

MTA MAGYAR
TUDOMÁNYOS
AKADÉMIA

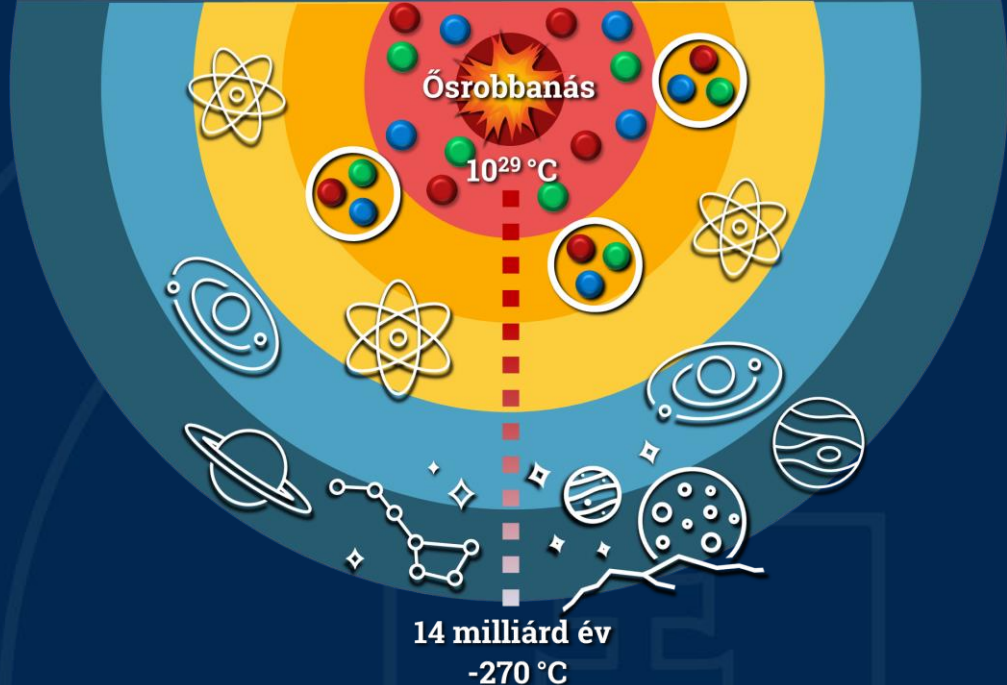


CERN70: Erős kölcsönhatás

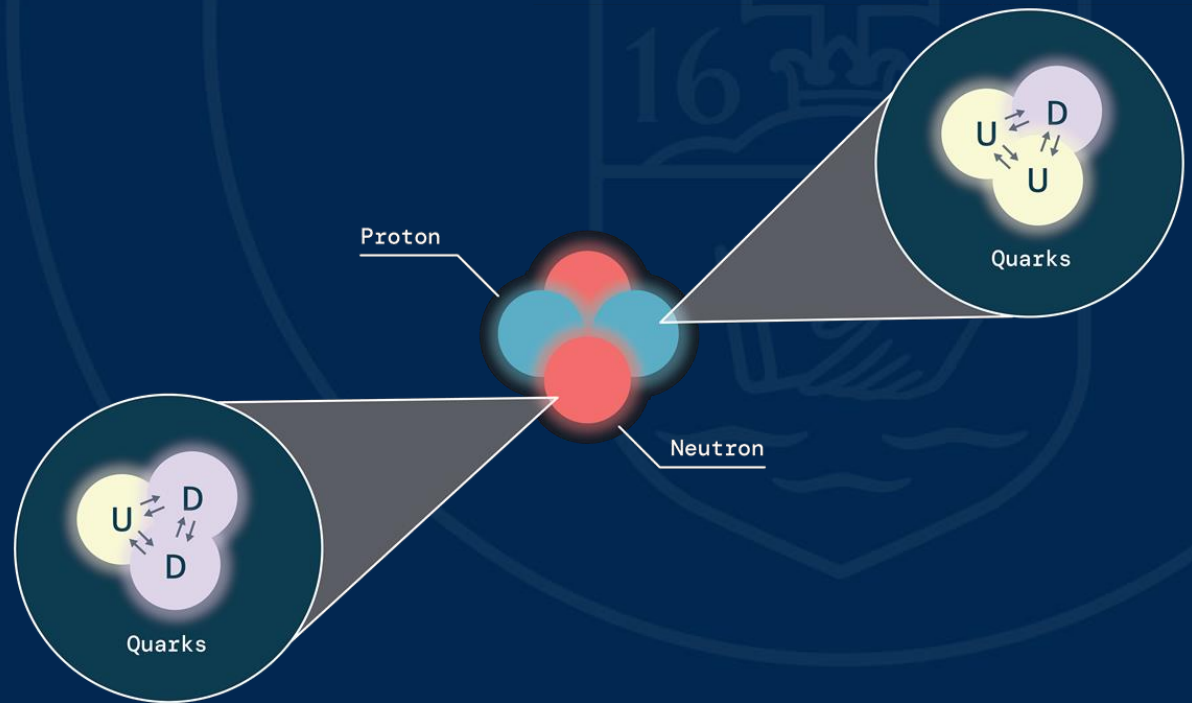
**Kincses Dániel,
Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest**



ELTE
EÖTVÖS LORÁND
UNIVERSITY

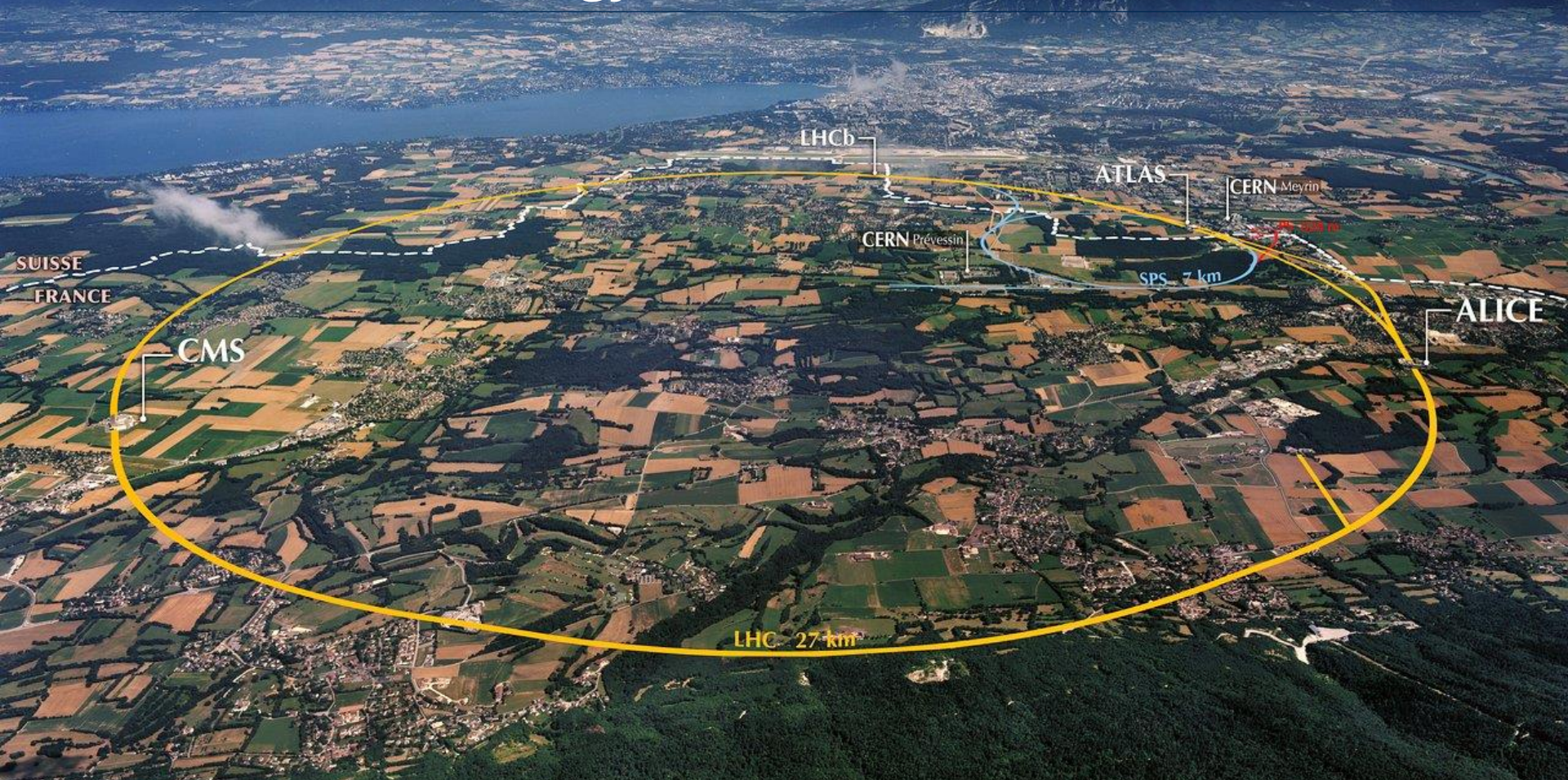


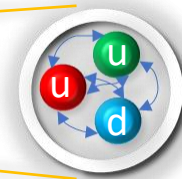
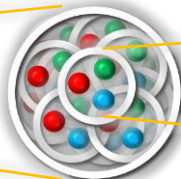
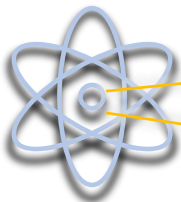
I. Bevezetés, előzmények



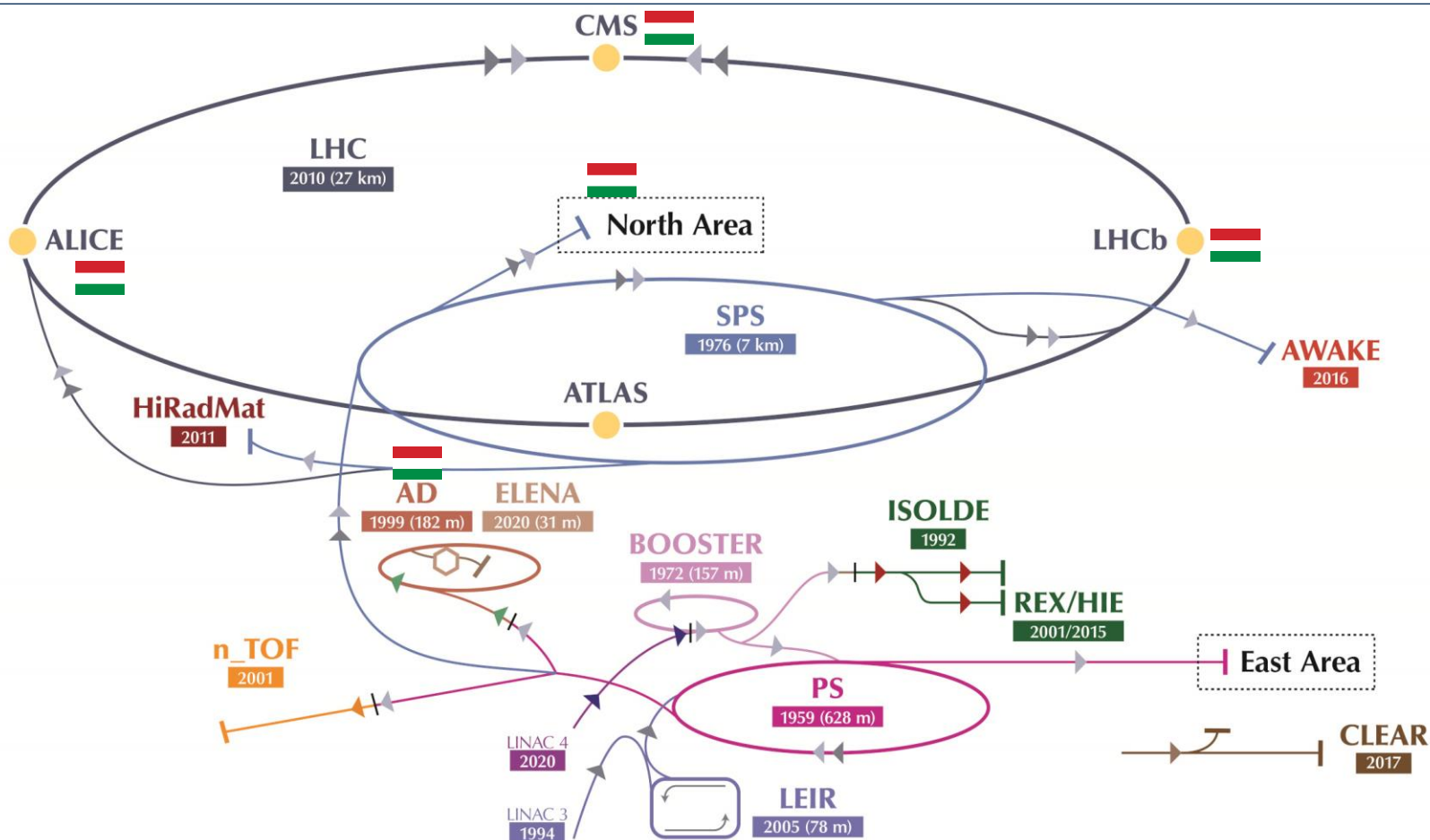


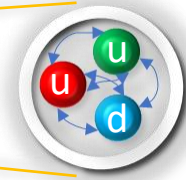
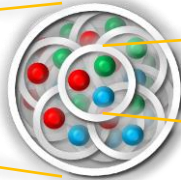
A CERN részecskegyorsítói és detektorai



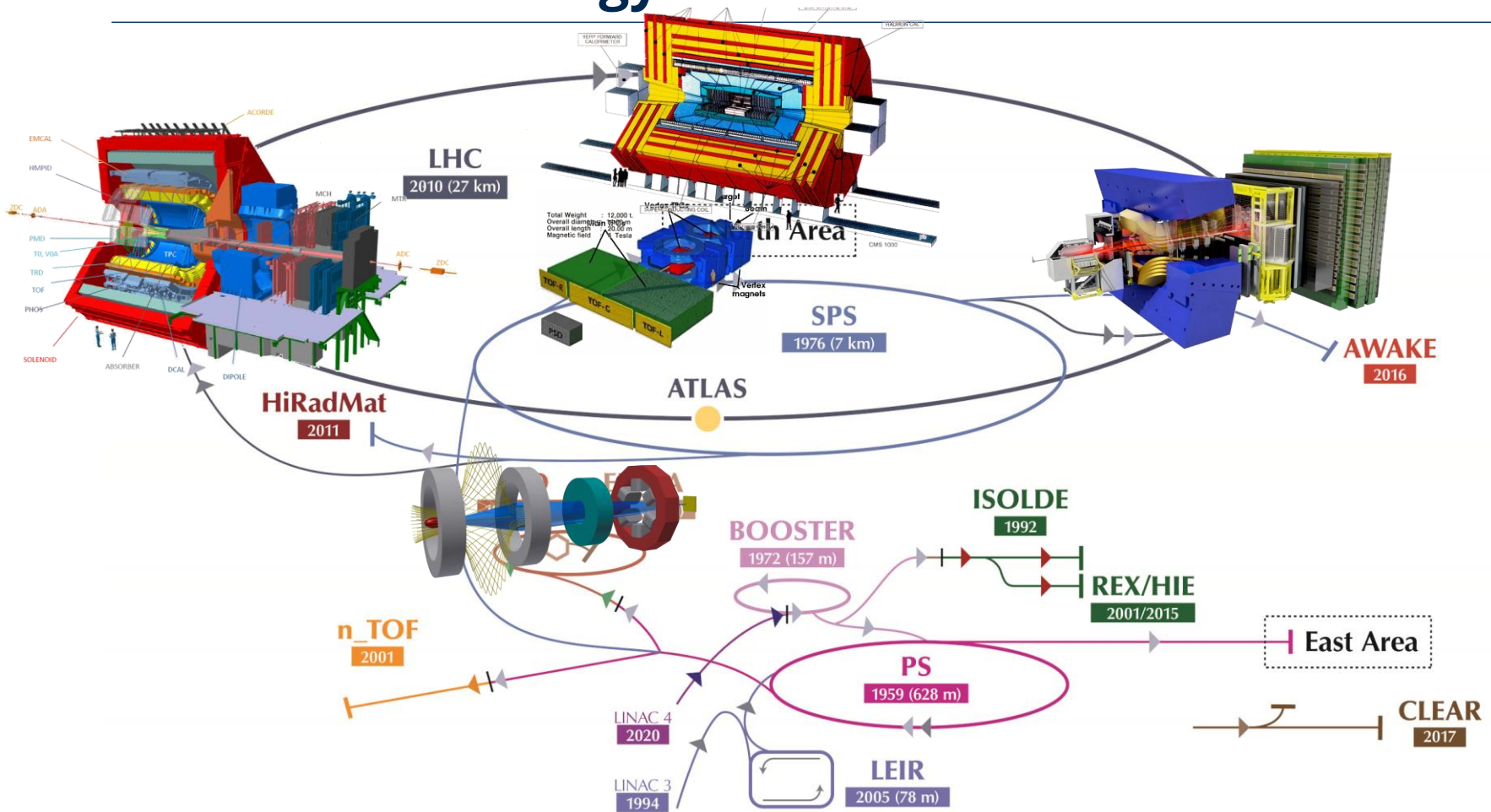


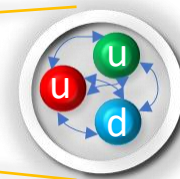
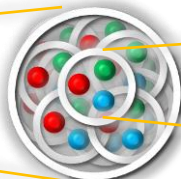
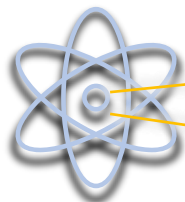
A CERN részecskegyorsítói és detektorai





A CERN részecskegyorsítói és detektorai





Út az erős kölcsönhatás kísérleti vizsgálata felé

• Alapvető kérdés: mik az elemi részecskék?

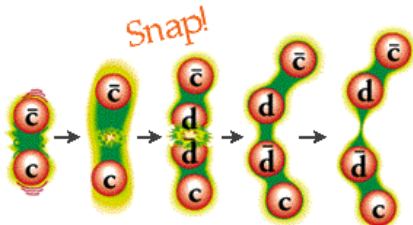
- 19. század eleje: elektron, proton, neutron
- Részecskegyorsítók, detektorfejlesztések, kozmikus sugárzás → rengeteg új részecske!
- Kölcsönhatások, bomlások vizsgálata → szimmetriák, rendszerezések → kvark modell!

• A részecskefizika standard modellje

- Három alapvető kölcsönhatás összefoglalása
- Erős kölcsönhatást leíró elmélet:

kvantum-színdinamika (QCD)

- Normál körülmények: kvarok és gluonok színsemitleges hadronokba zárva



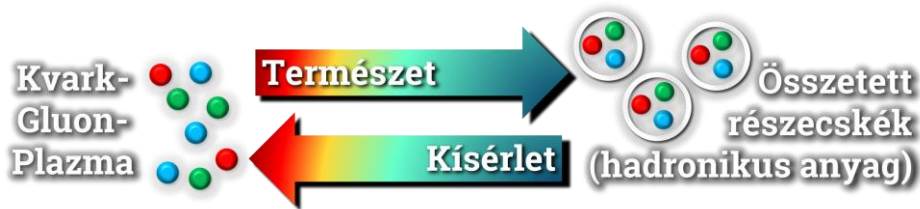
- Nagy energián: aszimptotikus szabadság!

Az anyagi részecskék három családja (fermionok)

	1.	2.	3.		
Kvarkok	2,3 MeV/c ² 2/3 1/2 u-kvark	1,27 GeV/c ² 2/3 1/2 c-kvark	173 GeV/c ² 2/3 1/2 t-kvark	erős nukleáris erő (erős mágneses)	
	4,8 MeV/c ² -1/3 1/2 d-kvark	95 MeV/c ² -1/3 1/2 s-kvark	4,2 GeV/c ² -1/3 1/2 b-kvark		
	0,511 MeV/c ² -1 1/2 elektron	105,7 MeV/c ² -1 1/2 műon	1,777 MeV/c ² -1 1/2 tau		elektromágneses erő (gyenge nukleáris erő (gyenge mágneses))
	<2,2 eV/c ² 0 1/2 elektron-neutrínó	<0,17 MeV/c ² 0 1/2 műon-neutrínó	<15,5 MeV/c ² 0 1/2 tau-neutrínó		
	80,4 GeV/c ² ±1 1 W-bozon	91,2 GeV/c ² 0 1 Z-bozon			
					126 GeV/c ² 0 0 Higgs-bozon
			gluon		
			γ foton		
			Bozonok (kölcsönhatások)		

H. David Politzer. In: *Phys. Rev. Lett.* 30 (1973).

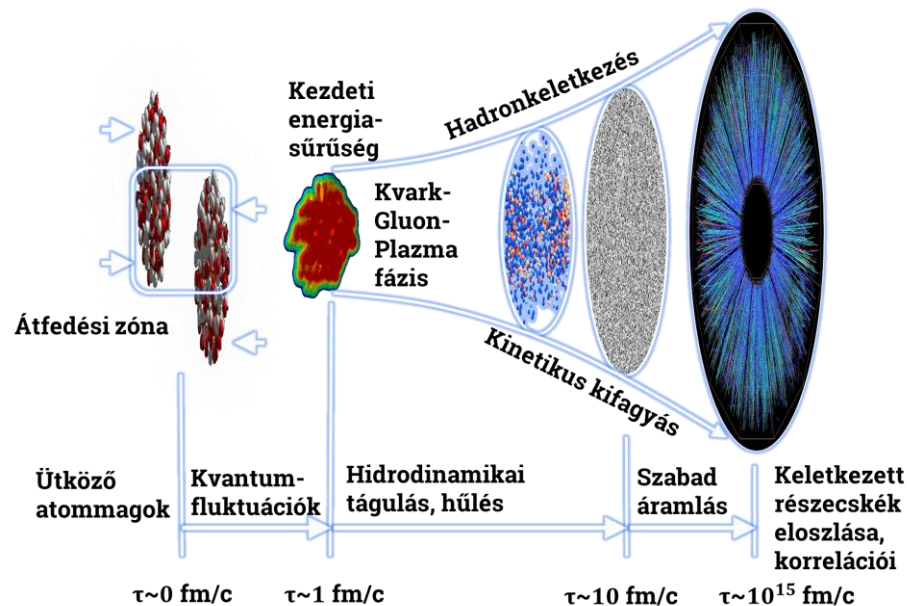
H. Fritsch, M. Gell-Mann, and H. Leutwyler. In: *Phys. Lett. B* 47 (1973), pp. 365–368; David J. Gross and Frank Wilczek. In: *Phys. Rev. Lett.* 30 (1973).



Nehézion-fizika és a Kvark Gluon Plazma vizsgálata

- **QCD jóslat: átmenet lehet a hadronikus anyagból egy kvark-gluon dominált fázisba**
 - 1980-as évek: átmenet tanulmányozható nagyenergiás atommag ütközésekben (?)
- **Nehézion-fizikai programok:**
 - Lawrence Berkeley National Laboratory
 - Bevatron
 - Brookhaven National Laboratory
 - AGS, RHIC
 - CERN
 - SPS, LHC
- **Kvark Gluon Plazma (QGP) felfedezése 2000-es évek elején**

Nehézion-ütközés időfejlődése



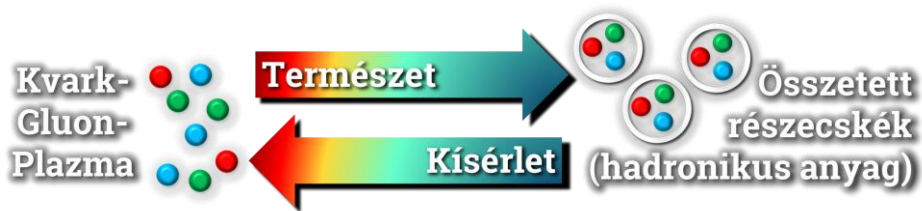
<https://arxiv.org/abs/nucl-th/0002042>

PHENIX Coll. In: Nucl.Phys. A757 (2005), pp. 184–283.

STAR Coll. In: Nucl. Phys. A757 (2005), pp. 102–183.

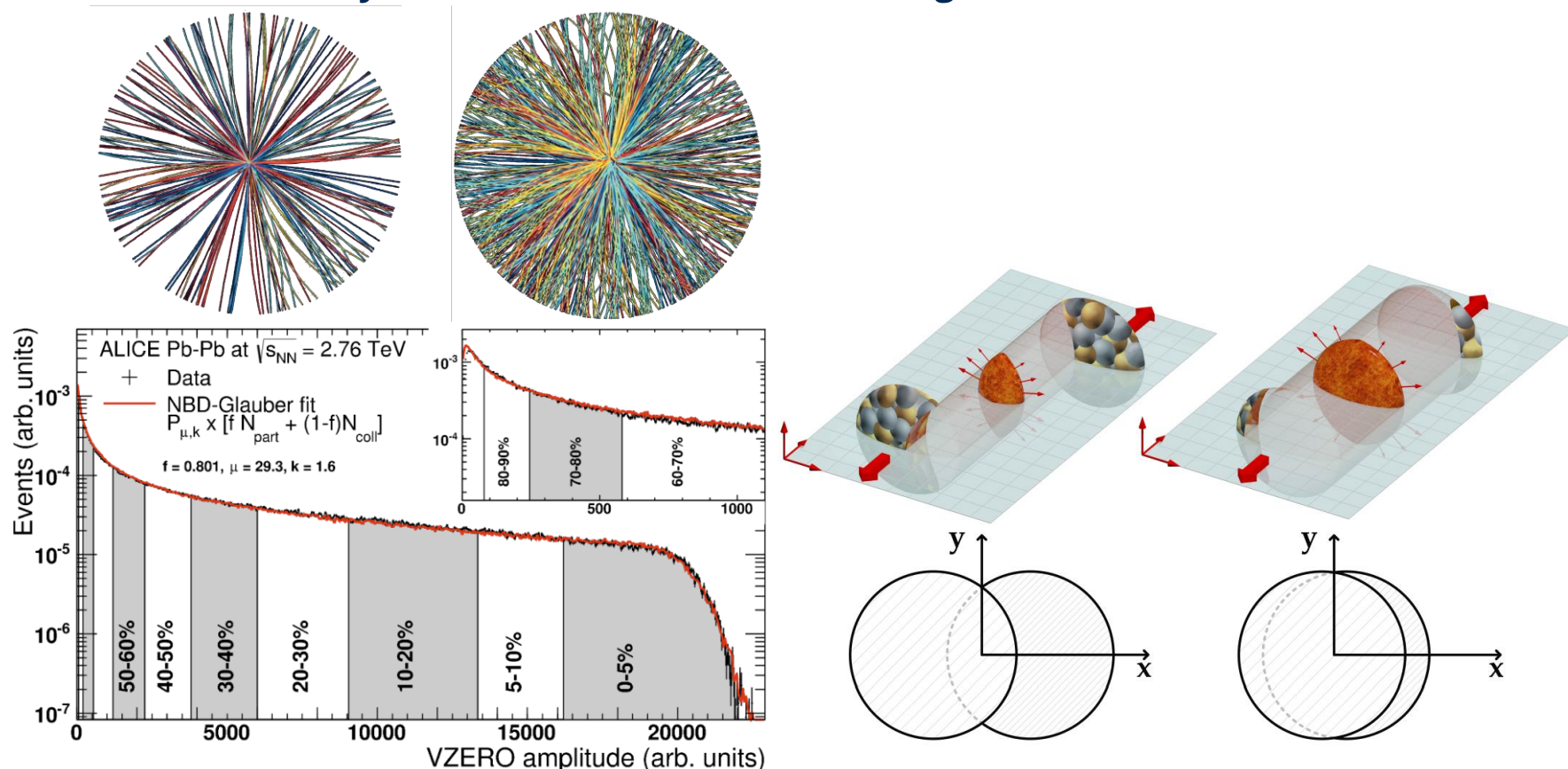
ALICE Coll. In: Phys. Rev. Lett. 105 (2010), p. 252301.

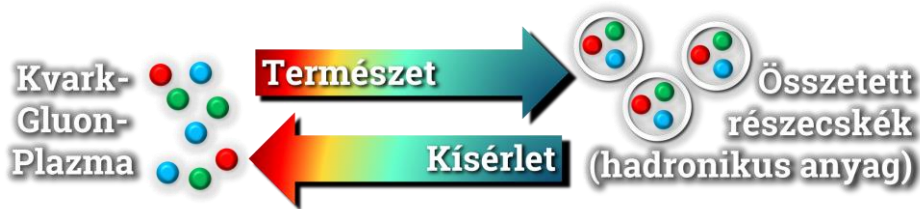
Peter Braun-Munzinger, Volker Koch, Thomas Schäfer, and Johanna Stachel. In: Phys. Rept. 621 (2016), pp. 76–126.



Nehézion-ütközések egy fontos jellemzője: centralitás

- Centralitás: mennyire fedtek át az ütköző atommagok





Nagyenergiás ütközések kinematikai változói

- Részecske négyesimpulzusa: $p = (E, p_x, p_y, p_z)$
- Nyalábirány: z ; transzverz sík: (x, y) koordináták, merőleges z -re

- Transzverz impuzus: $p_T = \sqrt{(p_x^2 + p_y^2)}$; transzverz tömeg: $m_T = \sqrt{(m^2 + p_T^2)}$

- Gömbi koordináták:

$$p_x = p_T \cos \phi, p_y = p_T \sin \phi$$

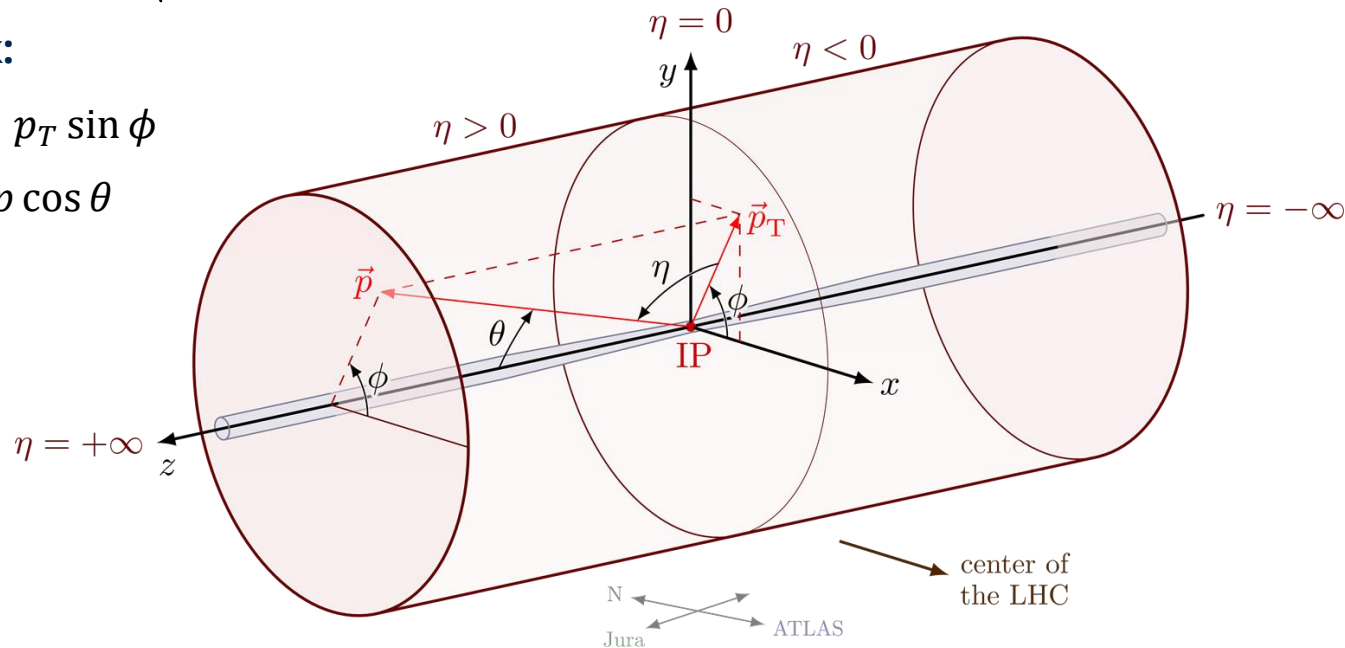
$$p_T = p \sin \theta, p_z = p \cos \theta$$

- Rapidityás:

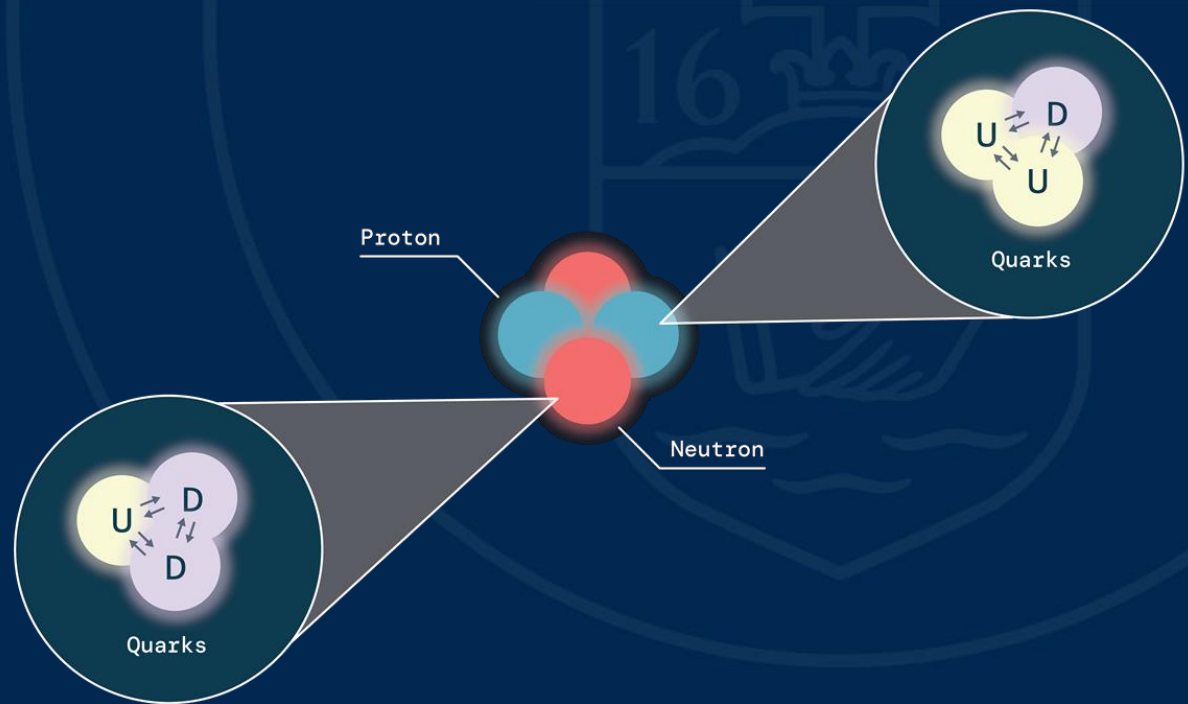
$$y = 0.5 \ln \frac{E+p_z}{E-p_z}$$

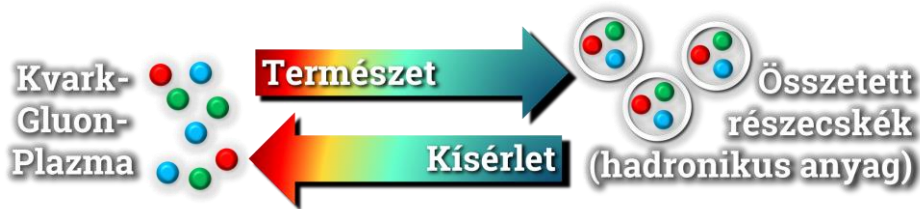
- Pszeudorapidityás:

$$\eta = 0.5 \ln \frac{|p|+p_z}{|p|-p_z}$$



II. Válogatott nehézion-fizikai felfedezések a CERN kísérleteinél

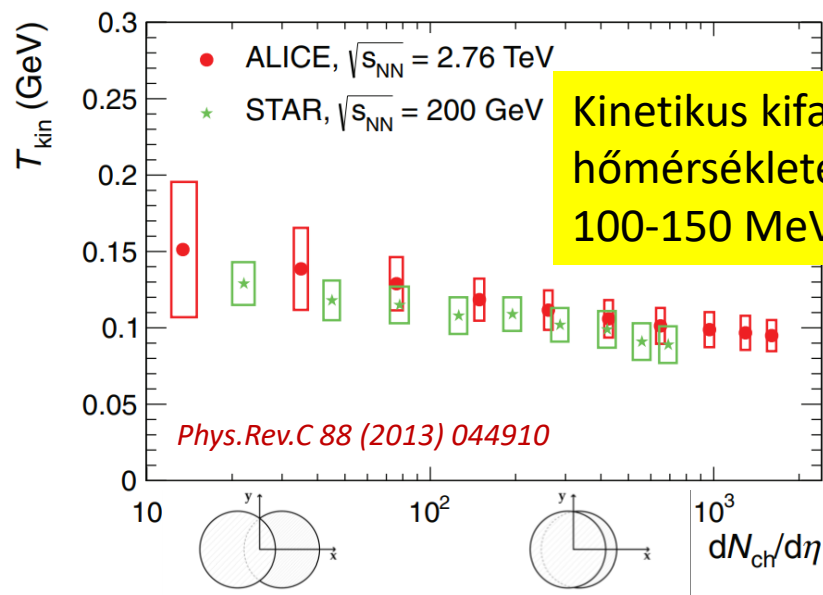
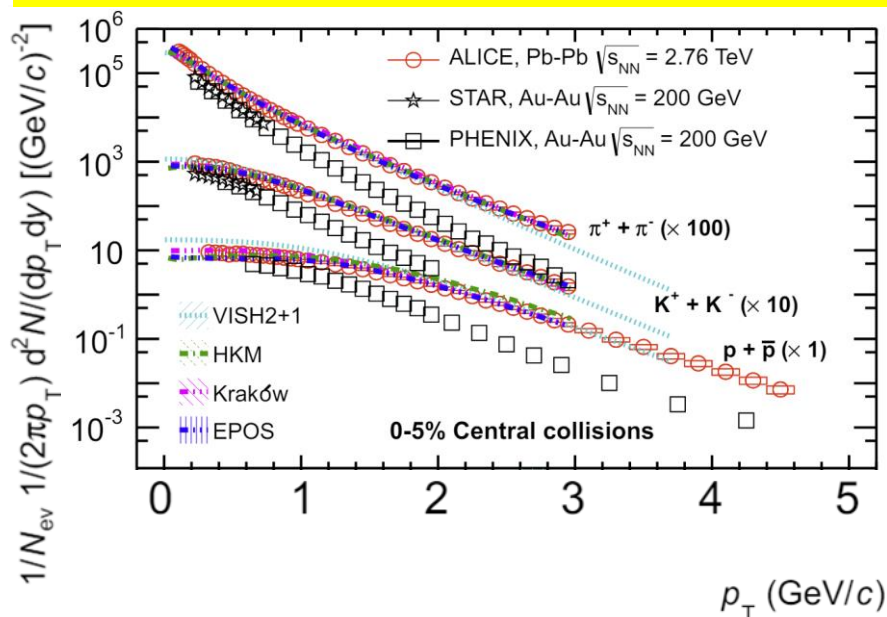


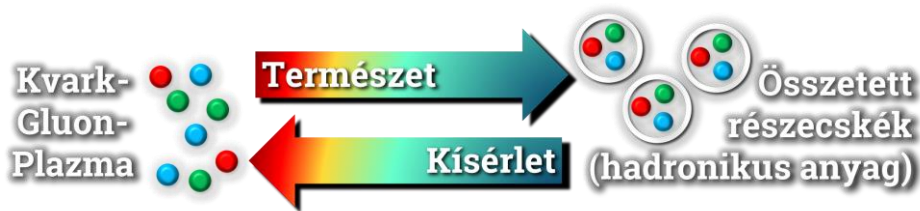


Hadronspektrumok – hidrodinamika, kinetikus kifagyás

- Alacsony p_T : hadronspektrumok Boltzmann-szerűek $\exp(-E/k_B T) \rightarrow$ lokális termodinamikai egyensúly?
- Egyszerű hidrodinamikai számítások táguló rendszerre: $T = T_{kin} + u^2 m$,
 T : effektív hőm.; T_{kin} : **kinetikus kifagyási hőm.**; m : részecsketömeg; u : tágulási sebesség

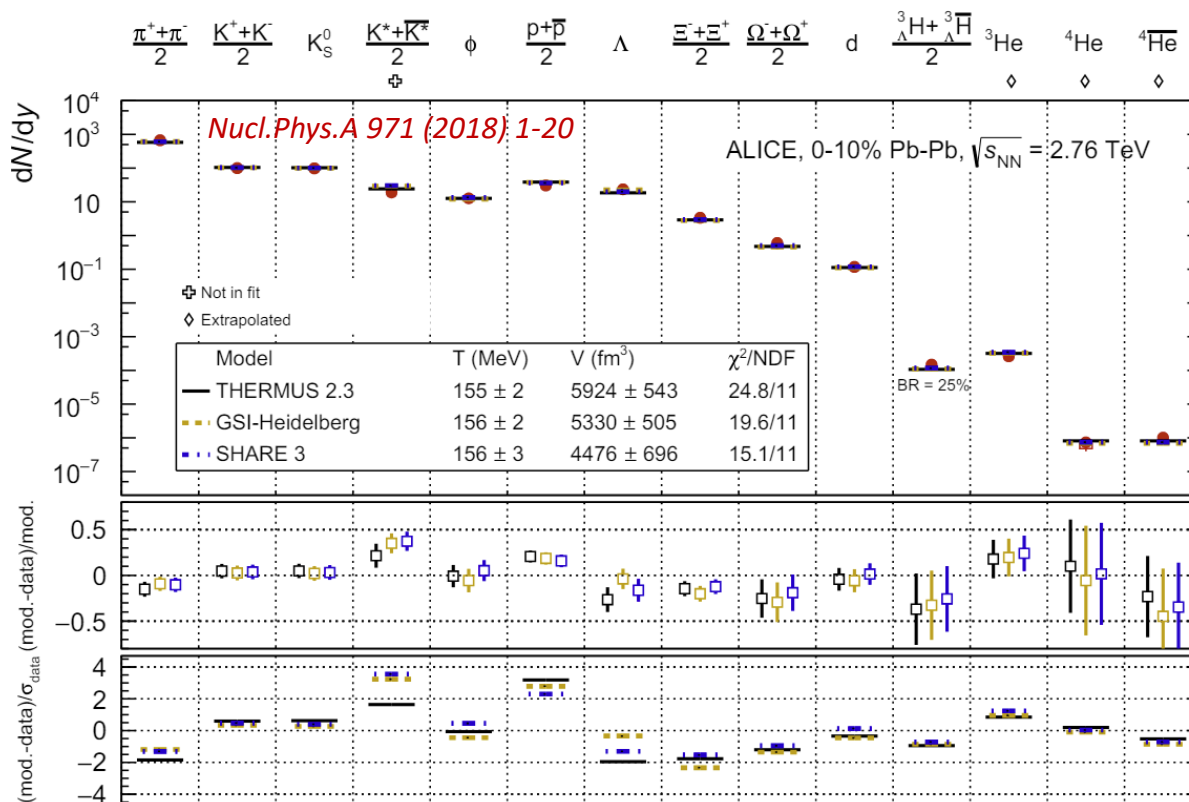
Hidrodinamika+hadronszórás: jó leírás!



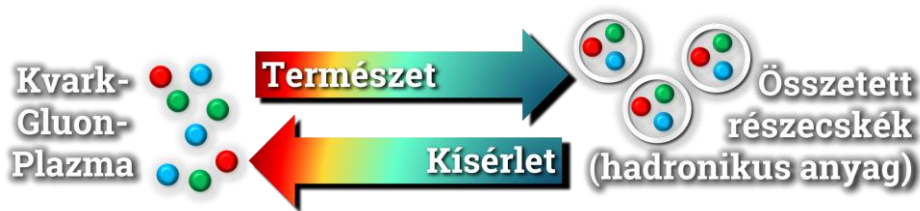


Hadronspektrumok – kémiai kifagyási hőmérséklet

- **Kémiai kifagyás:** részecsketípusok befagyása (kinetikus kifagyás előtt!)
- Integrált spektrumok illesztése statisztikus hadronizációs modellekkel → T_{ch} megkapható

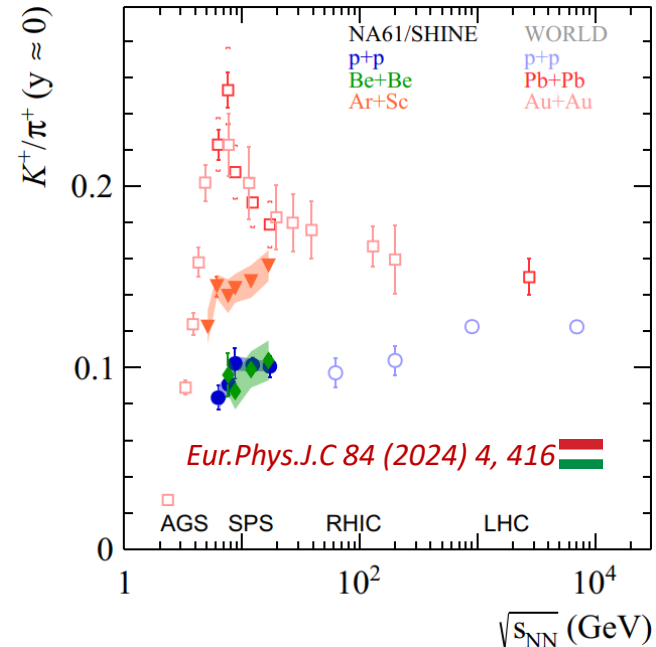
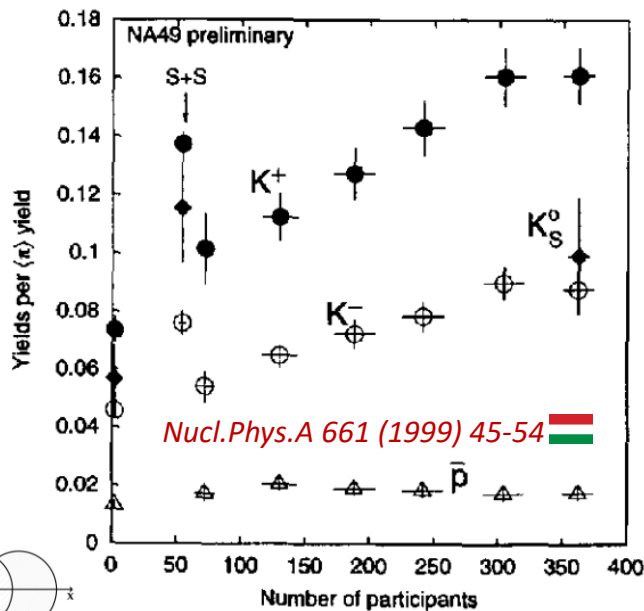


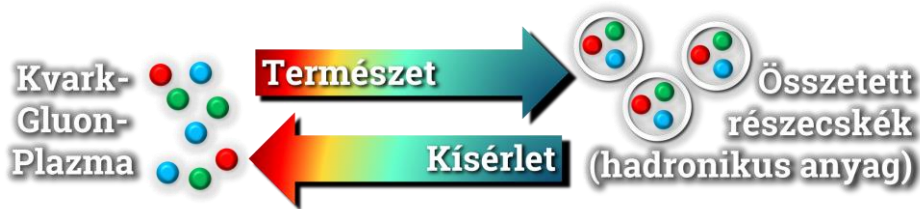
Kémiai kifagyás
hőmérséklete kb.
155 MeV
(0-10% PbPb)



Ritkaság növekedés (strangeness enhancement)

- Ütköző atommagok → csak u,d kvarkokat tartalmaznak
- Nehezebb kvarkokat tartalmazó részecskék keletkezése → QGP?
- Kaon/pion keltési arány nagyobb centrális nehézion-ütközések esetén
- **Energiafüggés vizsgálata – kvark kiszabadulás kezdete?** *Acta Phys.Polon.B 30 (1999) 2705*



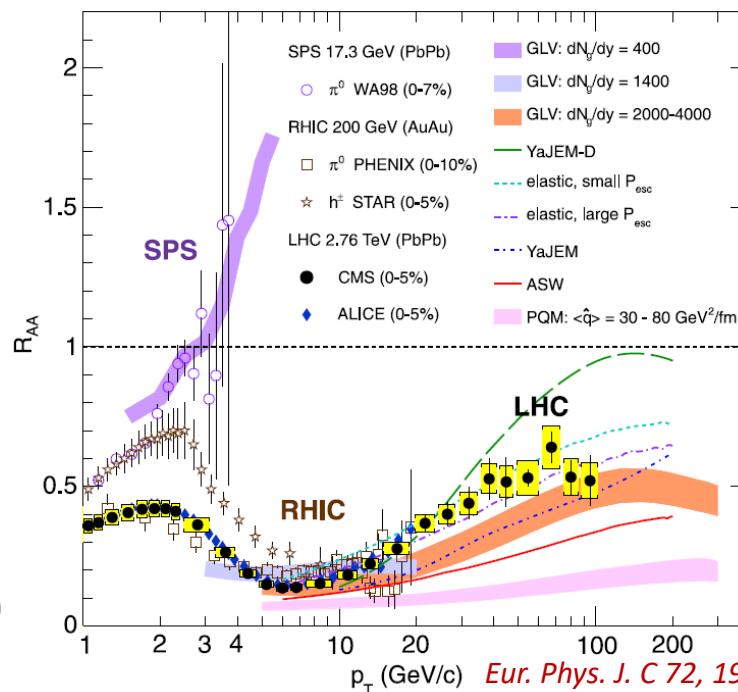
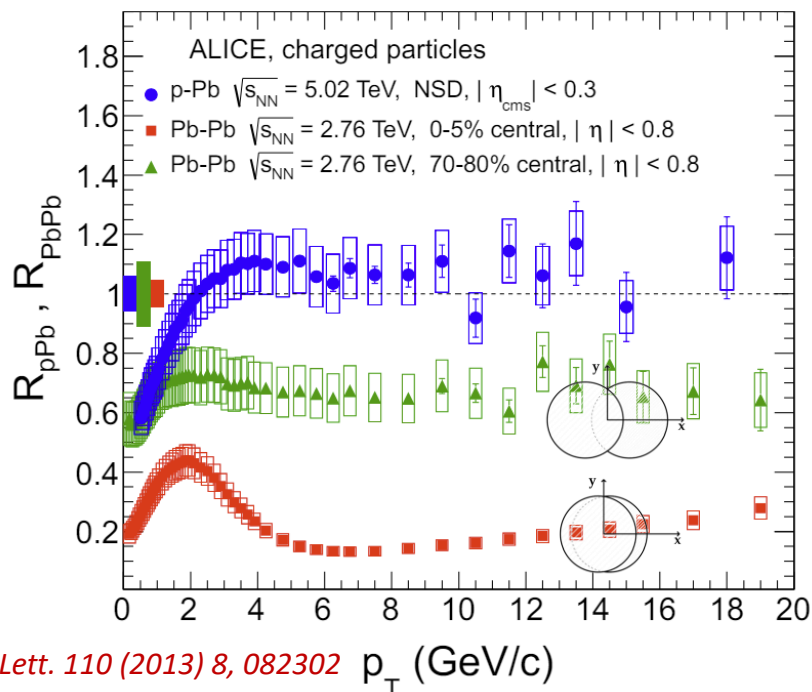


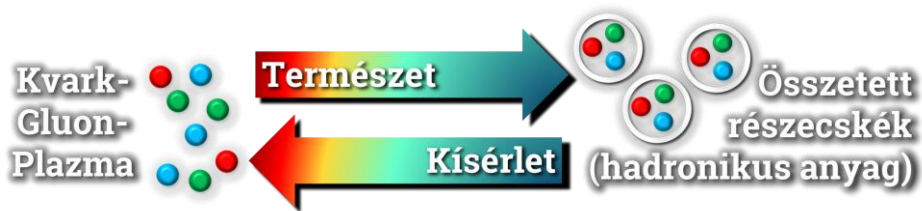
A mag módosulási tényező mérése

- Mag módosulási tényező:

$$R_{AA} = \frac{\text{Nehézion ütközés multiplicitása}}{(\text{bináris ütközések száma}) \times (\text{proton-proton ütközés mult.})}$$

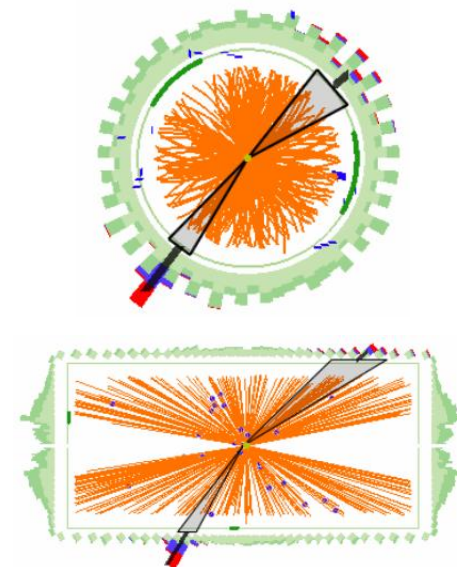
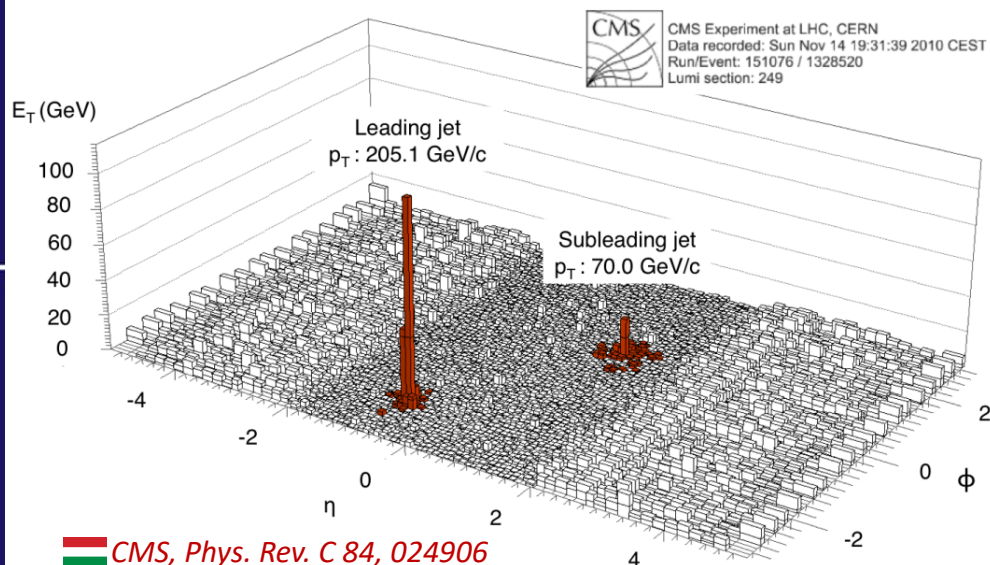
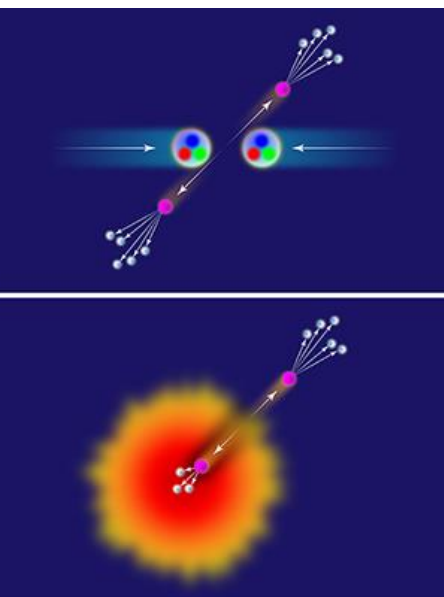
- Megfigyelés: Centrális ütközésekben lecsökken az erősen kölcsönható hadronok energiája

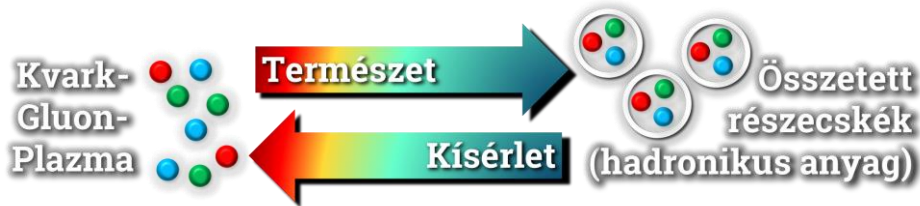




Jet elnyomás (jet quenching)

- Megfigyelés:** centrális ütközésekben a közeg elnyeli a nagyenergiás részecskenyaláb energiáját, magas a „féloldalas” jetek aránya

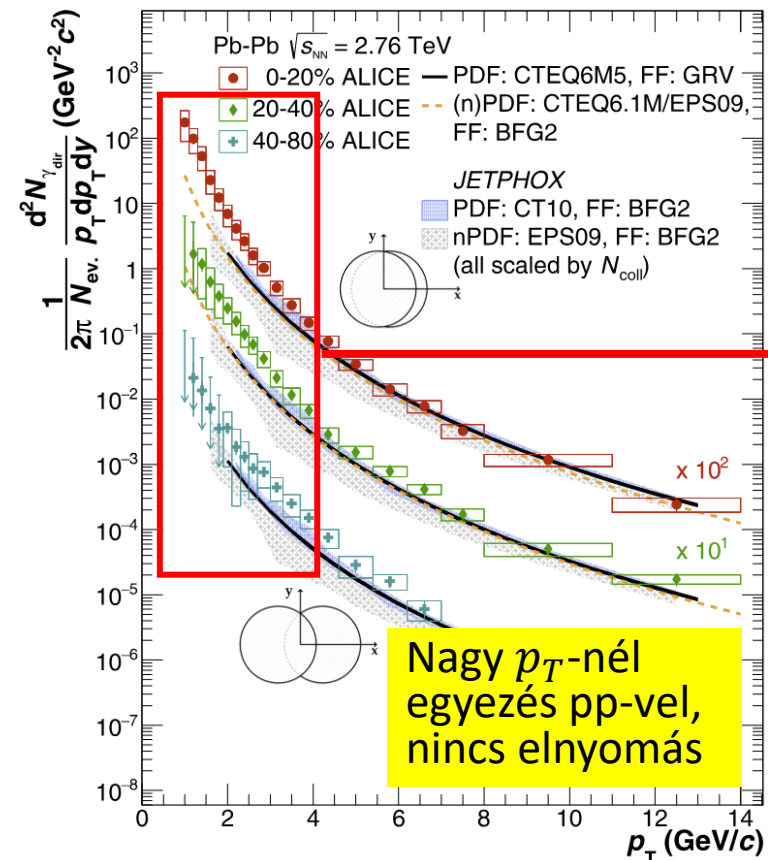




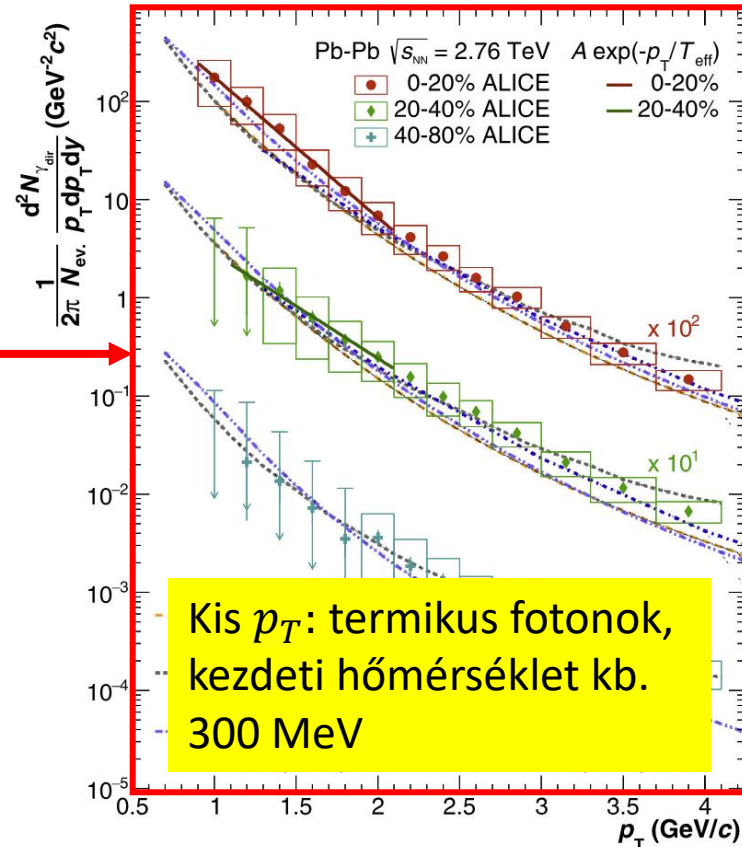
ALICE, Phys.Lett.B 754 (2016) 235-248

Direkt fotonok spektruma – kezdeti hőmérséklet

- Direkt fotonok:** Nem bomlásokból \rightarrow az ütközés minden szakaszában keletkeznek!

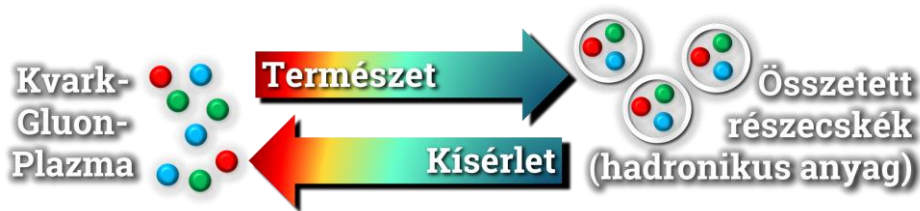


Nagy p_T -nél egyezés pp-vel, nincs elnyomás



Kis p_T : termikus fotonok, kezdeti hőmérséklet kb. 300 MeV

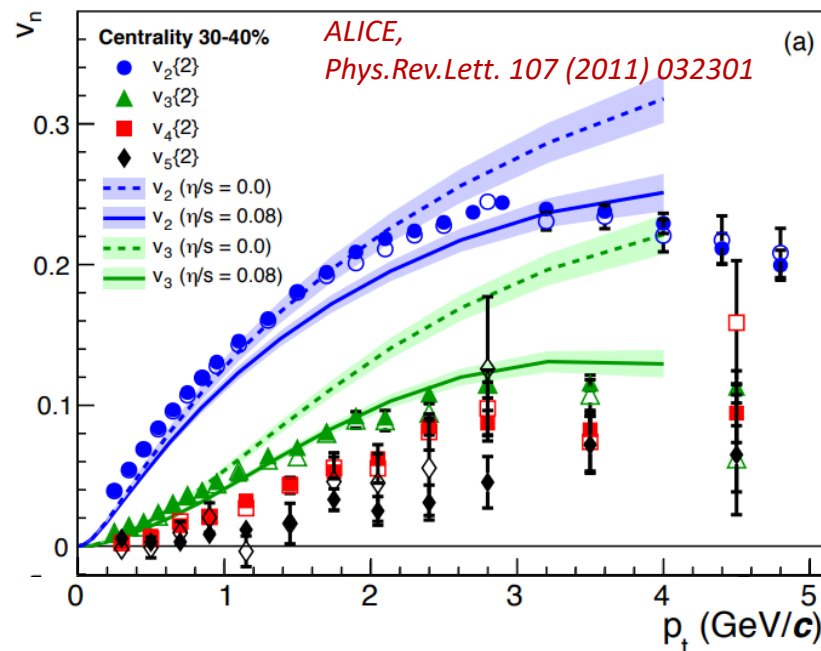
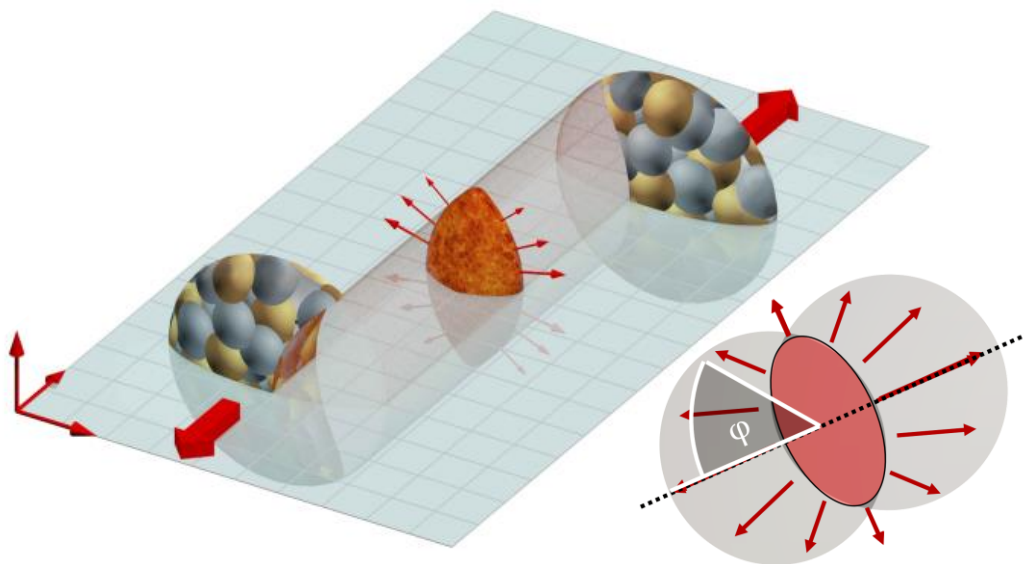
Egyezés QGP létrejöttét feltételező modellekkel!

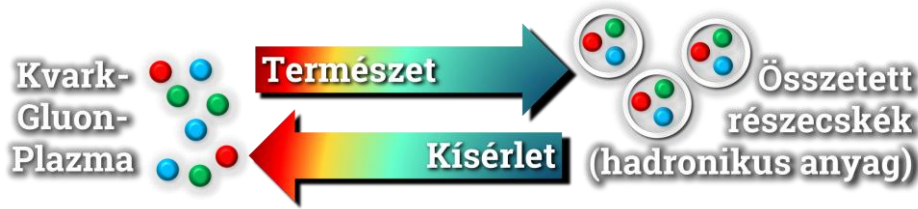


Elliptikus folyás – v_2

- **Megfigyelés:** Periférikus ütközések \rightarrow térbeli (azimutális) aszimmetria (ellipszoid alak) \rightarrow robbanásszerű kollektív tágulás: részecskék impulzuseloszlásában aszimmetria!
- Impulzuseloszlás azimutászög sorfejtése: $N(p_T, \varphi) = N(p_T)[1 + 2 \sum v_n \cos(n(\varphi - \Psi_{RP}))]$

Hidrodinamikai leírás jól működik! Magasabb rendű anizotrópiák – kicsi viszkozitás!

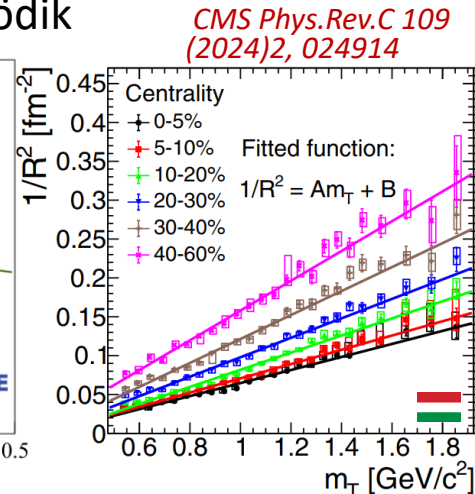
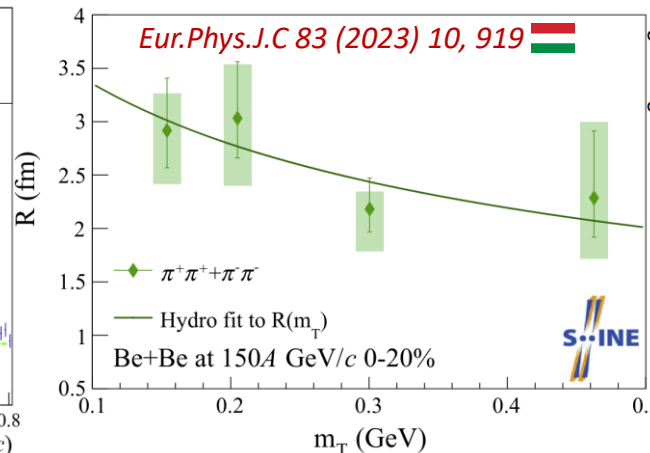
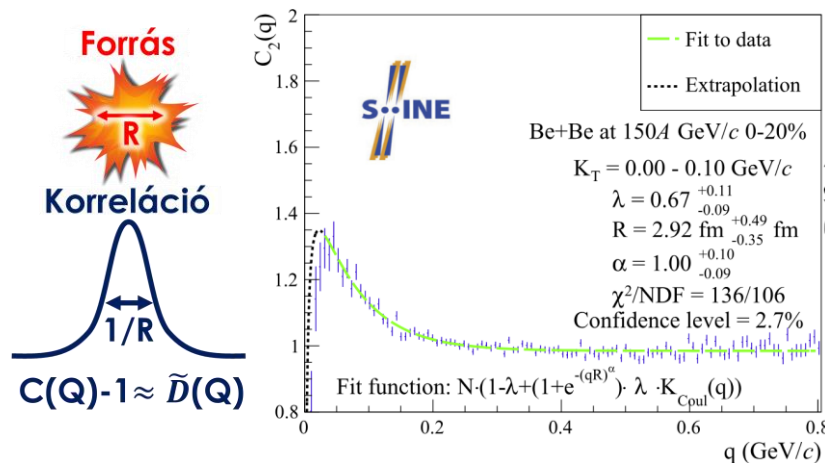




Nature 178 (1956), pp. 1046–1048.
Phys. Rev. 120 (1960), pp. 300–312.

Femtoszkópia, HBT korrelációk

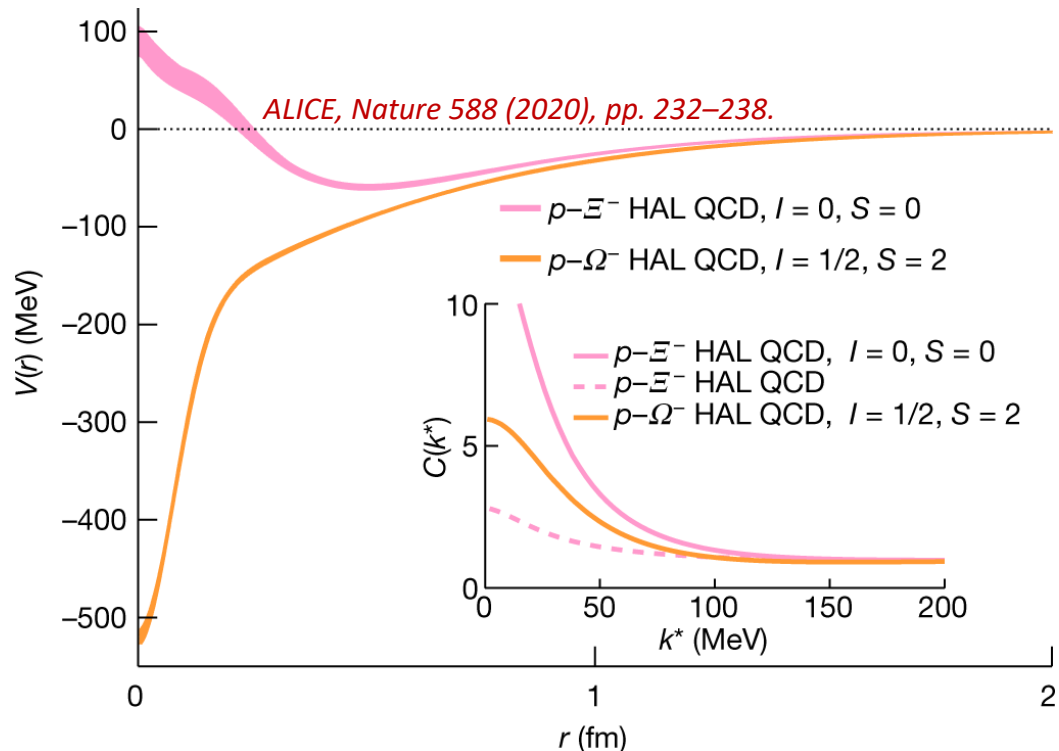
- Bose-Einstein korrelációk felfedezése: R. Hanbury Brown & R. Q. Twiss (rádiócsillagászat)
- Nagyenergiás fizika:** $C(Q)$ impulzuskorrelációval $D(r)$ források letapogatható!
- $C(Q) = 1 + e^{-|RQ|^\alpha}$ Q pár relatív impulzus r pár relatív koordináta
- Megfigyelés:** pionok forrásfüggvénye hatványfüggvény szerű, Lévy-stabil eloszlás!
- R – forrásméret, α – hatványfv. exponens: $\alpha = 2$: Gauss, $\alpha < 2$: $D(r) \sim r^{-1-\alpha}$
- Mérésben $\alpha < 2$** (BeBe, ArSc, PbPb esetén is, minden centralitás és m_T esetén)
- Ennek ellenére Gauss alakra számolt $1/R^2$ hidro skálázás jól működik





Kis kitérő (p+p) – nem azonos részecskék korrelációi

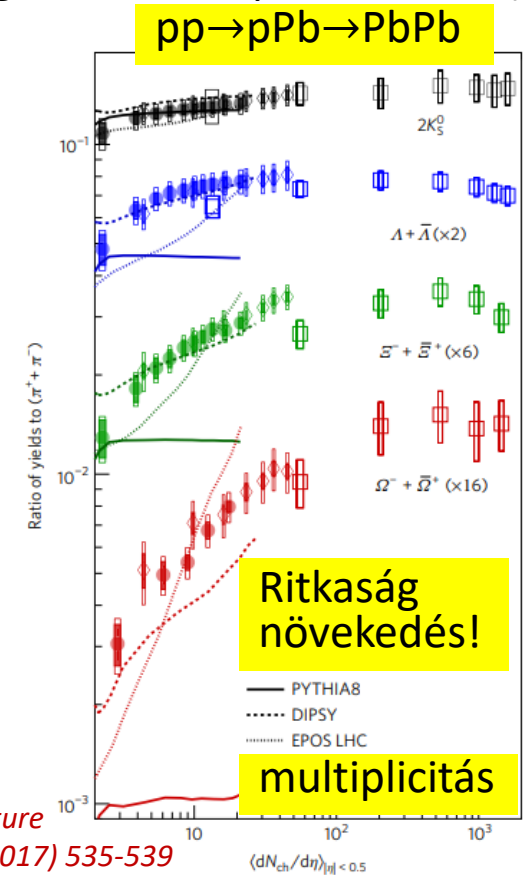
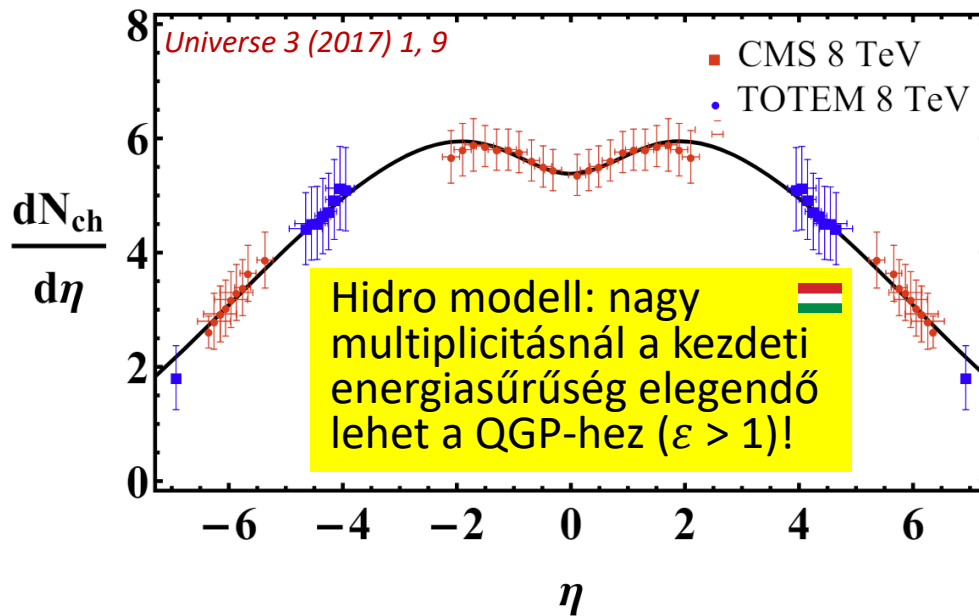
- Korrelációs függvényt befolyásolhatja: HBT effektus + végállapoti kölcsönhatások
- Nem azonos részecskékre csak a kölcsönhatási potenciál számít!
- **Különböző részecskék közti erős kölcsönhatás paraméterek feltérképezhetők!**





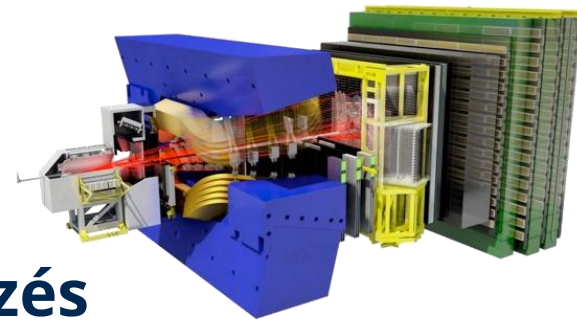
Kis kitérő (p+p) – nagy multiplicitás, QGP szignatúrák?

- **Megfigyelés:** nagy multiplicitású p+p ütközések QGP szignatúrákat reprodukálnak (?)



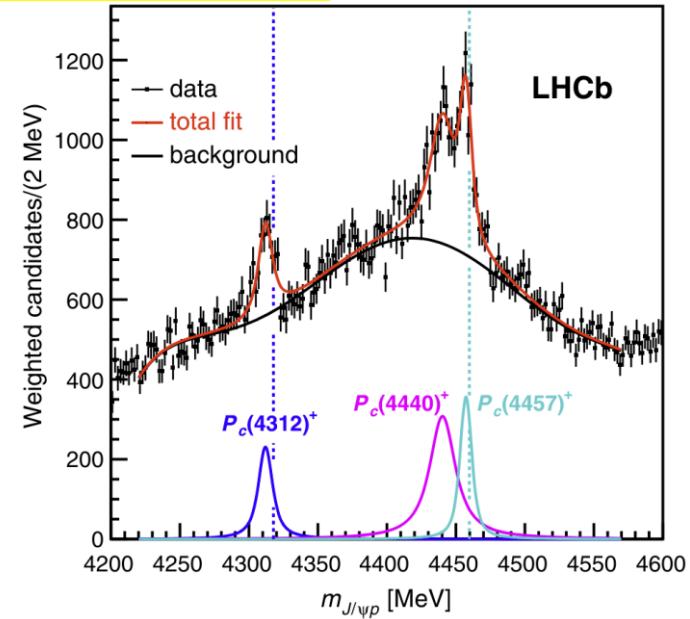
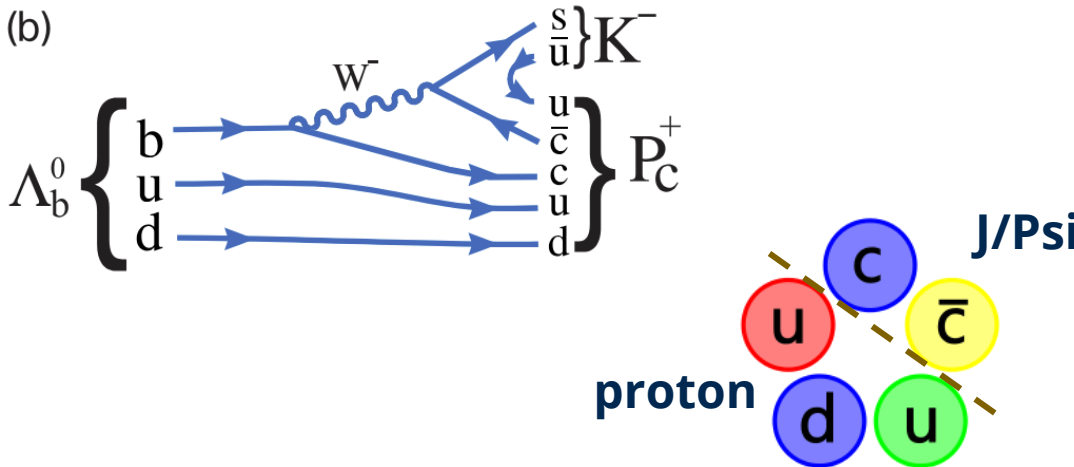
ALICE, Nature
Phys. 13 (2017) 535-539

Phys.Rev.Lett. 115 (2015) 072001
 Phys.Rev.Lett. 122 (2019) 22, 222001



Kis kitérő (p+p) – pentakvark felfedezés

- **LHCb kísérlet:** b kvarkot tartalmazó részecskék mérésére specializálódott
- **Első szignifikáns pentakvark felfedezés 2015-ben, pontosítás 2019-ben**
- Pentakvark: három különböző szín + szín-antiszín pár
- Kérdés: 5 kvark kötött állapota, vagy mezon-barion molekula?



State	M [MeV]	Γ [MeV]
$P_c(4312)^+$	$4311.9 \pm 0.7^{+6.8}_{-0.6}$	$9.8 \pm 2.7^{+3.7}_{-4.5}$
$P_c(4440)^+$	$4440.3 \pm 1.3^{+4.1}_{-4.7}$	$20.6 \pm 4.9^{+8.7}_{-10.1}$
$P_c(4457)^+$	$4457.3 \pm 0.6^{+4.1}_{-1.7}$	$6.4 \pm 2.0^{+5.7}_{-1.9}$

Eur. Phys. J. C 81, 180 (2021)

Eur. Phys. J. C 81, 611 (2021)

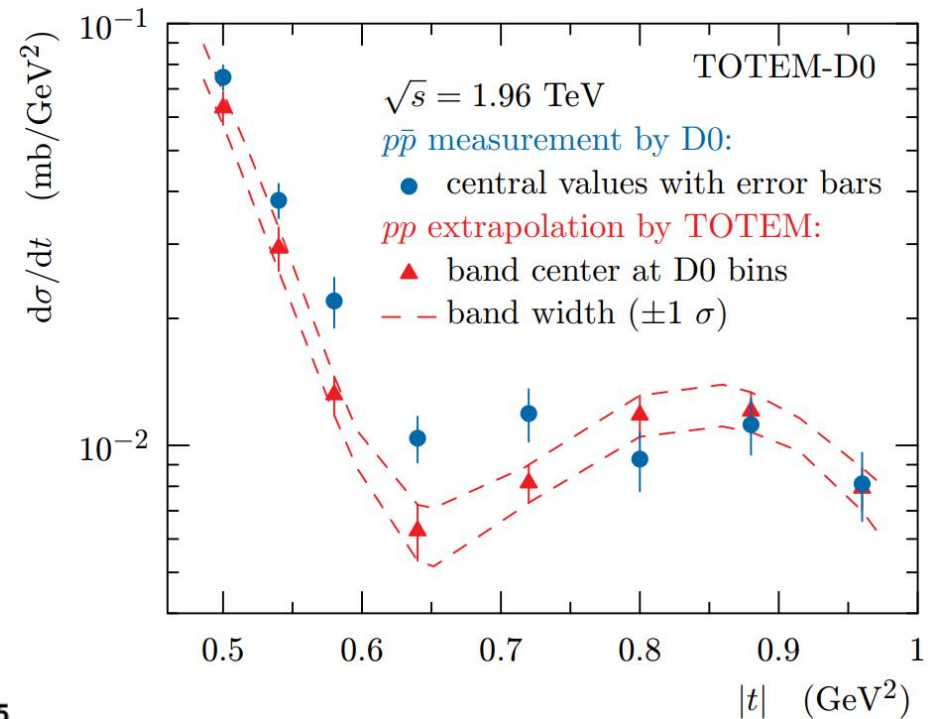
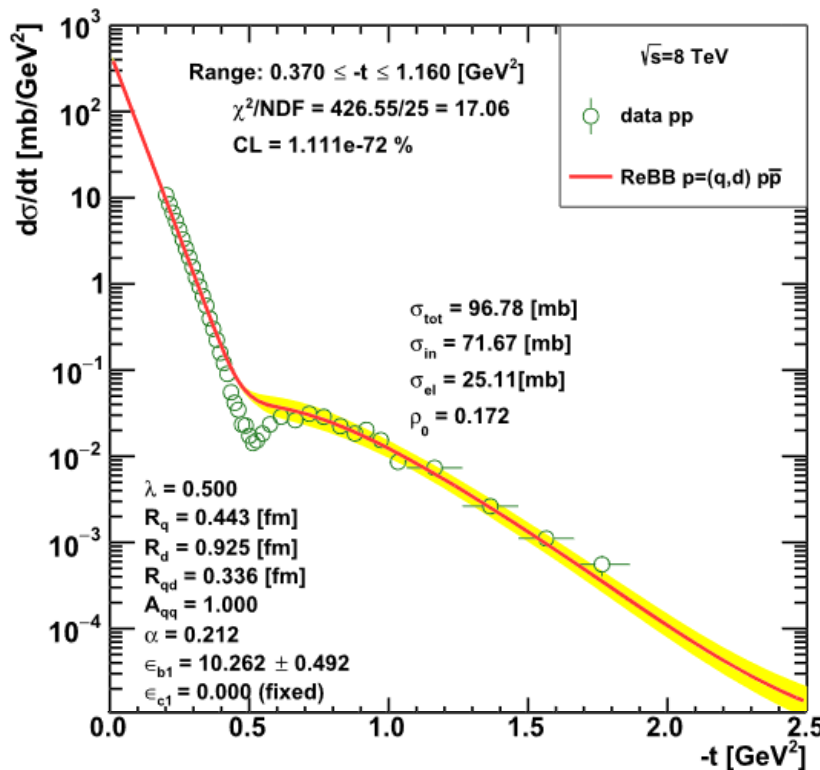
Eur. Phys. J. C 82, 827 (2022)

TOTEM, Phys.Rev.Lett. 127 (2021) 6, 062003

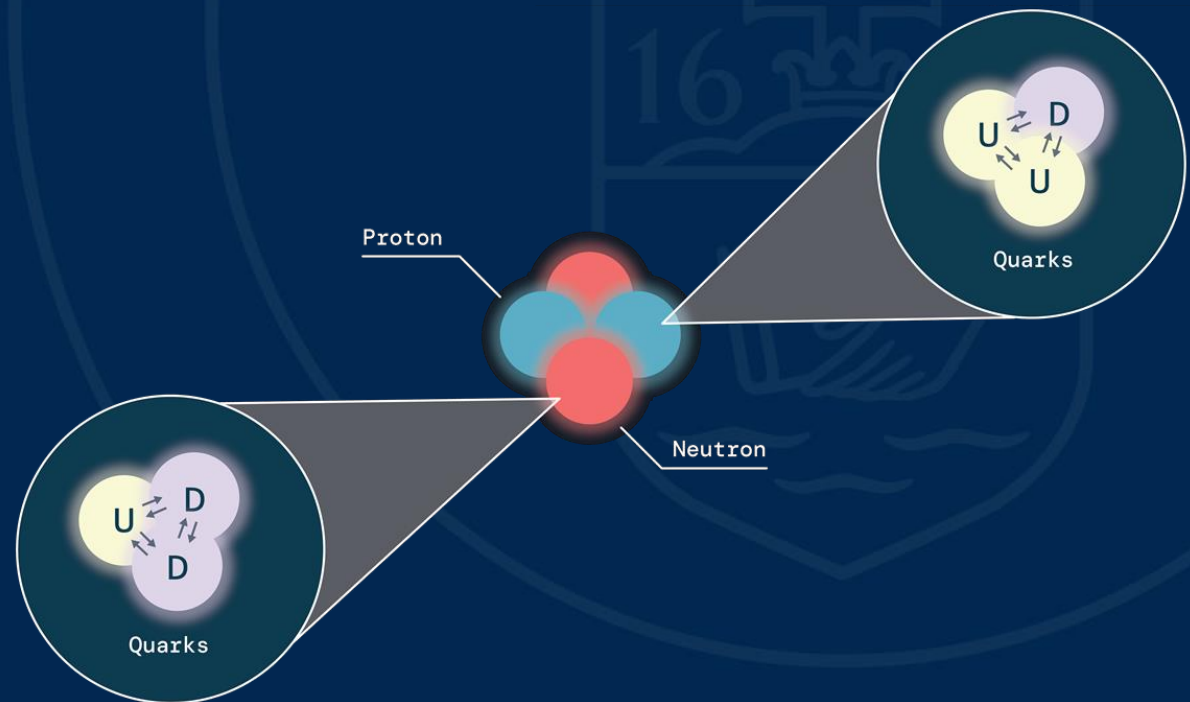


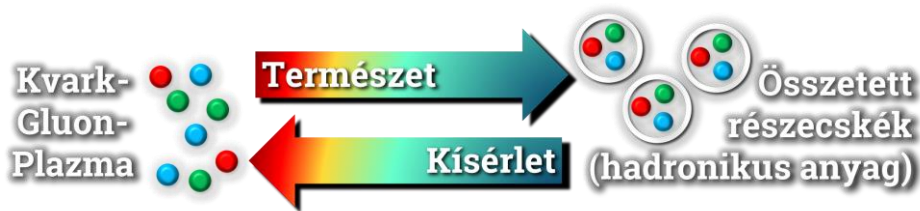
Kis kitérő (p+p) – Odderon felfedezés

- **Odderon:** páratlan számú gluon állapotok cseréje p-(anti)p rugalmas szórásban
- Ha létezik az Odderon: **különbség proton-proton és proton-antiproton szórás között!**



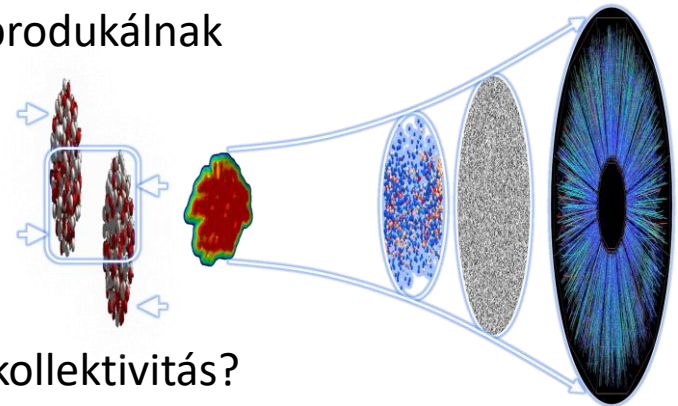
III. Összefoglalás, kitekintés





Mit tudunk a kvarkanyagról, merre tovább?

- **Nagyenergiás atommag ütközésekben létrejön a Kvark Gluon Plazma (QGP)**
 - Erősen kölcsönható (elnyeli a nagyenergiás hadronok energiáját)
 - Direkt fotonok nem nyelődnek el, extrém magas kezdeti hőmérséklet (terakelvin)
 - Hadronspektrumok alakja → kifagyási hőmérséklet mérhető (~155 MeV)
 - Hidrodinamikai modellek sok megfigyelést reprodukálnak
 - Kicsi viszkozitás, szinte tökéletes folyadék



- **Merre tovább?**

- Nagy multiplicitású p+p ütközések vizsgálata, kollektivitás?
- Precíziós nehézion-fizika, nagyságrendekkel pontosabb mérések
- Kezdeti állapot fluktuációi → kapcsolat alacsony energiás magfizikával, atommag deformációs paraméterek mérése?