

# CORFU 2018/3

‘Ερευνώντας την πρώτη Ύλη του Σύμπαντος’

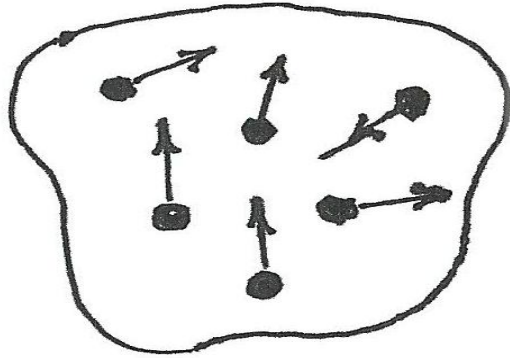
Συνέδριο COPD2018 (Critical Point and Onset of  
Deconfinement)

Νίκος Αντωνίου

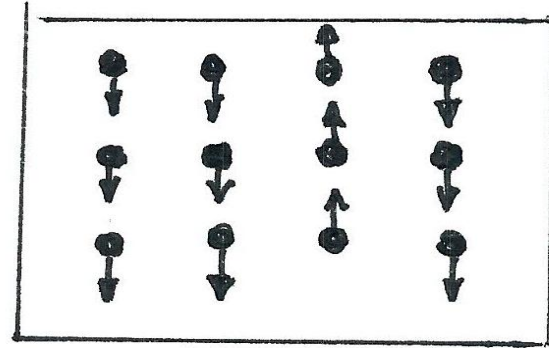
Πανεπιστήμιο Αθηνών

# Σύντομη εισαγωγή

1. Επιστήμη της Ύλης : Σύνθεση “απείρως” μεγάλου αριθμού στοιχειωδών οντοτήτων (άτομα , spin....) και των αλληλεπιδράσεων τους : Στατιστική Μηχανική , Θεωρία πεδίων ...
2. Φαινομενολογία της Ύλης : “Θερμοδυναμική”  
Μακροσκοπικές ιδιότητες ενός συστήματος ύλης:



αέριο



μαγνήτης 2d

- Ενέργεια-Εντροπία (E ,S)
- Εντροπία : μέτρο ελλείμματος πληροφορίας (πλήθος μικροσκοπικών καταστάσεων οδηγούν στην ίδια ενέργεια E)

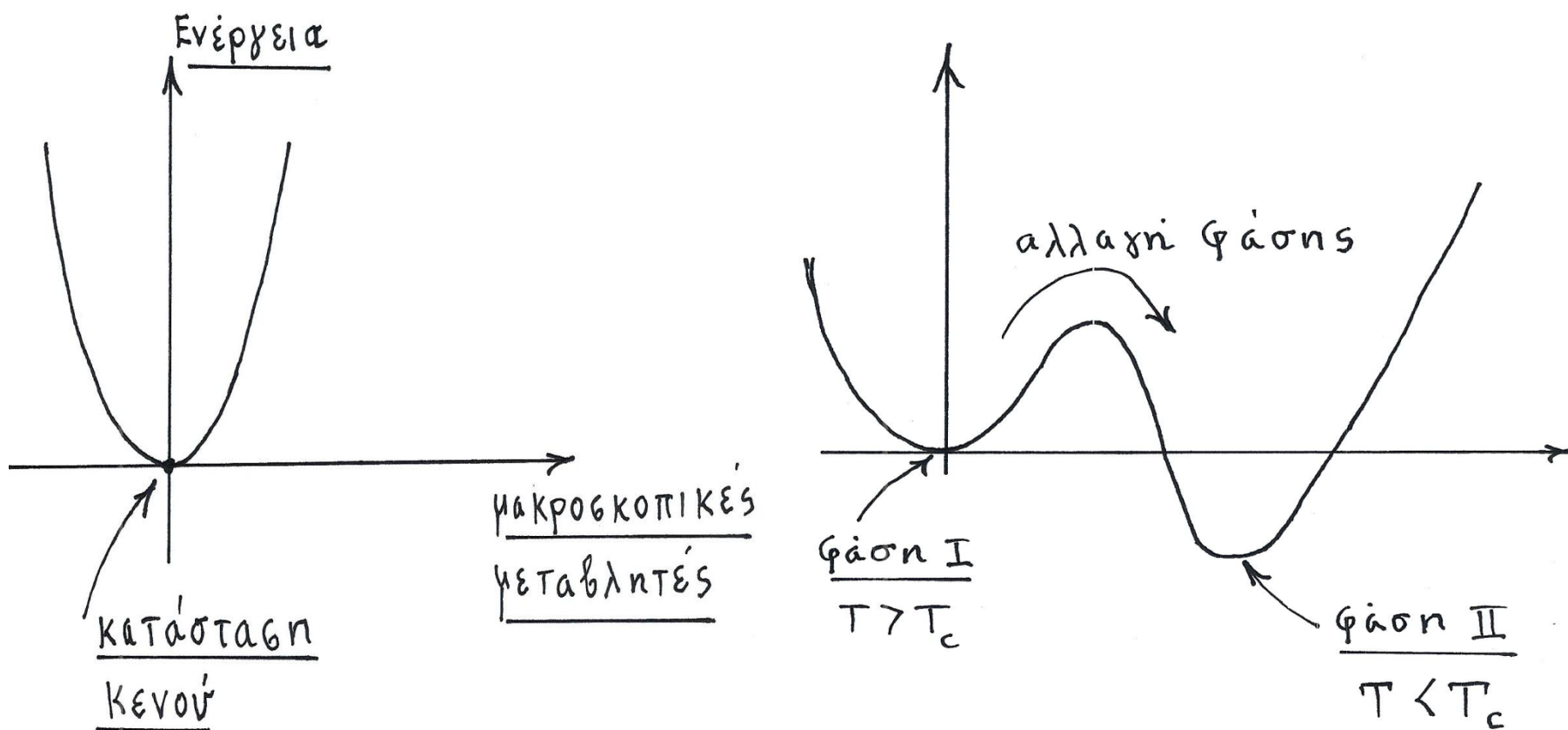
- Θερμότητα-θερμοκρασία ( $Q, T$ )

Το φυσικό περιεχόμενο της εντροπίας:  $\Delta S = \frac{\delta Q}{T}$

- “Η μεταβολή της εντροπίας του συστήματος ( $\Delta S$ ) συνδέεται με την μεταφορά ενέργειας  $\delta Q$  (θερμότητας). Ο συντελεστής της αναλογίας  $\delta Q \sim \Delta S$  είναι η θερμοκρασία του συστήματος. Η θερμοδυναμική διδάσκει την συμπεριφορά της εντροπικής ενέργειας στην φύση (τρεις νόμοι της θερμοδυναμικής )

3. Διακριτές φάσεις της Ύλης : (Το φαινόμενο αλλαγής φάσης): Ένα μακροσκοπικό σύστημα ύλης χαρακτηρίζεται από την κατάσταση ελαχίστης ενέργειας (κενό ): Η κβαντική θεωρία πεδίων διδάσκει ότι ένα σύστημα ύλης με απείρους βαθμούς ελευθερίας, μπορεί να επιλέξει διαφορετικές (μη ισοδύναμες) καταστάσεις κενού. Αντιστοιχούν σε διακριτές φάσεις της ύλης και η μετάβαση από την μια φάση στην άλλη μπορεί να συμβεί όταν μεταβληθεί καταλλήλως η θερμοκρασία (phase transition)

Είναι θεμελιώδες και οικουμενικό φαινόμενο , έχει παίξει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη του Σύμπαντος και στην κατανόηση της δομής και λειτουργίας του κενού στην φύση:



4. Ο ρόλος της “συμμετρίας” στις αλλαγές φάσης :

Η φάση υψηλής θερμοκρασίας ( $T > T_c$ ) χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερο βαθμό “συμμετρίας”, συγκρινόμενη με την φάση χαμηλής θερμοκρασίας ( $T < T_c$ ).

Σημαντική εφαρμογή : Η κοσμολογία διδάσκει ότι η θερμική Ιστορία του Σύμπαντος ήταν μια διαδοχή κοσμικών αλλαγών φάσης, σε διαφορετικές εποχές και θερμοκρασίες.

Προκύπτει το συμπέρασμα ότι το αρχέγονο Σύμπαν, την πρώιμη εποχή μετά την Μεγάλη Έκρηξη ήταν ένα σύστημα

ύλης με ύψιστο βαθμό συμμετρίας (όλα τα σωματίδια είχαν μηδενική μάζα, οι αλληλεπιδράσεις ήταν ενοποιημένες...).

5. Δομή και λειτουργία του κενού: Η κατανόηση του μηχανισμού αλλαγής φάσης (Κβαντική θεωρία) διδάσκει ότι το “κενό” είναι ένα πολύπλοκο μέσο στο οποίο συμπυκνώνεται η ενέργεια “βαθμωτών πεδίων” τα οποία συμμετέχουν στον μηχανισμό αλλαγής φάσης και τα οποία ενίοτε εμφανίζονται με τις ιδιότητες πραγματικών σωματιδίων, σε κατάλληλα πειράματα (Higgs).

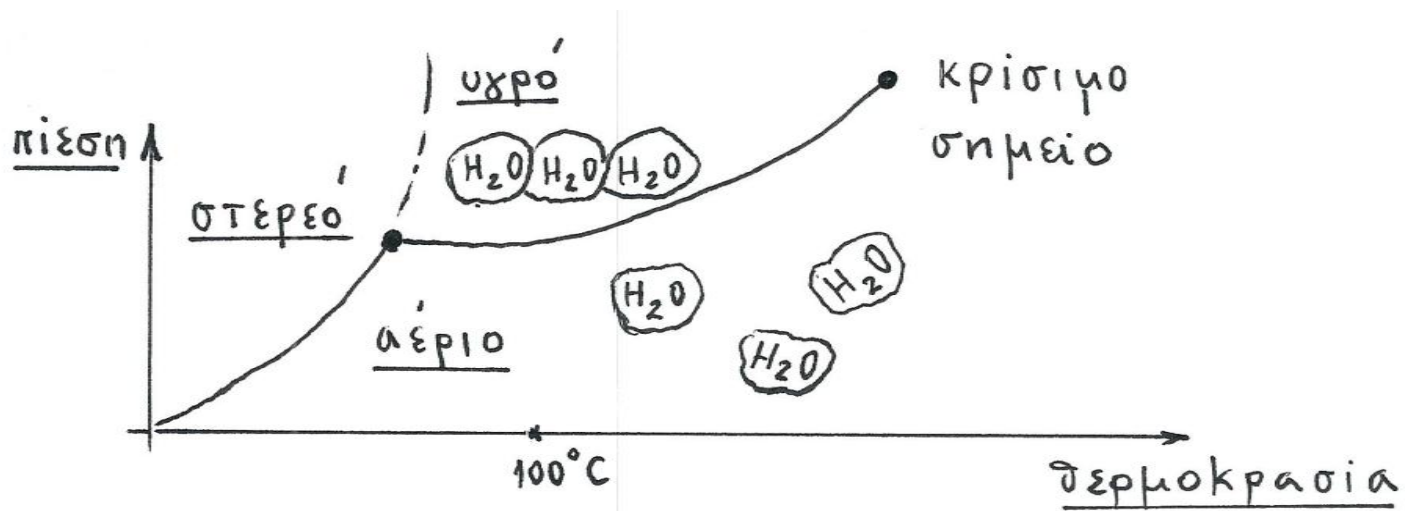


# Συμβατική Ύλη

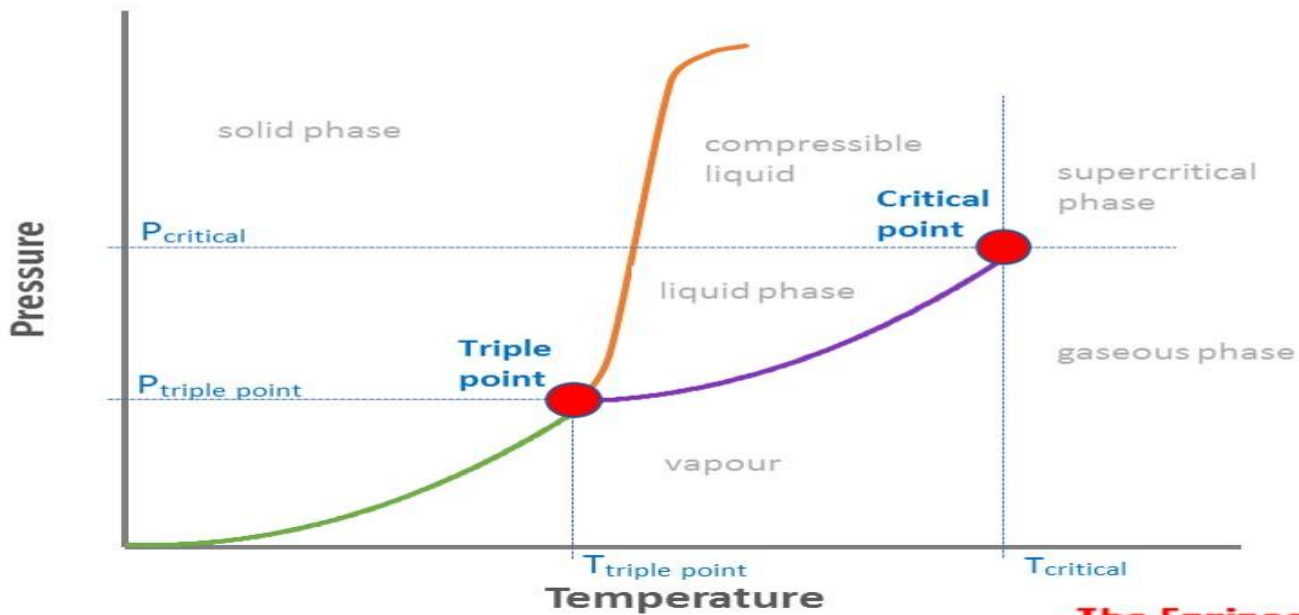
α) Στοιχειώδεις οντότητες :  $p$  ,  $n$  ,  $e^-$

β) Θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις : πυρηνικές δυνάμεις ( $p,n$ ) και ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις (QED). Στην εξέλιξη του Σύμπαντος οι οντότητες  $p,n$  (αδρόνια) εμφανίσθηκαν την εποχή  $10^{-5}$  sec μετά την Μεγάλη Έκρηξη και αποτελούν τα βασικά συστατικά της συμβατικής Ύλης.

γ) Διάγραμμα φάσεων (υγρό-αέριο) στην συμβατική Ύλη:



**Triple point and Critical point**



**The Engineering ToolBox**

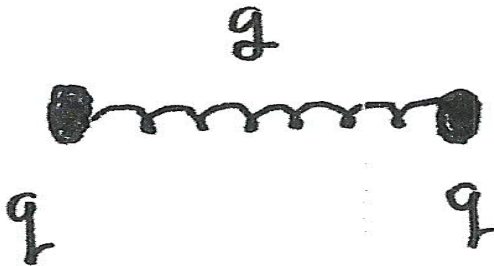
www.EngineeringToolBox.com

# Ύλη των quarks (quark matter) (Πρώτη Ύλη του Σύμπαντος)

(α) Στοιχειώδεις οντότητες : quark  $u : q = +\frac{2}{3}$

quark  $d : q = -\frac{1}{3}$

(β) θεμελιώδης αλληλεπίδραση : Κβαντική Χρωμοδυναμική  
(QCD)



$q$  : quark  
 $g$  : gluon

- Η ύλη των quarks εμφανίσθηκε στο σύμπαν πολύ νωρίτερα από την συμβατική ύλη ( $10^{-34}$  sec μετά την Μεγάλη Έκρηξη)

- η δέσμευση των quarks (confinement) οδηγεί στο σχήμα :

$$(uud) \rightarrow p, \quad (udd) \rightarrow n$$

## Elementary Particles

- Protons and neutrons are made from two types of quarks: **Up (u)** and **Down (d)**.
- **u**-quarks have electric charge **+2/3** while **d**-quarks have charge **-1/3** (electron has electric charge **-1** in these units).

Proton                      Neutron

The diagram illustrates the internal structure of a Proton and a Neutron. On the left, a yellow circle labeled 'Proton' contains three quarks: two blue circles labeled '+2/3 U' and one green circle labeled '-1/3 d'. On the right, a yellow circle labeled 'Neutron' contains three quarks: one blue circle labeled '+2/3 U' and two red circles labeled '-1/3 d'. Red arrows point from the labels 'Proton' and 'Neutron' to their respective diagrams.

(γ) δύο θεμελιώδη ερωτήματα :

- I. Ποιος ήταν ο μηχανισμός “δημιουργίας” της ύλης των quarks ( $10^{-34}$  sec ,  $T = 10^{28\circ}$  K)
- II. Ποιος ήταν ο μηχανισμός της μετατροπής της ύλης των quarks στην συμβατική ύλη των αδρονίων (hadrons) p, n ...( $10^{-5}$  sec)

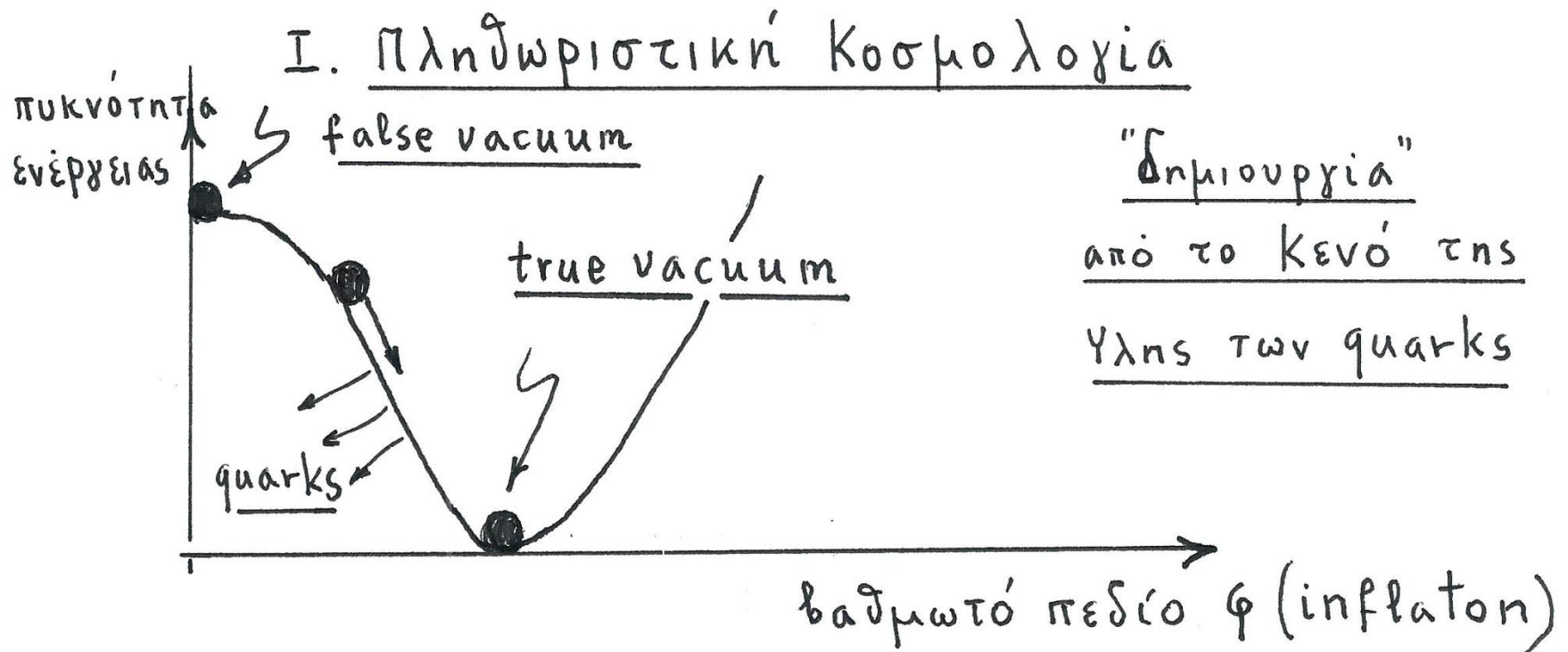
Η απάντηση στο ερώτημα I ανάγεται στην λεγόμενη

Πληθωριστική Κοσμολογία

ενώ η απάντηση στο ερώτημα II σε μια Κοσμική αλλαγή φάσης (quark-hadron phase transition) την εποχή

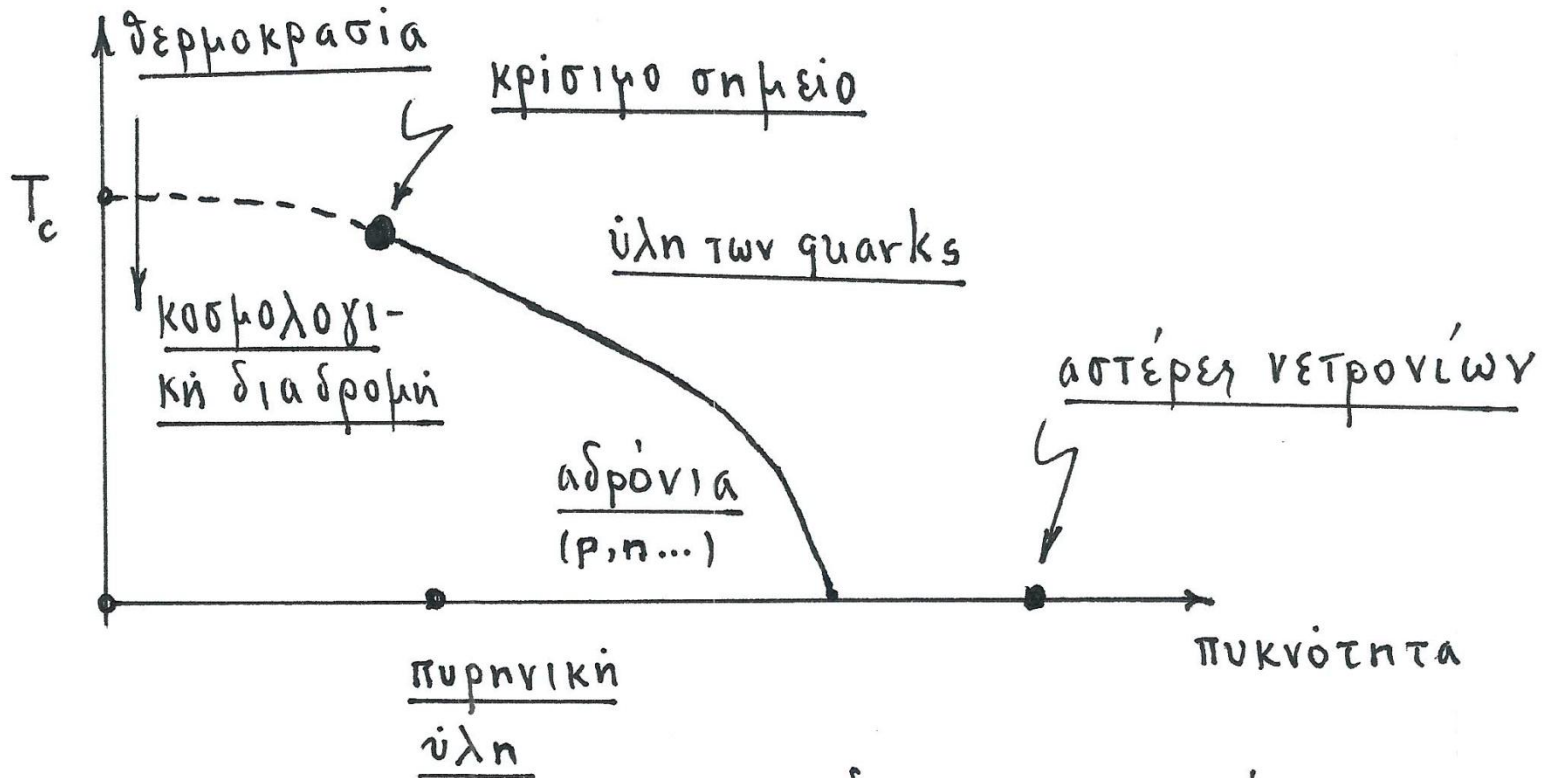
$t \approx 10^{-5}$  sec όταν η θερμοκρασία του σύμπαντος ήταν

$$T_c \approx 10^{12} \text{ }^\circ\text{K}$$



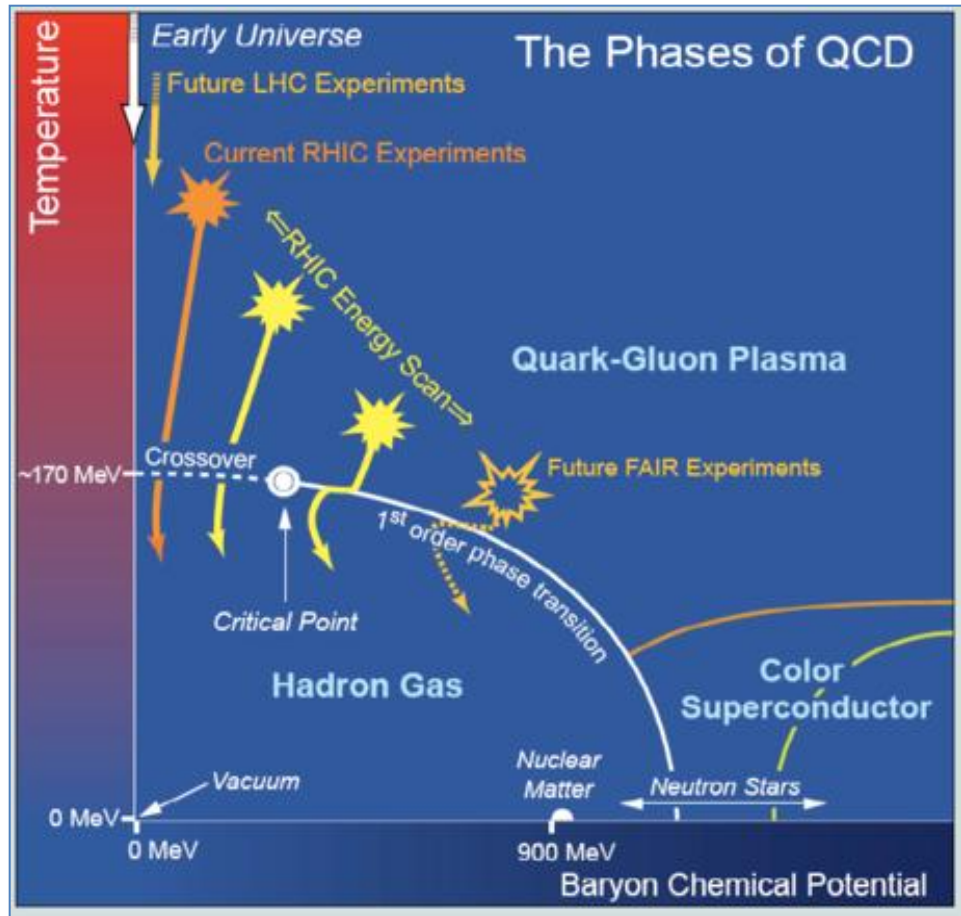
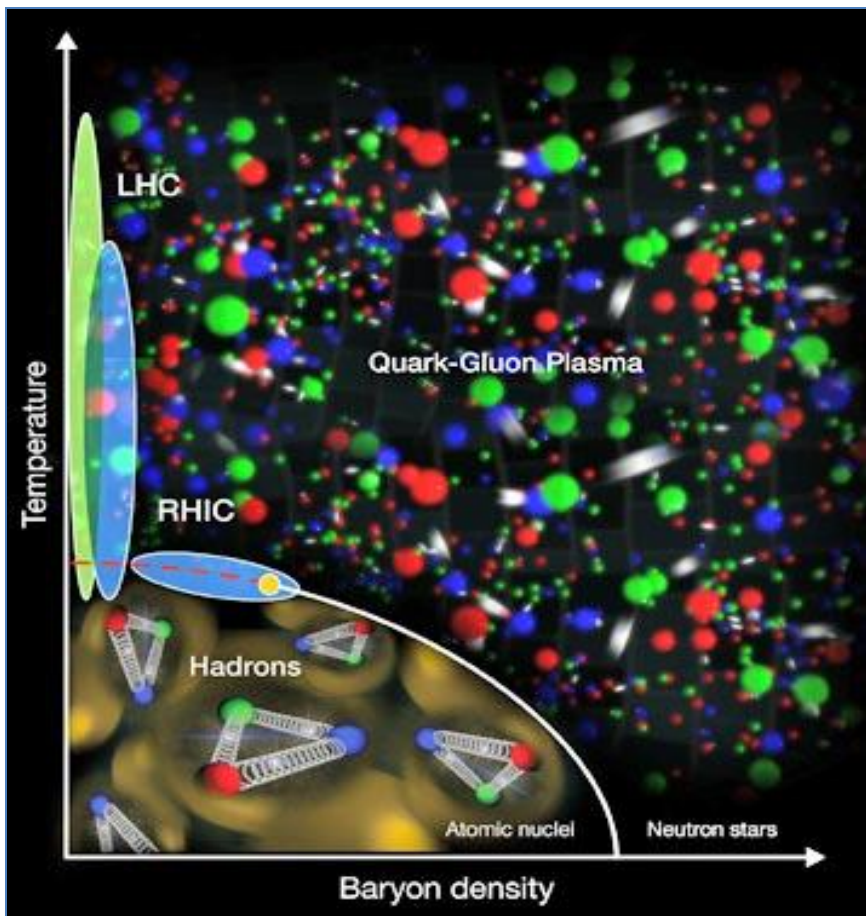
Η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας διδάσκει ότι η συγκέντρωση ενέργειας του βαθμωτού πεδίου  $\phi$  (inflaton) στην ασταθή κατάσταση του Κενού (false vacuum), έστω για μικρό χρονικό διάστημα, δημιουργεί ισχυρές, απωστικές δυνάμεις βαρύτητας οι οποίες οδηγούν σε μια “εκρηκτική” διαστολή του σύμπαντος (inflation). Η υπόλοιπη ενέργεια του πεδίου ελευθερώνεται με την μορφή σωματιδίων (quarks, leptons) καθώς το πεδίο  $\phi$  οδηγείται πλέον στην ευσταθή κατάσταση του κενού (true vacuum).

## II. Αλλαγή φάσης (quark - hadron)



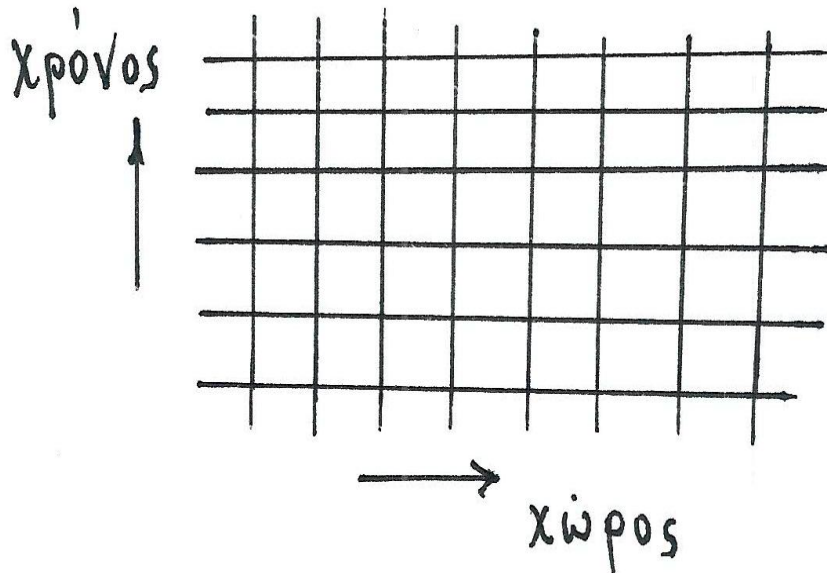
Διάγραμμα φάσεων





# Θεωρητική μεθοδολογία έρευνας (QCD)

(α) Η Χρωμοδυναμική ως θερμική θεωρία πεδίου διατυπώνεται σε ένα χωροχρονικό πλέγμα (lattice QCD) που αποτελεί προσέγγιση του συνεχούς χωροχρόνου:



πεδία:  $\psi$  (quarks)  
 $A_\mu$  (gluons)

Η λύση , από πρώτες αρχές , επιδιώκεται με την χρήση αριθμητικών μεθόδων σε μεγάλης ισχύος υπολογιστικά συστήματα...

(β) Για την μελέτη του διαγράμματος φάσεων της QCD (σχήματα) και ειδικά των κρίσιμων διακυμάνσεων (critical fluctuations), όλες οι πληροφορίες συγκεντρώνονται σε μια μοναδική οντότητα (ονομάζεται παράμετρος τάξης) η οποία αναδεικνύει τις οικουμενικές και σημαντικές ιδιότητες του κρίσιμου σημείου. Είναι ένα βαθμωτό πεδίο ( $\sigma$  - field) που

συνδέεται με την δομή και λειτουργία του Κενού  
(σύμφωνα με προηγούμενη συζήτηση) στη γειτονιά ,  
τώρα , της κρίσιμης θερμοκρασίας των ισχυρών  
αλληλεπιδράσεων ( $T_c \approx 10^{12} \text{ }^\circ K$ )

Συμπέρασμα : Η θεωρία του κρίσιμου σημείου της QCD  
ανάγεται στην "κλασική" θεωρία του βαθμωτού πεδίου –  $\sigma$

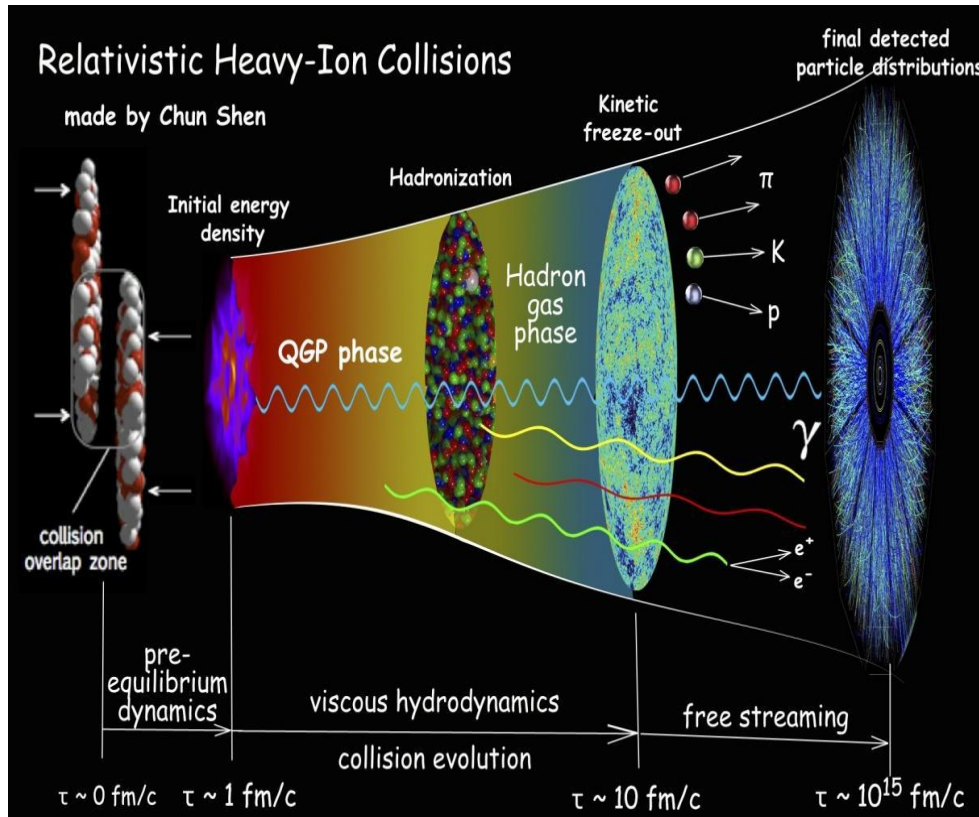
# Τρεις αξιοπρόσεκτες Κοσμολογικές Εποχές

- 1) Πεδίο -  $\Phi$  (inflaton) :  $10^{-34}$  sec,  $T_c \approx 10^{28}$  °K, G-unification
  - 2) Πεδίο - Higgs :  $10^{-12}$  sec,  $T_c \approx 10^{15}$  °K, EW-unification
  - 3) Πεδίο -  $\sigma$  :  $10^{-5}$  sec,  $T_c \approx 10^{12}$  °K, quark-hadron phase transition
- Σημερινό Σύμπαν :  $10^{10}$  y,  $T_c \approx 2.7$  °K
  - Σημερινό Κενό : Ωκεανός “ανενεργών” βαθμωτών πεδίων του παρελθόντος

## Η μάζα των quarks : $m_q$

- Στην Εποχή του πεδίου –  $\phi$  και την εμφάνιση της ύλης των quarks ( $10^{-34}$  sec) η μάζα των quarks :  $m_q = 0$
- Στην Εποχή του πεδίου – Higgs ( $10^{-12}$  sec) τα quarks απέκτησαν μικρή μάζα :  $m_q \approx 3-10 \text{ MeV}$
- Στην Εποχή του πεδίου –  $\sigma$  ( $10^{-5}$  sec) τα quarks, δεσμευμένα στα νουκλεόνια ( $m_q \approx 3m_q$ ) απέκτησαν την τελική τους μάζα  $m_q \approx 300 \text{ MeV}$

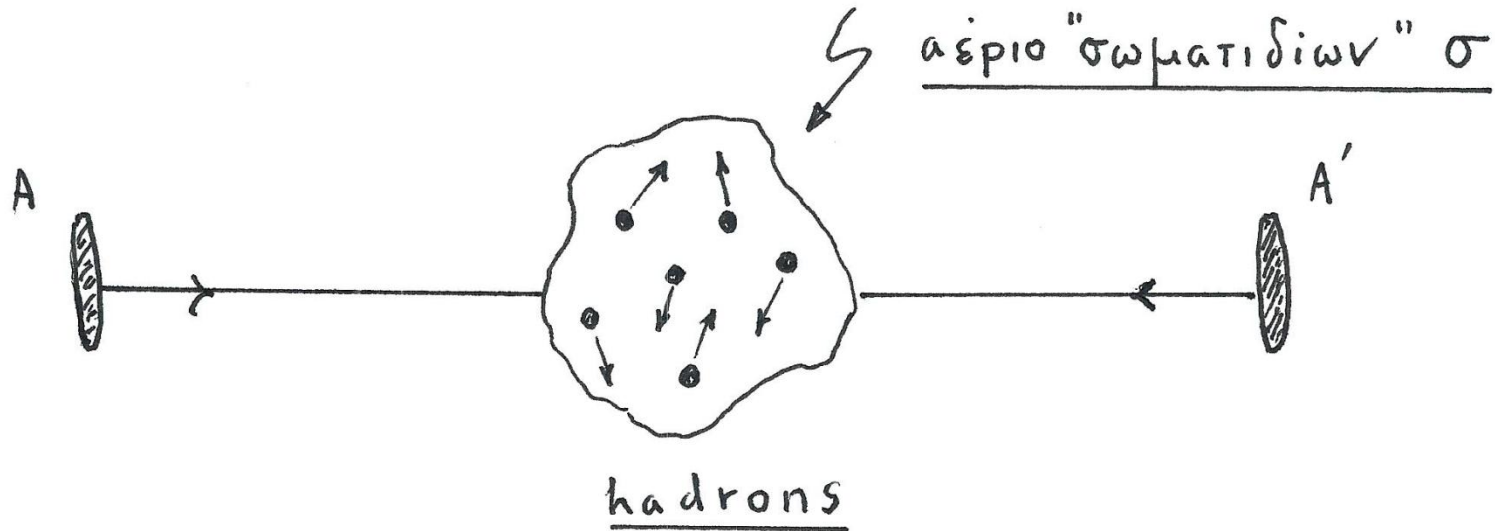
# Πειραματική μεθοδολογία (Heavy-Ion collisions)



- Η σύγκρουση βαρέων ιόντων(πυρήνων) σε υψηλές ενέργειες δημιουργεί συνθήκες που επικρατούσαν στο Σύμπαν την Εποχή της αλλαγής φάσης quark-hadron ( $t \approx 10^{-6}$  sec,  $T_c \approx 10^{12o}$  K)

## Τρέχοντα Πειράματα :

$A + A' \rightarrow \text{hadrons} : Pb + Pb, A_u + A_u, S_i + S_i, A_r + S_c, X_e + L_a \dots$

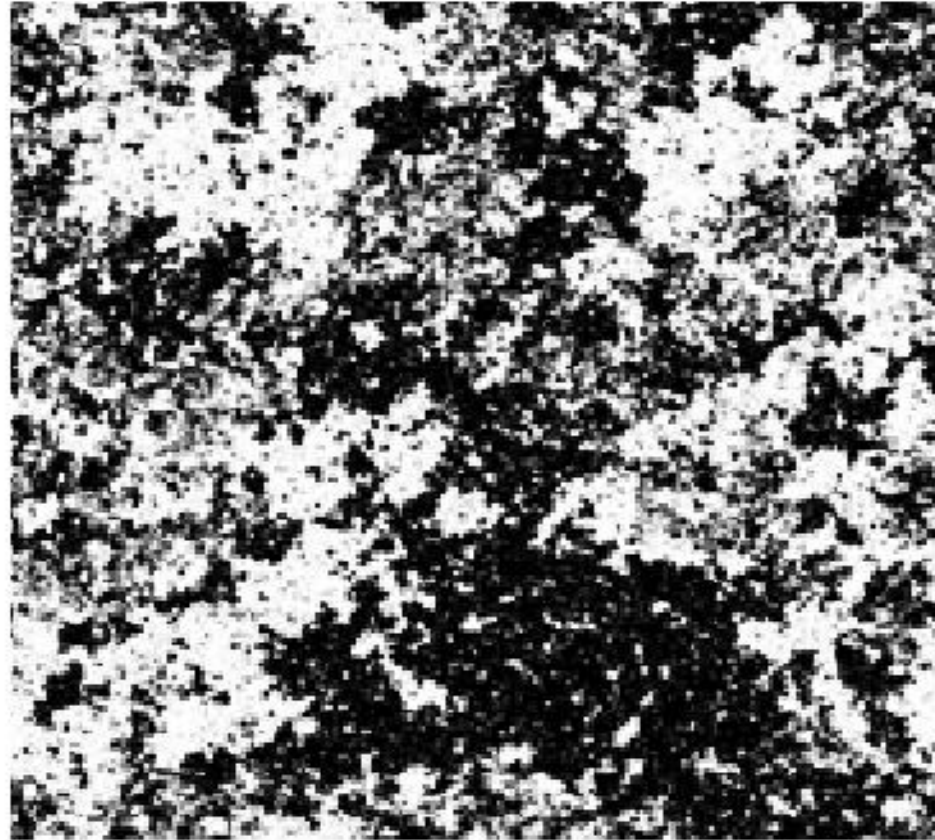


Ενδιαφέρουσα επιλογή : "αέριο" σωματιδίων  $-\sigma : \sigma \rightarrow \pi^+ \pi^-$

Μετρήσεις σχετιζόμενες με την διέγερση του κενού, την αλλαγή φάσης στην περιοχή του κρίσιμου σημείου.



Κατάλληλο μέγεθος προς μέτρηση (Observable):  
Διακυμάνσεις πυκνότητας του ζεύγους πιονίων ( $\pi^+ \pi^-$ ) στον χώρο των ορμών. Στη γειτονιά του κρισίμου σημείου οι διακυμάνσεις αυτές ικανοποιούν χαρακτηριστικούς νόμους βάρθμισης (fractal)



**Fig. 10.3 Critical fluctuations.** The two-dimensional square-lattice Ising model near the critical temperature  $T_c$ . Here the 'islands' come in all sizes, and the equilibrium fluctuations happen on all time scales:

## Επιταχυντές Ιόντων τα τελευταία 30 χρόνια:

$$\sqrt{s}$$

AGS (BNL) : 5.4 GeV  
SPS (CERN) : 19 GeV  
RHIC (BNL) : 200 GeV  
LHC (CERN) : 5.500 GeV

$$\sqrt{s} :$$

[ *ενέργεια ζεύγους  
νουκλεονίων στο  
κέντρο μάζας* ]

## Επιταχυντές Ιόντων υπό κατασκευή

FAIR (GSI) : 8 GeV

NICA (JINR) : 4-11 GeV

J-PARC (JAPAN) : 2-6 GeV

Τα νέα πειράματα σε χαμηλές ενέργειες (FAIR, NICA, J-PARC)

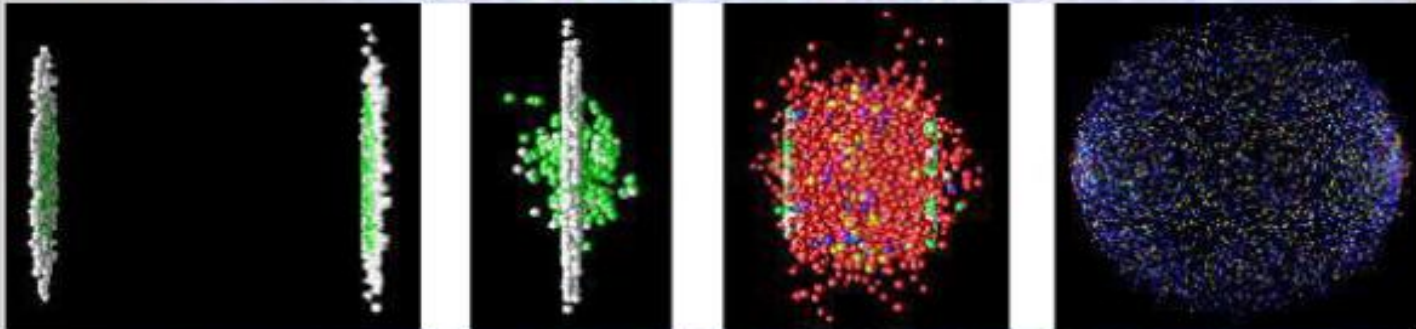
στοχεύουν περιοχές στο διάγραμμα φάσεων , πλούσιες σε

βαρυόνια ( $p - \bar{p}, n - \bar{n}...$ ) . Πλησιάζουν την θερμοδυναμική

κατάσταση στο εσωτερικό αστέρων νετρονίων.

# Heavy Ion Collisions

Create QGP by colliding ultra-relativistic heavy ions



**Requires a particle accelerator**

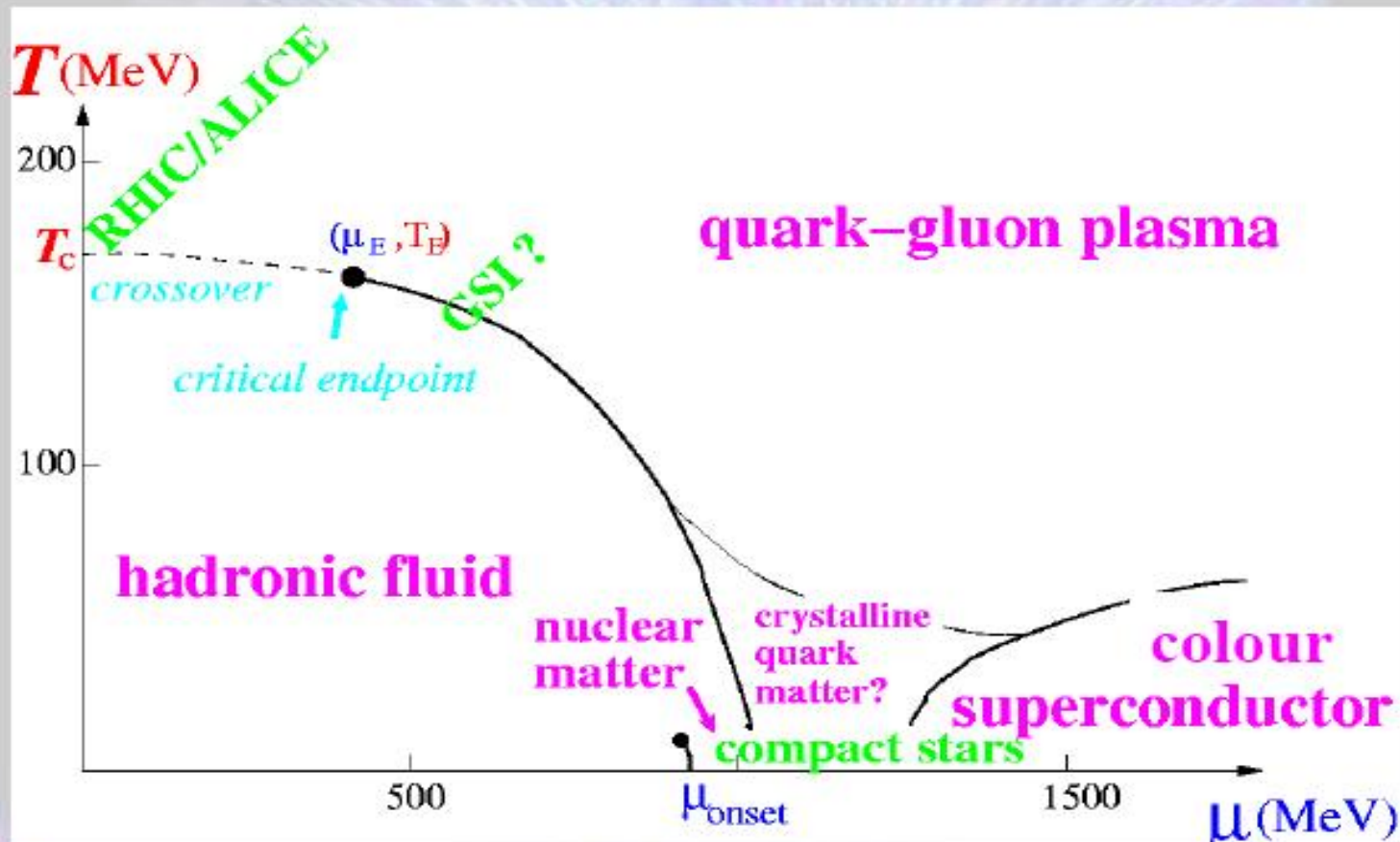
Accelerators used over past 30 years:

Colliders: AGS, SPS, RHIC, LHC

$\sqrt{s_{NN}}$  (GeV) = 5.4    19    200    2760    5500



# Phases of Strongly Interacting Matter



## Απεικόνιση των πειραμάτων στο διάγραμμα φάσεων

Τα πειράματα σε διαφορετικές ενέργειες ανιχνεύουν σημαντικά – διακριτά φαινόμενα της πρωτογενούς Ύλης (Quark Matter)

(1)  $\rho_b \approx 0$  : Κοσμολογική αλλαγή φάσης ( $T = T_c$ ) RHIC,LHC

(2)  $\rho_b \approx \rho_E$  : Κρίσιμο σημείο (critical point) RHIC,SPS

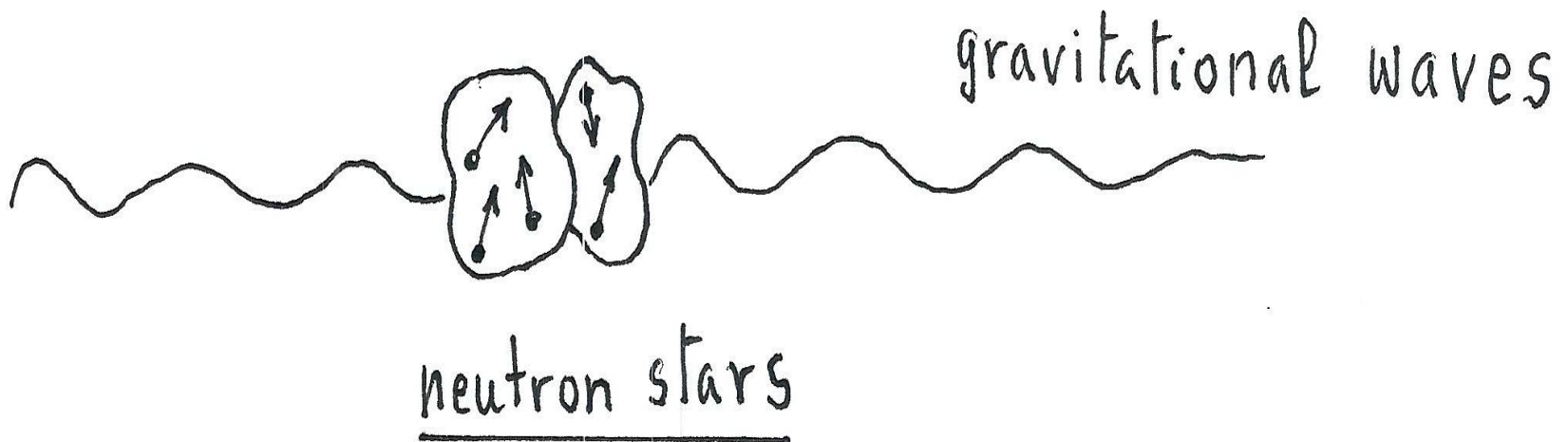
(3)  $\rho_b > \rho_E$  : “κοσμικός βρασμος” (deconfinement) SPS

(4)  $\rho_b \gg \rho_E, T \rightarrow 0$  : Ύλη Quark πλούσια σε βαρυόνια

FAIR,NICA,J-PARC

Ενδιαφέρουσα , πρόσφατη εξέλιξη : Μετά την ανακάλυψη των κυμάτων βαρύτητας (2016) έχει προκύψει κοινός τόπος έρευνας :

Πυρηνική Φυσική – Αστροφυσική – Γενική Σχετικότητα

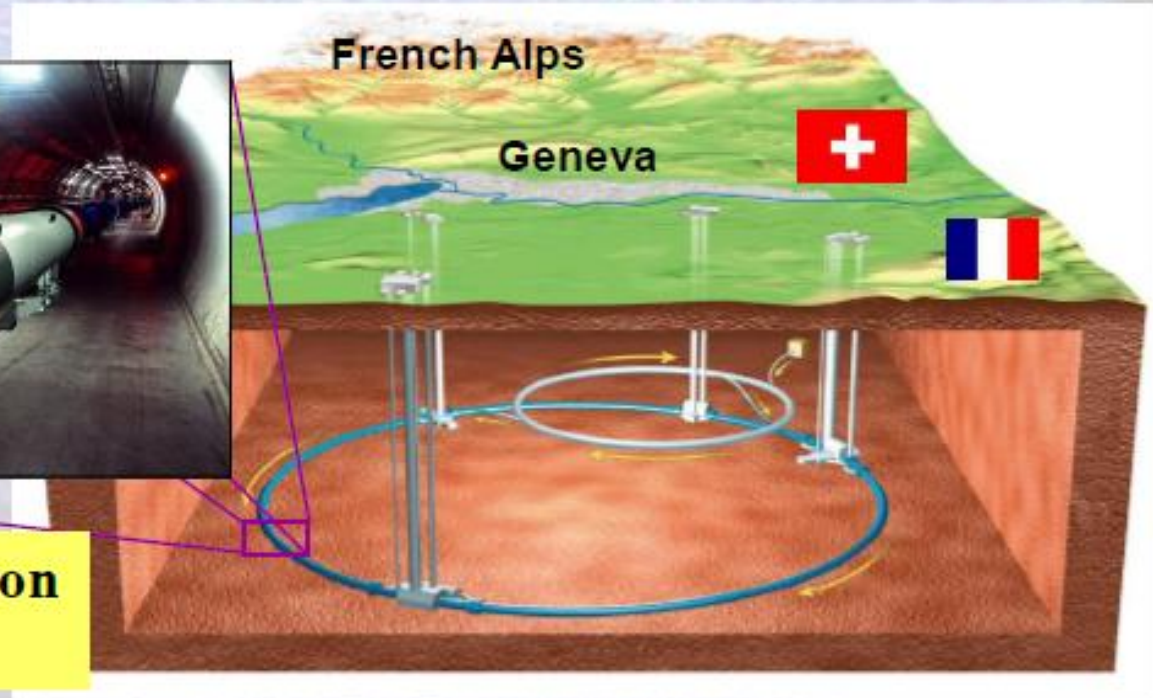
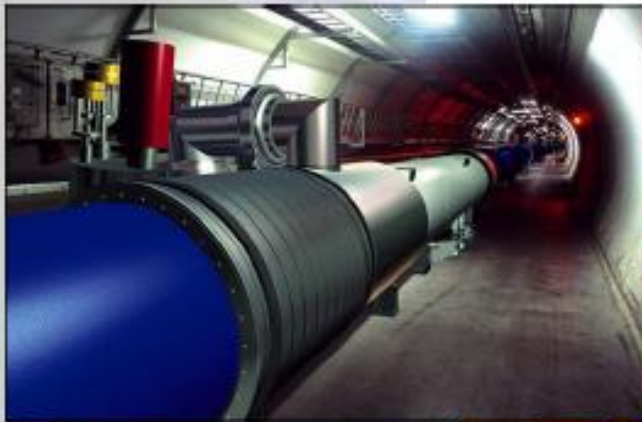




# CERN



**Deep underground, we have built the World's largest machine**



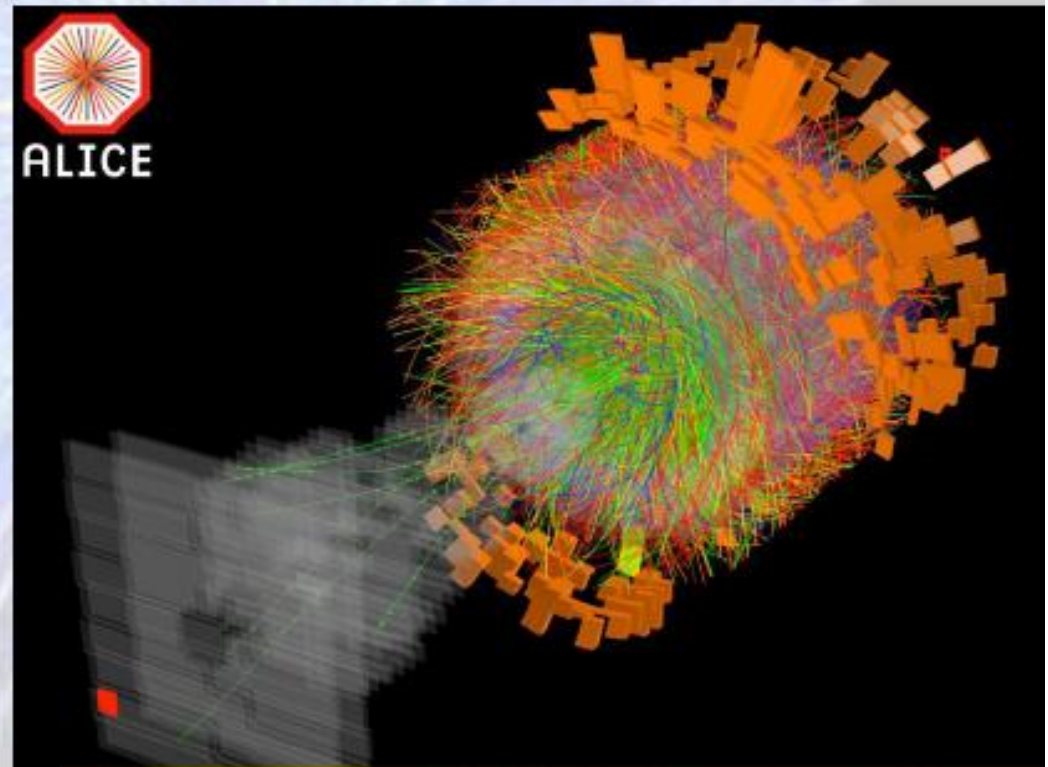
**The Large Hadron Collider (LHC)**

**Which accelerates sub-atomic particles to 0.999999991 the speed of light ....**



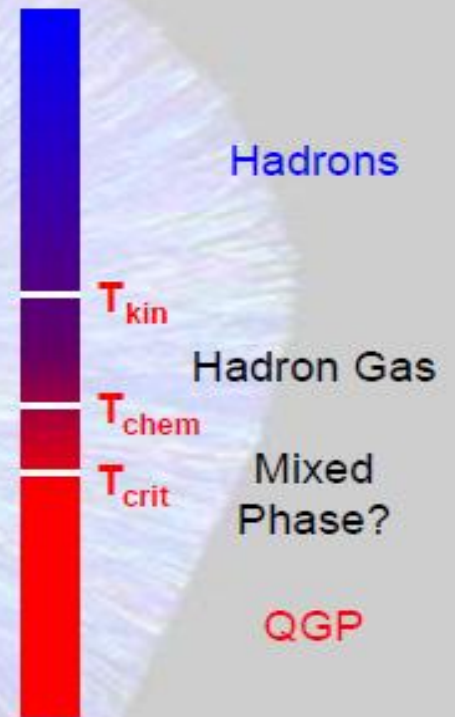
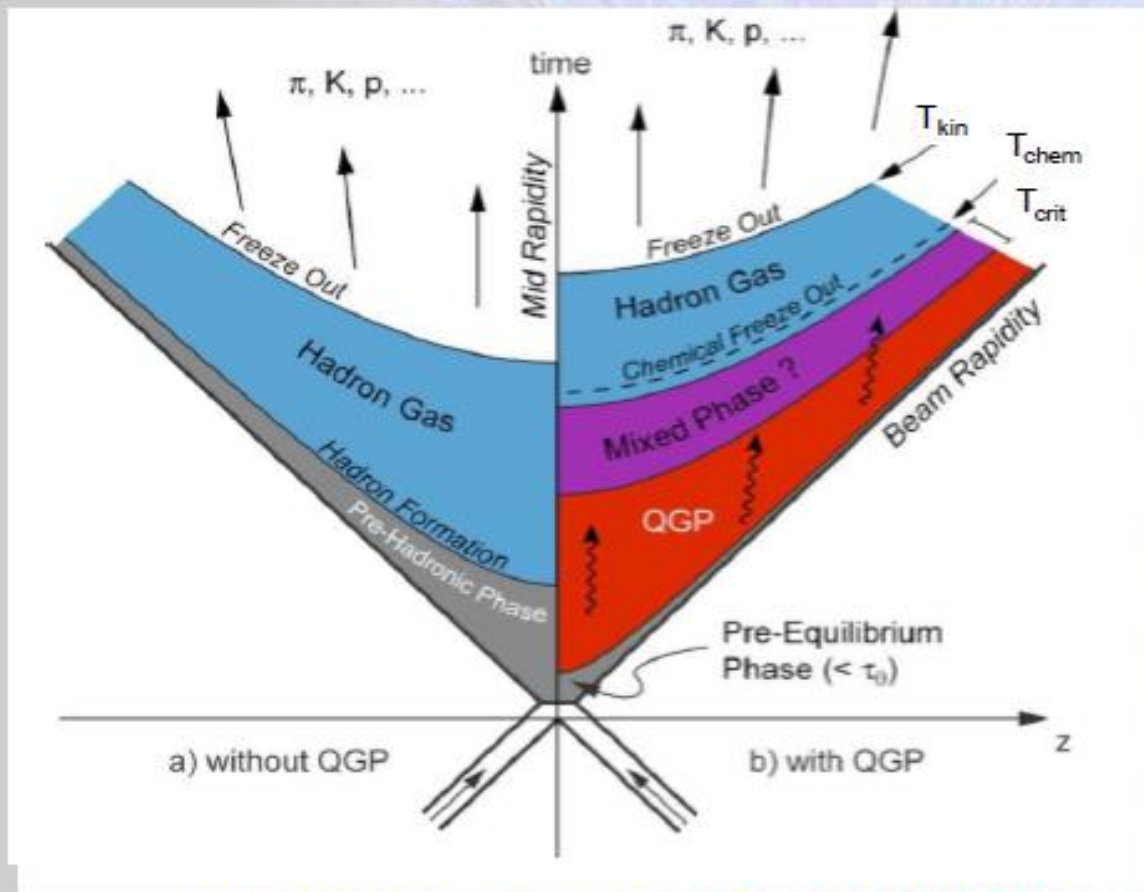
# What Happens when Lead Nuclei Smash Together?

- A super-hot, sub-atomic fireball is created.
- Quark-Gluon Plasma is formed and lasts for about  $10^{-22}$  seconds
- Then thousands of particles are produced



We have to study the QGP from this!

# Space-time collision picture



Hadronisation temperature  $T_{crit} \approx 155 \text{ MeV}$  (from LQCD)

Chemical freezeout temperature,  $T_{chem} \leq T_{crit}$ , fixes hadron yields

Kinetic freezeout temperature,  $T_{kin} < T_{chem}$ , fixes momentum distributions

# The ALICE Experiment

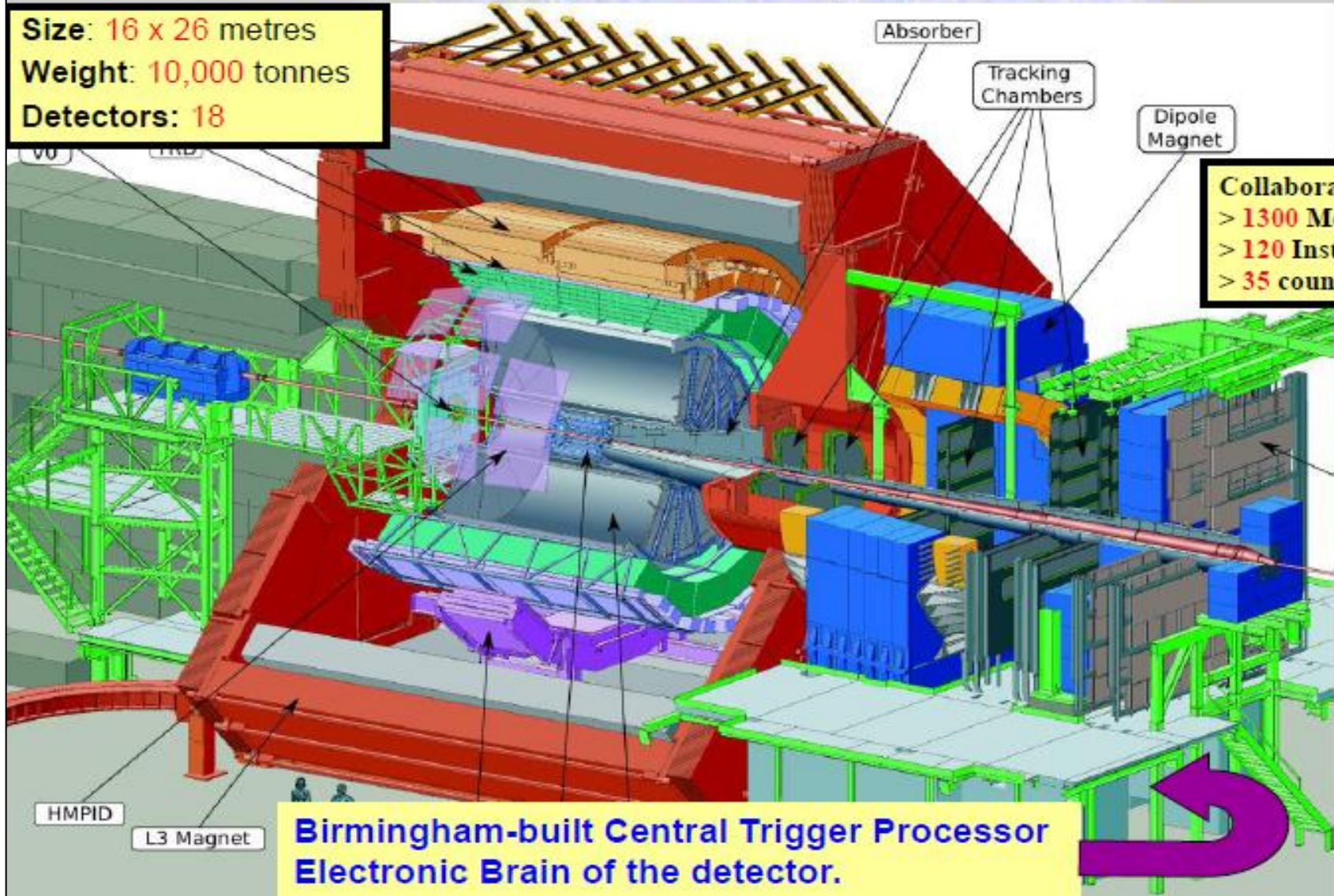
**Size:** 16 x 26 metres  
**Weight:** 10,000 tonnes  
**Detectors:** 18

Absorber

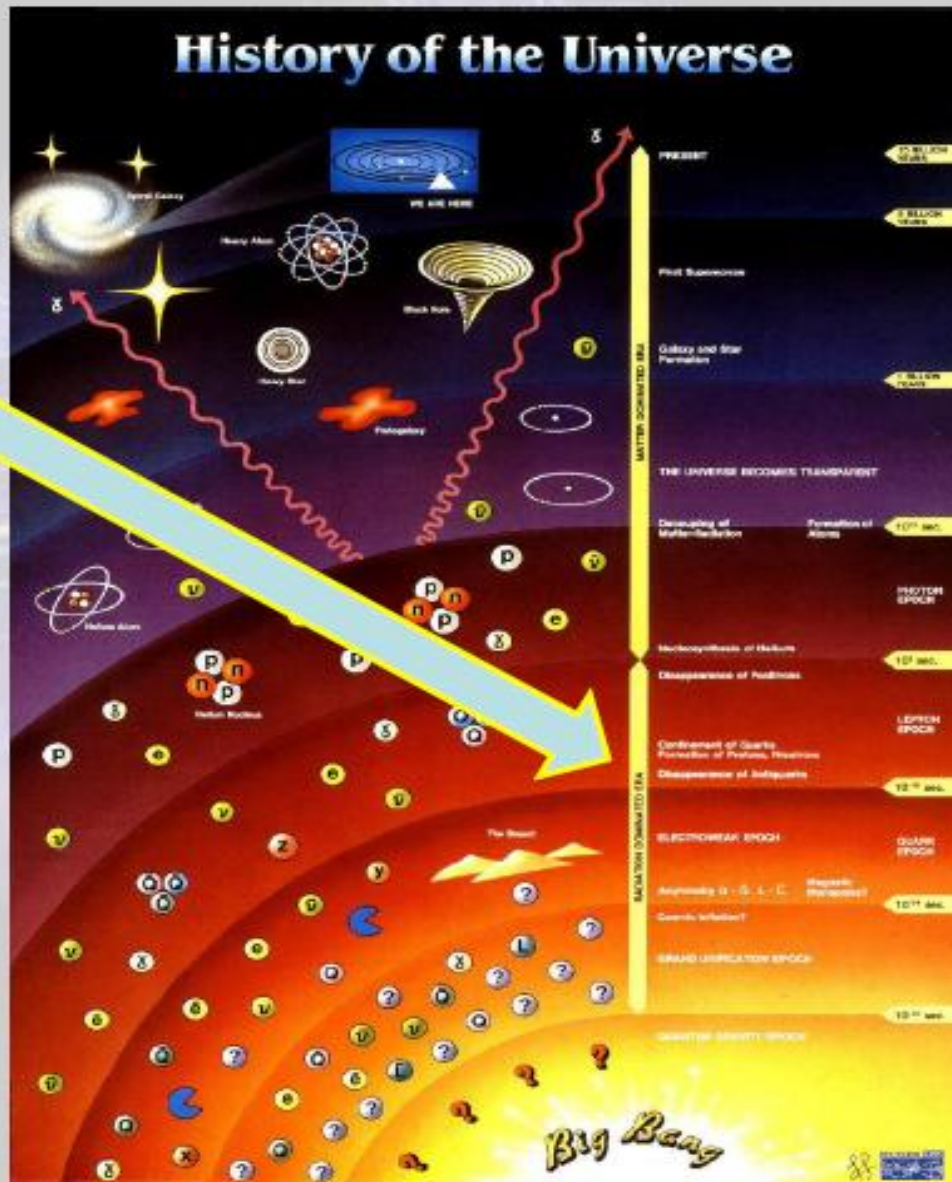
Tracking Chambers

Dipole Magnet

**Collaboration:**  
> 1300 Members  
> 120 Institutes  
> 35 countries



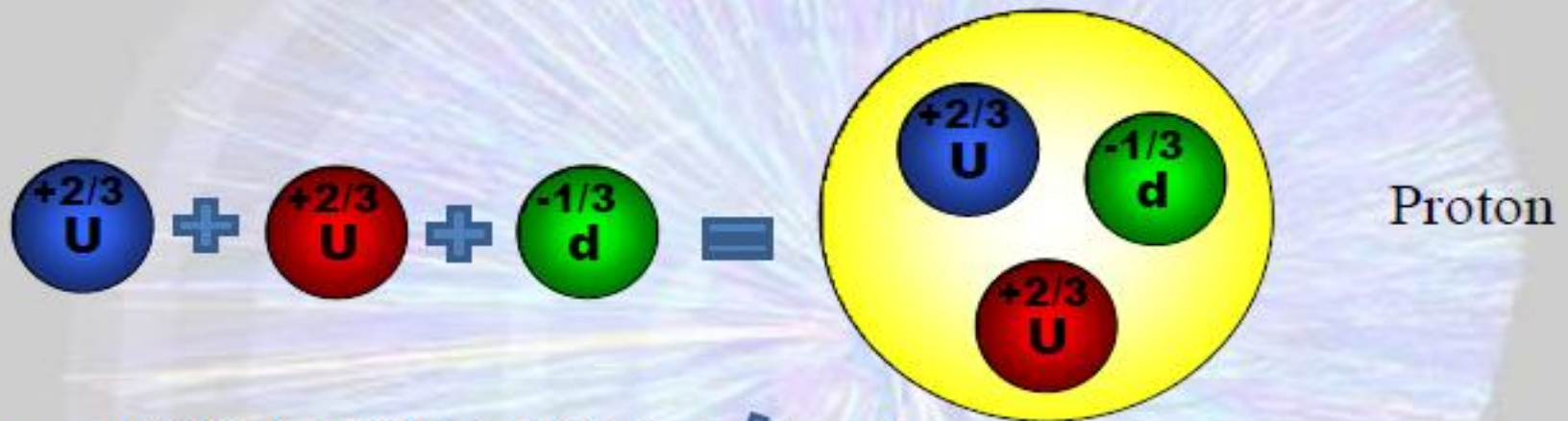
**Birmingham-built Central Trigger Processor  
Electronic Brain of the detector.**



**Recreate conditions similar to those some  $10^{-6}$  seconds after the Big Bang**

**Learn about the evolution of the very early Universe**

# Quark Mass



Mass:  $0.003 + 0.003 + 0.006 \neq 1$

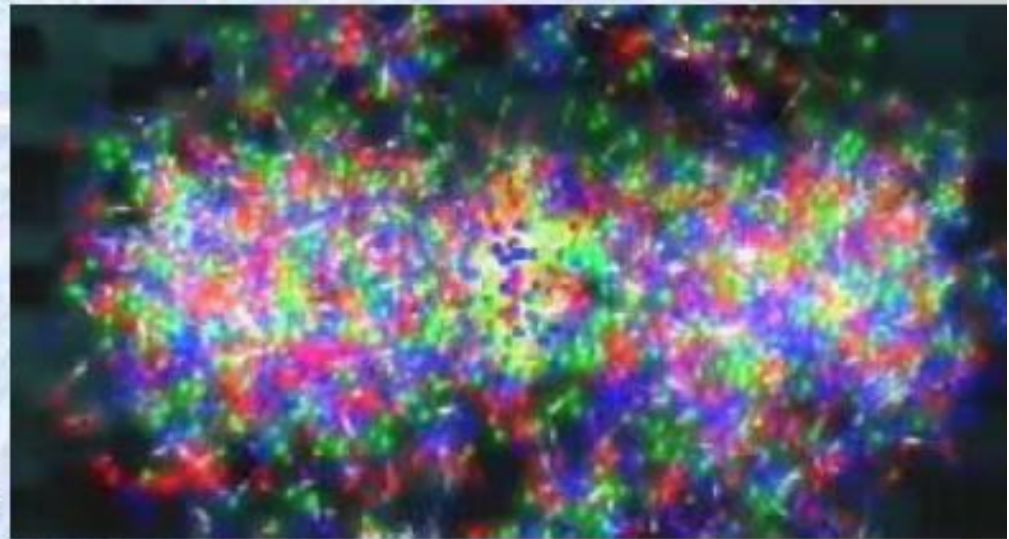
- ❖ Quarks have a much higher effective mass when confined in particles.
- ❖ Only account for  $\sim 2\%$  of proton mass
- ❖ Rest due to the **strong** force
- ❖ So, 98% of your mass actually comes from the strong force.

# The Quark-Gluon Plasma

**Normal hadronic matter**



**Soup of free quarks –  
Quark-Gluon Plasma**



**At extreme temperatures and/or densities nuclear matter ‘melts’ into a plasma of free quarks and gluons.**

**This state of matter would have existed up to about 10 millionths of a second after the Big Bang, and could be created in the core of collapsing neutron stars.**

# Σύνοψη

- 1) Η πρωτογενής Ύλη του Σύμπαντος (quarks..) εμφανίσθηκε την Εποχή του “Πληθωρισμού” ( $10^{-34}$  sec) ως αποτέλεσμα μιας ασταθούς διακύμανσης του Κενού (false vacuum  $\rightarrow$  true vacuum)
- 2) Η συμβατική Ύλη του Σύμπαντος (p,n...) εμφανίσθηκε την Εποχή  $t \approx 10^{-5}$  sec ως αποτέλεσμα αλλαγής φάσης (quarks  $\rightarrow$  hadrons) όταν η θερμοκρασία του Σύμπαντος ήταν  $T_c \approx 10^{12} \text{ }^\circ\text{K}$ .

- 3) Οι θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις στην ύλη των quarks περιγράφονται από την Κβαντική Χρωμοδυναμική (QCD) διατυπωμένη σε διάφορες εκδοχές :
- (α) ως θεωρία πεδίων  $(\Psi, A_\mu)$  σε πλεγματικό χωροχρόνο
  - (β) ως θεωρία ενός βαθμωτού πεδίου(σ) που συμπυκνώνει την συμπεριφορά της QCD στην γειτονία του κρισίμου σημείου (κρίσιμες διακυμάνσεις)



- 4) Η πειραματική μεθοδολογία για την ανίχνευση των φαινομένων του διαγράμματος φάσεων: Συγκρούσεις βαρέων ιόντων σε υψηλές ενέργειες (διέγερση του Κενού) .Επιταχυντές σε λειτουργία (τα τελευταία 30 χρόνια) και επιταχυντές υπό κατασκευή.
- 5) Ενδιαφέρουσες πληροφορίες από τα κύματα βαρύτητας που δημιουργούνται όταν συγχωνεύονται αστέρες νετρονίων ( $\rho_b \gg \rho_N$ ).

ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ