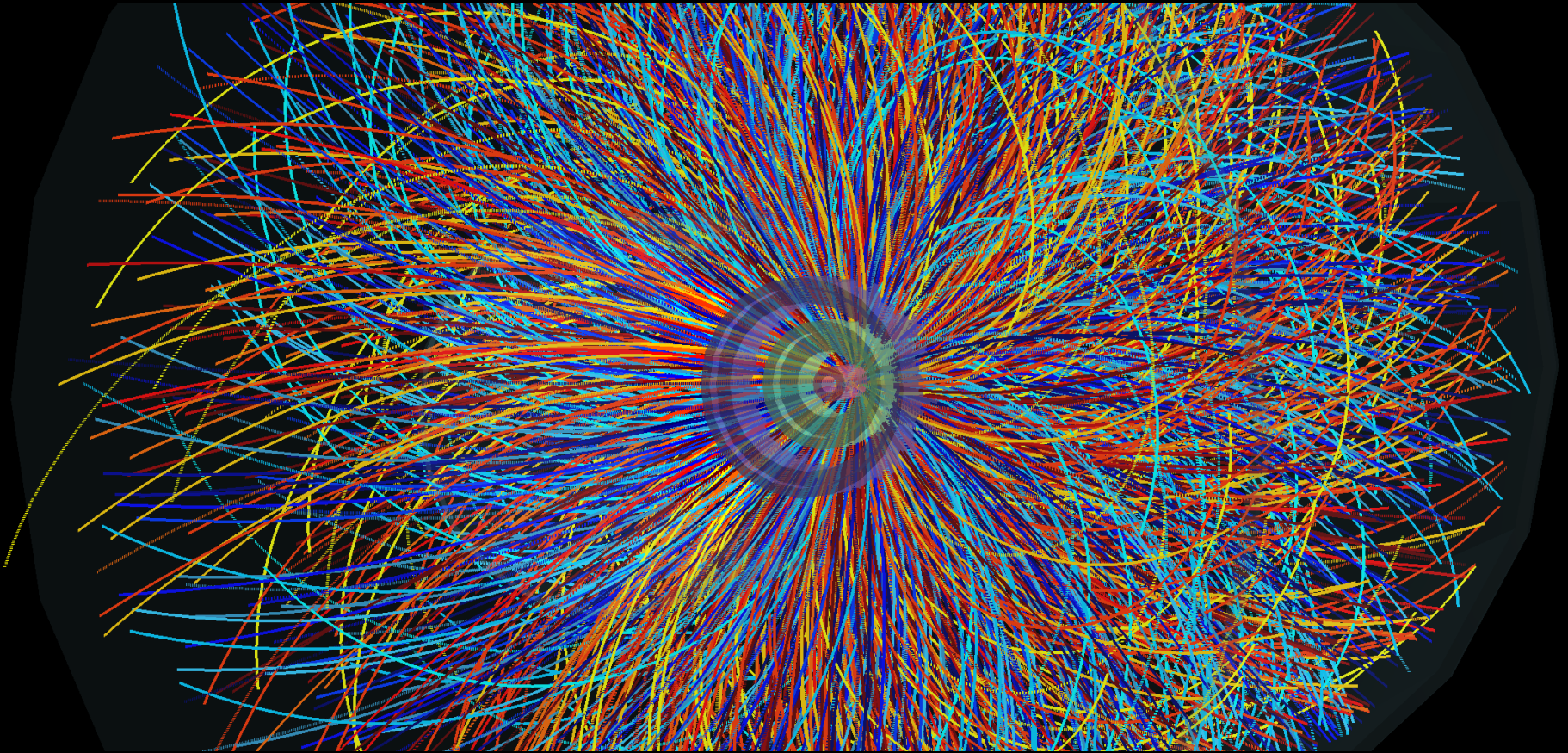


Relativistic Heavy Ion Physics and the ALICE experiment

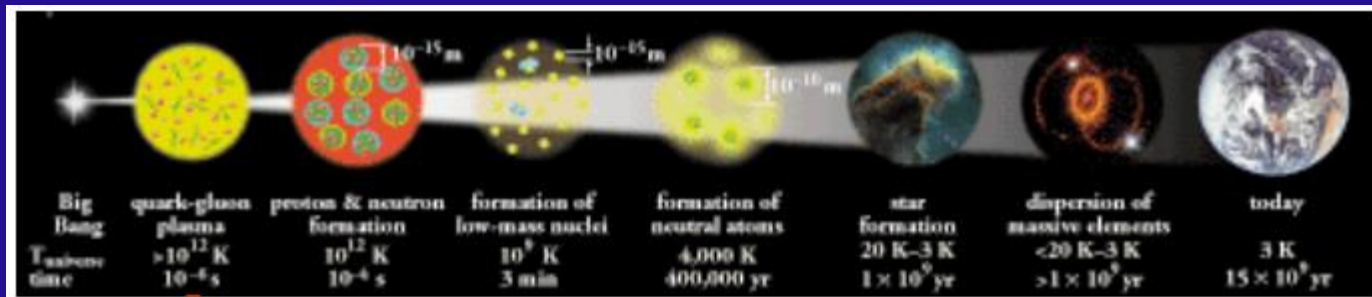


GREEK TEACHERS PROGRAMME, AUGUST 2017, CERN

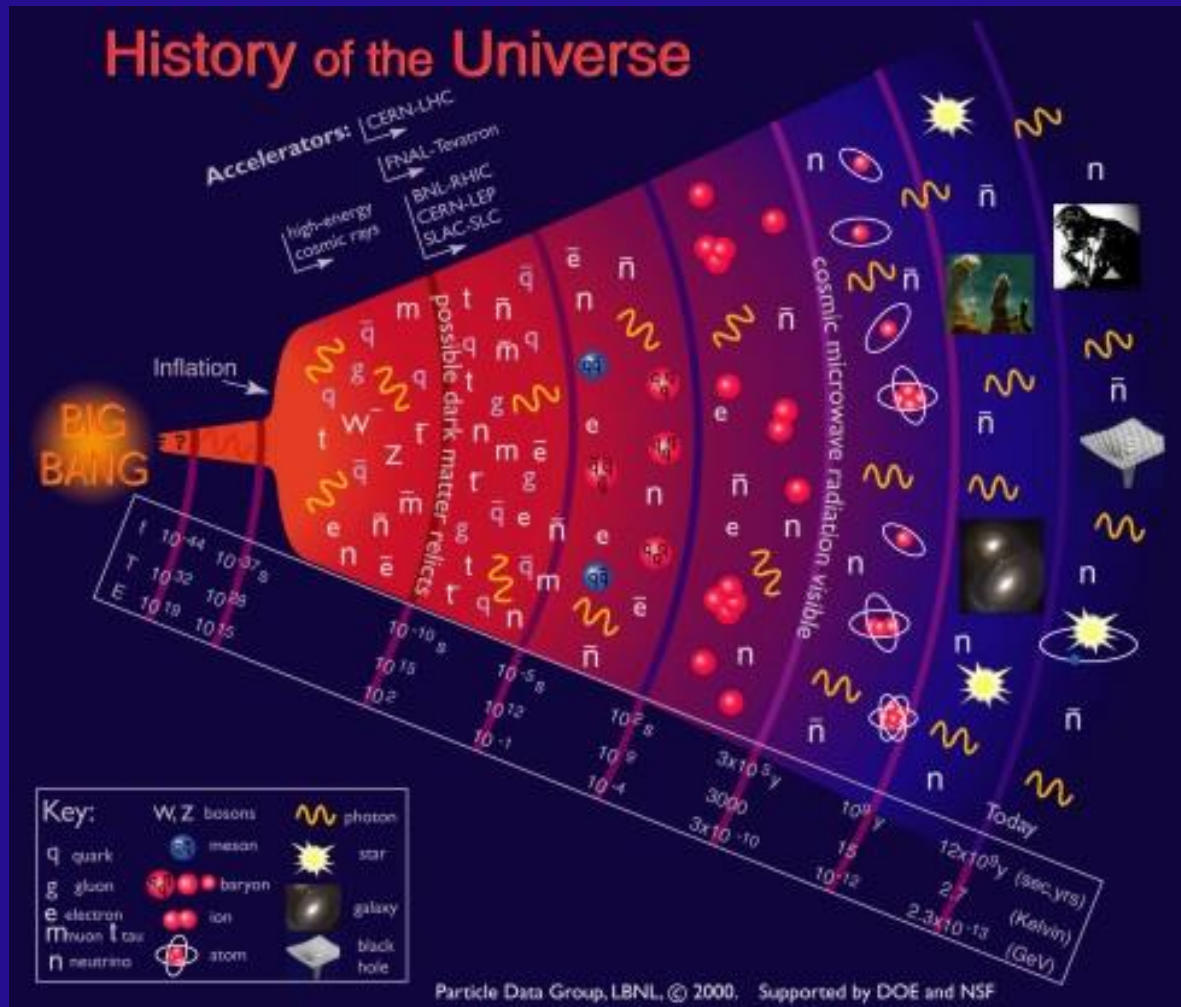
Despina Hatzifotiadou
INFN Bologna and CERN

Γιατί βαριά ιόντα;

- ❑ Οι αλληλεπιδράσεις βαριών ιόντων αντιπροσωπεύουν το πιο σύνθετο σύστημα που μελετάει στο εργαστήριο η φυσική στοιχειωδών σωματιδίων
- ❑ Γιατί μας ενδιαφέρει η μελέτη ενός τόσο σύνθετου συστήματος;
- ❑ Γιατί προσφέρει τη μοναδική δυνατότητα :
 - ❑ Να κατανοήσουμε το Σύμπαν μερικά micro-seconds μετά από το Big-Bang, όταν η θερμοκρασία ήταν $\sim 10^{12}$ K
 - ❑ Να κατανοήσουμε καλύτερα την ισχυρή αλληλεπίδραση



The Big Bang – Η μεγάλη έκρηξη



Εκατομμυριοστά του δευτερολέπτου μετά τη γέννηση του σύμπαντος, όλη η ύλη αποτελείται από κουάρκ και γλουόνια που κινούνται ελεύθερα

QUARK GLUON PLASMA

Καθώς το σύμπαν διαστέλεται και ψύχεται, τα κουάρκ και τα γλουόνια «φυλακίζονται» για πάντα μέσα στα αδρόνια, από τα οποία σήμερα παραμένουν μόνο πρωτόνια και νετρόνια

Πριν από 13.7 δισεκατομύρια χρόνια το σύμπαν γεννήθηκε από μια μεγάλη έκρηξη

Mini Big Bang

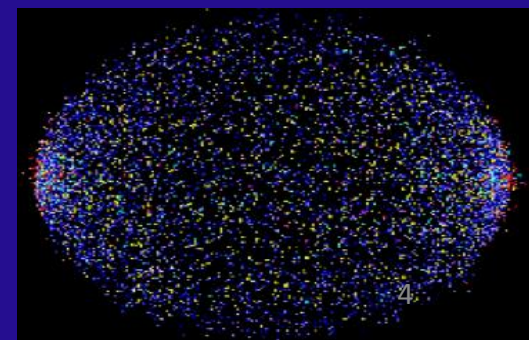
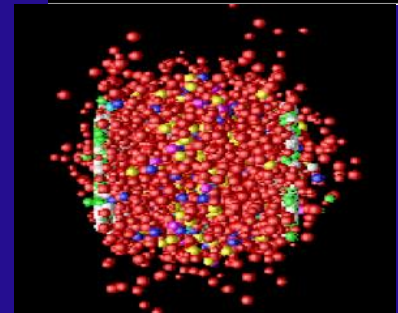
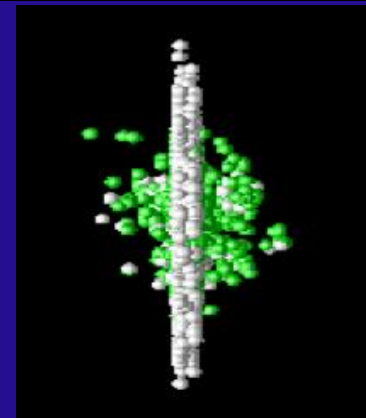
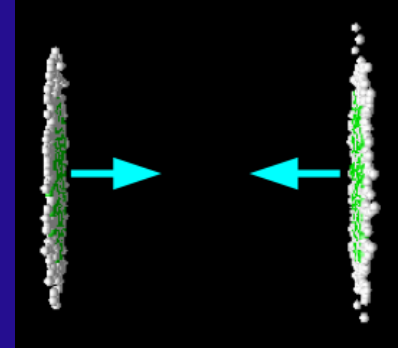
Συγκρούοντας πυρήνες μολύβδου με πολύ υψηλή ενέργεια αναδημιουργούμε τις συνθήκες πυκνότητας και θερμοκρασίας που υπήρχαν κλάσματα του δευτερολέπτου μετά το Big Bang

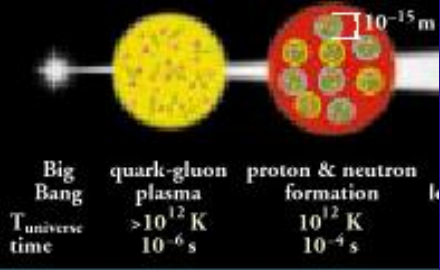
Δημιουργείται μια σταγόνα της πρωταρχικής κατάστασης της ύλης (Quark Gluon Plasma, QGP)

που ζει ελάχιστα

Μελετώντας τις ιδιότητές της

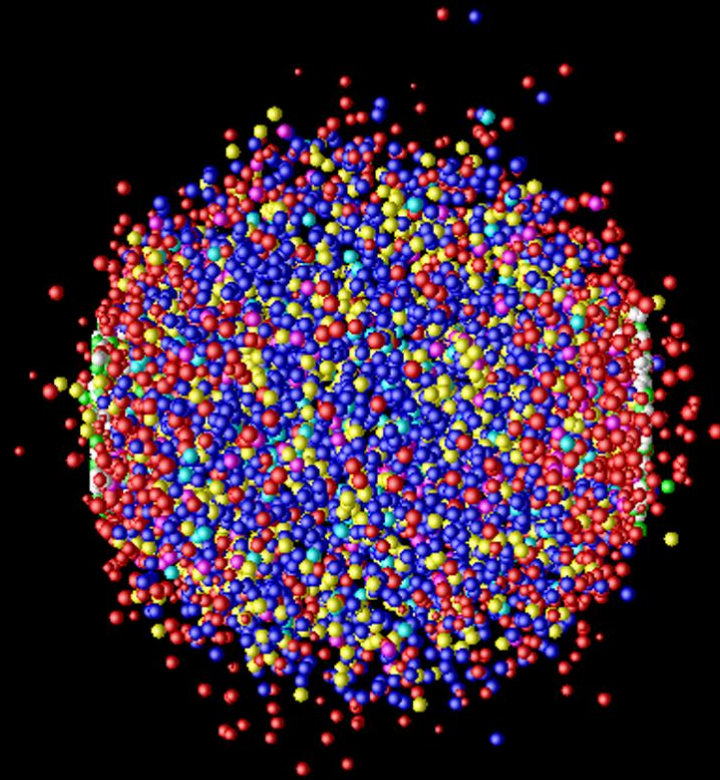
- Θα κατανοήσουμε καλύτερα τις διαδικασίες που συνέβησαν τα πρώτα κλάσματα του δευτερολέπτου στη ζωή του σύμπαντος
- Θα κατανοήσουμε καλύτερα την ισχυρή αλληλεπίδραση





Mini Big Bang

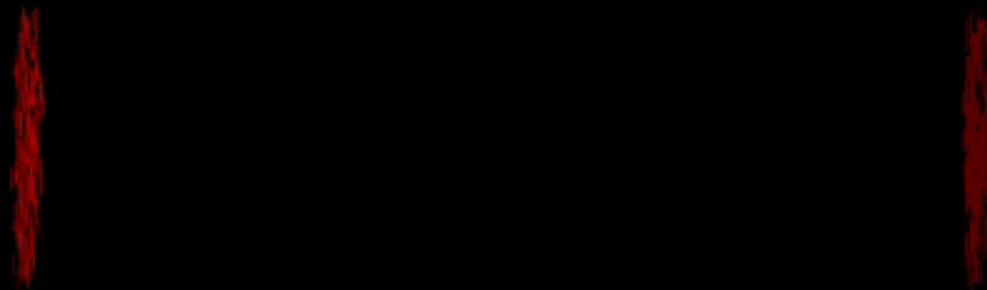
1. Οι επιταχυνόμενοι πυρήνες συγκρούονται μετωπικά
2. Η ενέργεια της σύγκρουσης μετατρέπεται σε μάζα με τη μορφή κουάρκ και γλουονίων
3. Τα κουάρκ και τα γλουόνια αλληλεπιδρούν ισχυρά : η ύλη τείνει προς την κατάσταση ισορροπίας
4. Το σύστημα ψύχεται και αραιώνει
5. Τα κουάρκ και τα γλουόνια «συμπυκνώνονται» και σχηματίζουν αδρόνια



$\tau \sim 10^{-23} \text{ s}$
 $T \sim 10^{12} \text{ K}$

Pb+Pb $E_{\text{cm}}=5.5$ TeV

$t=-19.00$ fm/c



H. Weber / UrQMD Frankfurt/M

BIG BANG

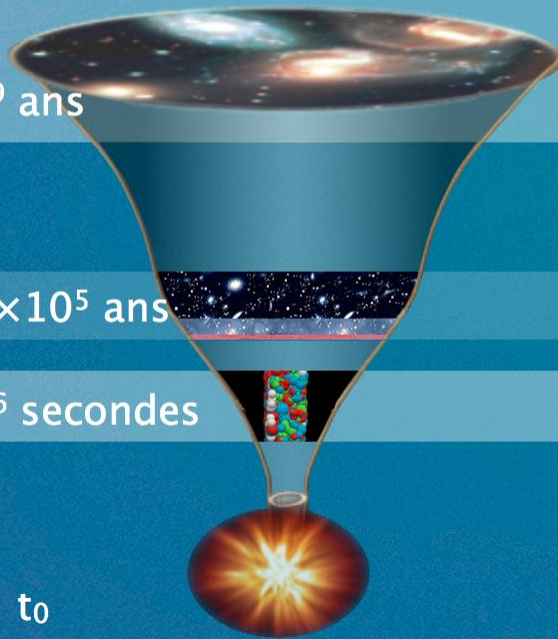
LITTLE BIG BANG

Aujourd'hui:
 $t_0 + 13.8 \times 10^9$ ans

CMB: $t_0 + 3.8 \times 10^5$ ans

QGP: $t_0 + 10^{-6}$ secondes

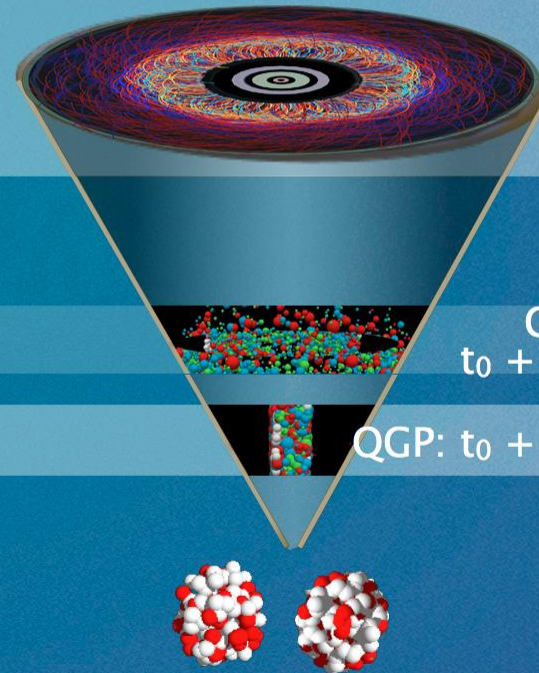
t_0



Gaz de hadrons:
 $t_0 + 10^{-23}$ secondes

QGP: $t_0 + 10^{-24}$ secondes

t_0

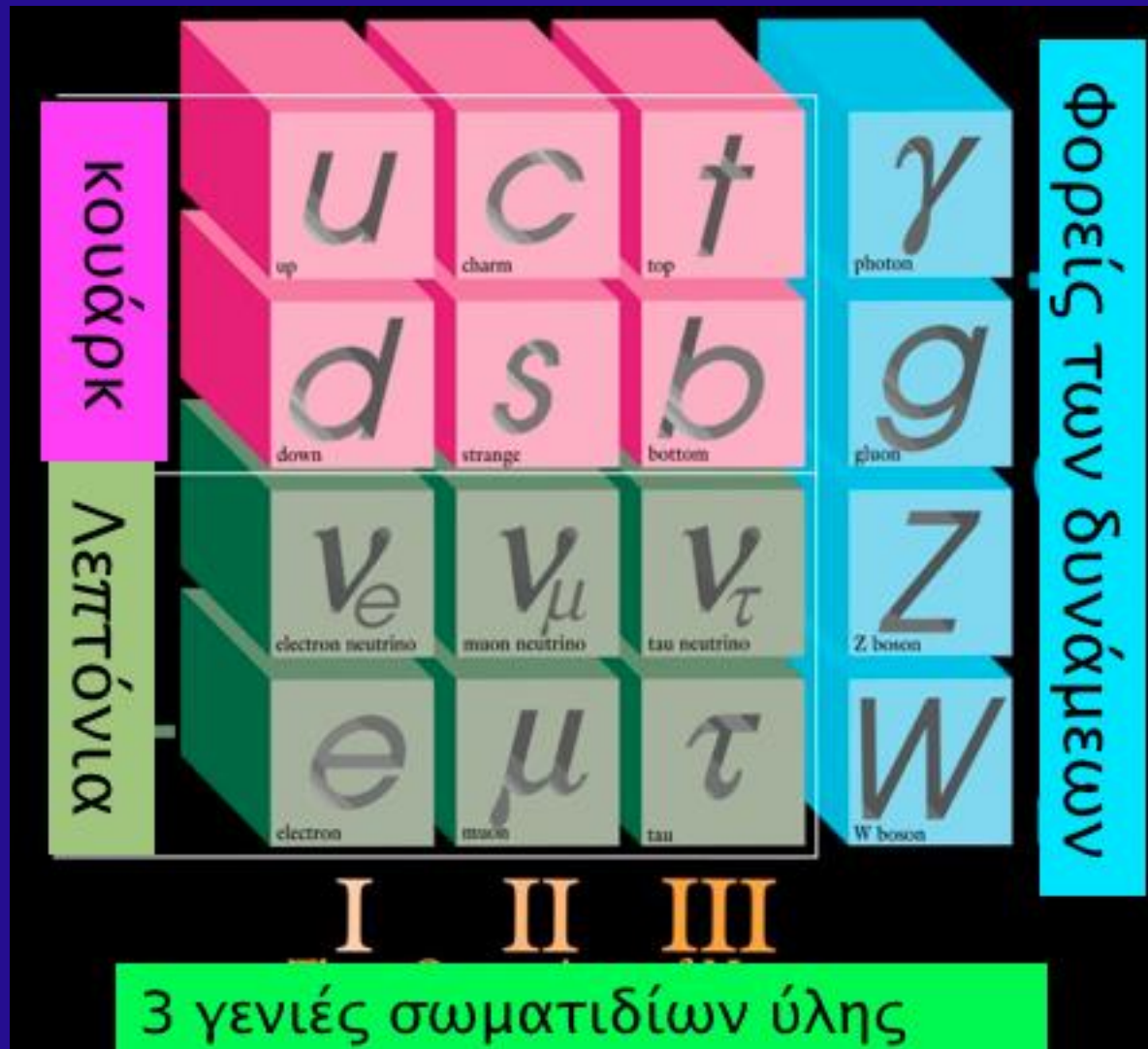


Το Καθιερωμένο Πρότυπο (The Standard Model)

Τα
στοιχειώδη
σωμάτια
είναι
φερμιόνια

Στατιστική
Fermi-Dirac

Spin
ημιακέραιο
(1/2, 3/2,...)



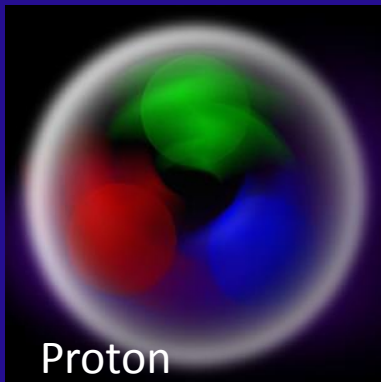
Οι φορείς των
δυνάμεων
είναι μποζόνια

Στατιστική
Bose-Einstein

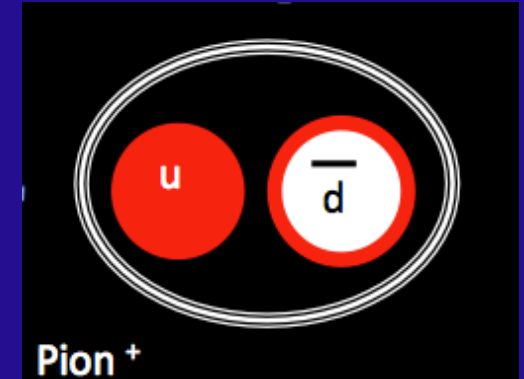
Spin ακέραιο
(0, 1, 2,...)

Εγκλωβισμός των κουάρκ (Quark Confinement)

Τα κουάρκ δεν μπορούν να υπάρξουν ελεύθερα
 Τα βρίσκουμε μόνο δέσμια μέσα στα αδρόνια



Βαρυόνια
 αποτελούνται
 από 3 κουάρκ



Μεσόνια
 αποτελούνται
 από ζεύγος
 κουάρκ
 αντικουάρκ

Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$

Baryons are fermionic hadrons.

These are a few of the many types of baryons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
\mathbf{p}	proton	\mathbf{uud}	1	0.938	1/2
$\bar{\mathbf{p}}$	antiproton	$\bar{\mathbf{u}}\bar{\mathbf{u}}\bar{\mathbf{d}}$	-1	0.938	1/2
\mathbf{n}	neutron	\mathbf{udd}	0	0.940	1/2
Λ	lambda	\mathbf{uds}	0	1.116	1/2
Ω^-	omega	\mathbf{sss}	-1	1.672	3/2

Mesons $q\bar{q}$

Mesons are bosonic hadrons

These are a few of the many types of mesons.

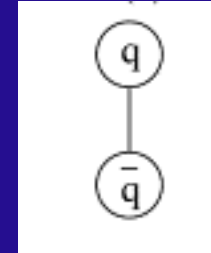
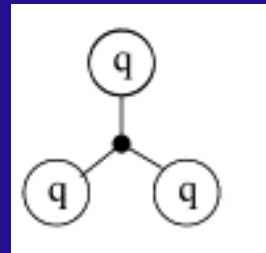
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
π^+	pion	$\mathbf{u}\bar{\mathbf{d}}$	+1	0.140	0
\mathbf{K}^-	kaon	$\mathbf{s}\bar{\mathbf{u}}$	-1	0.494	0
ρ^+	rho	$\mathbf{u}\bar{\mathbf{d}}$	+1	0.776	1
\mathbf{B}^0	B-zero	$\mathbf{d}\bar{\mathbf{b}}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	$\mathbf{c}\bar{\mathbf{c}}$	0	2.980	0

Ισχυρή αλληλεπίδραση

	I	II	III	
mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name →	u up	c charm	t top	γ photon
Quarks	d down	s strange	b bottom	g gluon
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Leptons	$<2.2 \text{ eV}$	$\approx 0.17 \text{ MeV}$	$<15.5 \text{ MeV}$	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z weak force
0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV	
-1	-1	-1	± 1	
$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
e electron	μ muon	τ tau	W weak force	

Bosons (Forces)

- Τα κουάρκ έχουν ένα φορτίο χρώματος (R,B,G) που εισήχθη για να εξηγήσει την σύνθεση
 - των βαρυονίων (3 κουάρκ ή αντικουάρκ)
 - και των μεσονίων (ζεύγος κουάρκ - αντικουάρκ) αντικείμενα χωρίς χρώμα



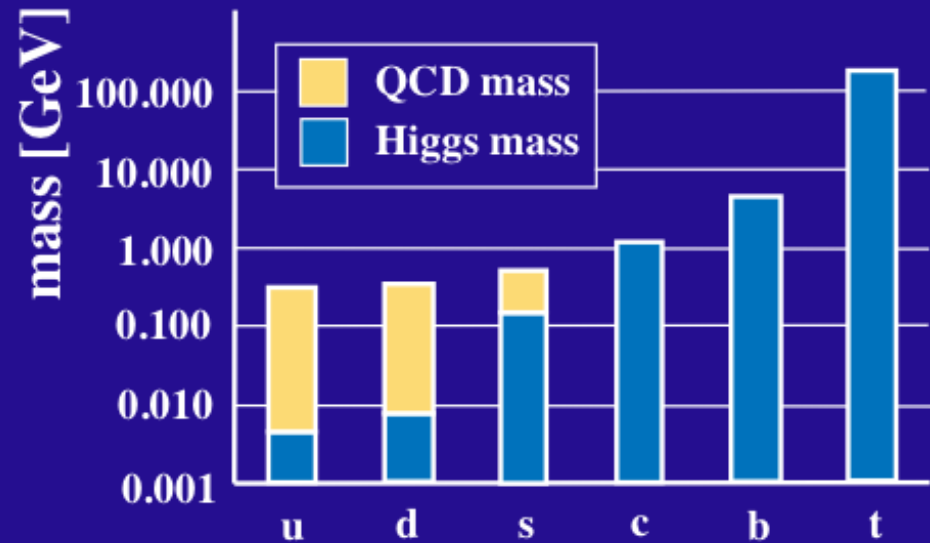
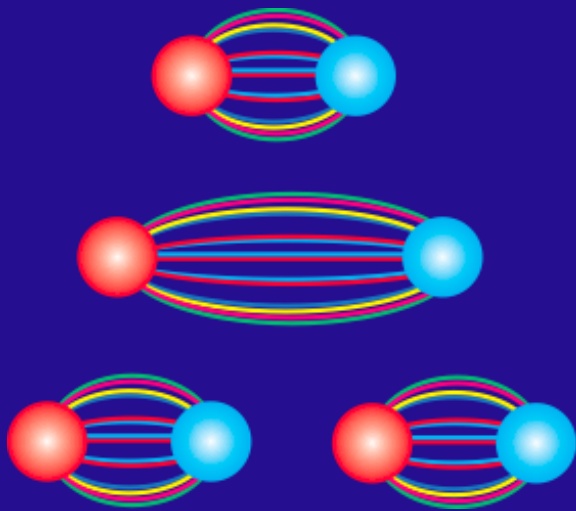
- Η αλληλεπίδραση μεταξύ κουάρκ γίνεται με την ανταλλαγή γλουονίων ($m_g=0$) που είναι φορείς ενός φορτίου χρώματος και ενός φορτίου αντι-χρώματος
- Η ισχυρή αλληλεπίδραση είναι ισχυρή σε μεγάλη απόσταση και ασθενής σε μικρή απόσταση
- Το κενό είναι γεμάτο απο virtual ζευγάρια κουάρκ-αντικουάρκ

QCD : Quantum Chromodynamics

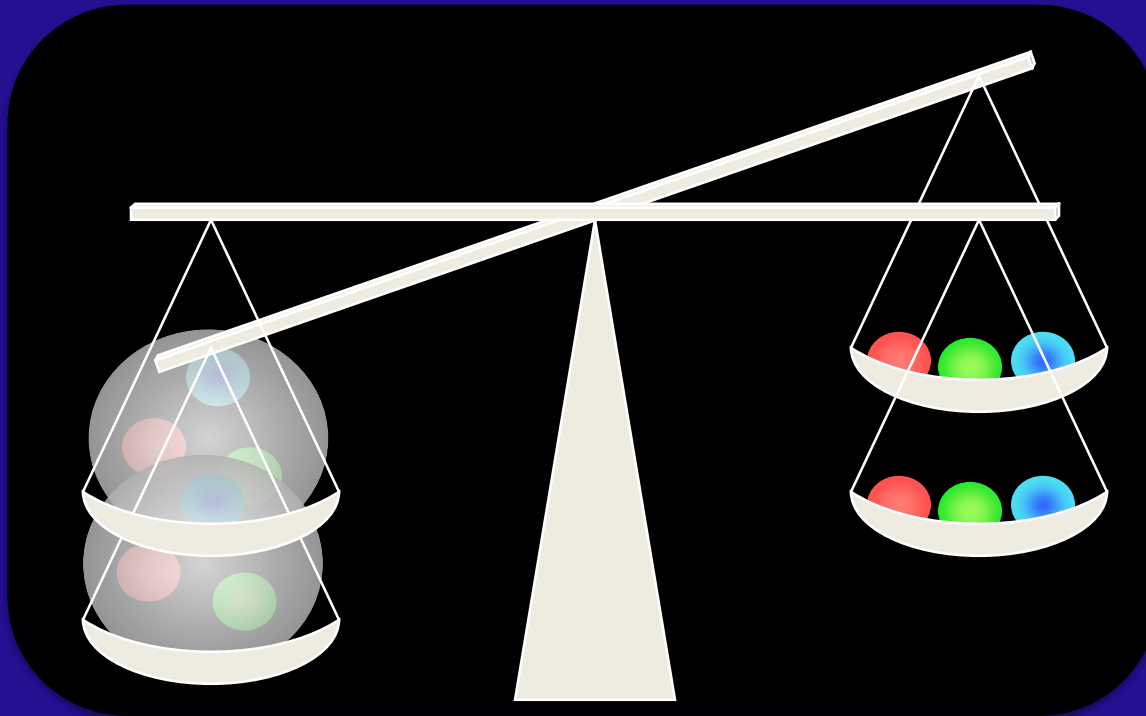
Τα δύο «μυστήρια» της κβαντικής χρωμοδυναμικής

Ο εγκλωβισμός των κουάρκ

Οι μάζες των αδρονίων

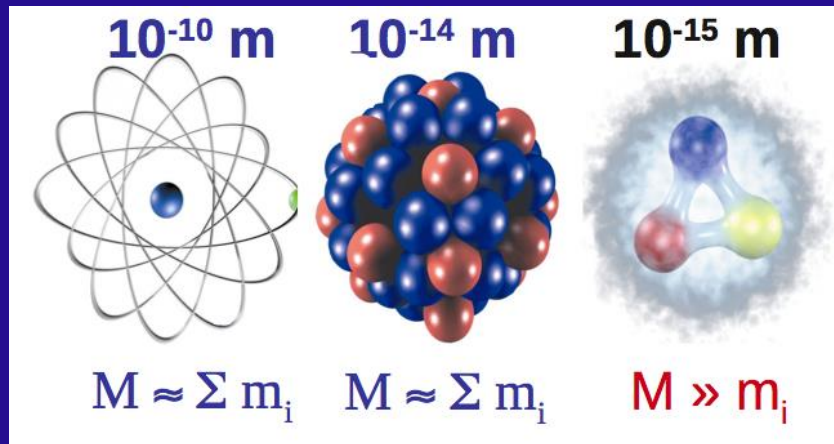


Πώς δημιουργείται η μάζα των αδρονίων;



Δημιουργία της μάζας

Άτομο πυρήνας νουκλεόνιο

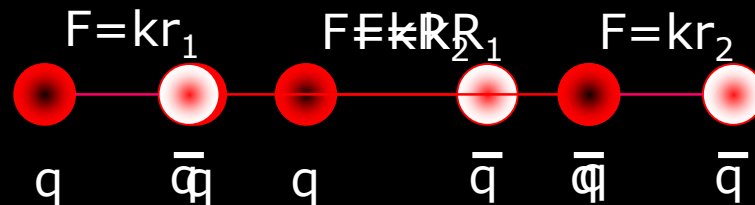


πρωτόνιο (uud) μάζα $938 \text{ MeV}/c^2$
Μαζα up quark : $1.7 - 3.3 \text{ MeV}/c^2$
Μάζα down quark : $4.1 - 5.8 \text{ MeV}/c^2$
Αθροισμα : $7.5 - 12.4 \text{ MeV}/c^2$

Στα νουκλεόνια (πρωτόνια και νετρόνια) η μάζα δεν καθορίζεται από το άθροισμα των μαζών των συστατικών αλλά κυρίως από την ενέργεια που περιέχεται στην κίνηση των κουάρκ και από την ενέργεια των γλουονίων

Confinement

Γιατί τα κουάρκ είναι μόνιμα εγκλωβισμένα μέσα στα αδρόνια;

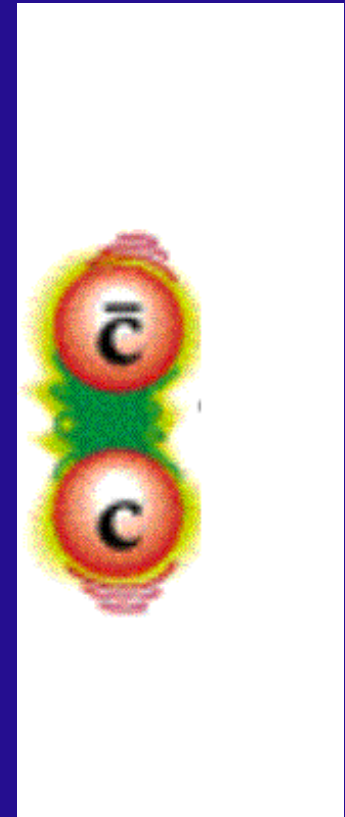


- Η αύξηση της ισχύος της αλληλεπίδρασης, όταν προσπαθούμε να απομακρύνουμε το κουάρκ από το αντικουάρκ σ'ένα βαρύ μεσόνιο, εκφράζεται **προσεγγιστικά από το δυναμικό**

$$V(r) = -\frac{A(r)}{r} + Kr$$

Όπου ο όρος **Kr περιγράφει τα αποτελέσματα του εγκλωβισμού (confinement)**

- Όταν το r αυξάνεται, το πεδίο του χρώματος φαίνεται σαν σωλήνας που συνδέει τα κουάρκ
- Σε μεγάλες αποστάσεις, βολεύει ενεργειακά να **μετατραπεί η (αυξανόμενη) ενέργεια** που έχει αποθηκευτεί στο σωλήνα χρώματος σ'ένα καινούριο ζευγάρι κουάρκ-αντικουάρκ



... deconfinement

- Εφόσον οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ κουάρκ και γλουονίων γίνονται ασθενέστερες στις μικρές αποστάσεις, θα ήταν δυνατόν, δημιουργώντας ένα σχετικά εκτεταμένο σύστημα με υψηλή πυκνότητα/θερμοκρασία που αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό κουάρκ και γλουονίων, να δημιουργήσουμε μια “deconfined” κατάσταση της ύλης

- Οι πρώτες ιδέες : '70s

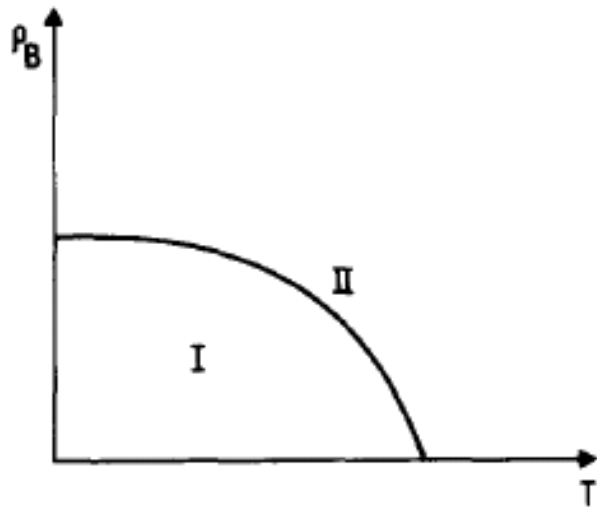


Fig. 1. Schematic phase diagram of hadronic matter. ρ_B is the density of baryonic number. Quarks are confined in phase I and unconfined in phase II.

“Experimental hadronic spectrum and quark liberation”

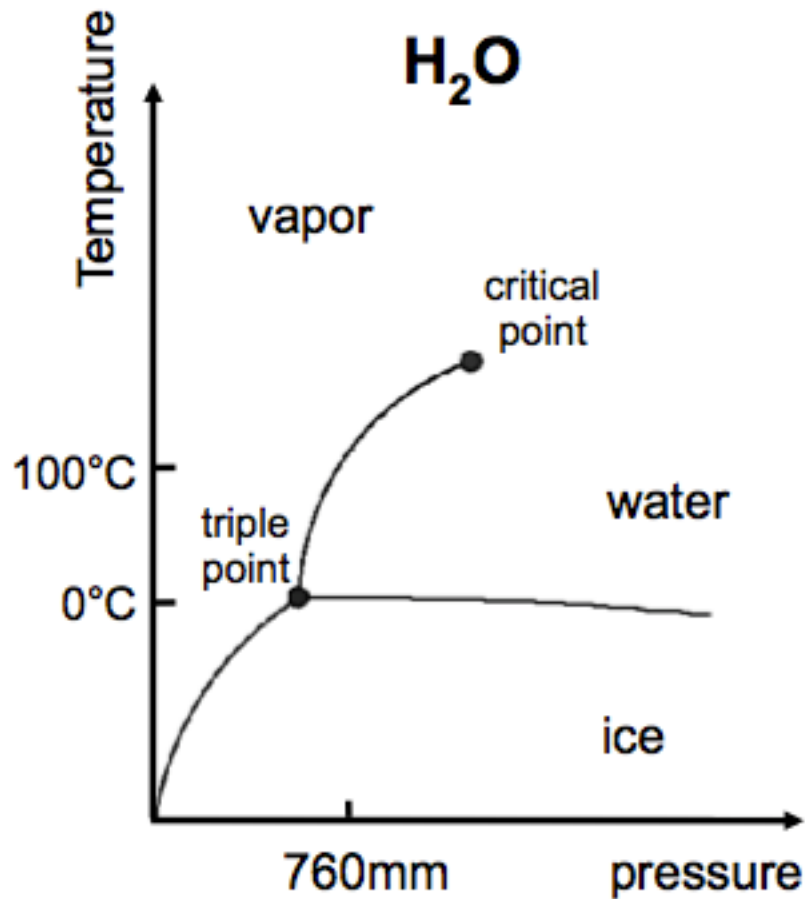
Cabibbo and Parisi *Phys. Lett.* **59B**, 67 (1975)

We expect models of this kind to give rise to a phase transition at a temperature $kT \approx m_\pi$, the high temperature phase being one where quarks can move freely in space.

We expect the same transition to be also present at low temperature but high pressure, for the same reason, i.e. we expect a phase diagram of the kind indicated in fig. 1.

Phase transition at large T and/or ρ_B

Reminder: Phase diagram



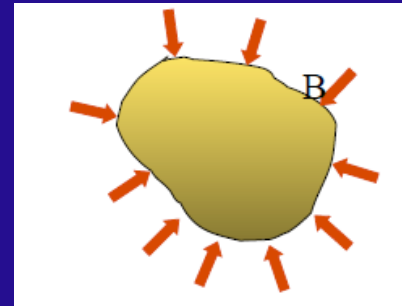
Becoming more quantitative...

- MIT bag model: απλή, φαινομενολογική προσέγγιση που περιέχει μια περιγραφή του απεγκλωβισμού (deconfinement)
- Τα κουάρκ θεωρούνται σωματίια χωρίς μάζα που περιέχονται σε μια σακούλα πεπερασμένου μεγέθους
- Ο εγκλωβισμός προέρχεται από την εξισορρόπηση της πίεσης από την κινητική ενέργεια των κουάρκ και μιας εξωτερικής πίεσης

Kinetic term

Bag energy

$$E = \frac{2.04N}{R}(\hbar c) + \frac{4\pi}{3}R^3B$$



- Η πίεση της σακούλας μπορεί να υπολογιστεί θεωρώντας το τυπικό μέγεθος αδρονίου
- Αν η πίεση μέσα στη σακούλα αυξηθεί έτσι ώστε να ξεπεράσει την εξωτερική πίεση → deconfined phase, or Quark-Gluon Plasma (QGP)
- Πώς αυξάνεται η πίεση ;
 - Αύξηση της θερμοκρασίας → Αύξηση της κινητικής ενέργειας των κουάρκ
 - Αύξηση της βαρυονικής πυκνότητας → συμπίεση

High-temperature QGP

□ Η πίεση ενός ιδανικού QGP δίνεται από

$$P = g_{tot} \frac{\pi^2}{90} T_c^4$$

όπου g_{tot} (συνολικός αριθμός βαθμών ελευθερίας που σχετίζονται με τα κουάρκ, αντικουάρκ και γλουόνια) δίνεται από $g_{tot} = g_g + 7/8 \times (g_q + g_{qbar}) = 37$, εφόσον

$$\begin{cases} g_g = 8 \times 2 \text{ (8 γλουόνια με 2 δυνατές πολώσεις)} \\ g_q = g_{qbar} = N_{color} \times N_{spin} \times N_{flavour} = 3 \times 2 \times 2 \end{cases}$$

□ Η **critical temperature** όπου η πίεση του QGP είναι ίση με την πίεση της σακούλας δίνεται από

$$P = 37 \frac{\pi^2}{90} T_c^4 \equiv B \Rightarrow T_c = \sqrt[4]{\frac{90B}{37\pi^2}} = 145 \text{ MeV}$$

Και η αντίστοιχη **ενεργειακή πυκνότητα** $\varepsilon=3P$ δίνεται από

$$\varepsilon = 37 \frac{\pi^2}{30} T^4 \frac{1}{(\hbar c)^3} = 0.7 \text{ GeV} / \text{fm}^3$$

High-density QGP

- Ο αριθμός των κουάρκ με ορμές μεταξύ p και $p+dp$ είναι (Fermi-Dirac)

$$dN_q = \frac{g_q V 4\pi p^2 dp}{(2\pi)^3} \left[\frac{1}{1 + e^{(p-\mu_q)/T}} \right]$$

όπου μ_q είναι το χημικό δυναμικό, που σχετίζεται με την ενέργεια που απαιτείται για να προστεθεί ένα κουάρκ στο σύστημα

- Η πίεση ενός συμπιεσμένου συστήματος κουάρκ είναι

$$P_q = \frac{\mathcal{E}_q}{3} = \frac{g_q}{24\pi^2} \mu_q^4$$

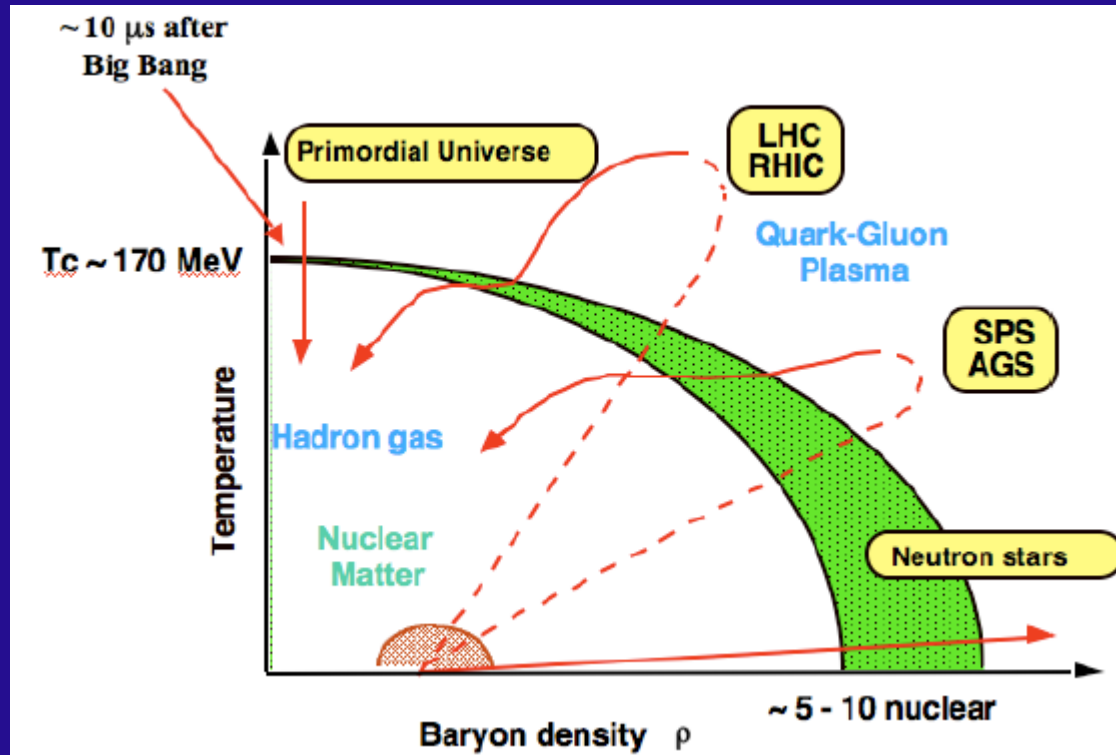
- Επιβάλλοντας και σ' αυτή την περίπτωση η πίεση της σακούλας να είναι ίση με την πίεση του συστήματος των κουάρκ, βρίσκουμε

$$\mu_q = \left(\frac{24\pi^2 B}{g_q} \right)^{\frac{1}{4}}$$

Που δίνει $\mu_q = 434 \text{ MeV}$

- Μεταφραζόμενο σε βαρυονική πυκνότητα, αυτό αντιστοιχεί σε $n_B = 0.72 \text{ fm}^{-3}$, που είναι περίπου 5 φορές μεγαλύτερη από την συνήθη πυρηνική πυκνότητα!

Διάγραμμα φάσης της ύλης που αλληλεπιδρά ισχυρά



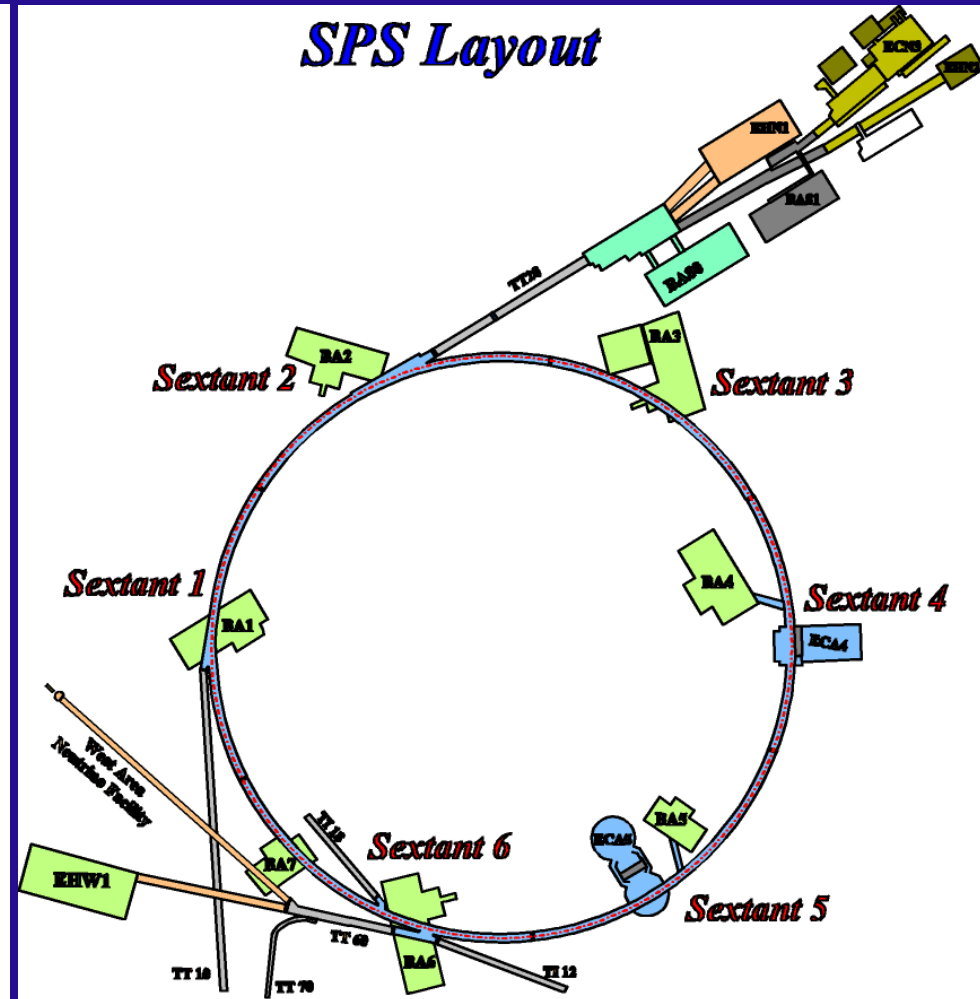
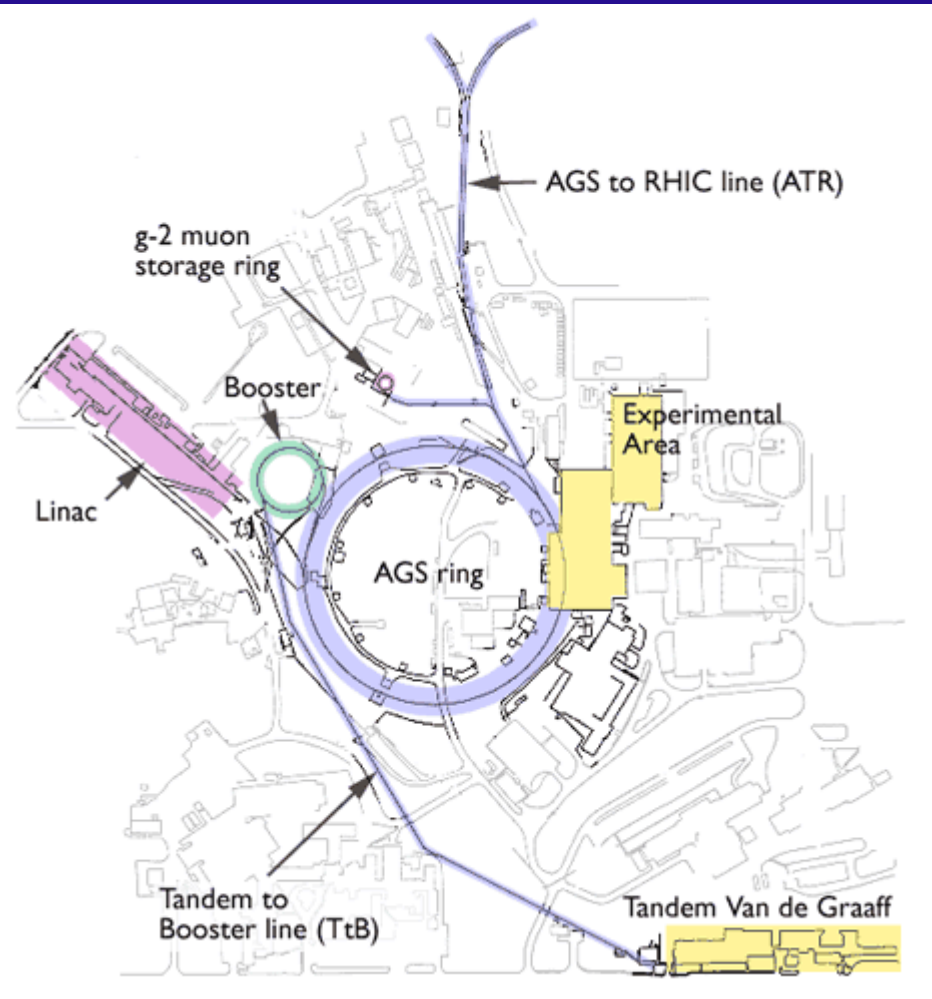
- ❑ Πώς μπορούμε να “εξερευνήσουμε” αυτό το διάγραμμα φάσης;
- ❑ Δημιουργώντας **εκτεταμένα συστήματα κουάρκ και γλουονίων** σε υψηλή θερμοκρασία και/ή βαρυονική πυκνότητα \rightarrow με συγκρούσεις βαριών ιόντων

Επιταχυντές για συγκρούσεις βαριών ιόντων

- Η μελέτη της αλλαγής φάσης απαιτεί ενέργειες σύγκρουσης στο σύστημα κέντρου μάζας αρκετών GeV/νουκλεόνιο
- Τη δεκαετία του 80, υπάρχοντες επιταχυντές και πειράματα στο **BNL** και στο **CERN** τροποποιήθηκαν για να επιταχύνουν δέσμες ιόντων και να ανιχνεύουν τα σωματίδια που παράγονται από τις συγκρούσεις



From fixed-target...



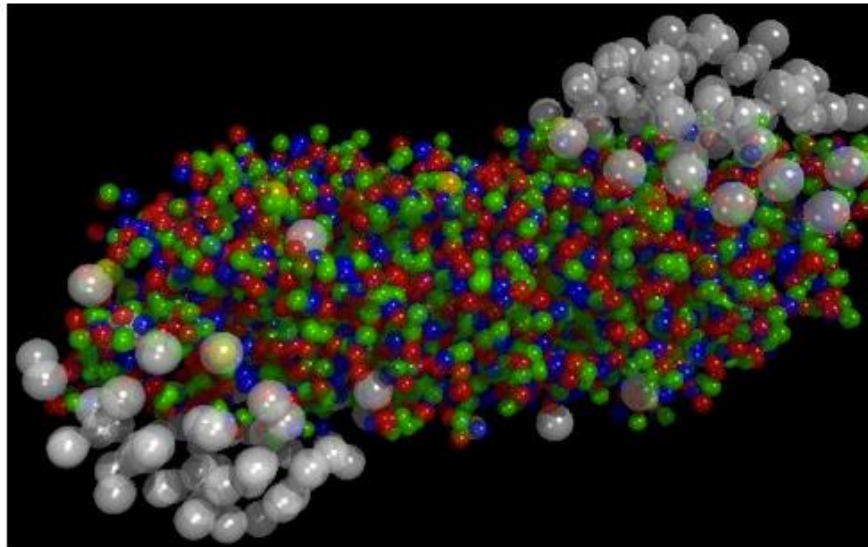
- AGS at BNL
- p beams up to 33 GeV
- Si and Au beams up to 14.6 A GeV

- SPS at CERN
- p beams up to 450 GeV
- O, S, In, Pb up to 200 A GeV

New State of Matter created at CERN

10 Feb 2000

<https://press.cern/press-releases/2000/02/new-state-matter-created-cern>



Geneva, 10 February 2000. At a special seminar on 10 February, spokespersons from the experiments on CERN¹'s Heavy Ion programme presented compelling evidence for the existence of a new state of matter in which quarks, instead of being bound up into more complex particles such as protons and neutrons, are liberated to roam freely.

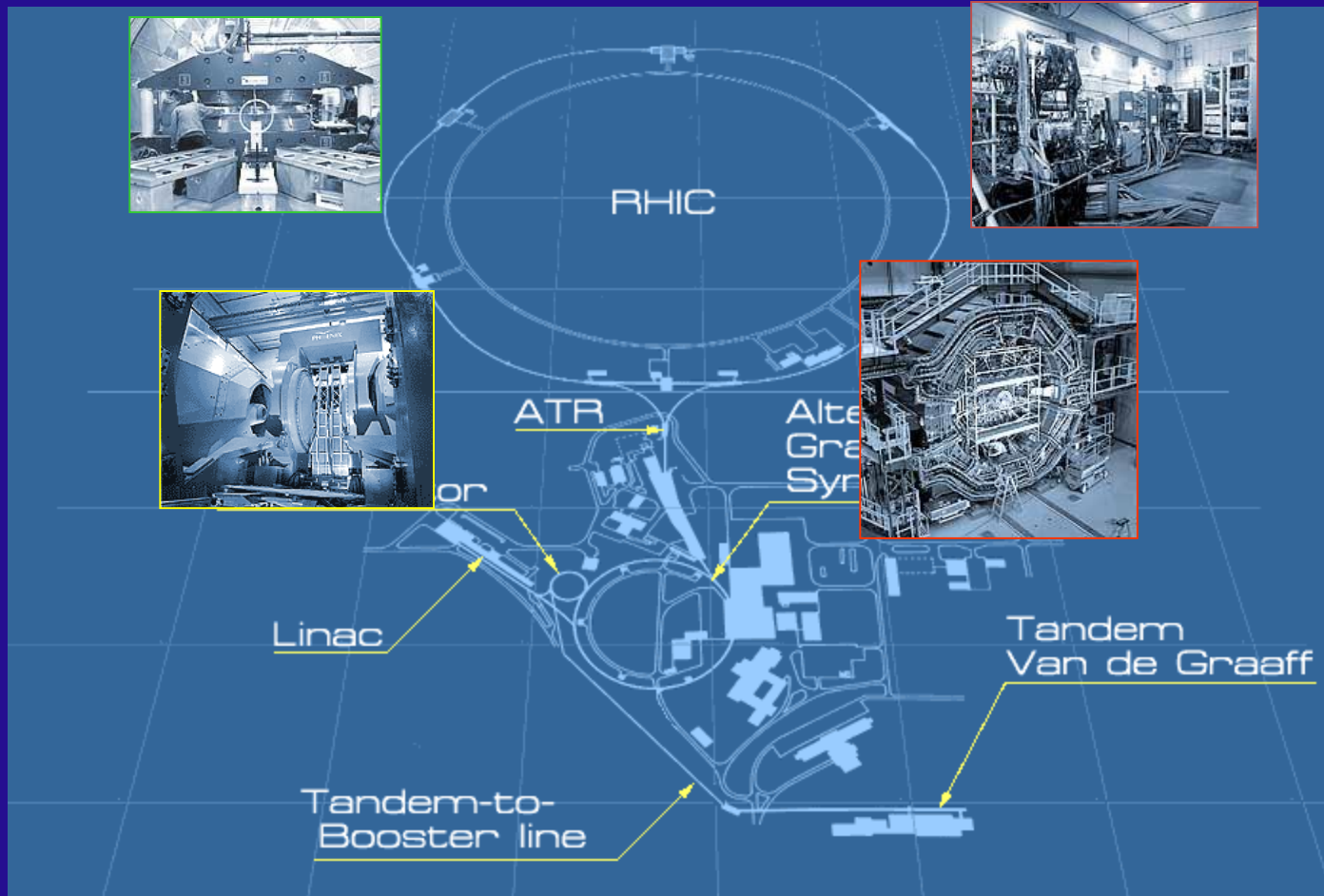
Theory predicts that this state must have existed at about 10 microseconds after the Big Bang, before the formation of matter as we know it today, but until now it had not been confirmed experimentally. Our understanding of how the universe was created, which was previously unverified theory for any point in time before the formation of ordinary atomic nuclei, about three minutes after the Big Bang, has with these results now been experimentally tested back to a point only a few microseconds after the Big Bang.

Professor Luciano Maiani, CERN Director General, said *"The combined data coming from the seven experiments on CERN's Heavy Ion programme have given a clear picture of a new state of matter. This result verifies an important prediction of the present theory of fundamental forces between quarks. It is also an important step forward in the understanding of the early evolution of the universe. We now have evidence of a new state of matter where quarks and gluons are not confined. There is still an entirely new territory to be explored concerning the physical properties of quark-gluon matter. The challenge now passes to the Relativistic Heavy Ion Collider at the Brookhaven National Laboratory and later to CERN's Large Hadron Collider."*

The aim of CERN's Heavy Ion programme was to collide lead ions so as to create immensely high energy densities which would break down the forces which confined quarks inside more complex particles. A very high energy beam of lead ions (3.3 TeV) was accelerated in CERN's Super Proton Synchrotron (SPS) and crashed into targets inside the

... to colliders!

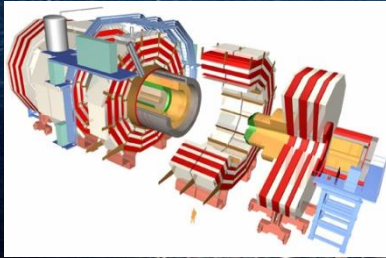
- ❑ RHC: the first dedicated machine for HI collisions (Au-Au, Cu-Cu)
 - ❑ Maximum $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV



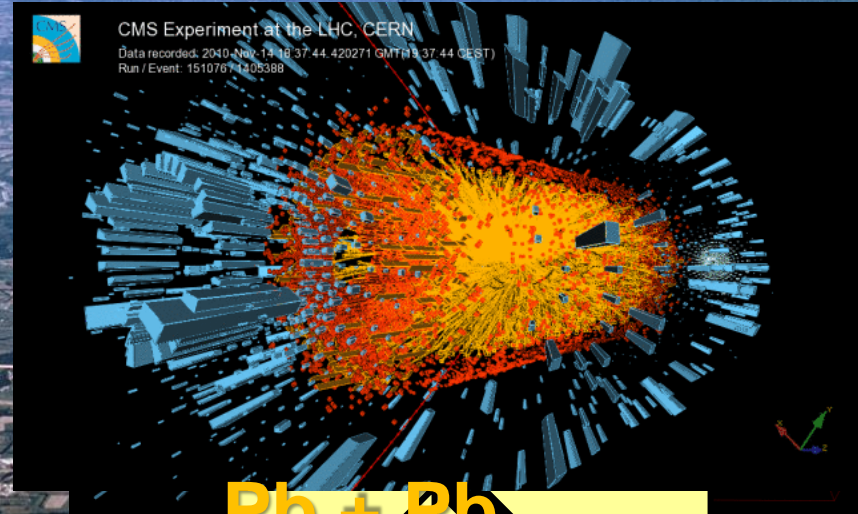
- ❑ experiments : **STAR**, **PHENIX**, **PHOBOS** and **BRAHMS**

Collider of 'Large Hadrons'

Design Energy:
14 TeV (pp)
1150 TeV (PbPb)



CMS



Pb + Pb



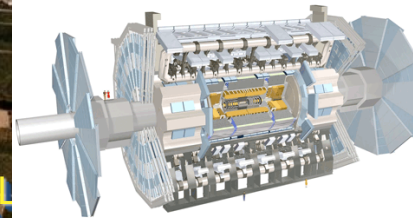
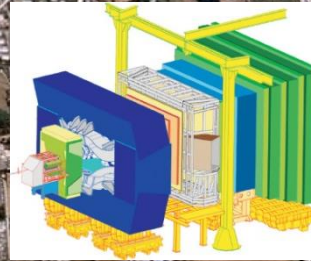
LHCb



ALICE



ATLAS



all participate in HI program (4)

Βαριά ιόντα στο LHC

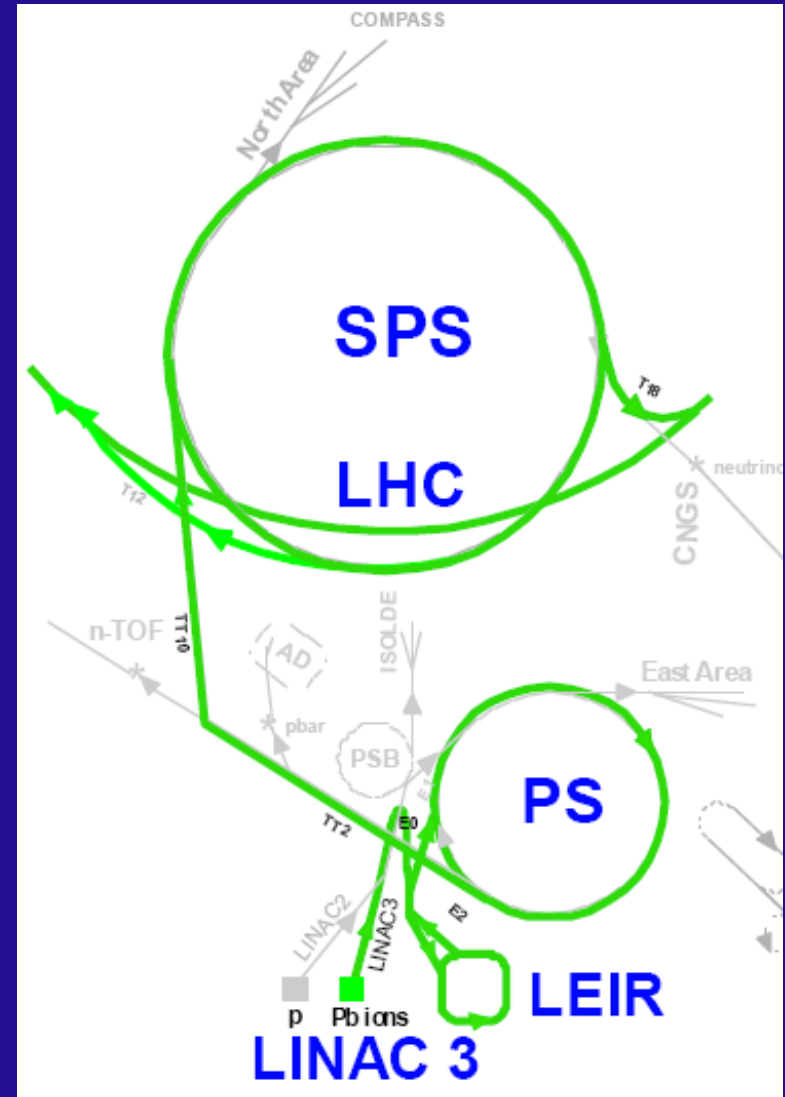
Μικρή ράβδος μολύβδου Pb^{208} (2 cm, 500 mg) θερμαίνεται σε $500^{\circ}C$ και εξαερώνεται. Ένα ισχυρό ηλεκτρικό ρεύμα βγάζει ηλεκτρόνια από τα άτομα



ισότοπο Pb^{208}
82 πρωτόνια
126 νετρόνια

Heavy Ions at CERN

- Acceleration of Pb ions:
 - ECR source: Pb^{27+} (80 mA)
 - RFQ: Pb^{27+} to 250 A keV
 - Linac3: Pb^{27+} to 4.2 A MeV
 - Stripper: Pb^{53+}
 - LEIR: Pb^{53+} to 72 A MeV
 - PS: Pb^{53+} to 4.25 A GeV
 - Stripper: Pb^{82+} (full ionisation)
 - SPS: Pb^{82+} to 158 A GeV
 - LHC: Pb^{82+} to 2.76 A TeV
 - LHC: Pb^{82+} to 5.02 A TeV



LHC as a HI accelerator

- Fully ionised ^{208}Pb nucleus accelerated in LHC configuration magnetically identical to that for pp; 2011 numbers:

$$p_{\text{Pb}} = Z p_p = 82 \cdot 3.5 \text{ TeV} = 287 \text{ TeV}$$



$$\sqrt{s_{\text{PbPb}}} = 574 \text{ TeV (!)}$$

- the relevant figure is \sqrt{s} per nucleon-nucleon collision: $\sqrt{s_{\text{NN}}}$

$$\sqrt{s_{\text{NN}}} = \frac{2E_{\text{Pb}}}{A} = \frac{Z}{A} \sqrt{s_{\text{pp}}} = \frac{82}{208} \sqrt{s_{\text{pp}}} = 2.76 \text{ TeV}$$

2015 numbers:

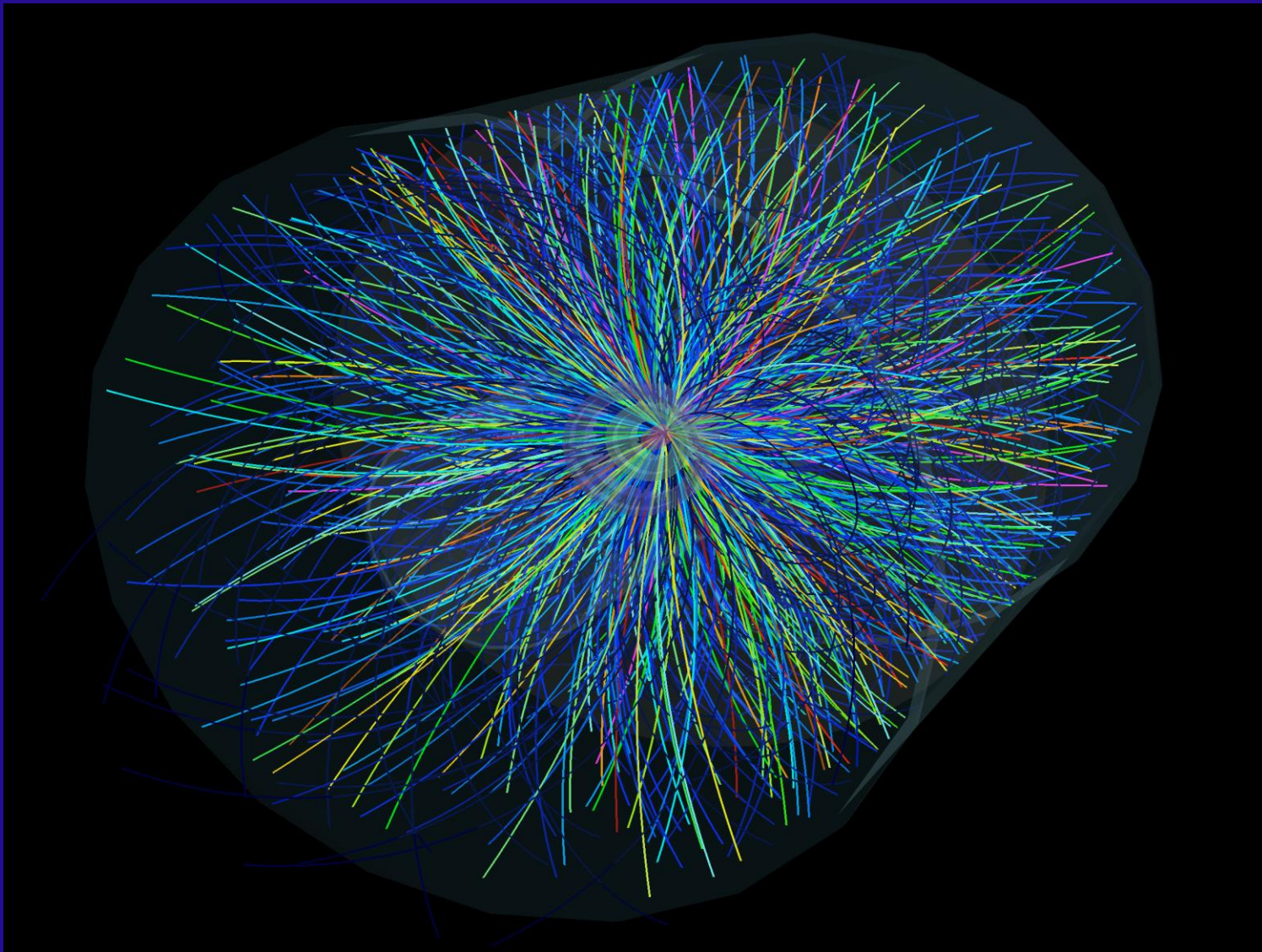
$$p_{\text{Pb}} = Z p_p = 82 \times 6.5 \text{ TeV} = 533 \text{ TeV}$$



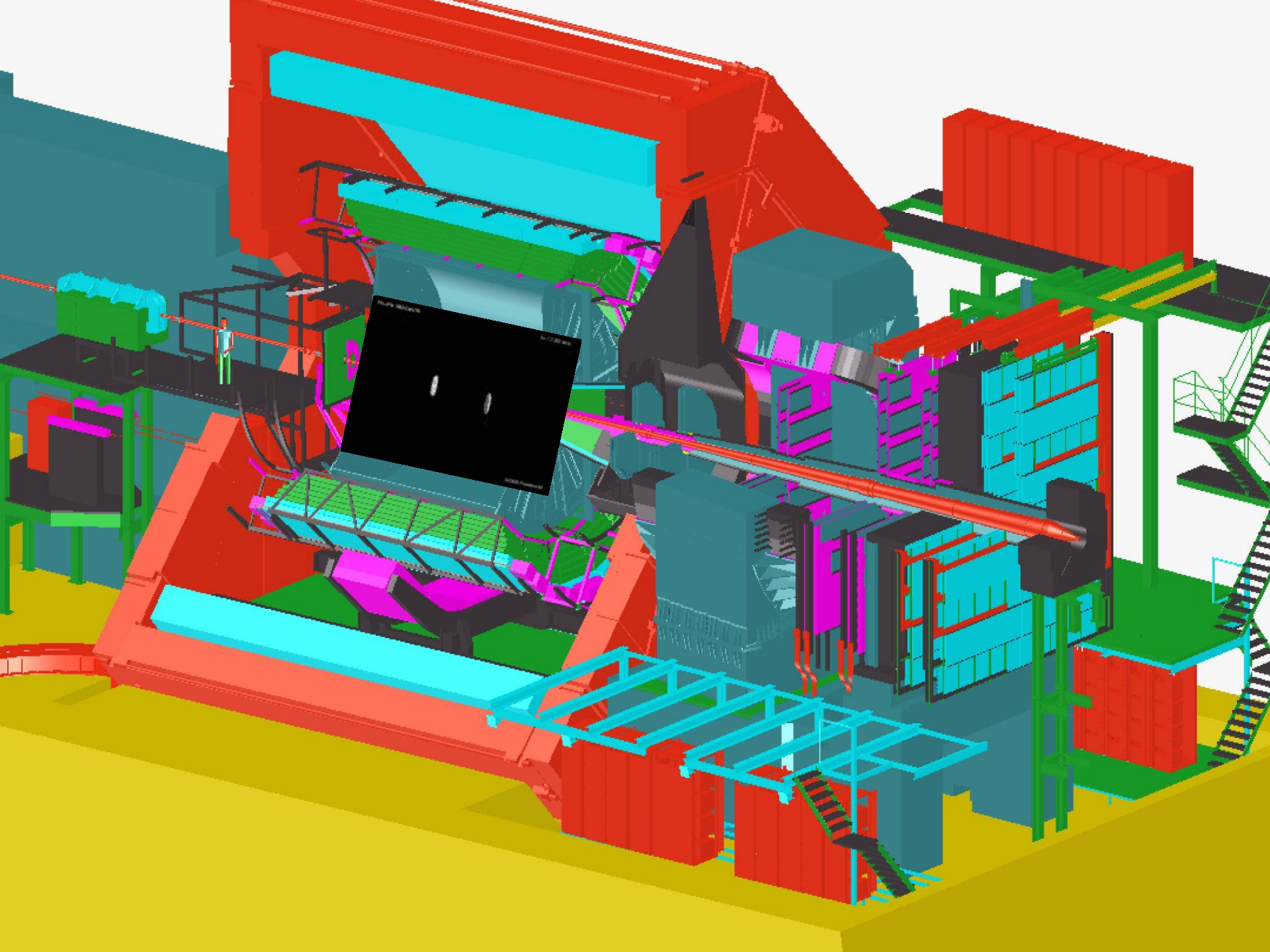
$$\sqrt{s_{\text{PbPb}}} = 1066 \text{ TeV (!)}$$

$$\sqrt{s_{\text{NN}}} = \frac{2E_{\text{Pb}}}{A} = \frac{Z}{A} \sqrt{s_{\text{pp}}} = \frac{82}{208} \sqrt{s_{\text{pp}}} = 5.02 \text{ TeV}$$

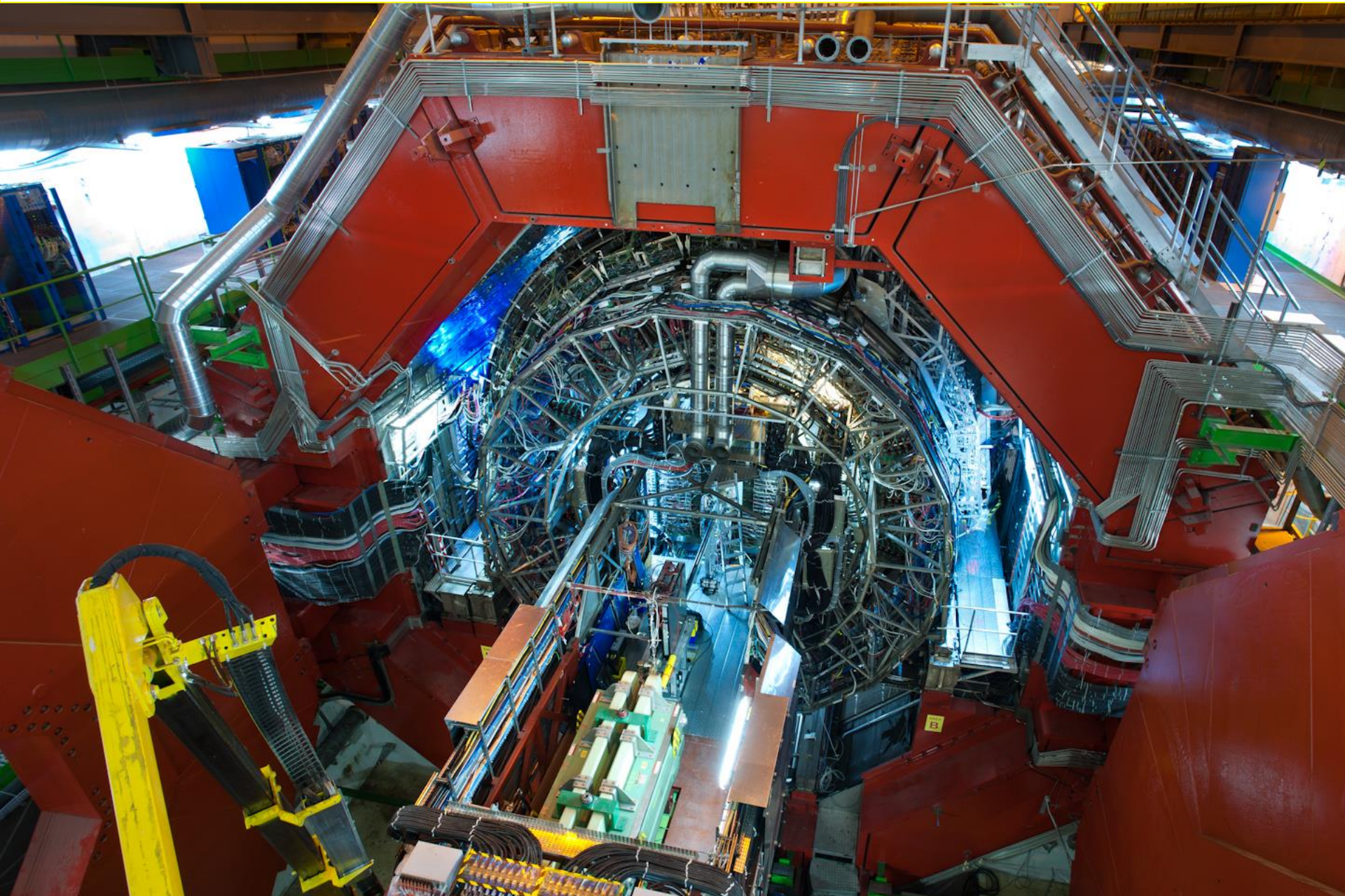
Συγκρούοντας πυρήνες μολύβδου πολύ υψηλής ενέργειας...



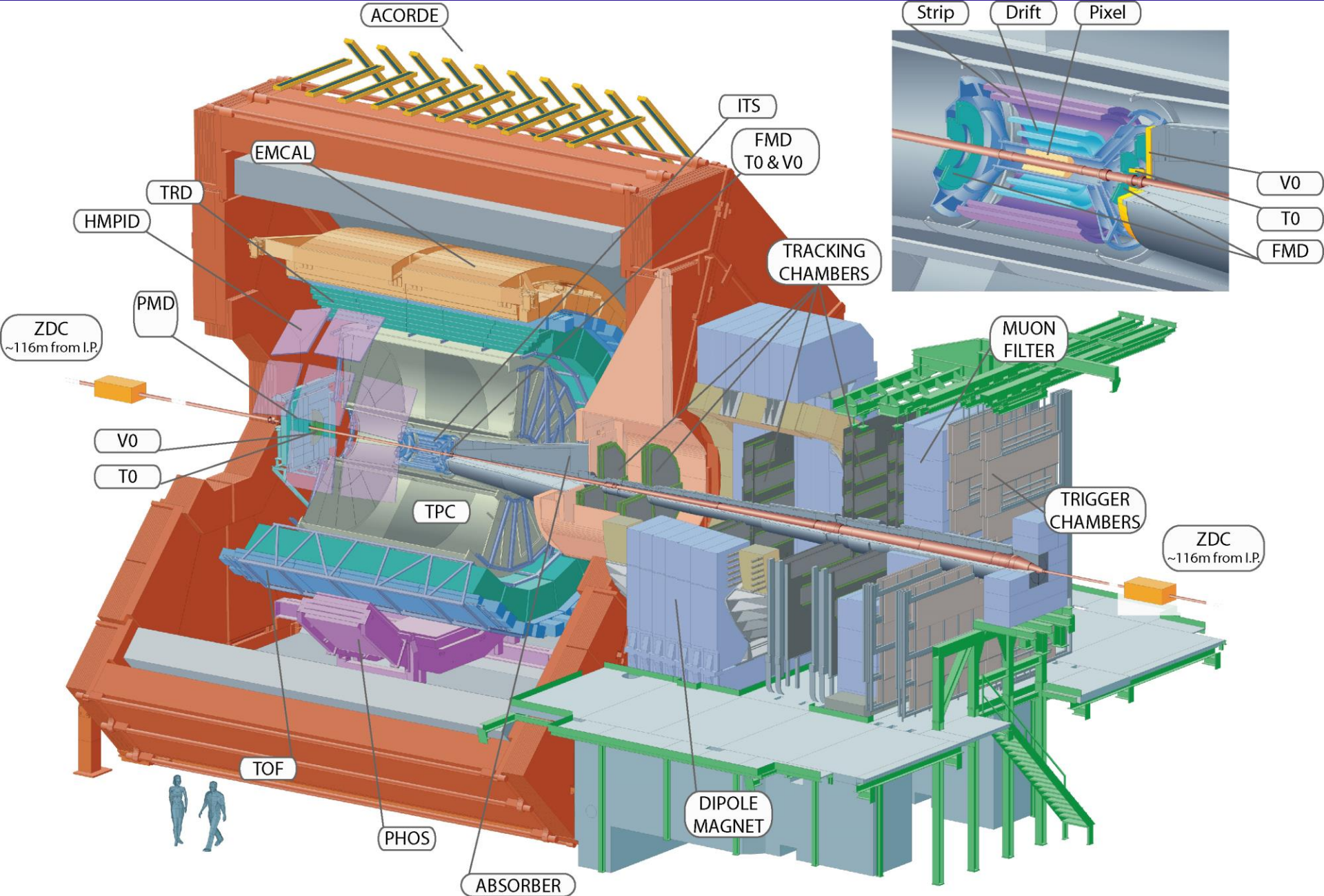
Μέχρι $\sim 10,000$ σωμάτια δημιουργούνται από κάθε σύγκρουση: κοντά στο σημείο αλληλεπίδρασης, η πυκνότητα φτάνει τα 90 σωμάτια ανά cm^2 !



ALICE : A Large Ion Collider Experiment



16 m x 16 m x 26 m 10 000 tons installed 56 m underground (@ point 2 of LHC)

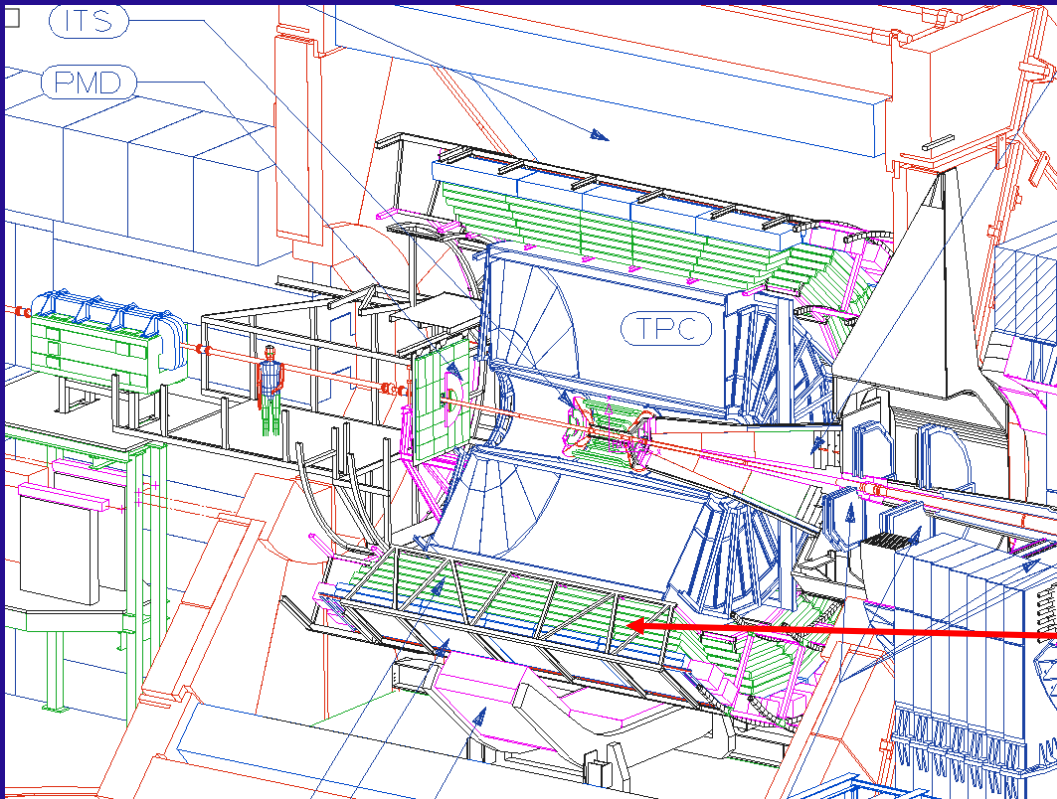


16 m x 16 m x 26 m 10 000 tons installed 56 m underground (@ point 2 of LHC)

Δέσποινα Χατζηφωτιάδου

ALICE : 18 διαφορετικά ανιχνευτικά συστήματα

- Γύρω από το σημείο της αλληλεπίδρασης έχουμε τοποθετήσει ανιχνευτές ,όπως...

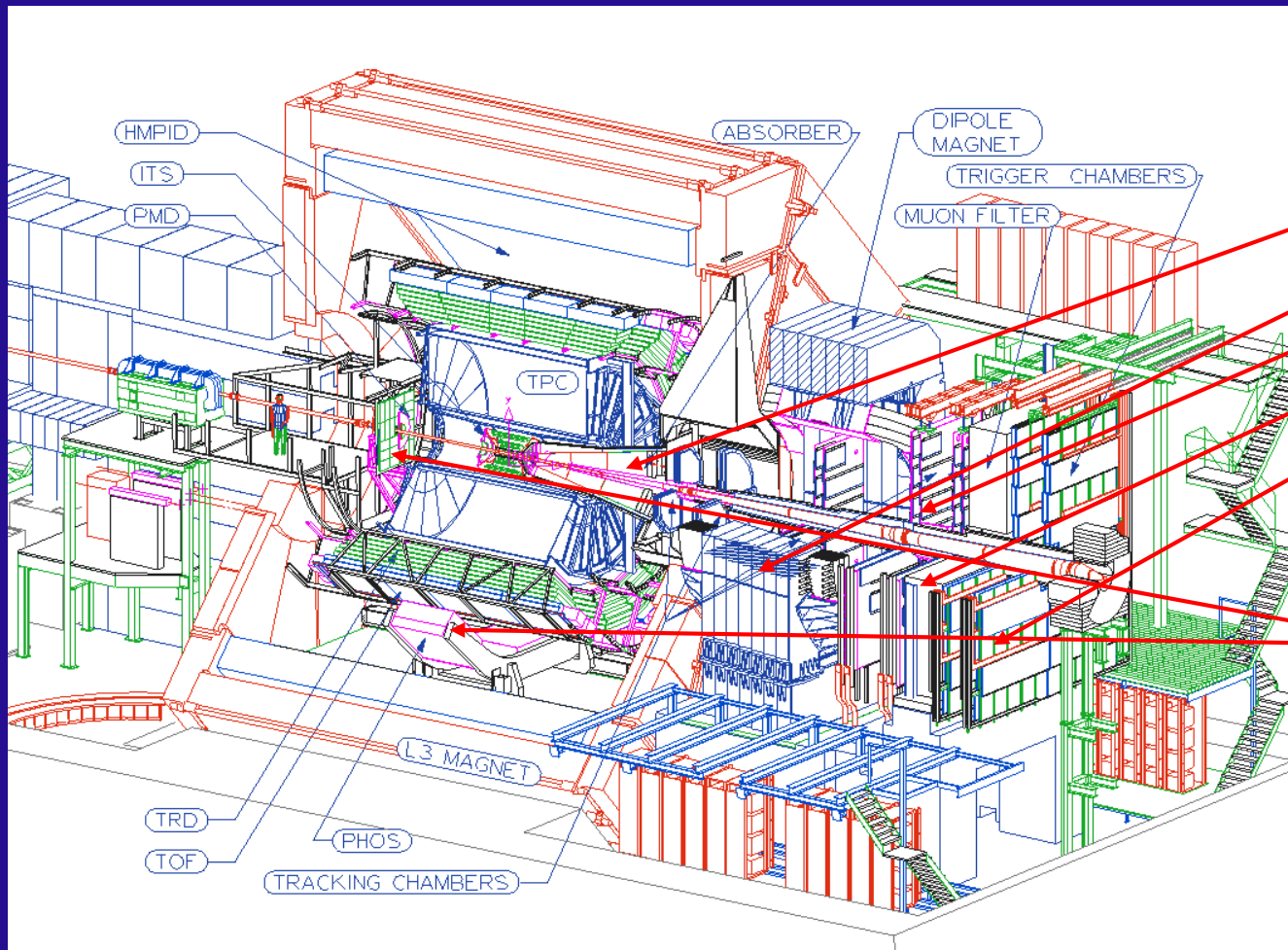


Εσωτερικός ανιχνευτής ιχνών (ITS): p , pid

Time projection chambre (TPC) : p , pid

Transition radiation detector (TRD) : e^-
Time Of Flight (TOF):
pid

... και μερικοί πιο εξειδικευμένοι ανιχνευτές



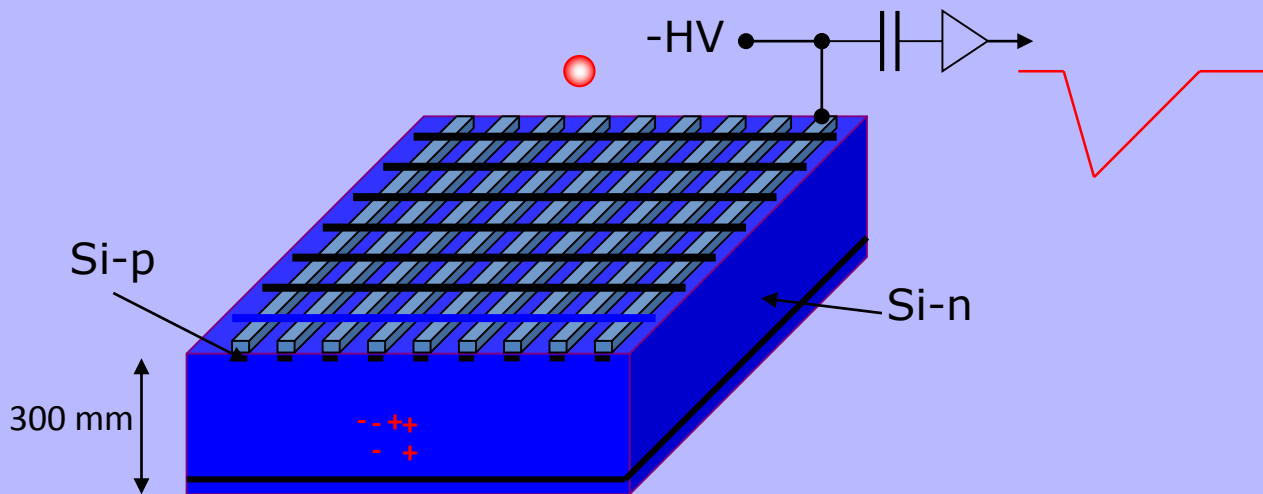
Φασματόμετρο
μιονίων :

- Απορροφητής
- Μαγνητ. δίπολο
- Ανιχν. Ιχνών μ
- Φίλτρο
- Trigger

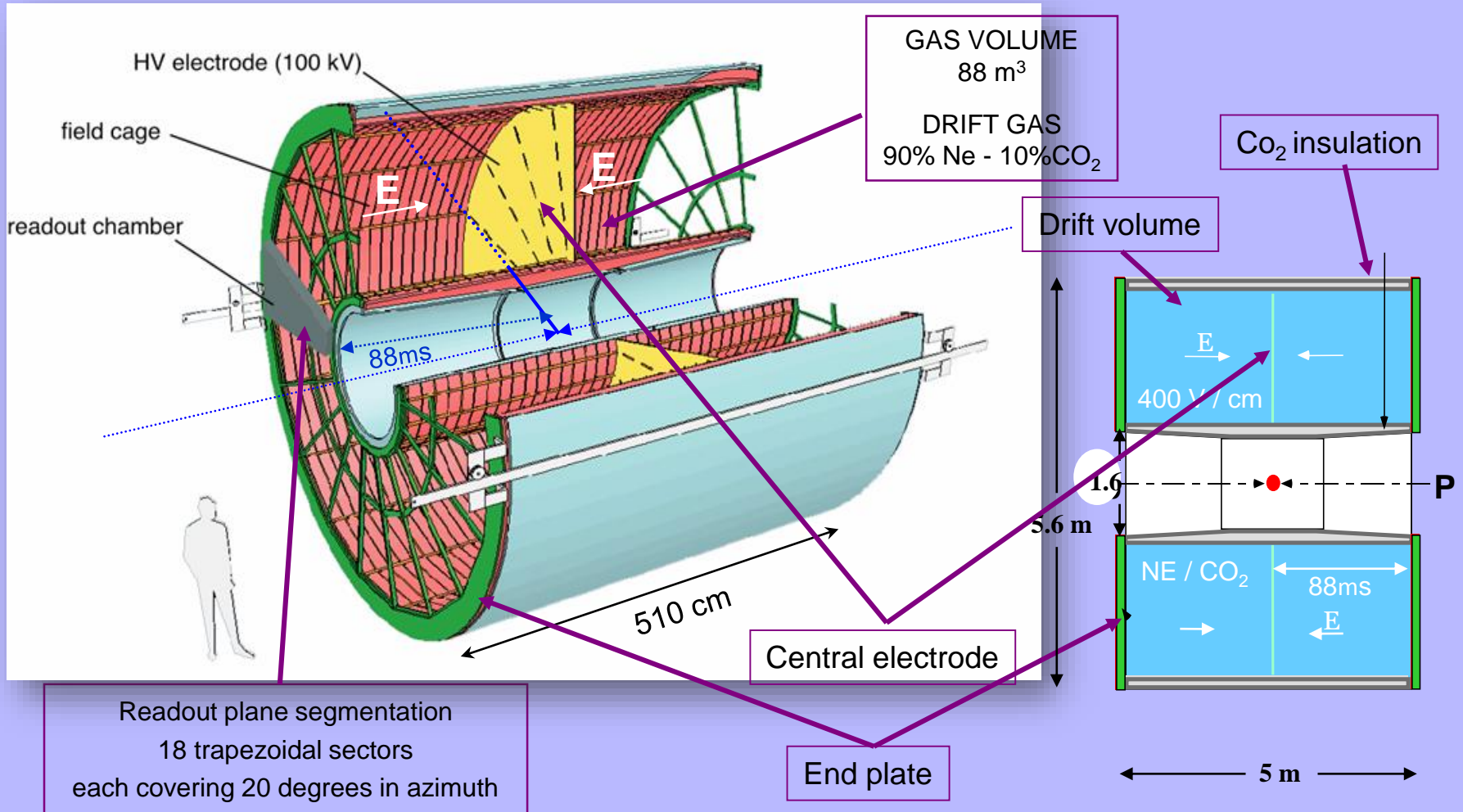
Ανιχνευτές
φωτονίων

Ανιχνευτές πυριτίου : λειτουργία

- Εσωτερικό σύστημα ανιχνευτών ιχνών: 6 στρώματα από διόδους Si που δίνουν 2D πληροφορία θέσης



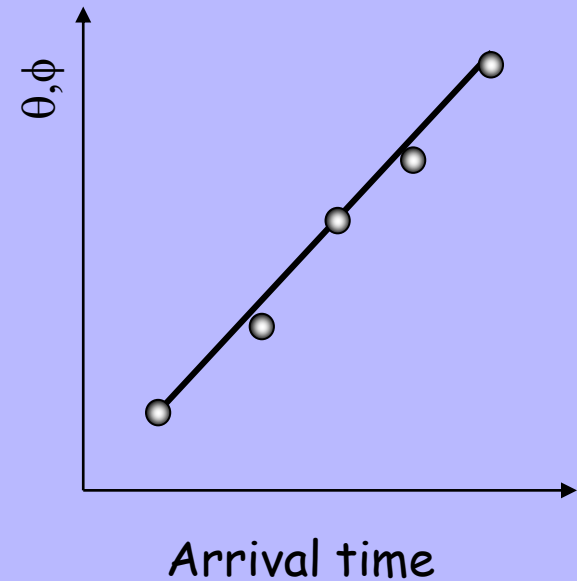
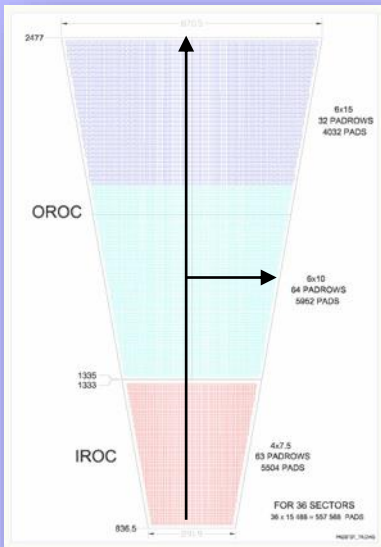
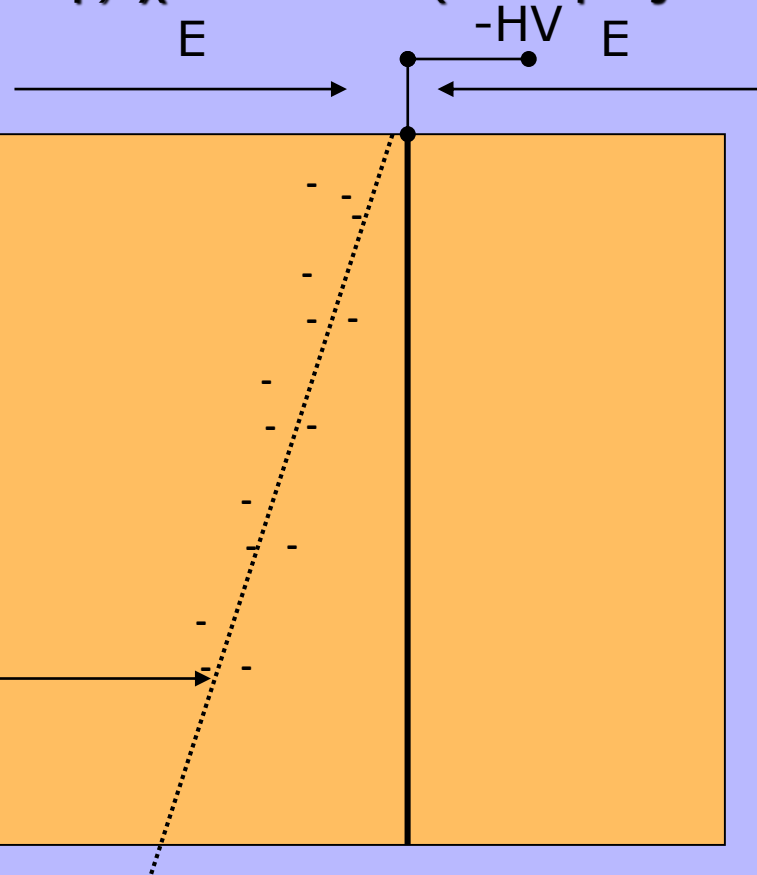
Time Projection Chamber



TPC : λειτουργία

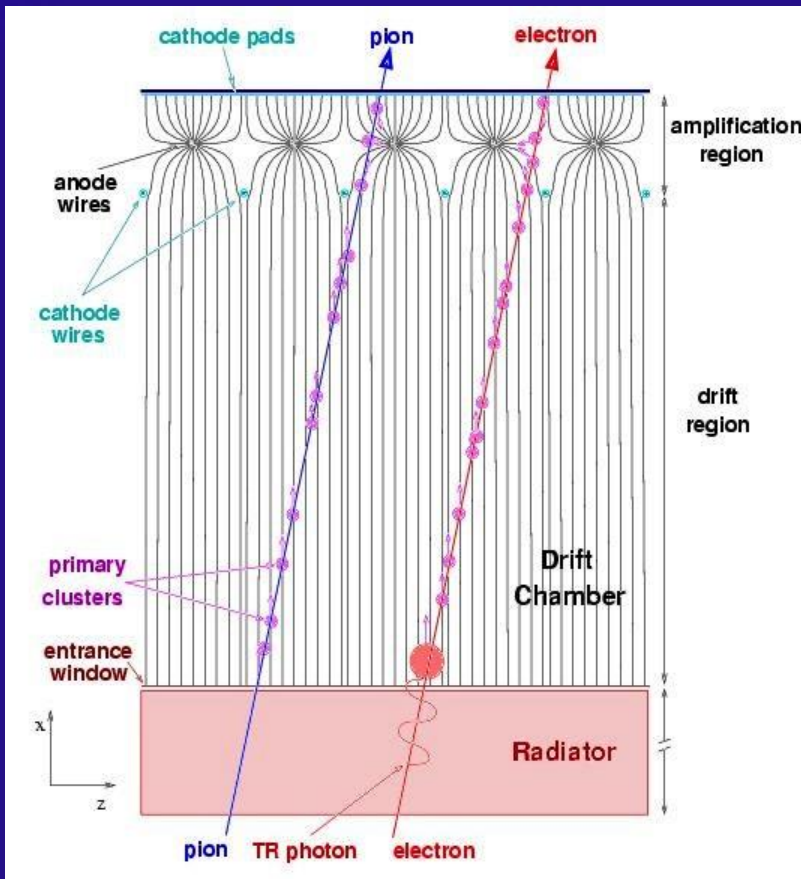


- Ο βασικός ανιχνευτής ιχνών : TPC (time projection chamber)



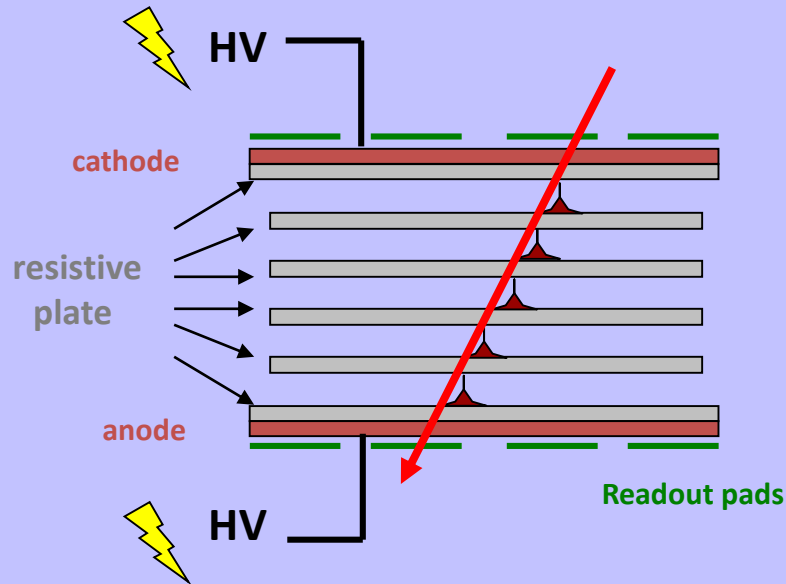
Transition Radiation Detector

- Ξεχωρίζει ηλεκτρόνια από πιόνια



- Όταν ένα σχετικιστικό σωματίο διασχίζει ένα ανομοιογενές μέσο εκπέμπεται ακτινοβολία X
- Επιλέγουμε το μέσο ώστε μόνο τα ηλεκτρόνια να εκπέμπουν ακτινοβολία μετάβασης
- Ανιχνεύουμε τόσο τα φορτισμένα σωματίια όσο και την ακτινοβολία X
- Θάλαμος πολλών συρμάτων με ένα βαρύ αέριο (Xe)

Time of Flight



Multigap Resistive Plate Chamber

Μετράει το χρόνο πτήσης (από το σημείο δημιουργίας μέχρι το σημείο ανίχνευσης) φορτισμένων σωματιδίων με ακρίβεια **70 ps**

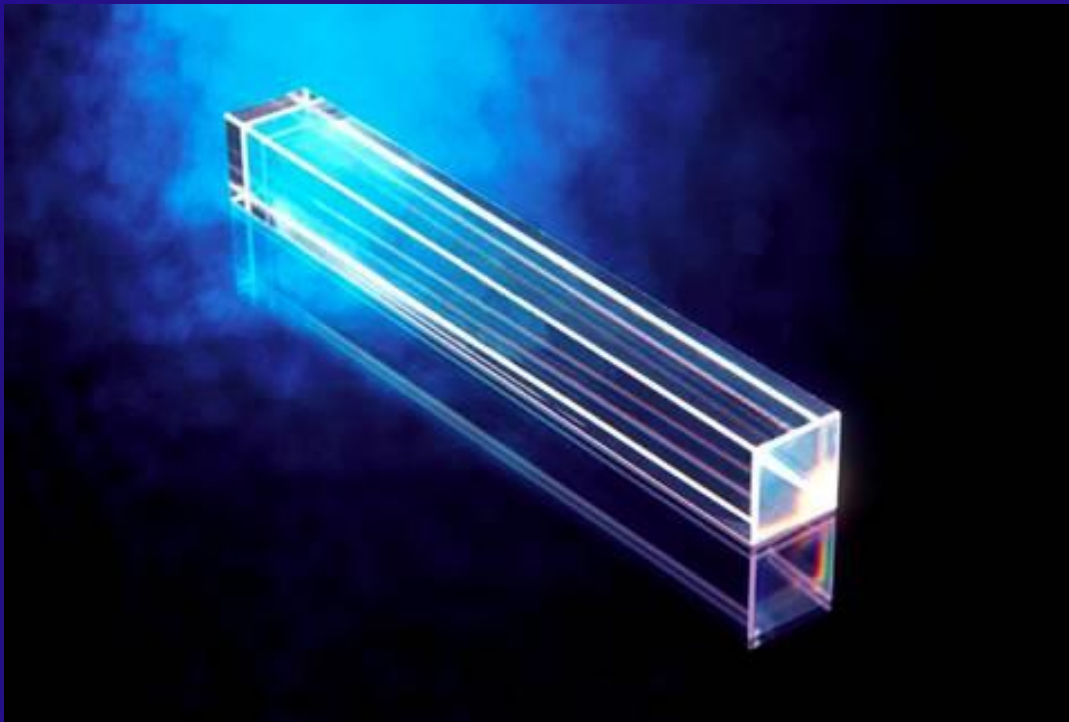
Χρόνος και μήκος διαδρομής (γνωστή από τους ανιχνευτές ιχνών) δίνουν την ταχύτητα

Απο τους ανιχνευτές ιχνών βρίσκουμε την ακτίνα καμπυλότητας της τροχιάς, άρα την ορμή

Ορμή και ταχύτητα μας δίνουν τη μάζα, άρα ταυτοποιούμε τα σωματίδια

PHOS : PHOton Spectrometer

PbWO_4 : Βαρύ σαν μολύβι και διαφανές σαν γυαλί



- Τα φωτόνια μετατρέπονται σε ζεύγη ηλεκτρονίων - ποζιτρονίων
- Τα ηλεκτρόνια διεγείρουν τα άτομα του κρυστάλλου
- Τα άτομα αποδιεγείρονται εκπέμποντας φως (φωτόνια UV)
- Τα φωτόνια UV ανιχνεύονται στη μια άκρη του κρυστάλλου από μια φωτοδίοδο, που μετατρέπει τα φωτόνια σε ηλεκτρόνια

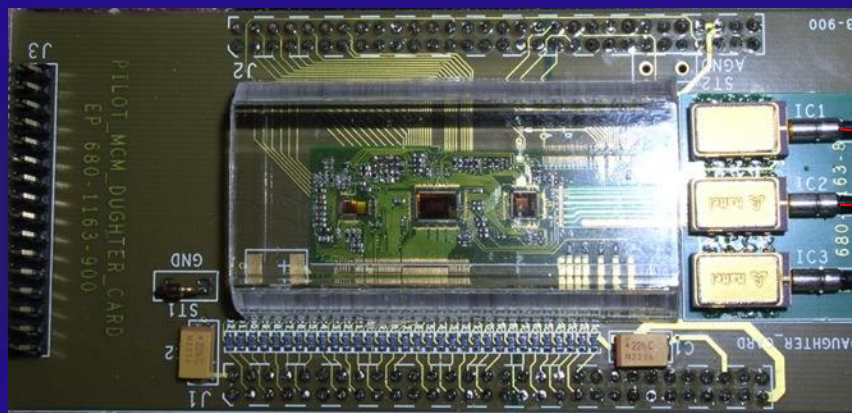
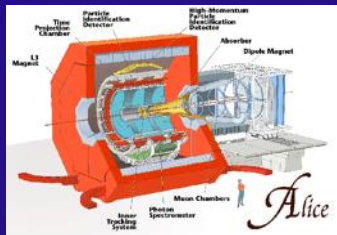


Ηλεκτρικό σήμα

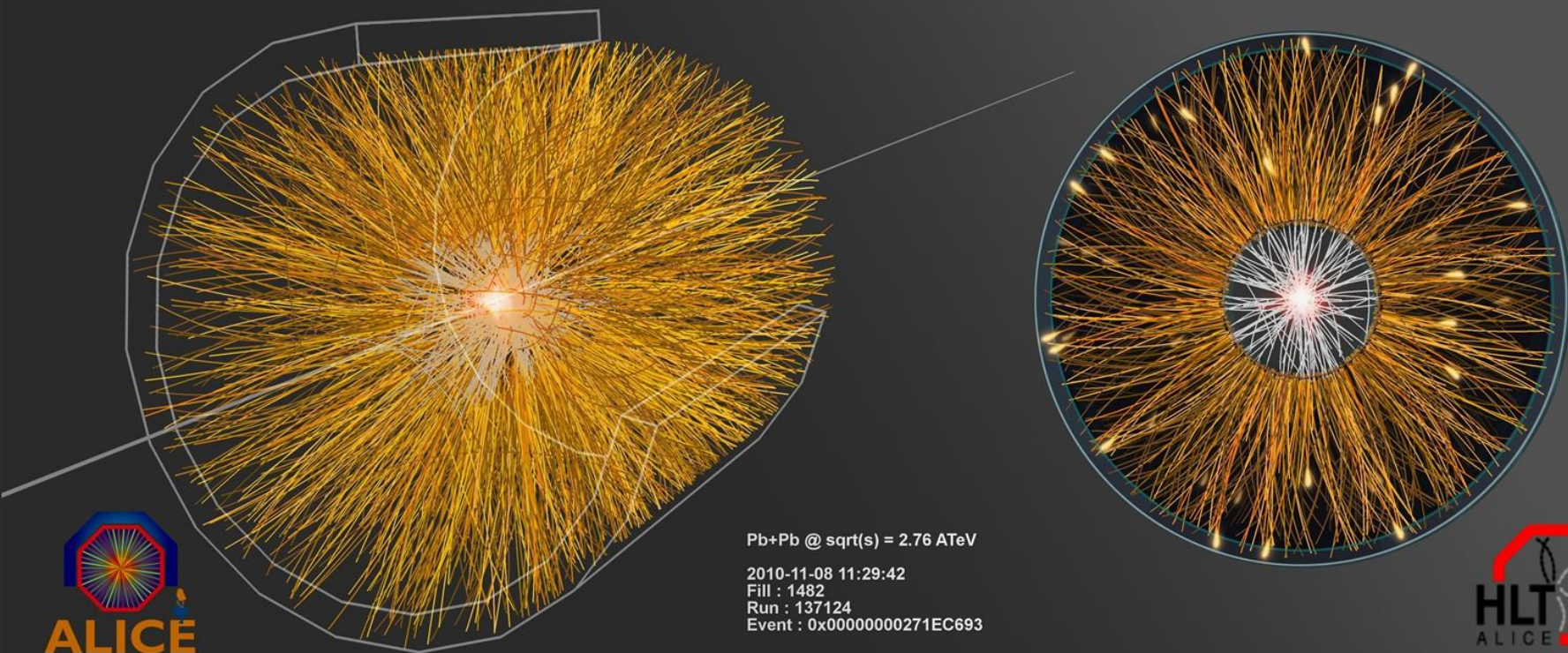
Ηλεκτρομαγνητικό καλορίμετρο

Επεξεργασία των σημάτων

- Το σήμα από κάθε ανιχνευτικό στοιχείο (~ 16 εκατομμύρια) υφίσταται πρώτα επεξεργασία από ειδικευμένα ηλεκτρονικά (front end electronics)
- Τα ηλεκτρικά σήματα ψηφιοποιούνται (readout electronics) και οι πληροφορίες διαβάζονται από υπολογιστές
- Οι πληροφορίες μεταφέρονται με οπτικές ίνες και καταγράφονται.

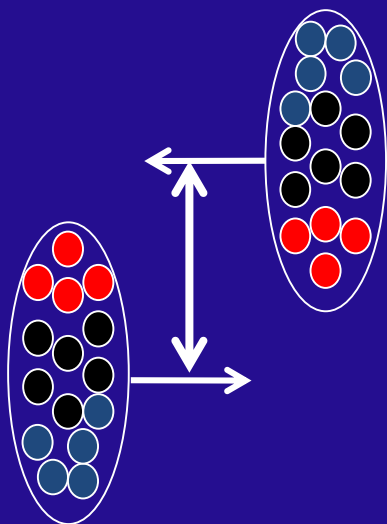


Για μια κεντρική σύγκρουση πυρήνων μολύβδου, μόνο το TPC παράγει 80 Mbyte



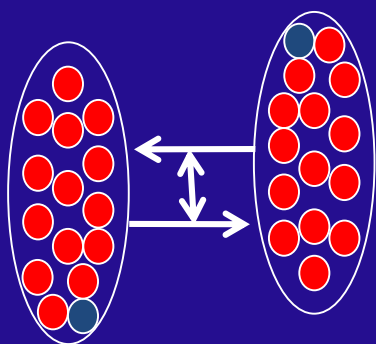
Αποθηκεύουμε δεδομένα 1,2 Gb/s (2 CD/s)
1 Pb/χρόνο (μια στοίβα από CD με 4 Km ύψος)

Γεωμετρία της σύγκρουσης Pb-Pb



Περιφερειακή σύγκρουση

- Μεγάλη απόσταση ανάμεσα στα κέντρα των πυρήνων
- Μικρός αριθμός νουκλεονίων που συμμετέχουν → παράγονται λίγα φορτισμένα σωματίια (μικρή πολλαπλότητα)

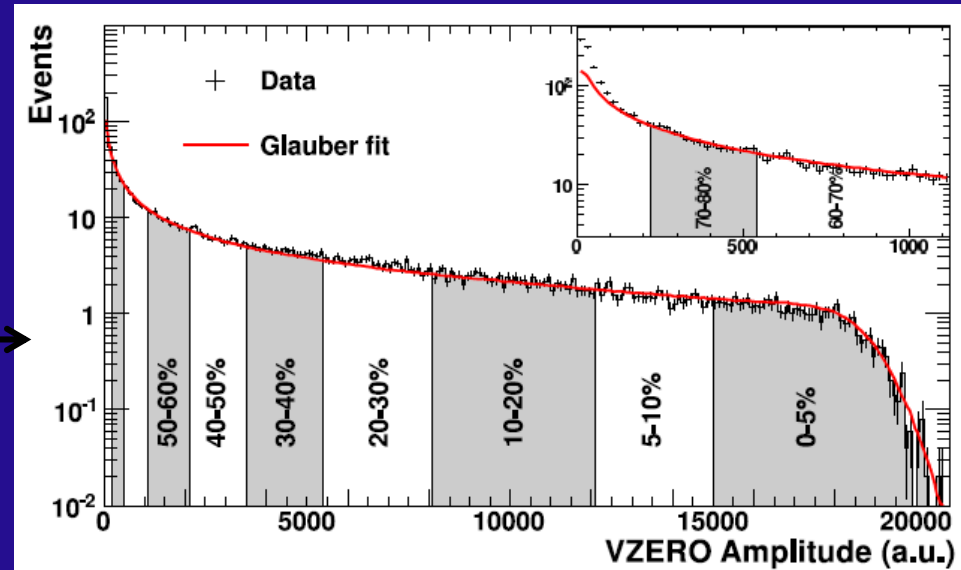


Κεντρική σύγκρουση

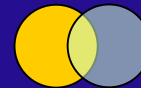
- Μικρή απόσταση ανάμεσα στα κέντρα των πυρήνων
- Μεγάλος αριθμός νουκλεονίων που συμμετέχουν → παράγονται πολλά φορτισμένα σωματίια (μεγάλη πολλαπλότητα)

Γεωμετρία της σύγκρουσης Pb-Pb

Κατανομή πλάτους σήματος σε πλαστικούς σπινθηριστές V0 περιγράφεται με ένα απλό μοντέλο (Glauber, κόκκινη γραμμή).



Centrality	$dN_{ch}/d\eta$	$\langle N_{part} \rangle$	$(dN_{ch}/d\eta)/(\langle N_{part} \rangle/2)$
0%-5%	1601 ± 60	382.8 ± 3.1	8.4 ± 0.3
5%-10%	1294 ± 49	329.7 ± 4.6	7.9 ± 0.3
10%-20%	966 ± 37	260.5 ± 4.4	7.4 ± 0.3
20%-30%	649 ± 23	186.4 ± 3.9	7.0 ± 0.3
30%-40%	426 ± 15	128.9 ± 3.3	6.6 ± 0.3
40%-50%	261 ± 9	85.0 ± 2.6	6.1 ± 0.3
50%-60%	149 ± 6	52.8 ± 2.0	5.7 ± 0.3
60%-70%	76 ± 4	30.0 ± 1.3	5.1 ± 0.3
70%-80%	35 ± 2	15.8 ± 0.6	4.4 ± 0.4

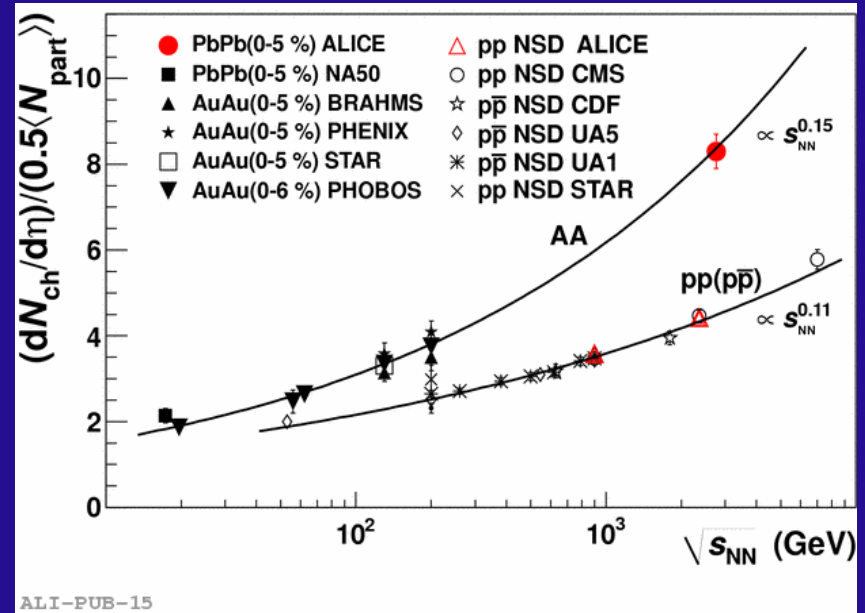
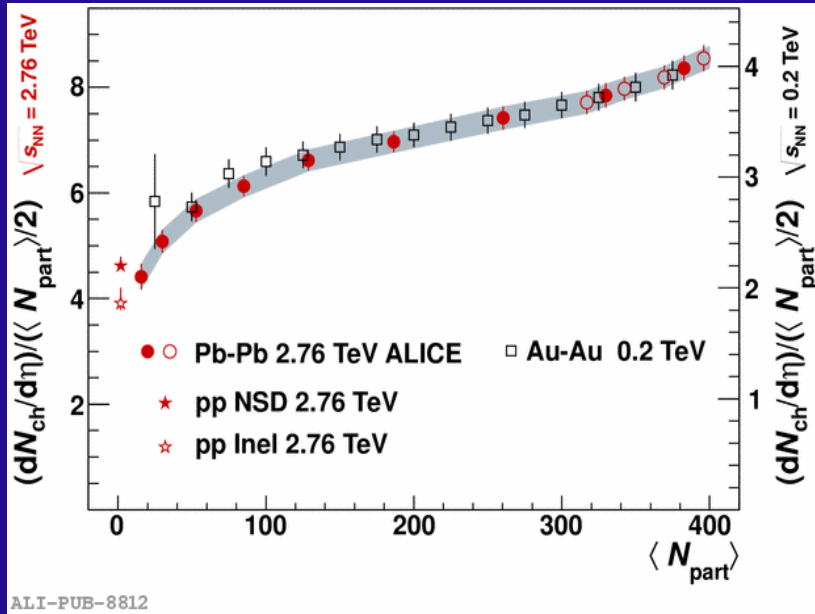


ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΕΣ



ΚΕΝΤΡΙΚΕΣ

Ενεργειακή πυκνότητα



$$dN_{ch}/d\eta = 1584 \pm 4 (stat.) \pm 76 (syst.)$$

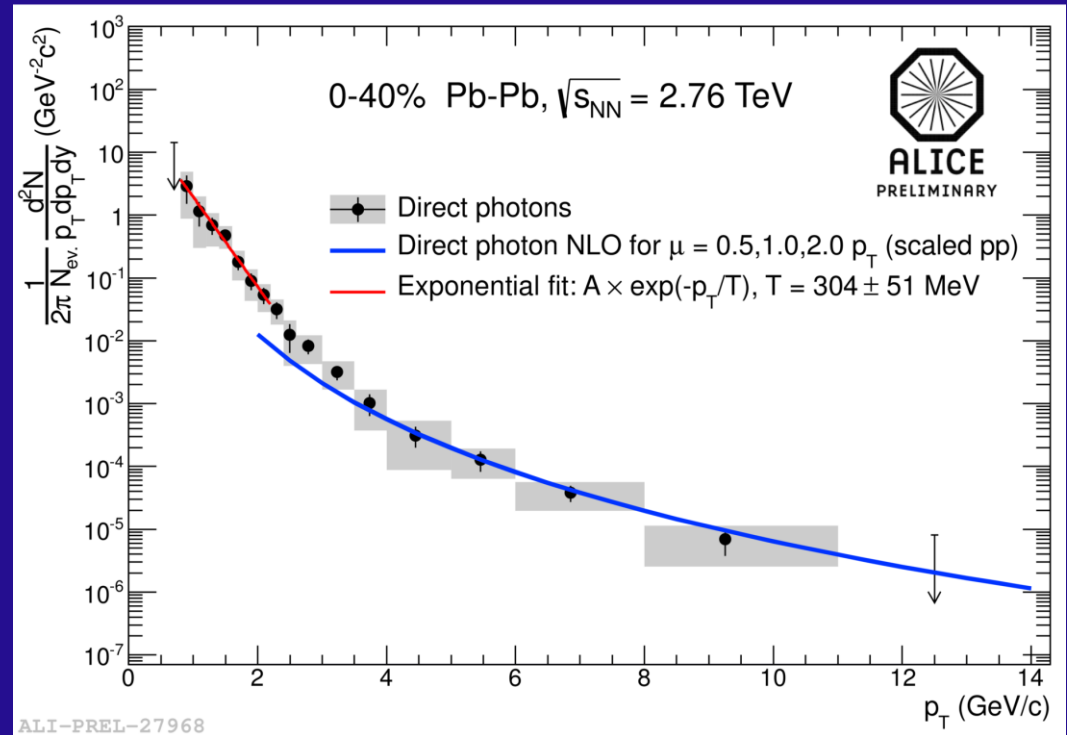
Από τον αριθμό των φορτισμένων σωματιδίων βρίσκουμε την πυκνότητα ενέργειας 3 φορές μεγαλύτερη από ότι στο RHIC. $15 \text{ GeV} / \text{fm}^3$ και την αρχική θερμοκρασία του συστήματος 30% υψηλότερη από ότι στο RHIC

N_{part} : αριθμός νουκλεονίων που συμμετέχουν στην αλληλεπίδραση

Η υψηλότερη θερμοκρασία που δημιούργησε ο άνθρωπος

Θερμικά φωτόνια, που εκπέμπονται από το πλάσμα κουάρκ και γκλουονίων, δίνουν πληροφορία για την αρχική θερμοκρασία του συστήματος.

Από την αντίστροφη κλίση της κατανομής αυτών των φωτονίων βρίσκουμε ότι η θερμοκρασία του συστήματος που δημιουργείται από τις συγκρούσεις ιόντων μολύβδου είναι μερικά τρισεκατομύρια βαθμοί Kelvin.



250 000 φορές υψηλότερη από τη θερμοκρασία στο κέντρο του ήλιου

Ένα τέλειο υγρό στο LHC

Το μέγεθος της ελλειπτικής ροής εξαρτάται από την τριβή στο μέσο και χαρακτηρίζεται από το λόγο η/s , όπου η το ιξώδες και s η εντροπία.

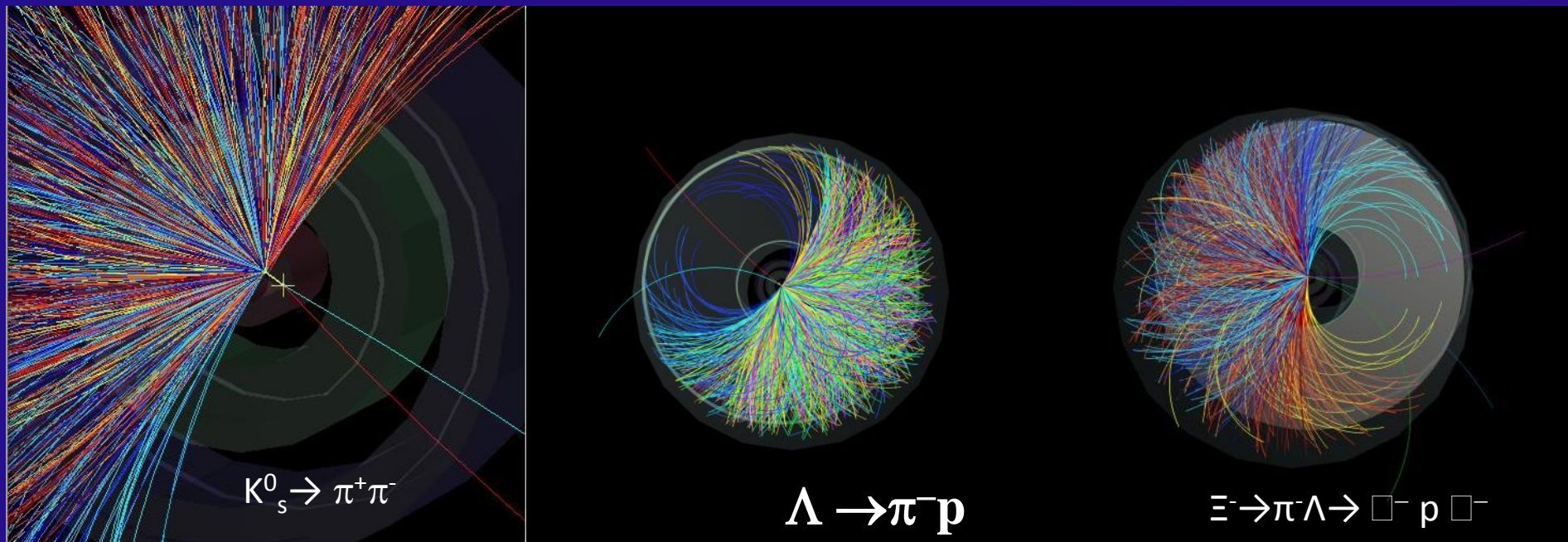
Η πυκνή ύλη που δημιουργείται από τη σύγκρουση ρέει σχεδόν χωρίς τριβή (όπως το νερό, που έχει μικρό ιξώδες) και όχι όπως το μέλι που έχει μεγάλο ιξώδες.

Η ύλη που σχηματίζεται από τις συγκρούσεις βαριών ιόντων αναμενόταν αρχικά να συμπεριφέρεται σαν αέριο πλάσμα. Αντί γι' αυτό, φαίνεται να συμπεριφέρεται σαν τέλειο υγρό, με συντονισμένη συλλογική κίνηση (ροή) των σωματιδίων που το συνιστούν.

Ηδη είχε ανακοινωθεί από τα πειράματα στο RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) στο Brookhaven (USA), όπου συγκρούονται πυρήνες χρυσού με ενέργεια 13 φορές μικρότερη

Ένα από τα πιο θεαματικά αποτελέσματα από τα πειράματα βαριών ιόντων

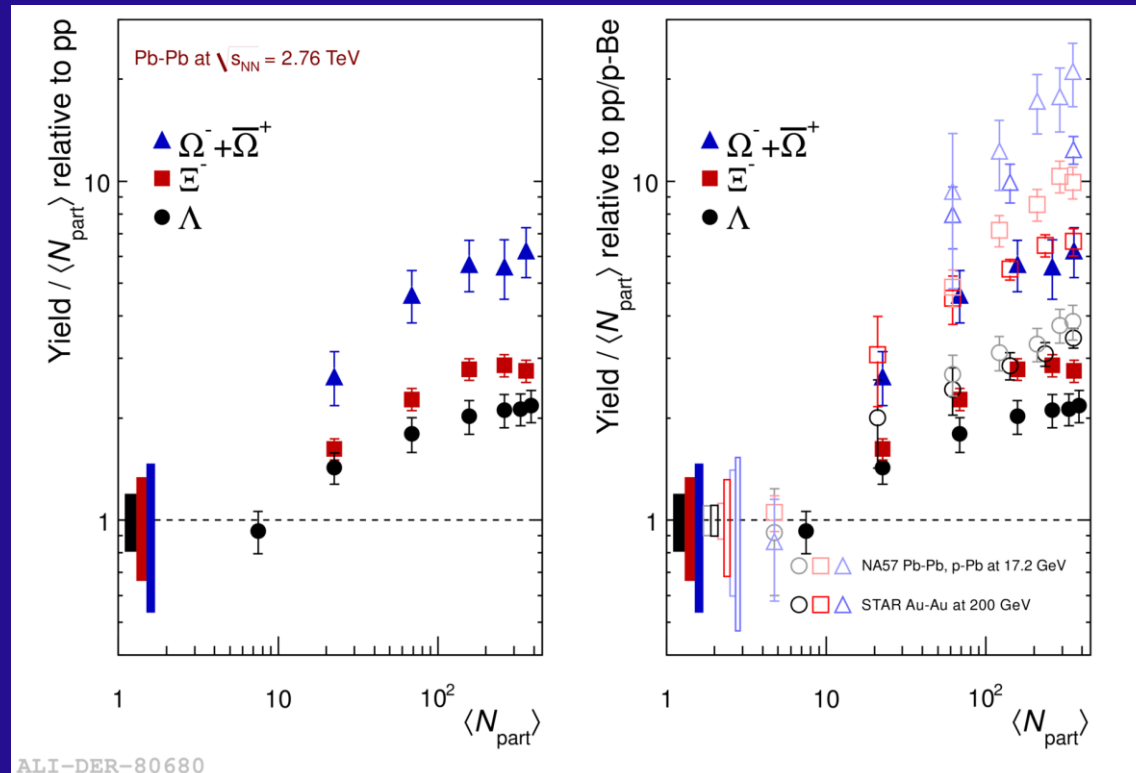
Ενίσχυση της παραδοξότητας (Strangeness enhancement)



V0 and cascade decays of strange hadrons

Ενίσχυση της παραδοξότητας (Strangeness enhancement)

Ενα από τα πρώτα σήματα για το πλάσμα κουάρκ και γλουονίων



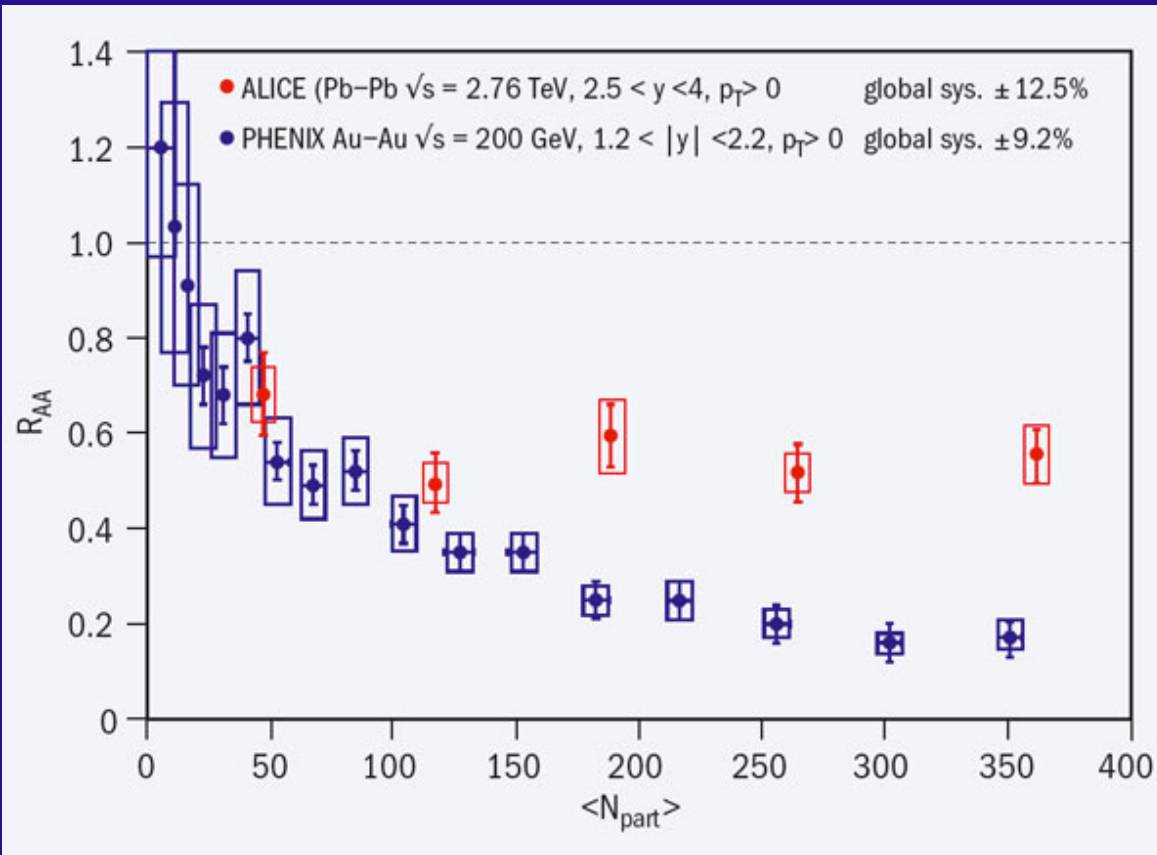
Αριθμος των σωματιδίων ενός τύπου ανά αλληλεπίδραση PbPb/ $\langle N_{part} \rangle$

Αριθμος των σωματιδίων του ίδιου τύπου ανά αλληλεπίδραση pp/2

Το μυστήριο του J/Ψ

- **J/Ψ** Βρέθηκε το 1974, σχεδόν συγχρόνως, στο Brookhaven (συγκρούσεις πρωτονίων-πυρήνων) και στο SLAC (συγκρούσεις e^+e^-)
- δέσμια κατάσταση ενός c κουάρκ και ενός \bar{c} (αντι) κουάρκ (μάζα 3 GeV)
- Τα δύο «αντικείμενα» που αποτελούν το J/Ψ συνδέονται λόγω της ισχυρής αλληλεπίδρασης
- Μέσα στο πλάσμα κουάρκ και γλουονίων (QGP), λόγω του μεγάλου αριθμού ελεύθερων φορτίων χρώματος που αποτελούν το QGP, η σύνδεση των c κουάρκ και \bar{c} (αντι) κουάρκ γίνεται ασθενέστερη, το ζευγάρι αποσυντίθεται και το J/Ψ εξαφανίζεται (Debye screening)
- Παρατηρείται ελάττωση του σήματος από το J/Ψ
(τα προϊόντα από τις διασπάσεις του, κυρίως J/Ψ \rightarrow μμ και J/Ψ \rightarrow e^+e^-)
- Το πόσο ελαττώνεται το σήμα έχει να κάνει με τη θερμοκρασία του QGP

Το μυστήριο του J/Ψ

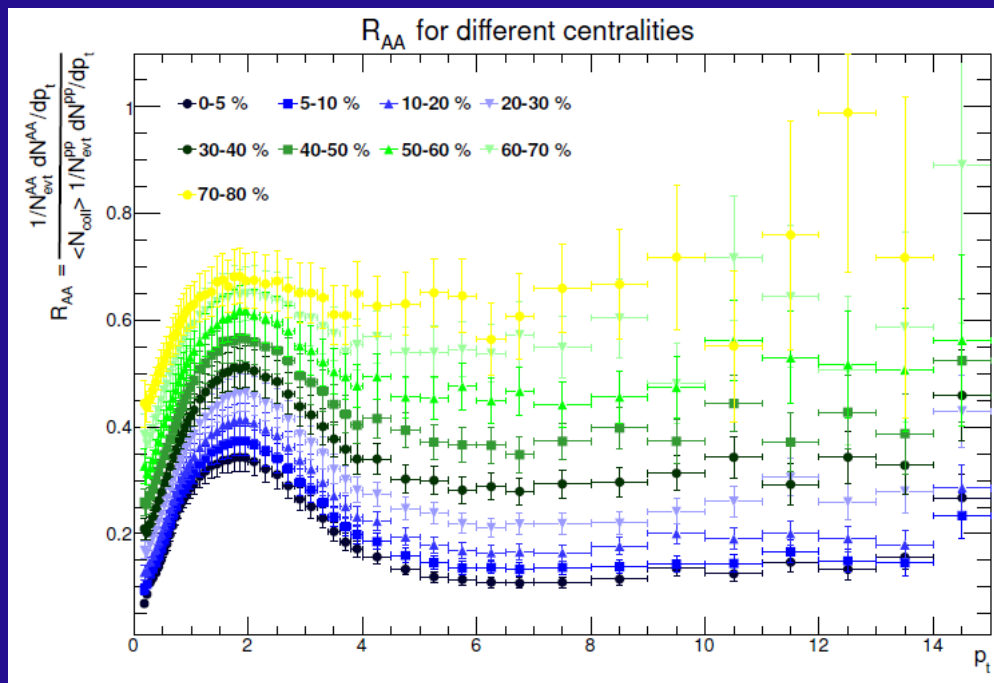


- Σε πολύ κεντρικές συγκρούσεις έχουμε αναγέννηση του J/Ψ
- Δύο φαινόμενα που συναγωνίζονται
- Ελάττωση του J/Ψ λόγω αλληλεπίδρασης με το QGP
- Δημιουργία πολλών J/Ψ λόγω του μεγάλου αριθμού ζευγαριών c – αντι-c που δημιουργούνται λόγω της τεράστιας ενέργειας της σύγκρουσης

R_{AA} Nuclear modification factor

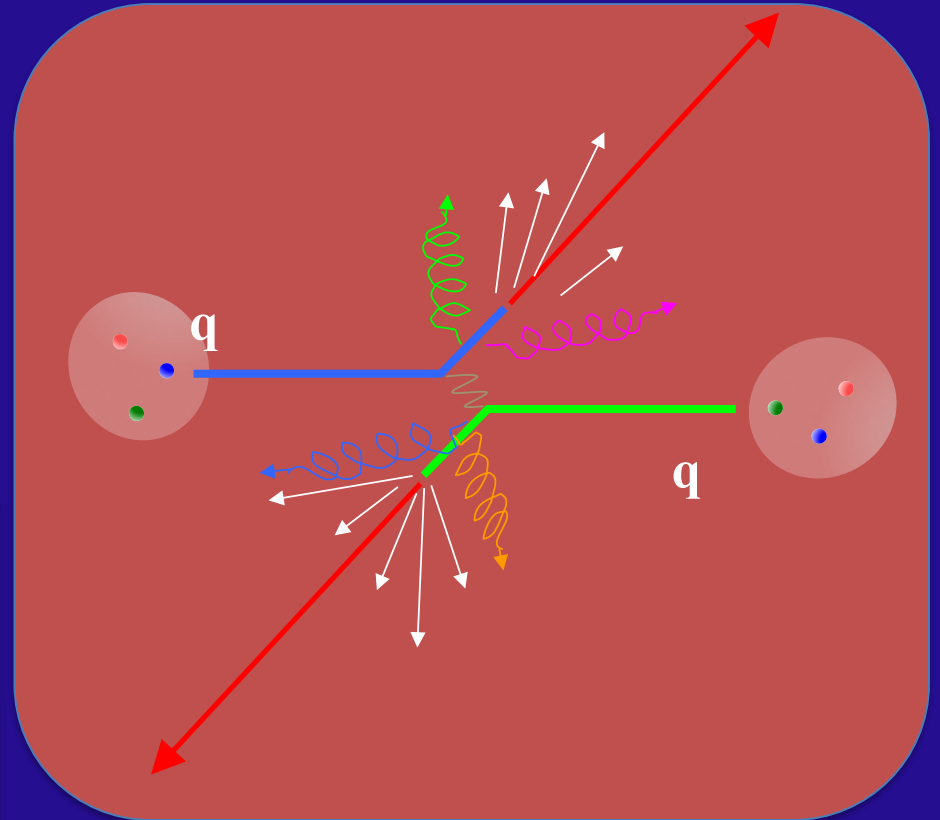
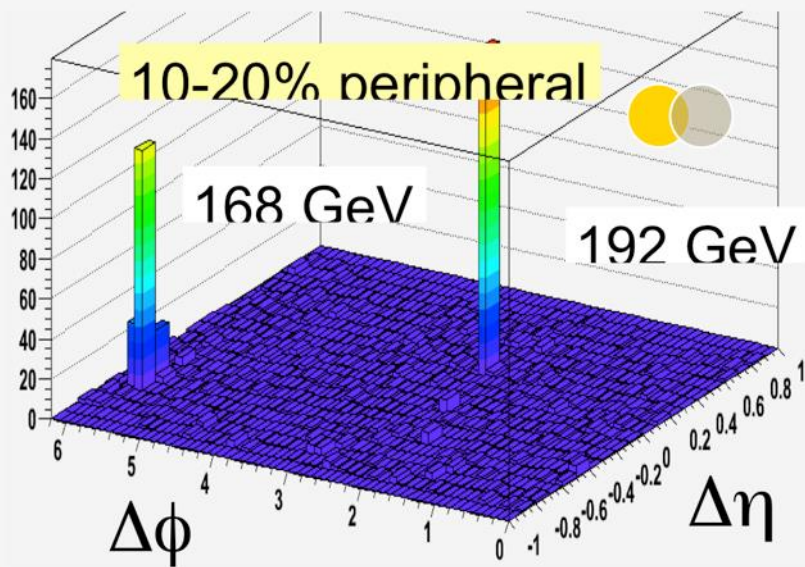
Συγκρίνουμε τον αριθμό των J/Ψ που παρατηρούμε σε συγκρούσεις μολύβδου με τον αντίστοιχο αριθμό σε συγκρούσεις πρωτονίων (όπου δεν έχουμε QGP).

R_{AA} – Nuclear Modification Factor



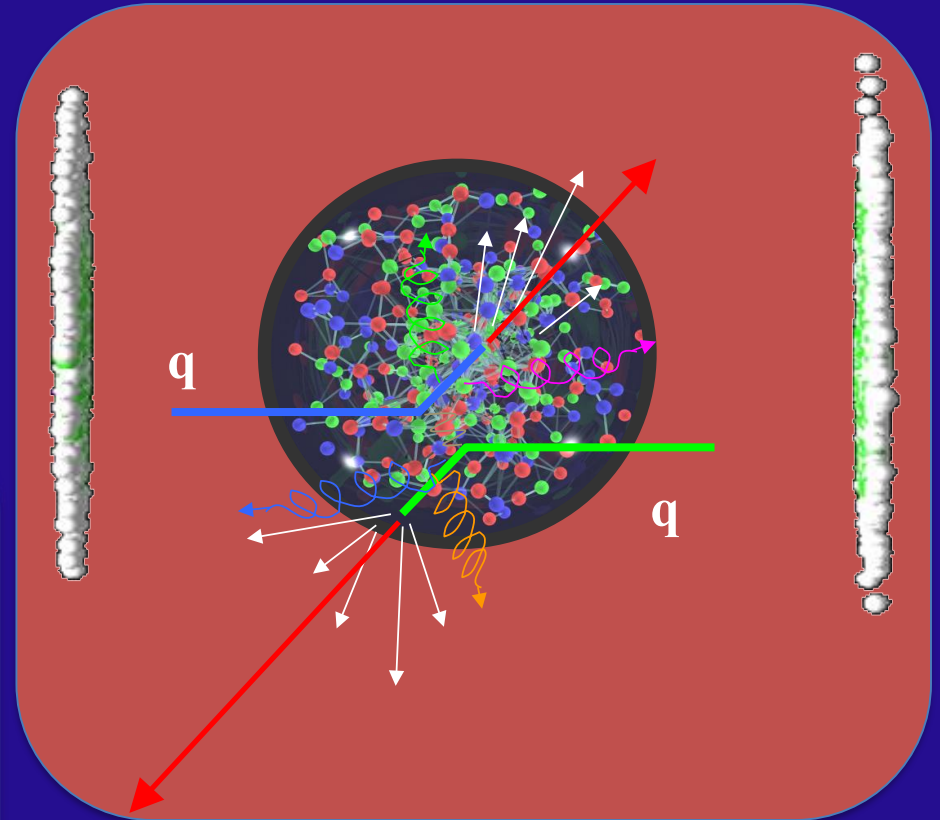
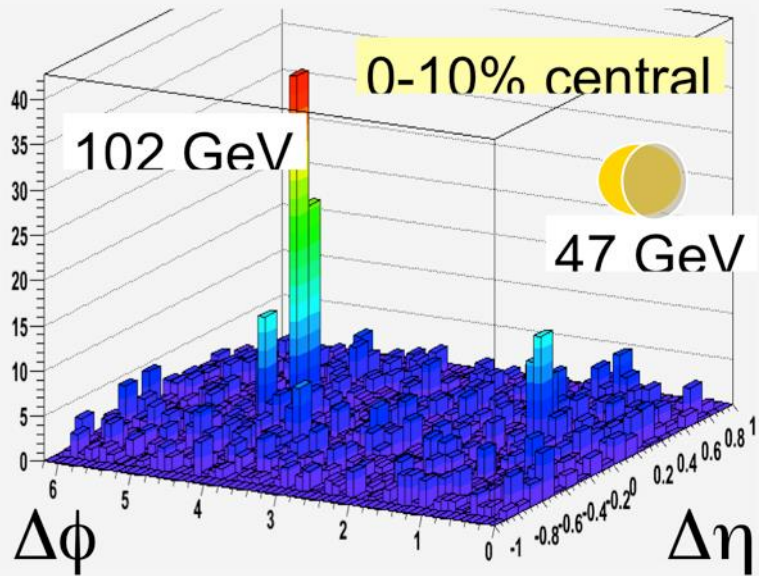
- Pb-Pb collision \neq many independent pp collisions
- \rightarrow comparison of unidentified charged particle momentum spectra in pp and Pb-Pb in different collision centralities

Πίδακες αδρονίων



Απόπνιξη των πιδάκων μέσα στο QGP

Ο πίδακας που παράγεται κοντά στην επιφάνεια από το QGP έχει μεγάλη ενέργεια ενώ εκείνος που διασχίζει το QGP απορροφιάται και σκεδάζεται από το πυκνό μέσο χάνοντας μεγάλο μέρος της ενέργειάς του



Αντί συμπεράσματος

- Οι συγκρούσεις βαριών ιόντων ήδη τα πρώτα χρόνια λειτουργίας του LHC επιβεβαίωσαν τα αποτελέσματα 10 χρόνων έρευνας στο RHIC.
- Η αυξημένη ενέργεια και αυξημένη φωτεινότητα των δεσμών του LHC από το 2015 και μετά δίνουν πολλά ενδιαφέροντα αποτελέσματα σχετικά με την συμπεριφορά και τις ιδιότητες της πρωταρχικής ύλης του σύμπαντος

Σας ευχαριστώ πολύ