

Σοιχεία Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων (5ου εξαμήνου, χειμερινό 2012-13)

Τμήμα G3: Κ. Κορδάς & Χ. Πετρίδου

Μάθημα 1

- α) Ύλη, τρόπος διαβάσματος και εξέτασης
- β) Εισαγωγή στο αντικείμενο
- γ) Πείραμα Rutherford, μονάδες, χρόνος ζωής
ενεργός διατομή και ορισμοί

Λέκτορας Κώστας Κορδάς
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Στόχος και μέσα

- Στόχος της Πυρηνικής Φυσικής και της Φυσικής Στοιχειωδών Σωματιδίων:
 - η κατανόηση του σύμπαντος και του κόσμου, της προέλευσης και δομής της ύλης, ο έλεγχος και η αξιοποίηση της γνώσης
- Το εργαστήριό μας
 - Το σύμπαν – παρατήρηση π.χ,
 - ακτινοβολίας γ που εκπέμπουν οι αστέρες
 - κοσμικής ακτινοβολίας που προσκρούει στη Γή
 - Τα ανθρώπινα εργαστήρια
 - πηγές ακτινοβολίας – ραδιενεργά υλικά
 - πυρηνικοί αντιδραστήρες
 - επιταχυντές σωματιδίων
 - όπου μπορούμε να αναπαράγουμε συνθήκες του σύμπαντος λίγο μετά τη γέννησή του
 - και μπορούμε να κατασκευάσουμε νέους πυρήνες και σωματίδια που δεν υπάρχουν γύρω μας

Τι θα συζητήσουμε ως εισαγωγή

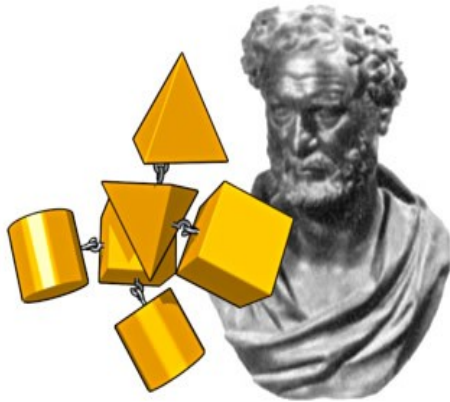
- Γιατί και πώς παρατηρούμε τον μικρόκοσμο
 - Τα πειράματα ως προέκταση των αισθήσεών μας
 - Η ανάγκη επιταχυντών και αντίστοιχων πειραμάτων
- Τι μαθαίνουμε με τα πειράματα στους επιταχυντές
 - Η δομή της ύλης και το σύμπαν
- Μεγάλα πειράματα σε επιταχυντές
 - Βασικά “συστατικά” τέτοιων πειραμάτων (στο LHC)

Γιατί; Η περιέργεια

- Αναρωτιόμαστε, από τι είναι φτιαγμένος ο κόσμος;



Τι είναι εδώ μέσα;



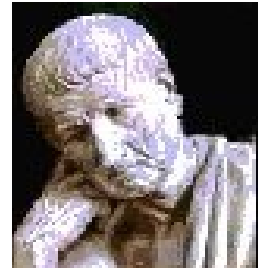
Δημόκριτος (460–371 π.Χ):

Η ύλη αποτελείται από θεμελιώδη
σωμάτια που είναι **ά-τομα** και
υπάρχουν στον κατά τ'άλλα **κενό χώρο**

→ Υπήρχαν όμως κι άλλες ιδέες

Αριστοτέλης (384–322 π.Χ):

Όλος ο χώρος είναι γεμάτος
από ένα **συνεχές ύλης**

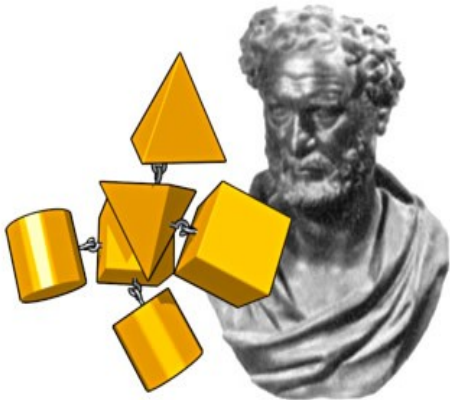


Γιατί; Η περιέργεια

- Αναρωτιόμαστε, από τι είναι φτιαγμένος ο κόσμος;



Τι είναι εδώ μέσα;



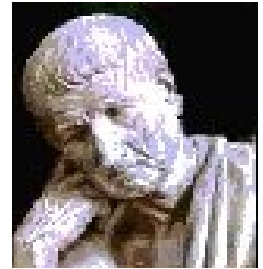
Δημόκριτος (460–371 π.Χ):

Η ύλη αποτελείται από θεμελιώδη
σωμάτια που είναι **ά-τομα** και
υπάρχουν στον κατά τ'άλλα **κενό χώρο**

→ Υπήρχαν όμως κι άλλες ιδέες

Αριστοτέλης (384–322 π.Χ):

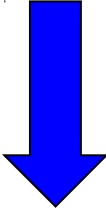
Όλος ο χώρος είναι γεμάτος
από ένα **συνεχές ύλης**



- Πώς μπορούμε να προχωρήσουμε από τις υποθέσεις σε επιστημονικά τεκμηριωμένες θεωρίες;
 - “**Με το πείραμα**” - Γαλιλαίος (Galileo Galilei), 1564 – 1642 μ.Χ

1906: Γνωρίζαμε ήδη ότι τα υλικά είναι φτιαγμένα από άτομα

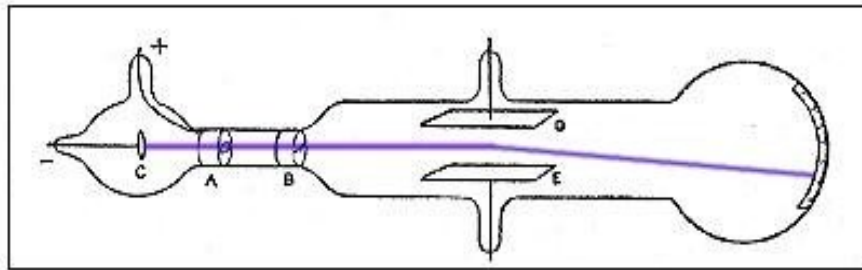
- Αναλύοντας τα δομένα παρατηρήσεων, φτάσαμε να ξέρουμε ότι υπάρχουν άτομα και κενός χώρος
 - Ατομική θεωρία του Dalton, Avogandro κ.α.

Τα άτομα των 92 στοιχείων (19ος αιώνας)	1. Υδρογόνο (H)	Μάζα $M_H \approx 1.7 \times 10^{-24} \text{ g}$	 Αυξανόμενη μάζα
	2. Ήλιο (He)		
	3. Λίθιο (Li)		
			
			
	92. Ουράνιο (U)	Μάζα $\approx 238 M_H$	

- 1896 ο Becquerel ανακάλυψε ότι πυρήνες ουρανίου ακτινοβολούν (= εκπέμπουν κάτι) → ραδιενέργεια
- Η προσπάθεια κατανόησης της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας μας έδειξε έναν κρυμμένο κόσμο: τους πυρήνες

1906: Γνωρίζαμε ήδη ότι τα άτομα... τεμαχίζονται

- Τα άτομα έχουν δομή = δεν είναι θεμελιώδη
 - J.J Thomson (πειράματα 1894-1897)
 - το ηλεκτρόνιο είναι συστατικό του ατόμου



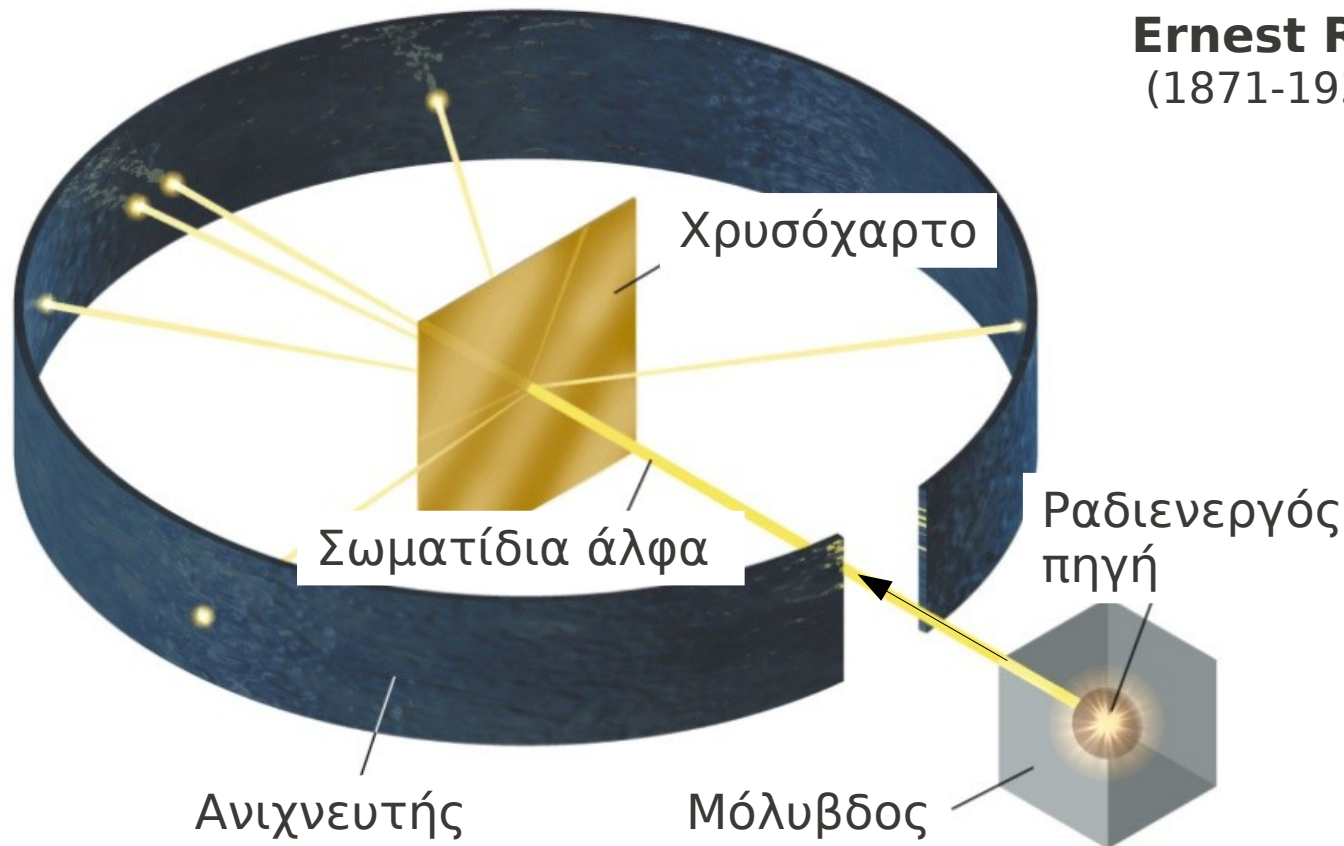
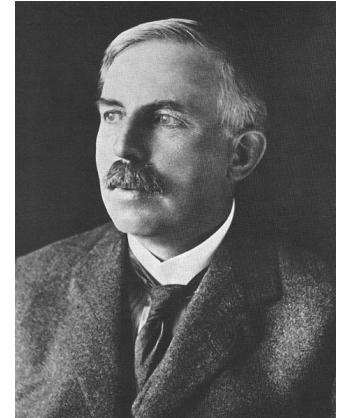
Καθοδικός σωλήνας (cathode ray tube)

- Αλλά, τα άτομα είναι ηλεκτρικά ουδέτερα.
- **Ερώτηση: Πώς είναι κατανεμημένα τα ηλεκτρόνια μέσα στο άτομο;**
 - Είναι το άτομο σαν το σταφιδόψωμο;
 - “Σταφίδες” → τα ηλεκτρόνια
 - “Ζύμη” → το θετικό φορτίο

Απάντηση από πειράματα σκέδασης

- Ο Ernest Rutherford, Hans Geiger και Ernest Marsden, κάνουν πειράματα σκέδασης σωματιδίων άλφα πάνω σε χρυσόχαρτο (1906)

Ernest Rutherford
(1871-1937)



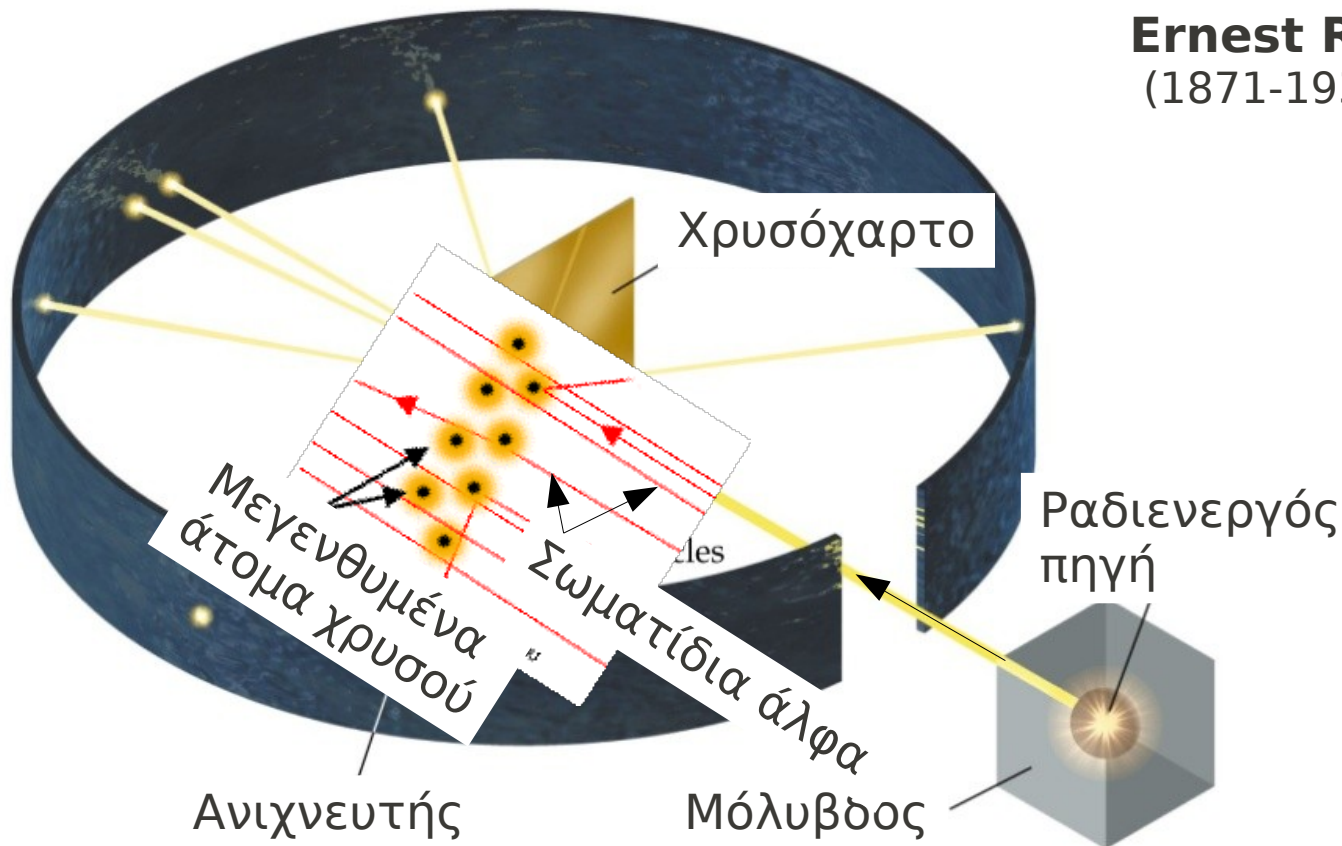
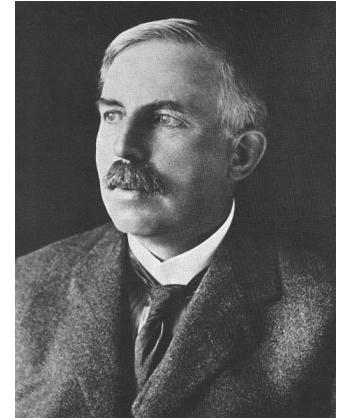
Σαν να πυροβολούμε
ένα σακκί.

Έχει μέσα άμμο,
ή μήπως
σιδερένιες μπάλες;

Απάντηση από πειράματα σκέδασης

- Ο Ernest Rutherford, Hans Geiger και Ernest Marsden, κάνουν πειράματα σκέδασης σωματιδίων άλφα πάνω σε χρυσόχαρτο (1906)

Ernest Rutherford
(1871-1937)



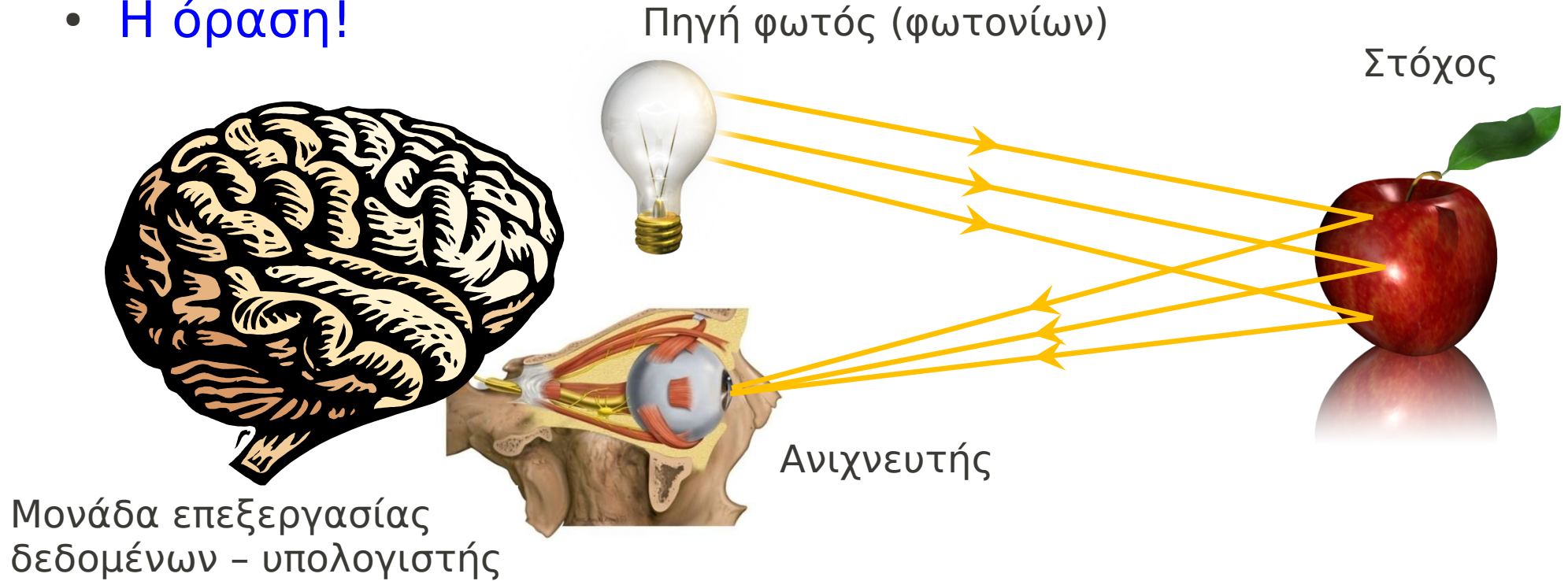
Το άτομο έχει το θετικό του φορτίο συγκεντρωμένο σ' έναν πυρήνα



έτσι εξηγείται η σκέδαση σε μεγάλες γωνίες

Μια καθημερινή εμπειρία σκέδασης

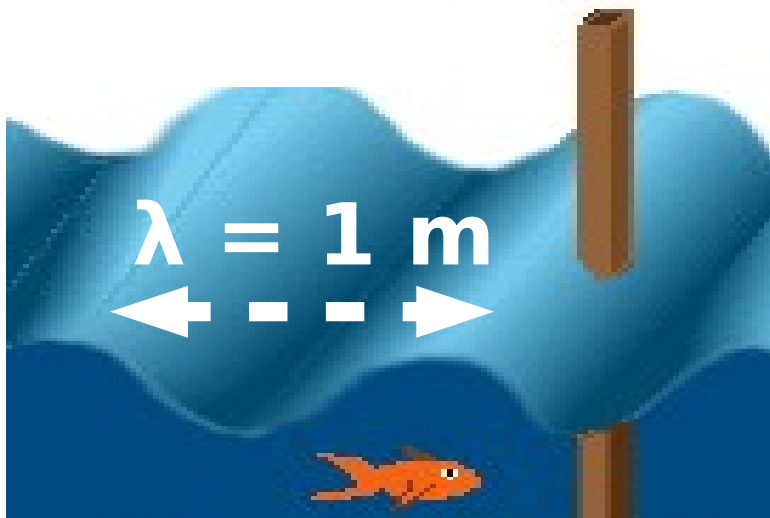
- Η όραση!



- Για να “δούμε” το μήλο, πρέπει να αναλύσουμε τα δεδομένα που ανιχνεύει/μετράει το μάτι μας
 - Ουσιαστικά, ανακατασκευάζουμε το στόχο-μήλο, αναλύοντας τις ιδιότητες των σκεδαζόμενων φωτονίων (τα “δεδομένα” του πειράματος)

Δε βλέπουμε όμως τα άτομα. Γιατί;

- Γιατί το “μήκος κύματος” (λ) του ορατού φωτός είναι πολύ μεγαλύτερο από τις διαστάσεις του ατόμου
 - 5000 φορές μεγαλύτερο, περίπου
 - $\lambda(\text{ορατό}) \sim 500 \text{ nm}$, $R(\text{άτομο}) \sim 10^{-10} \text{ m} = 0.1 \text{ nm}$



Μεγάλο μήκος κύματος



μικρή διακριτική ικανότητα
(διακρίνουμε δύσκολα τα μικρά αντικείμενα)

Μήκος κύματος - διακριτική ικανότητα

Μεγάλο μήκος κύματος

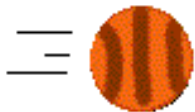


μικρή διακριτική ικανότητα

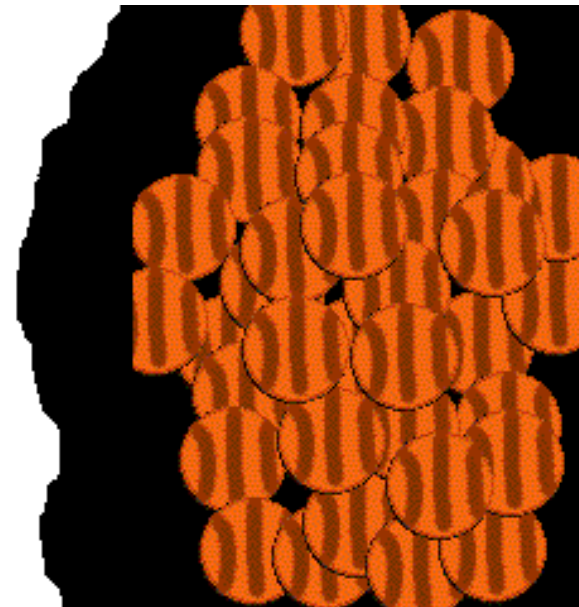
➤ Μήκος κύματος $\sim$ διάμετρος της μπάλας του μπάσκετ



Κάτι κρύβεται μέσα σε μια σκοτεινή σπηλιά. Τι να είναι;



Μετά από λίγο...



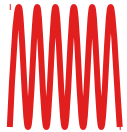
Μήκος κύματος - διακριτική ικανότητα

Μικρό μήκος κύματος



καλή (υψηλή) διακριτική ικανότητα

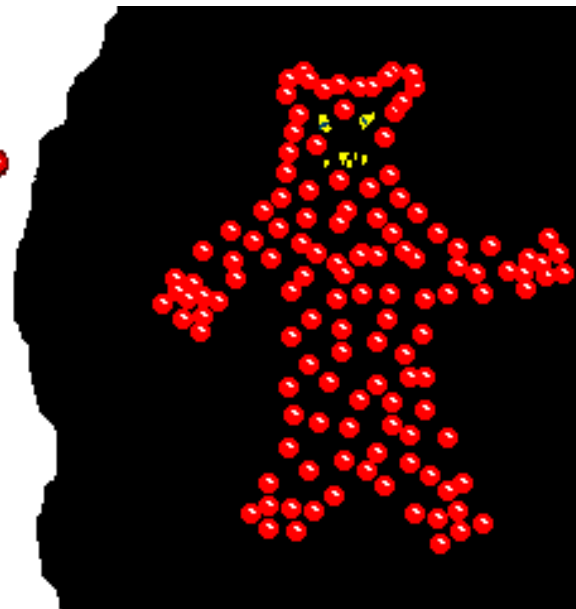
➤ Μήκος κύματος $\sim$ διάμετρος της καραμέλας



Κάτι κρύβεται μέσα σε μια σκοτεινή σπηλιά. Τι να είναι;



Μετά από λίγο...



Σωματίδια με το κατάλληλο μήκος κύματος

- Κβαντική Φυσική – τα σωματίδια συμπεριφέρονται και ως κύματα

– Όσο **μεγαλύτερη** είναι η **ορμή p** (= **μάζα** x **ταχύτητα**) ενός σωματιδίου

- τόσο **μικρότερο μήκος κύματος (λ)** έχει:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$



Louis de Broglie (1924)

Σταθερά του Planck = $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}$

Σωματίδια με το κατάλληλο μήκος κύματος: πώς;

- Κβαντική Φυσική – τα σωματίδια συμπεριφέρονται και ως κύματα

η ορμή (= **ταχύτητα** x **μάζα**)

κύματος (λ) έχει

$$\lambda = \frac{h}{p}$$



Louis de Broglie (1924)

π.χ.

Ηλεκτρόνιο
επιταχυνόμενο
από μια μπαταρία
των 1.5 Volt

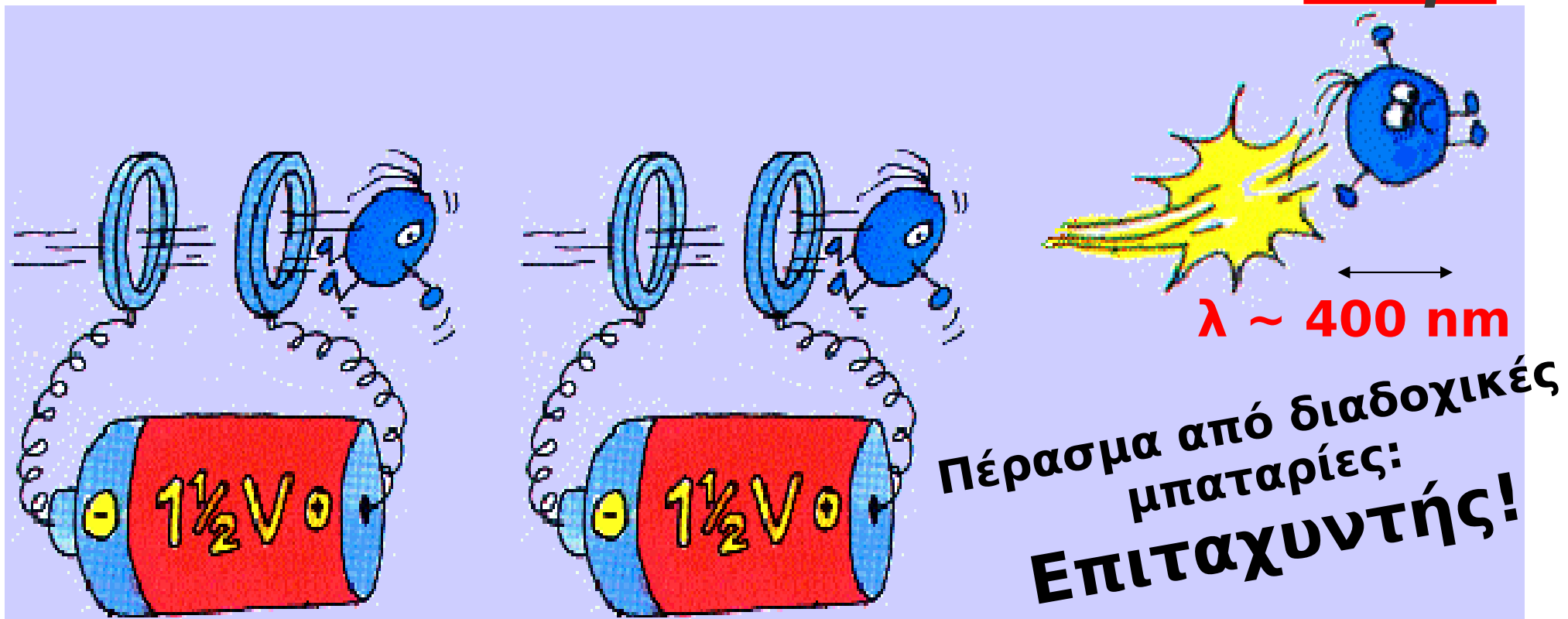
$\lambda \sim 800 \text{ nm}$

Όπως αποκτάμε
ταχύτητα
στην κατηφόρα!

Σωματίδια με το κατάλληλο μήκος κύματος: πώς;

- Κβαντική Φυσική – τα σωματίδια συμπεριφέρονται και ως κύματα
 - Όσο **μεγαλύτερη** είναι η ορμή (= **ταχύτητα** x **μάζα**) ενός σωματιδίου
 - τόσο **μικρότερο μήκος κύματος (λ)** έχει

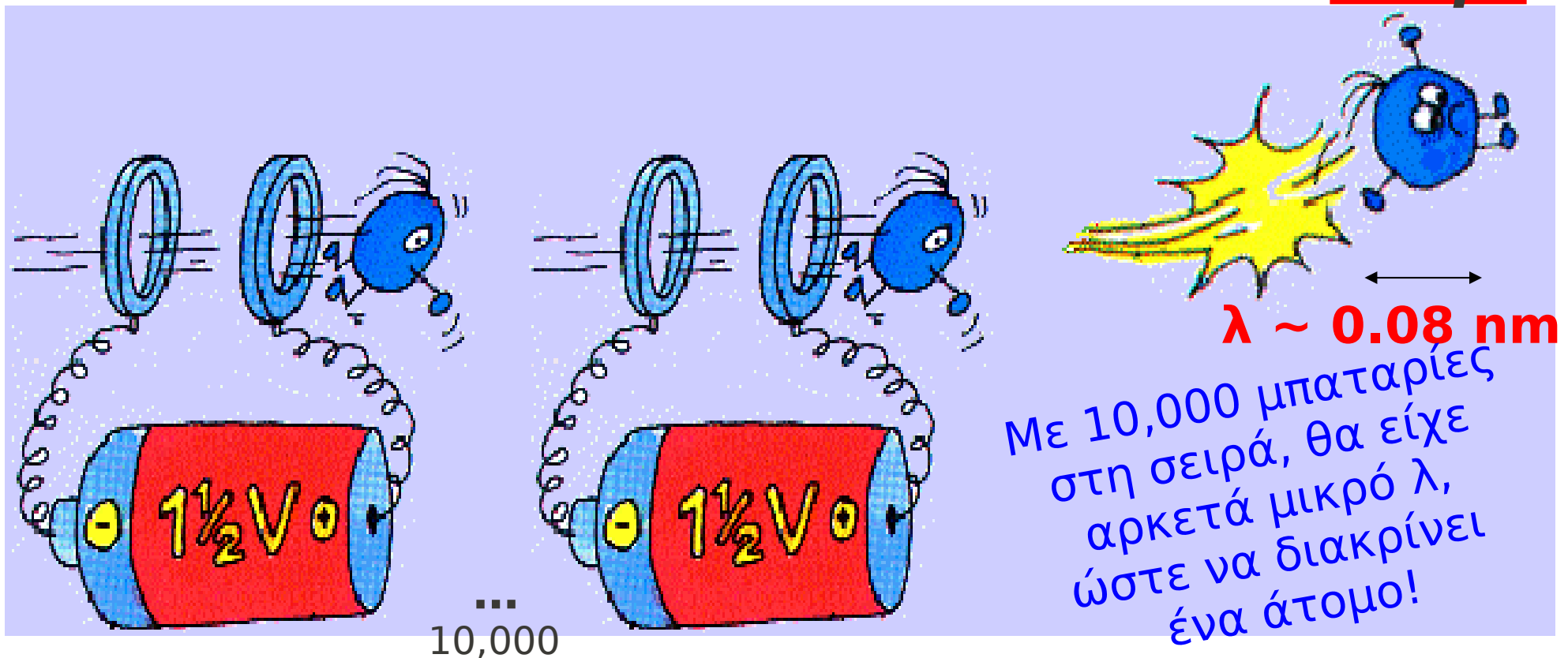
$$\lambda = \frac{h}{p}$$



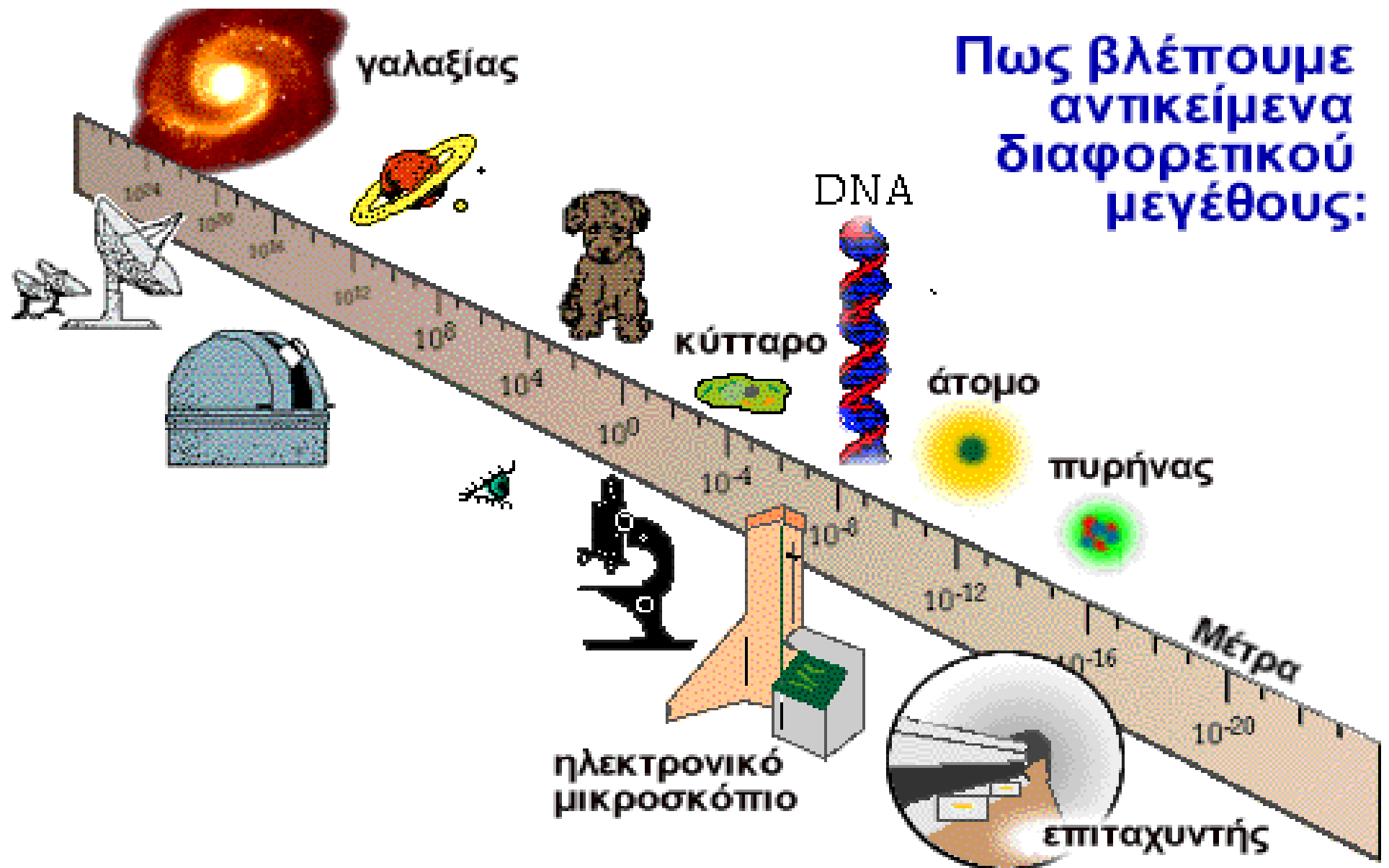
Σωματίδια με το κατάλληλο μήκος κύματος: πώς;

- Κβαντική Φυσική – τα σωματίδια συμπεριφέρονται και ως κύματα
 - Όσο **μεγαλύτερη** είναι η ορμή (= **ταχύτητα** x **μάζα**) ενός σωματιδίου
 - τόσο **μικρότερο μήκος κύματος (λ)** έχει

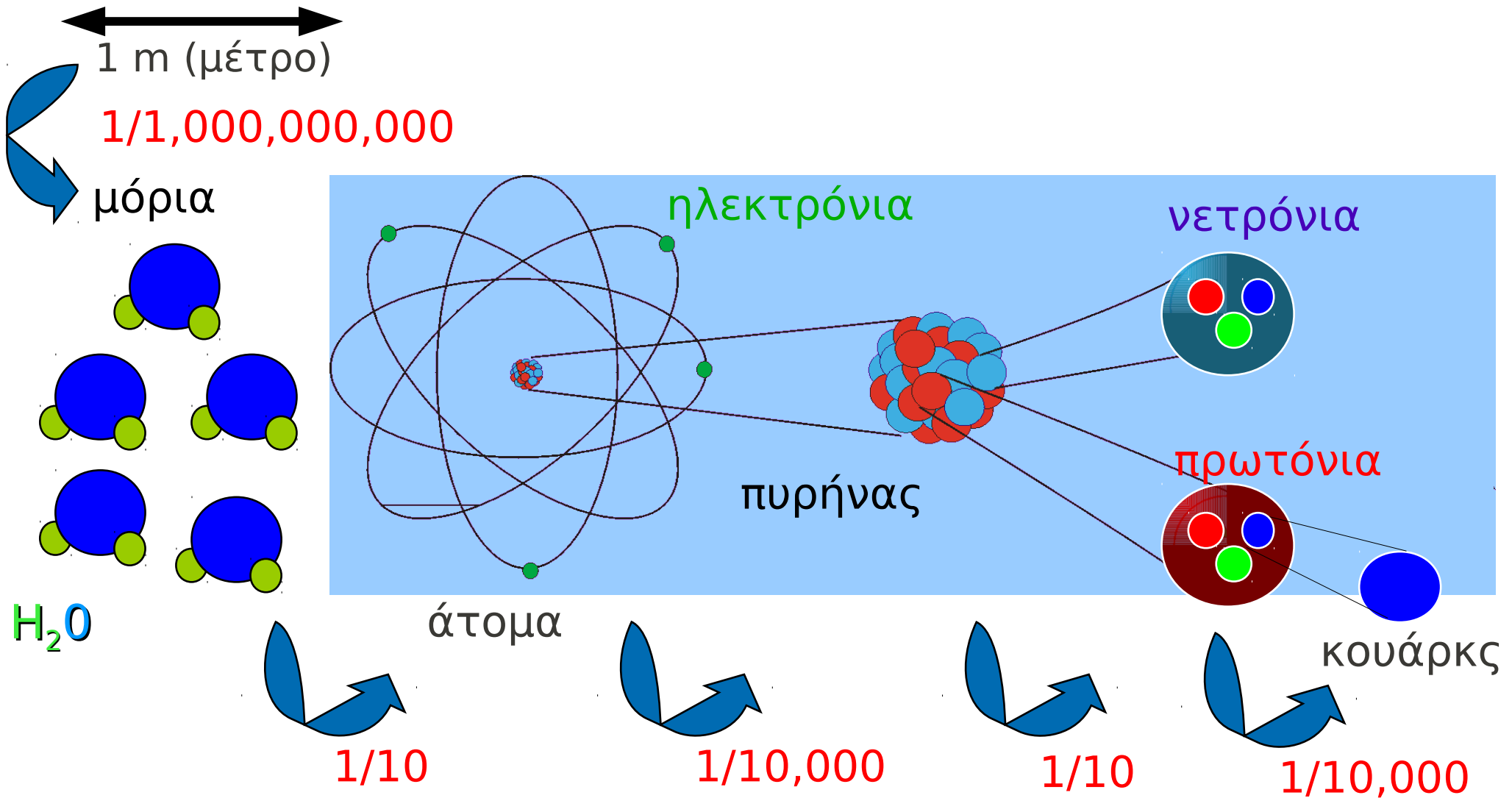
$$\lambda = \frac{h}{p}$$



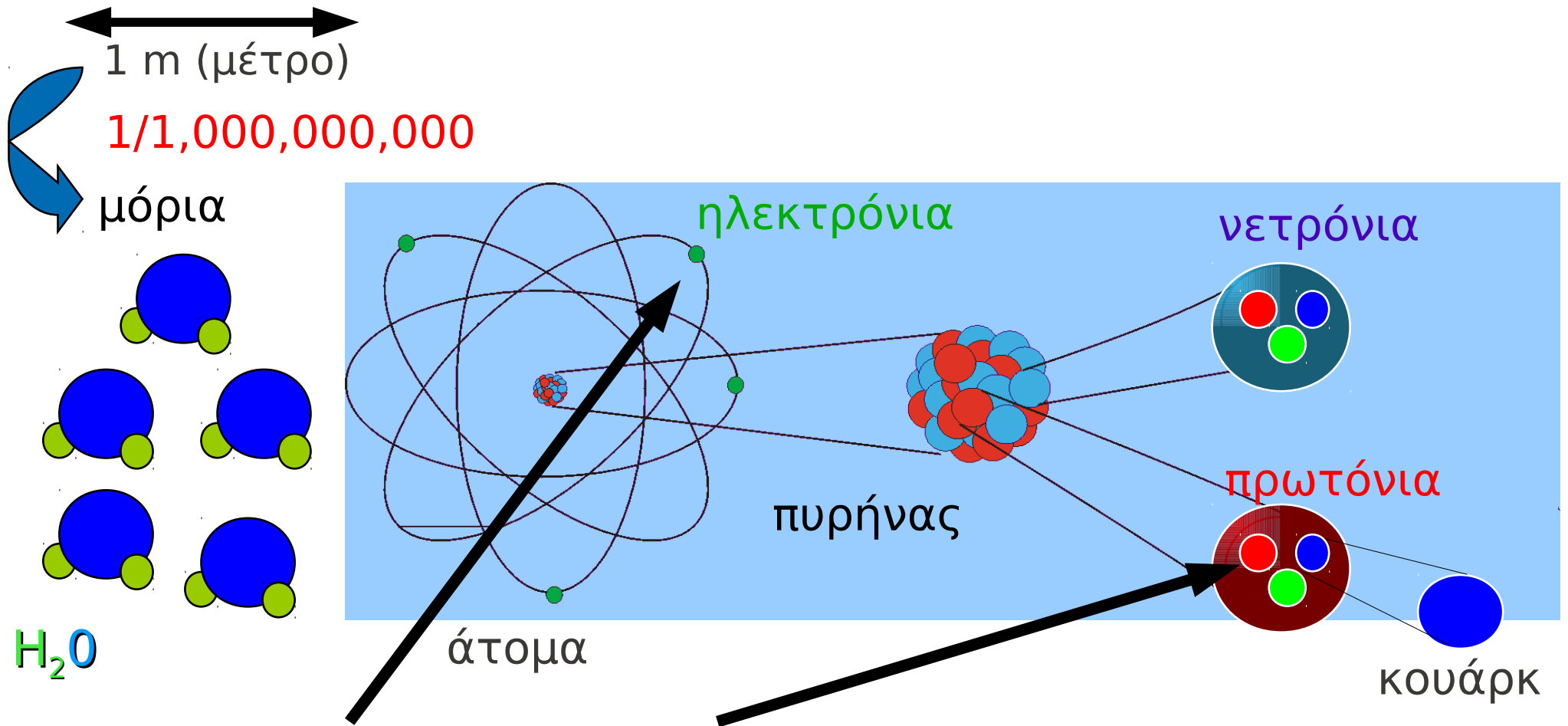
Το κατάλληλο εργαλείο ανά περίπτωση – οι επιταχυντές ως μικροσκόπια



Μετά από ~100 χρόνια πειραμάτων σκέδασης

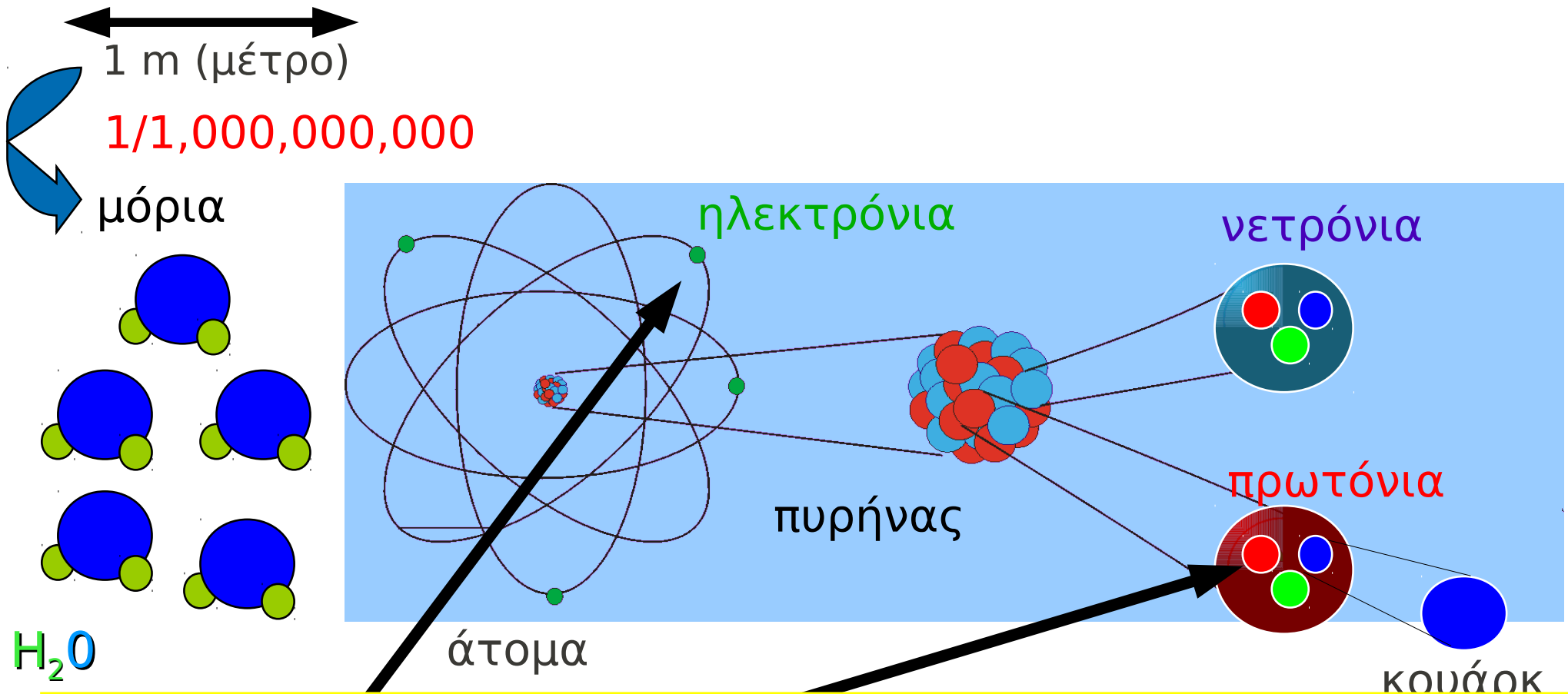


Μετά από ~100 χρόνια πειραμάτων σκέδασης



Ηλεκτρόνια και κουάρκ: δε βλέπουμε δομή - **θεμελιώδη**

Μετά από ~100 χρόνια πειραμάτων σκέδασης



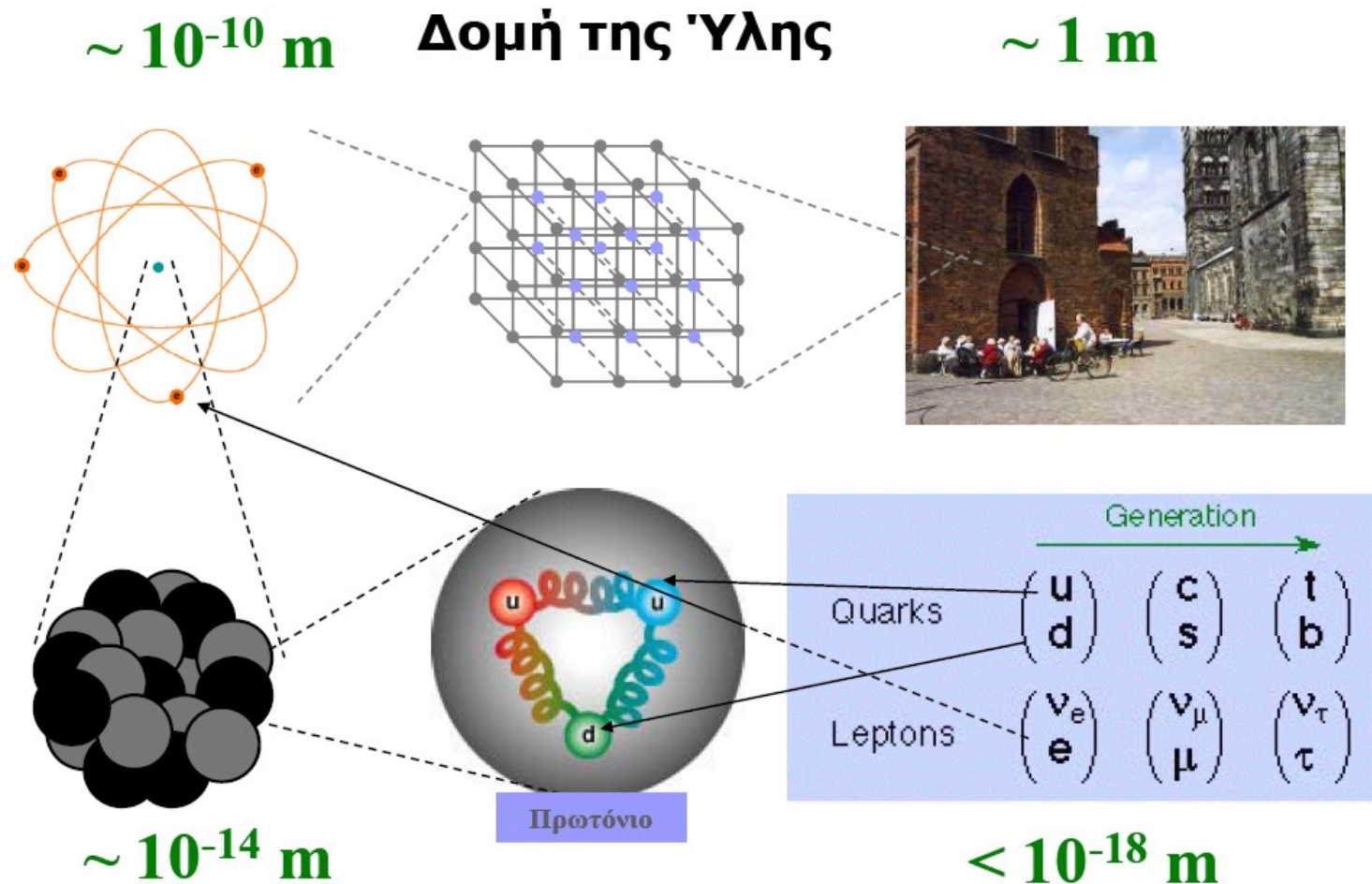
- Ηλεκτρόνια

+ 5 παρόμοια σωματίδια (4 απ' αυτά ασταθή: μ , τ , ν_μ , ν_τ)

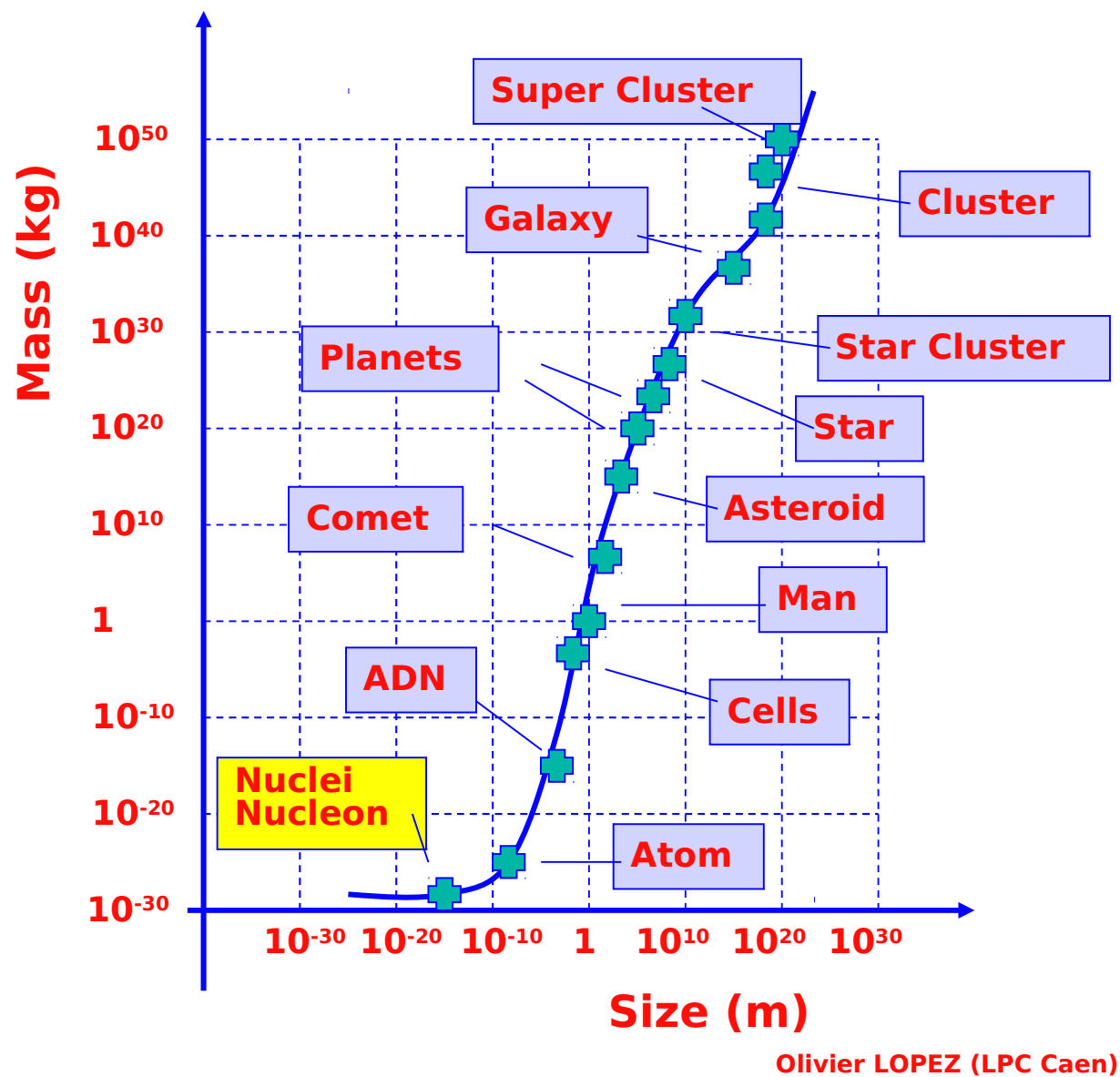
- Πρωτόνια, νετρόνια

+ ~200 παρόμοια αλλά ασταθή σωματίδια, φτιαγμένα από κουάρκ

Μετά από ~100 χρόνια πειραμάτων σκέδασης



Ένα σύμπαν με αντικείμενα δραματικά διαφορετικών διαστάσεων



Τα στοιχειώδη
σωμάτια και οι
πυρήνες είναι το
πρώτο βήμα σε μια
ιεραρχία όλο και πιο
σύνθετων
συστημάτων

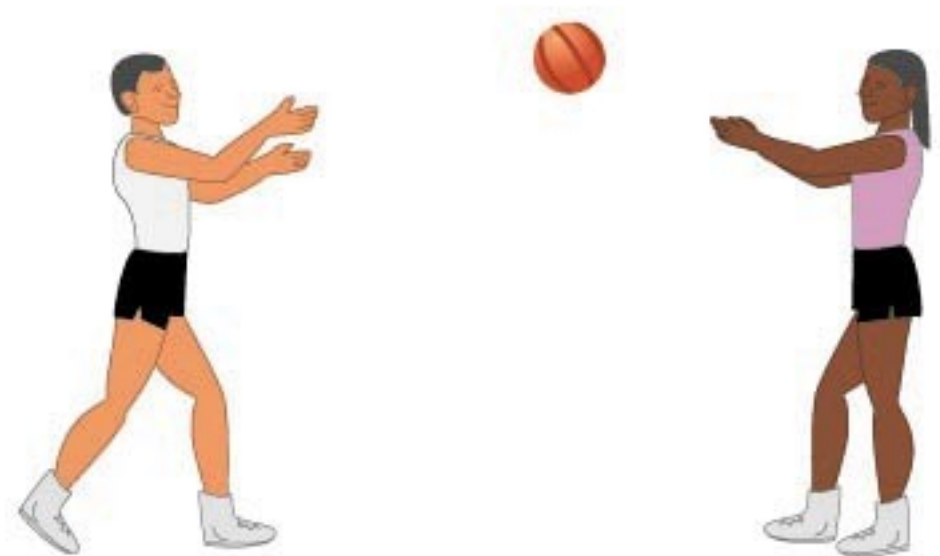
Υπάρχουν και δυνάμεις

- Τα σωματίδια αισθάνονται το ένα το άλλο – αλληλεπιδρούν με διάφορες δυνάμεις
 - ανταλλάσσοντας ειδικά σωματίδια που είναι οι φορείς της δύναμης



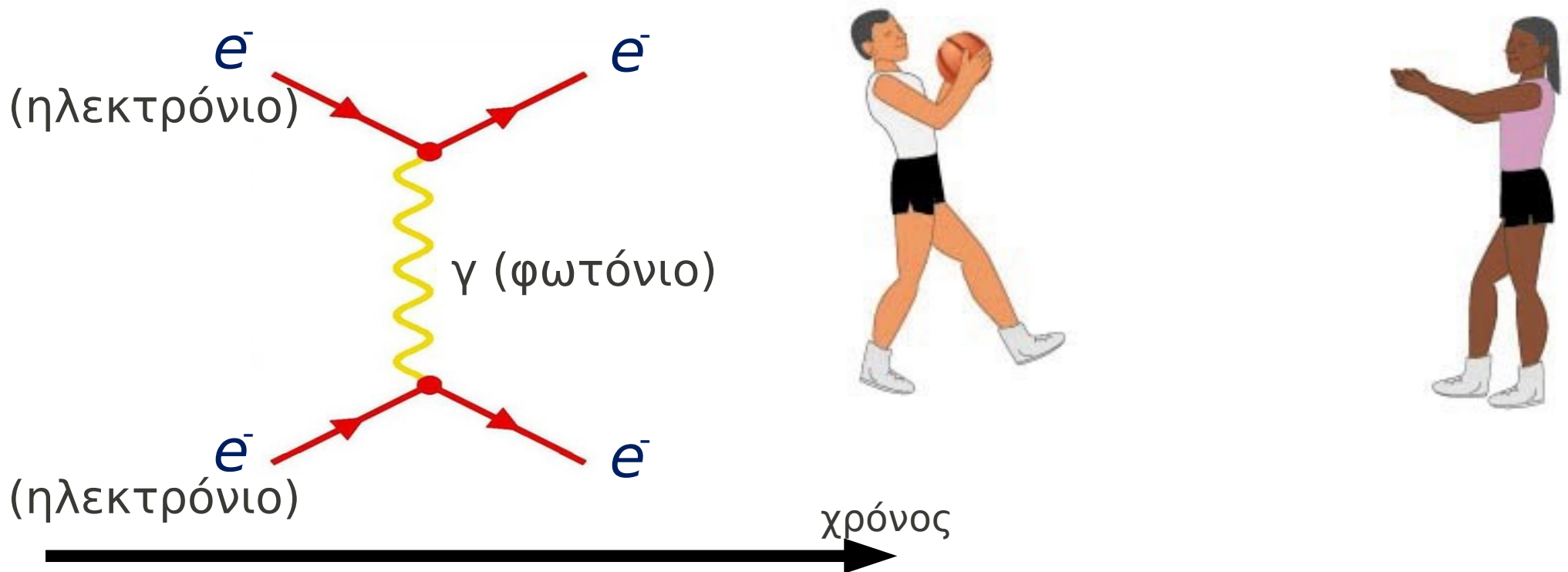
Υπάρχουν και δυνάμεις

- Τα σωματίδια αισθάνονται το ένα το άλλο – αλληλεπιδρούν με διάφορες δυνάμεις
 - ανταλλάσσοντας ειδικά σωματίδια που είναι οι φορείς της δύναμης



Υπάρχουν και δυνάμεις

- Τα σωματίδια αισθάνονται το ένα το άλλο – αλληλεπιδρούν με διάφορες δυνάμεις
 - ανταλλάσσοντας ειδικά σωματίδια που είναι οι φορείς της δύναμης

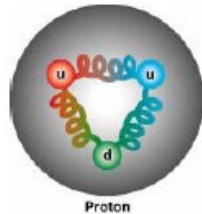


Το φωτόνιο (γ) είναι ο φορέας της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης

Υπάρχουν και δυνάμεις

Ισχυρές

Μεταδίδονται με τα
γκλουόνια



Συγκρατούν τα πρωτόνια και νετρόνια στον πυρήνα
Συγκρατούν τα quarks στα πρωτόνια και τα νετρόνια

Βαρυτικές

Μεταδίδονται με τα
γκραβιτόνια



Αναγκάζουν τα αντικείμενα με μάζα να πέφτουν
Διατηρούν τη γη και τους πλανήτες γύρω από τον ήλιο

Ασθενείς

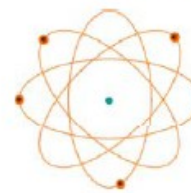
Μεταδίδονται με τα W
& Z^0



Προκαλούν την διάσπαση των ραδιενεργών πυρήνων
Διαμορφώνουν την ένταση της ηλιακής ενέργειας

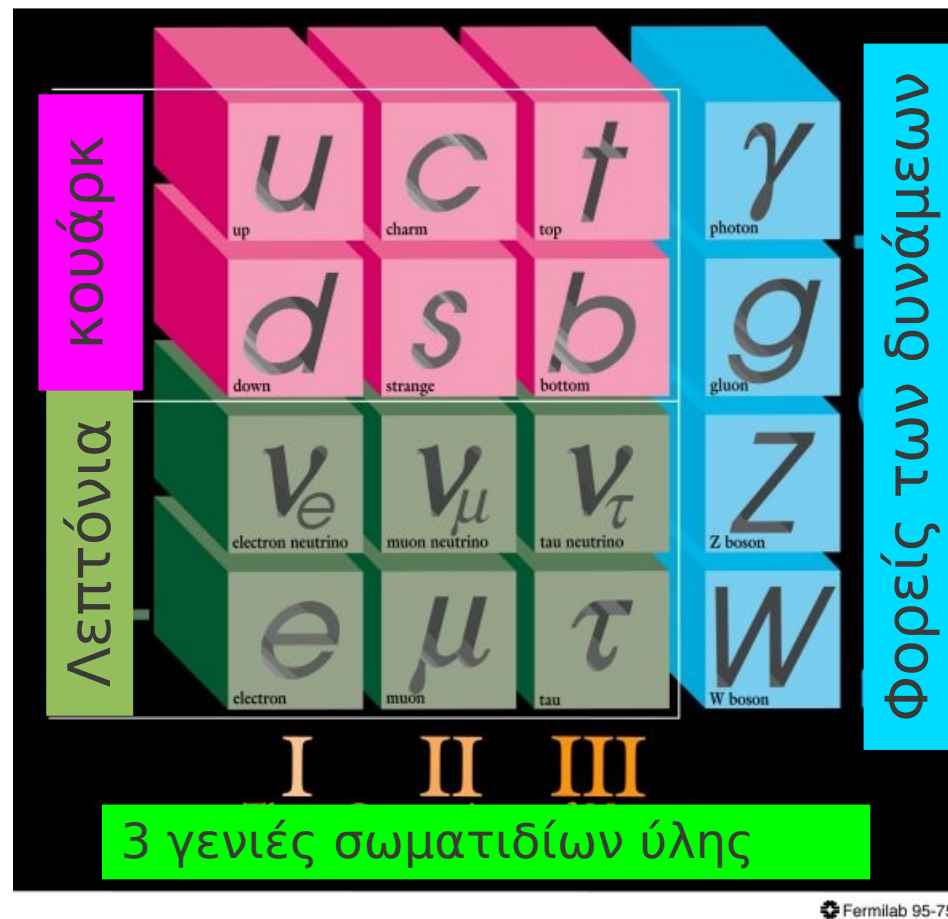
Ηλεκτρομαγνητικές

Μεταδίδονται με φωτόνια



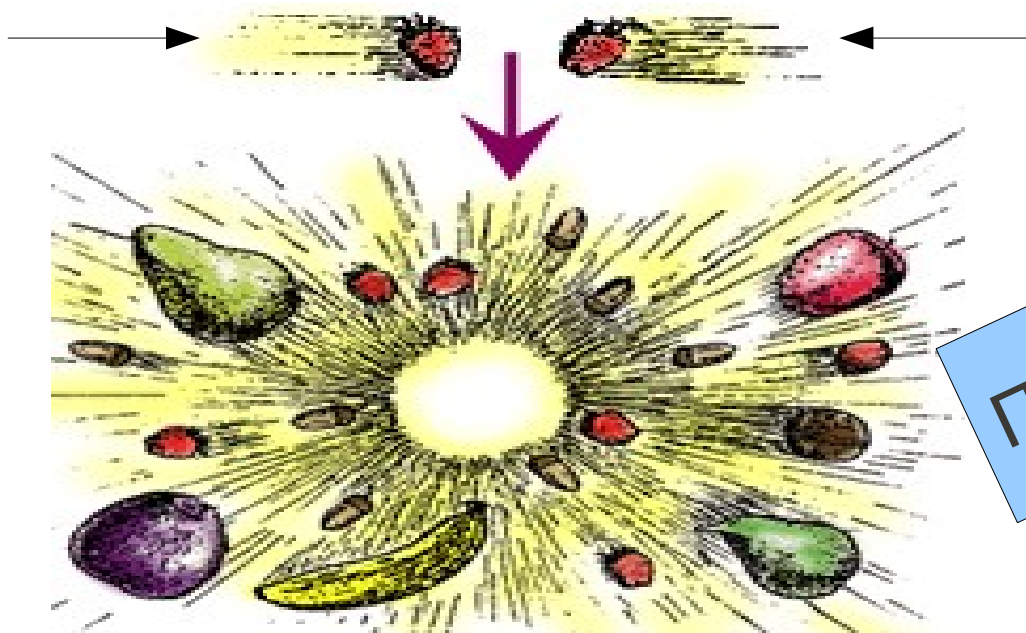
Συγκρατούν τα ηλεκτρόνια γύρω από τον πυρήνα
Ευθύνονται για τις χημικές αντιδράσεις
Ηλεκτρισμός, Φως, Ακτινοβολία ...

Μετά από ~100 χρόνια πειραμάτων σκέδασης Οι δομικοί λίθοι της ύλης



Μα, πώς παράγουμε σωματίδια;

- Πειράματα σκέδασης - συγκρούσεις σωματιδίων



Παράγονται “νέα” σωματίδια!

$$E = mc^2$$

ενέργεια

μάζα

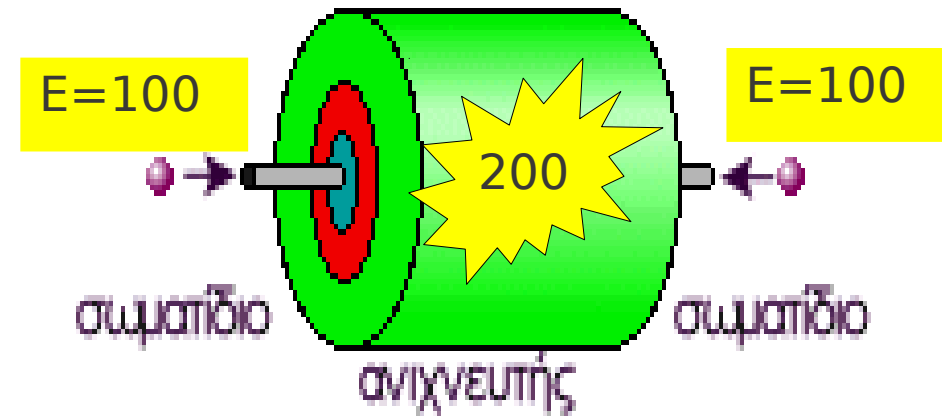
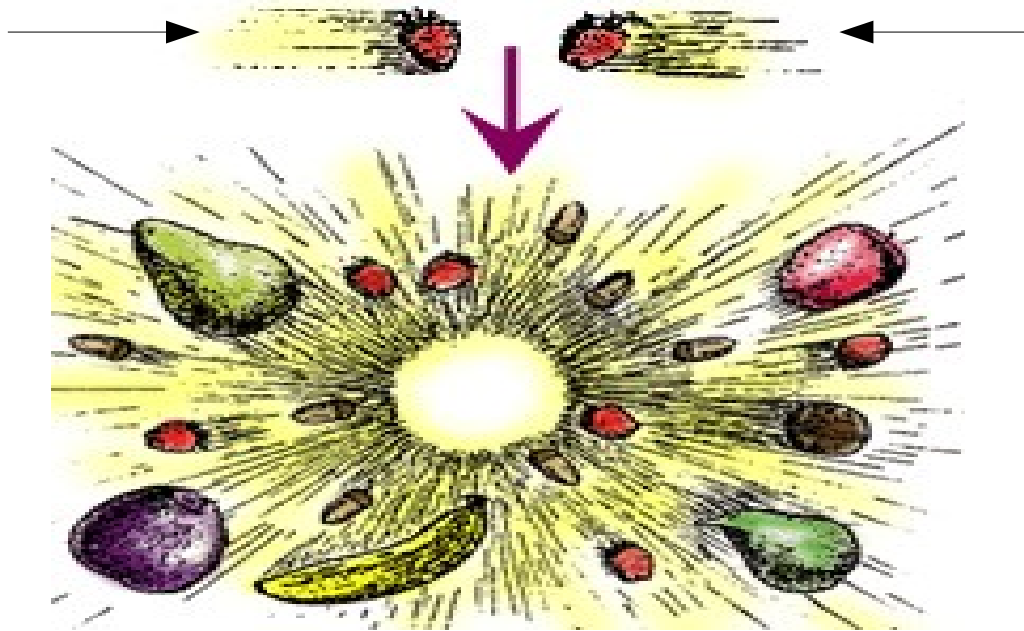
c = ταχύτητα του φωτός



Η μάζα είναι μια μορφή ενέργειας

Παράγουμε και ανιχνεύουμε σωματίδια

- Πειράματα σκέδασης - συγκρούσεις σωματιδίων



$$E = mc^2$$

ενέργεια

μάζα

c = ταχύτητα του φωτός



Η μάζα είναι μια μορφή ενέργειας

Επιταχυντές – σημαντικό εργαλείο έρευνας

- Οι μεγάλες ενέργειες συγκρούσεων επιτρέπουν:

μικροσκοπία

- Να κοιτάμε όλο και πιο βαθιά στην ύλη
 - Μεγάλη Ενέργεια → μικρό μήκος κύματος

$$\lambda = h/p$$

De Broglie (1924)

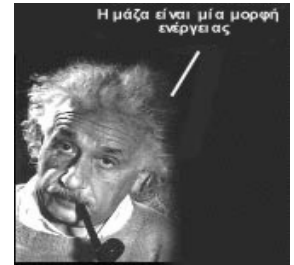


τηλεσκοπία

- Να ανακαλύπτουμε βαρύτερα σωματίδια
 - Η μάζα είναι μιά μορφή ενέργειας
- Να μελετάμε συνθήκες σαν του πρώιμου σύμπαντος
 - Πολύ Ενέργεια σε μικρό χώρο
→ μεγάλες θερμοκρασίες

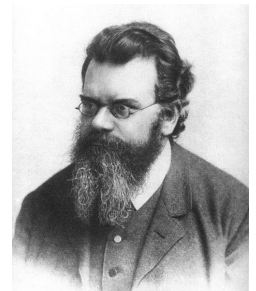
$$E = mc^2$$

Einstein (1905)



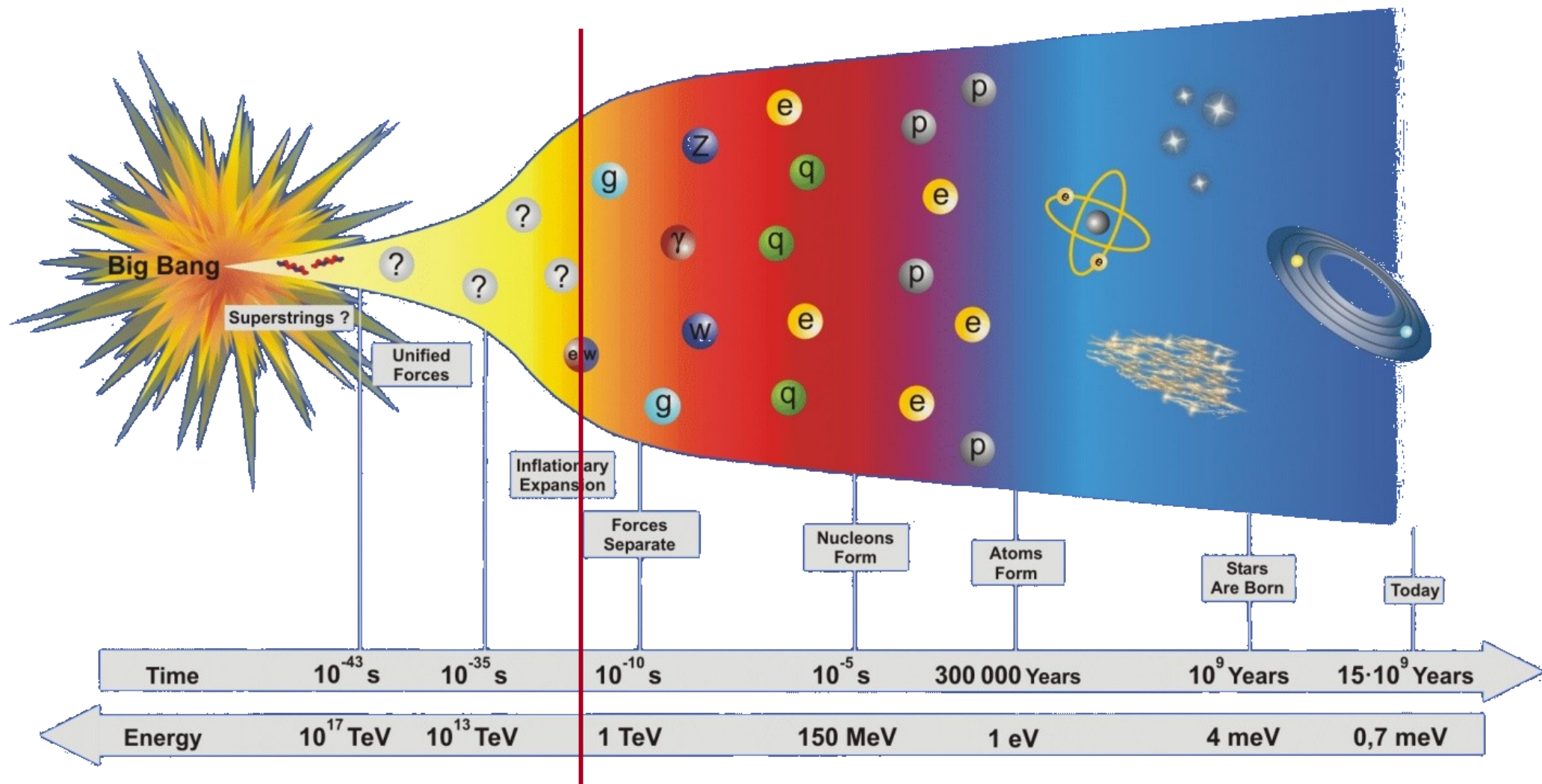
$$E = k T$$

Boltzman (~1900)



**Μελετάμε φαινόμενα και σωματίδια που
δεν είναι πιά “ορατά” ή υπαρκτά στον σύμπαν**

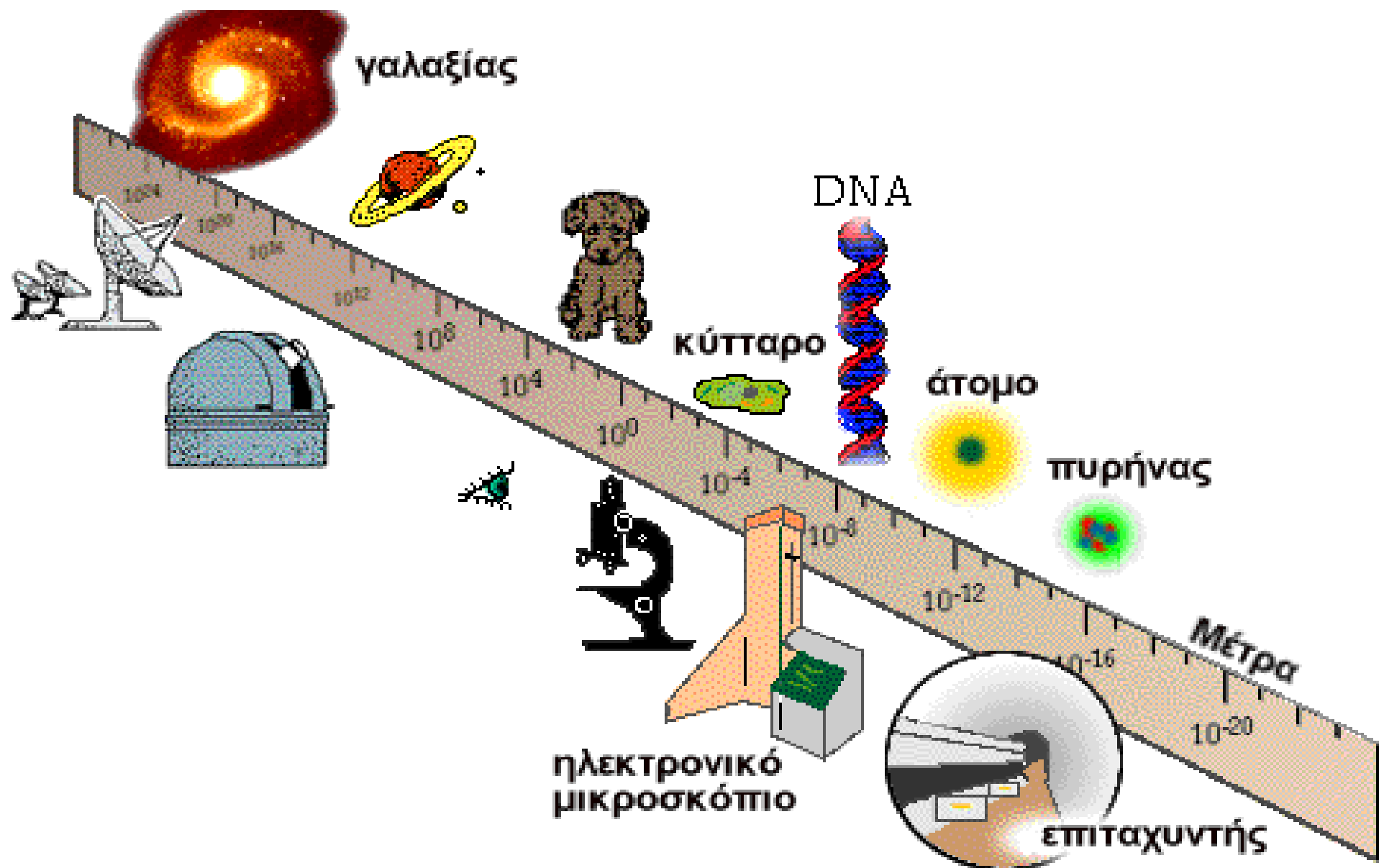
Ταξίδι σε συνθήκες πρώιμου σύμπαντος



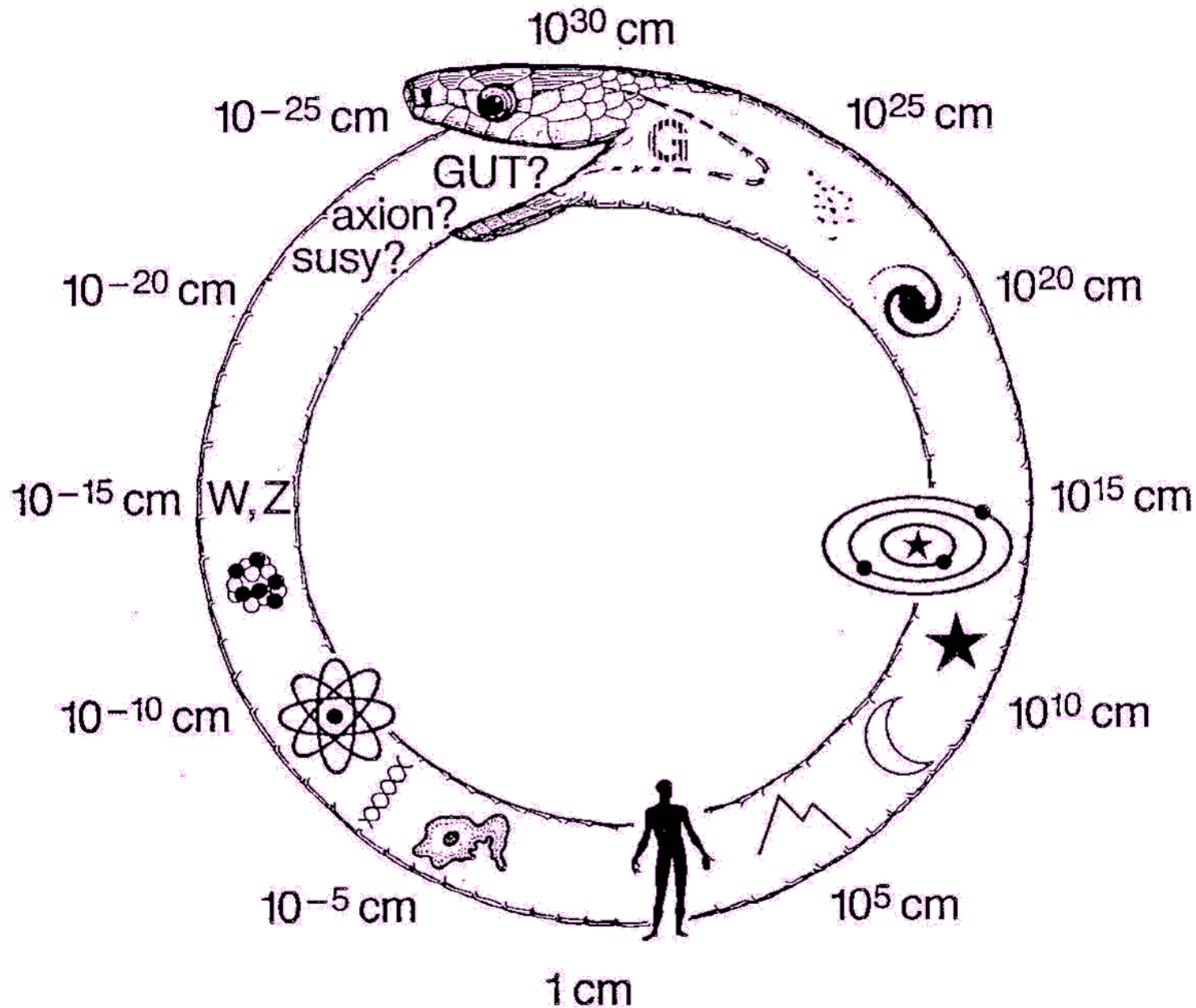
**Μεγάλος Επιταχυντής Αδρονίων (LHC) στο CERN:
συγκρούσεις πρωτονίων σε ενέργεια $14 \text{ TeV} \sim 10^{-14} \text{ sec}$**

(Σημείωση: $1 \text{ TeV} = 1000 \text{ GeV} = \text{ενέργεια όση η μάζα } 1000 \text{ πρωτονίων})$

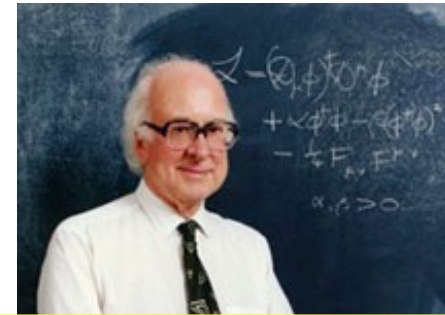
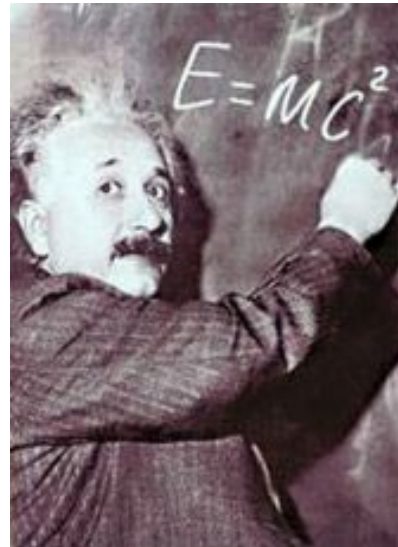
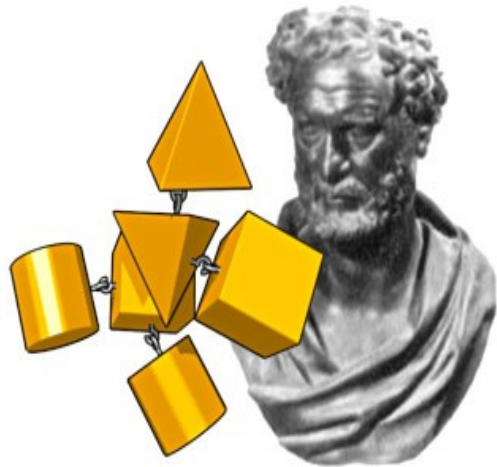
Επιταχυντές για τη μελέτη του σύμπαντος!



Το απειροστό συναντά το άπειρο!



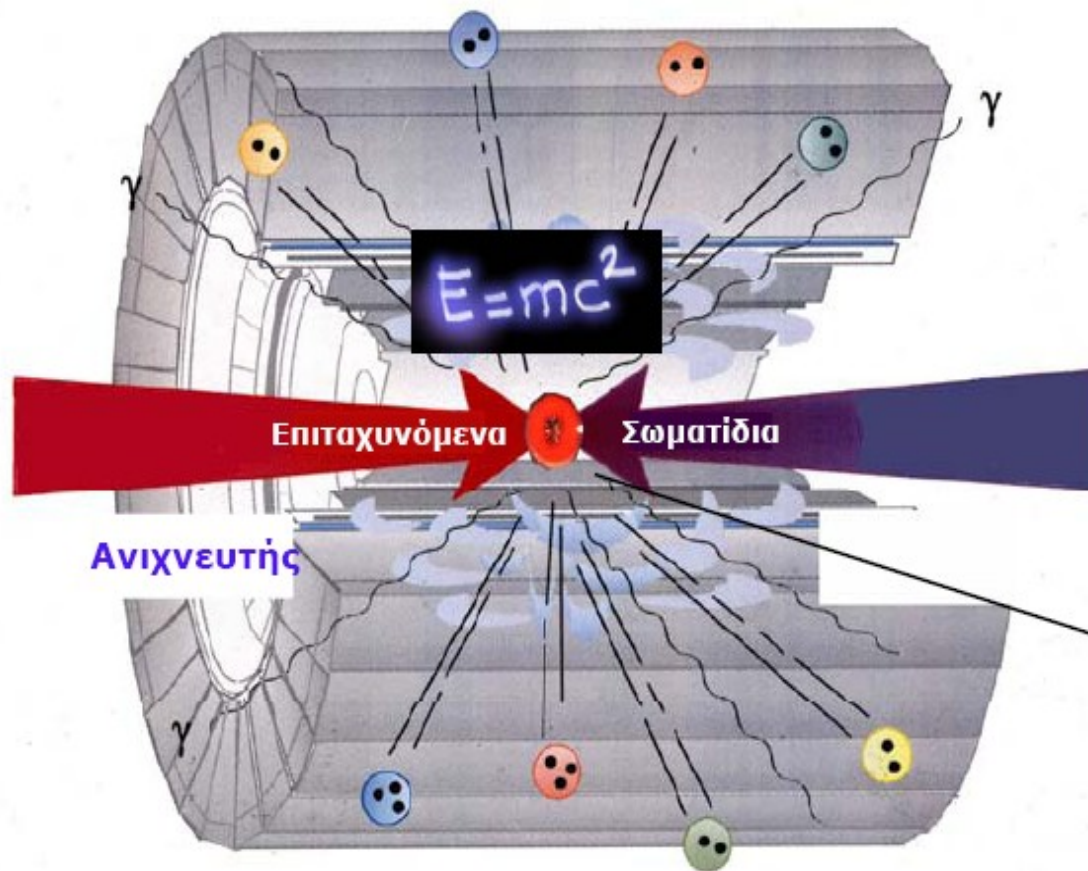
Κάποια από τα ερωτήματα που περιμένουν απάντηση



Ο κ. Higgs πάντως
έχει προτείνει
έναν τρόπο/μηχανισμό.
Το σωματίδιο Higgs στο LHC!
(φαίνεται να έχει
μάζα ~ 125 GeV)

- Έχουμε μιά επιτυχημένη θεωρία, αλλά...
 - Πώς τα σωματίδια αποκτούν μάζα; - έχουμε θεμελιώδη σωματίδια (δηλ. χωρίς δομή) με πολύ διαφορετικές μάζες
 - Από τι αποτελείται το 96% του σύμπαντος;
 - Η βαρύτητα δεν περιγράφεται στην ίδια θεωρία
 - Μπορούμε να περιγράψουμε “τα πάντα” στη βάση μιας θεωρίας;
 - Υπάρχουν άλλες δυνάμεις?
 - Ζούμε σε περισσότερες από 3+1 διαστάσεις?

Ψάνουμε τις απαντήσεις παράγοντας και ανιχνεύοντας σωματίδια ("η μέθοδος")

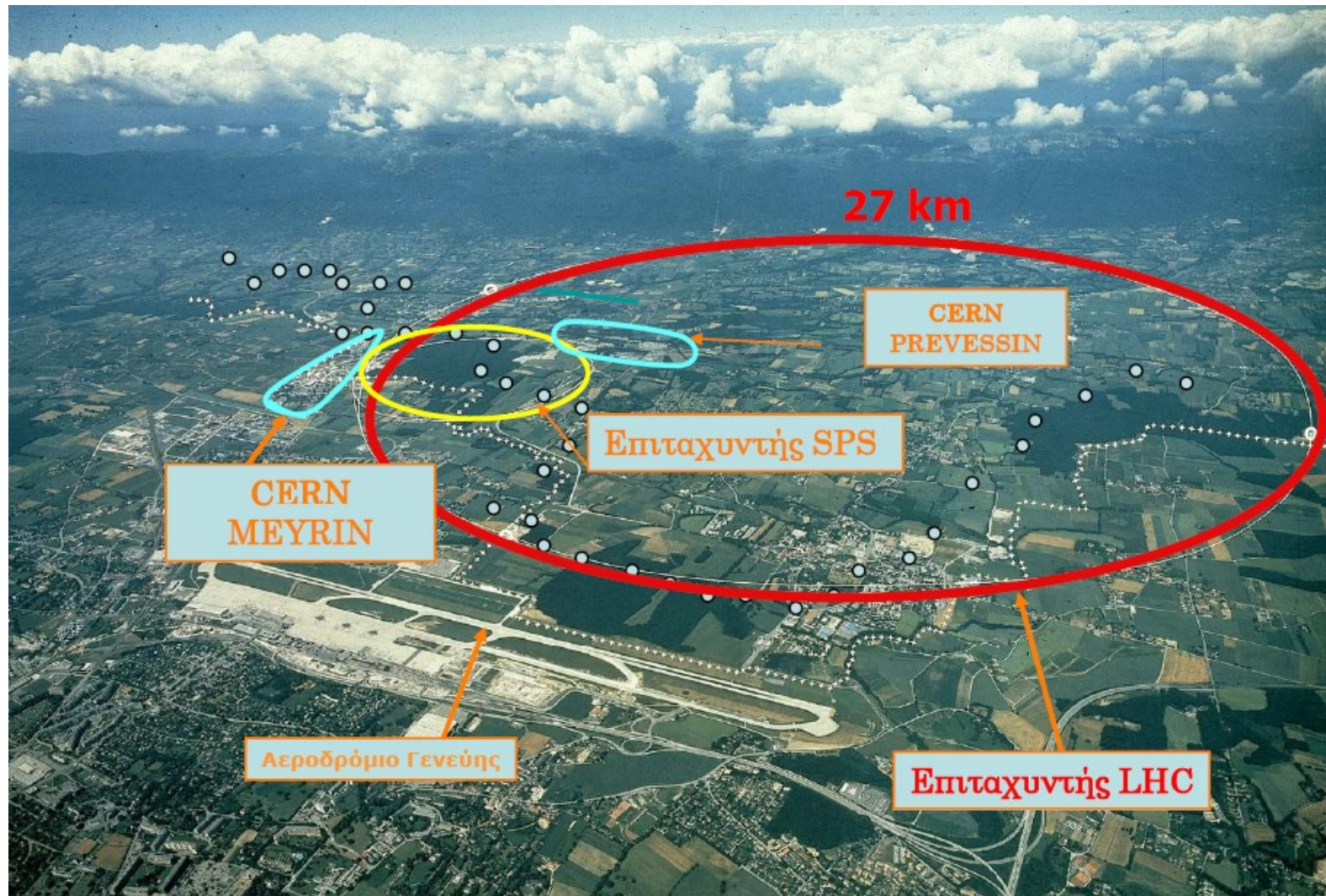


1) Συγκέντρωση ενέργειας στα σωματίδια (**επιταχυντής**)

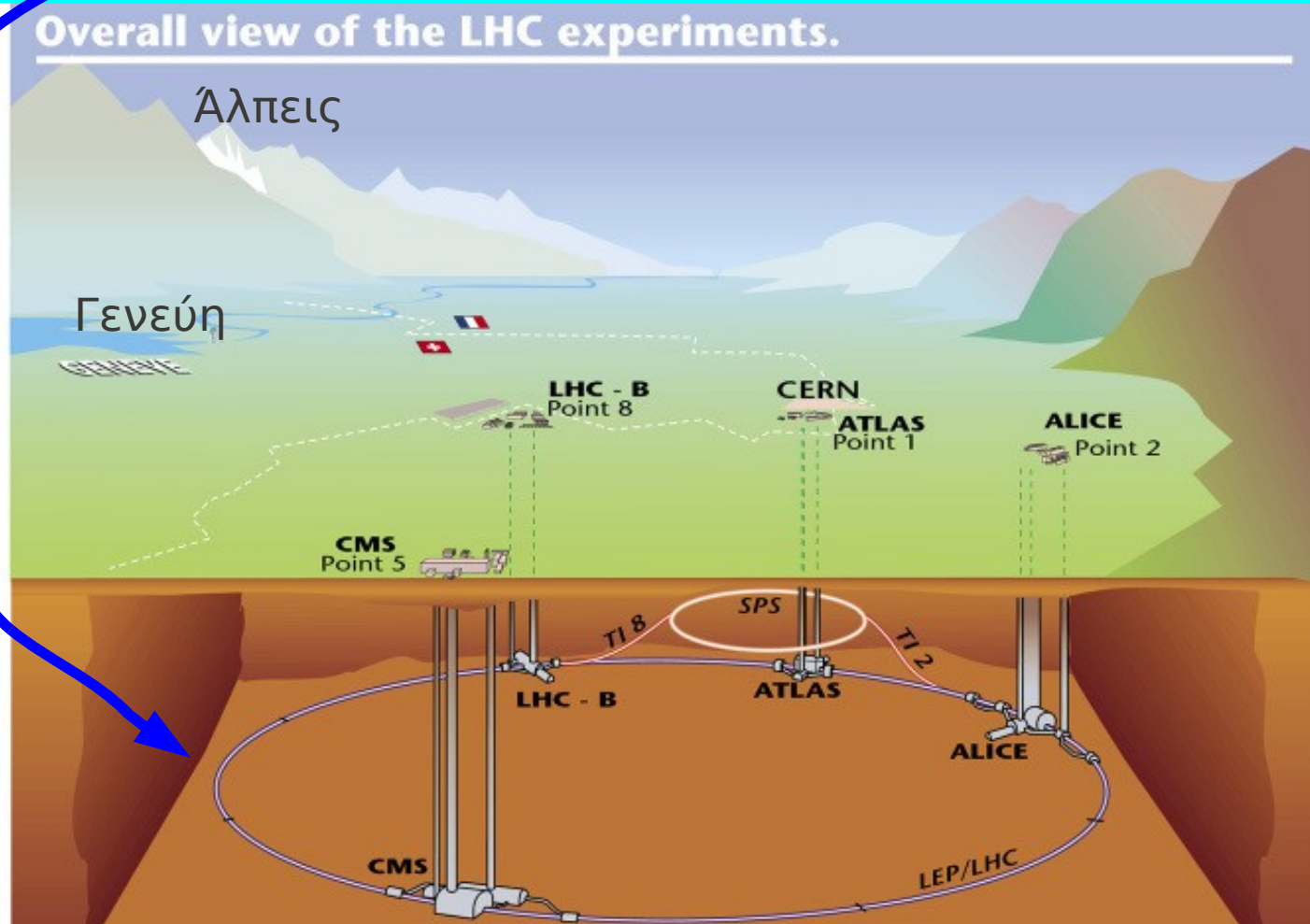
2) **Σύγκρουση** σωματιδίων (δημιουργία συνθηκών ανάλογων του Big Bang)

3) Αναγνώριση παραγόμενων σωματιδίων από τον **Ανιχνευτή** (έρευνα για νέα φαινόμενα)

Χρειαζόμαστε λοιπόν επιταχυντές – τον Μεγάλο Επιταχυντή Αδρονίων (Large Hadron Collider, LHC) στο CERN



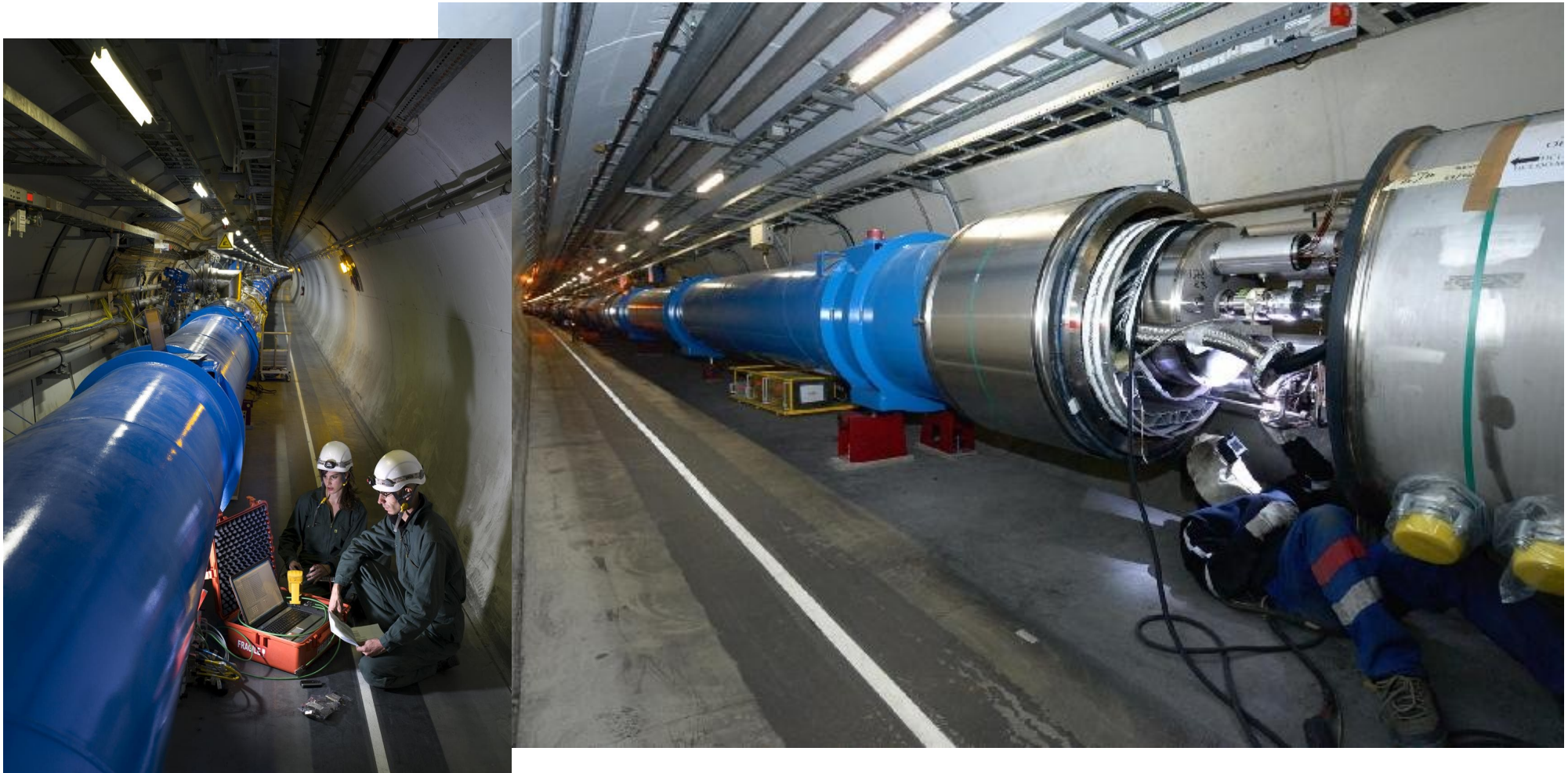
Το τούνελ του επιταχυντή LHC: 100 μέτρα βάθος



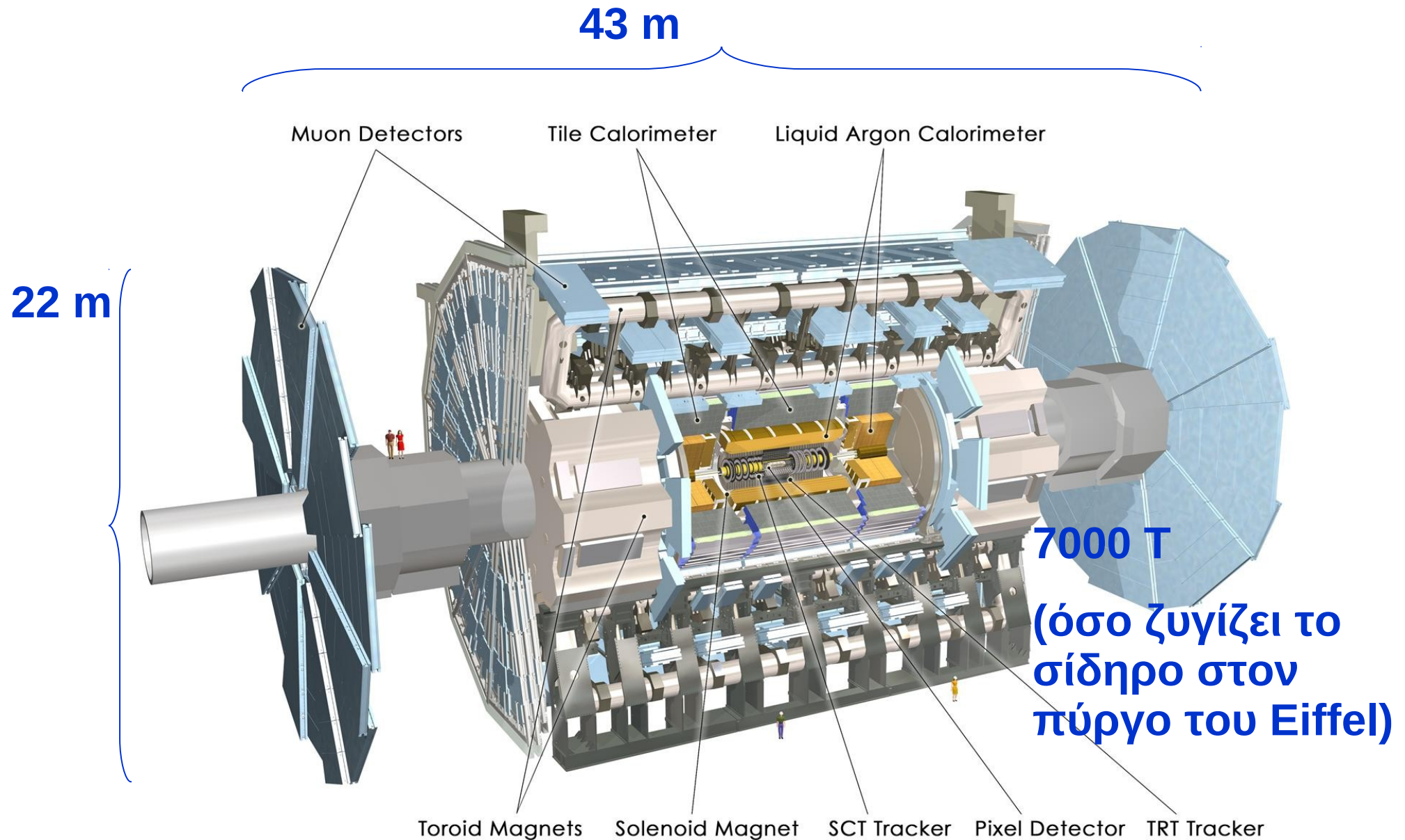
- ~300 τρισεκατομύρια πρωτόνια (~3000 δέσμες των 10^{11} πρωτονίων)
- ταξιδεύοντας με ταχύτητα 99.9999991% αυτής του φωτός,
- Γυρίζουν ~11000 φορές το δευτερόλεπτο γύρω από τον επιταχυντή που έχει περίμετρο 27km
- Η ενέργεια σύγκρουσης των πρωτονίων είναι 14 000 GeV

Μεγάλος Επιταχυντής Αδρονίων στο CERN

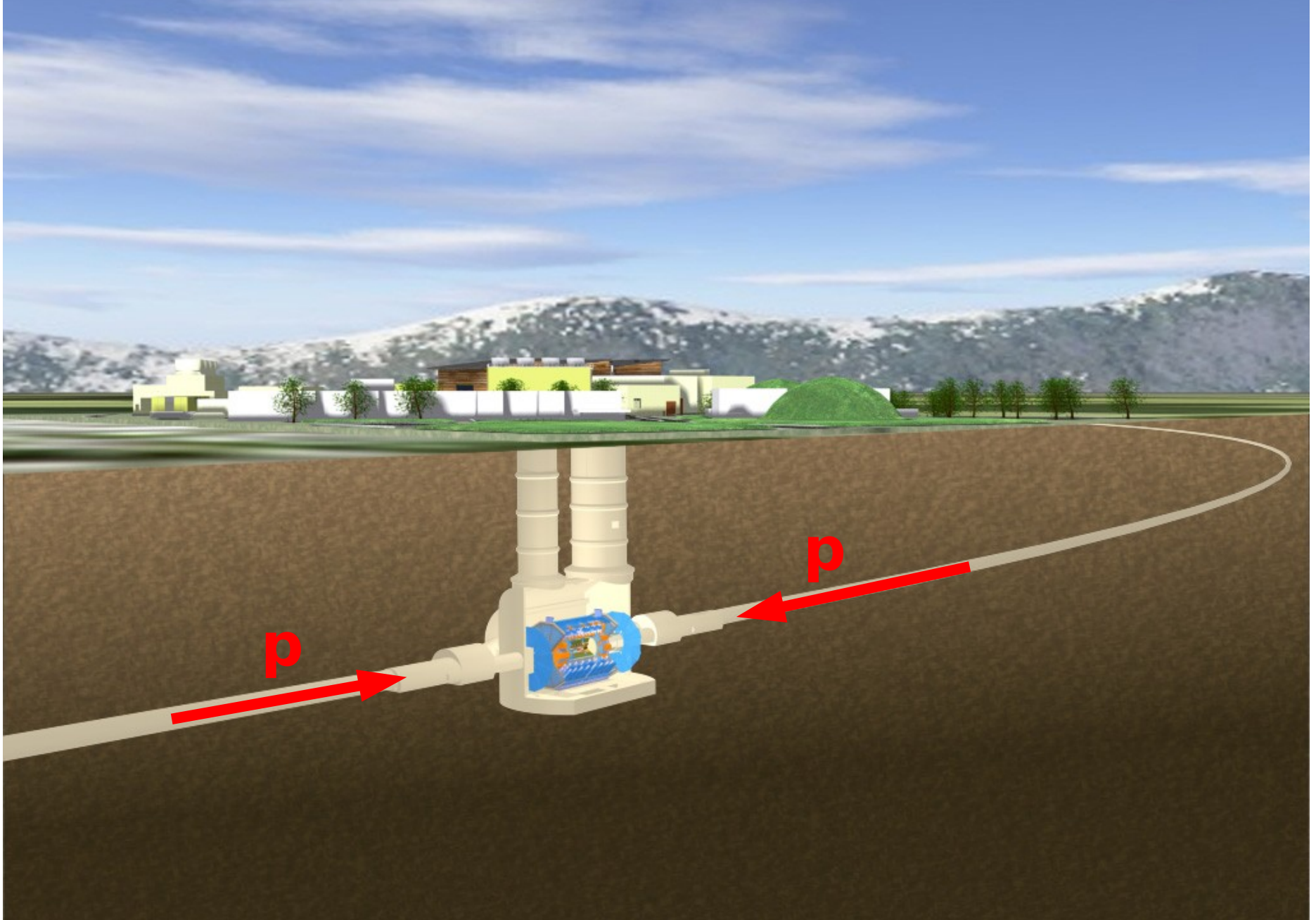
Από τις γρηγορότερες πίστες του πλανήτη, και απ'τα πιο άδεια και κρύα (**1.9 K = -271.1 C**) μέρη του σύμπαντος
→ κενό και θερμοκρασίες μέσα στους σωλήνες του επιταχυντή καλύτερα απ'του μεσοαστρικού χώρου!



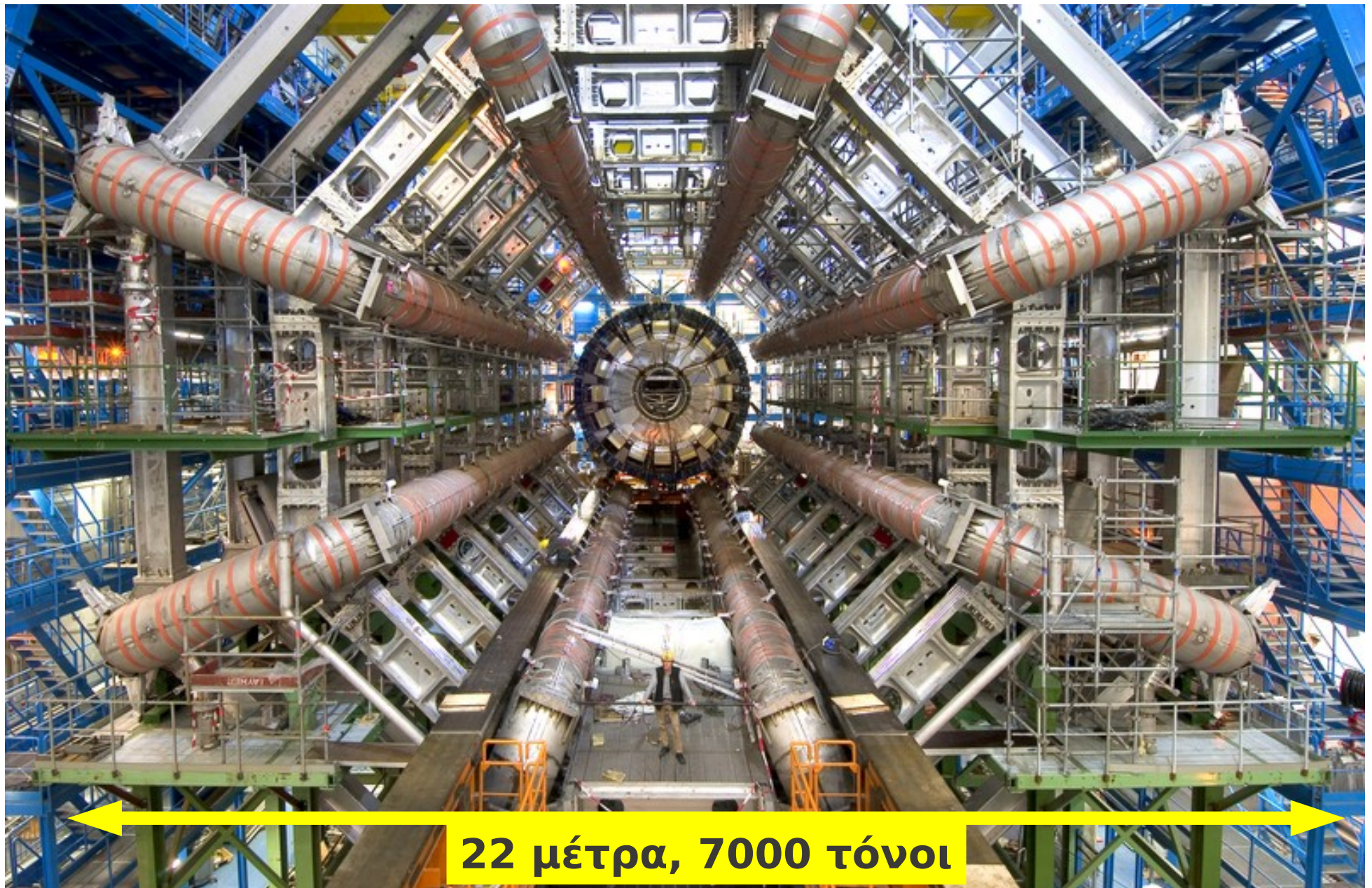
Χρειαζόμαστε μεγάλους ανιχνευτές



Το πείραμα ATLAS στο τούνελ του LHC

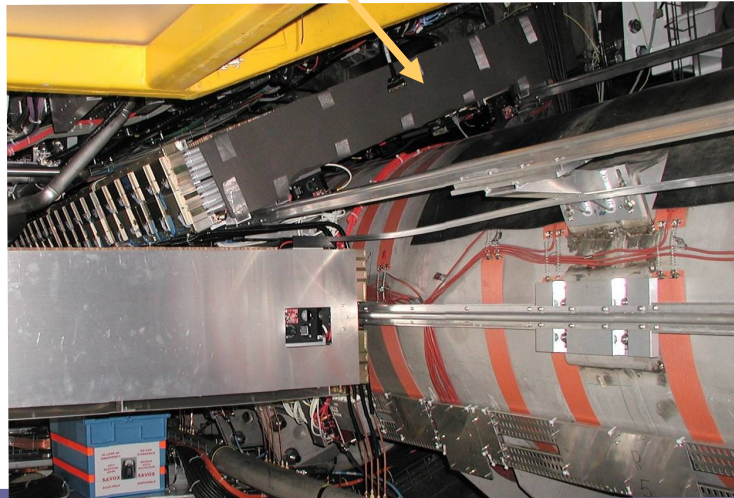
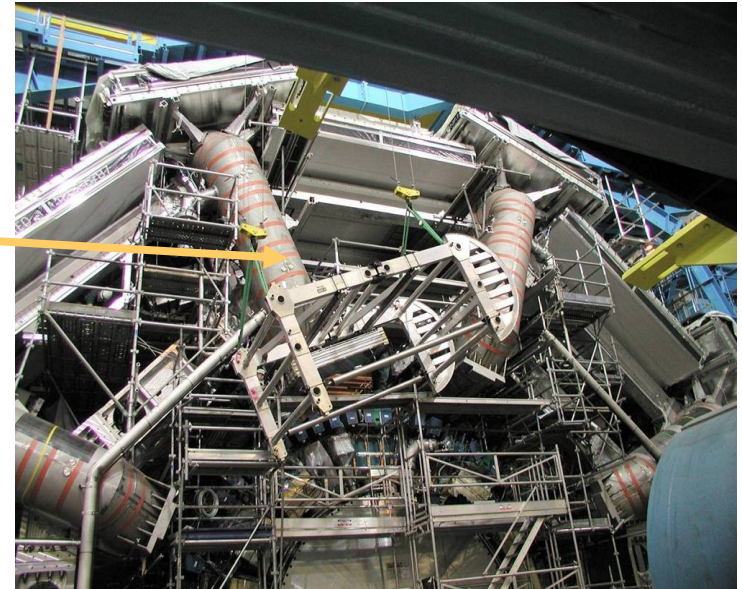
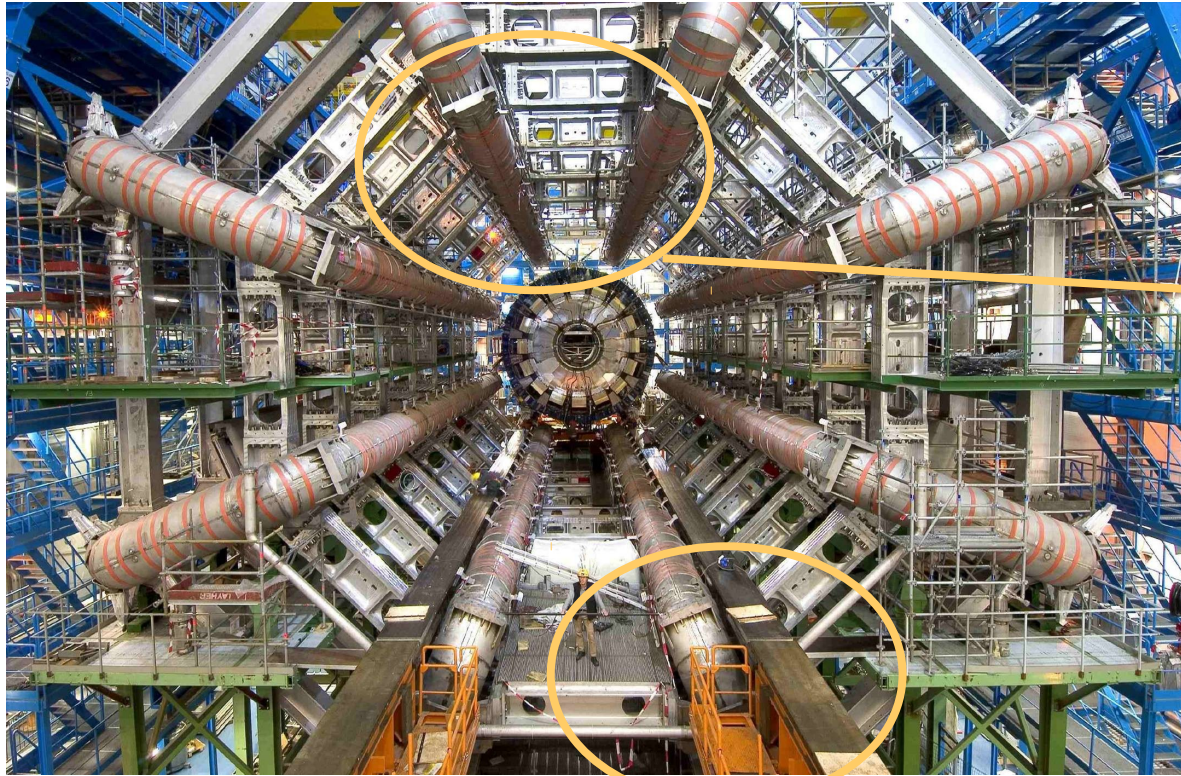


ATLAS



22 μέτρα, 7000 τόνοι

ATLAS at CERN - Αριστοτέλειο



Οι Ελληνικοί θάλαμοι
μιονίων που
κατασκευάστηκαν στο
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο
Θ/νίκης εγκαταστημένοι
στο πείραμα ATLAS

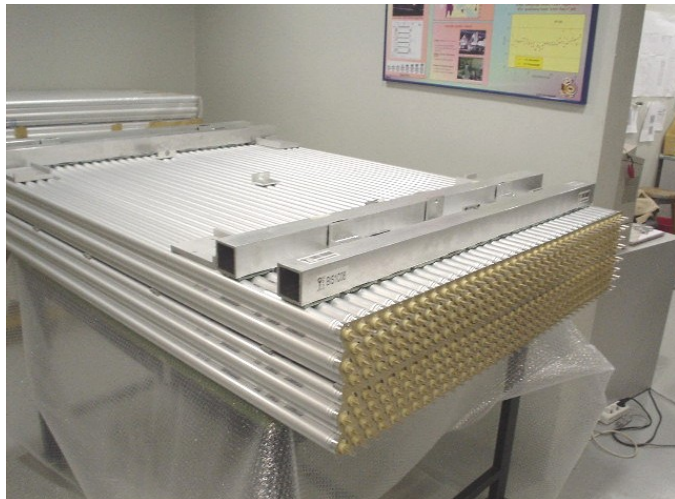
(συνεργασία με Μετσόβειο
και Καποδιστριακό)

ATLAS at CERN - Αριστοτέλειο

Το 1997 δημιουργήθηκε στο ΑΠΘ ένα εργαστήριο για την κατασκευή και τον έλεγχο ανιχνευτών μιονίων.



Χώρος Ελεγχόμενων
Συνθηκών

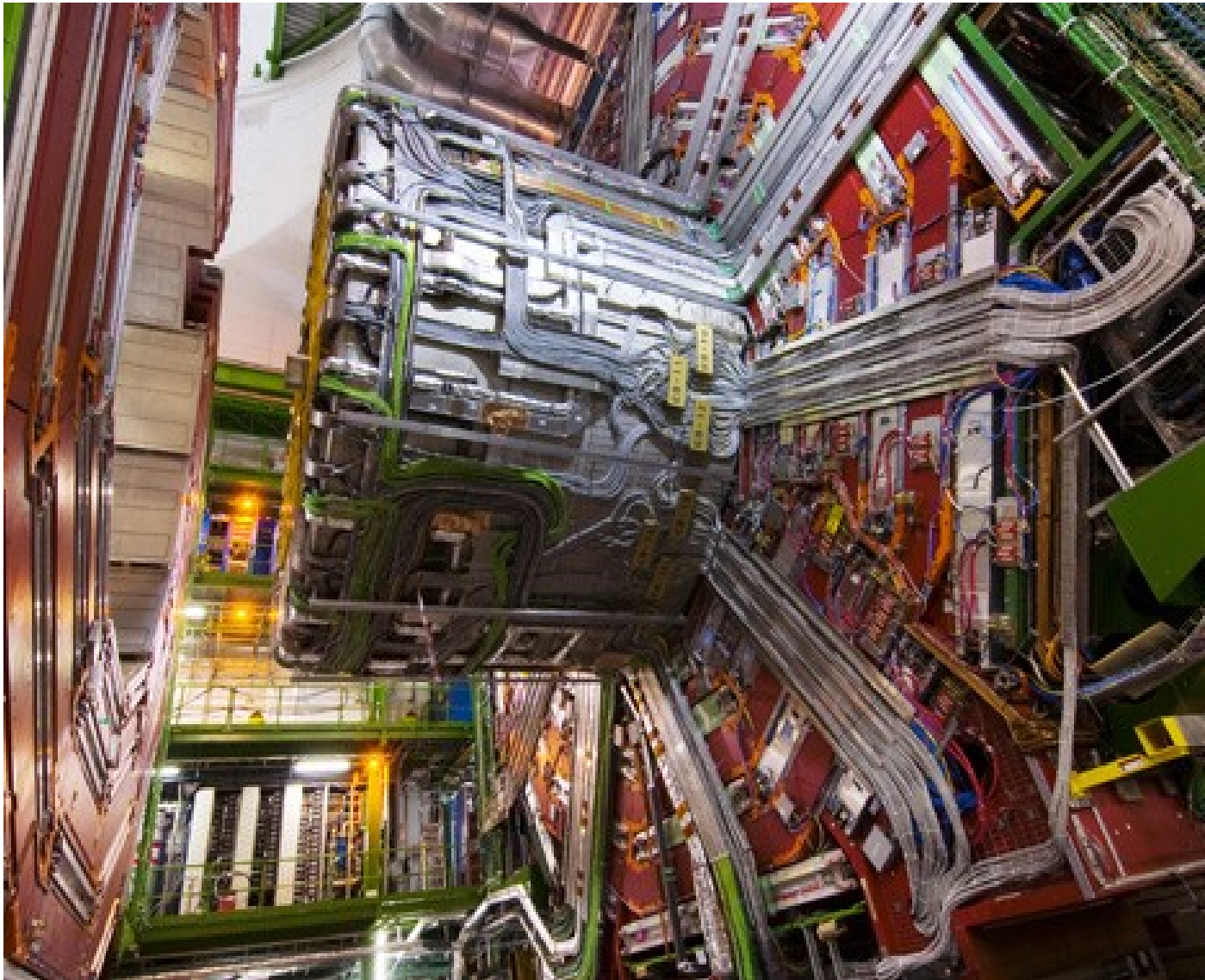


CMS



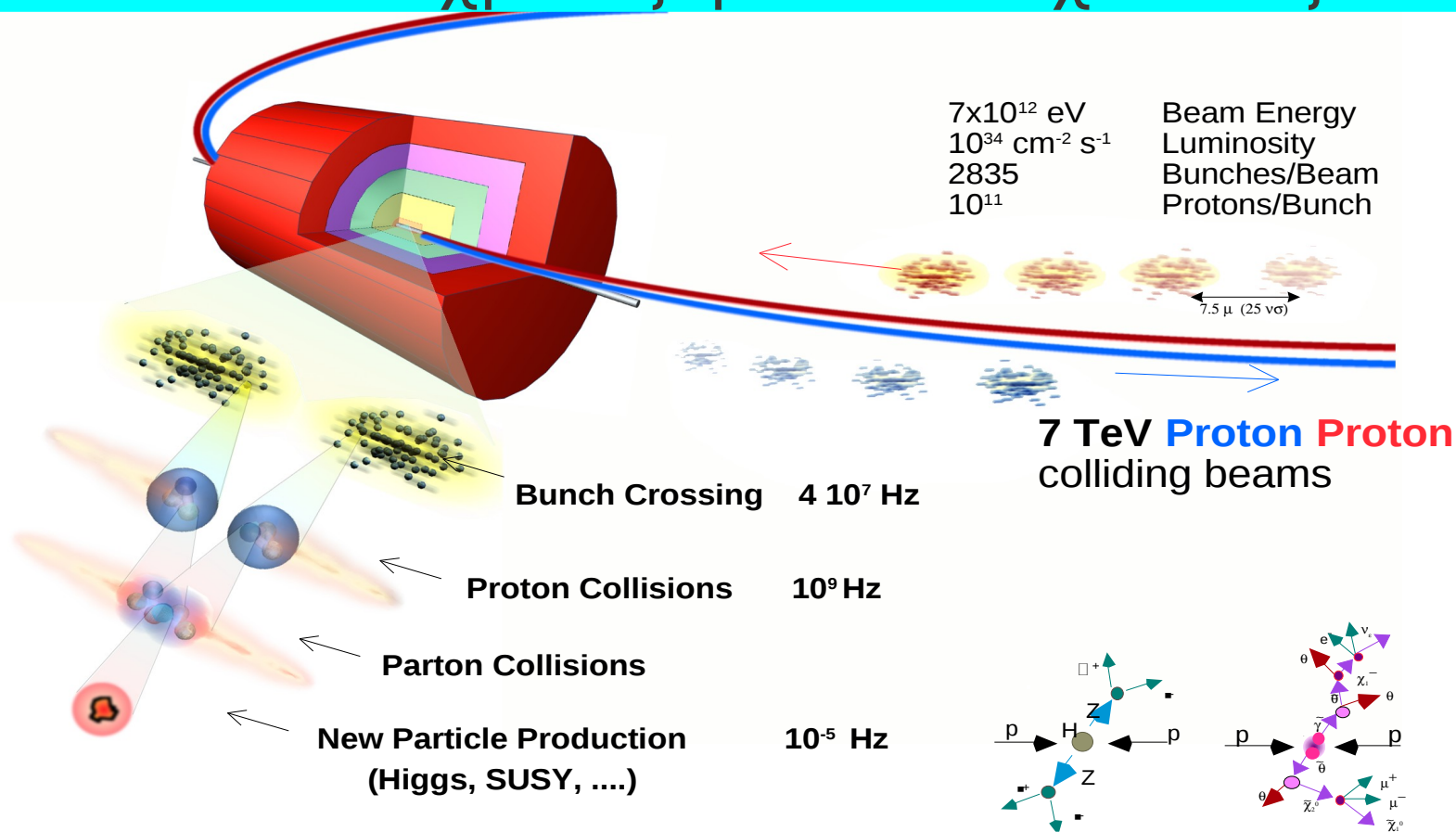
15 μέτρα, 12000 τόνοι
(λίγο περισσότερο από το συνολικό
βάρος του πύργου του Eiffel)

CMS



Όχι μόνο “σιδερικά”,
αλλά
και ηλεκτρονικά,
και καλώδια

Όχι μόνο όγκος/μπράτσα, αλλά και “νοημοσύνη” - στο LHC χρειαζόμαστε ανιχνευτές που..



- * Να βλέπουν ένα δισεκατομύριο συγκρούσεις πρωτονίων το δευτερόλεπτο,
- * Να διαλέγουν τις καλύτερες 100-200 ανά δευτερόλεπτο
- * και να τις καταγράφουν με διακριτική ικανότητα φωτογραφικής μηχανής των 100 Μεγα pixels.

Χρειαζόμαστε Υπολογιστές



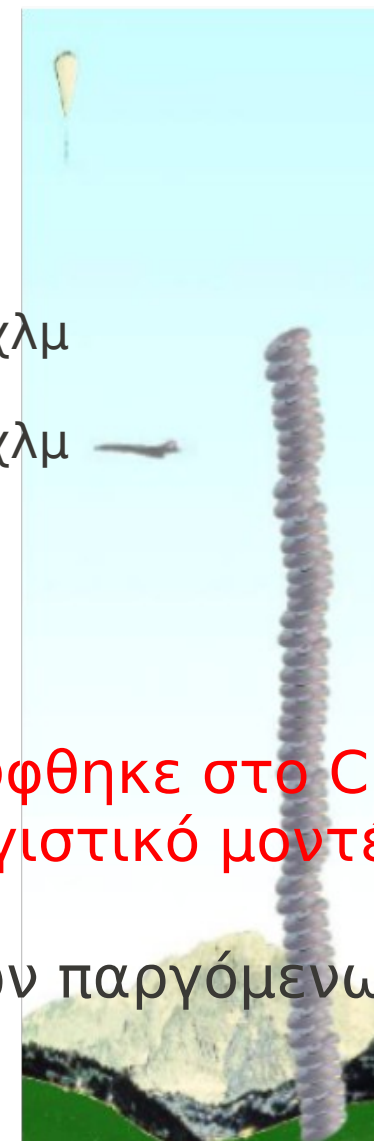
Περίπου 3000 υπολογιστές για την επιλογή των
“καλύτερων” 200 γεγονόσεων ανά δεπτερόλεπτο

Υπολογιστές παντού – παγκόσμιο δίκτυο (Grid)



20 χλμ

15 χλμ



- * Μετά το **world-wide web (WWW)** που ανακαλύφθηκε στο CERN, ένα ακόμα βήμα προς ένα αποκεντρωμένο υπολογιστικό μοντέλο
- * Απαραίτητο για την ανάλυση και αποθήκευση των παγόμενων δεδομένων
- * Π.χ., το πείραμα ATLAS καταγράφει πληροφορίες όσο ένα CD (700 MB) κάθε ~2 δεπτερόλεπτα

Και κυρίως χρειαζόμαστε ανθρώπους



Να τα φτιάξουμε ολ'
αυτά,

να συλλέξουμε τα
δεδομένα,

και να καταλάβουμε τι
μας λέει η φύση.

Ελληνική συμμετοχή στο CERN

Ελληνικά Πανεπιστήμια κατασκεύασαν ένα μέρος και έχουν συμμετοχή στα πειράματα

- ATLAS**
- CMS**
- ALICE**

στον νέο επιταχυντή LHC του CERN.



Τι συζητήσαμε

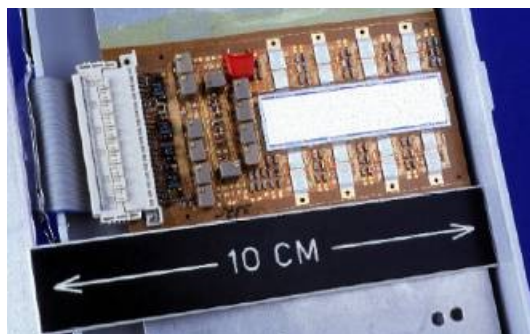
- Πώς παρατηρούμε τον μικρόκοσμο
 - Πειράματα σκέδασης ως προέκταση των αισθήσεών μας
 - Αναλογία με την όραση
 - Η ανάγκη επιταχυντών και αντίστοιχων πειραμάτων
 - Όσο πιο γρήγορο είναι το βλήμα, τόσο μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα παρατήρησης έχουμε.
- Τι μαθαίνουμε με τα πειράματα στους επιταχυντές
 - Η δομή της ύλης και το σύμπαν – μικροσκόπια και τηλεσκόπια
- Είδαμε λίγο το μεγάλο επιταχυντή αδρονίων (LHC) στο CERN και τα μεγάλα πειράματα στο LHC

Γιατί όλη αυτή η προσπάθεια;

Βασική έρευνα και εφαρμογές

- Από τι είναι φτιαγμένος ο κόσμος και με ποιές δυνάμεις αλληλεπιδρούν τα συστατικά του;
- Ανακάλυψη / κατασκευή νέων πυρήνων και νέων σωματιδίων στο εργαστήριο
- Κατανόηση των δυνάμεων που τους/τα κυβερνούν
- Μελέτη του τρόπου δημιουργίας των πυρήνων κατανόηση της πυρηνινোসύνθεσης στα άστρα
- Πλάσμα (“σούπα”) από τα συστατικά των πυρήνων
- Σχάση και σύντηξη πυρήνων – παραγωγή ενέργειας
- Εφαρμογές στην Ιατρική (ανιχνευτές ακτονοβολίας, κατασκευή ραδιοϊσοτόπων κλπ).
- Ραδιενέργεια περιβάλλοντος
- κλπ, κλπ...

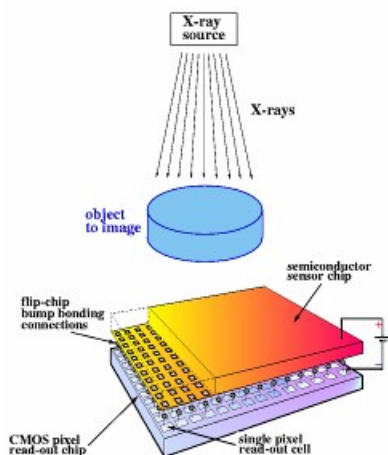
Για να κάνουμε την έρευνά μας ωθούμε την τεχνολογία κι έτσι αναπτύσσουμε και μεταφέρουμε τεχνολογίες αιχμής που βελτιώνουν τη ζωή μας



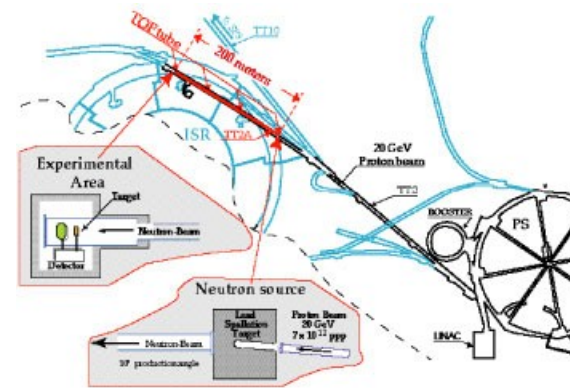
Silicon detector for a Compton camera in nuclear medical imaging



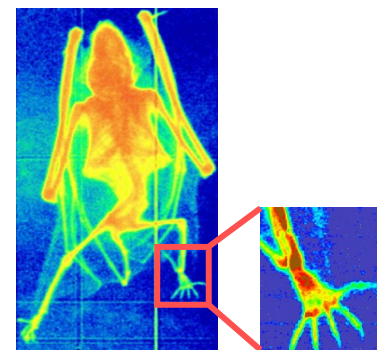
Thin films by sputtering or evaporation



Medipix: Medical X-ray diagnosis with contrast enhancement and dose reduction



Radio-isotope production for medical applications



Radiography of a bat, recorded with a GEM detector

Βασική έρευνα γίνεται με σκοπό...

- ...να καταλάβουμε αυτό “τον κόσμο τον μικρό, τον μέγα” που ζούμε
- Η παρατήρηση του κόσμου με διάφορα μέσα, αλλάζει τον τρόπο που σκεπτόμαστε. Θυμάστε
 - Την κατάρριψη του γεωκεντρικού μοντέλου του κόσμου;
 - Τη σχετικότητα του “ταυτόχρονου”;
 - Την αντικατάσταση της βεβαιότητας με την πιθανότητα;

