

Πυρηνική Φυσική και Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων (5ου εξαμήνου, χειμερινό 2018-19)

Τμήμα Τ3: Χ. Πετρίδου

Μάθημα 1β

Μια εισαγωγή στο αντικείμενο

Πετρίδου Χαρά

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Πυρηνική & Στοιχειώδη Ι, Αριστοτέλειο Παν. Θ/νίκης, 4 Οκτωβρίου 2018

Στόχος και μέσα

- Στόχος της Πυρηνικής Φυσικής και της Φυσικής Στοιχειωδών Σωματιδίων:
 - η κατανόηση του σύμπαντος και του κόσμου, της προέλευσης και της δομής της ύλης, ο έλεγχος και η αξιοποίηση της γνώσης
- Το ερευνητικό μας εργαστήριο / η πηγή των δεδομένων μας:
 - Το σύμπαν – παρατήρηση π.χ, της
 - 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

Γιατί; Η περιέργεια

- Αναρωτιόμαστε, από τι είναι φτιαγμένος ο κόσμος;

Τι είναι εδώ μέσα;



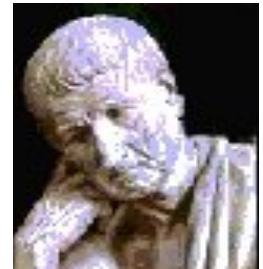
Δημόκριτος (460–371 π.Χ):

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**

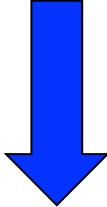


- Πώς μπορούμε να προχωρήσουμε από τις υποθέσεις σε
επιστημονικά τεκμηριωμένες θεωρίες;

– “**Με το πείραμα**” - Γαλιλαίος (Galileo Galilei), 1564 – 1642 μ.Χ

1906: Γνωρίζαμε ήδη ότι τα υλικά είναι φτιαγμένα από άτομα

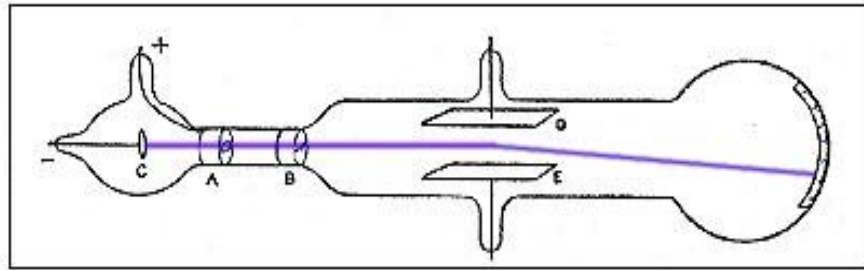
- Αναλύοντας τα δεδομένα παρατηρήσεων, φτάσαμε να ξέρουμε ότι υπάρχουν άτομα και κενός χώρος
 - Ατομική θεωρία του Dalton, Avogadro κ.α.

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

1906: Γνωρίζαμε ήδη ότι τα ά-τομα... τεμαχίζονται

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

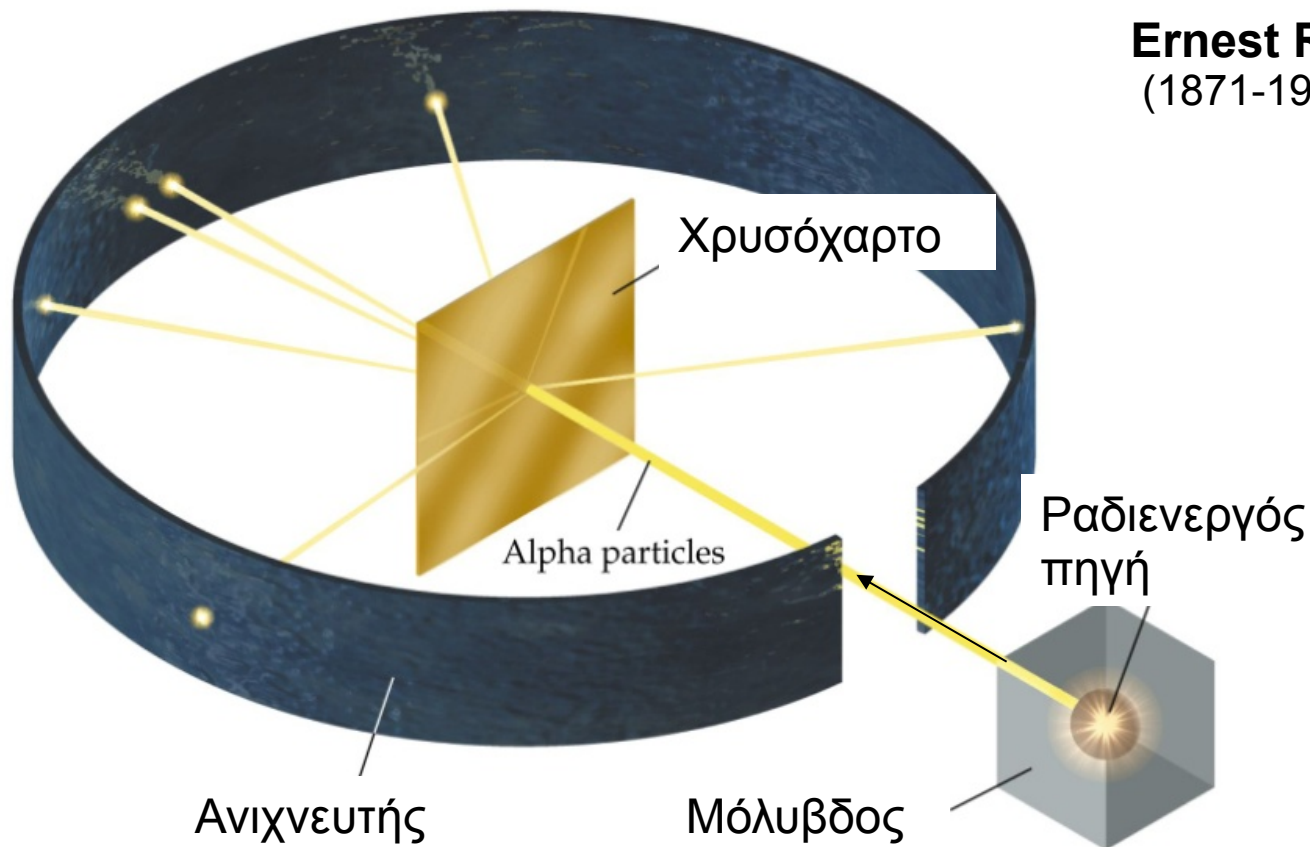


Καθοδικός σωλήνας (cathode ray tybe)

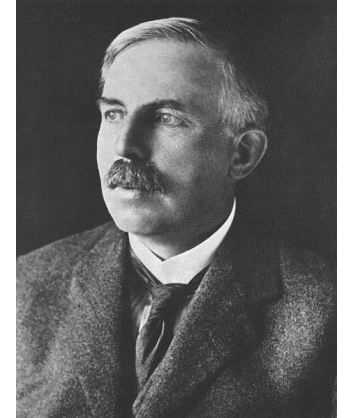
- Αλλά, τα άτομα είναι ηλεκτρικά ουδέτερα.
- **Ερώτηση: Πώς είναι κατανεμημένα τα ηλεκτρόνια μέσα στο άτομο;**
 - Είναι το άτομο σαν το σταφιδόψωμο;
 - “Σταφίδες” → τα ηλεκτρόνια
 - “Ζύμη” → το θετικό φορτίο

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)



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

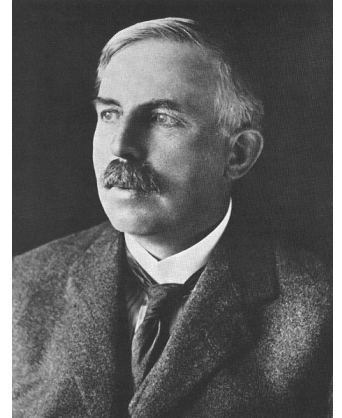


έτσι εξηγείται η σκέδαση σε μεγάλες γωνίες

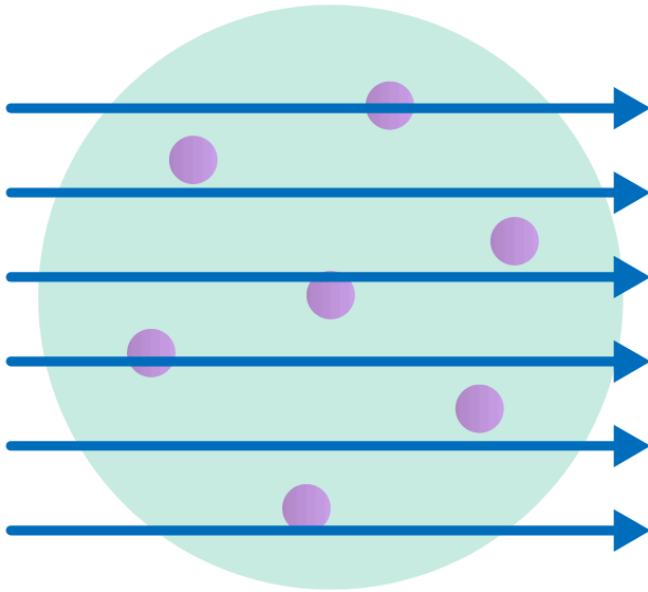
Απάντηση από πειράματα σκέδασης

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

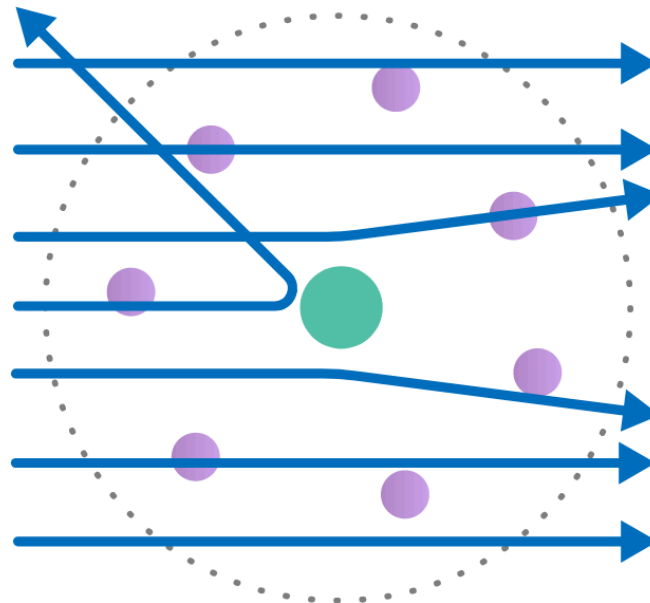
Ernest Rutherford
(1871-1937)



THOMSON MODEL



RUTHERFORD MODEL



"It was quite the most incredible event that has ever happened to me in my life. It was almost as incredible as if you fired a 15 inch shell at a piece of tissue paper and it came back and hit you."

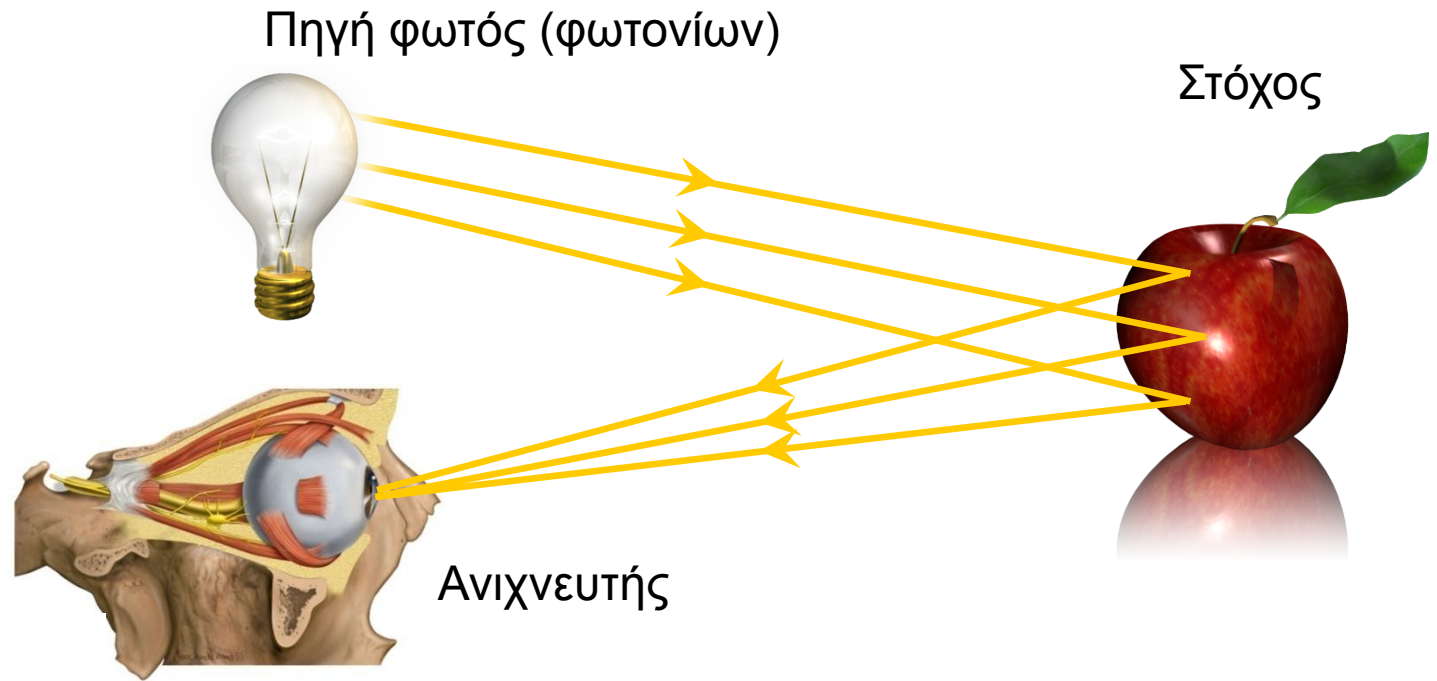
Το άτομο έχει το θετικό του φορτίο συγκεντρωμένο σ' έναν πυρήνα



έτσι εξηγείται η σκέδαση σε μεγάλες γωνίες

Μια καθημερινή εμπειρία σκέδασης

- Η όραση!

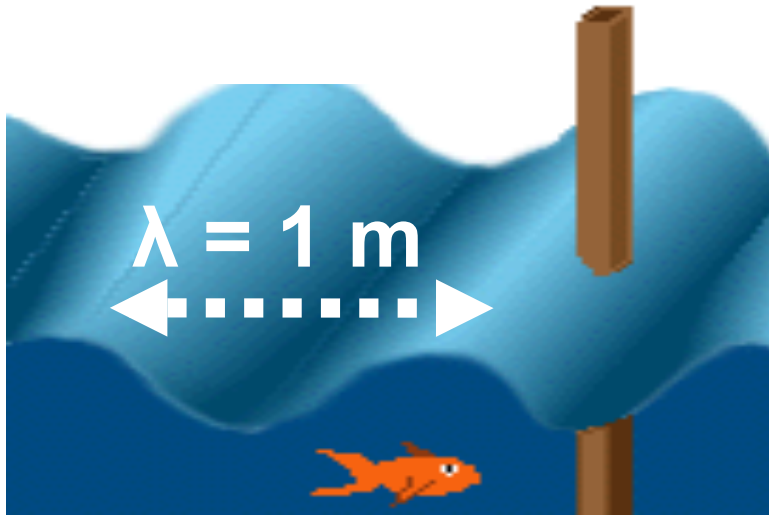


Μονάδα επεξεργασίας
δεδομένων – υπολογιστής

- 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)

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:

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



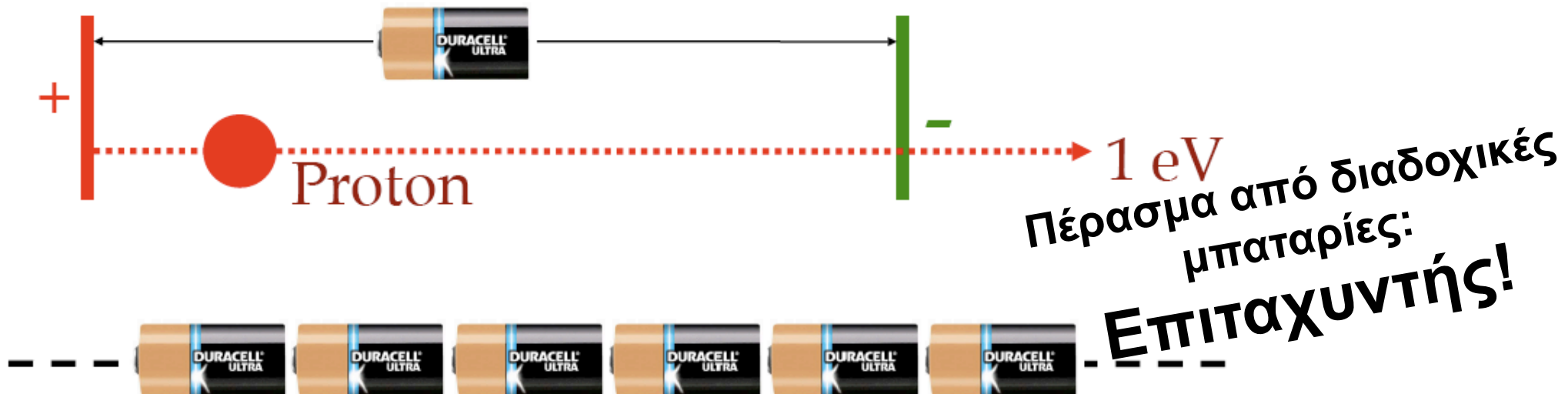
Louis de Broglie (1924)

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

Σωματίδια με το κατάλληλο μήκος κύματος:

- 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

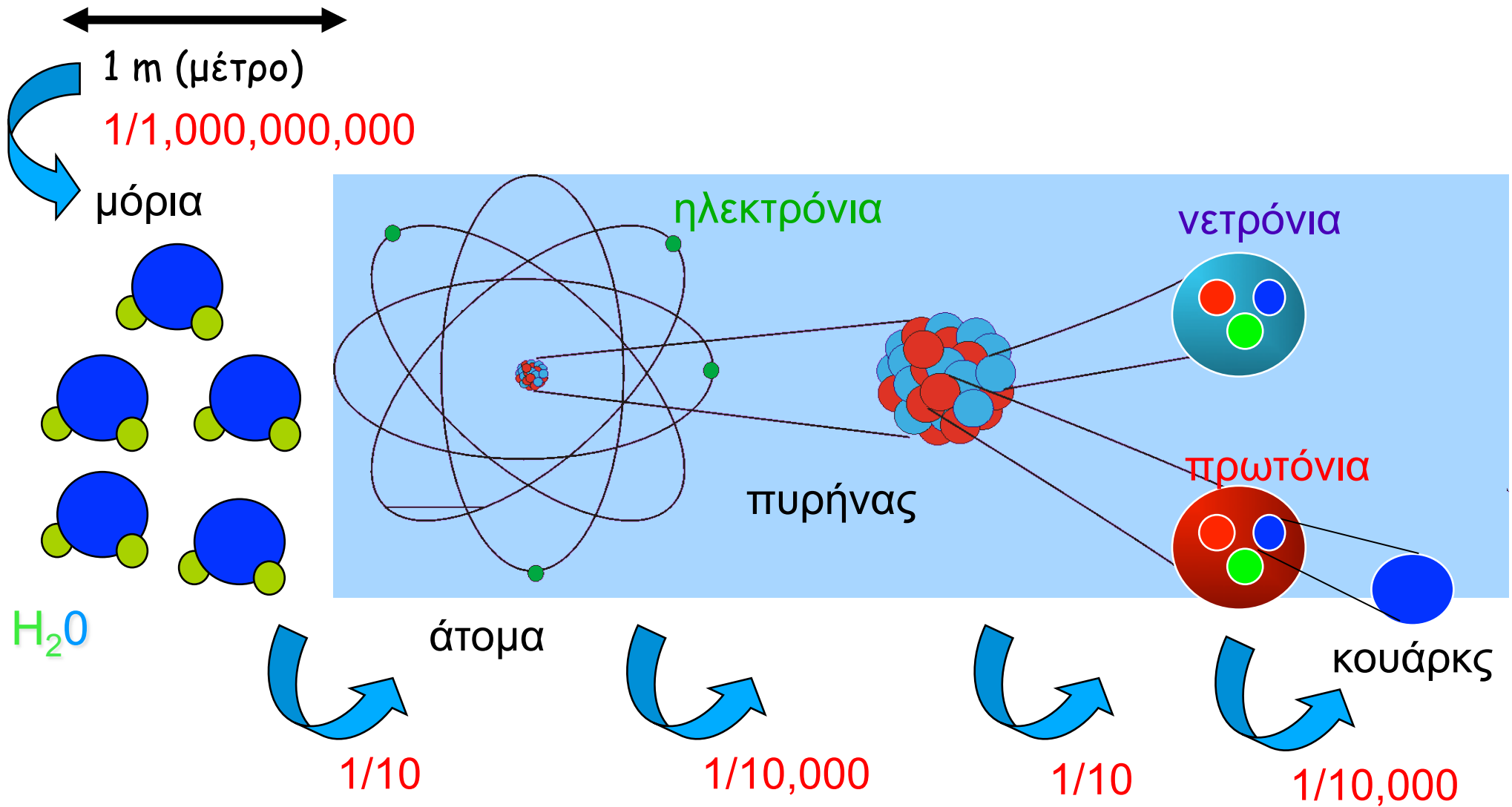
Οι δύο περιοχές στην Έρευνα της Φυσικής

Η Φυσική Στοιχειωδών
Σωματιδίων μελετά το
'απειροστό'

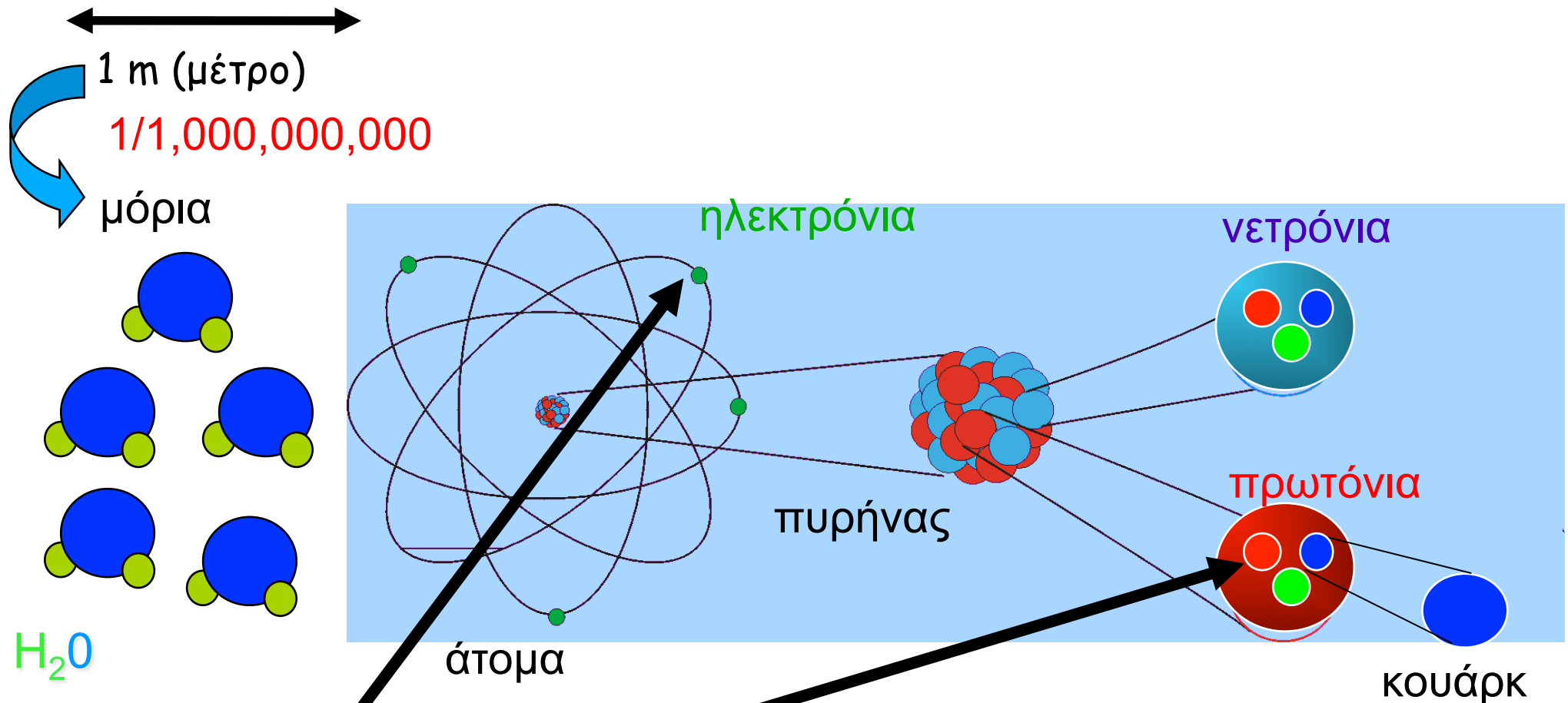
Η Αστροφυσική
μελετά το **'άπειρο'**



Μετά από ~100 χρόνια πειραμάτων σκέδασης



Μετά από ~100 χρόνια πειραμάτων σκέδασης



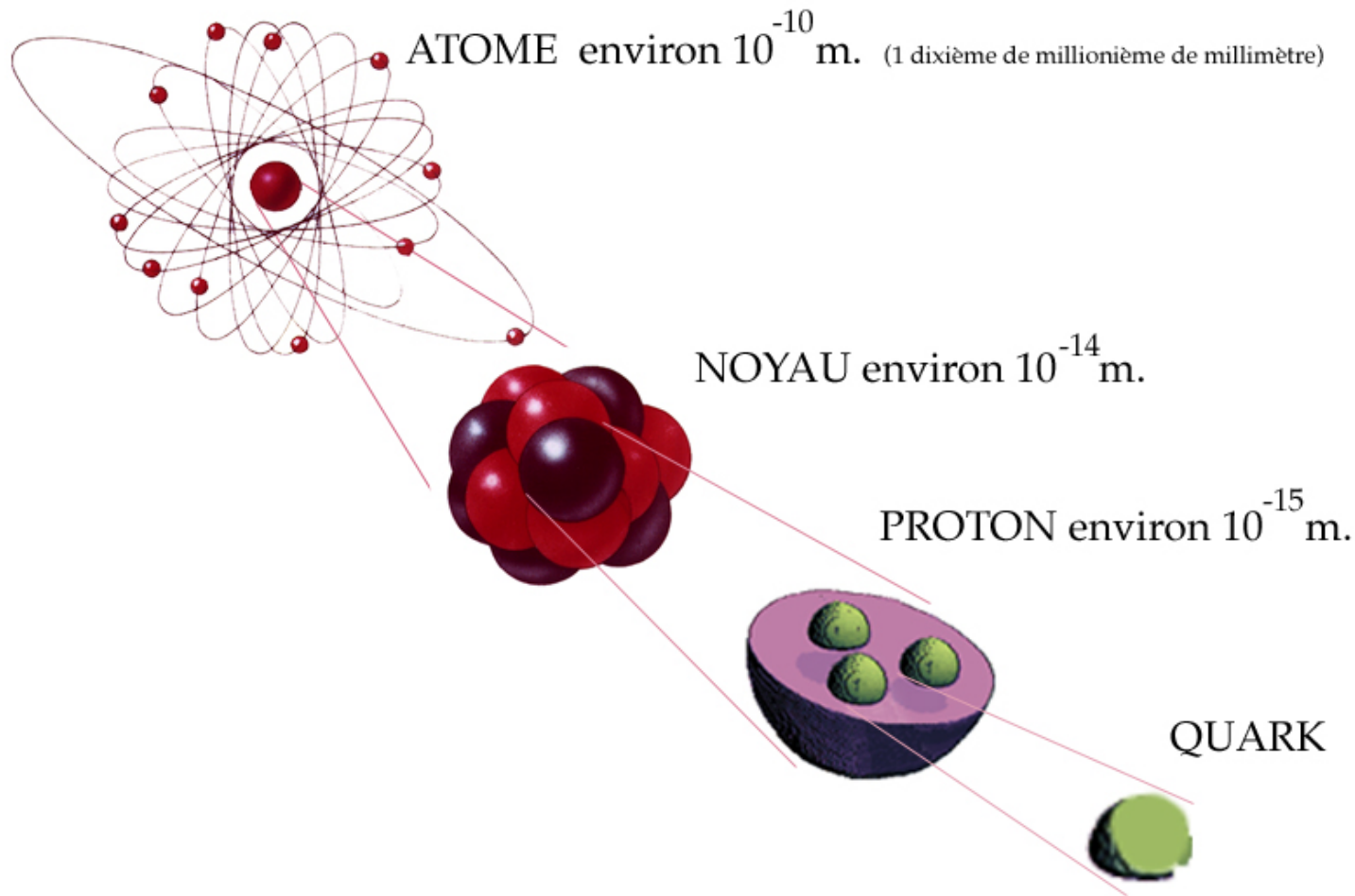
• Ηλεκτρόνια

+ 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



Il y a environ onze milliards de milliards d'atomes de fer dans un milligramme de fer !

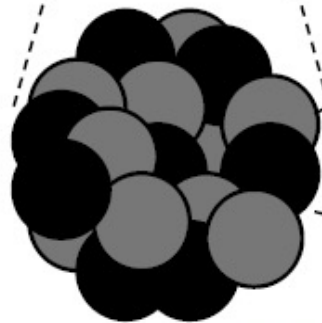
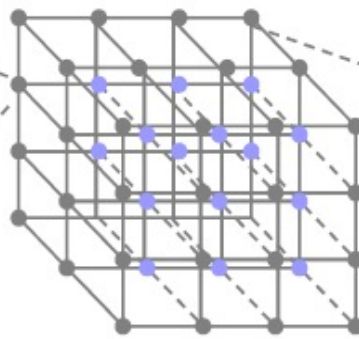
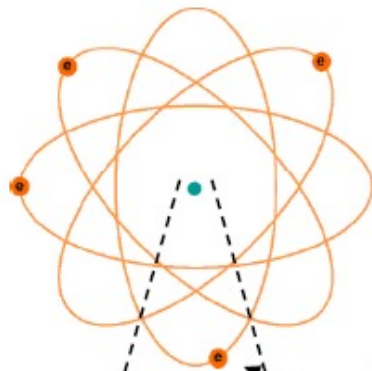
D.Bertola/CERN

Μετά από ~100 χρόνια πειραμάτων σκέδασης

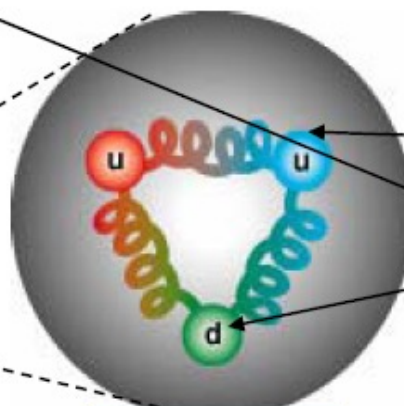
$\sim 10^{-10} \text{ m}$

Δομή της Ύλης

$\sim 1 \text{ m}$



$\sim 10^{-14} \text{ m}$

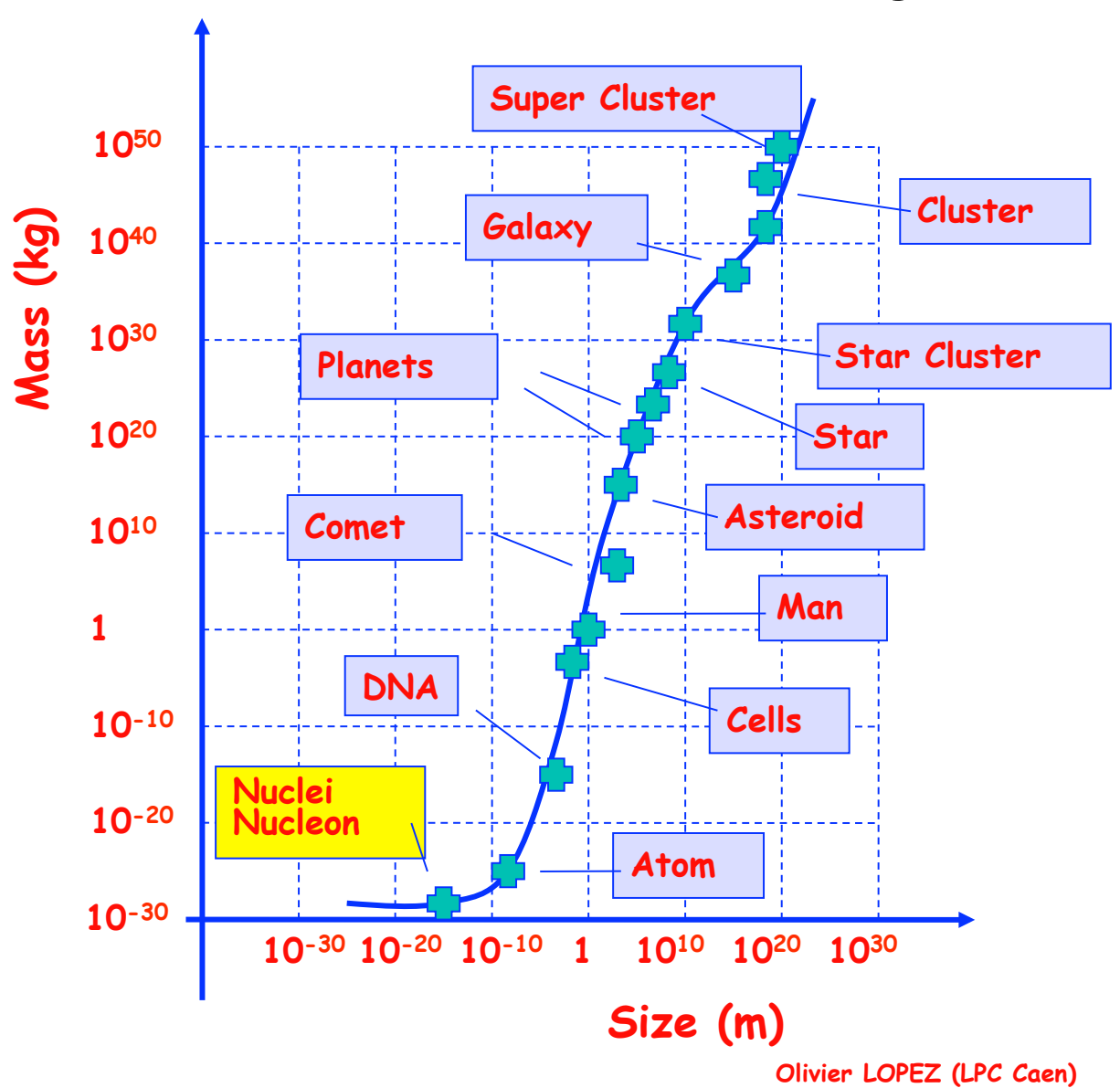


Πρωτόνιο

	Generation →		
Quarks	$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$
Leptons	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$

$< 10^{-18} \text{ m}$

Ένα σύμπαν από αντικείμενα με δραματικά διαφορετικές διαστάσεις



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

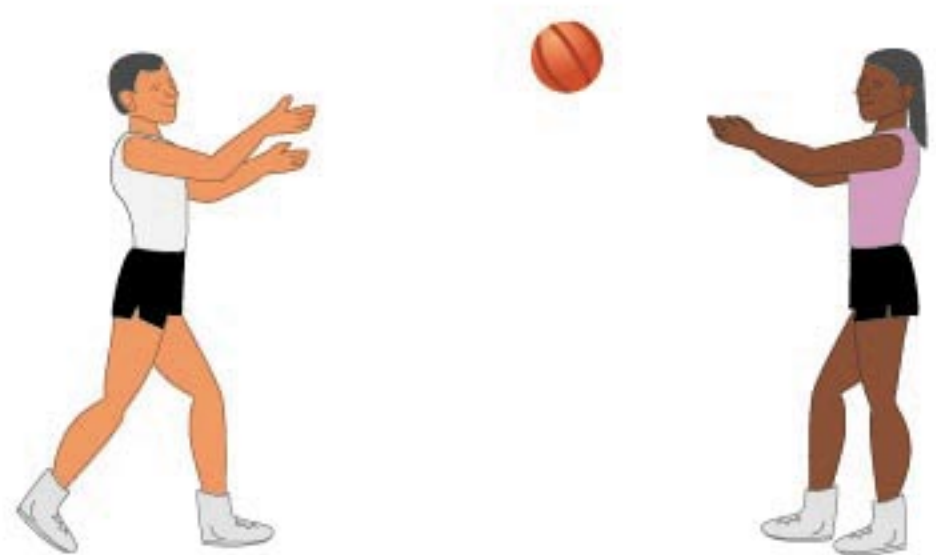
Υπάρχουν και δυνάμεις

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



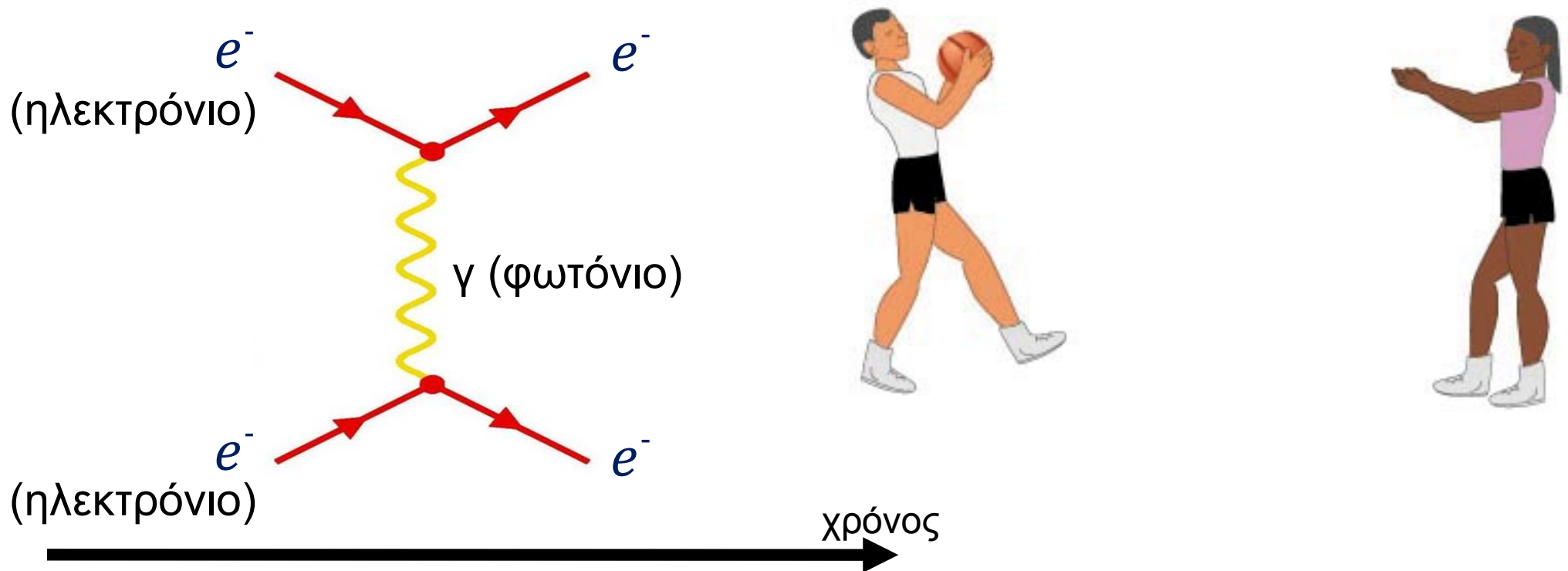
Υπάρχουν και δυνάμεις

- 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
 - ανταλλάσοντας ειδικά σωματίδια που είναι οι φορείς της δύναμης

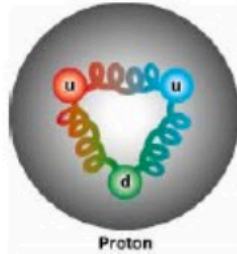


Το φωτόνιο (γ) είναι ο φορέας της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης

Υπάρχουν και δυνάμεις

Ισχυρές

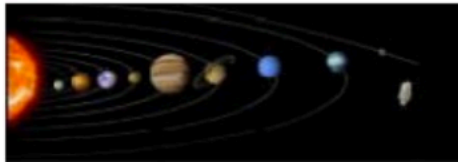
Μεταδίδονται με τα
γκλουόνια



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

Βαρυτικές

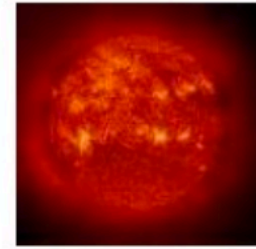
Μεταδίδονται με τα
γκραβιτόνια



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

Ασθενείς

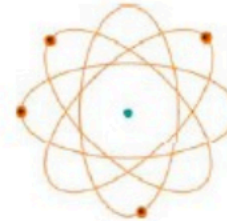
Μεταδίδονται με τα W
& Z^0



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

Ηλεκτρομαγνητικές

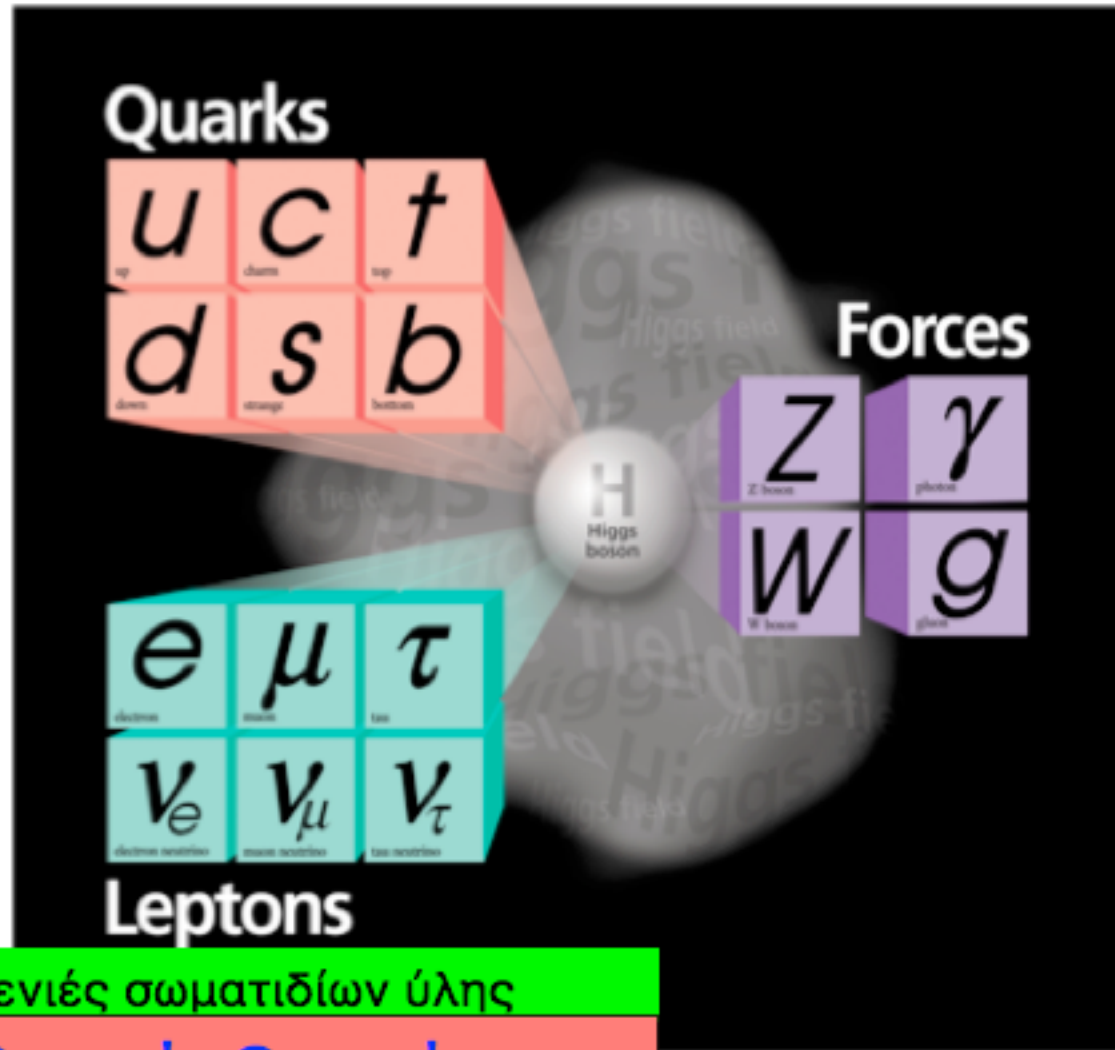
Μεταδίδονται με φωτόνια



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

Σωματίδια ύλης



Σωματίδια δυνάμεων

Φορείς των δυνάμεων

3 γενιές σωματιδίων ύλης

Οι τρεις Οικογένειες

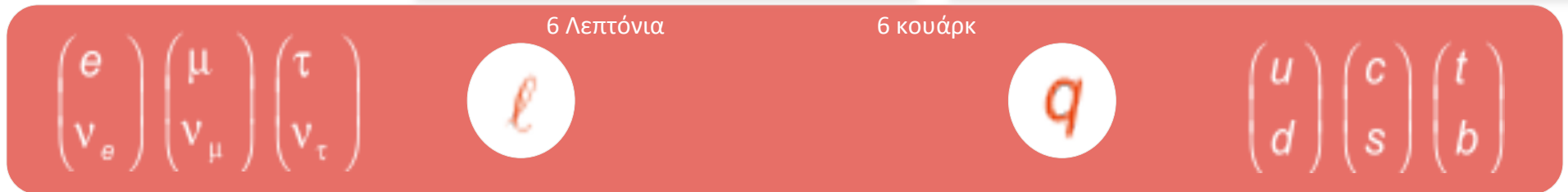
Όλα μαζί – η θεωρία μας για τα δομικά/βασικά συστατικά της ύλης και πώς αυτά αλληλεπιδρούν μεταξύ τους:

“Το Καθιερωμένο Πρότυπο”

Φερμιόνια

Σωματίδια ύλης

Κάθε κατηγορία σε 3 οικογένειες



Μποζόνια

Διαδότες/φορείς των δυνάμεων

3 δυνάμεις



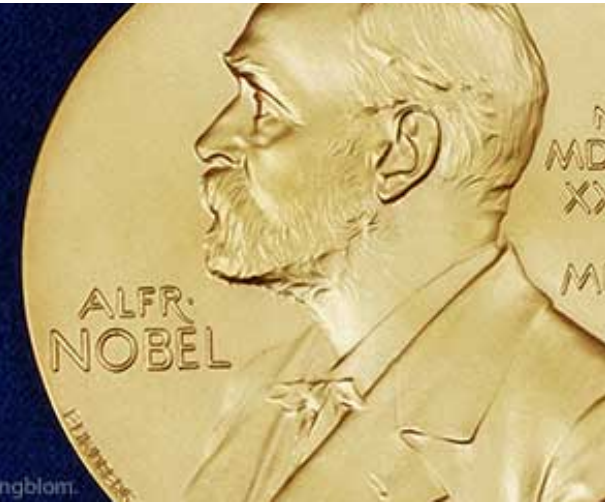
Μποζόνιο Higgs (ΒΕΗ)



“Σπάει” την Ηλεκτρασθενή Συμμετρία
Δίνει μάζα στα **στοιχειώδη σωματίδια**

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert
Peter W. Higgs



© The Nobel Foundation, Photo: Lovisa Engblom.

8 Οκτωβρίου 2013

Η Βασιλική Σουηδική Ακαδημία Επιστημών αποφάσισε να απονείμει το βραβείο Nobel Φυσικής του 2013 στους

François Englert and Peter Higgs

“για τη θεωρητική ανακάλυψη ενός μηχανισμού που συνεισφέρει στην κατανόηση της μάζας των υποατομικών σωματιδίων, και ο οποίος μηχανισμός επιβεβαιώθηκε πρόσφατα μέσω της ανακάλυψης του προβλεπόμενου θεμελιώδους σωματιδίου από τα πειράματα ATLAS και CMS στον Μεγάλο Συγκρουστήρα Αδρονίων του CERN.”

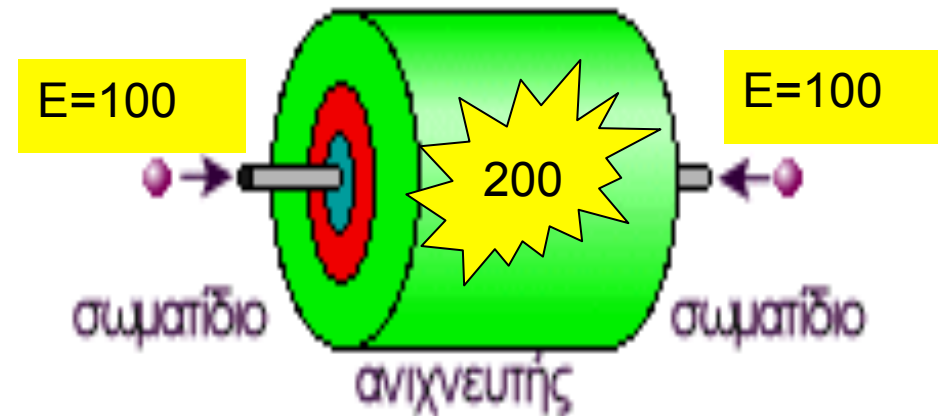
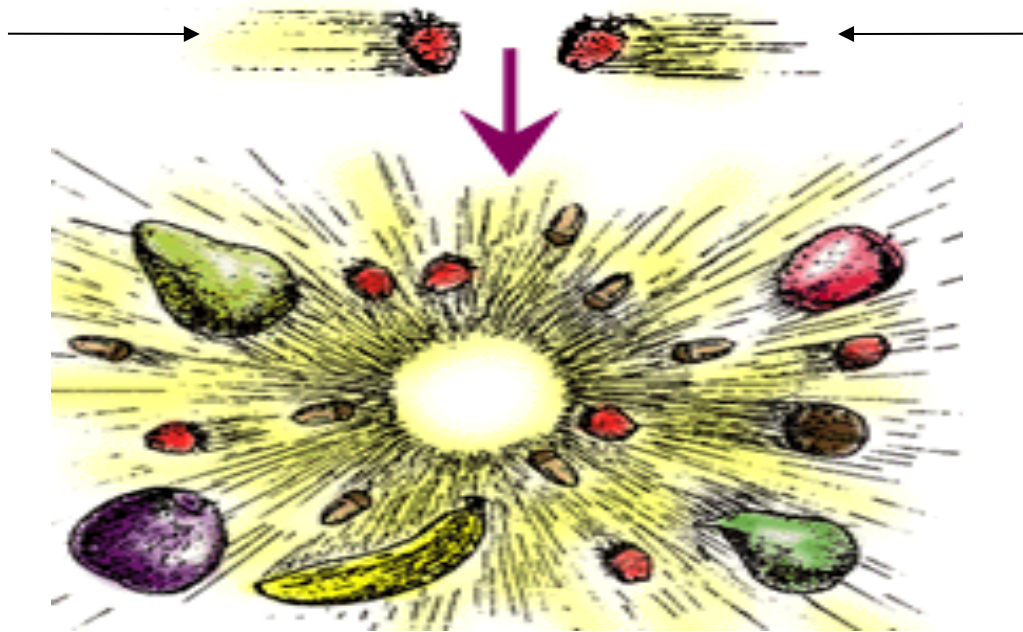


Peter
Higgs

Francois
Englert

Η μέθοδος: 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

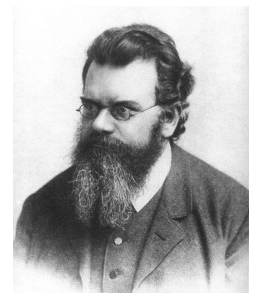
- Να ανακαλύπτουμε βαρύτερα σωματίδια
 - Η μάζα είναι μιά μορφή ενέργειας
- Να μελετάμε συνθήκες σαν του πρώιμου σύμπαντος
 - Πολύ Ενέργεια σε μικρό χώρο
→ μεγάλες θερμοκρασίες

$$E = mc^2$$



Einstein (1905)

$$E = k T$$

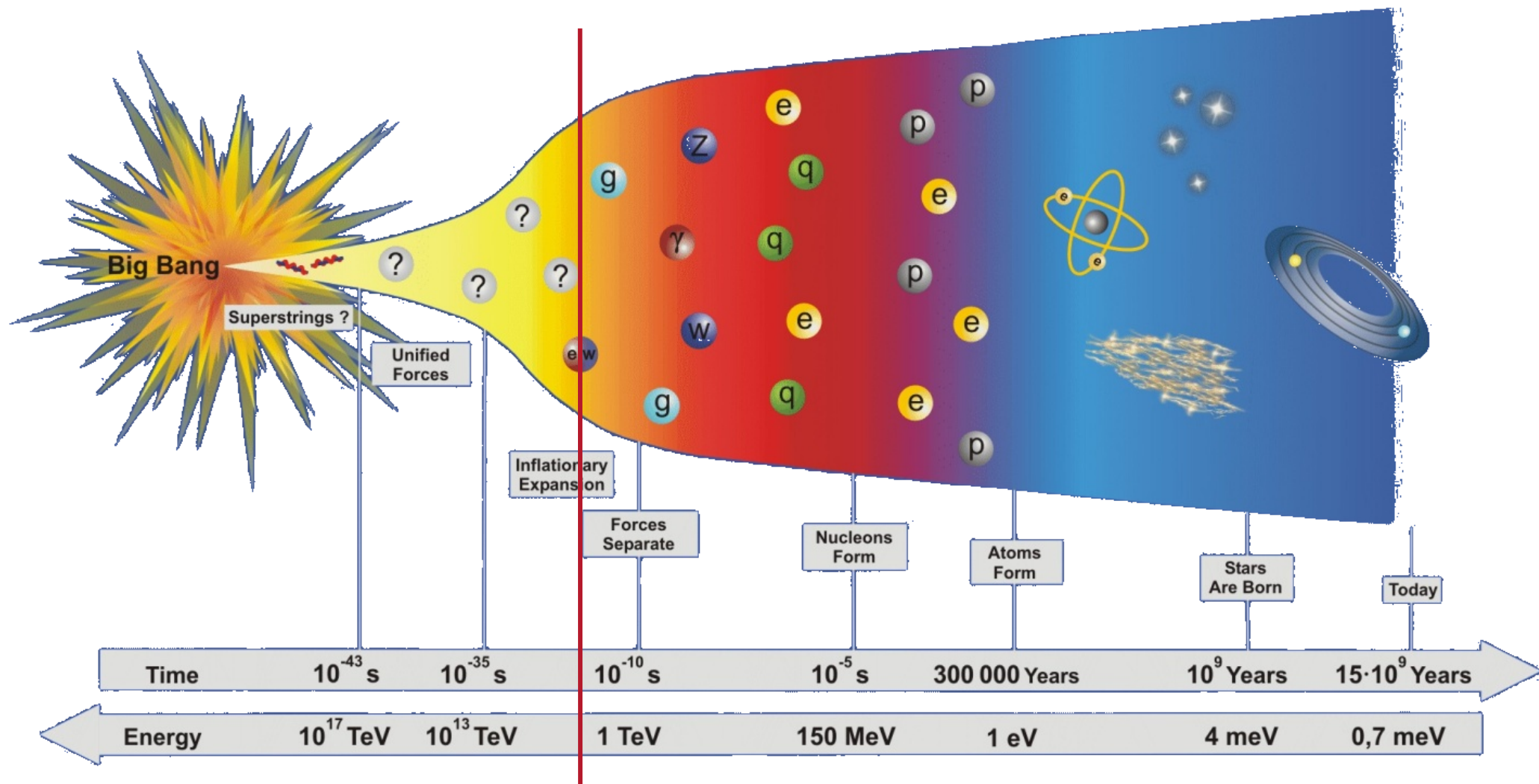


Boltzman (~1900)

Μελετάμε φαινόμενα και σωματίδια που

δεν είναι πιά “ορατά” ή υπαρκτά στον σύμπαν

Ταξίδι σε συνθήκες πρώιμου σύμπαντος

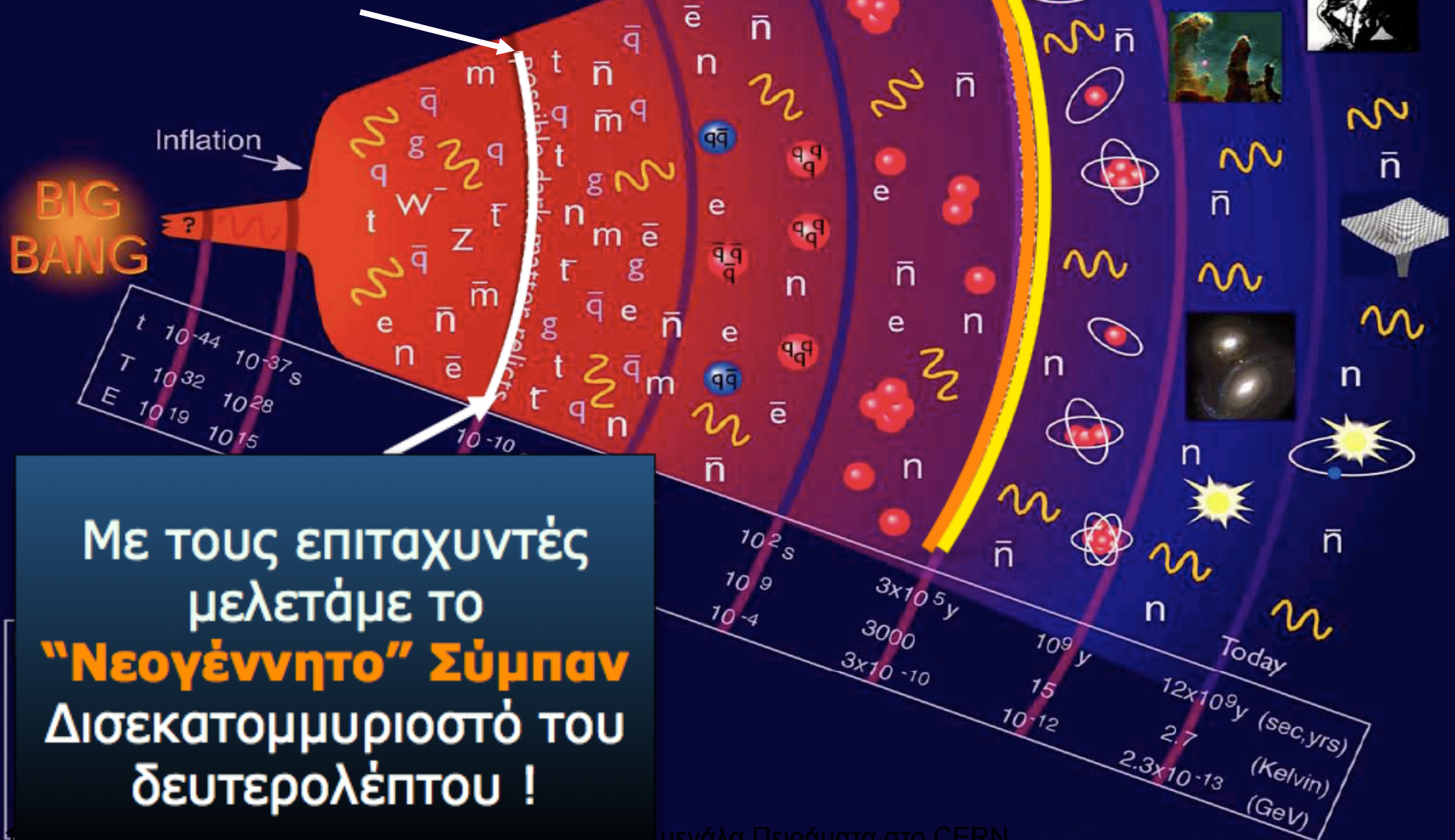


Μεγάλος Επιταχυντής Αδρονίων (LHC) στο CERN:
συγκρούσεις πρωτονίων σε ενέργεια 13-14 TeV $\sim 10^{-14}$ sec

(Σημείωση: 1 TeV = 1000 GeV = ενέργεια όση η μάζα 1000 πρωτονίων)

Η Ιστορία του Σύμπαντος

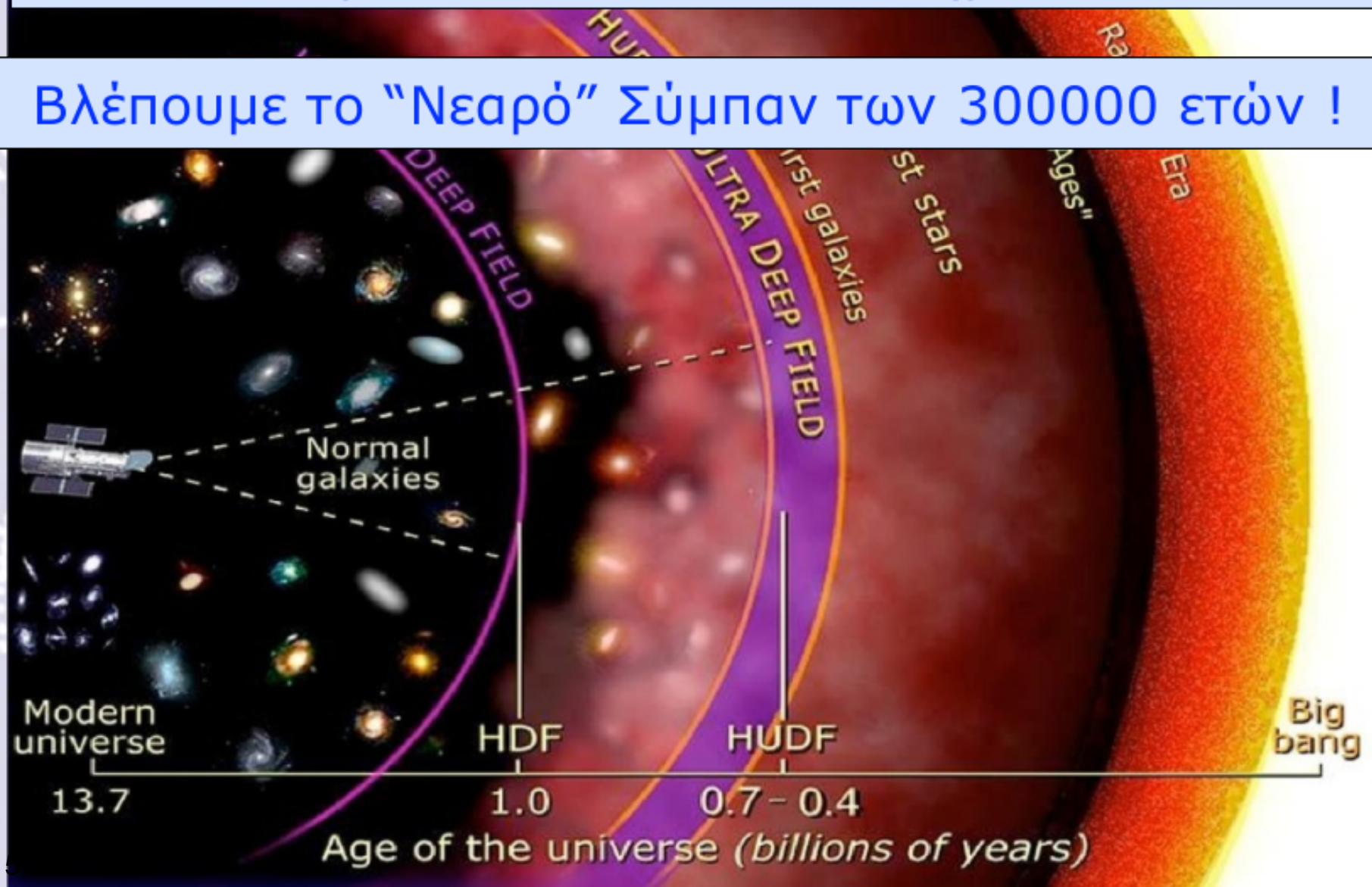
Το LHC αντιστοιχεί
στις συνθήκες εδώ



Το σύμπαν >300k ετών το παρατηρούμε με τηλεσκόπια

Την Ιστορία του Σύμπαντος την "Διαβάζουμε" με τα Τηλεσκόπια και τα Διαστημόπλοια

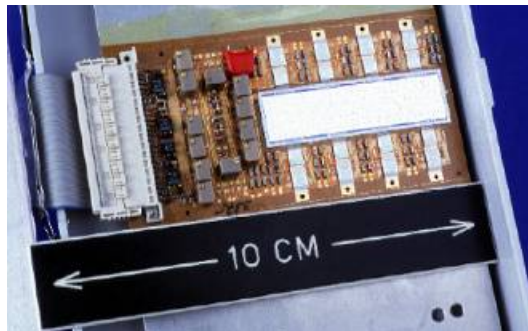
Βλέπουμε το "Νεαρό" Σύμπαν των 300000 ετών !



Βασική έρευνα και εφαρμογές

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

Για να κάνουμε βασική έρευνα χρησιμοποιούμε τεχνολογίες αιχμής δίνοντας έτσι ώθηση στην τεχνολογία με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται τεχνολογίες που βελτιώνουν τη ζωή μας

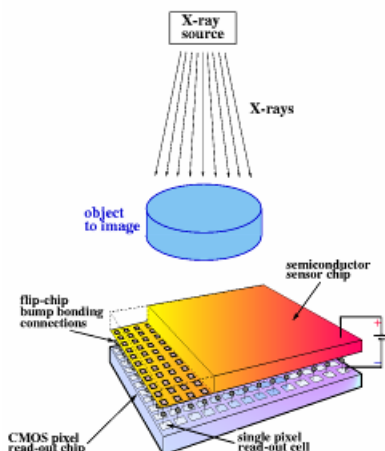


Silicon detector for a Compton camera in nuclear medical imaging

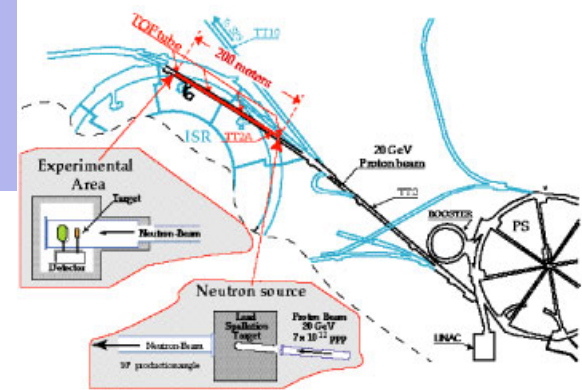
π.χ., διαγνωστικές μέθοδοι στις επιστήμες υγείας



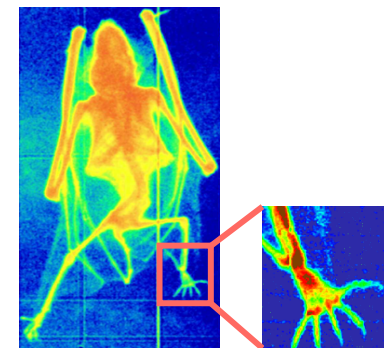
Thin films by sputtering or evaporation



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 και Βιωσιμότητα

...Βελτιώνοντάς το

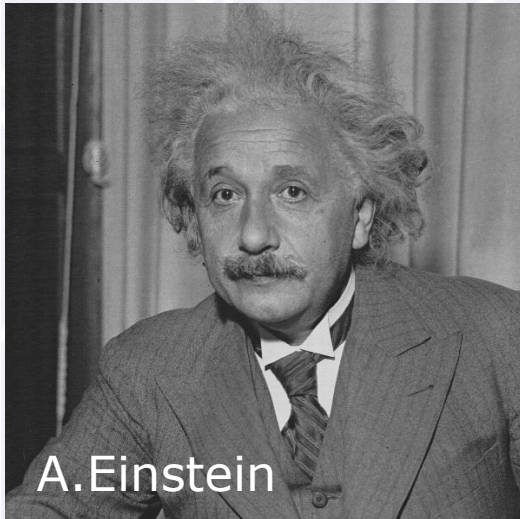


ΔΕΝ ανακαλύπτεις !
ΔΕΝ καινοτομείς !



Όταν ανακαλύφτηκε το ηλεκτρόνιο κανείς δεν φαντάστηκε
ότι σήμερα δεν θα μπορούσαμε λεπτό χωρίς αυτό !

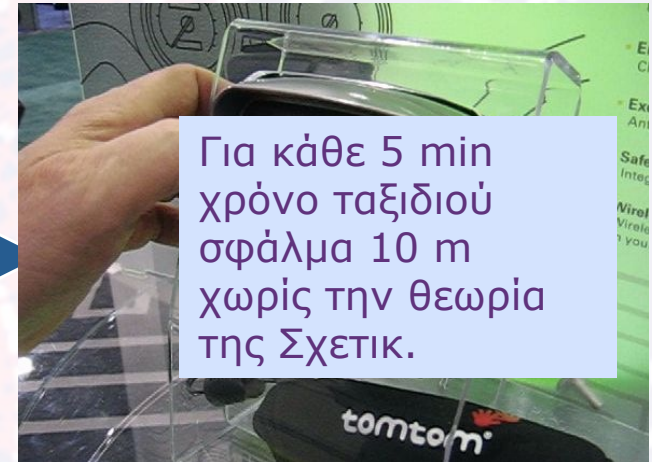
Η Βασική Έρευνα κινητήρια δύναμη στην καινοτομία !



A.Einstein

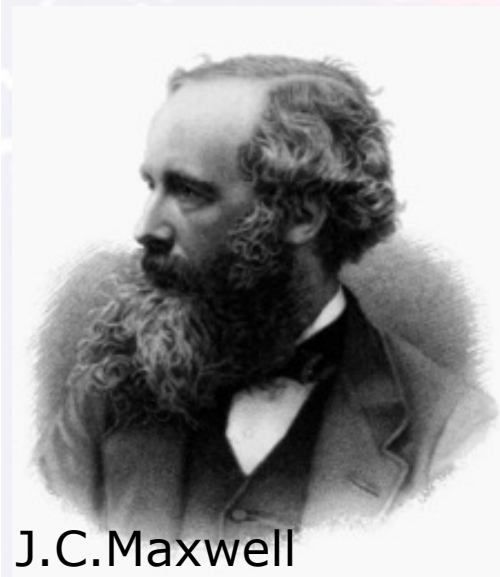
Θεωρία

100%
Βασική
Έρευνα



Για κάθε 5 min
χρόνο ταξιδιού
σφάλμα 10 m
χωρίς την θεωρία
της Σχετικ.

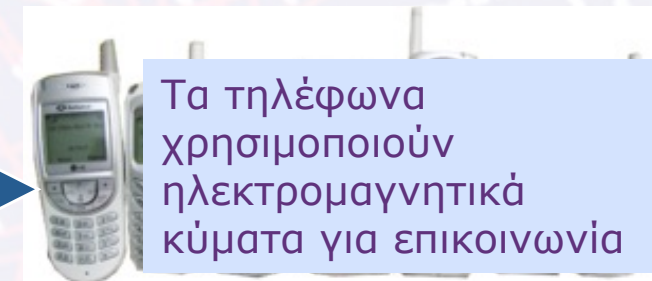
GPS



J.C.Maxwell

Ηλεκτρομαγνητικά

100%
Βασική
Έρευνα



Τα τηλέφωνα
χρησιμοποιούν
ηλεκτρομαγνητικά
κύματα για επικοινωνία

κινητά τηλ.

X

Επιταχυντές: αναπτύχθηκαν για την Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων

Πάνω από ~30000
επιταχυντές στον κόσμο
~17000 χρησιμοποιούνται
στην Ιατρική



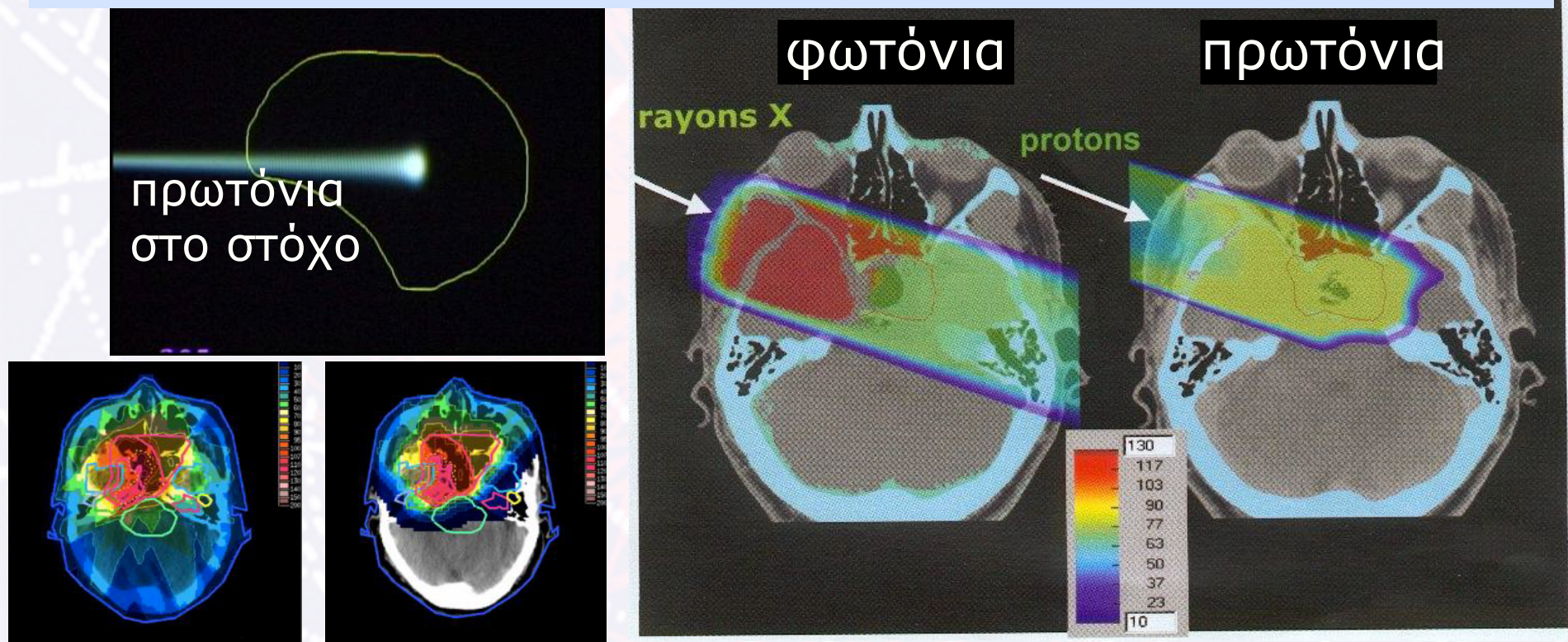
Σήμερα, η θεραπεία του καρκίνου με **αδρόνια**
είναι η πιο αποτελεσματική

X

Η θεραπεία του καρκίνου με **αδρόνια**

Συνεργασία Φυσικής, Πληροφορικής, Βιολογίας και Ιατρικής

Με τους επιταχυντές αδρονίων στοχεύουμε ακριβώς τον όγκο χωρίς να καταστρέφουμε υγιείς ιστούς (όπως με γ)



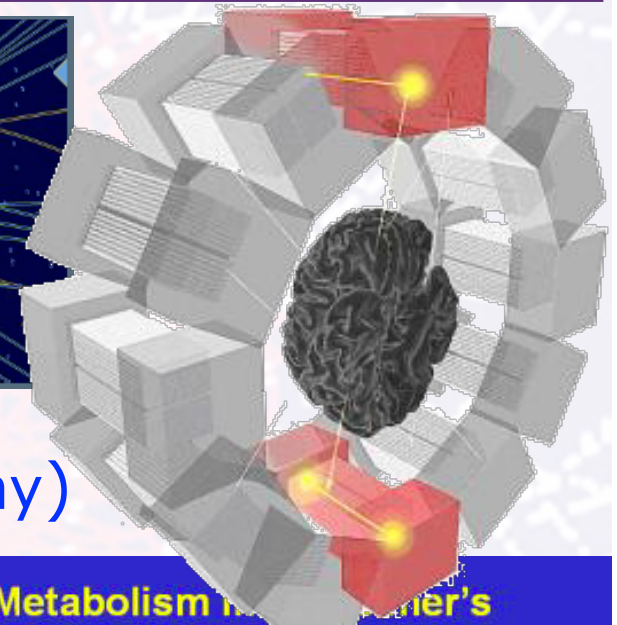
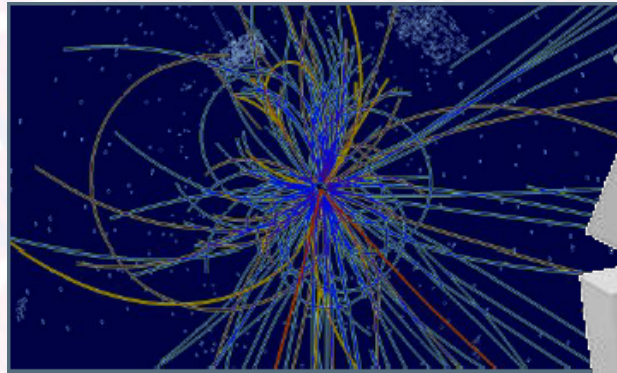
>90000 ασθενείς σε 40 εγκαταστάσεις στον κόσμο
>20000 ασθενείς σε 9 εγκαταστάσεις στην Ευρώπη

X

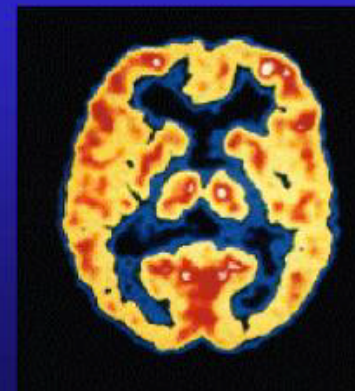
ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ: αναπτύχθηκαν για την Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων

Ανιχνευτές

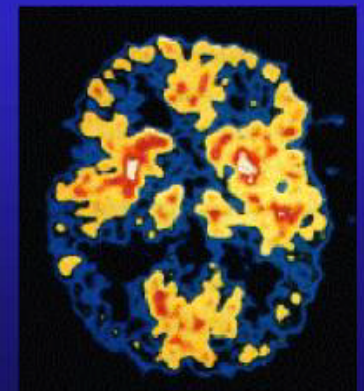
Χρησιμοποιούνται
στην απεικόνιση στην
διαγνωστική Ιατρική
(PET -Positron Emission Tomography
ClearPEM: Positron Emission Mammography)



Brain Metabolism in Alzheimer's
Disease: PET Scan



Normal Brain



Alzheimer's Disease

Η βασική έρευνα στην Φυσική→ αλλαγή στη θεώρηση του κόσμου

- Κάνουμε Φυσική και βασική έρευνα για να καταλάβουμε αυτόν “τον κόσμο τον μικρό, τον μέγα” που ζούμε
- Η παρατήρηση του κόσμου με διάφορα μέσα, αλλάζει τον τρόπο που σκεπτόμαστε. Θυμηθείτε:
 - Την κατάρριψη του γεωκεντρικού μοντέλου του κόσμου
 - Τη σχετικότητα του χρόνου
 - Την αντικατάσταση της βεβαιότητας με την πιθανότητα



Στα εργαστήρια φέτος θα δείτε φανταστικά πράγματα

λ Εργαστήριο Ατομικής , 5ου εξαμήνου:

- Πώς μπορείς “να παράγεις” ηλεκτρόνια,
- πώς τα “βλέπεις” = “ανιχνεύεις”,
- Πώς τα χρησιμοποιείς για να “δείς” χαρακτηριστικά της ύλης
- Πώς ξέρουμε ότι τα άτομα έχουν καθορισμένες ενεργειακές στάθμες,
- Μέτρηση της σταθεράς του Planck, κλπ

λ Εργαστήριο Πυρηνικής, 6ου εξαμήνου:

- Πώς ανιχνεύεις ακτινοβολία από τους πυρήνες και τι μαθαίνεις απ’ αυτήν για τους πυρήνες;
 - λ Απαρίθμηση, ένα-ένα σωματίο που βγαίνει
 - λ Μέτρηση της ενέργειας ενός ηλεκτρονίου ή φωτονίου
 - λ Χαρακτηριστικά των ανιχνευτικών διατάξεων, κλπ

Σχετικιστική Κινηματική

Σχετικιστική κινήματική:

$E = m c^2$ = η ενέργεια που έχω επειδή απλά και μόνο έχω μάζα m
 c = ταχύτητα του φωτός

Ενέργεια
μάζα



Η μάζα είναι μια μορφή ενέργειας

γενικά, με κινητική ενέργεια K , έχουμε: $E = K + m c^2$

$$E = m \gamma c^2, \text{ όπου } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}, \text{ και } \beta = v/c, \text{ με } v = \text{ταχύτητα σωματιδίου}$$

$$p = m \gamma v = m \gamma \beta c, \text{ όπου } p = \text{ορμή}$$

$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2 \quad \rightarrow \quad E [\text{MeV}], p [\text{MeV}/c], m [\text{MeV}/c^2]$$

Σημείωση: με $c = 1$, γράφουμε: $E^2 = p^2 + m^2$, κλπ.

$$\text{Χρήσιμα: } \beta = \frac{pc}{E} \text{ και } \beta\gamma = \frac{p}{mc}$$

Μονάδες

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \equiv \text{μονάδα ταχύτητας} \equiv 1$$

μονάδα ενέργειας $\equiv eV = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Cb} * V = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Joule}$
Συνήθως χρησιμοποιούμε το MeV ($= 10^9 \text{ eV}$)

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

$$\hbar c = 197 \text{ MeV fm}, \text{ όπου } \hbar = \frac{h}{2\pi} \equiv \text{μονάδα δράσης (ενέργειας} \times \text{χρόνου)} \equiv 1$$

$$\alpha = \frac{e^2}{4 \pi \epsilon_0 \hbar c} [mks] = \frac{e^2}{\hbar c} [cgs] = \frac{1}{137}$$

α = η σταθερά λεπής υφής = 1/137

Θα χρησιμοποιούμε παντού:
eV για ενέργεια (ή MeV στην πυρηνική),
 $1/4\pi\epsilon_0 = 1$ σε όλους τους τύπους,
και θα βάζουμε

$$e^2 = \alpha \hbar c, \text{ όπου } \alpha = 1/137$$

$$\hbar c = 197 \text{ MeV fm}$$

Μετράμε:

Μάζα: MeV/c² (αφού $E = mc^2$)

Ορμή: MeV/c (αφού $p = m\gamma\beta c$)

Χρόνο σε: 1/MeV (αφού η μονάδα δράσης = Ενέργεια * Χρόνος = 1)

Μήκος σε: μονάδες χρόνου = 1/MeV (αφού η μονάδα ταχύτητας=1)

1 amu = 1/12 μάζας ουδέτρου ατόμου ¹²C = 931.5 MeV/c²

Μάζα ηλεκτρονίου = 0.511 MeV/c²

Μάζα πρωτονίου = 938.3 MeV/c², Μάζα νετρονίου = 939.6 MeV/c²