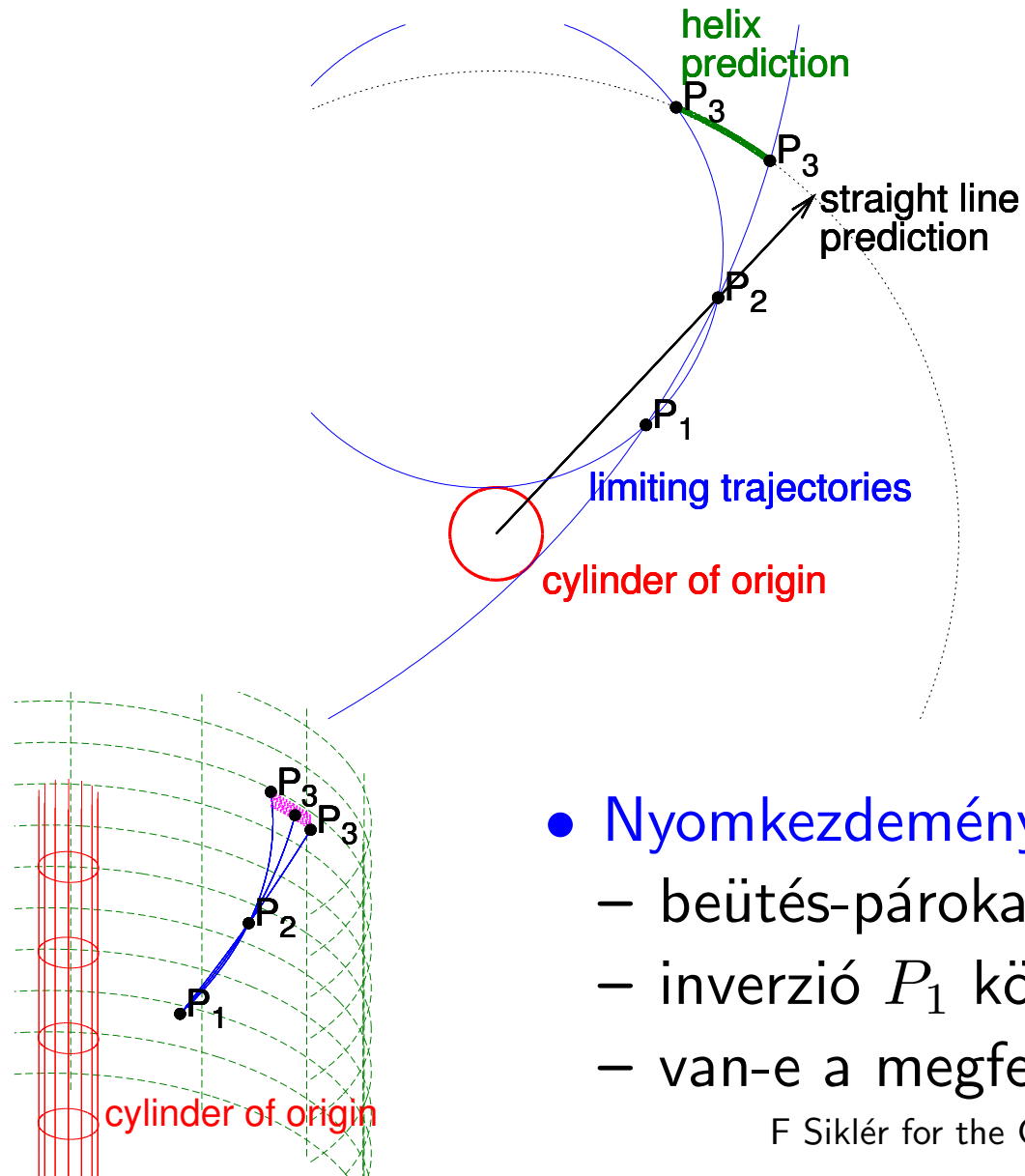


- Nyomkezdemenyek készítése
 - beütés-párokat formálunk (P_1 és P_2)
 - inverzió P_1 középponttal és P_1P_2 sugárral, $\Rightarrow P_3$
 - van-e a megfelelő pont a téglalap alakú burkolón?


F Siklér for the CMS Coll, Int J Mod Phys E **16** (2007) 1819 [F Siklér, CMS AN-2006/100]

F Siklér for the CMS Coll, J Phys G **35** (2008) 104150

Kis impulzusú nyomkövetés



- Nyomkezdemenyek készítése

- beütés-párokat formálunk (P_1 és P_2)
- inverzió P_1 középponttal és P_1P_2 sugárral, $\Rightarrow P_3$ 
- van-e a megfelelő pont a téglalap alakú burkolón?

F Siklér for the CMS Coll, Int J Mod Phys E **16** (2007) 1819 [F Siklér, CMS AN-2006/100]

F Siklér for the CMS Coll, J Phys G **35** (2008) 104150

A keltett töltött részecskék nagy része elérhető!

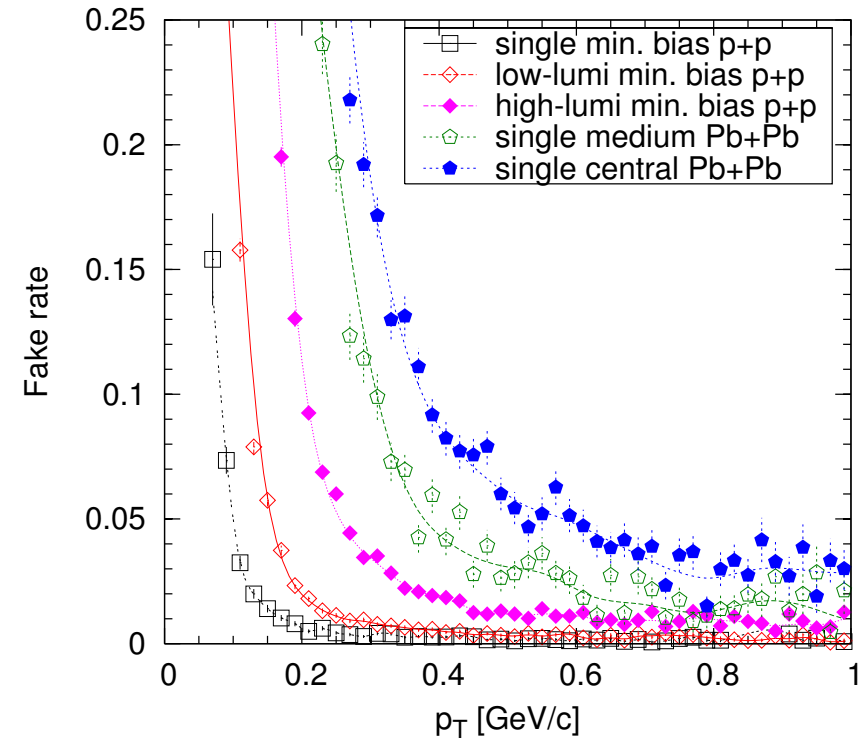
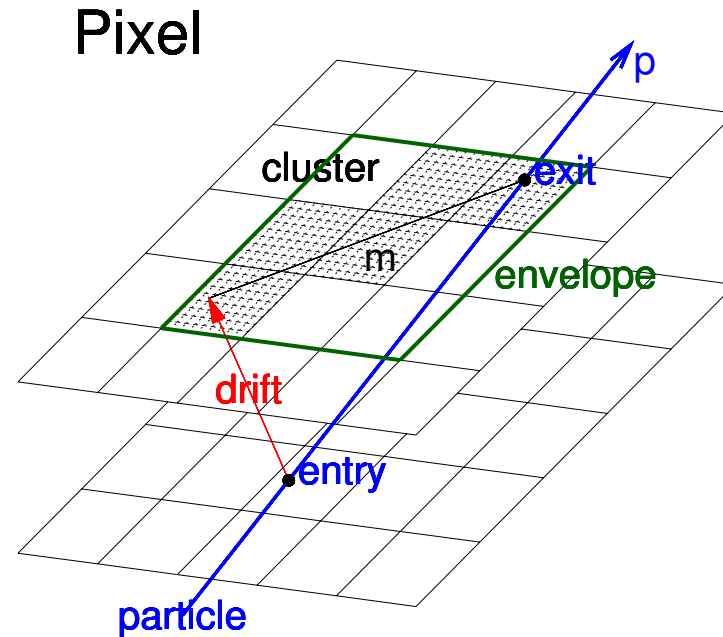
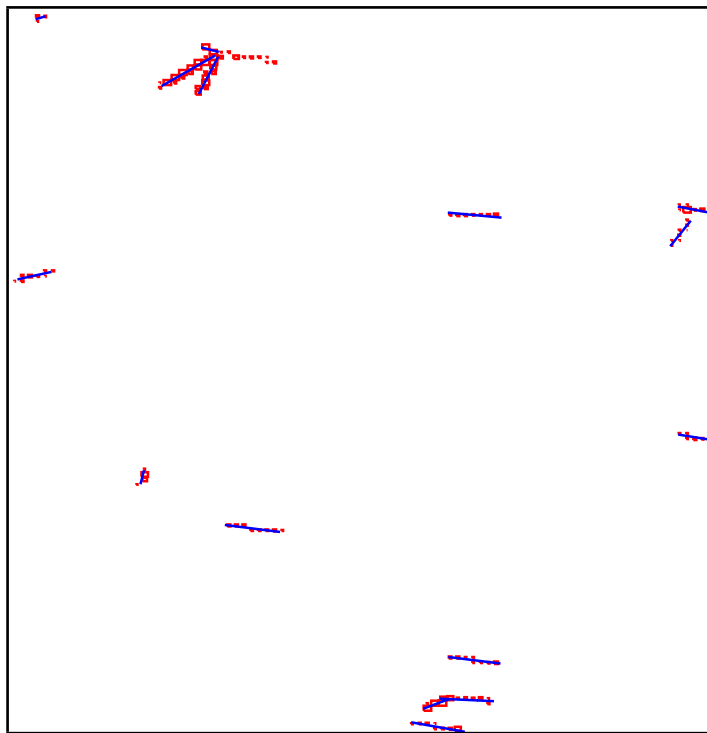
Kis impulzusú nyomkövetés

A keltett töltött részecskék
nagy része elérhető!

Alacsony tévesztésű nyomkövetés

- A beütések alakja

- túl sok beütés, melyik pont melyik részecskéhez tartozik?
- töltött részecske \rightarrow leadott energia \rightarrow klaszter
- a klaszterek alakja kapcsolatban van a bejövő részecske irányával

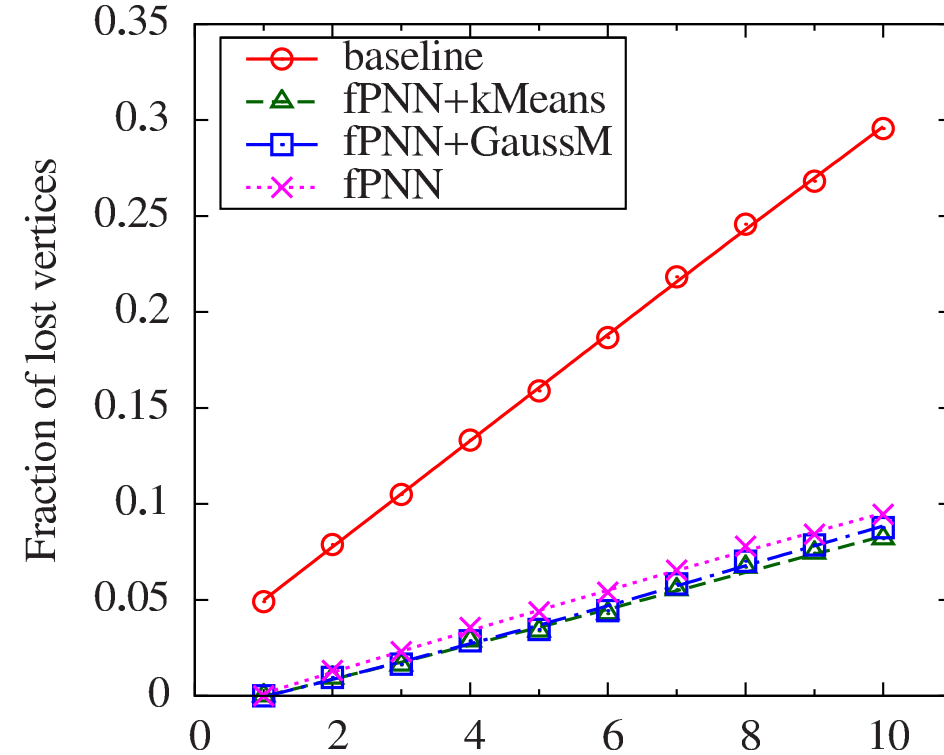
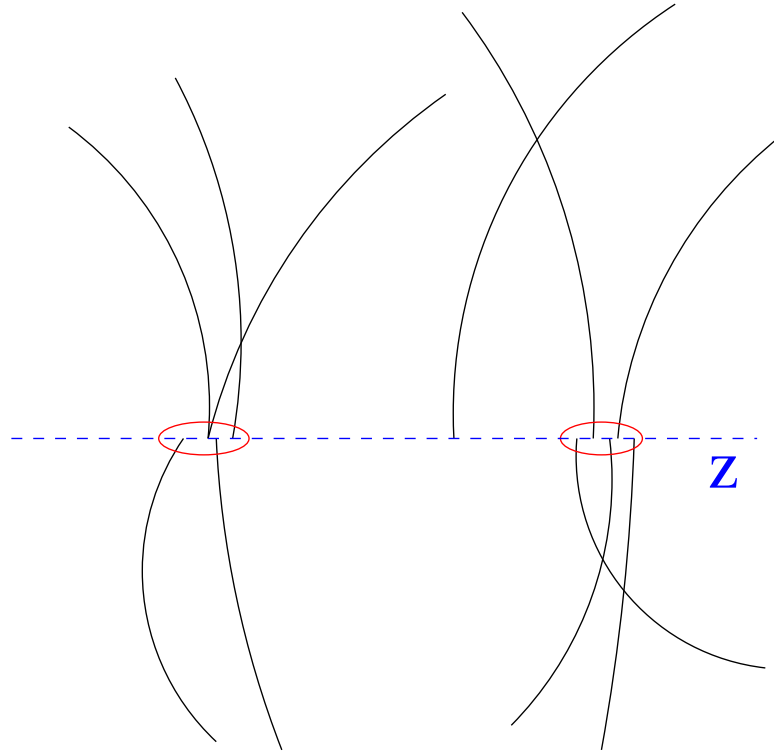


Nagyon hatékony szűrő

F Siklér for the CMS Coll, Int J Mod Phys E **16** (2007) 1819 [F Siklér, CMS AN-2006/100]

F Siklér for the CMS Coll, J Phys G **35** (2008) 104150

Kölcsönhatási pontok javított keresése



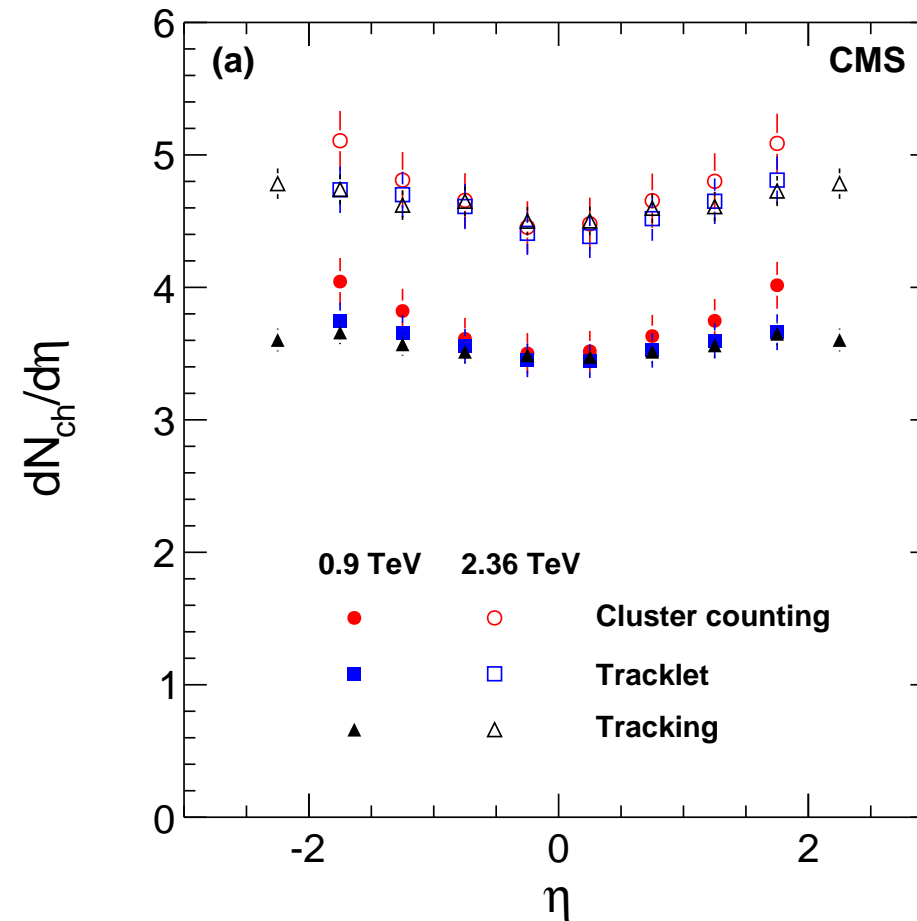
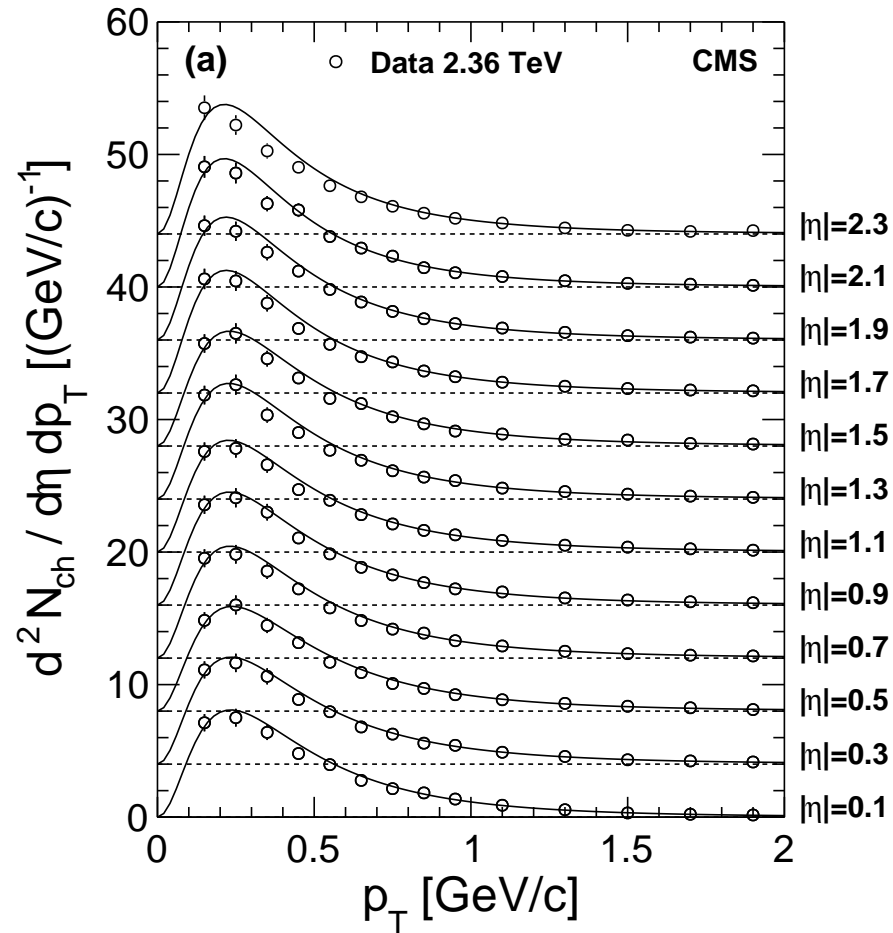
• Összevonó klaszterezés

- két részecske d távolsága: $d^2 = (z_i - z_j)^2 / (\sigma_i^2 + \sigma_j^2)$
- minden lépésben megkeressük a két legközelebbi klasztert és egyesítjük
- az új klaszter z -je és σ -ja a két klaszter súlyozott átlaga

F Siklér, Nucl Instrum Meth A **621** (2010) 526

Egy rekonstruált proton-proton ütközés

Töltött hadronok eloszlásai



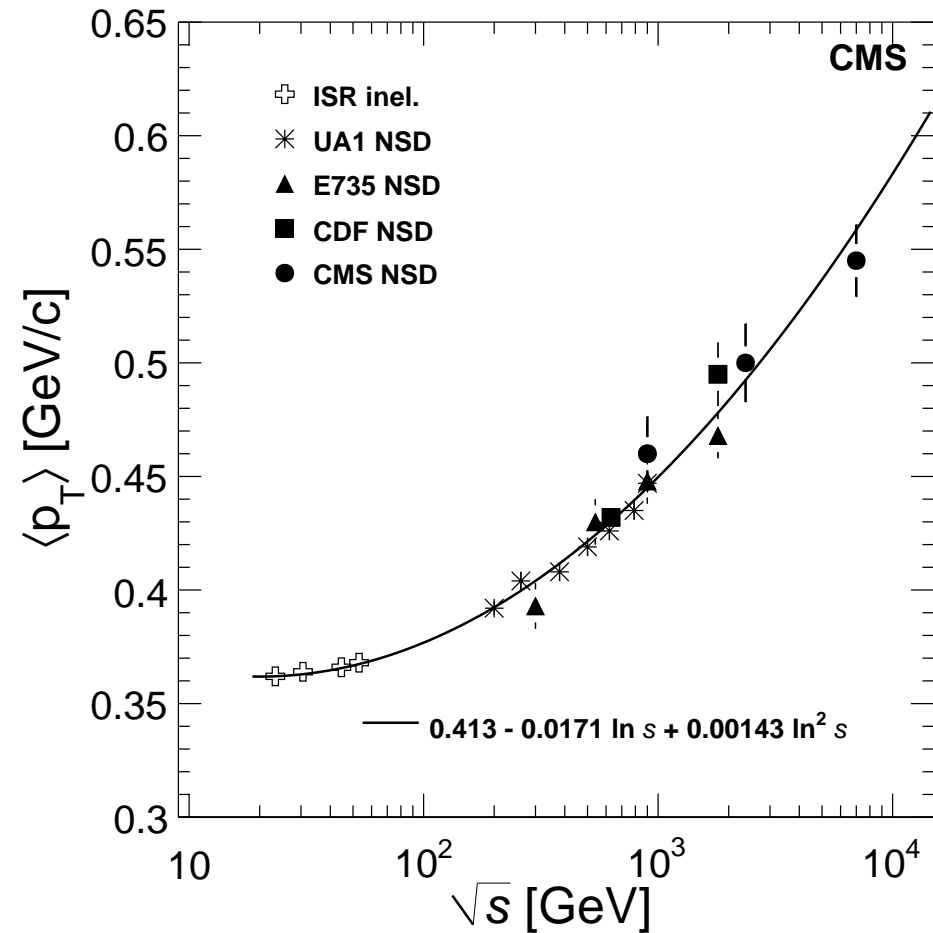
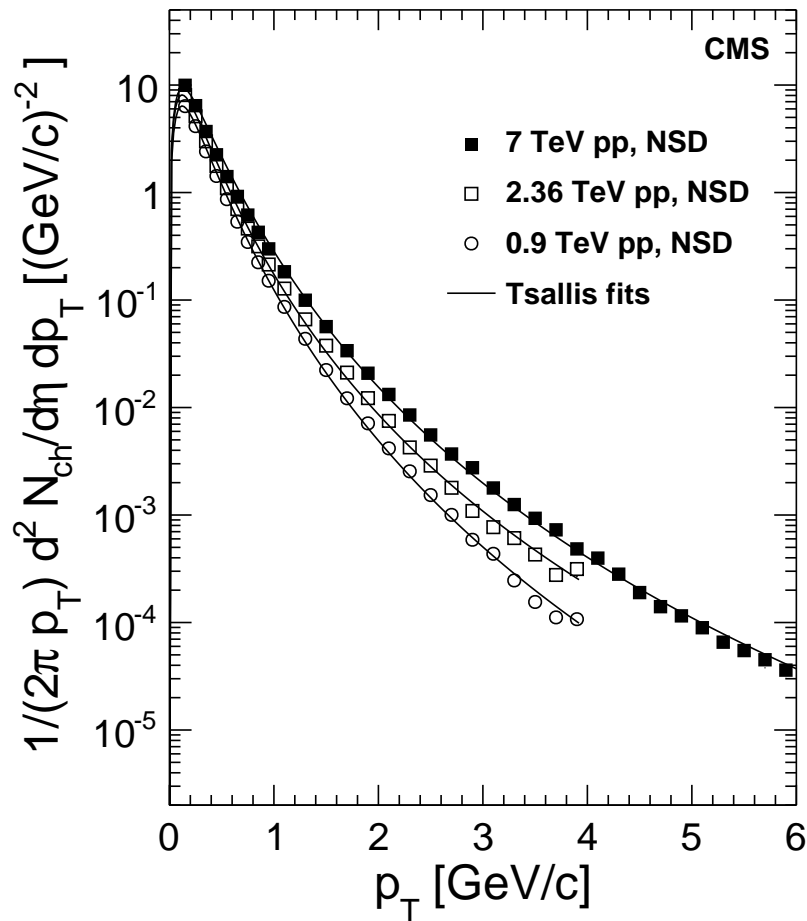
Gyors kiértékelés, differenciális spektrumok, 3 módszer

Mérések 0,9, 2,36 és 7 TeV-en

CMS Coll, J High Energy Phys **02** (2010) 041 [K Krajczár, YJ Lee, C Roland, F Siklér, GI Veres et al, CMS AN-2009/182]

CMS Coll, Phys Rev Lett **105** (2010) 022002 [K Krajczár, YJ Lee, C Roland, F Siklér, GI Veres et al, CMS AN-2010/069]

Töltött hadronok eloszlásai



LHC: első impulzusmérés, első 2,36 TeV-es mérés

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

CMS Coll, J High Energy Phys **02** (2010) 041 [K Krajczár, YJ Lee, C Roland, F Siklér, GI Veres et al, CMS AN-2009/182]

CMS Coll, Phys Rev Lett **105** (2010) 022002 [K Krajczár, YJ Lee, C Roland, F Siklér, GI Veres et al, CMS AN-2010/069]

Tudomány

Magyarok publikálták először az LHC rekordját

Stöckert Gábor

2010. február 3., szerda 15:40

Az ELTE és a KFKI RMKI három kutatóját érte a megtiszteltetés, hogy először publikálhattak 2,36 teraelektronvont történt ütközéseket. A rekord energiaszintet a CERN gyorsítójában, az LHC-ben állították elő, ahol még magasabb energián fogják keresni a rejtélyes Higgs-bozont. A részecskevezetésben jól jönnek majd a magyarok mérései.

[origo] címlap | hírcentrum | komment.hu | [freemail] | videó | IWIV | keresés | mag

[origo] tudomány

Világútr | Múlt-kor | terhesség | NASA | népszerű tudomány | magyar kutatók | evolúció | óssejtek | 365 zöld

Világelső magyar eredmény a CERN-ből

Simon Tamás | 2010. 02. 03., 17:35 | Utolsó módosítás: 2010. 02. 05., 8:43 |

CIMKEK: CMS, LHC, CERN, részecskefizika, magyar kutatók

Ez a cikk 206 napja frissült utoljára. A benne szereplő információk a megjelenés idején pontosak voltak, de mára elavultak lehetnek.

Megosztás:   

A tavaly látványos sikerrel újraindított nagy hadronütköztető a világ legnagyobb részecskegyorsítója. Ennek működésére épül a világ egyik legnagyobb tudományos együttműködése, a CMS-kísérlet. Már csak ezért is büszkék lehetünk arra, hogy az első, a CMS-hez és a "világrekord energiához" kapcsolódó tudományos cikk döntően magyar kutatók eredményei alapján jelenik meg a szaksajtóban.

A mérést három független módon végezték, ezek közül kettőt magyarok javasoltak és dolgoztak ki. Az egymást megerősítő adatok meglepték a szakembereket. "A két energiaszint között 28%-kal több részecske keletkezett, ehhez képest az elméleti modellek 18-, illetve 15%-ot jósoltak. Vagyis a keltett részecskék száma az energia függvényében meredekebb, mint azt eddig gondoltuk. Ez egy nagyon fontos, alapvető mérés, amely megalapozza a későbbi méréseket is. Valószínű, hogy nagyobb energiákon is több részecske fog keletkezni, mint ahogy a modellek alapján várjuk" - mondja Siklér Ferenc, az egyik mérési módszer kidolgozója.

Transverse-Momentum and Pseudorapidity Distributions of Charged Hadrons in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV

V. Khachatryan *et al.**
(CMS Collaboration)

(Received 18 May 2010; published 6 July 2010)

Charged-hadron transverse-momentum and pseudorapidity distributions in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV are measured with the inner tracking system of the CMS detector at the LHC. The charged-



HÍREK | TUDOMÁNYOS OSZTÁLYOK | AZ MTA KUTATÓHÁLÓZATA | A TUDOMÁNY VILÁGÁBÓL | KAPCSOLAT

MTA - Magyar Tudományos Akadémia | Hírek

MENÜ | HÍREK | VISSZA | 2010.02.18.

A Magyar Tudományos Akadémiáról | Rekord energiájú ütközések a LHC-ben

A tanulmányban részletezett eredmények a részecskék eddigi legnagyobb, 7 teraelektronvont energiájú ütközései alapján születtek. - Az LHC most egy ideig nem fogja túllépni ezt az energiaszintet, vagyis legalább egy évig stabilan 7 TeV-en működik majd a gyorsító – mondta Veres Gábor, hozzátéve: annak ellenére, hogy az LHC biztonsága sokat javult, és a mérnökök is nagyon elővigyázatosak a 2008-ban bekövetkezett sérülés óta, a gyorsító egyelőre nem lenne biztonságos a névleges energián, vagyis 14 TeV-en működtetve. A maximális energiára történő kapcsolást megelőzően az LHC valószínűleg egy évre teljesen leáll. Ebben az időszakban a technikai szakemberek



Az LHC CMS detektora

Tudomány

Magyarok vezetésével publikálták az LHC új rekordját

Stöckert Gábor

2010. július 8., csütörtök 14:32

Év elején magyar fizikusok közreműködésével készült el egy tanulmány, ami a világ legnagyobb részecskegyorsítójában, az LHC-ben rekord energiaszintű, 2,36 teraelektronvont ütközéseket írta le. Most az újabb, 7 teraelektronvont rekord ütközéseiről jelent meg egy tanulmány, amelynek a magyarok szintén szerzői.

MITnews

engineering | science | management | architecture and planning | humanities, arts, and social sciences | camp

Record-breaking collisions

Initial results from high-energy proton collisions at the Large Hadron Collider offer first glimpse of physics at new energy frontier.

Anne Trafton, MIT News Office

today's news

February 5, 2010

From sponges, a potential cancer drug

email | comment | print | share



In December, the Large Hadron Collider, the world's

This week, team led by researchers from MIT, CERN and the KFKI Research Institute for

Workers examine a new Quench Protection System at CERN in January. Image courtesy of CERN

Particle and Nuclear Physics in Budapest, Hungary, completed work on the first scientific paper analyzing the results of those collisions. Its findings show that the collisions produced an unexpectedly high number of particles called mesons — a factor that will have to be taken into account when physicists start looking for more rarer particles and for the theorized Higgs boson.

CERN COURIER

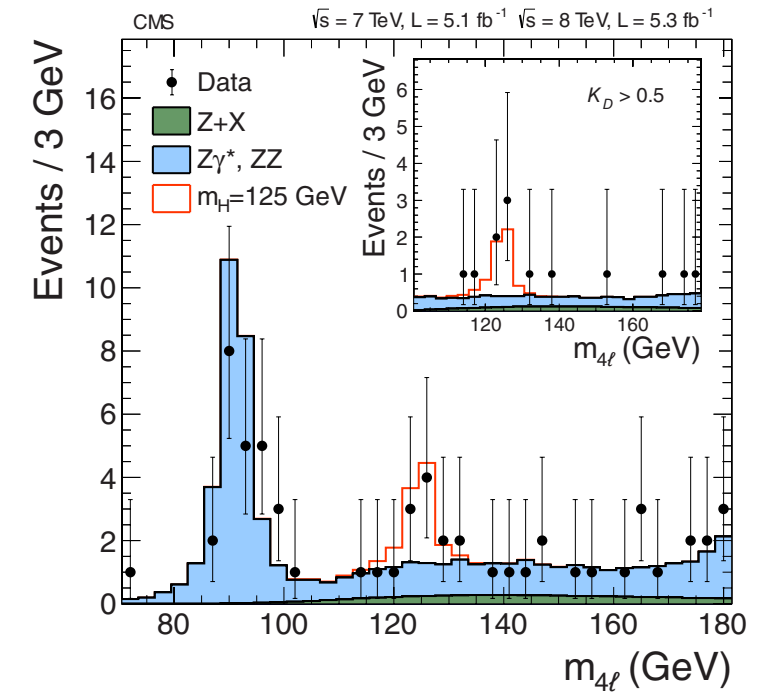
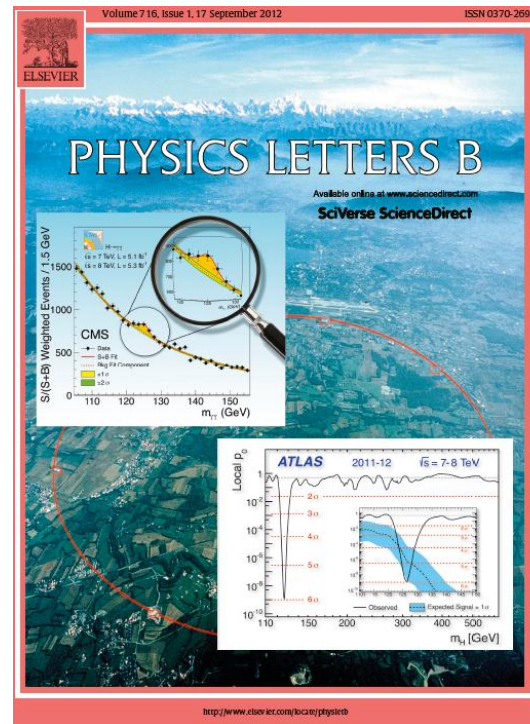
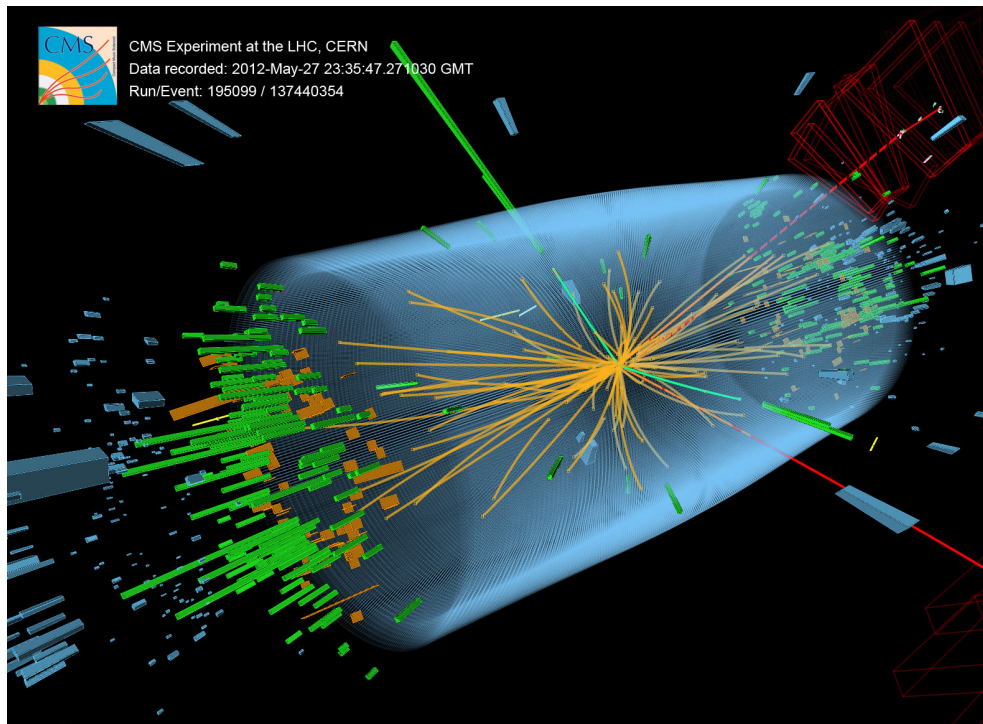
Jul 20, 2010

The DIS 2010 meeting in Florence covered a variety of collider results.

The DIS 2010 meeting in Florence covered a variety of collider results, despite the travel disruptions caused by ash from the Icelandic volcano. First measurements from the LHC at 7 TeV were one of the highlights.

progress in perturbative QCD. The session ended with the highlights from the ATLAS and CMS experiments at the LHC, with Thorsten Wengler of Manchester University and Ferenc Sikler of KFKI RMKI, Budapest, having the honour of showing the first published results on charged-particle spectra at 900 GeV and 2.36 TeV, as well as the first preliminary distributions at 7 TeV.

Felfedezés – a Higgs-bozon @ 125 GeV



CMS Coll, Phys Lett B **716** (2012) 301



G. Bencze, C. Hajdu, P. Hidas, D. Horvath¹⁹,
F. Sikler, V. Veszpremi, G. Vesztergombi²⁰, P. Zalan

KFKI Research Institute for Particle and Nuclear Physics, Budapest, Hungary

N. Beni, S. Czellar, A. Fenyvesi, J. Molnar, J. Palinkas, Z. Szillasi

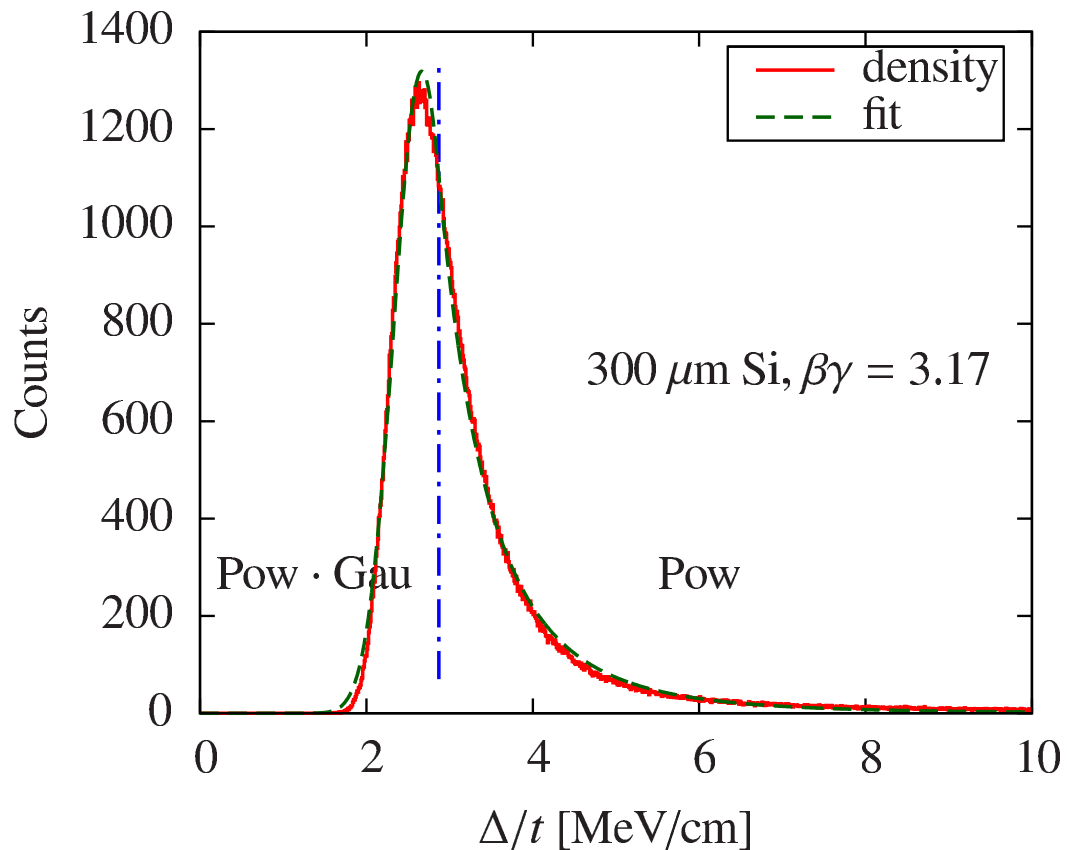
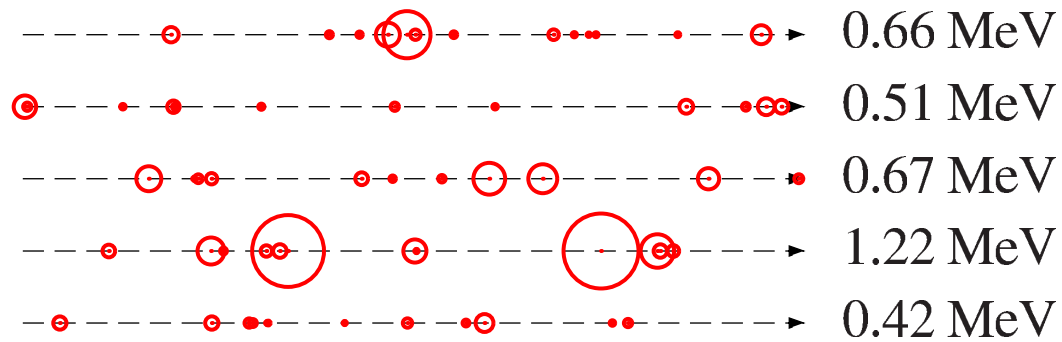
Institute of Nuclear Research ATOMKI, Debrecen, Hungary

J. Karancsi, P. Raics, Z.L. Trocsanyi, B. Ujvari, G. Zilizi

University of Debrecen, Debrecen, Hungary

K. Krajczar⁶⁷, G.I. Veres²⁰

Töltött részecskék energialeadása



• Töltött részecske áthaladása anyagon

- Bonyolult: gerjesztések, szórások, $1/\Delta E^2$
- Az ütközések 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; optimális súlyok?

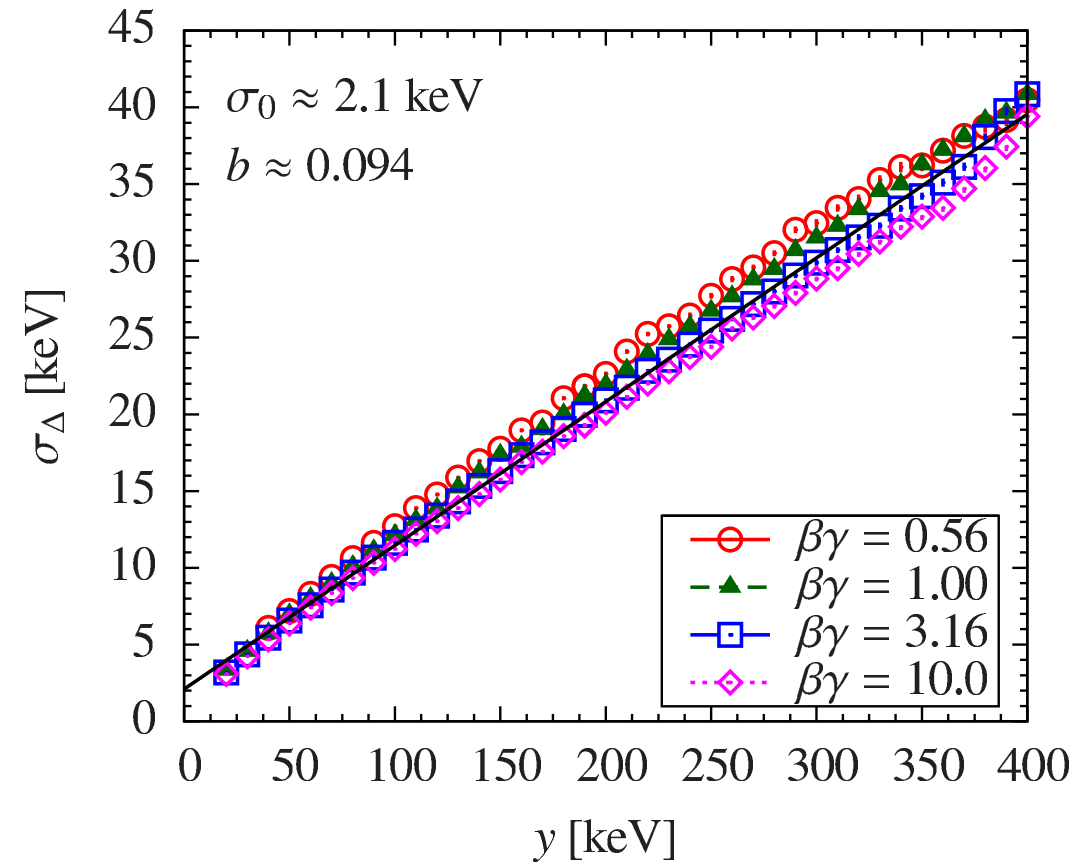
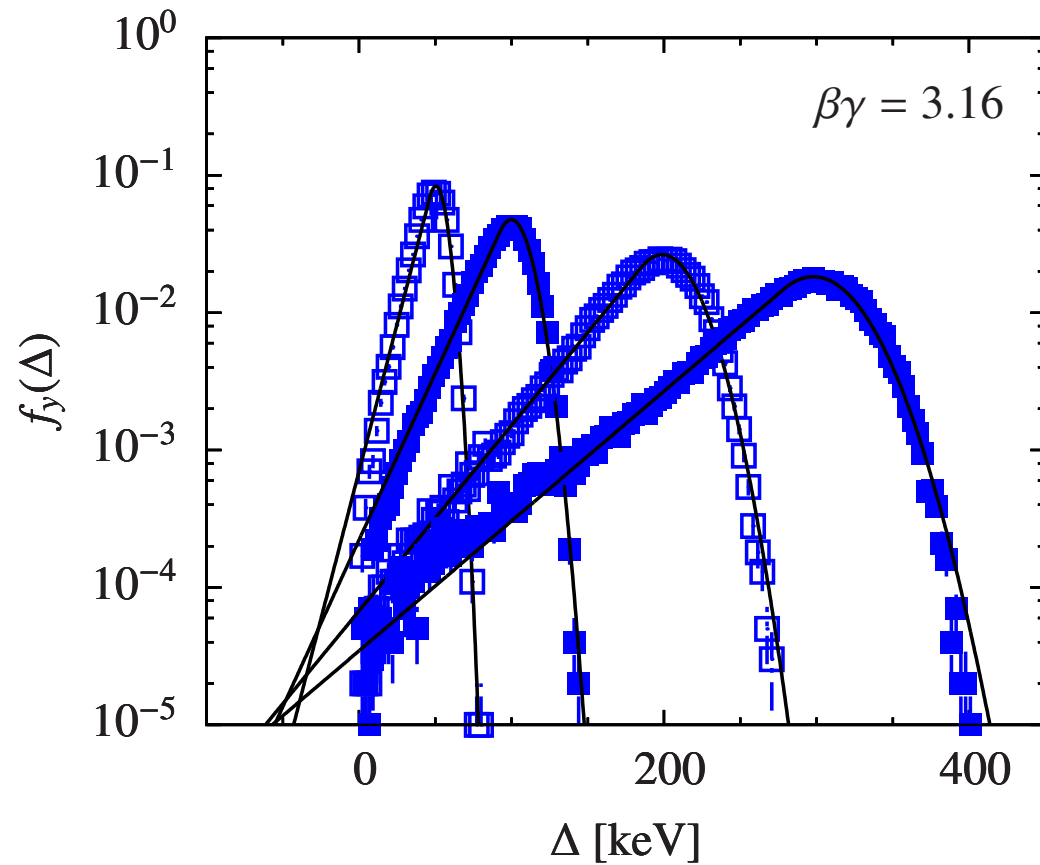


F Siklér and S Szeles, Nucl Instrum Meth A **687** (2012) 30

⇒ **Analitikus modell; max likelihood?**

Szerteágazó vizsgálatok:
többféle anyag (Si és Ne), $\beta\gamma$

Az energiavesztés-modell

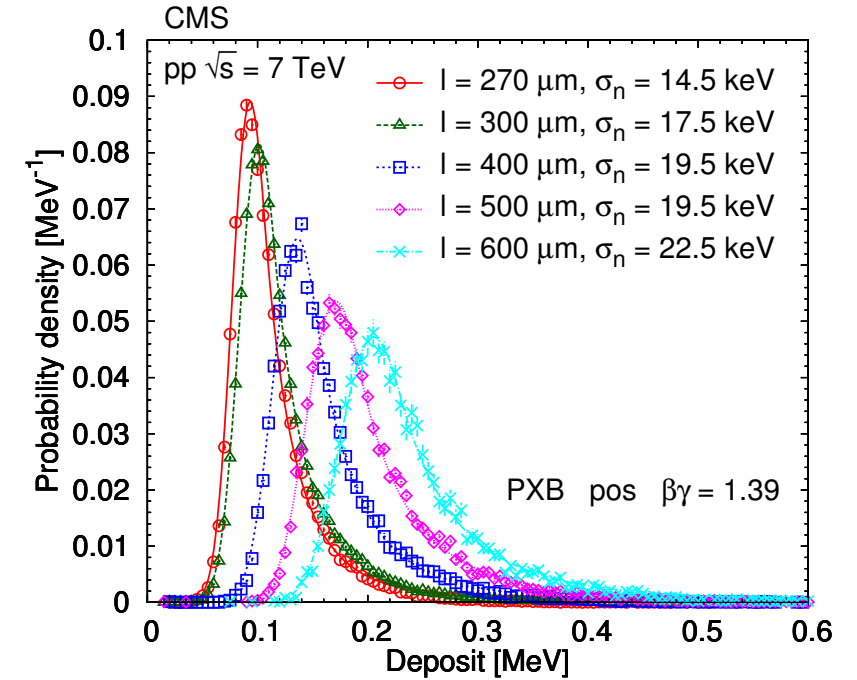
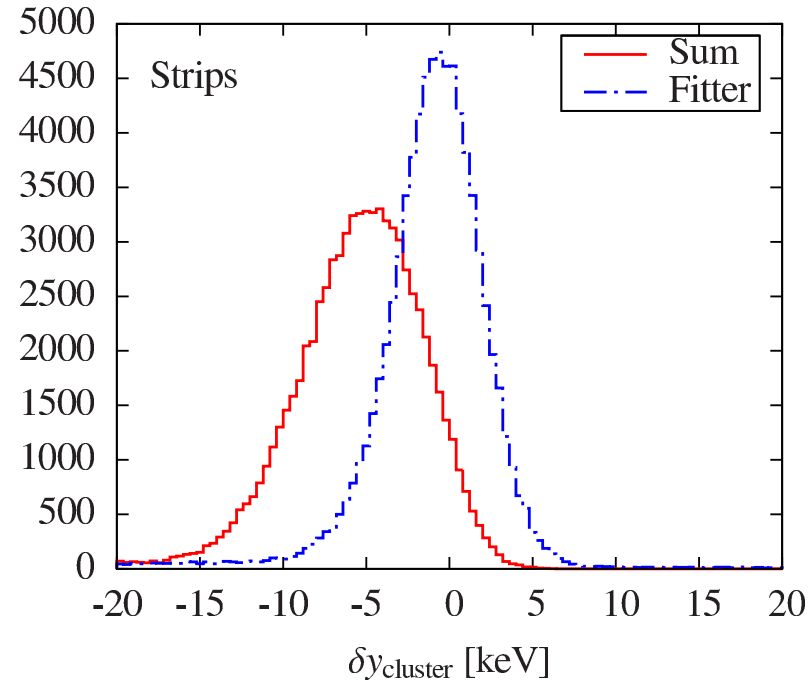
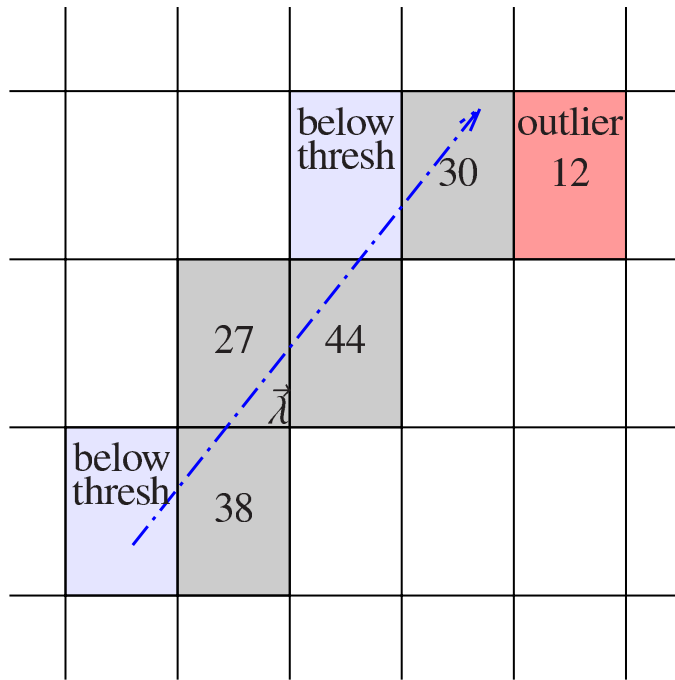


A legvalószínűbb energia $\Delta(l) \approx \varepsilon l [1 + a \log(l/l_0)]$, az inverz-eloszlásra $\sigma_\Delta(y) \approx \sigma_0 + by$
 Annak a valószínűsége, hogy a beütés energiája y , exponenciális és gauss-os részek

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



Az energiaveszteség-modell



F Siklér, Nucl Instrum Meth A **691** (2012) 16,

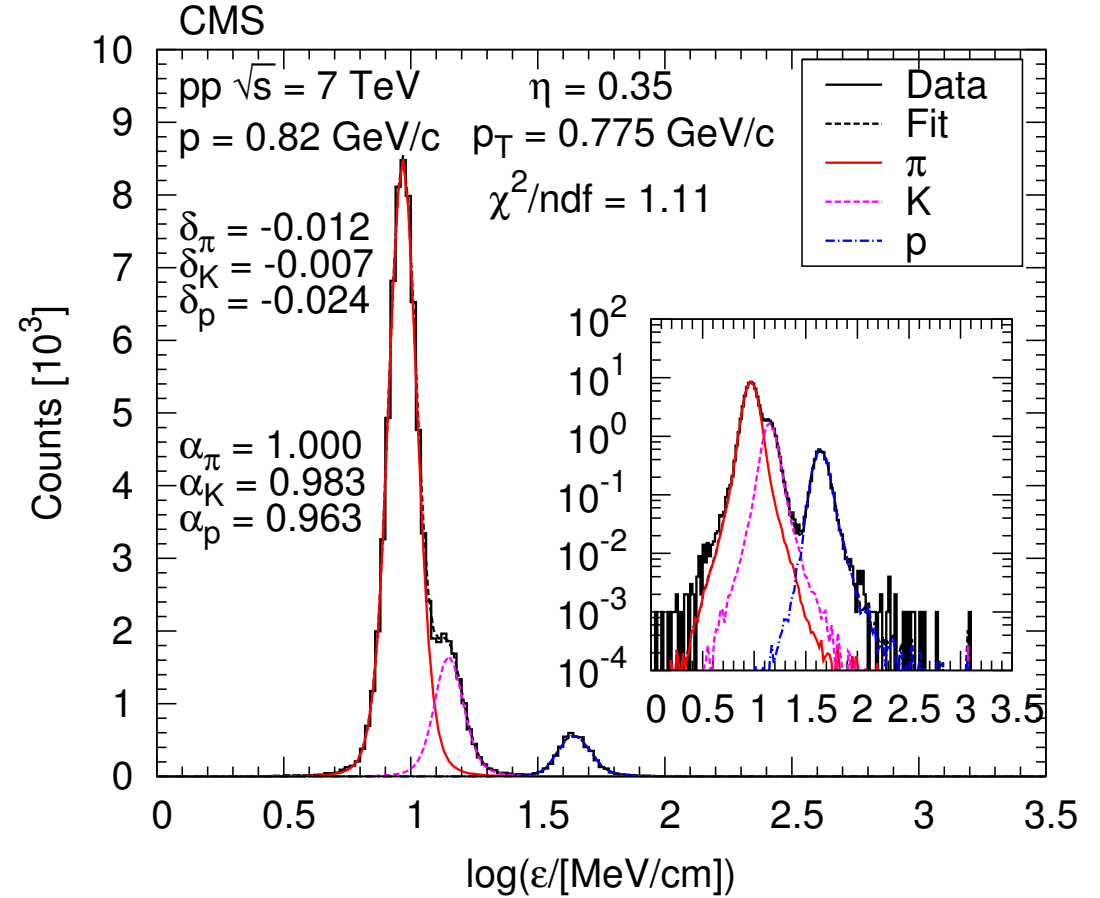
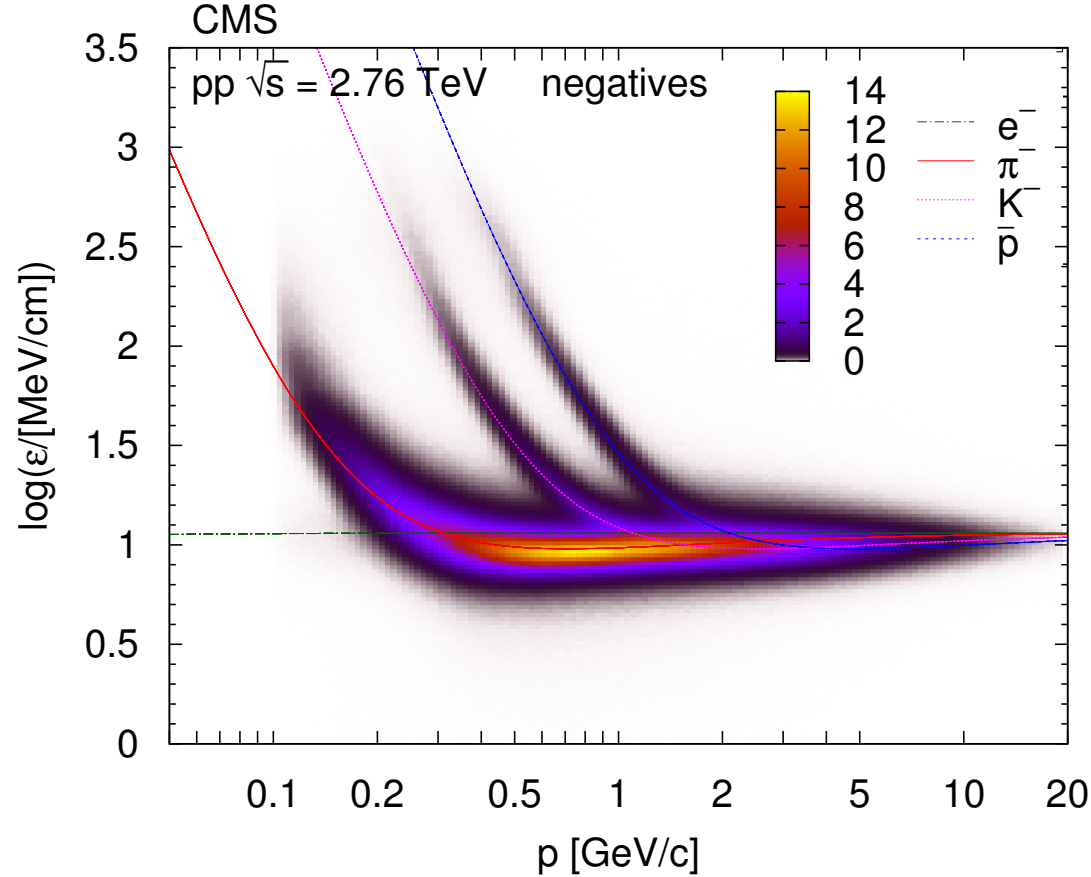
Valós adatok

- Sokféle alkalmazás

- a klaszterek hely- és energiabecslése; bizonytalanságuk számolható
- a kiolvasó chippek erősítésének kalibrációja
- a részecskék energiaveszteség-rátájának becslése

Egyszerű, de pontos: a Monte Carlo modell helyett egy analitikus parametrizáció

Az energiaveszteség-ráta becslése és használata



CMS Coll, Eur Phys J C **72** (2012) 2164 [F Siklér, CMS AN-2010/143]

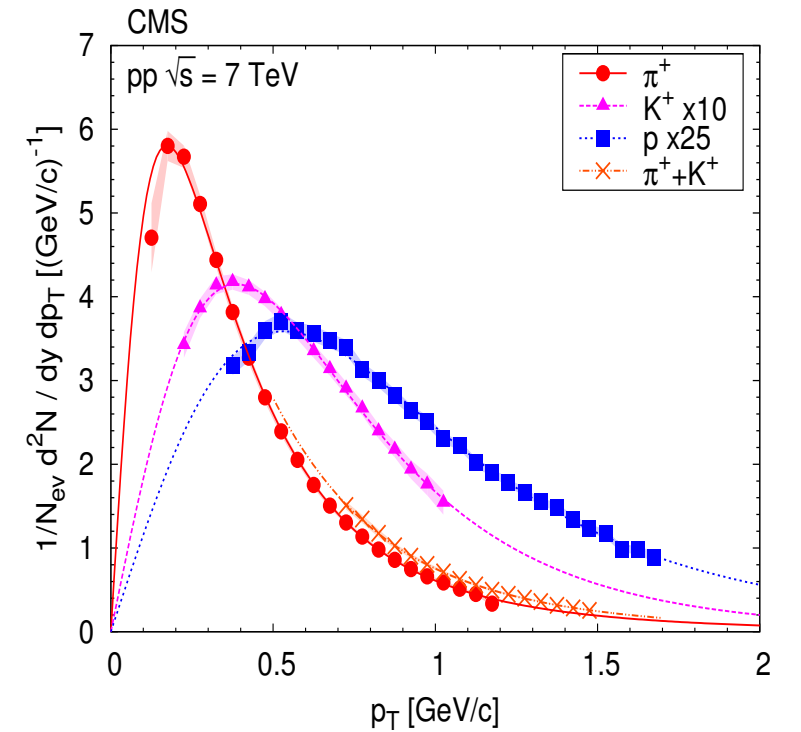
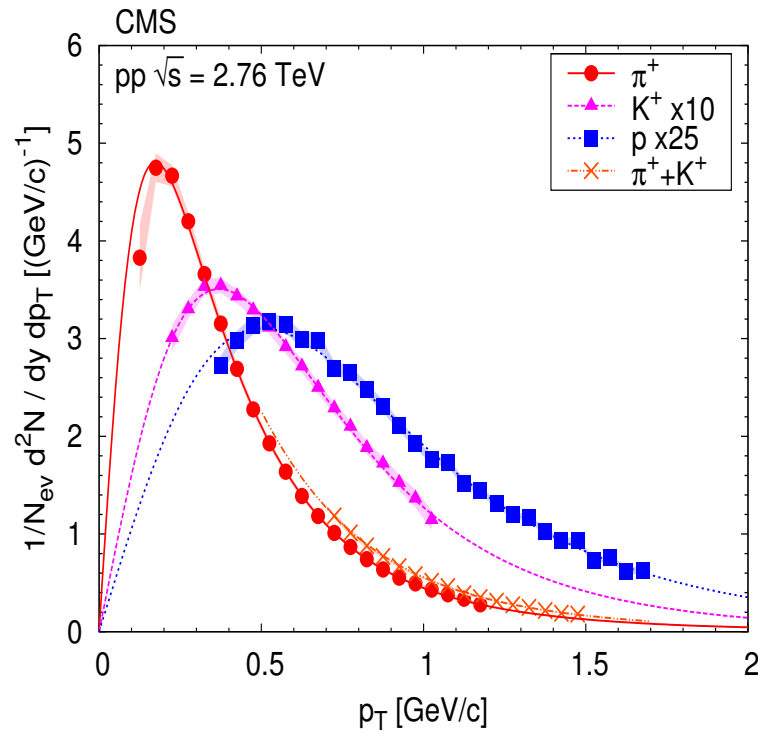
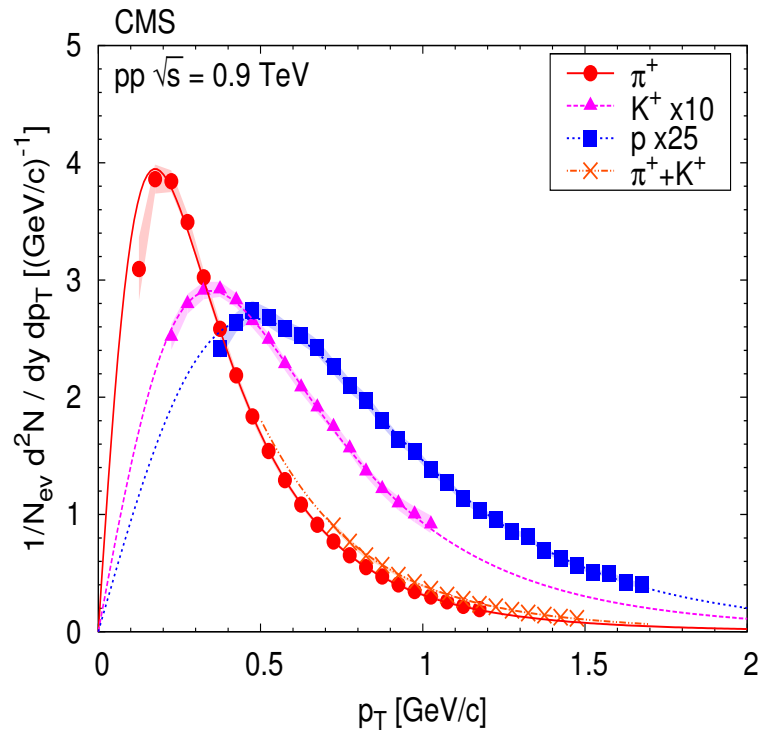
• A kiértékelés menete

- az ϵ ráta becslése mindegy egyes részecskepályára
- téves beütések eltávolítása (energiaveszteségben kilógnak)

Egyidejű, differenciális illesztések az adatokból meghatározott sablonokkal



Azonosított hadronok eloszlásai, p-p



CMS Coll, Eur Phys J C **72** (2012) 2164 [F Siklér CMS AN-2010/143]

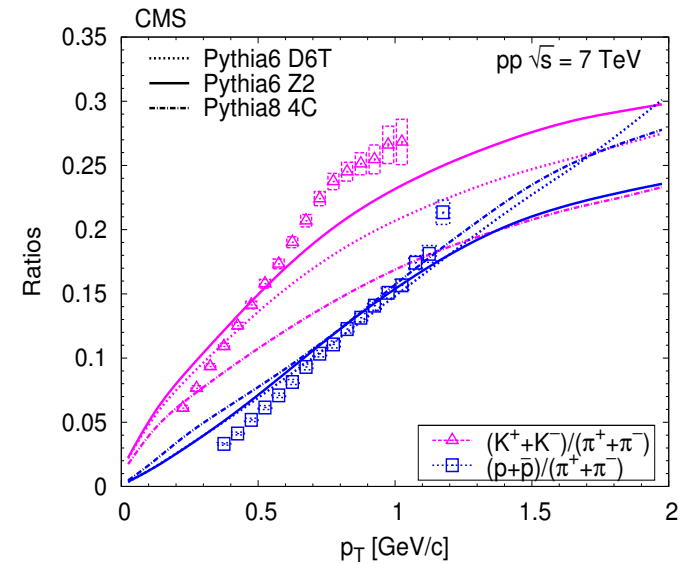
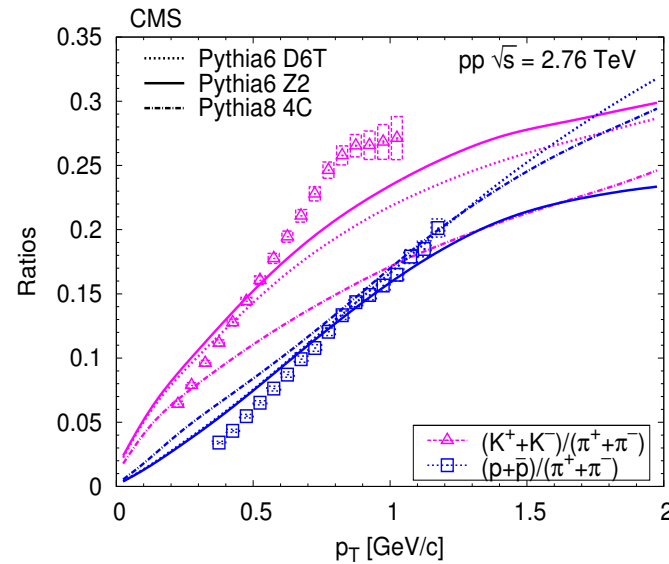
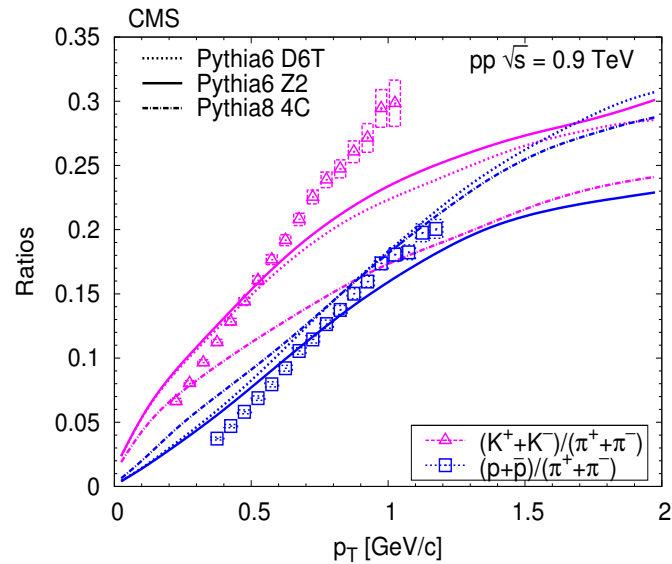
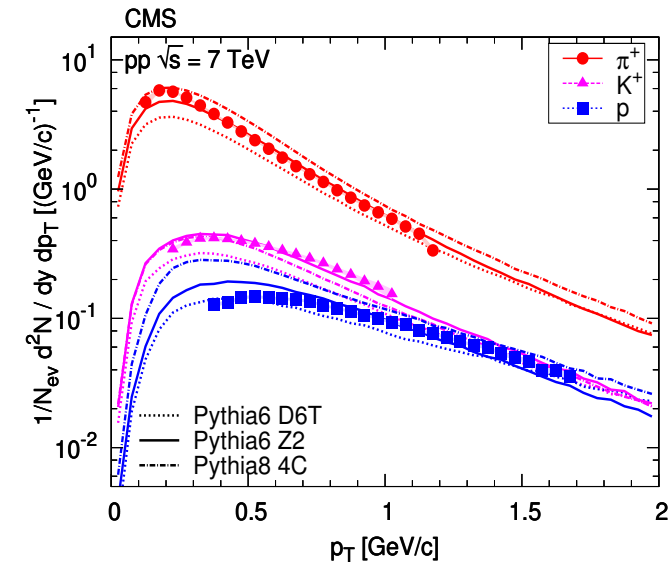
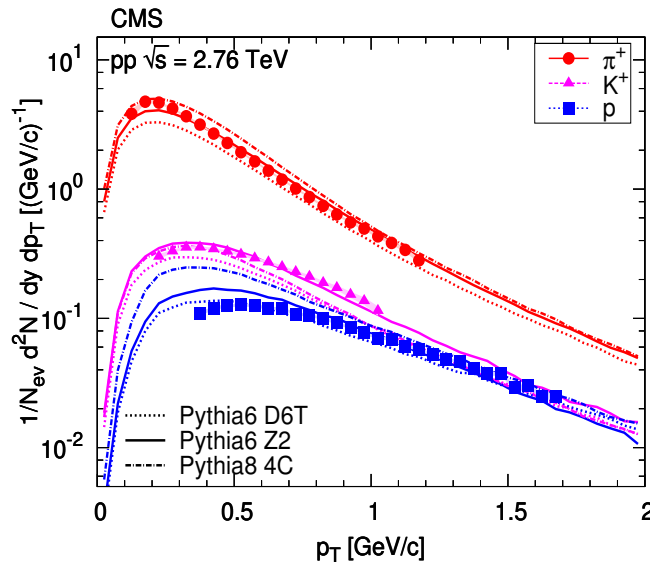
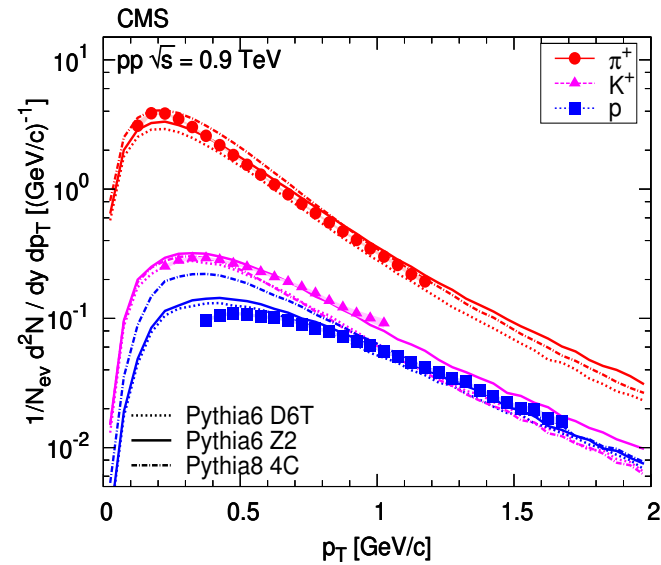
Tsallis-Pareto-eloszlás:

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

Gyökerei a nem-extenzív statisztikában

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

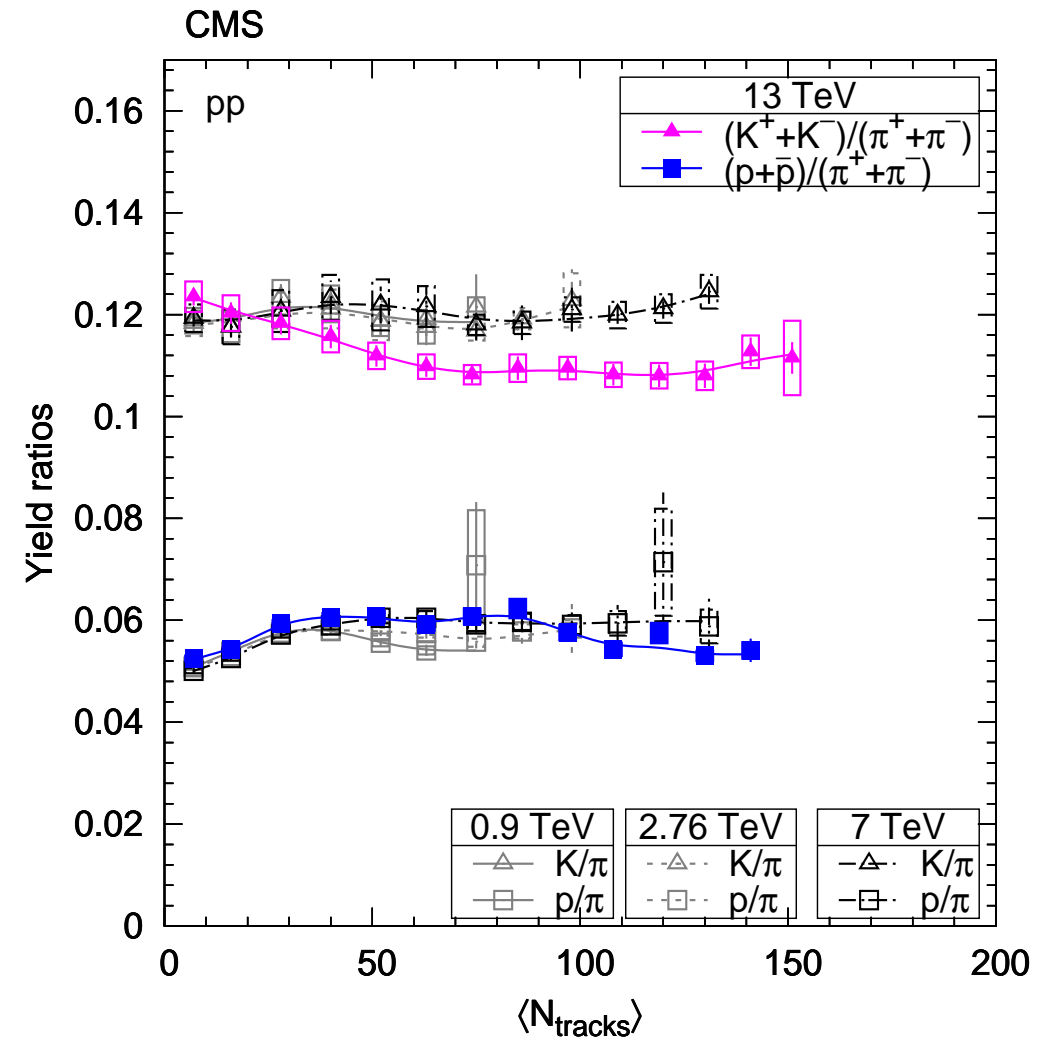
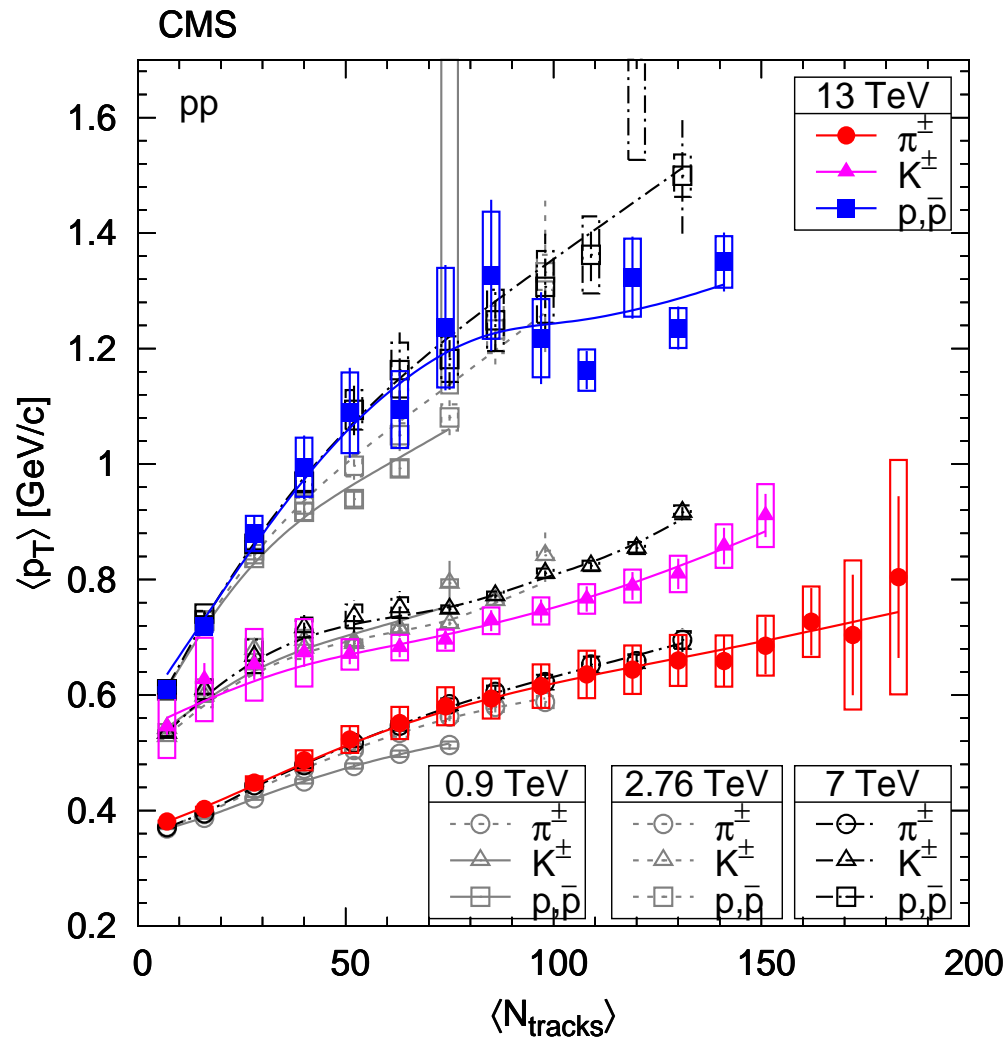
Azonosított hadronok eloszlásai, p-p



CMS Coll, Eur Phys J C **72** (2012) 2164 [F Siklér CMS AN-2010/143]

Elméleti modellek javítása, nagyon sok változó

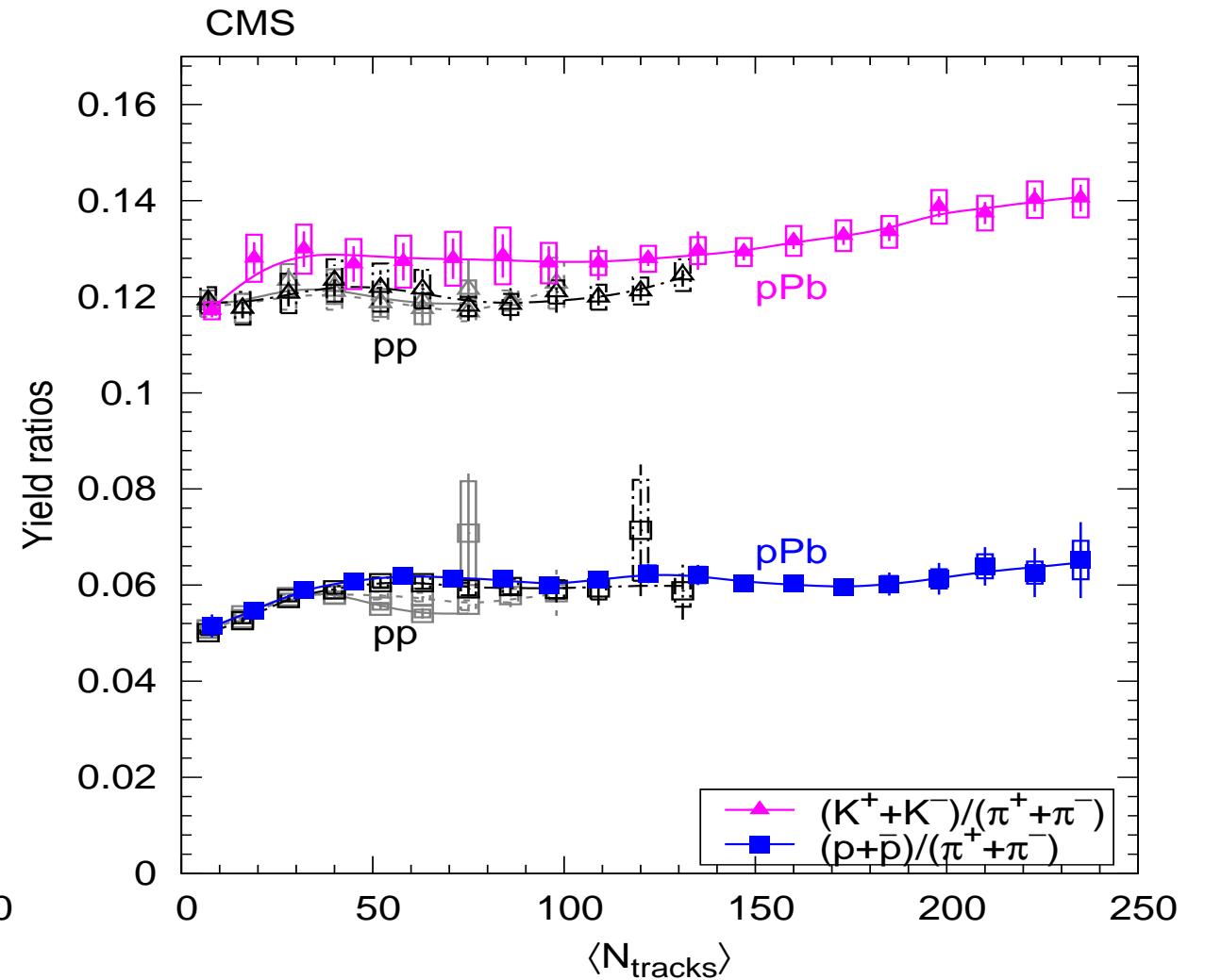
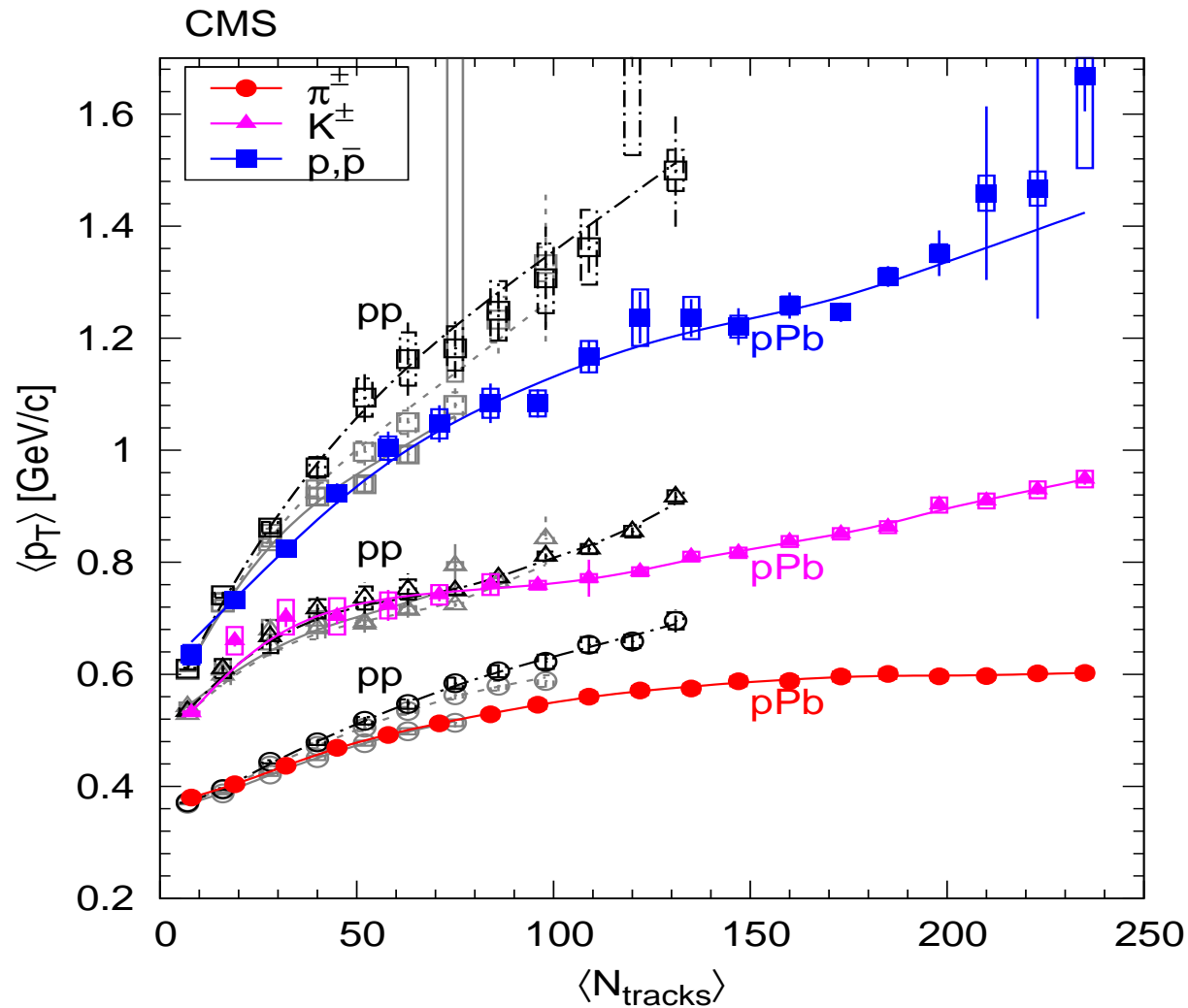
Azonosított hadronok eloszlásai, p-p, 0.9–2.76–7–13 TeV



CMS Coll, Phys Rev D **96** (2017) 112003, [F Siklér, CMS AN-2015/221]

A $\langle p_T \rangle$ és az arányok részecskeszám-függése mind a négy energián nagyon hasonló
 A részecskékeltés tulajdonságait a rendelkezésre álló partonok kezdeti energiája határozza meg

Azonosított hadronok eloszlásai, p-p és p-Pb

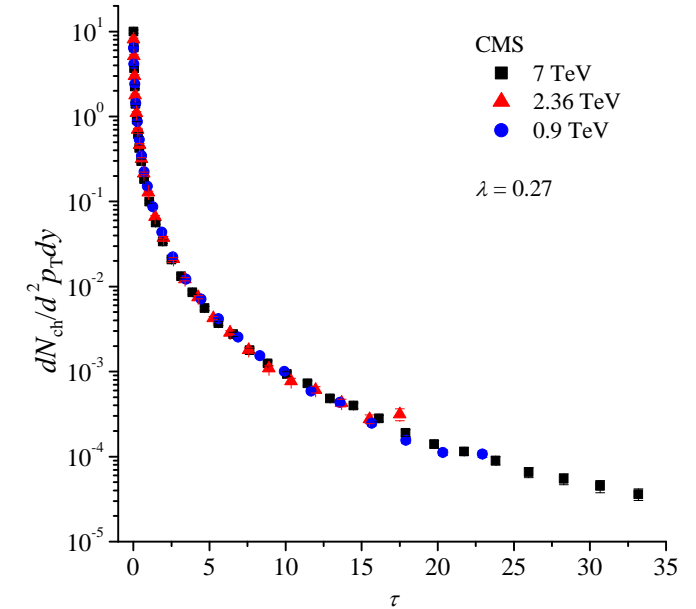
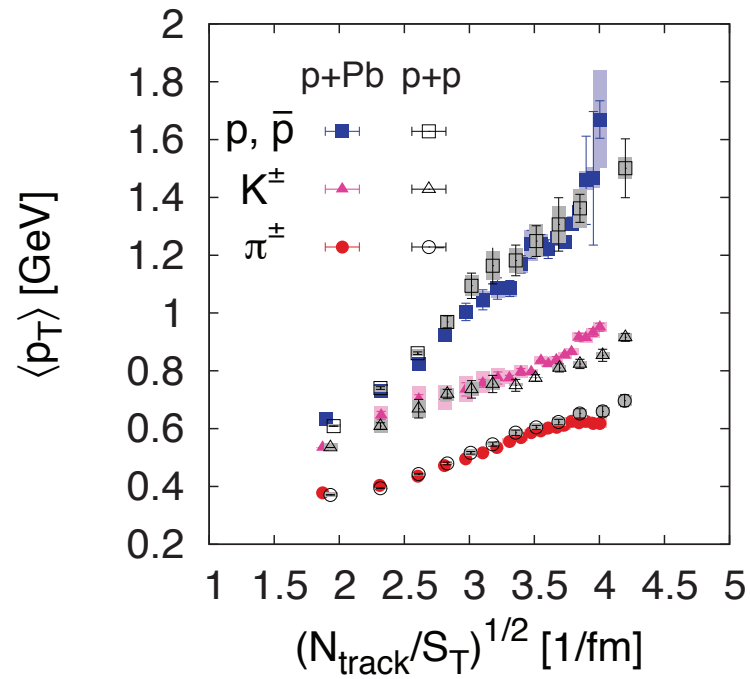
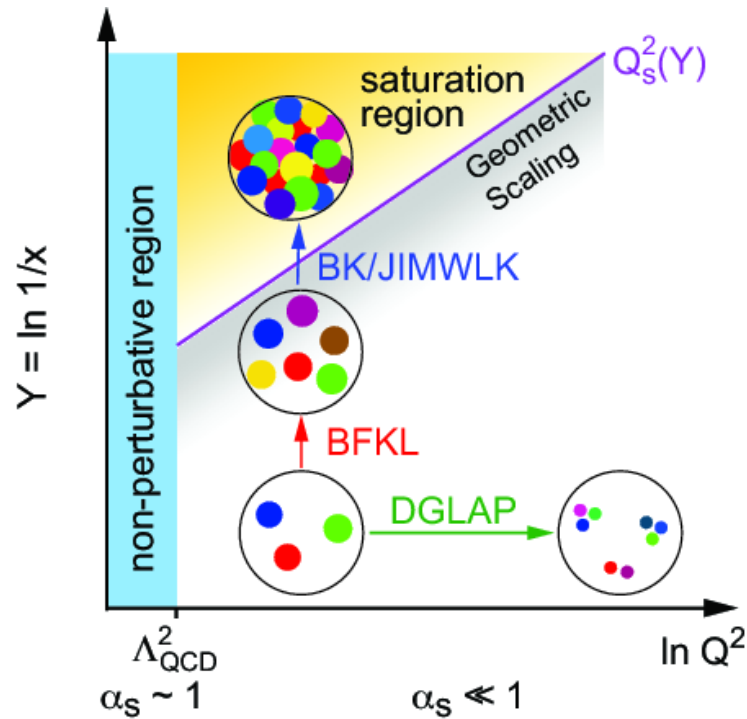


CMS Coll, Eur Phys J C **74** (2014) 2847 [F Siklér, CMS AN-2012/404]

A $\langle p_T \rangle$ és az arányok részecskeszám-függése más rendszerekben is hasonló

A részecskekeltés tulajdonságait a rendelkezésre álló partonok kezdeti energiája határozza meg

Az eredmények értelmezése



- Tsallis-Pareto-eloszlás sikere

- származtatás: a szokásos entrópia általánosítása (nem-additív)
- fraktálszerkezetű, valamint kaotikus jellegű dinamikai rendszerek; kevés idő

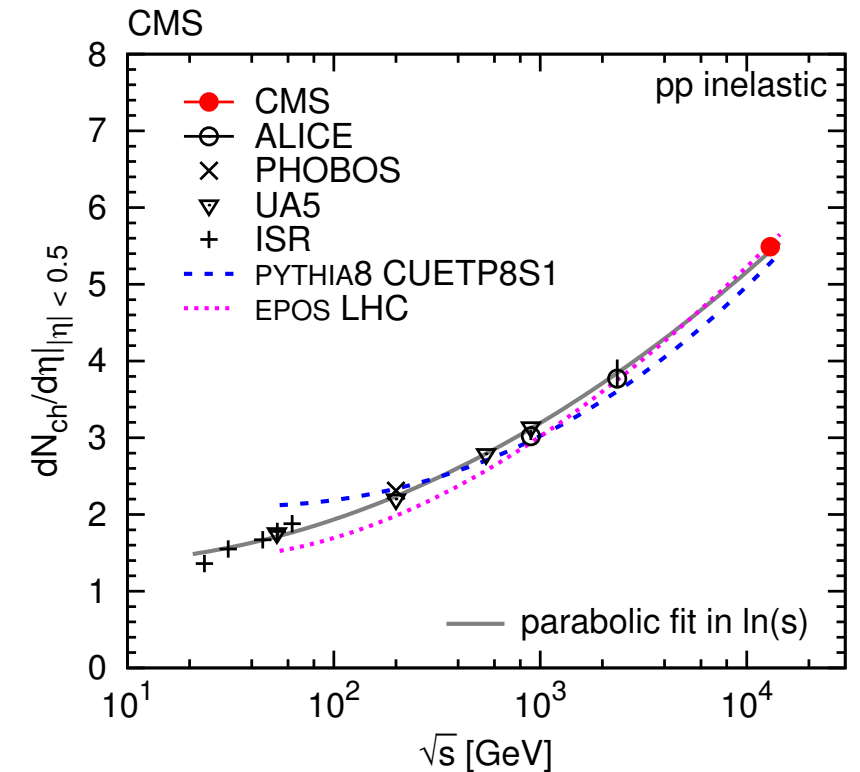
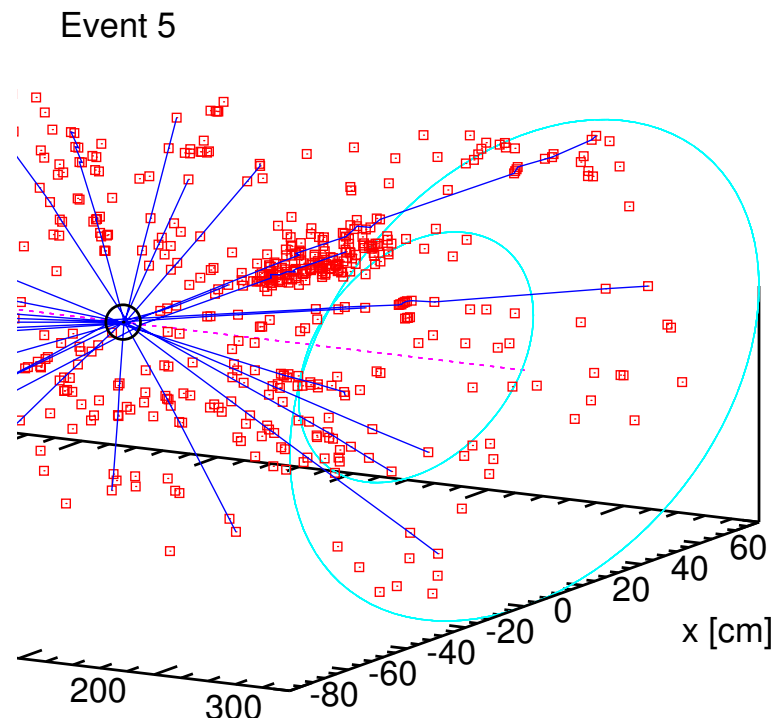
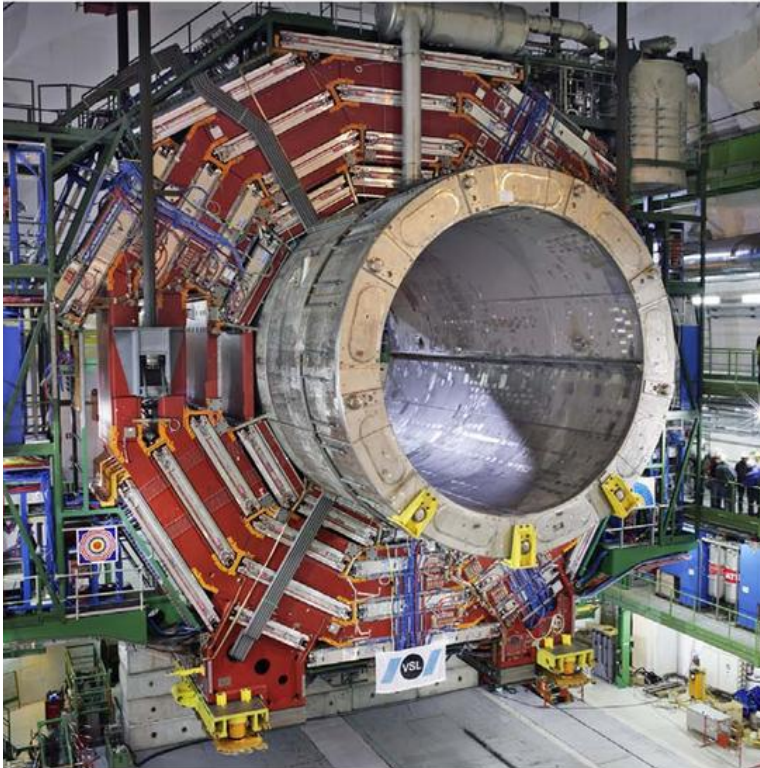
TS Biró, G Purcsel, and K Ürmössy, Eur Phys J A **40** (2009) 325

- Gluon telítés, geometriai skálázás

- a kis impulzusú gluonok viselkedése egyszerű; a gluonok sűrűsége egyre nagyobb lesz
- klasszikus, erős tér; geometriai skálázás a $\tau = m_T^{2+\lambda} / (Q_0^2 \sqrt{s}^\lambda)$ változóban

M Praszalowicz, Phys Rev Lett **106** (2011) 142002, L McLerran et al, Nucl Phys A **916** (2013) 210

Rendkívüli körülmények



CMS Coll, Phys Lett B **751** (2015) 143 [R Bi, YJ Lee, F Siklér, AJ Zsigmond et al, CMS AN-2015/142]

- Indul az LHC 13 TeV-en, de nem működik a mágnes!

- a belső pixel detektort sem kapcsolhatjuk be

- páros csík-beütések; $(x, y, z) \rightarrow (\theta, \phi)$; klaszterezés a képek terében, egyenesek



Az első 13 TeV-es cikk az LHC-n

Azonosított hadronok korrelációi



α CMA

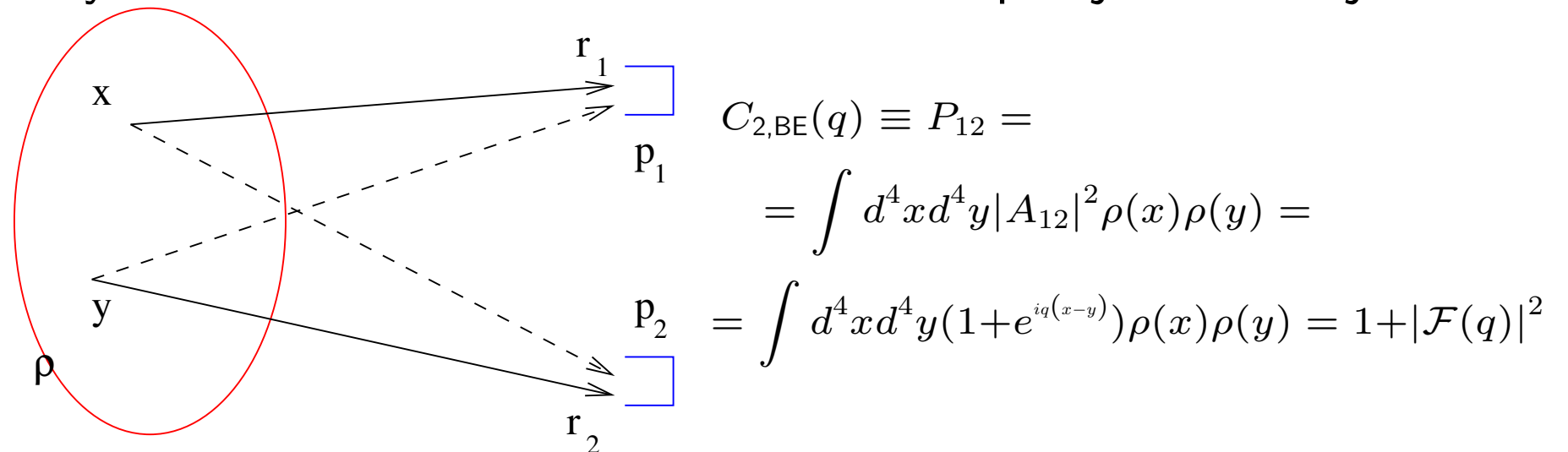
- Csillagok sugara

- foton-párok intenzitáskorrelációján keresztül
- bozonok, közös hullámfüggvényüket szimmetrizáljuk
- Sirius: szögátmérő $0,0063'' \rightarrow 1.7 R_{\odot}$

R Hanbury Brown, RQ Twiss, Nature **178** (1956) 1046

- Részecskefizika: kölcsönhatási zóna mérete, alakja

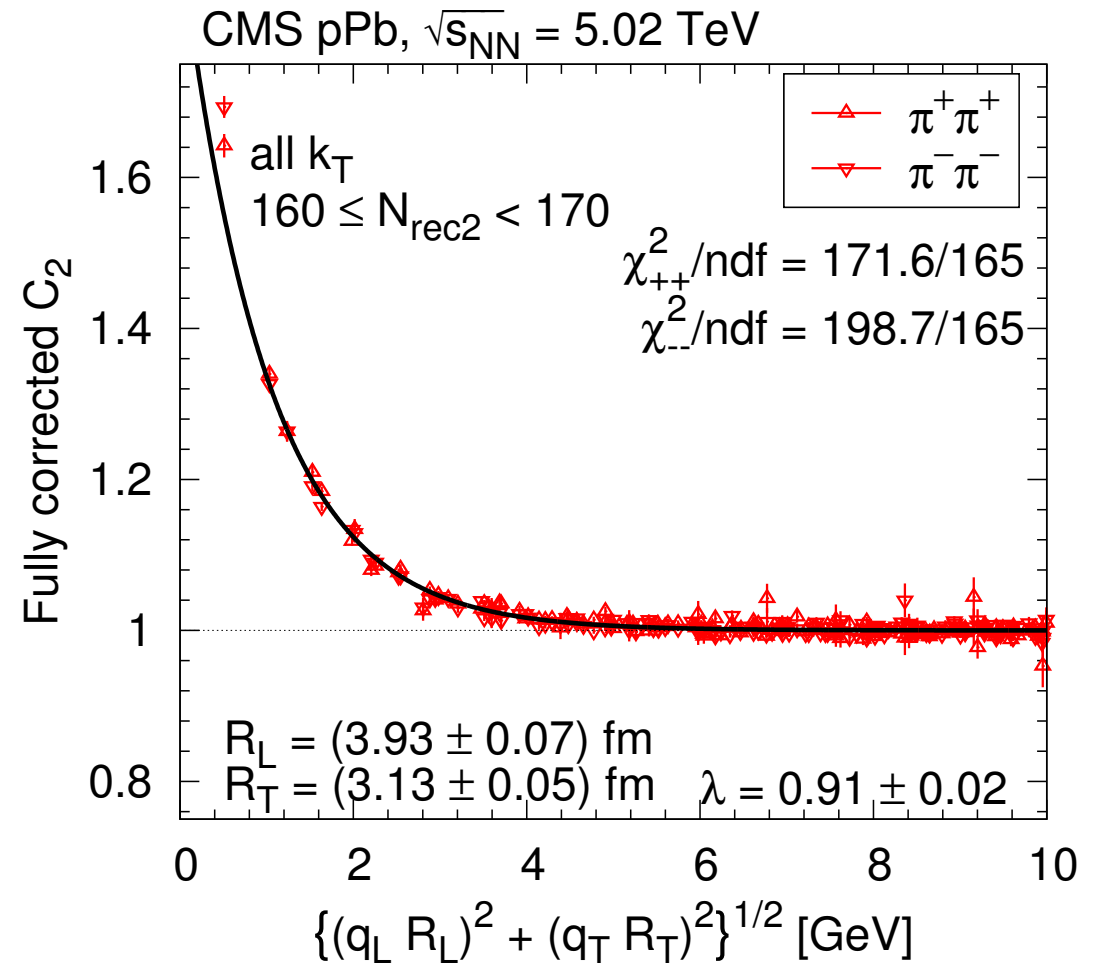
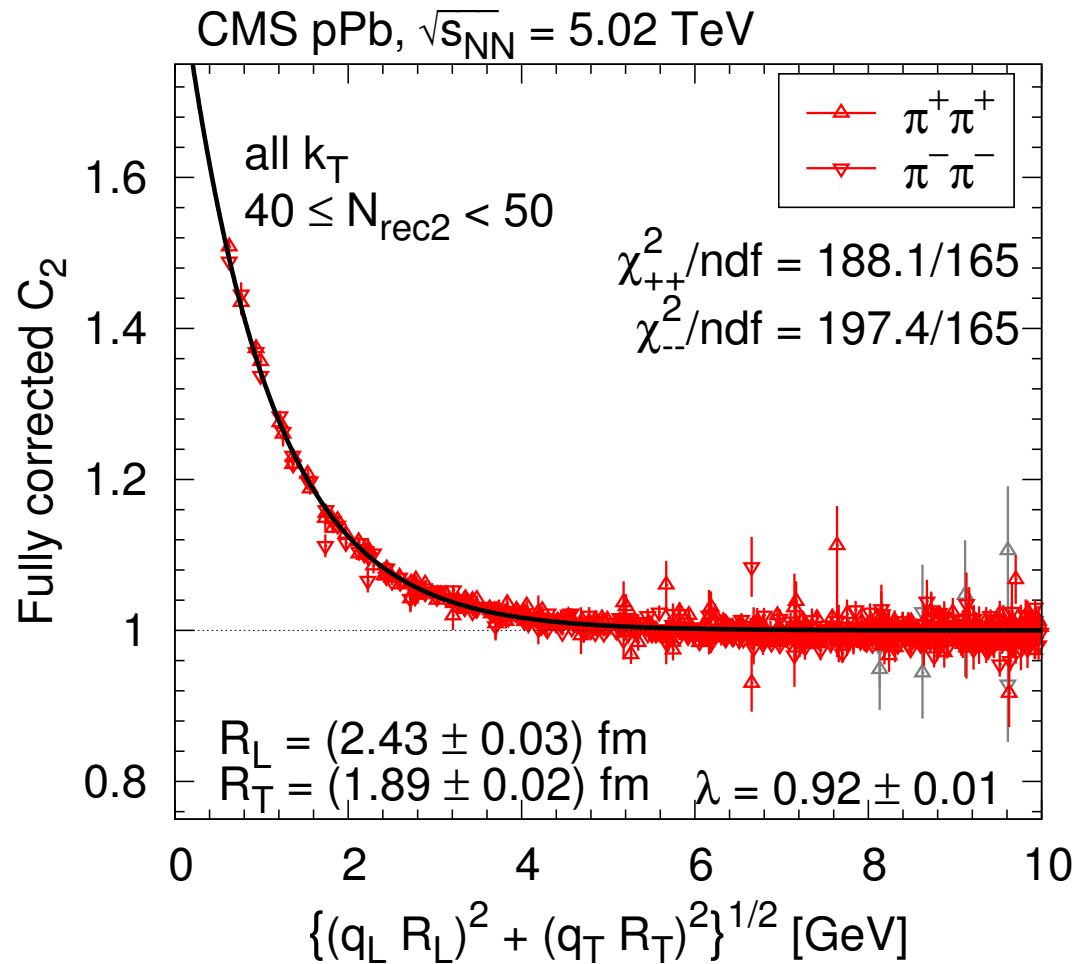
- milyen részecskékkel? vannak azonosított pionjaink, kaonjaink



- korreláció kis relatív q impulzusnál, $C_{2,BE}(q = 0) = 2$

- más effektusok eltüntetése: eseménykeverés

Azonosított hadronok korrelációi



CMS Coll, Phys Rev C **97** (2018) 064912 [F Siklér, CMS AN-2014/042]

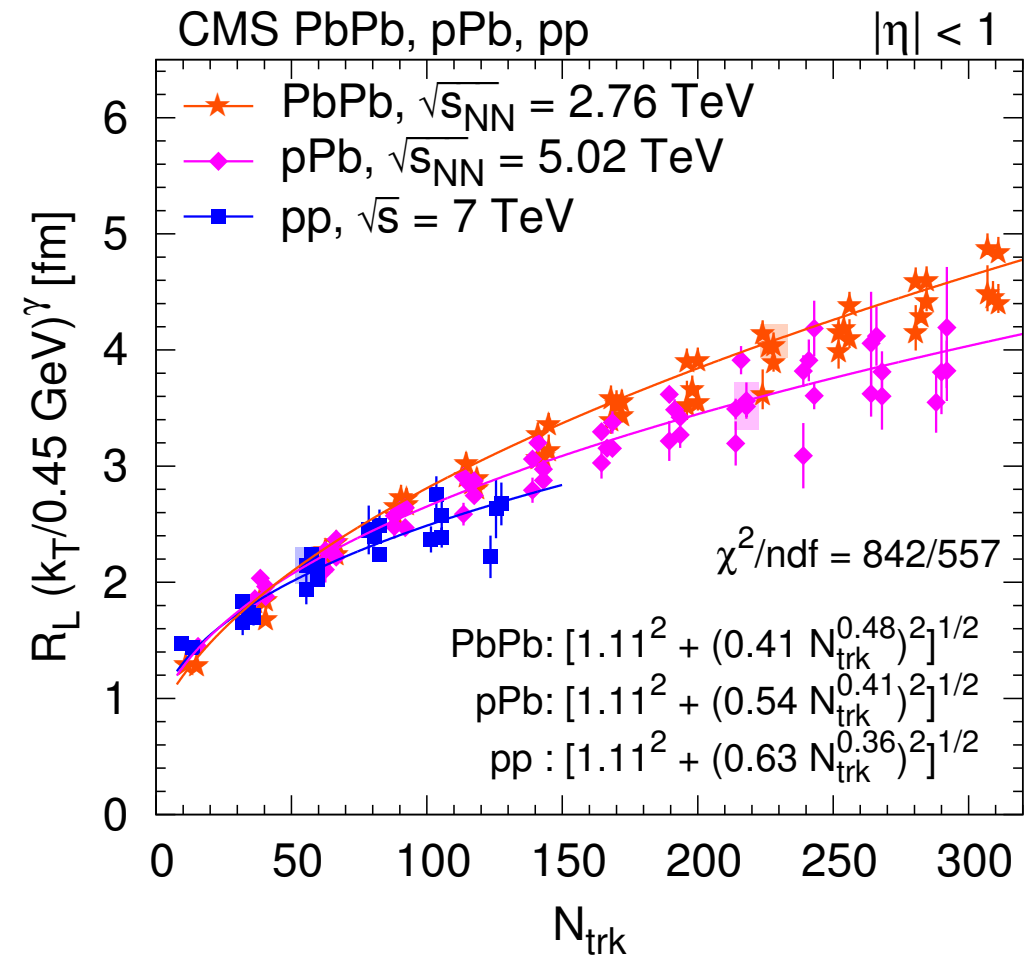
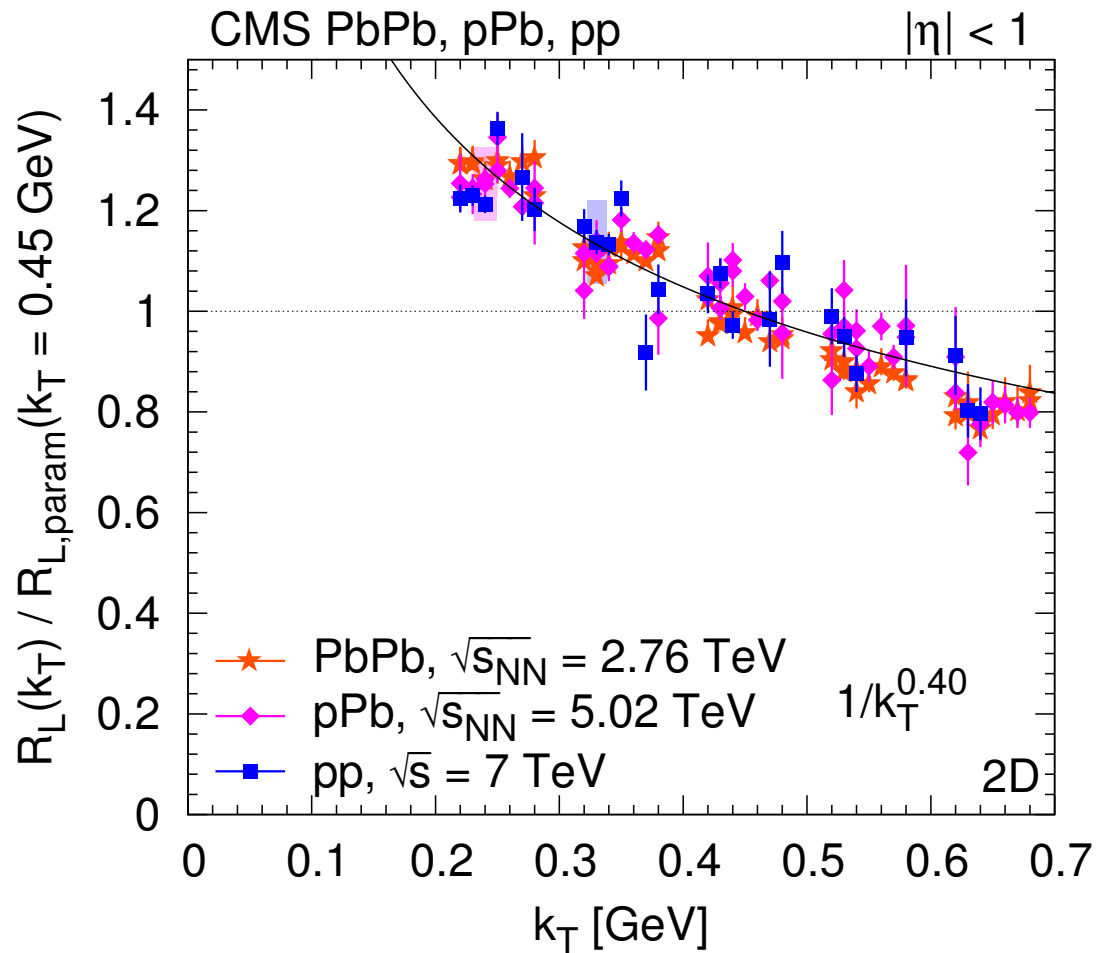
Korrekciók: Coulomb-taszítás, mini-jetek, rezonancia-bomlások 

A relatív hullámfüggvény $\Psi(\mathbf{k}, \mathbf{r}) = \Gamma(1 + i\eta) \exp(-\pi\eta/2) \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) F[-i\eta, 1, i(kr - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})]$

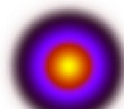
Nyújtott exponenciális: $C_{2, \text{BE}}(q_l, q_o, q_s) = 1 + \lambda \exp \left[-\sqrt{(q_l R_l)^2 + (q_o R_o)^2 + (q_s R_s)^2} \right]$

Csörgő, Hegyi, Zajc, Eur Phys J C **36** (2004) 67

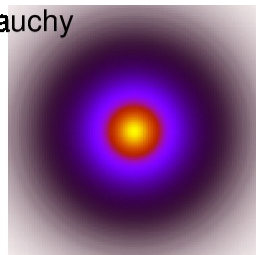
Azonosított hadronok korrelációi



Gaussian



Cauchy



Exponenciális parametrizáció, Cauchy-eloszlású forrás

A zóna mérete a részecskeszámától függ – hadronsűrűség

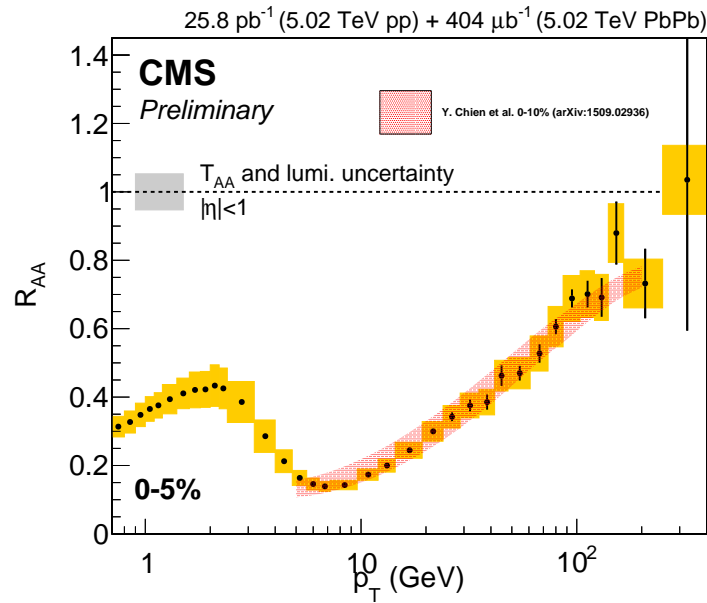
CMS Coll, Phys Rev C **97** (2018) 064912 [F Siklér, CMS AN-2014/042]

Glucion telítés – klasszikus, erős térként viselkedik; skálázás

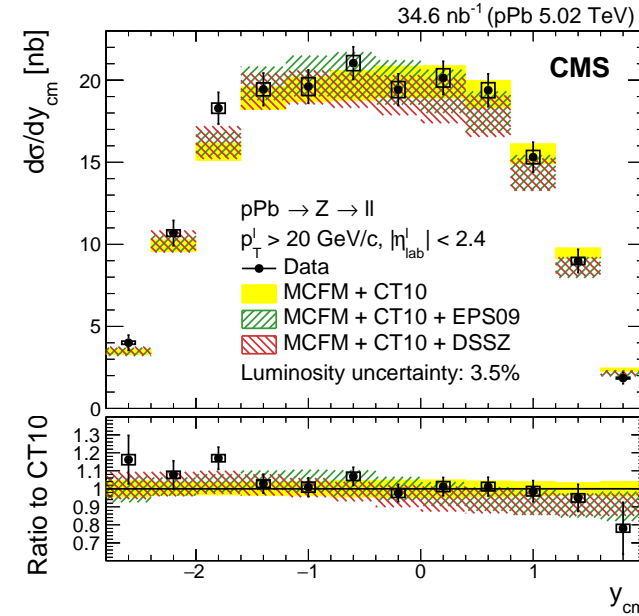
Kapcsolódó kiértékelések – analysis review committee-k

EXO-08-003	member	Search for Heavy Stable Charged Particles with 100 pb^{-1} and 1 fb^{-1} in	
QCD-09-002	chair	Study of Charged Hadron Multiplicity in Minimum Bias p+p Collisions	
FWD-11-003	chair	Study of the underlying event at forward rapidity in pp collisions at \sqrt{s}	J High Energy Phys 04 (2013)
FSQ-12-004	member	Exclusive and semiexclusive $\pi^+\pi^-$ production in proton-proton	sub to Phys Rev D
HIN-12-002	member	Modification of jet shapes in PbPb collisions at $\sqrt{s_{NN}}= 2.76 \text{ TeV}$	Phys Lett B 730 (2014)
HIN-12-003	chair	Evidence of b-jet quenching in PbPb collisions at $\sqrt{s_{NN}}= 2.76 \text{ TeV}$	Phys Rev Lett 113 (2014)
HIN-12-006	chair	Measurement of the pseudorapidity and centrality dependence of $dE/d\eta$	
HIN-12-015	member	Observation of long-range, near-side angular correlations in pPb	Phys Lett B 718 (2013)
FSQ-12-026	member	Measurement of pseudorapidity distributions of charged particles in	Eur Phys J C 74 (2014)
FSQ-14-001	member	CMS-TOTEM feasibility studies for single diffractive Z, W, J/ ψ and	
HIN-14-007	chair	Transverse momentum spectra of inclusive b jets in pPb collisions at	Phys Lett B 754 (2016)
FSQ-15-002	member	Measurement of long-range near-side two-particle angular correlations	Phys Rev Lett 116 (2016)
HIN-15-012	member	Measurements of the charm jet cross section and nuclear modification	Phys Lett B 772 (2017)
HIN-15-015	chair	Charged-particle nuclear modification factors in PbPb and pPb collisions	J High Energy Phys 04 (2017)
HIN-16-005	chair	Comparing transverse momentum balance of b jet pairs in pp and PbPb	J High Energy Phys 03 (2018)
HIN-16-013	chair	Nuclear modification factor of strange hadrons in pPb collisions at	to Phys Lett B
HIN-16-018	member	Measurement of mixed higher order flow harmonics in PbPb collisions	
HIN-17-004	member	Multiparticle correlations and higher order harmonics in pPb collisions	to Phys Rev Lett
HIN-17-005	chair	Mixed higher-order flow harmonics and nonlinear-response coefficients	to Eur Phys J C

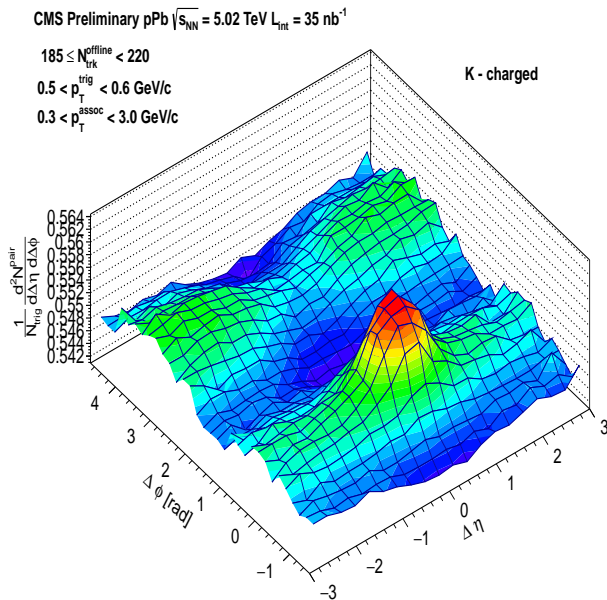
Kapcsolódó kiértékelések – diákok



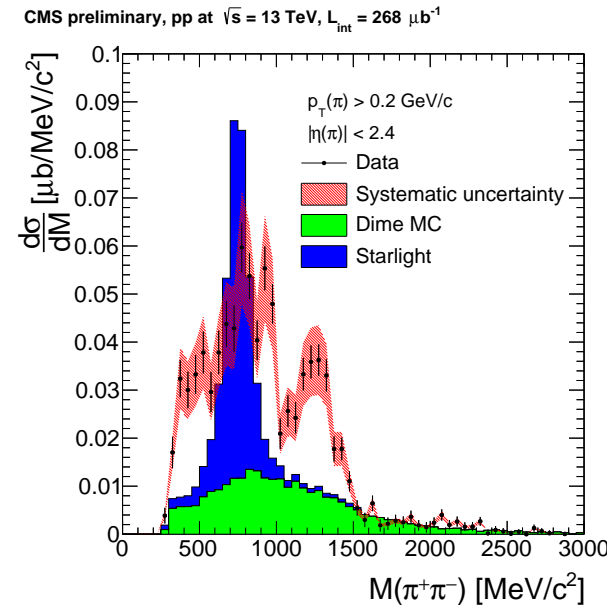
Krajczár Krisztián
PhD hallgató
Achievement Award
Pb-Pb, hadronok
elnyomása
→ MIT, CERN



Zsigmond Anna
PhD hallgató
p-Pb és Pb-Pb
Z-bozonok,
parton-eloszlások
módosulása
→ MPI

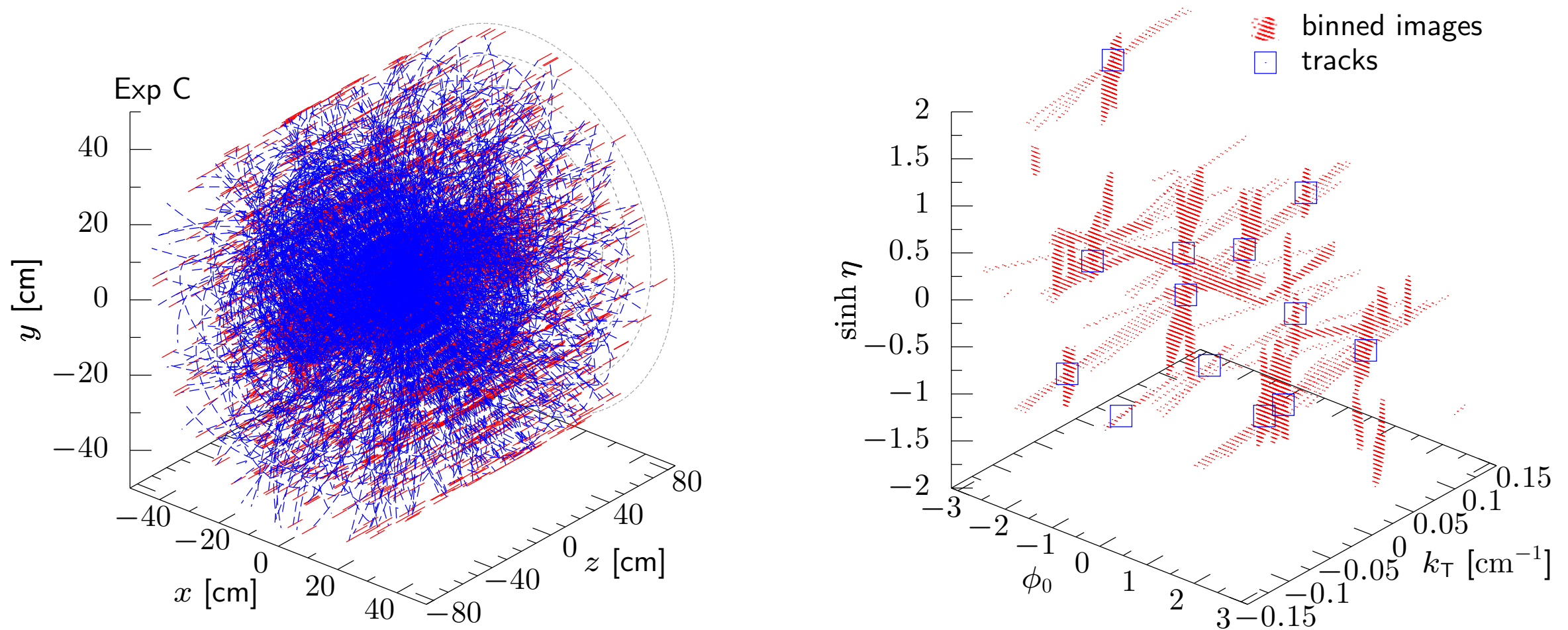


Englert Dávid
MSc hallgató
OTDK 2. díj
p-Pb, azonosított
részecskék
szöghkorrelációi
@ U Southampton



Surányi Olivér
PhD hallgató
OTDK 1. díj
p-p, pomeronos
folyamatok,
előreszórt neutronok
@ Eötvös U

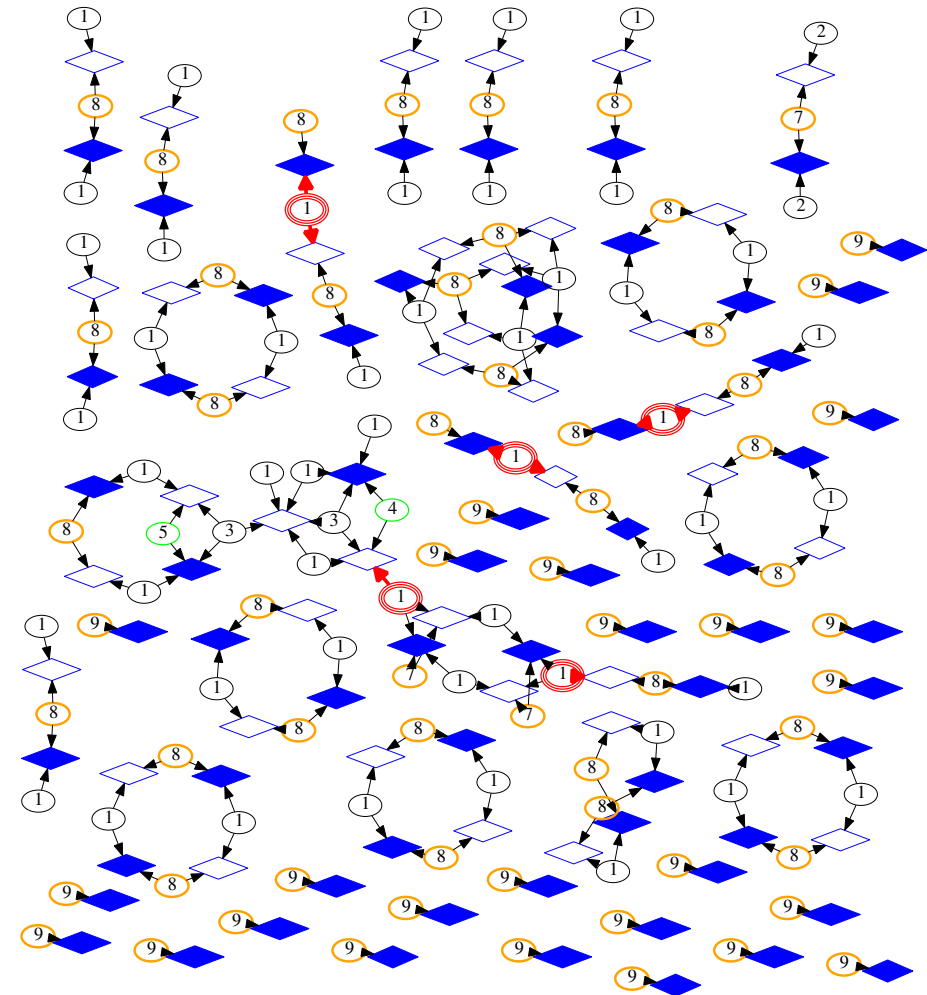
Új utakon: nagy részecskeszámú események feldolgozása



F Siklér, Eur Phys J A **54** (2018) 113

Transzformáció: (x, y, z) beütések \rightarrow \mathbf{p} pályaimpulzus
Keressünk csomópontokat képtérben (Hough-transzformáció)

Új utakon: nagy részecskeszámú események feldolgozása



F Siklér, Eur Phys J A **54** (2018) 113

Beütések és pályák páros gráfja; hogy oldjuk fel a többértelműségeket?

A gráf egyes elemeit (hidélek és elvágó csúcsok) eltávolítjuk → algráfok → döntési fa



Új utakon: konvertált fotonok ($\gamma \rightarrow e^+e^-$)

A kölcsönös közelség alapján beütés-láncokat készítünk
 k -medians klaszterezés; globális kovariancia-mátrix



Új utakon: konvertált fotonok ($\gamma \rightarrow e^+e^-$)

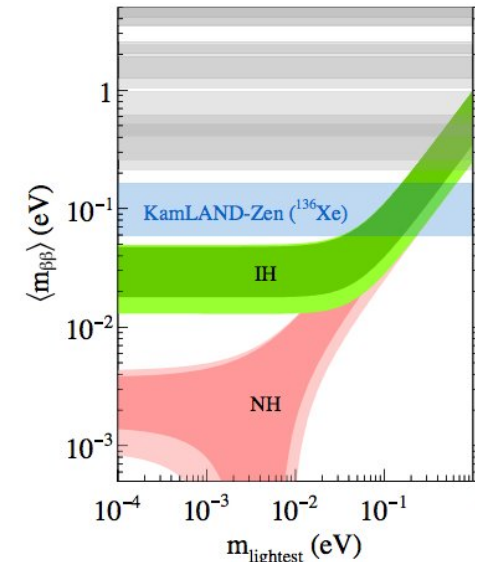
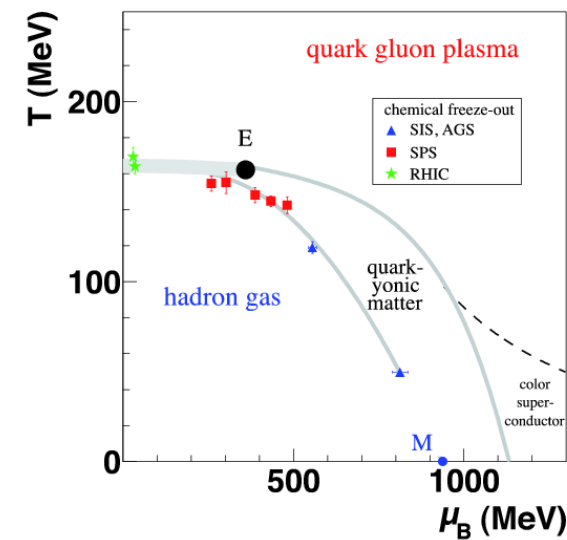
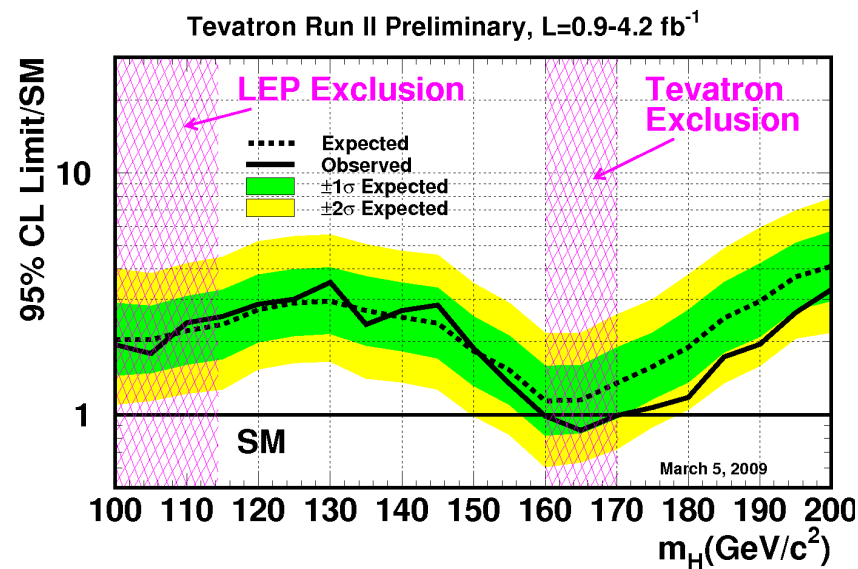
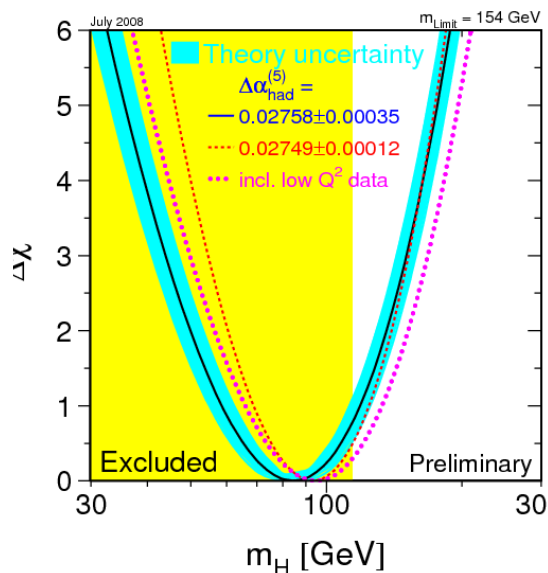
Metropolis-Hastings MCMC: új pályák hozzáadása, szükségtelenek elvétele
Kvantumos korrelációk fotonokkal: nincs töltésük, nem hatnak erősen kölcsön

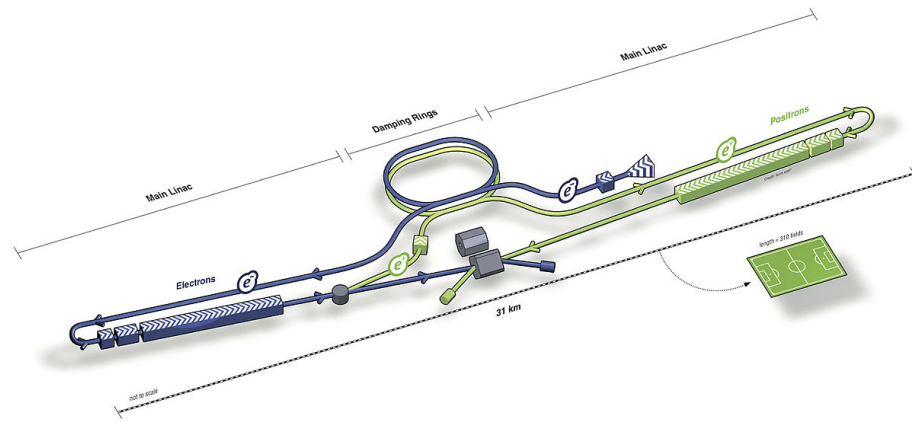
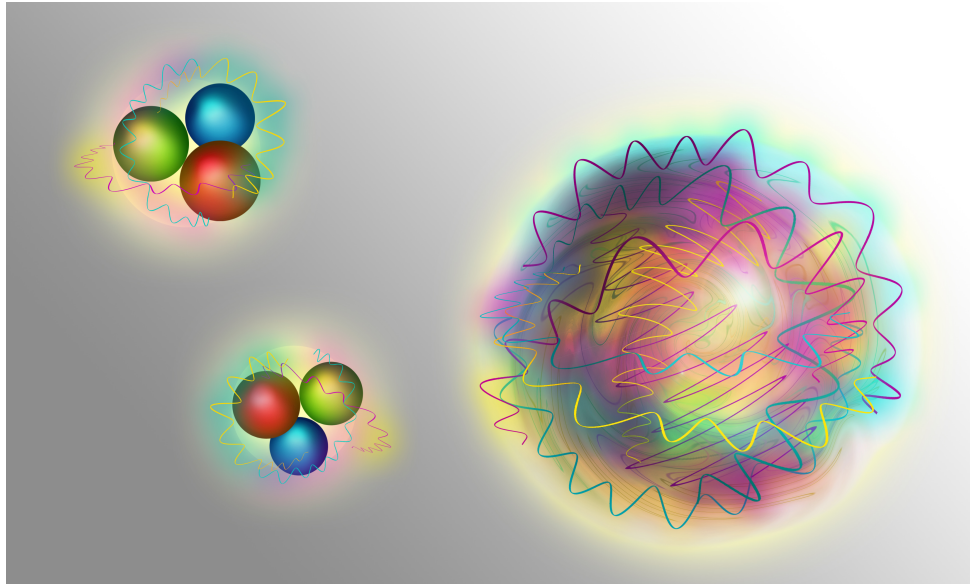


A standard modell sikeres, de . . .

- Nyitott kérdések

- ~~Létezik-e megjósolt skalár mező? Mekkora a mezőhöz tartozó bozon tömege?~~
- Van-e új fizika a TeV-es skálán? Szuperszimmetria? (??)
- ~~Milyen az erős kölcsönhatás kis és nagy energián?~~
- Hogyan valósul meg a kvark-bezárás? Léteznek-e egzotikus állapotok?
- Hogyan illeszthetők be a tömeges neutrínók a modellbe? (!!)
- Hova tűnt az antianyag? Részecskés természetű-e a sötét anyag, a sötét energia?
- Folytatható-e az egyesítés? Jó úton jár-e az elmélet? (?!)





- Új kiértékelési módszerek
 - ⇒ érdekes fizika fotonokkal
 - ⇒ gluonlabdák? monopólusok?
- Elektron-ion ütközések
 - a partonok eloszlása kis impulzushányadnál
 - már az LHC-n (Pb atomokkal)?
 - egy új gyorsítón (EIC)?
- Higgs-gyárok
 - csatolások és ami mögöttük van
 - kompakt gyorsítók (plazmagyorsítás)?
 - irány a Linear Collider?

