

ALICE: το πείραμα βαριών ιόντων στο LHC

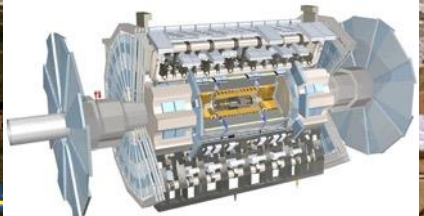
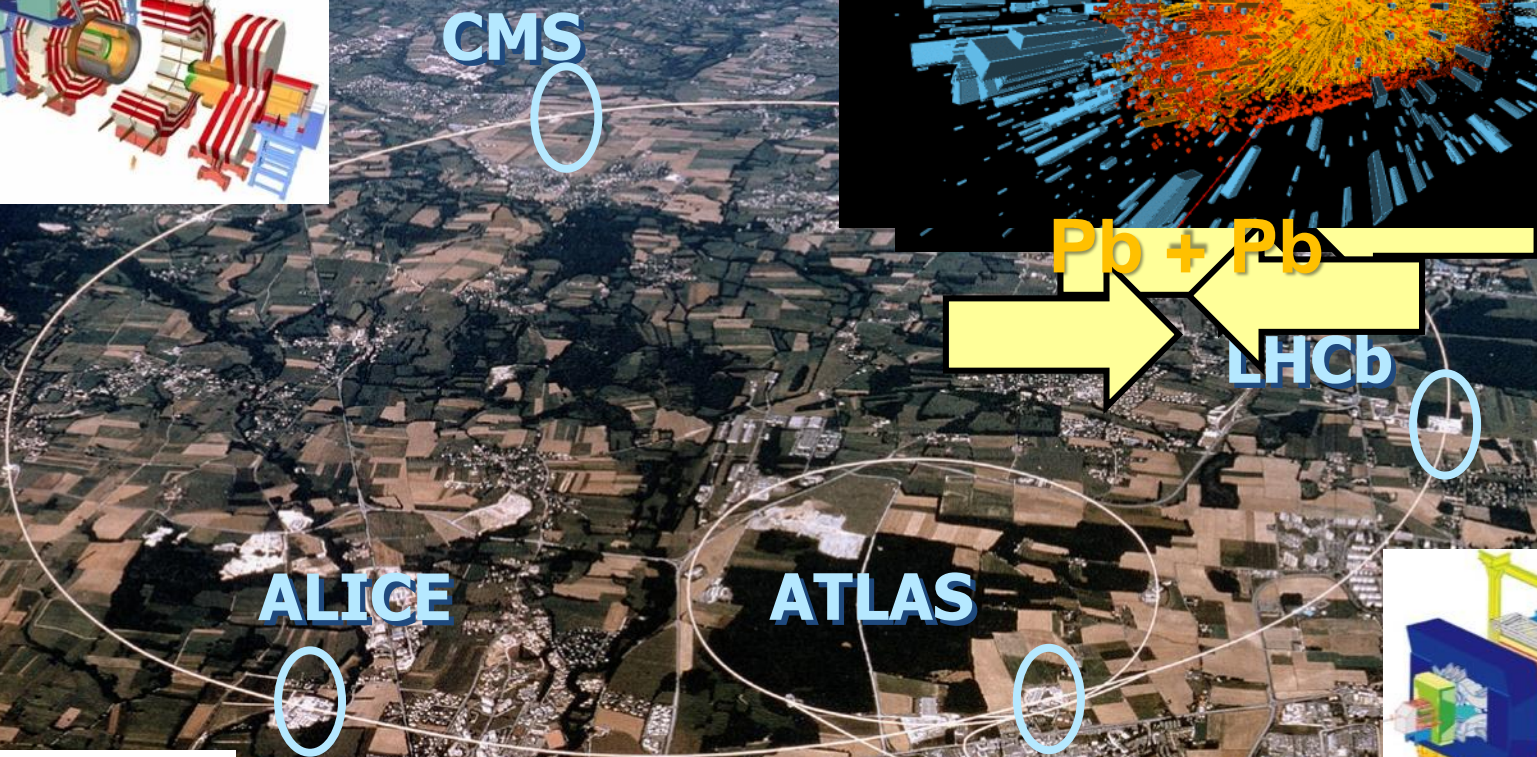
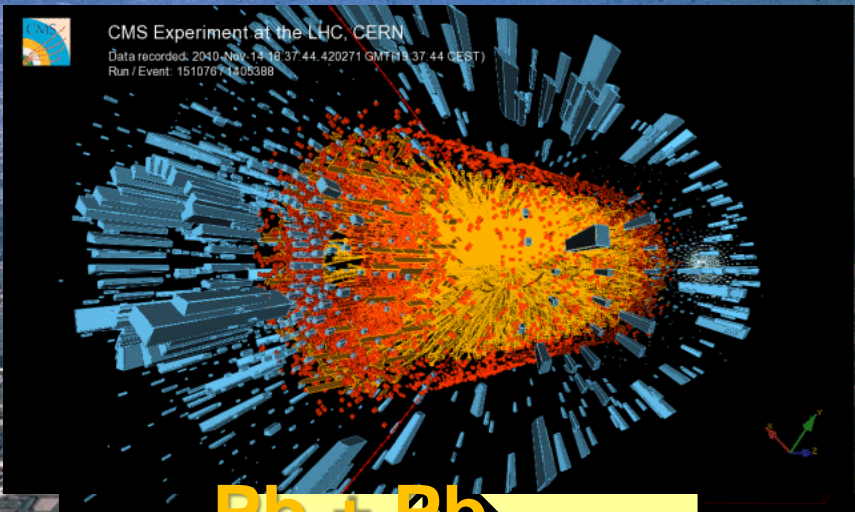
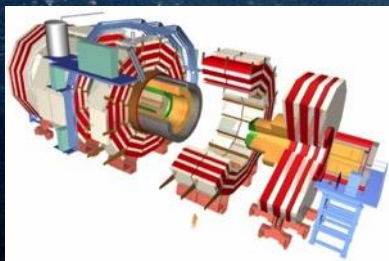
Δέσποινα Χατζηφωτιάδου
INFN Bologna και CERN



Collider of 'Large Hadrons'



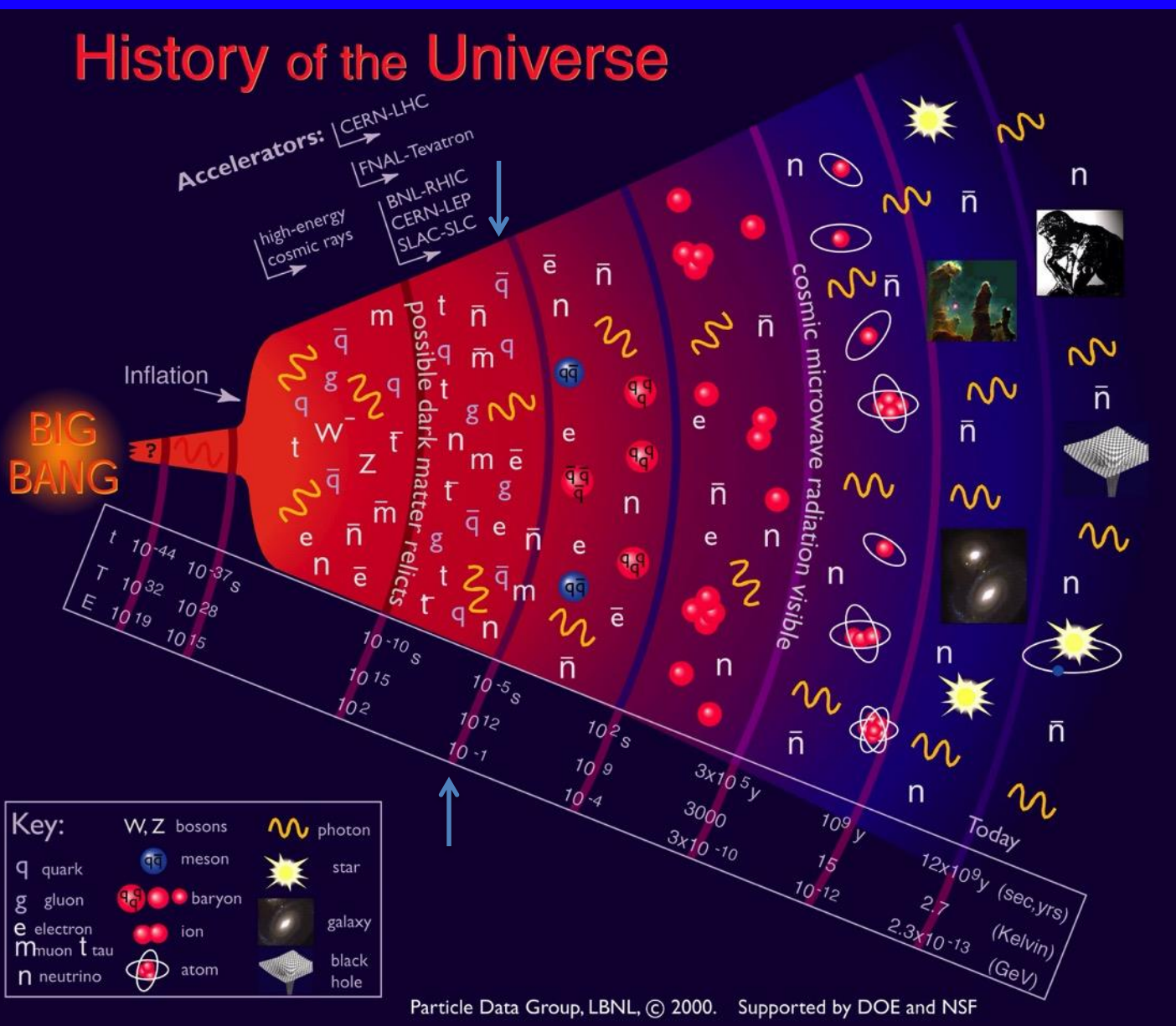
Design Energy:
14 TeV (pp)
1150 TeV (PbPb)



all participate in HI program (4)

Γιατί βαριά ιόντα;

History of the Universe



Εκατομμυριοστά του δευτερολέπτου μετά το Big Bang, όλη η ύλη αποτελείται από κουάρκ και γλουόνια που κινούνται ελεύθερα.
Quark Gluon Plasma

Καθώς το σύμπαν διαστέλεται και φύχεται, τα κουάρκ και τα γλουόνια «φυλακίζονται» μέσα στα αδρόνια, πρωτόνια και νετρόνια

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

LHC: Εκατομμυριοστά του δευτερολέπτου μετά το Big Bang

13.7 δισεκατομμύρια χρόνια

σήμερα

Mini Big Bang

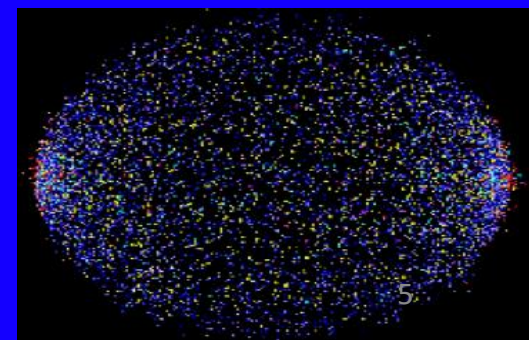
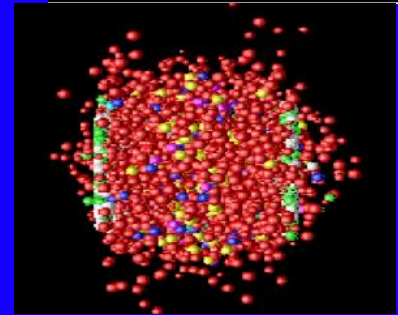
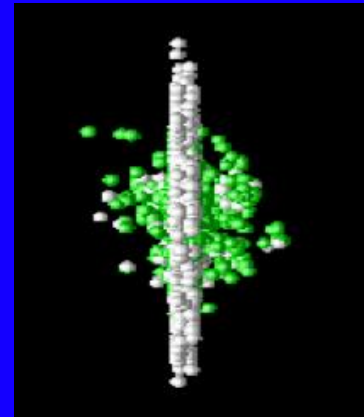
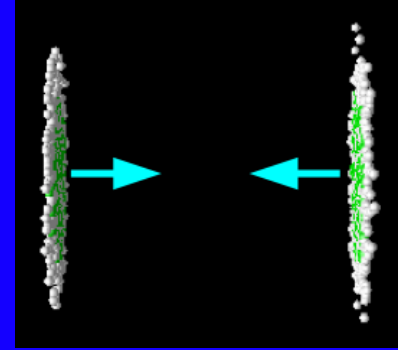
Συγκρούοντας πυρήνες μολύβδου με πολύ υψηλή ενέργεια αναδημιουργούμε τις συνθήκες πυκνότητας και θερμοκρασίας που υπήρχαν κλάσματα του δευτερολέπτου μετά το Big Bang

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

που ζει ελάχιστα

Μελετώντας τις ιδιότητές της

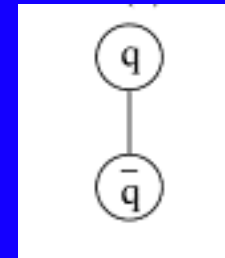
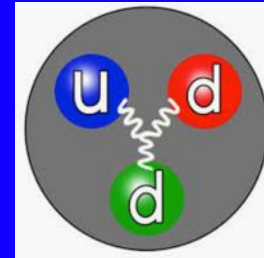
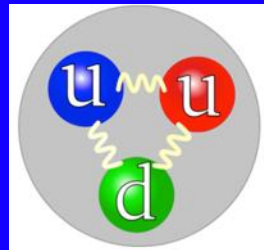
- Θα κατανοήσουμε καλύτερα τις διαδικασίες που συνέβησαν τα πρώτα κλάσματα του δευτερολέπτου στη ζωή του σύμπαντος
- Θα κατανοήσουμε καλύτερα την ισχυρή αλληλεπίδραση



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

	I	II	III	
mass →	2.3 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	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
Leptons	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 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 ⁰ 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)

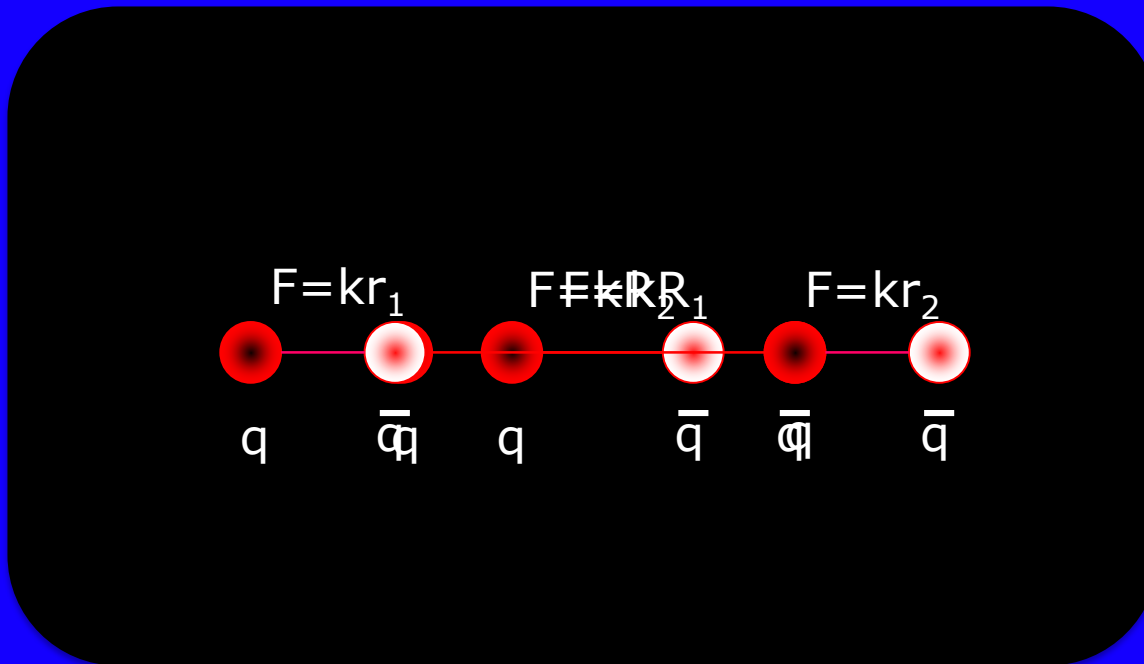
- Τα κουάρκ έχουν ένα φορτίο χρώματος (R,B,G) που έχει εισαχθεί για να εξηγήσει την σύνθεση
 - των βαρυονίων (3 κουάρκ ή αντικουάρκ)
 - και των μεσονίων (ζεύγος κουάρκ - αντικουάρκ) αντικείμενα χωρίς χρώμα



- 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

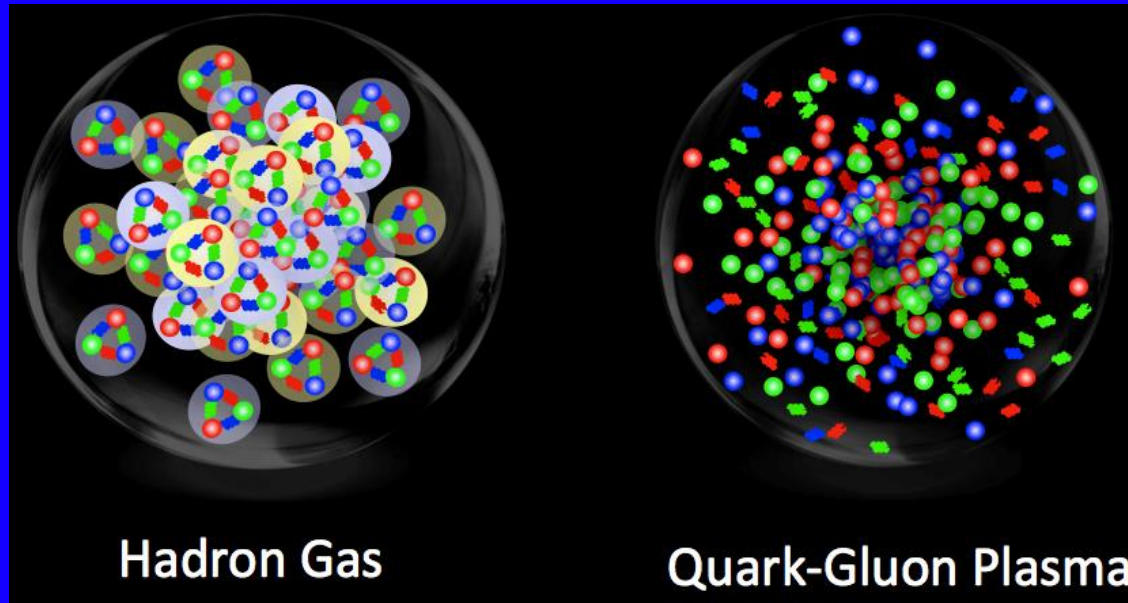
Quark Confinement

Ας προσπαθήσουμε να διαχωρήσουμε τα δύο κουάρκ ενός μεσονίου



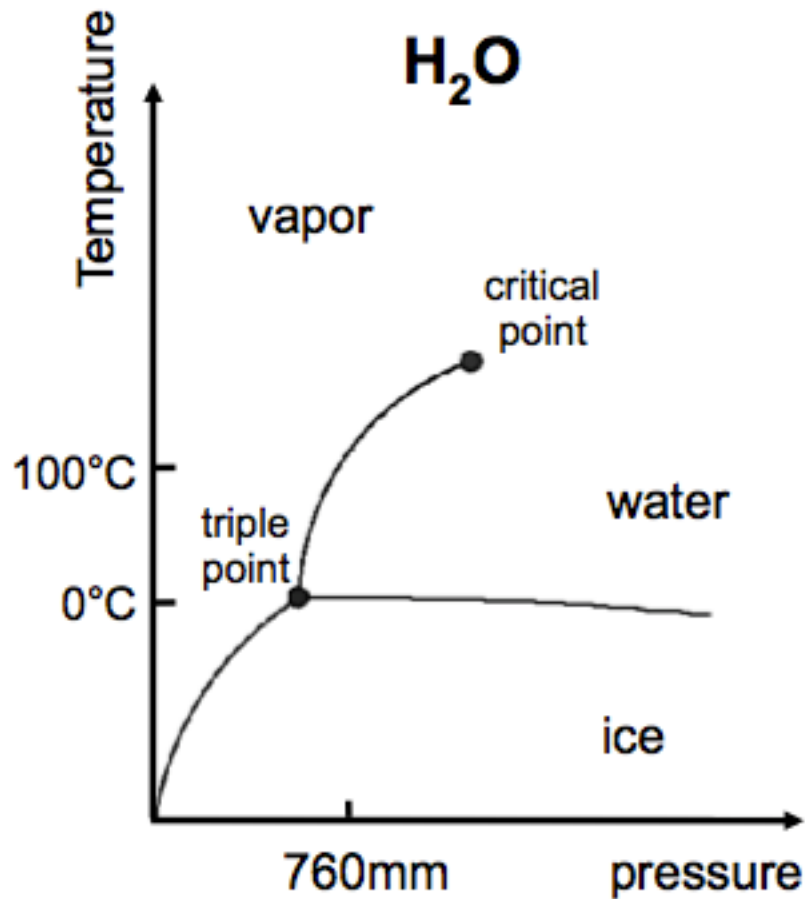
... deconfinement : Quark Gluon Plasma

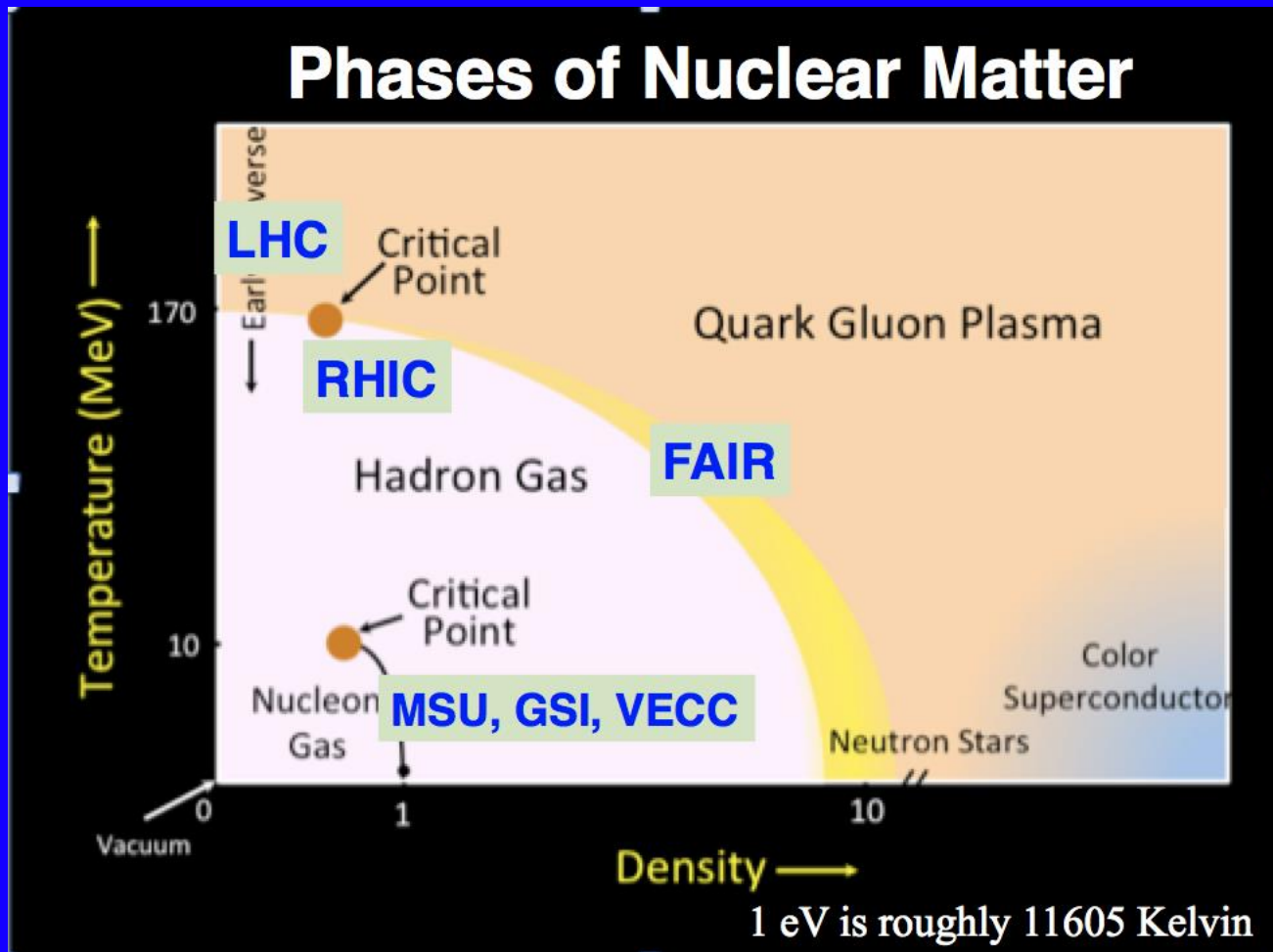
Εφόσον οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ κουάρκ και γλουονίων γίνονται ασθενέστερες στις μικρές αποστάσεις, δημιουργώντας ένα σχετικά εκτεταμένο σύστημα με υψηλή πυκνότητα/θερμοκρασία που αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό κουάρκ και γλουονίων, δημιουργούμε μια “deconfined” κατάσταση της ύλης (ελεύθερα κουάρκ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



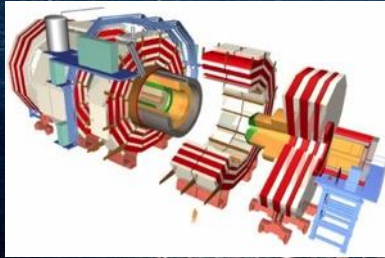


- Πώς μπορούμε να “εξερευνησουμε” αυτό το διάγραμμα φάσης;
- Δημιουργώντας **εκτεταμένα συστήματα κουάρκ και γλουονίων** σε υψηλή θερμοκρασία και/ή βαρυονική πυκνότητα \rightarrow **με συγκρούσεις βαριών ιόντων**

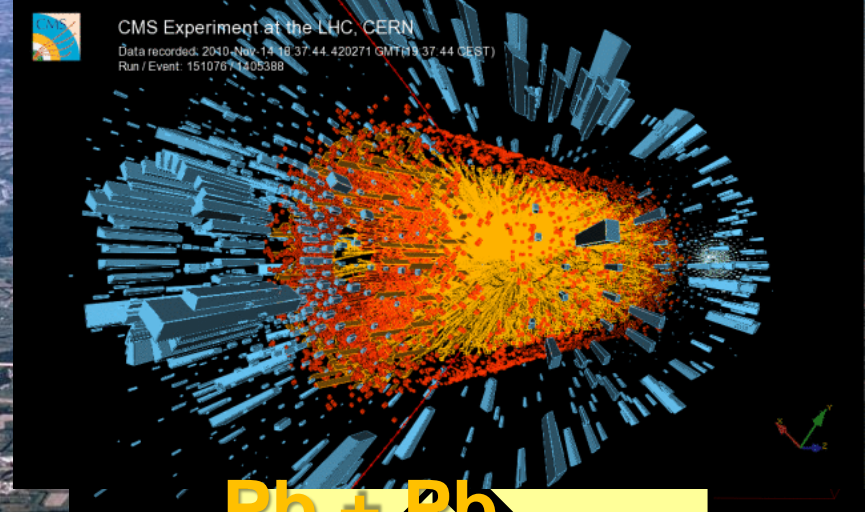
Collider of 'Large Hadrons'



14 TeV (pp)
1150 TeV (PbPb)



CMS



Pb + Pb



LHCb

ALICE

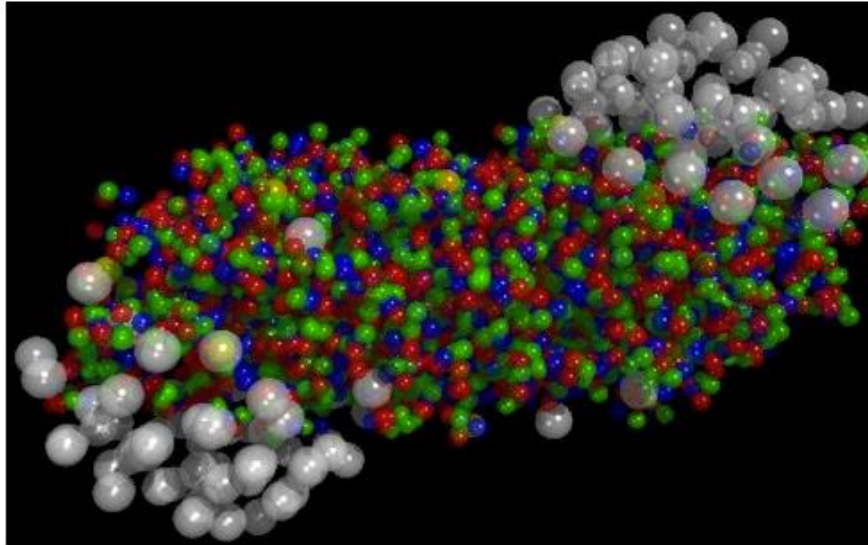
ATLAS



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.

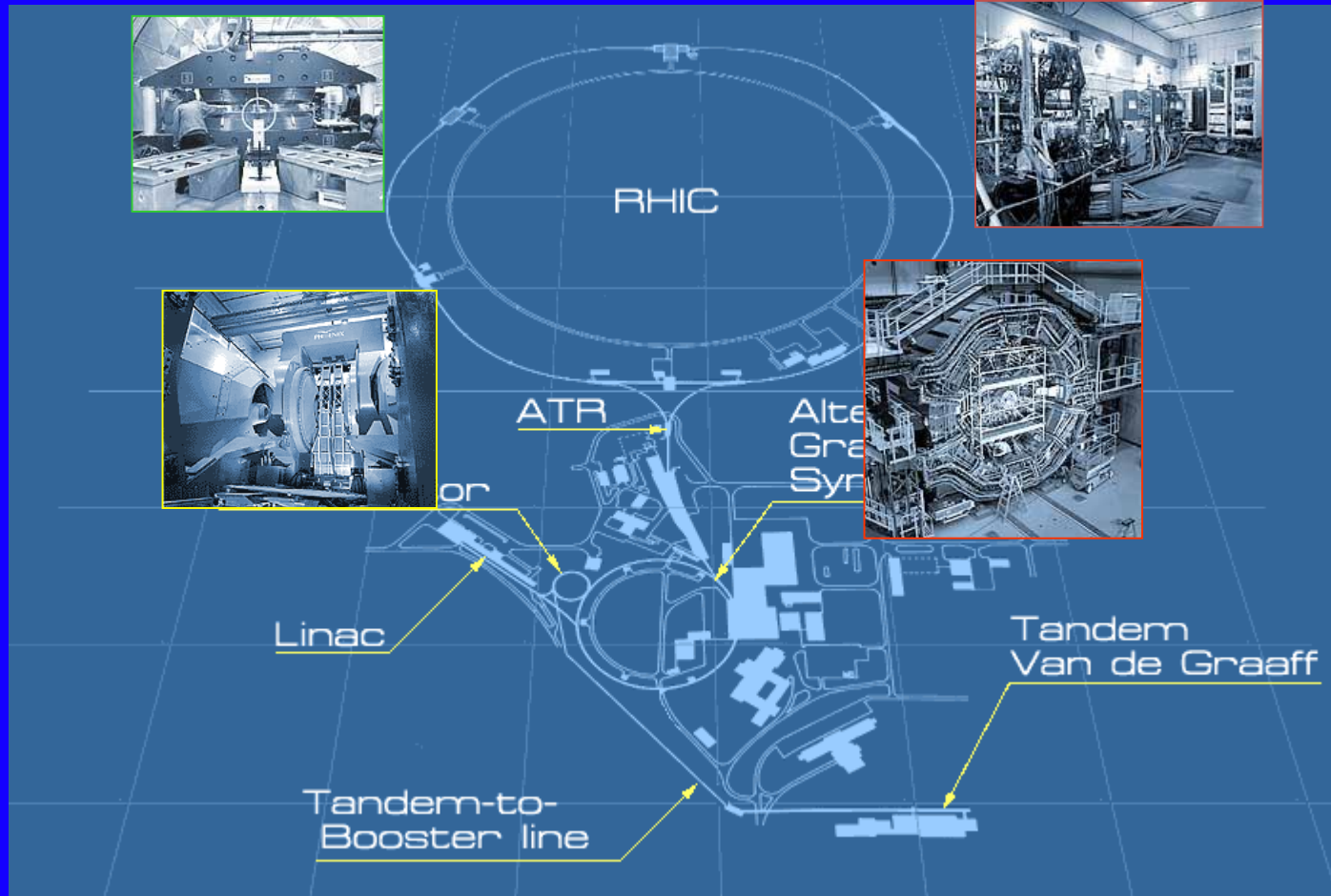
Theory predicts that this state must have existed at about 10 microseconds after the Big Bang, before the formation of matter as we know it today, but until now it had not been confirmed experimentally. Our understanding of how the universe was created, which was previously unverified theory for any 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)**
 - Μέγιστη ενέργεια $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$



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

Βαριά ιόντα στο LHC

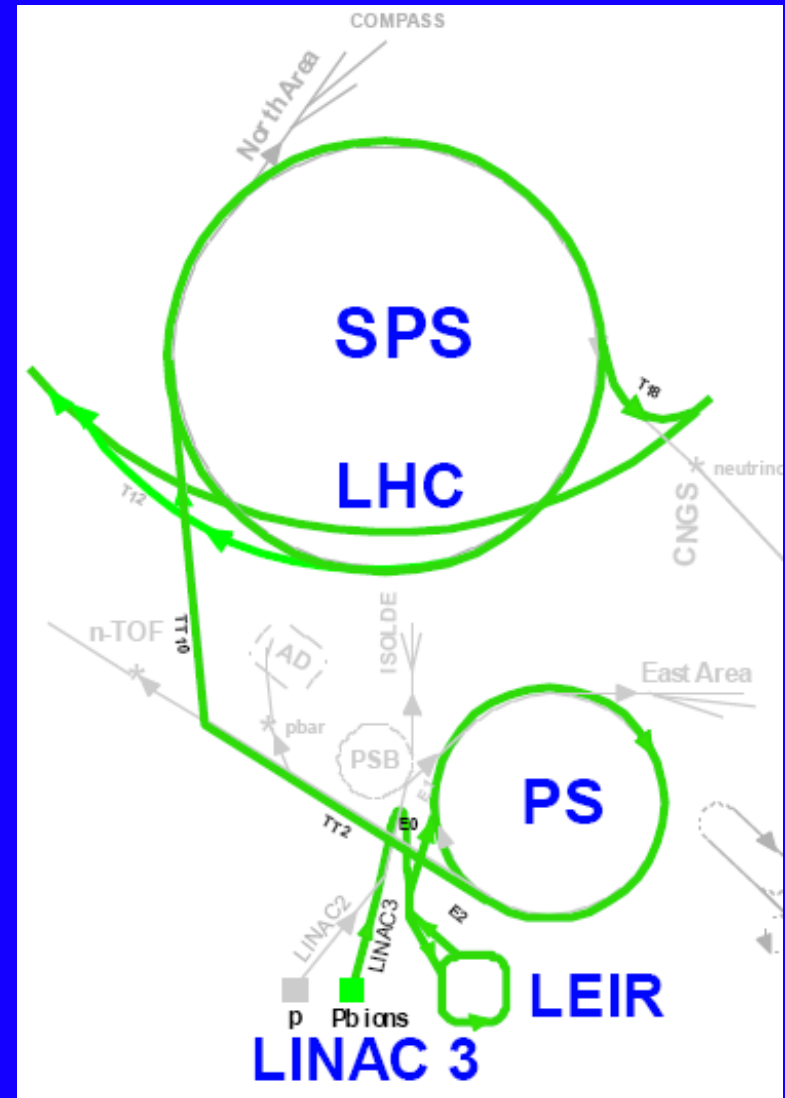
Μικρή ράβδος μολύβδου Pb^{208}
(2 cm, 500 mg) θερμαίνεται σε
500°C και εξαερώνεται. Ένα
ισχυρό ηλεκτρικό ρεύμα βγάζει
ηλεκτρόνια από τα άτομα



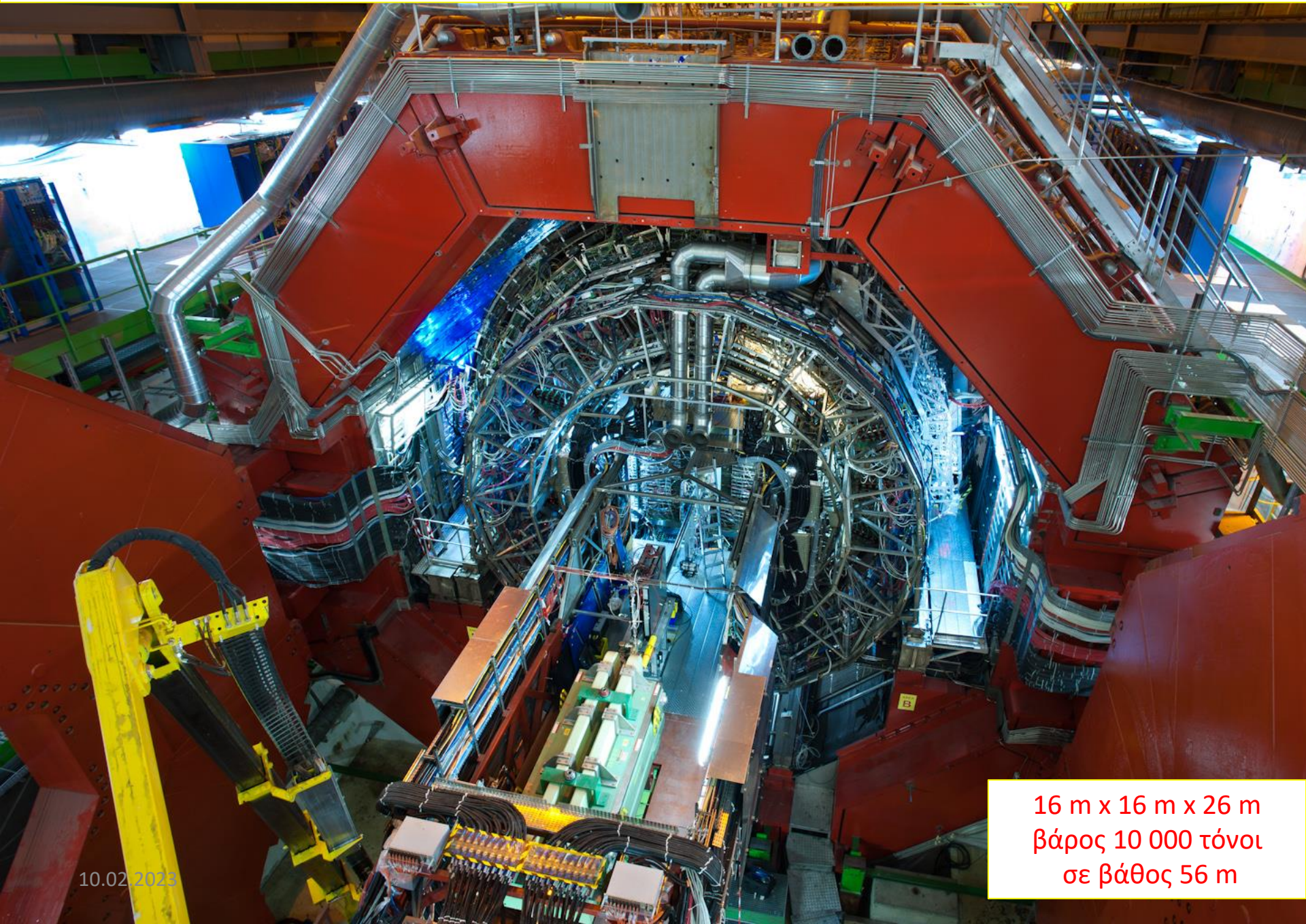
ισότοπο Pb^{208}
82 πρωτόνια
126 νετρόνια

Heavy Ions at CERN

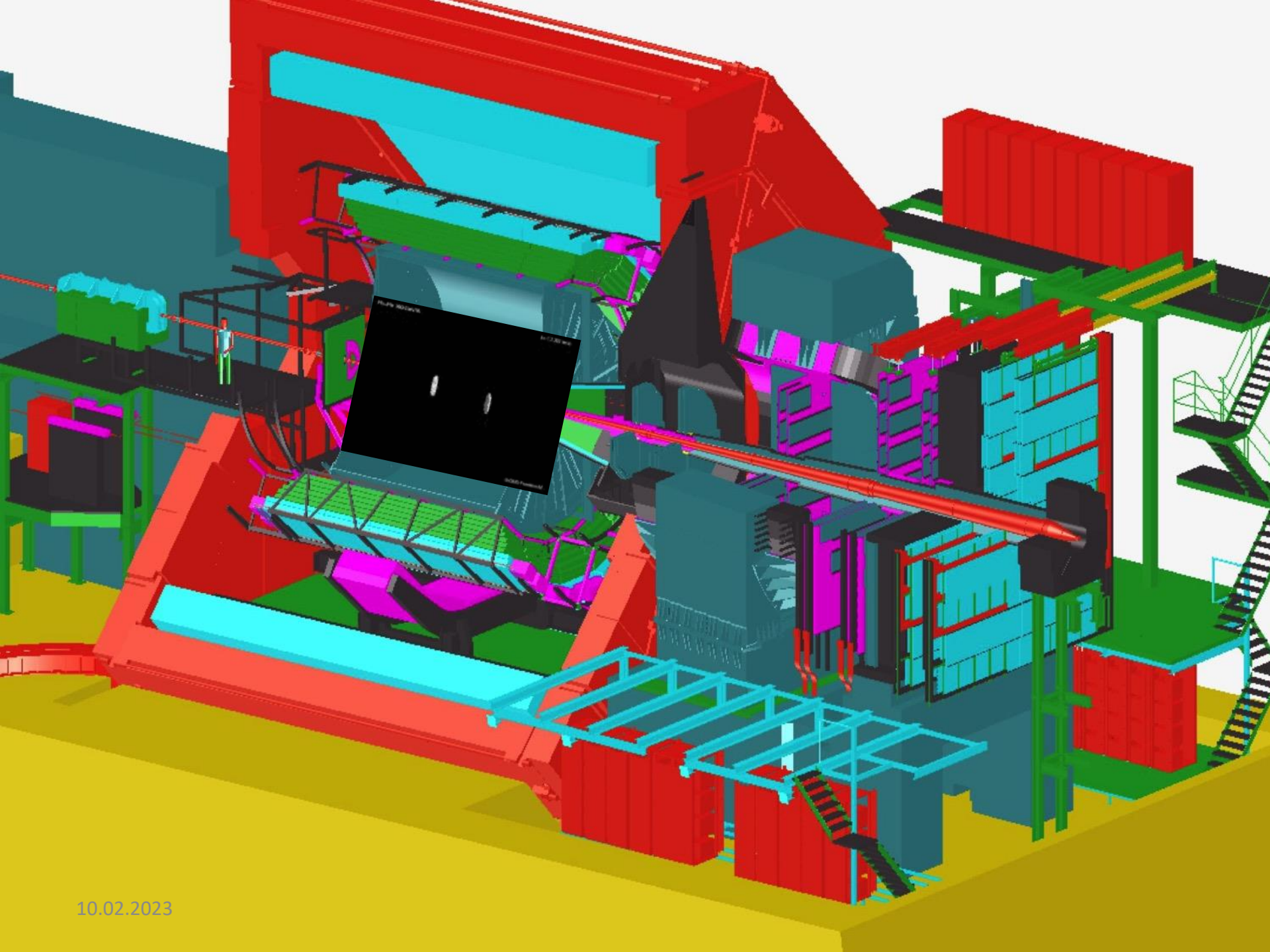
- Acceleration of Pb ions:
 - ECR source: Pb^{27+} (80 mA)
 - RFQ: Pb^{27+} to 250 A keV
 - Linac3: Pb^{27+} to 4.2 A MeV
 - Stripper: Pb^{53+}
 - LEIR: Pb^{53+} to 72 A MeV
 - PS: Pb^{53+} to 4.25 A GeV
 - Stripper: Pb^{82+} (full ionisation)
 - SPS: Pb^{82+} to 158 A GeV
 - LHC: Pb^{82+} to 2.76 A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



ALICE : A Large Ion Collider Experiment

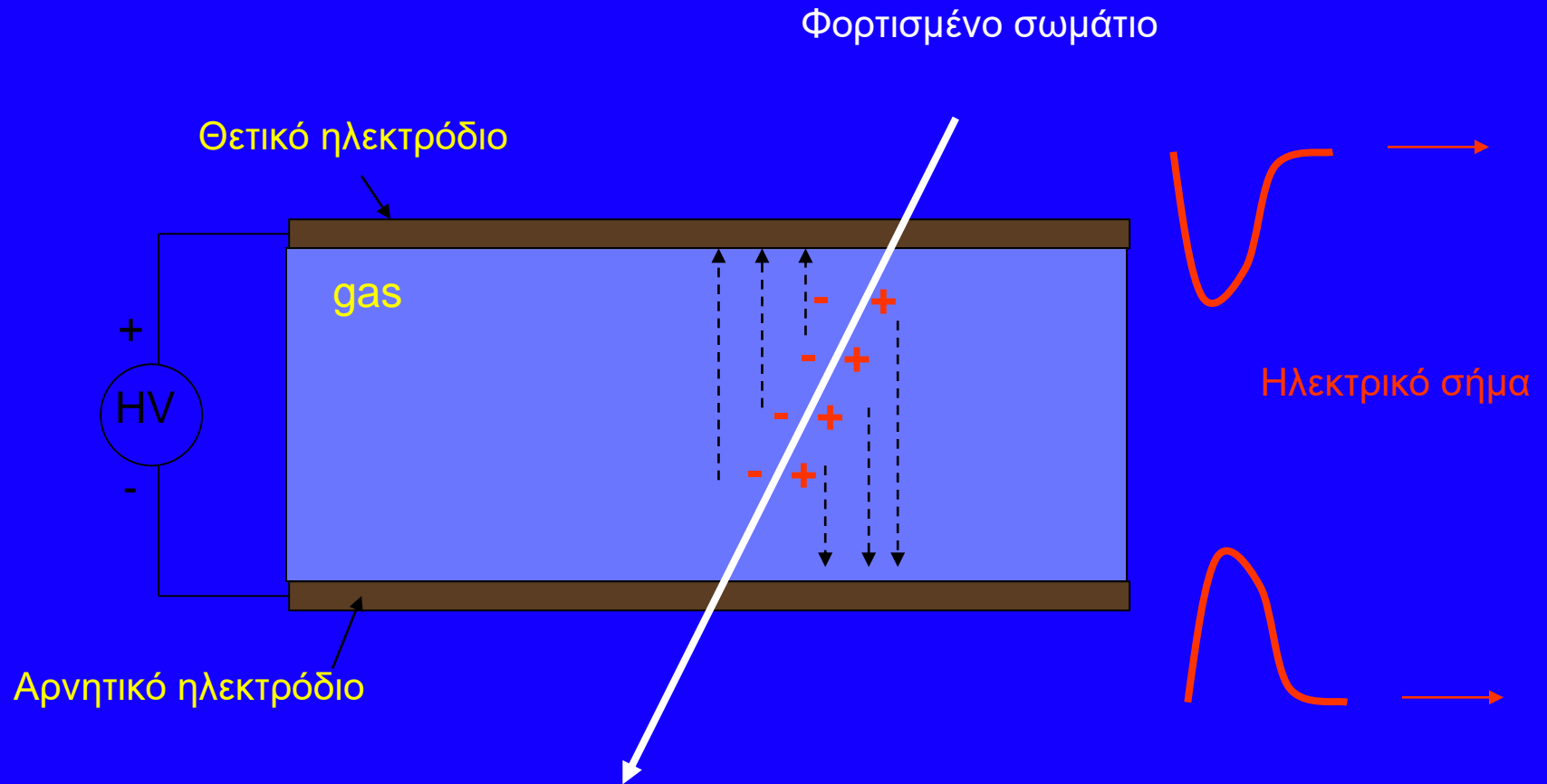


16 m x 16 m x 26 m
βάρος 10 000 τόνοι
σε βάθος 56 m

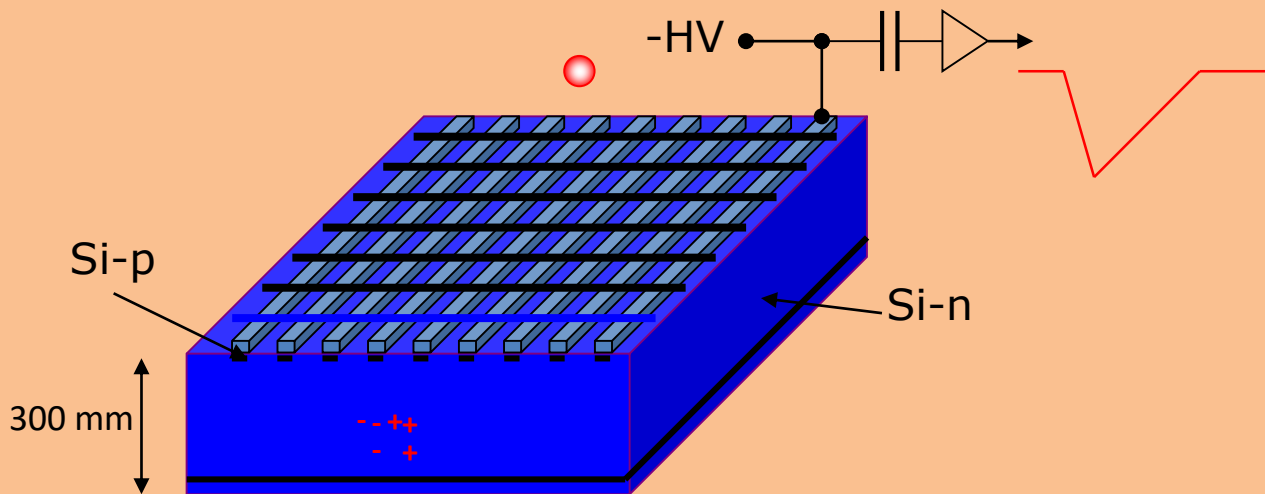


10.02.2023

Ανιχνευτές αερίου: αρχή λειτουργίας ΙΟΝΙΣΜΟΣ



Ανιχνευτές πυριτίου



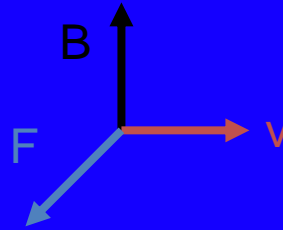
2D πληροφορία θέσης για την ανακατασκευή των ιχνών και την εύρεση του σημείου προέλευσης φορτισμένων σωματιδίων

Μέτρηση ορμής φορτισμένου σωματιδίου

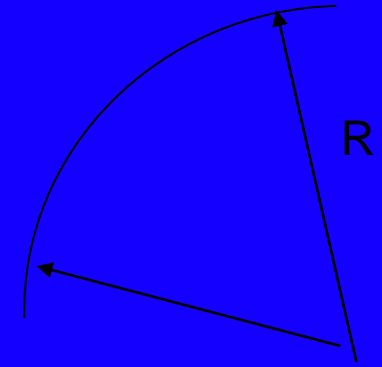
Από την καμπύλωση της τροχιάς μέσα σε μαγνητικό πεδίο
Δύναμη Lorentz

$$|F| = q v B$$

$$R = p/qB \quad p = RqB$$

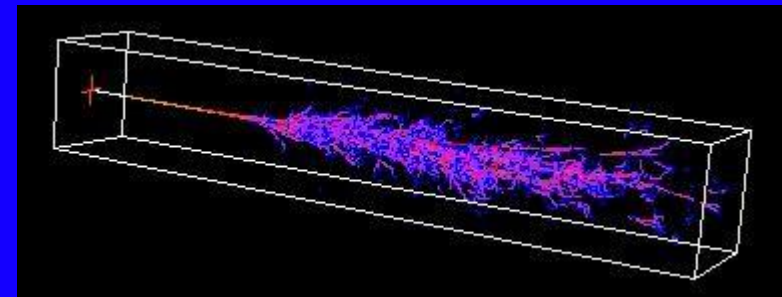


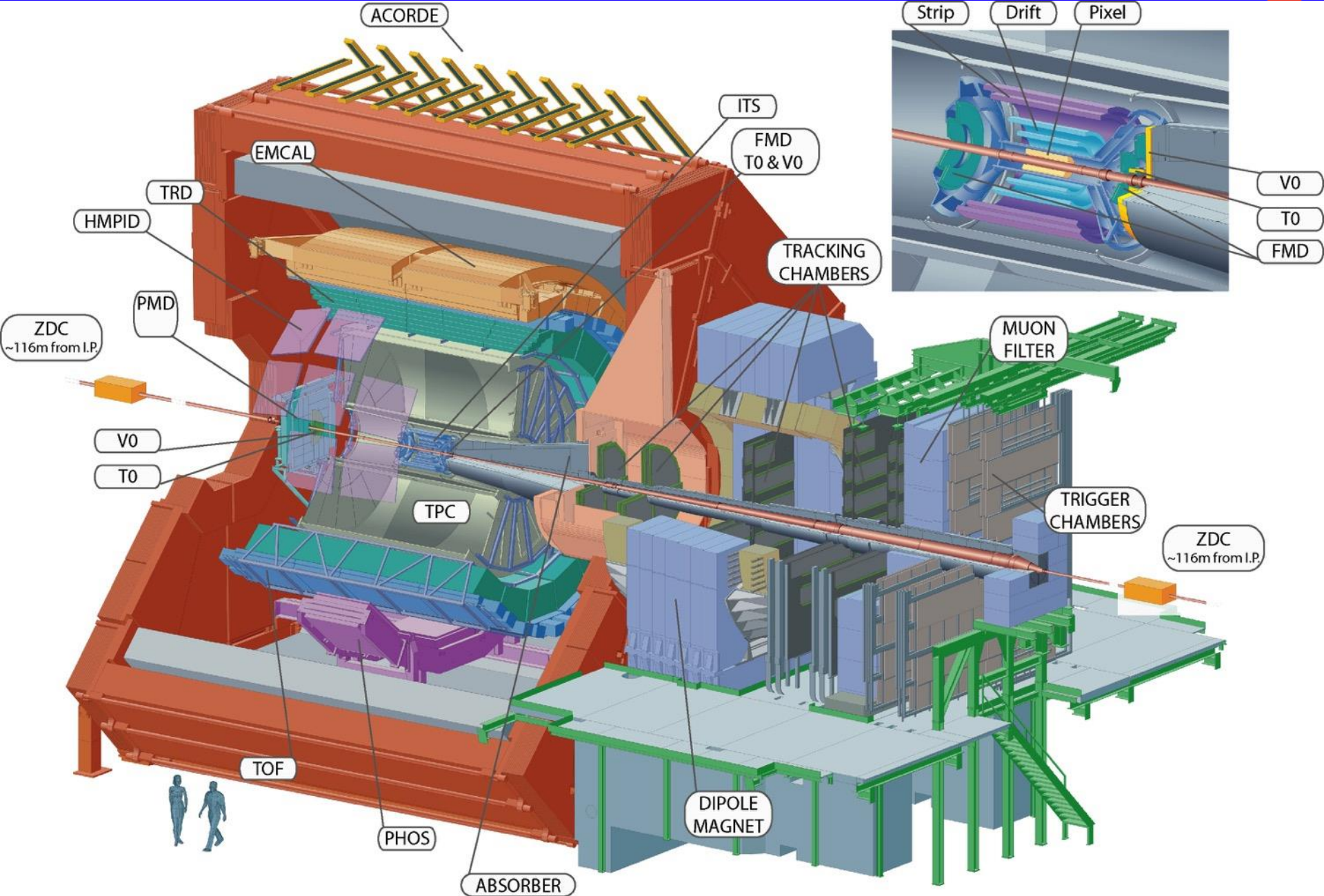
Η καμπύλωση είναι αντιστρόφως ανάλογη της ορμής
Η ακτίνα καμπυλότητας είναι ανάλογη της ορμής



Μέτρηση ενέργειας

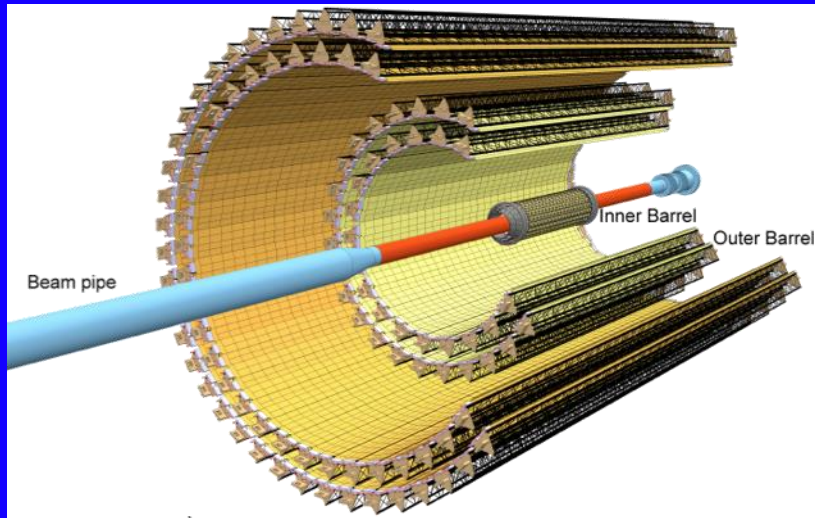
Τα σωματάρια σταματούν
Η ενέργειά τους αποτίθεται στα
καλορίμετρα





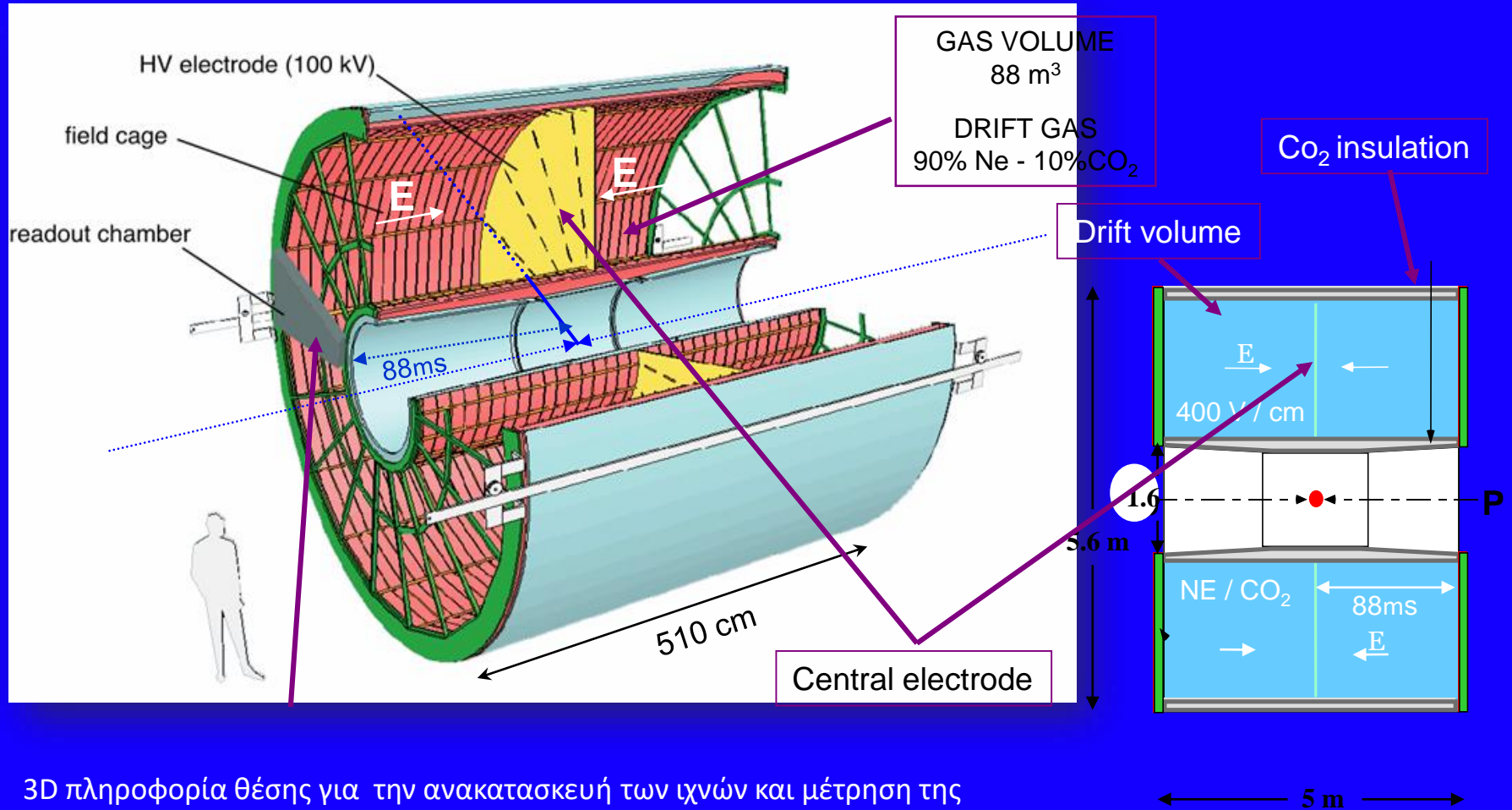
Το πείραμα ALICE (όπως ήταν μέχρι το τέλος του 2018)

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

Time Projection Chamber

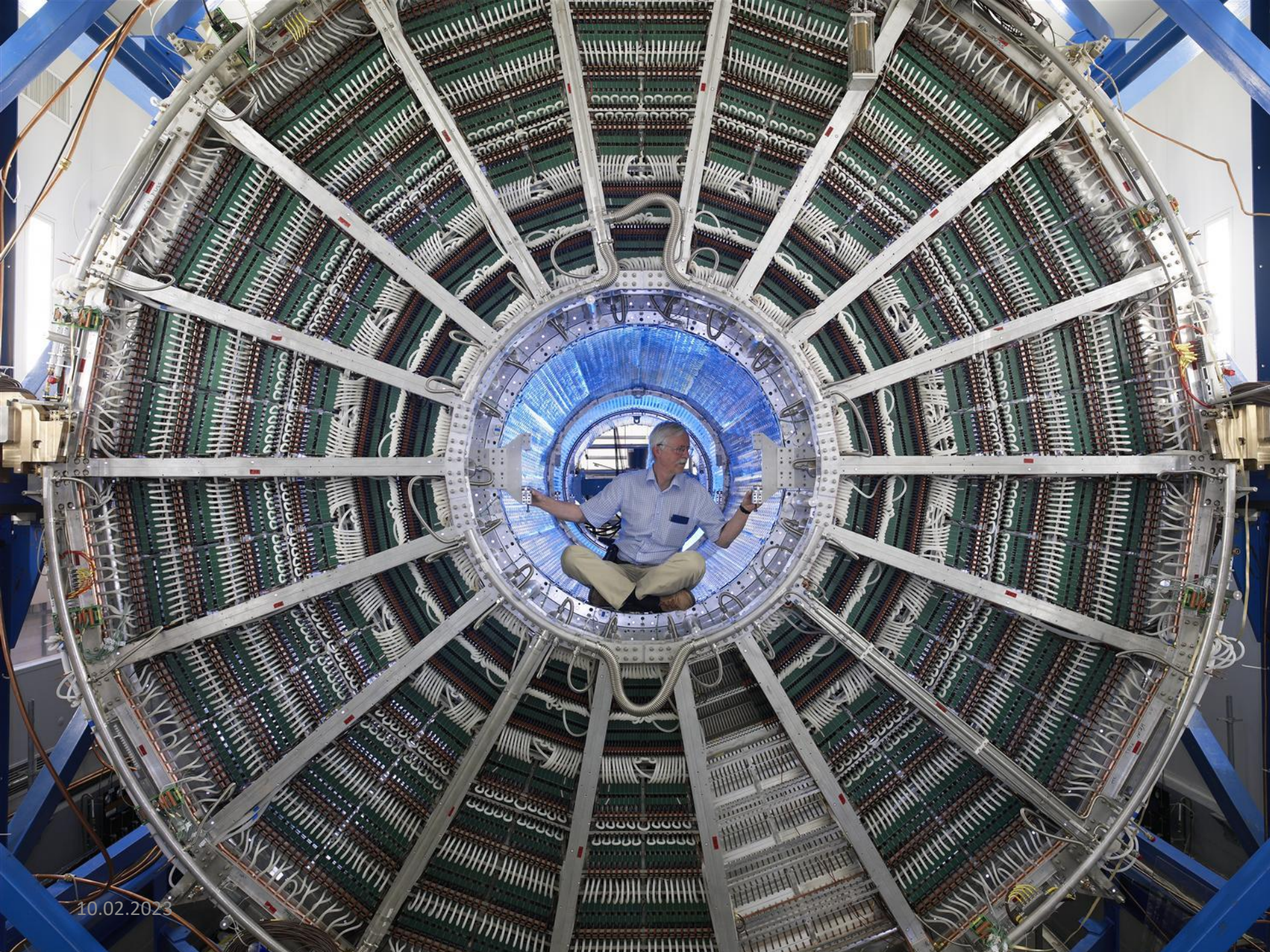


3D πληροφορία θέσης για την ανακατασκευή των ιχνών και μέτρηση της αποτιθέμενης ενέργειας/ταυτοποίηση φορτισμένων σωματιδίων



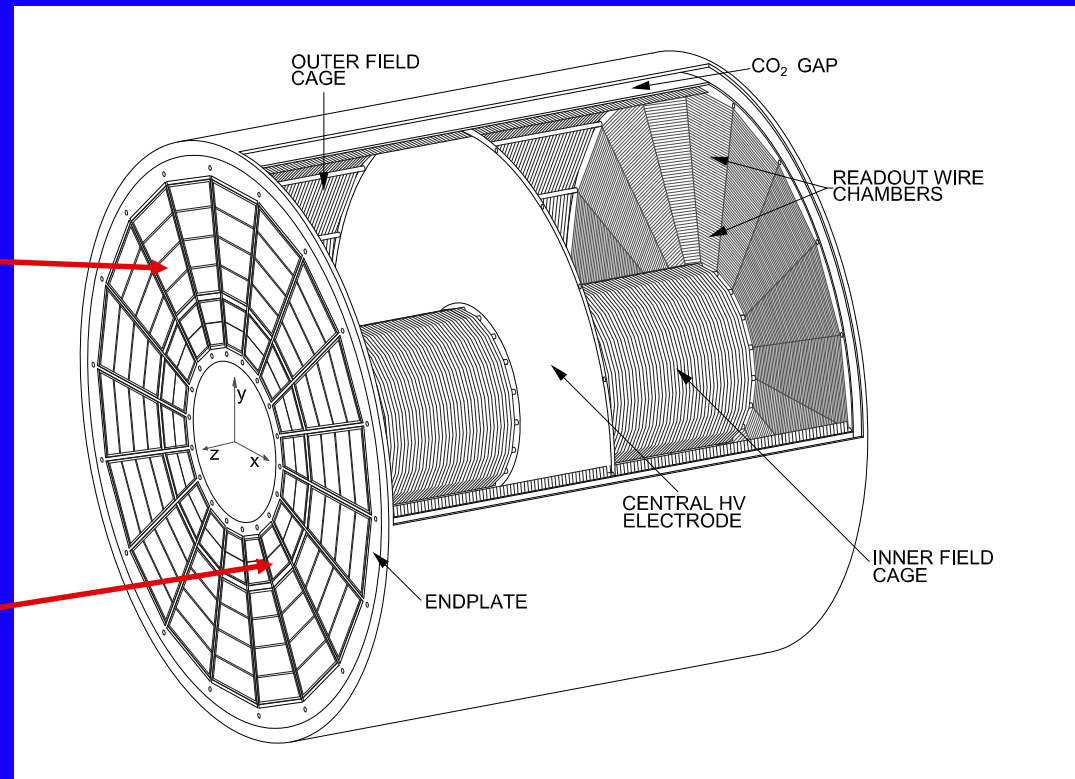
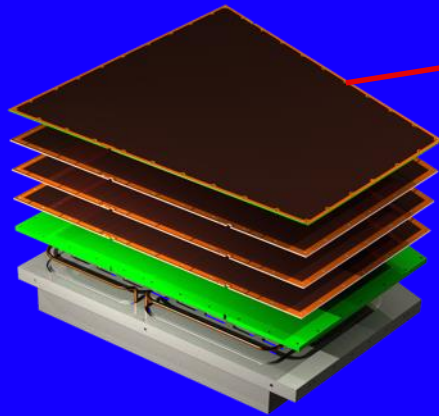
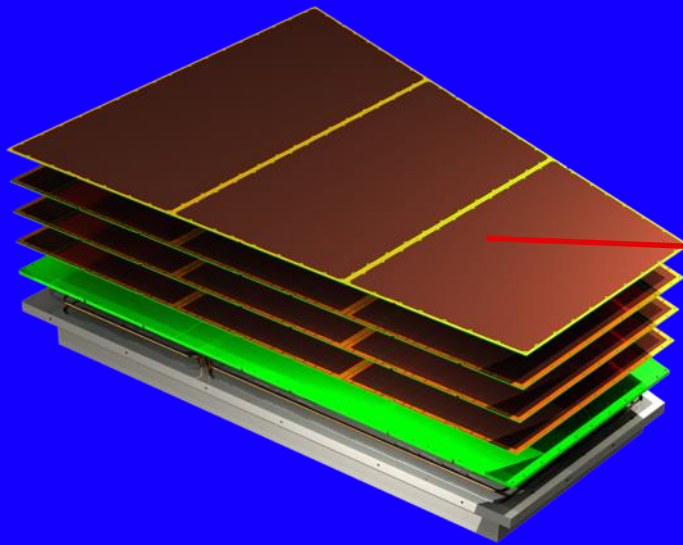
10.02.2023

photo by michael hoch



10.02.2023

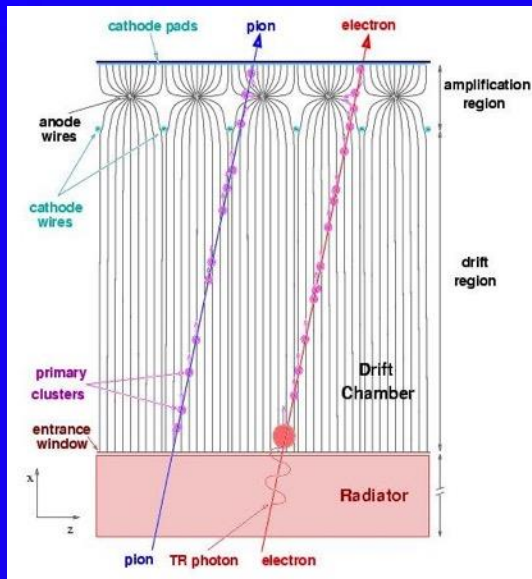
Καινούριοι θάλαμοι για το διάβασμα του σήματος από το TPC



GEMs : Gas electron multipliers

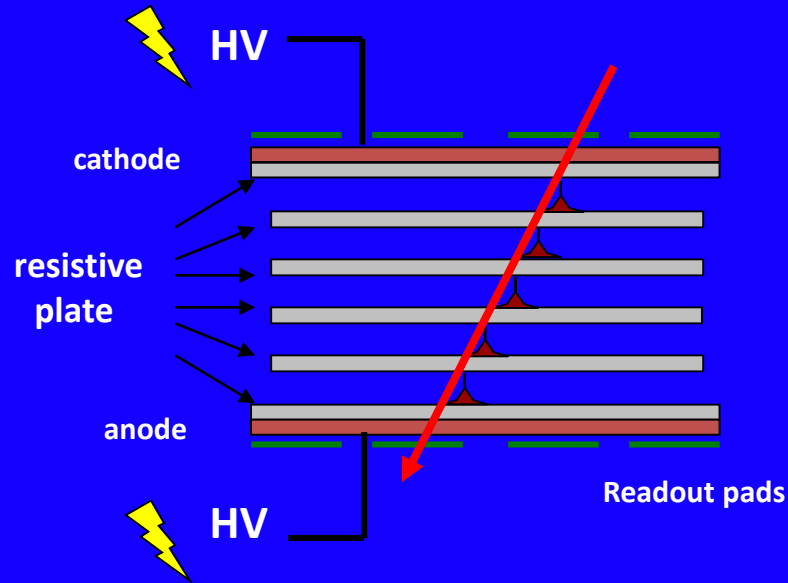
Θα ελαττωθεί ο νεκρός χρόνος του TPC
 Δυνατότητα ανίχνευσης 50 000 συγκρούσεων/sec

Transition Radiation Detector



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

Time of Flight

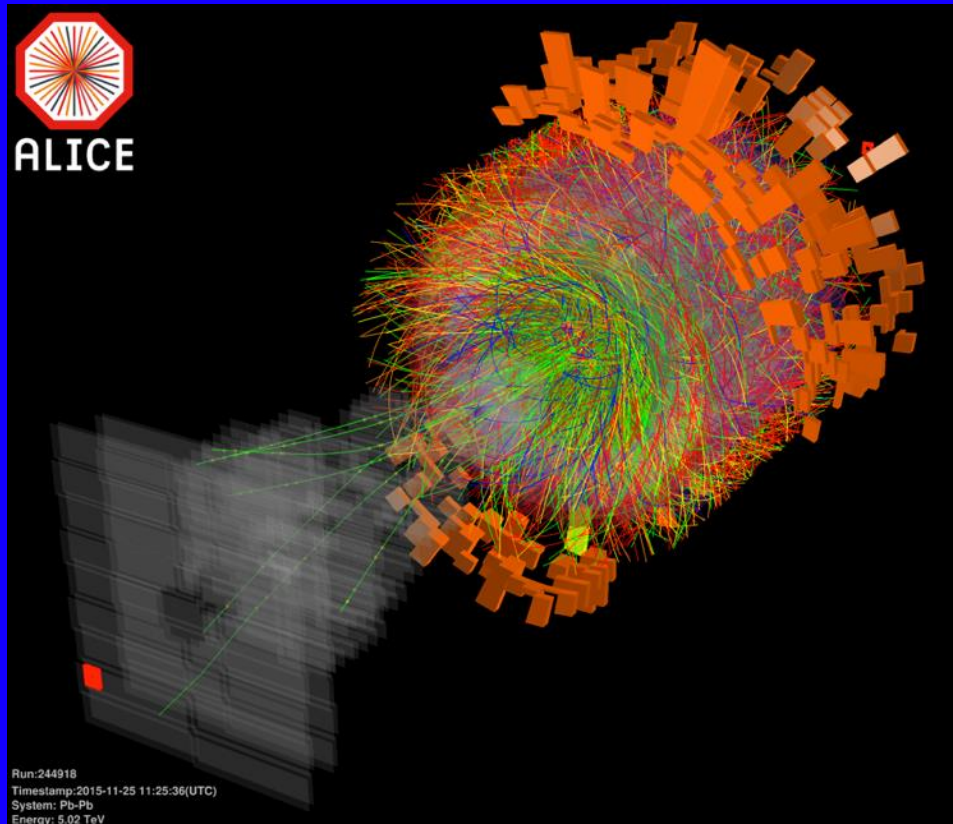


Multigap Resistive Plate Chamber

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

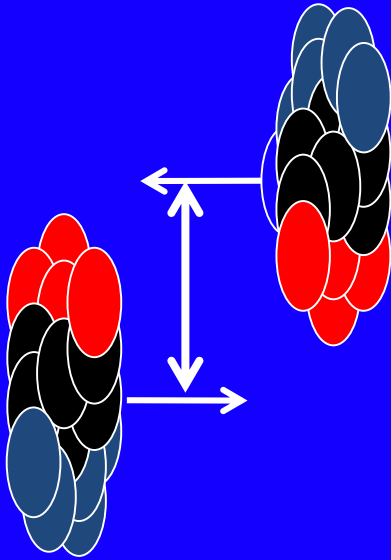
Το σημείο από το οποίο προέρχονται
(το σημείο της σύγκρουσης, primary
vertex ή άλλο, secondary vertex αν
πρόκειται για προϊόντα διάσπασης)

Το ίχνος (τροχιά) και την ορμή

Την ενέργεια ηλεκτρονίων / φωτονίων

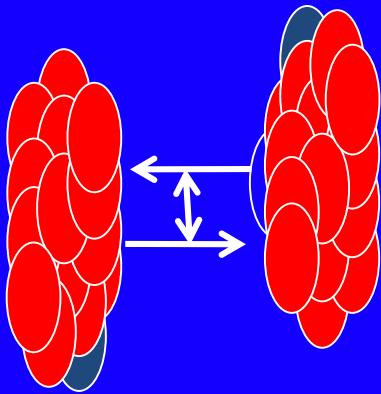
Το είδος του σωματιδίου

Γεωμετρία της σύγκρουσης Pb-Pb (centrality)



Περιφερειακή σύγκρουση

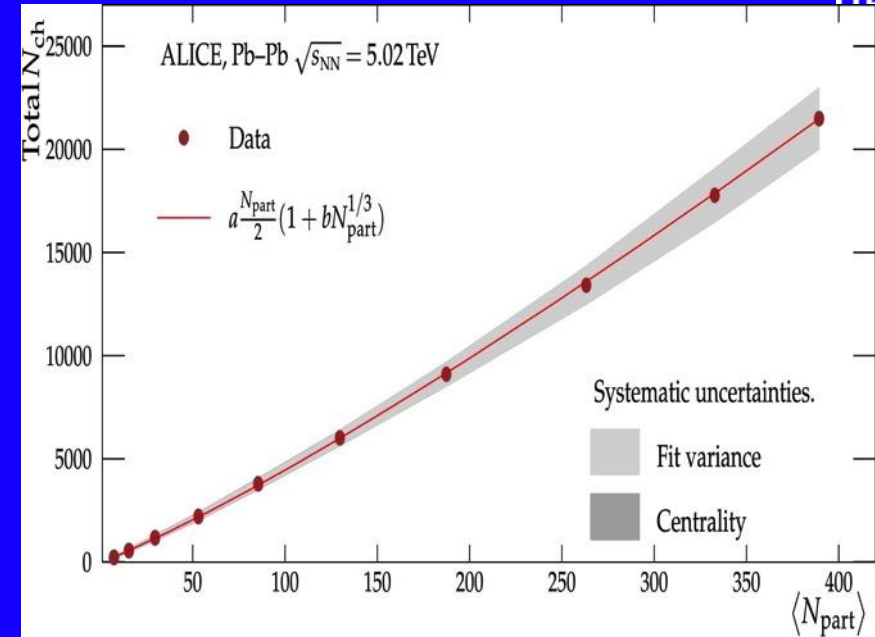
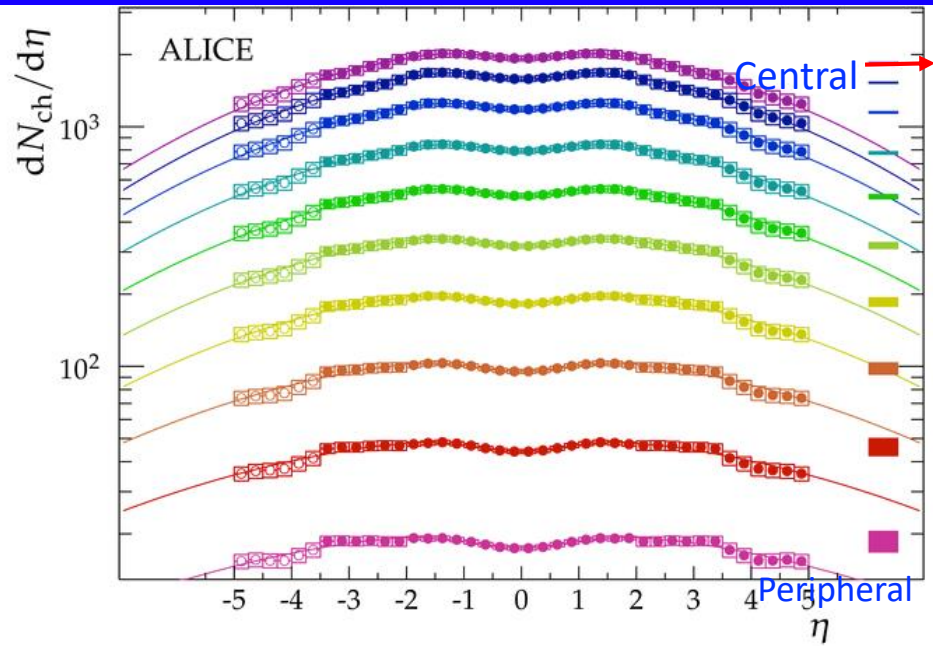
- Μεγάλη απόσταση ανάμεσα στα κέντρα των πυρήνων
- Μικρός αριθμός νουκλεονίων που συμμετέχουν → παράγονται λίγα φορτισμένα σωμάτια (μικρή πολλαπλότητα)



Κεντρική σύγκρουση

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

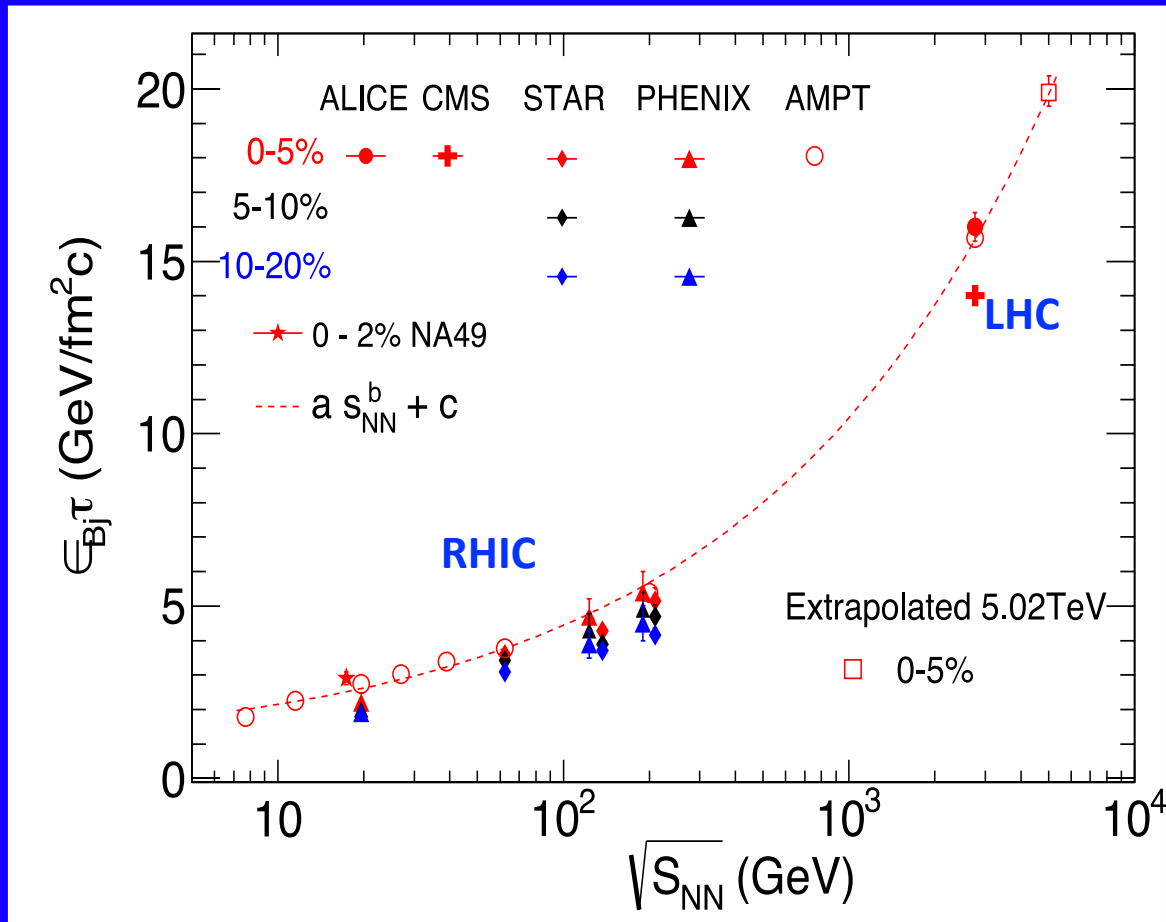
Πολλαπλότητα φορτισμένων σωματιδίων



N_{part} : αριθμός νουκλεονίων που συμμετέχουν στην αλληλεπίδραση

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

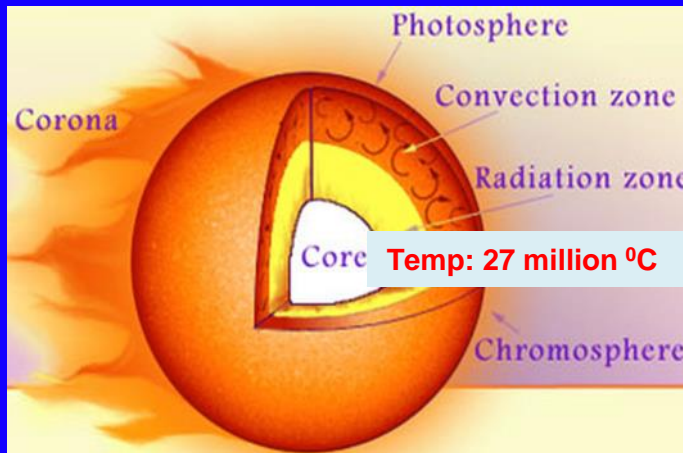
Ενεργειακή πυκνότητα



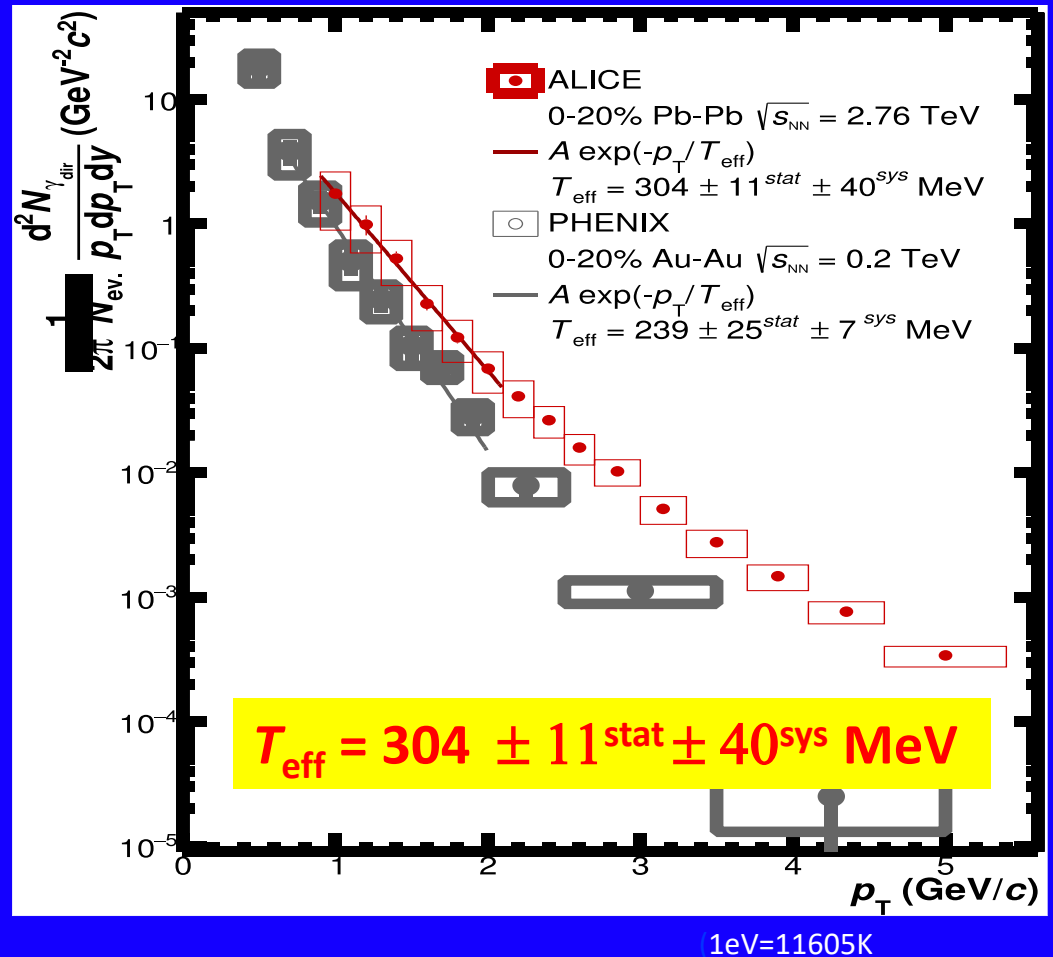
Από τον αριθμό των φορτισμένων σωματιδίων βρίσκουμε την πυκνότητα ενέργειας **15 GeV / fm³** (3 φορές μεγαλύτερη από ότι στο RHIC) και την αρχική θερμοκρασία του συστήματος 30% υψηλότερη από ότι στο RHIC

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.



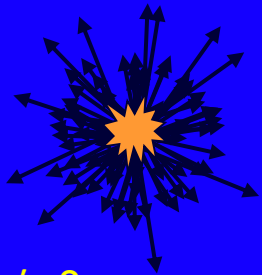
150 000 φορές υψηλότερη από τη θερμοκρασία στο κέντρο του ήλιου



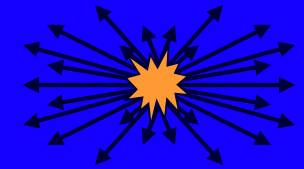
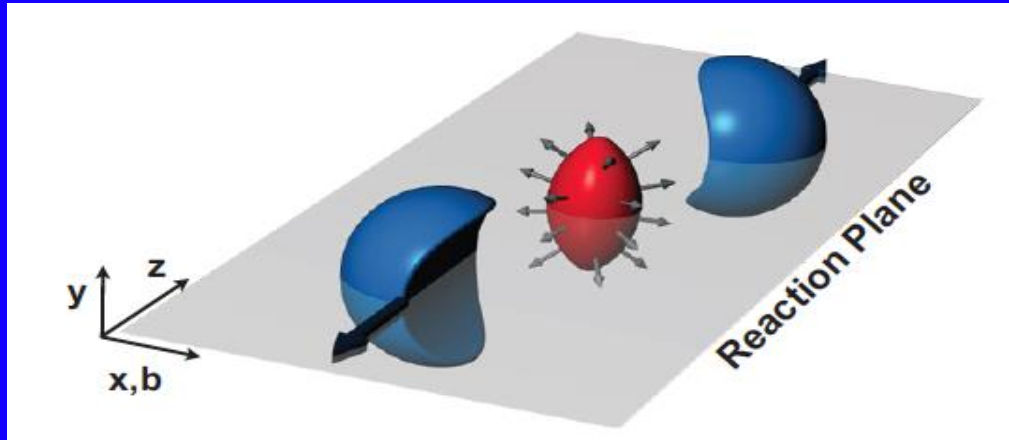
$T_{\text{eff}} = 3,527$ trillion deg

Ροή

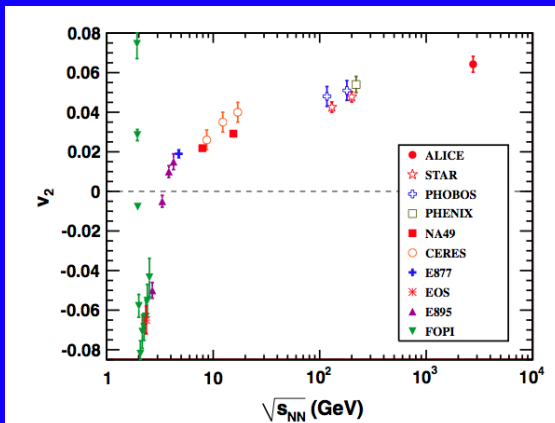
Σε μη κεντρικές συγκρούσεις, η αρχική ασυμμετρία στη γεωμετρία της σύγκρουσης έχει σαν αποτέλεσμα ανισοτροπία στη γωνιακή κατανομή των παραγομένων σωματιδίων



Υπέρθεση 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.

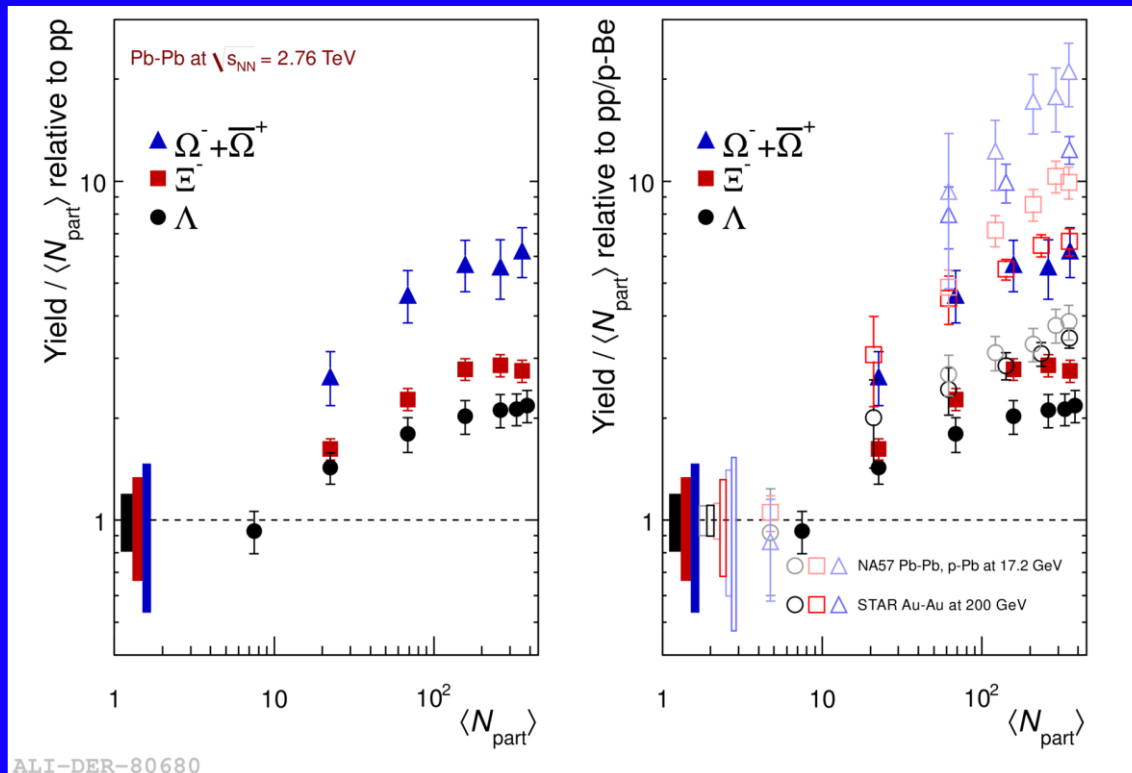
Ηδη είχε ανακοινωθεί από τα πειράματα στο RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) στο Brookhaven (USA), όπου συγκρούονται πυρήνες χρυσού με ενέργεια 13 φορές μικρότερη

Ενα από τα πιο θεαματικά αποτελέσματα από τα πειράματα βαριών ιόντων



Ενίσχυση της παραδοξότητας (Strangeness enhancement)

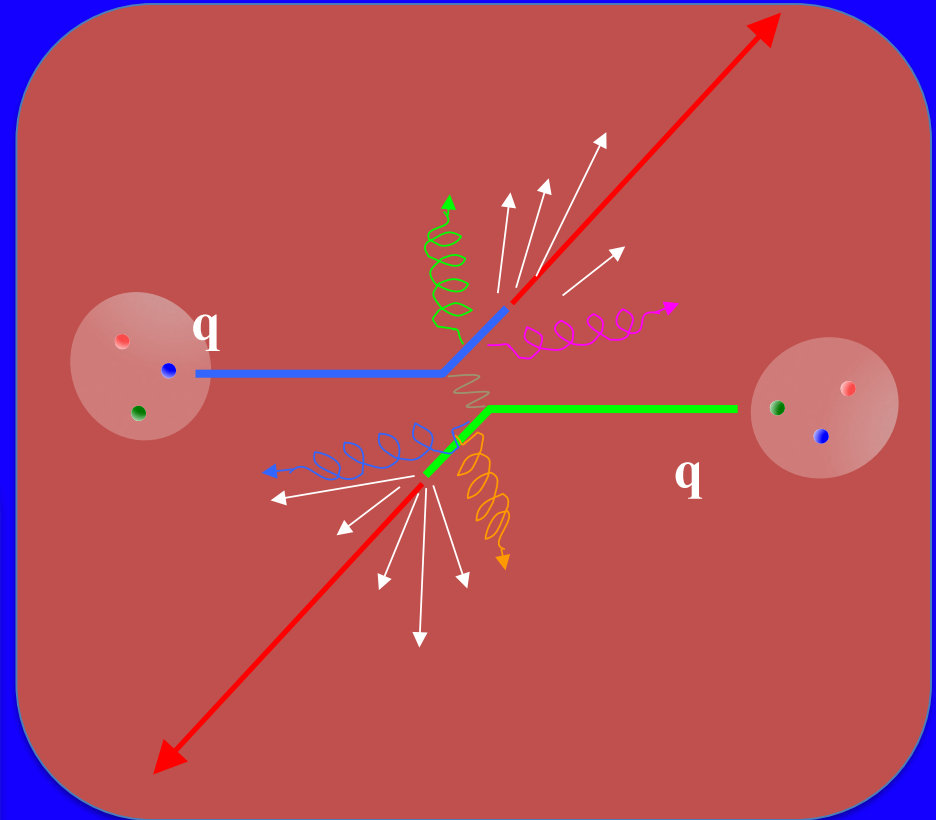
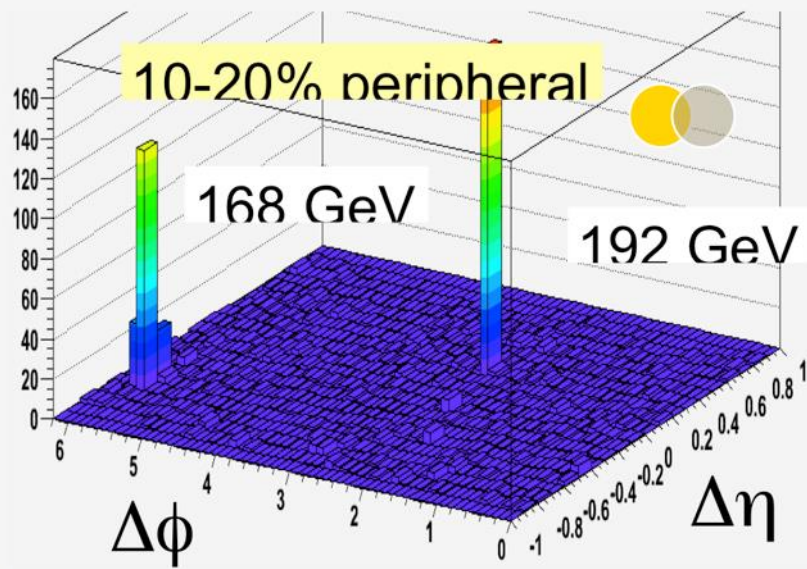
Ενα από τα πρώτα σήματα για το πλάσμα κουάρκ και γλουονίων



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

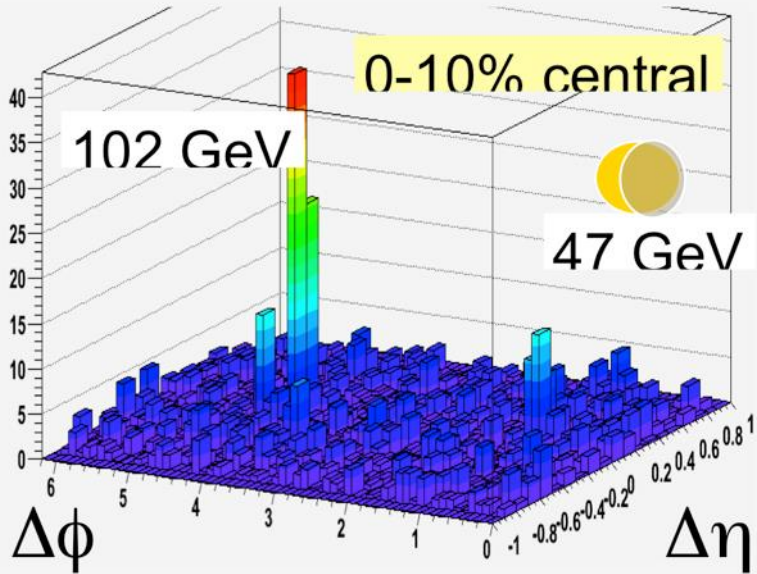
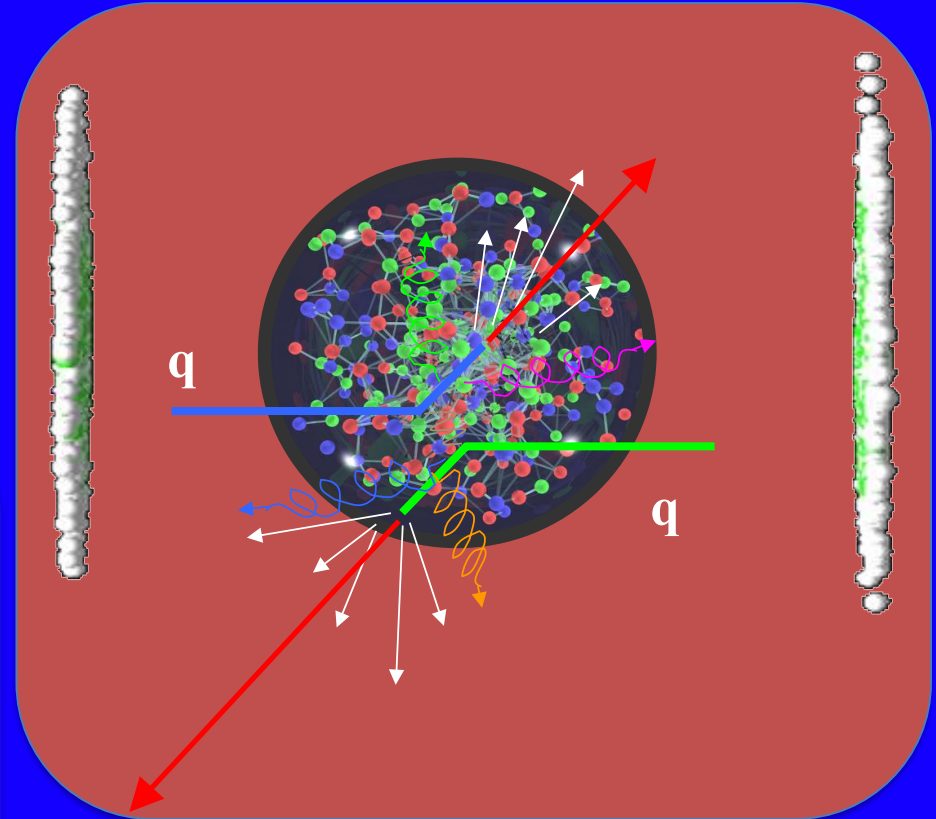
Αριθμος των σωματιδίων του ίδιου τύπου ανά αλληλεπίδραση pp/2

Πίδακες αδρονίων



Απόπνιξη των πιδάκων μέσα στο QGP

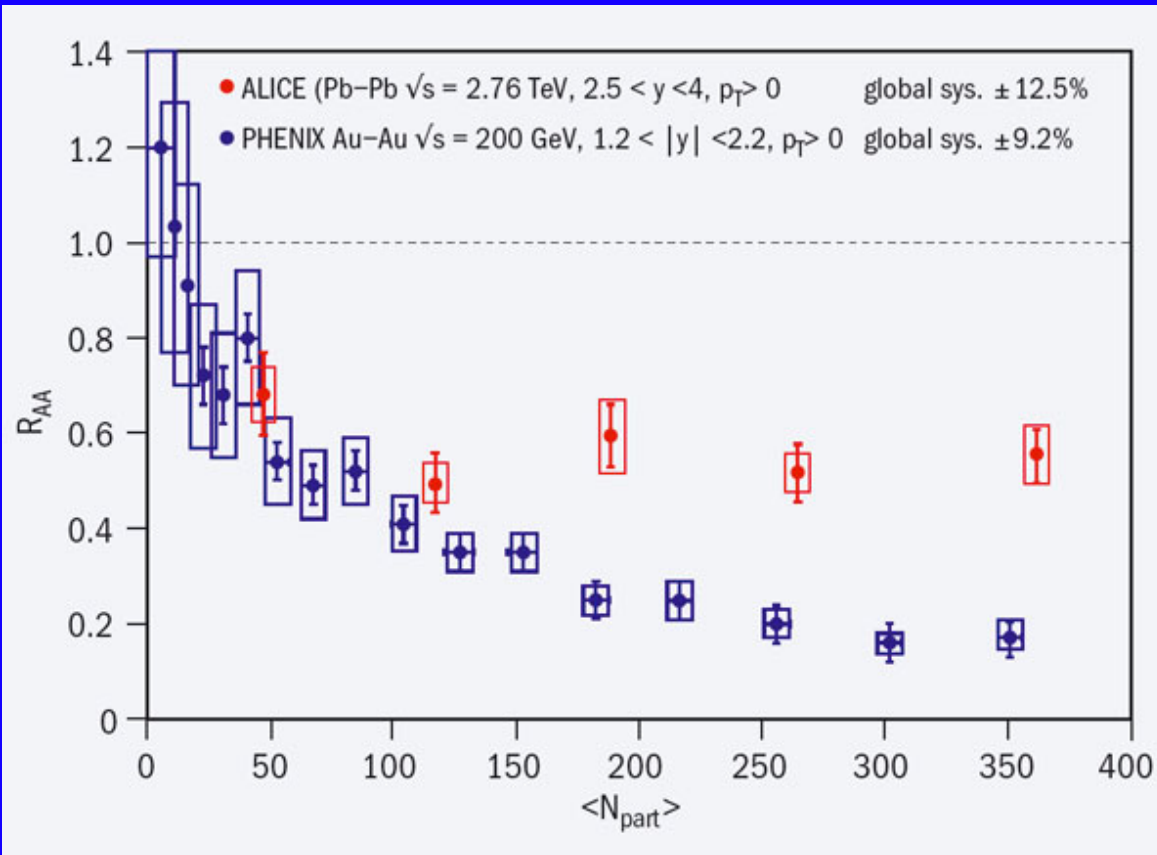
Ο πίδακας που παράγεται κοντά στην επιφάνεια από το QGP έχει μεγάλη ενέργεια ενώ εκείνος που διασχίζει το QGP απορροφιέται και σκεδάζεται από το πυκνό μέσο χάνοντας μεγάλο μέρος της ενέργειάς του



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 $c - \text{αντι-}c$ 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).

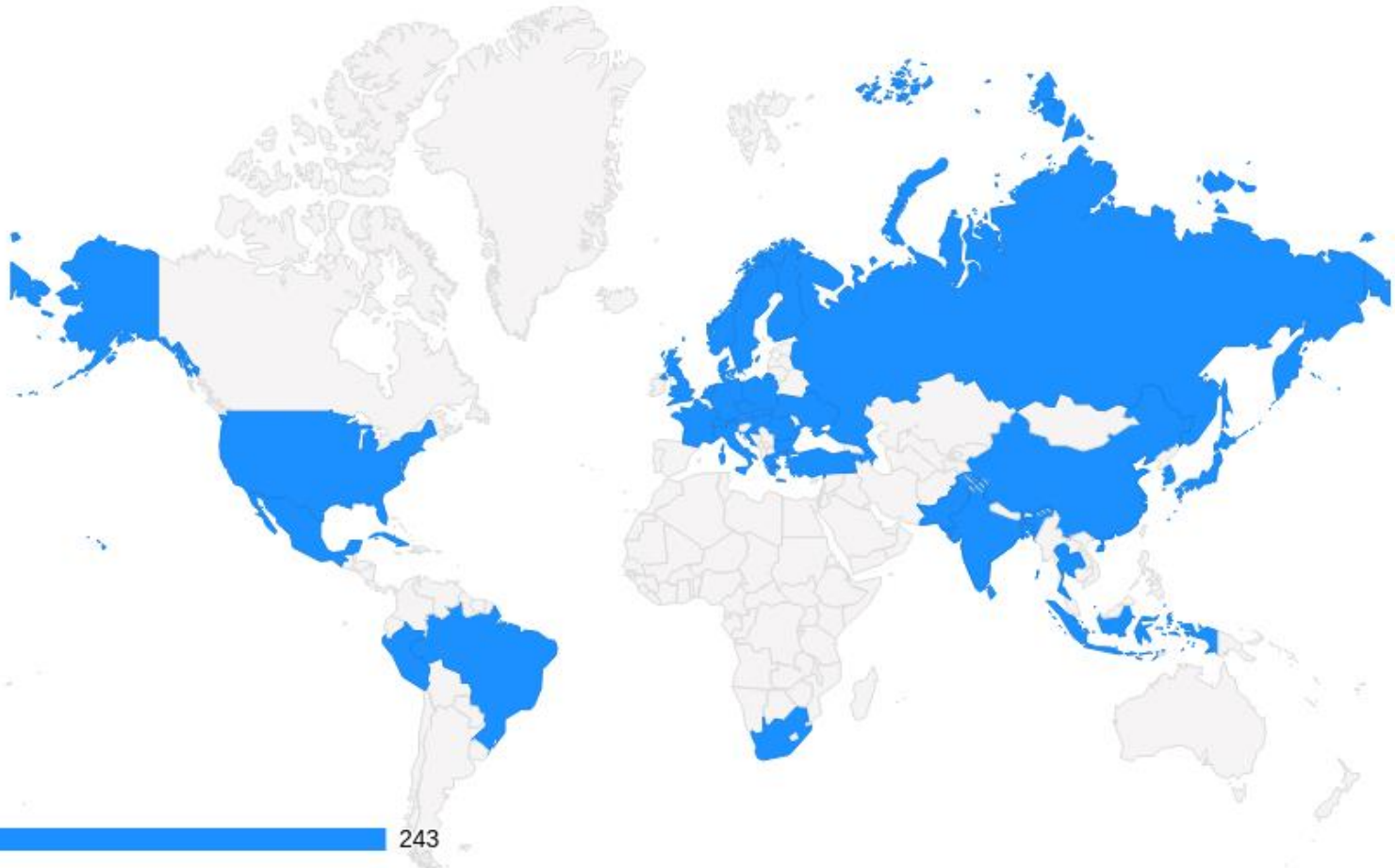
Αναβάθμιση του ALICE κατά τη διάρκεια του LS2, για το Run3

αυξημένη φωτεινότητα των δεσμών
περισσότερες συγκρούσεις
μεγαλύτερη στατιστική

ALICE Collaboration



40 countries, 171 institutes, 1985 members



2 243

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>

To visit ALICE write to alice-visits@cern.ch

To arrange a virtual visit to ALICE write to alice-outreach-virtual-visits@cern.ch

My email : despina.hatzifotiadou@cern.ch