

Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική & τη Φυσική των Στοιχειωδών Σωματιδίων (Φυσική Υψηλών Ενεργειών)

Πυρηνική Φυσική

(Κ. Παπαδόπουλος)

Στοιχειώδη σωματίδια

(Γ. Τσιπολίτης)

εργαστήρια

(Μ. Κόκκορης)

<http://www.physics.ntua.gr/~yorgos/hep/index.php>

Βιβλία

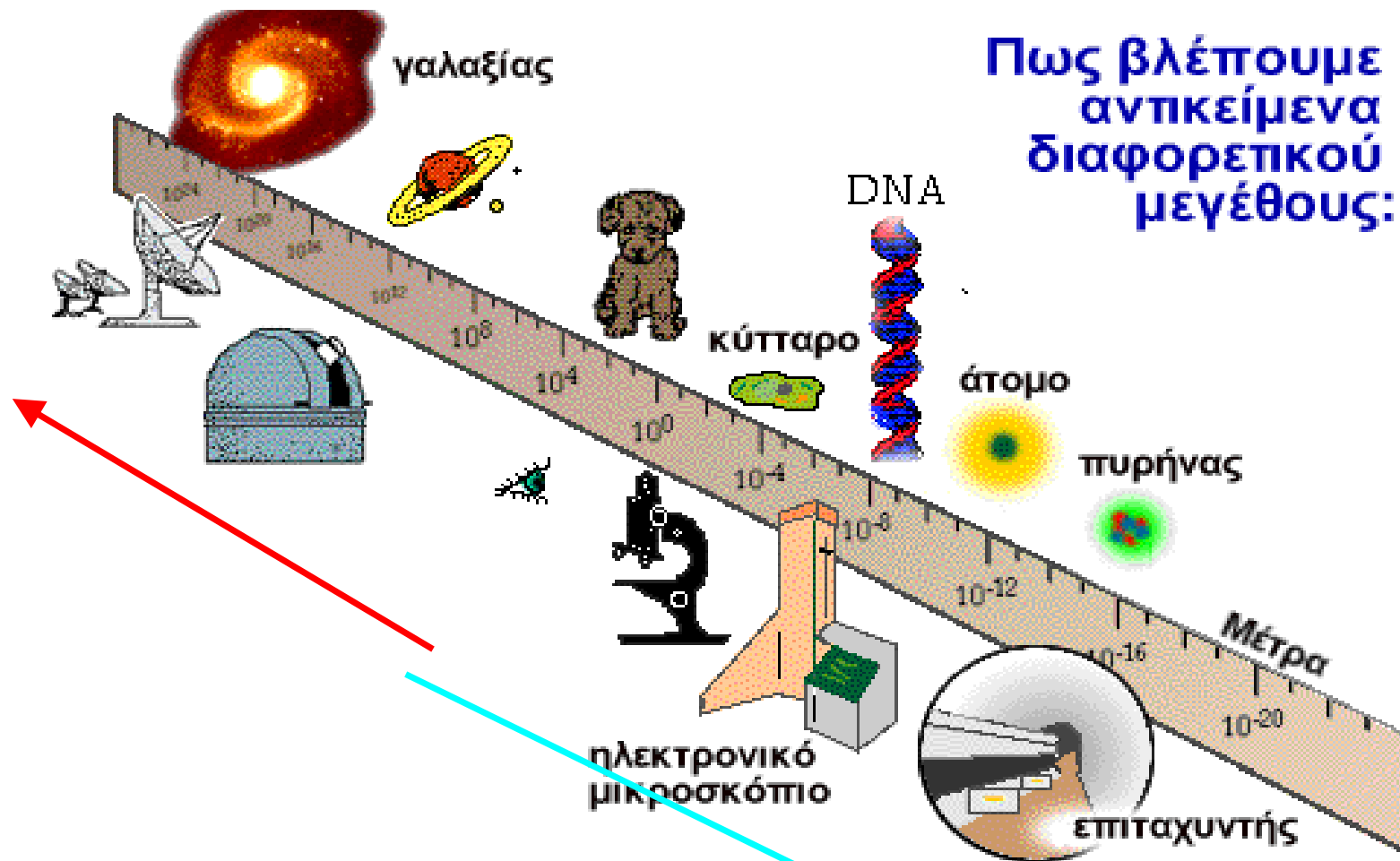
- *"Εισαγωγή στα Στοιχειώδη Σωματίια & την Κοσμολογία"*,
- Ι.Δ.Βέργαδος & Η.Τριανταφυλλόπουλος
- (εκδ. Συμείων 2000), Ηρώων Πολυτεχνείου 74, Ζωγράφου. Η διανομή γίνεται 10:00 - 14:00 h.

- Επιπλέον: Βιβλίο ασκήσεων που μπορείτε να το πάρετε από το γραφείο μου.

Βιβλιογραφία

- *Στοιχειώδη Σωματίδια*, Αργύρης Νικολαΐδης (1992)
- "Εισαγωγή στη Φυσική Υψηλών Ενέργειών" Donald H. Perkins. 3η έκδοση μετάφραση στα Ελληνικά
- *Introduction to Elementary Particles*, David Griffiths (Wiley, 1987).
- *Introduction to High Energy Physics*, 4th Ed. by Donald Perkins (Cambridge, 2000)
- *The Experimental Foundations of Particle Physics*, Robert Cahn and Gerson Goldhaber (Cambridge, 1989).
- *Quarks and Leptons: An Introductory Course in Modern Particle Physics*, Francis Halzen and Alan Martin (Wiley, 1984).
- *Concepts of particle physics*, Kurt Gottfried and Victor F. Weisskopf (Oxford, 1984)
- *Particle Physics*, B.R.Martin and G.Shaw (Wiley, 1988).
- *Subatomic Physics*, Hans Frauenfelder and Ernest Henley (Prentice-Hall 1974)
- *Elementary Particle Physics: An introduction*, David Cheng and Gerard O'Neil (Addison-Wesley 1979)
- *Lepton & Quarks*, L. Okun (North Holland 1982)
- A. Das and T.Ferbel, *Introduction to Nuclear and Particle Physics*, 2nd Edition, World Scientific Publishing Company.

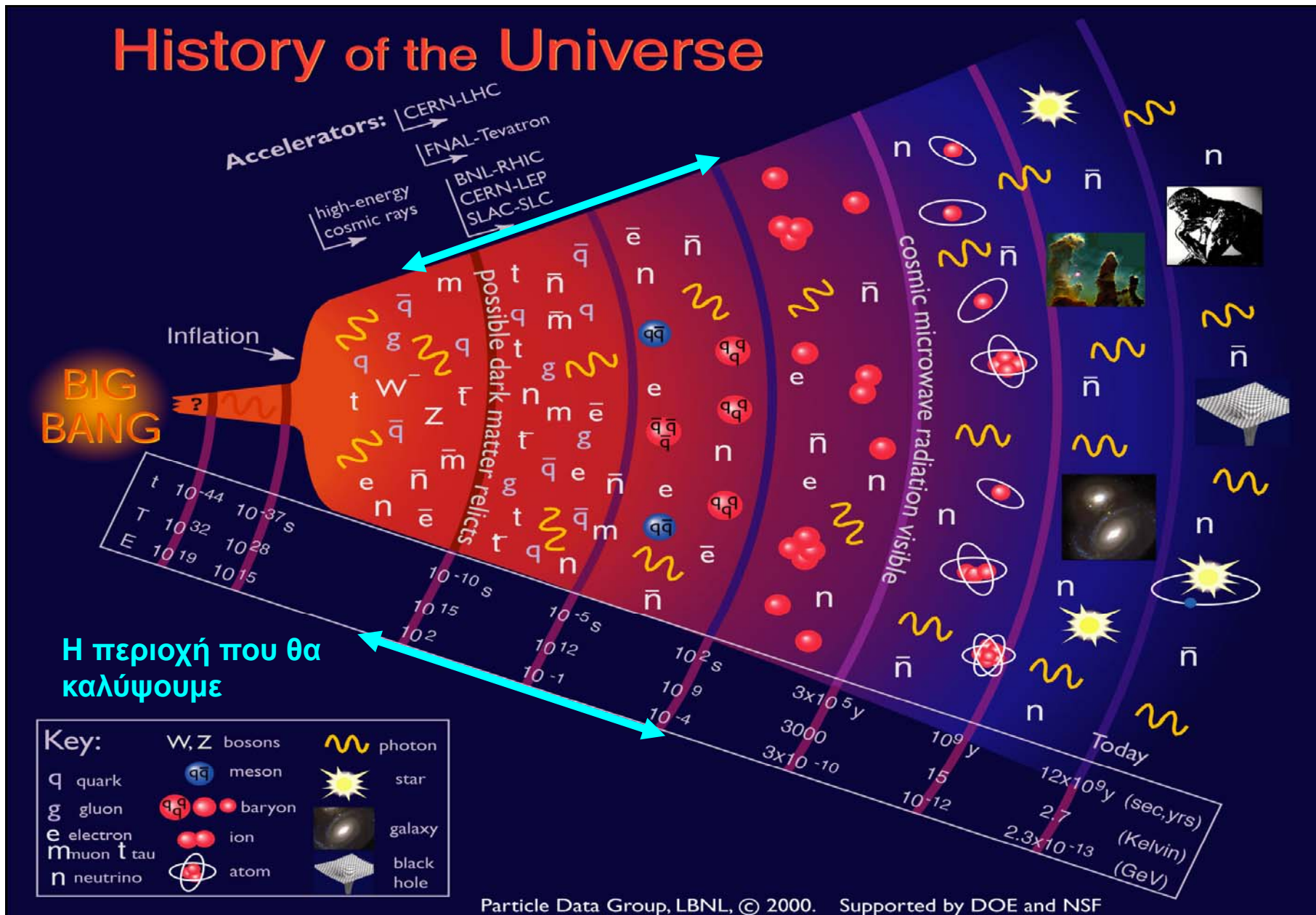
Δυνάμεις του 10



Γ. Τσιπολίτης

Δυνάμεις του 10

History of the Universe



Particle Data Group, LBNL, © 2000. Supported by DOE and NSF

Ιστορία ΦΥΕ

- ~50% Nobel σχετικά με ΦΥΕ
- **1921** A. Einstein - φωτοηλεκτρικό φαινόμενο μαζί με M. Planck (nobel 1918) & Compton (nobel 1927)
- **1922** Neils Bohr - δομή του ατόμου, κβάντωση ενεργειακών επιπέδων μαζί με τους Franck & Hertz (nobel 1925) πείραμα
- **1929** Louis-Victor de Broglie - κυματική ιδιότητα των ηλεκτρονίων. Πείραμα Davisson & Thomson (nobel 1937)
- **1932** Werner Heisenberg **1933** Erwin Schroedinger & Paul Dirac : Κβαντική Θεωρία
- **1936** Carl Anderson - ανακάλυψη ποζιτρονίου. Προβλέφθηκε από την εξίσωση Dirac. Ανακάλυψη αντιπρωτονίου Segrè & Chamberlain (nobel 1959)
- **1935** James Chadwick - ανακάλυψη νετρονίου
- **1939** Ernest Lawrence - Κύκλοτρο



Ιστορία ΦΥΕ

- **1945** Wolfgang Pauli - απαγορευτική αρχή. Ο Pauli προέβλεψε και την ύπαρξη του νετρίνο.
- **1948** P.M.S. Blackett ανάπτυξη του θαλάμου νεφών. Επίσης Donald Glaser ανάπτυξη θαλάμου φυσαλίδων (nobel 1960) & Georges Charpak ανάπτυξη των πολυσυρματικών αναλογικών θαλάμων (nobel 1992)
- **1949** Hideki Yukawa - μεσόνια. Το π-μεσόνιο του Yukawa ανακαλύφθηκε από τον Powell (nobel 1950)
- **1955** Willis Lamb & Polykarp Kusch - Μέτρηση της λεπτής υφής του υδρογόνου και της μαγνητικής ροπής του ηλεκτρονίου
- **1957** Chen Ning Yang & Tsung-Dao Lee - παραβίαση της parity σε ασθενείς αλληλεπιδράσεις.
- **1961** Robert Hofstadter - σκέδαση ηλεκτρονίων από πυρήνες. Gell-Mann - έδειξε ότι η υφή των αδρονίων είναι υπεύθυνη για το μεγάλο αριθμό μεσονίων και βαρυονίων (nobel 1969). Δομή του νουκλεονίου από "partons" - Friedman, Kendall & Taylor (nobel 1990).
- **1965** Feynman, Schwinger & Tomonaga - QED



Ιστορία ΦΥΕ

- **1976** Burton Richter & Sam Ting - ανακάλυψη του J/ψ
- **1980** James Cronin & Val Fitch - Παραβίαση της CP στα K
- **1979** Glashow Salam & Weinberg - Ενοποίηση ηλεκτρασθενών. ανακάλυψη των Z^0 και $W^{+/-}$ - Rubbia & van der Meer (nobel 1984). Ηλεκτρασθενής θεωρία - QFT 't Hooft & Veltman (nobel 1999).
- **1982** Ken Wilson - Critical phenomena. Σύνδεση μεταξύ θεωριών πεδίου.
- **1995** Fred Reines - ανακάλυψη του νετρίνο. Ανίχνευση του μ-νετρίνο - Lederman, Schwartz & Steinberger (nobel 1988). Ταλαντώσεις νετρίνο - Ray Davis & Masatoshi Koshiha (nobel 2002).
- **2004** David Gross, David Politzer & Frank Wilczek - QCD



Τεχνολογίες "spinoff"

- World Wide Web
- Ιατρική απεικόνιση (MRI, CAT, PET)
- Μεγάλης αποδοτικότητας υπεραγώγιμοι μαγνήτες
- συστήματα υψηλού κενού
- cryogenics
- Υπολογιστές μεγάλων απαιτήσεων
- γρήγορα ηλεκτρονικά

Τι είναι η Φυσική των Στοιχειωδών Σωματιδίων;

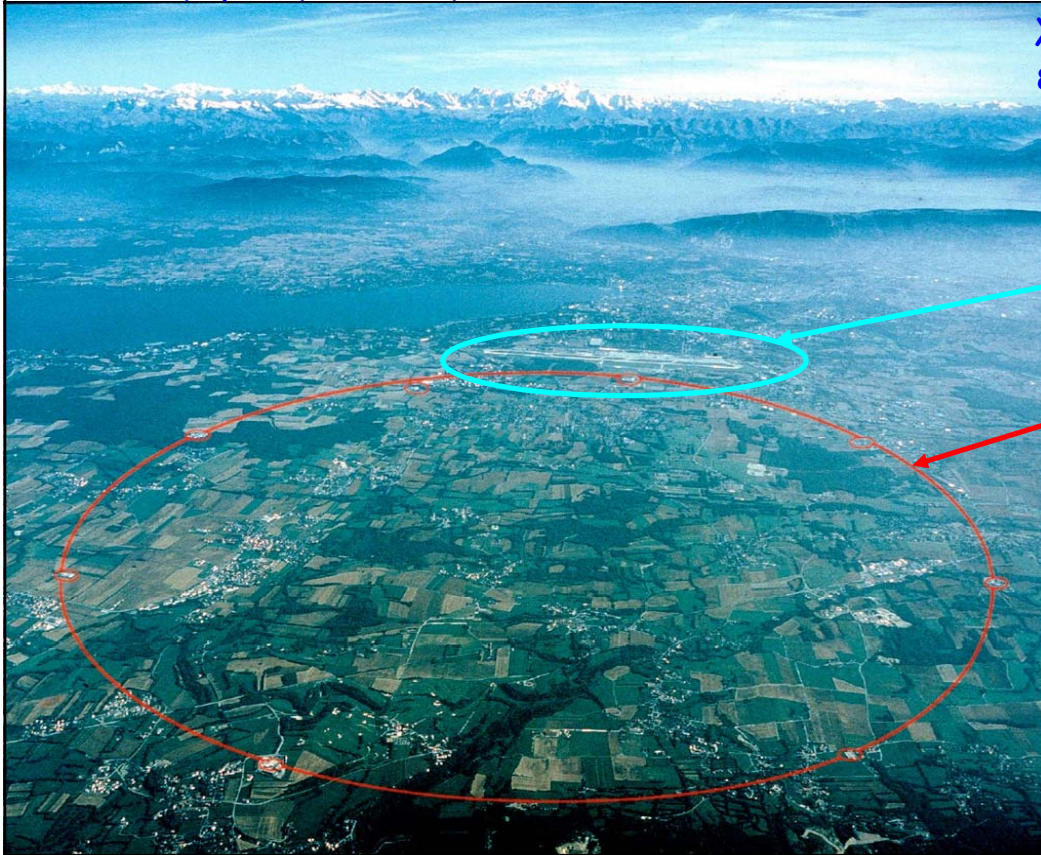
Η Φυσική των Στοιχειωδών Σωματιδίων προσπαθεί να περιγράψει με ένα κοινό τρόπο τα σωματίδια και τις αλληλεπιδράσεις στους. Προσπαθεί να καθορίσει ποια σωματίδια είναι και ποιες αλληλεπιδράσεις είναι θεμελιώδεις.

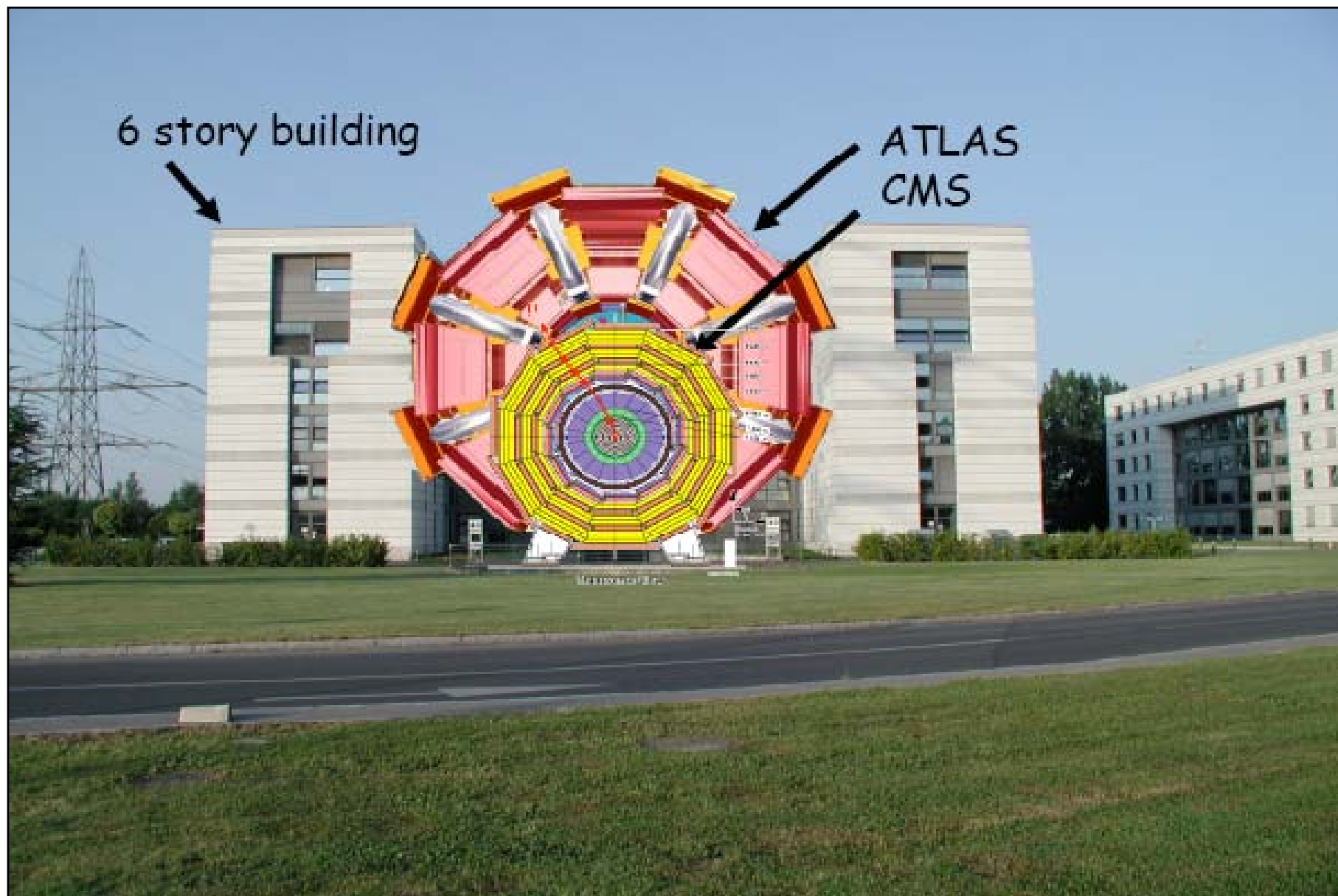
Είναι επίσης γνωστή σα Φυσική των Υψηλών Ενεργειών μιας και το πιο συνηθισμένο εργαλείο είναι επιταχυντές πολύ μεγάλης ενέργειας. Μεγάλη ενέργεια σημαίνει και μεγάλο μέγεθος μιας και τα φορτισμένα σωματίδια που κινούνται σε κυκλική τροχιά

χάνουν ενέργεια $\sim E^4/r \rightarrow$ μεγαλύτερη ενέργεια = μεγαλύτερη ακτίνα

Το αεροδρόμιο της Γενεύης

Ο επιταχυντής LHC έχει περιφέρεια 27 km. Δεν είναι ορατός από ψηλά επειδή βρίσκεται κάτω από το έδαφος σε βάθος μεταξύ 50 - 150 m. Τα μόνα ορατά σημεία είναι τα κτίρια στα 8 σημεία σύγκρουσης των σωματιδίων.





6 story building

ATLAS
CMS

Γ. Τσιπολίτης

Γιατί μεγάλες ενέργειες;

- Στη ΦΥΕ μελετάμε τα στοιχειώδη υλικά της ύλης. Όταν λέμε στοιχειώδη εννοούμε σωματίδια που δεν έχουν περαιτέρω δομή → σημειακά.

- Για να μελετήσουμε πολύ μικρές αποστάσεις χρειαζόμαστε μεγάλη ορμή. Αυτό είναι απόρροια της σχέσης του de Broglie $\lambda=h/p$

- Η διακριτική ικανότητα ενός μικροσκοπίου είναι:

$$\Delta r \sim \lambda/\sin\theta = h/p \sin\theta \sim h/q$$

- Για να μελετήσουμε αποστάσεις της τάξης της ακτίνας του πρωτονίου (~ 1fm, 1 fermi, 10^{-15} m) χρειαζόμαστε ενέργεια περίπου 200 MeV. Για να δούμε τι υπάρχει μέσα στο πρωτόνιο χρειαζόμαστε πολύ μεγαλύτερη ενέργεια.

- Το μεγάλο είναι σχετικό : 200 MeV = $3,2 \times 10^{-11}$ joule

- Μερικά σωματίδια έχουν πολύ μεγάλη μάζα, π.χ. $m_{\tau} = 175 \text{ GeV}/c^2$ που είναι 186 φορές η μάζα του πρωτονίου. Και εδώ το «πολύ μεγάλη» είναι σχετικό:

$$m_{\tau} \sim 10^{-25} \text{ kg}$$

Για την εύρεση του t οι δέσμες του επιταχυντή είχαν ενέργεια 1 TeV και ήταν σε ομάδες 10^{13} σωματίδια και η συνολική ενέργεια ήταν 1,6 Mjoules

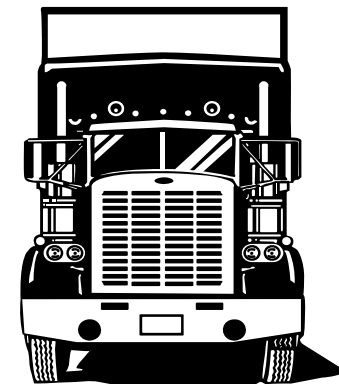
→ 30000



Tevatron

15 τονοι

45 km/h



Γιατί μεγάλες ενέργειες:

- Στη ΦΥΕ μελετάμε τα στοιχειώδη υλικά της ύλης. Όταν λέμε στοιχειώδη εννοούμε σωματίδια που δεν έχουν περαιτέρω δομή → σημειακά.

- Για να μελετήσουμε πολύ μικρές αποστάσεις χρειαζόμαστε μεγάλη ορμή. Αυτό είναι απόρροια της σχέσης του de Broglie $\lambda=h/p$

- Η διακριτική ικανότητα ενός μικροσκοπίου είναι:

$$\Delta r \sim \lambda/\sin\theta = h/p \sin\theta \sim h/q$$

- Για να μελετήσουμε αποστάσεις της τάξης της ακτίνας του πρωτονίου (~ 1fm, 1 fermi, 10^{-15} m) χρειαζόμαστε ενέργεια περίπου 200 MeV. Για να δούμε τι υπάρχει μέσα στο πρωτόνιο χρειαζόμαστε πολύ μεγαλύτερη ενέργεια.

- Το μεγάλο είναι σχετικό : 200 MeV = $3,2 \times 10^{-11}$ joule

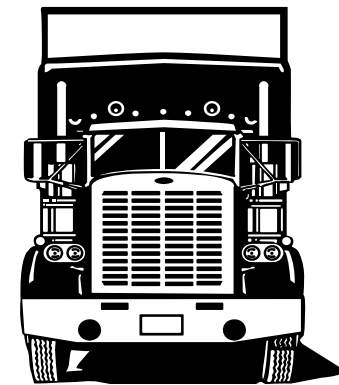
- Μερικά σωματίδια έχουν πολύ μεγάλη μάζα, π.χ. $m_{\tau} = 175 \text{ GeV}/c^2$ που είναι 186 φορές η μάζα του πρωτονίου. Και εδώ το «πολύ μεγάλη» είναι σχετικό:

$$m_{\tau} \sim 10^{-25} \text{ kg}$$

LHC

$$10^{14} \text{ protons} \times 14 \times 10^{12} \text{ eV} = 1 \times 10^8 \text{ J}$$

$$m_{\text{truck}} = 100 \text{ T} \ \& \ v_{\text{truck}} = 120 \text{ km/h}$$



Αντισωματίδια

- Το αποτέλεσμα της εφαρμογής της σχετικότητας στην κβαντομηχανική είναι η πρόβλεψη των αντισωματιδίων.
- **κλασσικά:** $E=p^2/2m$ που οδηγεί στην εξίσωση του Schrödinger

γραμμικό

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi$$

- **Σχετικιστικά:** $E^2=p^2c^2+m^2c^4$ που οδηγεί στην εξίσωση Klein-Gordon

2^{ου} βαθμού

$$-\hbar^2 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = -\hbar^2 c^2 \nabla^2 \Psi + m^2 c^4 \Psi$$

οδηγεί σε θετικές και αρνητικές ενέργειες.

- **αρνητικές ενέργειες αντισωματίδια με θετική ενέργεια**
- όλα τα σωματίδια έχουν αντισωματίδια και συνήθως τα σημειώνουμε με μια παύλα πάνω από το σωματίδιο. πχ K^0 και \bar{K}^0
 - όμως e^- και e^+ , μ^- και μ^+
 - μερικά σωματίδια είναι τα αντισωματίδια του εαυτού τους πχ γ , π^0

Μονάδες

- 3 κύριες μονάδες : μήκος, μάζα και χρόνος
- Μπορούμε να διαλέξουμε αυθαίρετα ℓ_0 , m_0 και t_0 ώστε Mx/T αδιάστατο

$$\text{πχ} \quad \frac{(M/m_0)(x/\ell_0)}{(T/t_0)} \quad \left(\frac{Mx}{T}\right)_{\text{αδίαστ.}} \rightarrow \left(\frac{Mx}{T}\right) \frac{m_0 \ell_0}{t_0}$$

- Δεν είναι απαραίτητο να είναι όλα αδιάστατα
- Στη ΦΥΕ χρησιμοποιούμε $\hbar = c = 1$ και αφήνουμε μια μονάδα με διαστάσεις που είναι η ενέργεια σε **MeV**. (natural units)
- Ενέργεια \rightarrow μήκος $\hbar c = 197 \text{ MeV fm}$
- Μήκος \rightarrow χρόνο $c = 3 \times 10^{23} \text{ fm/s}$

	Μονάδες ΦΥΕ	Μονάδες SI
Μήκος	1 fm	10^{-15} m
Ενέργεια	1 GeV	$1,602 \times 10^{-10} \text{ J}$
Μάζα E/c^2	$1 \text{ GeV}/c^2$	$1,78 \times 10^{-27} \text{ kg}$
$\hbar = h/(2\pi)$	$6,588 \times 10^{-25} \text{ GeV s}$	$1,055 \times 10^{-34} \text{ J s}$
c	$2,998 \times 10^{23} \text{ fm s}^{-1}$	$2,998 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
$\hbar c$	0,1975 GeV fm	$3,162 \times 10^{-26} \text{ Jm}$

Παράδειγμα

- Ο χρόνος ημιζωής του μιονίου είναι (natural units):

$$\tau_{\mu} = \frac{12(8\pi)^3 M_W^4}{g_W^4 m_{\mu}^5}$$

1. $\div c^2 \rightarrow$ ενέργεια ($1/c^2$)
2. Έχουμε τ_{μ} σε MeV^{-1} , $\times \hbar c \rightarrow$ μήκος ($\hbar c/c^2$)
3. Έχουμε τ_{μ} σε fm, $\div c \rightarrow$ χρόνος (\hbar/c^2)

- Δεδομένα $g_w=0,65$ $M_w=80,4 \text{ GeV}$ $m_{\mu}=106 \text{ MeV}$

1. $\rightarrow \tau_{\mu} = 3.3 \times 10^{15} \text{ MeV}^{-1}$
2. $\rightarrow \tau_{\mu} = 6,6 \times 10^{17} \text{ fm}$
3. $\rightarrow \tau_{\mu} = 2,2 \times 10^{-6} \text{ s}$

Παράδειγμα

- Υπολογίστε την απαιτούμενη ενέργεια ηλεκτρονίων που αντιστοιχούν σε μήκος κύματος $\lambda=1 \text{ fm}$

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4} \Rightarrow E \approx pc \quad (\text{για } m_0 c^2 \ll pc)$$

$$p = \frac{\hbar}{\lambda} \Rightarrow pc = \frac{\hbar c}{\lambda} = \frac{197 \text{ MeV} \cdot \text{fm}}{1 \text{ fm}}$$

$$E \approx 200 \text{ MeV}$$