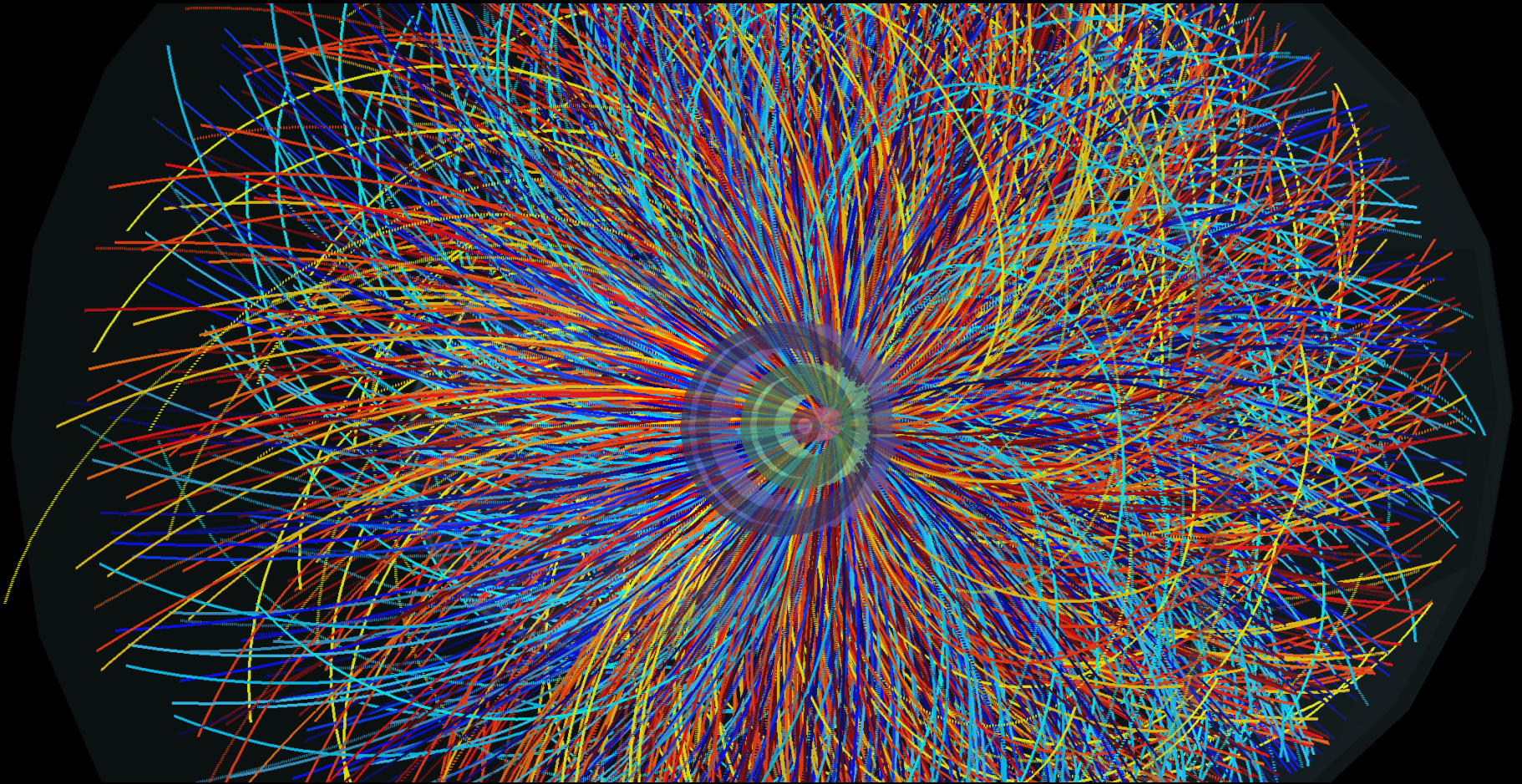


# Heavy Ion Physics

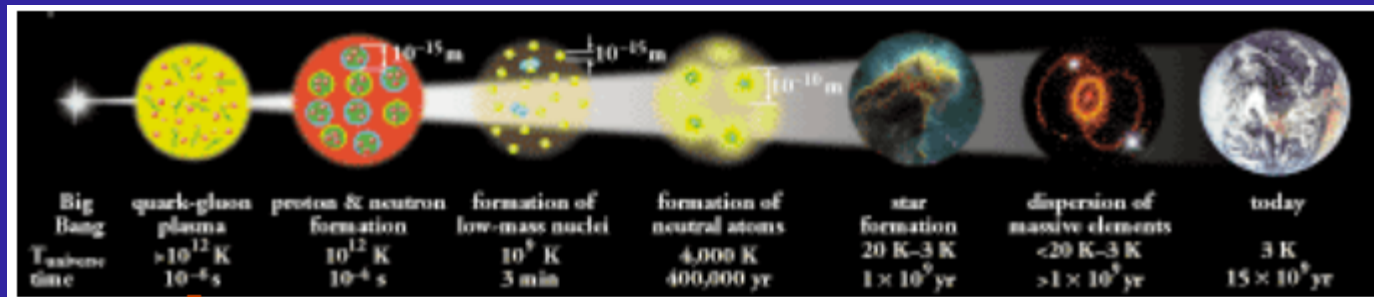


GREEK TEACHERS PROGRAMME, AUGUST 2015, CERN

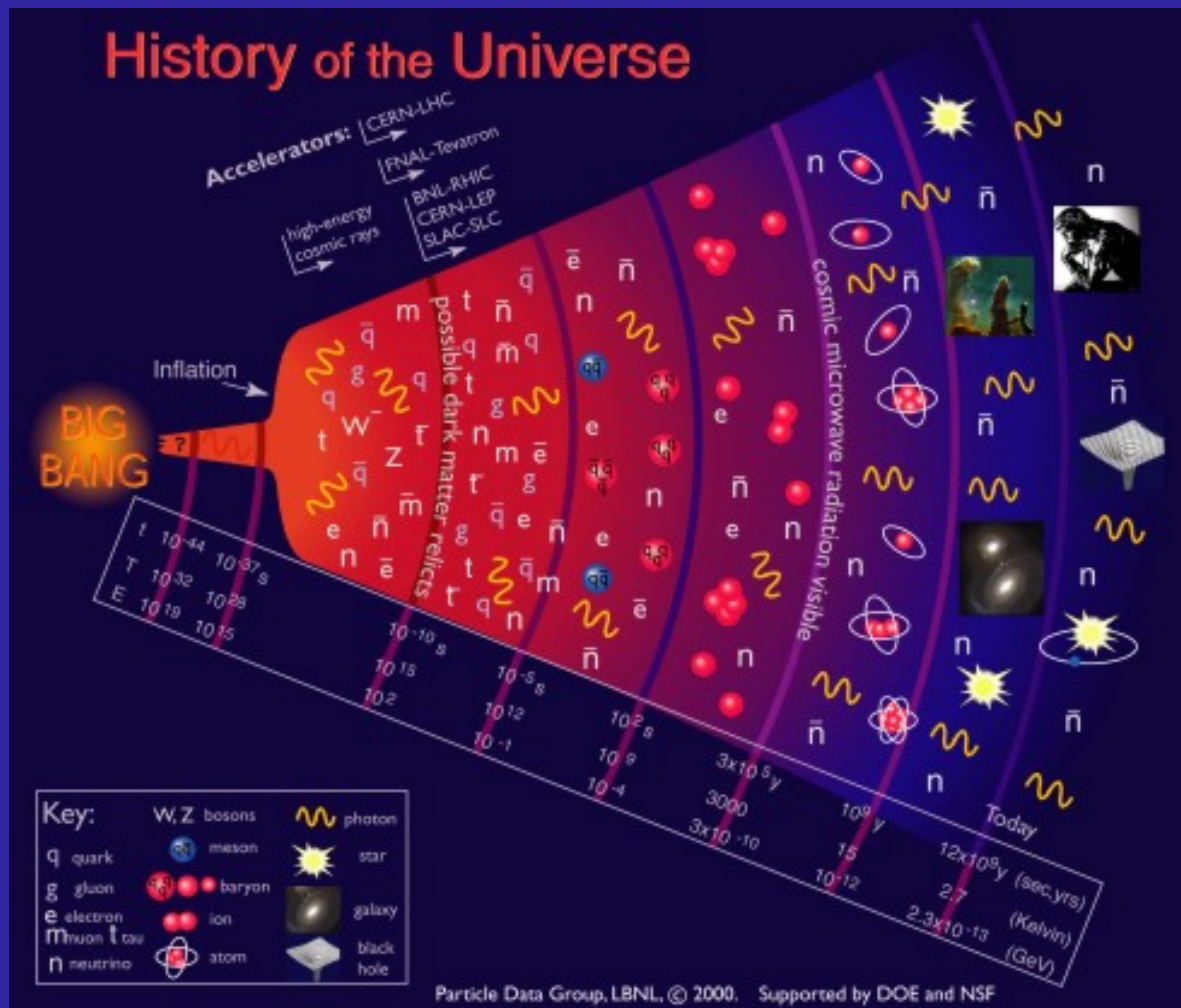
Despina Hatzifotiadou  
INFN Bologna and CERN

# 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 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

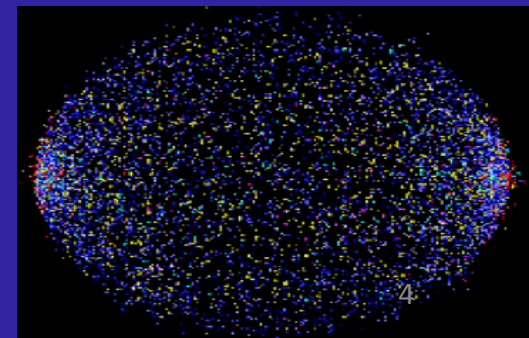
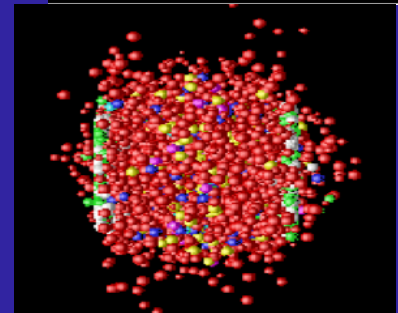
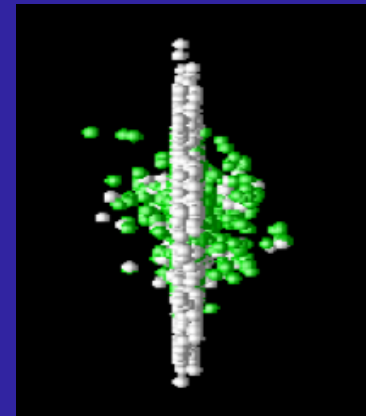
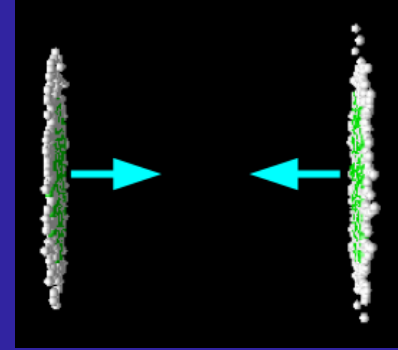
Συγκρούοντας πυρήνες μολύβδου με πολύ υψηλή ενέργεια αναδημιουργούμε τις συνθήκες πυκνότητας και θερμοκρασίας που υπήρχαν κλάσματα του δευτερολέπτου μετά το Big Bang

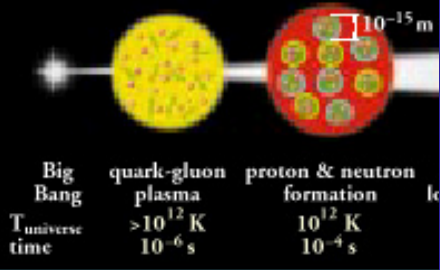
Δημιουργείται μια σταγόνα της πρωταρχικής κατάστασης της ύλης (QUARK GLUON PLASMA, QGP)

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, και
- πώς τα πρωτόνια και νετρόνια αποκτούν τη μάζα τους





# Mini Big Bang

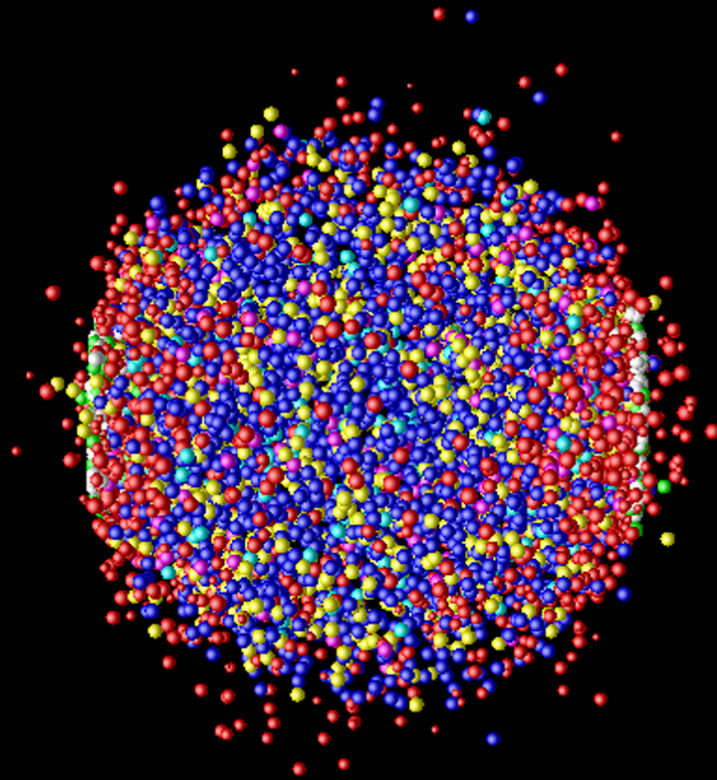
1. Οι επιταχυνόμενοι πυρήνες συγκρούονται μετωπικά

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



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

## BIG BANG

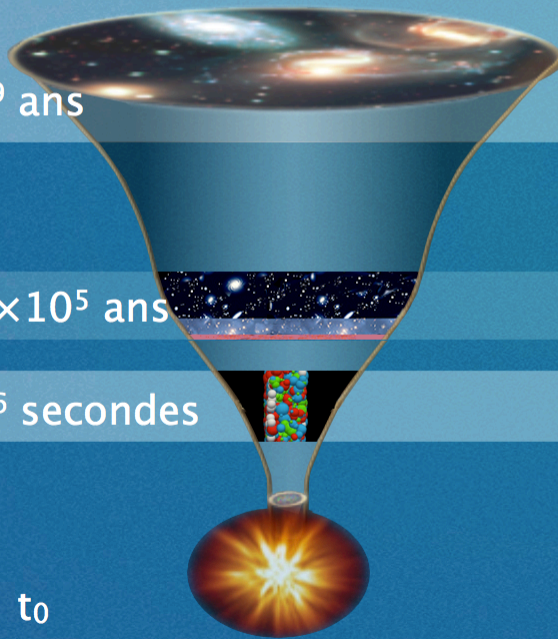
## LITTLE BIG BANG

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

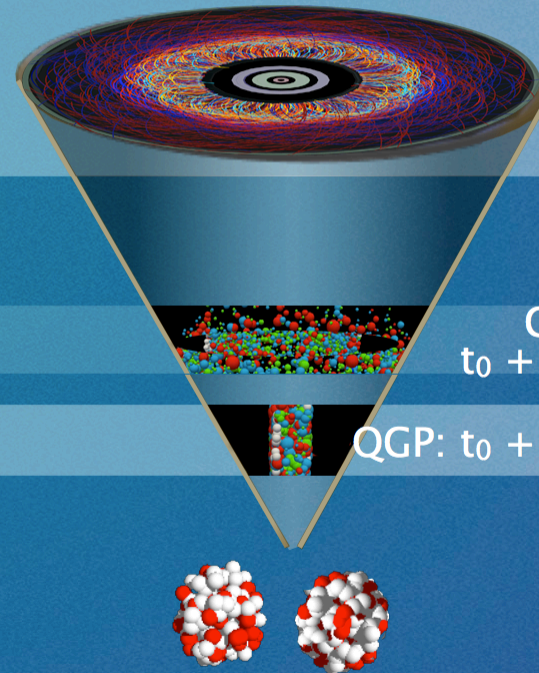
$t_0$



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

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

$t_0$

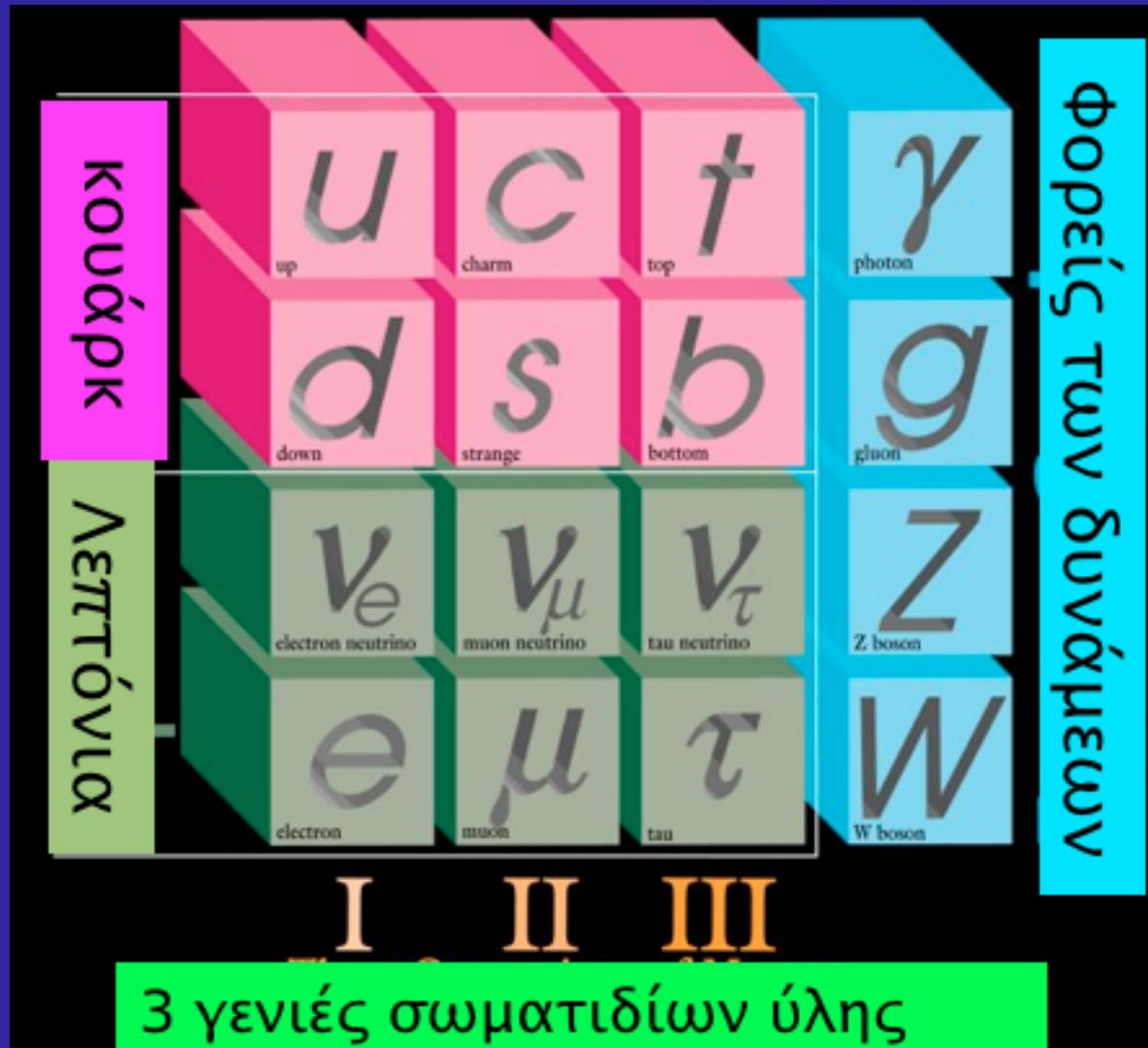


# Το Καθιερωμένο Πρότυπο (The Standard Model)

Τα  
στοιχειώδη  
σωμάτια  
είναι  
φερμιόνια

Στατιστική  
Fermi-Dirac

Spin  
ημιακέραιο  
(1/2, 3/2,...)



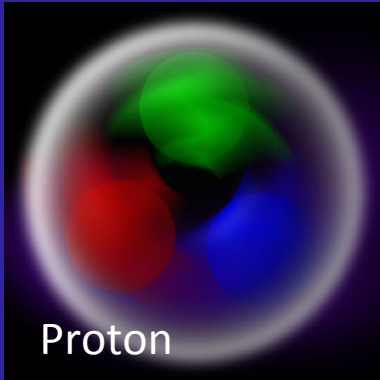
Οι φορείς των  
δυνάμεων  
είναι μποζόνια

Στατιστική  
Bose-Einstein

Spin ακέραιο  
(0, 1, 2,...)

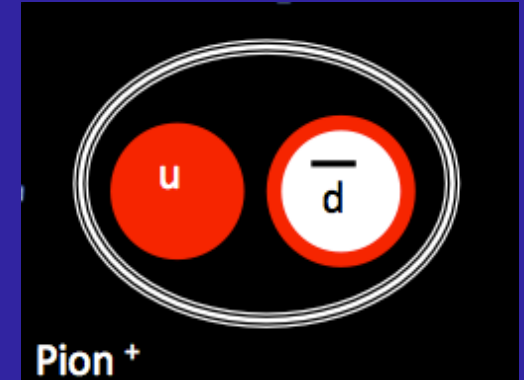
# Εγκλωβισμός των κουάρκ (Quark Confinement)

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



Proton

Βαρυόνια  
αποτελούνται  
από 3 κουάρκ



Pion<sup>+</sup>

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 <sup>2</sup>	Spin
<b>p</b>	proton	<b>uud</b>	1	0.938	1/2
<b><math>\bar{p}</math></b>	antiproton	<b><math>\bar{u}\bar{u}\bar{d}</math></b>	-1	0.938	1/2
<b>n</b>	neutron	<b>udd</b>	0	0.940	1/2
<b><math>\Lambda</math></b>	lambda	<b>uds</b>	0	1.116	1/2
<b><math>\Omega^-</math></b>	omega	<b>sss</b>	-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 <sup>2</sup>	Spin
<b><math>\pi^+</math></b>	pion	<b><math>u\bar{d}</math></b>	+1	0.140	0
<b><math>K^-</math></b>	kaon	<b><math>s\bar{u}</math></b>	-1	0.494	0
<b><math>\rho^+</math></b>	rho	<b><math>u\bar{d}</math></b>	+1	0.776	1
<b><math>B^0</math></b>	B-zero	<b><math>d\bar{b}</math></b>	0	5.279	0
<b><math>\eta_c</math></b>	eta-c	<b><math>c\bar{c}</math></b>	0	2.980	0

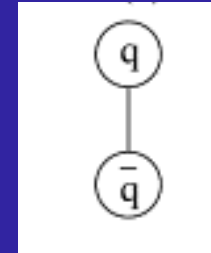
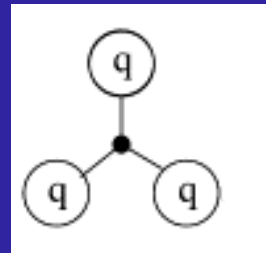


# Ισχυρή αλληλεπίδραση

	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 →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> photon
Quarks	0.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluon
<math>-2.2 eV</math>	<math><0.17 MeV</math>	<math><15.5 MeV</math>	91.2 GeV	0
0	0	0	0	0
$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	1
<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	<b>Z</b> weak force	
0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV	$\pm$
-1	-1	-1	±1	±1
$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	1
<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>W</b> weak force	

Bosons (Forces)

- Τα κουάρκ έχουν ένα φορτίο χρώματος (R,B,G) που εισήχθη για να εξηγήσει την σύνθεση
  - των βαρυονίων (3 quarks or antiquarks)
  - και των μεσονίων (quark-antiquark pair) αντικείμενα χωρίς χρώμα



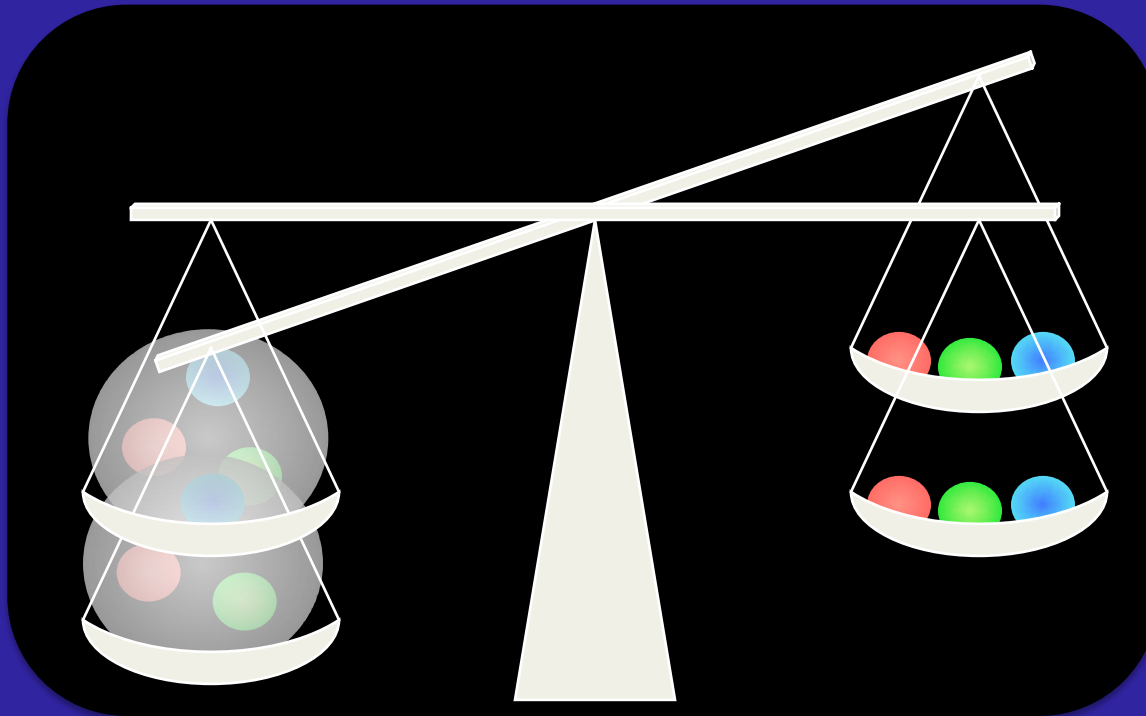
- Η αλληλεπίδραση μεταξύ κουάρκ γίνεται με την ανταλλαγή γλουονίων ( $m_g=0$ ) που είναι φορείς ενός φορτίου χρώματος και ενός φορτίου αντι-χρώματος
- Η ισχυρή αλληλεπίδραση είναι ισχυρή σε μεγάλη απόσταση και ασθενής σε μικρή απόσταση
  - Το κενό είναι γεμάτο από virtual ζευγάρια κουάρκ-αντικουάρκ

# QCD : Quantum Chromodynamics

Τα δύο «μυστήρια» της κβαντικής χρωμοδυναμικής

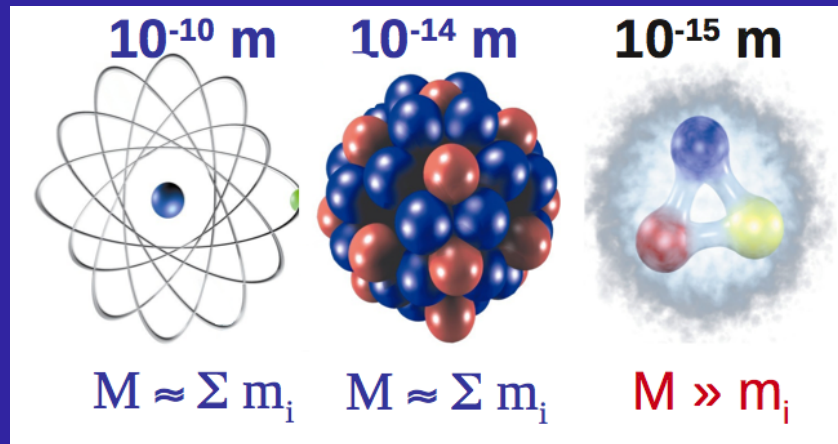
- Οι μάζες των αδρονίων
- Ο εγκλωβισμός των κουάρκ

# Πώς δημιουργείται η μάζα των αδρονίων;



# Δημιουργία της μάζας

Άτομο                      πυρήνας                      νουκλεόνιο

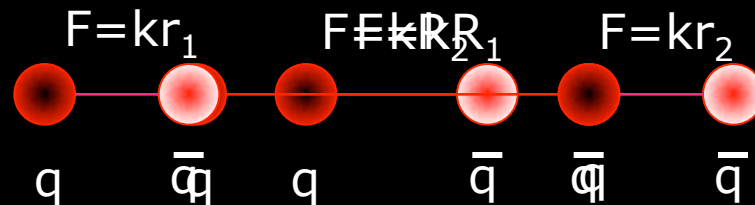


πρωτόνιο (uud) μάζα  $938 \text{ MeV}/c^2$   
Μάζα up quark :  $1.7 - 3.3 \text{ MeV}/c^2$   
Μάζα down quark :  $4.1 - 5.8 \text{ MeV}/c^2$   
Αθροισμα :  $7.5 - 12.4 \text{ MeV}/c^2$

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;

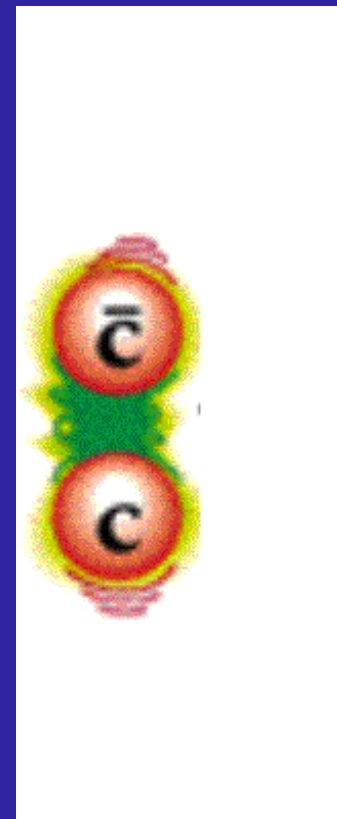


- Η αύξηση της ισχύος της αλληλεπίδρασης, όταν προσπαθούμε να απομακρύνουμε το κουάρκ από το αντικουάρκ σ' ένα βαρύ μεσόνιο, εκφράζεται **προσεγγιστικά από το δυναμικό**

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

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

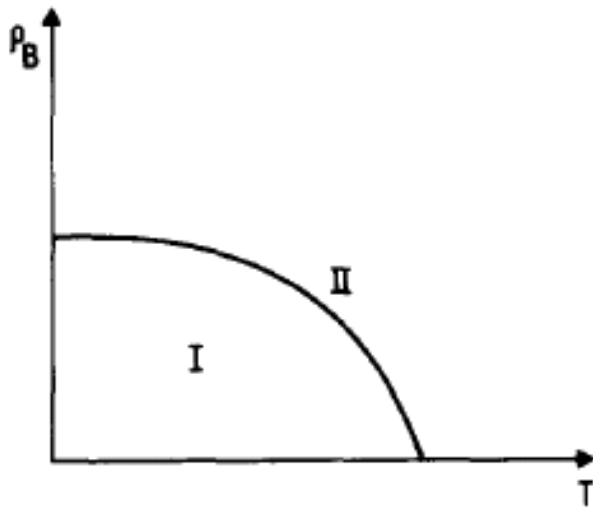


Fig. 1. Schematic phase diagram of hadronic matter.  $\rho_B$  is the density of baryonic number. Quarks are confined in phase I and unconfined in phase II.

“Experimental hadronic spectrum and quark liberation”

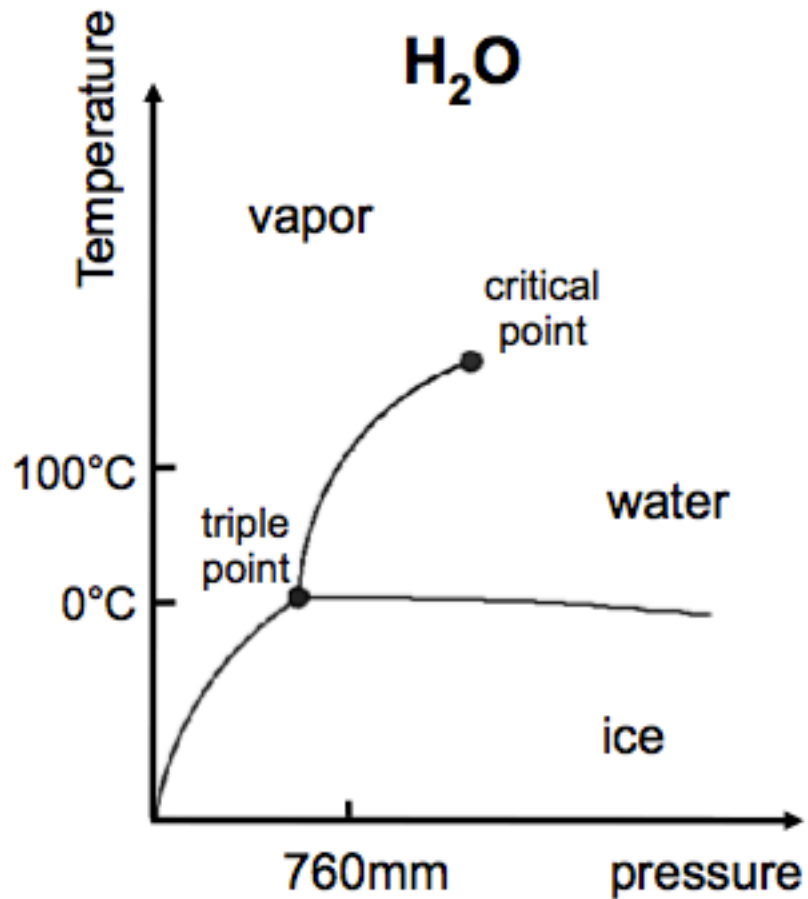
Cabibbo and Parisi *Phys. Lett.* **59B**, 67 (1975)

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  $\rho_B$

# Reminder: Phase diagram





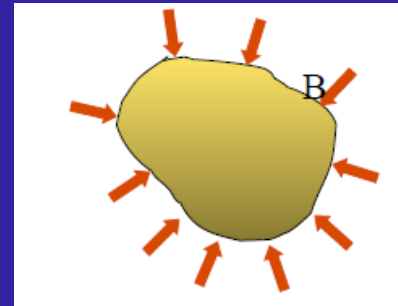
# Becoming more quantitative...

- 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
- Η confinement προέρχεται από την εξισορρόπηση της πίεσης από την κινητική ενέργεια των κουάρκ και μιας εξωτερικής πίεσης

Kinetic term

Bag energy

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



- 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  $\mu_q$  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

$$P_q = \frac{\varepsilon_q}{3} = \frac{g_q}{24\pi^2} \mu_q^4$$

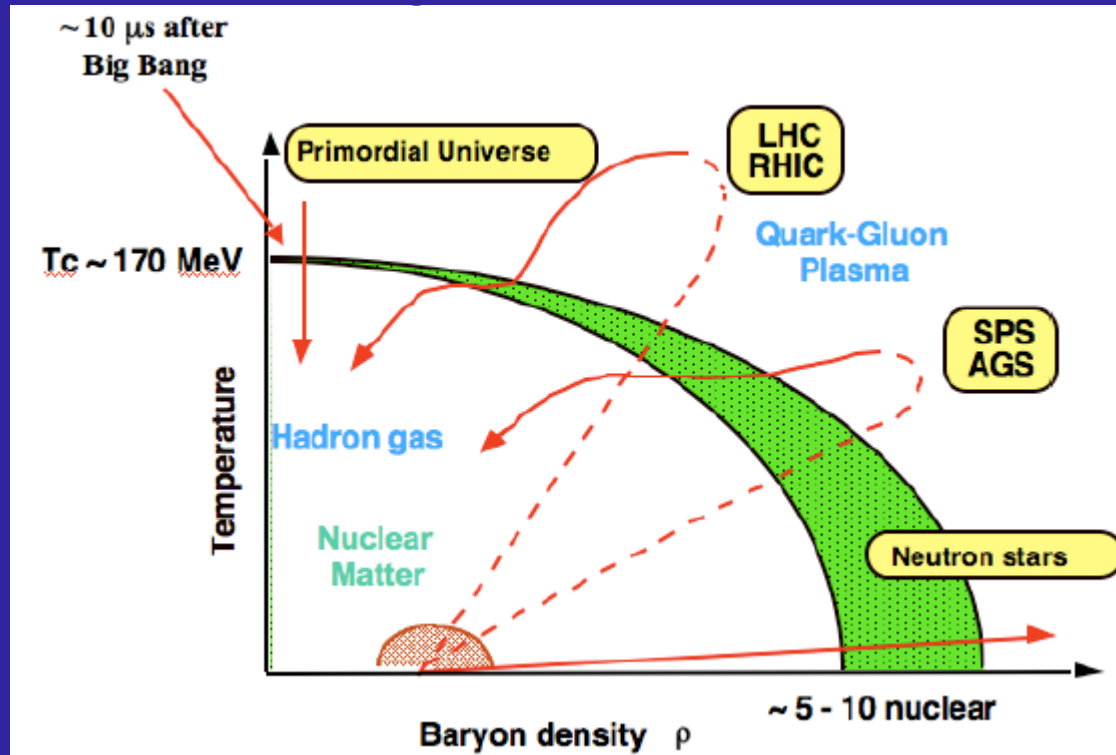
- Επιβάλλοντας και σ' αυτή την περίπτωση η πίεση της σακούλας να είναι ίση με την πίεση του συστήματος των κουάρκ, βρίσκουμε

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

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



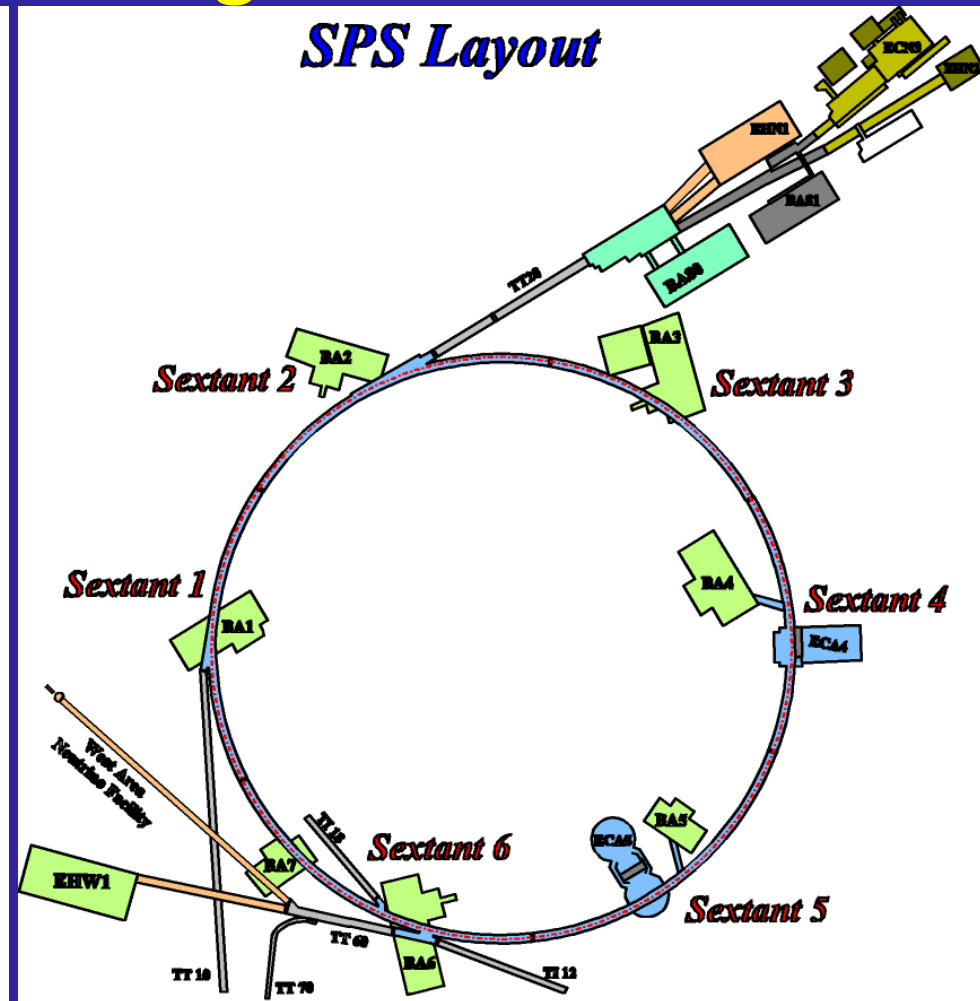
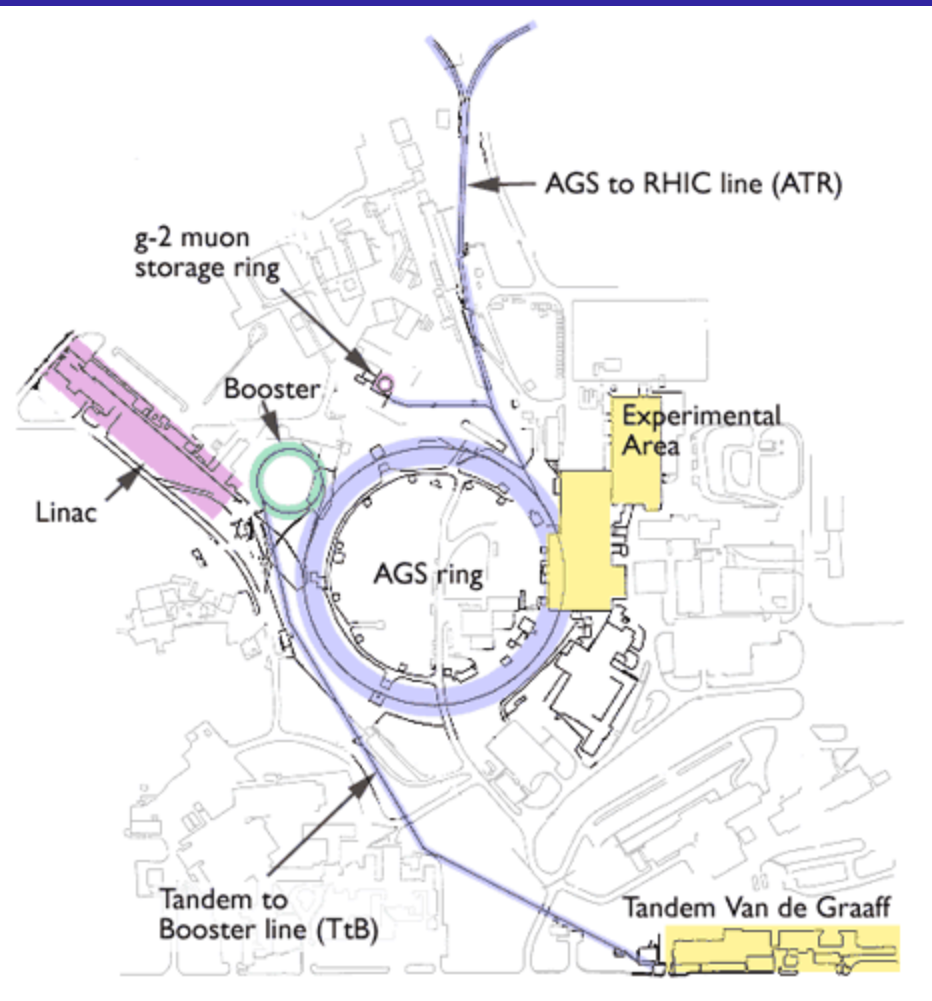
- ❑ Πώς μπορούμε να “εξερευνήσουμε” αυτό το διάγραμμα φάσης;
- ❑ Δημιουργώντας **εκτεταμένα συστήματα κουάρκ και γλουονίων** σε υψηλή θερμοκρασία και/ή βαρυονική πυκνότητα → **με συγκρούσεις βαριών ιόντων**

# Facilities for HI collisions

- ❑ The study of the phase transition requires center-of-mass energies of the collision of **several GeV/nucleon**
- ❑ First results date back to the **80's** when existing accelerators and experiments at **BNL** and **CERN** were modified in order to be able to accelerate ion beams and to detect the particles emitted in the collisions



# From fixed-target...

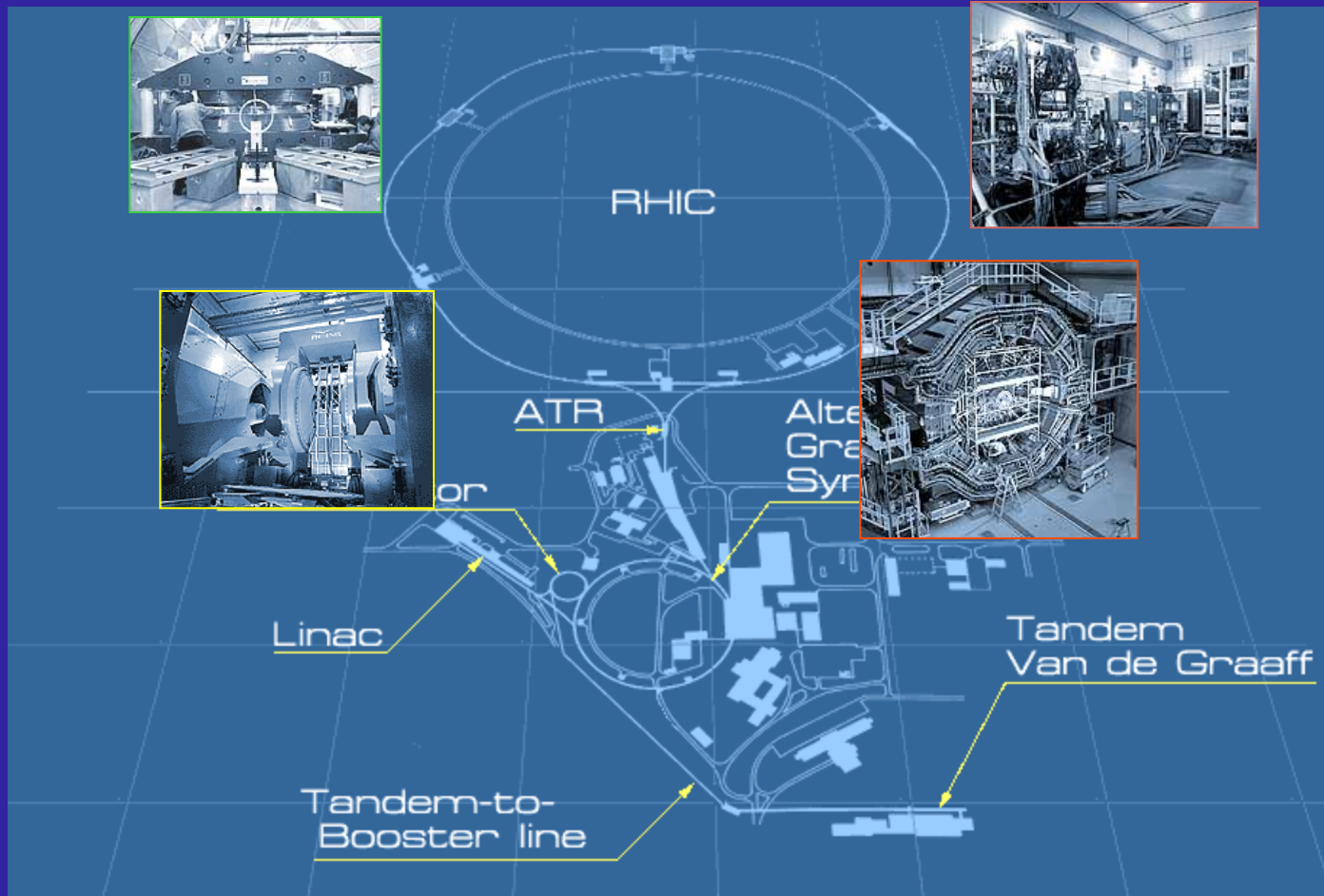


- AGS at BNL
- p beams up to 33 GeV
- Si and Au beams up to 14.6 A GeV

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

# ... to colliders!

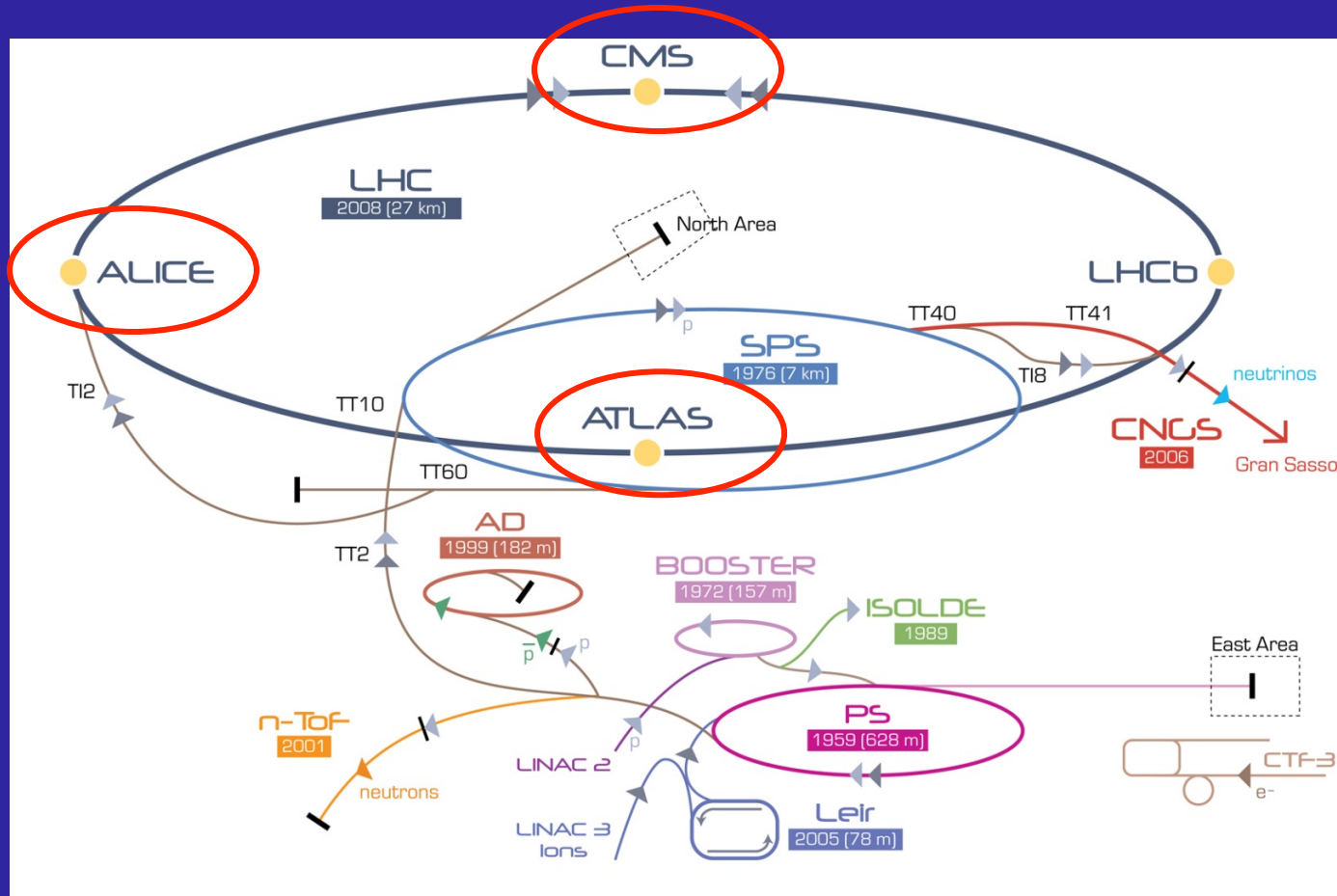
- ❑ RHC: the first dedicated machine for HI collisions (Au-Au, Cu-Cu)
  - ❑ Maximum  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV



- ❑ 2 main experiments : **STAR** and **PHENIX**
- ❑ 2 small(er) experiments: PHOBOS and BRAHMS

# ... to colliders!

- LHC: the most powerful machine for HI collisions
  - $\sqrt{s_{NN}} = 2760 \text{ GeV}$  (for the moment!)

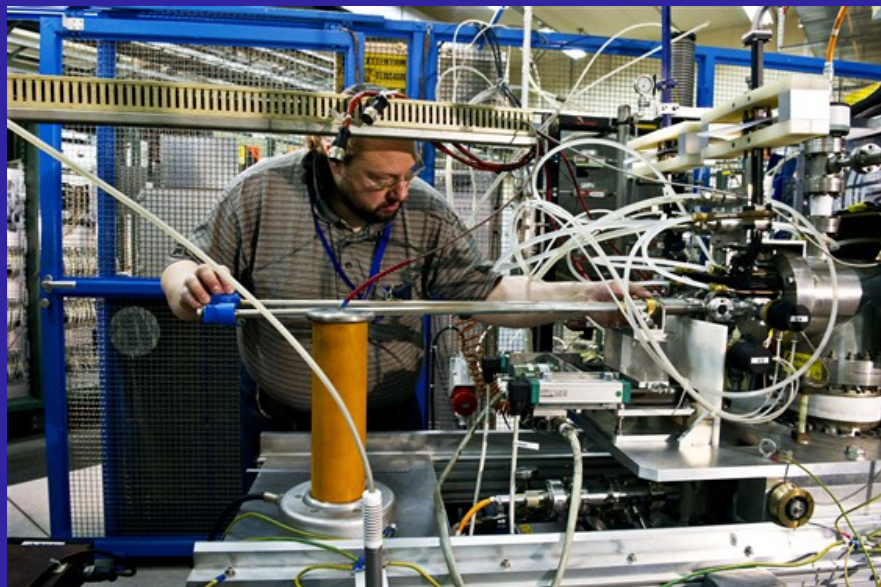


- 3 experiments studying HI collisions: **ALICE**, **ATLAS** and **CMS**



# Βαριά ιόντα στο LHC

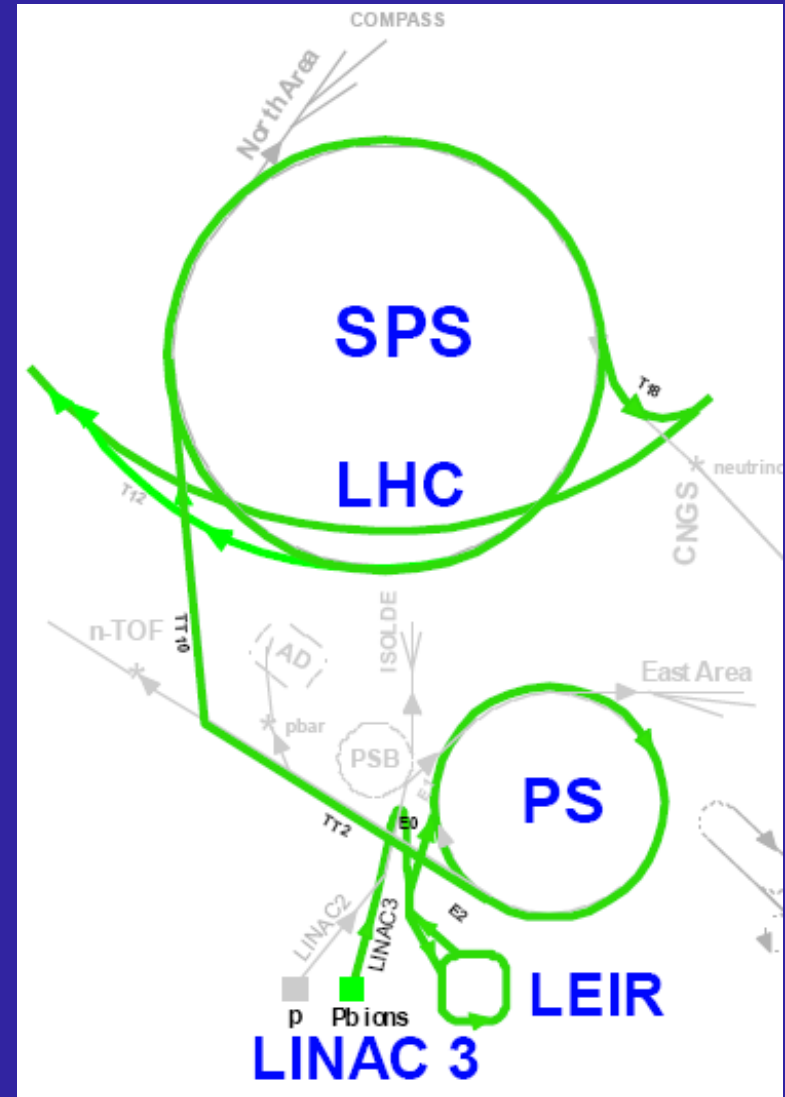
Μικρή ράβδος μολύβδου  $Pb^{208}$   
(2 cm, 500 mg) θερμαίνεται σε  
500°C και εξαερώνεται. Ένα  
ισχυρό ηλεκτρικό ρεύμα βγάζει  
ηλεκτρόνια από τα άτομα



ισότοπο  $Pb^{208}$   
82 πρωτόνια  
126 νετρόνια

# Heavy Ions at CERN

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



# LHC as a HI accelerator

- Fully ionised  $^{208}\text{Pb}$  nucleus accelerated in LHC (configuration magnetically identical to that for pp), e.g. (2011 numbers):

$$p_{\text{Pb}} = Z p_p = 82 \cdot 3.5 \text{ TeV} = 287 \text{ TeV} \longrightarrow \sqrt{s_{\text{PbPb}}} = 574 \text{ TeV (!)}$$

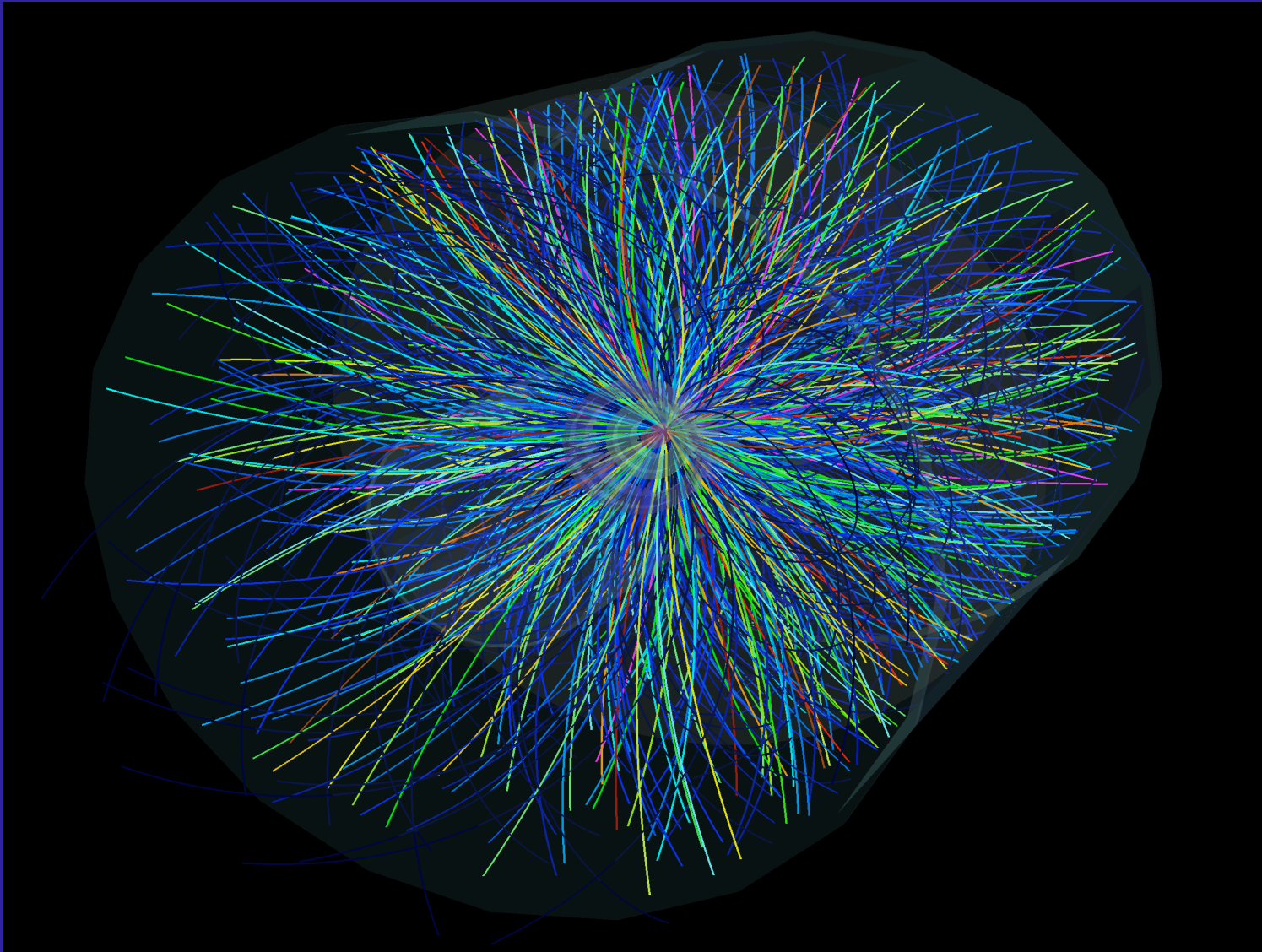
- the relevant figure is  $\sqrt{s}$  per nucleon-nucleon collision:  $\sqrt{s_{\text{NN}}}$

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

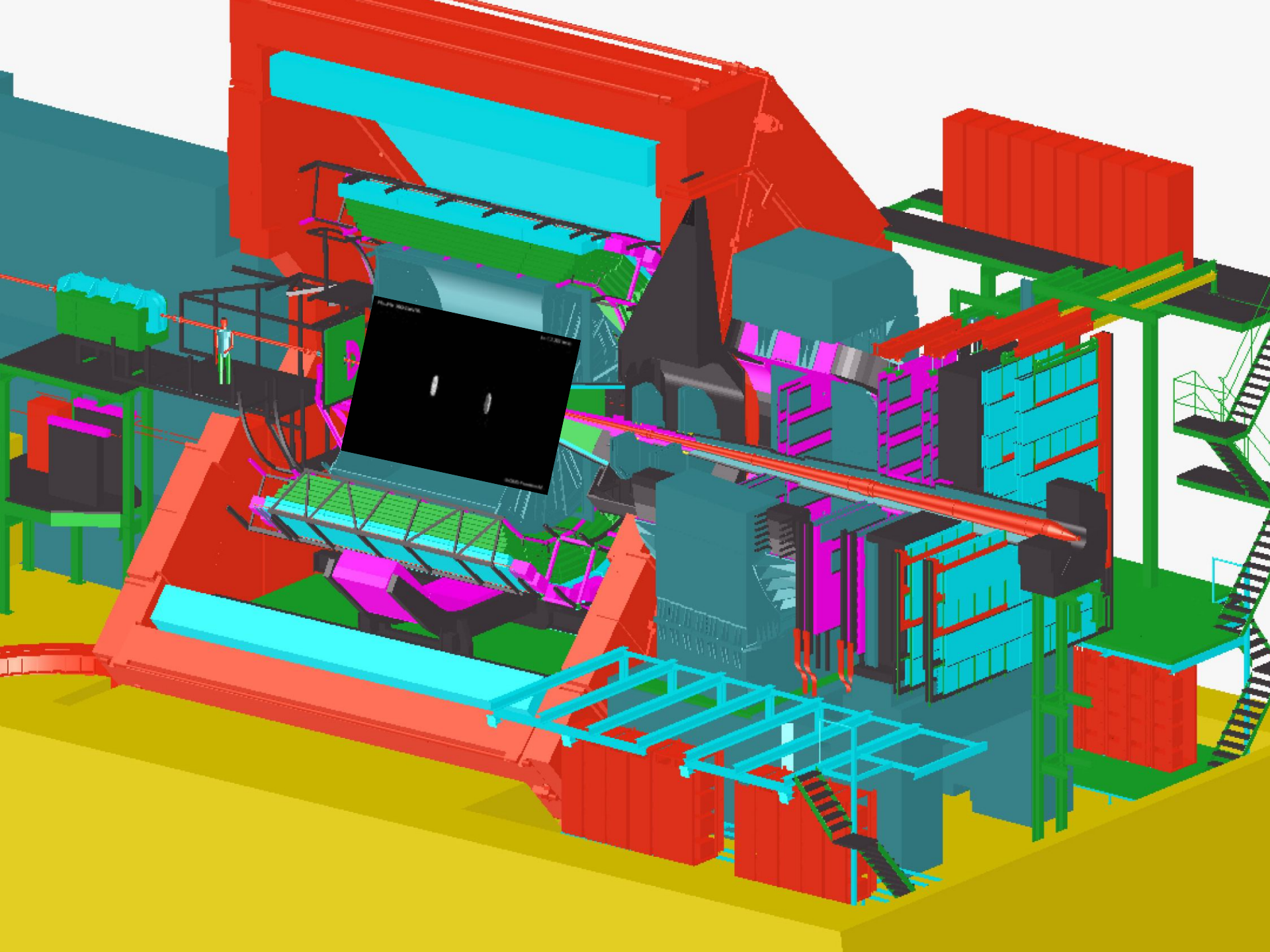
... for comparison with protons

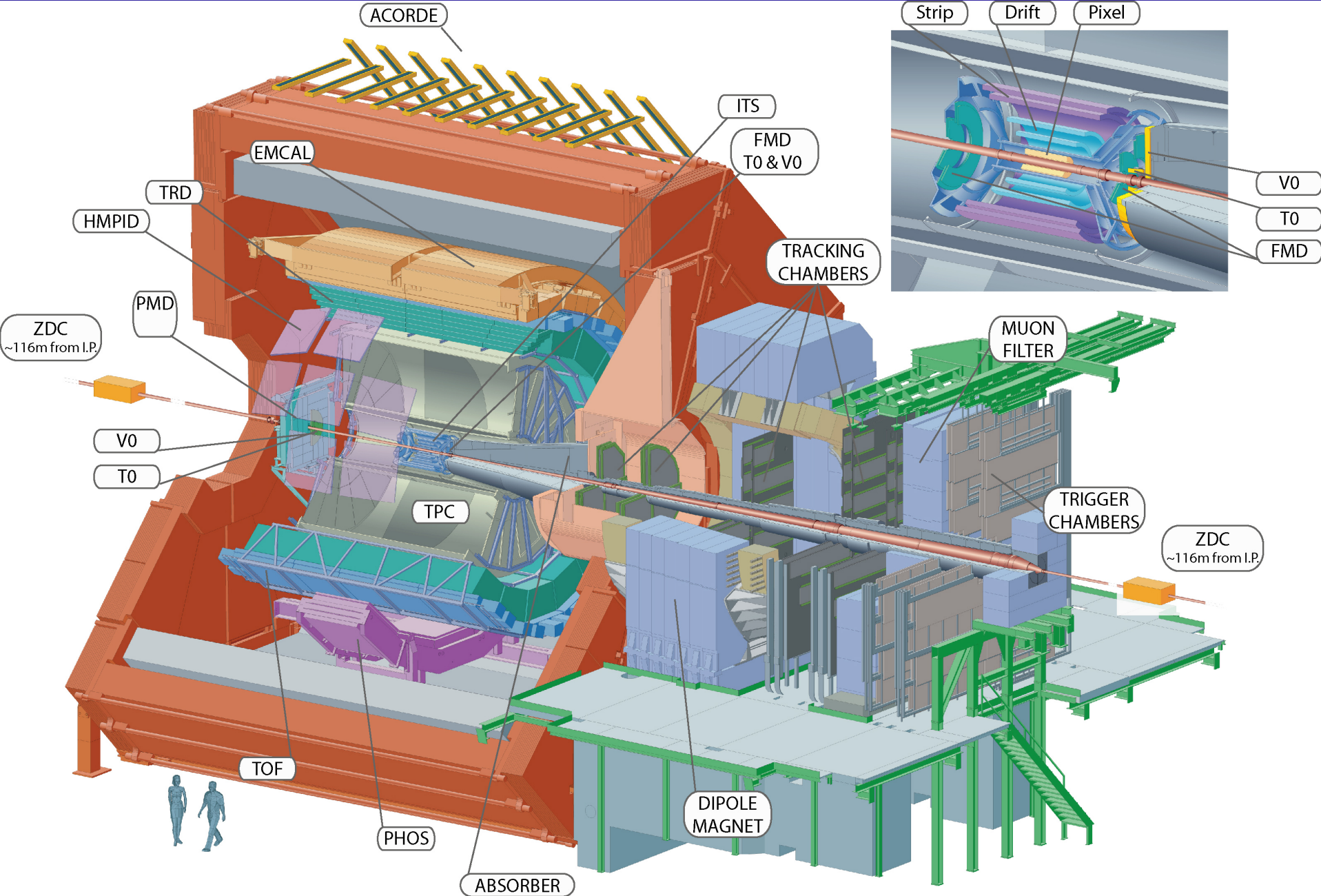
- For 2011 Pb-Pb run:
  - $\sim 1.1 \cdot 10^8$  ions/bunch
  - 358 bunches (200 ns basic spacing)
  - $L \sim 5 \cdot 10^{26} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
  - $\sim 4000 \text{ Hz}$  interaction rate

# Συγκρούοντας πυρήνες μολύβδου πολύ υψηλής ενέργειας...



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



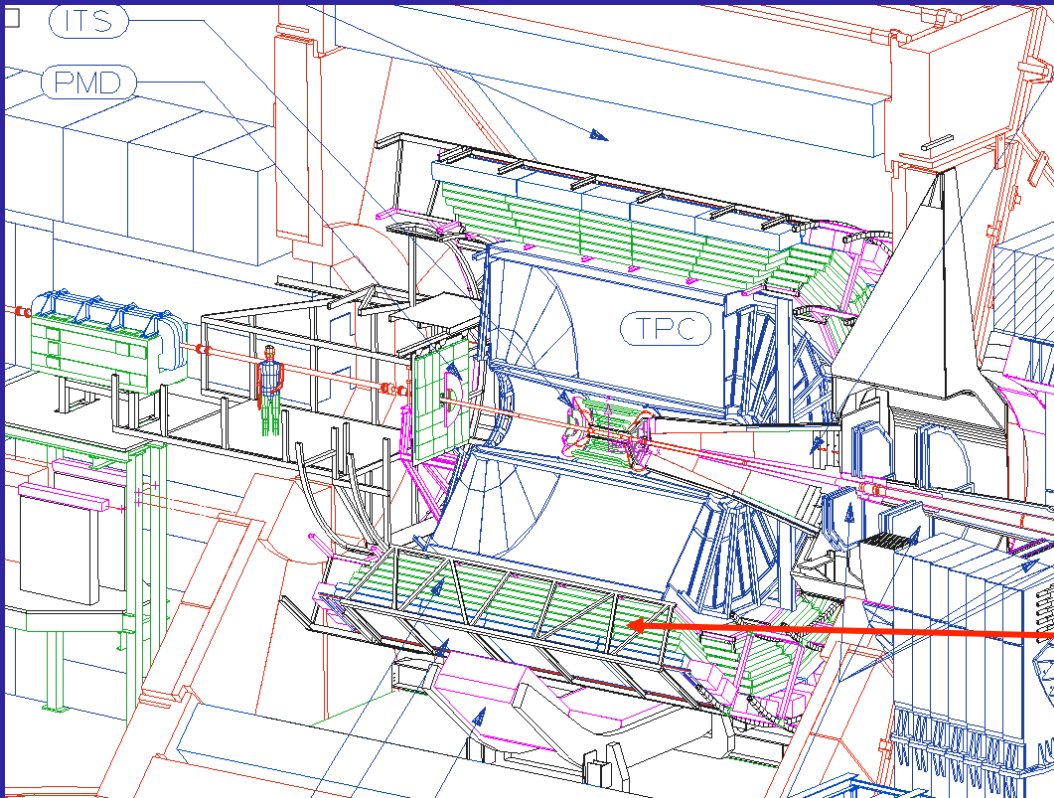


16 m x 16 m x 26 m 10 000 tons installed 56 m underground (@ point 2 of LHC)

Δέσποινα Χατζηφωτιάδου

# ALICE : 18 διαφορετικά ανιχνευτικά συστήματα

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

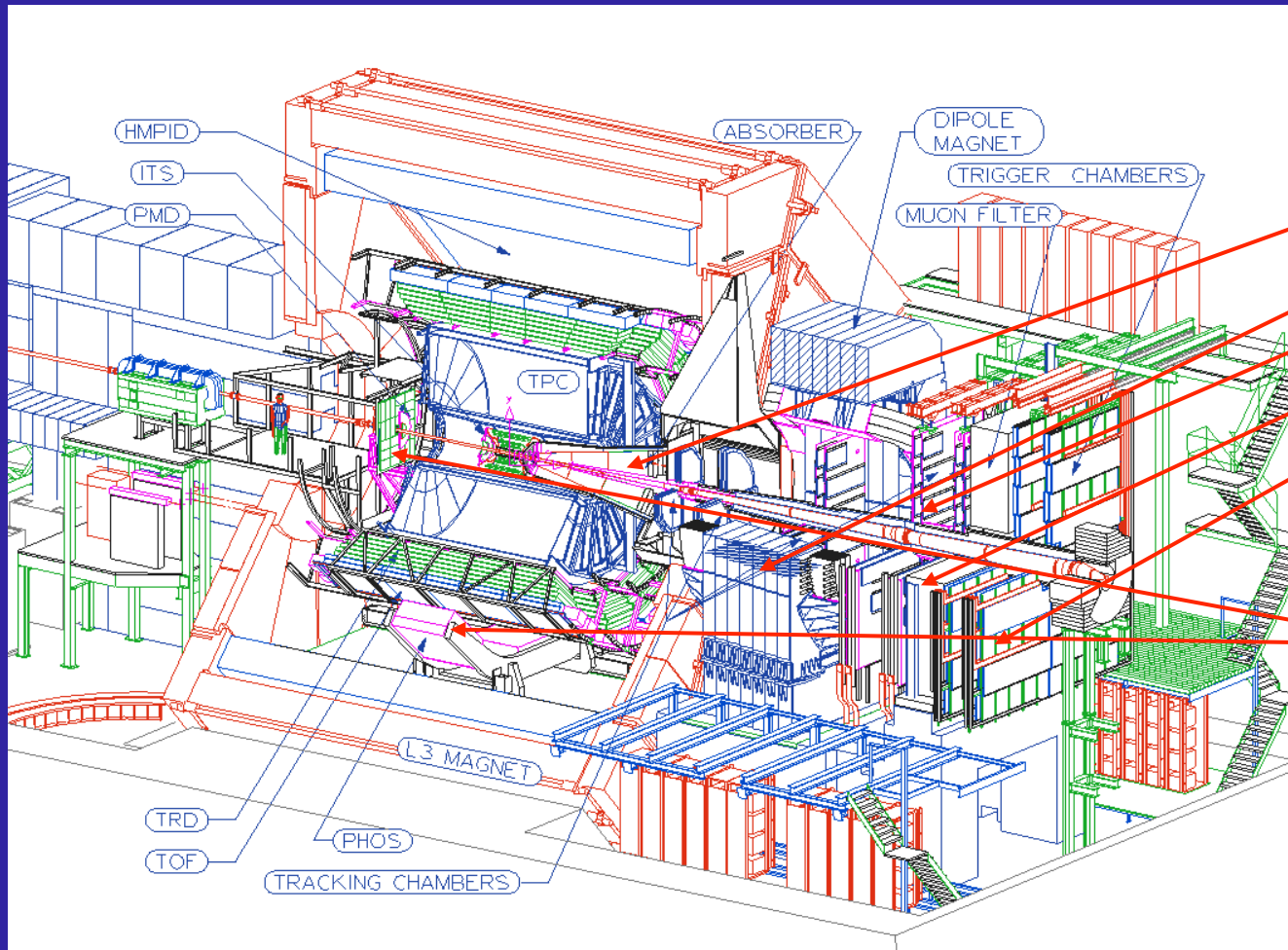


Εσωτερικός ανιχνευτής ιχνών (ITS):  $p$ , pid

Time projection chambre (TPC) :  $p$ , pid

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

## ... και μερικοί πιο εξειδικευμένοι ανιχνευτές



Φασματόμετρο  
μιονίων :

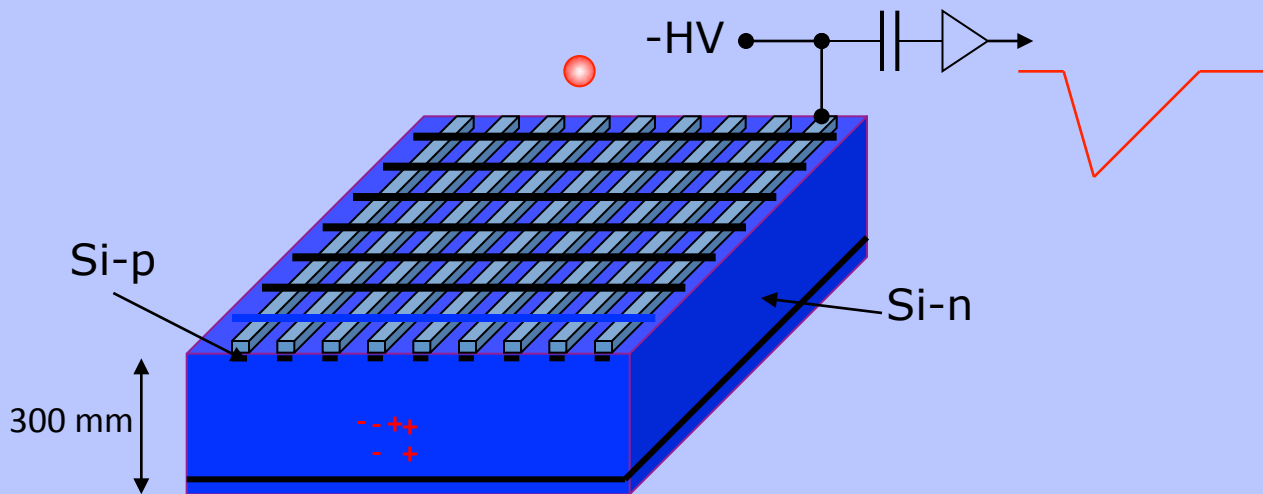
- Απορροφητής
- Μαγνητ. δίπολο
- Ανιχν. Ιχνών μ
- Φίλτρο
- Trigger

Ανιχνευτές  
φωτονίων

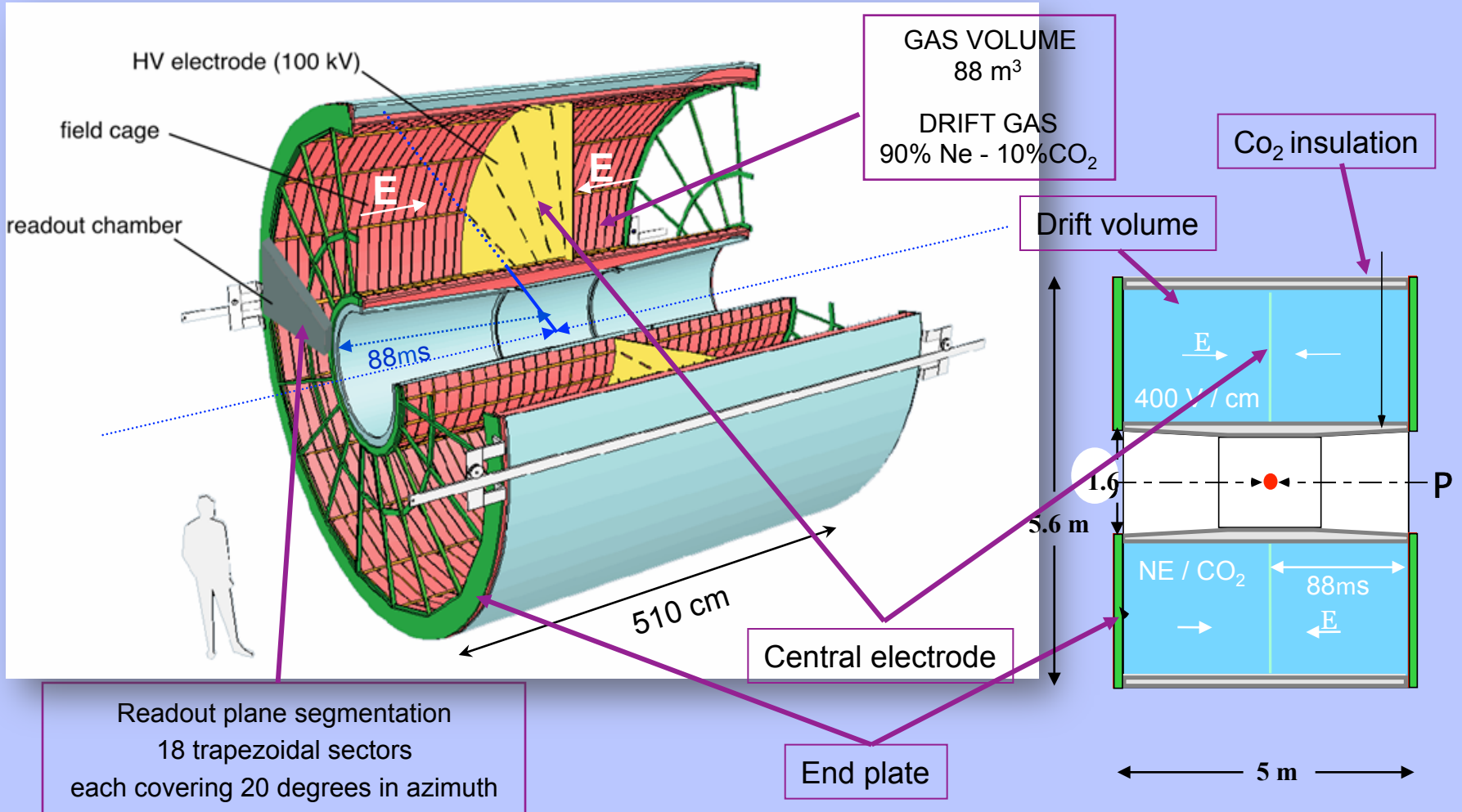


# Ανιχνευτές πυριτίου : λειτουργία

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



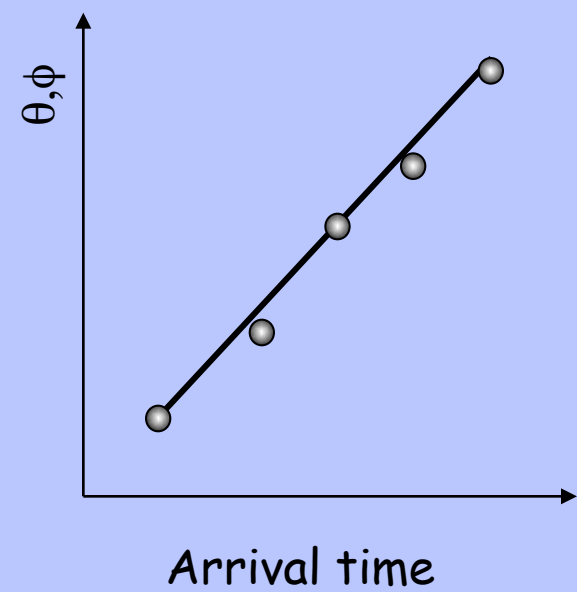
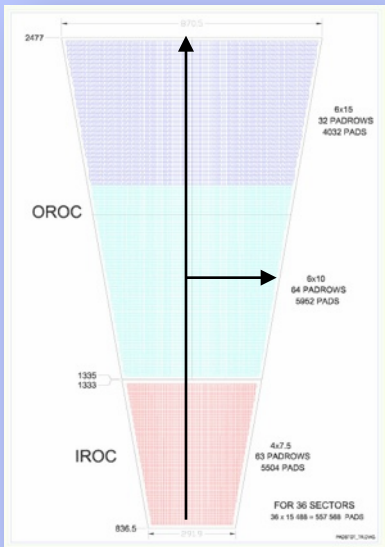
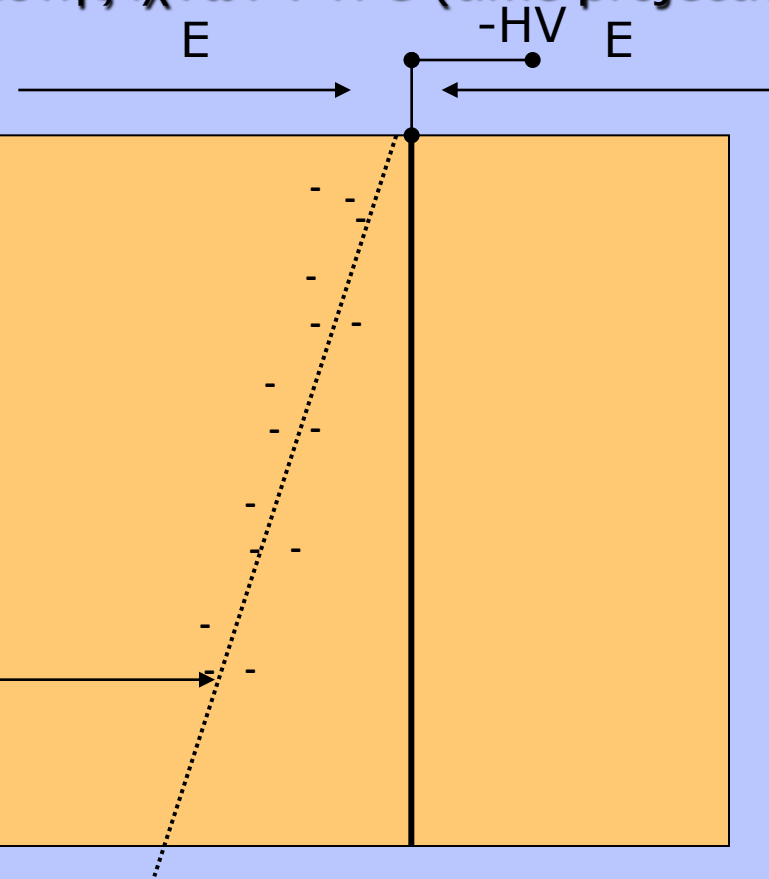
# Time Projection Chamber



# TPC : λειτουργία

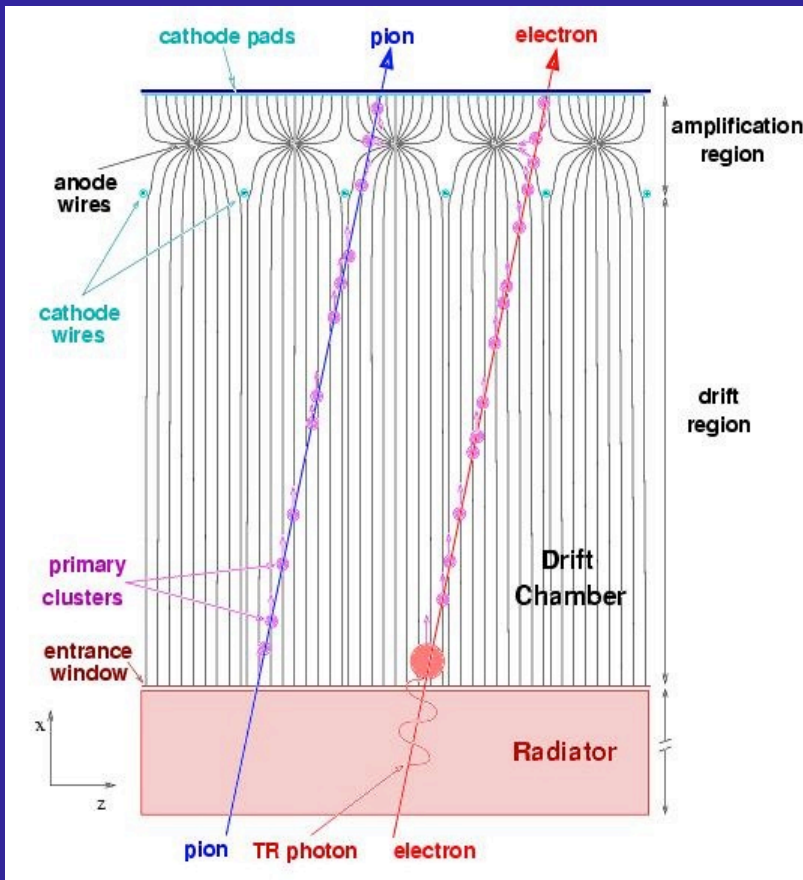


- Ο βασικός ανιχνευτής ιχνών : TPC (time projection chamber)



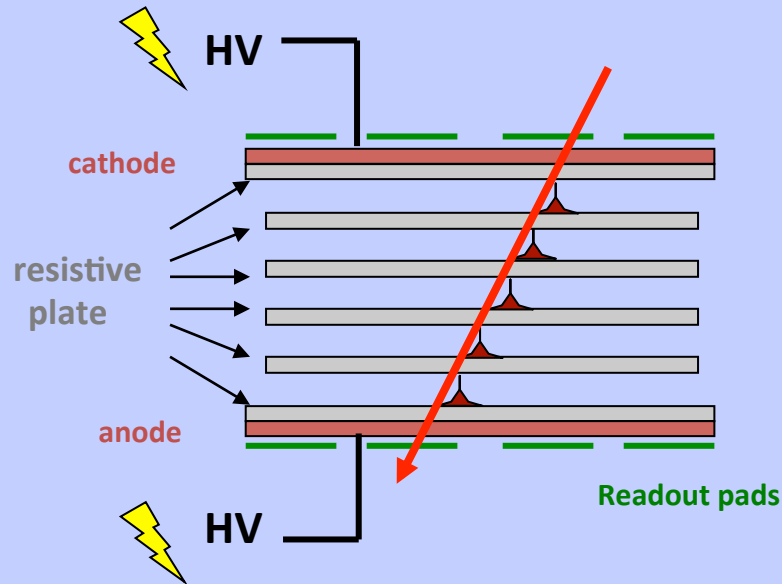
# Transition Radiation Detector

- 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**

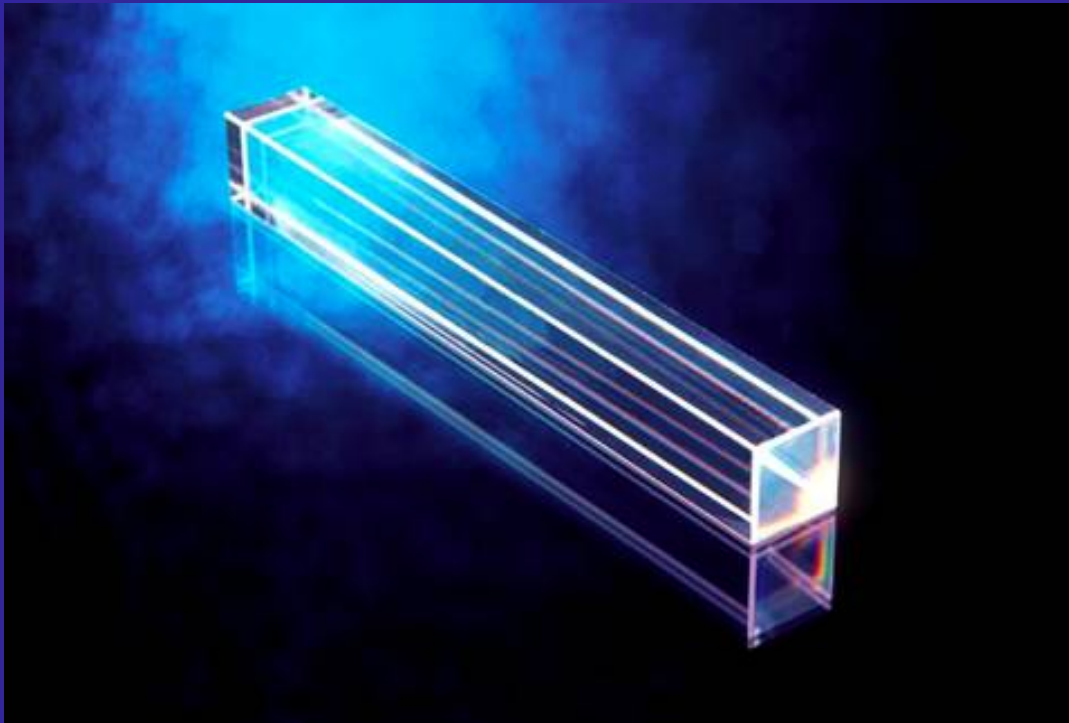
Χρόνος και μήκος διαδρομής (γνωστή από τους ανιχνευτές ιχνών) δίνουν την ταχύτητα

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

$\text{PbWO}_4$  : 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

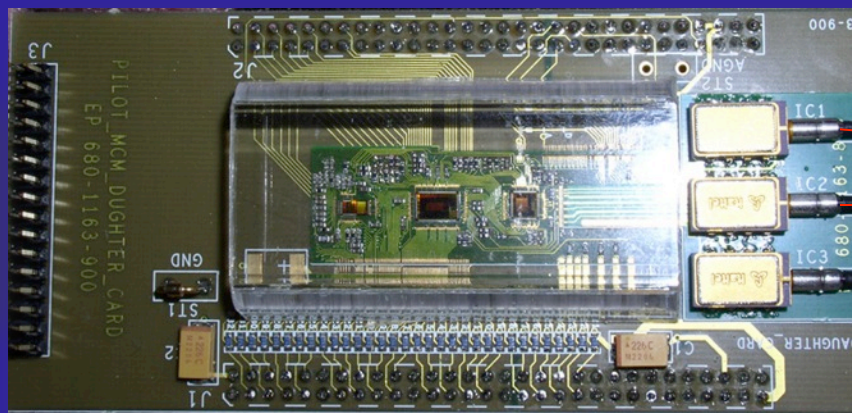
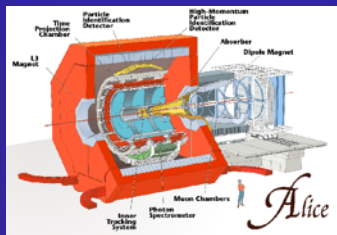


Ηλεκτρικό σήμα

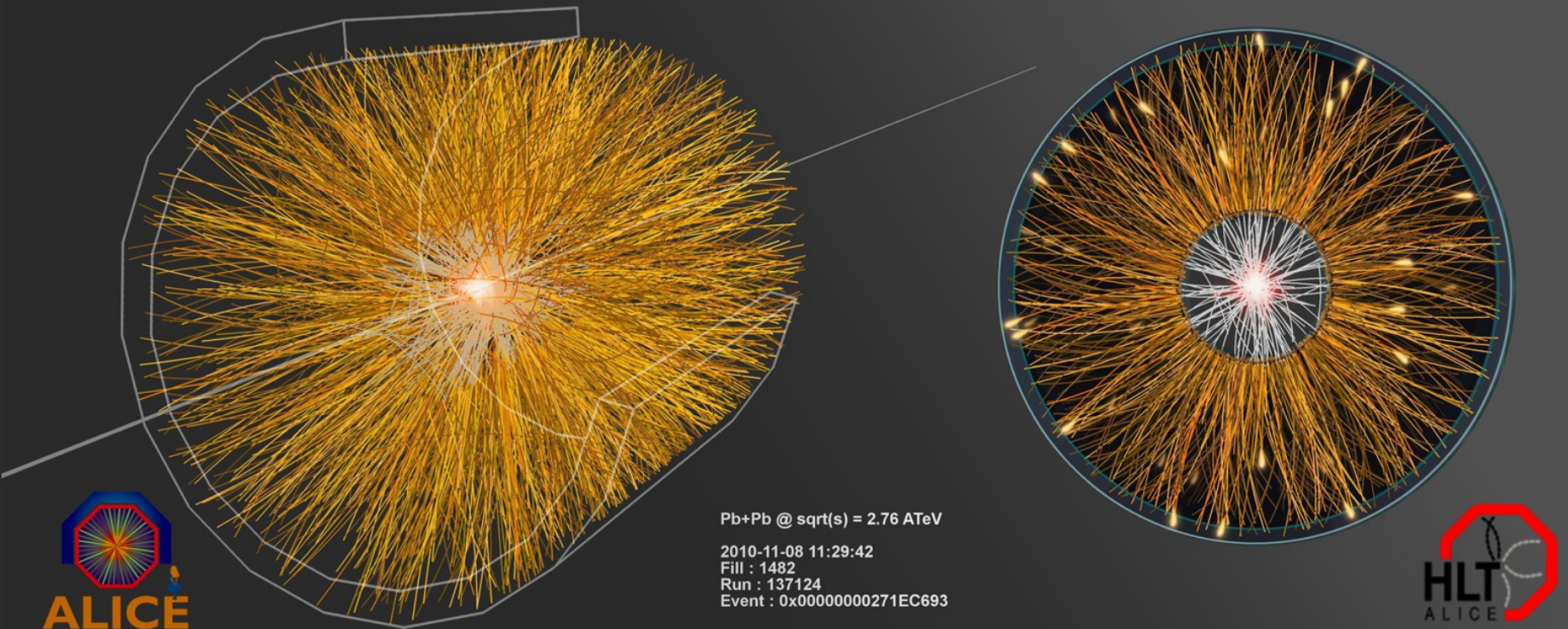
Ηλεκτρομαγνητικό καλορίμετρο

# Επεξεργασία των σημάτων

- Το σήμα από κάθε ανιχνευτικό στοιχείο ( $\sim 16$  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.



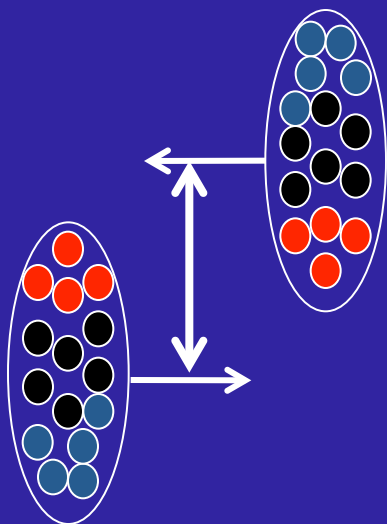
Για μια κεντρική σύγκρουση πυρήνων μολύβδου, μόνο το TPC παράγει 80 Mbyte



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

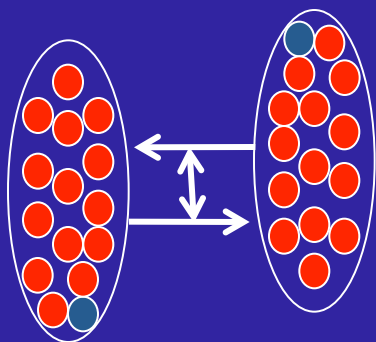


# Γεωμετρία της σύγκρουσης Pb-Pb



## Περιφερειακή σύγκρουση

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

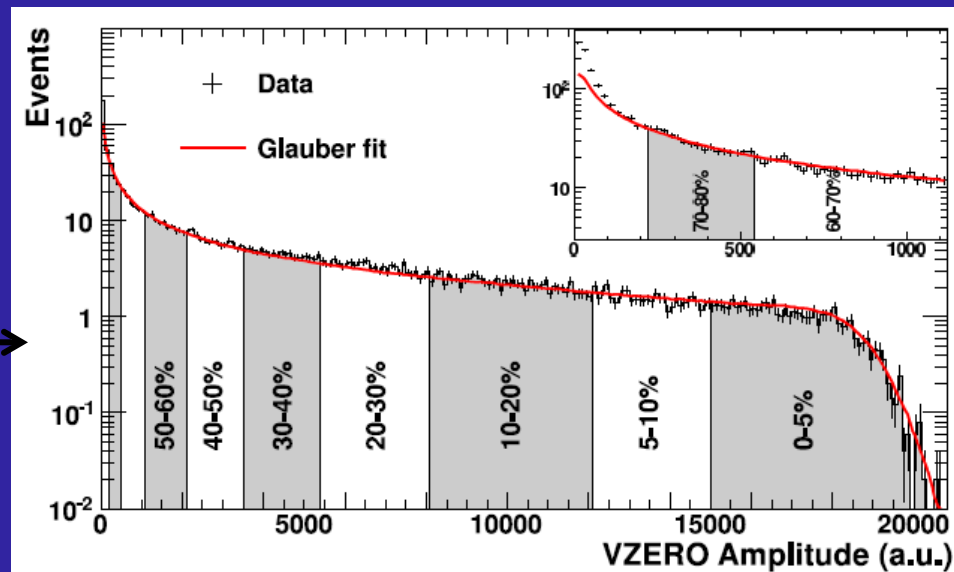


## Κεντρική σύγκρουση

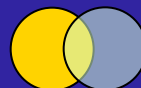
- Μικρή απόσταση ανάμεσα στα κέντρα των πυρήνων
- Μεγάλος αριθμός νουκλεονίων που συμμετέχουν → παράγονται πολλά φορτισμένα σωμάτια (μεγάλη πολλαπλότητα)

# Γεωμετρία της σύγκρουσης Pb-Pb

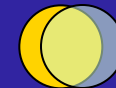
Κατανομή πλάτους σήματος σε πλαστικούς σπινθηριστές V0 περιγράφεται με ένα απλό μοντέλο (Glauber, κόκκινη γραμμή).



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

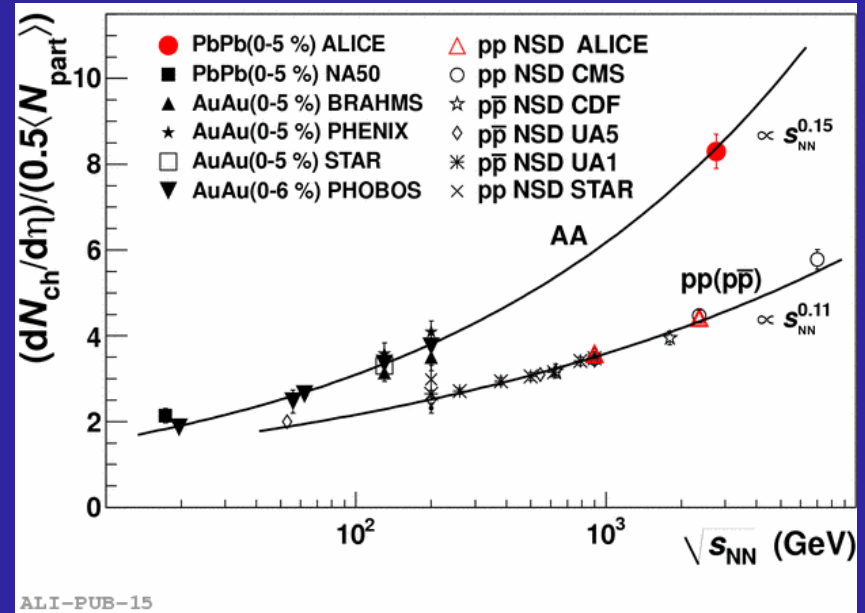
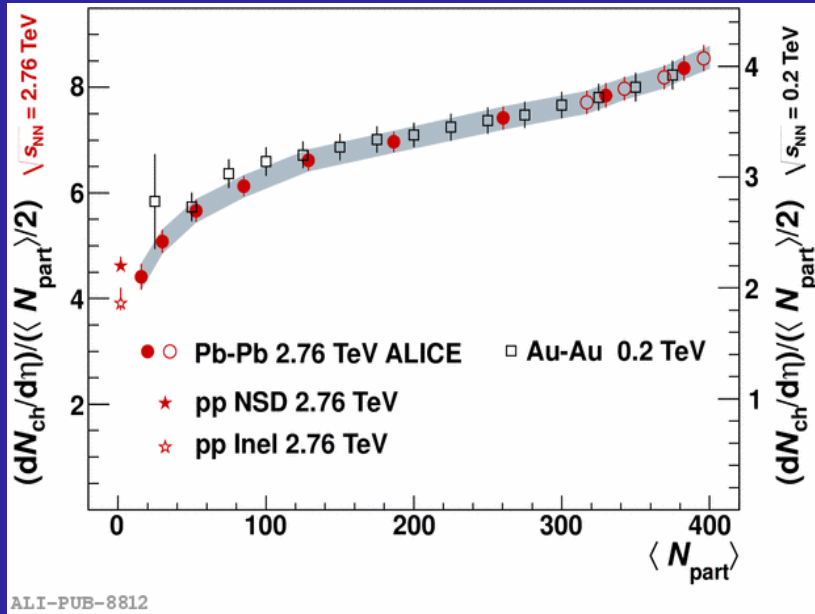


ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΕΣ



ΚΕΝΤΡΙΚΕΣ

# Ενεργειακή πυκνότητα



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

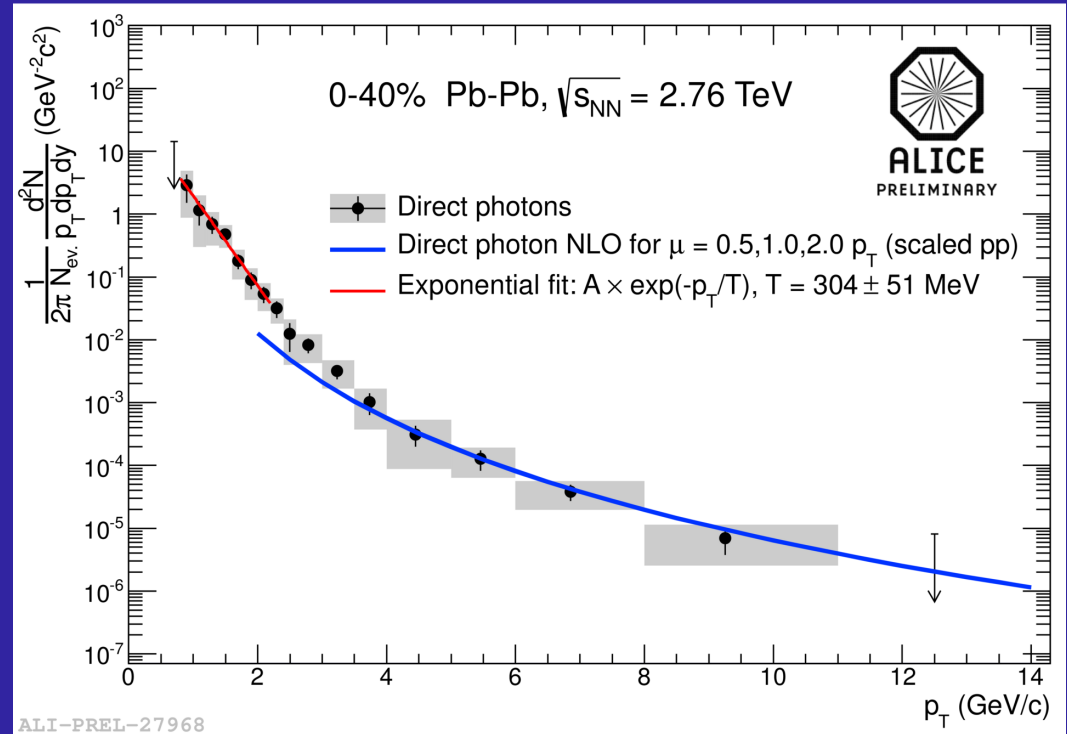
Από τον αριθμό των φορτισμένων σωματιδίων βρίσκουμε την πυκνότητα ενέργειας 3 φορές μεγαλύτερη από ότι στο RHIC.  $15 \text{ GeV} / \text{fm}^3$  και την αρχική θερμοκρασία του συστήματος 30% υψηλότερη από ότι στο RHIC

$N_{part}$ : 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.

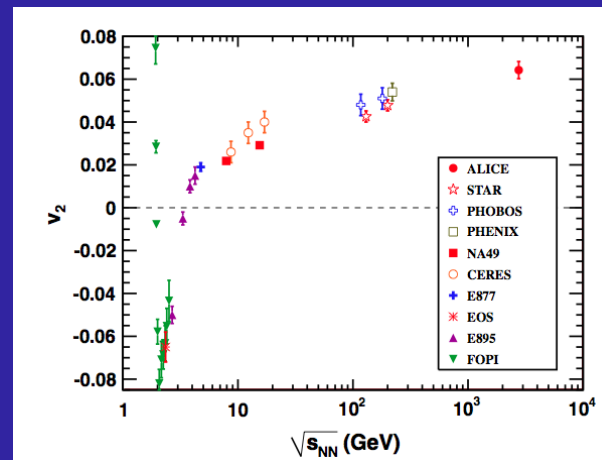
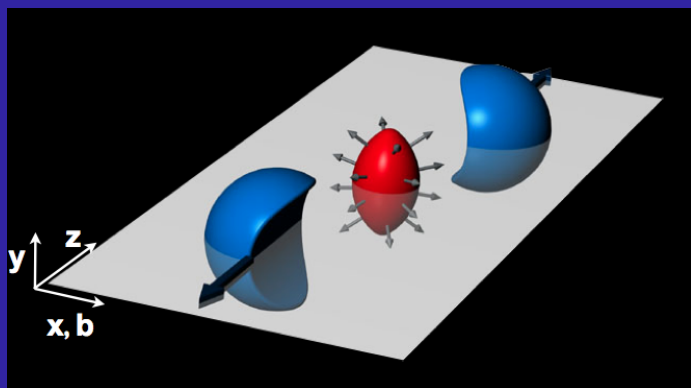
Από την αντίστροφη κλίση της κατανομής αυτών των φωτονίων βρίσκουμε ότι η θερμοκρασία του συστήματος που δημιουργείται από τις συγκρούσεις ιόντων μολύβδου είναι μερικά τρισεκατομύρια βαθμοί Kelvin.



250 000 φορές υψηλότερη από τη θερμοκρασία στο κέντρο του ήλιου

# Flow (ροή)

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



Elliptic flow : 2<sup>nd</sup> Fourier coefficient of azimuthal distribution of particles in momentum space

Σχήμα αμυγδάλου

Πολύ περισσότερα αδρόνια παράλληλα στο επίπεδο της αλληλεπίδρασης παρά στο κάθετο προς αυτό

## Ενα τέλειο υγρό στο LHC

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

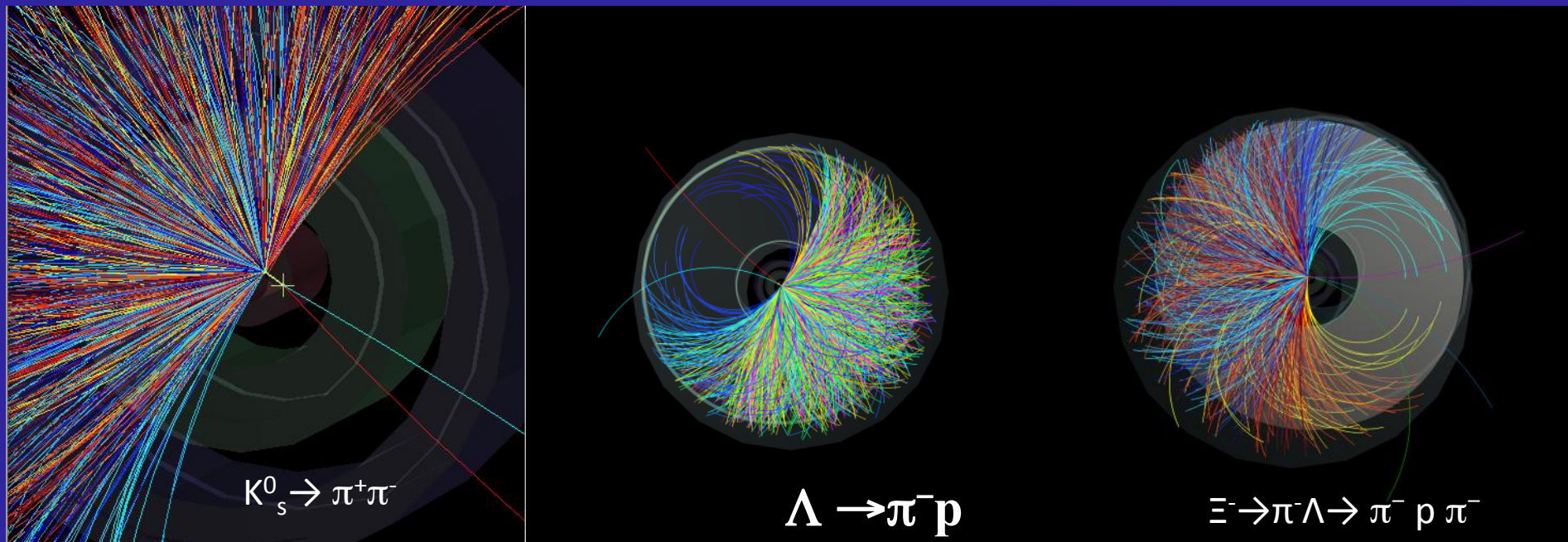
Η πυκνή ύλη που δημιουργείται από τη σύγκρουση ρέει σχεδόν χωρίς τριβή (όπως το νερό, που έχει μικρό ιξώδες) και όχι όπως το μέλι που έχει μεγάλο ιξώδες.

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

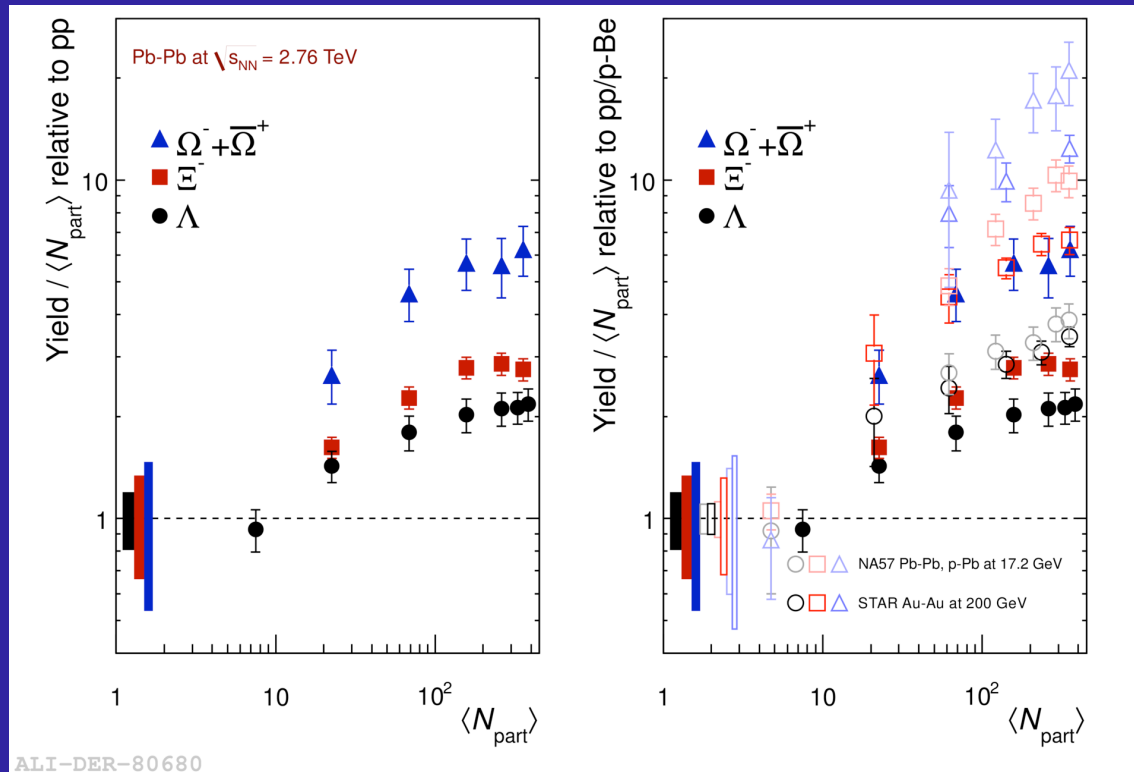
# Ενίσχυση της παραδοξότητας (Strangeness enhancement)



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/ $\langle N_{part} \rangle$

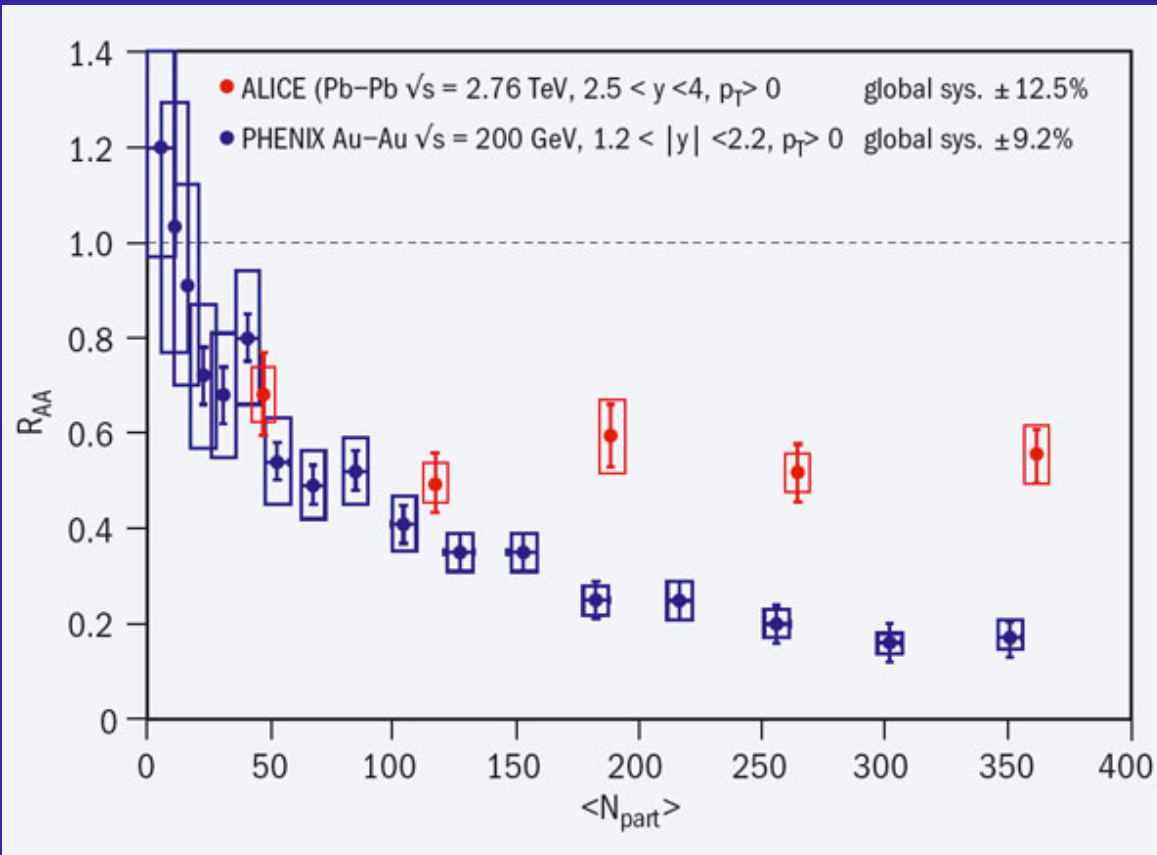
Αριθμος των σωματιδίων του ίδιου τύπου ανά αλληλεπίδραση pp/2



## 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

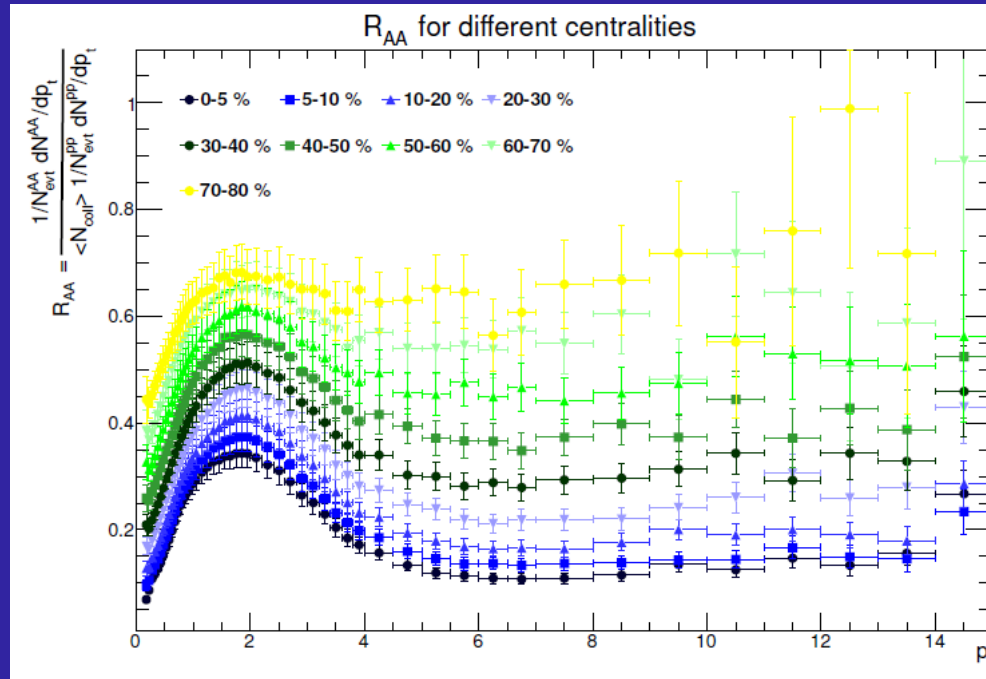


- Σε πολύ κεντρικές συγκρούσεις έχουμε αναγέννηση του J/ψ
- Δύο φαινόμενα που συναγωνίζονται
- Ελάττωση του J/ψ λόγω αλληλεπίδρασης με το QGP
- Δημιουργία πολλών J/ψ λόγω του μεγάλου αριθμού ζευγαριών  $c - \text{αντι-}c$  που δημιουργούνται λόγω της τεράστιας ενέργειας της σύγκρουσης

## $R_{AA}$ Nuclear modification factor

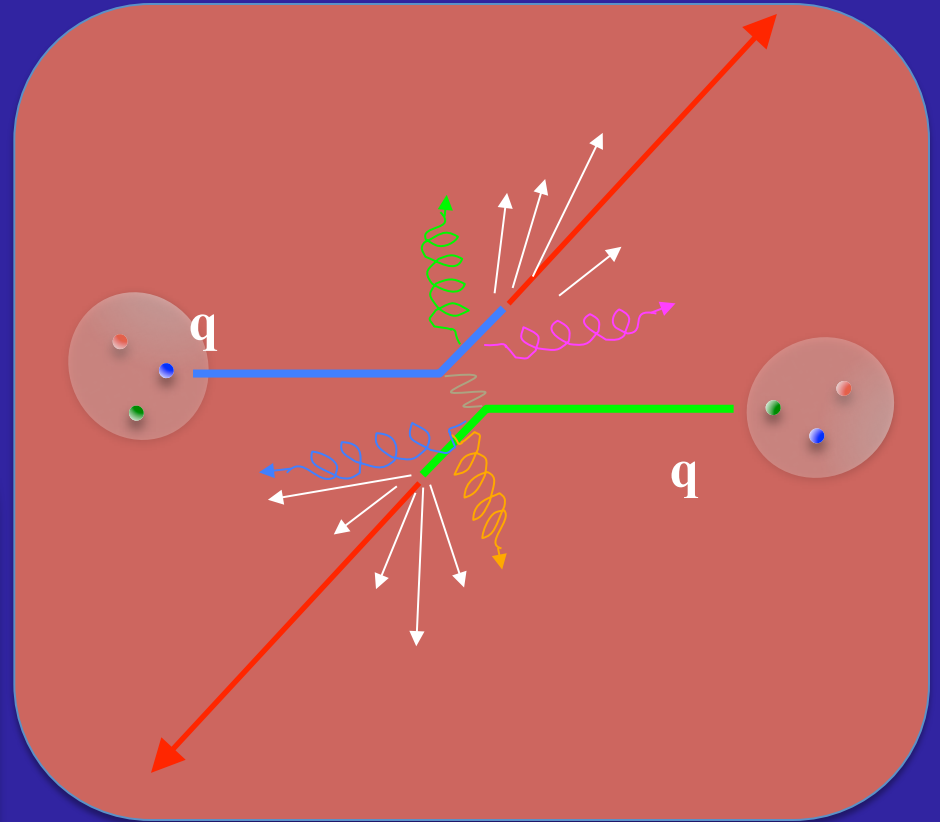
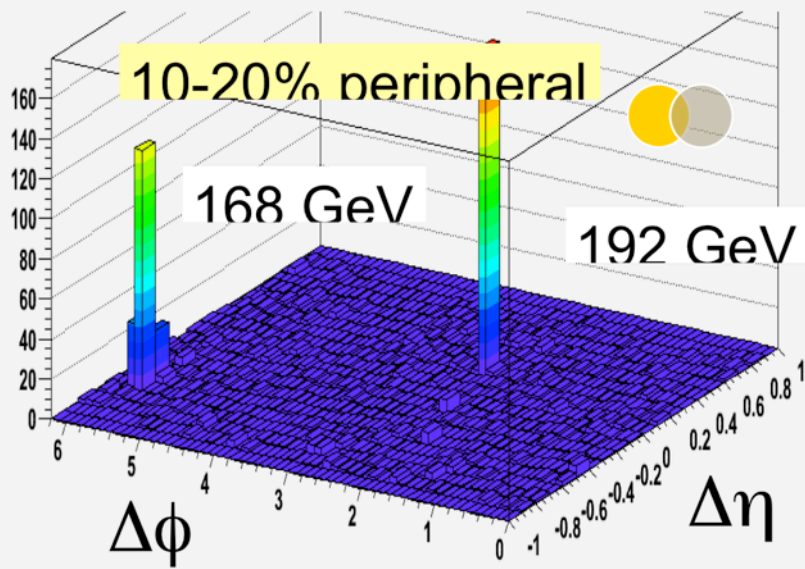
Συγκρίνουμε τον αριθμό των J/ψ που παρατηρούμε σε συγκρούσεις μολύβδου με τον αντίστοιχο αριθμό σε συγκρούσεις πρωτονίων (όπου δεν έχουμε QGP).

# $R_{AA}$ – Nuclear Modification Factor



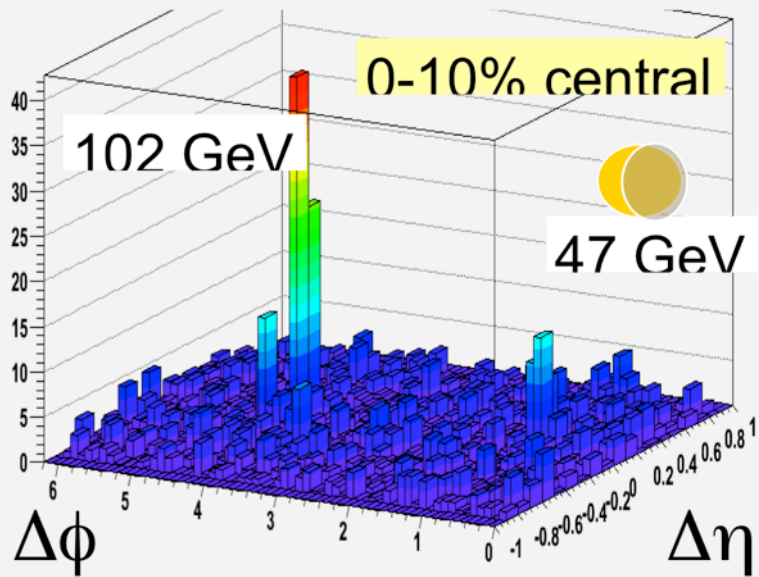
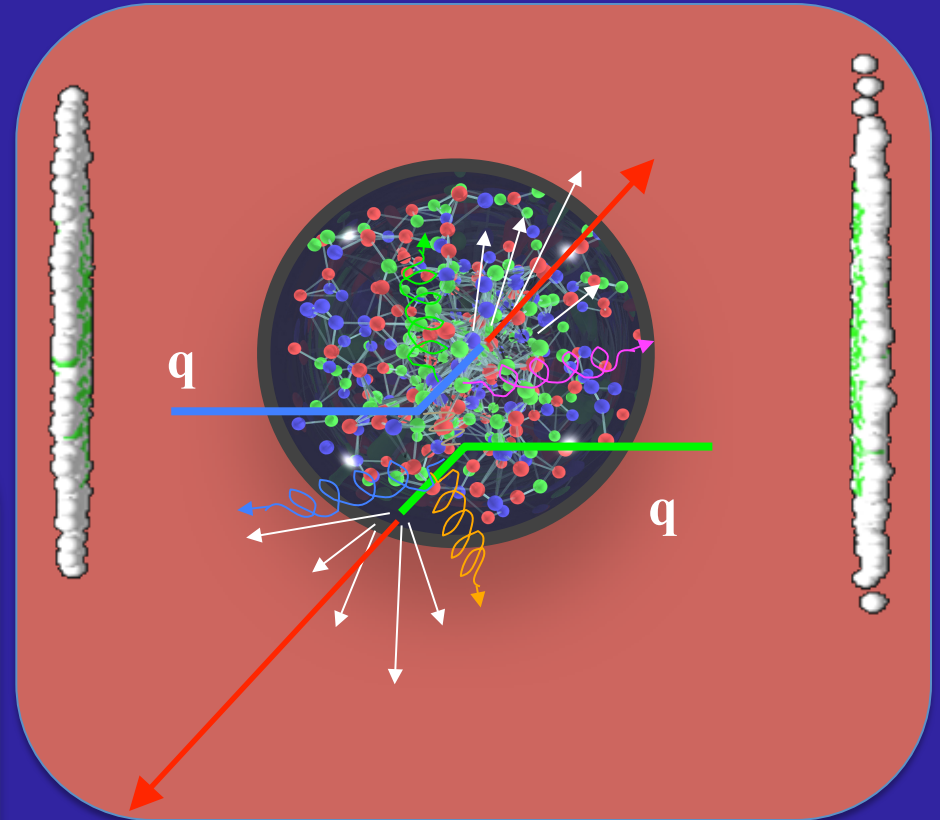
- Pb-Pb collision  $\neq$  many independent pp collisions
- $\rightarrow$  comparison of unidentified charged particle momentum spectra in pp and Pb-Pb in different collision centralities

# 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 απορροφιέται 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 σε συνδυασμό με τη βελτιωμένη λειτουργία των ανιχνευτών αναμένεται να δώσουν ακόμη πιο ενδιαφέροντα αποτελέσματα στη μελέτη της πρωταρχικής ύλης του σύμπαντος

Σας ευχαριστώ πολύ