

# Μαθαίνοντας για το CERN



ΕΛΛΗΝΟΓΕΡΜΑΝΙΚΗ ΑΓΩΓΗ



Ε. Χανιωτάκης, Φυσικός  
Τμήμα Έρευνας και Ανάπτυξης,  
Ελληνογερμανική Αγωγή

## Σε αυτήν την ομιλία θα συζητήσουμε:

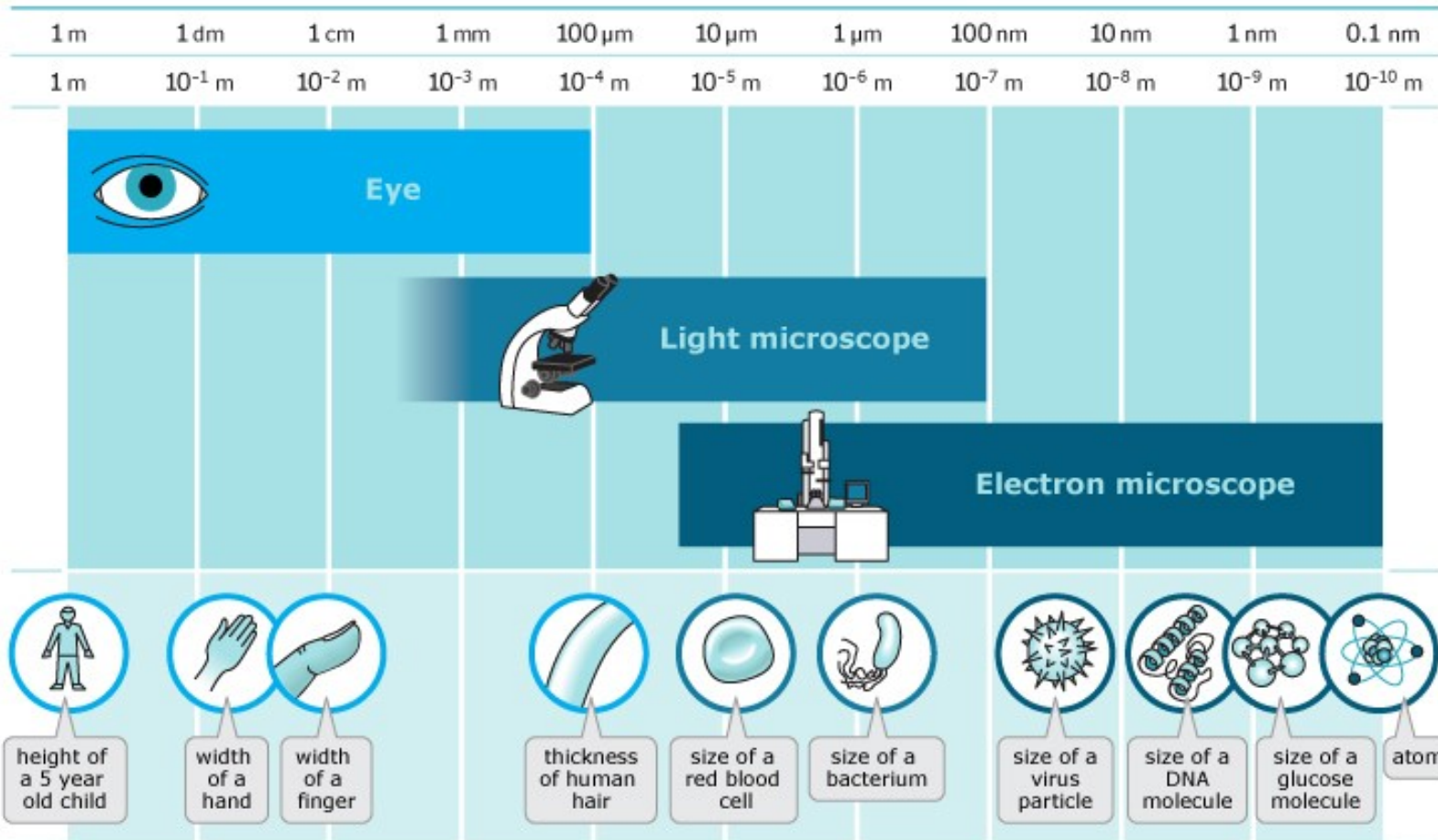
- Ποιο είναι το αντικείμενο έρευνας της Φυσικής Υψηλών Ενεργειών
- Τι είναι το CERN; Τι ψάχνει να βρεί;
- Ποια είναι η διαδικασία από την σύγκρουση σωματιδίων έως την ανακάλυψη νέας Φυσικής;

# ΦΥΣΙΚΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

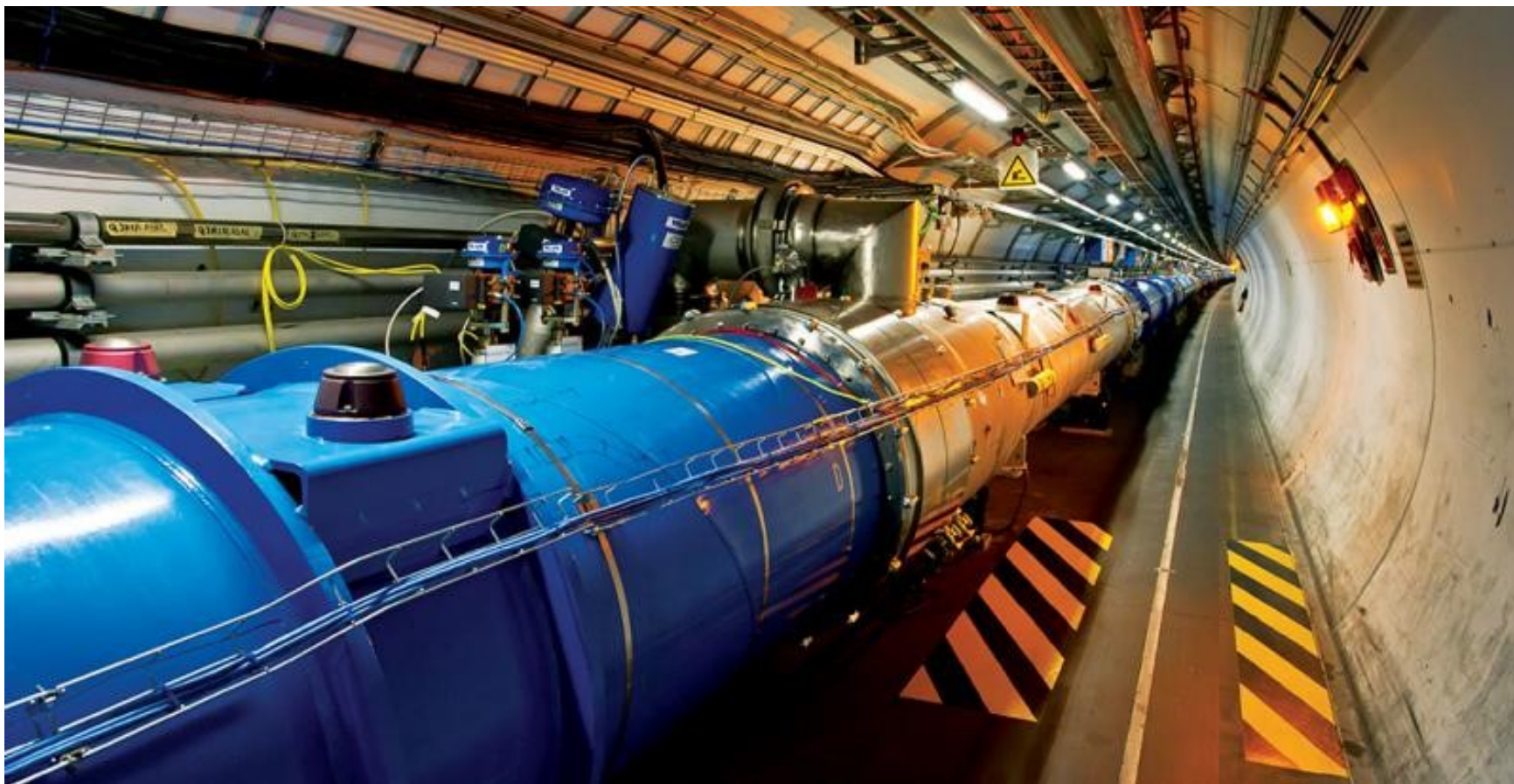
- Αποτελεί έναν από τους πιο προηγμένους κλάδους της Σύγχρονης Φυσικής
- Μελετά τα Στοιχειώδη Σωματία τις Ύλης και τις Αλληλεπιδράσεις τους σε συνθήκες που προσομοιώνουν τις πρώτες στιγμές μετά το Big Bang!
- Αναζητά απαντήσεις σε κάποιες από τις πιο βαθύτερες ερωτήσεις του ανθρωπίνου πνεύματος:  
Από τι είμαστε φτιαγμένοι, ποιοι είναι οι θεμελιώδεις νόμοι που διέπουν το σύμπαν; ;
- Πως γίνεται αυτή η έρευνα; Τι έχουμε μάθει; Τι ευελπισθούμε να μάθουμε;



# Resolving power of microscopes



Επιταχυντές : Τα πιο ισχυρά «Μικροσκόπια» της ανθρωπότητας





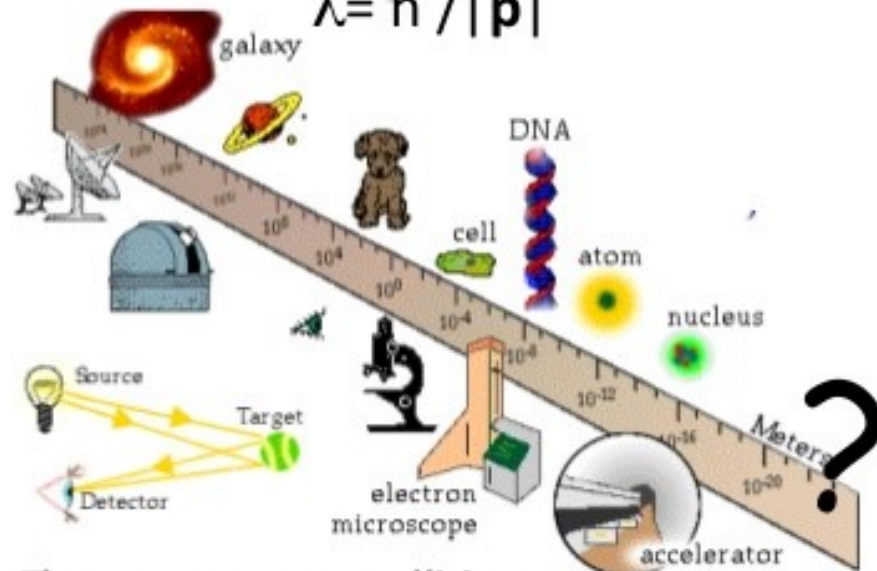
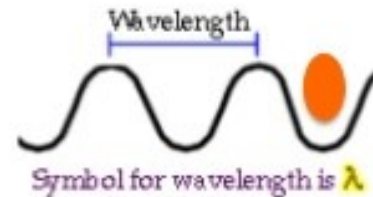
# Accelerators ..as huge microscopes

Particles behave as waves...

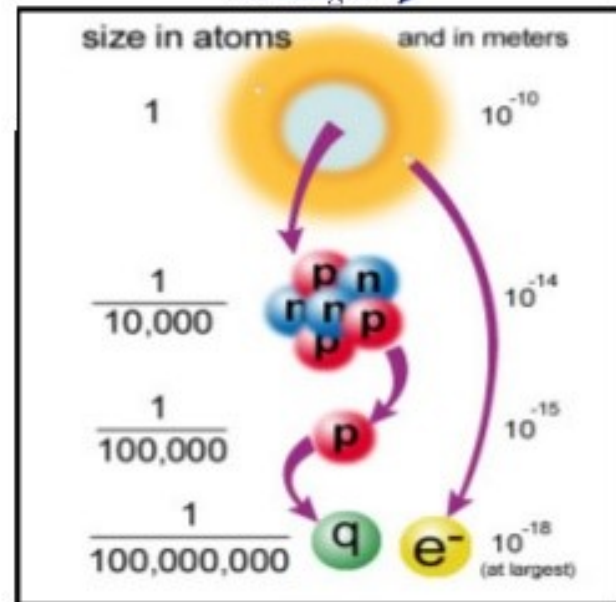
$$E = \hbar \nu$$

$\hbar \rightarrow$  Planck const.

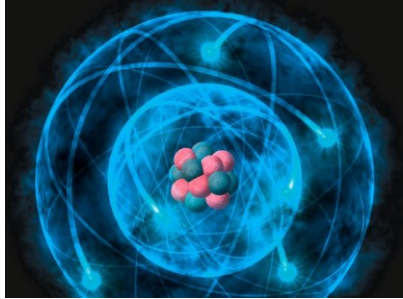
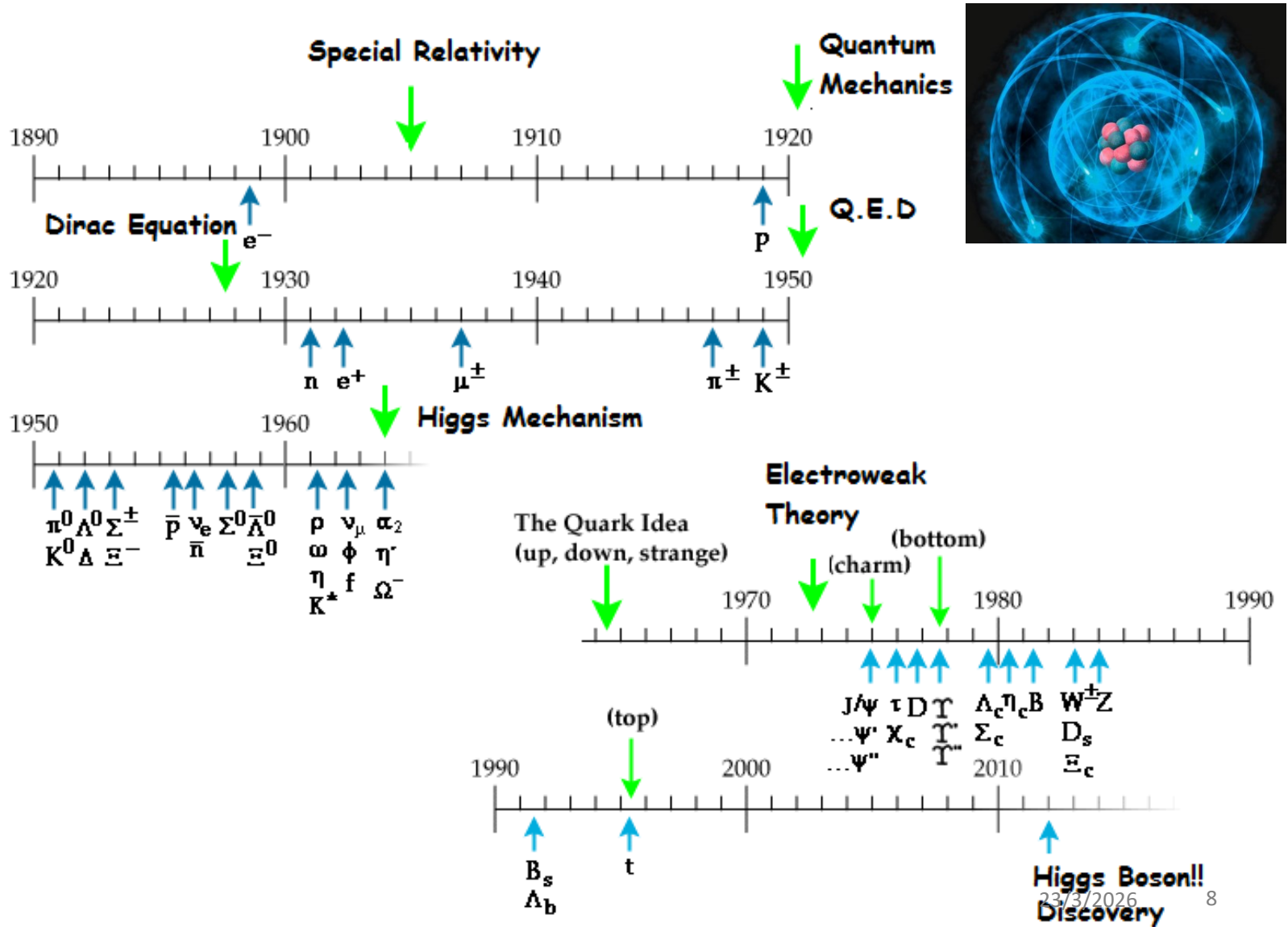
$$\lambda = \hbar / |p|$$



The proton-proton collisions probe distances down to  $10^{-19} m$



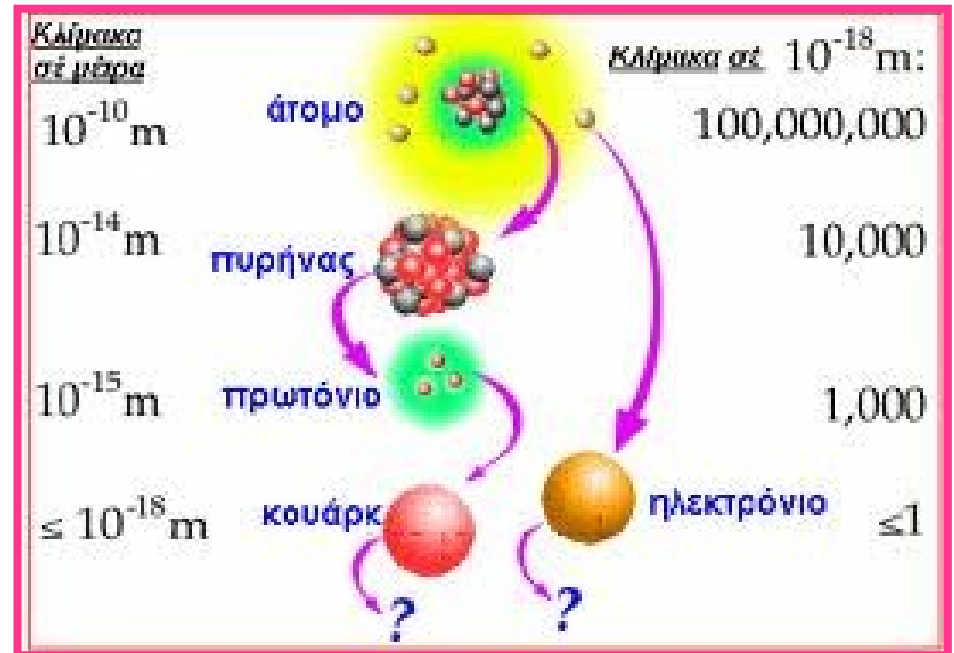
# 100 και πλέον χρόνια ανακαλύψεων



# Ταξίδι στο Εσωτερικό της Ύλης

Ο κόσμος όπως τον γνωρίζουμε μπορεί να αναλυθεί σε βασικά στοιχειώδη σωματίδια και τις αλληλεπιδράσεις τους.

Τα στοιχειώδη σωματίδια είναι τα κουάρκ και τα λεπτόνια ενώ οι αλληλεπιδράσεις μεταδίδονται μέσω μποζονίων βαθμίδας.



# Τα κουαρκ

$\left(\frac{2}{3}\right)$   
up



$\left(\frac{2}{3}\right)$   
charm



$\left(\frac{2}{3}\right)$   
top



Στη Φύση απαντώνται 6 είδη κουαρκ  
(up, down, charm, strange, top, bottom)

Έχουν κλασματικό φορτίο και όλα πλην του top quark εμφανίζονται σε συνδυασμούς. ΔΕΝ μπορούμε να τα βρούμε ελεύθερα στη φύση.

Οι συνδυασμοί τους παράγουν τα αδρόνια:  
(αδρός = τραχύς) όπως τα πρωτόνια και τα νετρόνια.

Τα κουαρκ συνδέονται μεταξύ τους ανταλλάσσοντας γκλουόνια, τους φορείς της ισχυρής αλληλεπίδρασης.

Σε αντιδιαστολή, τα λεπτόνια (όπως τα ηλεκτρόνια) δεν έχουν εσωτερική δομή.

$\left(-\frac{1}{3}\right)$   
down



$\left(-\frac{1}{3}\right)$   
strange



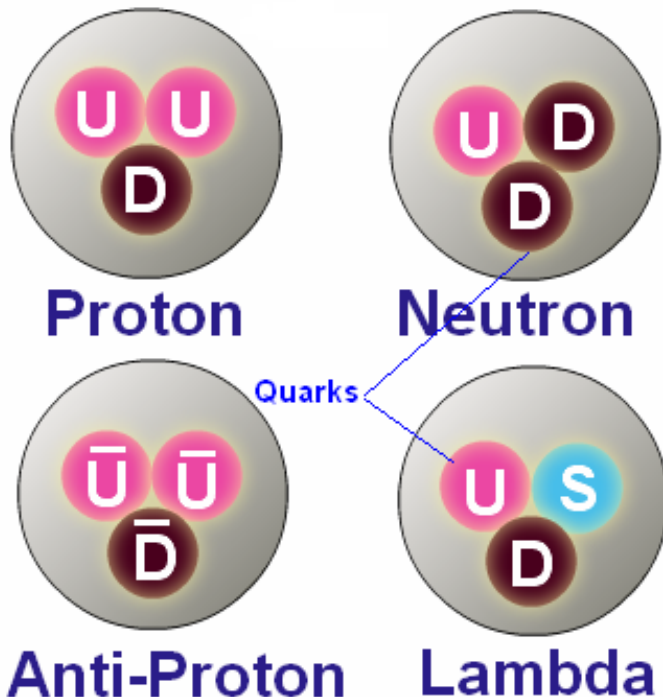
$\left(-\frac{1}{3}\right)$   
bottom



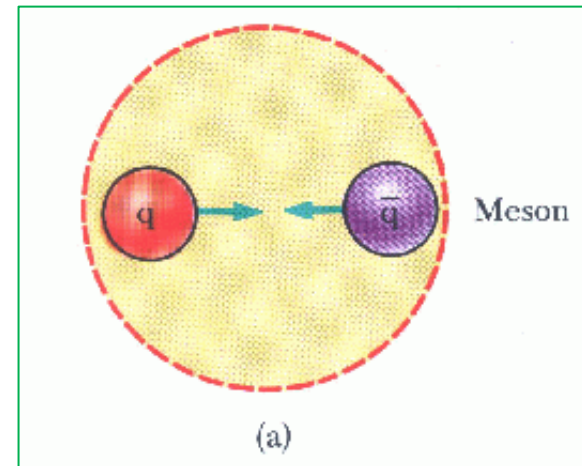
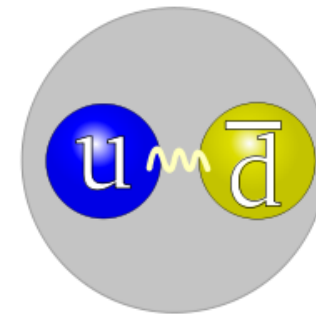
# Συνδυάζοντας κουαρκ για να παράξουμε αδρόνια

Αδρόνια = βαρυόνια + μεσόνια

3 κουαρκ  $\rightarrow$  βαρυόνια



Ζεύγη κουαρκ-αντικουαρκ  $\rightarrow$  Μεσόνια



# Τα λεπτόνια

Τα λεπτόνια δεν έχουν εσωτερική δομή.

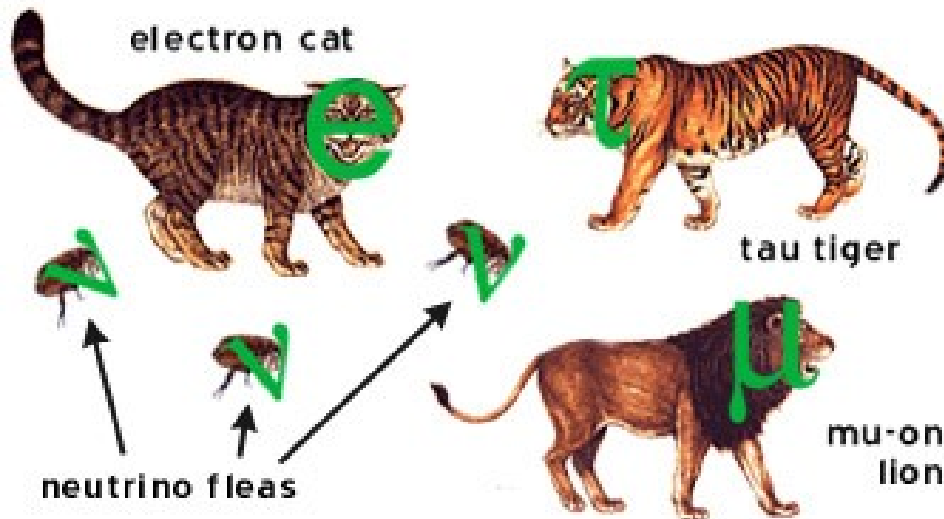
Το πιο γνωστό μας λεπτόνιο είναι το ηλεκτρόνιο.

Τα φορτισμένα λεπτόνια είναι: το ηλεκτρόνιο, το μιονίο, το ταυ τα οποία έχουν ίδιες ιδιότητες και διαφορετικές μάζες

Τα αφορτιστα λεπτόνια είναι τα νετρίνο: νετρίνο ηλεκτρονίου, νετρίνο μιονίου, Νετρίνο ταυ. Έχουν απειροελάχιστη μάζα και αλληλεπιδρούν πολύ ασθενικά με την ύλη.

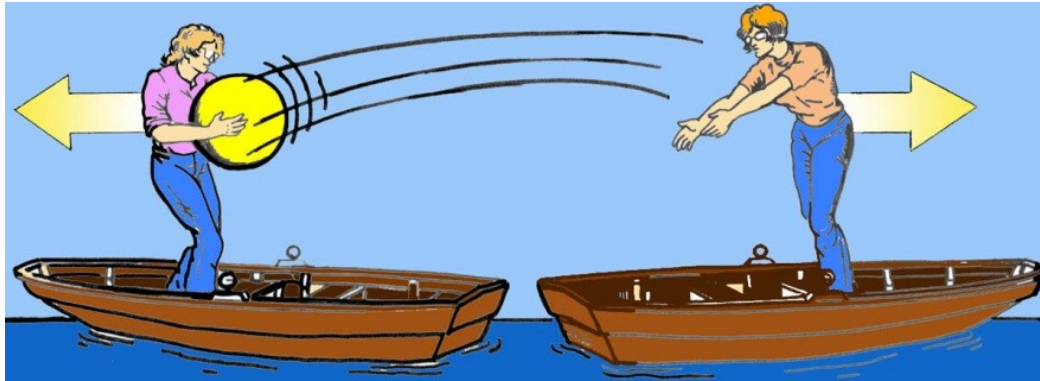
LEPTONS

0.511 MeV/c <sup>2</sup> -1 1/2 <b>e</b> electron	105.7 MeV/c <sup>2</sup> -1 1/2 <b>μ</b> muon	1.777 GeV/c <sup>2</sup> -1 1/2 <b>τ</b> tau
<2.2 eV/c <sup>2</sup> 0 1/2 <b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<0.17 MeV/c <sup>2</sup> 0 1/2 <b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<15.5 MeV/c <sup>2</sup> 0 1/2 <b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino



# Οι αλληλεπιδράσεις των στοιχειωδών σωματιδίων

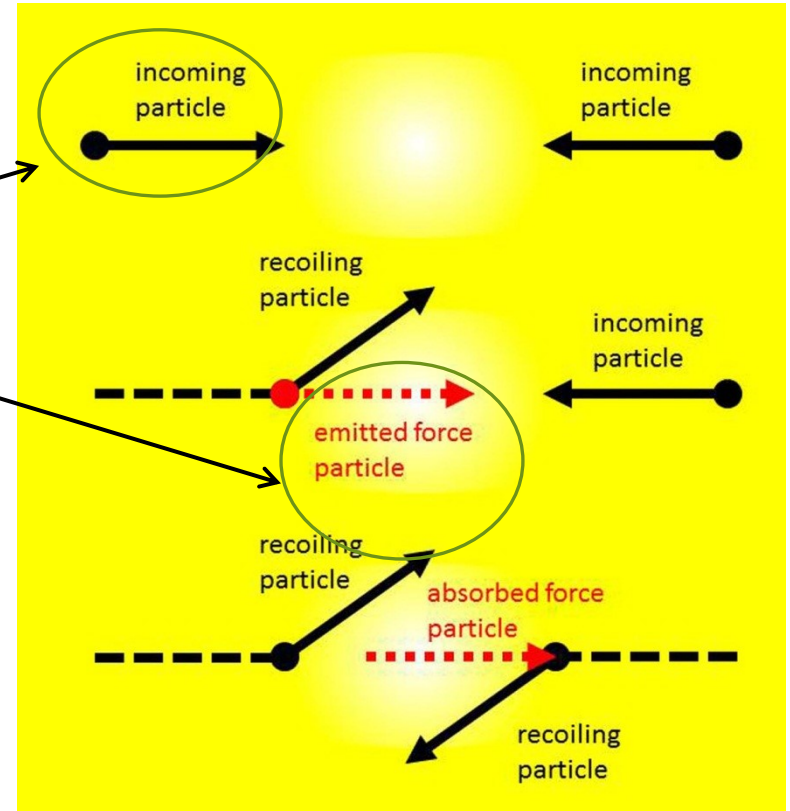
- Όλες οι φυσικές διαδικασίες μπορούν να αναχθούν σε αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στα στοιχειώδη σωματίδια (κουαρκ-λεπτόνια).
- Πώς όμως ακριβώς αλληλεπιδρούν τα σωματίδια;
- Η κλασική φυσική μας μιλά για δυνάμεις από επαφή (π.χ τριβή) και δυνάμεις από απόσταση (π.χ μαγνητισμός, βαρύτητα)
- Στην πραγματικότητα όμως η έννοια της «επαφής» δεν υφίσταται. Όλες οι δυνάμεις που συντελούν την καθημερινή μας εμπειρία ανάγονται στην βαρυτική αλληλεπίδραση (πτώση των σωμάτων, κίνηση των πλανητών), και την ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση (αλληλεπιδράσεις φορτίων, μαγνητών, τριβή !!!, δυνάμεις που αναπτύσσονται σε μια σύγκρουση, αλληλεπίδραση ακτινοβολίας και ύλης κ.α)
- Από το 1930 γνωρίζαμε ότι πρέπει να υπάρχει μία ακόμη δύναμη που κρατά τον πυρήνα του ατόμου ενωμένο παρά τις απώσεις των πρωτονίων μεταξύ τους. Αυτή ονομάστηκε ισχυρή αλληλεπίδραση (Yukawa 1934).
- Την ίδια περίπου εποχή, η ραδιενέργεια, δηλαδή η αυθόρμητη διάσπαση των ατομικών πυρήνων εξηγήθηκε με την ύπαρξη μιας τέταρτης δύναμης, της ασθενούς αλληλεπίδρασης (Fermi 1933).



Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ στοιχειωδών σωματιδίων μπορούν ευριστικά να παρομοιαστούν με το πέταγμα μιας μπάλας ανάμεσα σε δύο ανθρώπους που βρίσκονται σε γειτονικές βάρκες.

Παρατηρείτε τον διαχωρισμό ανάμεσα σε σωματίδια και σε σωματίδια φορείς δύναμης;

Κατα την αλληλεπίδραση, το ένα σωματίδιο , εκπέμπει ένα σωματίδιο «φορέα δύναμης» με αποτέλεσμα να «αλλάξει η κινητική του κατάσταση». Το άλλο σωματίδιο απορροφά το σωματίδιο φορέα δύναμης με αποτέλεσμα να αλλάξει και η δική του κινητική κατάσταση.



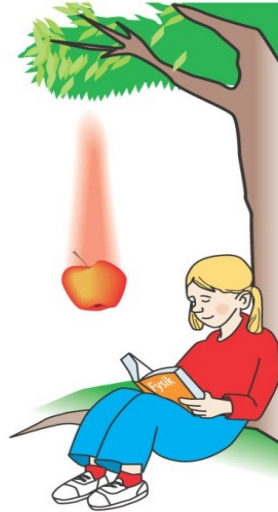
# Οι 4 θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις

Illustration: Typoform



Graviton?  
Solar systems  
Galaxies

## Gravity Force



**Strong force**

Gluons (8)

Quarks

Mesons  
Baryons

Nuclei

up quark  
down quark  
**proton**

down quark  
up quark  
down quark  
**neutron**

## Electromagnetic force

Hydrogen atom

Water molecule

Oxygen atom

Oxygen atom

Protons and Neutrons

Electron

Photon

Atoms  
Light  
Chemistry  
Electronics

## Weak force

Bosons (W,Z)

Neutron decay  
Beta decay  
Neutrino interactions  
Burning of the sun

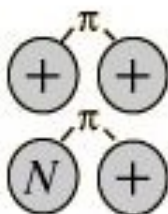
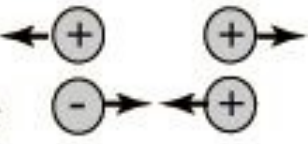
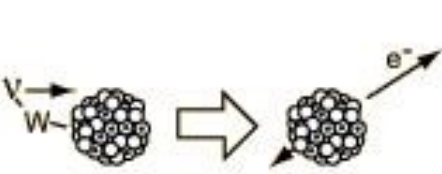
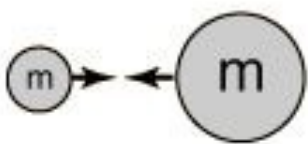
anti-neutrino

electron

W force carrier particle

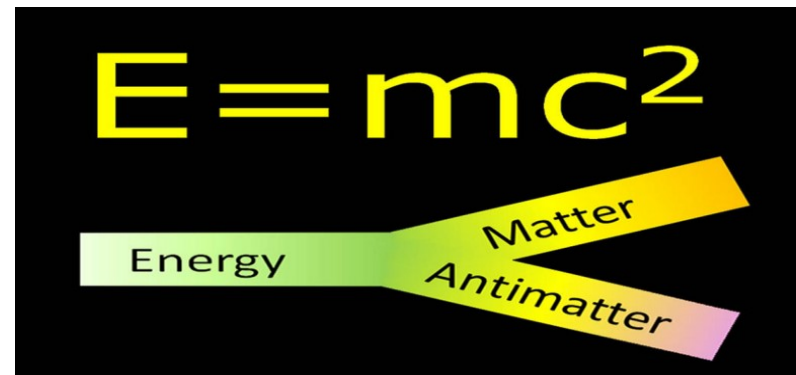
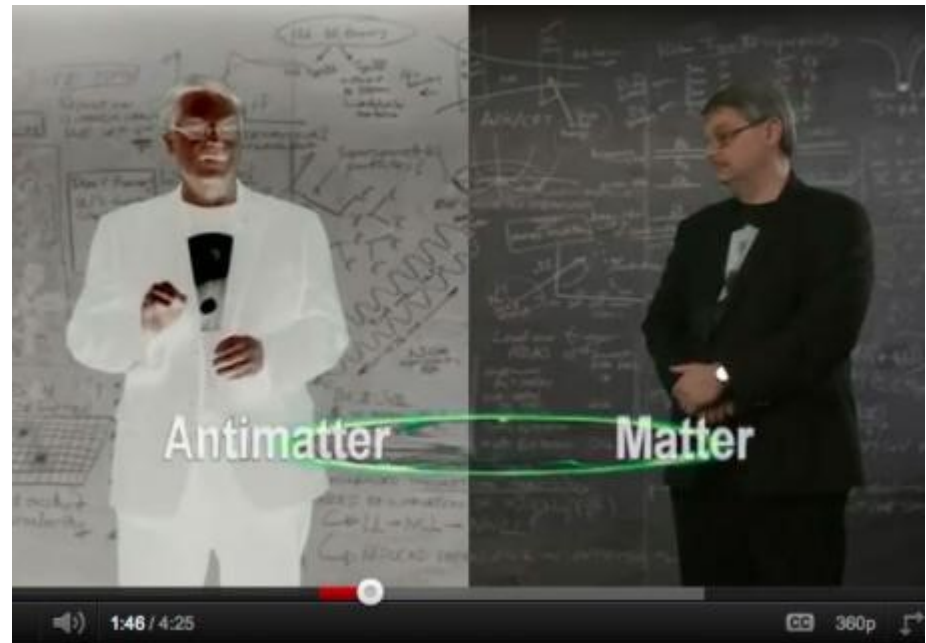
proton

# Fundamental Forces

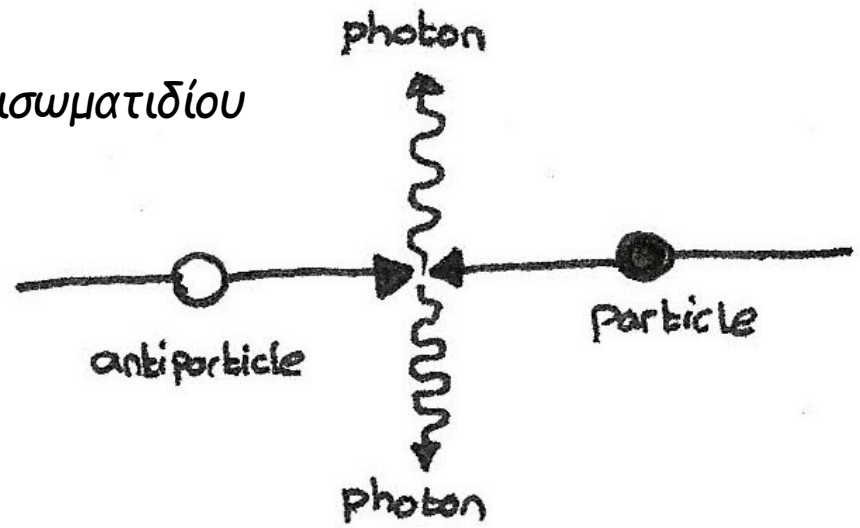
<i>Strong</i>	 <p>Force which holds nucleus together</p>	Strength <b>1</b>	Range (m) $10^{-15}$ (diameter of a medium sized nucleus)	Particle gluons, $\pi$ (nucleons)
<i>Electro-magnetic</i>		Strength $\frac{1}{137}$	Range (m) Infinite	Particle photon mass = 0 spin = 1
<i>Weak</i>	 <p>neutrino interaction induces beta decay</p>	Strength $10^{-6}$	Range (m) $10^{-18}$ (0.1% of the diameter of a proton)	Particle Intermediate vector bosons $W^+$ , $W^-$ , $Z_0$ , mass > 80 GeV spin = 1
<i>Gravity</i>		Strength $6 \times 10^{-39}$	Range (m) Infinite	Particle graviton? mass = 0 spin = 2

# Και η αντιύλη...

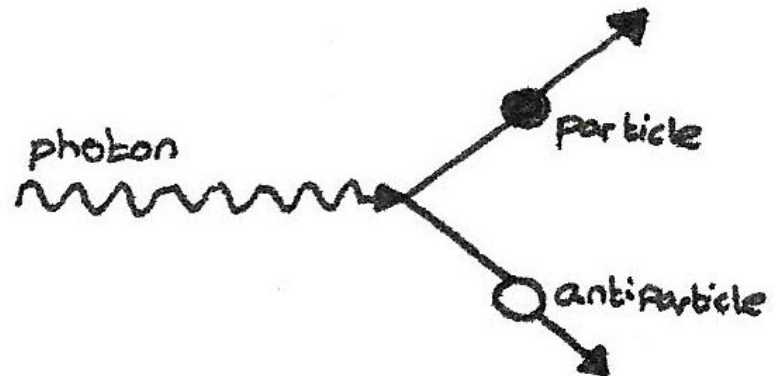
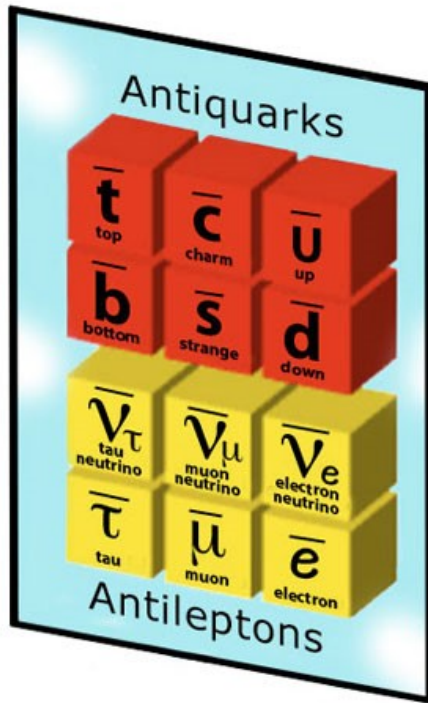
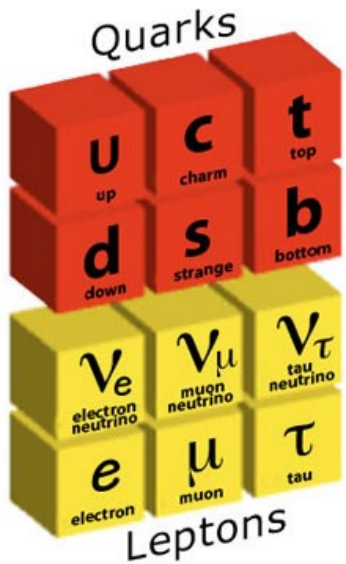
- Για κάθε σωματίο ύλης αντιστοιχεί ένα σωματίο «αντι-ύλης», δηλαδή ένα σωματίο με ίση μάζα αλλά αντίθετο ηλεκτρικό φορτίο και αντίθετες κάποιες άλλες βασικές ιδιότητές του.
- Γνωρίζουμε για την ύπαρξη της αντιύλης από την δεκαετία του 1930.
- Όταν η ύλη και η αντιύλη έρθουν σε επαφή, εξαυλώνονται και παράγεται ενέργεια ίση με το άθροισμα των μαζών τους επί  $c^2$ .



# Εξαύλωση σωματιδίου-αντισωματιδίου



Annihilation



Pair production

Παραγωγή ζεύγους  
σωματιδίου-αντισωματιδίου

# Το Καθιερωμένο Πρότυπο των Στοιχειωδών Σωματιδίων

- Τα είδη σωματιδίων με τα αντισωματιδιά τους και τις αλληλεπιδράσεις τους συναποτελούν το «Καθιερωμένο Μοντέλο της Φυσικής Στοιχειωδών Σωματιδίων»
- Το Καθιερωμένο μοντέλο έχει ελεγχθεί πειραματικά σε αποστάσεις έως και  $10^{-18}m$  με τεράστια ακρίβεια.
- Το τελευταίο συστατικό του καθιερωμένου προτύπου ήταν η επιβεβαίωση της ύπαρξης του Σωματιδίου Higgs (2012- CERN).
- Το καθιερωμένο πρότυπο έχει αρκετά κενά. Ελπίζουμε στον LHC να μπορέσουμε να ανακαλύψουμε Φυσική πέραν αυτού.

## WHAT PART OF

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^\alpha \partial_\nu g_\mu^\alpha - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^b g_\mu^c g_\nu^a - \frac{1}{2}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \frac{1}{2}ig_s^2 (\bar{\psi}^a \gamma^\mu \psi^a) g_\mu \\
 & \bar{C}^a \phi^a C^a + g_s f^{abc} \partial_\mu C^a C^b g_\mu^c - \partial_\mu W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - M^2 W_\nu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\mu Z_\nu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2}M^2 Z_\nu^0 Z_\mu^0 - \\
 & \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\nu A_\mu - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\nu H - \frac{1}{2}m_H^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\nu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\nu \phi^0 - \\
 & \frac{1}{2\epsilon_0} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h [2\frac{M^2}{g^2} + 2\frac{M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-)] + 2\frac{M}{g^2} \alpha_h - ig_c \omega [\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\nu^+ W_\mu^- - \\
 & W_\nu^- W_\mu^+) - Z_\nu^0 (W_\nu^+ \partial_\mu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\nu^+) + Z_\nu^0 (W_\nu^+ \partial_\mu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\nu^+)] - ig_s \omega_\nu \partial_\nu A_\mu (W_\mu^- W_\nu^+ - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\nu^+ \partial_\mu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\nu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+) - \frac{1}{2}g^2 W_\nu^+ W_\nu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \\
 & \frac{1}{2}g^2 W_\nu^+ W_\nu^- W_\nu^+ W_\nu^- + g^2 \zeta_\nu^0 (Z_\nu^0 W_\mu^+ Z_\mu^0 W_\nu^- - Z_\nu^0 W_\mu^- Z_\mu^0 W_\nu^+) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\nu^+ A_\nu W_\mu^- - \\
 & A_\mu A_\nu W_\nu^+ W_\mu^-) + g^2 s_w c_w A_\mu Z_\nu^0 (W_\nu^+ W_\mu^- - W_\nu^- W_\mu^+) - 2A_\mu Z_\nu^0 W_\nu^+ W_\mu^- - g\alpha [H^3 + \\
 & H \phi^0 \phi^0 + 2H \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2}g^2 \alpha_h H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + \\
 & 2(\phi^0)^2 H^2] - g M W_\nu^+ W_\nu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{g} Z_\nu^0 Z_\mu^0 H - \frac{1}{2}ig [W_\nu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\nu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \\
 & \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \frac{1}{2}ig [W_\nu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\nu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H)] + \frac{1}{2}ig \frac{1}{2\epsilon_0} (Z_\nu^0 H \partial_\mu \phi^0 - \\
 & \phi^0 \partial_\mu H) - ig \frac{1}{2\epsilon_0} M Z_\nu^0 (W_\nu^+ \phi^- - W_\nu^- \phi^+) + ig s_w M A_\mu (W_\nu^+ \phi^- - W_\nu^- \phi^+) - ig \frac{1}{2\epsilon_0} Z_\nu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \\
 & \phi^- \partial_\mu \phi^+) + ig s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{2}g^2 W_\nu^+ W_\nu^- H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{2}g^2 \frac{1}{2\epsilon_0} Z_\nu^0 Z_\mu^0 [H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2}g^2 \frac{1}{2\epsilon_0} Z_\nu^0 \phi^0 (W_\nu^+ \phi^- + W_\nu^- \phi^+) - \\
 & \frac{1}{2}ig^2 \frac{1}{2\epsilon_0} Z_\nu^0 H (W_\nu^+ \phi^- - W_\nu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\nu^+ \phi^- + W_\nu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\nu^+ \phi^- \\
 & W_\nu^- \phi^+) - g^2 \frac{1}{2\epsilon_0} (2c_w^2 - 1) Z_\nu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- + g^2 \frac{1}{2\epsilon_0} A_\mu A_\nu \phi^+ \phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma^\theta + m_e) e^\lambda - \\
 & \bar{\nu}^\lambda \gamma^\theta \nu^\lambda - \bar{u}_3^\lambda (\gamma^\theta + m_u) u_3^\lambda - \bar{d}_3^\lambda (\gamma^\theta + m_d) d_3^\lambda + ig s_w A_\mu [(\bar{e}^\lambda \gamma^\theta e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}_3^\lambda \gamma^\theta u_3^\lambda) - \\
 & \frac{1}{3}(\bar{d}_3^\lambda \gamma^\theta d_3^\lambda)] + \frac{1}{2}ig \frac{1}{2\epsilon_0} Z_\nu^0 [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) - (\bar{u}_3^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - \\
 & 1 - \gamma^5) u_3^\lambda) + (\bar{d}_3^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{2}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_3^\lambda)] + \frac{1}{2\sqrt{2}} W_\nu^+ [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) - (\bar{u}_3^\lambda \gamma^\mu (1 + \\
 & \gamma^5) C_{3,1} d_3^\lambda)] + \frac{1}{2\sqrt{2}} W_\nu^- [(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_3^\lambda \gamma^\mu C_{3,1} (1 + \gamma^5) u_3^\lambda)] + \frac{1}{2\sqrt{2}} M [-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \\
 & \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda)] - \frac{g}{2} \frac{m_H^2}{M} [H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i\phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{m_H^2}{M} \phi^+ [-m_H^2 (\bar{u}_3^\lambda C_{3,1} (1 - \\
 & \gamma^5) u_3^\lambda) + m_H^2 (\bar{d}_3^\lambda C_{3,1} (1 + \gamma^5) d_3^\lambda)] + \frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{m_H^2}{M} \phi^- [m_H^2 (\bar{d}_3^\lambda C_{3,1} (1 + \gamma^5) u_3^\lambda) - m_H^2 (\bar{u}_3^\lambda C_{3,1} (1 - \\
 & \gamma^5) d_3^\lambda)] - \frac{g}{2} \frac{m_H^2}{M} H (\bar{u}_3^\lambda u_3^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_H^2}{M} H (\bar{d}_3^\lambda d_3^\lambda) + \frac{1}{2} \frac{m_H^2}{M} \phi^0 (\bar{u}_3^\lambda \gamma^5 u_3^\lambda) - \frac{1}{2} \frac{m_H^2}{M} \phi^0 (\bar{d}_3^\lambda \gamma^5 d_3^\lambda) + \\
 & X^+ (\partial^- - M^2) X^+ + X^- (\partial^- - M^2) X^- + X^0 (\partial^- - \frac{M^2}{\epsilon_0}) X^0 + Y \partial^2 Y + ig c_w W_\nu^+ (\partial_\mu X^0 X^- - \\
 & \partial_\mu X^+ X^0) + ig s_w W_\nu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu X^+ Y) + ig c_w W_\nu^- (\partial_\mu X^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + \\
 & ig s_w W_\nu^- (\partial_\mu X^- Y - \partial_\mu Y X^+) + ig c_w Z_\nu^0 (\partial_\mu X^+ X^- - \partial_\mu X^- X^+) + ig s_w A_\mu (\partial_\mu X^- X^+ + \\
 & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2}g M [\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{2}\bar{X}^0 X^0 H] + \frac{1}{2\epsilon_0} M [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \\
 & X^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2\epsilon_0} ig M [X^0 X^- \phi^+ - X^0 X^+ \phi^-] + ig M s_w [X^0 X^- \phi^+ - X^0 X^+ \phi^-] + \\
 & \frac{1}{2}ig M [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - X^- X^- \phi^0]
 \end{aligned}$$

## DO YOU NOT UNDERSTAND?

# Τα στοιχειώδη σωμάτια μετά την ανακάλυψη του σωματιδίου Higgs (2012)

Τα «συστατικά» της συνήθους ύλης

mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> Higgs boson
<b>QUARKS</b>	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b><math>\gamma</math></b> photon	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b>Z</b> Z boson	
<b>LEPTONS</b>	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	$\pm 1$	
	1/2	1/2	1/2	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>W</b> W boson	
					<b>GAUGE BOSONS</b>

Αν η ύλη απαρτίζεται συνολικά από 12 στοιχειώδη σωμάτια, 4 σωματίδια-φορείς δυνάμεων και το σωματίδιο Higgs, γιατί ο κόσμος μας αποτελείται μόνο από 3 σωμάτια;

Τα περισσότερα στοιχειώδη σωμάτια είναι ασταθή .  
Στις συνθήκες «θερμοκρασίας» που έχει το σύμπαν σήμερα,  
τα μόνα σωμάτια που επιβιώνουν ες αεί είναι τα u,d quarks , τα  
ηλεκτρόνια, τα φωτόνια και τα νετρίνα τα οποία δεν διασπώνται  
περαιτέρω.

Όσο υψηλότερη η «θερμοκρασία» τόσο μεγαλύτερη η διαθέσιμη  
ενέργεια ανα μονάδα όγκου.

Από την περίφημη σχέση :  $E = mc^2$ ,

αν η ενέργεια αυτή είναι αρκετή μπορεί να δημιουργηθεί ένα «μή σύνηθες»  
σωμάτιο μάζας  $m$  και να διασπαστεί στην συνέχεια δίνοντας εν τέλει σταθερά  
υποπαράγωγα.

**Το σύμπαν στις αρχές του ήταν αρκετά «ζεστό» ώστε στην ημερησία διάταξή  
του να είναι σωμάτια που σήμερα δεν παρατηρούμε .**

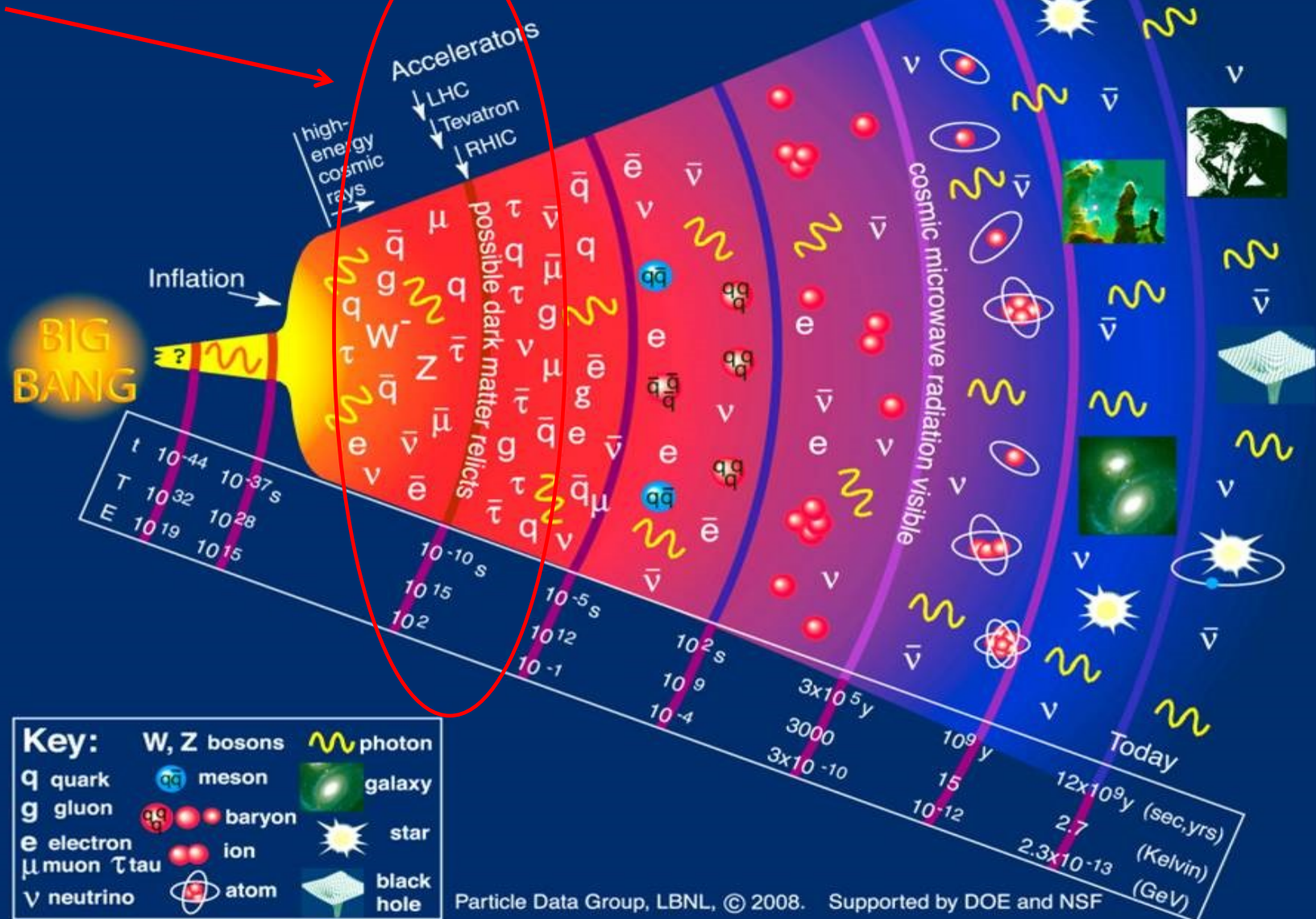
Πώς μπορούμε να δούμε αυτά τα σωμάτια επομένως;

Παράγοντάς τα με τεχνητούς τρόπους η μελετώντας τις συγκρούσεις  
της κοσμικής ακτινοβολίας με την ατμόσφαιρά μας,  
προσομοιώνοντας έτσι τις συνθήκες του σύμπαντος  
σε πρότερες εποχές!

Μάθετε περισσότερα για την  
ισοδυναμία μάζας – ενέργειας

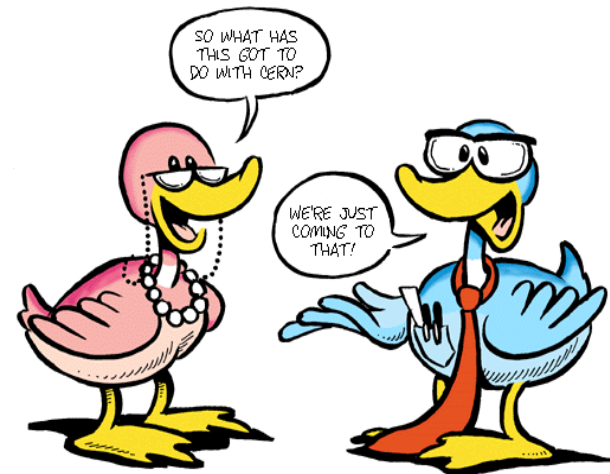
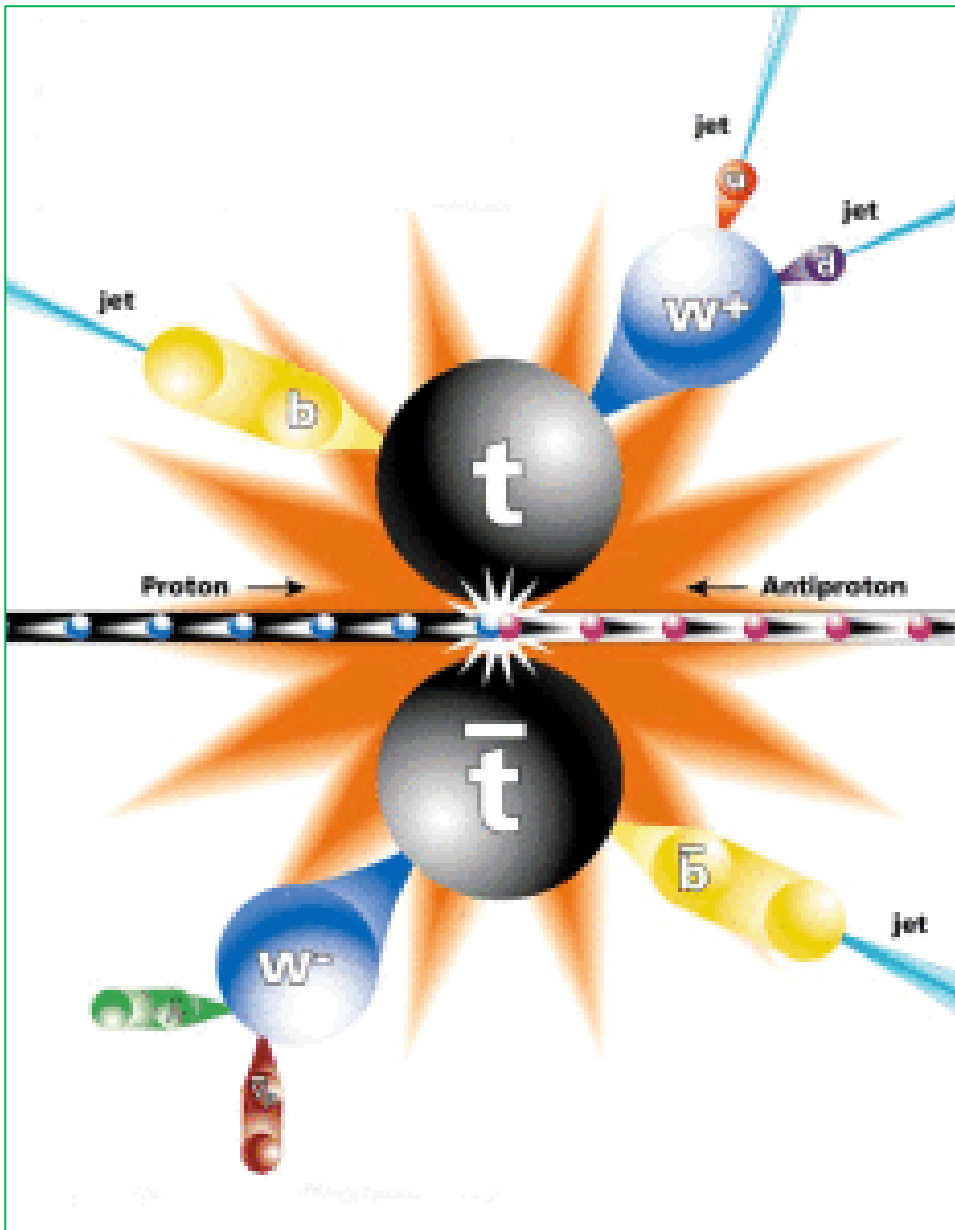
[εδώ](#)

# History of the Universe



## Πως μελετάμε τα στοιχειώδη σωματρία στο εργαστήριο

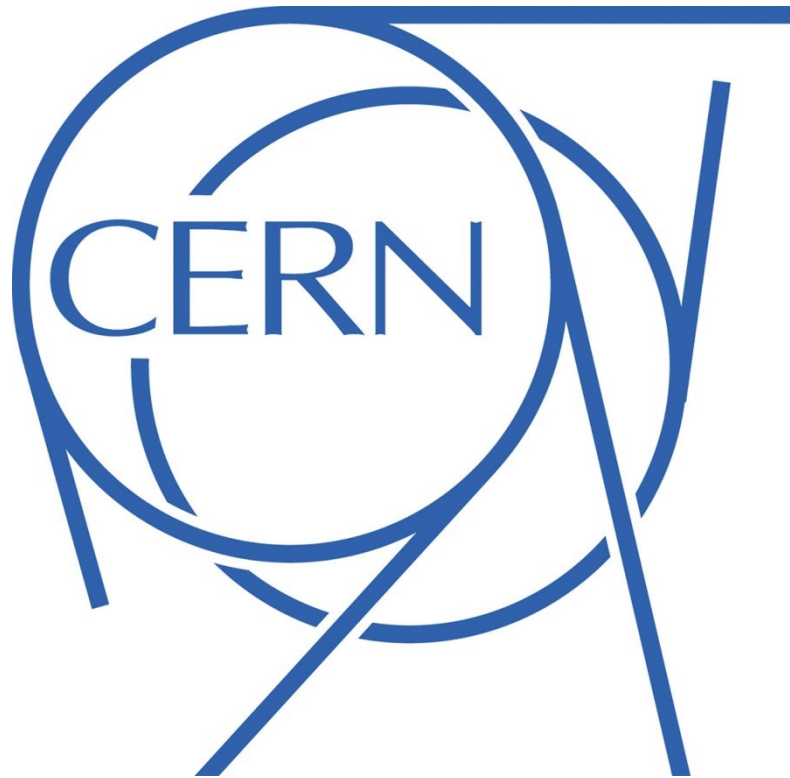
- Πρέπει να δημιουργήσουμε συνθήκες κατα τις οποίες παράγεται μεγάλη ποσότητα ενέργειας εντοπισμένη στο χώρο  
→ π.χ συγκρούοντας πρωτόνια που επιταχύνουμε σε υψηλή ενέργεια στο εργαστήριο.
- Από τη σχέση  $E=mc^2$  αν η ενέργεια αυτή είναι αρκετή και πληρούνται μια σειρά κριτηρίων επιλογής θα παραχθούν νέα σωματίδια!
- Τα νέα σωματίδια συνήθως διασπώνται στιγμιαία.  
Μπορούμε να τα ανιχνεύσουμε μελετώντας τα υποπαράγωγα των διασπάσεών τους με ειδικούς ανιχνευτές.



■ Άρα χρειαζόμαστε:

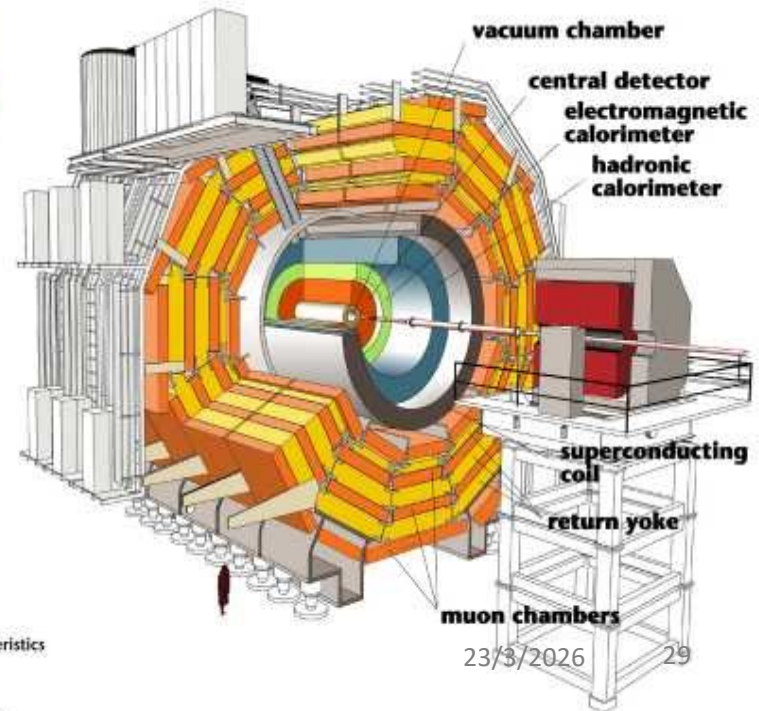
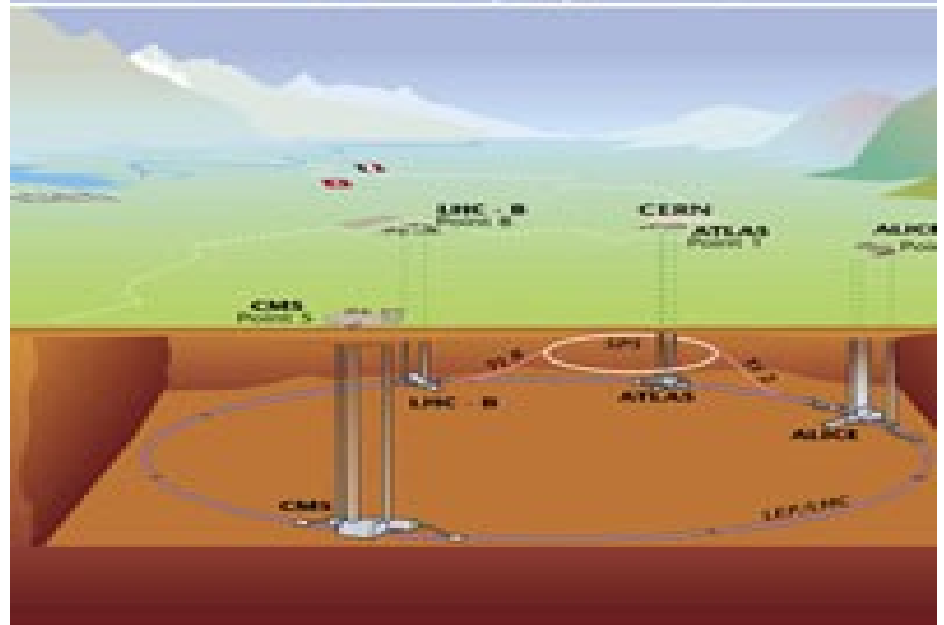
- Σωματίδια «βλήματα» και «στόχους» (φορτισμένα σωματίδια:  $e^-$ ,  $e^+$ ,  $p$ ,  $p\text{-bar}$ , βαρέα ιόντα).
- Διατάξεις που θα επιταχύνουν τα σωματίδια έως ότου συγκρουστούν → Επιταχυντές!
- Ανιχνευτές που θα καταγράψουν την ενέργεια, την ορμή και την τροχιά των παραγόμενων σωματιδίων.
- Λογισμικό που θα επεξεργαστεί τα δεδομένα των ανιχνευτών και θα επιλέξει αυτά που είναι «ενδιαφέροντα» για μελέτη.
- Ανάλυση δεδομένων και εξαγωγή συμπερασμάτων Φυσικής.

Τί είναι το



- CERN (Ευρωπαϊκό Κέντρο Πυρηνικών Ερευνών) : Το μεγαλύτερο εργαστήριο στον κόσμο για μελέτη των στοιχειωδών σωματιδίων της ύλης
- Ιδρύθηκε το 1954
- Βρίσκεται στα σύνορα Γαλλίας-Ελβετίας.
- Αποτελείται από 23 χώρες μέλη, 2 χώρες παρατηρητές καθώς και 2 οργανισμούς παρατηρητές. Η Ελλάδα αποτελεί ιδρυτικό μέλος του .
- Έχει ετήσιο προϋπολογισμό της τάξης του 1 δισ. ευρώ
- Πάνω από 3000 φυσικοί και μηχανικοί εργάζονται μόνιμα στο CERN με 6500 περίπου επιστήμονες και μηχανικούς να το επισκέπτονται κάθε χρόνο (πάνω από 600 συνεργαζόμενα πανεπιστήμια και ινστιτούτα)





Detector characteristics

Width: 22m  
Diameter: 15m  
Weight: 14'500t

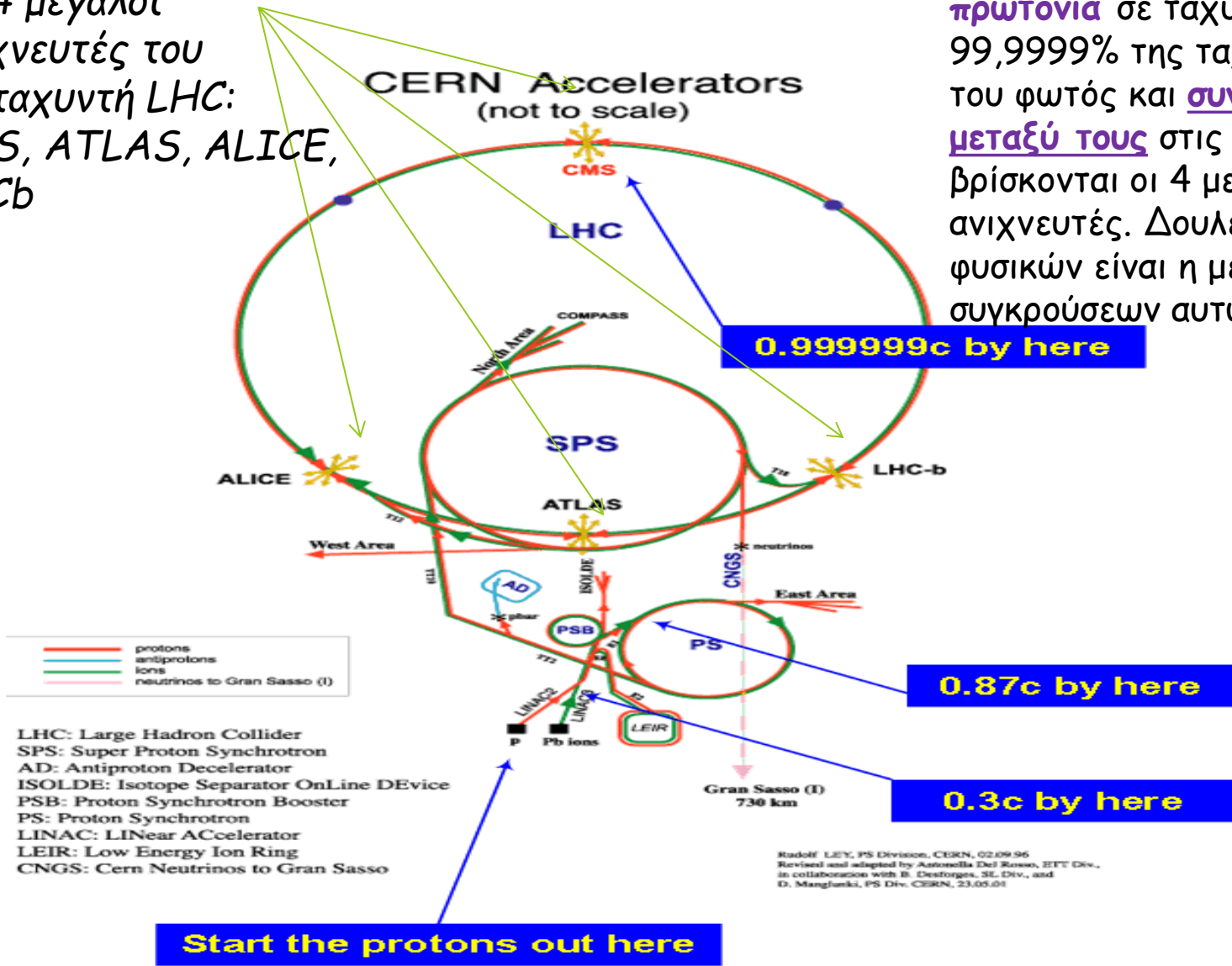
23/3/2026

29

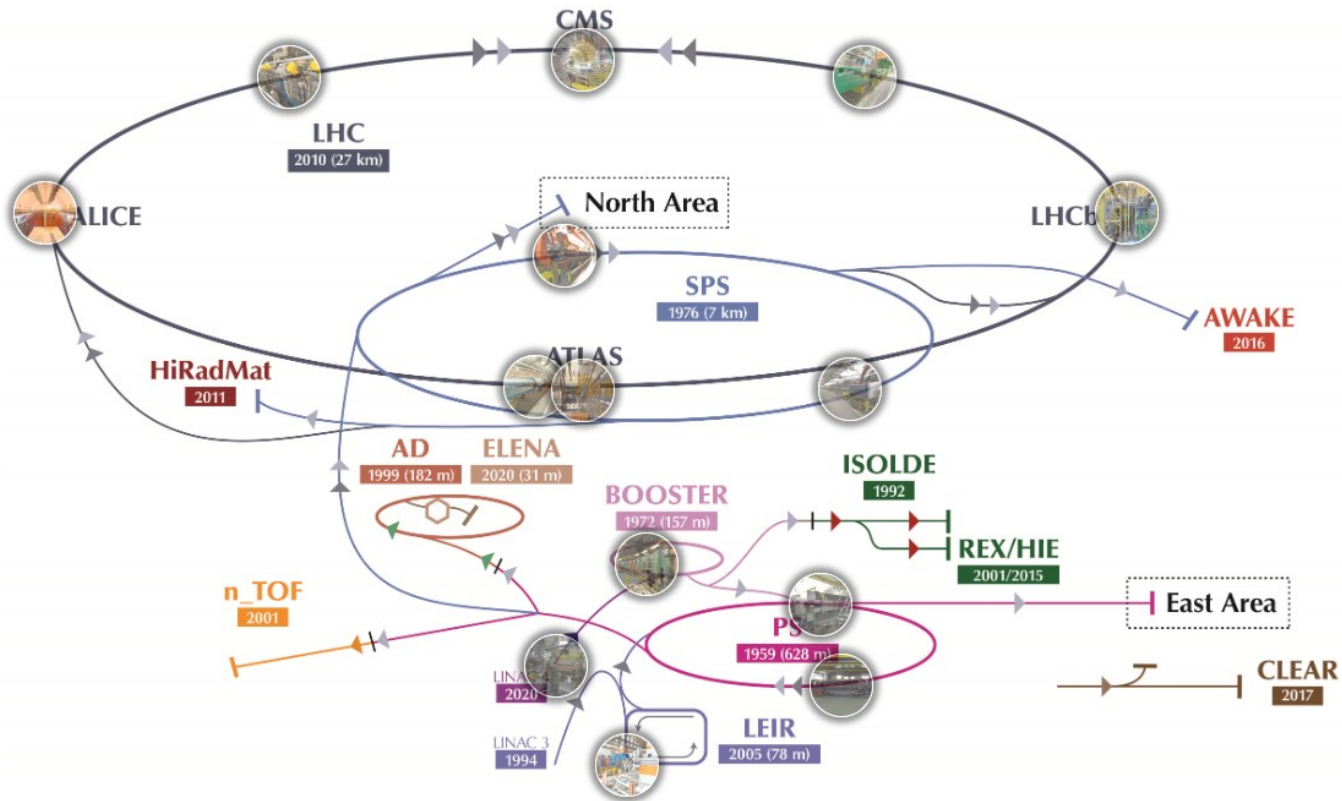
- Αποτελείται από ένα συγκρότημα επιταχυντών . Διατάξεων δηλαδή που επιταχύνουν στοιχειώδη σωματρία (πρωτόνια, ηλεκτρόνια αλλά και βαρέα ιόντα) σε υψηλές ενέργειες και τα αναγκάζουν να συγκρουστούν ώστε να μελετηθούν τα παράγωγα της σύγκρουσής τους.
- Γύρω από το σημείο της σύγκρουσης των σωματιδίων είναι εγκατεστημένοι πολύπλοκοι ανιχνευτές οι οποίοι ανιχνεύουν με ακρίβεια το «αποτύπωμα» των σωματιδίων που παρήχθησαν στην σύγκρουση. Με τον τρόπο αυτό οι Φυσικοί Ερευνούν τις θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις της ύλης και προσπαθούν να 'δούν' το σύμπαν όπως αυτό ήταν λίγο μετά το Big Bang!
- Από το 2008 λειτουργεί στο CERN ο Μεγάλος Επιταχυντής Αδρονίων (Large Hadron Collider), ο οποίος έχει σκοπό την διερεύνηση της ύπαρξης του σωματιδίου Higgs (2012), και την διερεύνηση Φυσικής Πέραν του Καθιερωμένου Προτύπου (Standard Model) της Φυσικής Σωματιδίων

Οι 4 μεγάλοι  
ανιχνευτές του  
επιταχυντή LHC:  
CMS, ATLAS, ALICE,  
LHCb

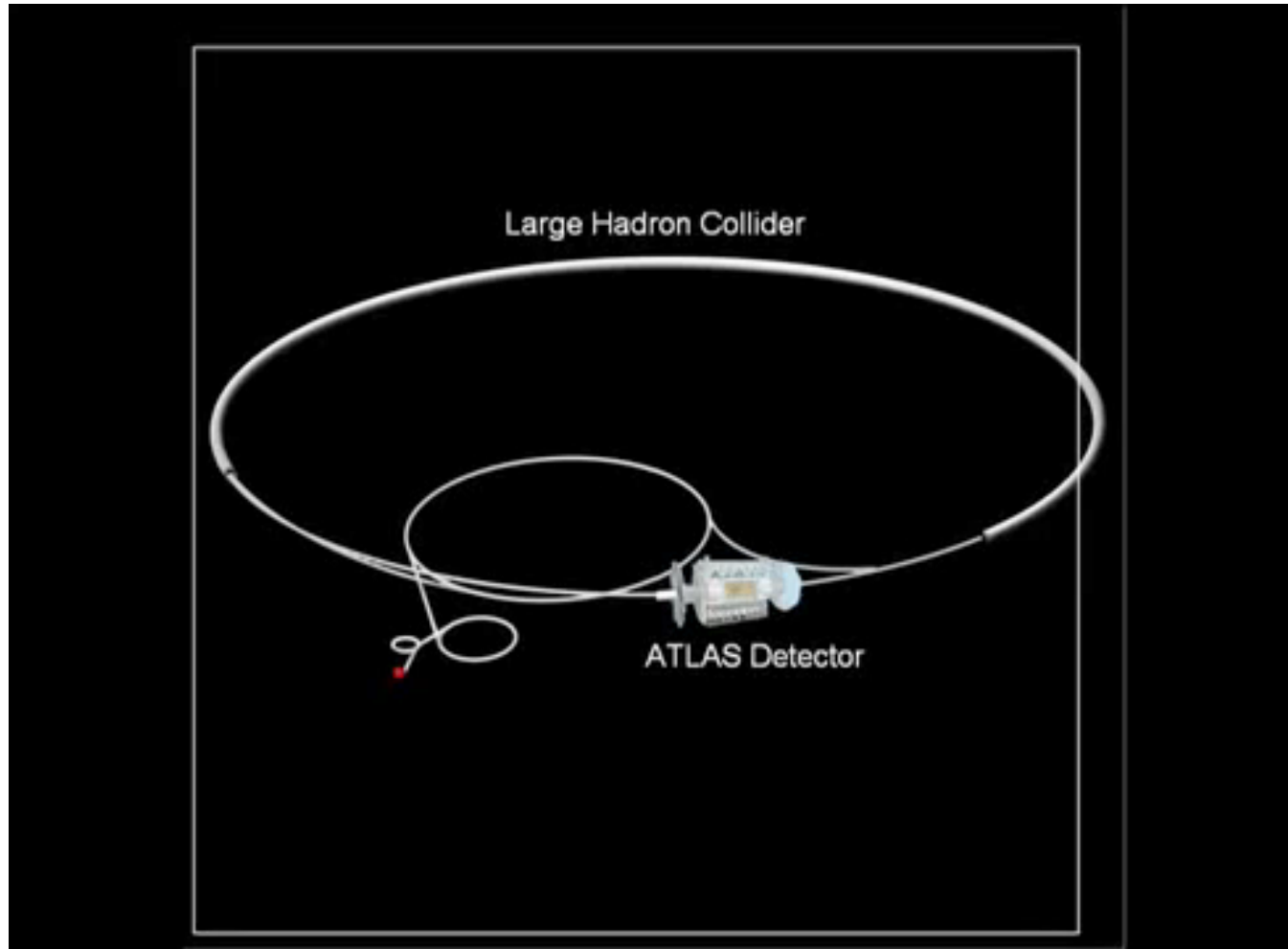
Στον LHC επιταχύνονται  
**πρωτόνια** σε ταχύτητα  
99,9999% της ταχύτητας  
του φωτός και **συγκρούονται  
μεταξύ τους** στις θέσεις που  
βρίσκονται οι 4 μεγάλοι  
ανιχνευτές. Δουλειά των  
φυσικών είναι η μελέτη των  
συγκρούσεων αυτών.



# Ας το δούμε!!



# Ας δούμε πως γίνεται η σύγκρουση σωματιδίων



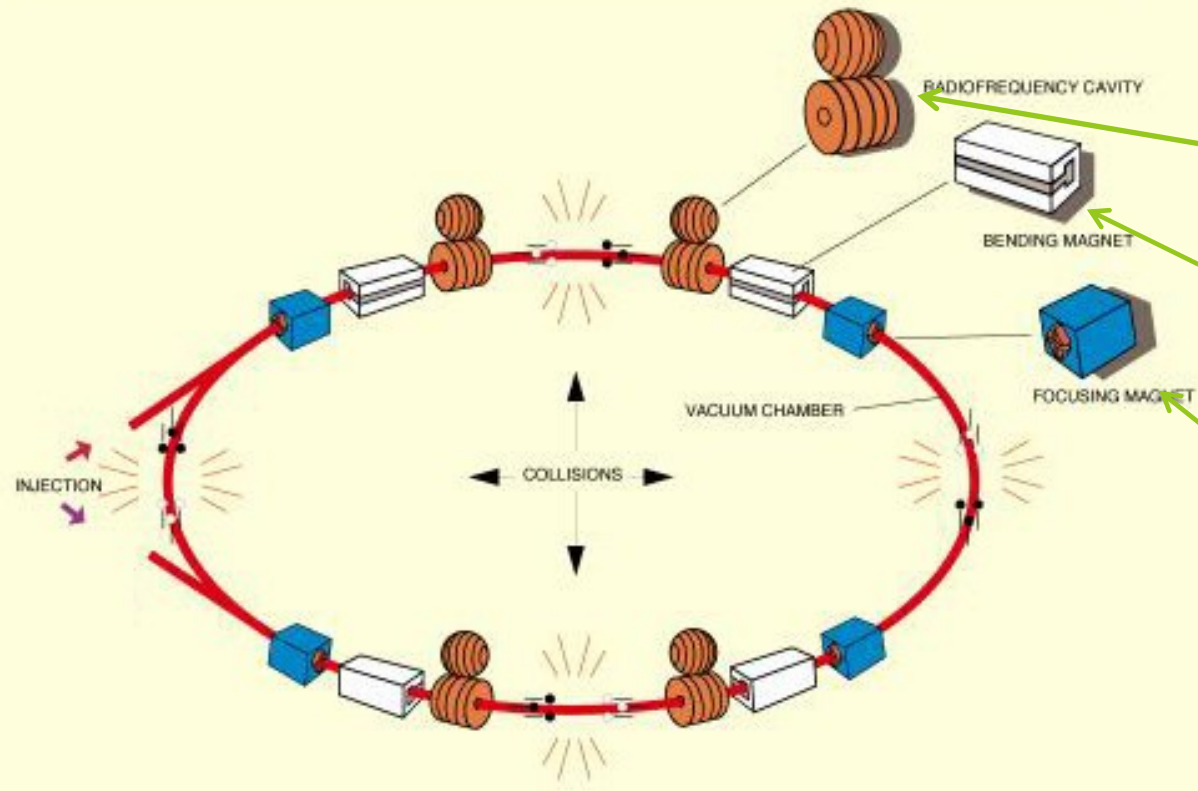
<https://www.youtube.com/watch?v=AHT9RTICqjQ>

# Επιταχύνοντας Σωματίδια

Μάθετε περισσότερα [εδώ](#)

# Τα Κύρια Στοιχεία ενός επιταχυντή

## THE PRINCIPAL MACHINE COMPONENTS OF AN ACCELERATOR



Κοιλότητες  
επιτάχυνσης

Μαγνήτες κάμψης  
της δέσμης  
(δίπολα)

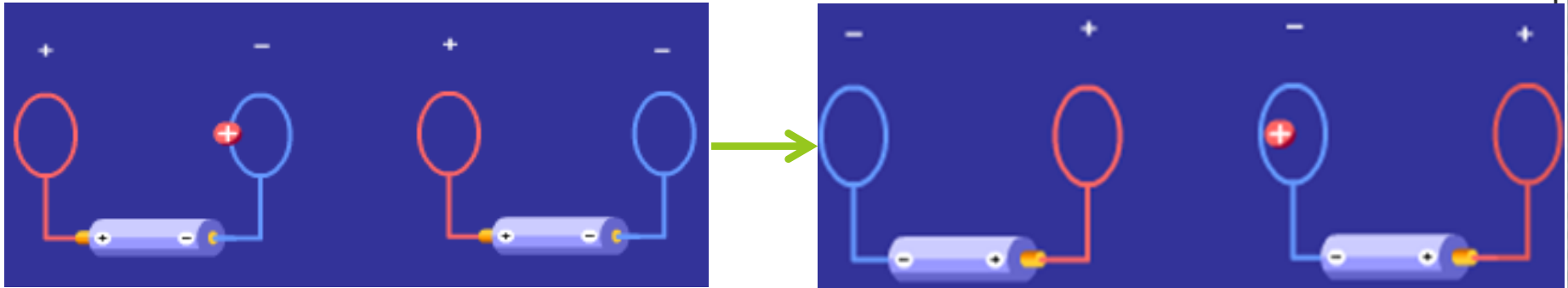
Μαγνήτες  
εστίασης της δέσμης  
(τετράπολα)

Κυκλικοί επιταχυντές: Προσφέρεται ενέργεια στα σωματίδια μέσω των κοιλοτήτων επιτάχυνσης σε κάθε περιστροφή.

Οι δέσμες σωματιδίων παραμένουν σε κυκλική τροχιά: κάμπτονται από διπολικούς μαγνήτες. Η ισχύς των μαγνητών και η ακτίνα του επιταχυντή καθορίζουν τη μέγιστη ενέργεια που μπορούν να αποκτήσουν τα σωματίδια!

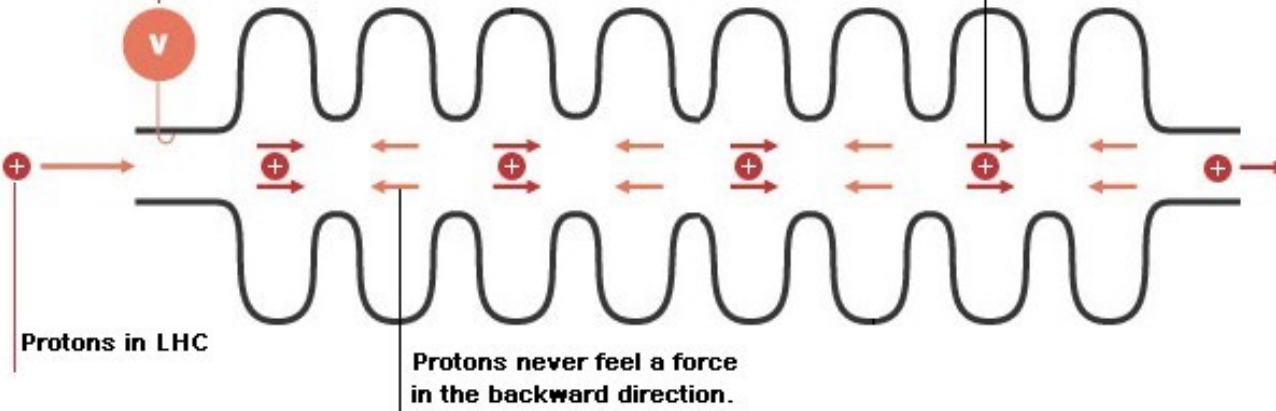
Οι δέσμες σωματιδίων εστιάζονται μέσω τετραπολικών μαγνητών

# Κοιλότητες Ραδιοσυχνότητας (RF) για επιτάχυνση σωματιδίων



A voltage generator induces an electric field inside the RF cavity. Its voltage oscillates with a radio frequency of 400 MHz.

Protons always feel a force in the forward direction.



LHC: 8 κοιλότητες RF, με  $V=2\text{ MV}$ ,  $f = 400\text{ MHz}$

## Μερικοί γρήγοροι υπολογισμοί:

Ένα κουνούπι μάζας  $m = 0,05 \text{ g}$  που πετάει με ταχύτητα  $20 \text{ cm/s}$  έχει κινητική ενέργεια:

$$K = \frac{1}{2} * m * u^2 \rightarrow K = 6 * 10^{-7} \text{ J} \rightarrow K \sim 7 \text{ TeV}$$

→ Δηλαδή η ενέργεια που έχει ένα πρωτόνιο στον LHC !!!



- Κάθε πρωτόνιο κερδίζει:  $\delta E = 2 \cdot 8 = 16 \text{ MeV}$  ανα περιστροφή.
- Περιφέρεια επιταχυντή:  $L = 27 \text{ km}$
- πρωτόνια κινούνται περίπου με  $c = 300.000 \text{ km/s}$

Μία περιστροφή διαρκεί:  $\delta t = L/c = 0,0001 \text{ sec}$

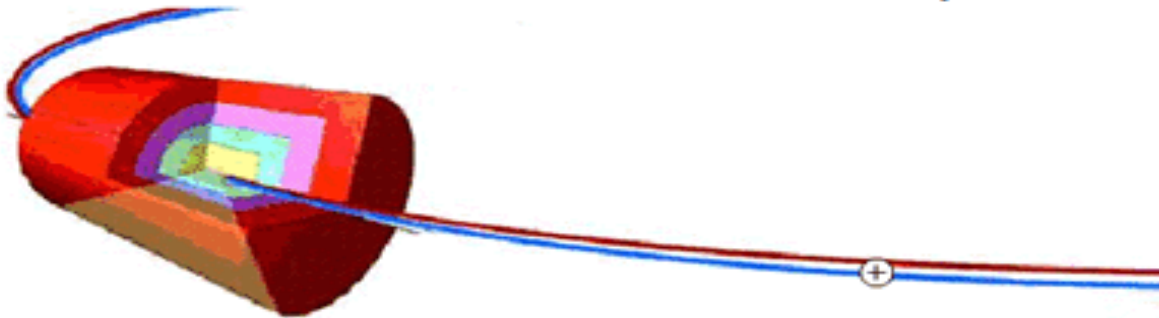
Άρα:  $N = 10.000$  περιστροφές/  $\text{sec}$

Κάθε δευτερόλεπτο το πρωτόνιο κερδίζει ενέργεια:

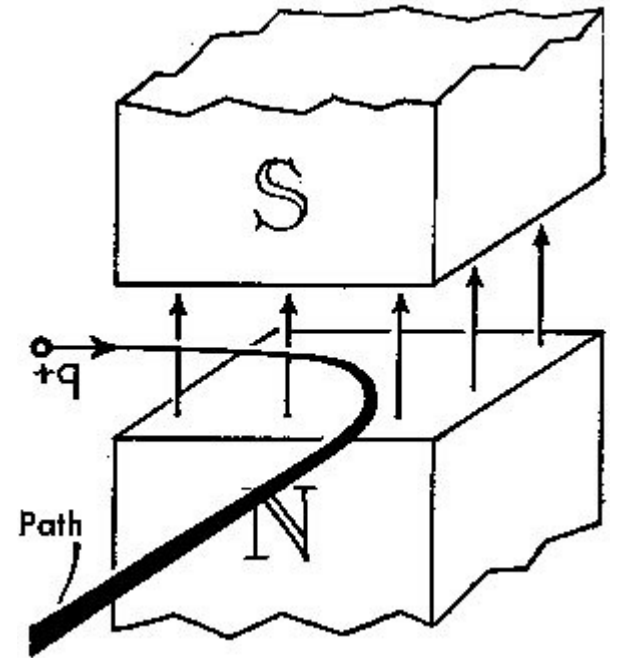
$$\Delta E = N \cdot \delta E \rightarrow \Delta E = 0,16 \text{ TeV}$$

Για να επιταχύνουμε τα πρωτόνια σε ενέργεια 7 TeV θέλουμε μόλις:  
0,44 λεπτά!

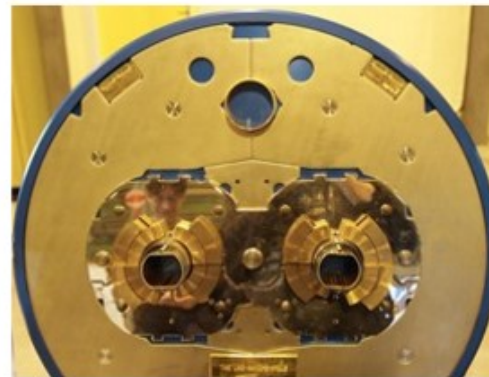
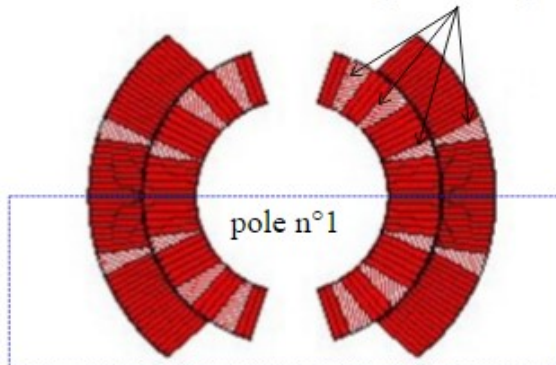
[http://www.lhc-closer.es/taking\\_a\\_closer\\_look\\_at\\_lhc/0.rf\\_cavities](http://www.lhc-closer.es/taking_a_closer_look_at_lhc/0.rf_cavities)



# Διπολικοί μαγνήτες για κάμψη της δέσμης πρωτονίων

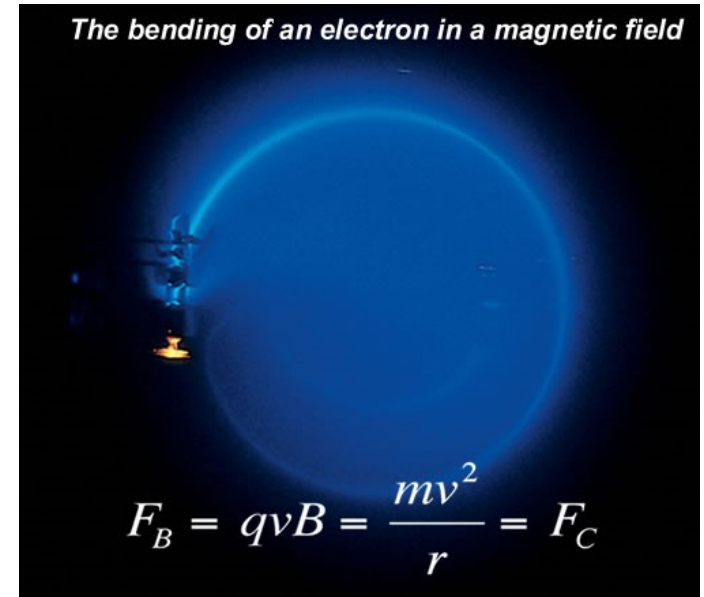


angular wedges



- $B = 8,33 \text{ T}$
- $T = 1,9 \text{ K}$
- $J = 500 \text{ A/mm}^2$
- 1232 διπολικοί μαγνήτες

Πόση ενέργεια μπορούν να αποκτήσουν τα πρωτόνια;  
Μπορώ να τα επιταχύνω επ' άπειρον;



Η μέγιστη ορμή των σωματιδίων, δεδομένου του  $B$  και της ακτίνας της τροχιάς, βρίσκεται από παραπάνω:

$$p(\text{GeV}/c) = 0,3 * B(\text{T}) * R$$

Το μέγεθος του επιταχυντή και η ένταση του μαγνητικού πεδίου περιορίζουν τη μέγιστη ορμή (ενέργεια) που μπορώ να προσφέρω σε ένα σωματίδιο!

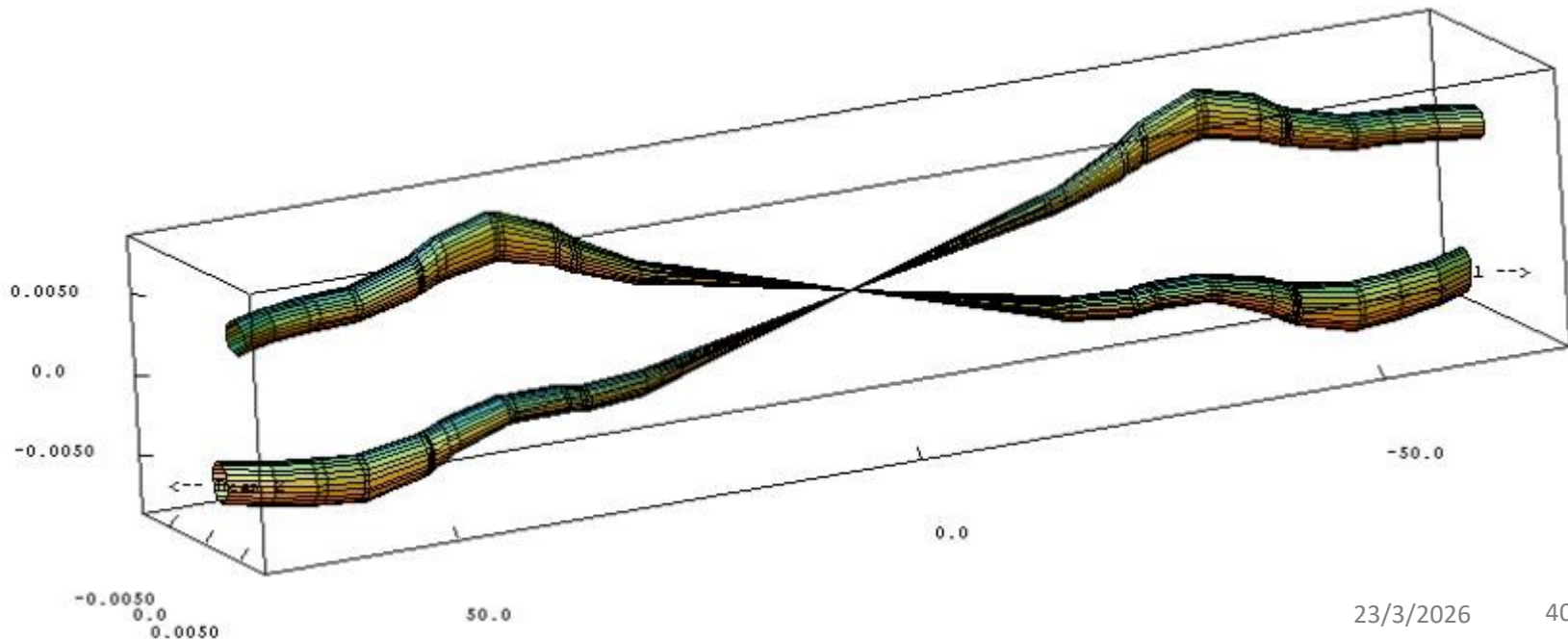
# Εστιάζοντας σωματίδια

Τα πρωτόνια είναι θετικά φορτισμένα σωματίδια.

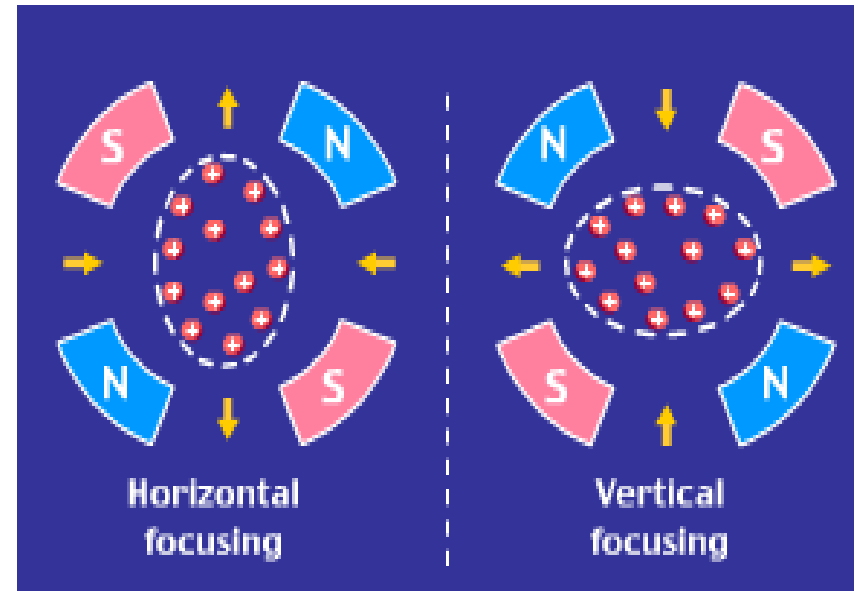
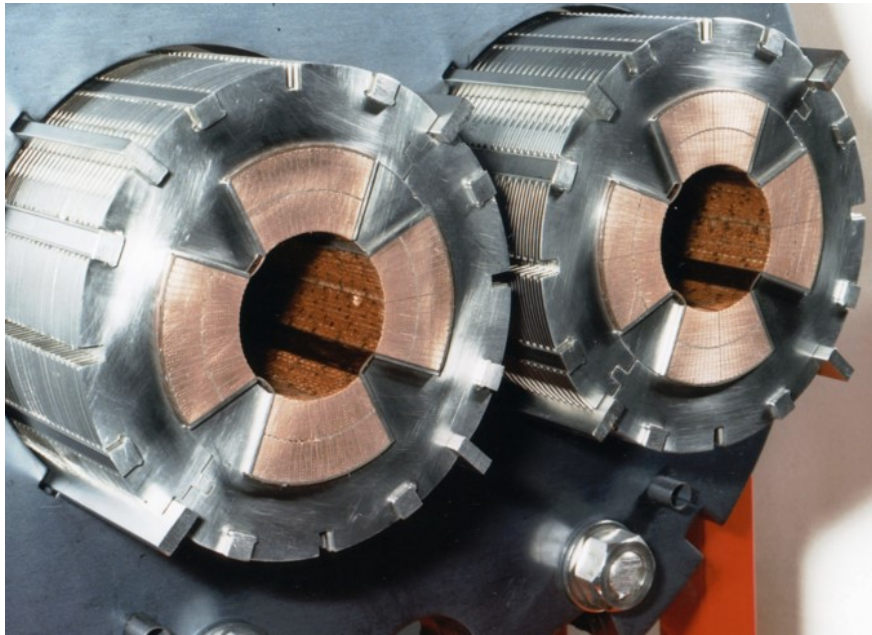
Στον LHC Συγκρούονται συρμοί σωματιδίων με  $1.5 \cdot 10^{11}$  πρωτόνια έκαστος οι οποίοι έχουν συμπιεστεί σε μια μορφολογία «μολυβιού» με μήκος 30cm, και διάμετρο  $\sim$  mm.

Στο σημείο της σύγκρουσης: διάμετρος  $\sim$  16 $\mu$ m για να έχω μεγαλύτερη πιθανότητα σύγκρουσης!!

Πώς συγκρατώ τόσα πολλά πρωτόνια σε τόσο λίγο χώρο;;;



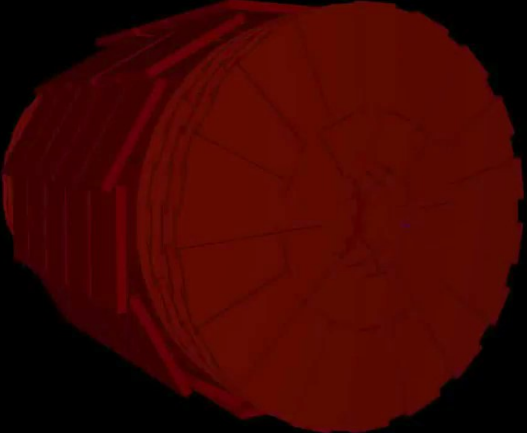
Εστιάζω τη δέσμη και στην οριζόντια και στην κάθετη διάσταση, χρησιμοποιώντας μαγνητικά τετράπολα !



Proton-proton Collision in the ATLAS Experiment  
Higgs particle production



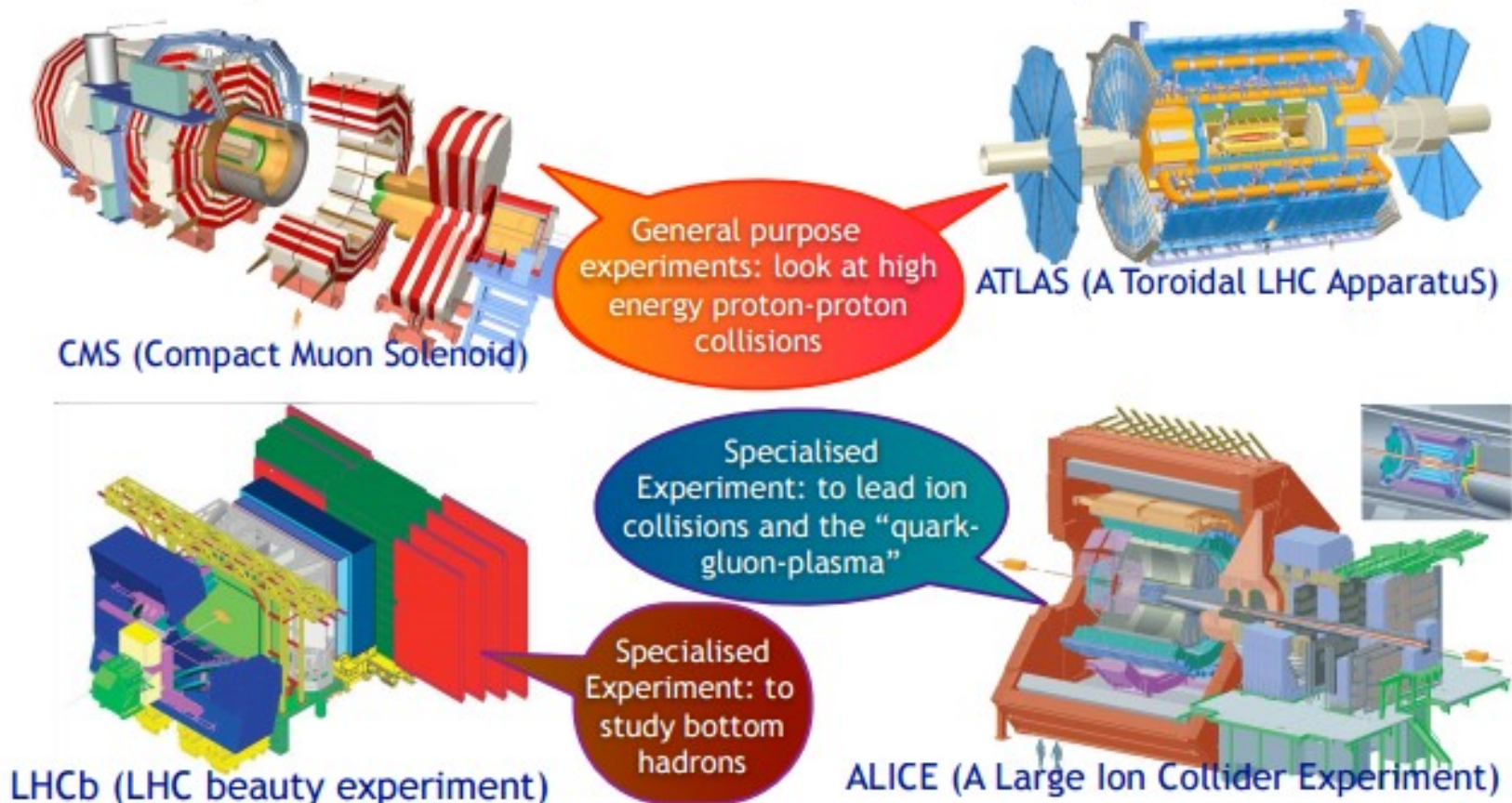
[https://www.youtube.com/watch?v=vvh\\_0\\_1sv3c](https://www.youtube.com/watch?v=vvh_0_1sv3c)



CLAS Experiment at the LHC, CERN  
Sat 2012-12-09 22:34 CEST  
Run 104050 Event 11194635  
C O M Energy 8 TeV  
H>Ostrans Gamma candidate

# Ανιχνεύοντας Σωματίδια

# Οι ανιχνευτές του LHC



Οι ανιχνευτές μετράνε τα εξής «αντικείμενα»:  $e$ ,  $\gamma$ , jets,  $\mu$ ,  $E_{\text{miss}}$

# Σχεδιάγραμμα ενός ανιχνευτή «γενικού σκοπού»

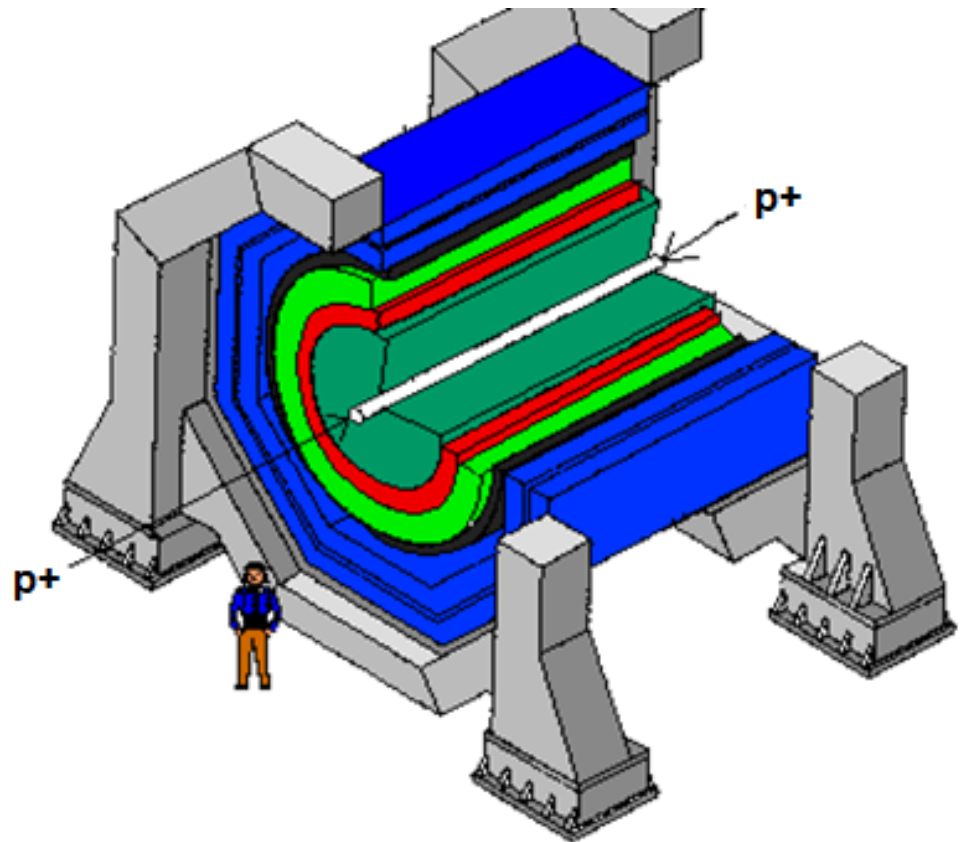
Ανιχνευτής Τροχιών → Μετράει την τροχιά φορτισμένων σωματιδίων

Η/Μ καλορίμετρο → Μετράει την ενέργεια από φωτόνια, ηλεκτρόνια

Αδρονικό καλορίμετρο → Μετράει την ενέργεια αδρονίων - πιδάκων

Μαγνήτης → κάμπει τα παραγόμενα σωματίδια ανάλογα με το φορτίο τους

Ανιχνευτής Μιονίων → Μετράει την ορμή μιονίων



θάλαμος  
ανίχνευσης  
τροχιών

ηλεκτρο-  
μαγνητικό  
καλορίμετρο

αδρονικό  
καλορίμετρο

θάλαμος  
μιογίων

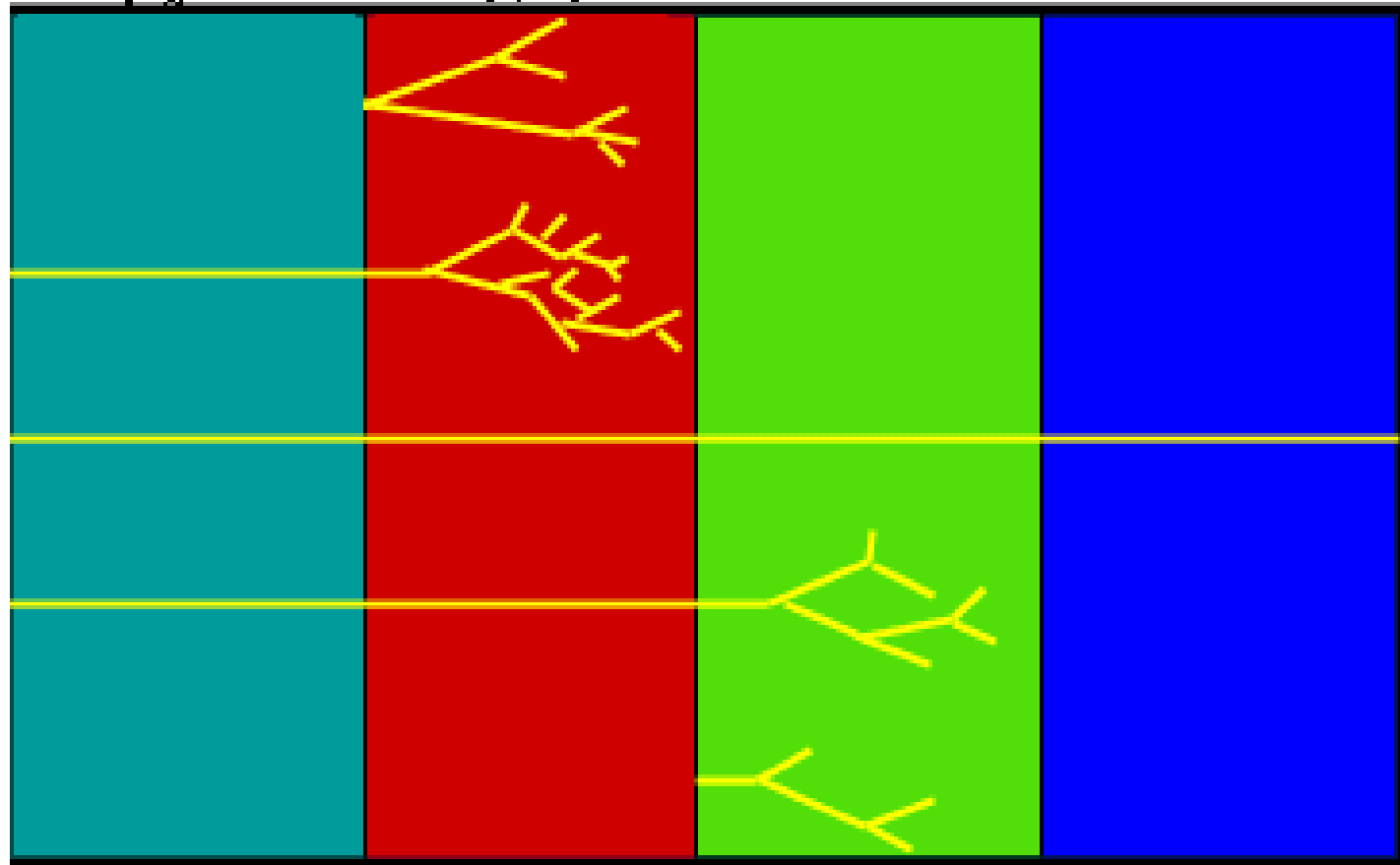
φωτόνια  
→

ηλεκτρόνια  
→  
ποζιτρόνια  
→

μυόνια  
→

πιόνια  
→  
πρωτόνια  
→

νετρόνια  
→



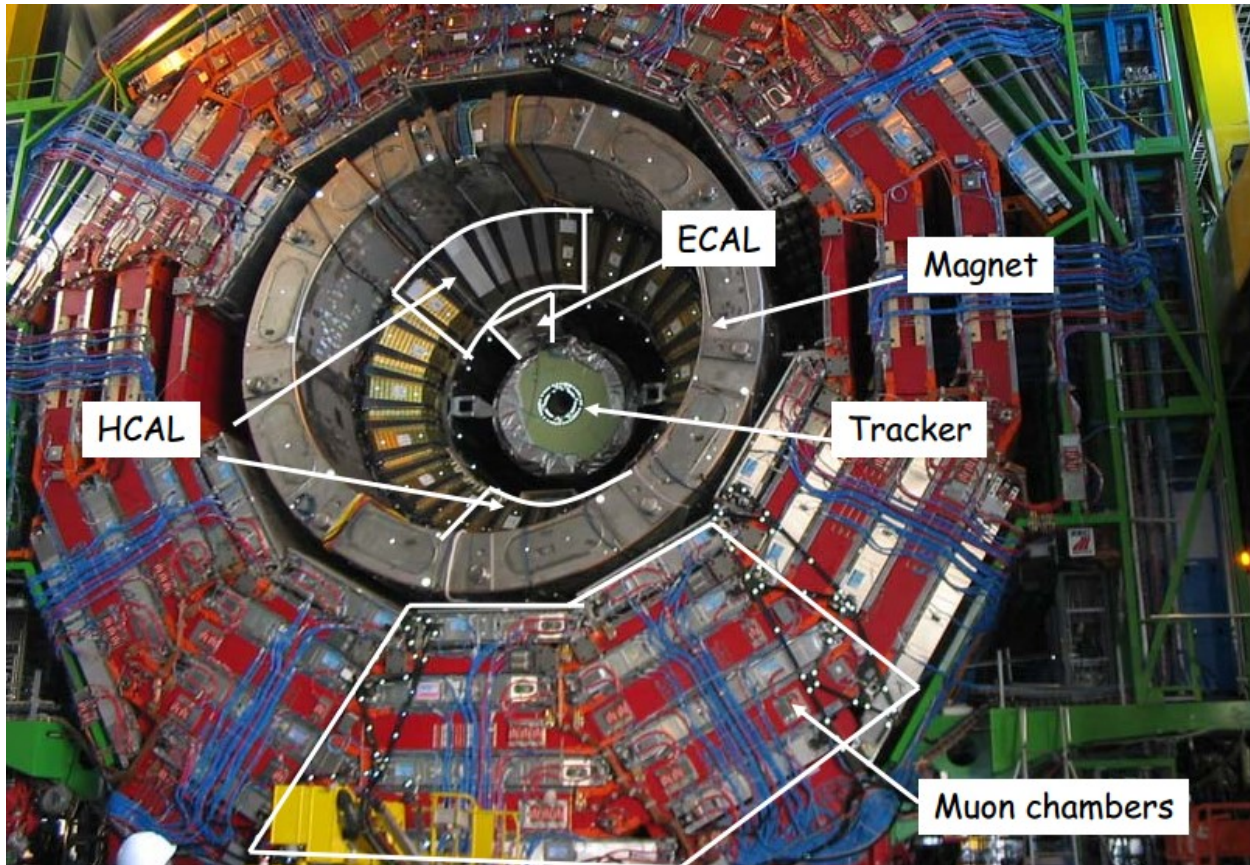
μέσα στρώση



έξω στρώση

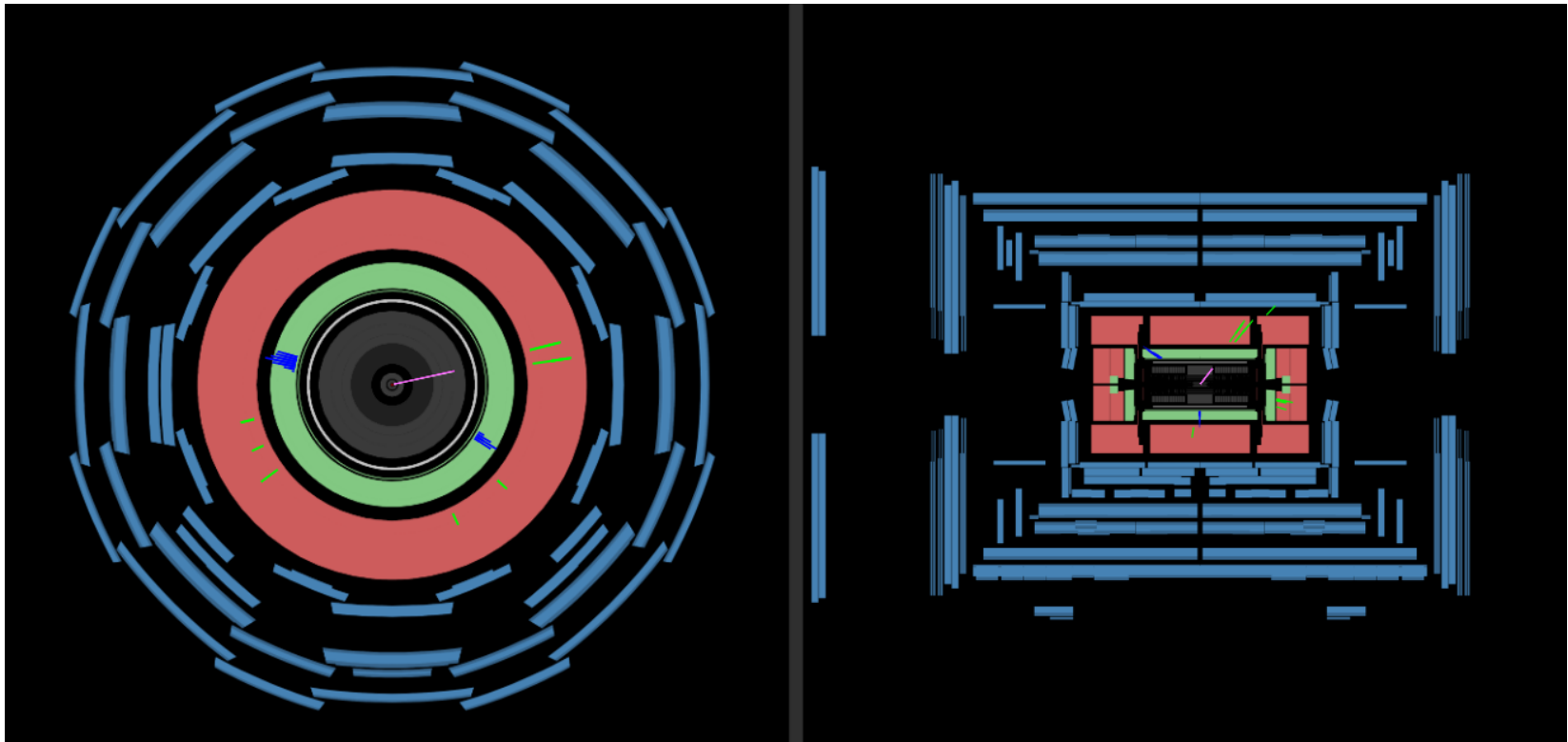
## ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ

Εισερχόμενο σωματίδιο → Αλληλεπίδραση με ανιχνευτή → Εναπόθεση ενέργειας → Μετατροπή αποθηκευμένης ενέργειας σε ηλεκτρικό παλμό → καταγραφή φορτίου παλμού



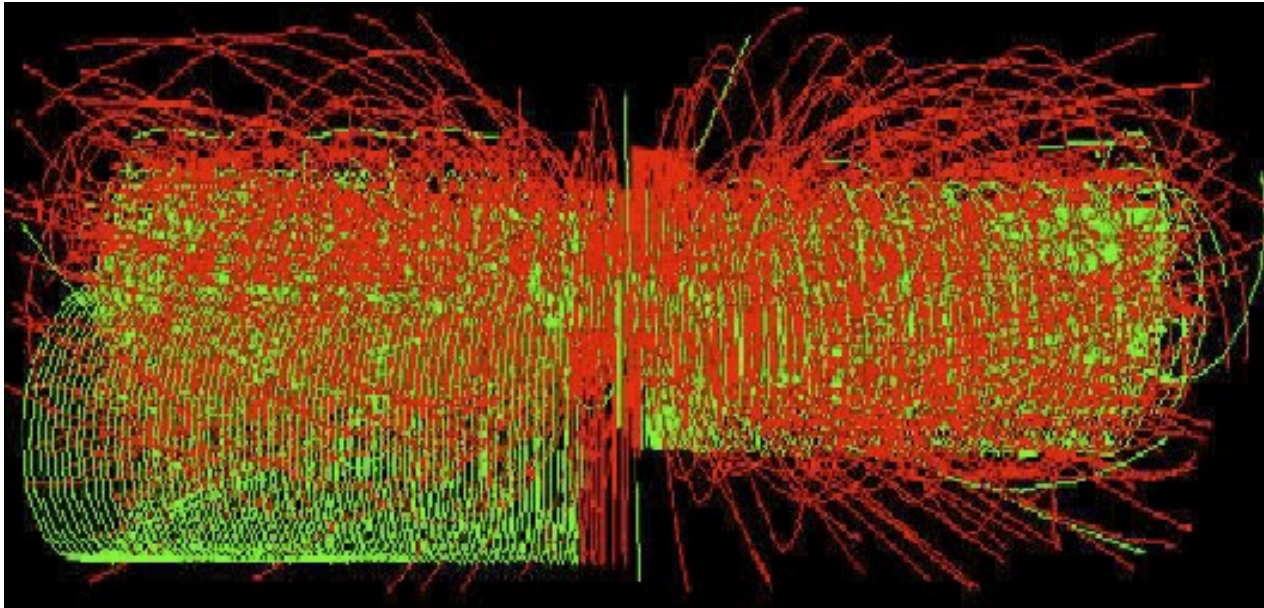
# Εγκάρσια τομή ανιχνευτή

<https://www.zooniverse.org/projects/reinforce/new-particle-search-at-cern/classify>

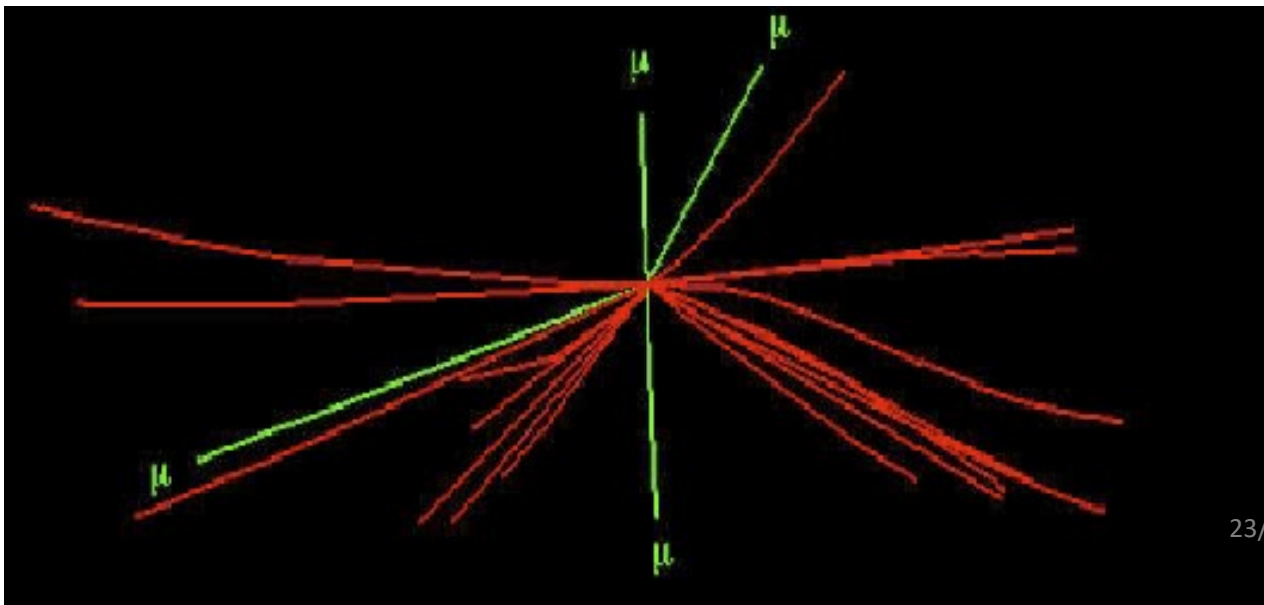


# Σκανδαλισμός Δεδομένων

Σύγκρουση 2 συρμών πρωτονίων: Εικόνα πριν τον σκανδαλισμό



Σύγκρουση 2 συρμών πρωτονίων: Εικόνα μετά τον σκανδαλισμό: Διάσπαση  $H \rightarrow 4\mu$  !

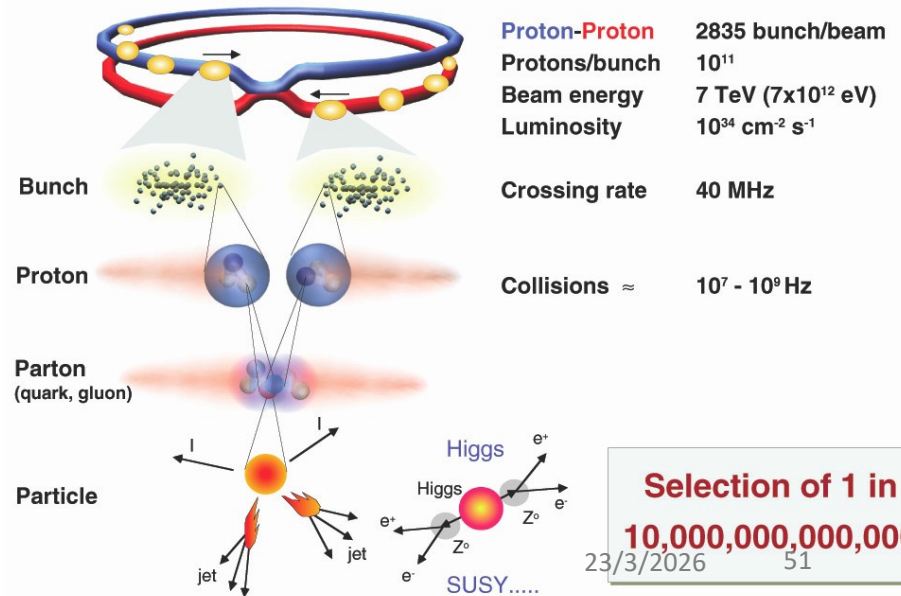
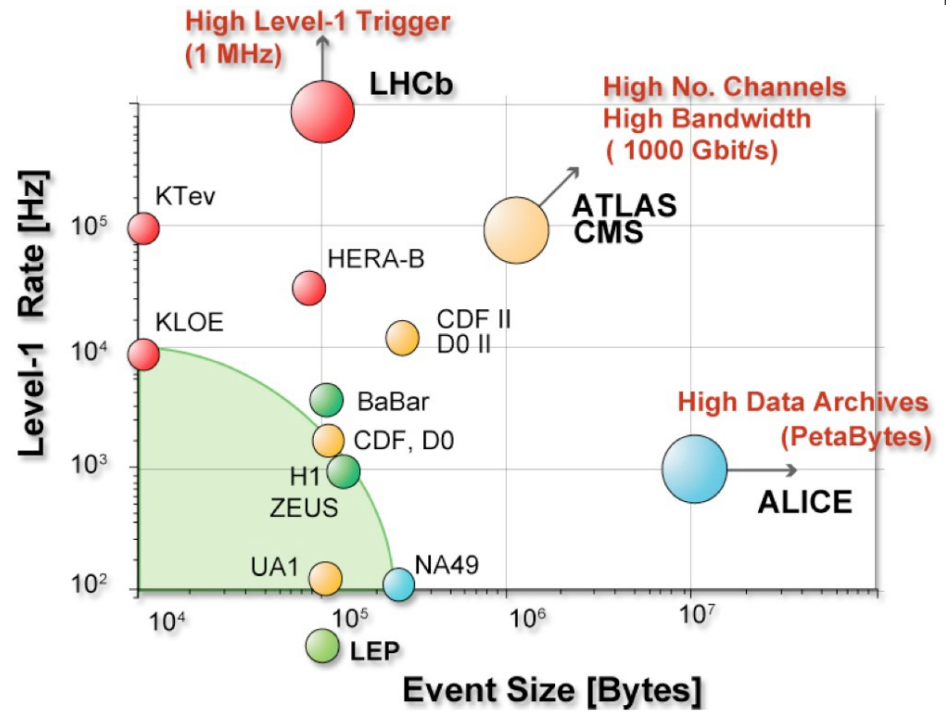


- Είναι όλα τα δεδομένα που ανιχνεύει ο ανιχνευτής μας «χρήσιμα»; Χρειαζόμαστε ένα σύστημα σκανδαλισμού → επιλογή των χρήσιμων δεδομένων Online. (π.χ κρατάμε δεδομένα στα οποία η ενέργεια των μιονίων είναι πάνω από μια τιμή)

- Τα περισσότερα δεδομένα αφορούν σε γνωστές διαδικασίες φυσικής → αναζητούμε «Νέα Φυσική» η οποία έρχεται σε αναλογία τουλάχιστον  $1:10^{13}$  ως προς τα τετριμμένα!!

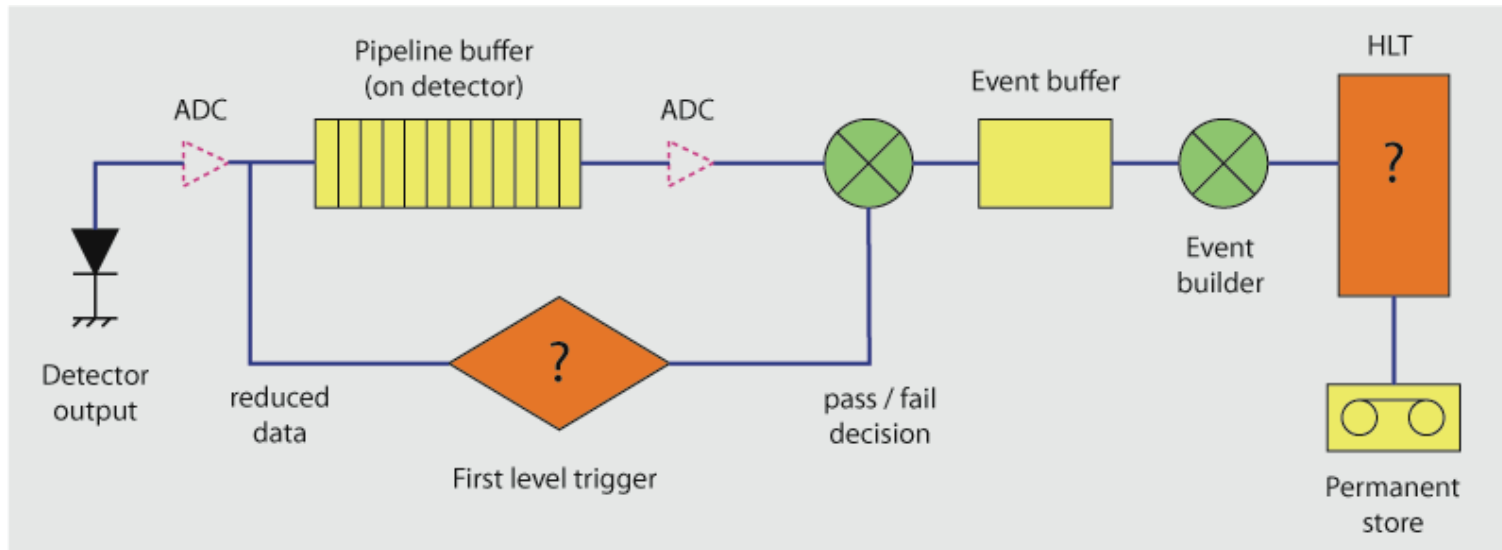
- Σκεφτείτε: Οι συγκρούσεις στα πειράματα ATLAS, CMS γίνονται με μια συχνότητα 40MHz και κάθε σύγκρουση παράγει 1-2 MB δεδομένων: ~60 TB/s !!!! Τέτοιος όγκος δεδομένων δεν μπορεί να καταγραφεί!!!!

- Εξαιρετικά δύσκολη διαδικασία - online - Αν γίνει ένα λάθος, δεν μπορεί να διορθωθεί εκ των υστέρων!!



**Selection of 1 in  
10,000,000,000,000**

23/3/2026 51



Τα μεγάλα πειράματα όπως αυτά του CERN, χρησιμοποιούν ένα σύστημα σκανδαλισμού όπως αυτό που περιγράφεται παραπάνω.

- Στο Πρώτο επίπεδο (Level 1), επιλέγεται γρήγορα online από ψηφιακά ηλεκτρονικά (FPGAs) ο όγκος χρήσιμων δεδομένων ανάλογα με τα πρώτα κριτήρια επιλογής μας πάνω σε απλά αντικείμενα. (40 MHz  $\rightarrow$  100 kHz)
- Στο Υψηλό επίπεδο (HLT), επιλέγονται τα δεδομένα που πληρούν σύνθετα κριτήρια επιλογής offline. Τα δεδομένα αυτά αποθηκεύονται μόνιμα για ανάλυση. (100 kHz  $\rightarrow$  100Hz)

Επιτυγχάνουμε μια ροή δεδομένων : 150 MB/s

Αναλύοντας δεδομένα από μια σύγκρουση σωματιδίων

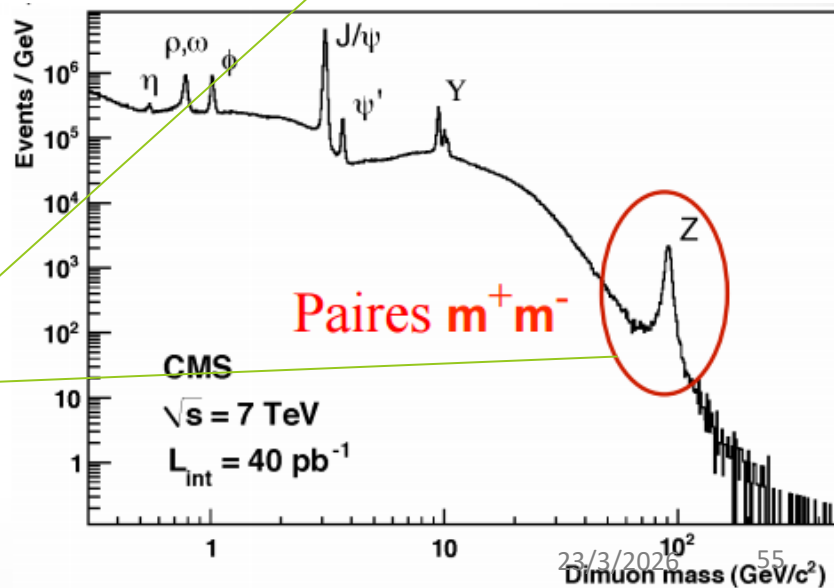
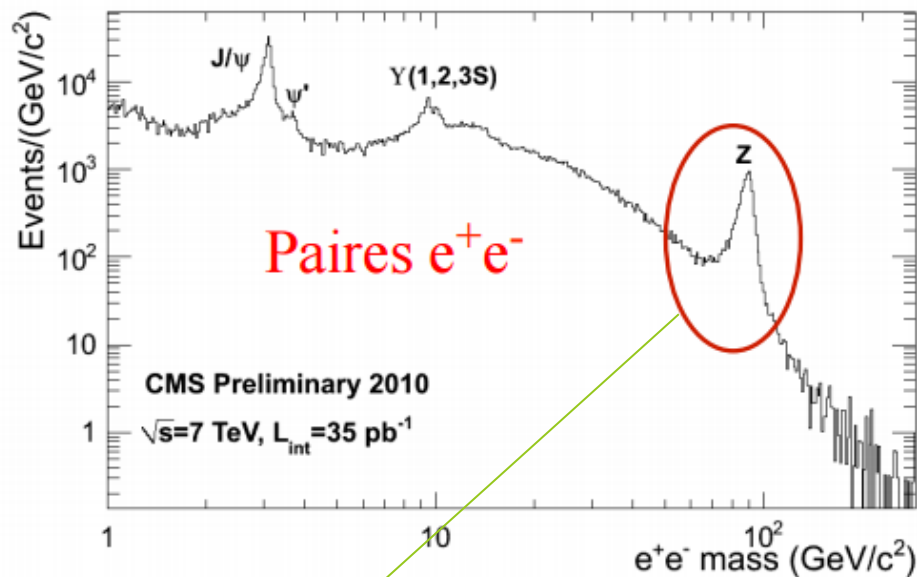
Ψάξτε κι εσείς το σωματίδιο Z και το σωματίδιο Higgs

Είναι η διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων που προέκυψαν μετά τον σκανδαλισμό για άντληση συμπερασμάτων φυσικής.

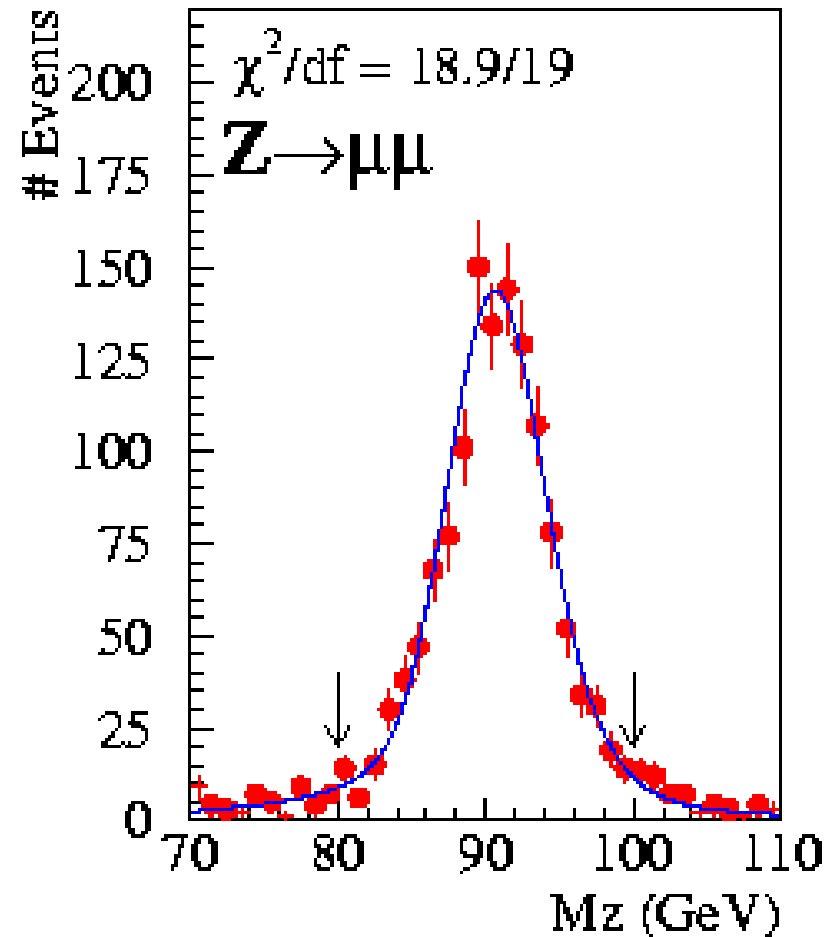
- Σε πρώτη προσέγγιση μοιάζει με μια απλή άσκηση στατιστικής:
  - Θέλουμε να μετρήσουμε π.χ τους ανθρώπους που βρίσκονται στο μετρό συναρτήσει της ηλικίας τους.
  - Κατατάσσουμε τους ανθρώπους ανα ηλικιακή ομάδα (π.χ 10-15, 15-20, 20-25 κλπ).
  - Παρουσιάζουμε τα αποτελέσματά μας σε ένα ιστόγραμμα.
  - Αντλούμε πληροφορίες από το ιστόγραμμά μας.
- Είναι αλήθεια τόσο εύκολο;
  - Πόσο χρόνο διαρκεί η μέτρηση που κάναμε;
  - Θα έχουμε τα ίδια αποτελέσματα αν μετρήσουμε τους επιβάτες του μετρό ανάμεσα στις 07:00 - 09:00 με μια μέτρηση στις 15:00-17:00 ;
  - Θα έχουμε τα ίδια αποτελέσματα κάθε μέρα;
  - *Φανταστείτε πόσο πιο δύσκολη θα είναι η δουλειά μας αν θέλουμε να απομονώσουμε τους άνδρες ηλικίας 50-51 ετών με τουλάχιστον 1 παιδί...*
- Σκεφτείτε τώρα το εξής:
  - Τι θα συμπεράνουμε αν κάθε μέρα μεταξύ 14:00 - 14.30 παρατηρήσουμε στο ιστόγραμμά μας ότι έχουμε μεγάλο πληθυσμό νέων 13-17 ετών;
  - Τι θα συμπεράνουμε αν κάθε μέρα μεταξύ 05:00 - 06:00 παρατηρήσουμε στο ιστόγραμμά μας ότι έχουμε μεγάλο πληθυσμό καλοντυμένων νέων 18-30;

# Μελέτη διασπάσεων του σωματιδίου Z<sup>0</sup>

- Μελετάμε γεγονότα με δύο μίονια ή δύο ηλεκτρόνια στην τελική κατάσταση.
- Ορίζουμε την παράμετρο ενδιαφέροντος: Εδώ η «αναλλοίωτη μάζα» των δύο λεπτονίων.
- Κατασκευάζουμε το ιστόγραμμα της κατανομής των γεγονότων συναρτήσει της μάζας. Βλέπουμε και στις δύο περιπτώσεις μια «κορυφή» σε περιοχή μαζών που η θεωρία μας λέει ότι θα βρίσκεται το μποζόνιο Z.

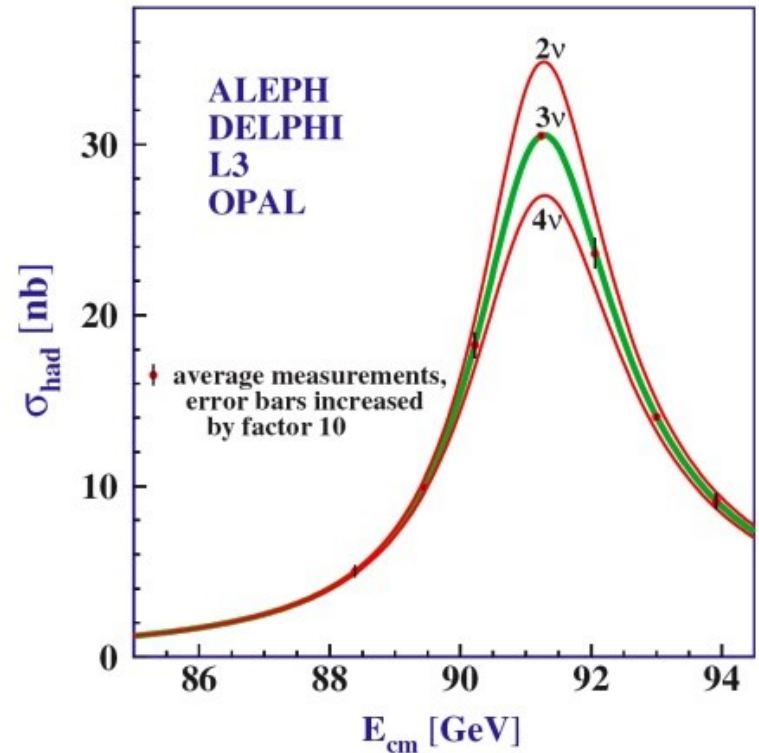
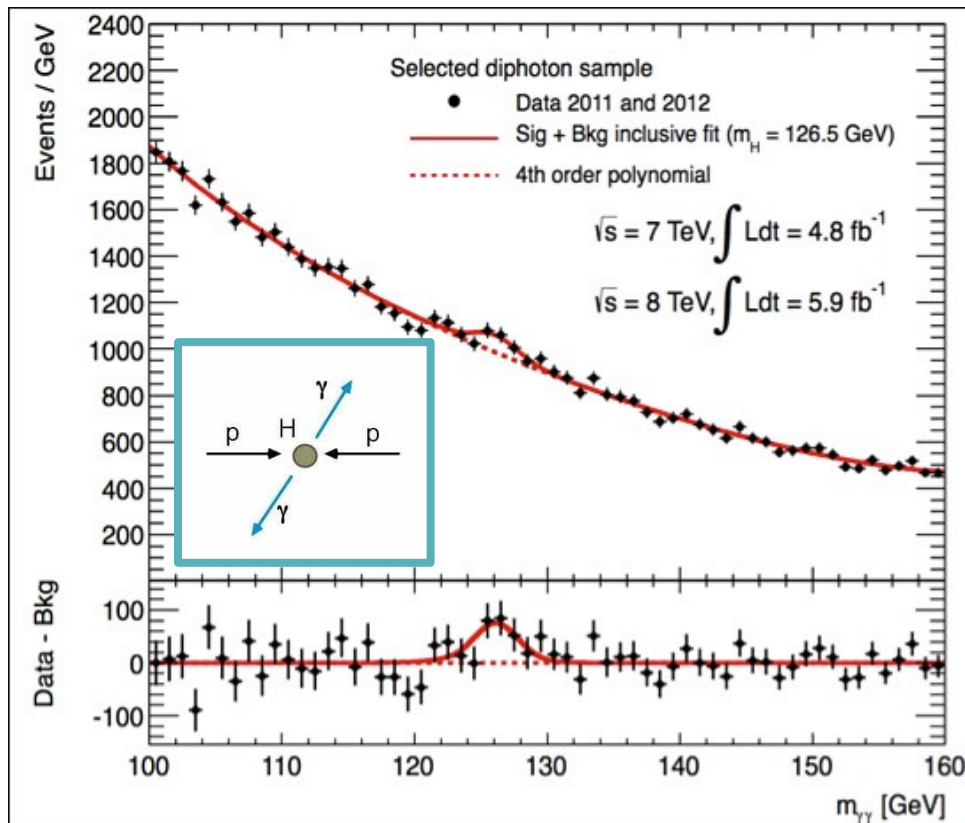


- Στη συνέχεια αφαιρούμε το «υπόβαθρο» για να απομονώσουμε την κορυφή που αντιστοιχεί στο Z.
- Προσαρμόζουμε μια κατάλληλη καμπύλη στα δεδομένα μας. Απο τα αποτελέσματα της προσαρμογής μπορούμε να βρούμε τη θέση της κορυφής που αντιστοιχεί στη μάζα του Z, και το εύρος της που παραπέμπει στο χρόνο ζωής του αν συμπεριλάβουμε και τη διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή.
- Μόλις είδαμε σε 2 διαφάνειες μια ανάλυση που για να γίνει απαιτεί εβδομάδες!!!



Αυτή είναι η δουλειά ενός πειραματικού φυσικού:

Να βεβαιωθεί ότι η διάταξή του δουλεύει καλά, να λύσει τα προβλήματα, να αντλήσει καλά δεδομένα και να βγάλει αποτελέσματα από αυτά που συνεισφέρουν κάτι παραπάνω στη γνώση μας για το σύμπαν!!!



Ανακάλυψη σωματιδίου Higgs!

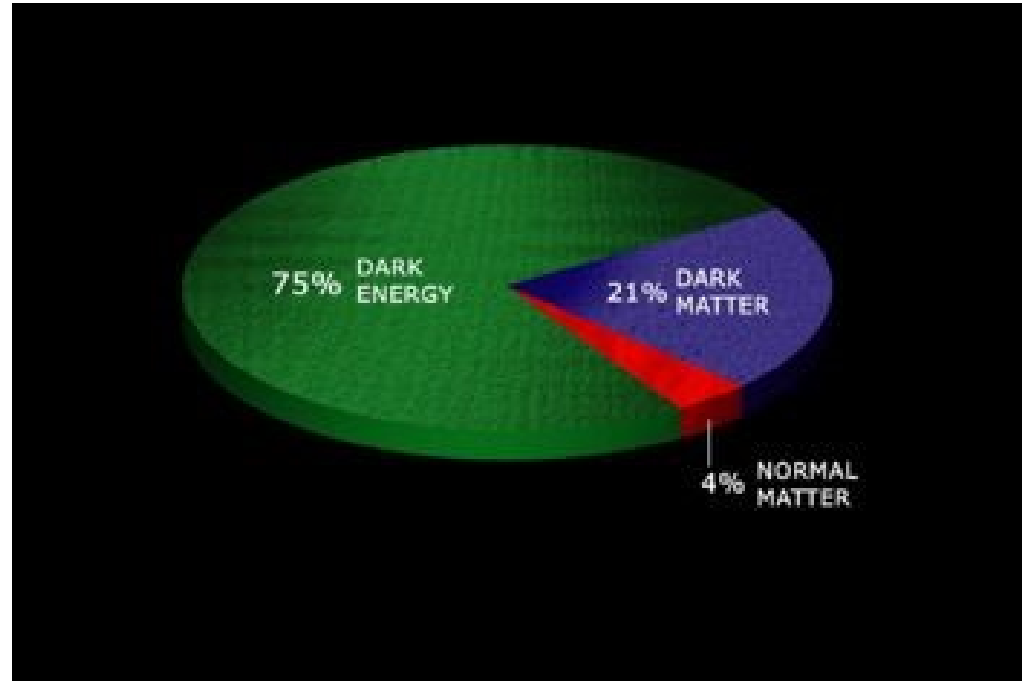
Ανακάλυψη ότι υπάρχουν 3 «οικογένειες» ελαφρών νετρίνο!

# Ανοιχτά ερωτήματα

# Σκοτεινή Ύλη

■ Η Φύση της σκοτεινής ύλης:

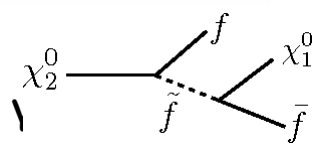
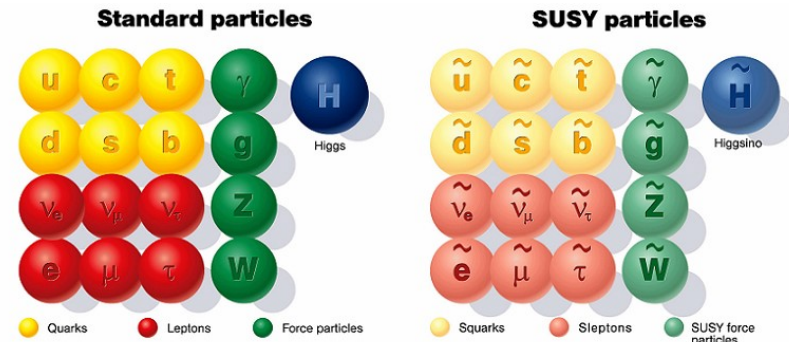
Από το σύμπαν, μόνο το 4% αποτελείται από ύλη που αλληλεπιδρά με το φως. Το 21% αποτελείται από την «Σκοτεινή Ύλη» και το υπόλοιπο 75% αποτελείται από την «Σκοτεινή Ενέργεια». Ποιά είναι η φύση τους;



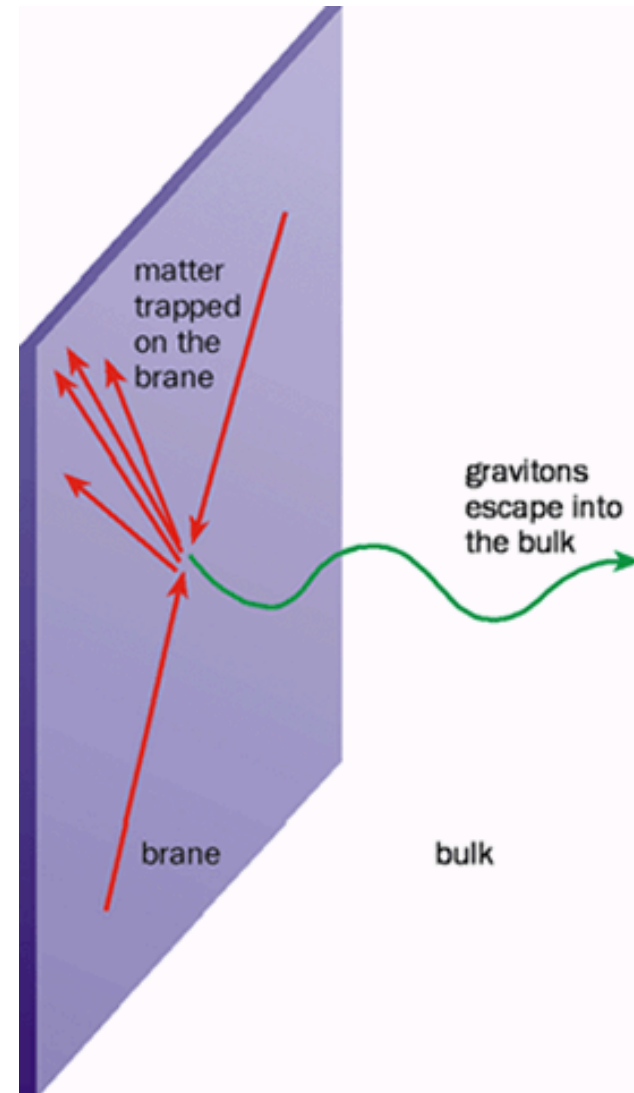
Υπερσυμμετρία: Μια φυσική θεωρία

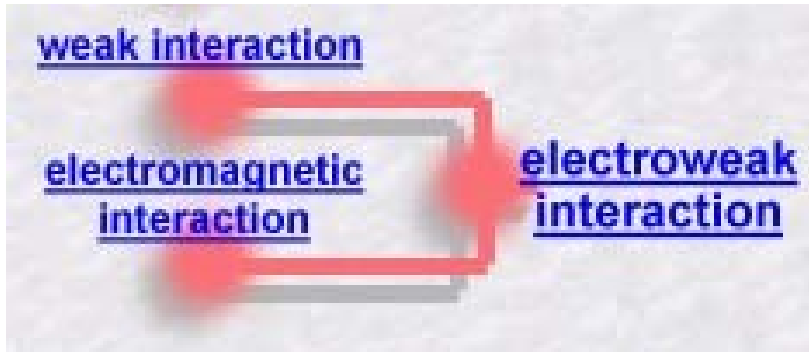
που προτείνει την ύπαρξη μίας νέας ομάδας σωματιδίων «υπερ-εταίρων» των γνωστών σωματιδίων.

Το πιο ευσταθές από αυτά, θεωρείται ο επικρατέστερος υποψήφιος  $\chi$  την εξήγηση της σκοτεινής ύλης.



Υπάρχουν εξτρά διαστάσεις στον χώρο;  
Γιατί η βαρύτητα είναι τόσο ασθενής συγκριτικά  
με τις άλλες δυνάμεις;

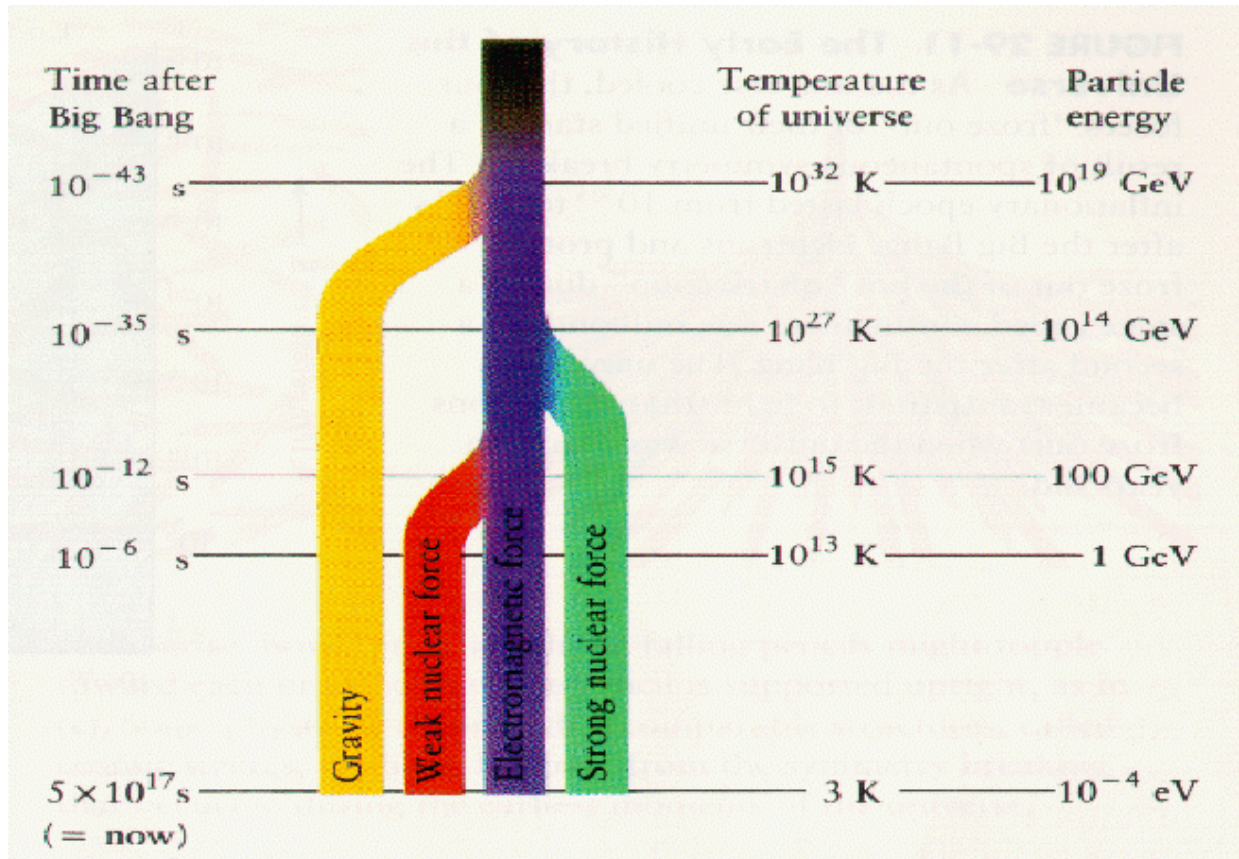




Neutral weak interaction



Electromagnetic interaction



Ενοποιούνται οι 4 γνωστές δυνάμεις της Φύσης σε μία και μοναδική αλληλεπίδραση:

- Όσο μεγαλύτερη η διαθέσιμη ενέργεια τόσο πιο « « πίσω στον χρόνο» » μπορούμε να πάμε και να καταλάβουμε τις συνθήκες στο αρχέγονο σύμπαν αλλά και πιο βαθιά στο εσωτερικό της ύλης.
- Υπάρχει βαθύτερη δομή της ύλης;  
Πώς ήταν το σύμπαν στις πρώτες του στιγμές;  
Η Φυσική που γνωρίζουμε ισχύει στις πολύ υψηλές ενέργειες;

# Μάθετε περισσότερα

- <https://www.frontiers-project.eu/high-energy-physics/>
- <https://www.zooniverse.org/projects/reinforce/new-particle-search-at-cern>
- <https://hypatia.iasa.gr/>

**I do not know what  
I may appear to the world,  
but to myself I seem to have  
been only like a boy  
playing on the seashore,  
and diverting myself  
in now and then  
finding a smoother pebble  
or a prettier shell than ordinary,  
whilst the great ocean of truth  
lay all undiscovered before me.**

**— Isaac Newton**



More science quotes at Today in Science History [todayinsci.com](http://todayinsci.com)