

Εισαγωγή στη φυσική βαρέων ιόντων και το πείραμα ALICE

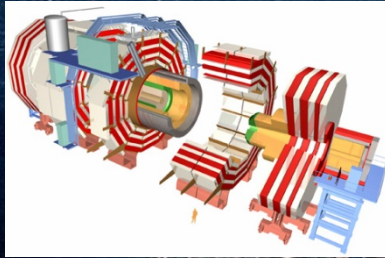
Δέσποινα Χατζηφωτιάδου
INFN Bologna και CERN

GREEK TEACHER PROGRAMME 2022
29 Αυγούστου 2022

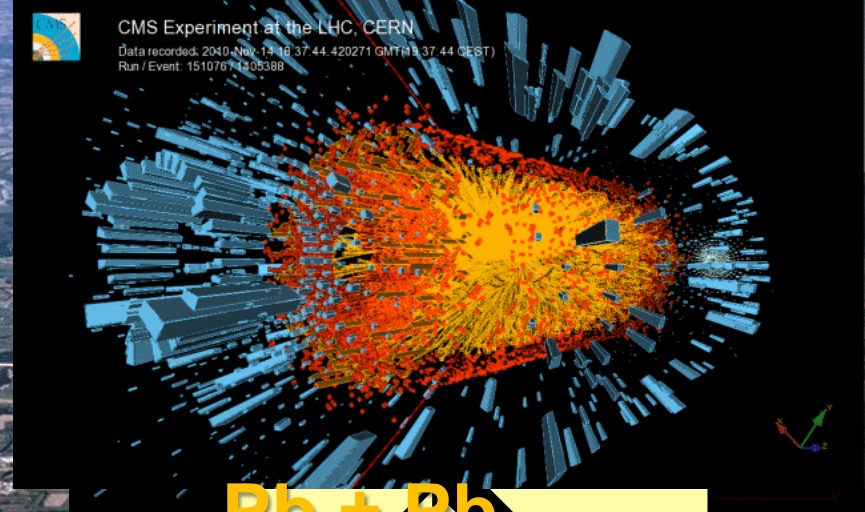
Collider of 'Large Hadrons'



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



CMS

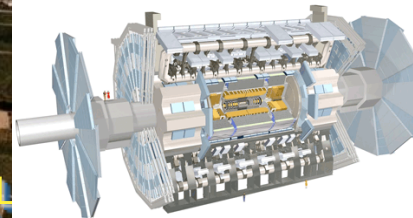
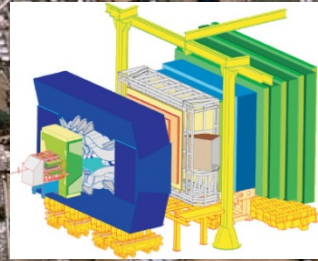


Pb + Pb

LHCb

ALICE

ATLAS

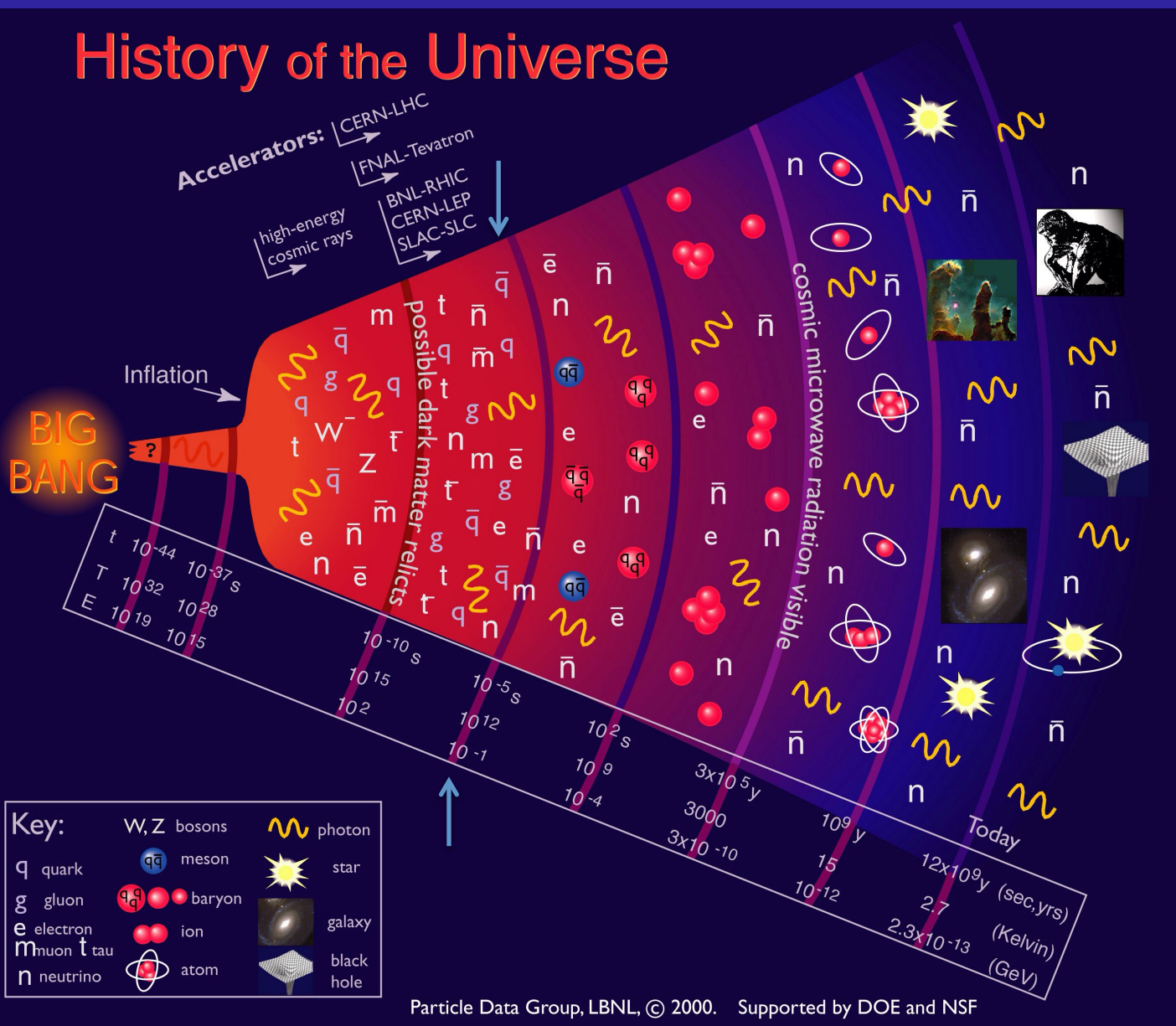


all participate in HI program (L)

Γιατί βαριά ιόντα;

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

History of the Universe



Αστρονομικές παρατηρήσεις : 380 000 χρόνια μετά το Big Bang (CMBR, Cosmic Microwave Background)

Επιταχυντές(LHC): Εκατομμυριοστά του δευτερολέπτου μετά το Big Bang

Quark Gluon Plasma

13.7 δισεκατομμύρια χρόνια

σήμερα

Mini Big Bang

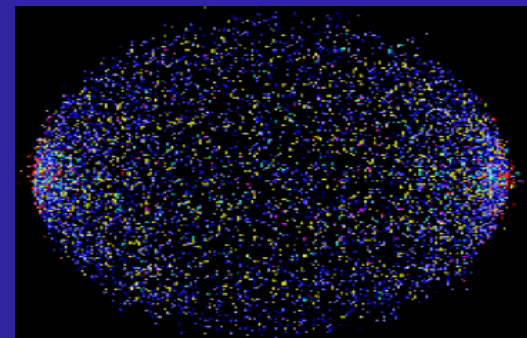
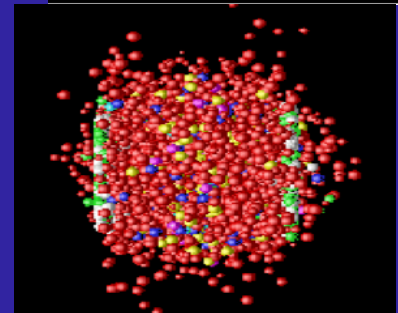
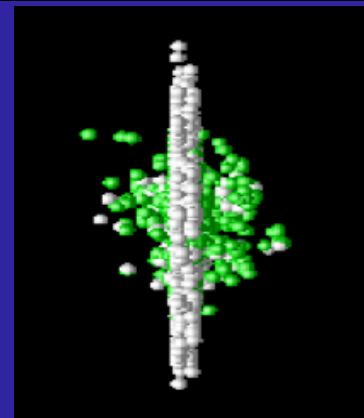
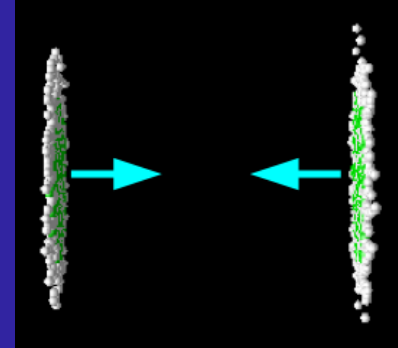
Συγκρούοντας πυρήνες μολύβδου με πολύ υψηλή ενέργεια αναδημιουργούμε τις συνθήκες πυκνότητας και θερμοκρασίας που υπήρχαν κλάσματα του δευτερολέπτου μετά το Big Bang

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

που ζει ελάχιστα

Μελετώντας τις ιδιότητές της

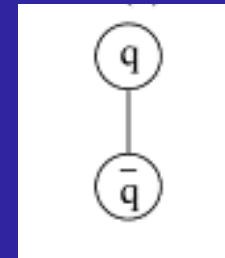
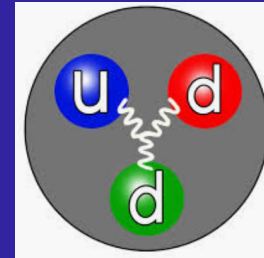
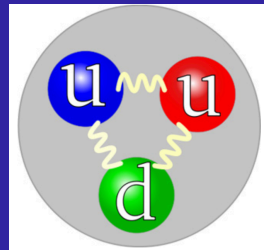
- Θα κατανοήσουμε καλύτερα τις διαδικασίες που συνέβησαν τα πρώτα κλάσματα του δευτερολέπτου στη ζωή του σύμπαντος
- Θα κατανοήσουμε καλύτερα την ισχυρή αλληλεπίδραση



Ισχυρή αλληλεπίδραση : εγκλωβισμός των κουάρκ Τα κουάρκ δεν μπορούν να υπάρξουν ελεύθερα

	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	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$	104 MeV $-\frac{1}{3}$	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$	0
	d down	s strange	b bottom	g gluon
	<2.2 eV 0	<0.17 MeV 0	<15.5 MeV 0	91.2 GeV 0
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z ⁰ weak force
Leptons	0.511 MeV -1	105.7 MeV -1	1.777 GeV -1	80.4 GeV ±1
	e electron	μ muon	τ tau	W [±] weak force
				Bosons (Forces)

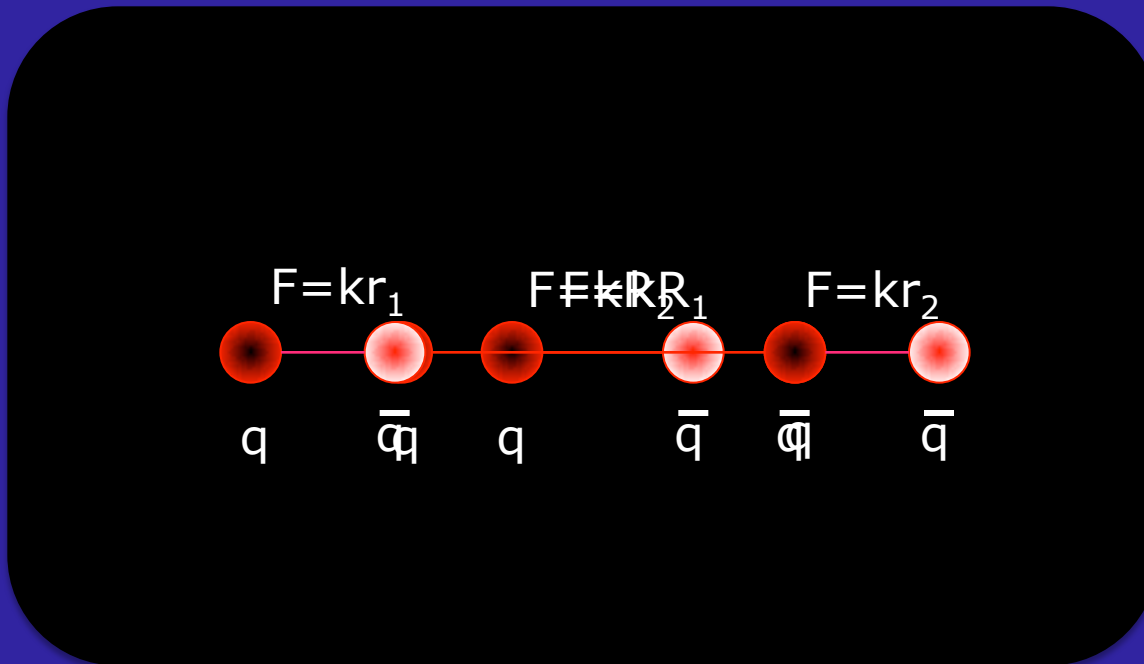
- Τα κουάρκ έχουν ένα φορτίο χρώματος (R,B,G) που έχει εισαχθεί για να εξηγήσει την σύνθεση
 - των βαρυονίων (3 κουάρκ ή αντικουάρκ)
 - και των μεσονίων (ζεύγος κουάρκ - αντικουάρκ) αντικείμενα χωρίς χρώμα



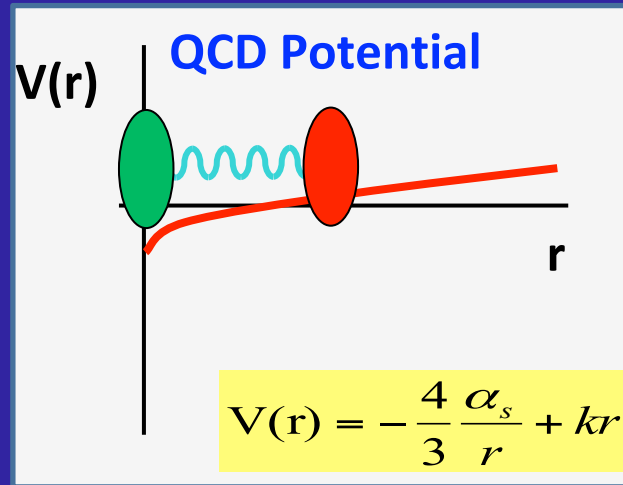
- Η αλληλεπίδραση μεταξύ κουάρκ γίνεται με την ανταλλαγή γλουονίων ($m_g=0$) που είναι φορείς ενός φορτίου χρώματος και ενός φορτίου αντι-χρώματος
- Η ισχυρή αλληλεπίδραση είναι ισχυρή σε μεγάλη απόσταση και ασθενής σε μικρή απόσταση

Quark Confinement

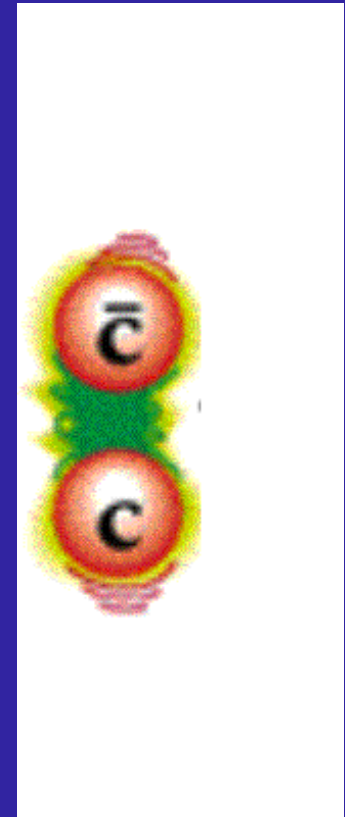
Ας προσπαθήσουμε να διαχωρήσουμε τα δύο κουάρκ ενός μεσονίου



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

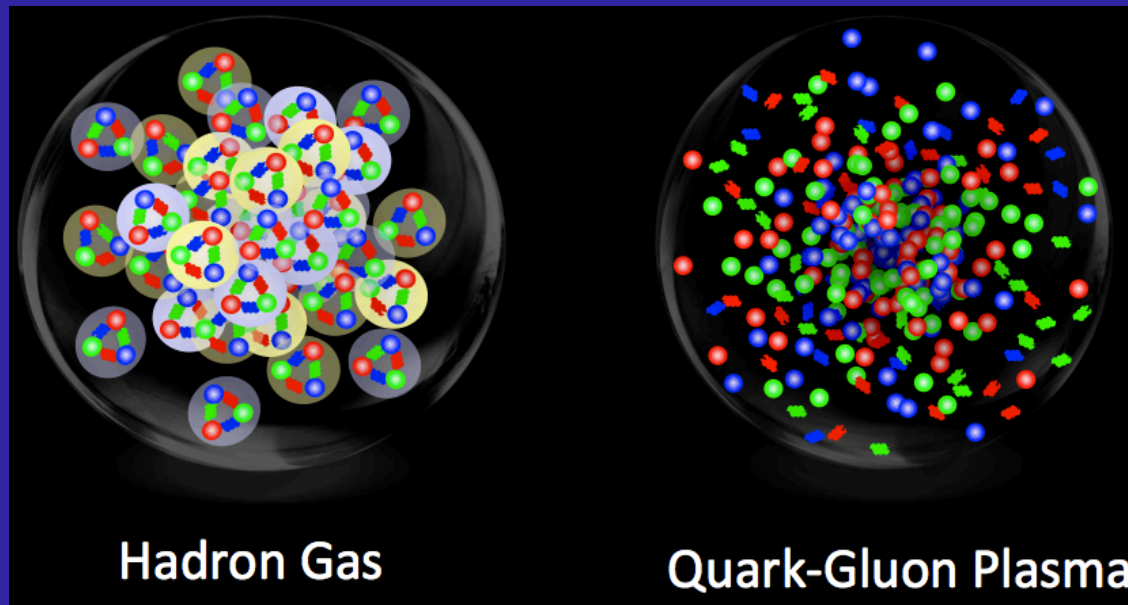


- Όταν το r αυξάνεται, το πεδίο του χρώματος φαίνεται σαν σωλήνας που συνδέει τα κουάρκ
- Σε μεγάλες αποστάσεις, βολεύει ενεργειακά να **μετατραπεί η (αυξανόμενη) ενέργεια** που έχει αποθηκευτεί στο σωλήνα χρώματος σ'ένα καινούριο ζευγάρι κουάρκ-αντικουάρκ



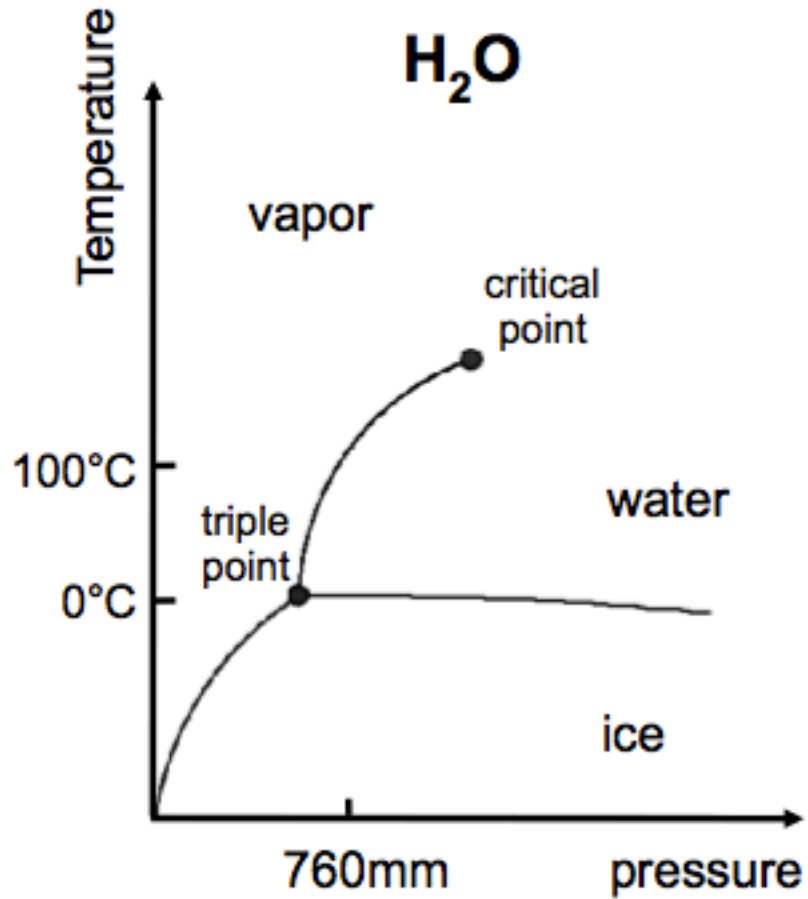
... deconfinement : Quark Gluon Plasma

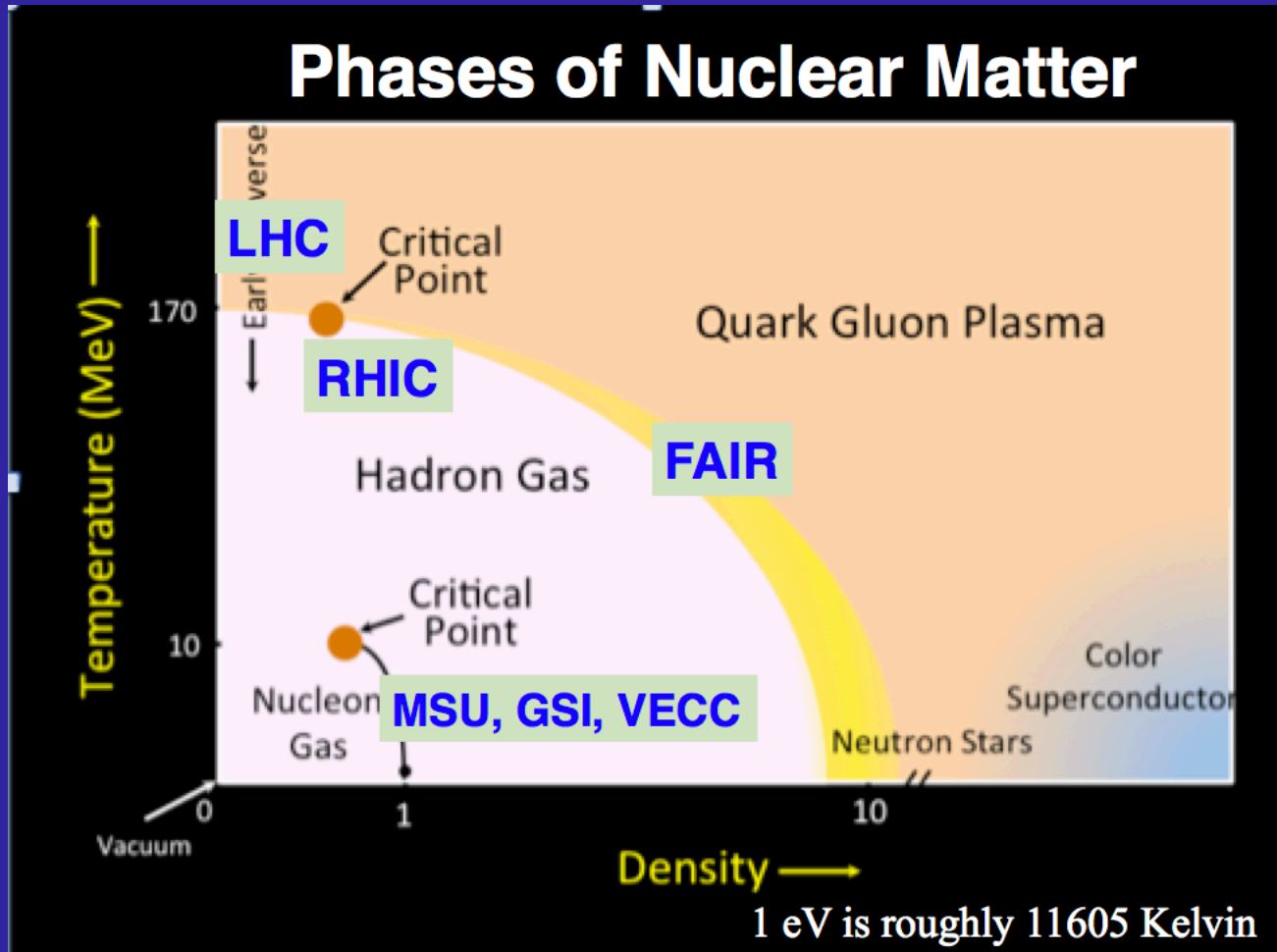
Εφόσον οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ κουάρκ και γλουονίων γίνονται ασθενέστερες στις μικρές αποστάσεις, δημιουργώντας ένα σχετικά εκτεταμένο σύστημα με υψηλή πυκνότητα/θερμοκρασία που αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό κουάρκ και γλουονίων, δημιουργούμε μια “deconfined” κατάσταση της ύλης (ελεύθερα κουάρκ και γλουόνια)



Θερμαίνοντας σε πολύ υψηλή θερμοκρασία (αύξηση της κινητικής ενέργειας των κουάρκ) και συμπιέζοντας (αύξηση της βαρυονικής πυκνότητας) το «αέριο αδρονίων», γίνεται αλλαγή φάσης : Quark Gluon Plasma

Reminder: Phase diagram



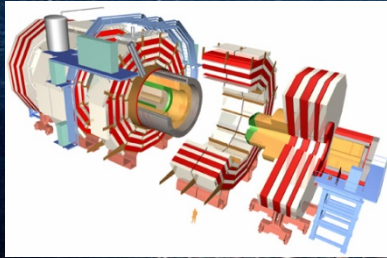


- Πώς μπορούμε να “εξερευνήσουμε” αυτό το διάγραμμα φάσης;
- Δημιουργώντας εκτεταμένα συστήματα κουάρκ και γλουονίων σε υψηλή θερμοκρασία και/ή βαρυονική πυκνότητα → με συγκρούσεις βαριών ιόντων

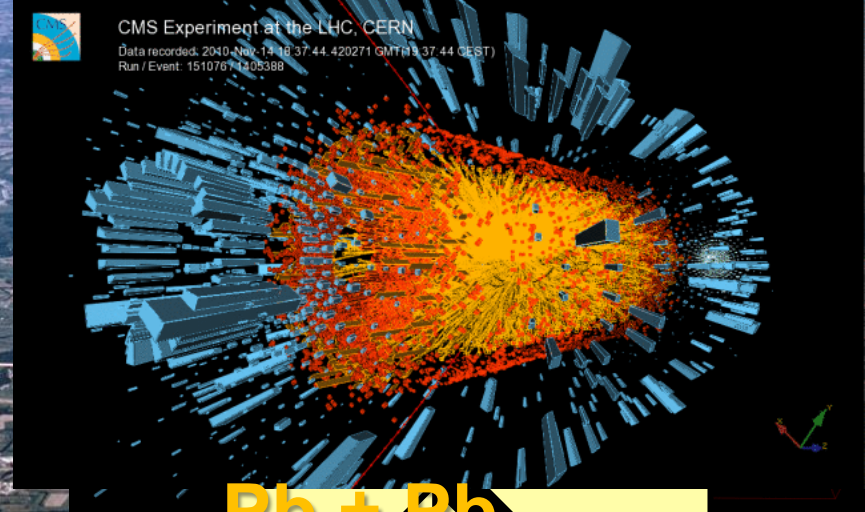
Collider of 'Large Hadrons'



14 TeV (pp)
1150 TeV (PbPb)



CMS

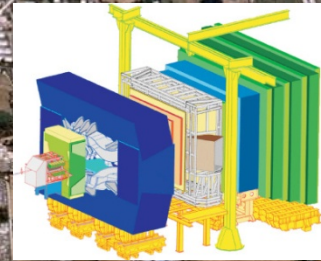
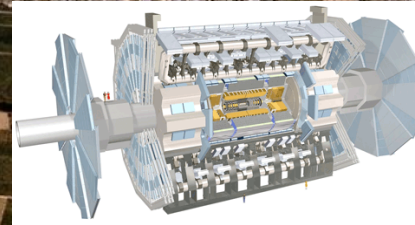


Pb + Pb

LHCb

ALICE

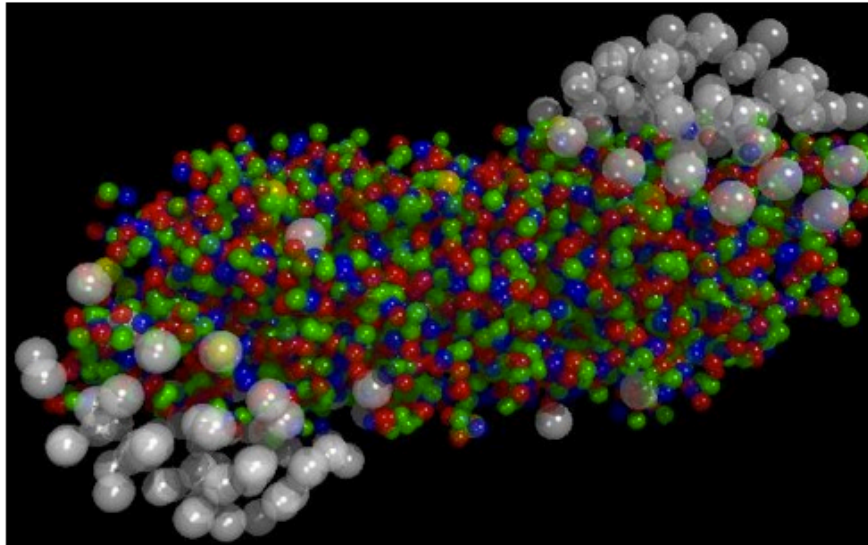
ATLAS



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.

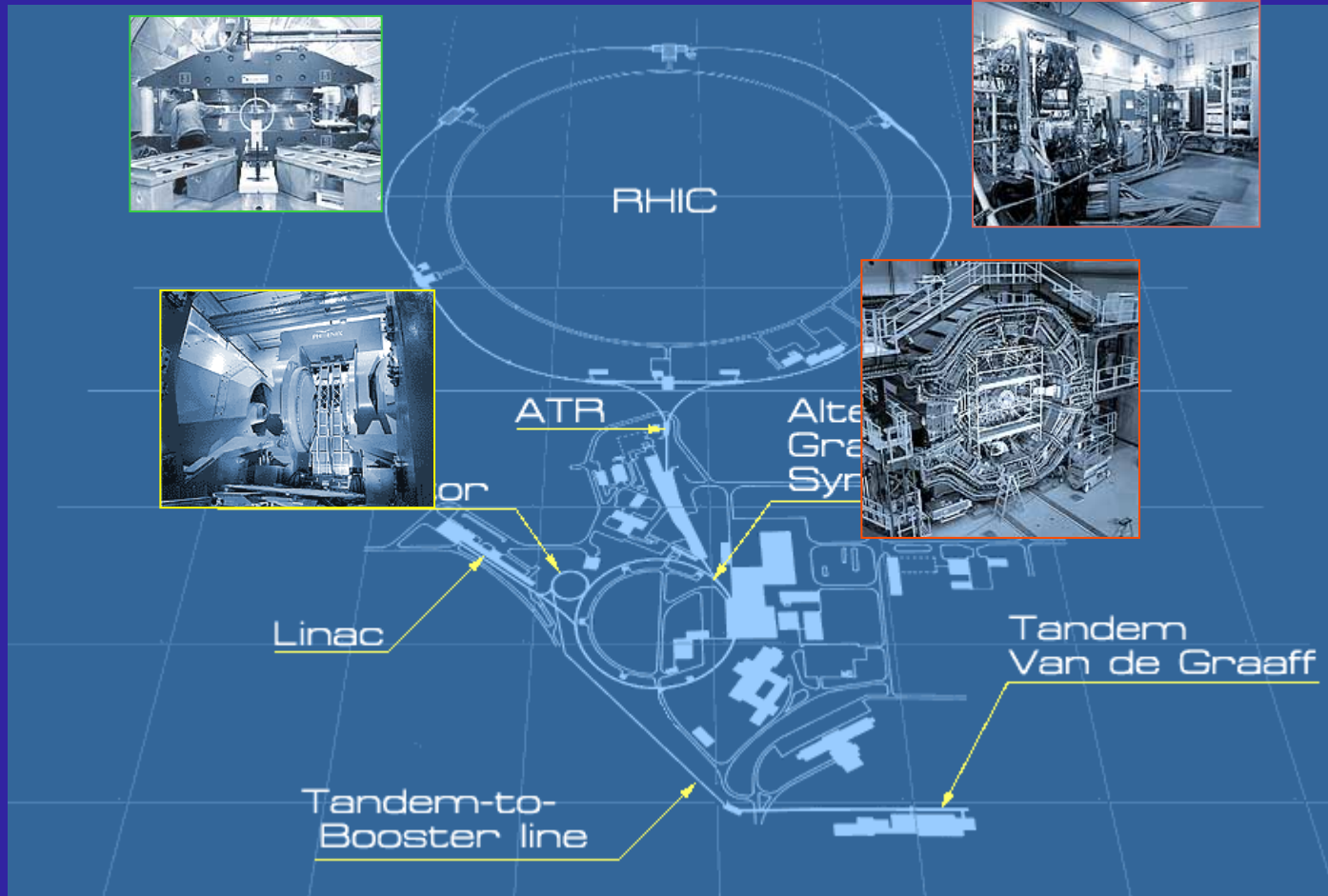
Professor Luciano Maiani, CERN Director General, said *"The combined data coming from the seven experiments on CERN's Heavy Ion programme have given a clear picture of a new state of matter. This result verifies an important prediction of the present theory of fundamental forces between quarks. It is 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 (33 TeV) was accelerated in CERN's Super Proton Synchrotron (SPS) and crashed into targets inside the

Πειράματα
σταθερού
στόχου
στο CERN
(SPS)
Δέσμες
μολύβδου
σε στόχο
μολύβδου

➤ **RHIC**: Relativistic Heavy Ion Collider (Au-Au, Cu-Cu)

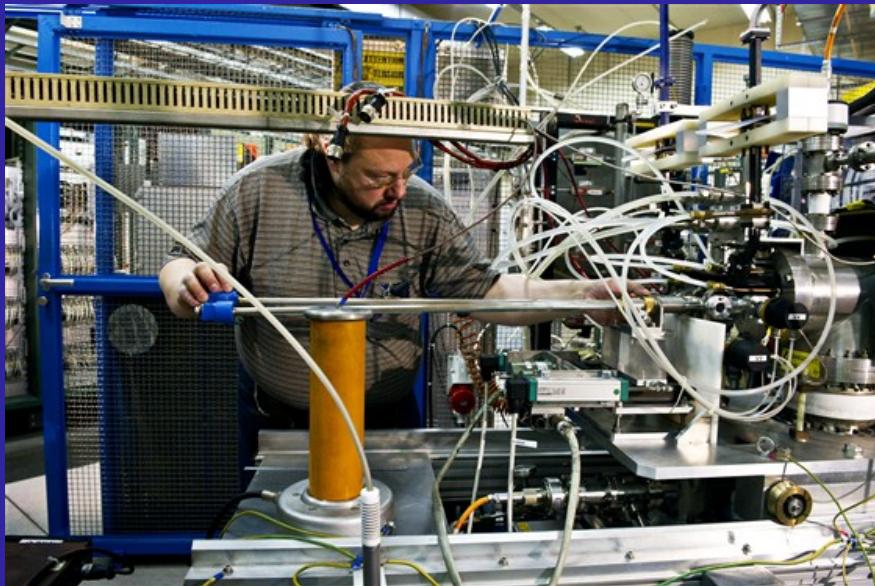
➤ Μέγιστη ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$



➤ πειράματα : **STAR, PHENIX, PHOBOS** and **BRAHMS**

Βαριά ιόντα στο LHC

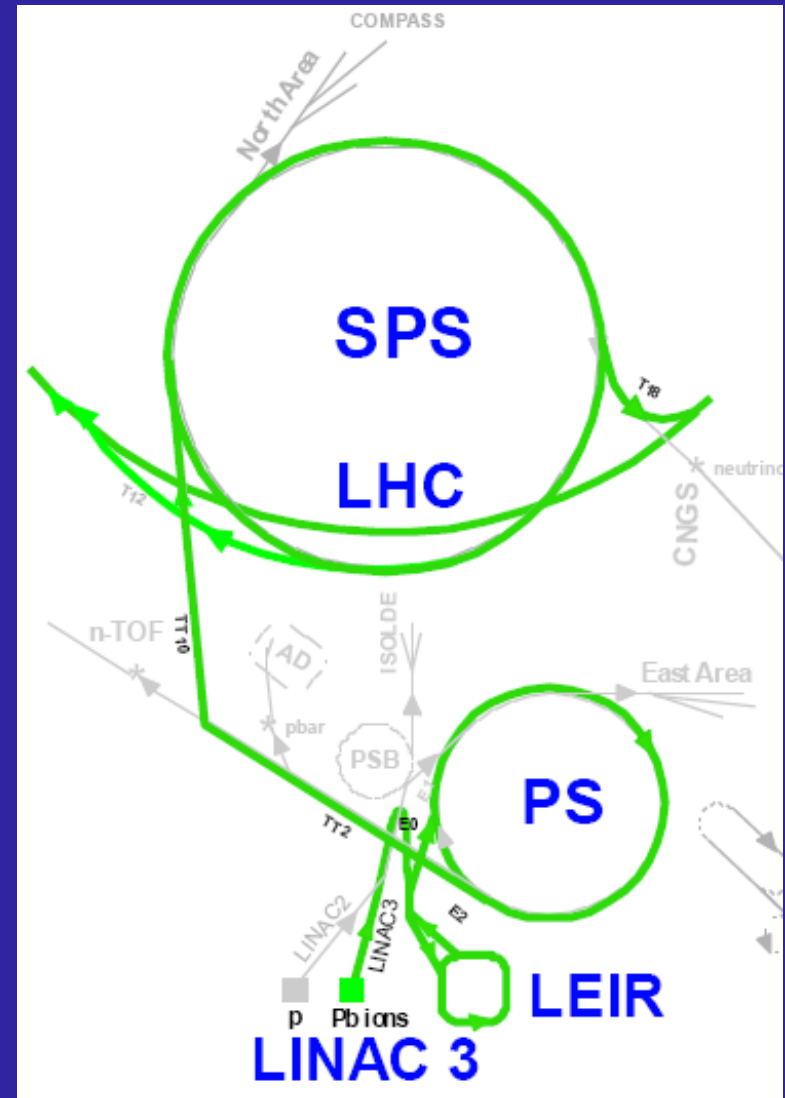
Μικρή ράβδος μολύβδου Pb^{208}
(2 cm, 500 mg) θερμαίνεται σε
500°C και εξαερώνεται. Ένα
ισχυρό ηλεκτρικό ρεύμα βγάζει
ηλεκτρόνια από τα άτομα



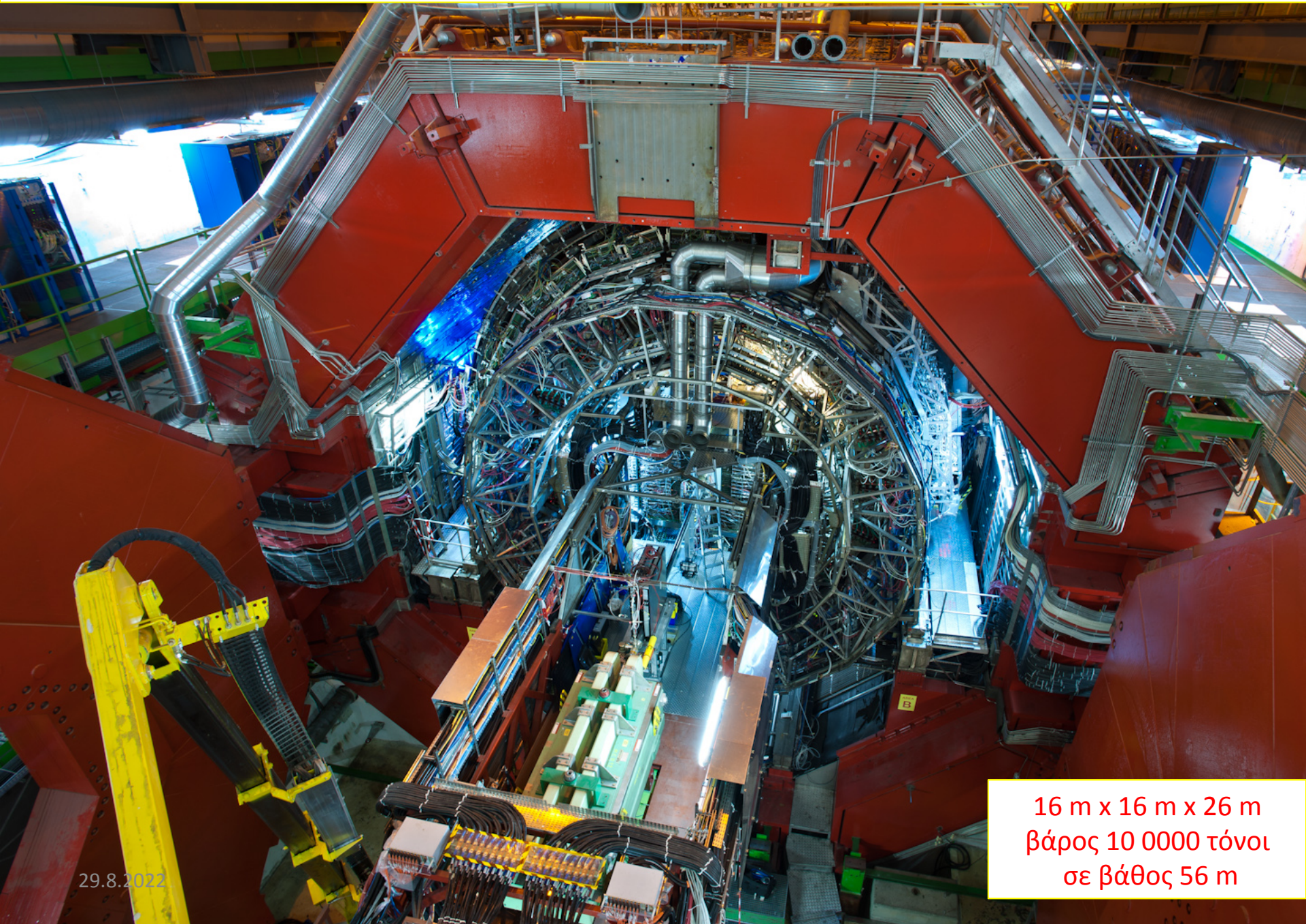
ισότοπο Pb^{208}
82 πρωτόνια
126 νετρόνια

Heavy Ions at CERN

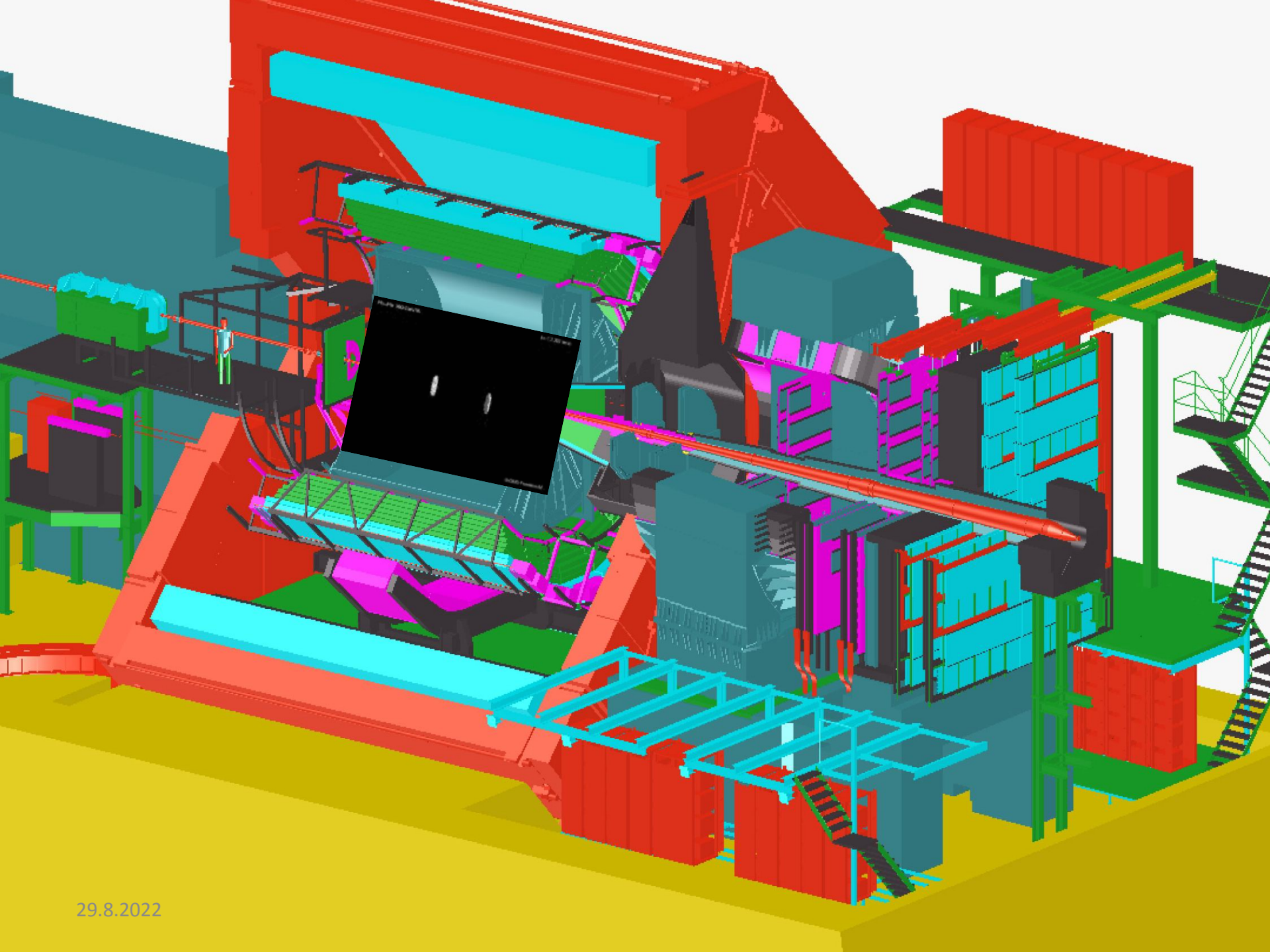
- Acceleration of Pb ions:
 - ECR source: Pb^{27+} (80 mA)
 - RFQ: Pb^{27+} to 250 A keV
 - Linac3: Pb^{27+} to 4.2 A MeV
 - Stripper: Pb^{53+}
 - LEIR: Pb^{53+} to 72 A MeV
 - PS: Pb^{53+} to 4.25 A GeV
 - Stripper: Pb^{82+} (full ionisation)
 - SPS: Pb^{82+} to 158 A GeV
 - LHC: Pb^{82+} to 2.76 A TeV (Run1)
 - LHC: Pb^{82+} to 5.02 A TeV (Run2)



ALICE : A Large Ion Collider Experiment



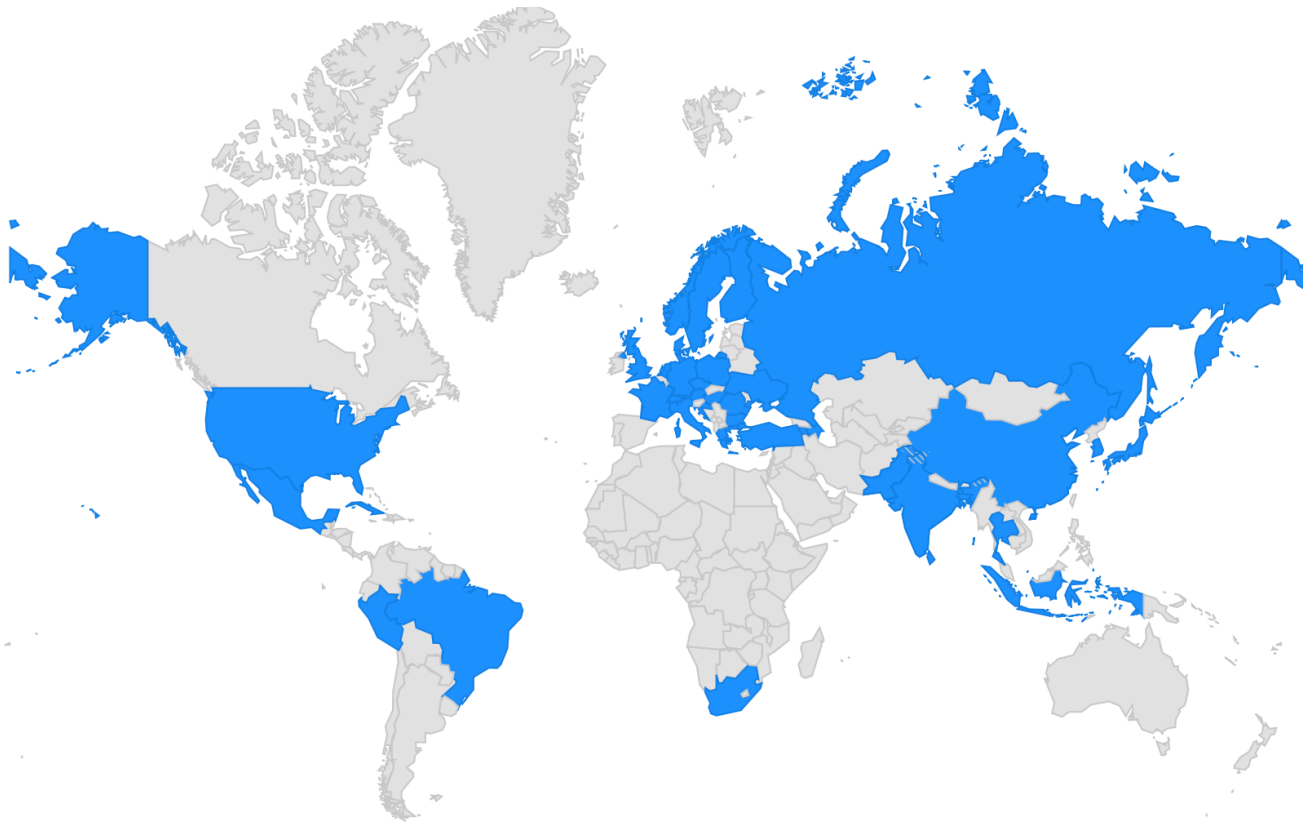
16 m x 16 m x 26 m
βάρος 10 000 τόνοι
σε βάθος 56 m

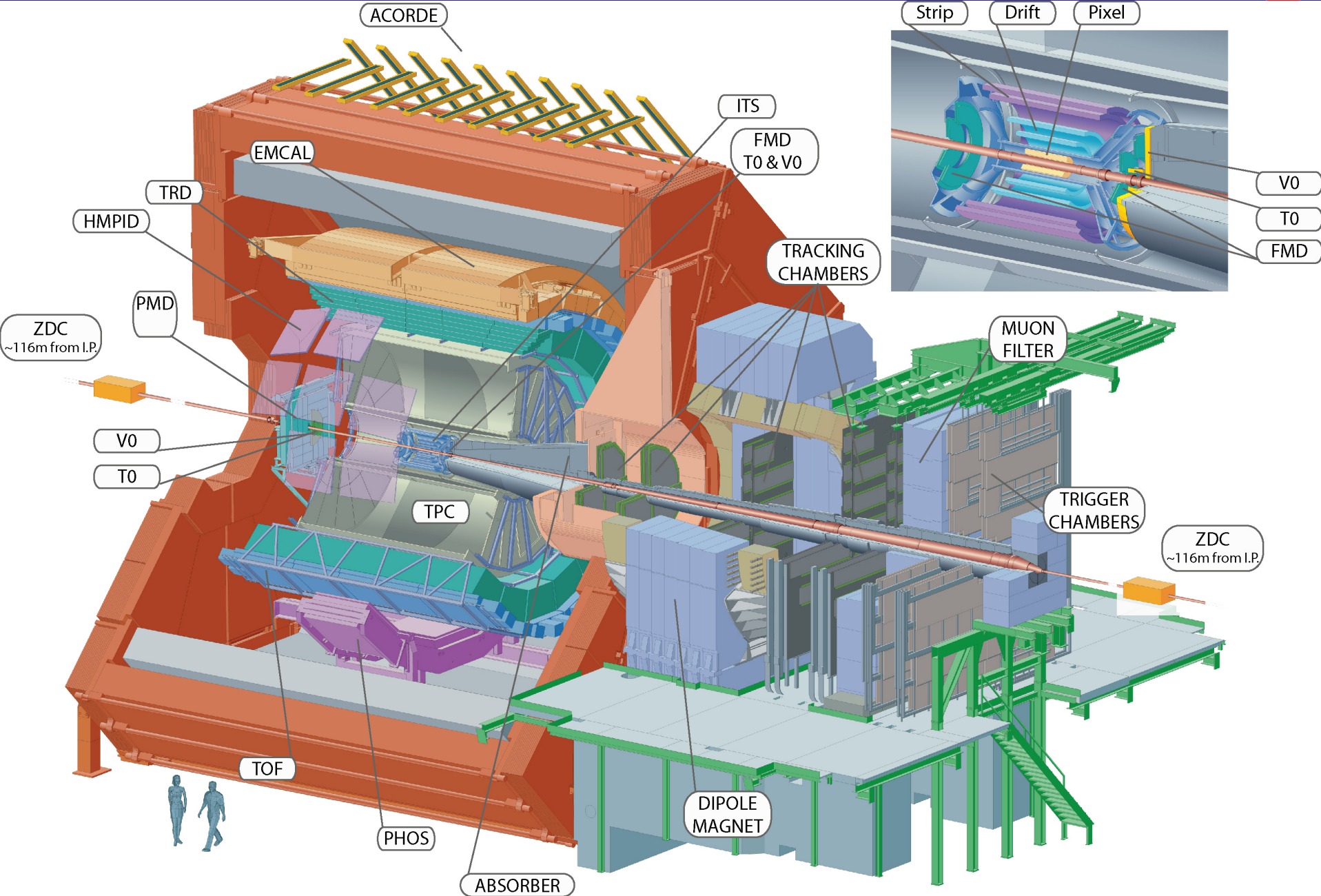


29.8.2022

ALICE Collaboration

40 countries, 172 institutes, 2031 members

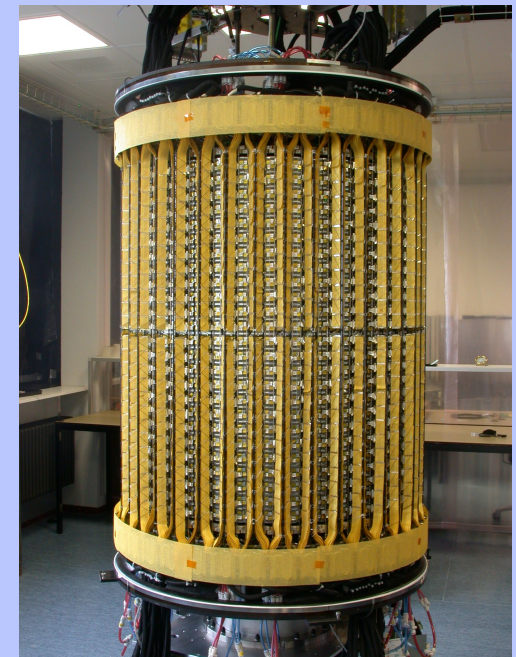
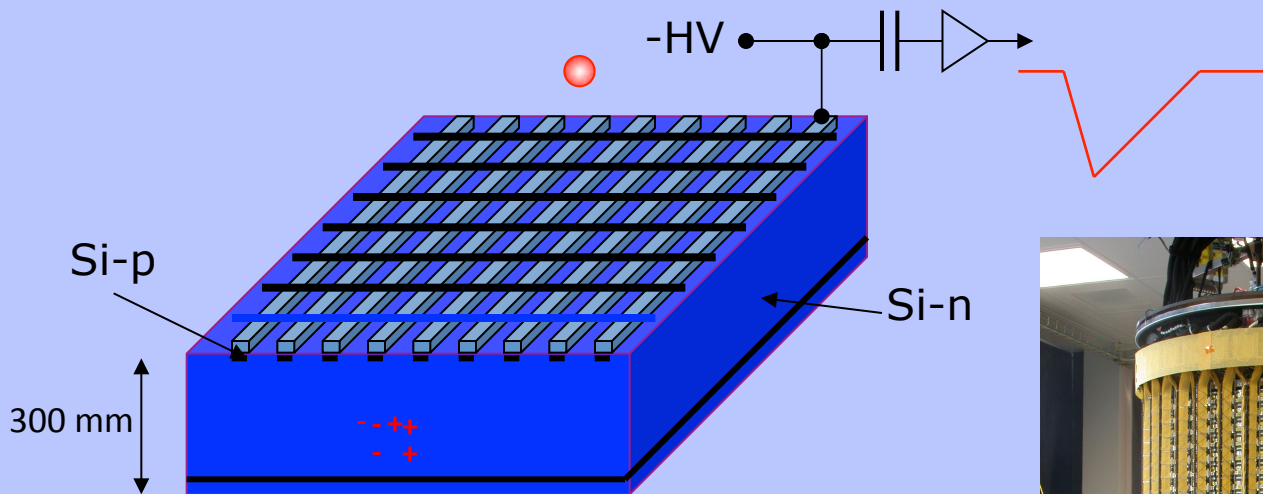




Το πείραμα ALICE (όπως ήταν μέχρι το τέλος του 2018)

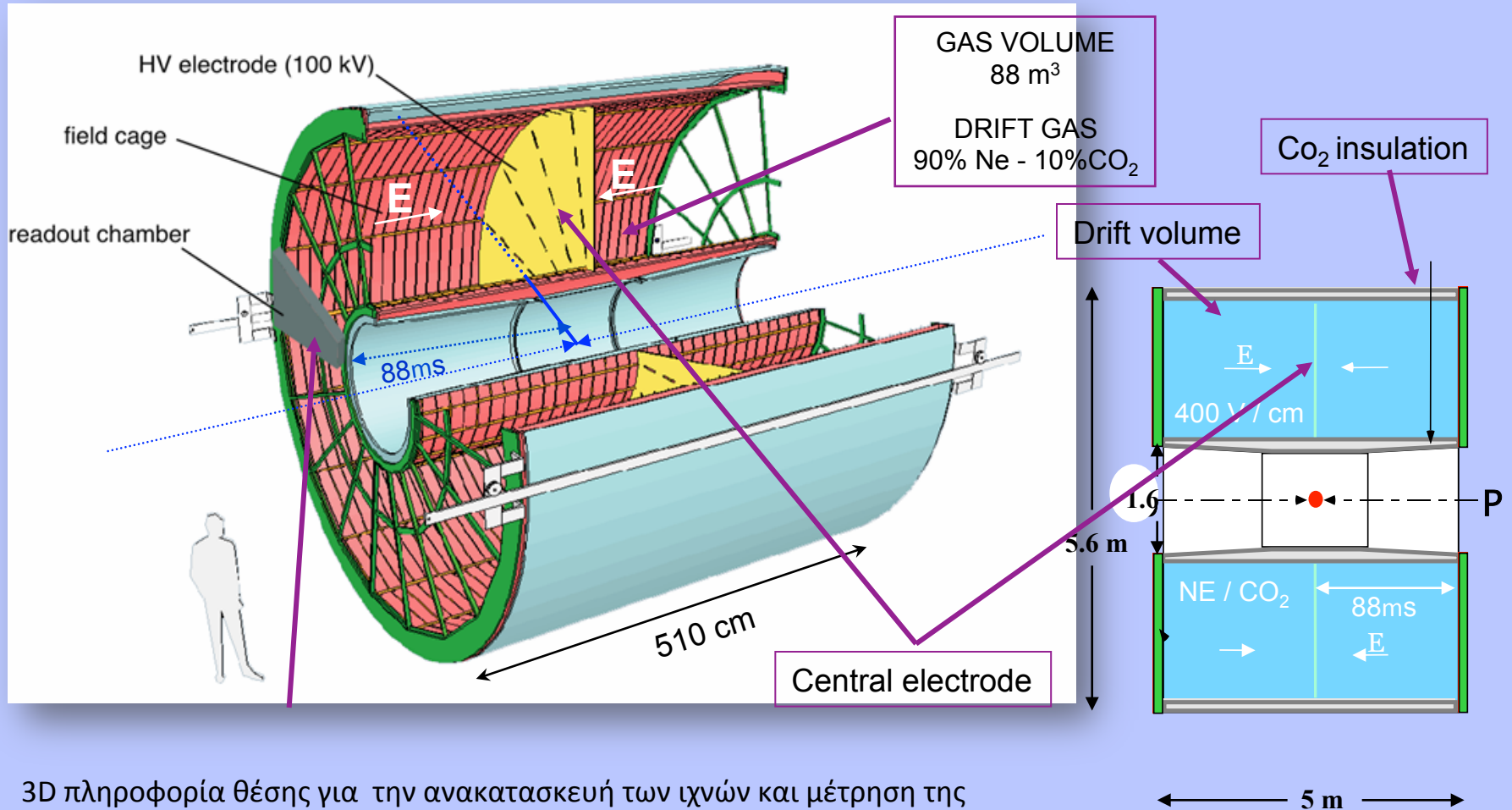
Ανιχνευτές πυριτίου : $\sim 10\,000\,000$ κανάλια

- Εσωτερικό σύστημα ανιχνευτών ιχνών: 6 στρώματα από διόδους Si
-

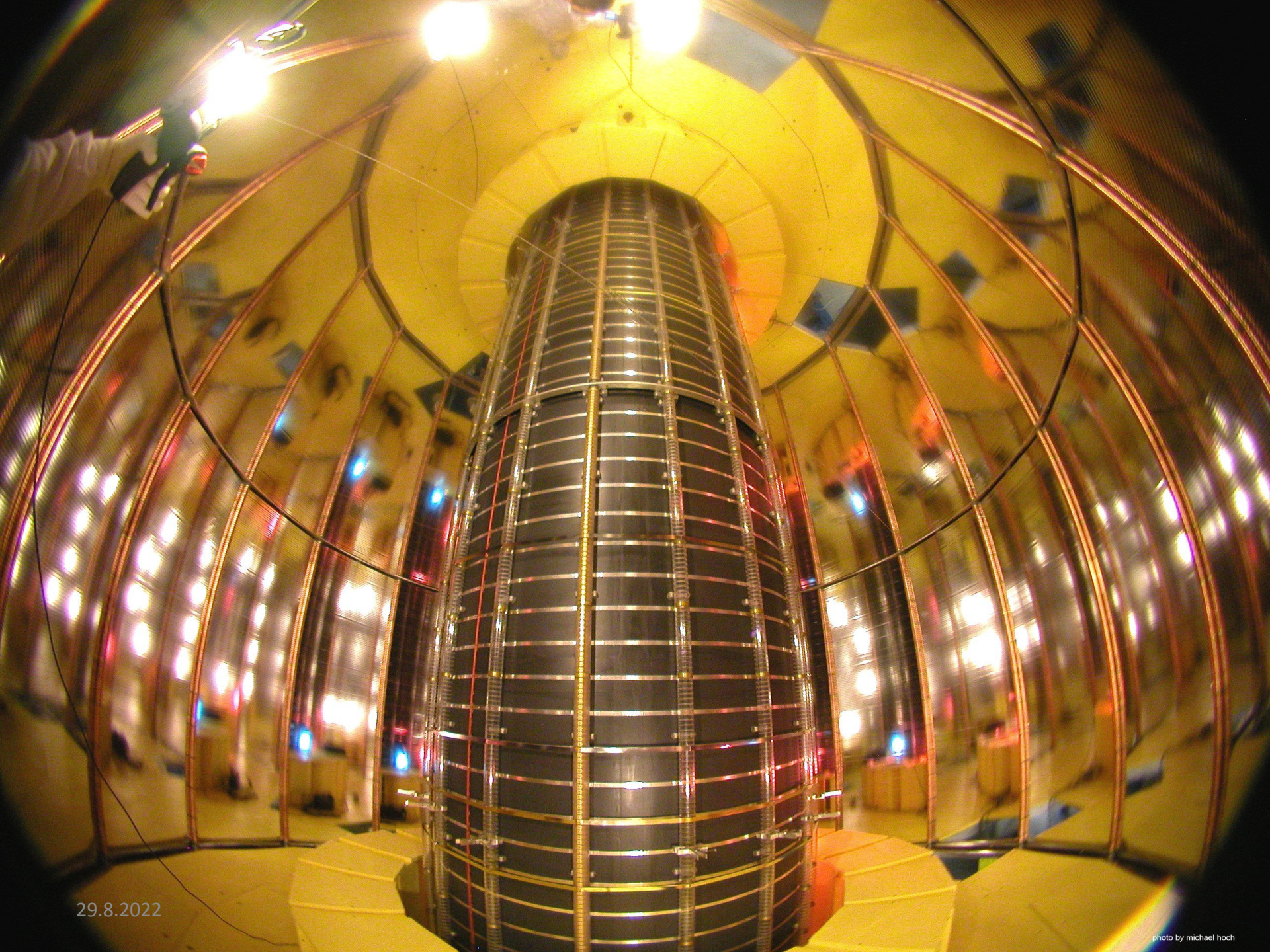


2D πληροφορία θέσης για την ανακατασκευή των ιχνών και την εύρεση του σημείου προέλευσης και ταυτοποίηση φορτισμένων σωματιδίων

Time Projection Chamber

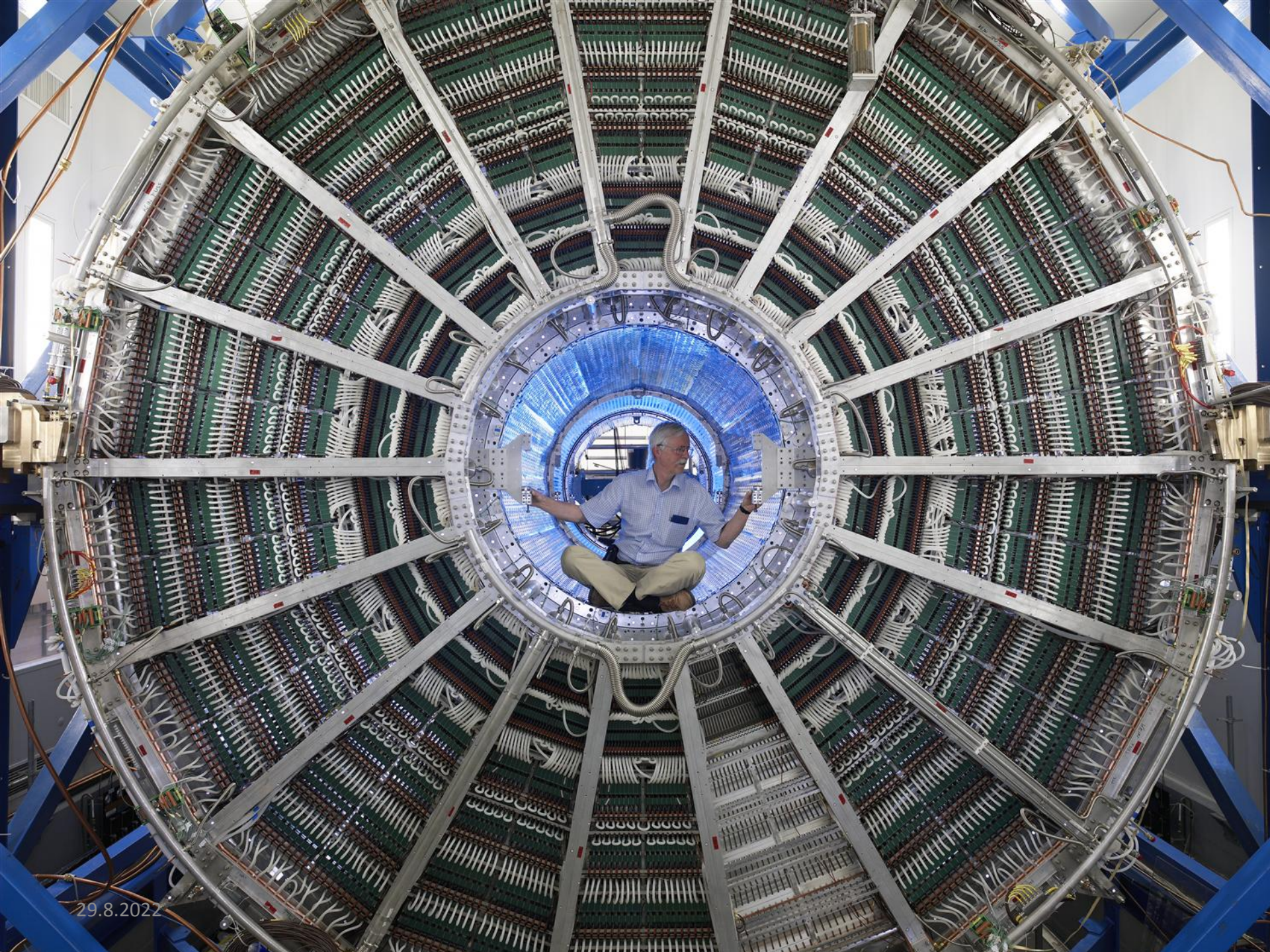


3D πληροφορία θέσης για την ανακατασκευή των ιχνών και μέτρηση της αποτιθέμενης ενέργειας/ταυτοποίηση φορτισμένων σωματιδίων



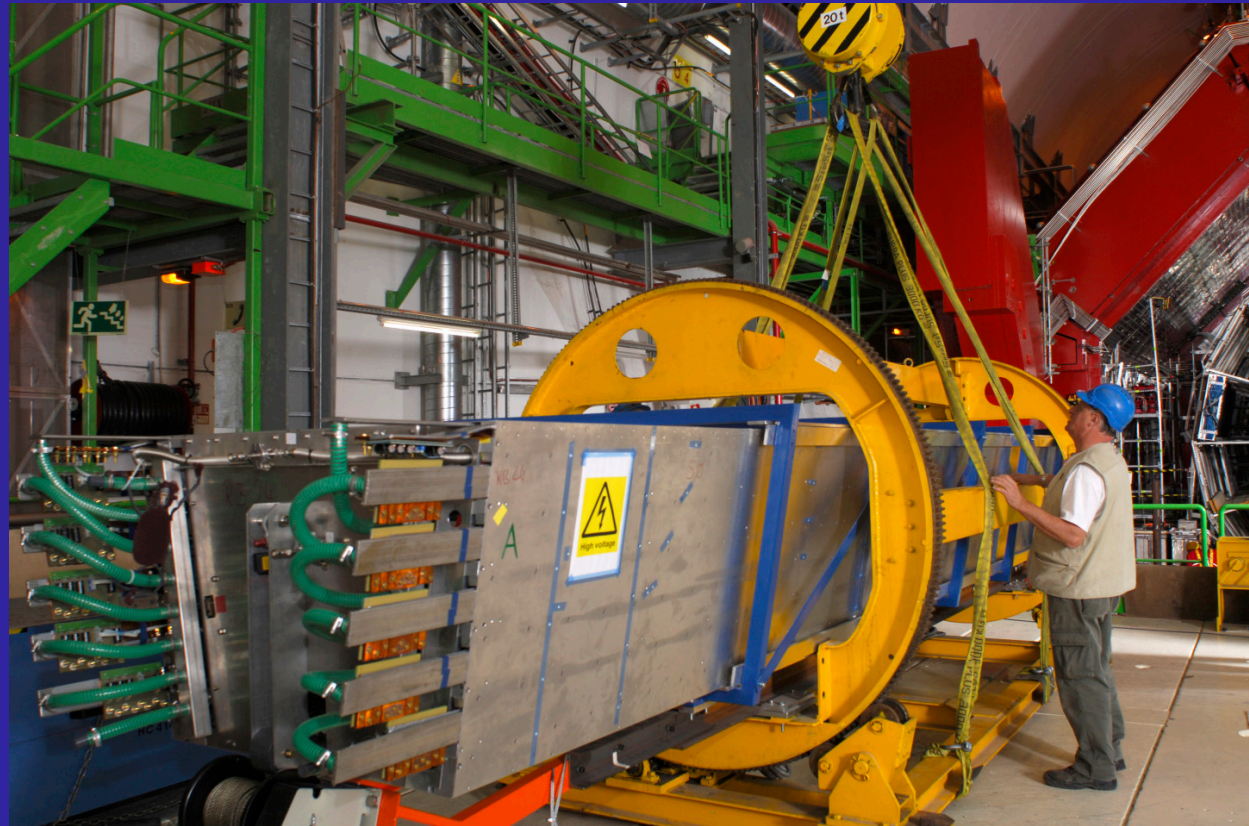
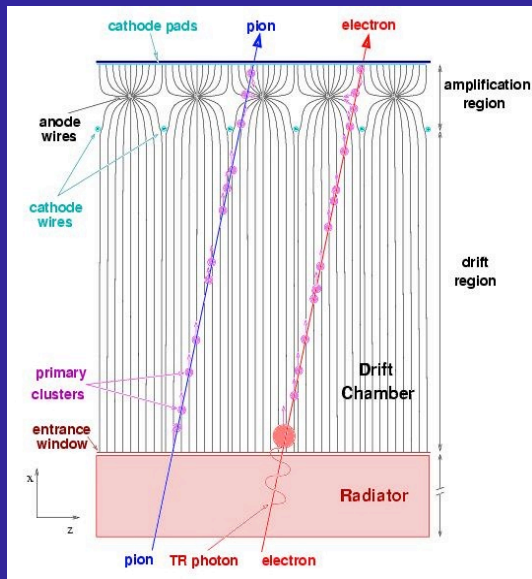
29.8.2022

photo by michael hoch



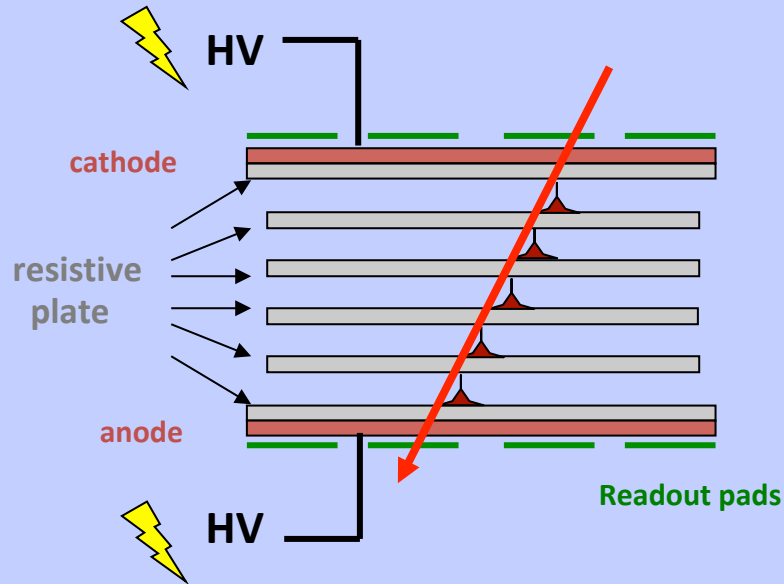
29.8.2022

Transition Radiation Detector



Ηλεκτρόνια εκπέμπουν φωτόνια (transition radiation) που ανιχνεύονται. Το σήμα από ηλεκτρόνια είναι μεγαλύτερο από πόνια => ταυτοποίηση ηλεκτρονίων

Time of Flight

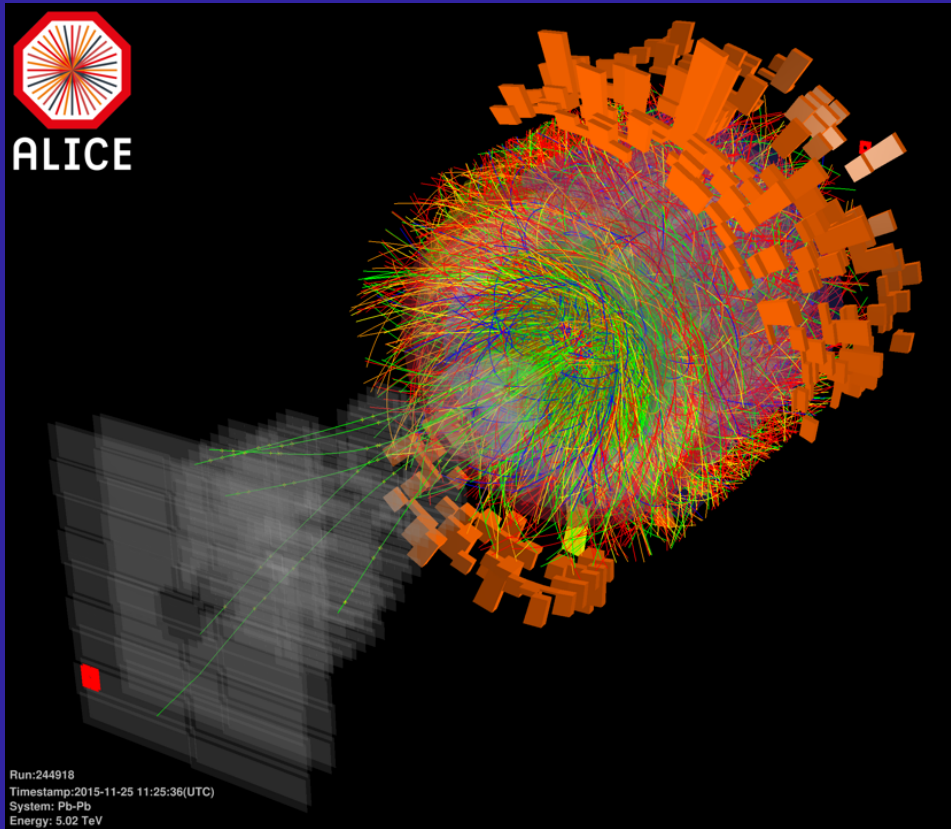


Multigap Resistive Plate Chamber

Μέτρηση χρόνου πτήσης με ακρίβεια 70 ps
 => Ταχύτητα σωματιδίου
 Ταχύτητα + ορμή => μάζα => ταυτοποίηση
 σωματιδίου



Για κάθε σύγκρουση, βρίσκουμε



Τον αριθμό των φορτισμένων
σωματιδίων που δημιουργήθηκαν

Το σημείο από το οποίο προέρχονται
(το σημείο της σύγκρουσης, primary
vertex ή άλλο, secondary vertex αν
πρόκειται για προϊόντα διάσπασης)

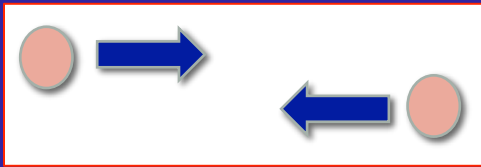
Το ίχνος (τροχιά) και την ορμή

Την ενέργεια ηλεκτρονίων / φωτονίων

Το είδος του σωματιδίου

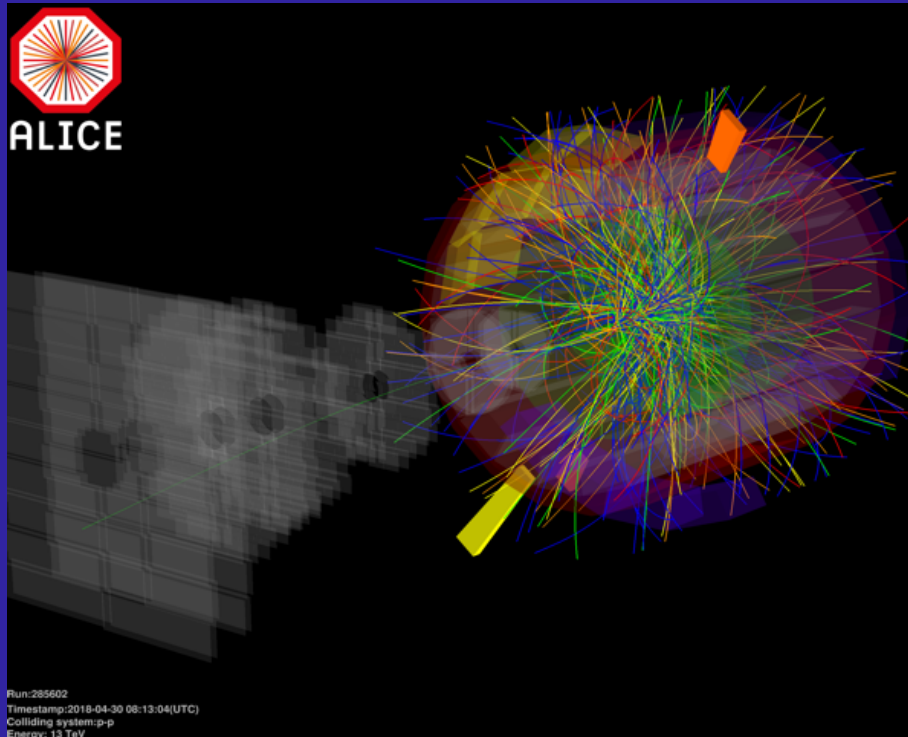
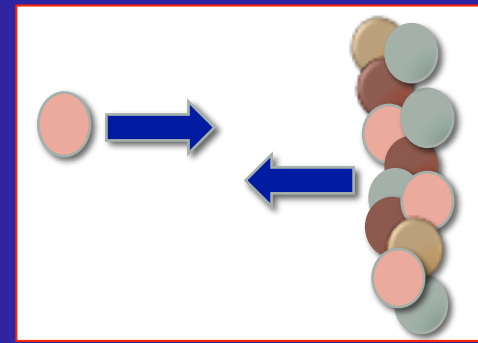
Run 2 : καταγράφουμε ~ 4 GB/second

Run 3 (μετά από το LS2) περιμένουμε ~ 1 TB /second

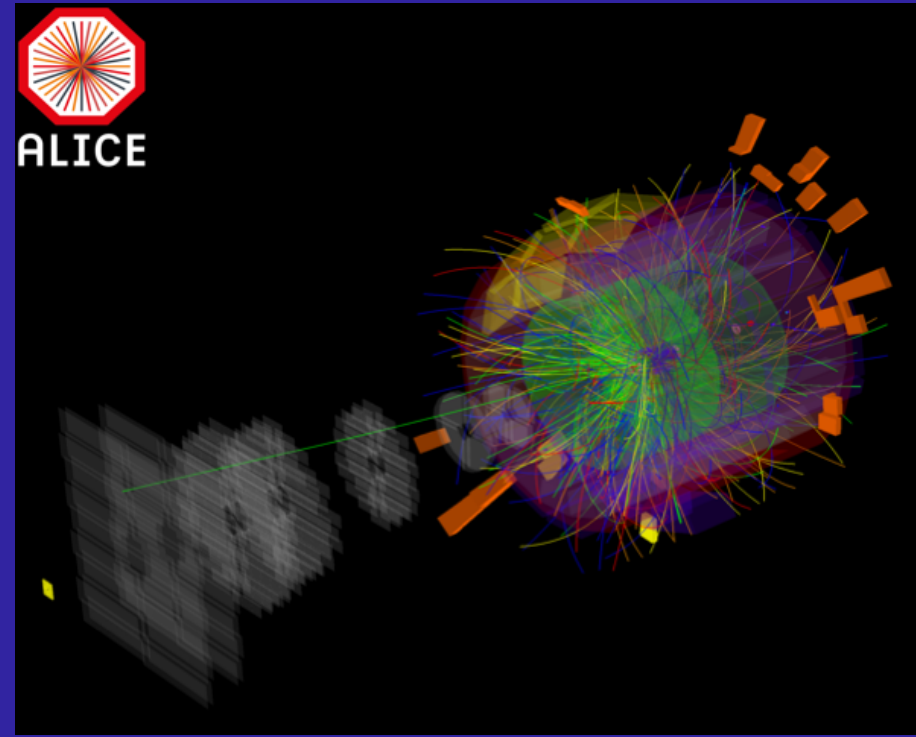


Αναφορά / σύγκριση για pPb και PbPb

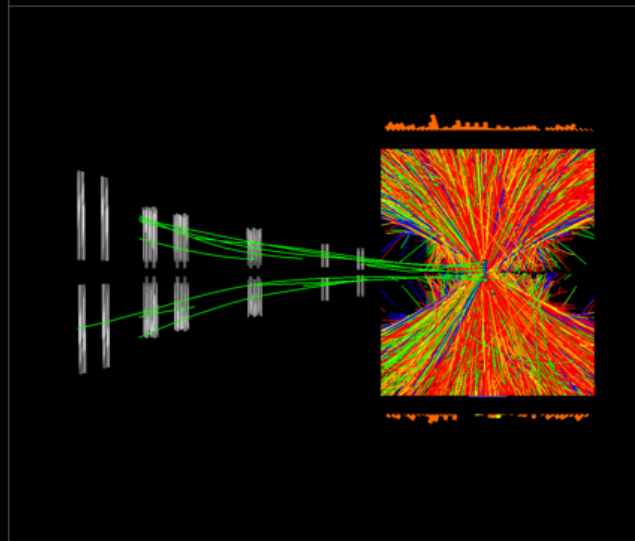
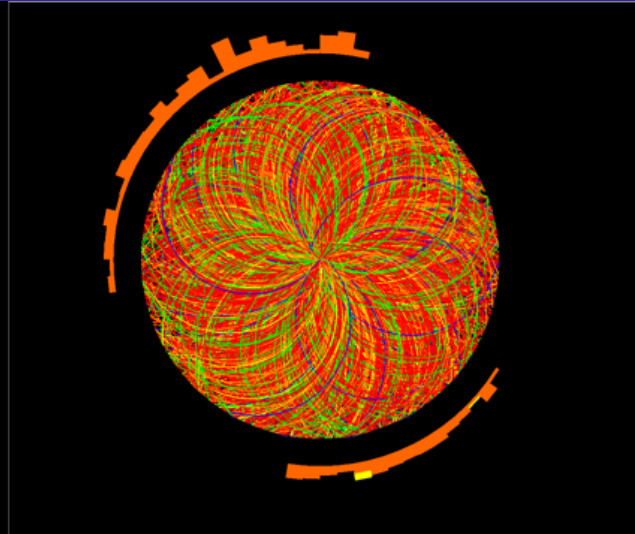
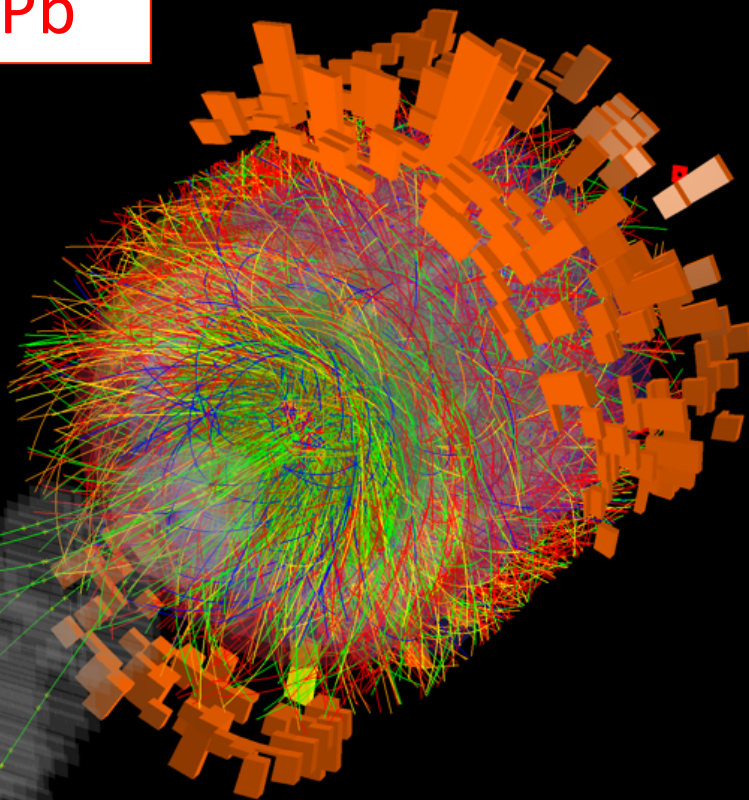
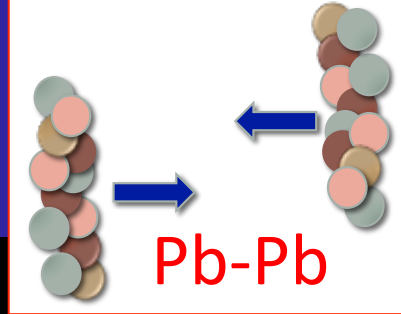
- Φαινόμενα λόγω της ύπαρξης της ψυχρής πυρηνικής ύλης



pp at 13 TeV



p-Pb at 5.02 TeV

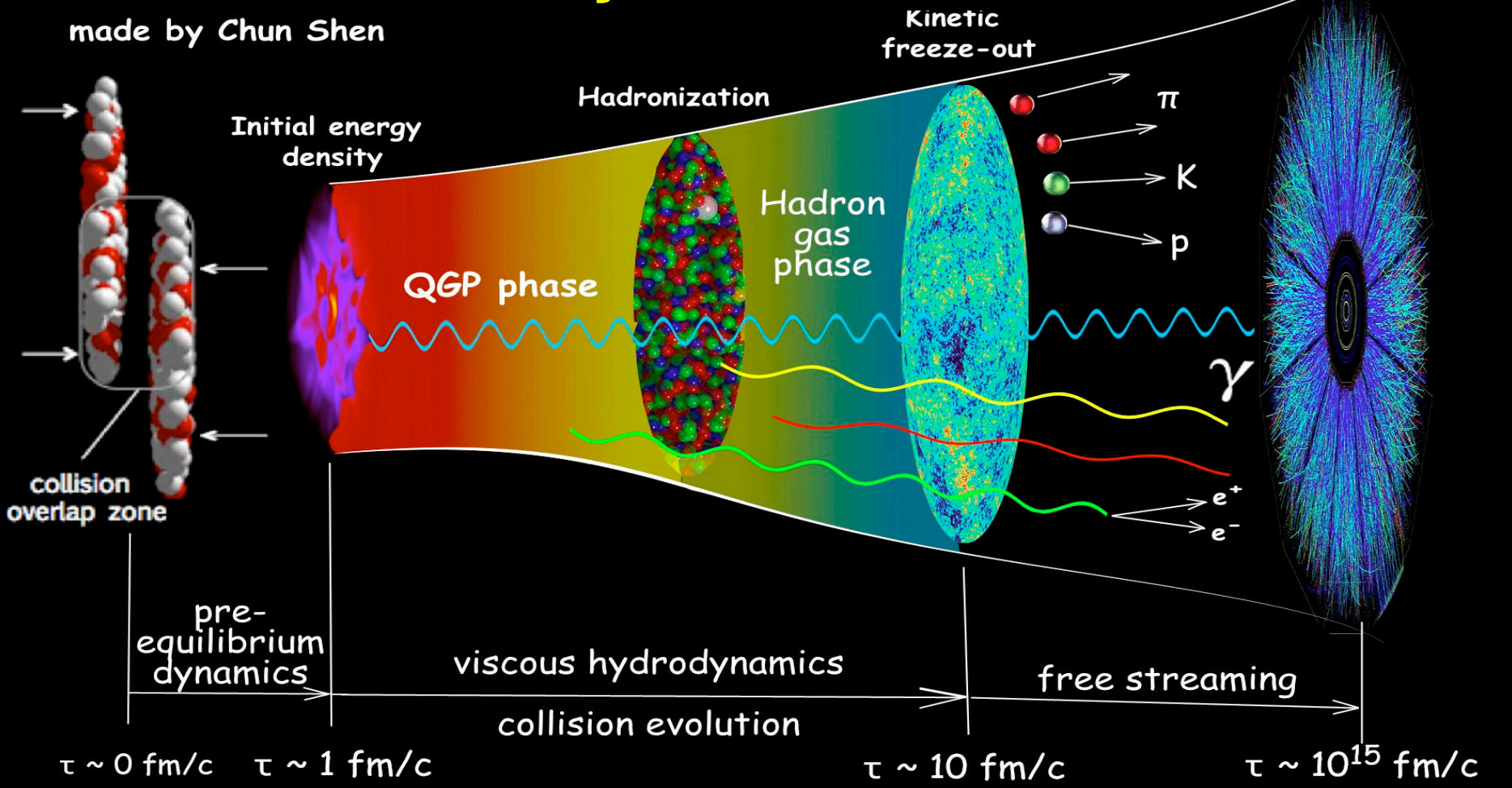


Run:244918
Timestamp:2015-11-25 11:25:36(UTC)
System: Pb-Pb
Energy: 5.02 TeV



Relativistic Heavy-Ion Collision

made by Chun Shen



Initial State Fluctuations

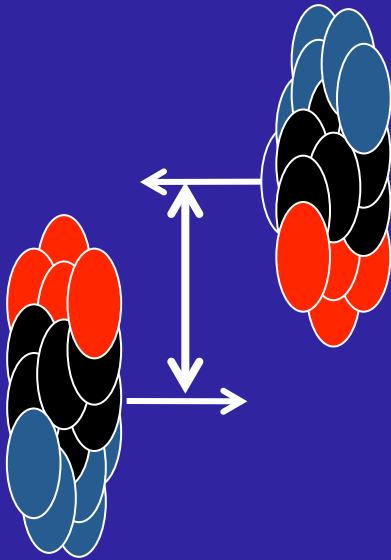
Thermal Fluctuations

Hadronization

Measurement

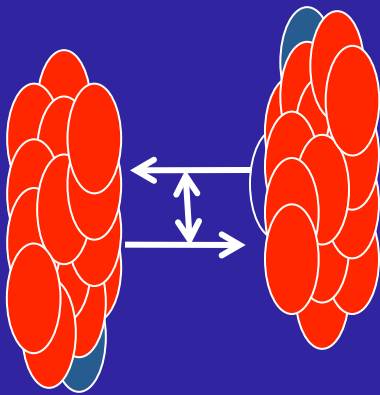


Γεωμετρία της σύγκρουσης Pb-Pb (centrality)



Περιφερειακή σύγκρουση

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

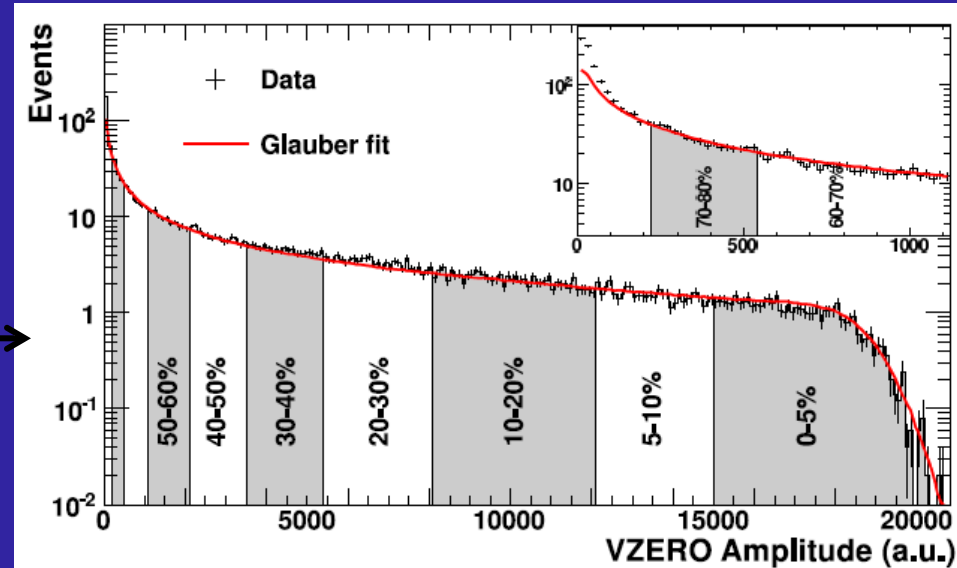


Κεντρική σύγκρουση

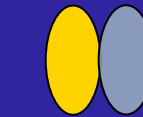
- Μικρή απόσταση ανάμεσα στα κέντρα των πυρήνων
- Μεγάλος αριθμός νουκλεονίων που συμμετέχουν → παράγονται πολλά φορτισμένα σωματία (μεγάλη πολλαπλότητα)

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

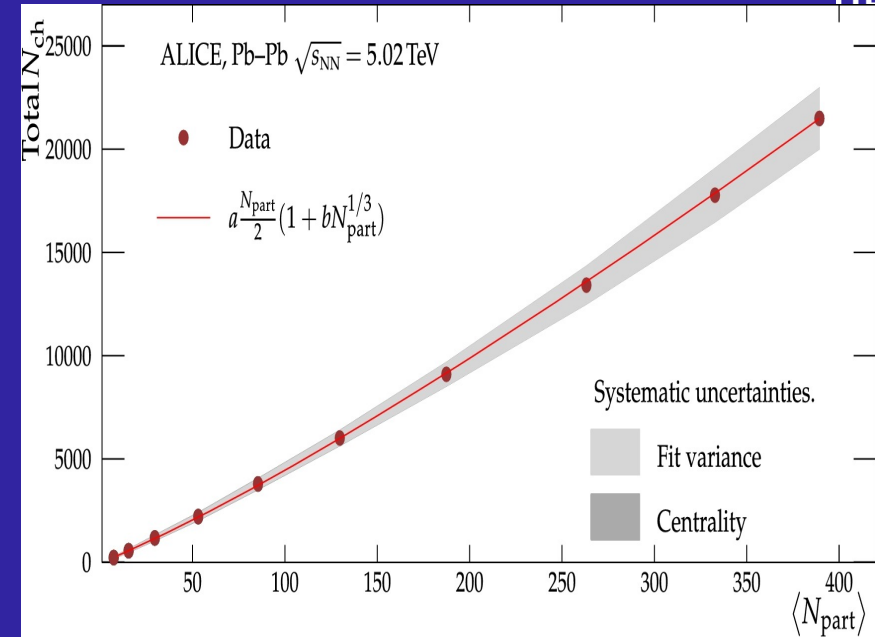
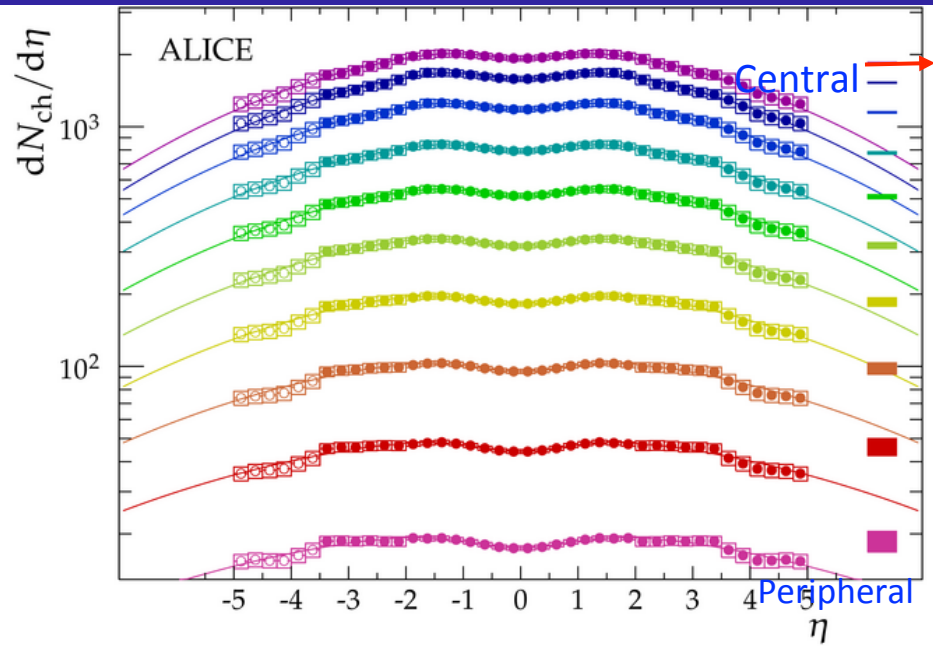


ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΕΣ



ΚΕΝΤΡΙΚΕΣ

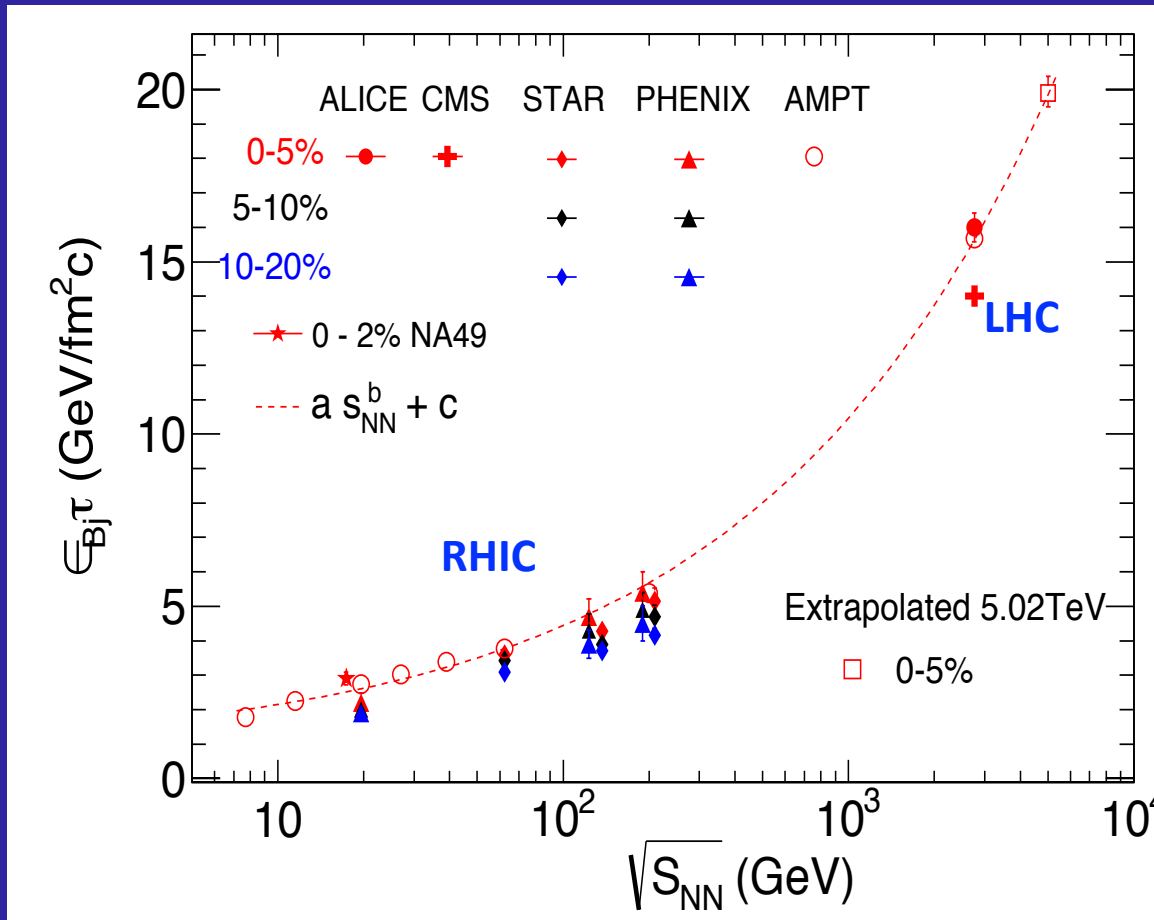
Πολλαπλότητα φορτισμένων σωματιδίων



N_{part} : αριθμός νουκλεονίων που συμμετέχουν στην αλληλεπίδραση

αριθμός των φορτισμένων σωματιδίων σε μια σύγκρουση
 Κεντρικές συγκρούσεις : 21400 ± 1300
 Περιφερειακές συγκρούσεις : 230 ± 38

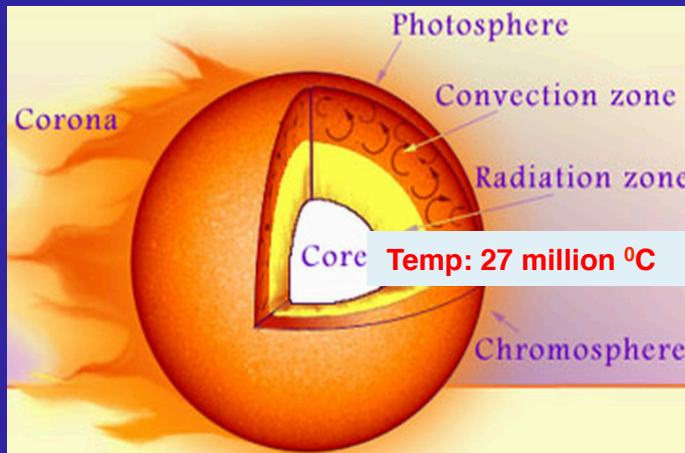
Ενεργειακή πυκνότητα



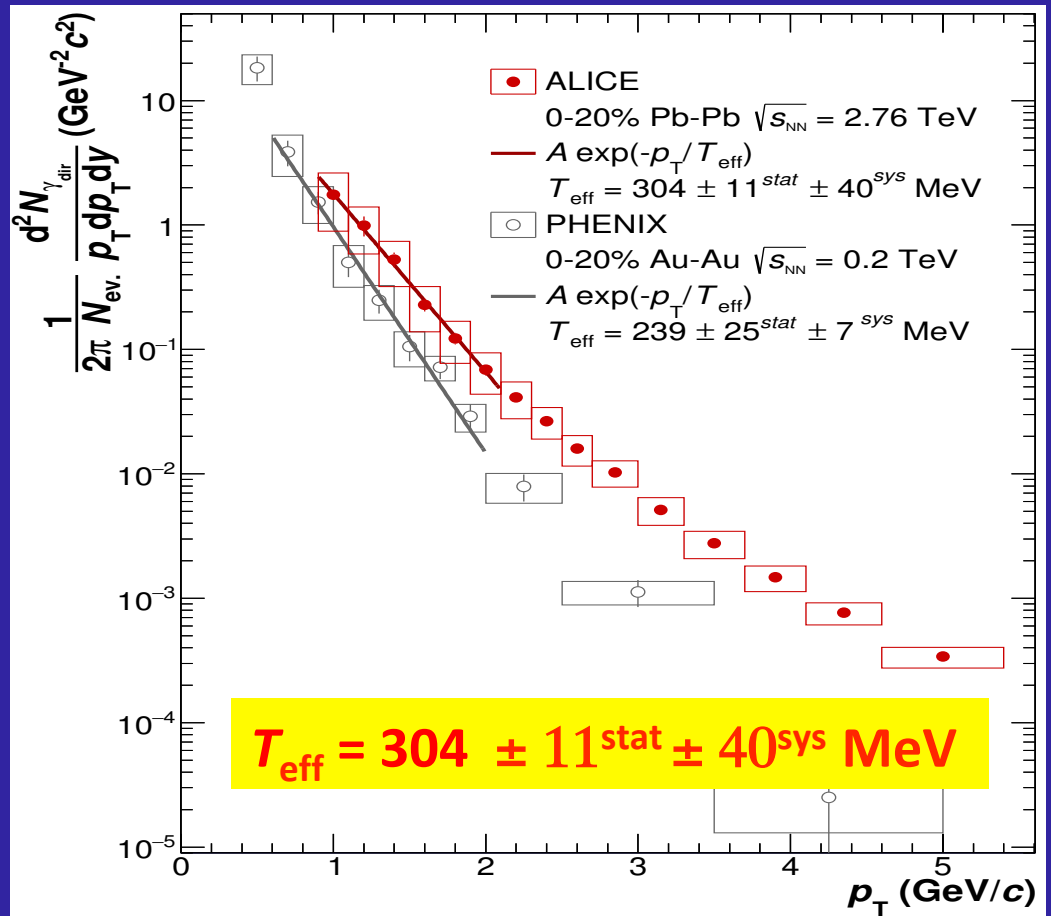
Από τον αριθμό των φορτισμένων σωματιδίων βρίσκουμε την πυκνότητα ενέργειας **15 GeV / fm³** (3 φορές μεγαλύτερη από ότι στο RHIC) και την αρχική θερμοκρασία του συστήματος 30% υψηλότερη από ότι στο RHIC

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.



150 000 φορές υψηλότερη από τη θερμοκρασία στο κέντρο του ήλιου

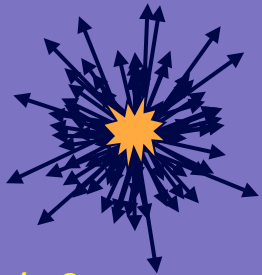


(1eV=11605K)

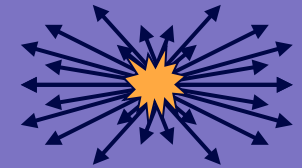
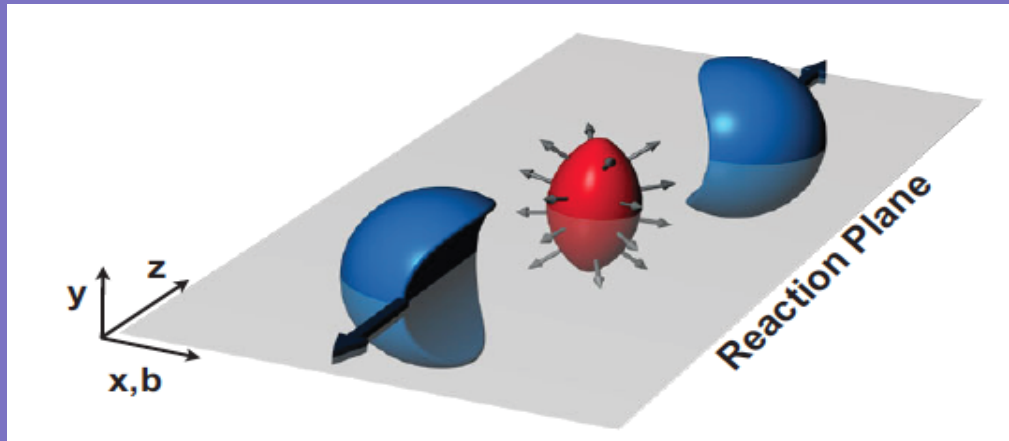
$T_{\text{eff}} = 3,527,920$ million deg

Ροή

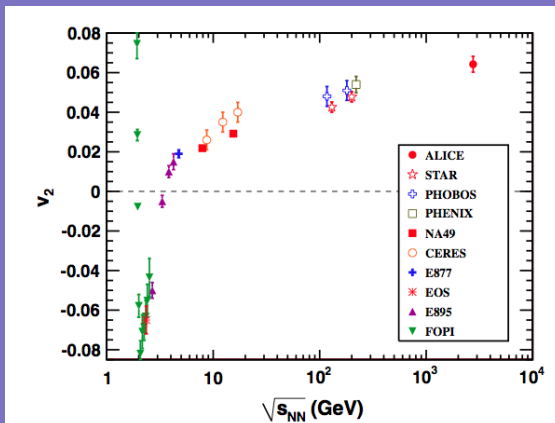
Σε μη κεντρικές συγκρούσεις, η αρχική ασυμμετρία στη γεωμετρία της σύγκρουσης έχει σαν αποτέλεσμα ανισοτροπία στη γωνιακή κατανομή των παραγομένων σωματιδίων



Υπέρθωση ανεξάρτητων συγκρούσεων πρωτονίων



Εξέλιξη του συστήματος σαν σύνολο : πολύ περισσότερα αδρόνια παράλληλα στο επίπεδο της αλληλεπίδρασης παρά στο κάθετο προς αυτό



Ελλειπτική ροή: 2^η συνιστώσα Fourier της κατανομής των ορμών των σωματιδίων

Ενα 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.

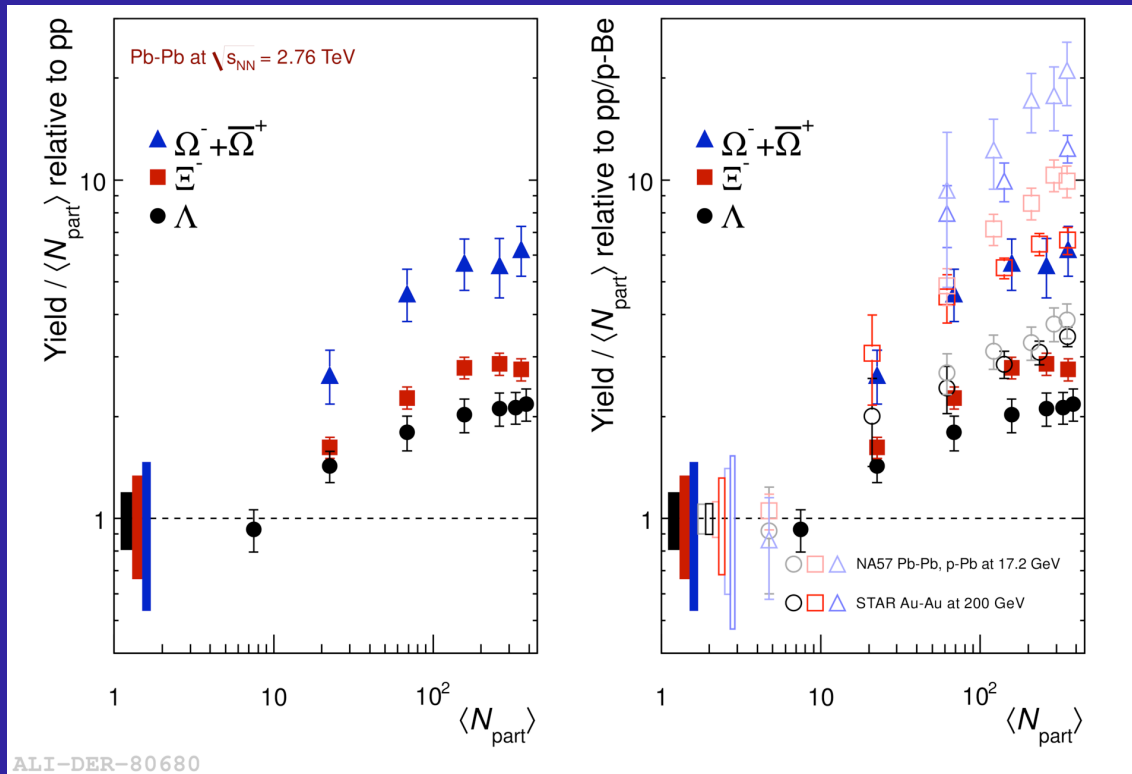
Η ύλη που σχηματίζεται από τις συγκρούσεις βαριών ιόντων αναμενόταν αρχικά να συμπεριφέρεται σαν αέριο πλάσμα. Αντί γι'αυτό, φαίνεται να συμπεριφέρεται σαν τέλειο υγρό, με συντονισμένη συλλογική κίνηση (ροή) των σωματιδίων που το συνιστούν.

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

Ενα από τα πιο θεαματικά αποτελέσματα από τα πειράματα βαριών ιόντων

Ενίσχυση της παραδοξότητας (Strangeness enhancement)

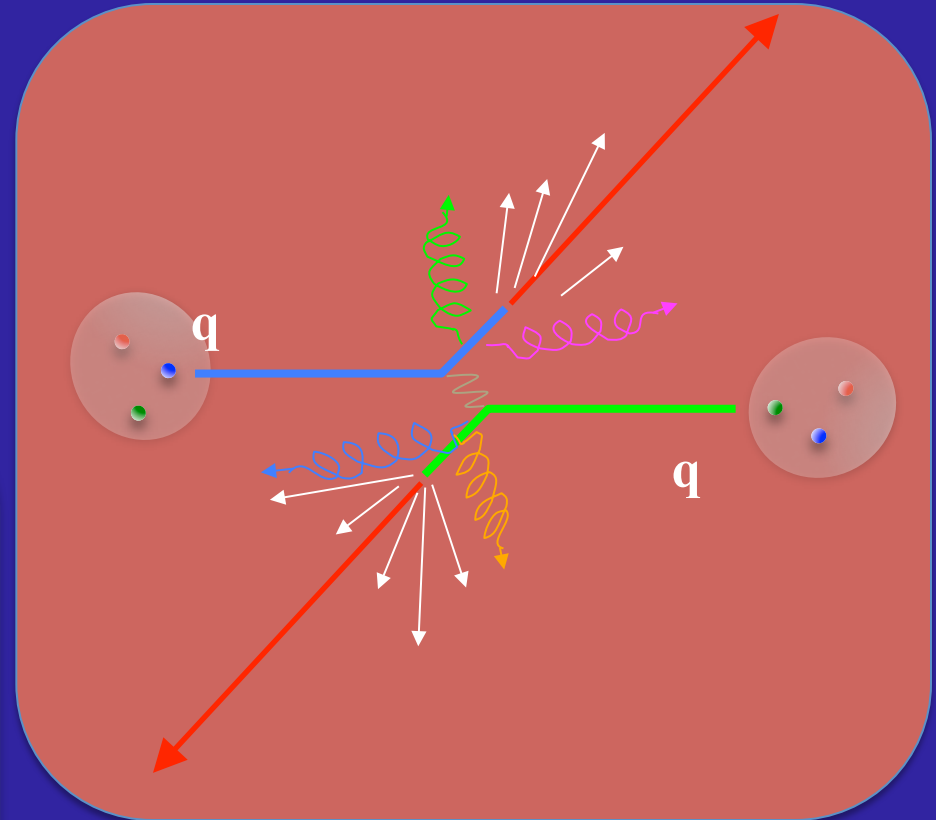
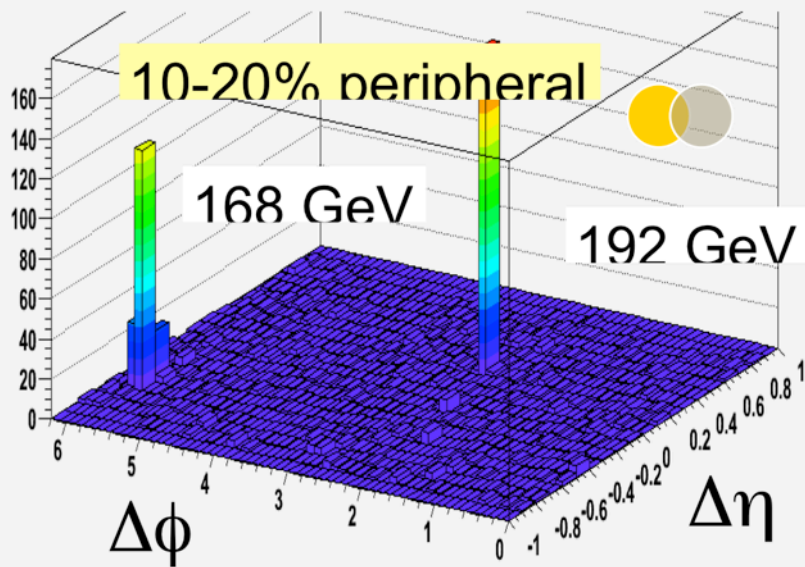
Ένα από τα πρώτα σήματα για το πλάσμα κουάρκ και γλουονίων



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

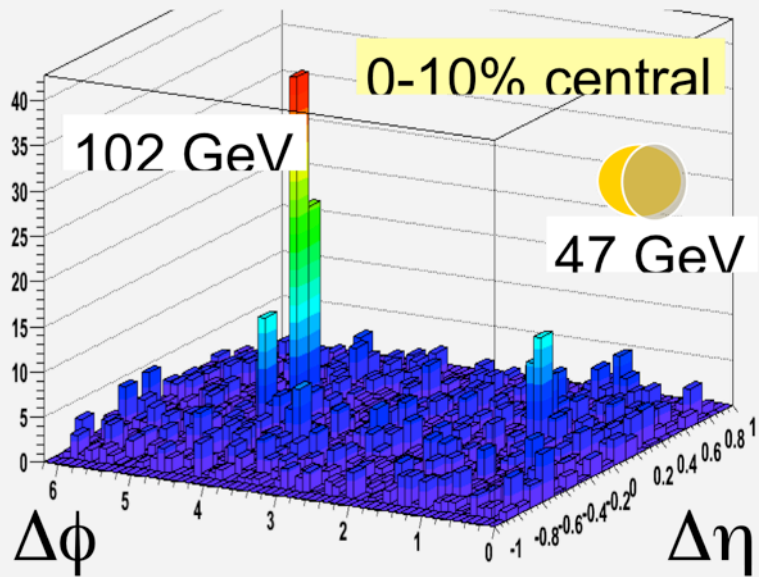
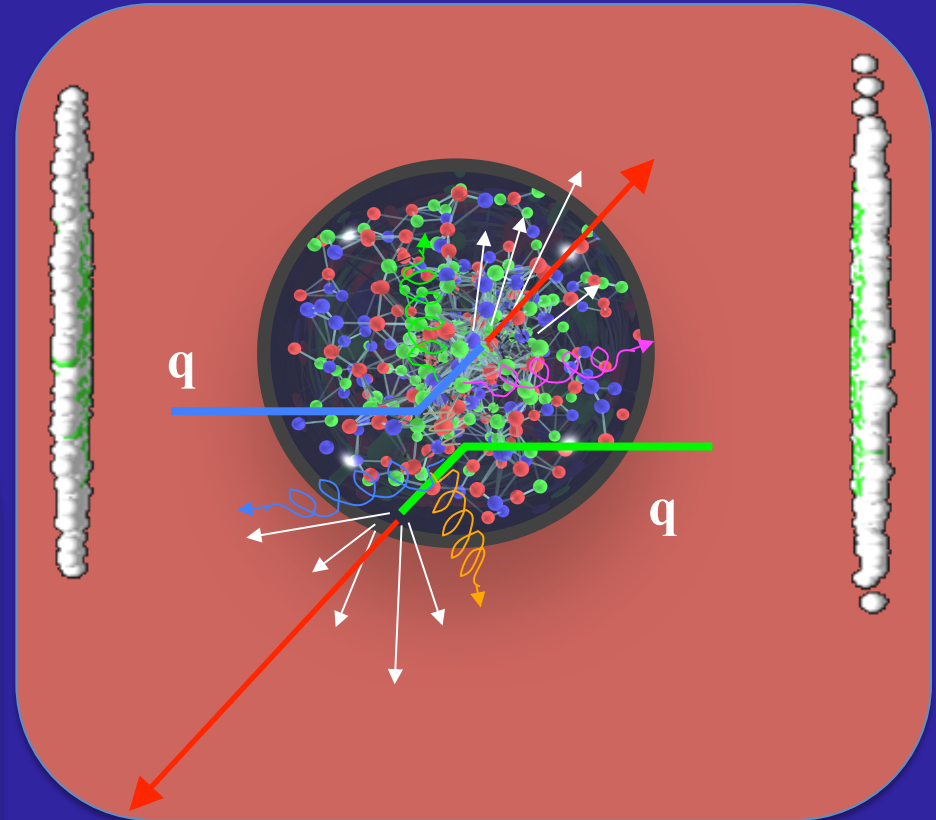
Αριθμος των σωματιδίων του ίδιου τύπου ανά αλληλεπίδραση pp/2

Πίδακες αδρονίων



Απόπνιξη των πιδάκων μέσα στο QGP

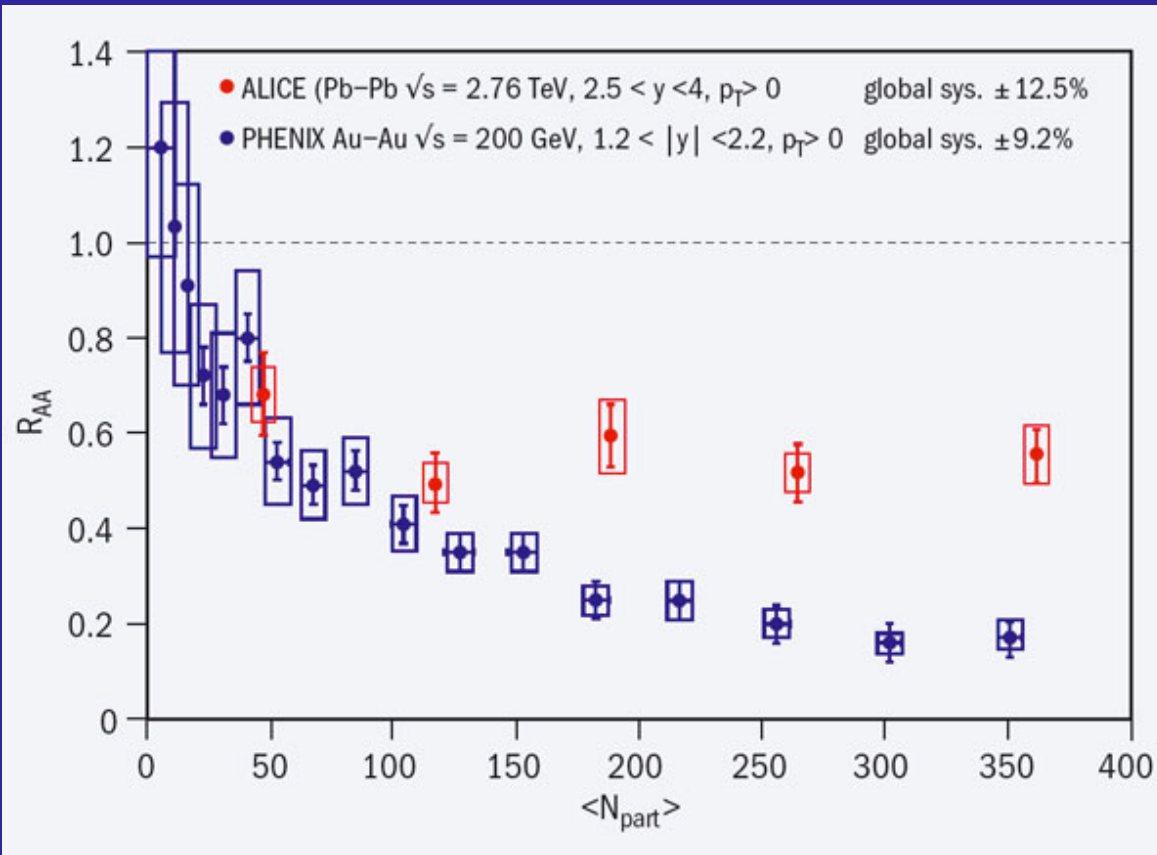
Ο πίδακας που παράγεται κοντά στην επιφάνεια από το QGP έχει μεγάλη ενέργεια ενώ εκείνος που διασχίζει το QGP απορροφείται και σκεδάζεται από το πυκνό μέσο χάνοντας μεγάλο μέρος της ενέργειάς του



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 $J/\psi \rightarrow \mu\mu$ και $J/\psi \rightarrow e^+e^-$)
- 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

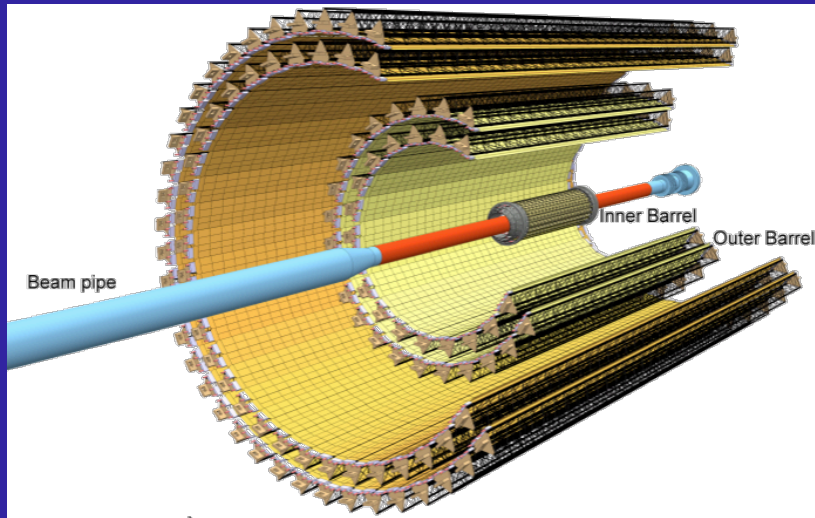
R_{AA} Nuclear modification factor

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

Αναβάθμιση του ALICE κατά τη διάρκεια του LS2, για το Run3

αυξημένη φωτεινότητα των δεσμών
περισσότερες συγκρούσεις
μεγαλύτερη στατιστική

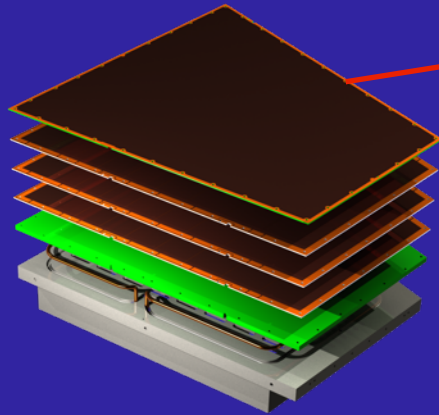
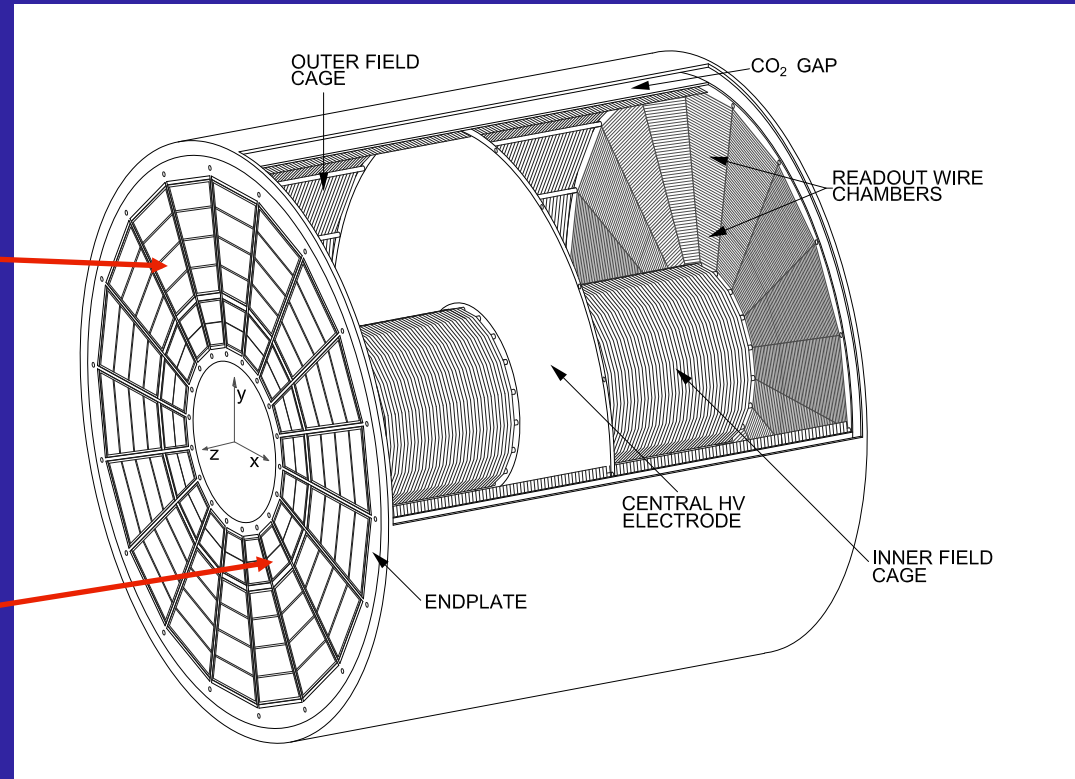
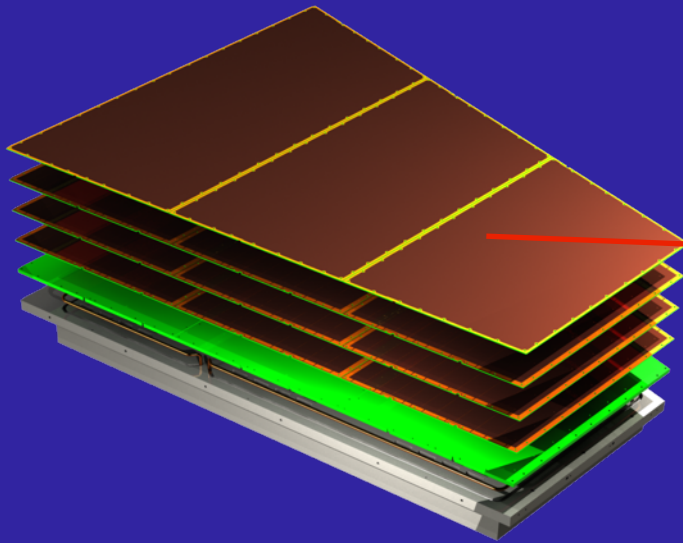
Καινούριο σύστημα καταγραφής ιχνών (ITS) με 7 στρώματα



- 7-layer geometry (23 – 400mm), $|\eta| \leq 1.5$
- 10 m² active silicon area (**12.5 G-pixels**)
- Pixel pitch 28 x 28 μm²
- Spatial resolution ~5μm
- Power density < 40mW / cm²
- Material thickness: ~0.3% / layer (IB)
- Maximum particle rate: 100 MHz / cm²

Καλύτερη διακριτική ικανότητα
Δυνατότητα ανίχνευσης πιο βραχύβιων σωματιδίων

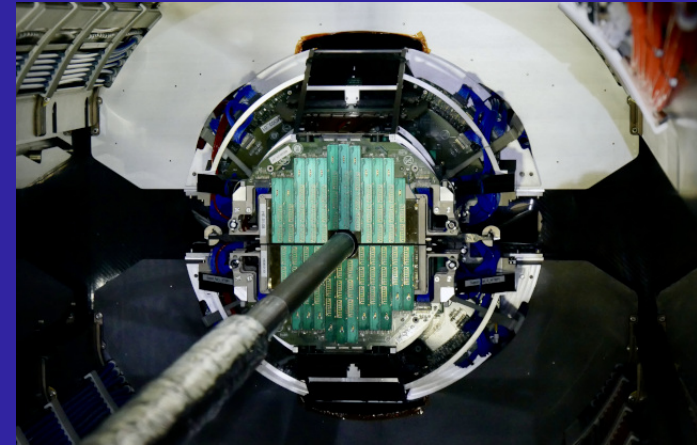
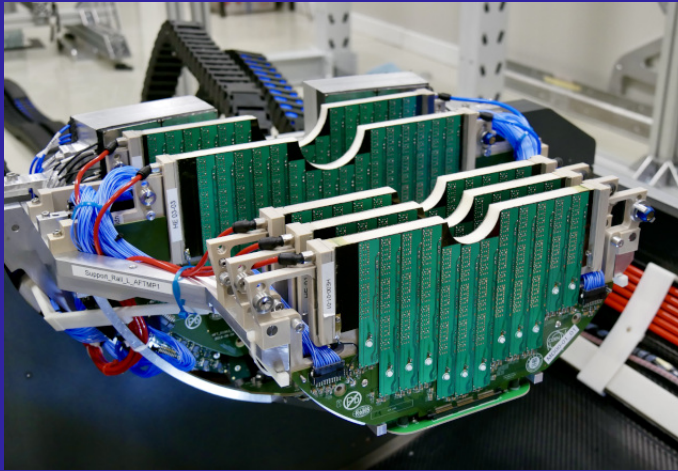
Καινούριοι θάλαμοι για το διάβασμα του σήματος από το TPC



GEMs : Gas electron multipliers

Θα ελαττωθεί ο νεκρός χρόνος του TPC
 Δυνατότητα ανίχνευσης 50 000 συγκρούσεων/sec

Καινούριο σύστημα καταγραφής ιχνών για το φασματόμετρο των μιονίων



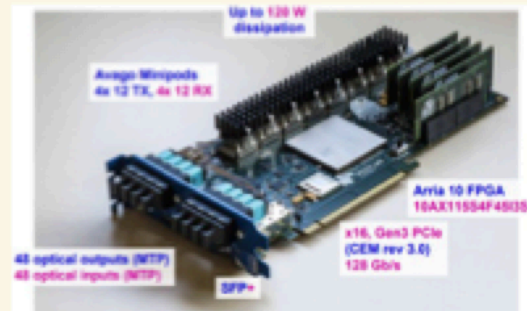
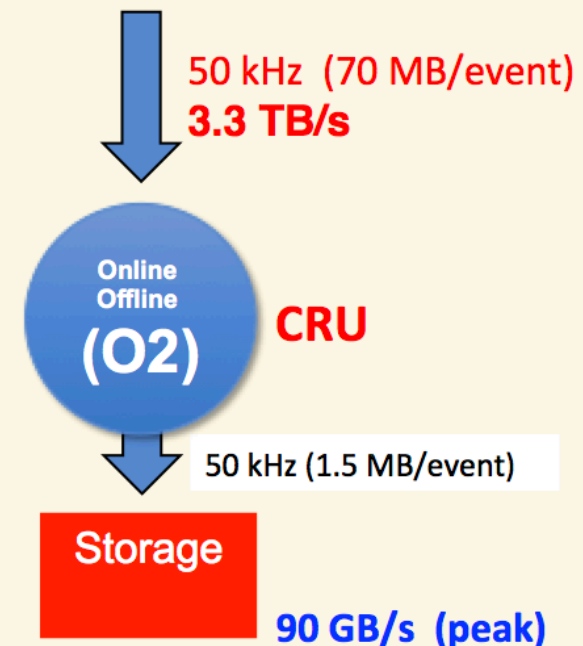
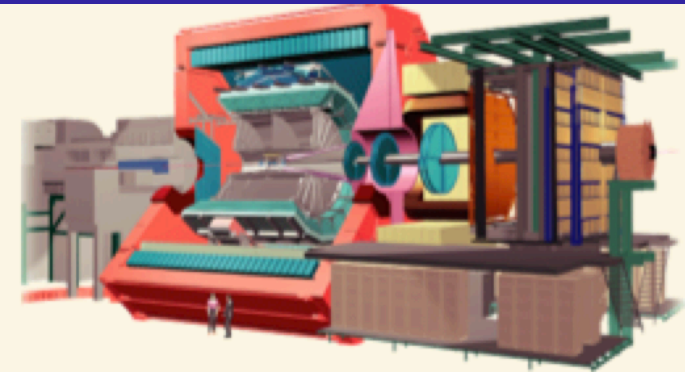
MFT : Muon Forward Tracker

5 δίσκοι από ανιχνευτές πυριτίου που θα αυξήσουν την ακρίβεια στην εύρεση του σημείου προέλευσης των μιονίων

Read-out Architecture

	Before LS2	RUN3
Luminosity	$10^{27} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$6 \times 10^{27} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Collision rate	8 kHz (PbPb)	50 kHz (PbPb)
Max Readout rate	500 Hz (PbPb)	PbPb: 50 kHz pp & pPb: 200 kHz

- Several detectors will have continuous readout to address pileup and avoid trigger-generated dead-time.
- Online/Offline (O2) Facility: to reduce recorded data volume by doing the online reconstruction.
- **Common Readout Unit (CRU)** of O2: tasked to perform data concentration, reconstruction and multiplexing.



CRU FPGA Board:

Αντί συμπεράσματος

- Οι συγκρούσεις βαριών ιόντων ήδη τα πρώτα χρόνια λειτουργίας του LHC επιβεβαίωσαν τα αποτελέσματα 10 χρόνων έρευνας στο RHIC, και έδωσαν καινούρια αποτελέσματα
- Η αυξημένη φωτεινότητα των δεσμών του LHC από το 2022 και μετά σε συνδυασμό με τις αναβαθμισμένες επιδόσεις του ALICE αναμένεται να δώσει αυξημένη ακρίβεια στις μετρήσεις και καινούριους τρόπους μελέτης της συμπεριφοράς και των ιδιοτήτων της πρωταρχικής ύλης του σύμπαντος

Σας ευχαριστώ πολύ

<https://alice.cern>

<http://alice-collaboration.web.cern.ch>

Journey of the beams into the accelerators chain :

<http://cds.cern.ch/record/1228924>

CERN in 3 MINUTES an introduction to CERN <http://cds.cern.ch/record/986165>

ALICE: Voyage inside the core of matter <http://cds.cern.ch/record/1018975?ln=en>

Flying over ALICE :

<https://www.youtube.com/watch?v=yWBWzIUCNpw>

Visit ALICE : write to alice-visits@cern.ch

My email : despina.hatzifotiadou@cern.ch