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**.

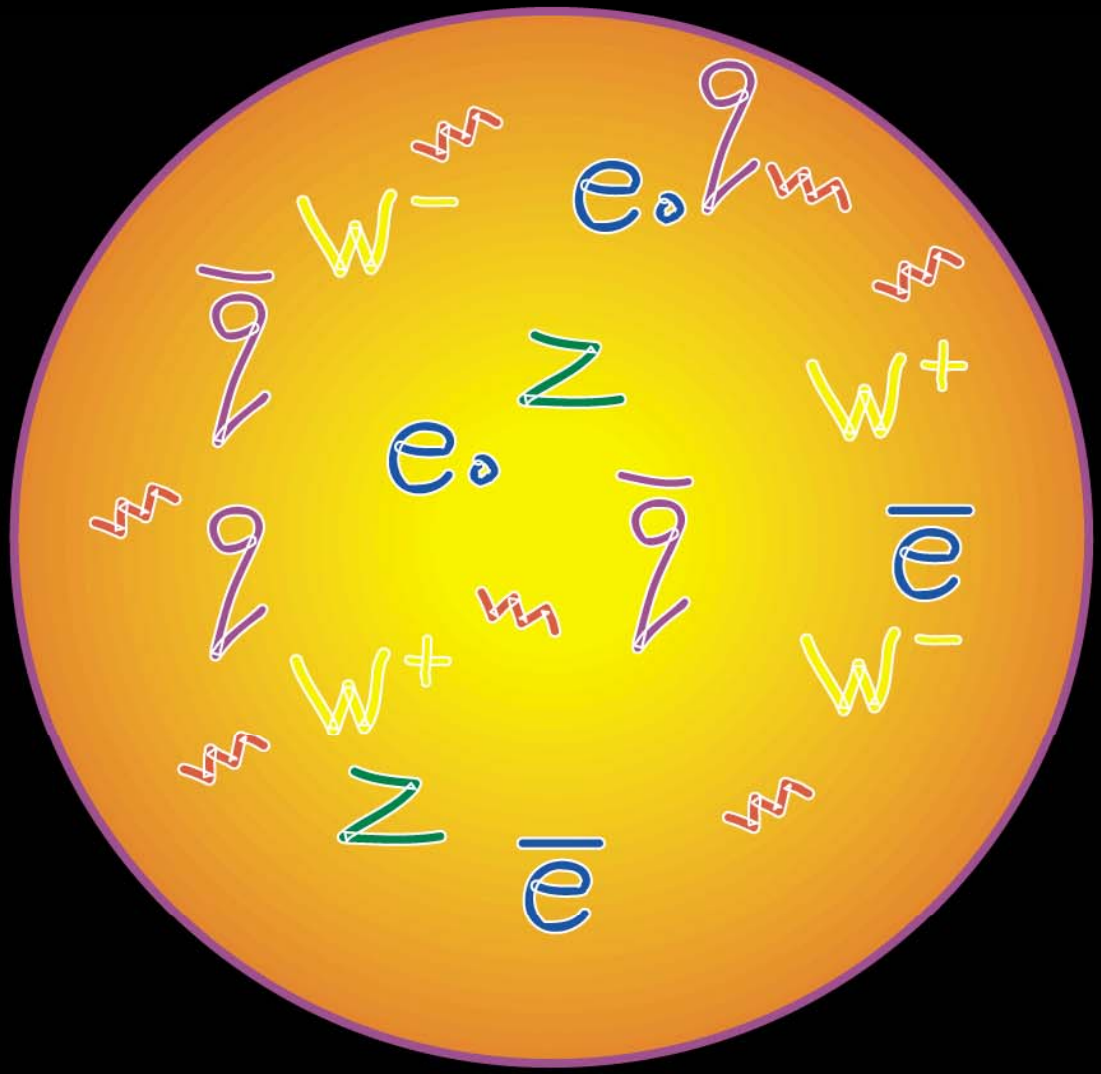
De hogyan lehet ezt tanulmányozni?

Visszafelé is végrehajtható-e?

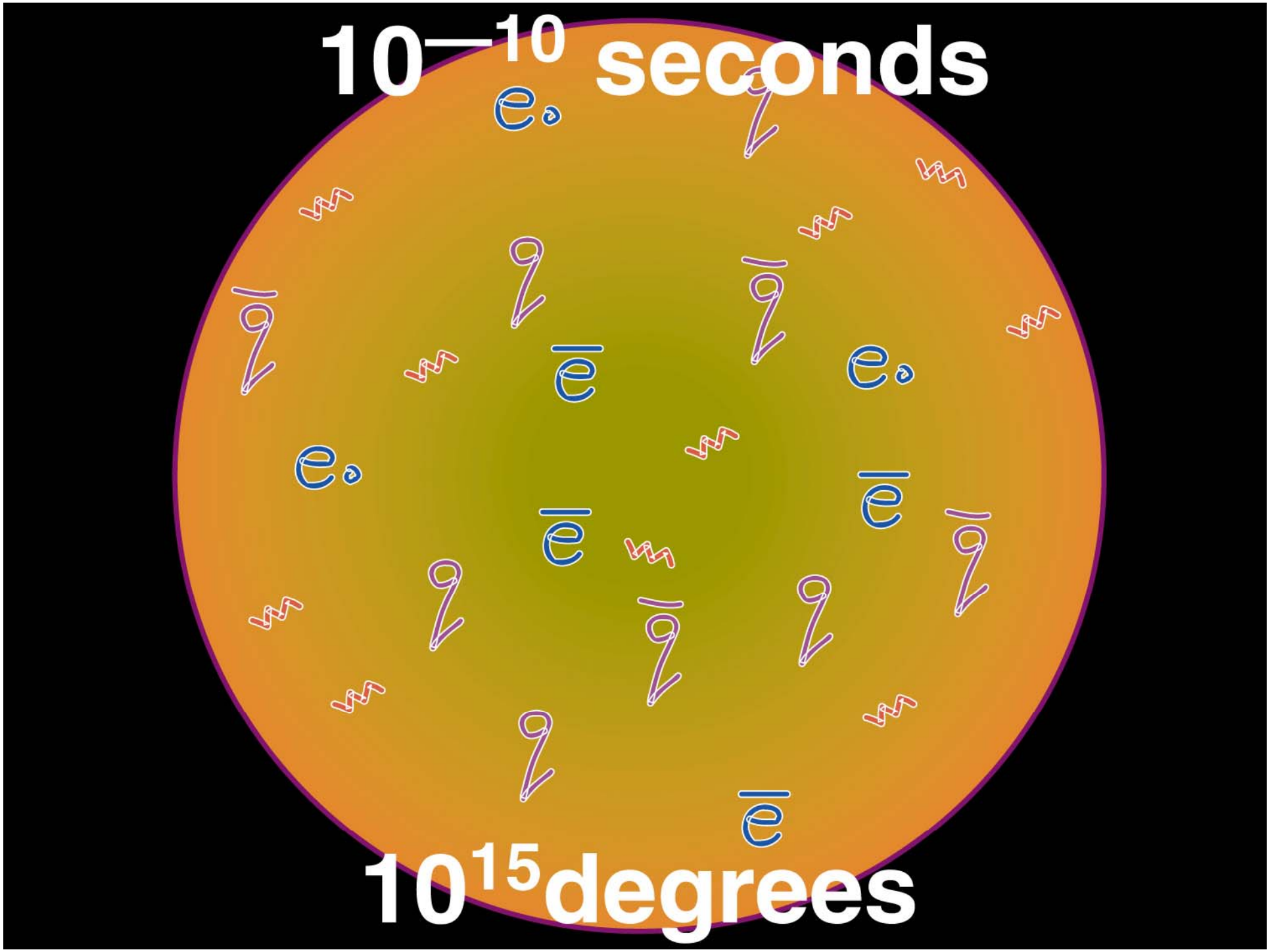
10^{-43} seconds

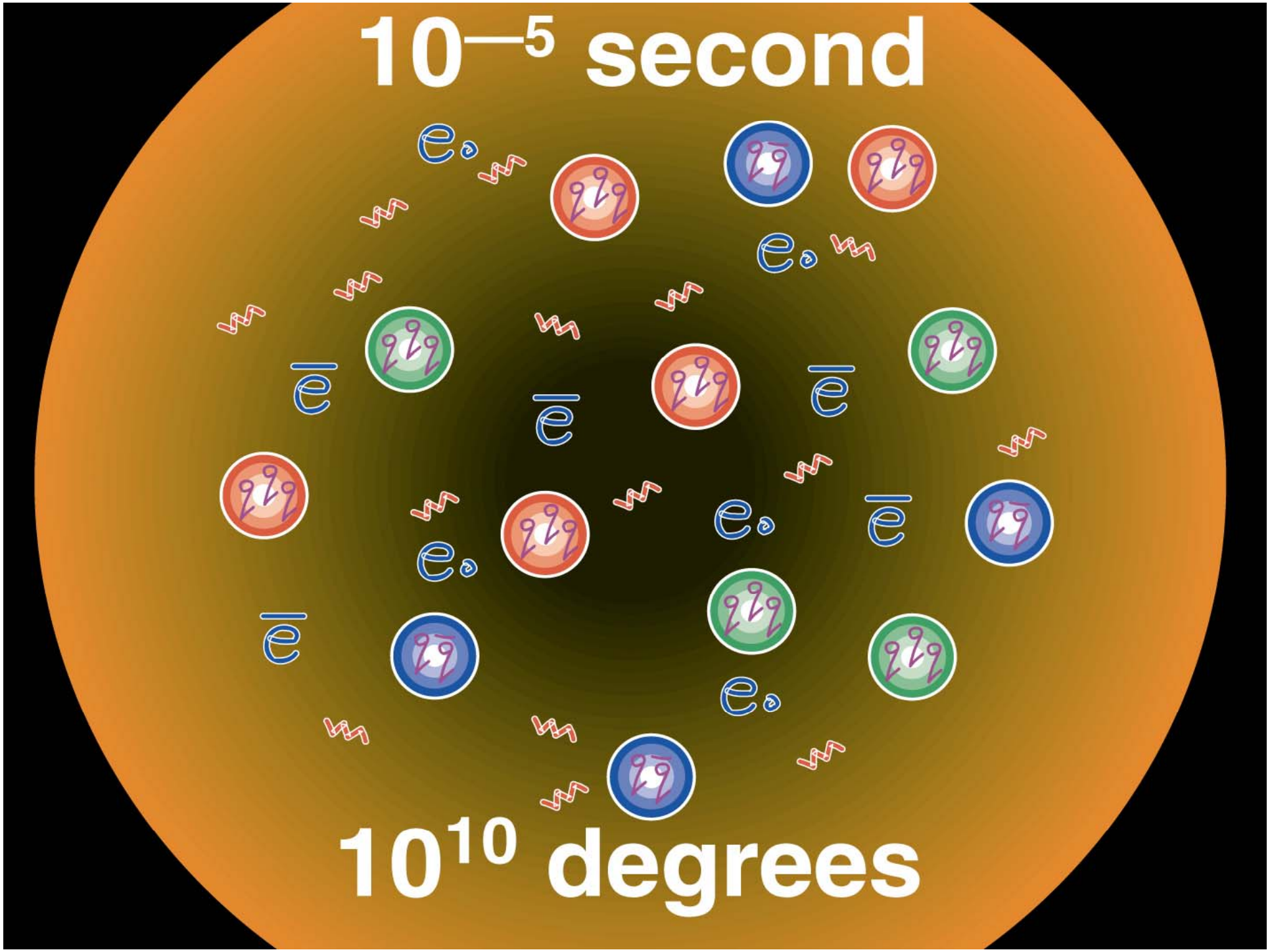
10^{32} degrees

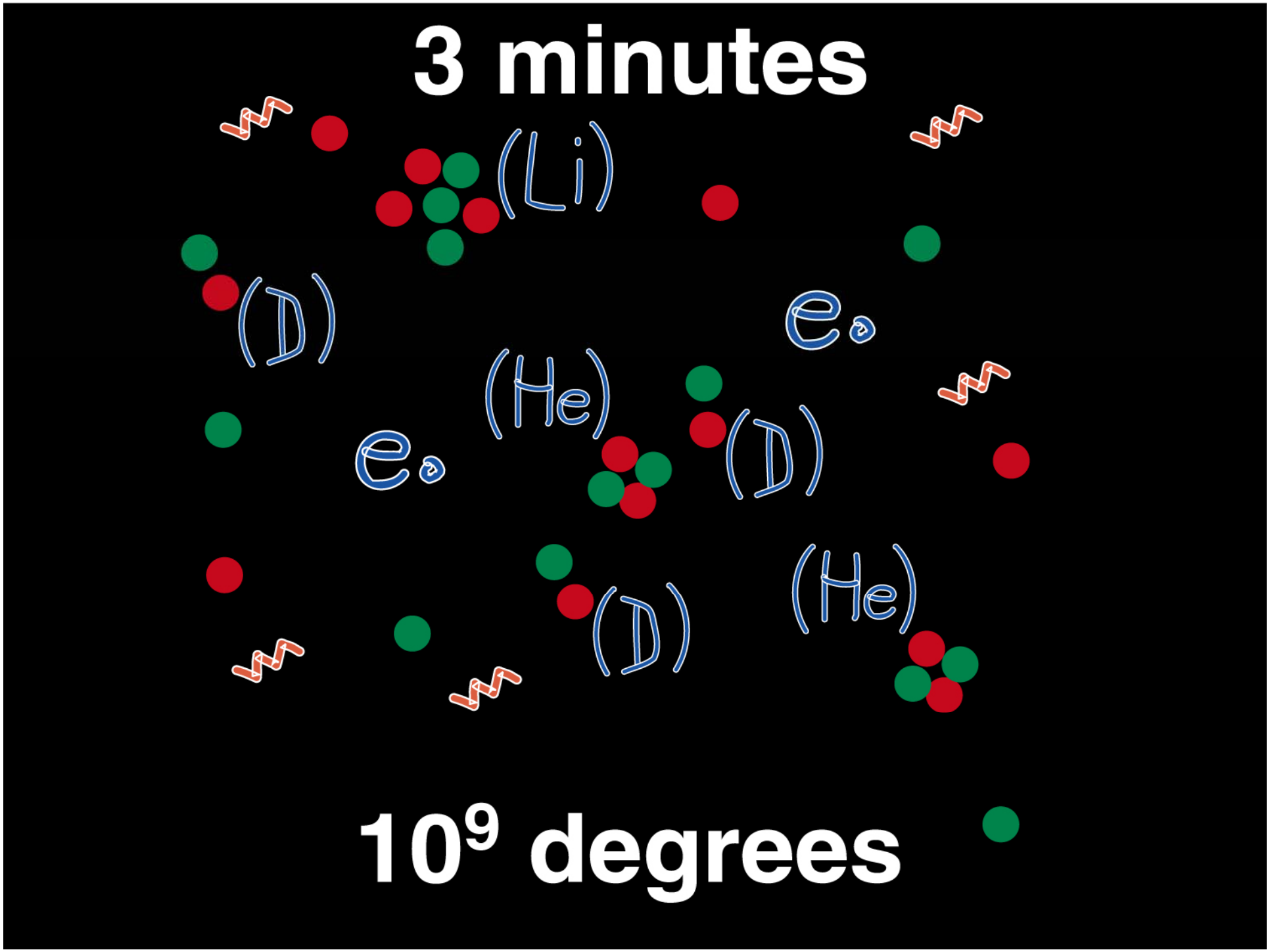
10^{-34} seconds

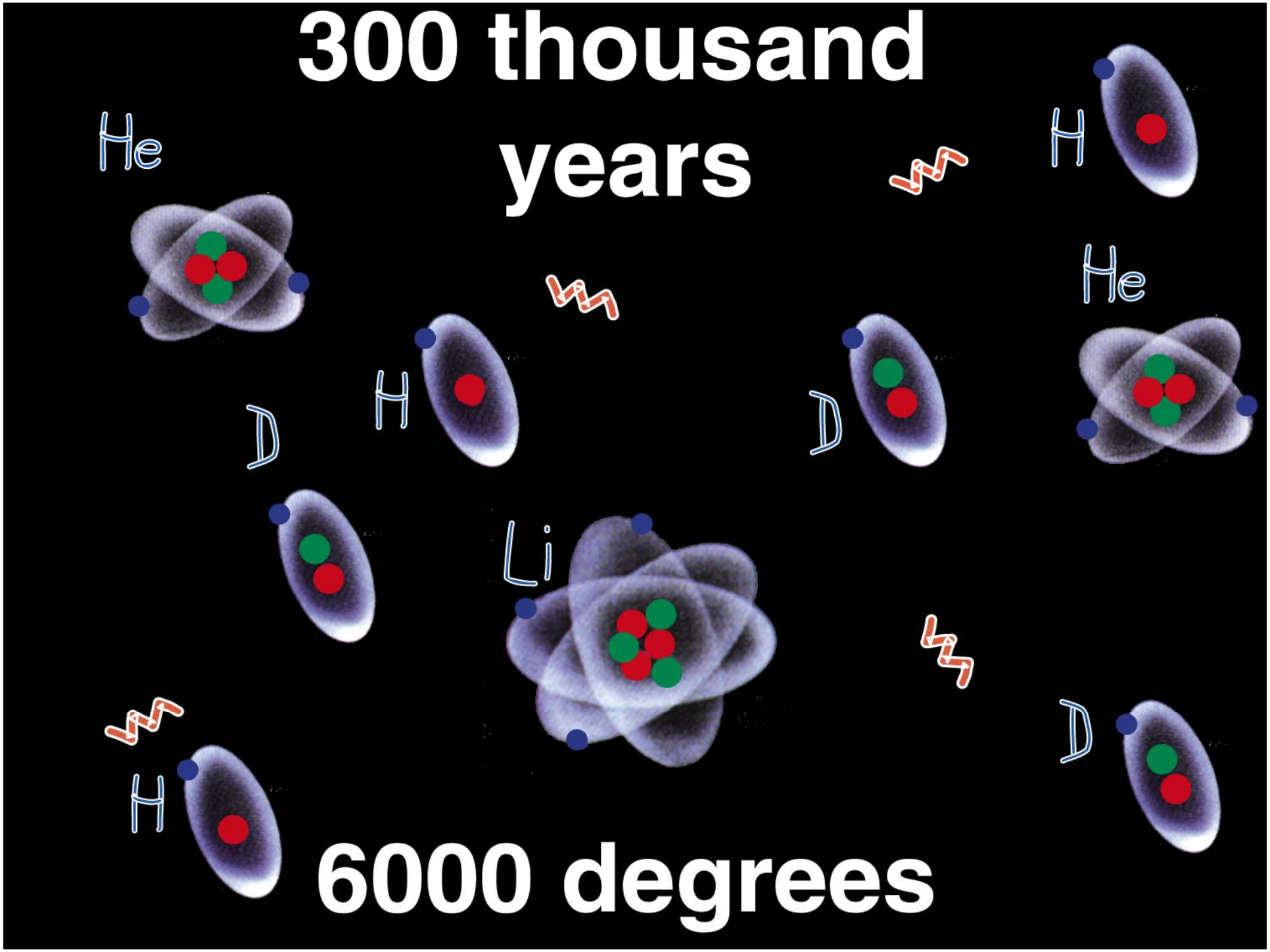


10^{27} degrees

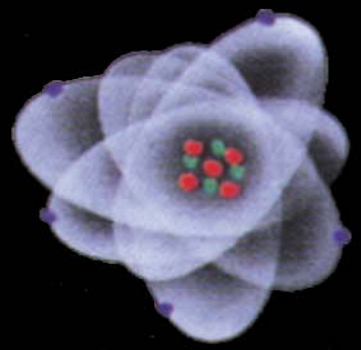

10^{-10} seconds
10^{15} degrees


10−5 second
10^10 degrees


3 minutes
(Li)
(D)
e
(He)
e
(D)
(D)
(He)
10^9 degrees


300 thousand years
He
H
He
H
D
D
Li
H
D
6000 degrees

1 thousand million years



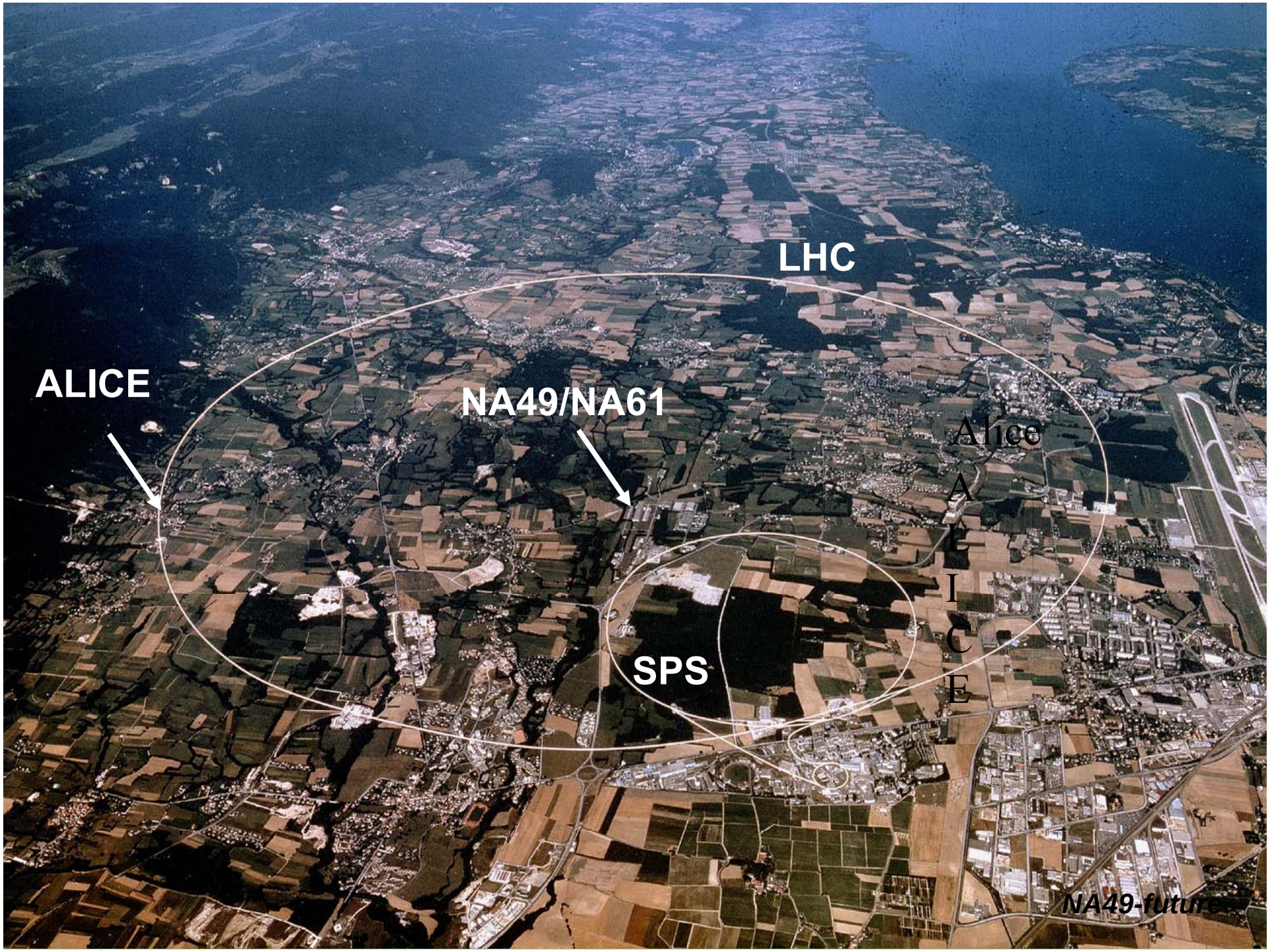
18 degrees

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/ Nehéz-ion 2010/
FLAIR, Darmstadt	45 GeV	2015


LHC
ALICE
NA49/NA61
Alice
A
L
I
C
E
SPS
NA49-future

Kitűzött feladatok

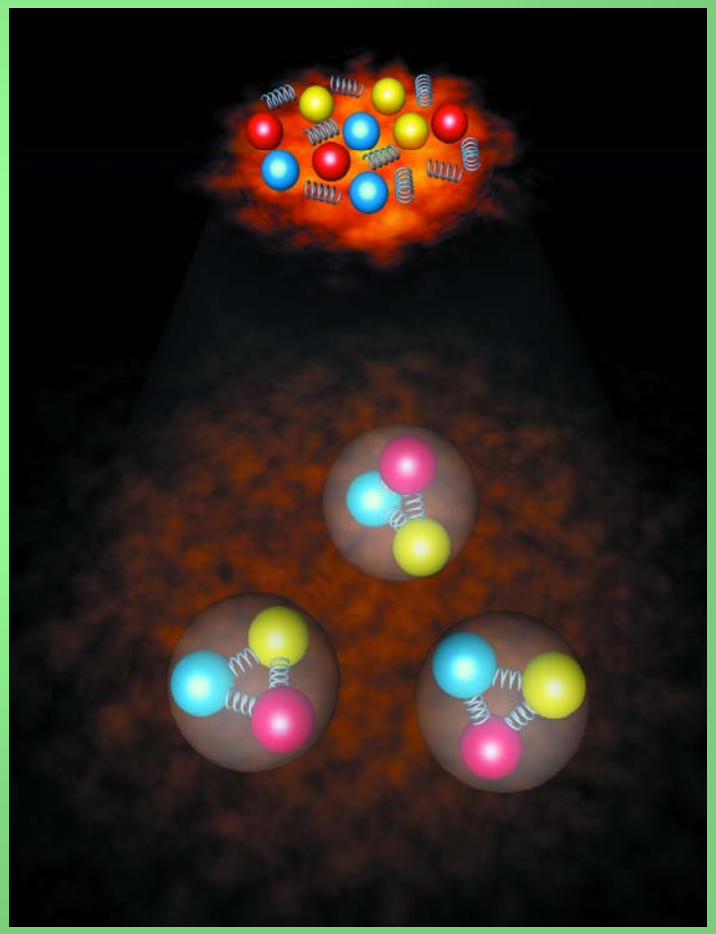
- Alacsonyabb energiákon:
  - Állapotegyenlet ρ(p) meghatározása a stabilitási pont közelében
  - Új, a stabilitási vonaltól távol eső atommagok előállítása
- Magasabb energiákon:
  - Állapotegyenletnek a ρ(T) és ρ(p) meghatározása
  - Új fajtájú anyag a Quark Gluon Plazma előállítása és tulajdonságainak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

Mérési módszerek

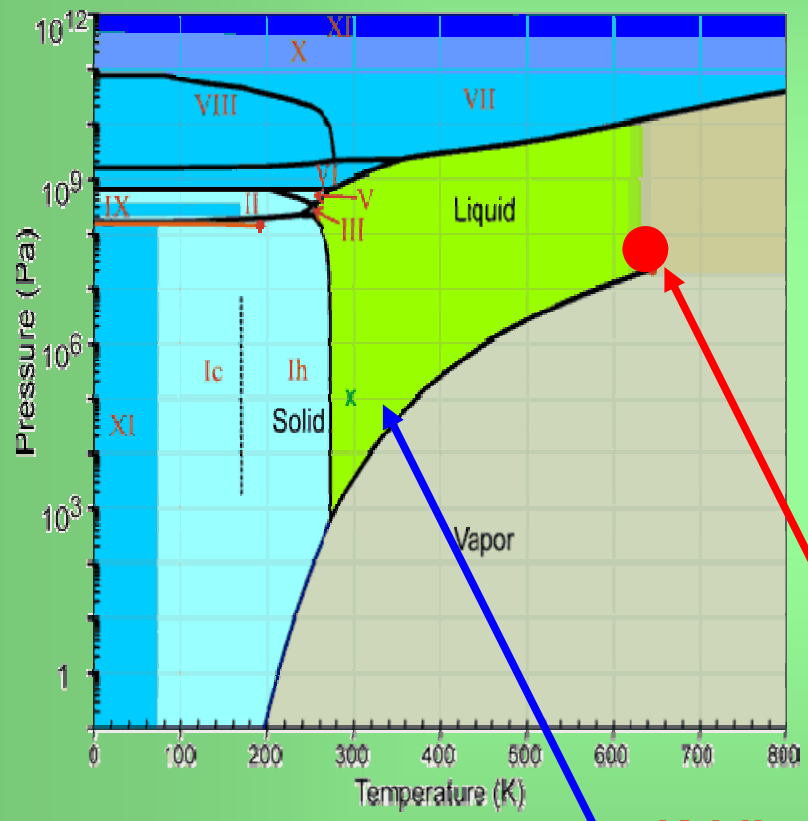
- Ütközési paraméter
  - A nem kölcsönható anyagrész mennyiségének mérése
  - Az ütközésben keletkezett részecskék számának mérése
- A keletkezett tűzgömb geometriai nagysága
  - Azonos típusú részecskék eloszlásából
- A tűzgömb hőmérséklete
  - A keletkezett részecskék nyalábra merőleges irányú impulzus eloszlása
- Kémiai összetétele
  - A keletkezett részecskék fajtájának eloszlása /különösen értékesek, amelyek megmaradnak a kifagyás folyamata alatt/

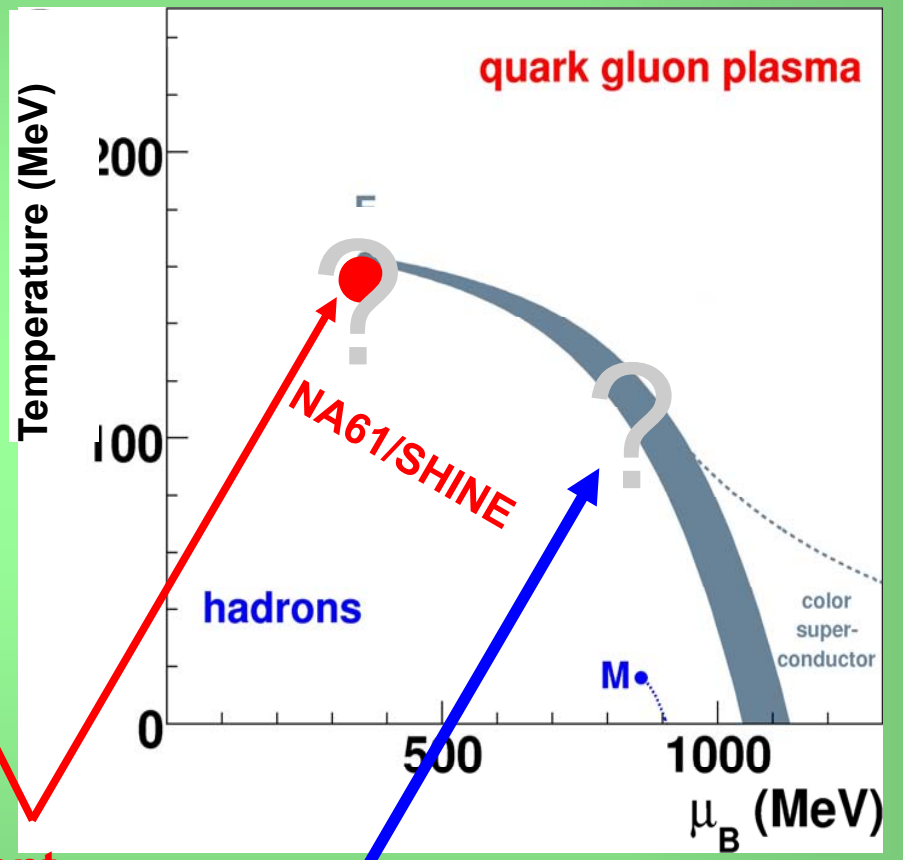
A viz fázisai

Az erősen kölcsönható anyag fázisai



A viz fázisgörbéi de a **A maganyag fázis görbéit még nem ismerjük**

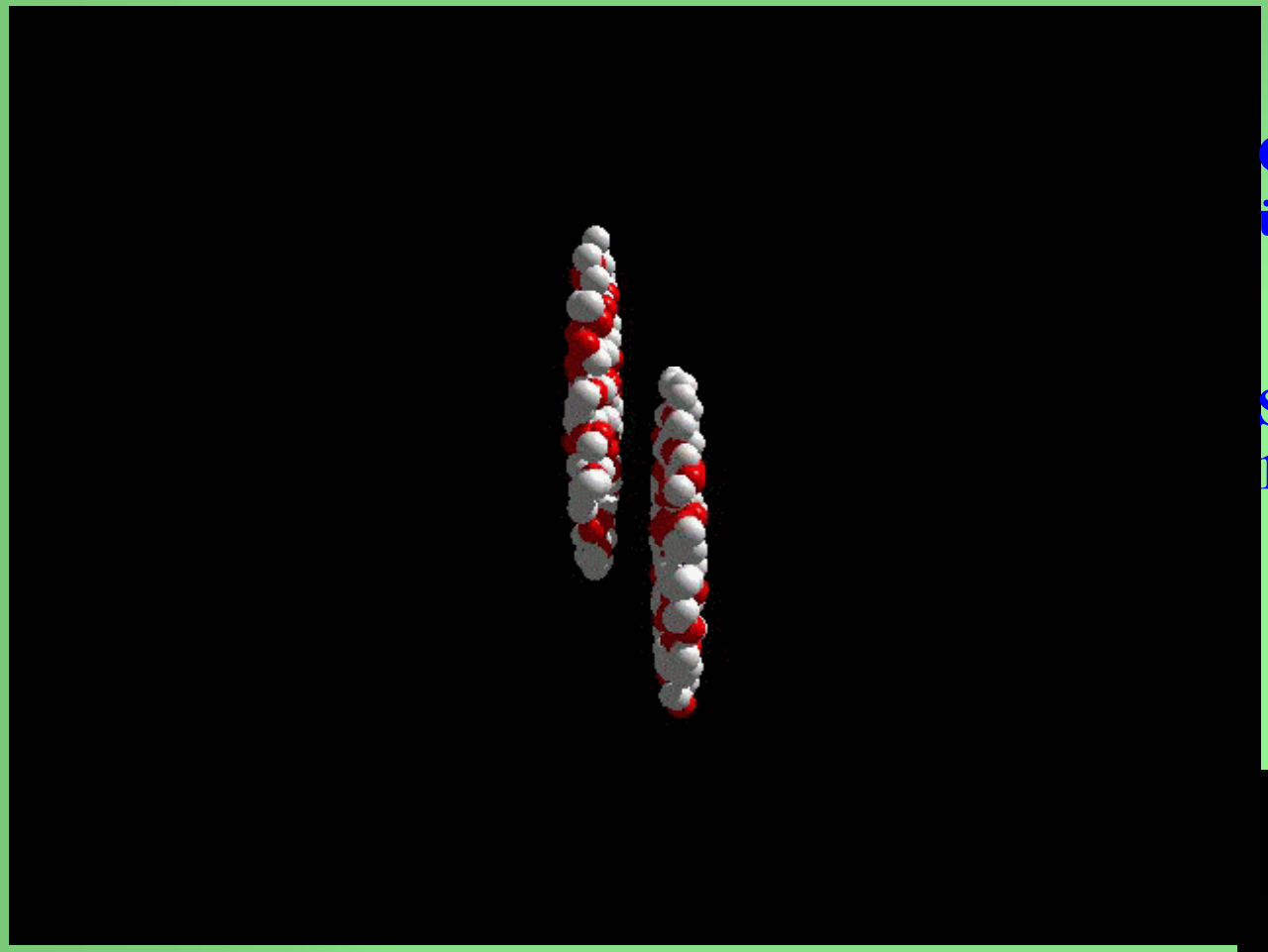




Kritikus pont

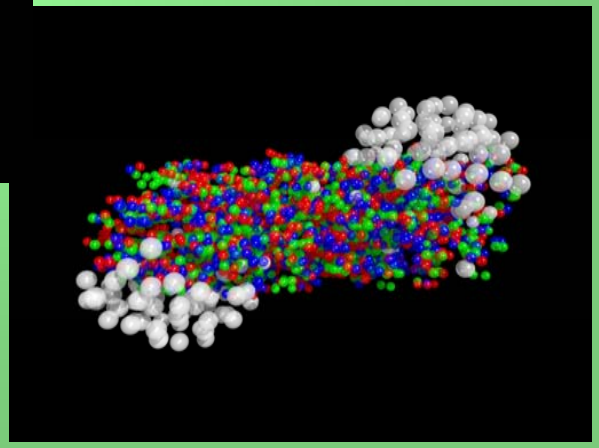
Baryochemical potential (MeV)

Első rendű fázisátalakulás



Ólom atommagok ütközése, 5500*208 GeV = 0,00018 J

Szimuláció 10^{-13} cm méretskálán

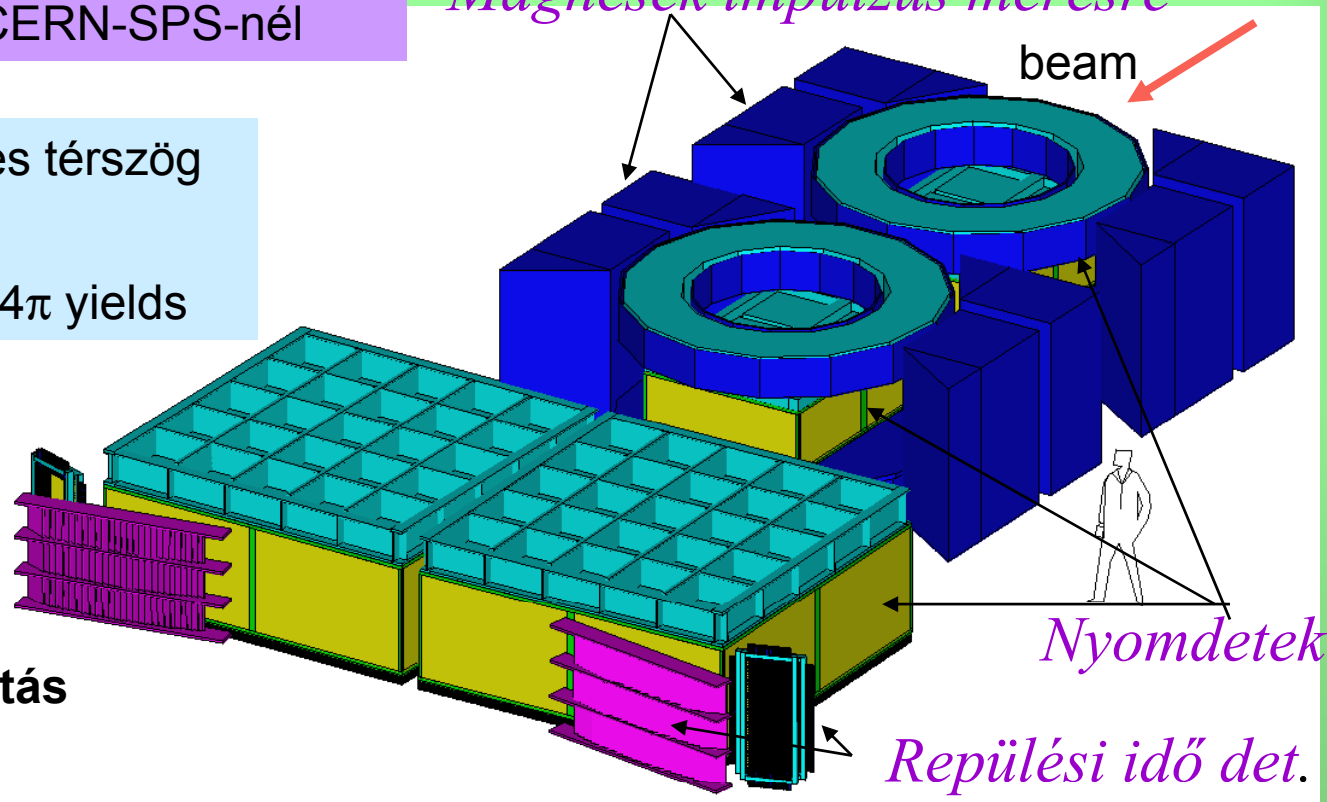


Az NA49/NA61-es kisérlet

nagy térszögű hadron spektométer a CERN-SPS-nél

Az előremenő teljes térszög le lett fedve ebből:

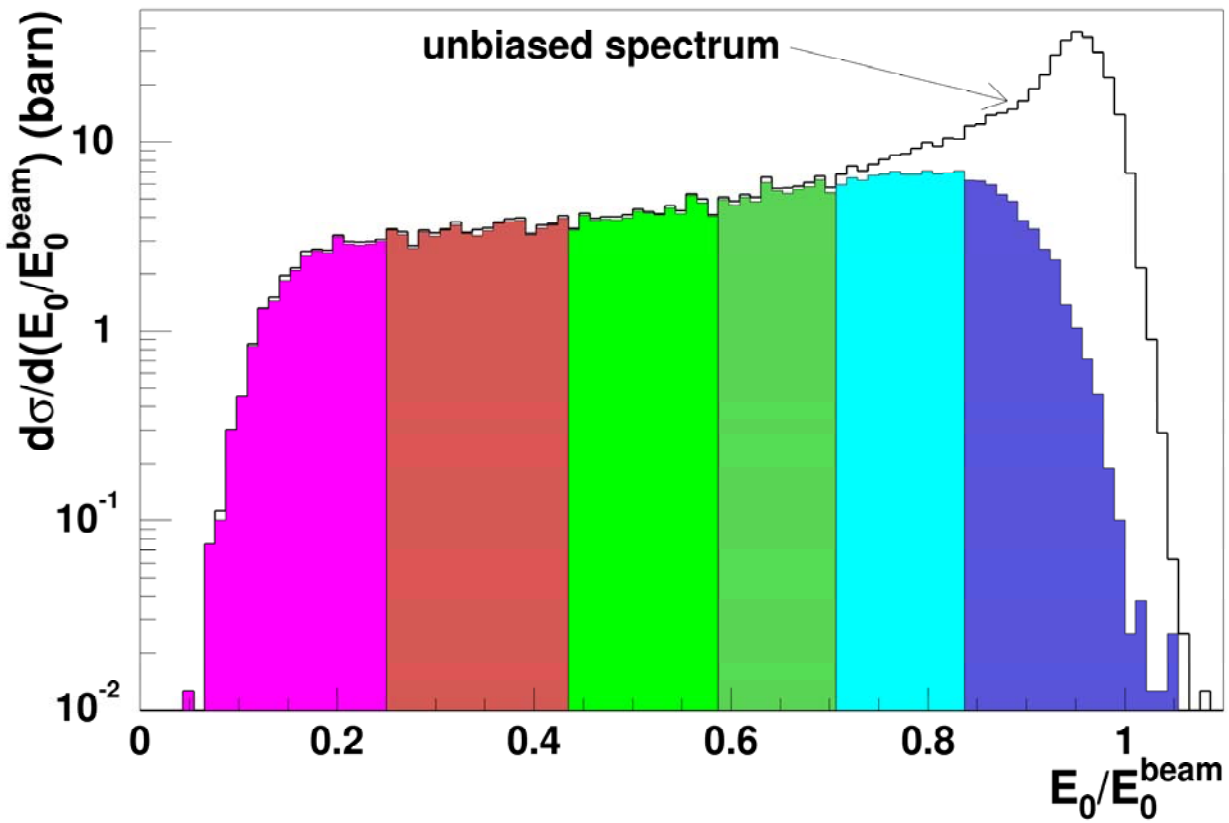
(y,p_t)-spektrum $\rightarrow$ 4π yields



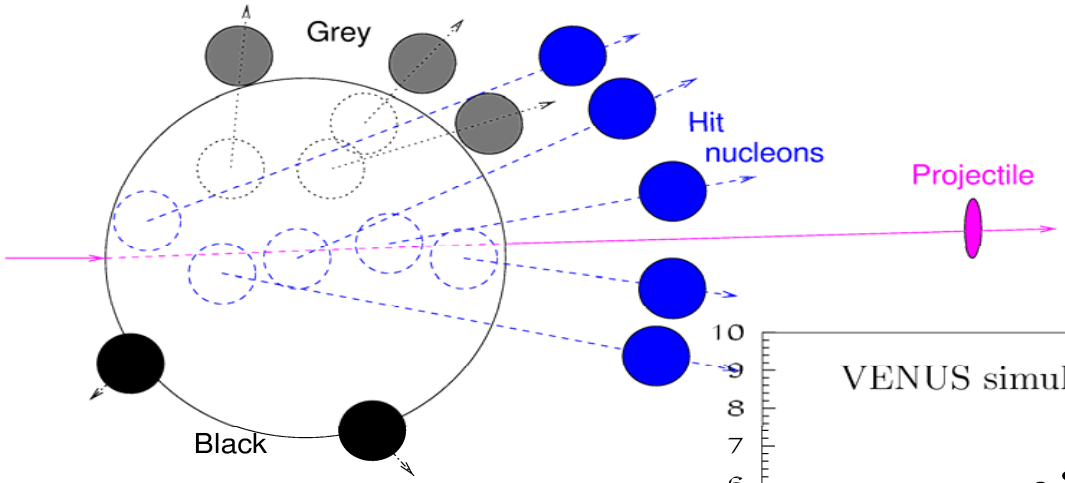
részecske azonosítás

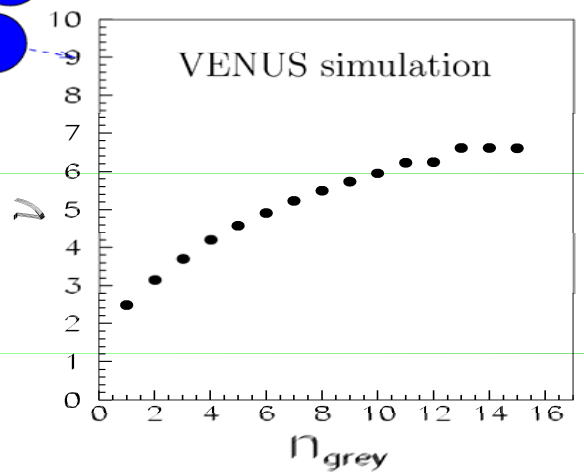
- dE/dx (3-6% res.)
- TOF (60 ps res.) centrális rapiditás körül
- invariant mass + topology (5-10 MeV res.)

- Centralitás mérése a bombázó részecske fragmentumai energiáinak alapján AA esetén
- könnyebb bombázó részecskék az ólom atommag hasításából

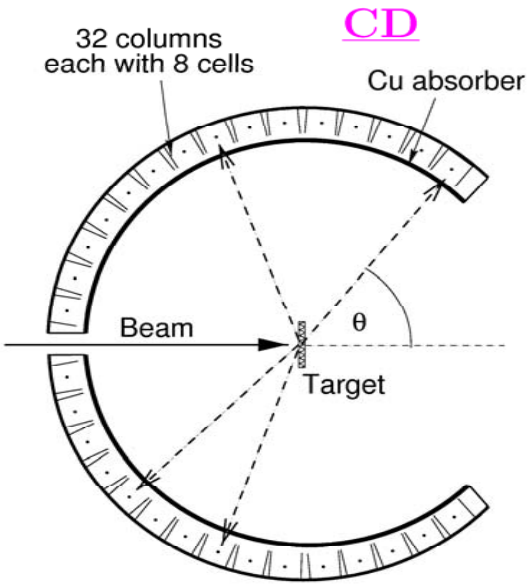


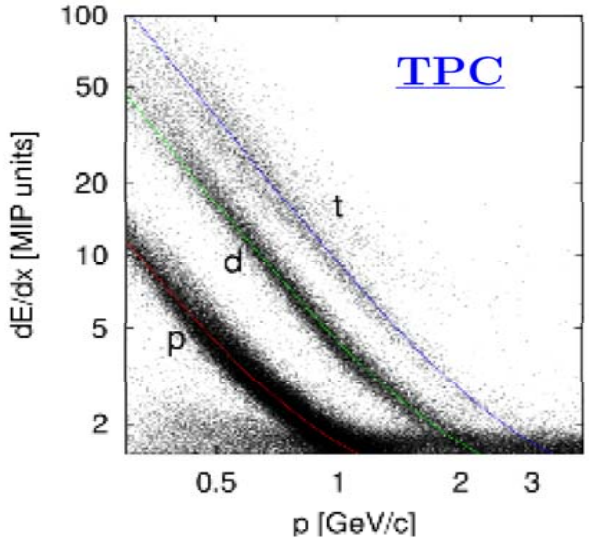
bin	fraction of cross section	⟨b(fm)⟩	⟨N_{part}⟩
1	0.05	2.2	362±12
2	0.09	4.6	304±16
3	0.09	5.7	241±16
4	0.09	7.0	188±16
5	0.15	8.5	130±14
6	0.52	10.5	72±8





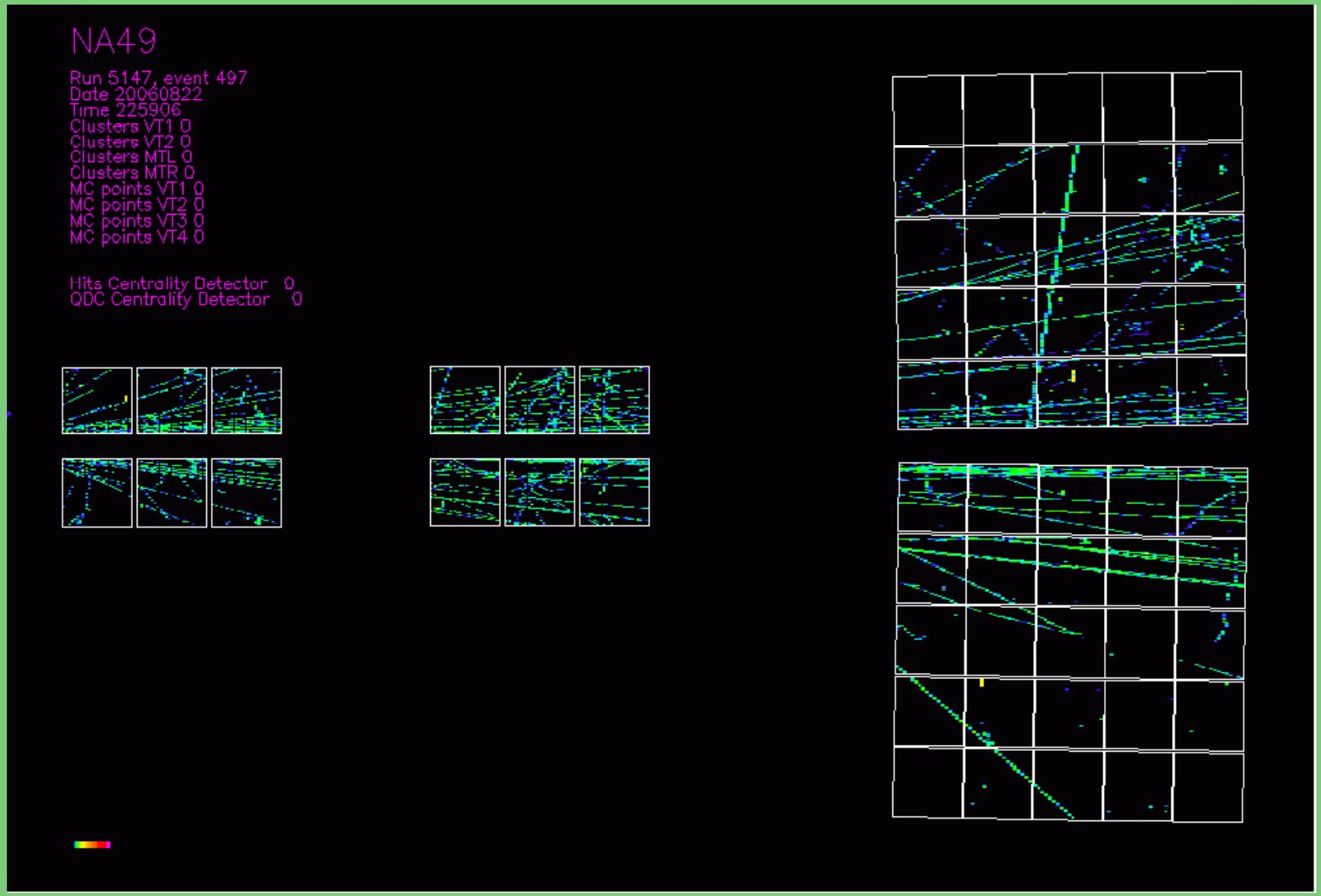
- grey: $0.15 < p < 1.0$ GeV/c
- black: $p < 0.15$ GeV/c

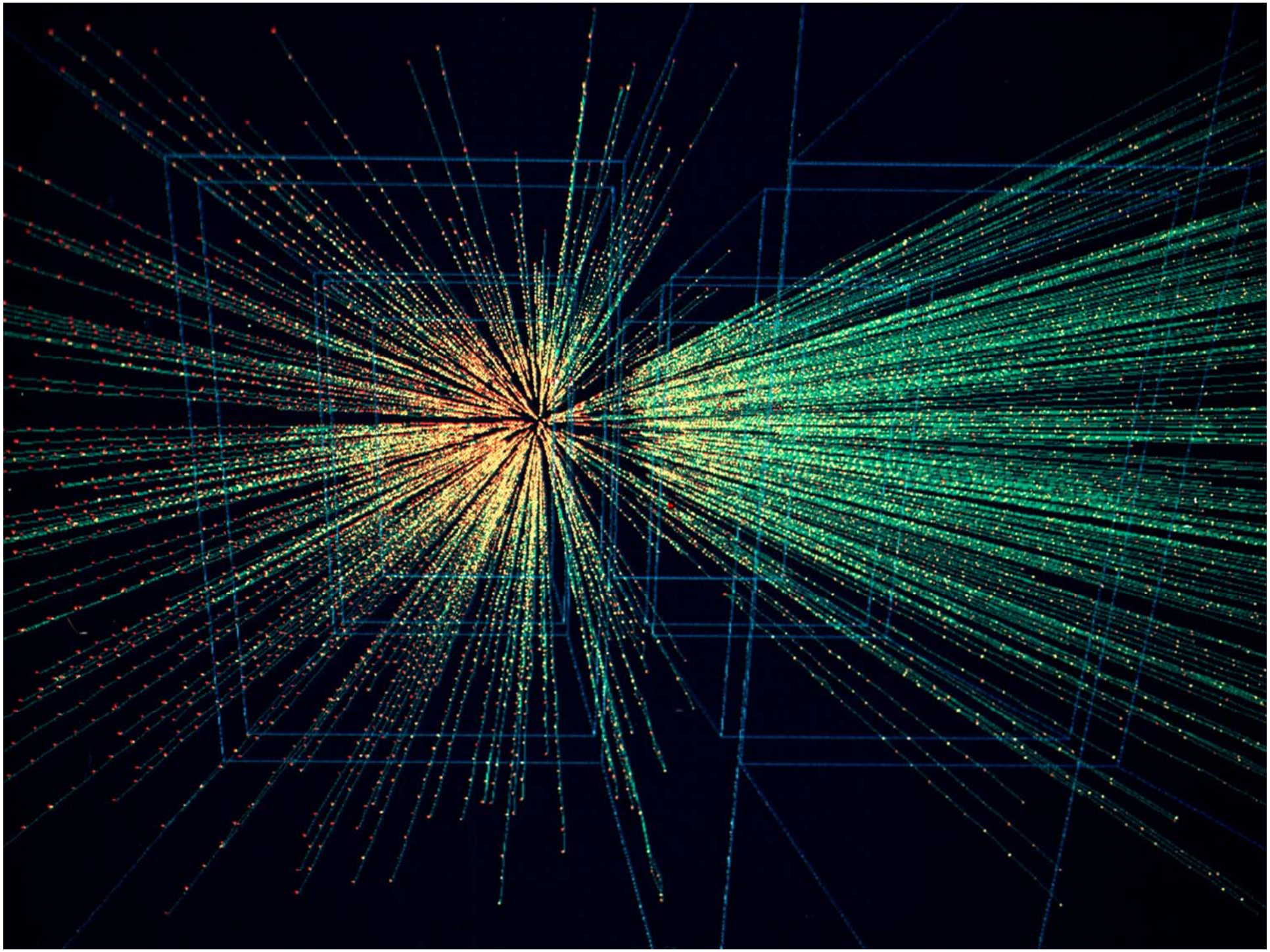


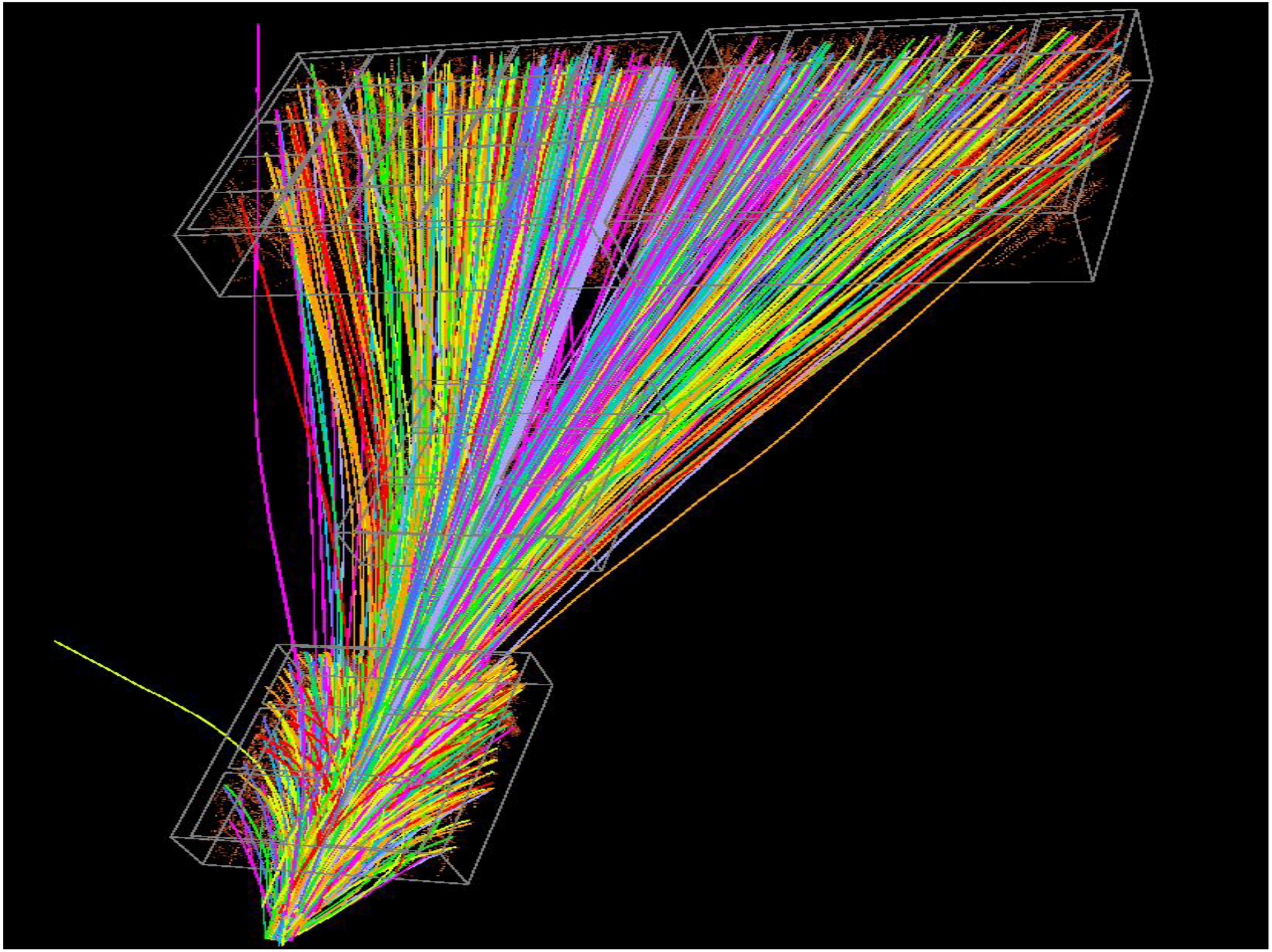


- Cu absorber 200 μ eliminates

Egy esemény képe







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

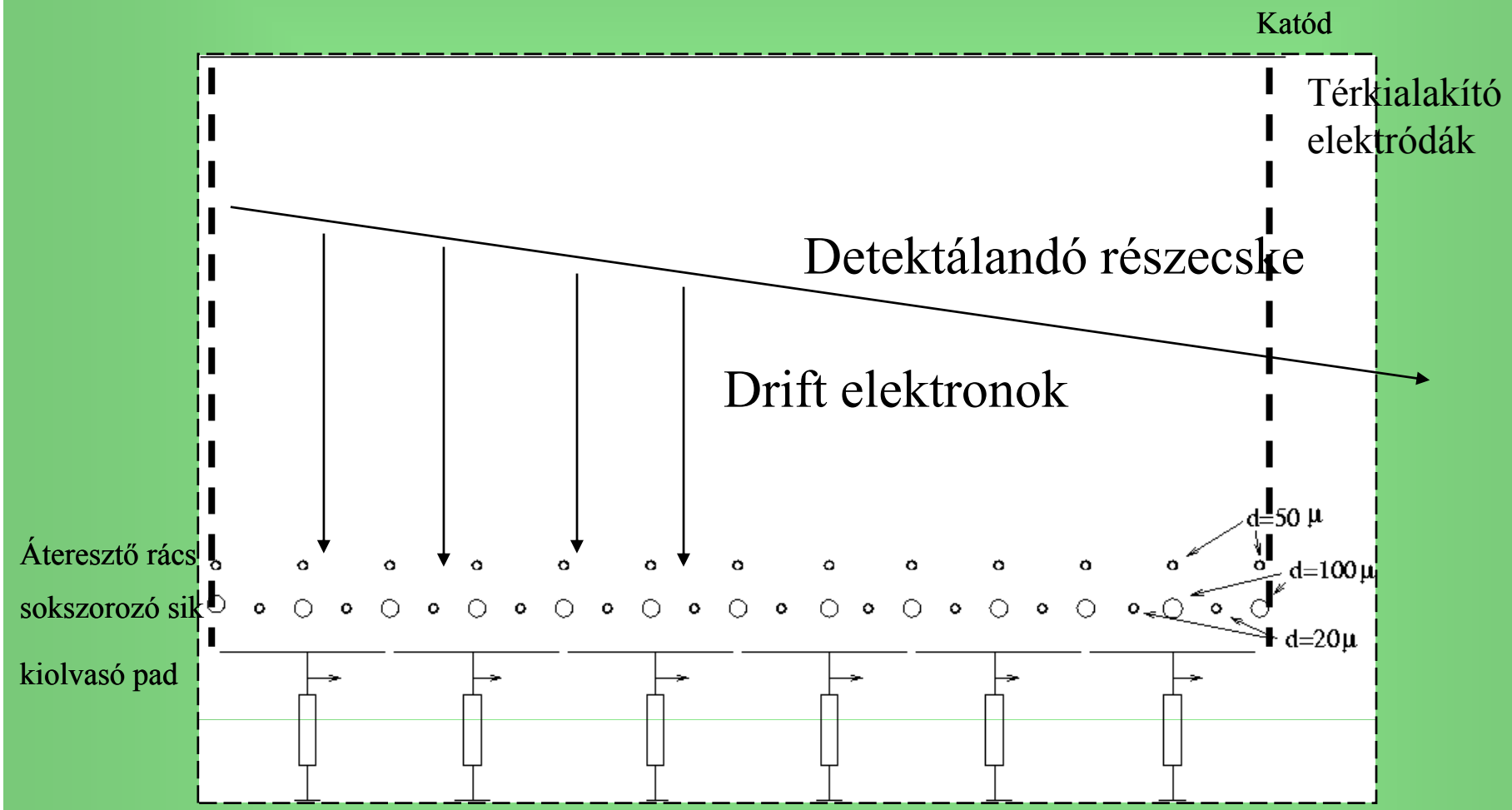
→nagy pontosságú adatok az elemi ütközéseknél

• 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

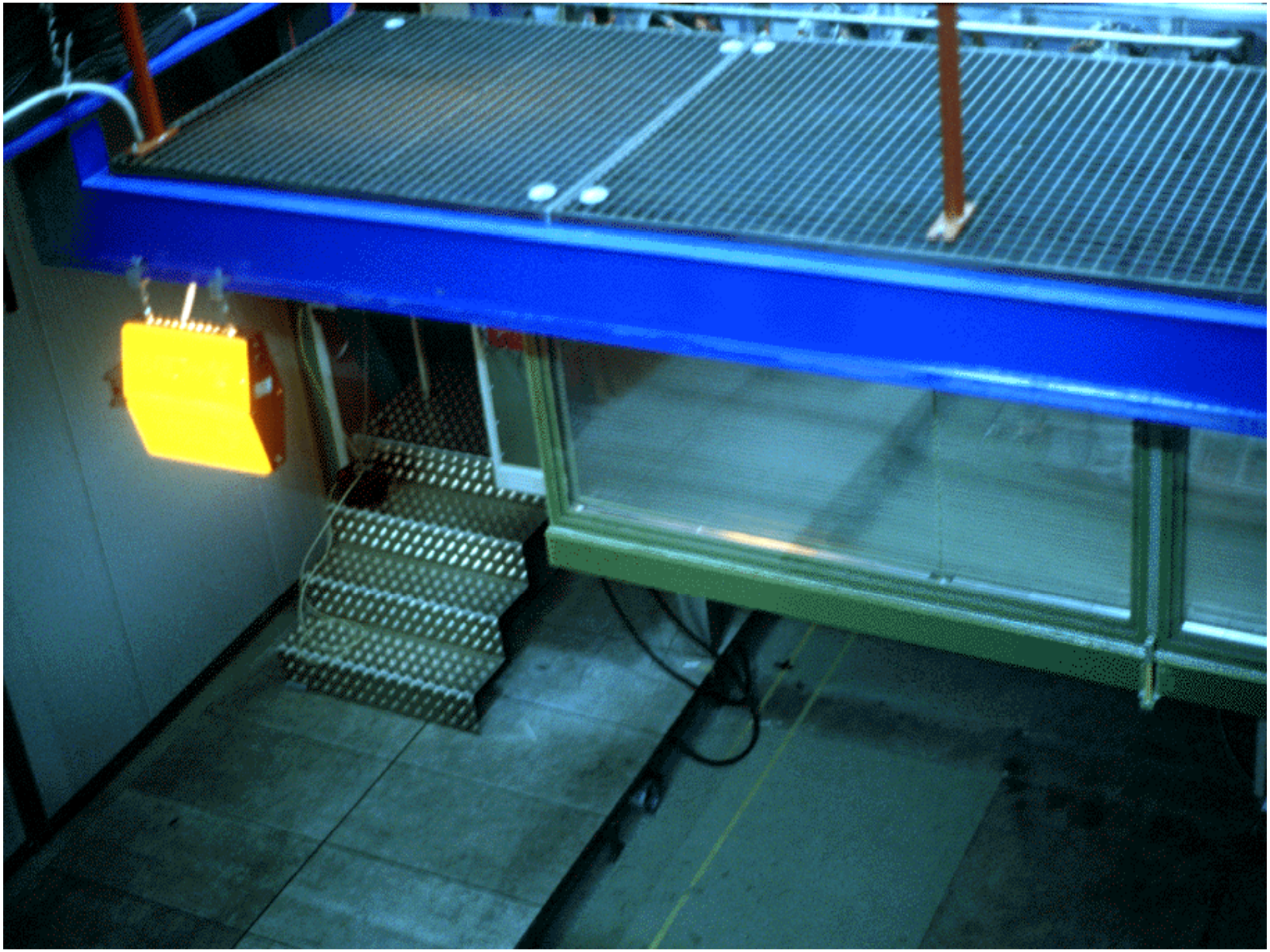
NA61-ben tervezett

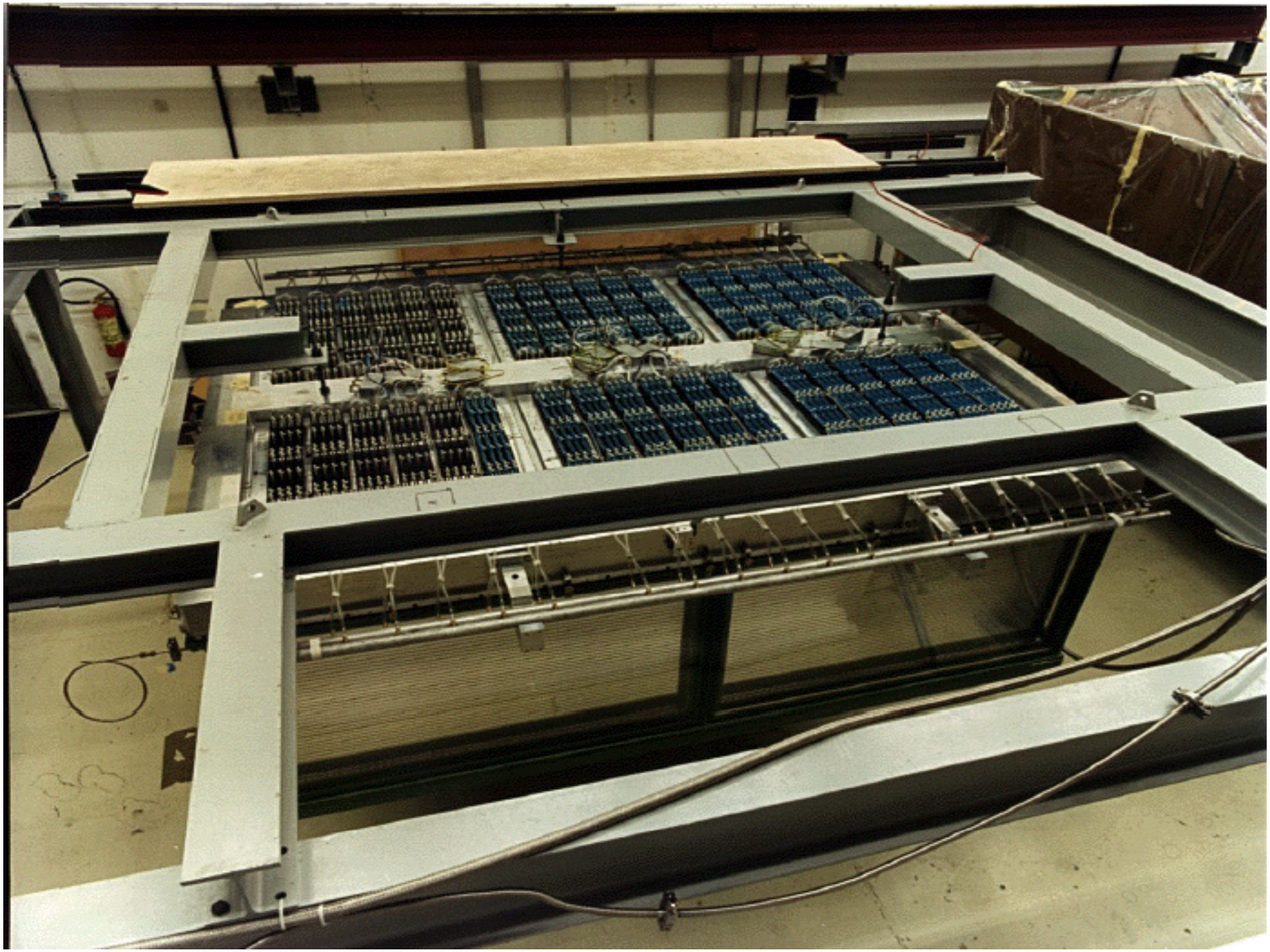
In+In 10-160 GeV/n
Si+Si 10-160 GeV/n
C+C 10-160 GeV/n

TPC Time Projection Chamber



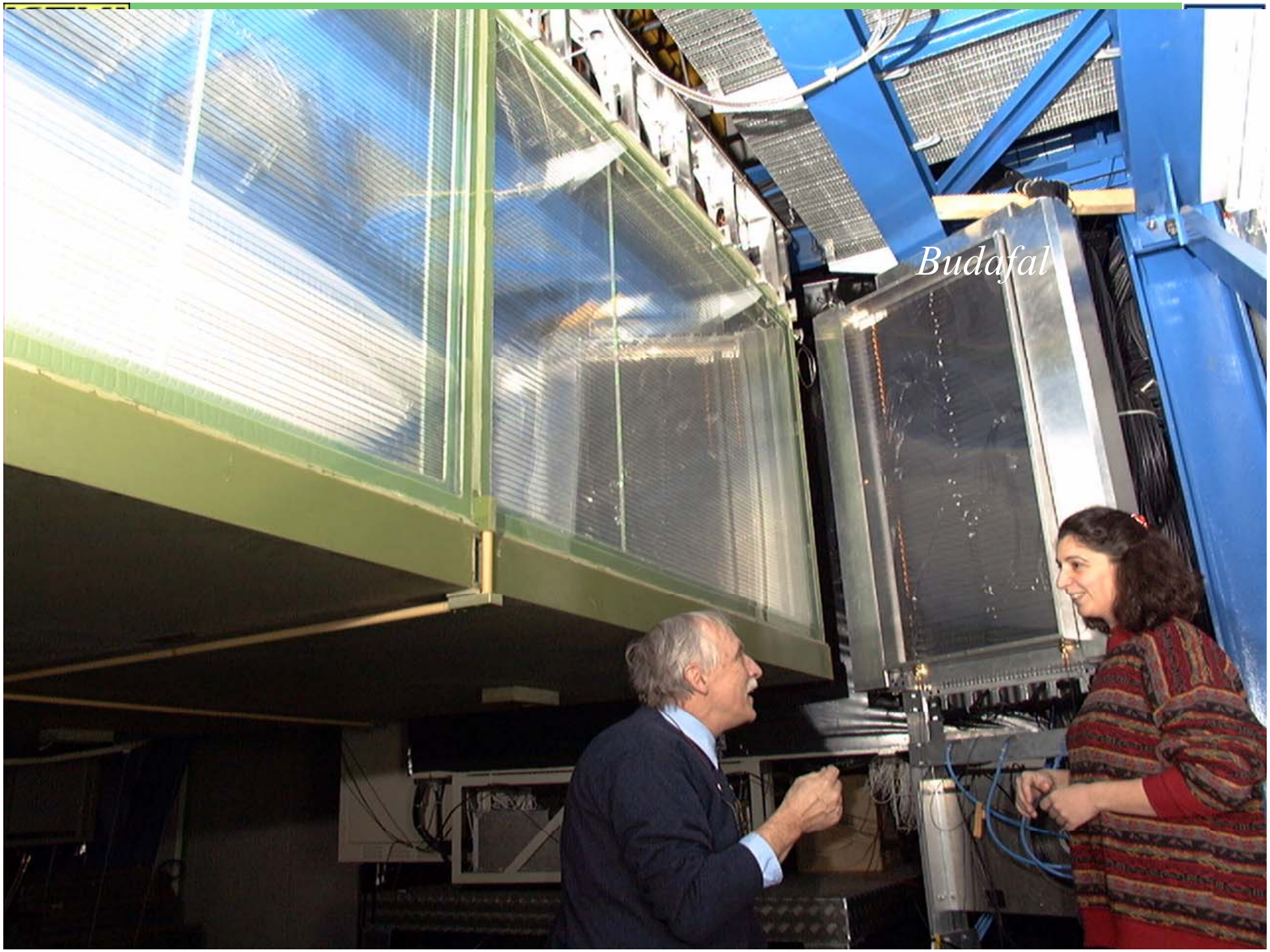
x,z a pad elhelyezkedéséből, y a driftelési időből





Repülési idő mérése

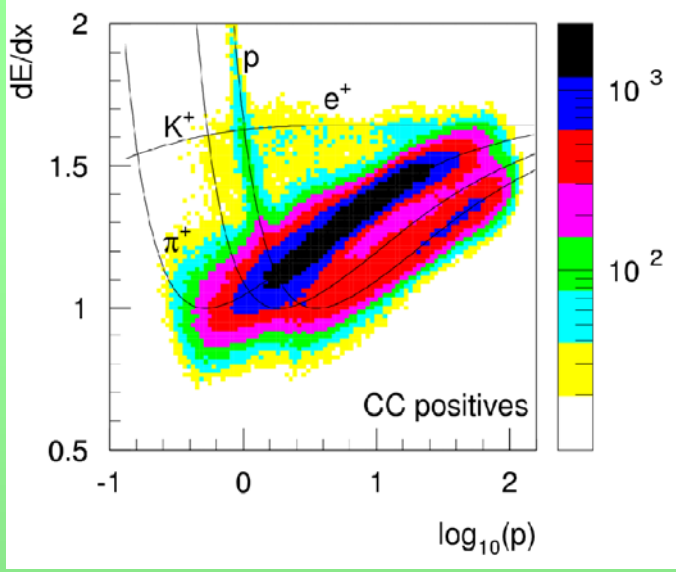
- A mérés kezdete: a bombázó részecske belépése a rendszerbe
- A mérés vége: a részecske becsapódása a detektorba
- A bombázó részecske repülési ideje a céltárgyig állandó
- A keletkezett részecske által megtett út az impulzusától függ a mágneses tér miatt
- A mérés relatív, mert csak a különböző részecskék között repülési idő különbséget kell mérni.
- Az NA49/NA61-es kísérletnél a repülési út ~14m, a szükséges pontosság 60-80 ps, az egyik rendszert a KFKI készítette és ezért BUDAFAL a neve.

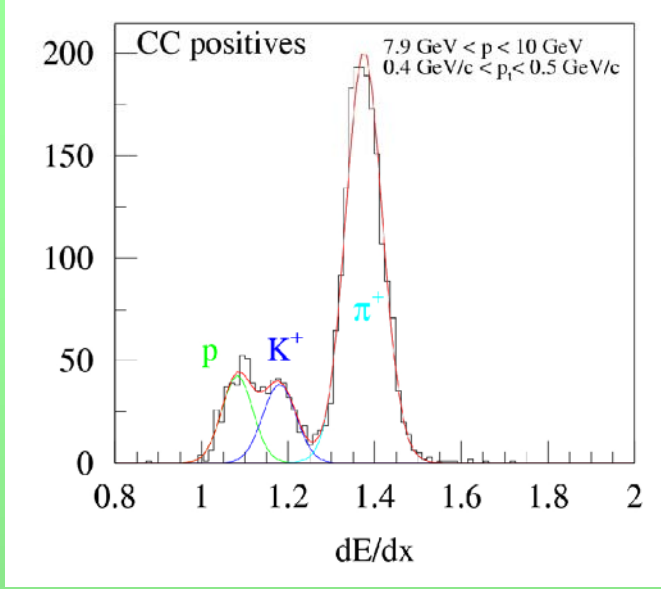

Budafal

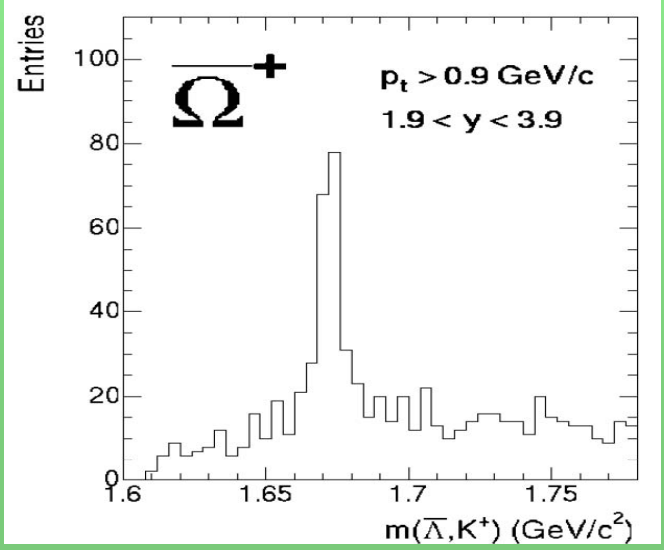
Részecske azonosítás

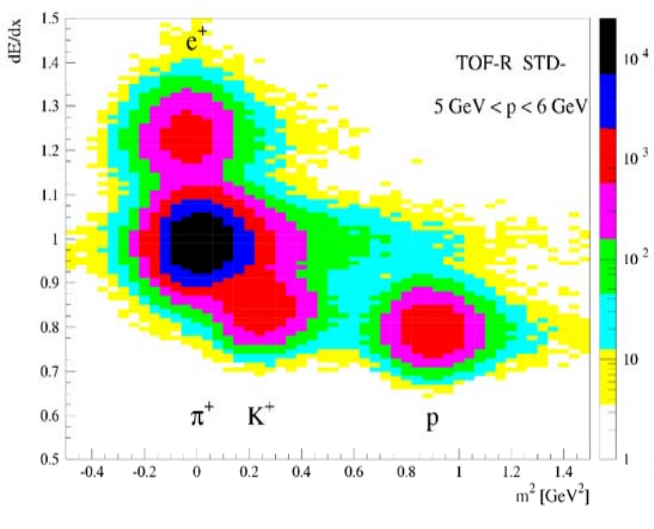
momentum

dE/dx



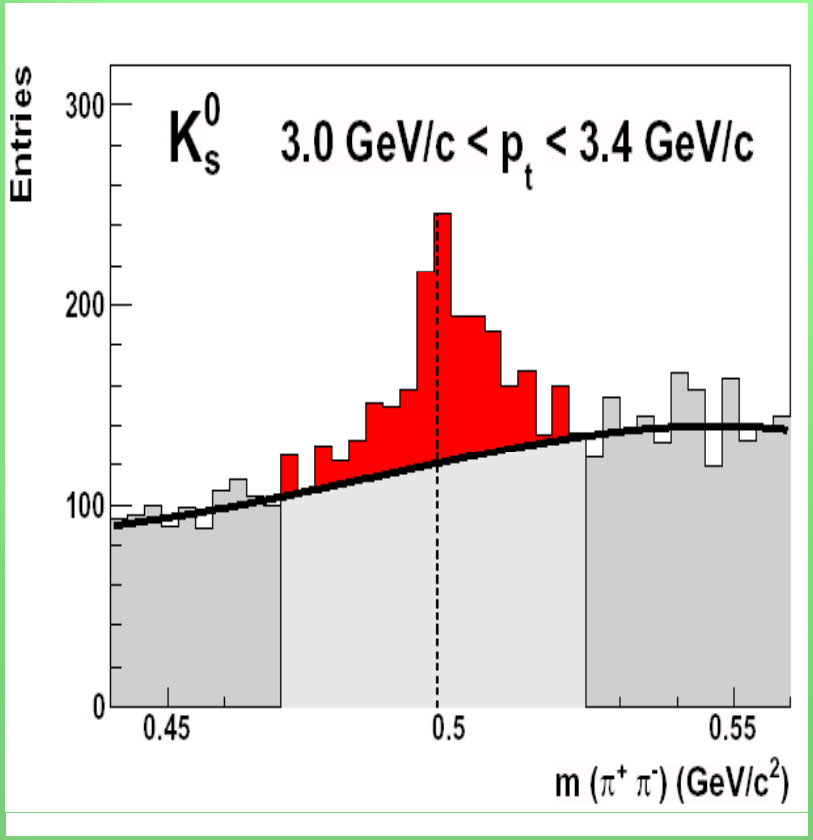


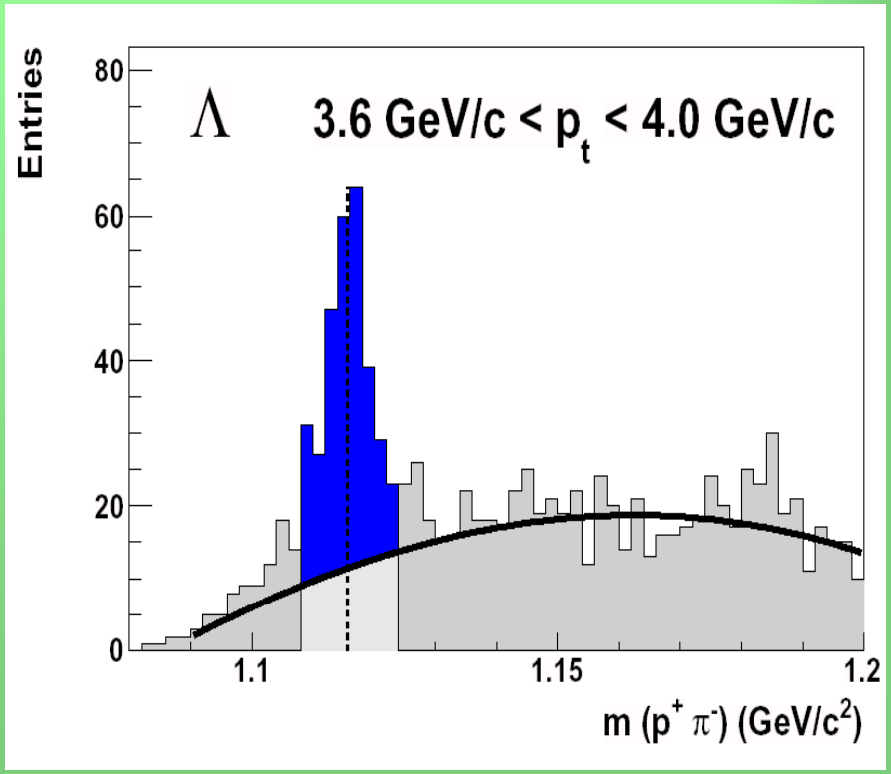




K_s^0 és Λ^0 analizis

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



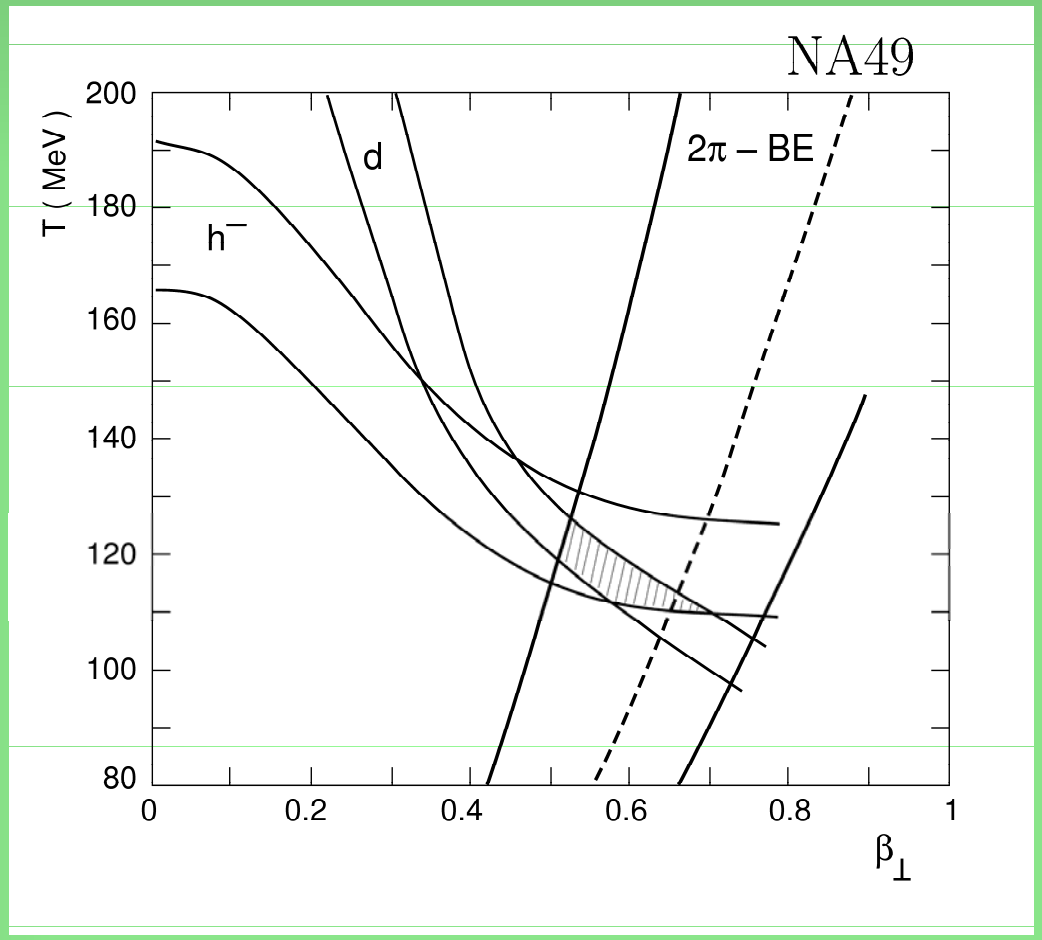


A tűzgömb méretének meghatározása

- 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

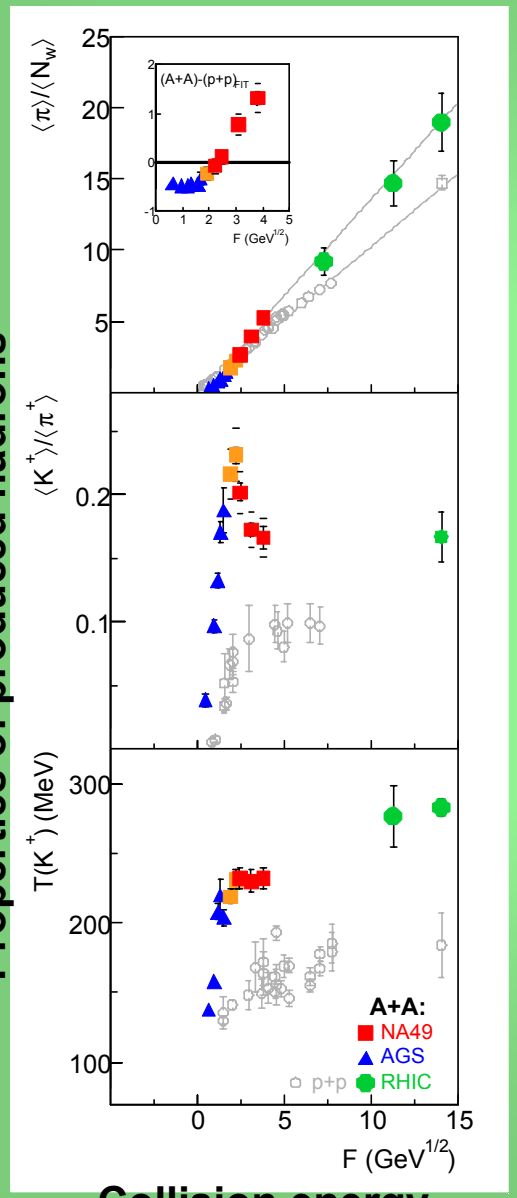
  impulzus eloszlásai és a forrás nagysága és kiterjedésének sebessége között is van egy összefüggés, ami szintén a forrás nagyságától függ

A tűzgolyó hőmérséklete

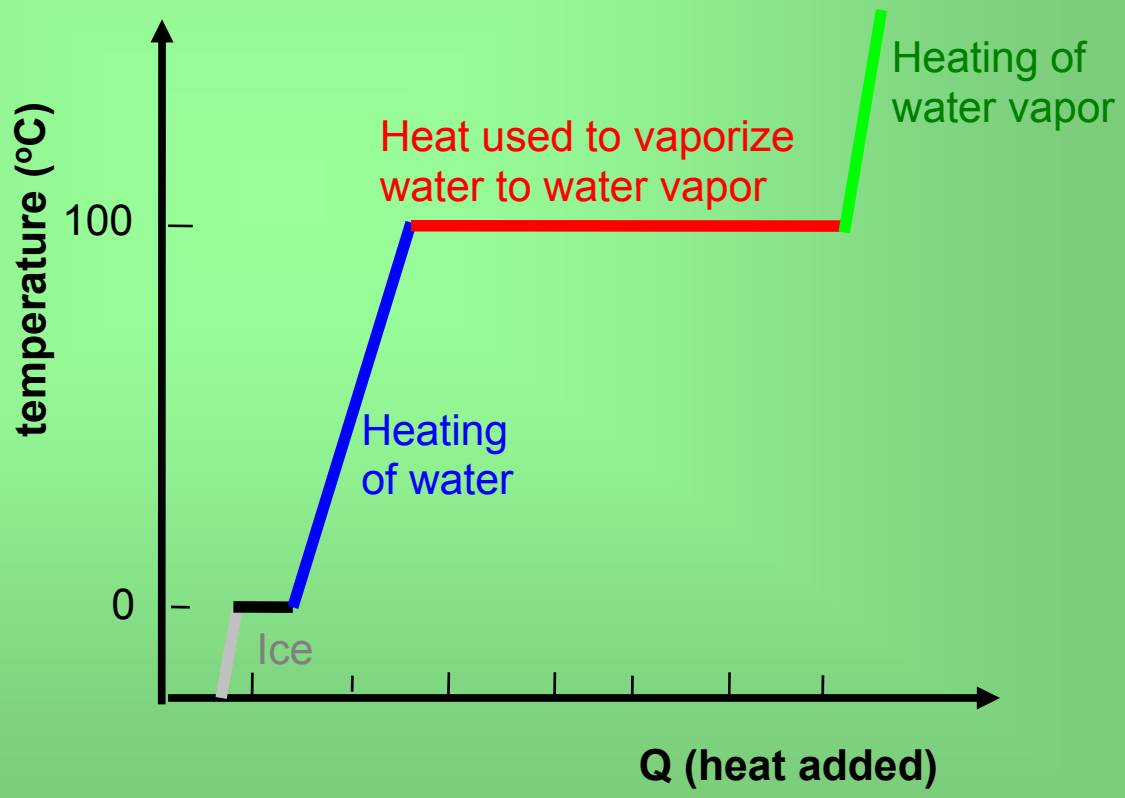


Felületen a tágulási sebesség

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,



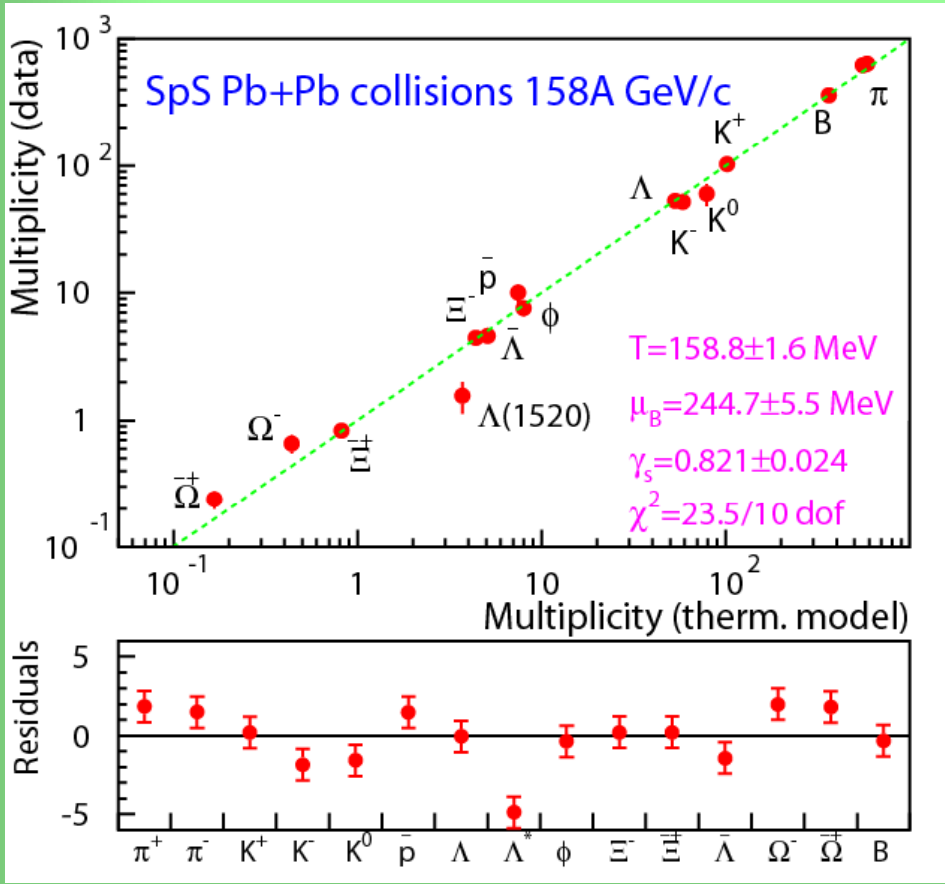
similarly the heating curve of water shows the transitions between the phases of water



NA49-future

Hadronok a centrális PbPb ütközéseknél

- Kezdeti állapot: energia sürüség $\varepsilon \approx 3$ 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:

  $T_{chem} \approx 160$ MeV

  $\mu_B \approx 240$ MeV

  ($\gamma_S \approx 0.8$)

- RHIC:

  $T_{chem} \approx 160$ MeV

  $\mu_B \approx 30 - 50$ MeV

A hadronizáció a fázis átmenethez közel történik

Fázis diagram

Hadronkeltés hatáskeresztmetszeteit mértük meg 20-158 GeV/n

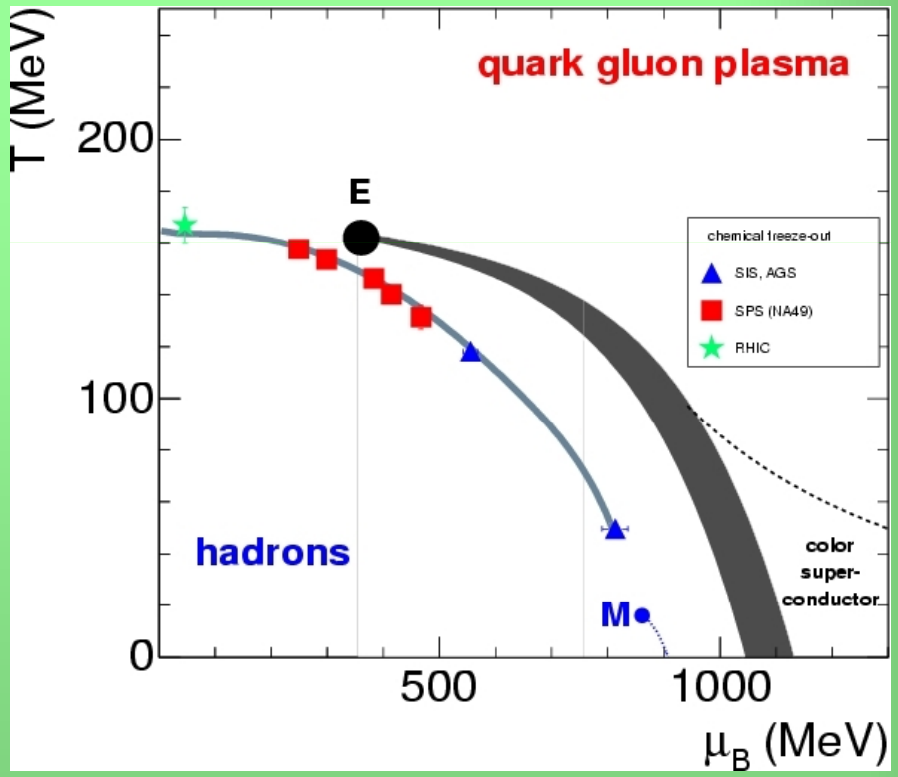
$\rightarrow(T,\mu_B)$ a hadrokémiai kifagyásnál

Új program a kritikus pont kísérleti kimutatása:

- Fluktuációk mérésével a bombázó energia és atommag függvényében

NA61

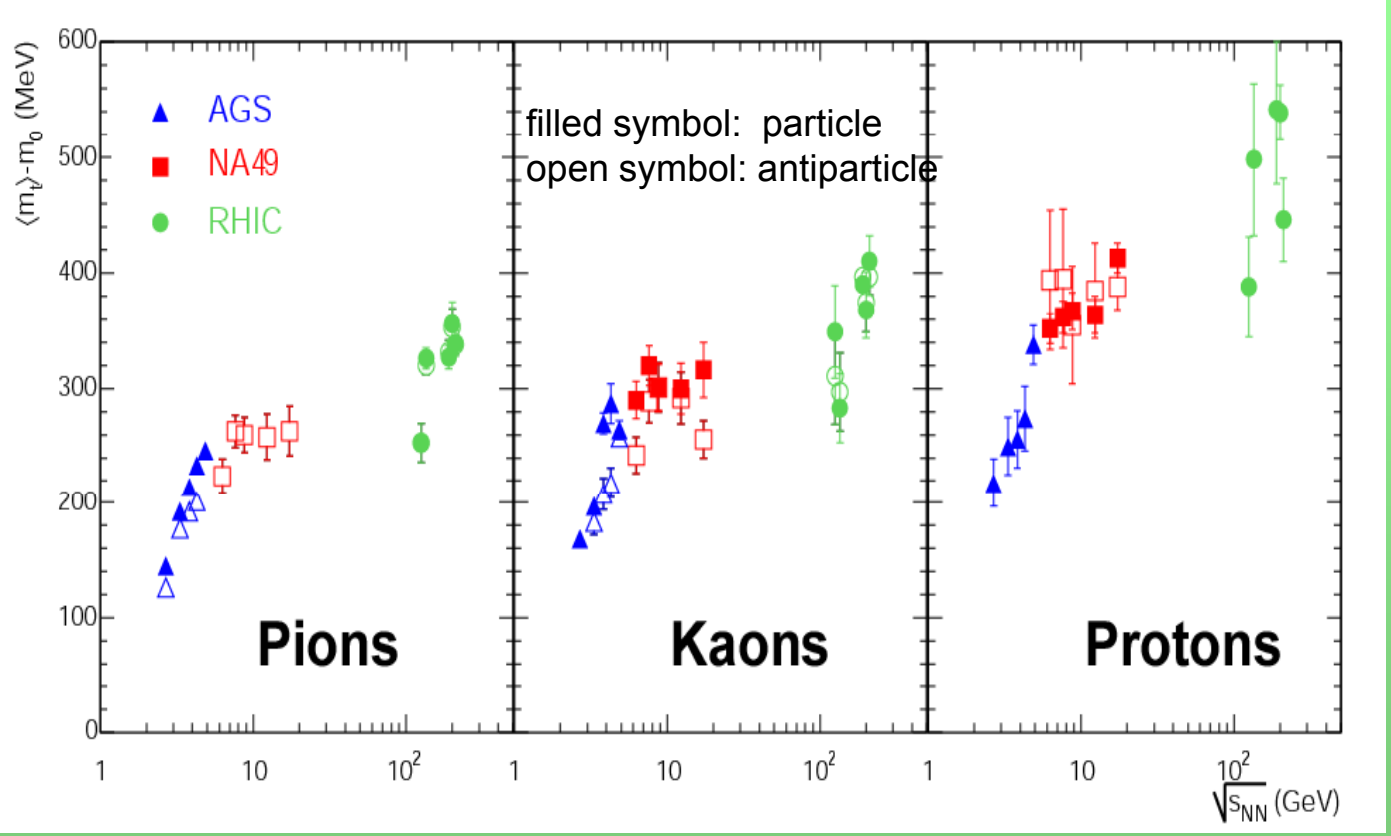
- **A deconfinementet hol érjük el? Az SPS-nél vagy a RHIC-nél?**
- **Alacsony SPS energiáknál**
  - **Csökkenő hőmérséklet**
    növekvő barion sűrűség
  - **(depart from phase boundary)**



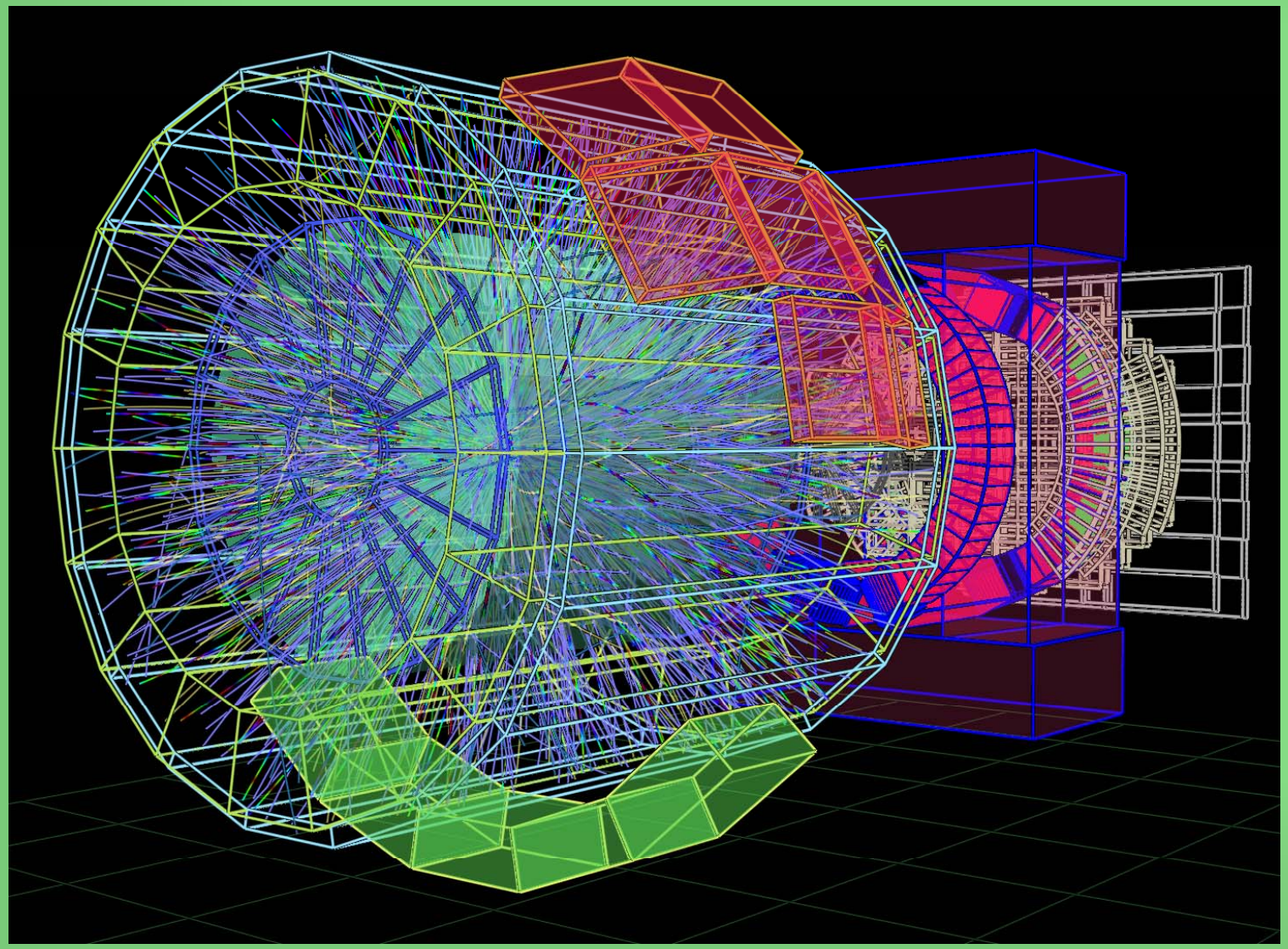
Kritikus pont (E): Fodor and Kratz,
Hadron Gas(γ_s): J. Manninen et al.,
Grey band: elsőrendű fázisátalakulás]

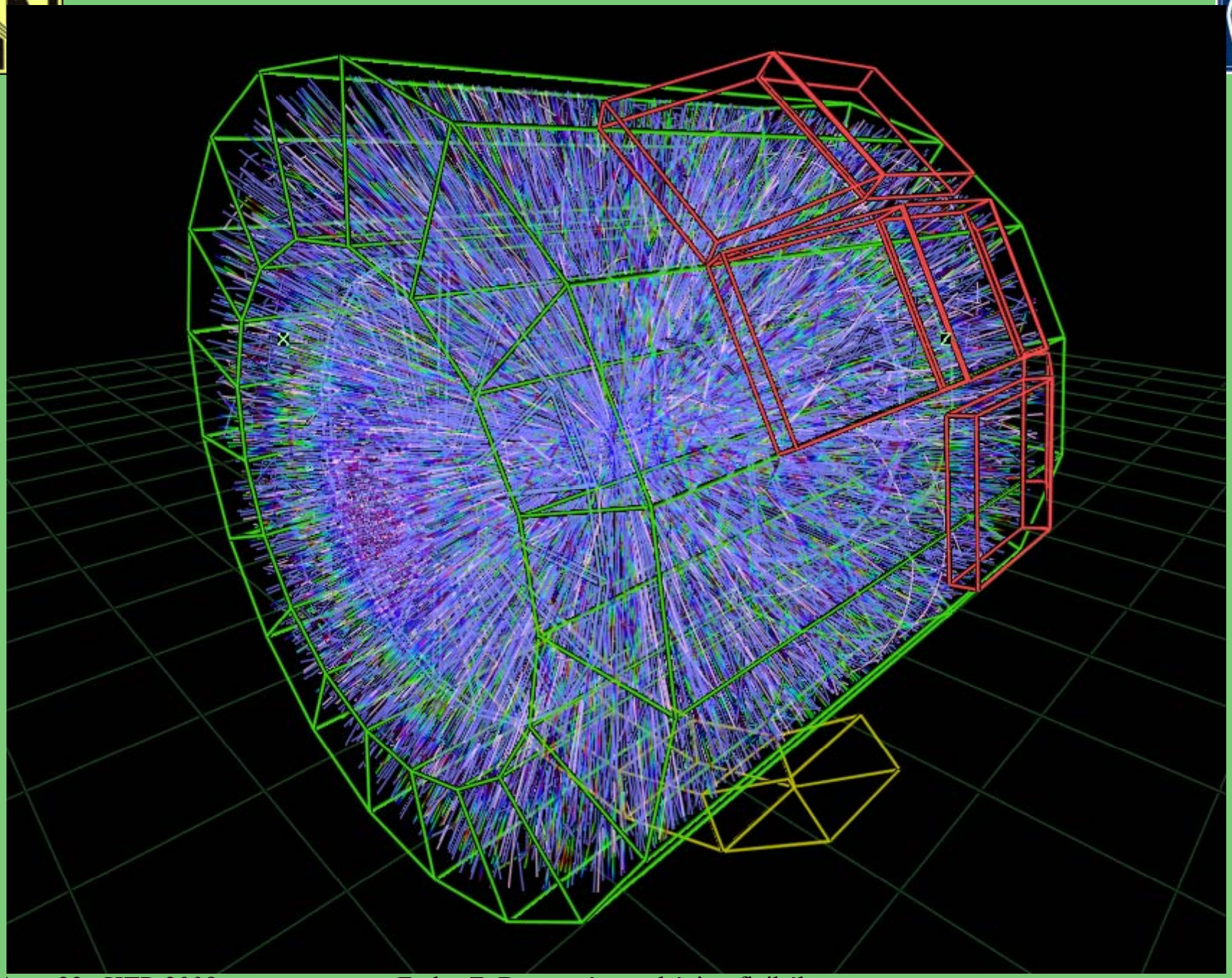
Transverzális tömeg eloszlások

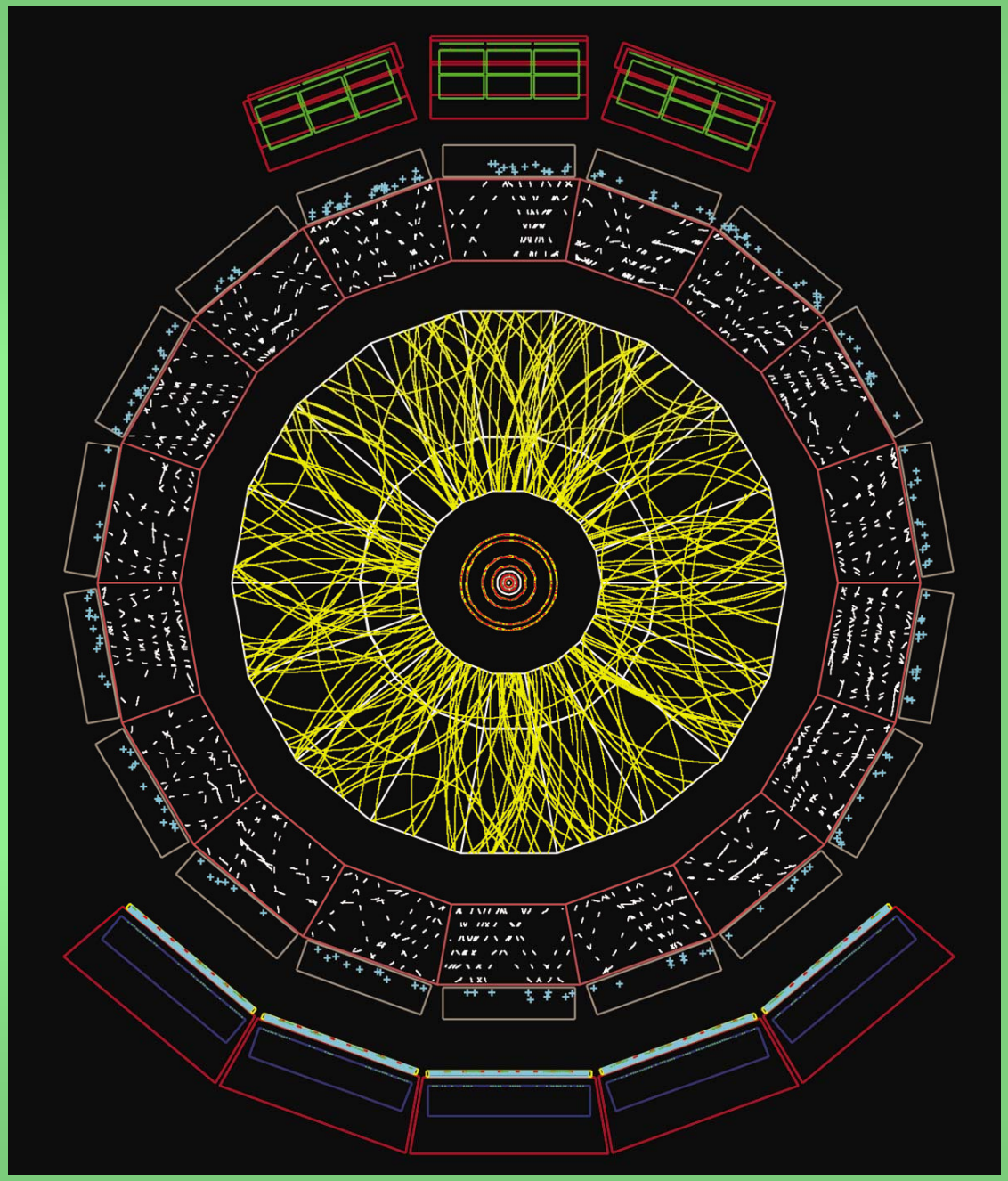
- az $\langle m_t \rangle$ energiafüggésében is változás figyelhető meg az alacsonyabb SPS energiáknál



Szolenoid mágnes 0.5 T
Kozmikus sugárzás trigger
„Forward” detectorok
• PMD
• FMD, T0, V0, ZDC
Specializált detektorok
• HMPID
• PHOS
Központi nyomkövető rendszer
• ITS
• TPC
• TRD
• TOF
MUON Spektrométer
• elnyelő anyagok
• nyomkövető állomások
• trigger kamrák
• dipól mágnes







Magyar aktivitás az ALICE együttműködésben (1996-2002)

DAQ - DDL: központi adatgyűjtő rendszer
- Dénes E., Kiss T., Rubin Gy., Soós Cs. -

PesTOF
Töltött hadronok azonosítása
$\pi^{\pm}$, $K^{\pm}$, $p^{\pm}$, d, ...
Fizikai modellek fejl.

Pálla G., Sziklai J.
Zimányi J.
Boldizsár L.
Harangazó G.

TPC
Elektromos tér kialakítása
Teszt-mérések

Fodor Z.

Magyar aktivitás az ALICE együttműködésben (2007)

DAQ - DDL: központi adatgyűjtő rendszer
- Dénes E., Kiss T., Rubin Gy., Soós Cs., Tölyhi T. -

ITS
TPC
TRD
TOF
részecske
nyomok
analízise

HMPID
Nagy impulzusú
$\pi^{\pm}$, $K^{\pm}$, $p^{\pm}$ azonosítása
Off-line analízis
Fizikai értelmezés

Molnár L., Agócs A.
Barnaföldi G.G.
Lévai P.

WEB-site

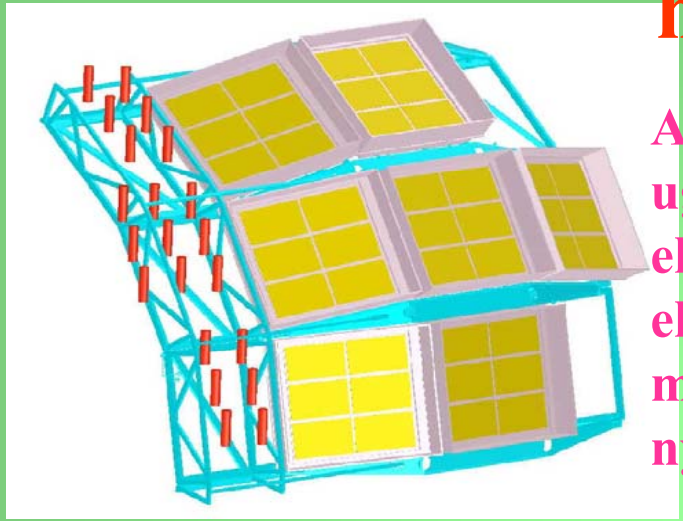
VHMPID + Trigger
Nagyon nagy impulzusú
$\pi\pm$, $K\pm$, $p\pm$ azonosítása
R&D, GEM-labor
Szimulációk

Fodor Z., Pálla G.
Boldizsár L., Futó E.
Varga D.
Hamar G.
Novitzky N.

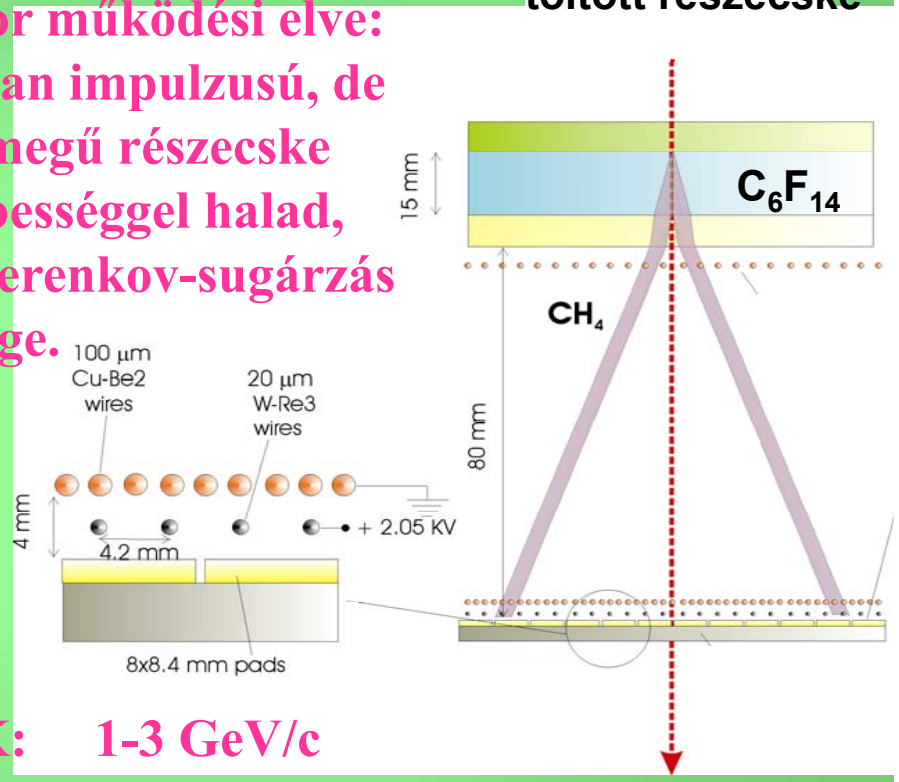
EMCal
Nagy imp
h-h korr.

LHC GRID ALICE-VO
KFKI RMKI állomás
(30 proc., 10 TB, 7/24)

HMPID: nagy impulzusú töltött hadronok azonosítása



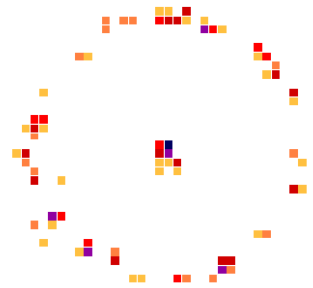
A detektor működési elve: ugyanolyan impulzusú, de eltérő tömegű részecske eltérő sebességgel halad, más a Cserenkov-sugárzás nyílásszöge.



7 db modul, 1,5x1,7 m² → 11 m²
Radiator: 15 mm folyékony C_6F_{14}
Törésmutató: n=1,2989

2006: építés, tesztelés befejezése
2006/09/13: leengedés az alagútba
2006/09/20-25: beüzemelés (legelső)

π - K: 1-3 GeV/c
proton: 2-5 GeV/c



<u>Magyar részvétel</u> 2006-ig:
gáz-tesztek, hűtési tesztek
közreműködés az beüzemelésben

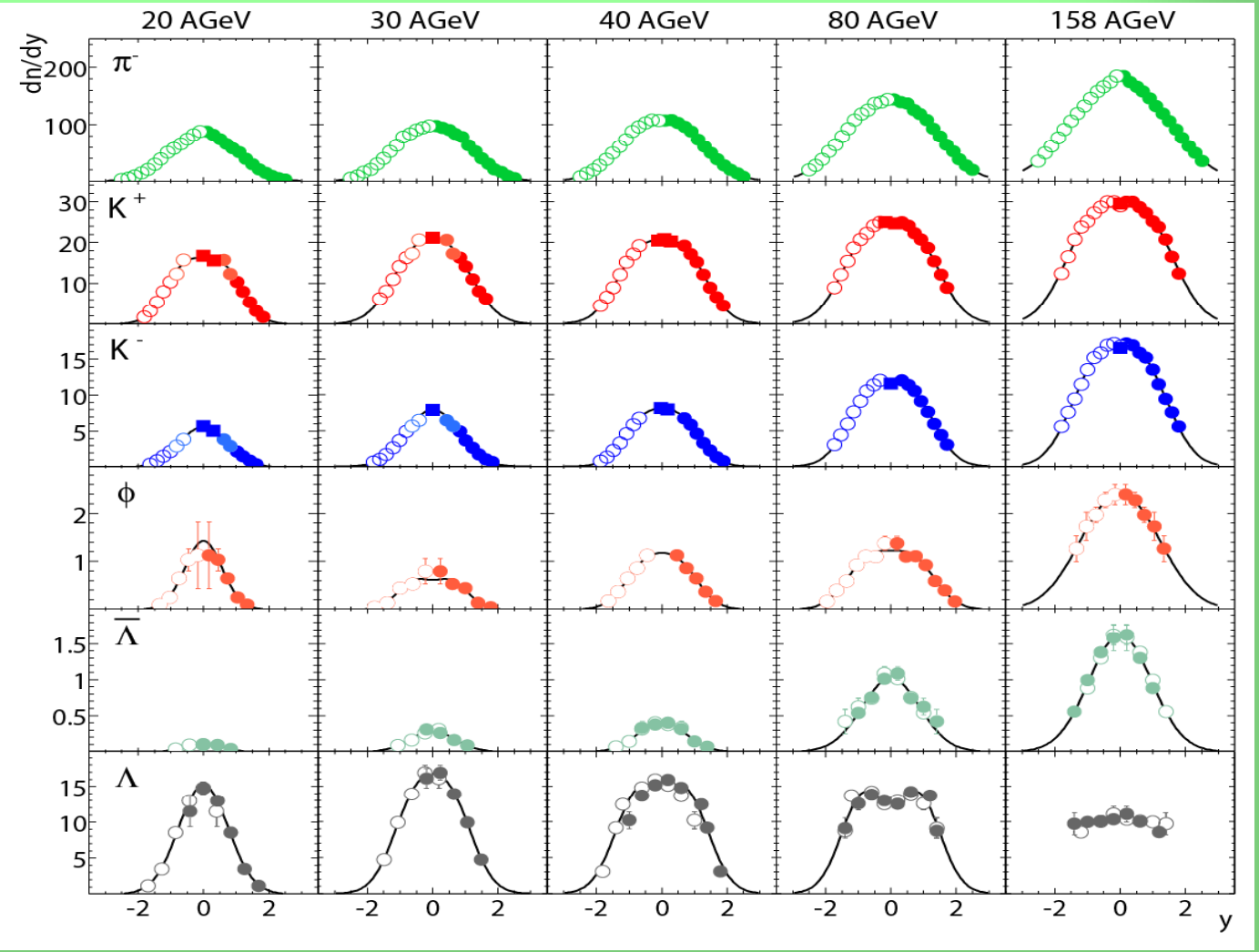
2007 végétől:
p+p adatanalízis (PbPb)
elméleti értelmezés

Tartalék ábrák

rapiditás eloszlások

Centrális Pb+Pb
7% (20-80 *A*GeV)
5/10% (158 *A*GeV)

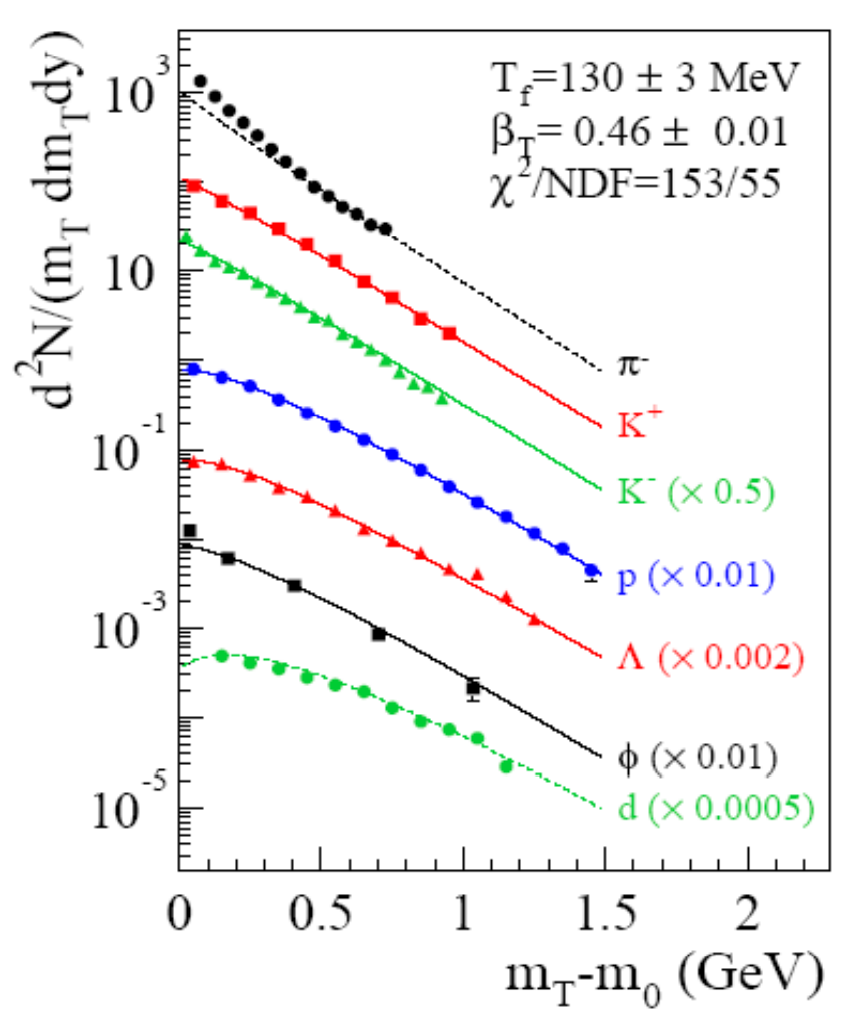
NA49



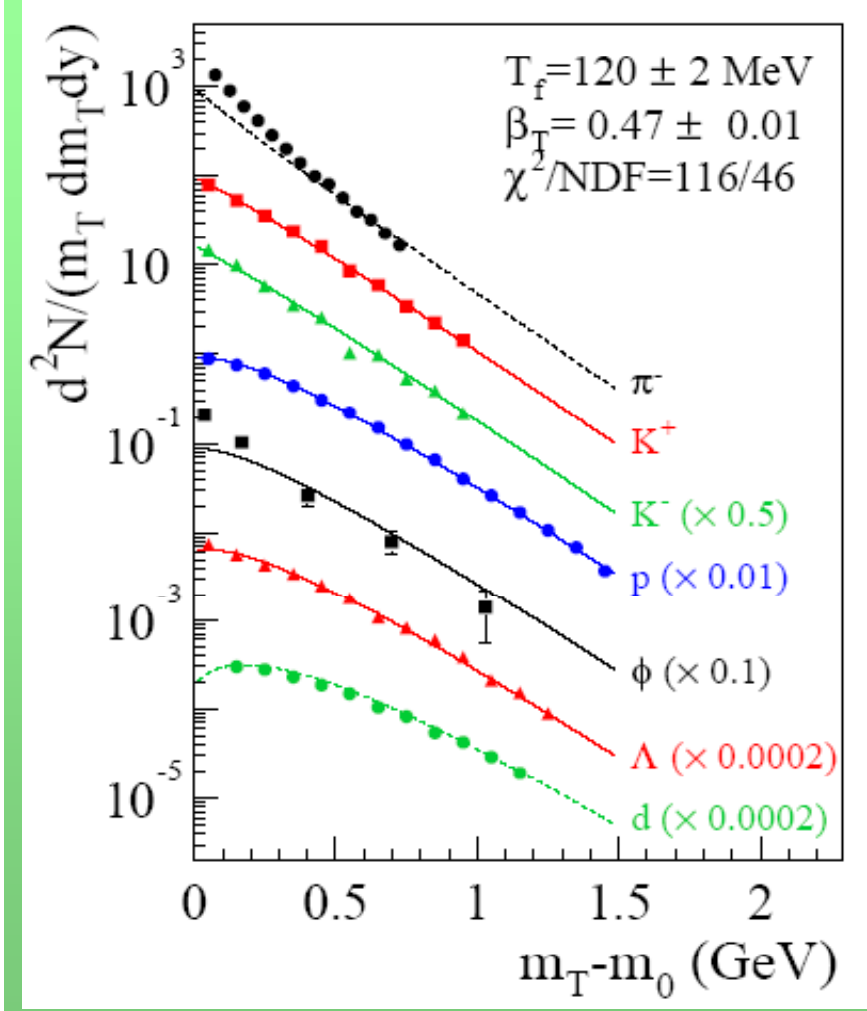
Rapidítás: relativiszikusan invariáns sebesség

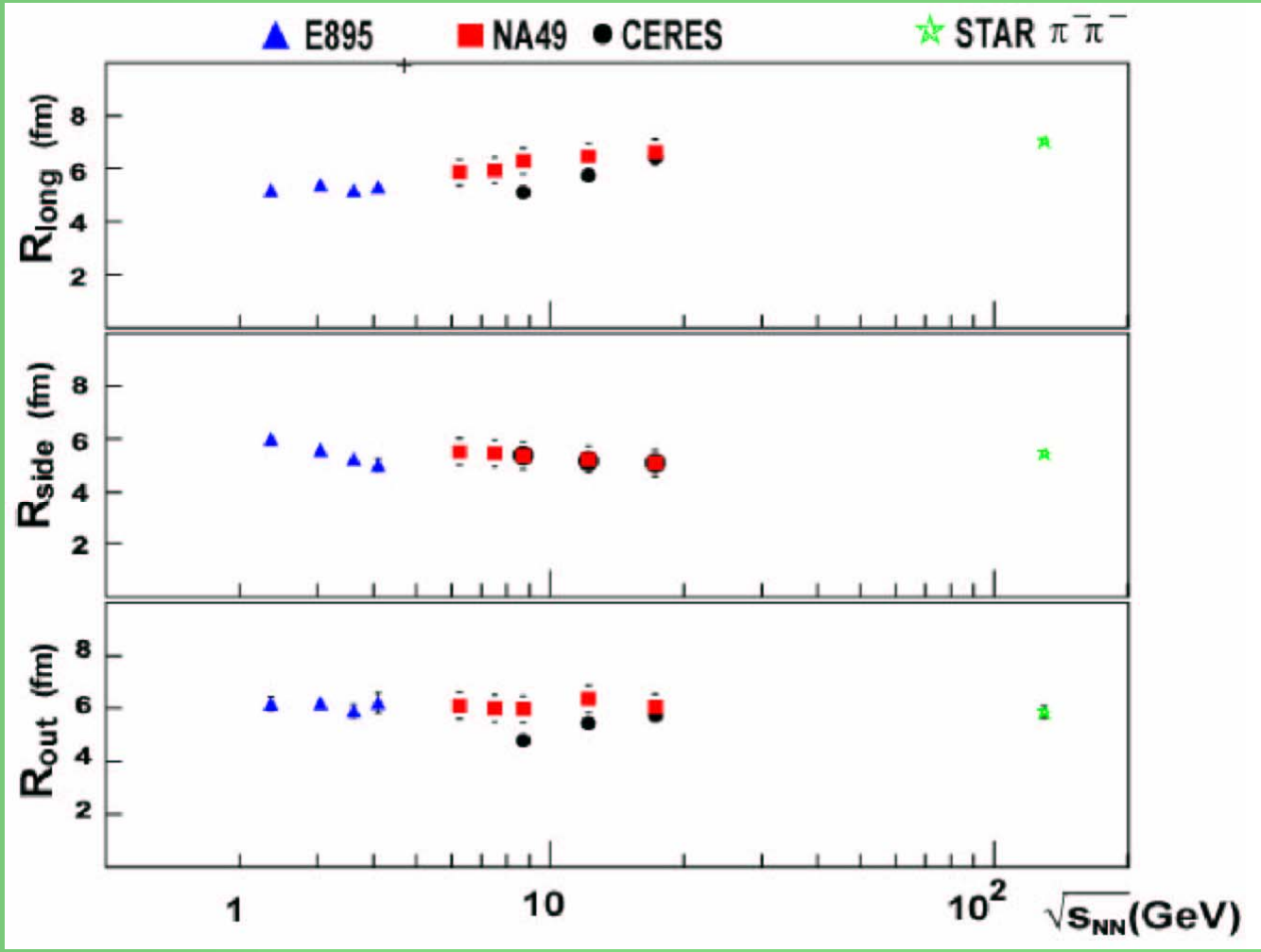
p_t-eloszlások

30 *A*GeV



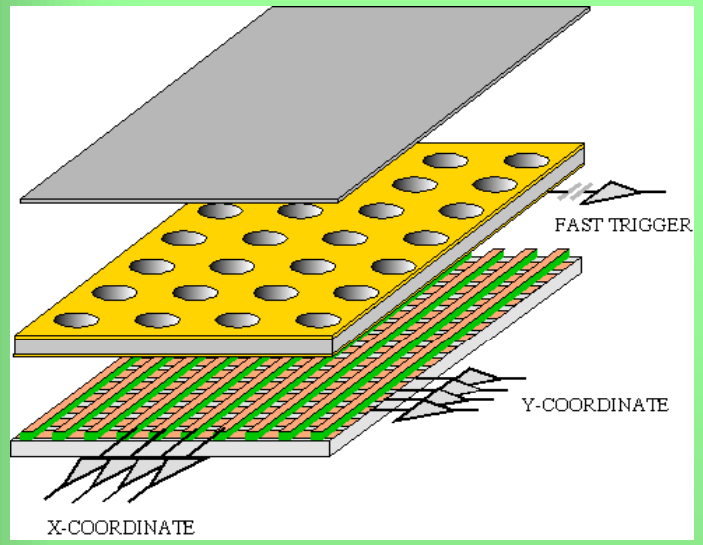
20 *A*GeV

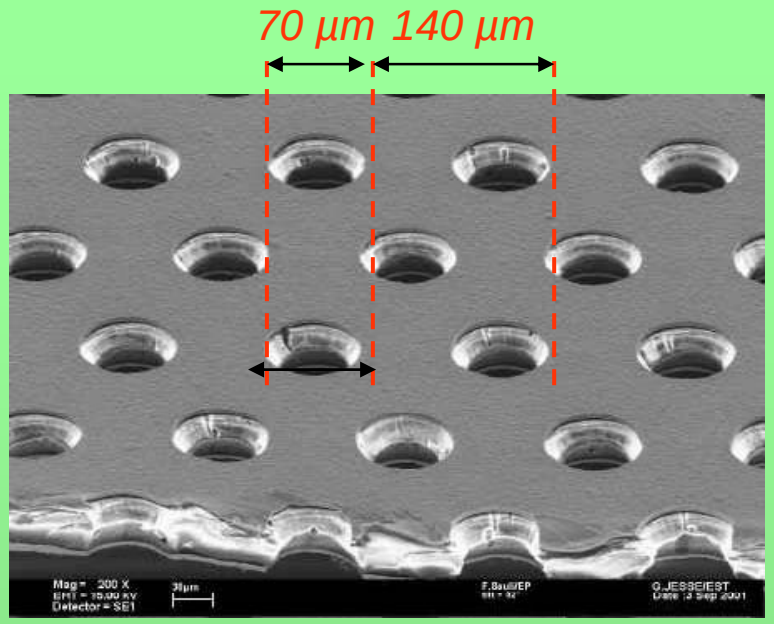


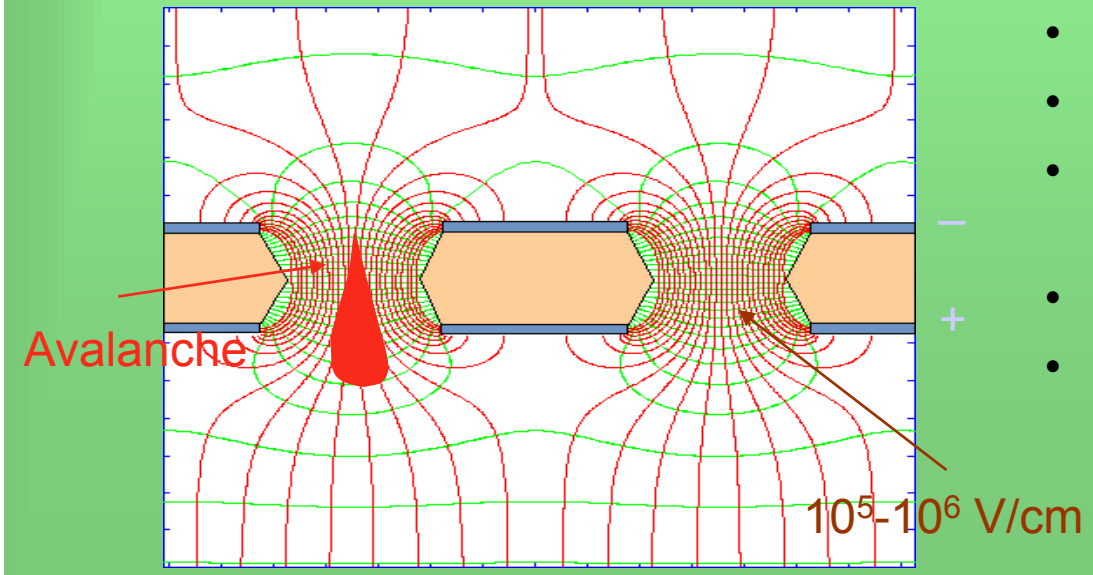


Rendelkezésre álló energia

Új fejlesztés: GEM detektorok

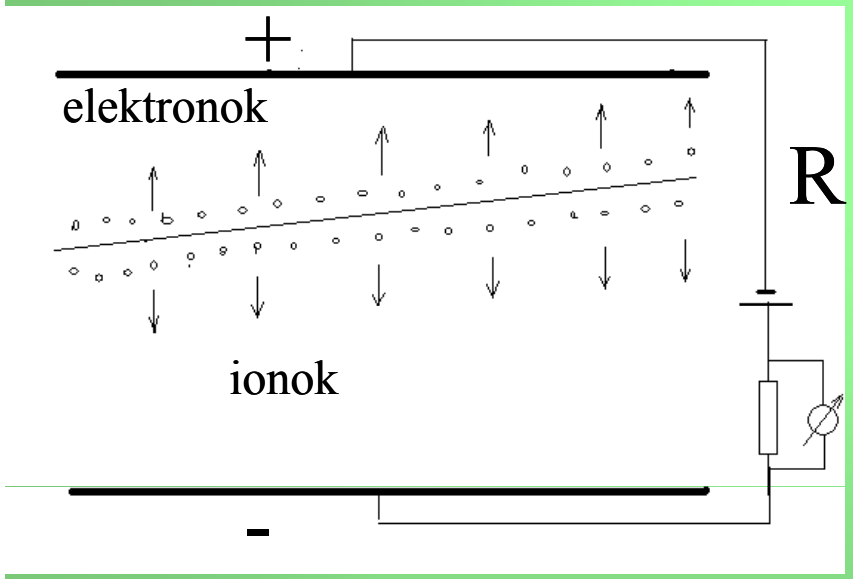
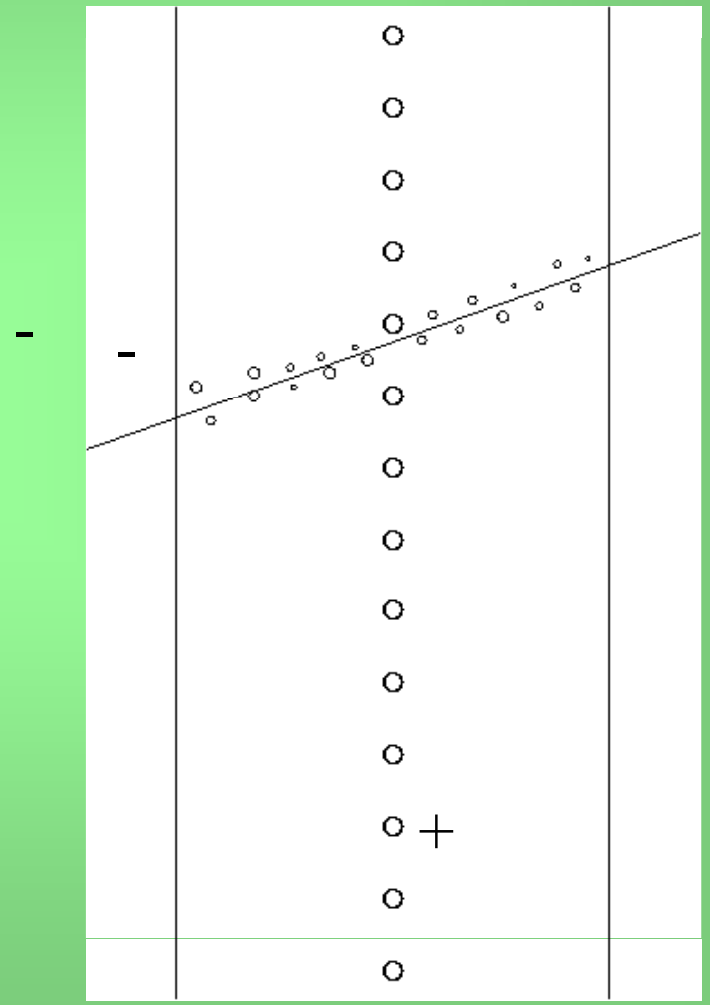






- Olcsón előállítható
- Nagy felület készíthető
- Sérülésekre tisztaságra kevésbé érzékeny
- Kiválthatja a TPC-k szálrendszerét
- Felületére konverter is felpárolható, amivel gamma ill. fény detektor gyártható

F. Sauli, NIM A386,1997, 531

Proporcionális kamra

Ionizációs kamra