

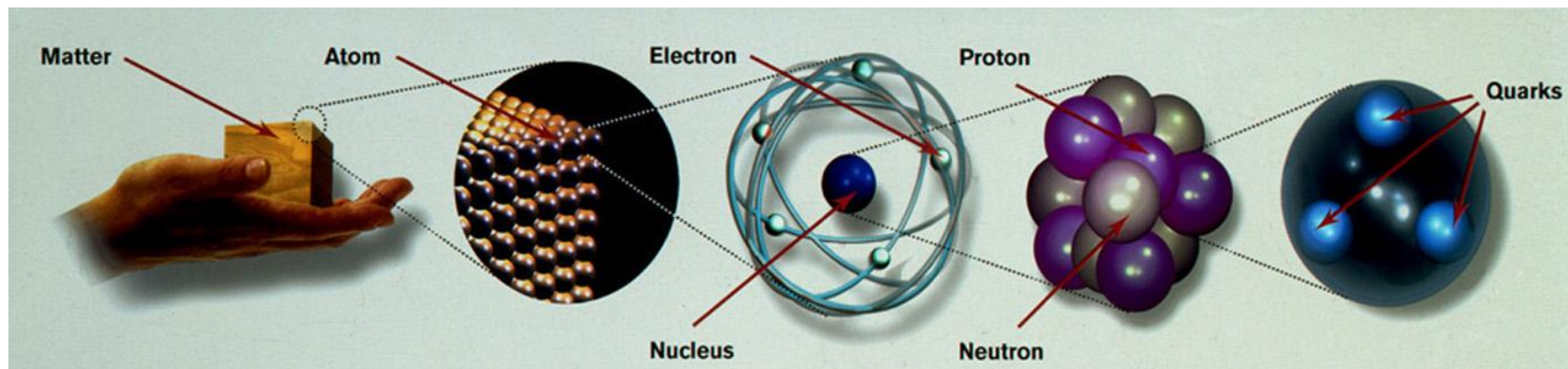
Nehézion-fizika

Zoltán Fodor

MTA Wigner FK RMI

Hungarian Teachers Programme 2017





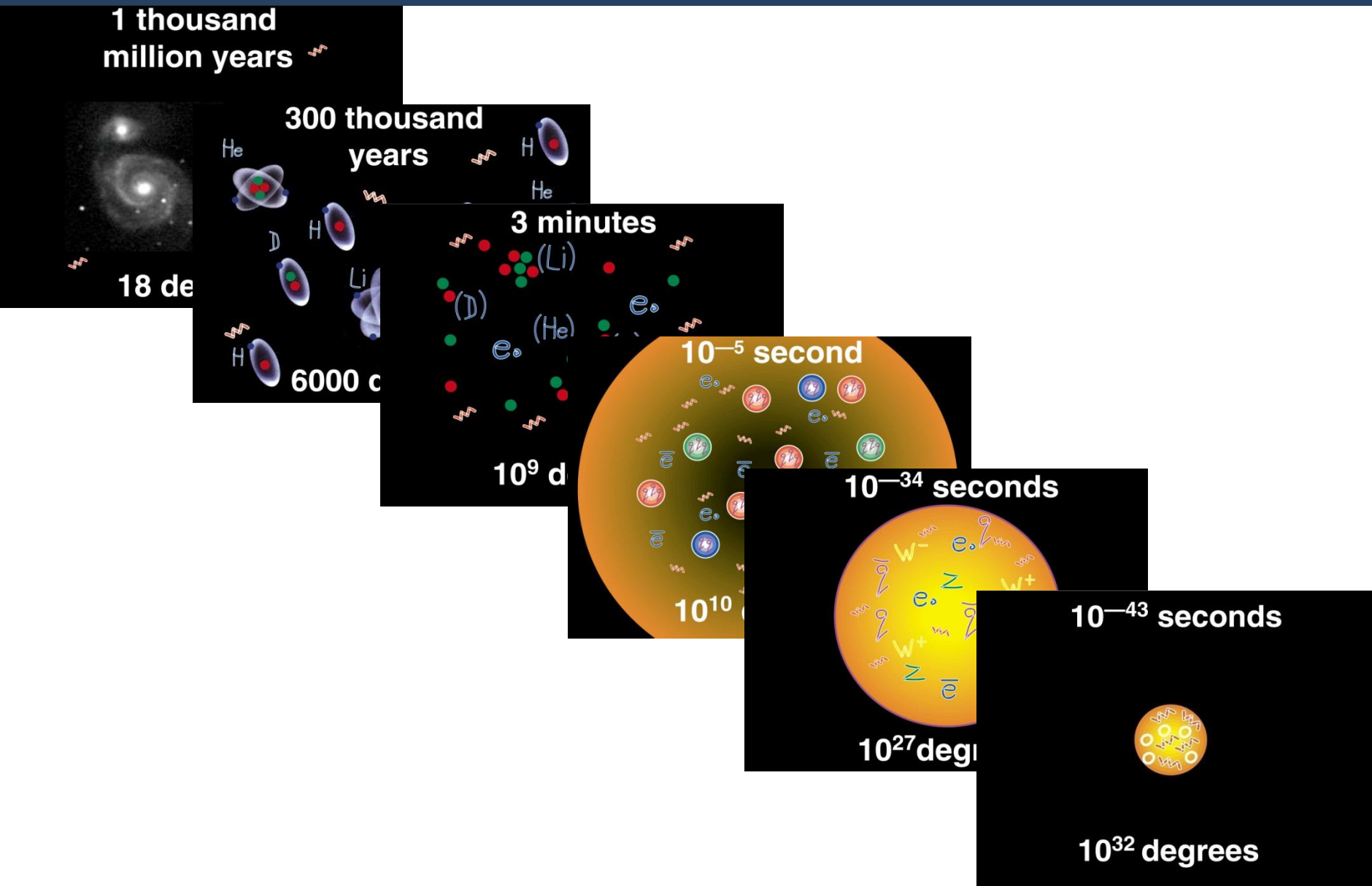
Napjaink periódusos rendszere

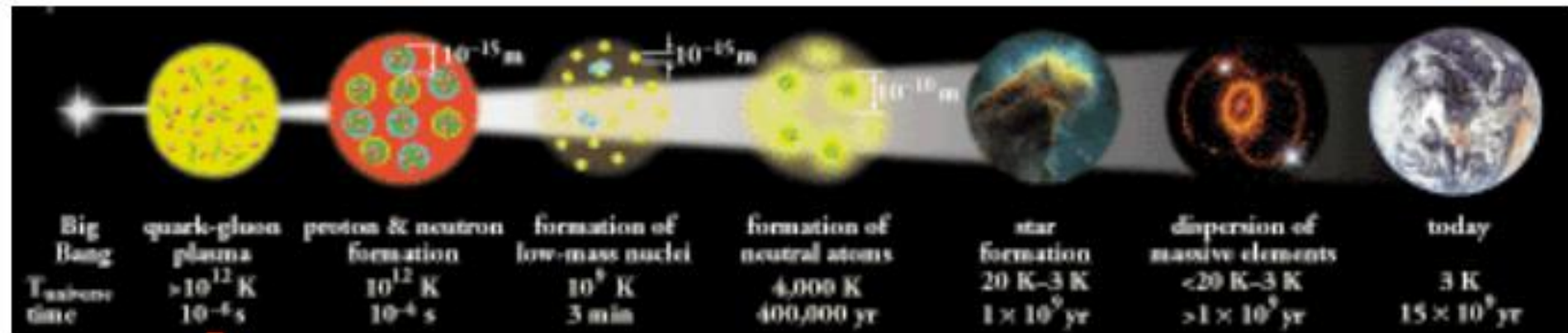
	Quarks		Leptons	
Generation 3	Top	Bottom	Tau	Tau-neutrino
Generation 2	Charm	Strange	Muon	Muon-neutrino
Generation 1	Up	Down	Electron	Electron-neutrino

Kölcsönhatásuk különbözik az eddig ismertektől → csak kötött állapotban lehetnek

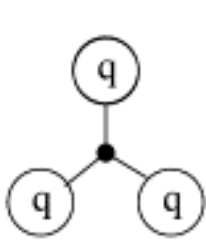
De mindig így volt ez ?

Minden körülmények között?





- A Nagy Bummnál minden anyag egy pontban sűrűsödött össze, ami azután tágulva lehűlt.
- Ennek az anyagnak a tulajdonságai teljes bizonyossággal mások voltak mint a ma közvetlenül megfigyelhető világnak.
- Tudjuk-e tanulmányozni ezt az anyagot?



barionok

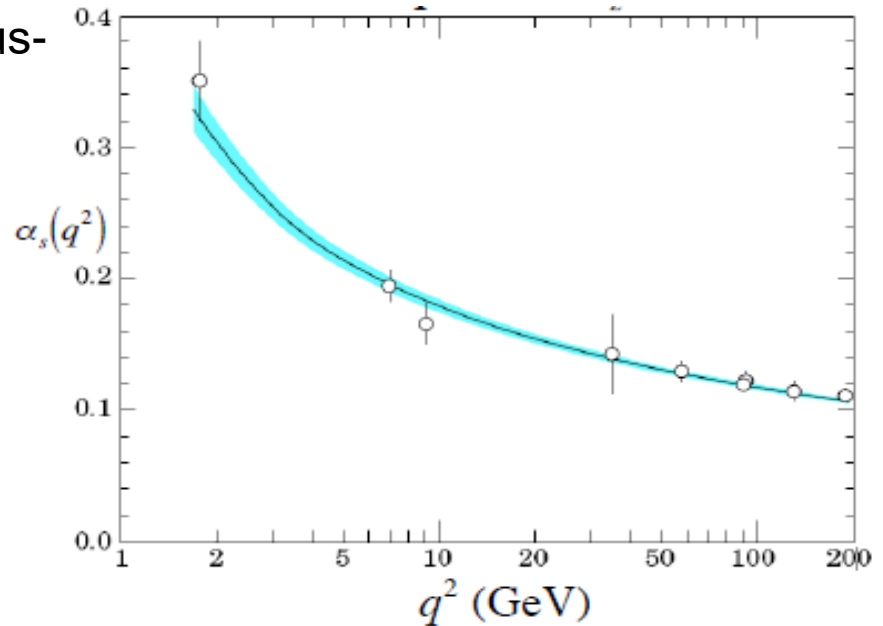
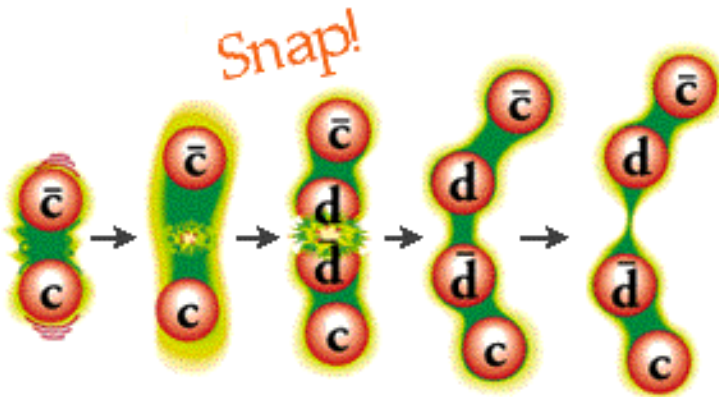


mezonok

Erős kölcsönhatás közvetítője: gluon

QCD: kvantum-színdinamika

A kölcsönhatás erőssége az impulzusátadástól (méretskálától) függ:



Nagy impulzusok: aszimptotikus szabadság

Nagy távolságok: nagyon erős, kvarkbezárás

- A quarkok be vannak zárva, a mai normál körülmények közötti állapotban.
- Mi történik akkor, ha a részecskék olyan közel kerülnek egymáshoz, hogy már nincs közöttük szabad hely?

A quarkok kiszabadulnak a „börtönükből”, és az egyensúly nem a hadronok között lesz, hanem a quarkok között. Ezt az anyagot nevezzük **QuarkGluonPlazmának**.

Ehhez szükséges

- Energiasűrűség: kb. $1 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ vagy
- Barionsűrűség: kb. $1 \text{ barion}/\text{fm}^3$ (magsűrűség ötszöröse)

De hogyan lehet ezt előállítani és tanulmányozni?

- **Hogyan tudunk ilyen anyagot előállítani?**
 - nehézionok nagyenergiával történő ütköztetésével
- **Mivel tudjuk megnézni?**
 - Az ütközést körülvevő detektorokkal, de mérni csak a kifagyott hadronokat tudjuk.
- **Hogyan tudjuk meghatározni az állapot paramétereit?**
 - Ismert törvényszerűségek és összefüggések segítségével.
 - Model számítások segítségével

Helye	Max energia/nukleon	üzembeállítás
GSI, Darmstadt	1.5 GeV	1991
AGS, Brookhaven	9 GeV	1992
CERN SPS, Genf	160 GeV	1994
RHIC, Brookhaven	200 GeV	2000
CERN, LHC	6.750 GeV (p) 2.760 GeV (Pb)	2008/ Nehéz-ion 2010/
FAIR, Darmstadt	22 GeV (45 GeV)	2020+
NICA, Dubna	4.5 GeV, 12,6 GeV (p)	2020



CMS

LHC

ALICE

NA49/NA61

Alice

A
L
I
C
E

ATLAS

SPS

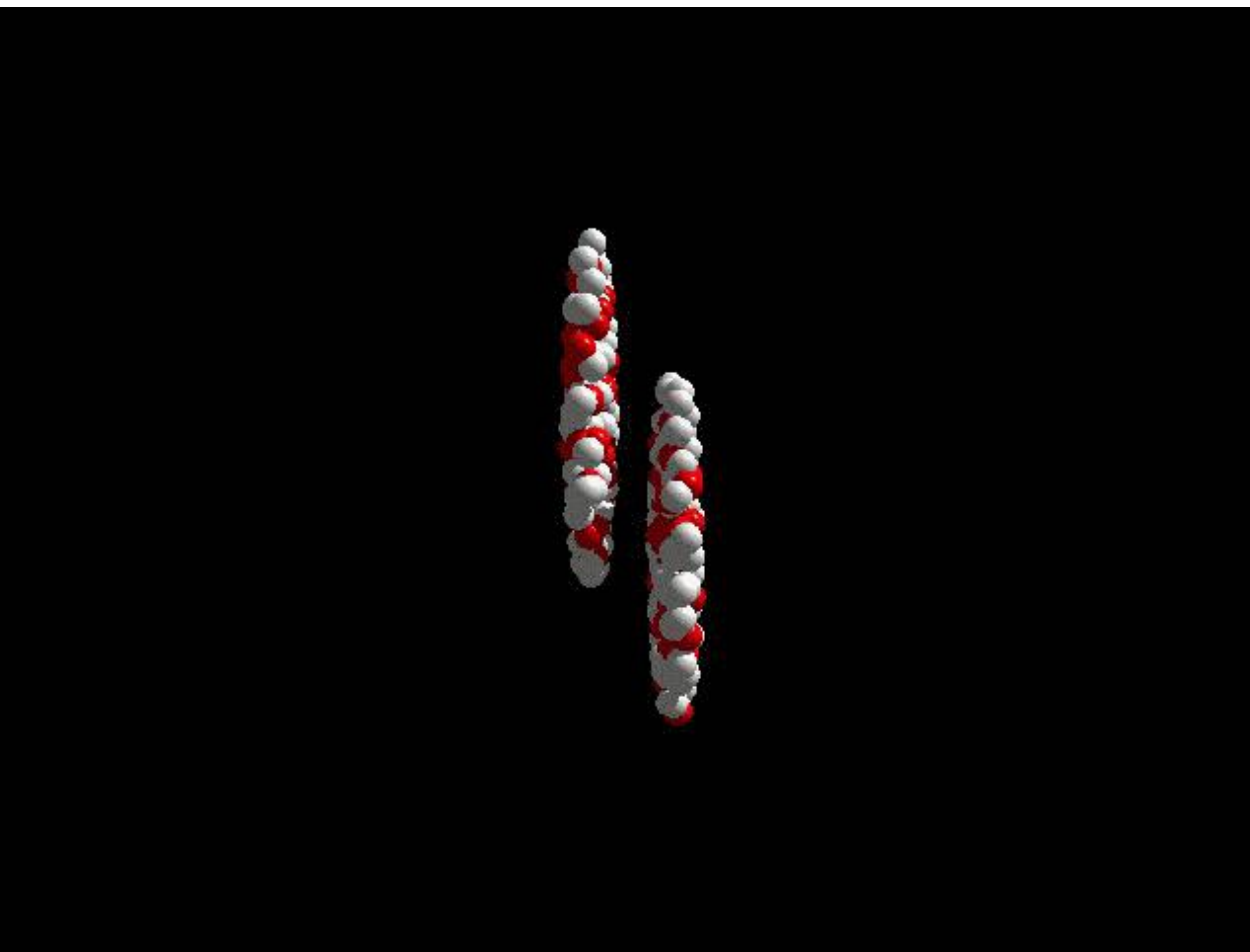
NA49-future

- **Alacsonyabb energiákon:**
 - Állapotegyenlet $\rho(p)$ meghatározása a stabilitási pont közelében
 - Új, a stabilitási vonaltól távol eső atommagok előállítása
- **Magasabb energiákon:**
 - Állapotegyenletnek a $\rho(T)$ és $\rho(p)$ meghatározása
 - Új fajtájú anyag a **Quark Gluon Plazma** előállítása és tulajdonságainak vizsgálata
 - A fázisátalakulási görbék meghatározása
 - Részecske tulajdonságainak meghatározása a maganyagban

- **Ütközési paraméter**
 - A nem kölcsönható anyagrész mennyiségének mérésével
 - Az ütközésben keletkezett részecskék számának mérésével
- **A keletkezett tűzgömb geometriai nagysága**
 - Azonos típusú részecskék eloszlásából
- **A tűzgömb hőmérséklete**
 - A keletkezett részecskék nyalábra merőleges irányú impulzus eloszlásából
- **Kémiai összetétele**
 - A keletkezett részecskék fajtájának eloszlása /különösen értékesek, amelyek megmaradnak a kifagyás folyamata alatt/
- **A mért mennyiségek eltérhetnek az álló céltárgyú és az ütköző nyalábos méréseknél**
 - A fázistér más helyein tudnak mérni

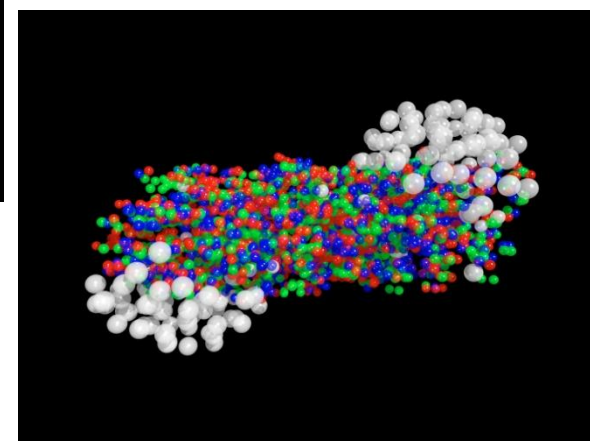
Ütköző nyalábos mérés szimmetrikusan mér a tömegközépponti rendszerben, de nem méri a kis pT-jű részecskéket és az előre menőket

Álló céltárgyú mérések pedig nem mérik a hátrafelé kilépőket

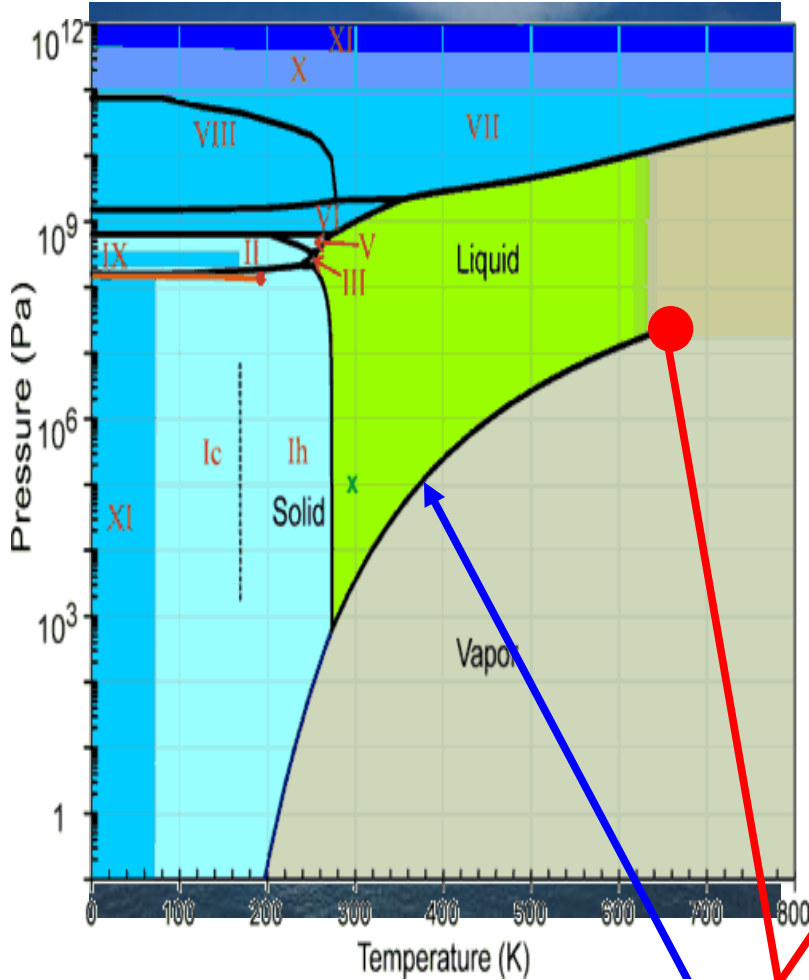


**Ólom atommagok
ütközése, $5500 \cdot 208 \text{ GeV}$
 $= 0,00018 \text{ J}$**

**Szimuláció
 10^{-13} cm méretskálán**



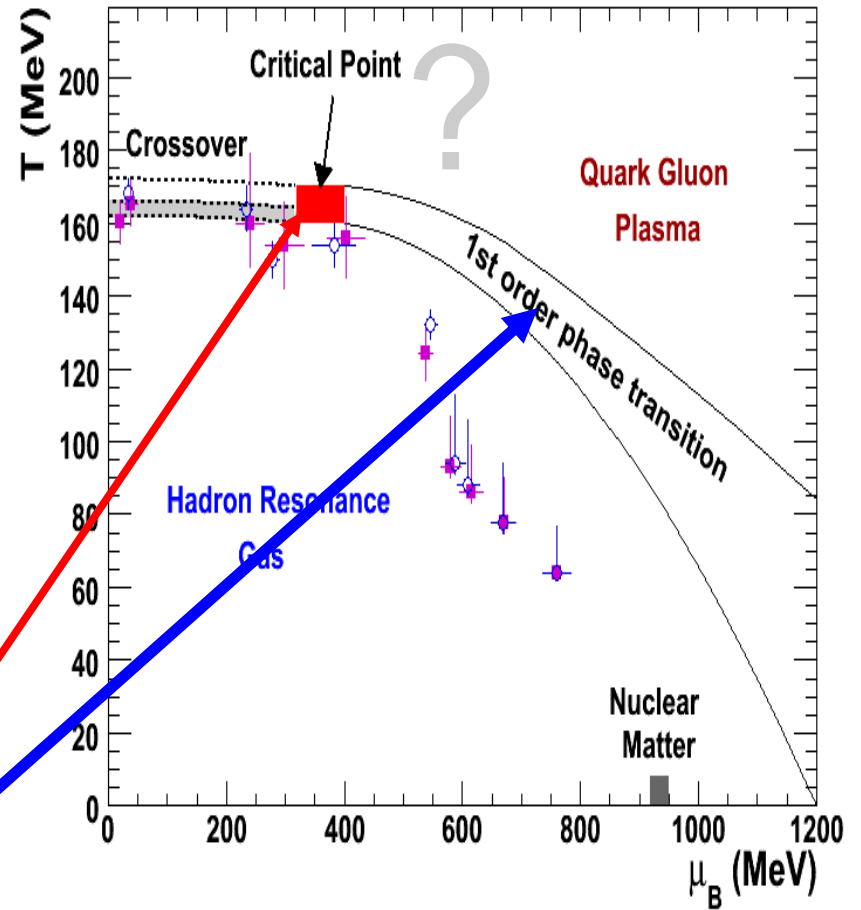
A víz fázis görbéi



Kritikus pont

Első rendű fázisátalakulás

A maganyag fázis görbéit még az erősen kölcsönható anyag fázisai nem ismerjük



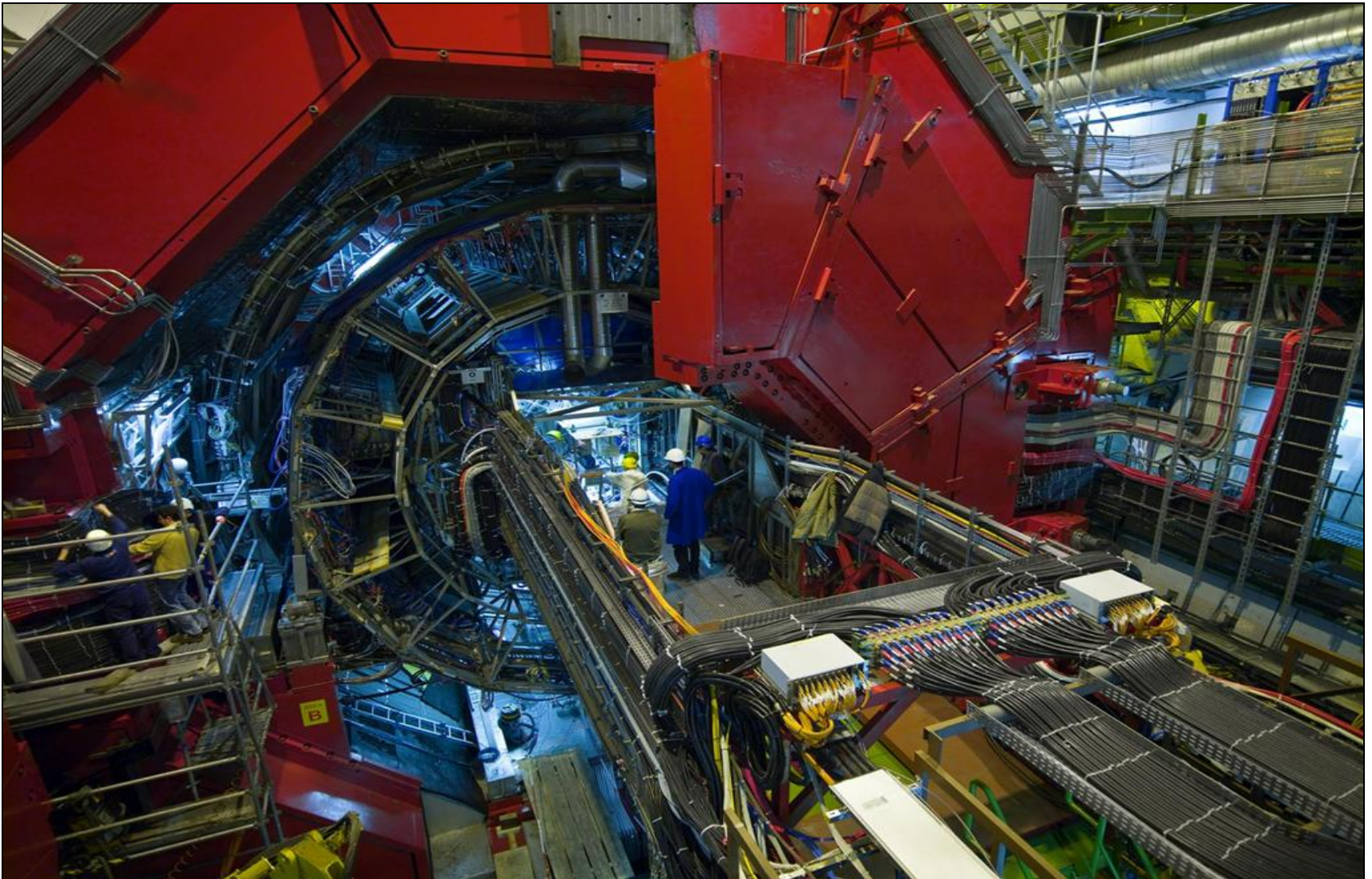
- A legnagyobb azonos körülmények között mért adathalmaz a CERN-i SPS gyorsítónál centrális Pb+Pb ütközéseknél, /NA49, NA61/
- Pb+Pb, Si+Si, C+C reakciók mérése az impakt paraméter függvényében, és p+p valamint p+A adatok az összehasonlításhoz
- energiafüggés meghatározása az SPS által elérhető teljes energia tartományban
 - jelenleg szinte teljesen folytonosan léteznek adatok az SPS küszöbenergiájától a maximális RHIC energiáig
 - az SPS által elért energia tartomány rendkívül érdekes az utóbbi évek eredményei alapján
 - nagy pontosságú adatok az elemi ütközéseknél

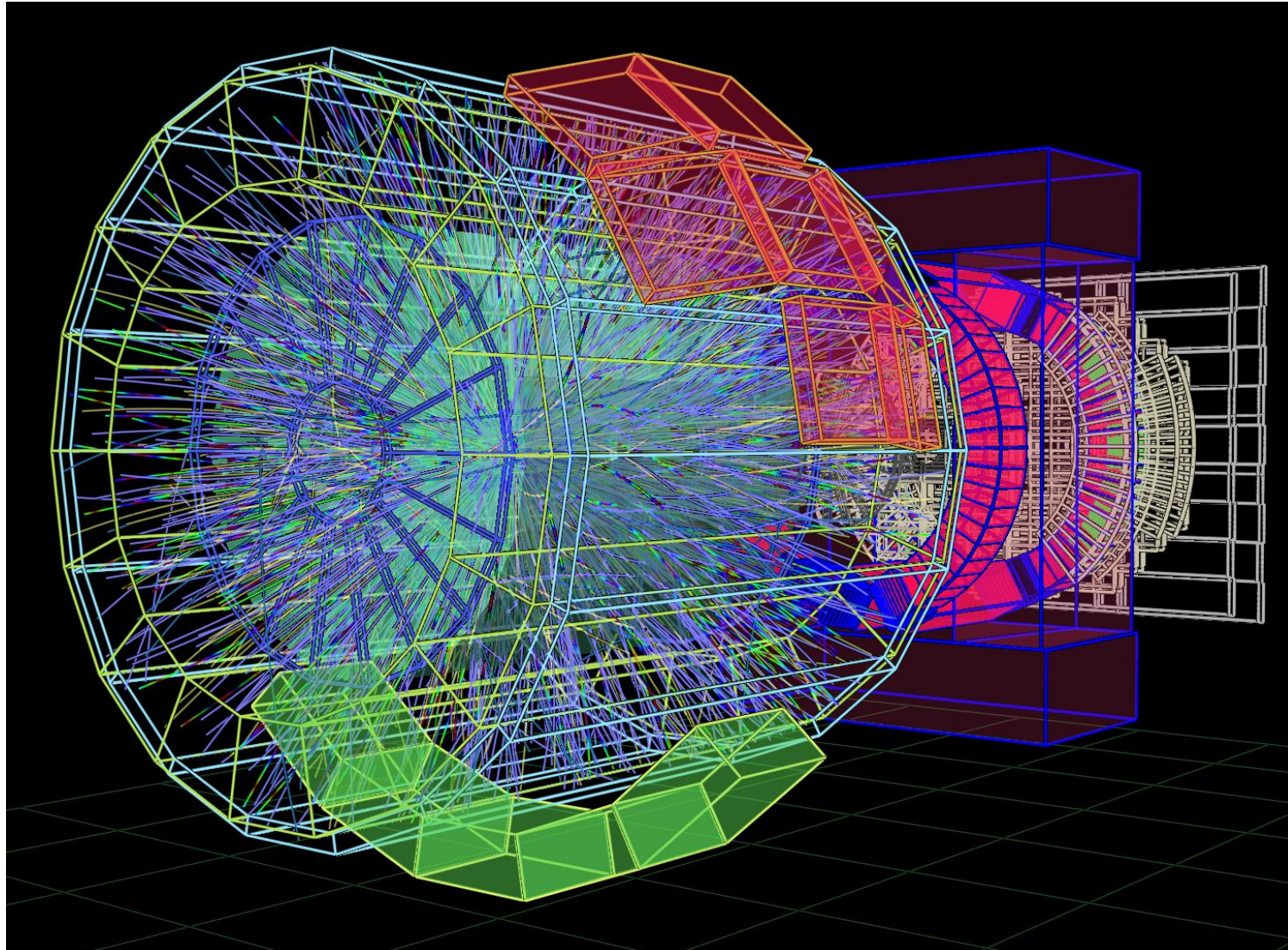
SPS-nél

- C+C, Si+Si 158, 40 GeV/n
- Pb+Pb 158, 80, 40, 30, 20, 10 GeV/n
- Be+Be 155, 80, 40, 30, 20, 13 GeV/n
- Ar+Ca 155, 80, 40, 30, 20, 13 GeV/n
- Xe+La 155, 80, 40, 30, 20, 13 GeV/n **NA61-ben tervezett**
- p+p 158, 80, 40, 30, 20, 10 GeV
- p+Pb, p+C 158, 80, 40, 30, 20, 10 GeV
- π +p, π +Pb 158 GeV
- n+p, /d+p -ból/ 158 GeV

LHC-nál

- Pb+Pb 2.760 GeV/n
- p+Pb 2.760 GeV/n
- p+p





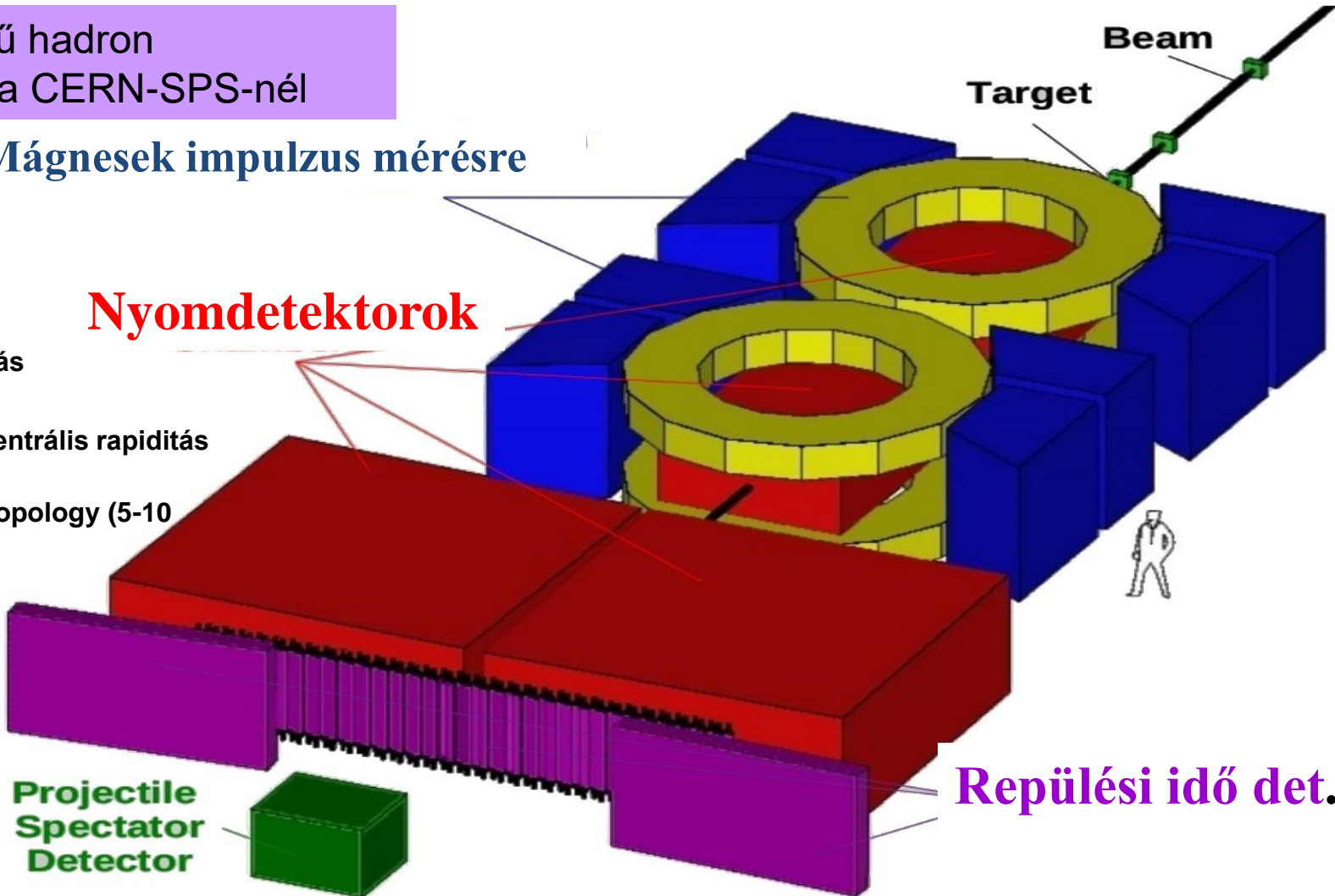
nagy térszögű hadron spektrométer a CERN-SPS-nél

Mágnesek impulzus mérésre

Nyomdetektorok

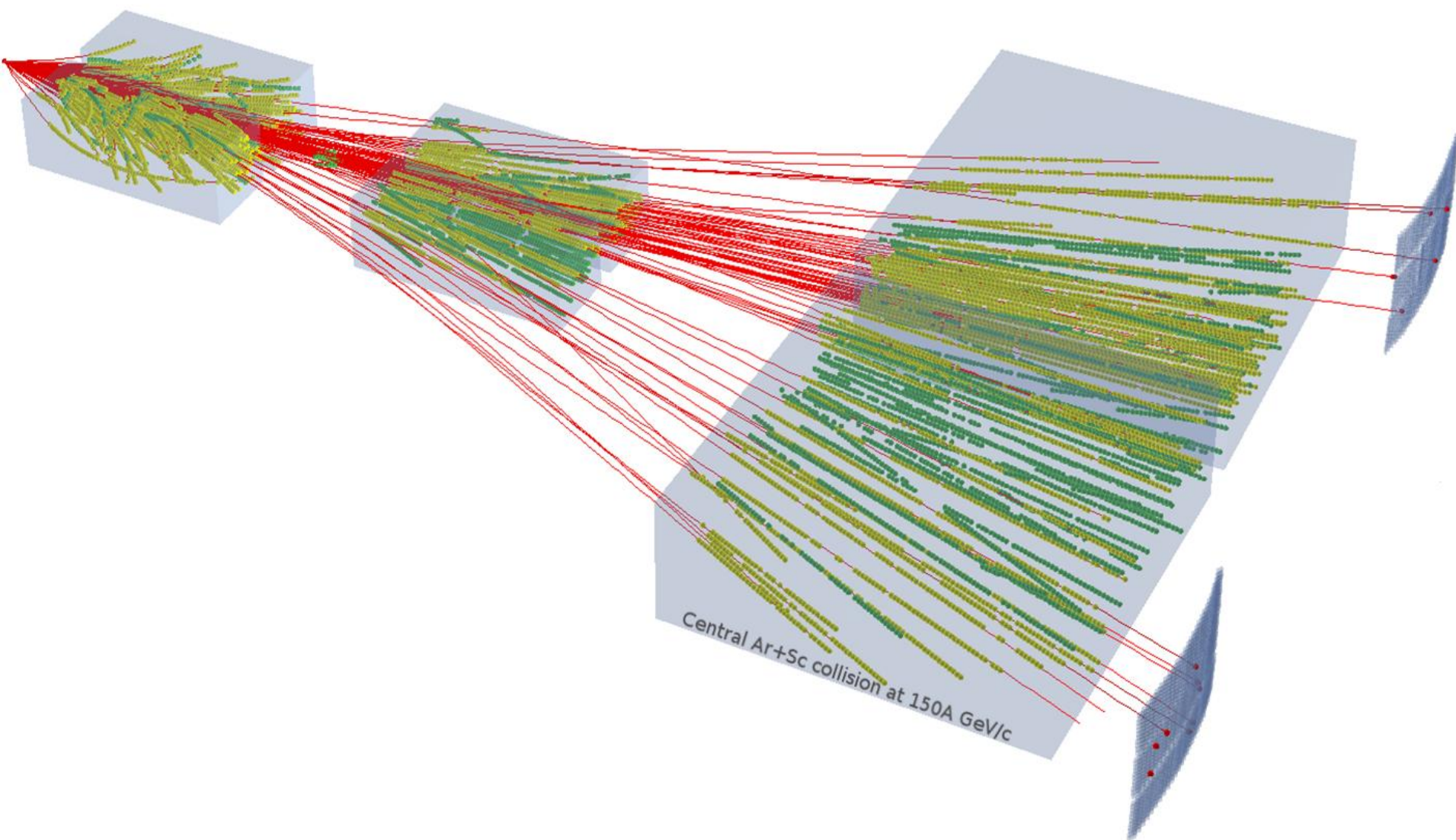
részecske azonosítás

- dE/dx (3-6% res.)
- TOF (60 ps res.) centrális rapiditás körül
- invariant mass + topology (5-10 MeV res.)



Repülési idő det.

- Centralitás mérése a bombázó atommag felhasadásából keletkezett fragmentumok energiának mérése alapján (AA ütközéseknél)
- a target atommagjából kilépő protonok mérésével (pA reakcióknál)

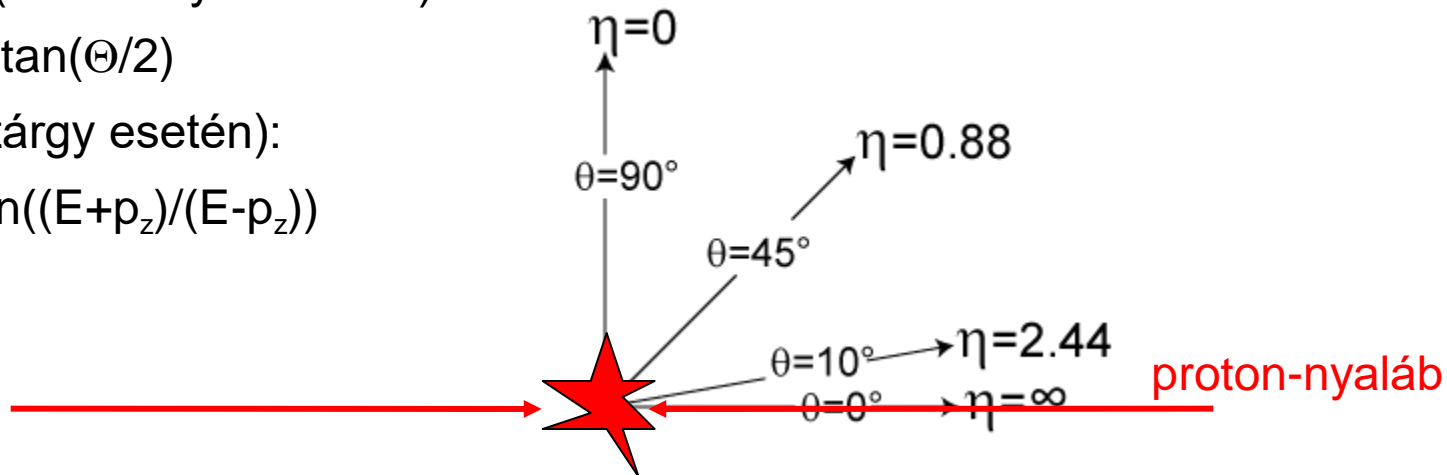


Pszedorapiditás(ütköző nyaláboknál):

$$\eta = -\ln \tan(\Theta/2)$$

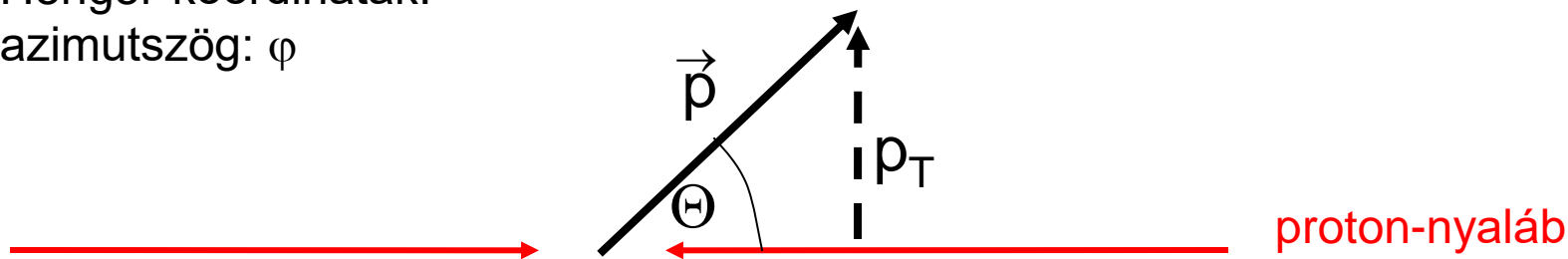
Rapiditás(álló céltárgy esetén):

$$y = 1/2 \ln((E+p_z)/(E-p_z))$$

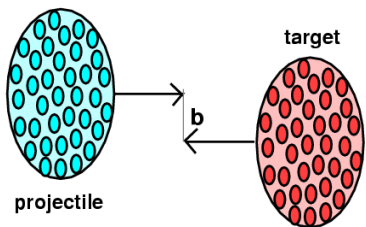


Transzverzális impulzus: p_T

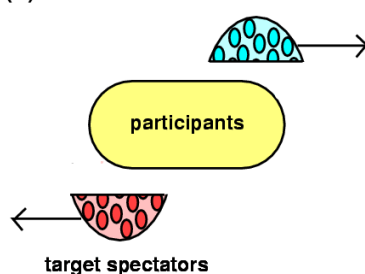
Henger-koordináták:
azimutszög: φ



(a) Centrális ütközés



(b)

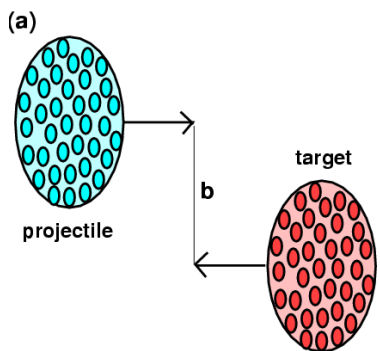


N_{part} : résztvevő nukleonok száma

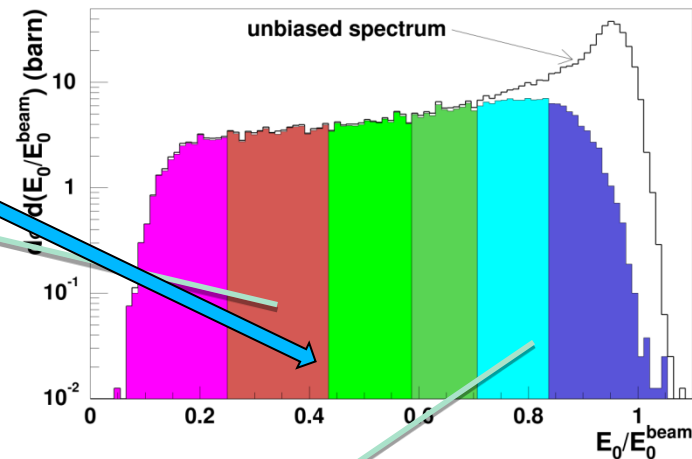
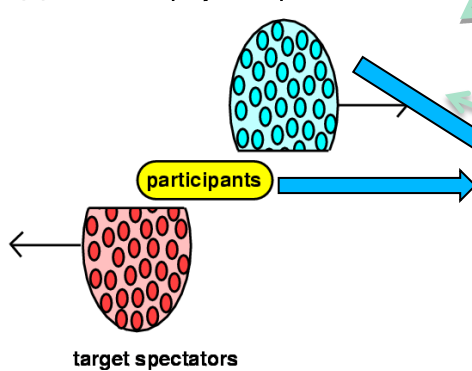
N_{coll} : páronkénti nukleon-nukleon ütközések száma

Gyakran a teljes hatáskeresztmetszet
százalékában adjuk meg

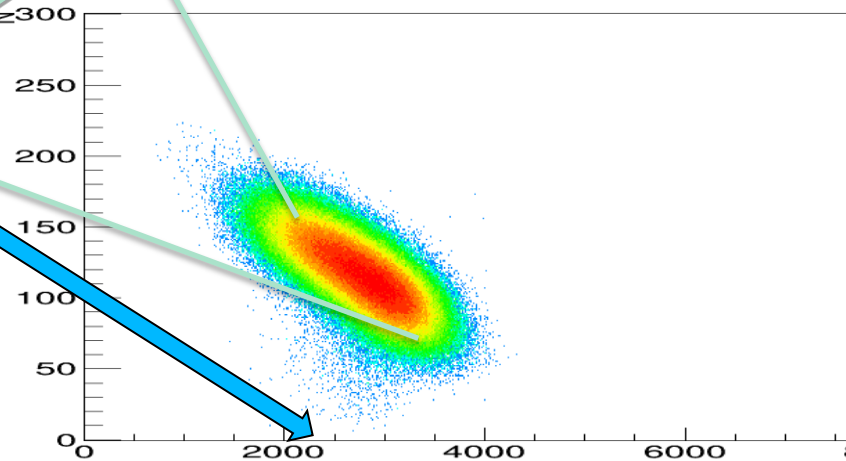
Perifériális ütközés



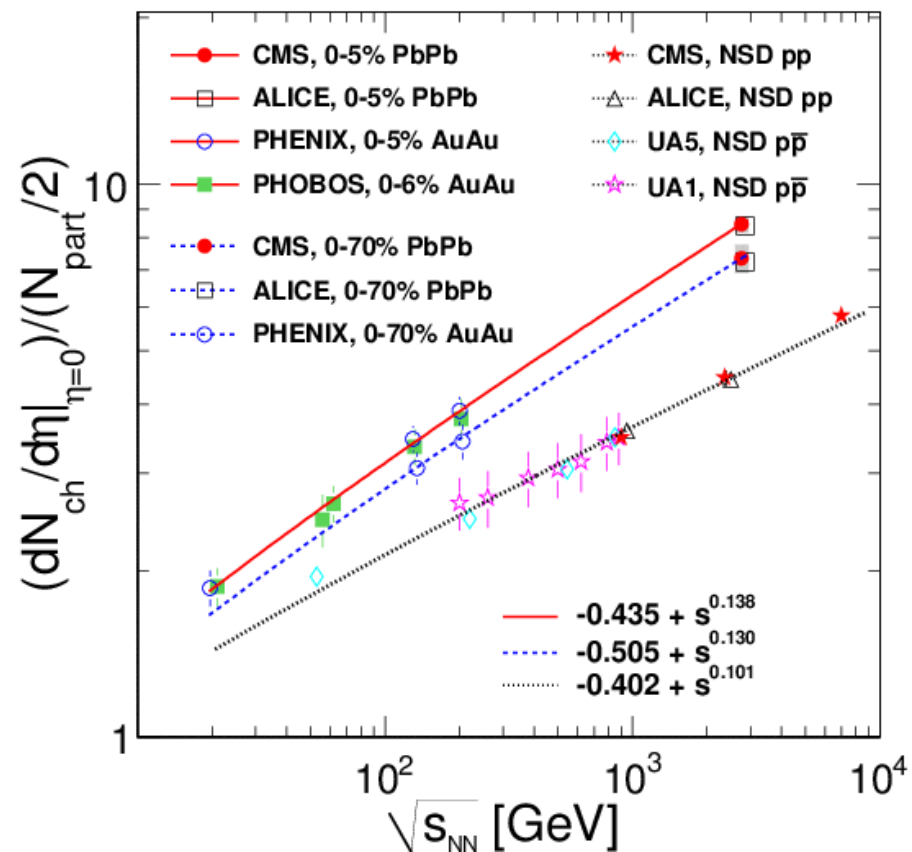
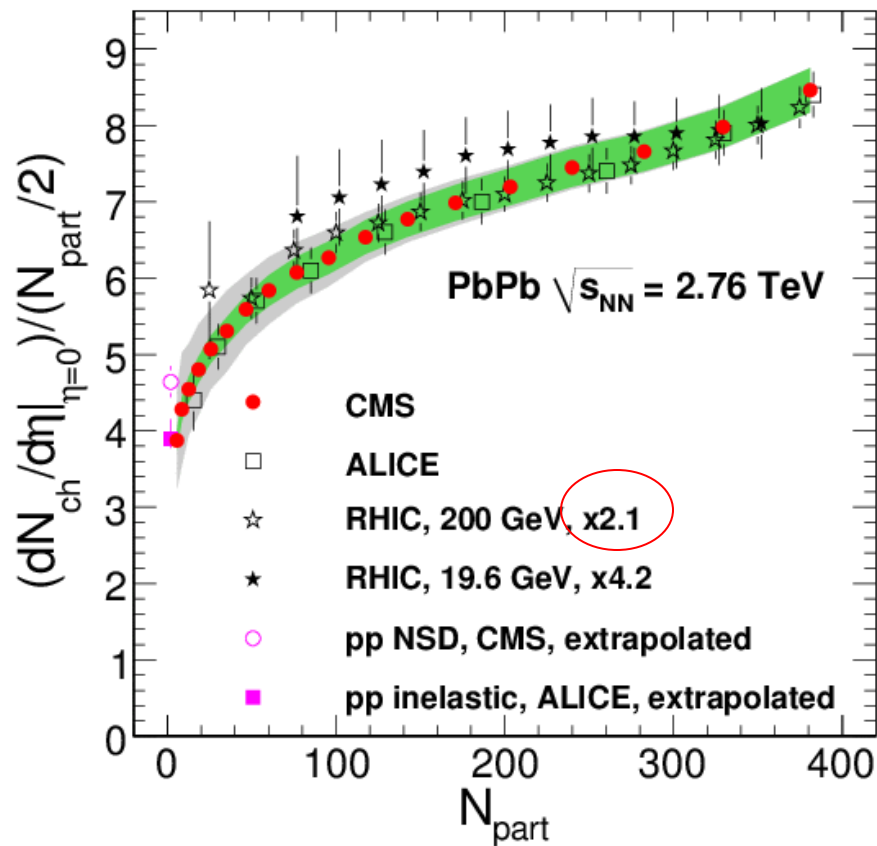
(b)



bin	fraction of cross section	$\langle b(\text{fm}) \rangle$	$\langle N_{part} \rangle$
1	0.05	2.2	362 ± 12
2	0.09	4.6	304 ± 16
3	0.09	5.7	241 ± 16
4	0.09	7.0	188 ± 16
5	0.15	8.5	130 ± 14
6	0.52	10.5	72 ± 8



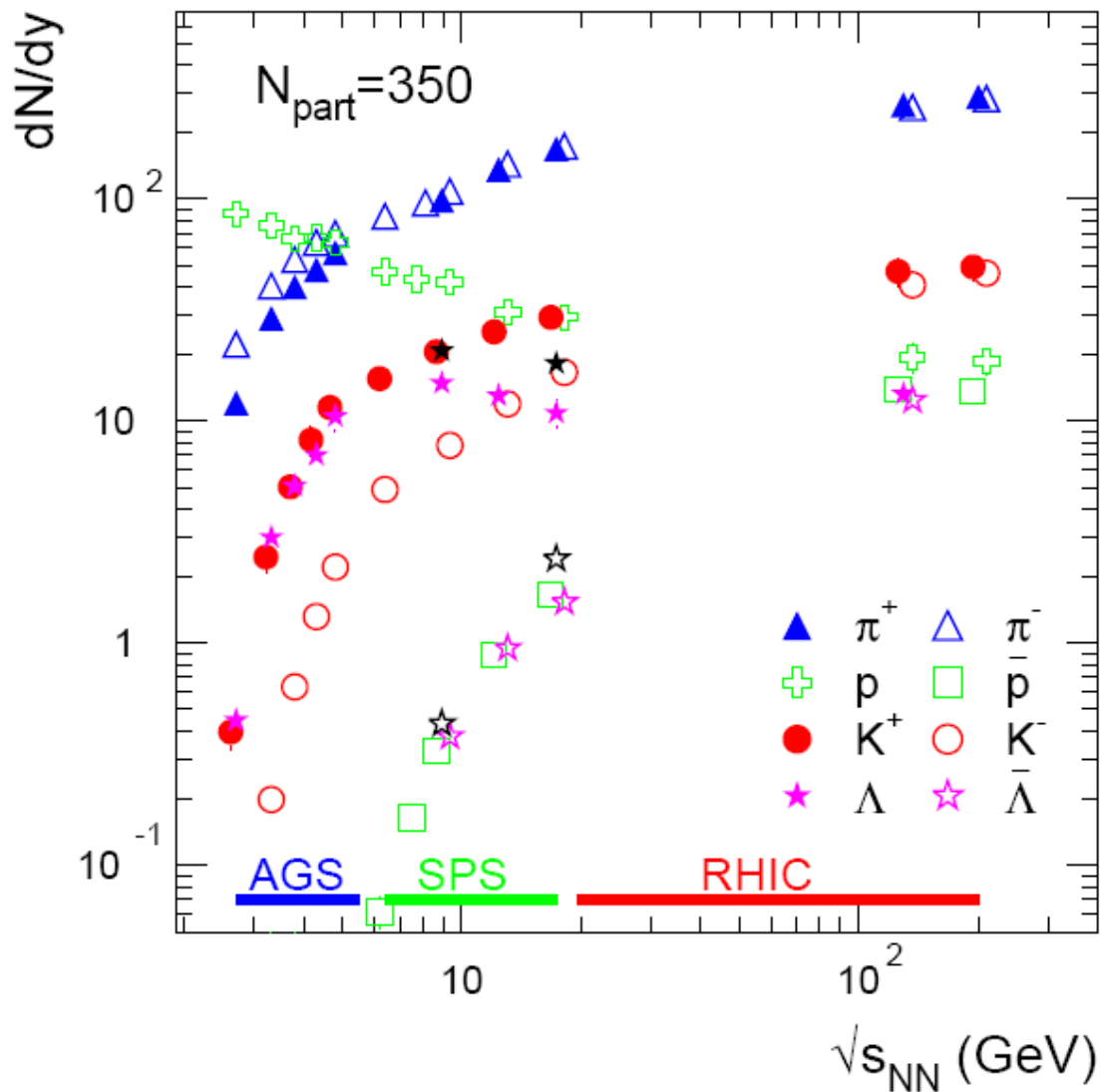
- **Bose-Einstein koreláció alapján**
 - A bozonok szeretnek azonos impulzus állapotba kerülni, és hogy ez mekkora relatív impulzus tartományig hat, az függ a forrás méretétől.
- **Deuteronok és a protonok arányából**
 - Az egymáshoz közeli impulzusú p és n szeret deuteronná egyesülni és ennek a folyamatnak a hatáskeresztmetszete is függ a forrás nagyságától
- A különböző részecskék nyalábra merőleges impulzus eloszlásai és a forrás nagysága és kiterjedésének sebessége között is van egy összefüggés, ami szintén a forrás nagyságától függ



- Centralitás-függés:
 - Hasonló a RHIC eredményeihez

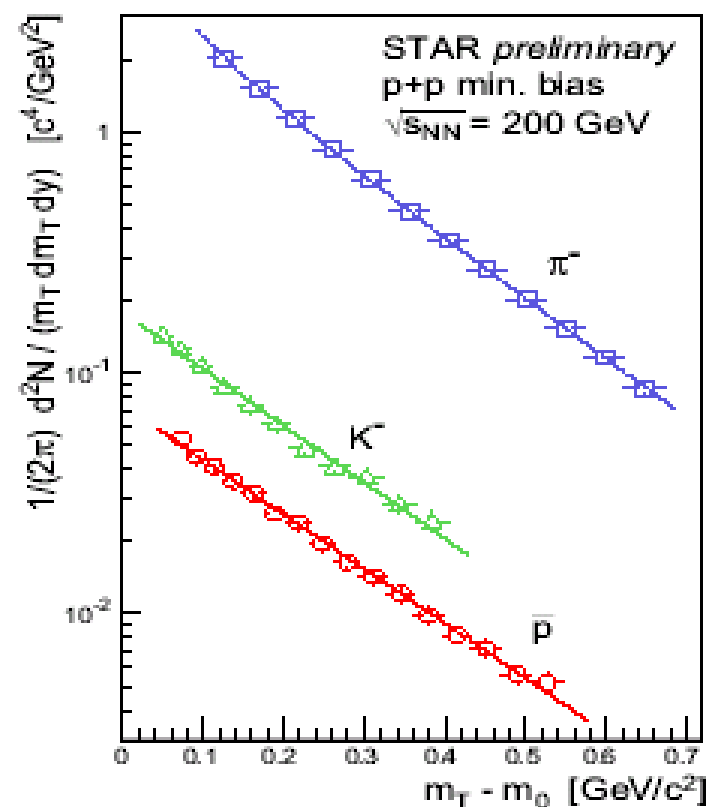
- \sqrt{s} -függés:
 - p+p, Pb+Pb: hatványfüggvény

Energiasűrűség becsülhető, kb. 15 GeV/fm³!

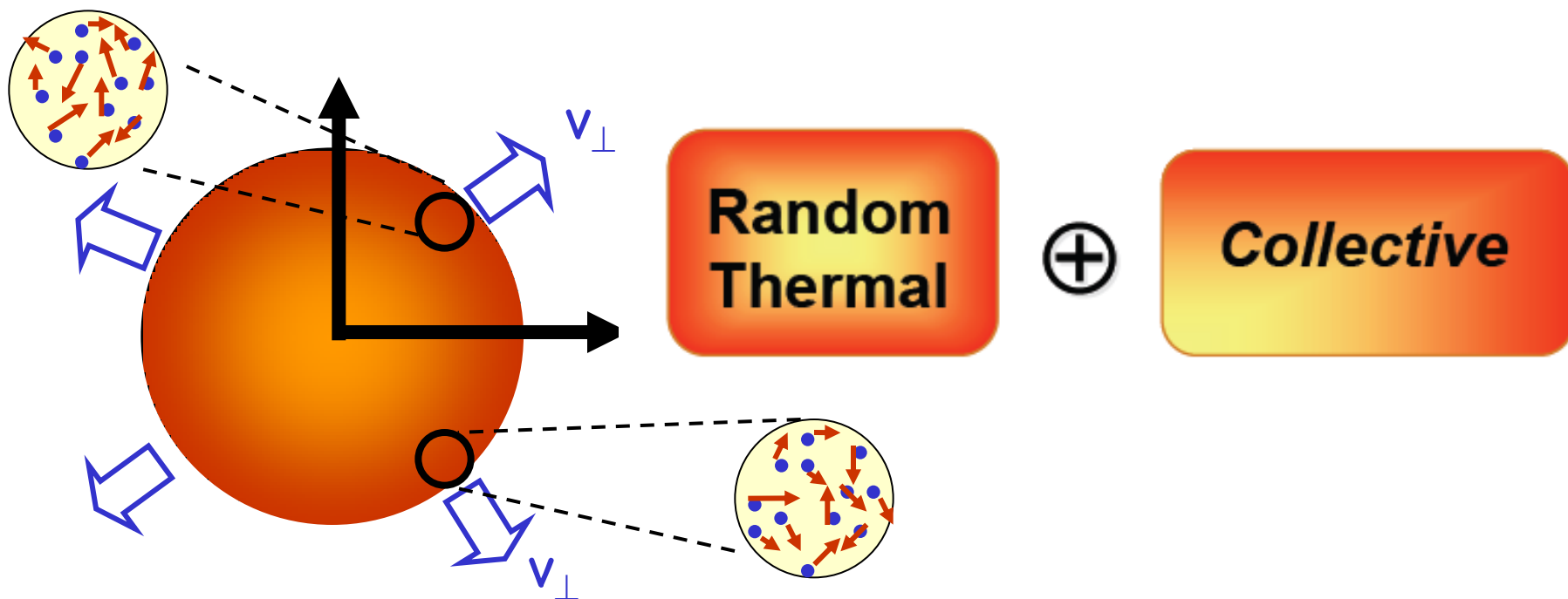


Kis transzverzális impulzusnál termális spektrumokat látunk (proton-proton ütközésekben)

$$\frac{dN}{m_T dm_T} \propto e^{-\frac{m_T}{T_{slope}}} \Rightarrow \frac{dN}{dm_T} \propto m_T e^{-\frac{m_T}{T_{slope}}}$$



- Információt hordoz az anyagon belüli kölcsönhatások erősségéről.
- Hogyan mérhető?
 - Részecske korelációkkal
- Mivel jellemezhető?
 - Folyási sebességgel
 - Folyási irányokkal
 - A reakciósíkhöz képesti szögeloszlással

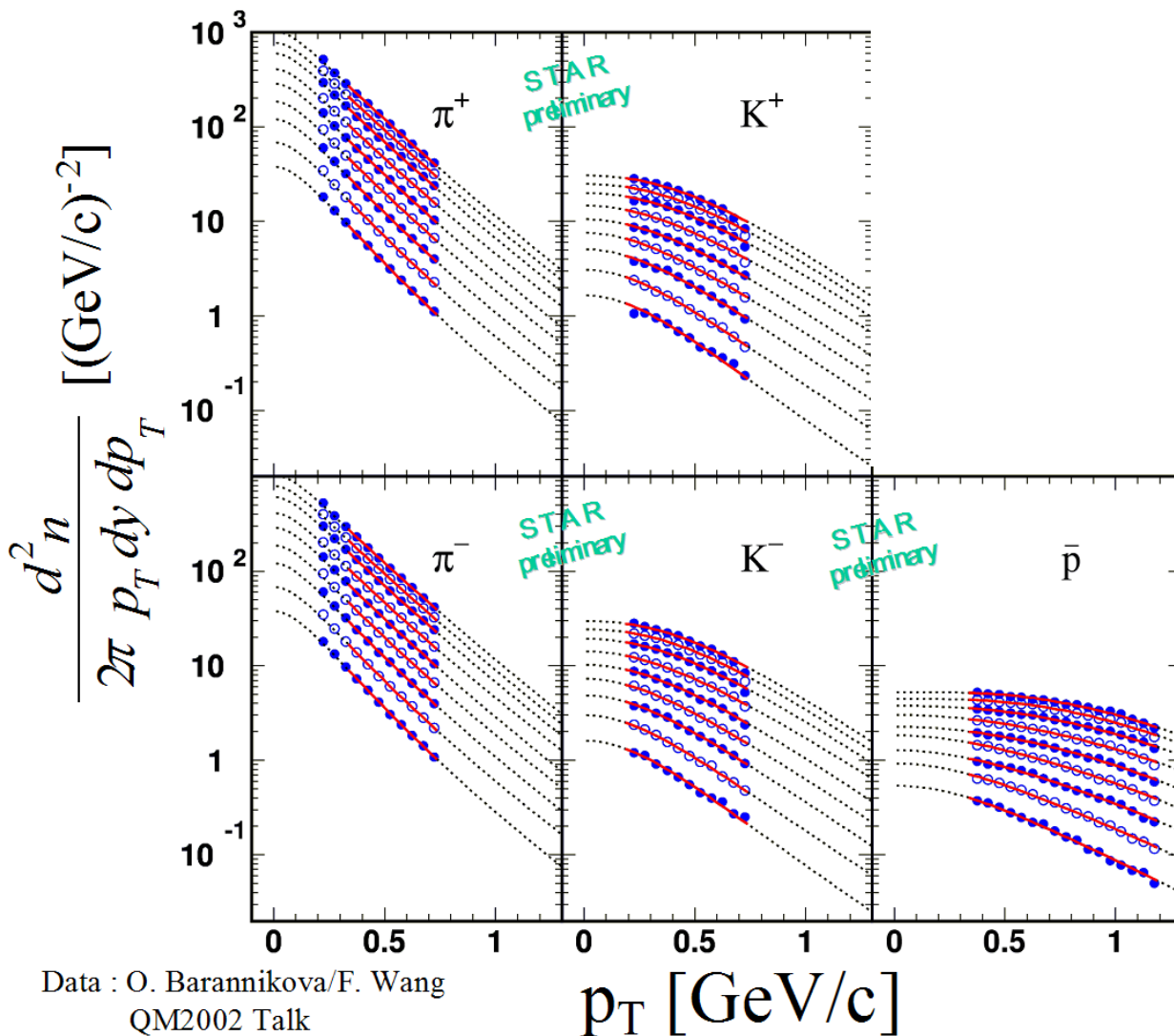


A kollektív mozgás ráakódik a termális mozgásra

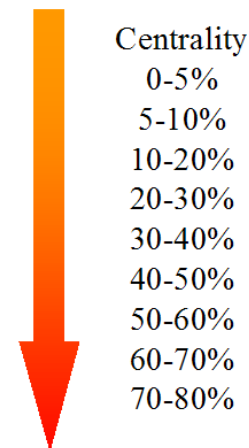
A kialakuló nagy nyomás miatt

Tehát fontos a különböző tömegű részecskék mérése

Ütközési energiával nő a radiális folyás sebessége (0.5-0.7c)



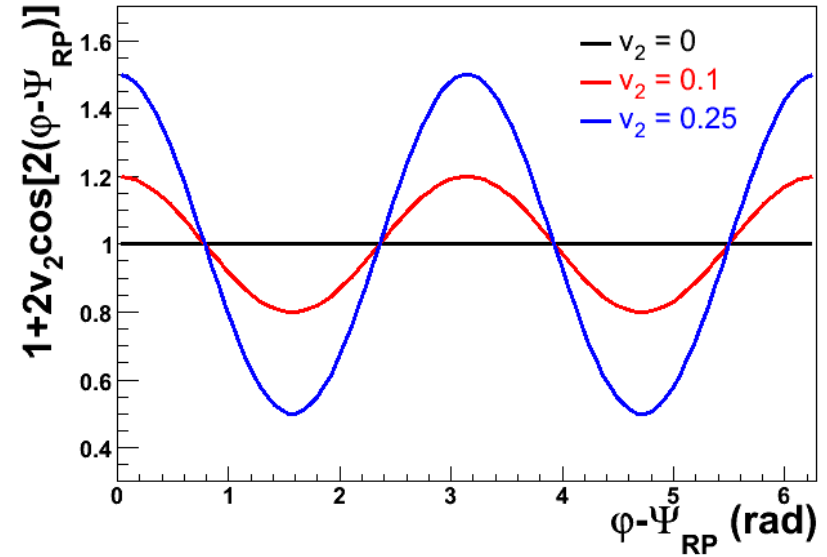
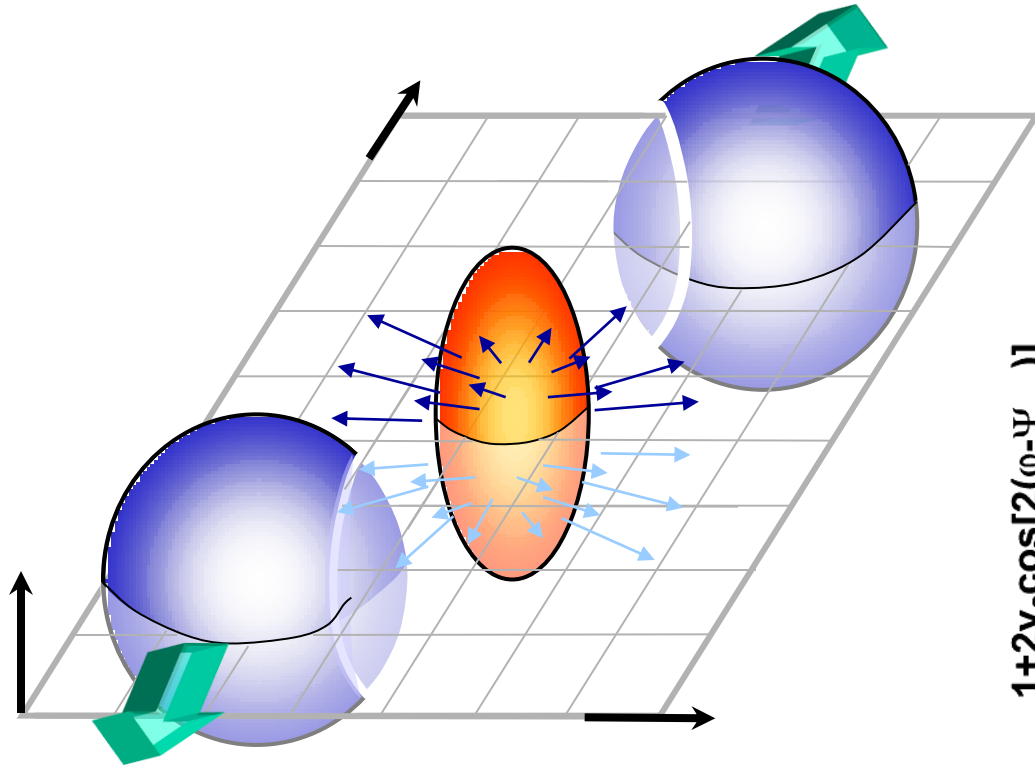
$$T_{slope} = T_{fo} + \frac{1}{2} m v_{\perp}^2$$



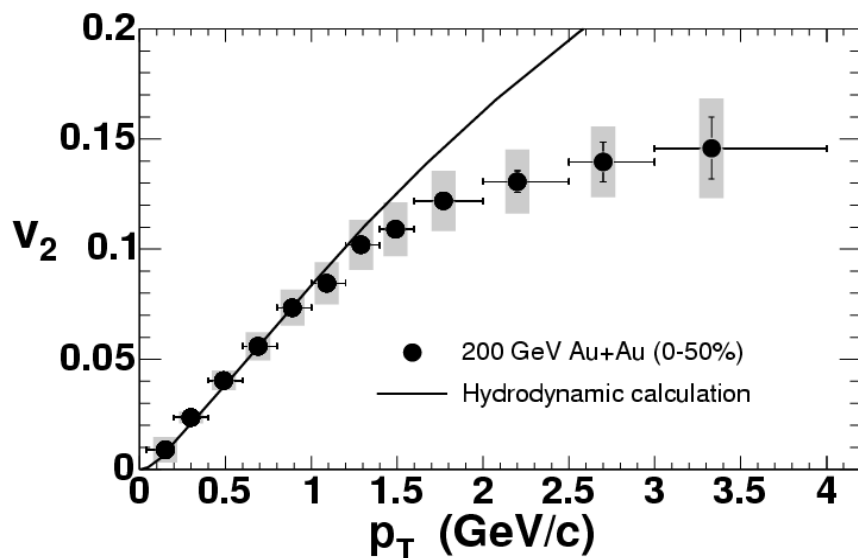
- Centrality
- 0-5%
 - 5-10%
 - 10-20%
 - 20-30%
 - 30-40%
 - 40-50%
 - 50-60%
 - 60-70%
 - 70-80%

Data : O. Barannikova/F. Wang
QM2002 Talk

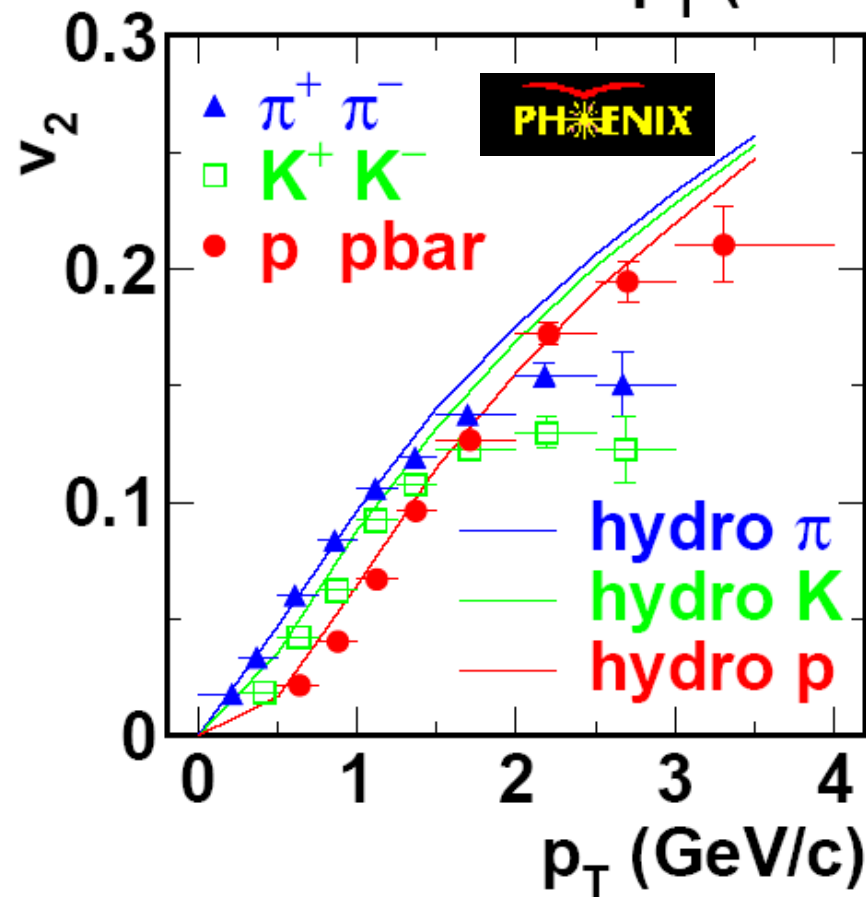
p_T [GeV/c]



$$\frac{dN}{d(\varphi - \Psi_{RP})} = \frac{N_0}{2\pi} \left(1 + 2v_1 \cos(\varphi - \Psi_{RP}) + 2v_2 \cos(2(\varphi - \Psi_{RP})) + \dots \right)$$

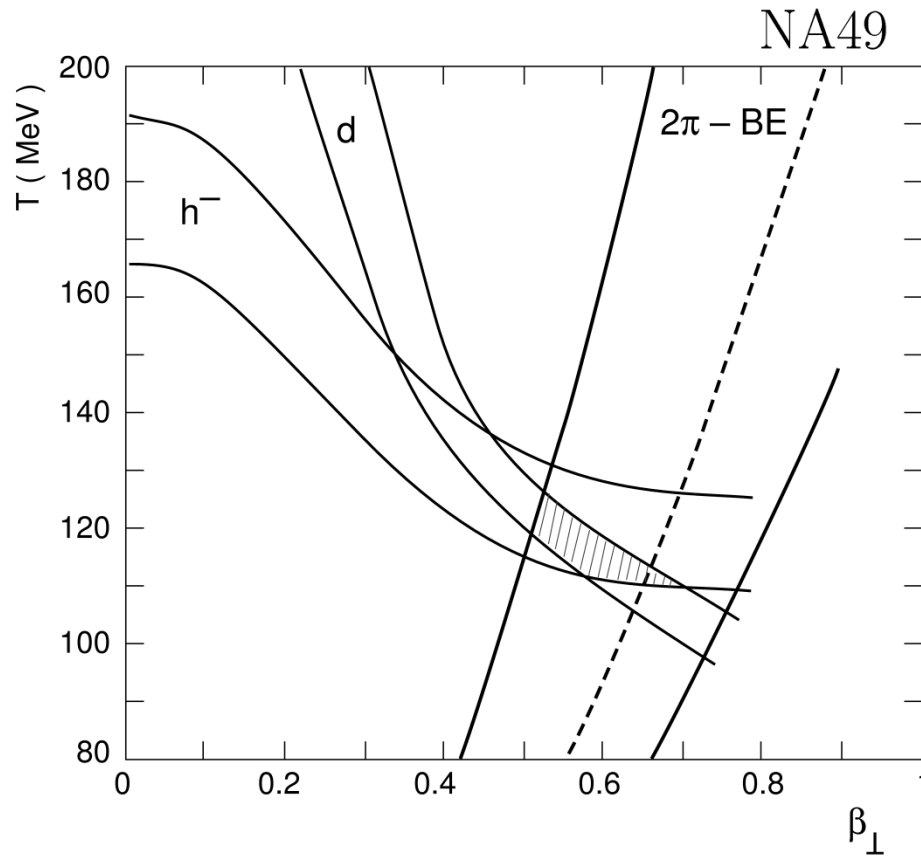


Nagy p_T : a részecskék gyorsan kiszöknek, nincs termalizáció



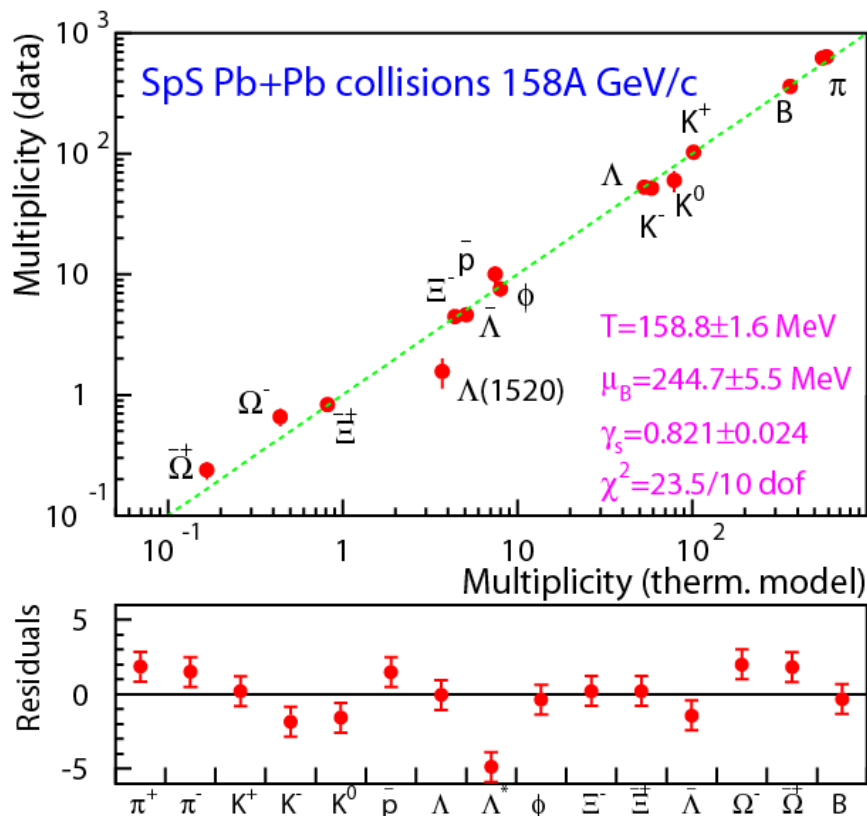
A hidrodinamikai modellek jól leírják a tömegfüggést is

A tűzgolyó hőmérséklete



Felületen a tágulási sebesség

- Kezdeti állapot: energia sűrűség $\varepsilon \approx 3 \text{ GeV/fm}^3$ [NA49, PRL 75(1995)3814]
- Végállapot: kémiai egyensúlyban lévő hadron gáz



Becattini et al. PRC 69(2004) 024905

- Kifagyási paraméterek SPS-nél:

$$T_{\text{chem}} \approx 160 \text{ MeV}$$

$$\mu_B \approx 240 \text{ MeV}$$

$$(\gamma_S \approx 0.8)$$

- RHIC:

$$T_{\text{chem}} \approx 160 \text{ MeV}$$

$$\mu_B \approx 30 - 50 \text{ MeV}$$

- LHC:

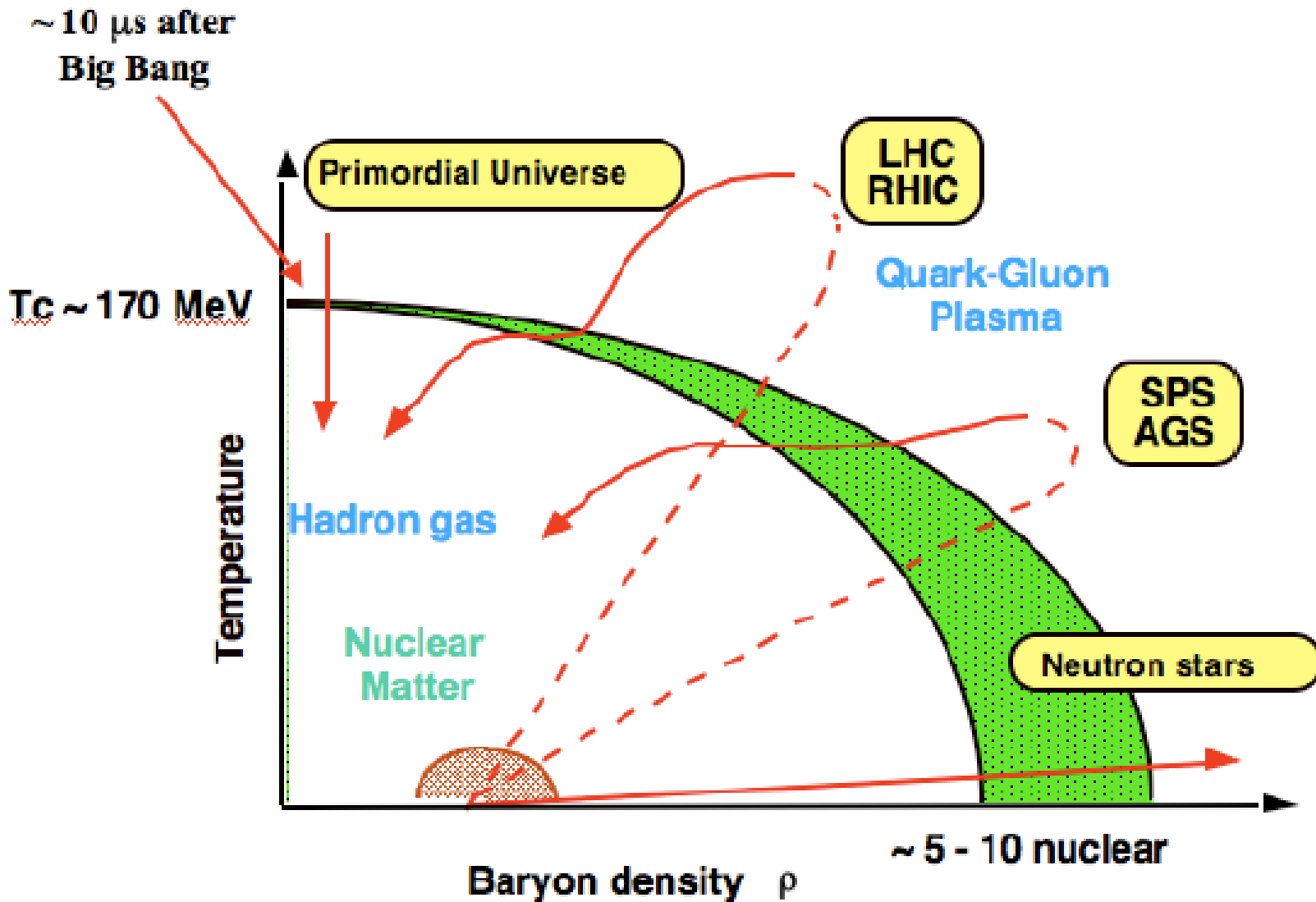
$$T_{\text{chem}} \approx 164 \text{ MeV}$$

A hadronizáció a fázis átmenethez közel történik

Direkt fotonokkal mért kezdeti hőmérséklet:

$$\text{LHC: } T = 304 \pm 51 \text{ MeV}$$

$$\text{RHIC: } T = 221 \pm 19 \pm 19 \text{ MeV}$$



Hadronkeltés hatáskeresztmetszeteit mértük meg 20-158 GeV/n

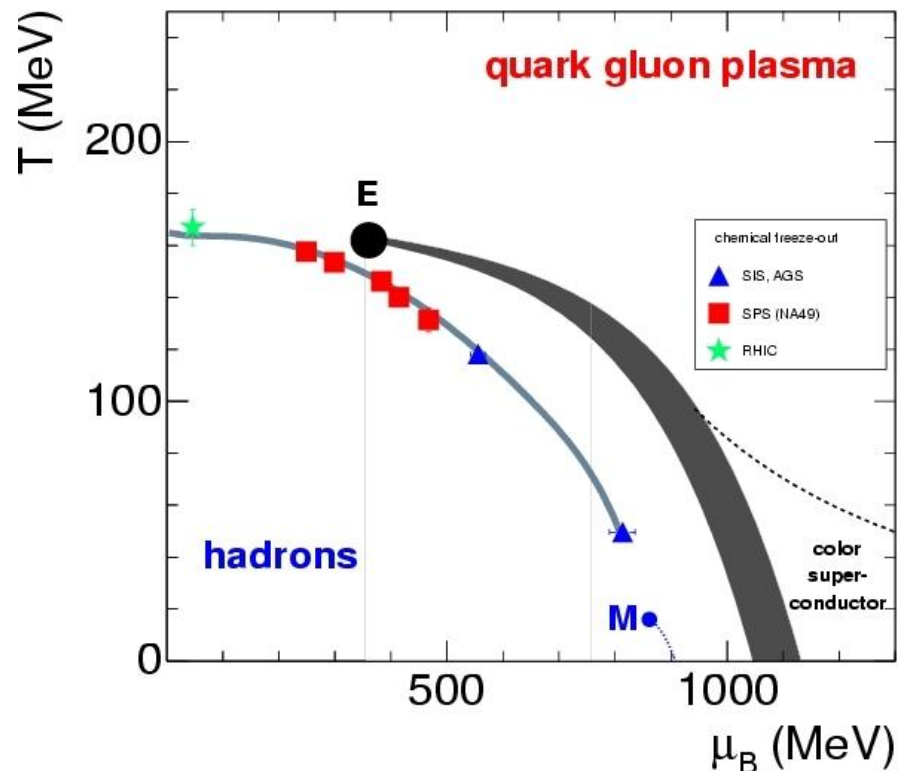
→ (T, μ_B) a hadrokémiai kifagyásnál

Új program a kritikus pont kísérleti kimutatása:

- Fluktuációk mérésével a bombázó energia és atommag függvényében

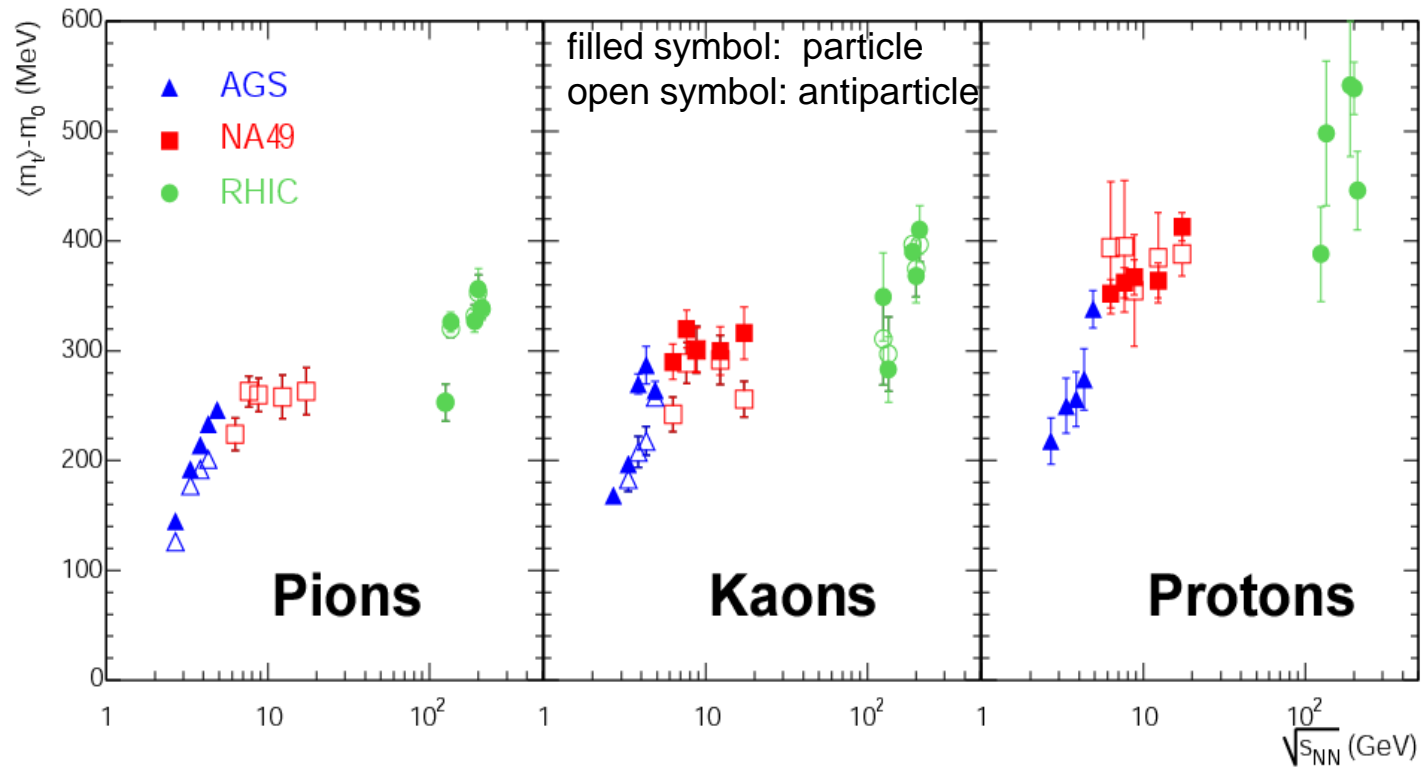
NA61/SHINE

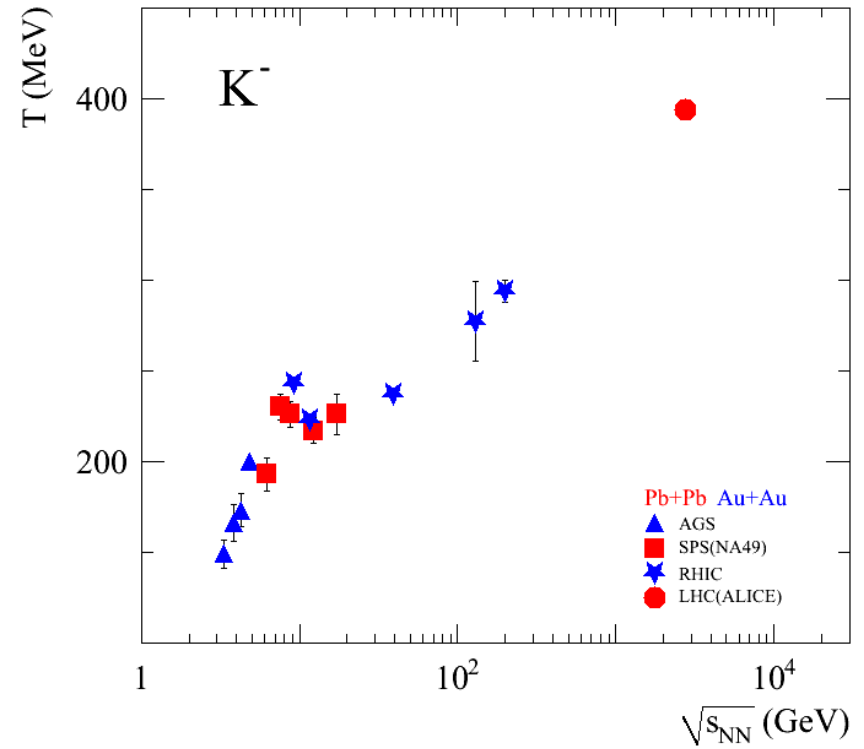
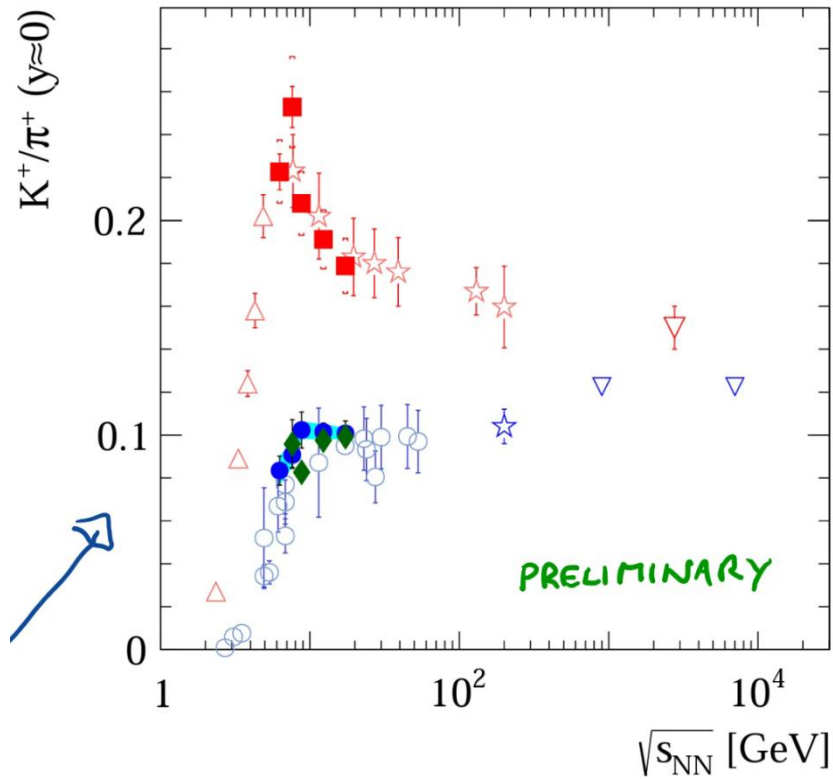
- A deconfinementet hol érzük el? Az SPS-nél vagy a RHIC-nél?
- Alacsony SPS energiáknál
 - Csökkenő hőmérséklet
 - növekvő barion sűrűség
 - (depart from phase boundary)



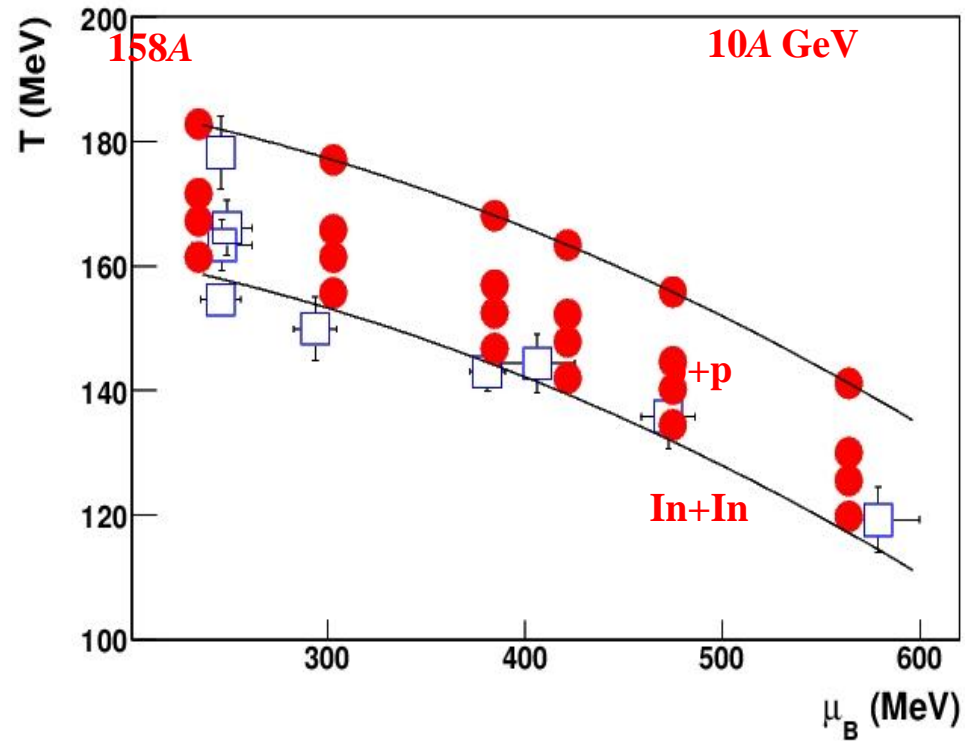
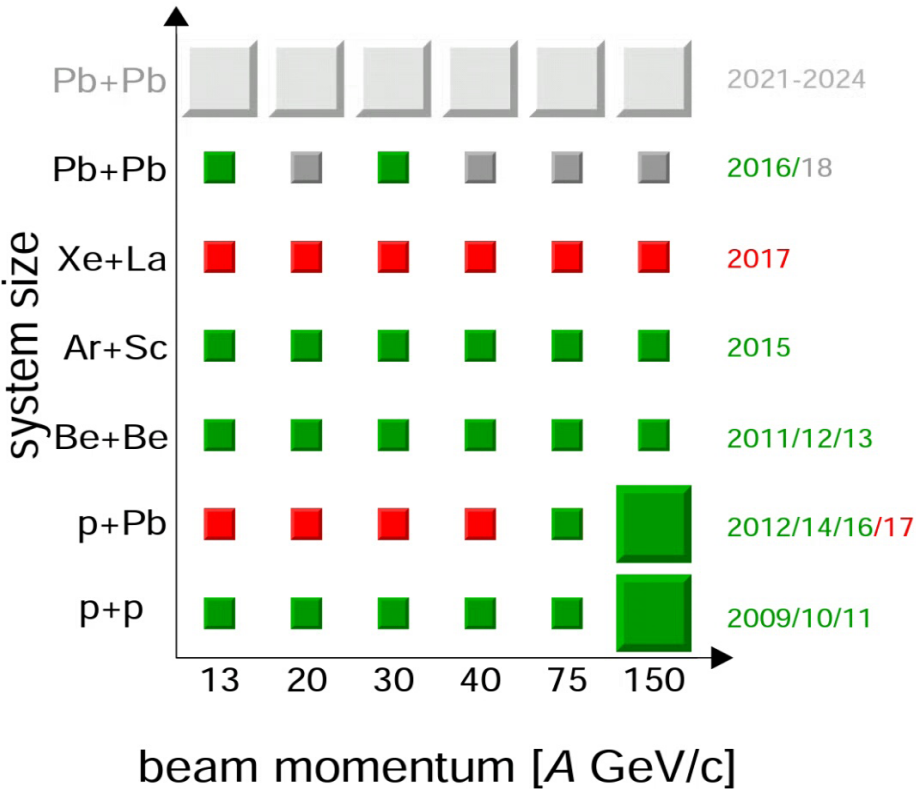
Kritikus pont (E): Fodor and Kratz, Hadron Gas(γ_s): J. Manninen et al., Grey band: elsőrendű fázisátalakulás]

- az $\langle m_t \rangle$ energiafüggésében is változás figyelhető meg az alacsonyabb SPS energiáknál





NA61 tervezett mérései

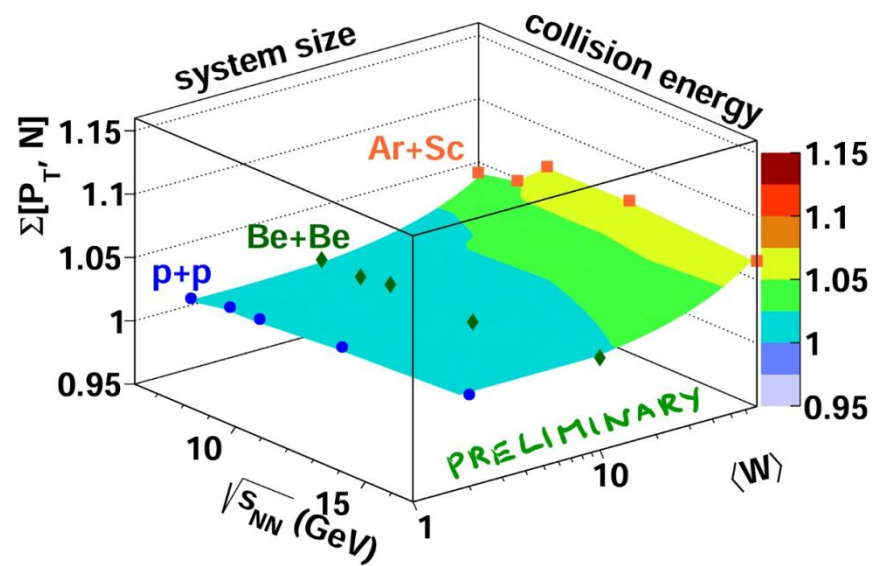
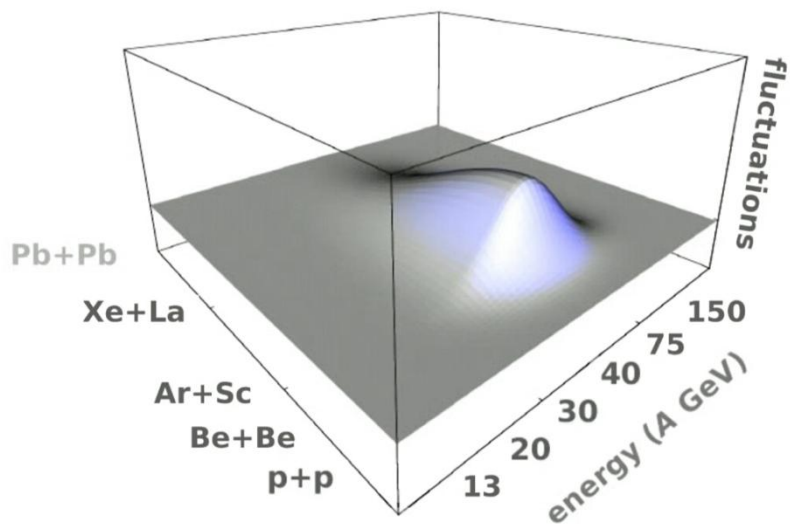


Azt várjuk, hogy, kritikus pont környékén megnőnek a fluktuációk

Fluctuations and CP: Stephanov, Rajagopal, Shuryak, Phys. Rev. D 60, 114028

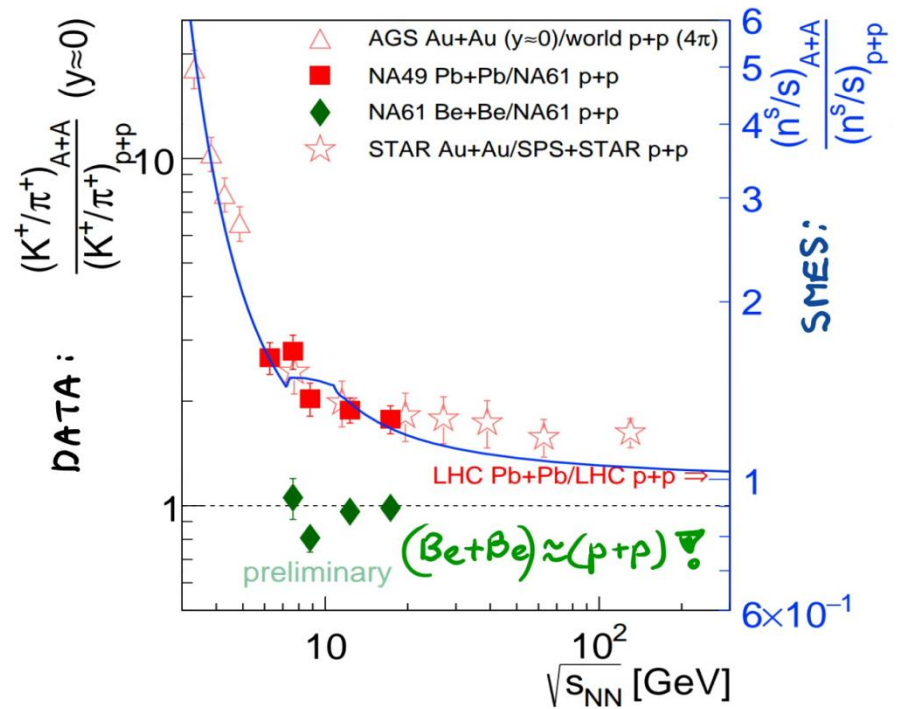
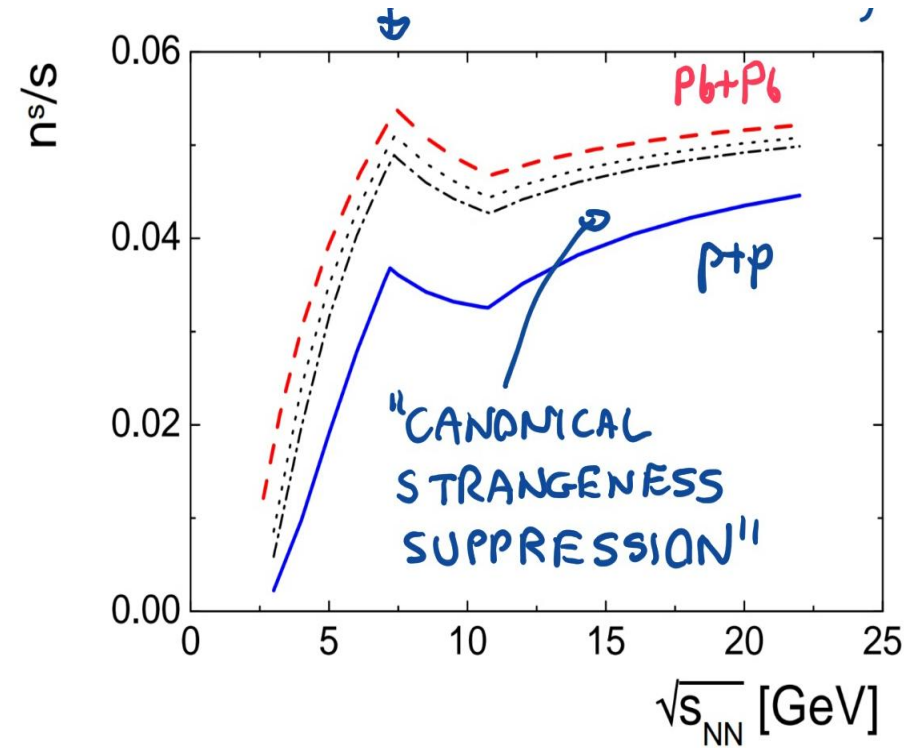
Freeze-out points: Becattini et al., Phys. Rev. C 73, 044905

Milyen mennyiségek flutuációját vizsgáltuk?
 Részecskeszám egy adott fázistérben
 Különböző részecskék száma
 Az eseményen belüli átlagos p_T

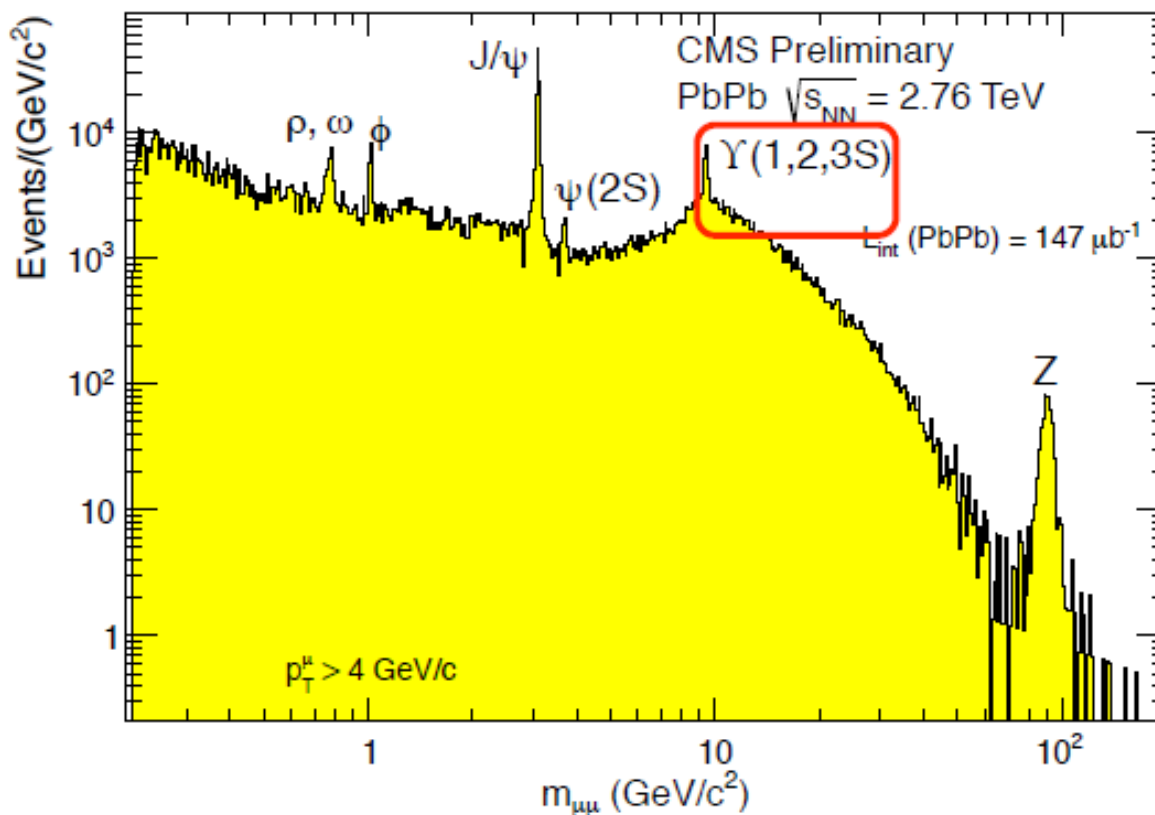


Statisztikai model számítás

Fázisátalakulás



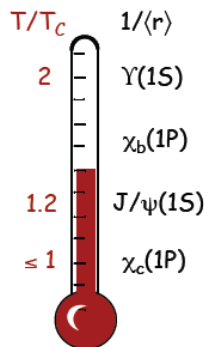
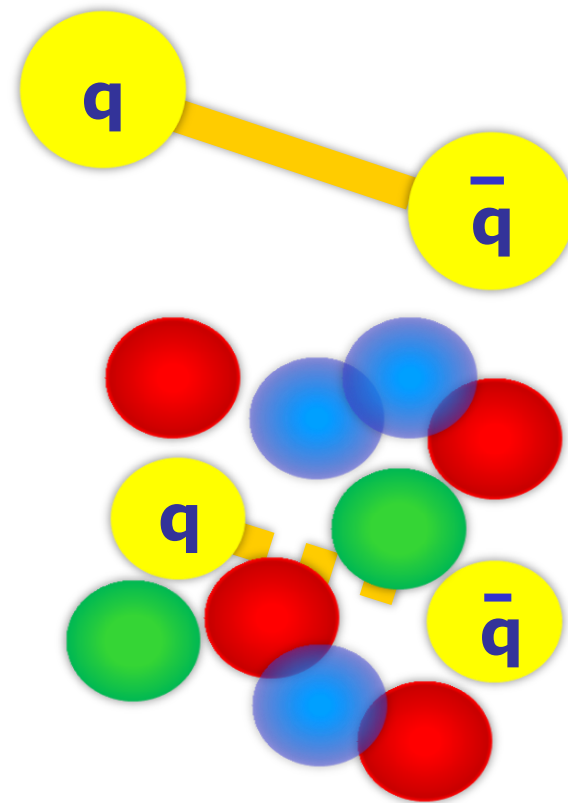
Feltételezzük, hogy $K^+/\pi^+ = a \cdot (n_s/s) + b$



Az ütközés korai szakasza
 Nem hatnak erősen kölcsön

$$V(r) = -\frac{\alpha}{r} + kr$$

$$V(r) = -\frac{\alpha}{r} e^{-r/\lambda_D}$$

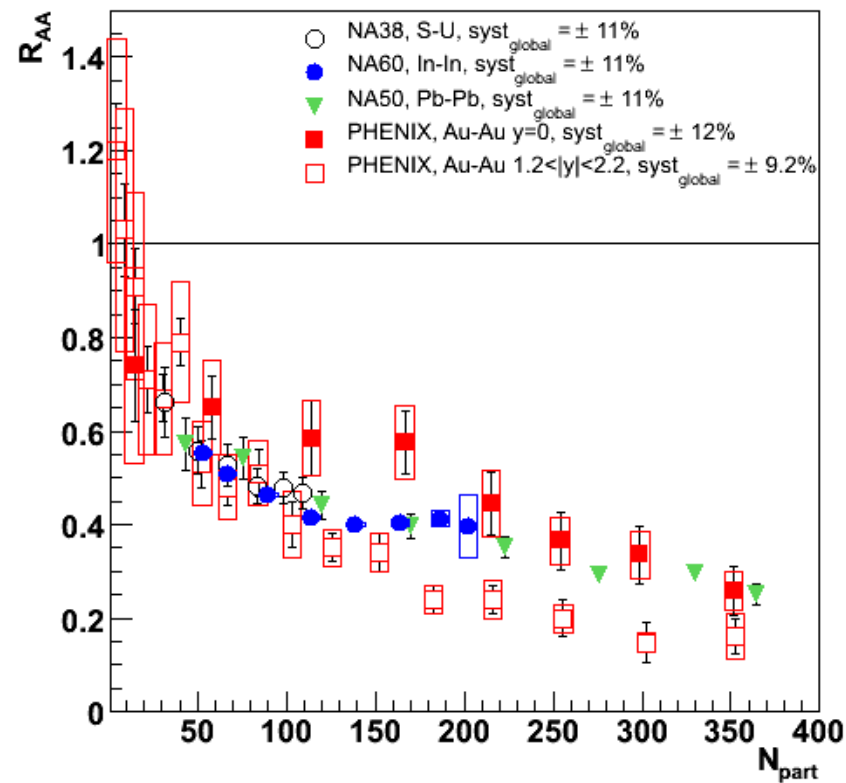


λ_D : a kötött állapot maximális mérete,
Hőmérséklet növelésével csökken
(de: regeneráció)

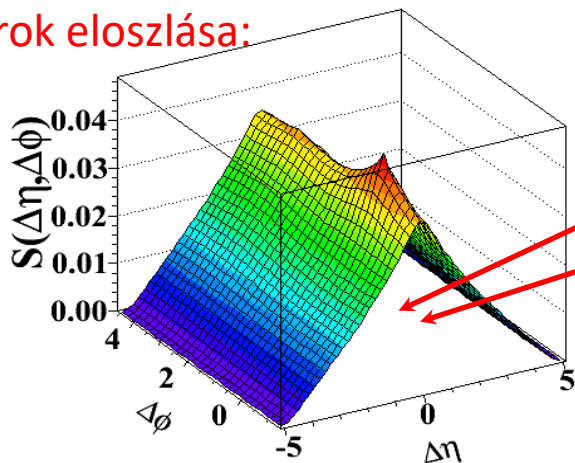
Összehasonlítás p+p ütközésekkel:

Ha nincs módosulás,
akkor $R_{AA}=1$

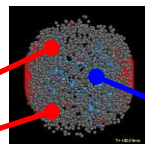
SPS \approx RHIC...
rekombináció?



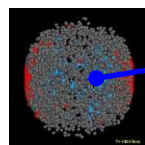
Jel-párok eloszlása:



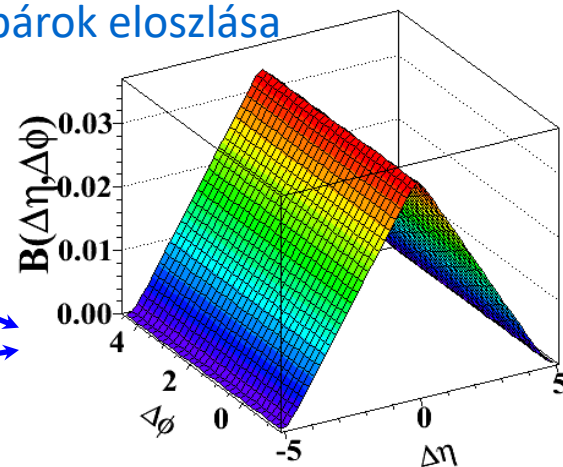
Event 1



Event 2



Háttér-párok eloszlása



$$S(\Delta\eta, \Delta\phi) = \frac{1}{N_{trig}} \frac{d^2 N^{same}}{d\Delta\eta d\Delta\phi}$$

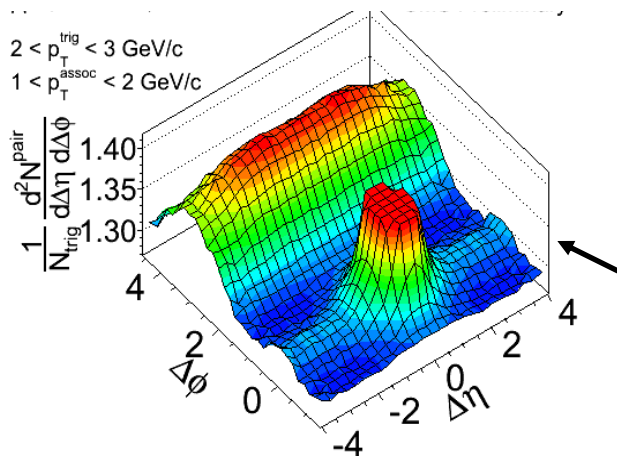
$$B(\Delta\eta, \Delta\phi) = \frac{1}{N_{trig}} \frac{d^2 N^{mix}}{d\Delta\eta d\Delta\phi}$$

$$\Delta\eta = \eta_1 - \eta_2$$

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$$

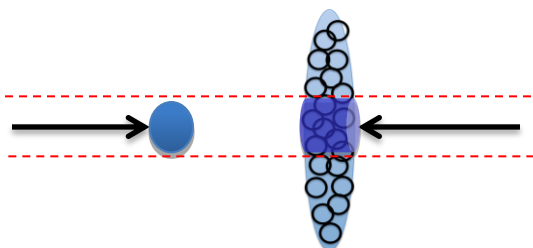
High multiplicity pp ($N > 110$) $\sqrt{s} = 7 TeV$

$2 < p_T^{trig} < 3 GeV/c$
 $1 < p_T^{assoc} < 2 GeV/c$



Az asszociált hadronok triggerenkénti száma:

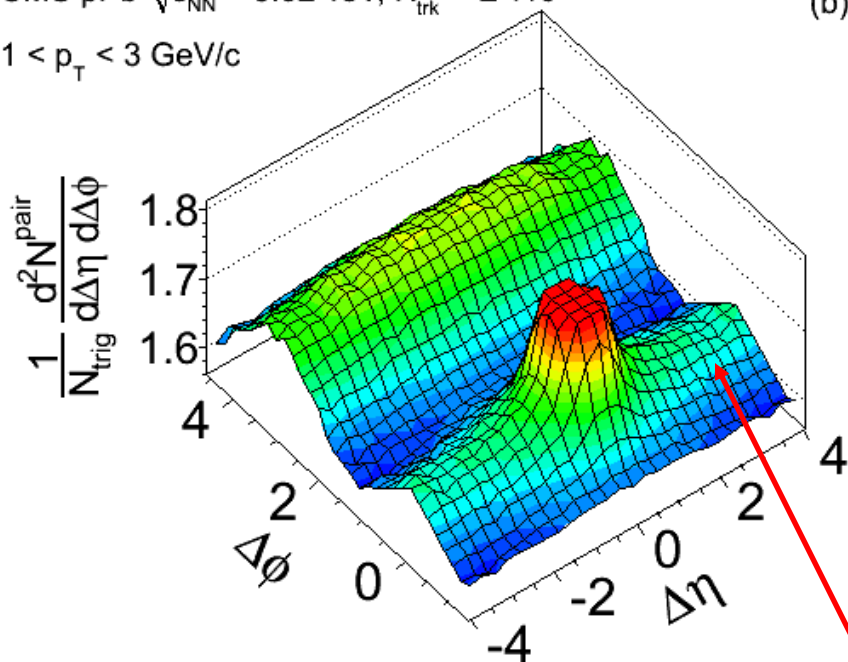
$$\frac{1}{N_{trig}} \frac{d^2 N^{pair}}{d\Delta\eta d\Delta\phi} = B(0,0) \times \frac{S(\Delta\eta, \Delta\phi)}{B(\Delta\eta, \Delta\phi)}$$



A fizikai magyarázat még nem teljesen tisztázott

CMS pPb $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, $N_{trk}^{offline} \geq 110$
 $1 < p_T < 3$ GeV/c

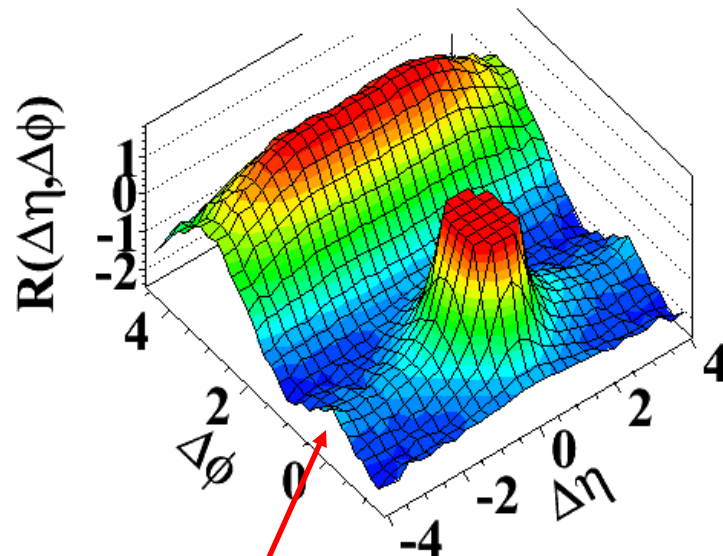
(b)



$N \equiv$ a töltött részecskék száma ($p_T > 0.4$ GeV/c)

p+p 7 TeV

(d) $N > 110$, $1.0 \text{ GeV}/c < p_T < 3.0 \text{ GeV}/c$



Sokkal nagyobb mint p+p ütközésekben

- NA61, SPS gyorsító:
 - kritikus pont keresése, kvark-kiszabadulás kutatása
- PHENIX, RHIC gyorsító:
 - tökéletes folyadék vizsgálata, energia-scan, stb.
- ALICE, LHC gyorsító:
 - kiváló részecske-azonosítás
- CMS, LHC:
 - kiváló jet, (di)müon, foton, korrelációs mérési lehetőségek

- A nehézion-fizika az anyag új fázisával foglalkozik
 - Alacsony energián a fázisátmenettel
 - LHC energián a QGP tulajdonságaival
- Az elmélet kevesebb támpontot ad mint a részecskefizikában megszoktuk, de ez a szép benne.
- A kísérletek sokszor nem várt eredményeket adnak
- A magyar részvétel nemzetközi szinten is jelentős