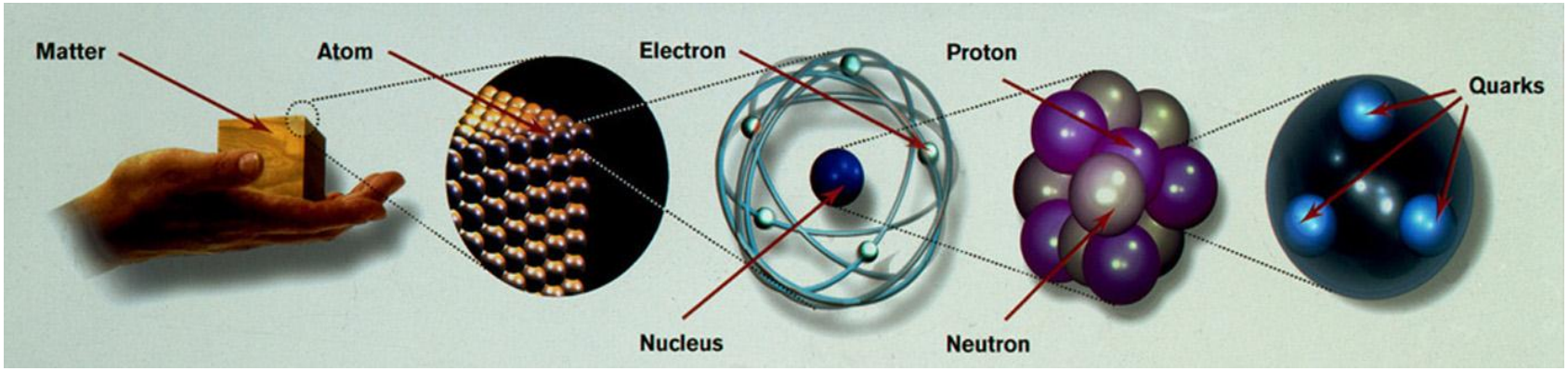
Bevezetés a nehézion-fizikába

Zoltán Fodor

MTA Wigner FK RMI

Hungarian Teachers Programme 2012

Az anyag elemi építő kövei



Napjaink periódusos rendszere

	Quarks		Leptons	
Generation 3	t Top	b Bottom	τ Tau	ν_τ Tau-neutrino
Generation 2	c Charm	s Strange	μ Muon	ν_μ Muon-neutrino
Generation 1	u Up	d Down	e Electron	ν_e Electron-neutrino

Kölcsönhatásuk különbözik az eddig ismertektől ➔ csak kötött állapotban lehetnek

De mindig igy volt ez ? Minden körülmények között?

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?

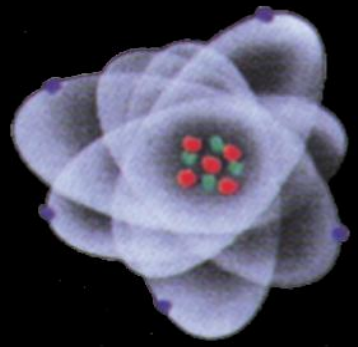
- A quarkok be vannak zárva, a mai normál körülmények közötti állapotban.
- Mi történik akkor, ha a részecskék olyan közel kerülnek egymáshoz, hogy már nincs közöttük szabad hely?

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?

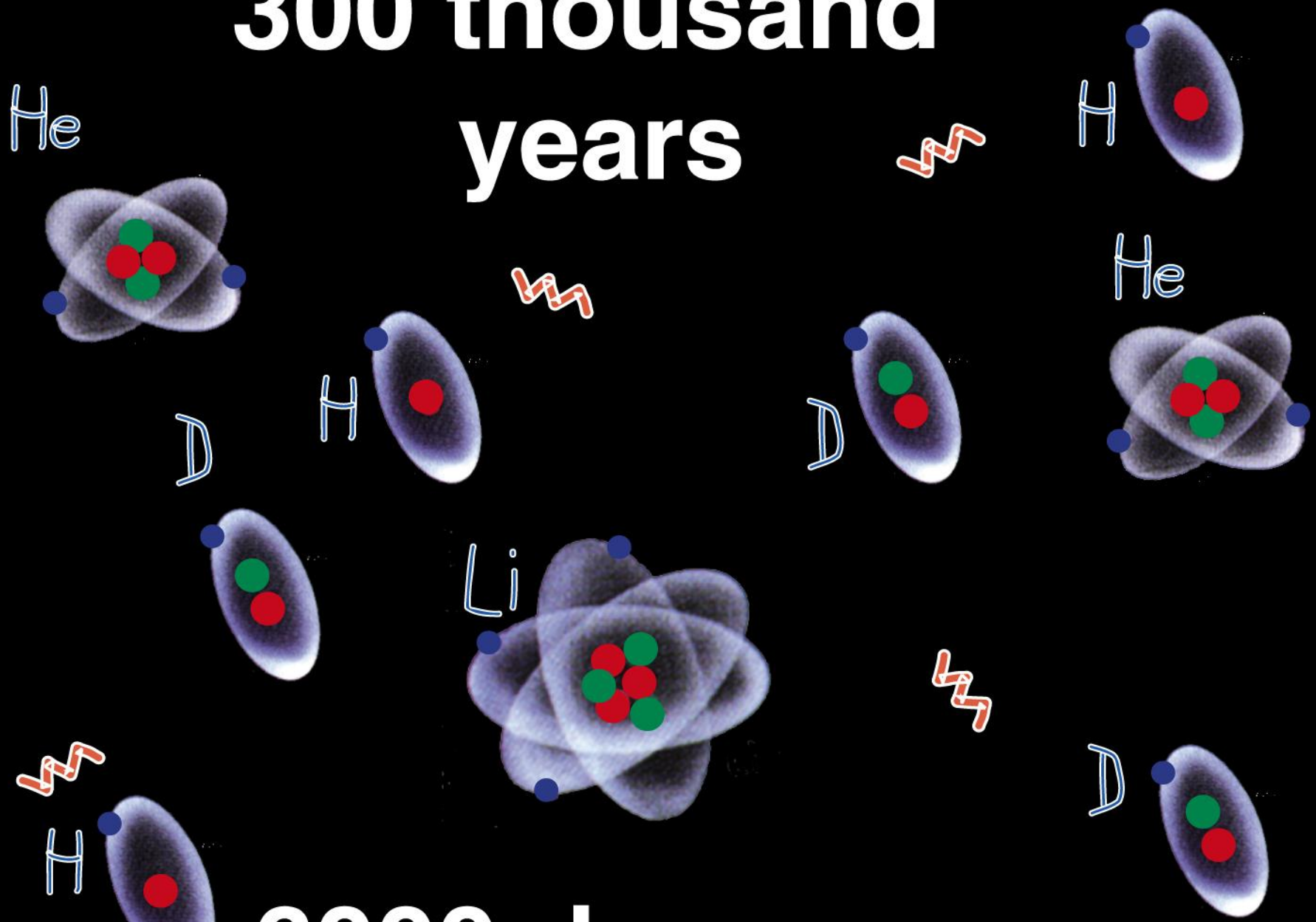
Visszafelé is végrehajtható-e?

1 thousand million years



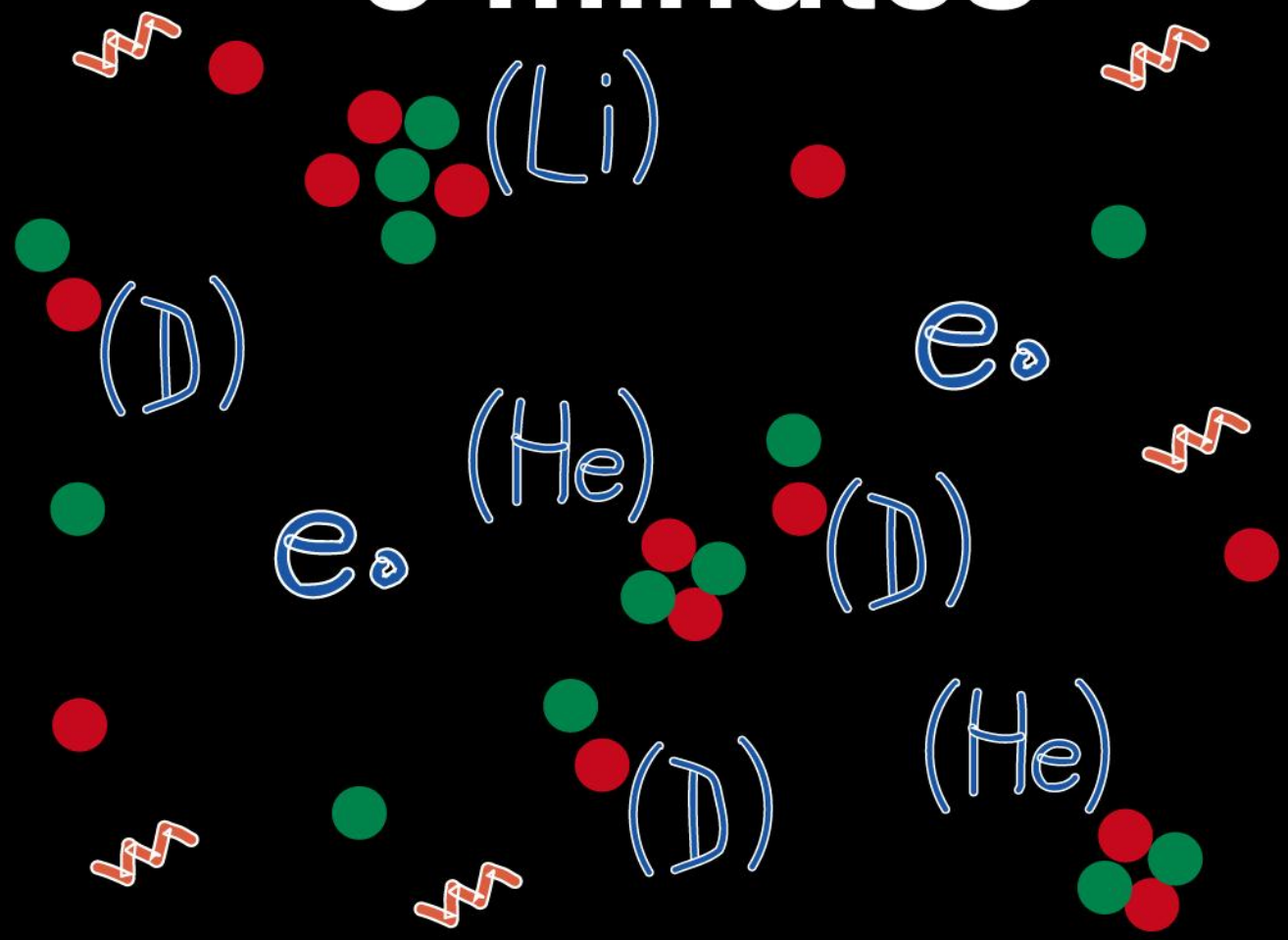
18 degrees

300 thousand years

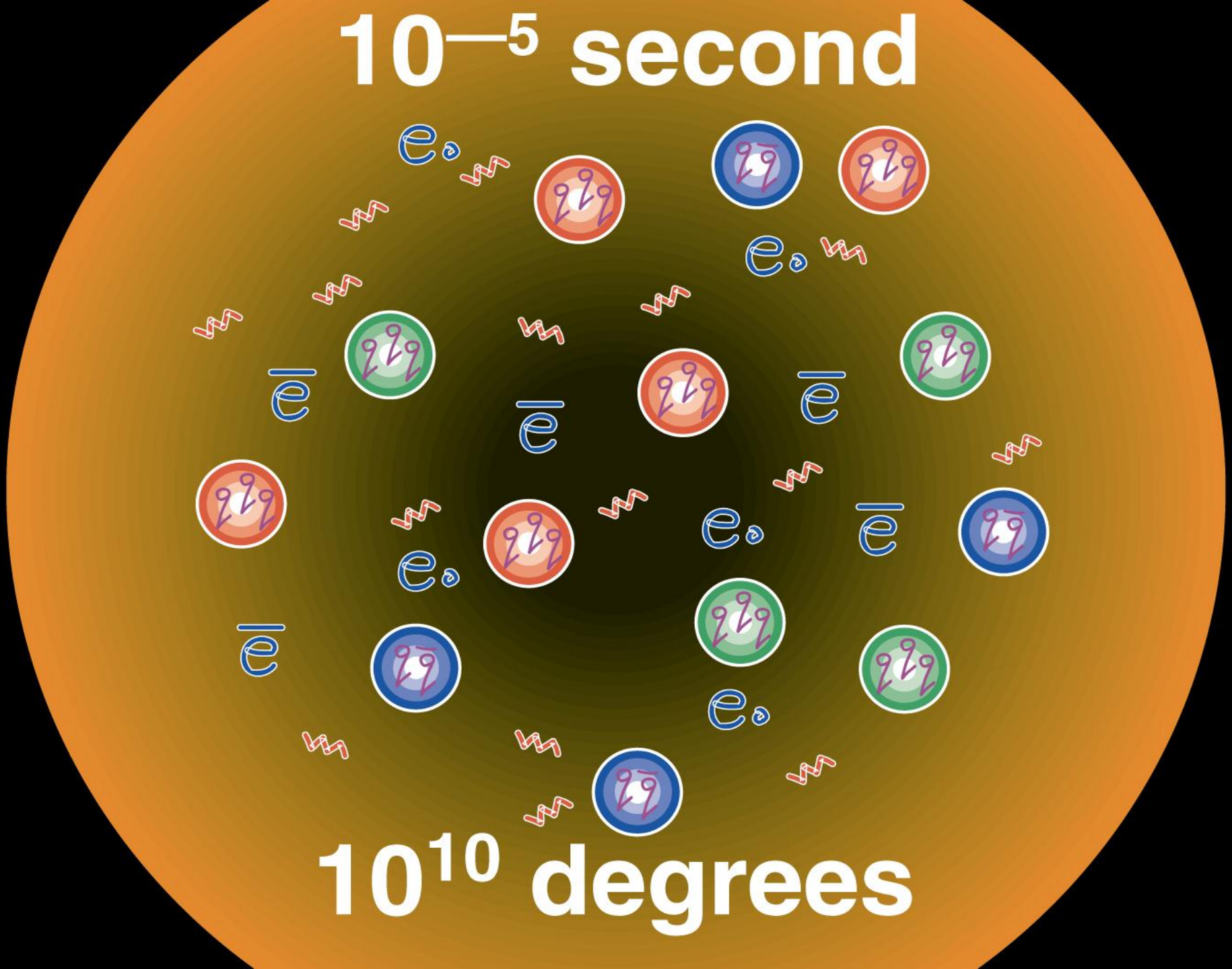


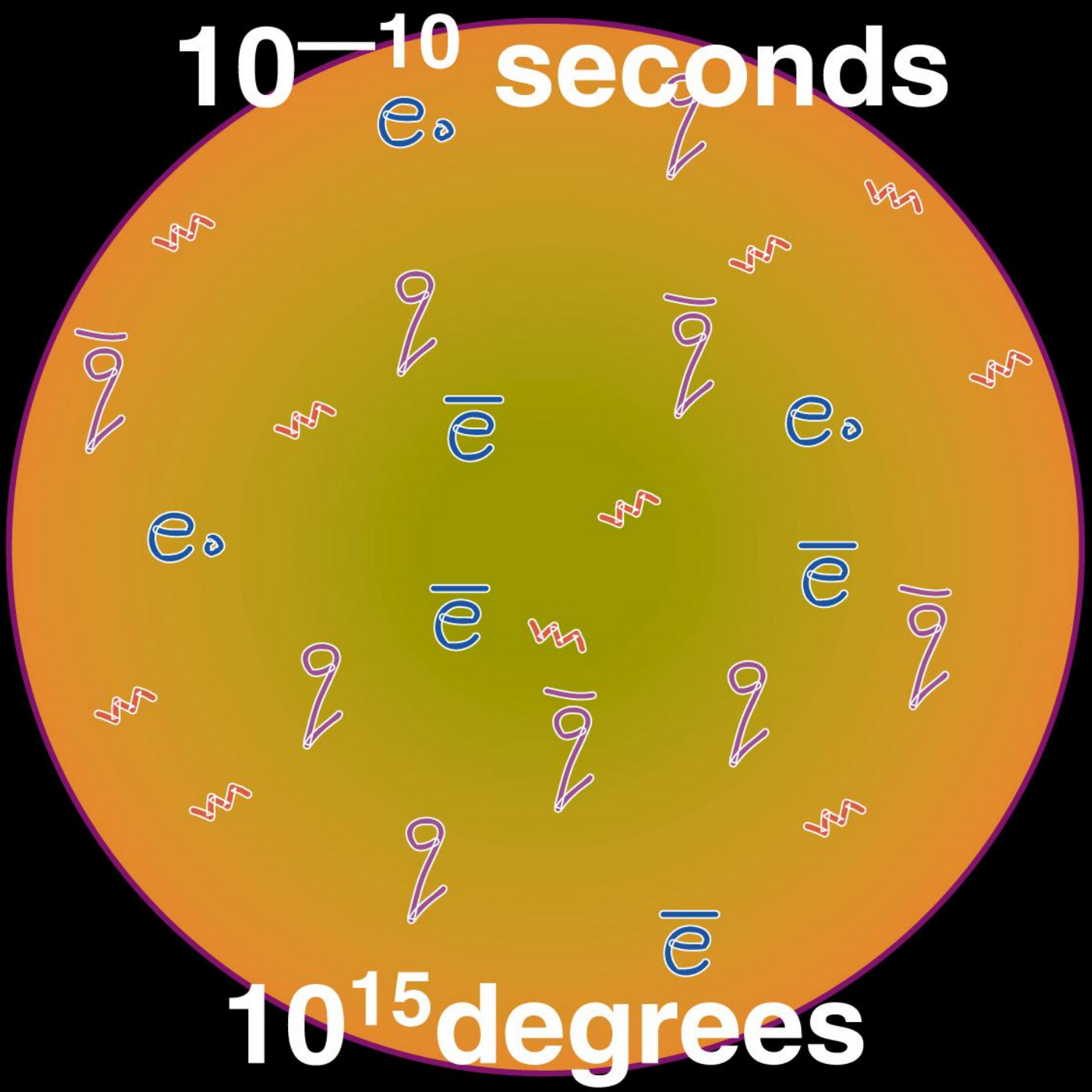
6000 degrees

3 minutes

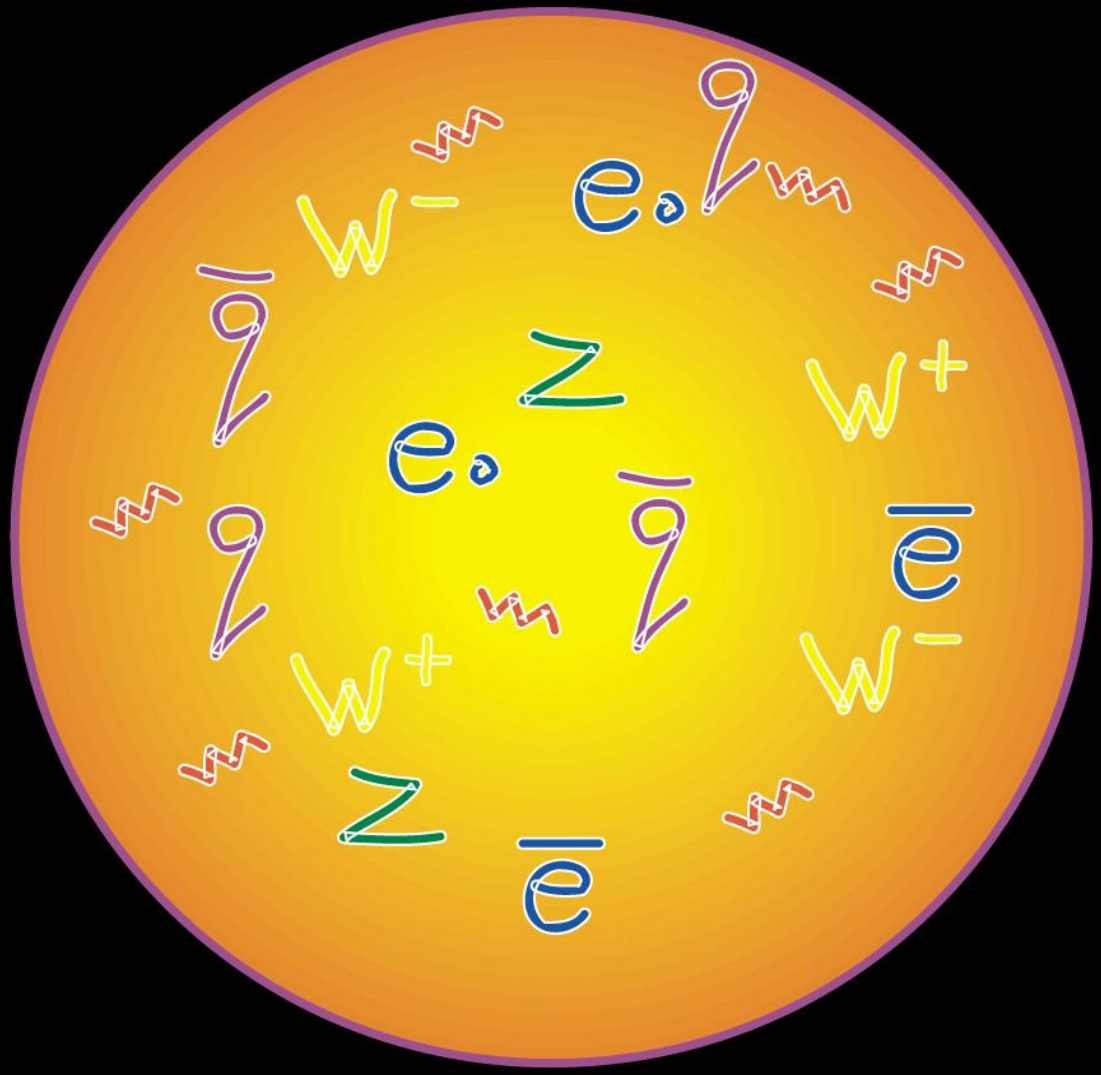


10^9 degrees


10⁻⁵ second
10¹⁰ degrees

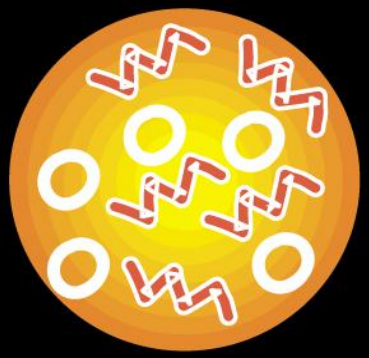

10^{-10} seconds
10^{15} degrees

10^{-34} seconds



10^{27} degrees

10^{-43} seconds



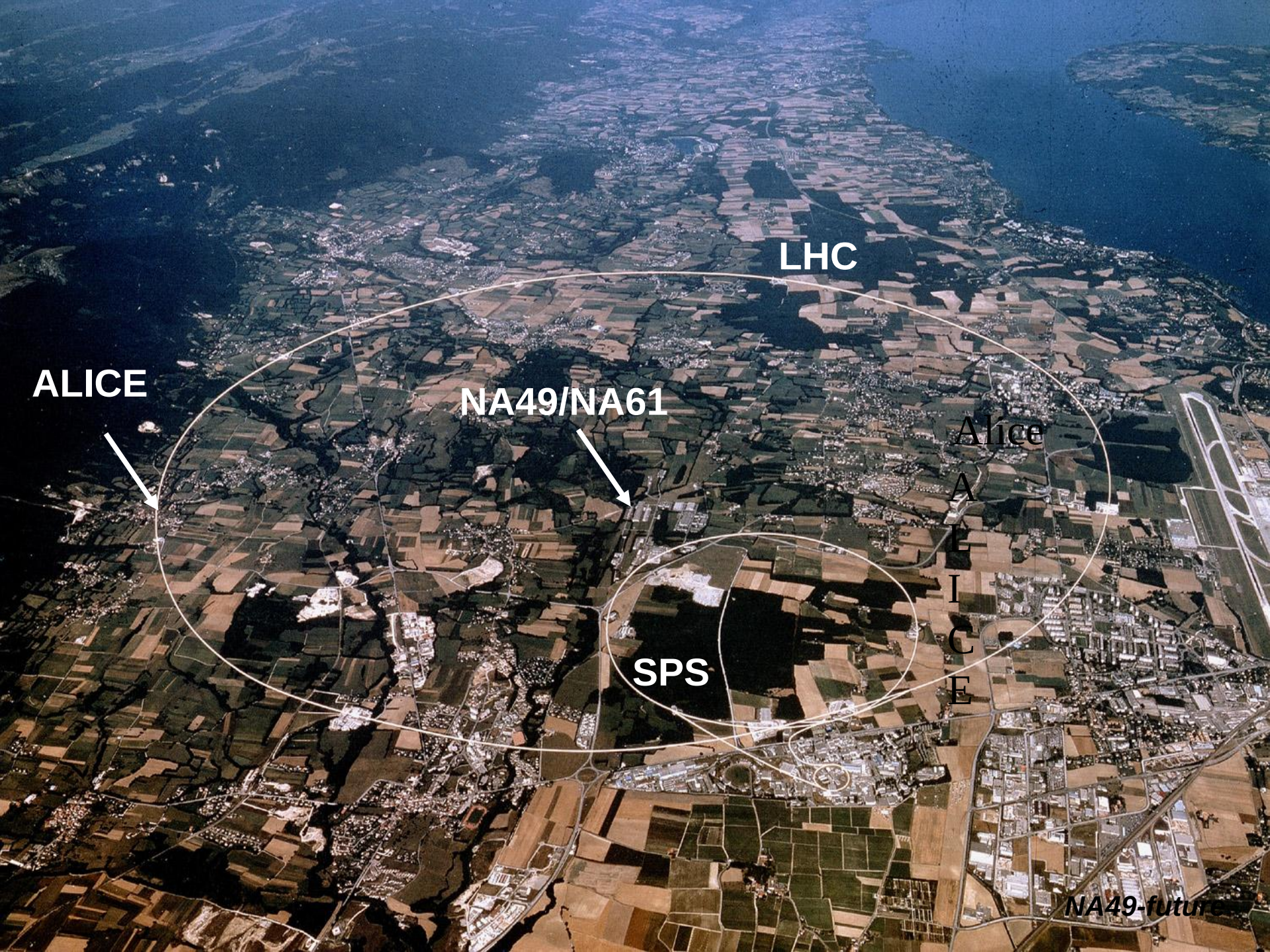
10^{32} degrees

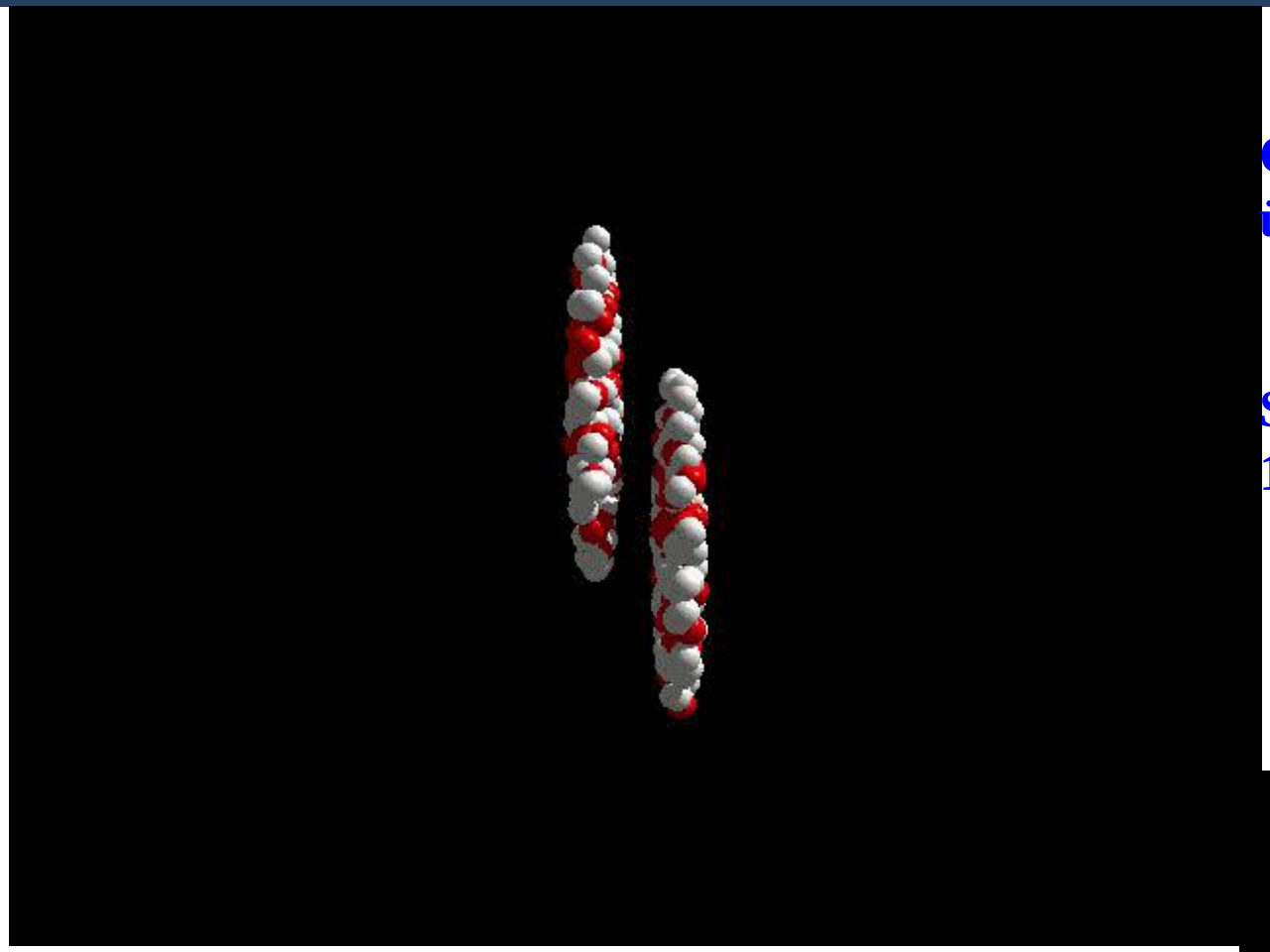
Tanulmányozási módszerek

- 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

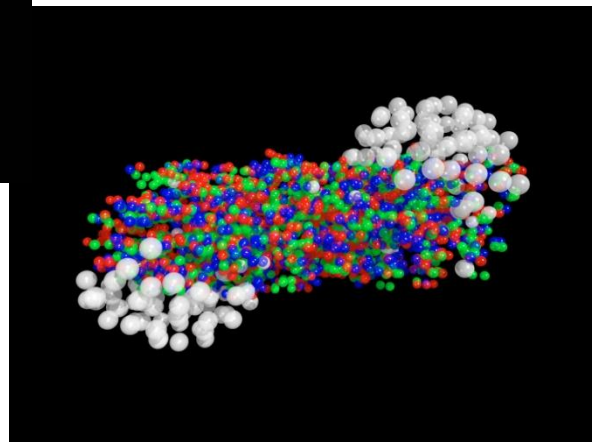
Helye	Max energia/nukleon	üzembeállítás
GSI, Darmstadt	1.5 GeV	1991
AGS, Brookhaven	9 Gev	1992
CERN SPS, Genf	160 GeV	1994
RHIC, Brookhaven	20.000 GeV	2000
CERN, LHC	14.500.000 GeV	2008/ Nehéz-ion 2010/
FAIR, Darmstadt	22GeV(45 GeV)	2018
NICA, Dubna	6.2 GeV	2017


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



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

Szimuláció 10^{-13} cm méretskálán



Kitűzött feladatok

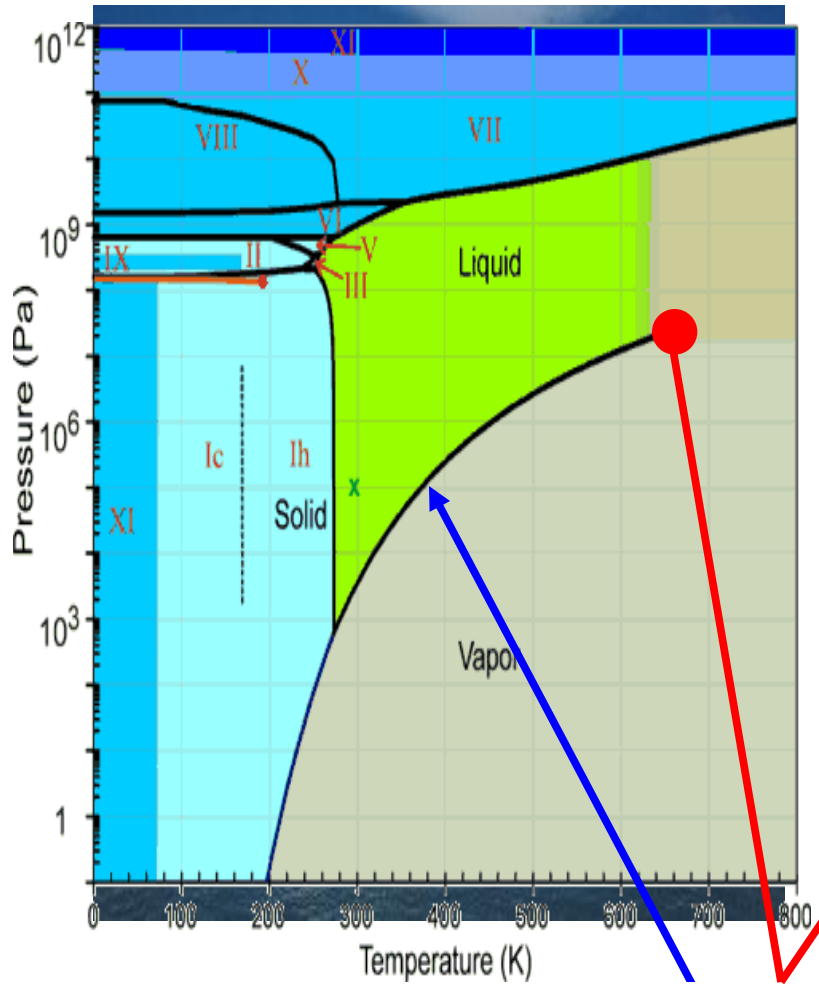
- Alacsonyabb energiákon:
  - Állapotegyenlet $\rho(p)$ meghatározása a stabilitási pont közelében
  - Új, a stabilitási vonaltól távol eső atommagok előállítása
- Magasabb energiákon:
  - Állapotegyenletnek a $\rho(T)$ és $\rho(p)$ meghatározása
  - Új fajtájú anyag a **Quark Gluon Plazma** előállítása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

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/

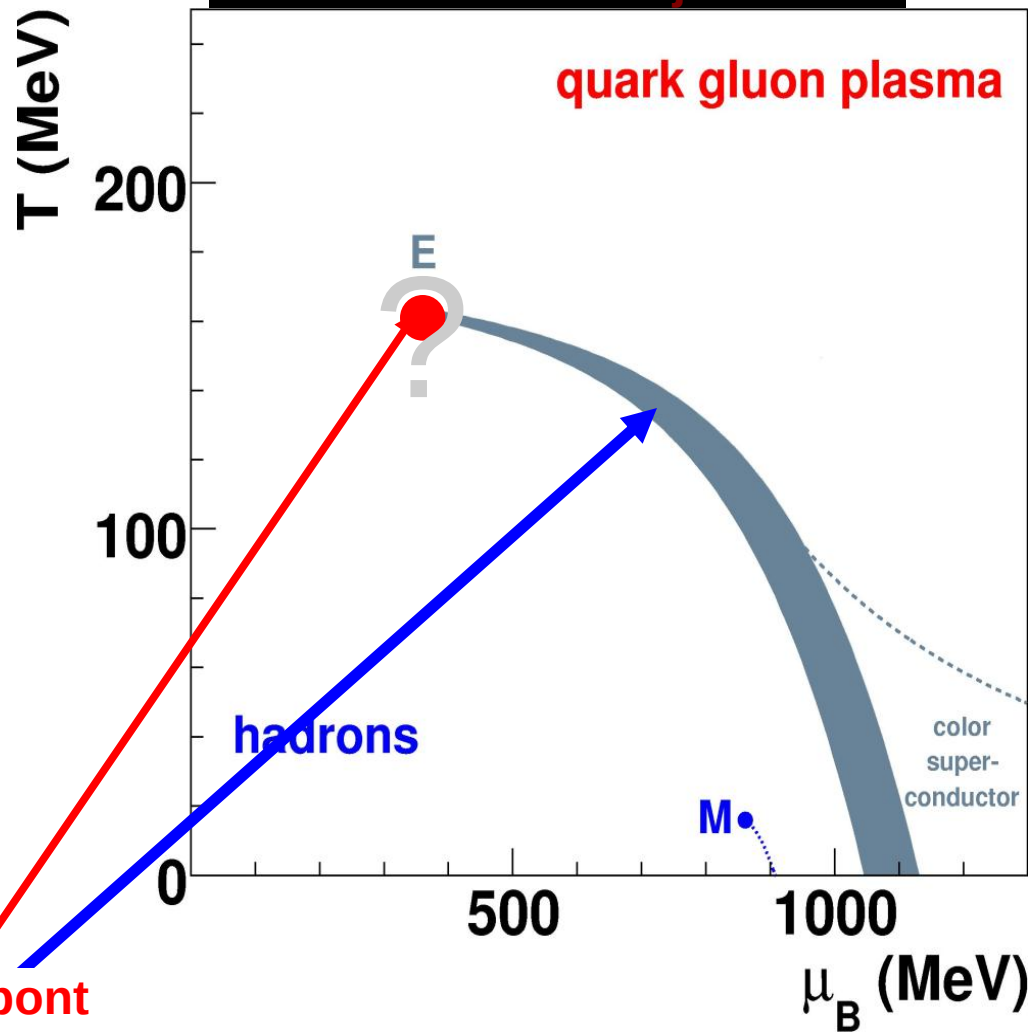
Fázis átalakulások

A víz fázisgörbéi



A maganyag fázis görbéit még nem ismerjük

Az erősen kölcsönható anyag fázisai



Kritikus pont

Első rendű fázisátalakulás

NA61-es kisérlet

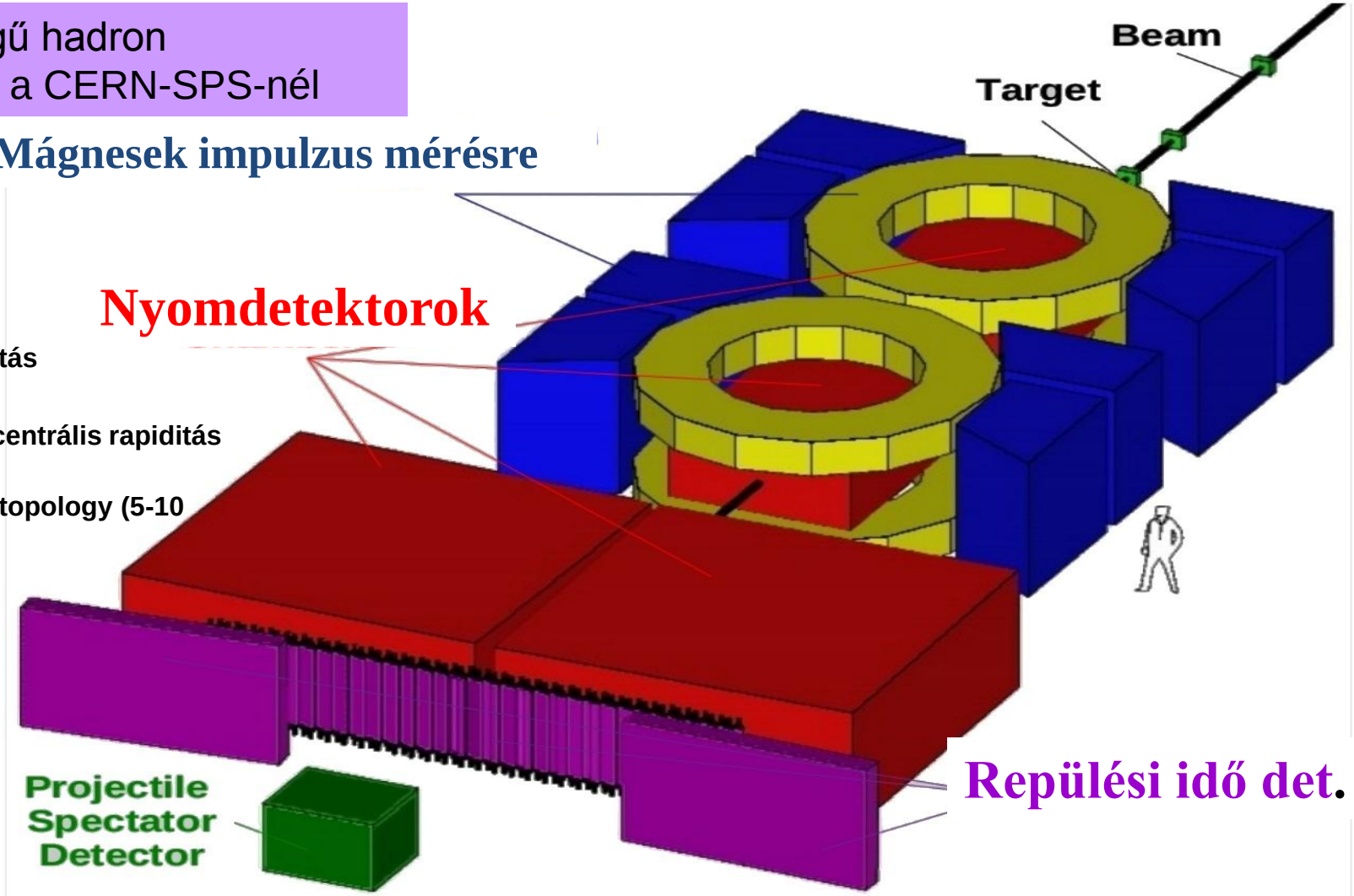
nagy térszögű hadron spektométer a CERN-SPS-nél

Mágnesek impulzus mérésre

Nyomdetektorok

részecske azonosítás

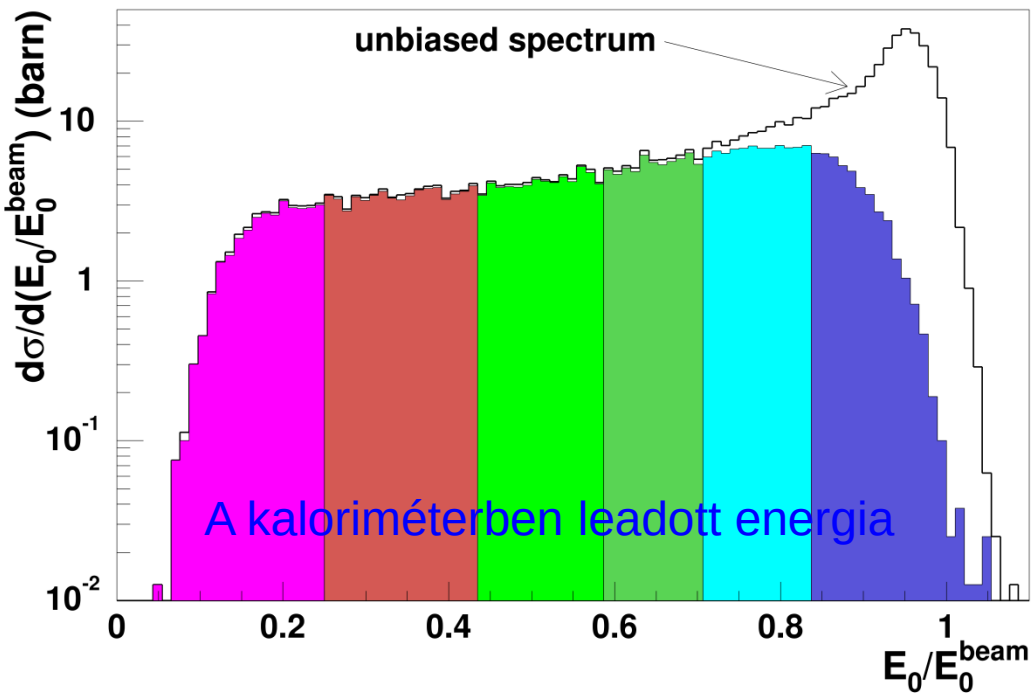
- **dE/dx (3-6% res.)**
- **TOF (60 ps res.) centrális rapiditás körül**
- **invariant mass + topology (5-10 MeV res.)**



Repülési idő det.

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

Ütközési paraméter mérése



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

Tanulmányozott rendszerek

- A legnagyobb azonos körülmények között mért adathalmaz a CERN-i SPS gyorsítónál centrális Pb+Pb ütközéseknél, /NA49/
- 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, 10 GeV/n
- p+p 158, 80, 40, 30, 20,10 GeV
- p+Pb, p+C 158 GeV
- π+p, π+Pb 158 GeV
- n+p, /d+p -ból/ 158 GeV

NA61-ben tervezett

Xe+La 13-160 GeV/n
Ar+Ca 13-160 GeV/n
Be+Be 13-160 GeV/n

A tűzgömb méretének meghatározása

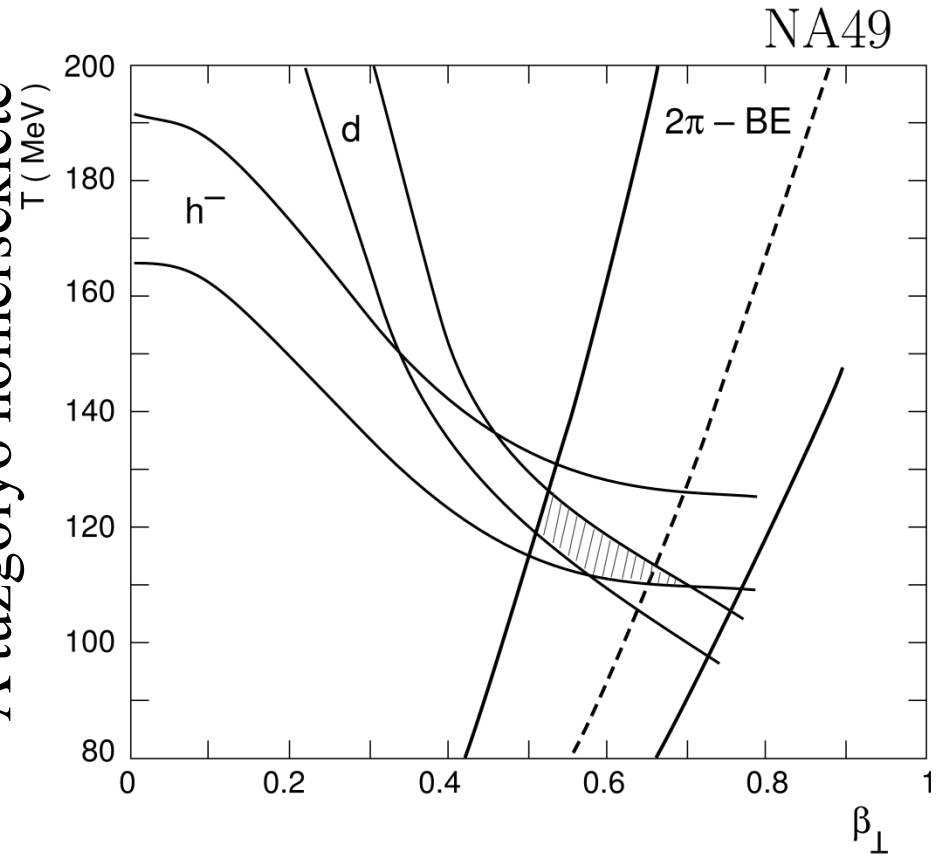
- Bose-Einstein koreláció alapján
  - A bozonok szeretnek azonos impulzus állapotba kerülni, és hogy ez mekkora relatív impulzus tartományig hat, az függ a forrás méretétől.
- Deuteronok és a protonok arányából
  - Az egymáshoz közeli impulzusú p és n szeret deuteronná egyesülni és ennek a folyamatnak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

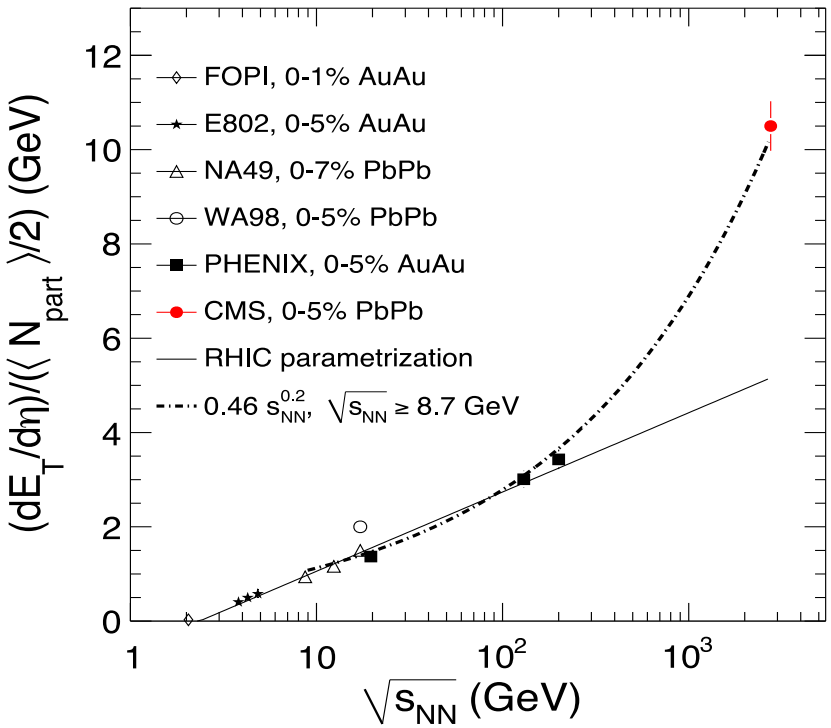
  impulzus eloszlásai és a forrás nagysága és kiterjedésének sebessége között is van egy összefüggés, ami szintén a forrás nagyságától függ

Az anyag folyása

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

A tűzgolyó hőmérséklete

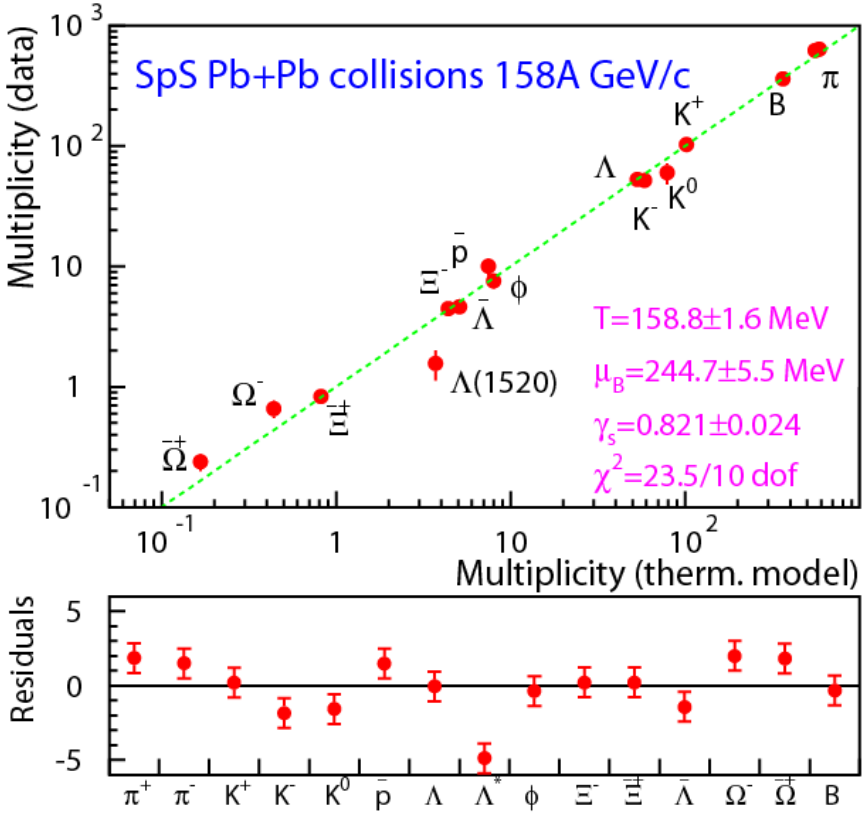




Felületen a tágulási sebesség

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
- LHC:

  $T_{chem} \approx 164$ MeV

A hadronizáció a fázis átmenethez közel történik

Direkt fotonokkal mért kezdeti hőmérséklet:

LHC: $T = 304 \pm 51$ MeV

RHIC: $T = 221 \pm 19 \pm 19$ MeV

Fázis diagram

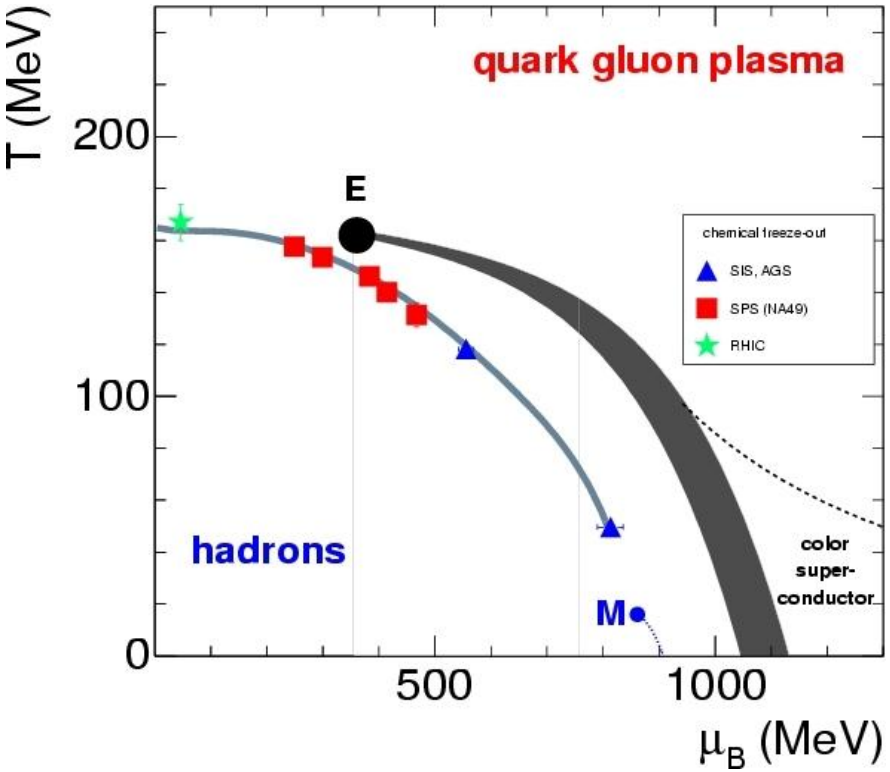
Hadronkeltés hatáskeresztmetszeteit mértük meg 20-158 GeV/n

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

Új program a kritikus pont kísérleti kimutatása:

- Fluktuációk mérésével a bombázó energia és atommag függvényében

NA61

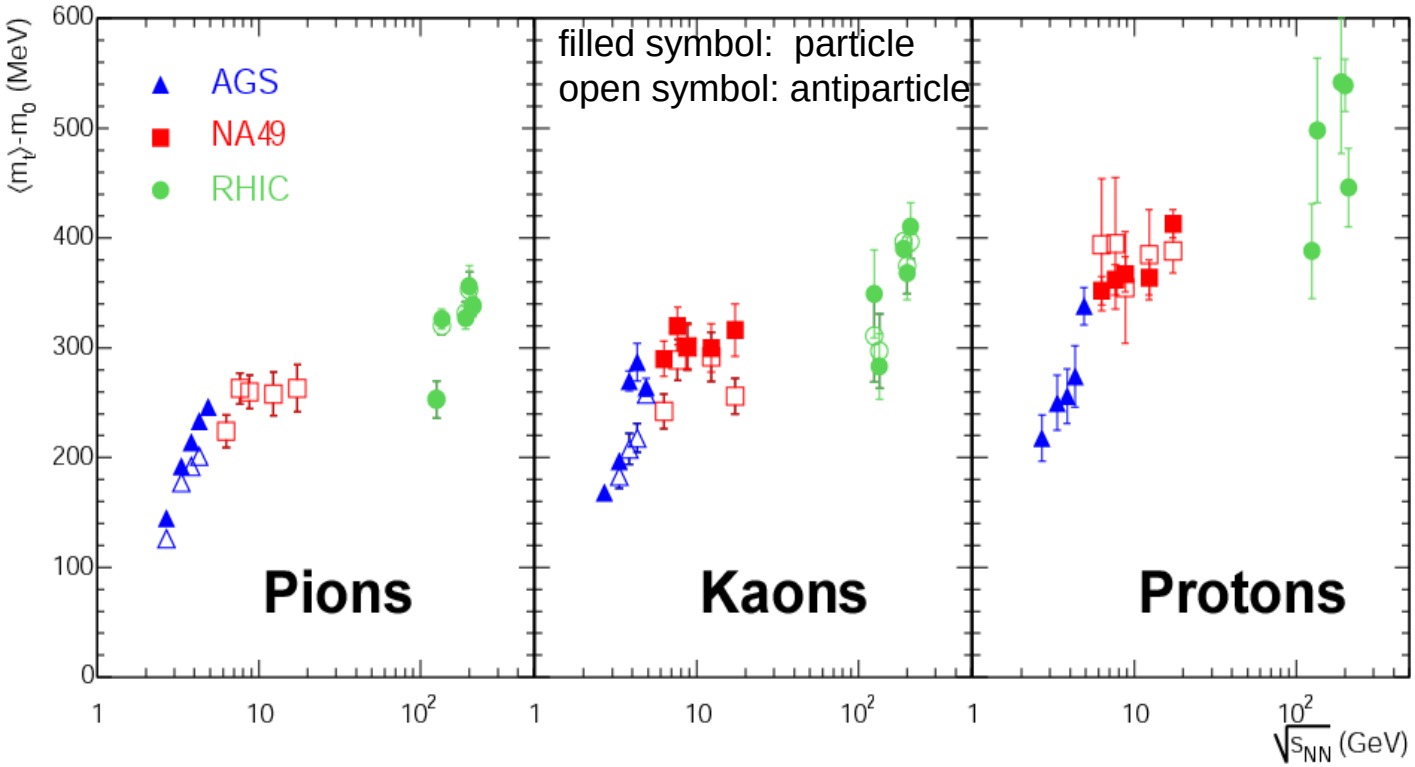


Kritikus pont (E): Fodor and Kratz, Hadron Gas(γ_s): J. Manninen et al., Grey band: elsőrendű fázisátalakulás]

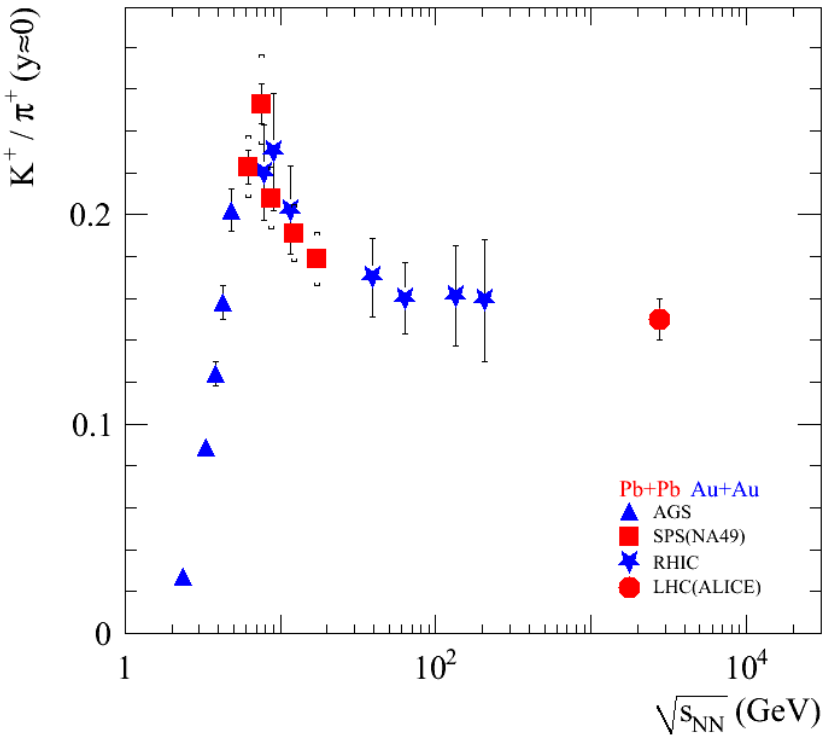
- **A deconfinementet hol érjük el? Az SPS-nél vagy a RHIC-nél?**
- **Alacsony SPS energiáknál**
  - **Csökkenő hőmérséklet**
    növekvő barion sűrűség
  - **(depart from phase boundary)**

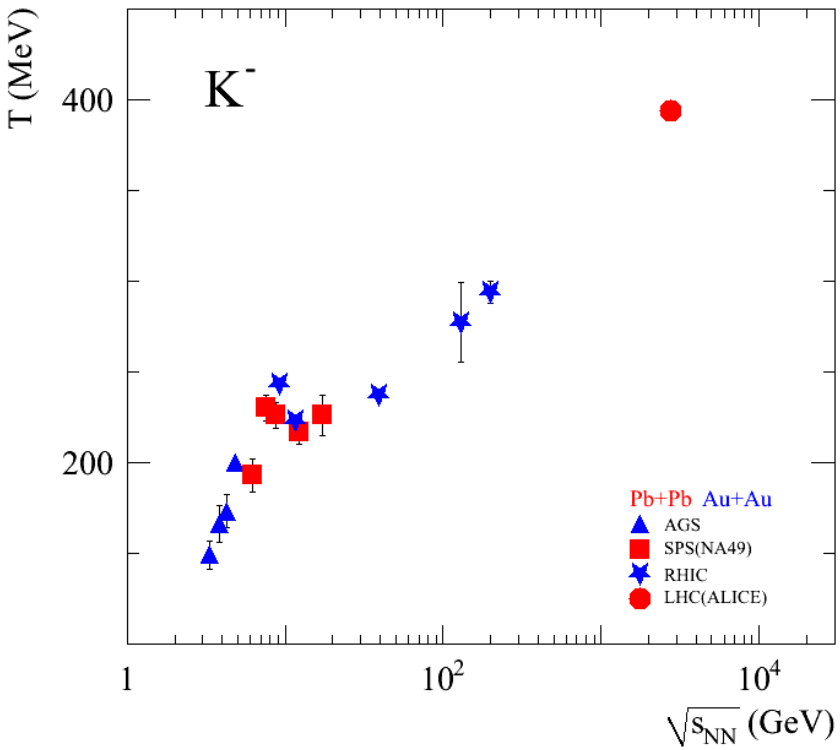
Transverzális tömeg eloszlások

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

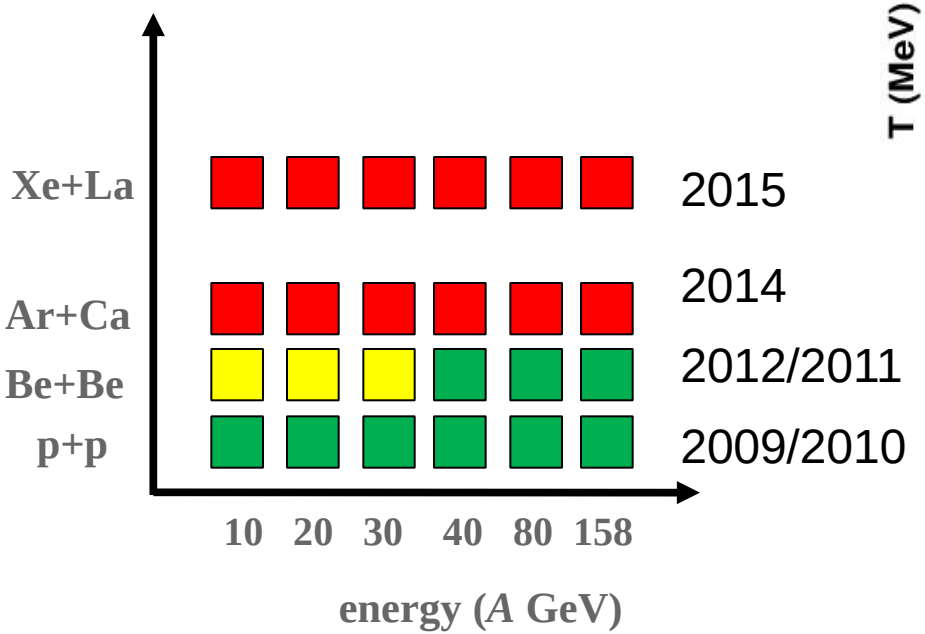


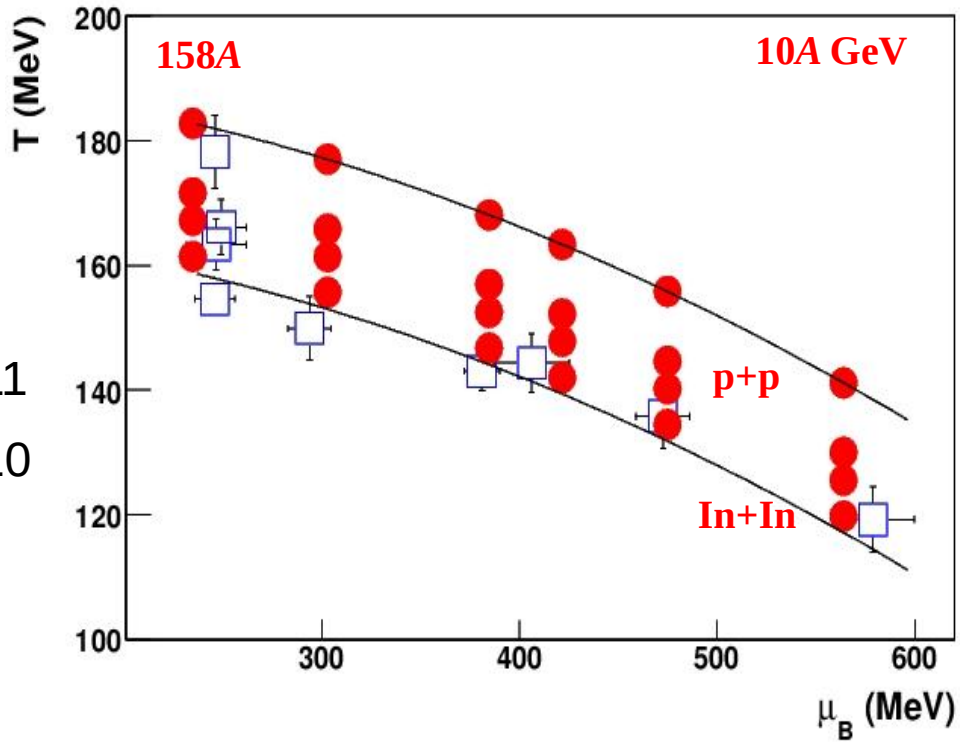
New LHC results





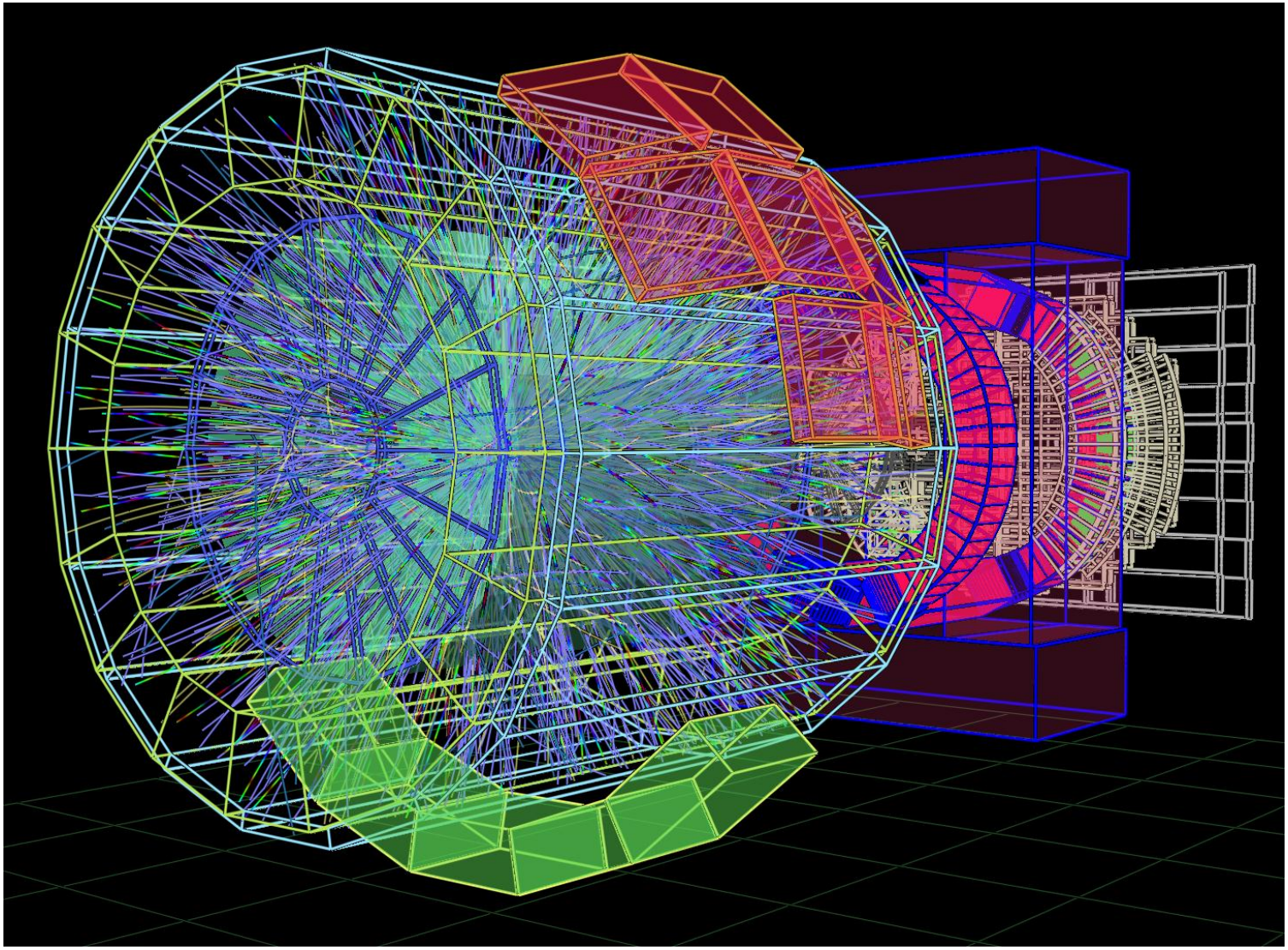
NA61 tervezett mérései





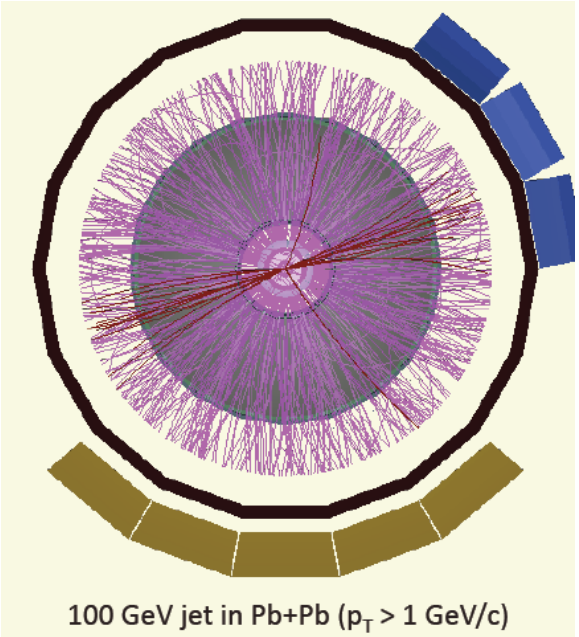
Azt várjuk, hogy, kritikus pont környékén megnőnek a fluktuációk

Fluctuations and CP: Stephanov, Rajagopal, Shuryak, Phys. Rev. D 60, 114028
Freeze-out points: Becattini et al., Phys. Rev. C 73, 044905

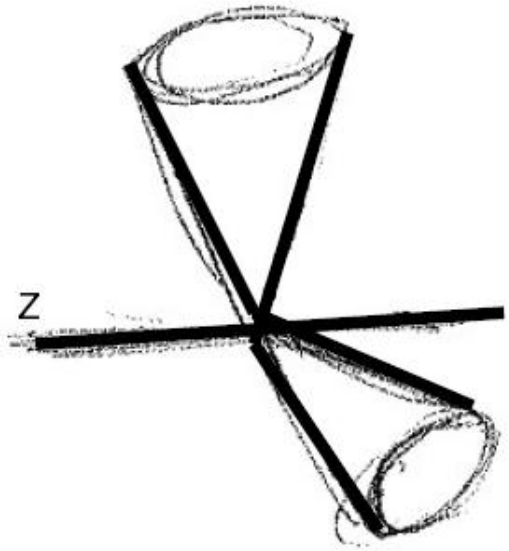


ALICE – Budapest feladatok I.

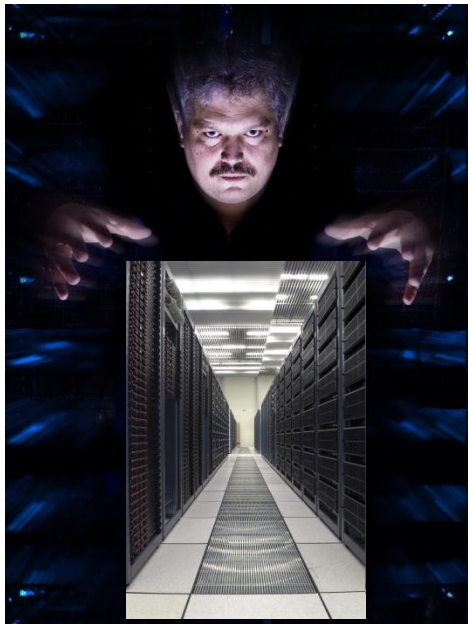
Fizikai analízis (kísérleti):
jetek vizsgálata
p+p és PbPb ütközésekben



Fizikai analízis (elméleti):
Jetek és kölcsönhatásaik vizsgálata:
QCD, rekombináció, ...

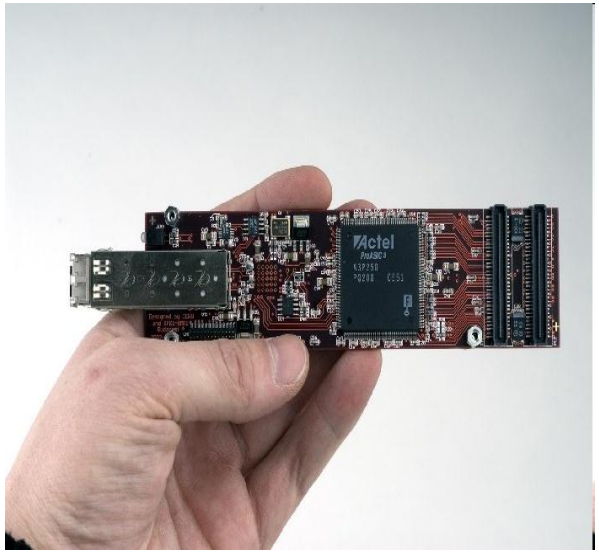
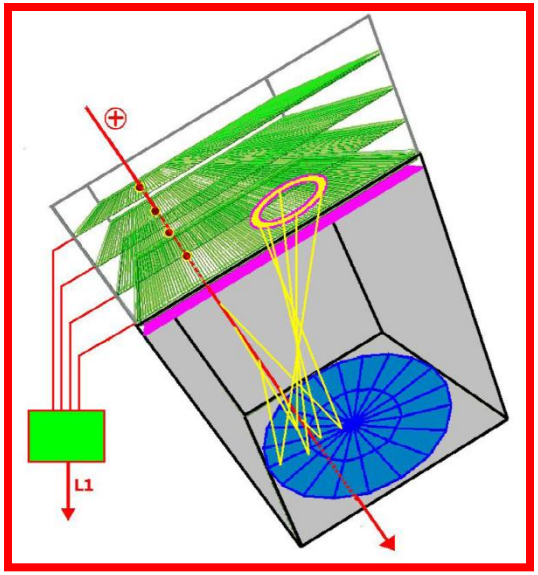
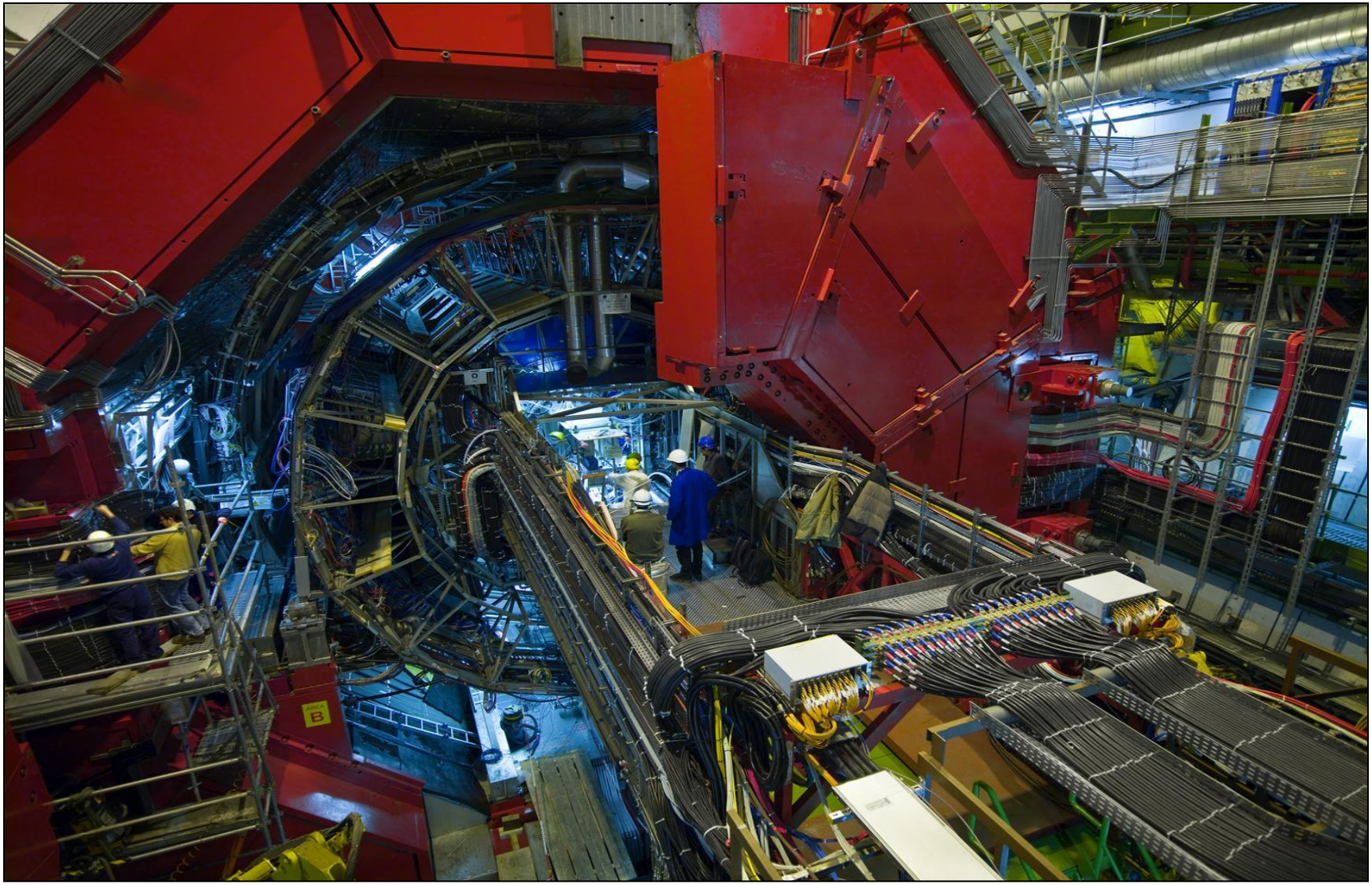


ALICE Grid:
Az RMKI Tier 2.es Grid központjának üzemeltetése



ALICE – Budapest feladatok II.

Detektor feladatok:
Az ALICE – HMPID detektorának Run Koordinációja

Új hardware építése:
Az ALICE kiolvasó elektronikájának (DDL = Detector Data Link) továbbfejlesztése

ALICE továbbfejlesztés:
Új detektor – VHMPID – építése az ALICE-ben