

Bevezetés a nehézion fizikába

Fodor Zoltán

KFKI-Részecske és Magfizikai
Kutató Intézet

A világmindenség fejlődése

- 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?

- 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.

De hogyan lehet ezt tanulmányozni?

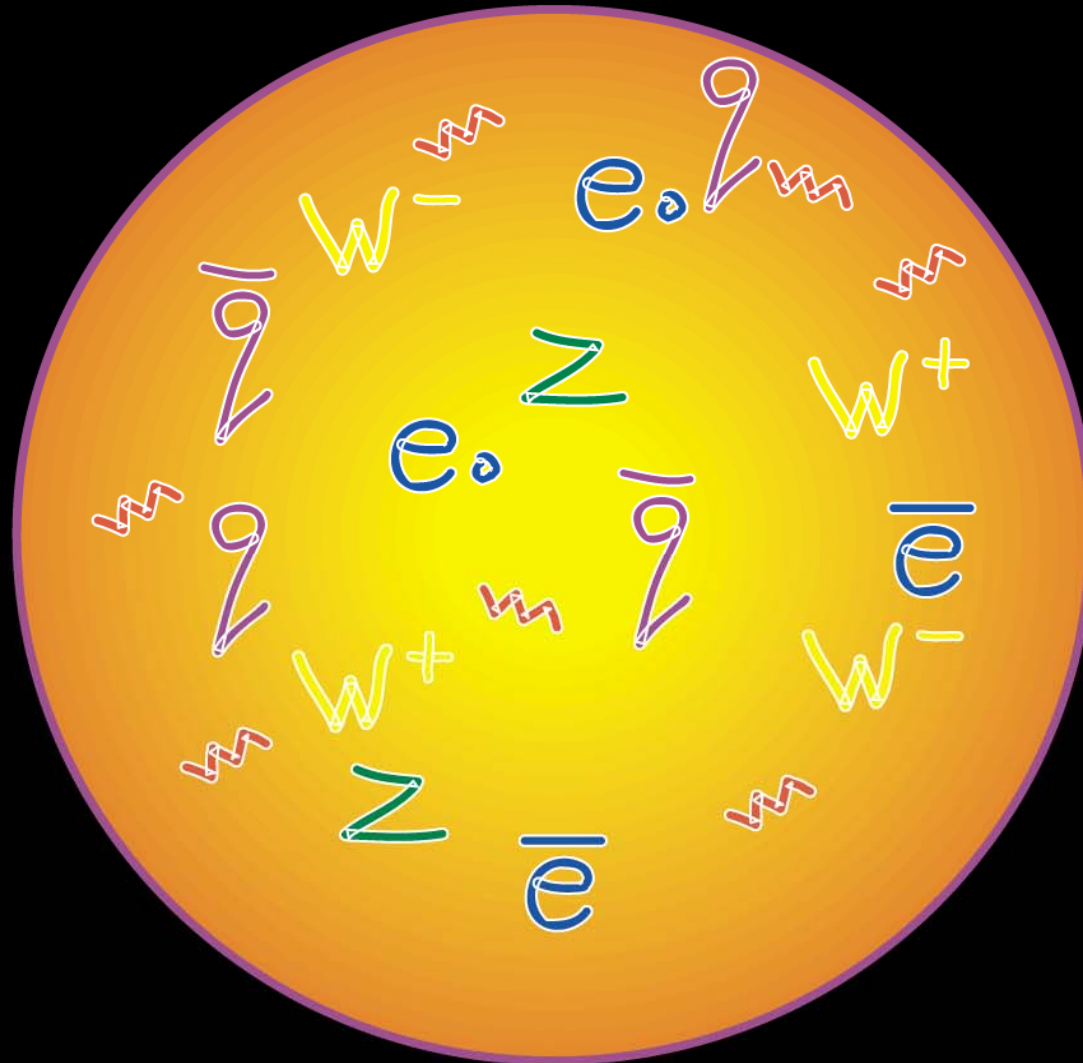
Visszafelé is végrehajtható-e?

10^{-43} seconds



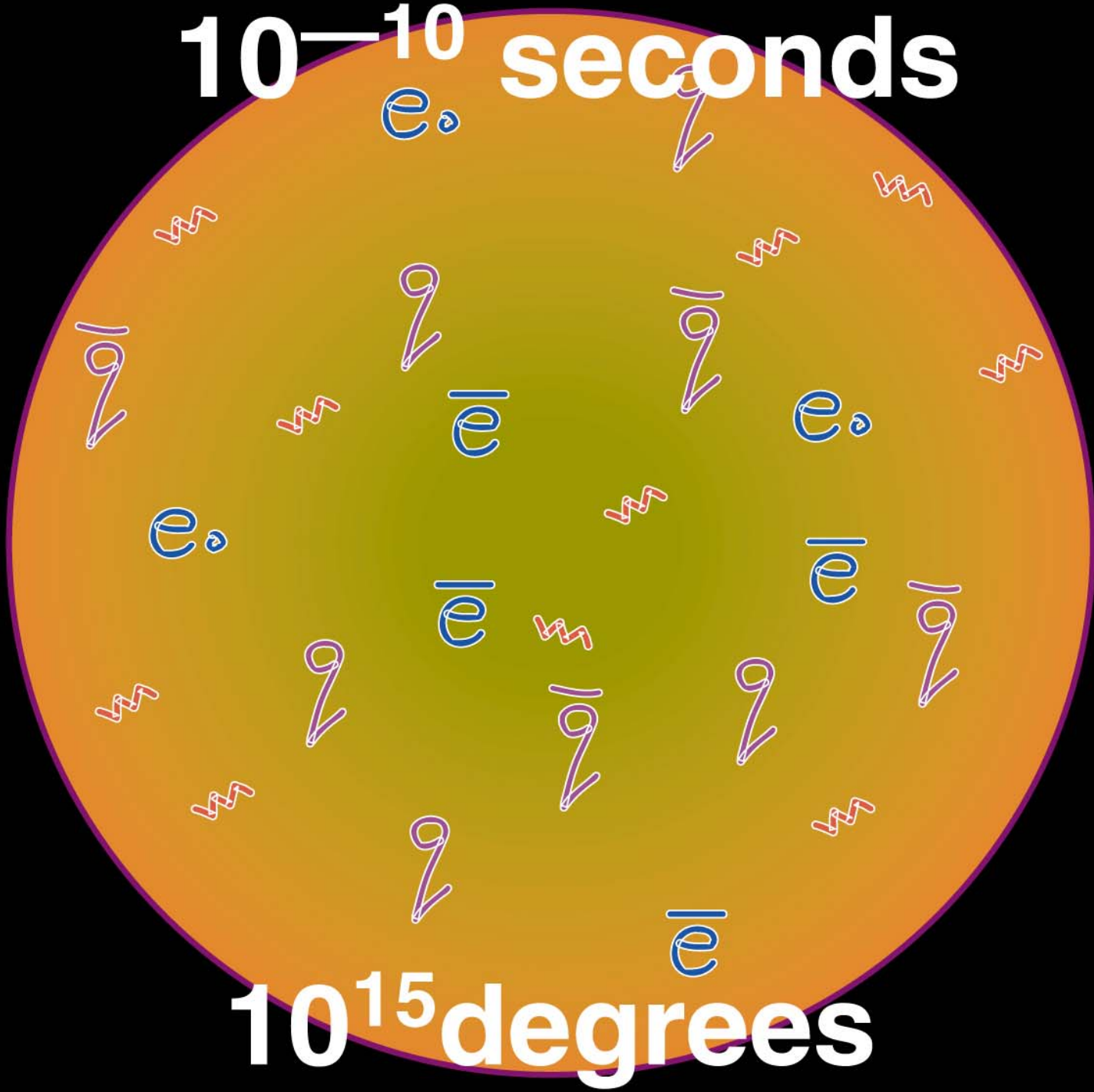
10^{32} degrees

10^{-34} seconds



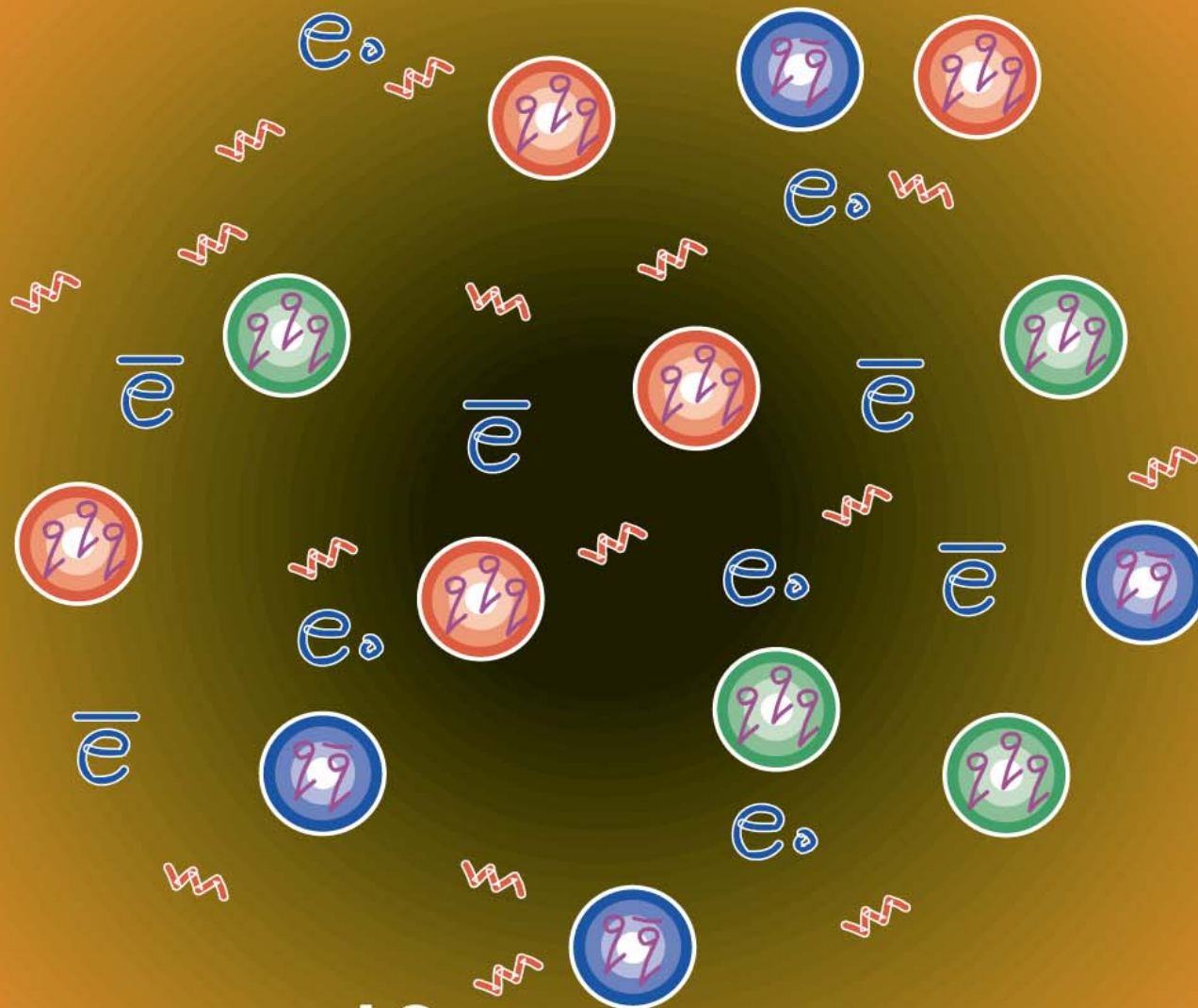
10^{27} degrees

10^{-10} seconds



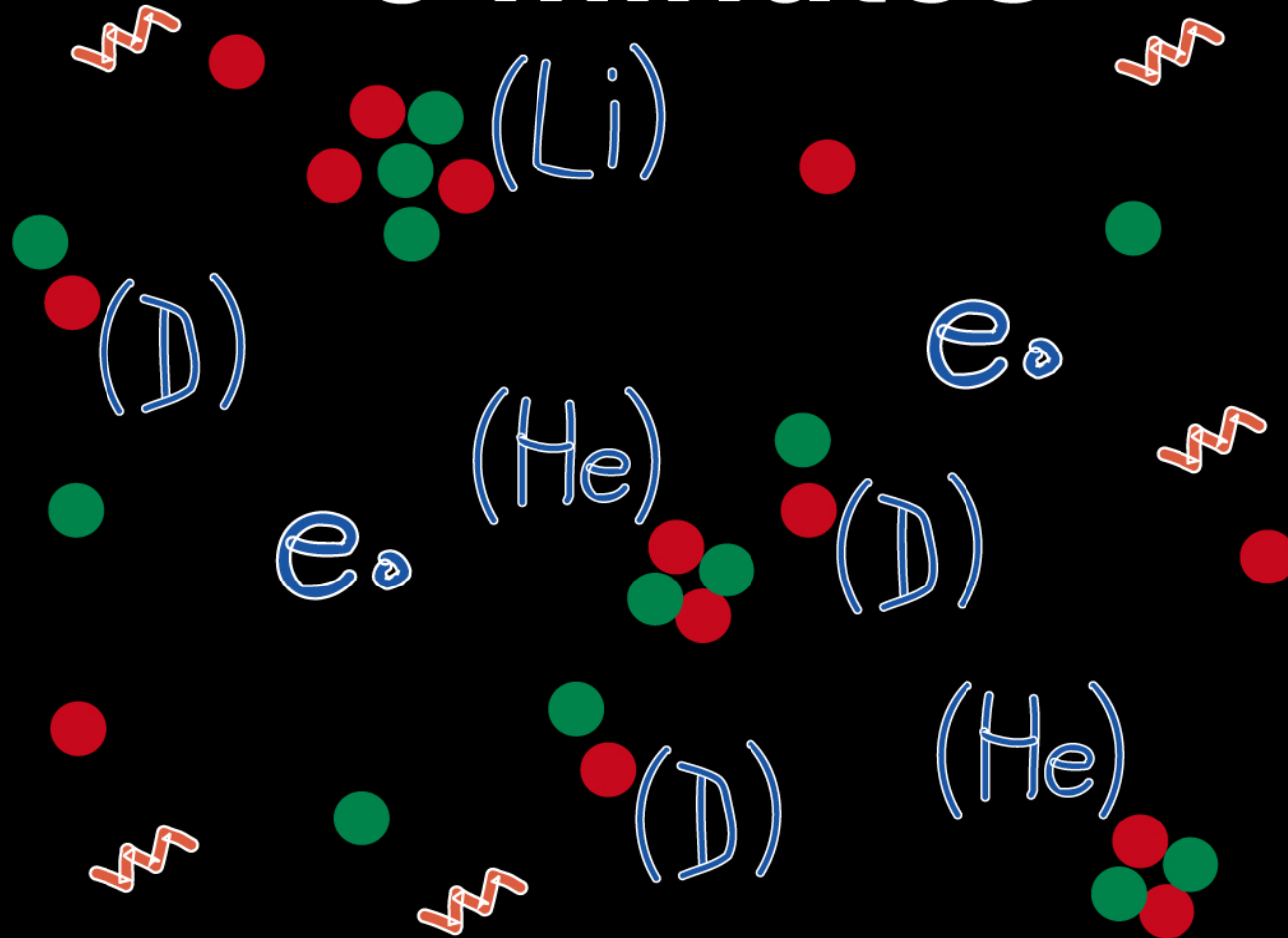
10^{15} degrees

10^{-5} second



10^{10} degrees

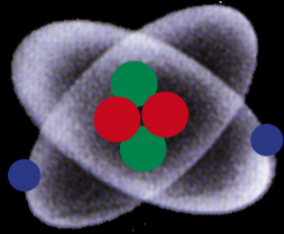
3 minutes



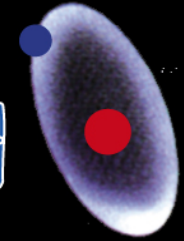
10^9 degrees

300 thousand
years

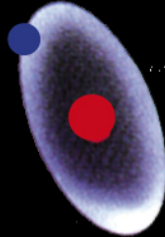
He



H



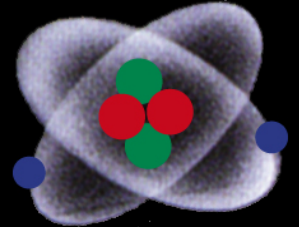
H



D



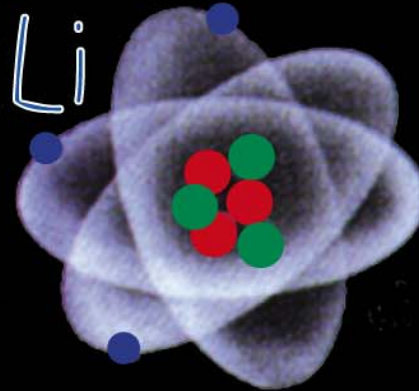
He



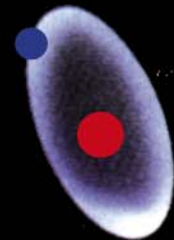
D



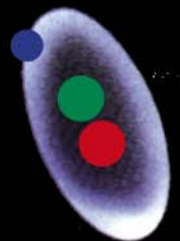
Li



H

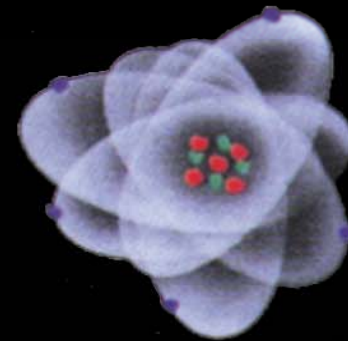


D



6000 degrees

**1 thousand
million years**



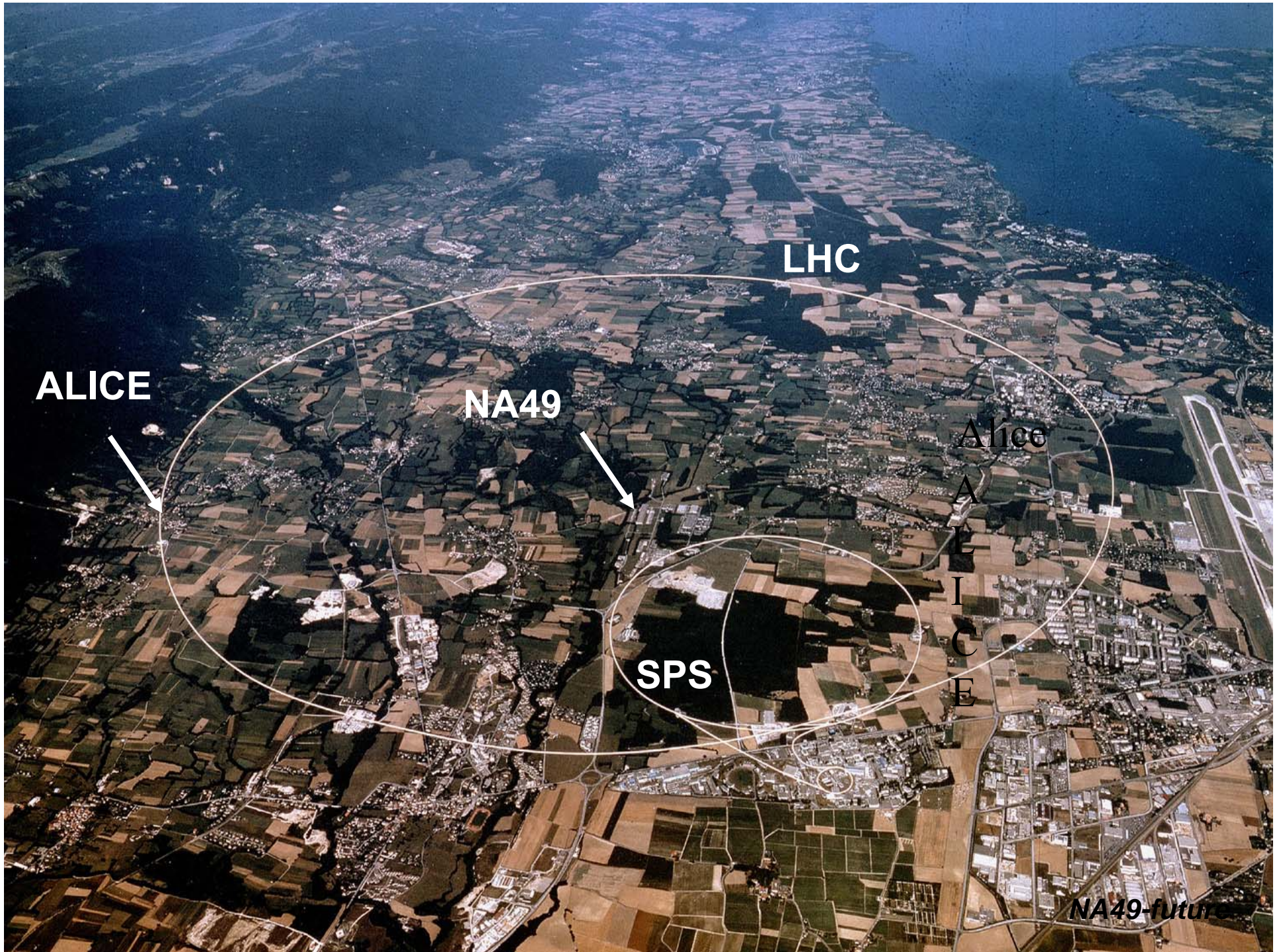
18 degrees

Tanulmányozási módszerek

- 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.

Nehézion gyorsítók

Helye	Max energia/nukleon	üzembeállítás
GSI, Darmstadt	1.5 GeV	1991
AGS, Brookhaven	9 GeV	1992
CERN SPS, Genf	160 GeV	1994
RHIC, Brookhaven	20.000 GeV	2000
CERN, LHC	14.500.000 GeV	2008/9
FLAIR, Darmstadt	45 GeV	2015



LHC

ALICE

NA49

SPS

Alice
A
L
I
C
E

NA49-future

Kitűzött feladatok

- Alacsonyabb energiákon:
 - Állapotegyenlet $\rho(p)$ meghatározása
 - Új, a stabilitási vonaltól távol eső atommagok előállítása
- Magasabb energiákon:
 - Állapotegyenletnek a $\rho(T)$ és $\rho(p)$ meghatározása
 - Az új fajtájú anyag előállítása, amit **Q**uark **G**luon **P**lazmának nevezünk
 - A fázisátalakulási görbék meghatározása

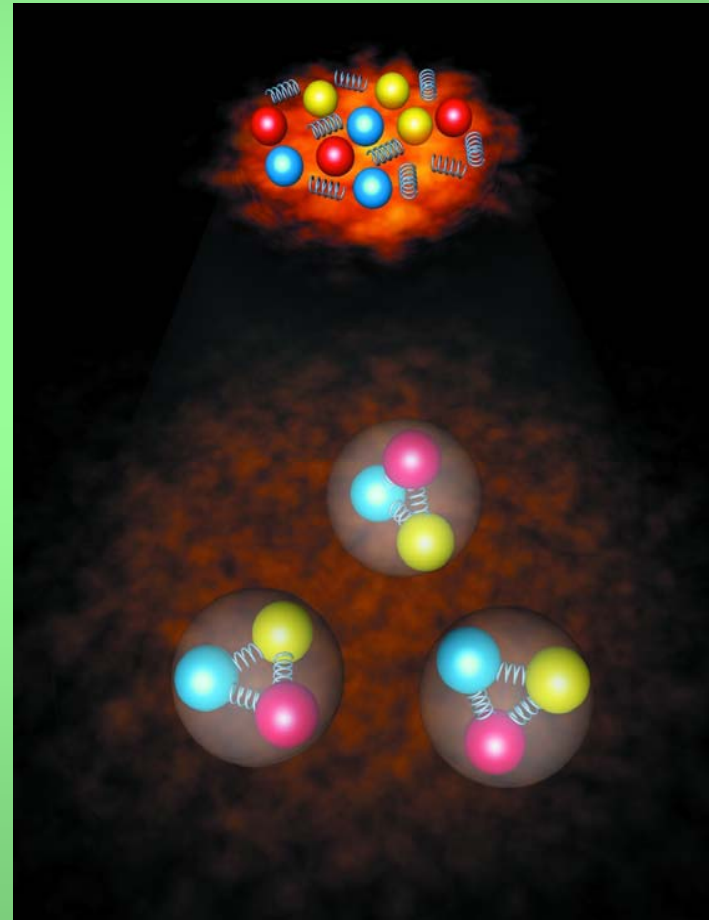
Mérési módszerek

- Ütközési paraméter
 - A nem kölcsönható anyagrész mennyiségének mérése
 - Az ütközésben keletkezett részecskék számának mérése
- A keletkezett tűzgömb geometriai nagysága
 - Azonos típusú részecskék eloszlásából
- A tűzgömb hőmérséklete
 - A keletkezett részecskék nyalábra merőleges irányú impulzus eloszlása
- Kémiai összetétele
 - A keletkezett részecskék fajtájának eloszlása

A víz fázisai



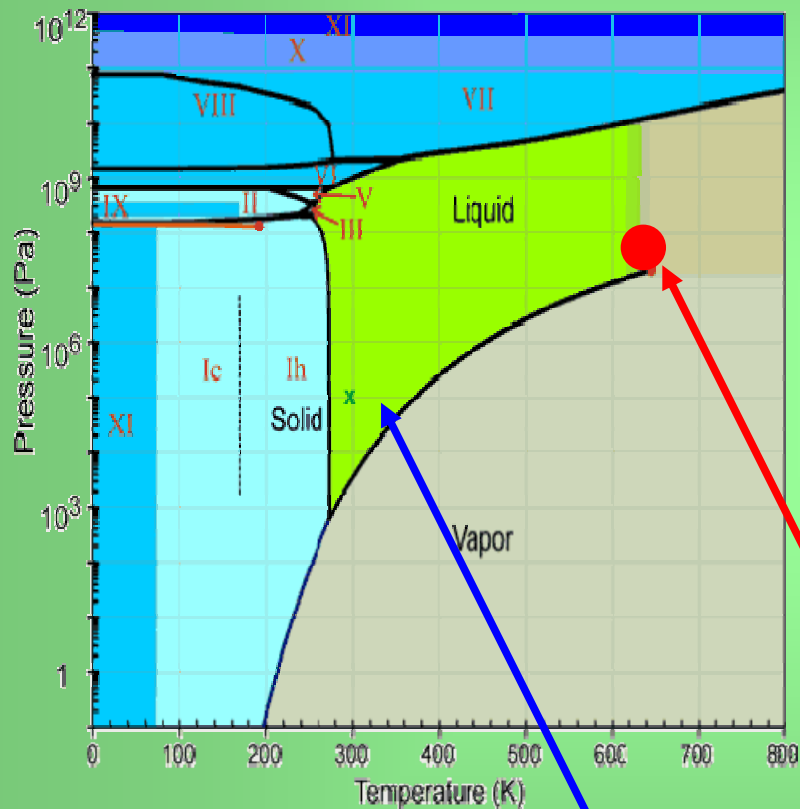
Az erősen kölcsönható anyag fázisai



A víz fázisgörbéi

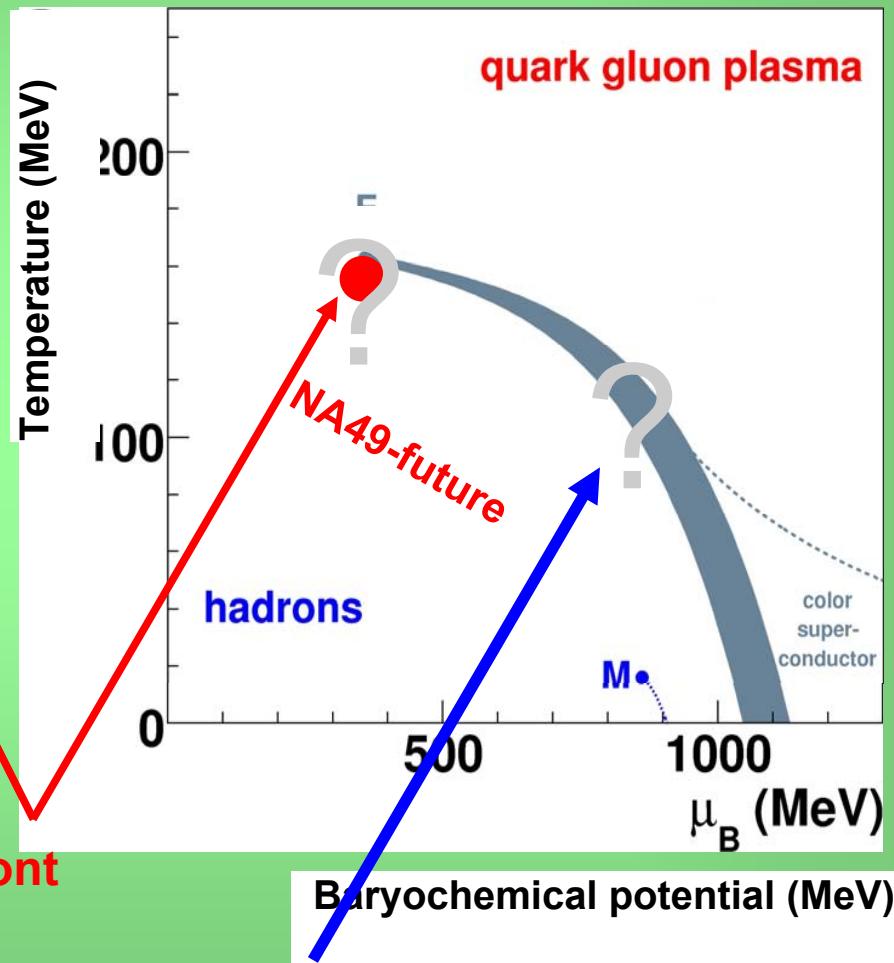
de a

A maganyag fázis görbéit még nem ismerjük

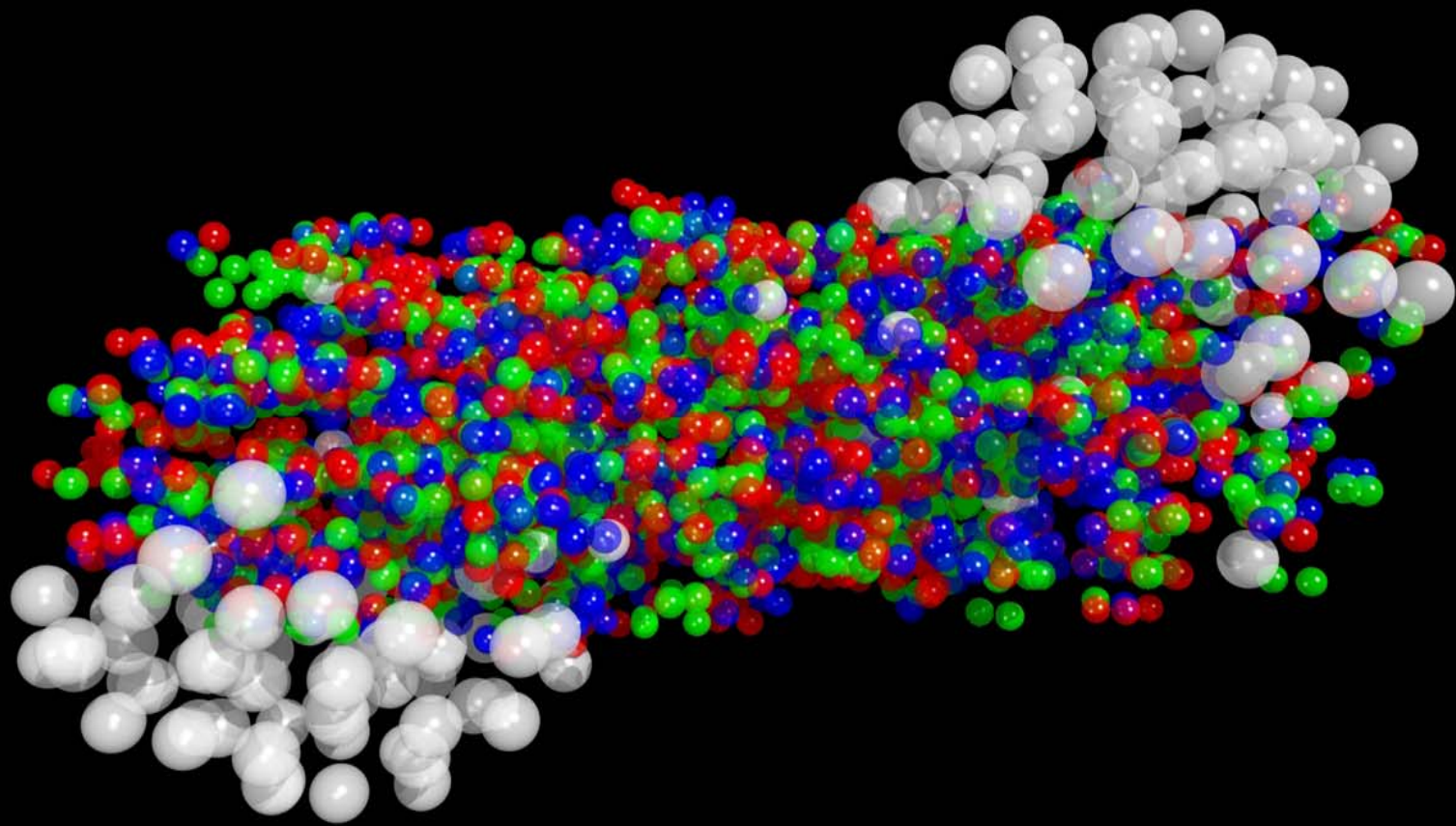


Kritikus pont

Első rendű fázisátalakulás



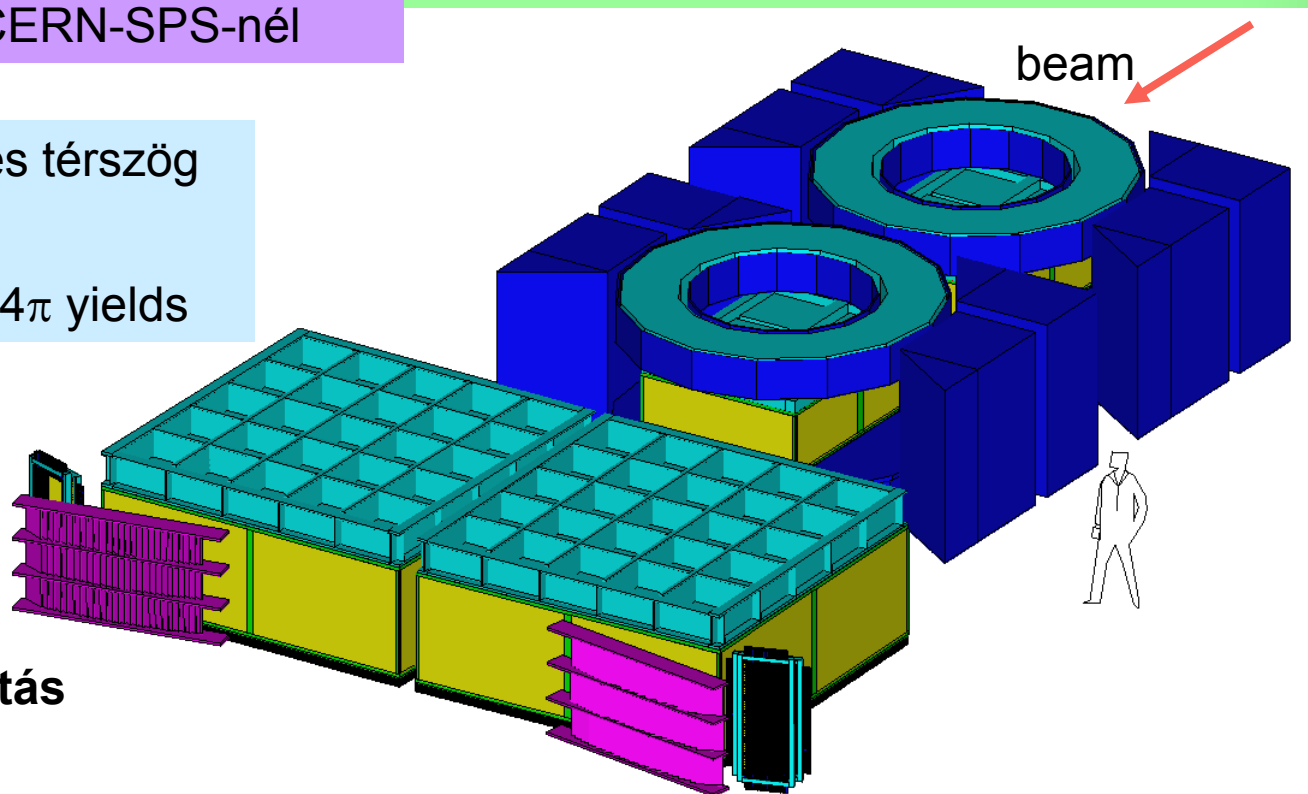
Baryochemical potential (MeV)



nagy térszögű hadron
spektrométer a CERN-SPS-nél

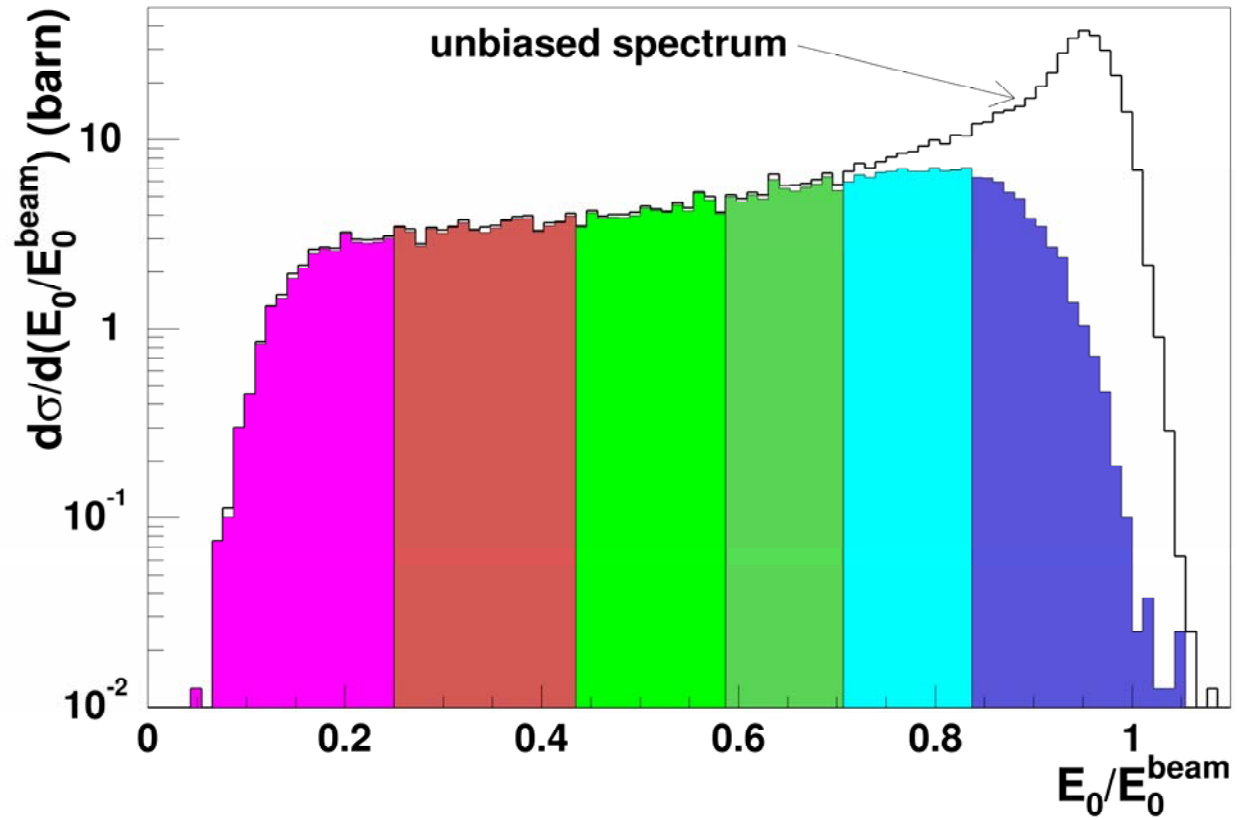
Az előremenő teljes térszög
le lett fedve ebből:

(y, p_t) -spektrum $\rightarrow 4\pi$ yields

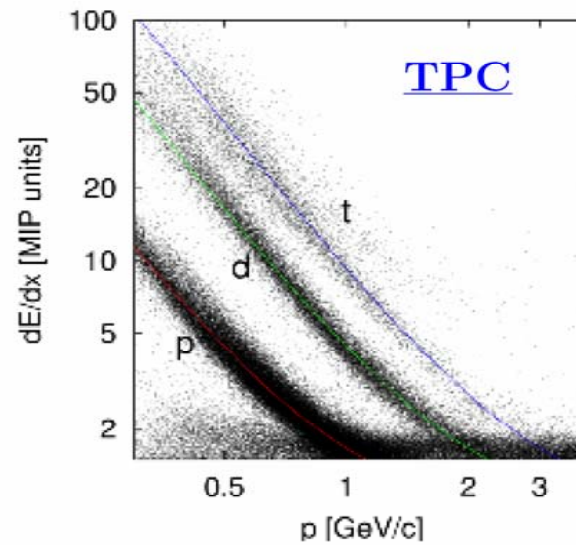
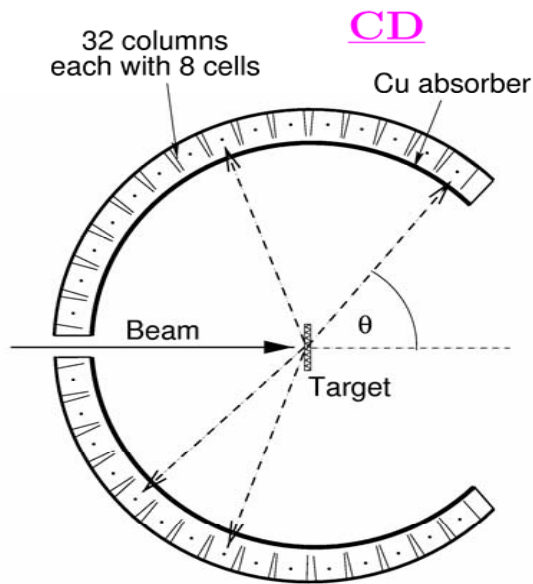
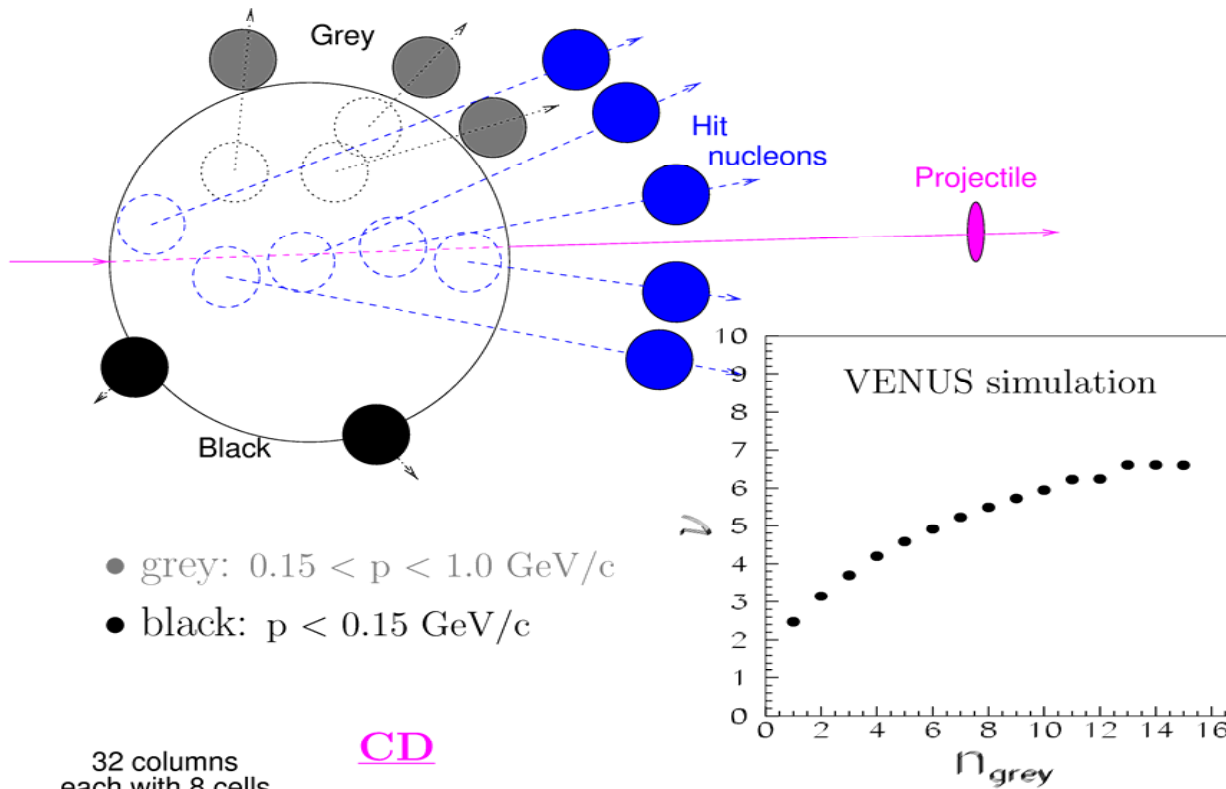


részecske azonosítás

- dE/dx (3-6% res.)
- TOF (60 ps res.) centrális rapiditás körül
- invariant mass + topology (5-10 MeV res.)
- Centralitás mérése a bombázó részecske fragmentumai energiáinak alapján AA esetén
- könnyebb bombázó részecskék az ólom atommag hasításából



bin	fraction of cross section	$\langle b(\text{fm}) \rangle$	$\langle N_{\text{part}} \rangle$
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

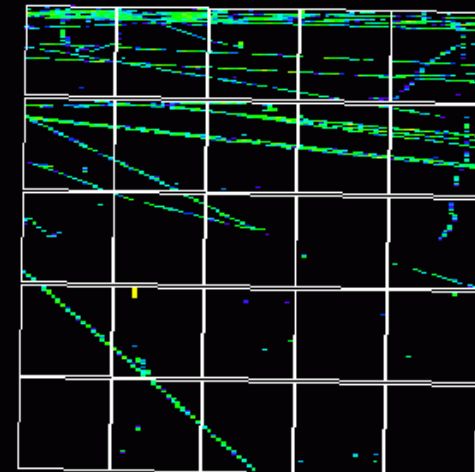
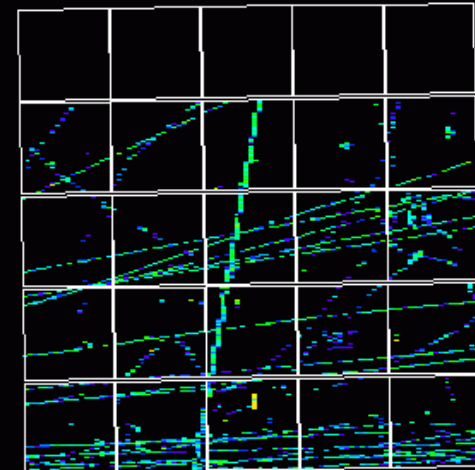
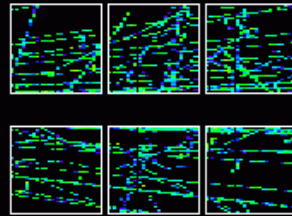
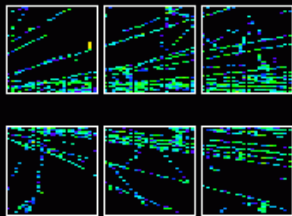


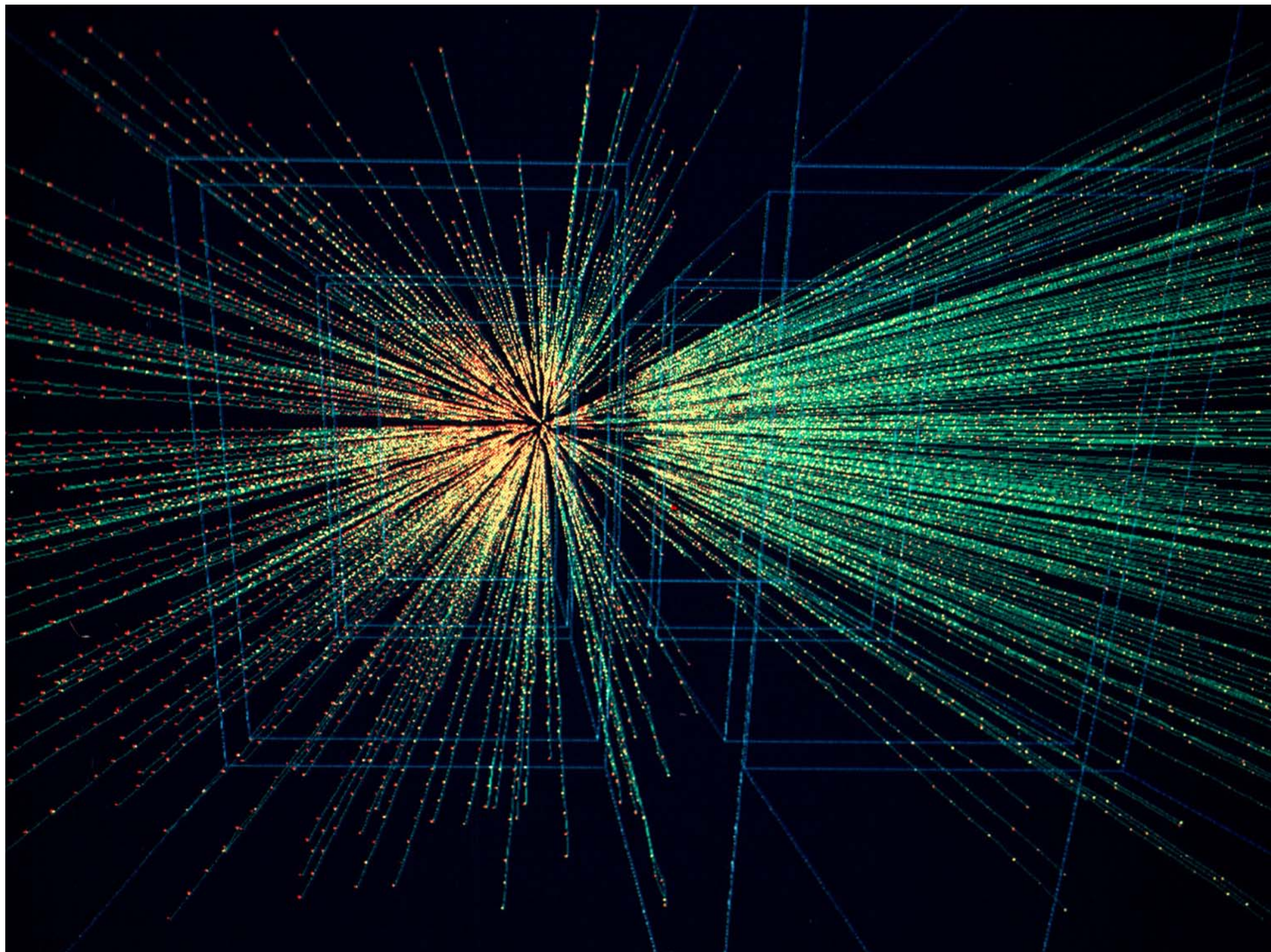
- Cu absorber 200μ eliminates

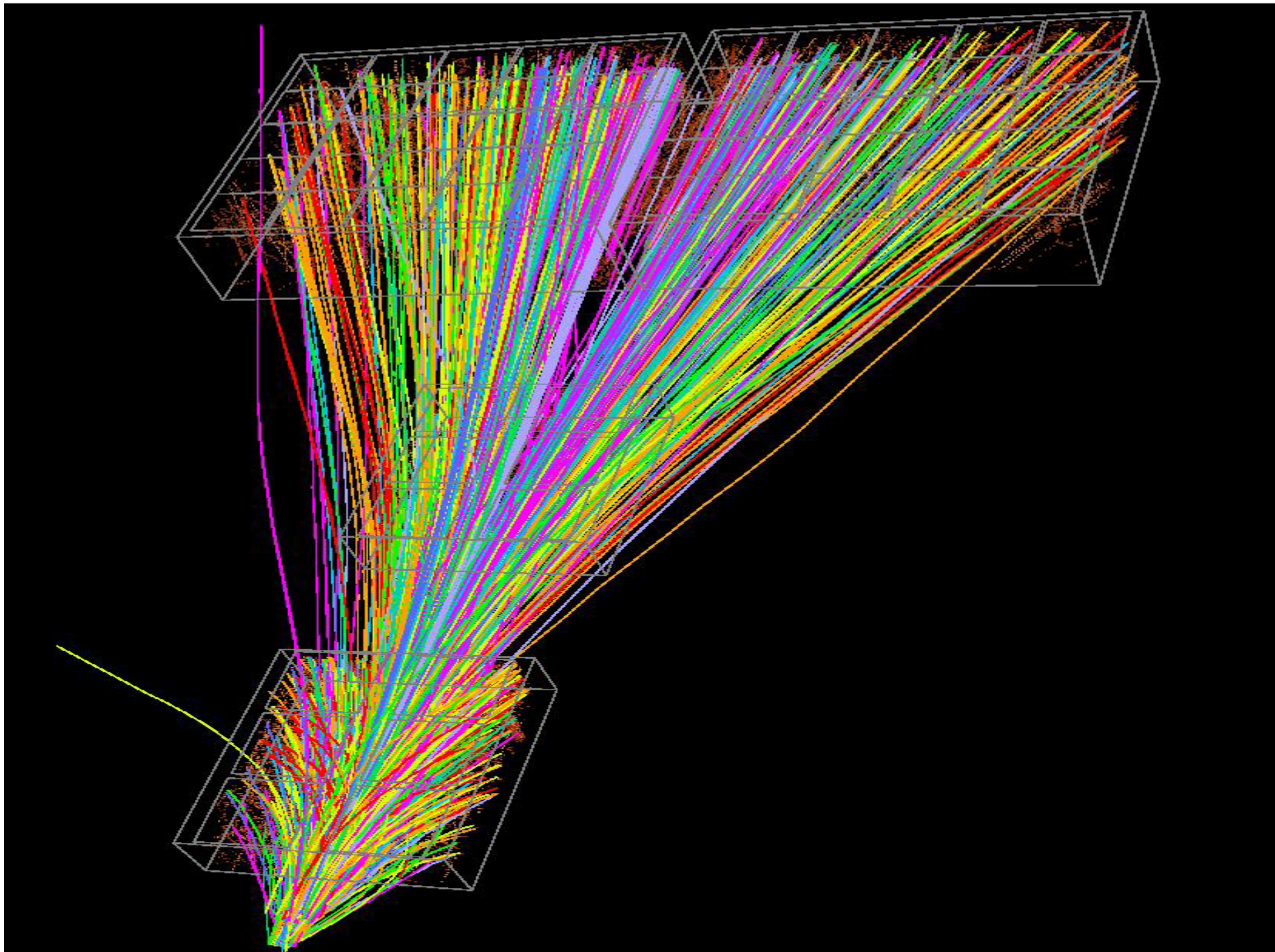
NA49

Run 5147, event 497
 Date 20060822
 Time 225906
 Clusters VT1 0
 Clusters VT2 0
 Clusters MTL 0
 Clusters MTR 0
 MC points VT1 0
 MC points VT2 0
 MC points VT3 0
 MC points VT4 0

Hits Centrality Detector 0
 QDC Centrality Detector 0



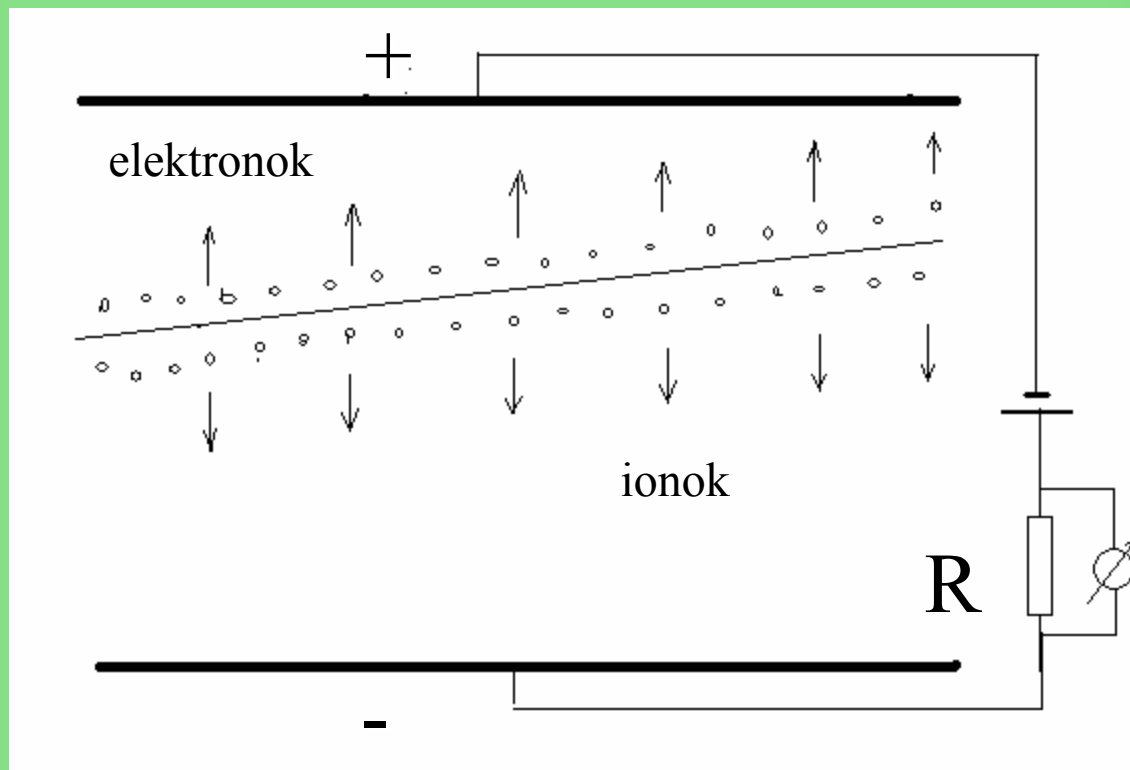




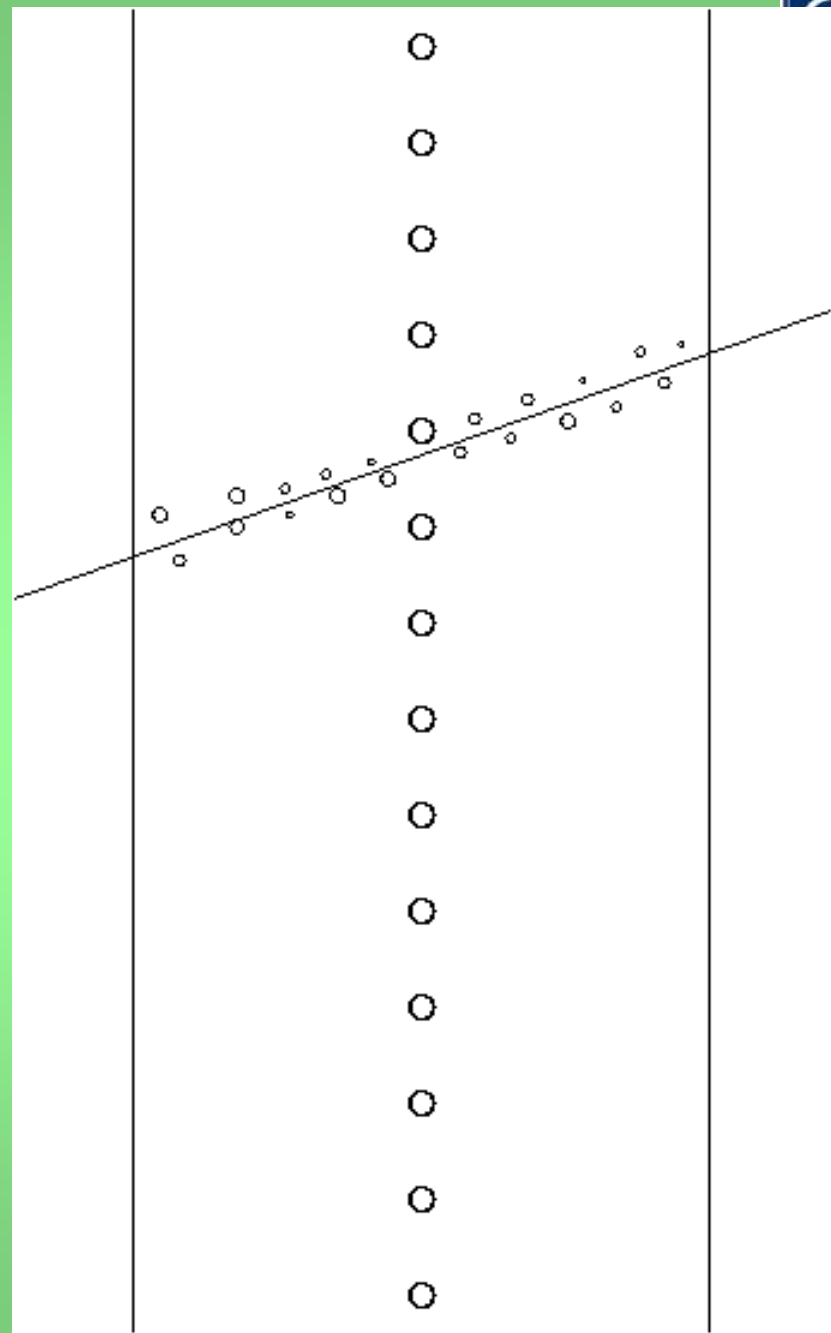
Tanulmányozott rendszerek

- A legnagyobb azonos körülmények között mért adathalmaz a CERN-i SPS gyorsítónál centrális Pb+Pb ütközéseknél,
 - 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
- | | |
|-----------------------|---------------------------|
| • C+C, Si+Si | 158, 40 GeV/n |
| • Pb+Pb | 158, 80, 40, 30, 20 GeV/n |
| • p+p | 158 GeV |
| • p+Pb, p+C | 158 GeV |
| • π +p, π +Pb | 158 GeV |
| • n+p, /d+p -ból/ | 158 GeV |

Ionizációs kamra



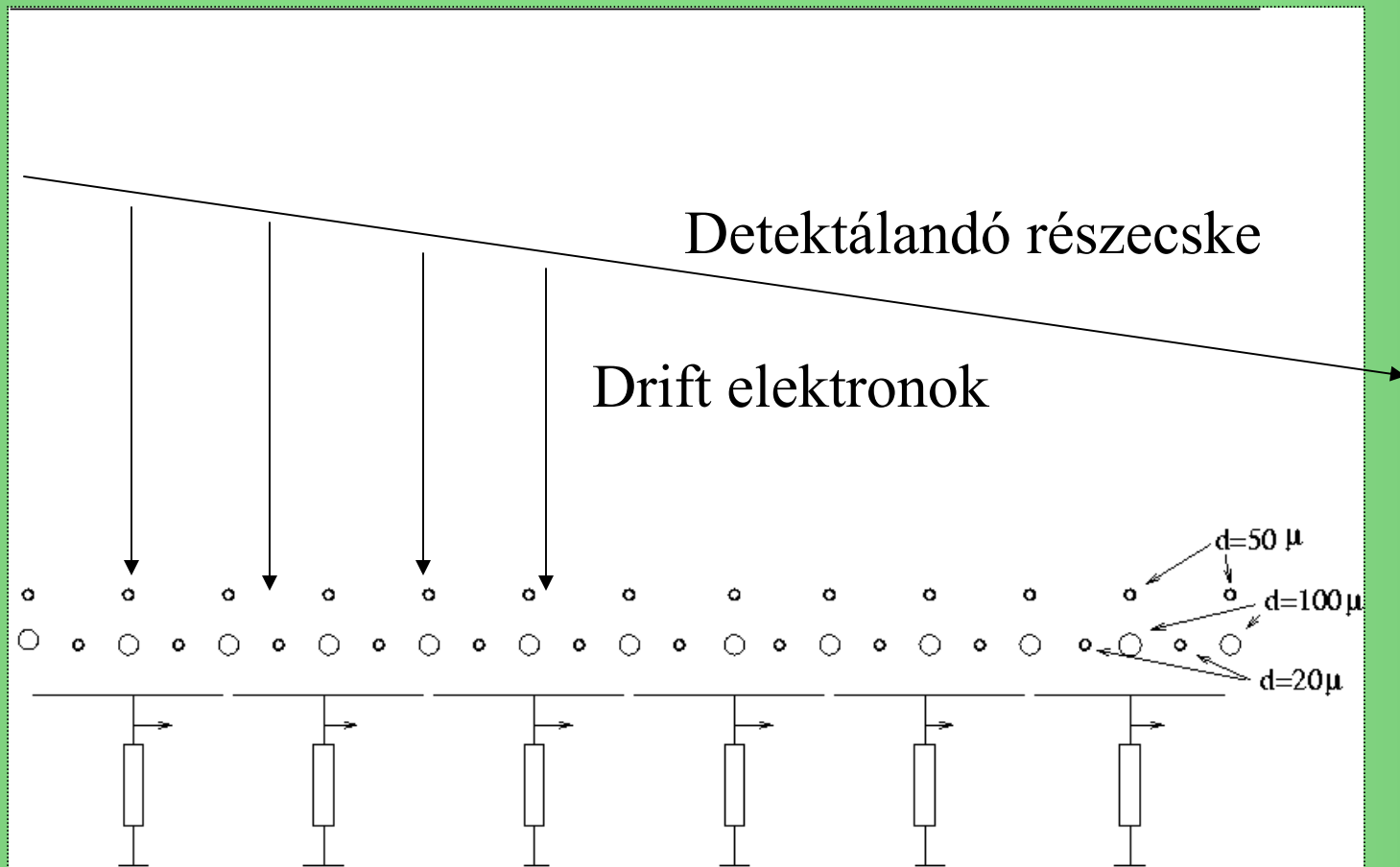
Proporcionális kamra



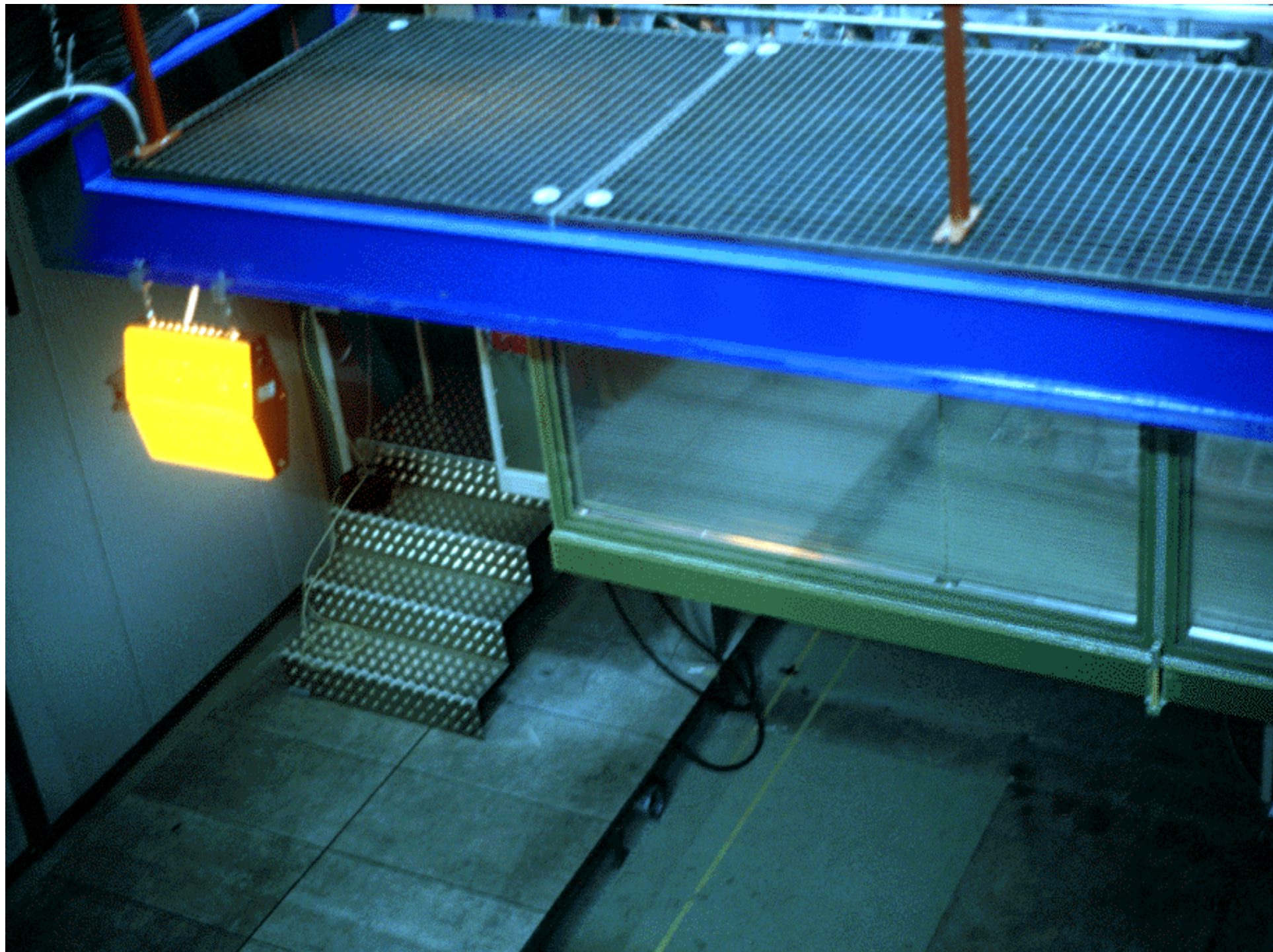
TPC Time Projection Chamber

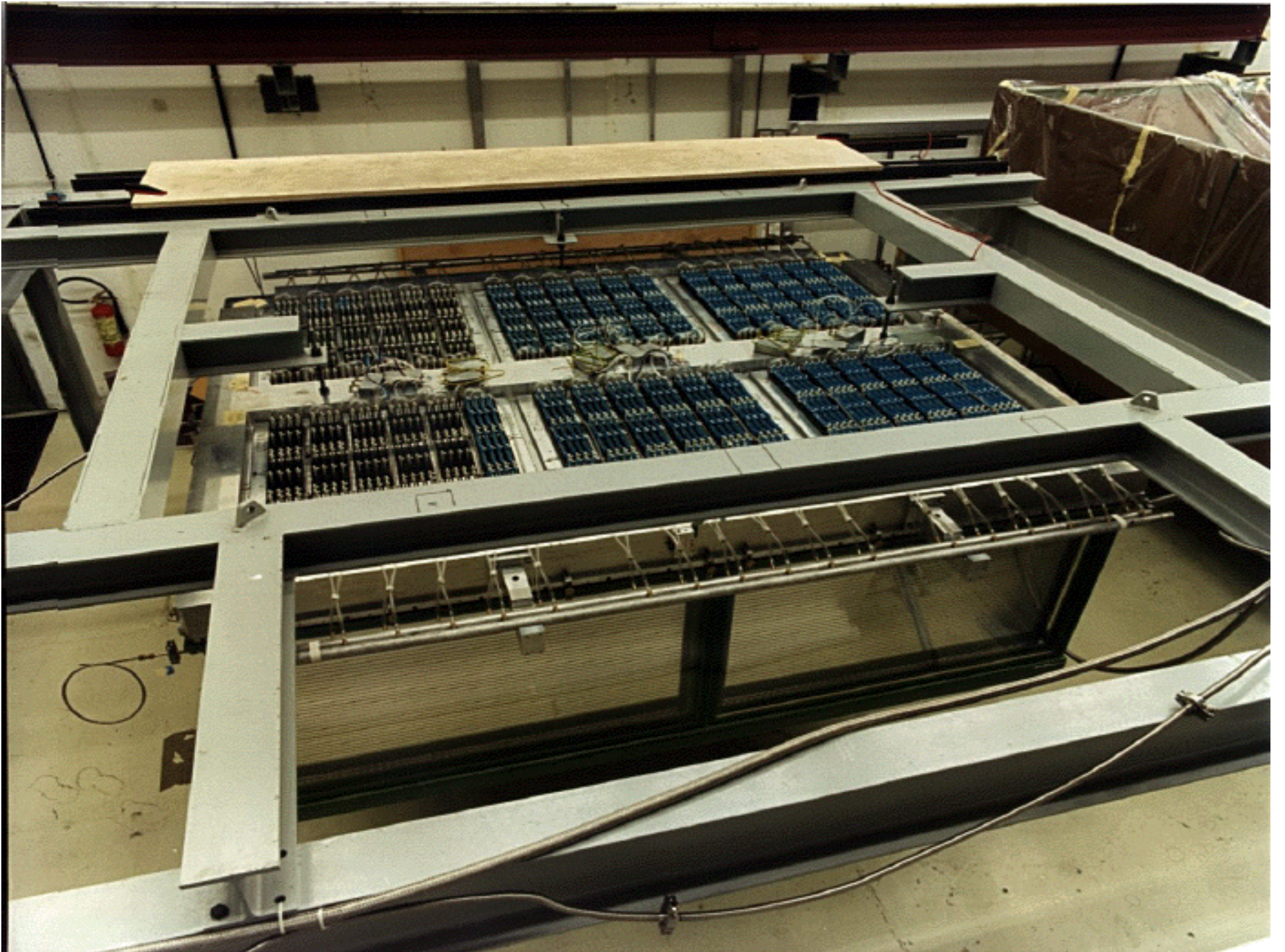
Katód

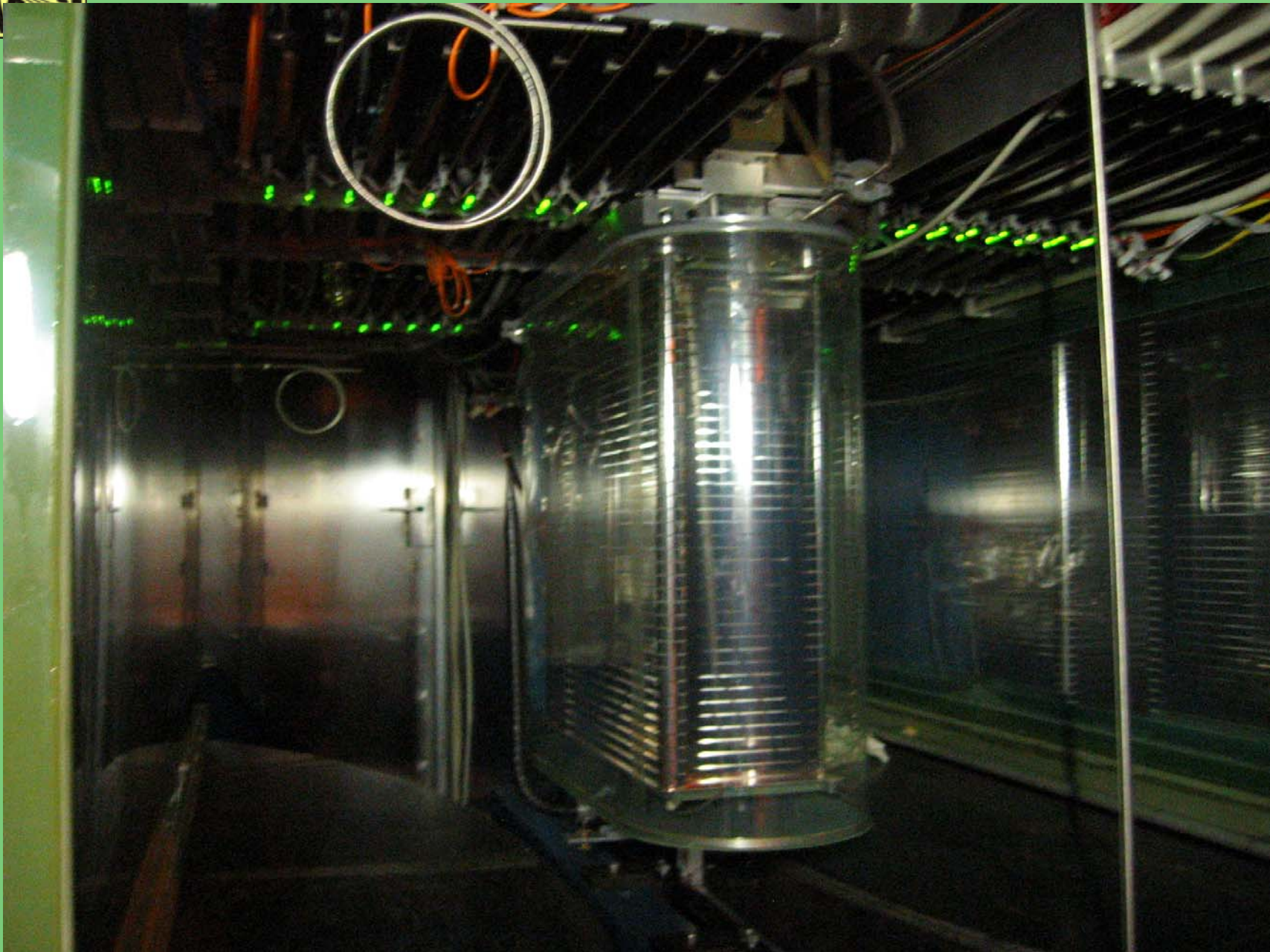
Áteresztő rács
sokszorozó sík
kiolvasó pad



x,z a pad elhelyezkedéséből, y a driftelési időből







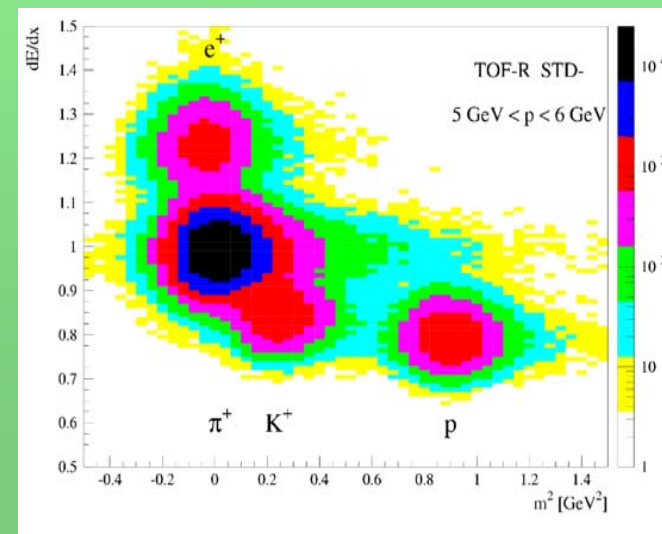
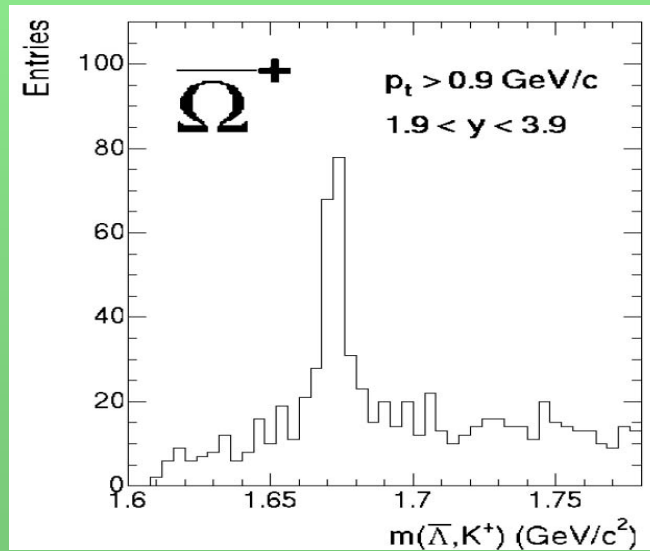
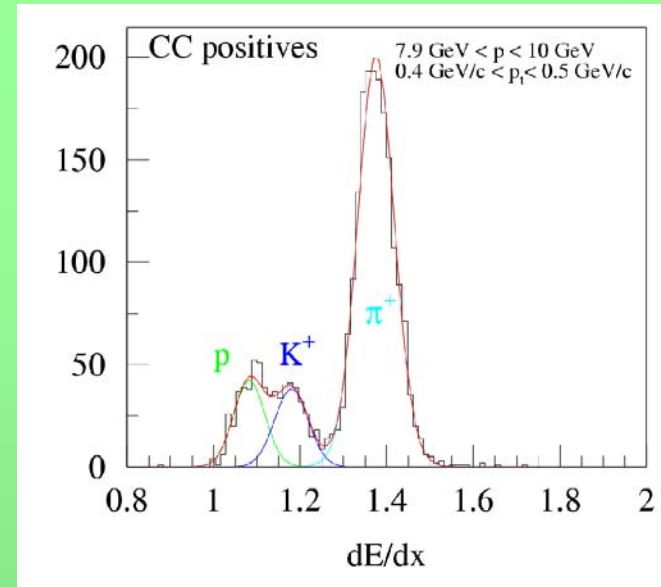
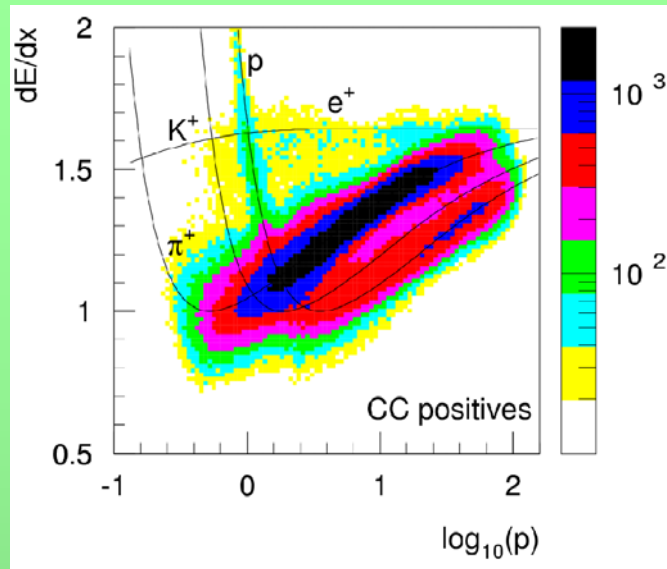


Repülési idő mérése

- A mérés kezdete: a bombázó részecske belépése a rendszerbe
- A mérés vége: a részecske becsapódása a detektorba
- A bombázó részecske repülési ideje a céltárgyig állandó
- A keletkezett részecske által megtett út az impulzusától függ a mágneses tér miatt
- A mérés relatív, mert csak a különböző részecskék között repülési idő különbséget kell mérni.
- Az NA49-es kísérletnél a repülési út $\sim 14\text{m}$, a szükséges pontosság 60-80 ps, az egyik rendszert a KFKI készítette és ezért BUDAFAL a neve.

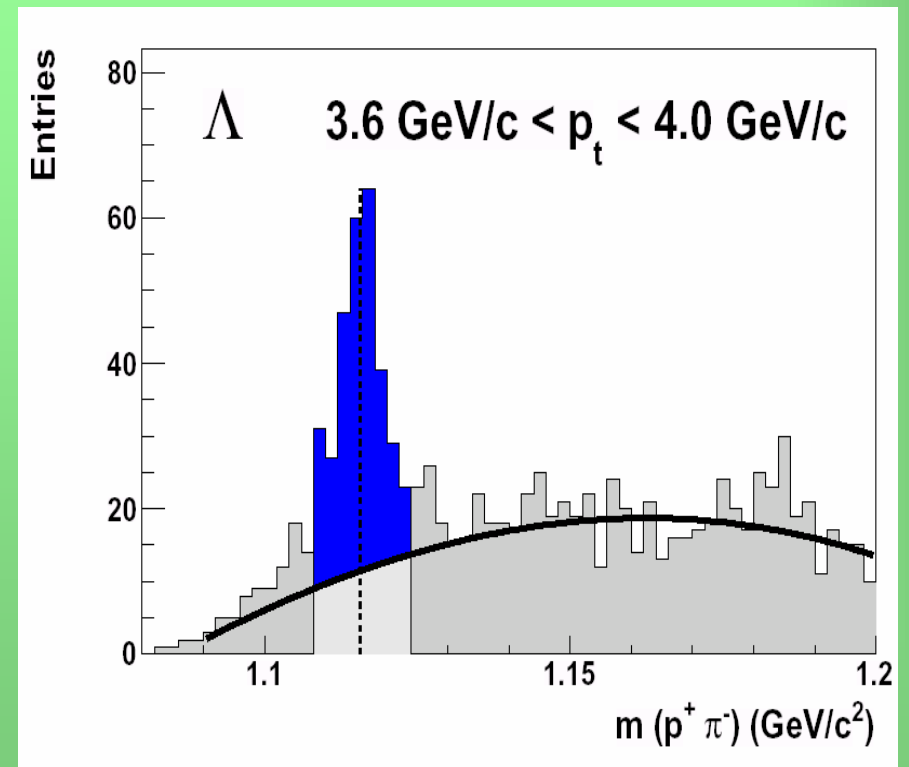
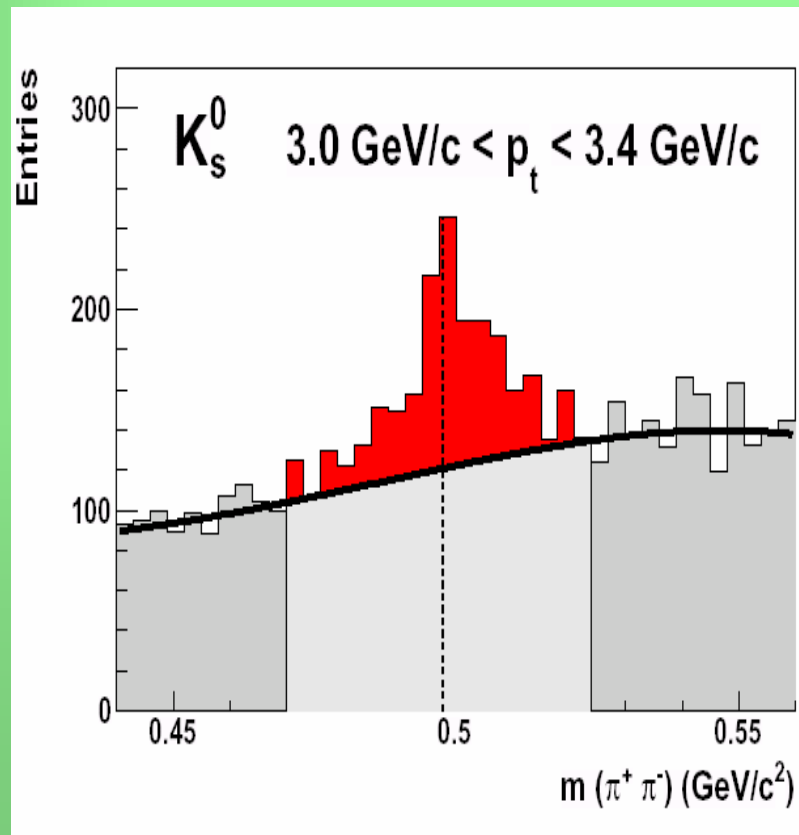
Részecske azonosítás

momentum
dE/dx



K_s^0 és Λ^0 analízis

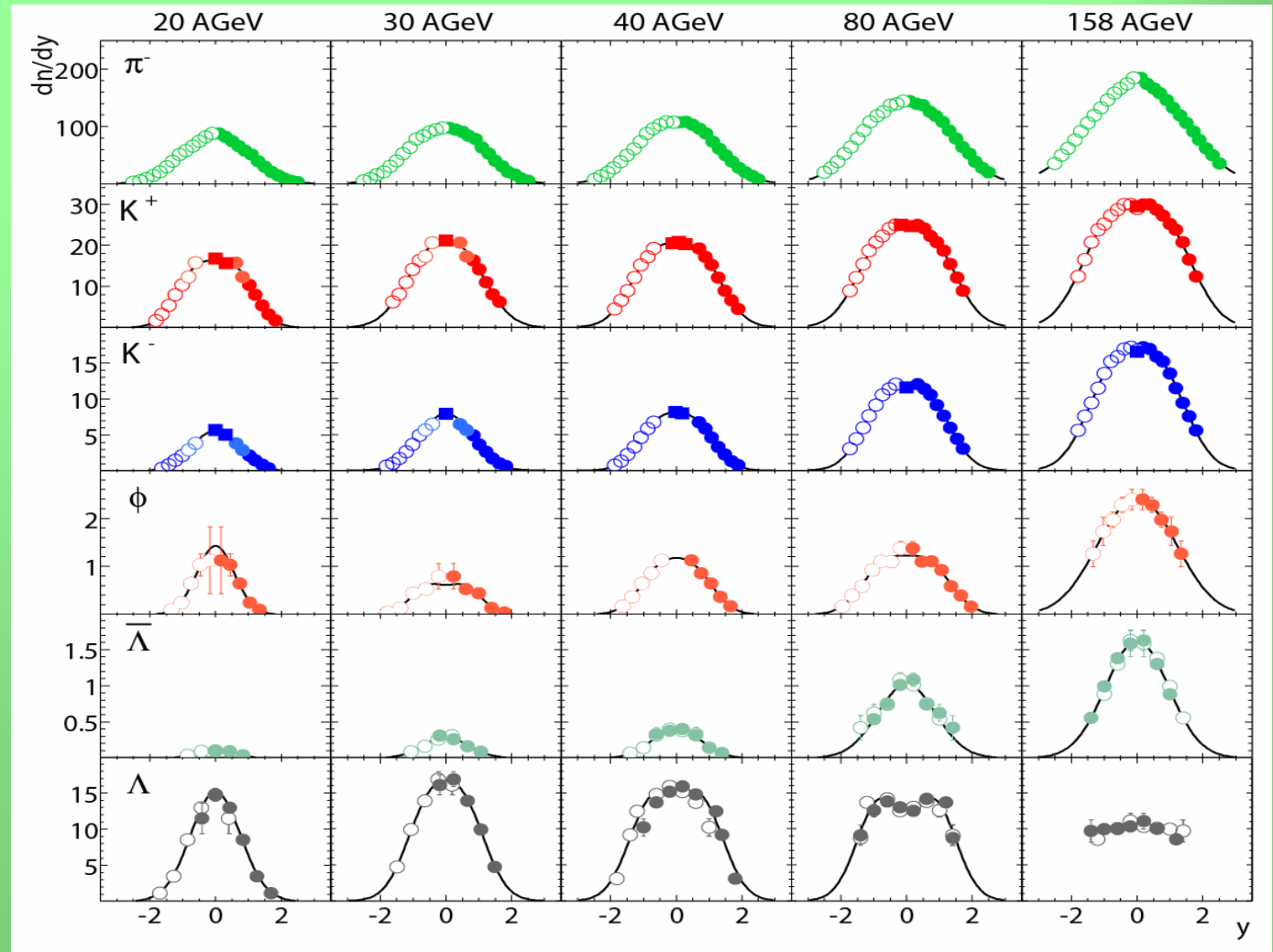
- Azonosítás a bomlás topológiája alapján
- rapiditás $[-0.5, 0.5]$, centralitás: 0-23.5 %



rapiditás eloszlások

Centrális Pb+Pb
7% (20-80 AGeV)
5/10% (158 AGeV)

NA49

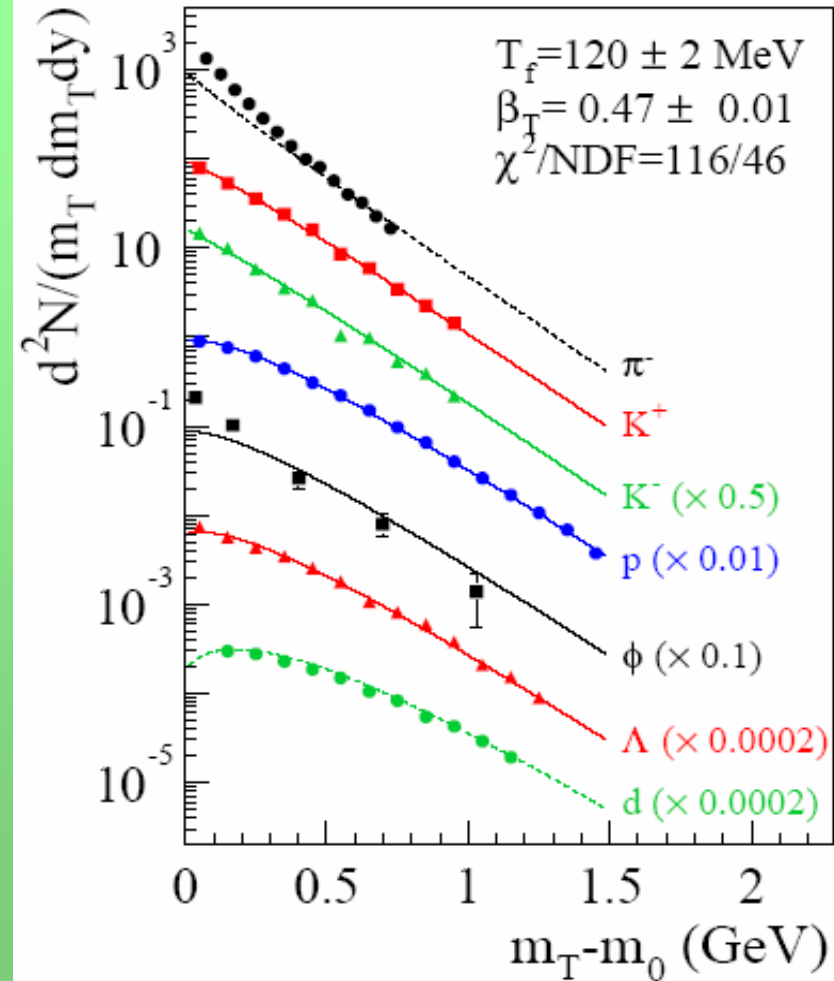
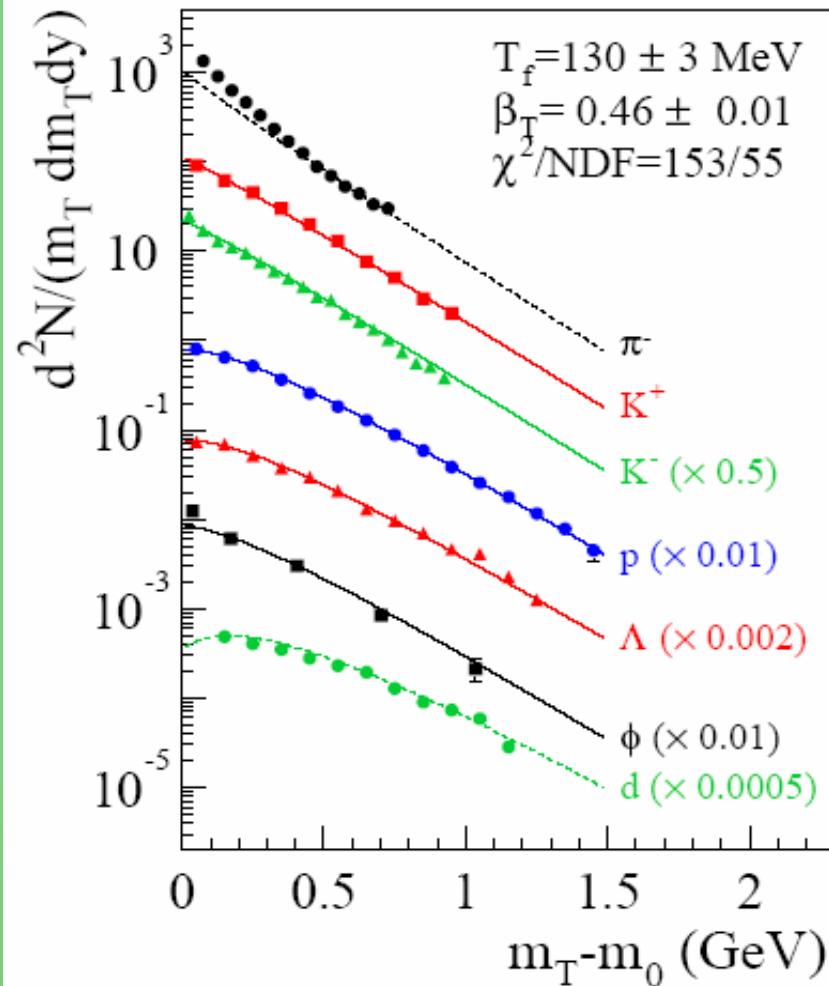


Rapiditás: relativisztikusan invariáns sebesség

p_t -eloszlások

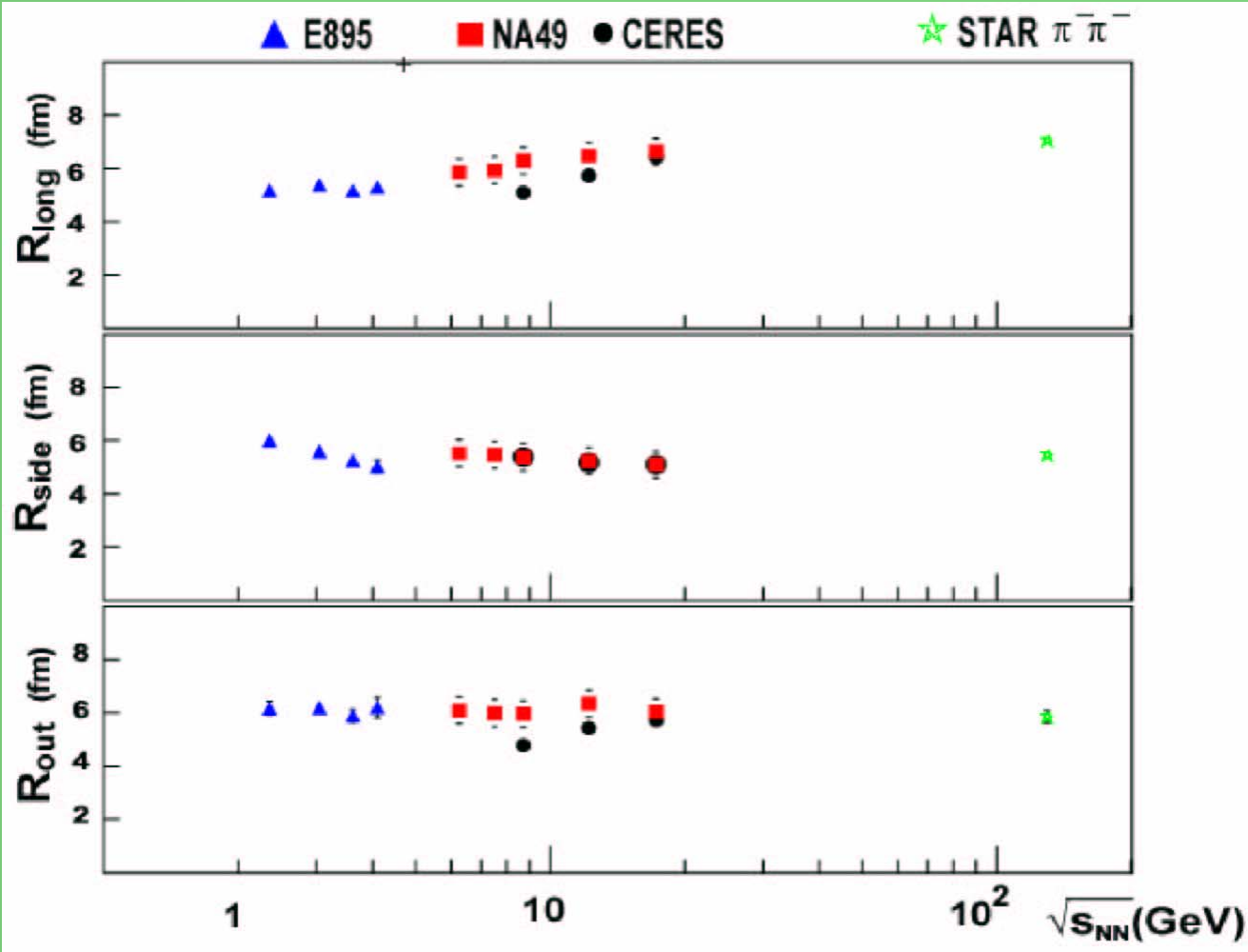
30 AGeV

20 AGeV

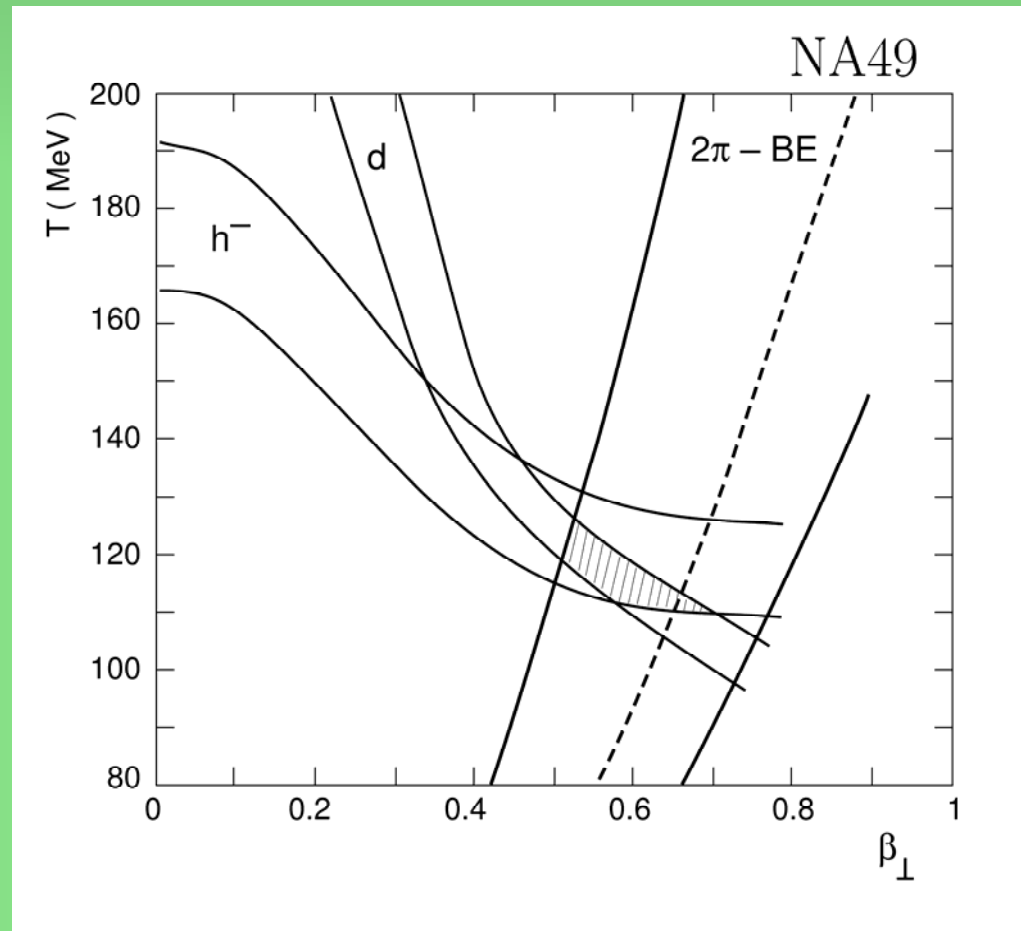


A tüzgömb méretének meghatározása

- 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



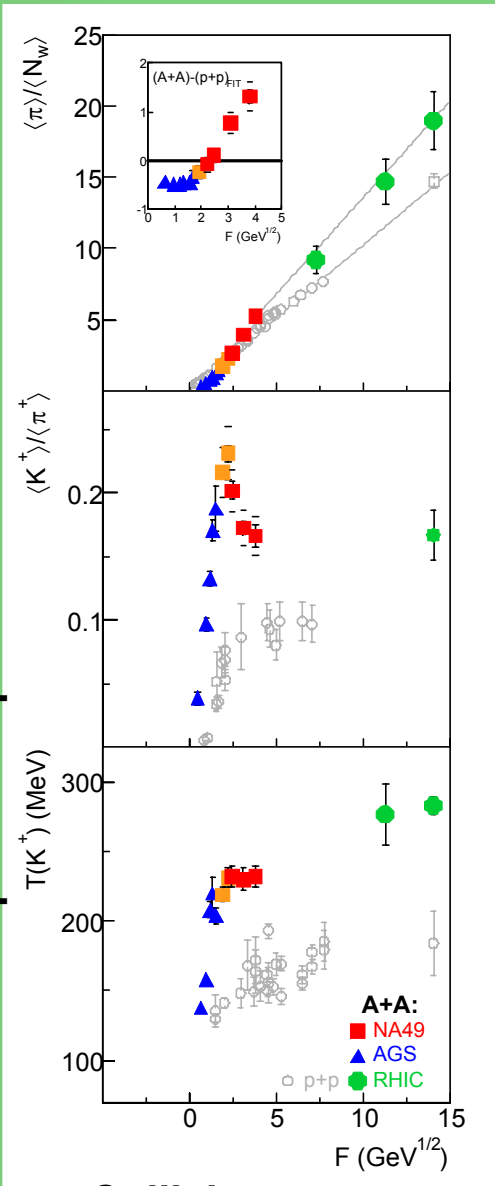
Rendelkezésre álló energia



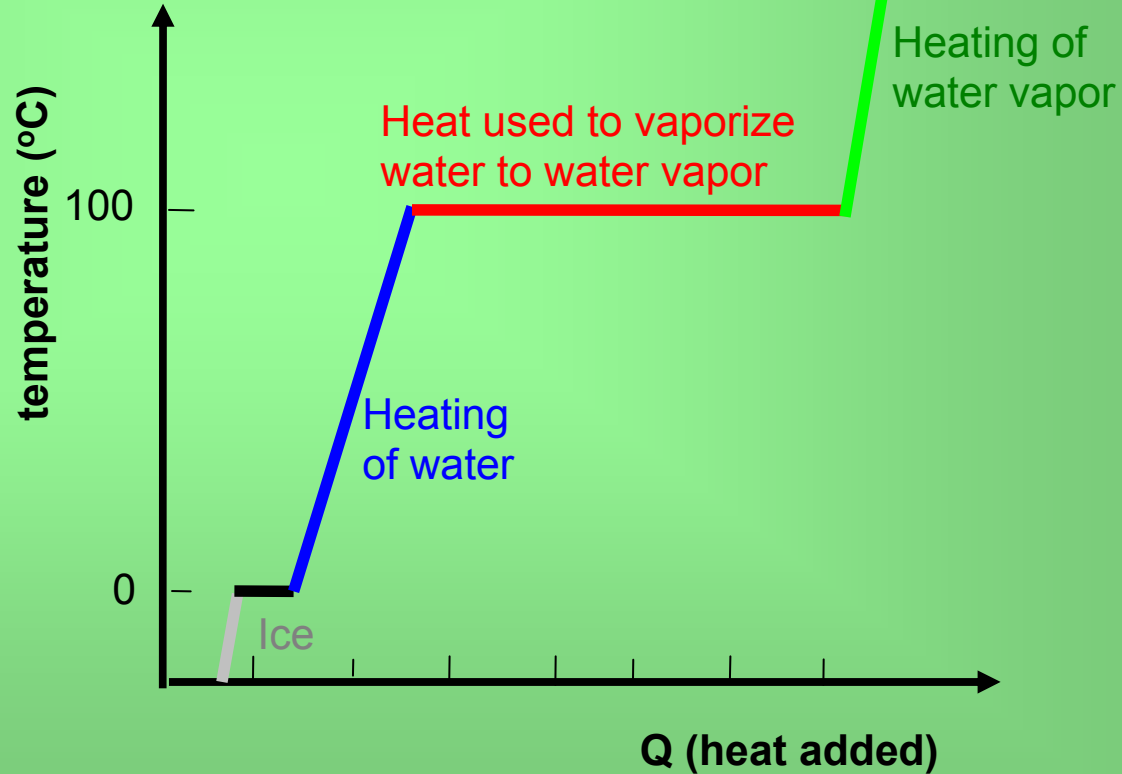
Heating curves of strongly interacting matter measured by NA49 at the CERN SPS serve as evidence for a transition between hadron gas and quark-gluon plasma,

similarly the heating curve of water shows the transitions between the phases of water

Properties of produced hadrons



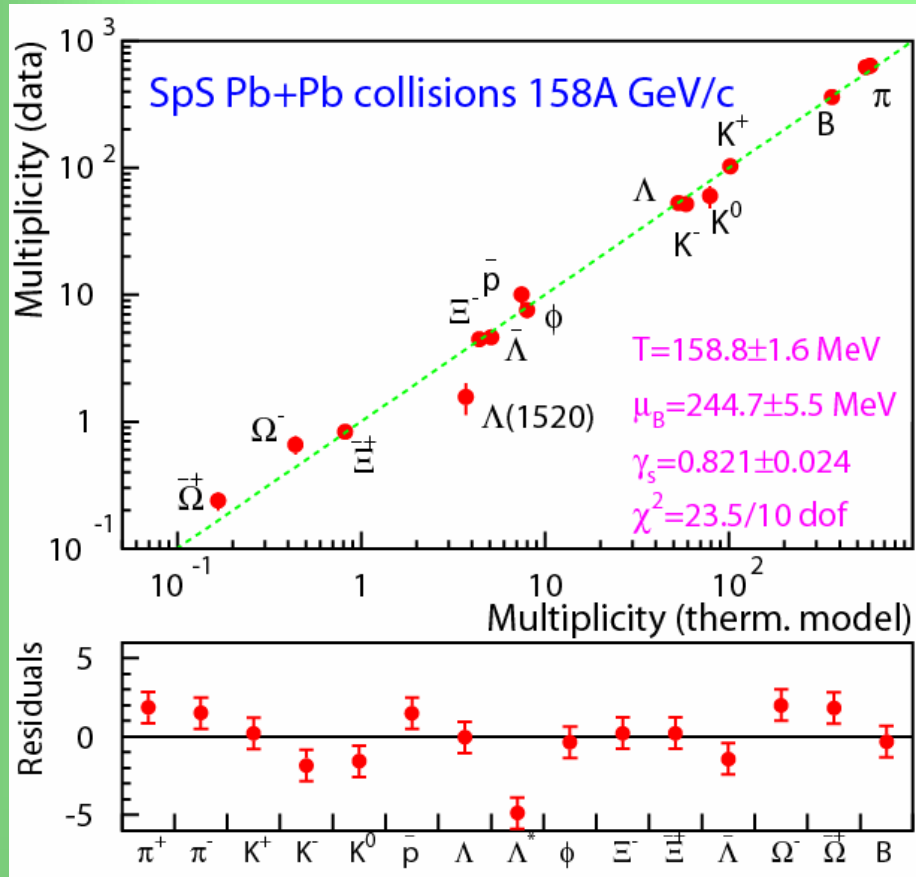
Collision energy



NA49-future

Hadronok a centrális PbPb ütközéseknél

- Kezdeti állapot: energia sűrűség $\varepsilon \approx 3 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ [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:

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

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

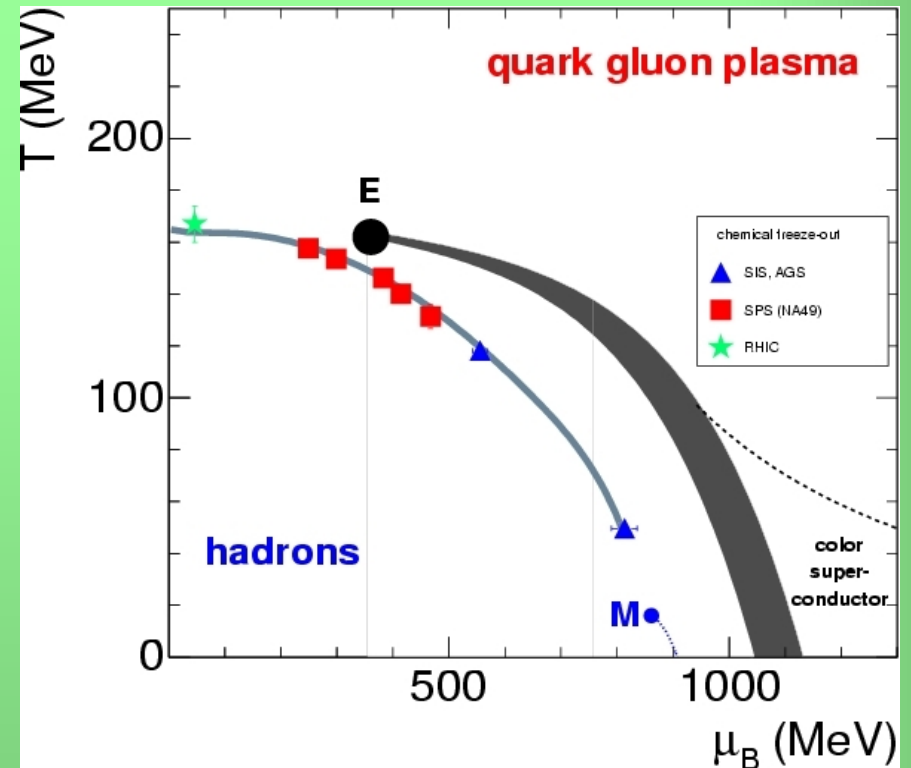
A hadronizáció a fázis átmenethez közel történik

Fázis diagram

Hadronkeltés hatáskeresztmetszeteit mértük meg 20-158 GeV/n

→(T, μ_B) a hadrokémiai kifagyásnál

- **A deconfinementet hol érjük 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]

Transverzális tömeg eloszlások

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

