

ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΣΤΗ ΦΥΣΙΚΗ ΤΩΝ ΥΨΗΛΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ (ΦΥΕ)

Ανιχνευτές και Μεθοδολογία I

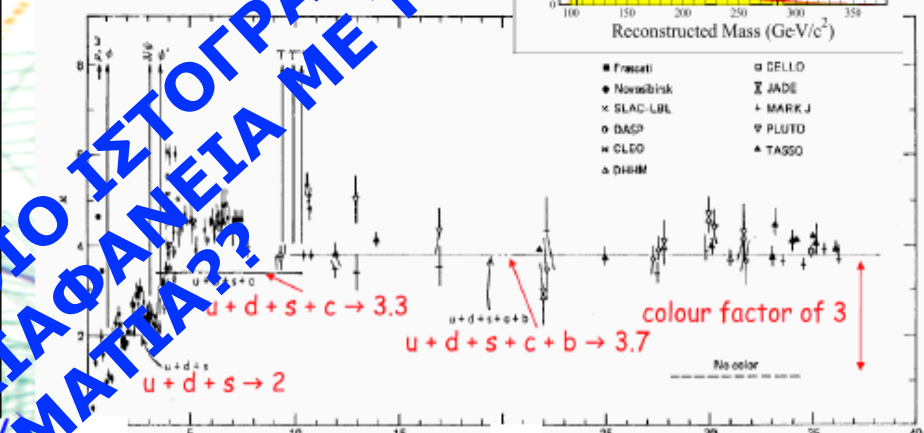
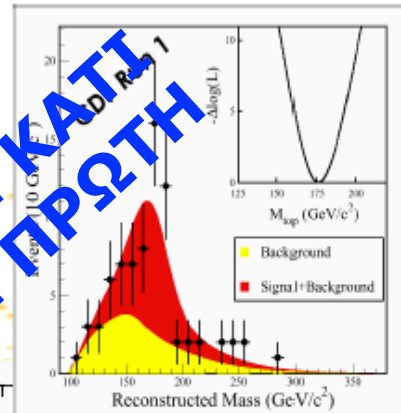
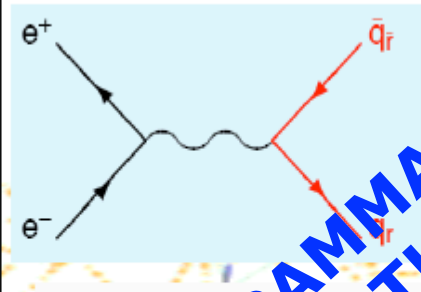
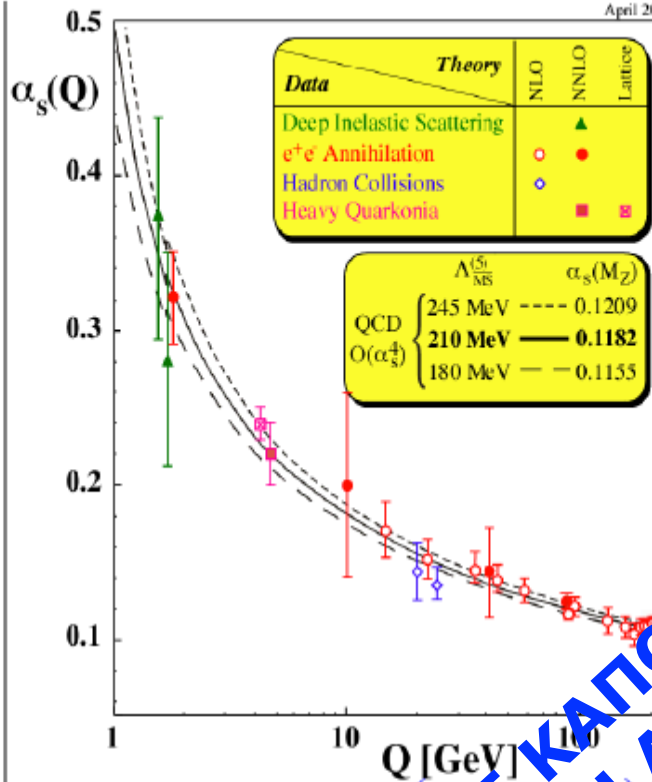
Ευάγγελος Ν. Γαζής, Καθηγητής ΕΜΠ
Βενέτης Πολυχρονάκος, Ερευνητής BNL (USA)
Σωτήρης Βλάχος, Ερευνητής ΕΜΠ-CERN

Σύνοψη

- Εισαγωγή και Αντικείμενο Μελέτης

- Ιδιότητες των Στοιχειωδών Σωματιδίων
 - Ποιές ποσότητες μετράμε?
 - Πώς τις μετράμε?

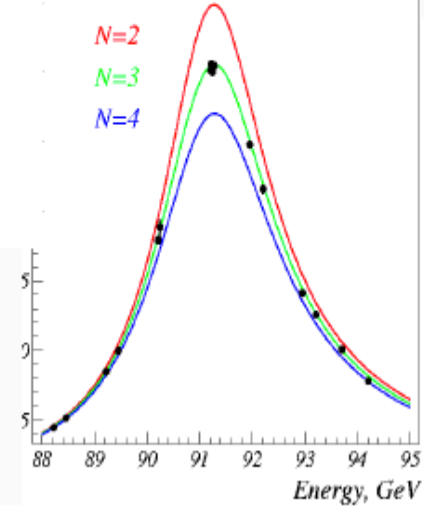
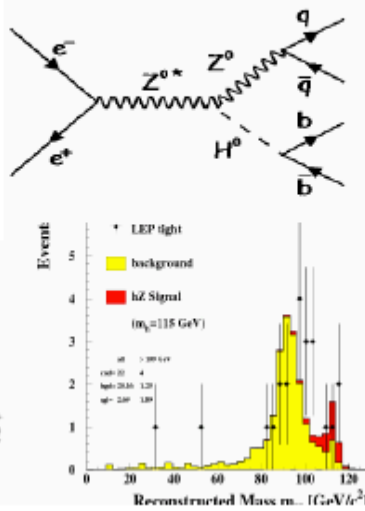
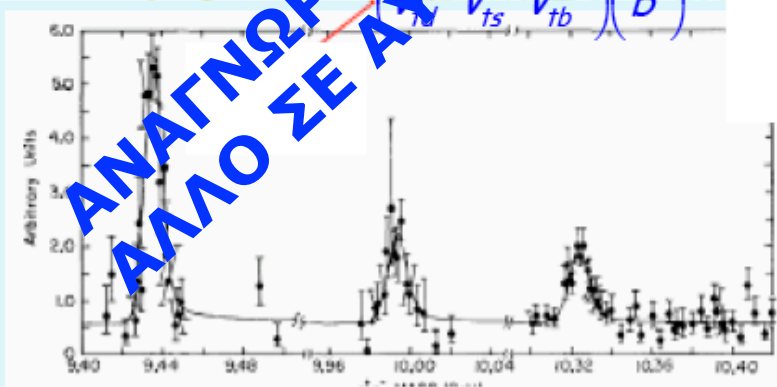
- Ανιχνευτές ΦΥΕ @ CERN
 - Κύρια Ανιχνευτικά Συστήματα
 - Υποδομή



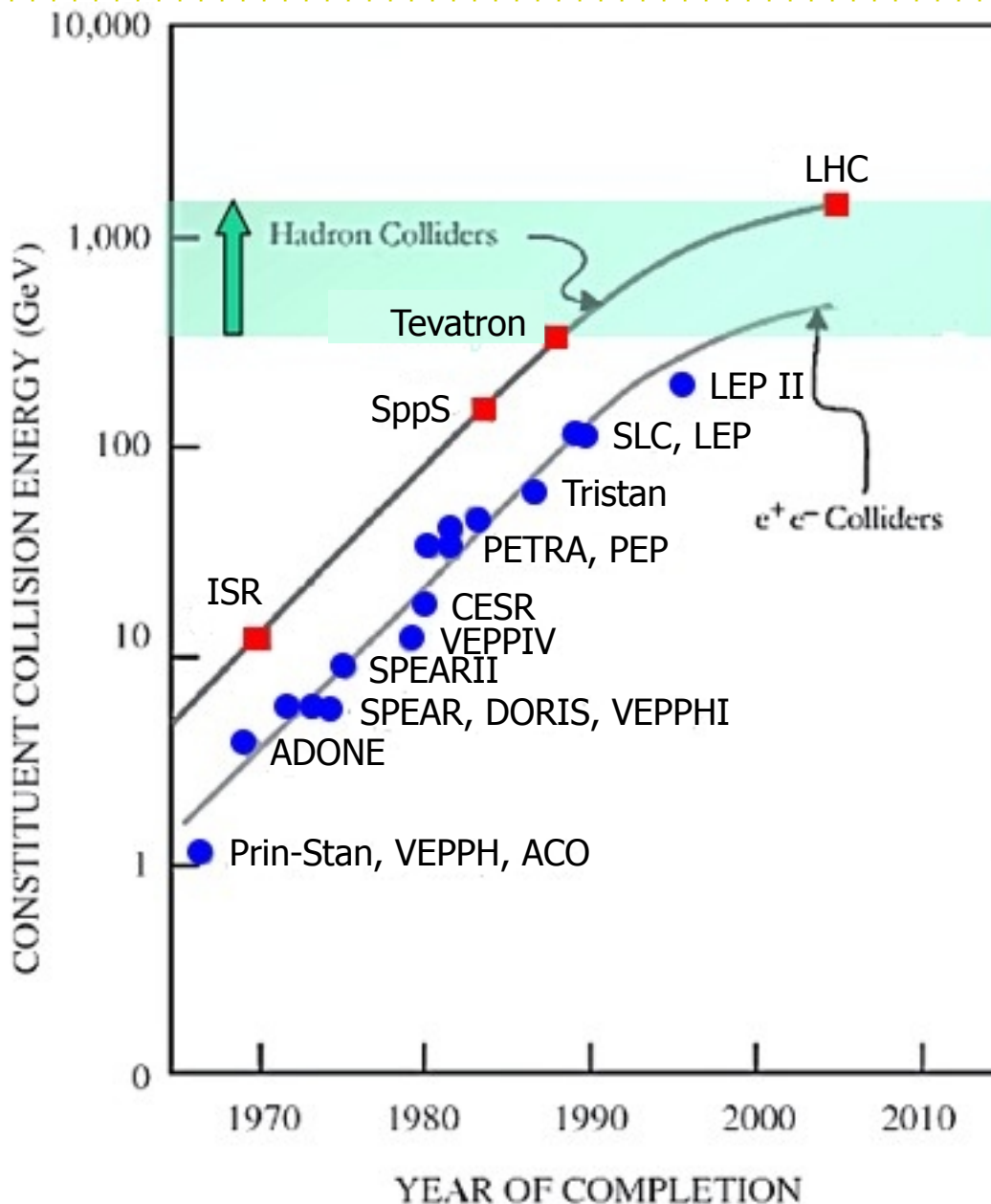
$J^- = (\bar{u}, \bar{c}, \bar{t})$

$V_{us}, V_{ub}, V_{cb}, V_{cb}, V_{cb}, V_{cb}$
 $V_{td}, V_{ts}, V_{tb}, V_{tb}, V_{tb}, V_{tb}$

d, s, b



ΑΝΑΓΝΩΡΙΖΕΤΕ ΚΑΠΟΙΟ ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑ Η ΚΑΤΙ ΑΛΛΟ ΣΕ ΑΥΤΗ ΤΗ ΔΙΑΦΑΝΕΙΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΩΤΗ ΜΑΤΙΑ?



- Σήμερα η κοινότητα ΦΥΕ έχει προτεραιότητα να διερευνήσει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των πρωτονίων στον LHC (Large Hadron Collider): 7+7 TeV ενέργεια ΚΜ
- Για να φτάσουμε εδώ, όλη η κοινότητα ΦΥΕ έχει επενδύσει, για πρώτη φορά σε μία μοναδική υποδομή στο CERN, δηλ. στο LHC:

Επιταχυντής

Ανιχνευτής

Σύστημα Σκανδαλισμού & Λήψης Δεδομένων [Trigger, DAQ]

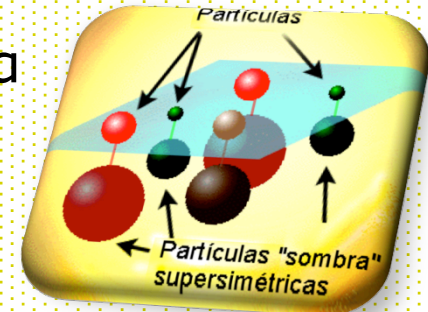
Ανάλυση Δεδομένων

• Προκλήσεις στη ΦΥΕ •

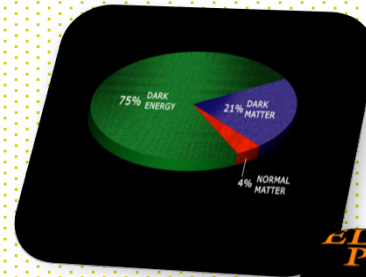
□ Μάζα : Μποζονίου Higgs



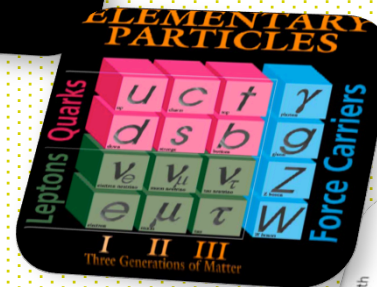
□ Σκοτεινή Ύλη: Υπερσυμμετρικά Σωματίδια



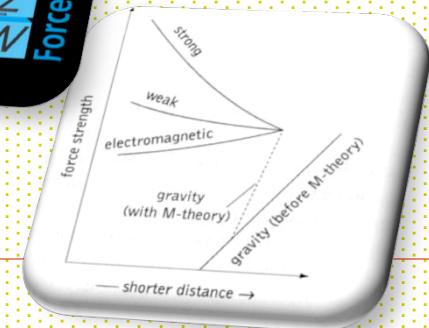
□ Ύλη έναντι Αντι-Ύλης



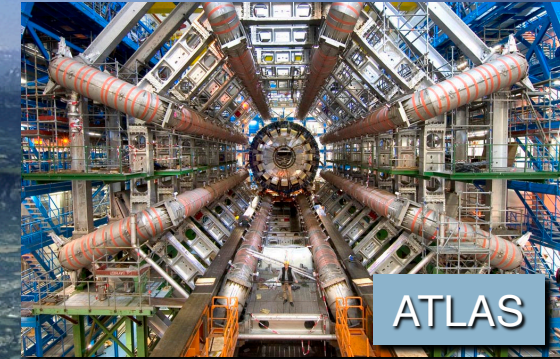
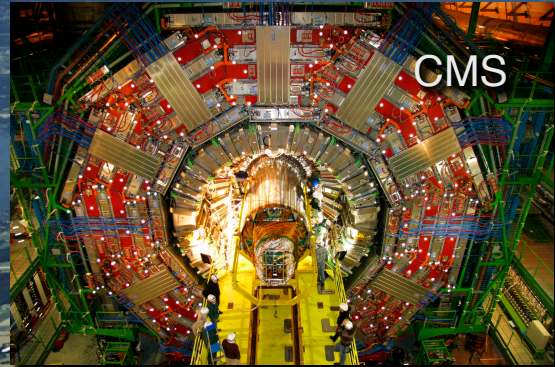
□ Θεμελιώδη Σωματίδια



□ Νέες Δυνάμεις, extra διαστάσεις...



ΝΕΑ Εποχή στη Θεμελιώδη Επιστήμη



Αναζήτηση σε ένα νέο ενεργειακό πεδίο των αλληλεπιδράσεων $p-p$ και $Pb-Pb$



• Ιστορία •

Slide: W.Riegler, CERN

Ιστορία Σωματιδιακής Φυσικής

1895: **X-rays**, W.C. Röntgen
1896: **Radioactivity**, H. Becquerel
1899: **Electron**, J.J. Thomson
1911: **Atomic Nucleus**, E. Rutherford
1919: **Atomic Transmutation**, E. Rutherford
1920: **Isotopes**, E.W. Aston
1920-1930: **Quantum Mechanics**, Heisenberg, Schrödinger, Dirac
1932: **Neutron**, J. Chadwick
1932: **Positron**, C.D. Anderson
1937: **Mesons**, C.D. Anderson
1947: **Muon**, Pion, C. Powell
1947: **Kaon**, Rochester
1950: **QED**, Feynman, Schwinger, Tomonaga
1955: **Antiproton**, E. Segre
1956: **Neutrino**, Rheines
Etc. etc. etc.

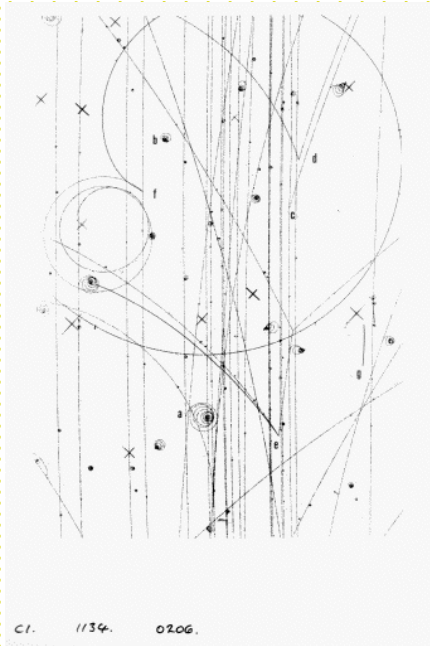
Ιστορία Οργανολογίας Ανιχνευτών

1906: **Geiger Counter**, H. Geiger, E. Rutherford
1910: **Cloud Chamber**, C.T.R. Wilson
1912: **Tip Counter**, H. Geiger
1928: **Geiger-Müller Counter**, W. Müller
1929: **Coincidence Method**, W. Bothe
1930: **Emulsion**, M. Blau
1940-1950: **Scintillator, Photomultiplier**
1952: **Bubble Chamber**, D. Glaser
1962: **Spark Chamber**
1968: **Multi-Wire Proportional Chamber**, G. Charpak
Etc. etc. etc.

• Ιστορία •

Slide: W.Riegler, CERN

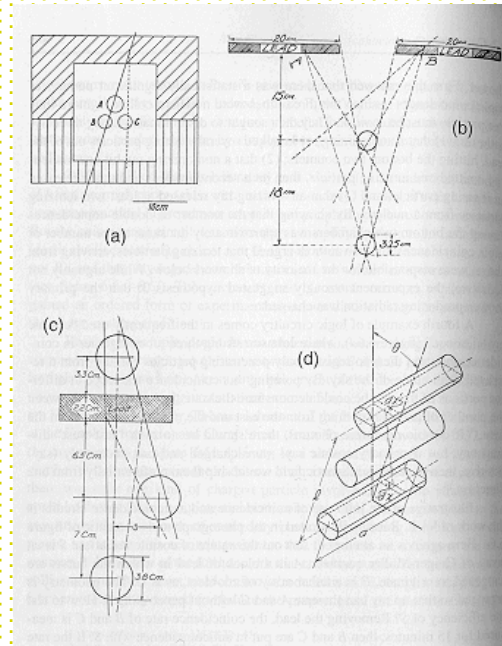
Ανιχνευτές Απεικόνισης Bubble Chamber



Bubble chamber photograph

Θάλαμοι Φυσαλίδων & Γαλακτωμάτων

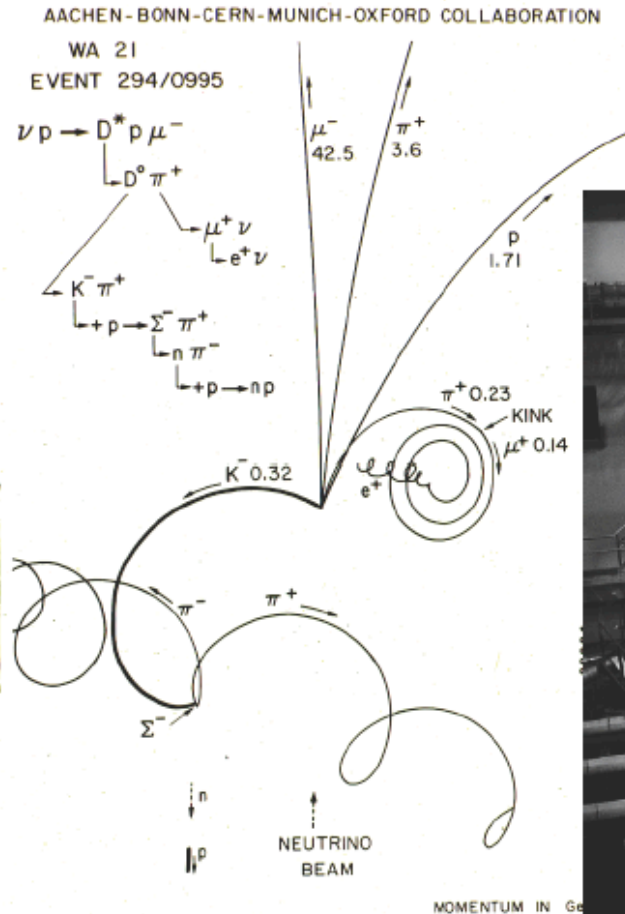
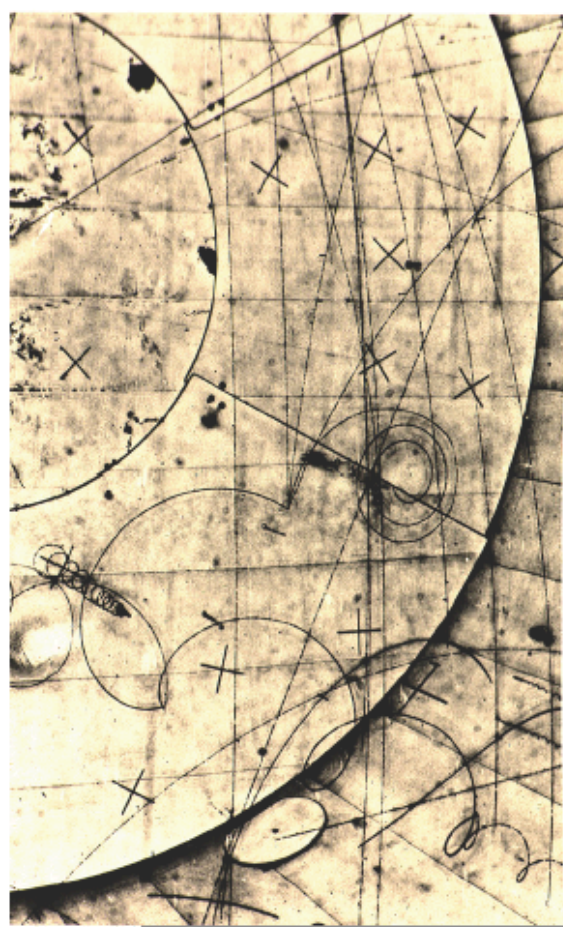
Ανιχνευτές με ηλεκτρονικά



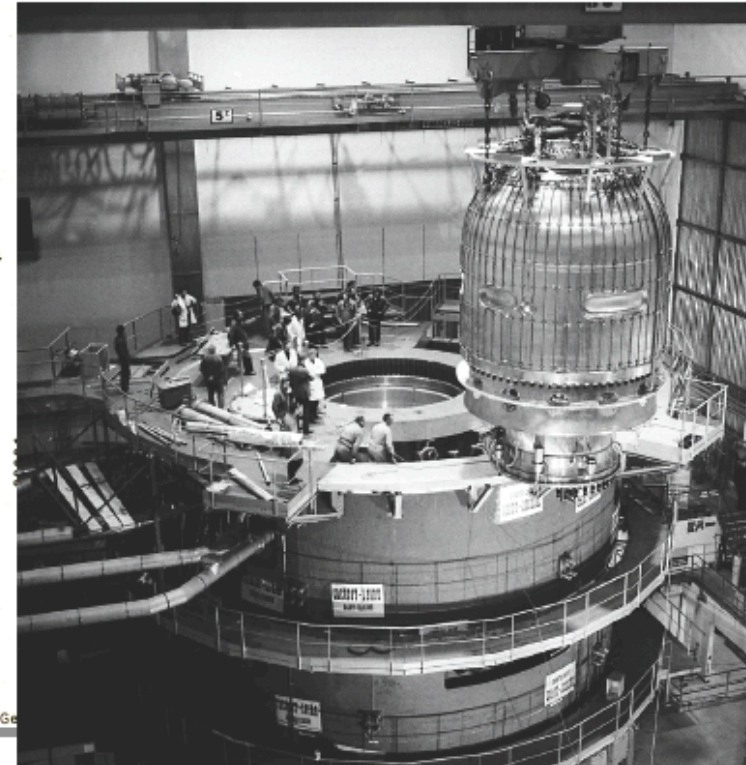
Πείραμα ανίχνευσης σύμπτωσης

Με ανιχνευτές της οικογένειας:
Σπινθηριστής, Μετρητής Geiger,
Μετρητής Tip, Μετρητής σπινθήρων

• Ιστορία • Ανιχνευτές Απεικόνισης Bubble Chamber



BEBC, equipped with the largest superconducting magnet in service at the time.



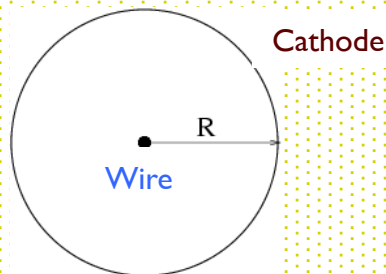
D^* (διεγερμένο D-μεσόνιο, που μεταφέρει τον κβαντικό αριθμό "charm": παραγωγή και διάσπαση στο πείραμα WA21, στον θάλαμο φυσαλίδων BEBC με υγρό υδρογόνο

• Ιστορία •

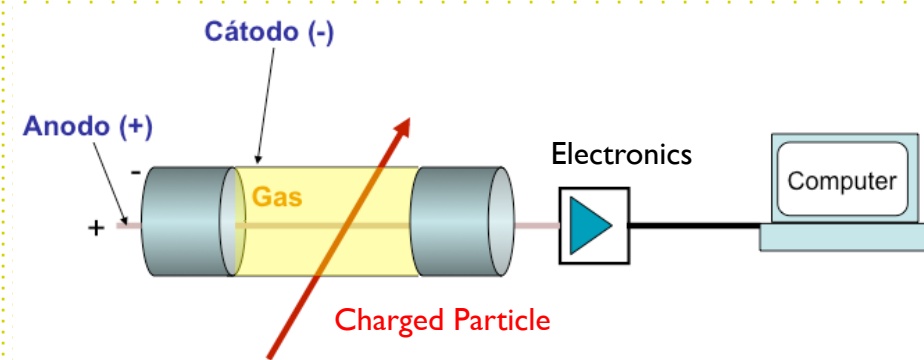


• ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΑΝΙΧΝΕΥΤΩΝ •

Tube, Geiger- Müller, 1928

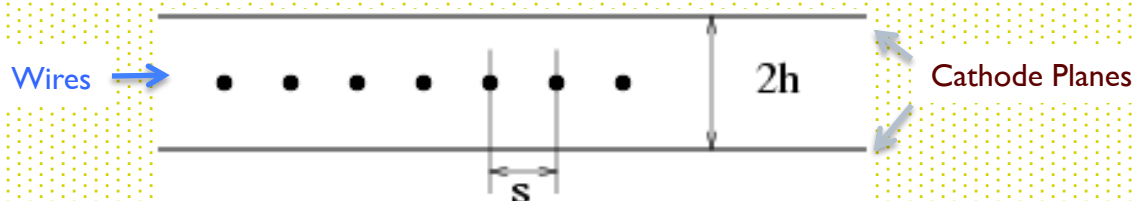


Single Wire Proportional Chamber



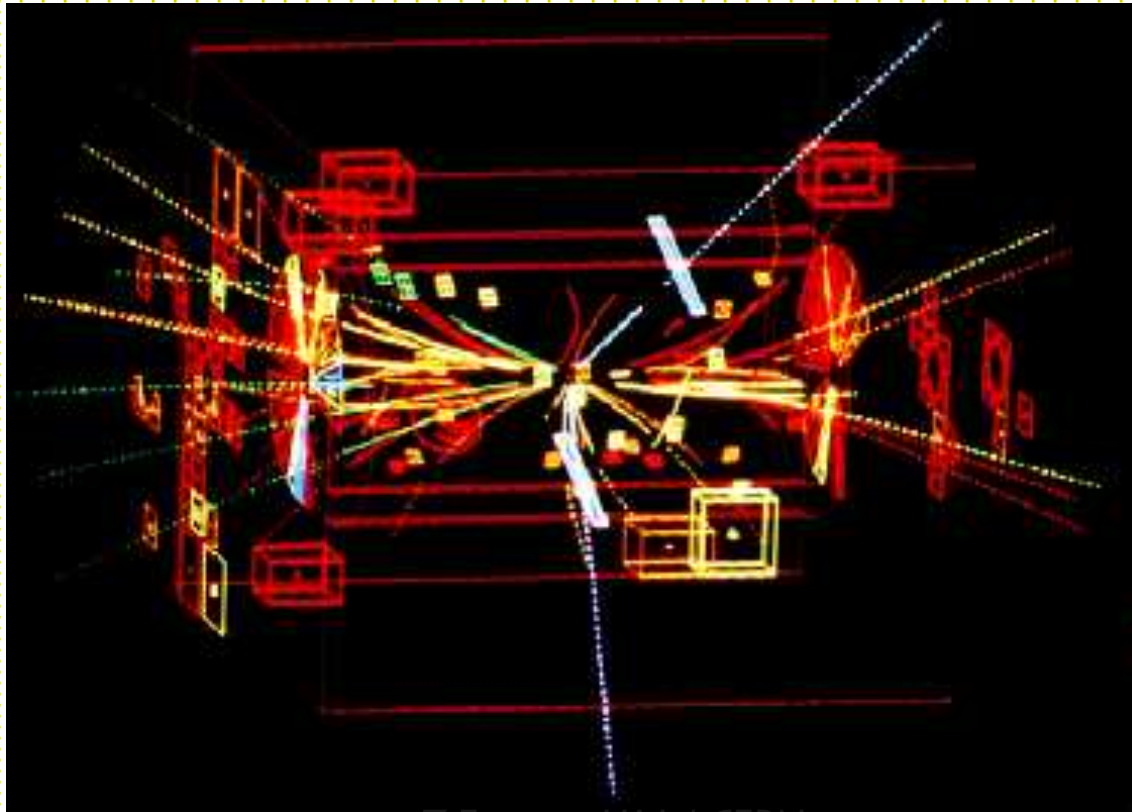
G. Charpak (1992 Nobel), Multi Wire Proportional Chamber (MWPC) 1968

- Λήψη σήματος από κάθε σύρμα στο σημείο αναλογικής λειτουργίας
- Πρώτη ηλεκτρονική συσκευή, που επιτρέπει πειράματα με υψηλή στατιστική !!



• Ιστορία • 1^ο Nobel Φυσικής στο CERN!!

‘Ηλεκτρονική Απεικόνιση’ στη δεκαετία των 1970. Ανακάλυψη του Z^0



Z-Event at UA1 / CERN

Ανακατασκευή τροχιών με H/Y των φορτισμένων σωματιδίων από την αλληλεπίδραση πρωτονίου-αντιπρωτονίου. Οι δύο λευκές τροχιές είναι εκπομπή του Z^0 μποζονίου και είναι υψηλής ενέργειας ηλεκτρόνιο και ποζιτρόνιο.

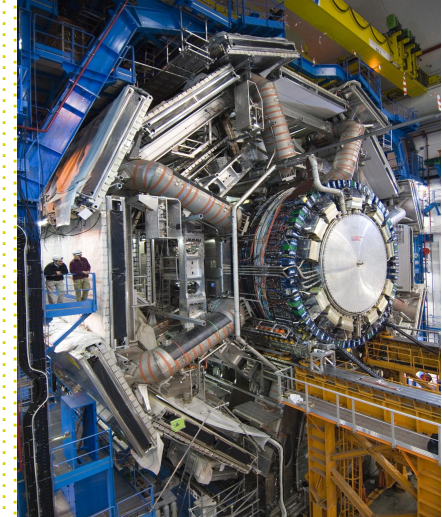
• Απεικονίσεις γεγονότων •



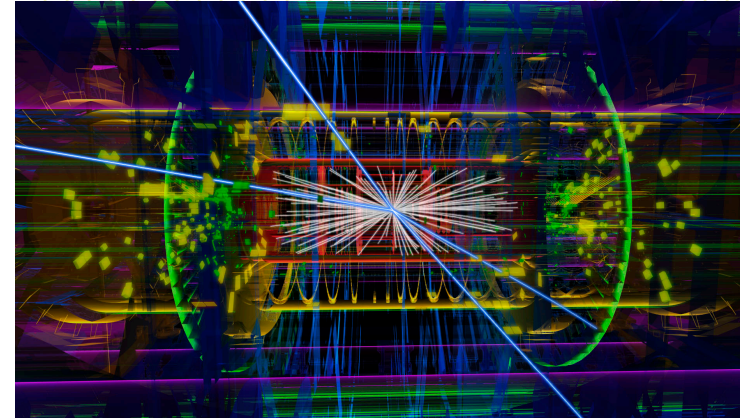
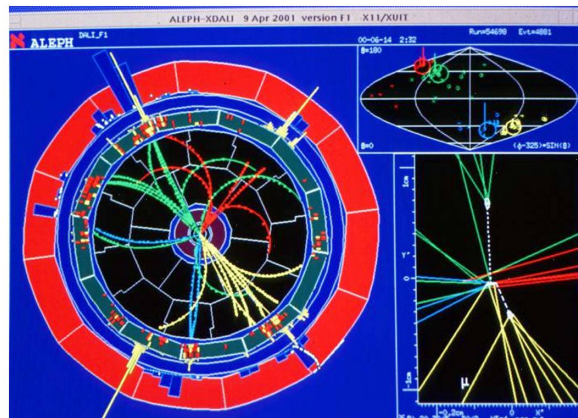
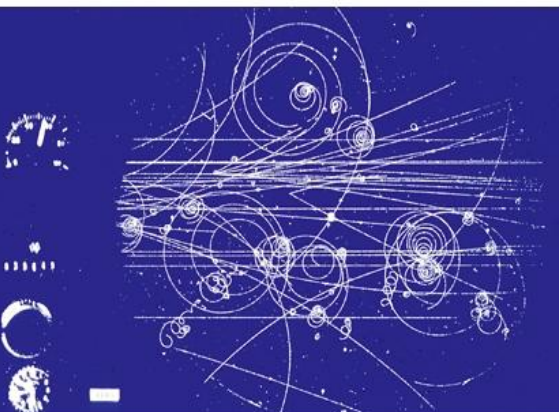
50's – 70's



LEP: 88 - 2000



LHC



Μελέτη Αλληλεπιδράσεων

□ Με σκέδαση

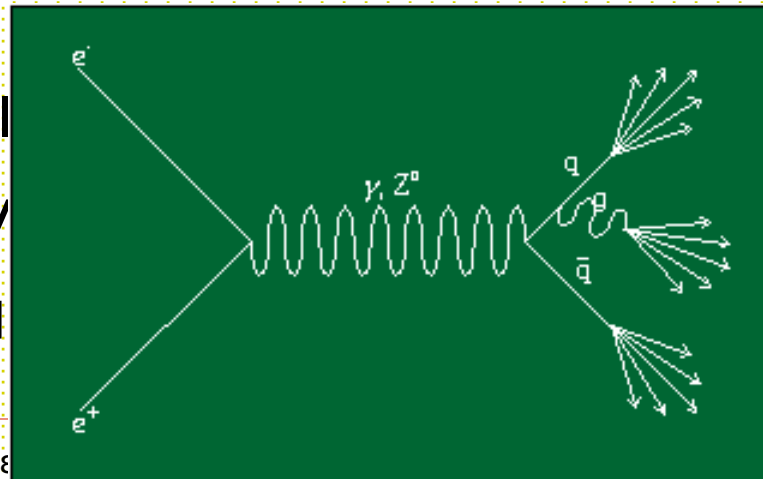
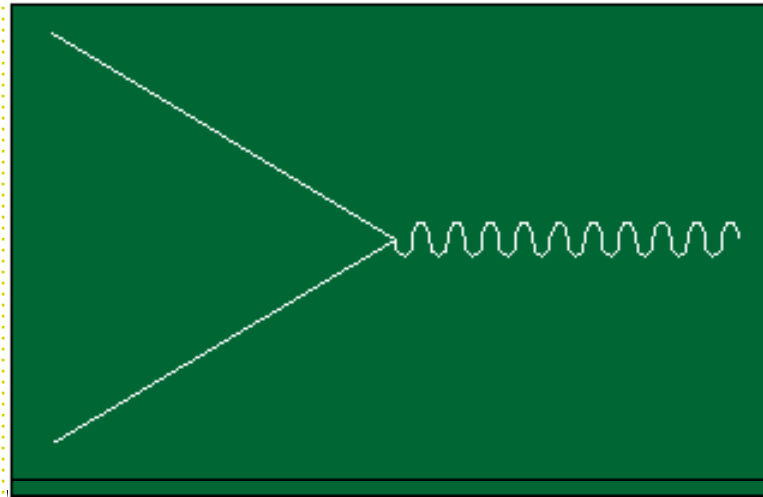
□ Με εξαΰλωση

□ και την παραγωγή νέων σωματιδίων

□ ΟΛΕΣ οι αλληλεπιδράσεις

■ Πειραμάτων συγκρούσεων

■ Πειραμάτων σταθερών πηγών

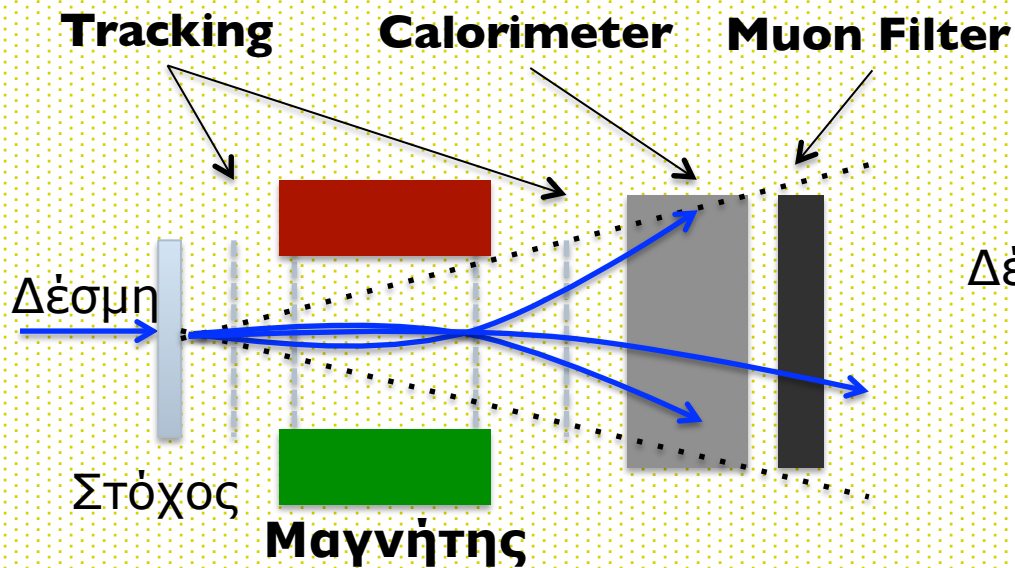


μέσω

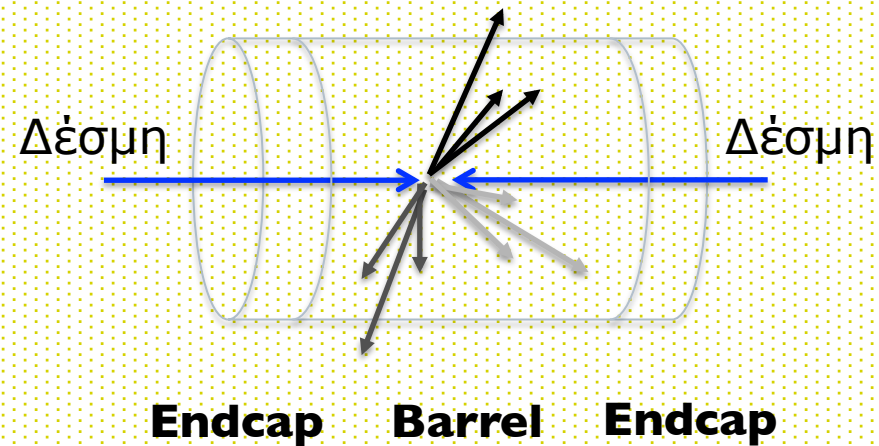
ή

• Συστήματα Ανιχνευτών •

Γεωμετρία Σταθερού Στόχου



Γεωμετρία Αλληλεπίδρασης Δεσμών



Υπάρχουν Ιδανικοί Ανιχνευτές?

- Ένας ιδανικός ανιχνευτής, μπορεί να καταγράψει μια πλήρη αλληλεπίδραση, να μετρήσει όλες τις ιδιότητες όλων των παραγόμενων σωματιδίων, και να ανακατασκευάσει πλήρως το γεγονός της αλληλεπίδρασης.
- Αυτό δίδει την δυνατότητα να συγκρίνουμε τα πειραματικά αποτελέσματα απευθείας με θεωρητικές προβλέψεις χωρίς μεγάλες αβεβαιότητες.

Ιδιότητες Σωματιδίων

□ Τι ιδιότητες έχει ένα σωματίδιο?

■ ενέργεια

■ ορμή

■ φορτίο

~~■ μάζα~~

■ χρόνο ζωής

~~■ ιδιοπεριστροφή (spin)~~

■ διασπάσεις

$$\vec{p} = \left. \begin{pmatrix} E \\ p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{pmatrix} \right\} \begin{pmatrix} E \\ \vec{p} \end{pmatrix}$$

□ Ποιά απ' όλα αυτά είναι μετρήσιμα?

Ιδιότητες Σωματιδίων

Αν μετρήσουμε
την ενέργεια και
την ορμή

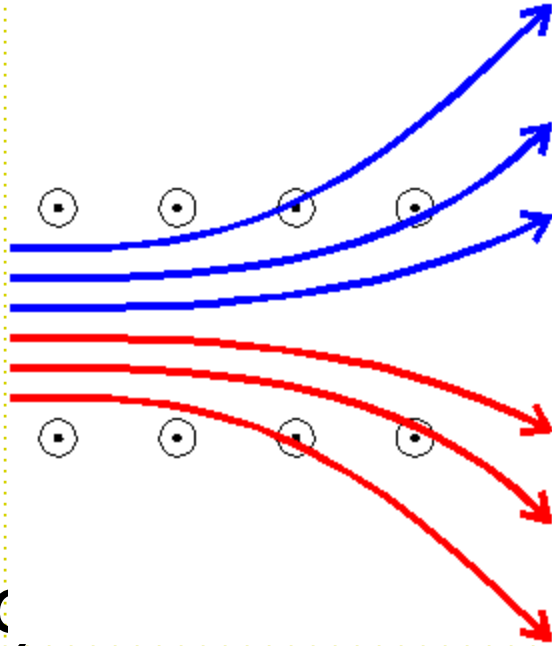
$$\vec{p} = \left. \begin{pmatrix} E \\ p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{pmatrix} \right\} \begin{pmatrix} E \\ \vec{p} \end{pmatrix}$$

□ Ποιές άλλες ιδιότητες μπορούμε να βρούμε?

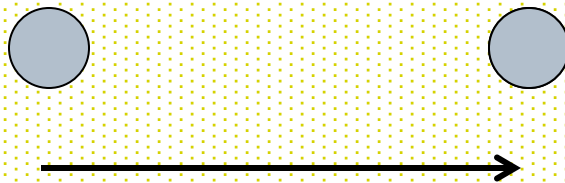
$$E^2 = m^2 \cdot c^4 + \vec{p}^2 c^2 \Rightarrow m = \frac{\sqrt{E^2 - \vec{p}^2 c^2}}{c^2}$$

Ιδιότητες Σωματιδίων

□ φορτίο

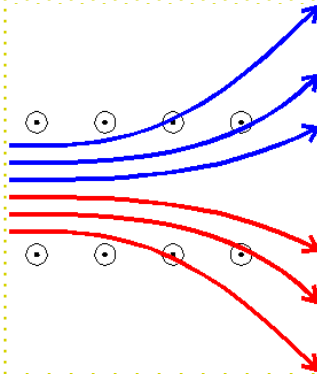


□ Χρόνος ζωής



Μέτρηση των Ιδιοτήτων των Σωματιδίων

□ ορμή



$$F = q \cdot v \cdot B = m \cdot \frac{v^2}{R}$$

$$\Rightarrow q \cdot B \cdot R = m \cdot v = |\vec{p}|$$

□ ταχύτητα

- χρόνος πτήσης
- RICH (Ring Cherenkov Imaging)

□ ενέργεια

- θερμιδόμετρο

Ποιά Σωματίδια μπορούν να ανιχνευθούν?

- Φορτισμένα Σωματίδια

$$e^{\pm}, \mu^{\pm}, \pi^{\pm}, K^{\pm}, p^{\pm}, n, \gamma$$

- Ουδέτερα Σωματίδια

$$\gamma, n, \pi^0, K^0, \nu, Y$$

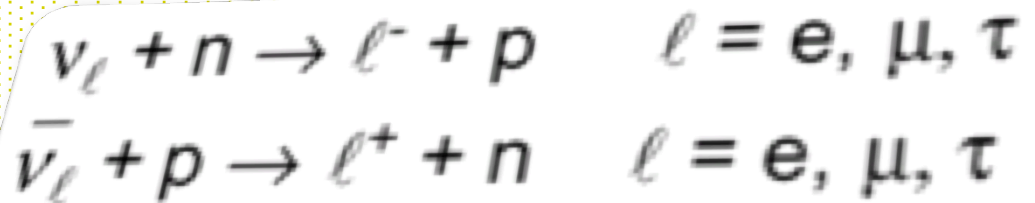
- Διαφορετικά σωματίδια αλληλεπιδρούν πολύ διαφορετικά με το υλικό του ανιχνευτή.

ιδιότητες Σωματιδίων

- Μόνο λίγα από πάρα πολλά στοιχειώδη σωματίδια έχουν *have* χρόνο ζωής αρκετά μεγάλο για να επιβιώσουν κατά μήκος της τροχιάς τους σε ένα ανιχνευτή
- Τα περισσότερα σωματίδια μετρούνται μέσω των προϊόντων εκπομπής και των κνηματικών εξισώσεων (*invariant mass*, αναλλοίωτη μάζα)
- Μερικά σωματίδια μικρού χρόνου ημιζωής (*b, c*) αφήνουν σύντομες τροχιές πριν διασπαστούν, οπότε ταυτοποιούνται από τη μέτρηση των μικρών τροχιών
- Η διαφορά στη μάζα, φορτίο και αλληλεπίδραση είναι η μεθοδολογία του προσδιορισμού

• Νετρίνα •

- Τα νετρίνα αλληλεπιδρούν μόνο ασθενώς με **ελάχιστες ενεργούς διατομές**
- Για την ανίχνευση νετρίων, χρειαζόμαστε πρώτα ε'να φορτισμένο σωματίδιο (ξανά)
 - Πιθανές αντιδράσεις:



- Η ενεργός διατομή της αντίδρασης $n_e + n \rightarrow e^- + p$ είναι της τάξης 10^{-43} cm^2 (ανά νουκλεόνιο, $E_n \sim$ μερικά MeV), οπότε:
 - Η Ικανότητα ανίχνευσης $e_{\text{det}} = s \times N^{\text{surf}} = s r N_A d / A$
 - 1m Fe (iron): $e_{\text{det}} \sim 5 \times 10^{-17}$

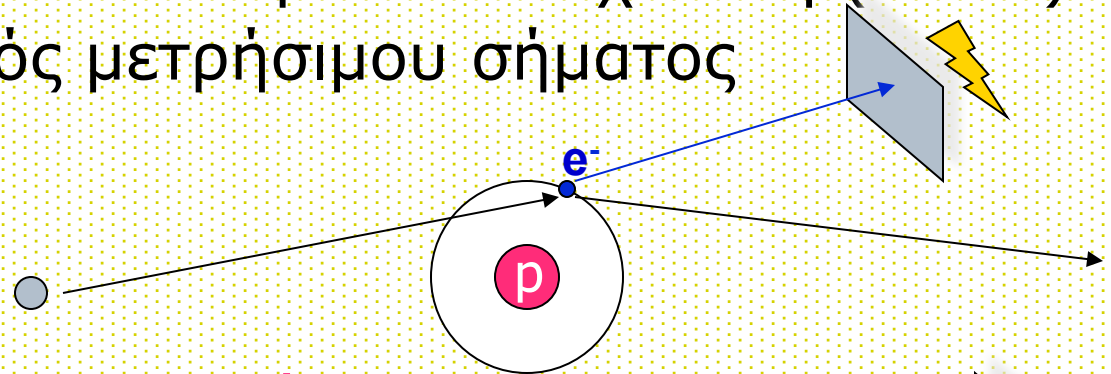
• Νετρίνα •

- Η ανίχνευση νετρίνων απαιτεί μεγάλους, ογκώδεις με μάζα ανιχνευτές (kT) και υψηλές ροές νετρίνων
- Στα πειράματα αλληλεπίδρασης τη δέσμης, ένας πλήρως ερμητικά κλειστός ανιχνευτής επιτρέπει την ανίχνευση νετρίνων ΕΜΜΕΣΑ: αθροίζονται όλες τις ενέργειες και ορμές των ορατών σωματιδίων και αποδίδονται η ελλείπουσα ενέργεια και ορμή στο(α) νετρίνο(α)!!!

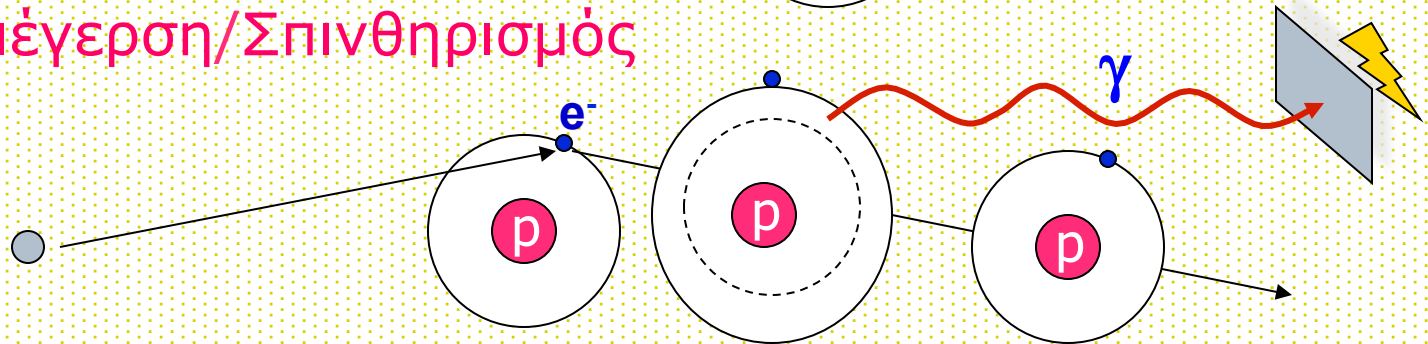
Βασικές Αρχές των Μετρήσεων

- Η μέτρηση γίνεται μέσω της H-M αλληλεπίδρασης (ξανά...) του σωματιδίου με τον ανιχνευτή (υλικό)
 - παραγωγή ενός μετρήσιμου σήματος

□ Ιοντισμός



□ Διέγερση/Σπινθηρισμός

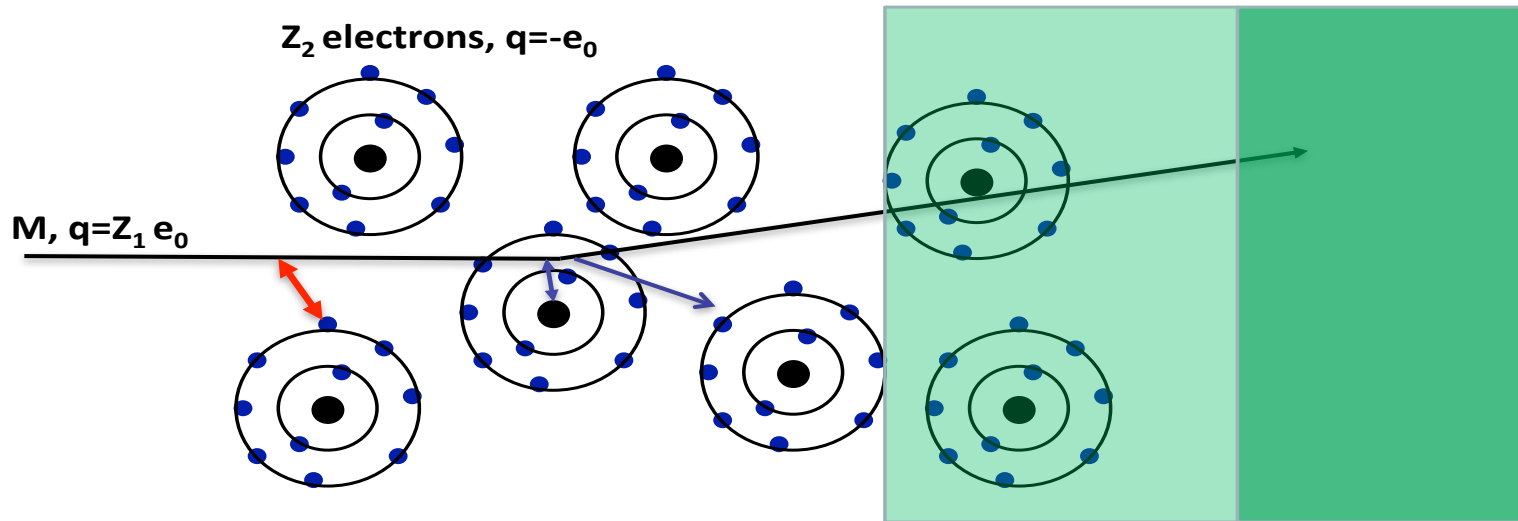


□ Αλλαγή της πορείας του σωματιδίου

- καμπύλωση μέσα σε μαγνητικό πεδίο, απώλεια ενέργειας
- σκέδαση, αλλαγή διεύθυνσης, απορρόφηση

- Η-Μ Αλληλεπιδράσεις των Σωματιδίων με την Ύλη •

Electromagnetic Interaction of Particles with Matter



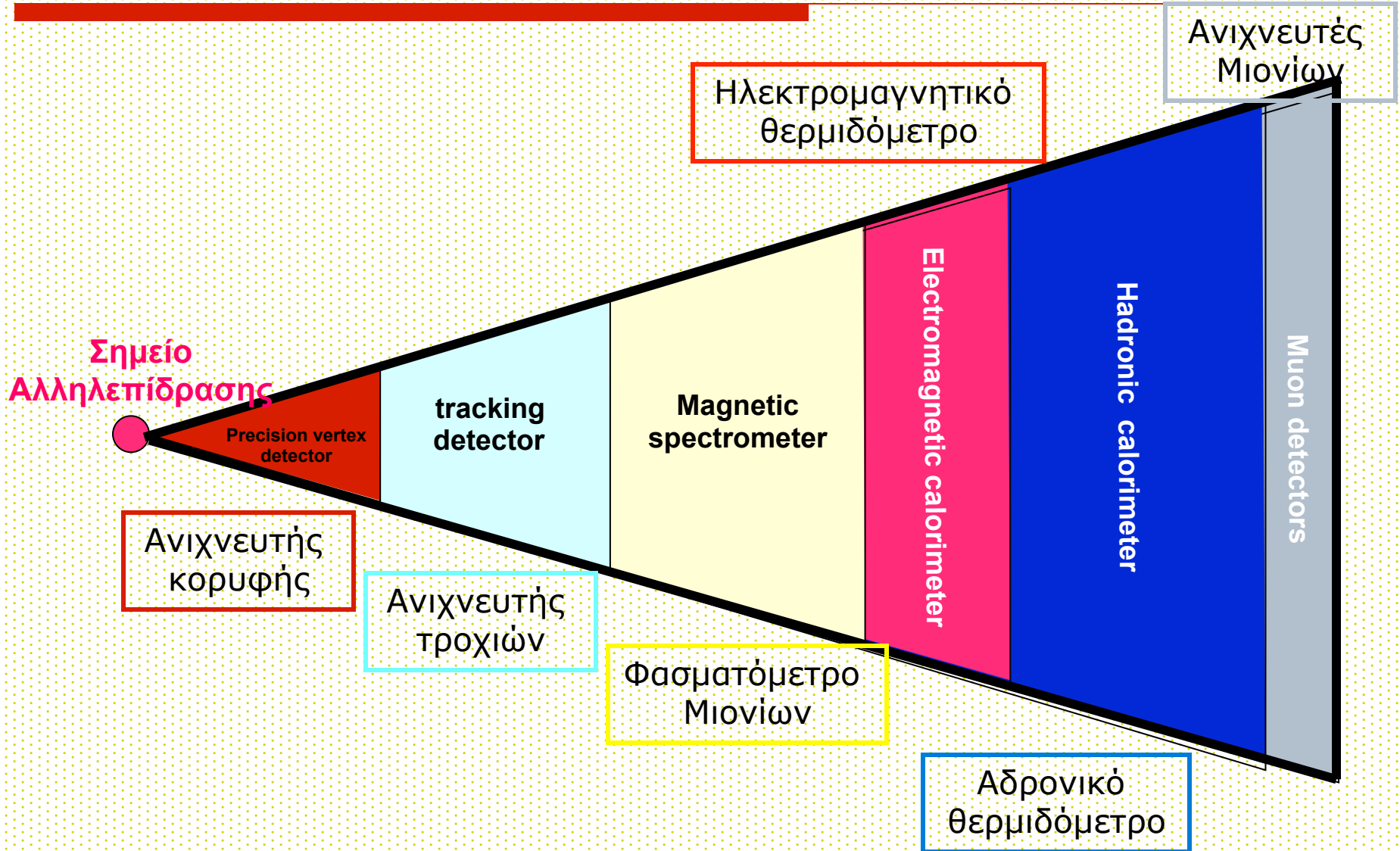
Interaction with the atomic electrons. The incoming particle loses energy and the atoms are excited or ionized.

11/09/2011

Interaction with the atomic nucleus. The particle is deflected (scattered) causing multiple scattering of the particle in the material. During this scattering a Bremsstrahlung photon can be emitted.

In case the particle's velocity is larger than the velocity of light in the medium, the resulting EM shockwave manifests itself as Cherenkov Radiation. When the particle crosses the boundary between two media, there is a probability of the order of 1% to produce and X ray photon, called Transition radiation.

Η σύνθεση ενός τυπικού ανιχνευτή



Διαμερίσεις των Υπο-ανιχνευτών

Υποσύστημα Τροχιών

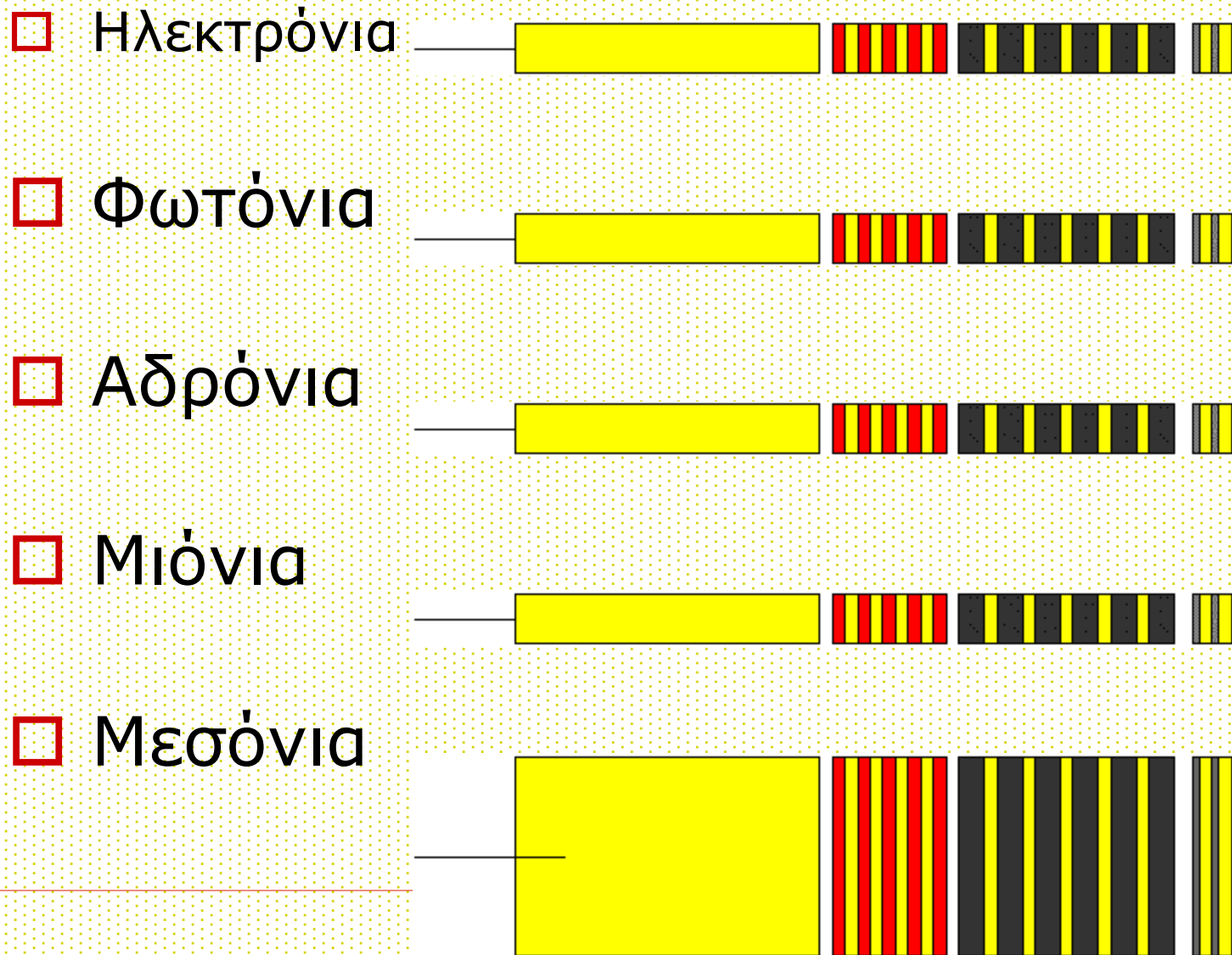
Ηλεκτρομαγνητικό
Θερμιδόμετρο

Αδρονικό Θερμιδόμετρο

Σύστημα
Μιονίων

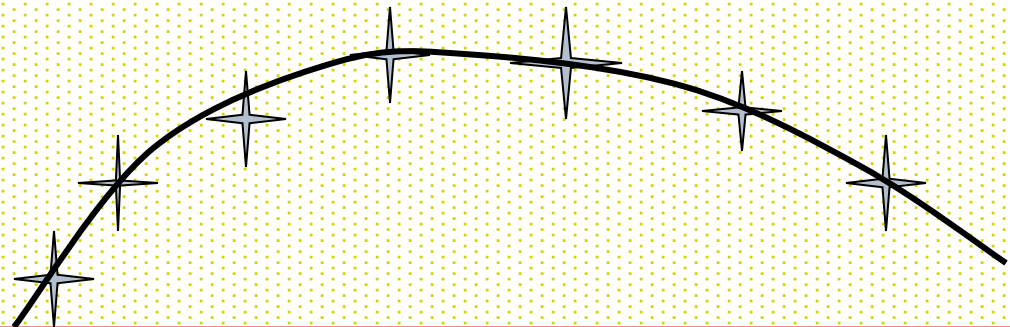
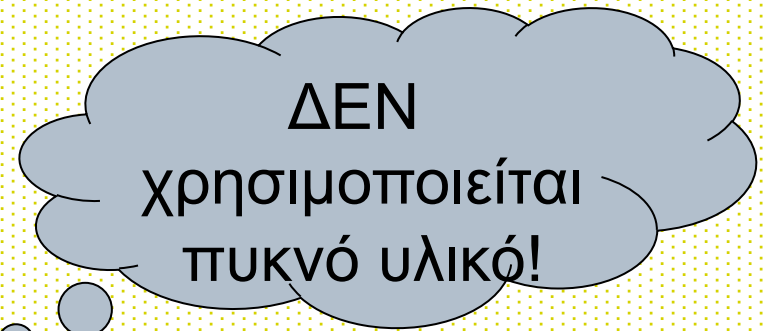


Διάβαση των Σωματιδίων



Ανιχνευτές Τροχιών

- μέτρηση των τροχιών των παραγόμενων σωματιδίων
- προσδιορίζουν
 - φορτίο και
 - ορμήσε συνδυασμό με το μαγνητικό πεδίο
- Οι τροχιές ανακατασκευάζονται από τα μετρηθέντα σημεία του χώρου:



Πώς λειτουργούν οι ανιχνευτές τροχιών?

□ Δύο βασικές αρχές

■ Ανιχνευτές Ιοντισμού

□ Geiger-Müller counter

□ MWPC

□ TPC

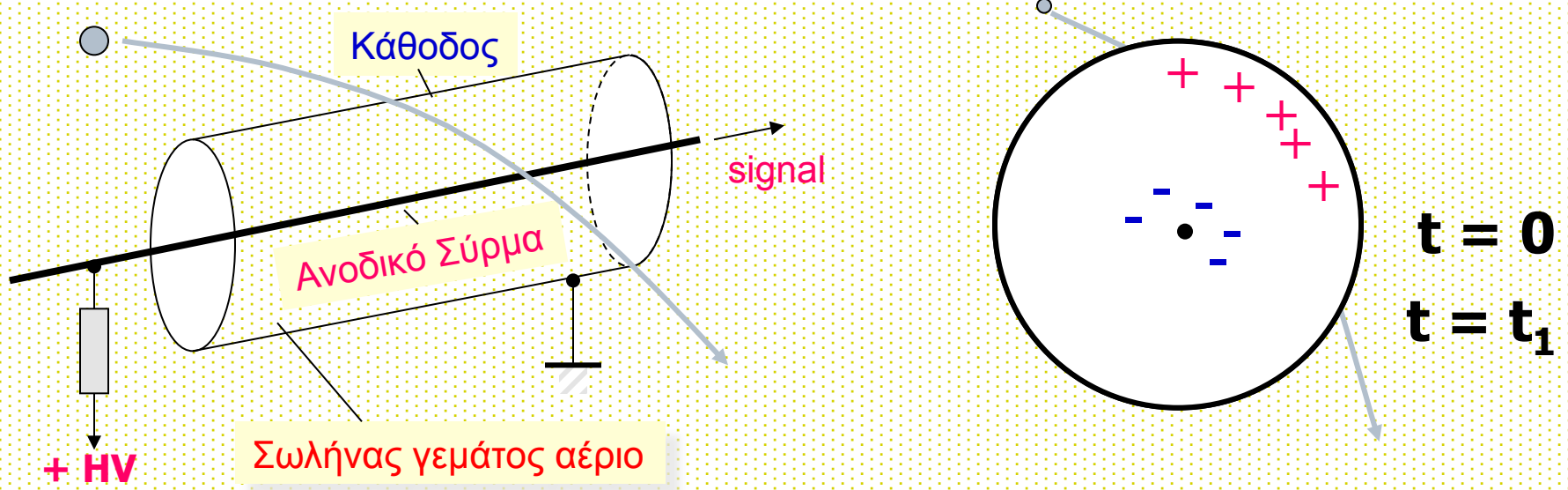
□ silicon detectors

Πολυ-Σύρματος Αναλογικός Θάλαμος
Multi-Wire Proportional Chamber

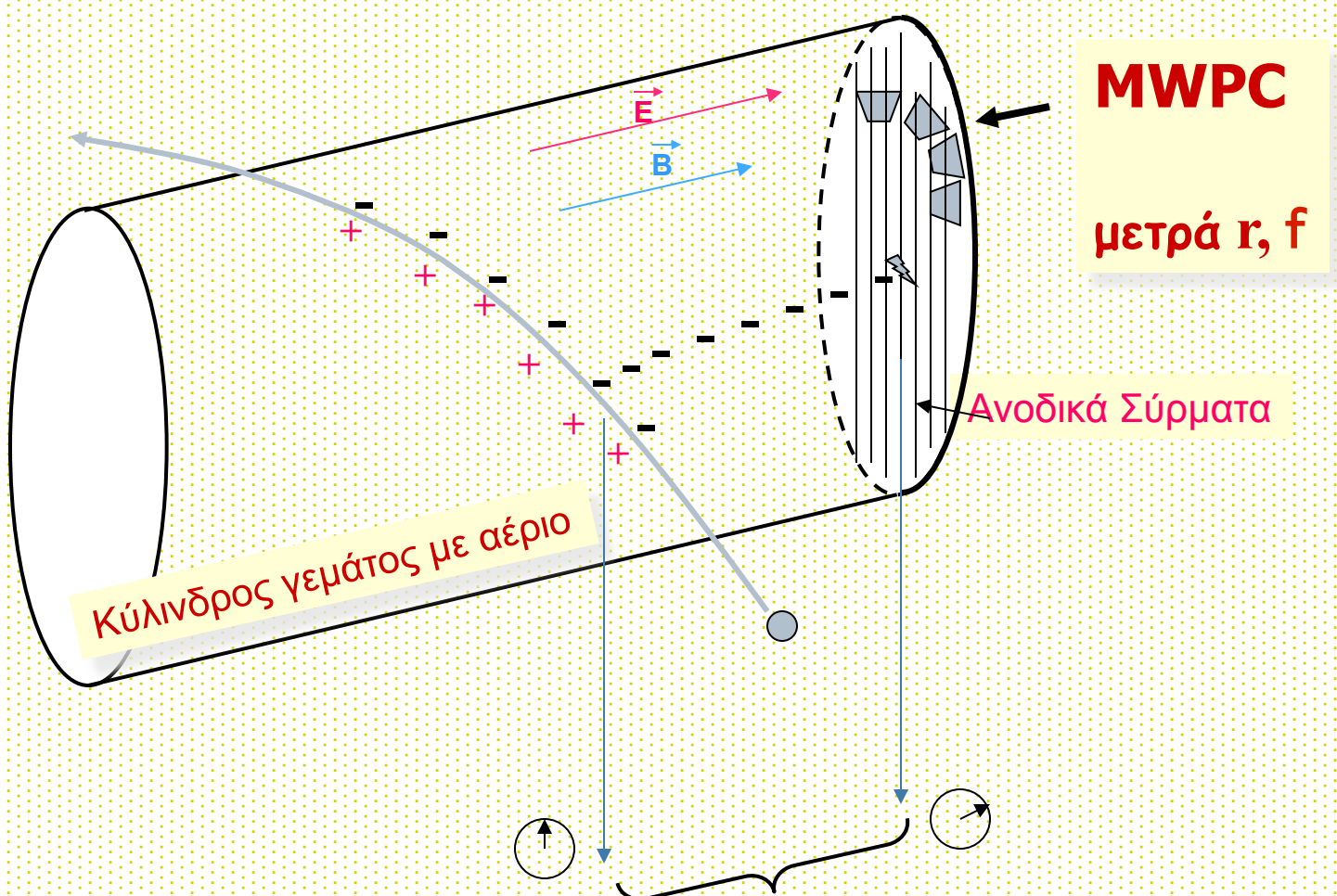
Θάλαμος Προβολικού Χρόνου
Time Projection Chamber

■ Ανιχνευτές Σπινθηρισμού

Μετρητές Ιοντισμού

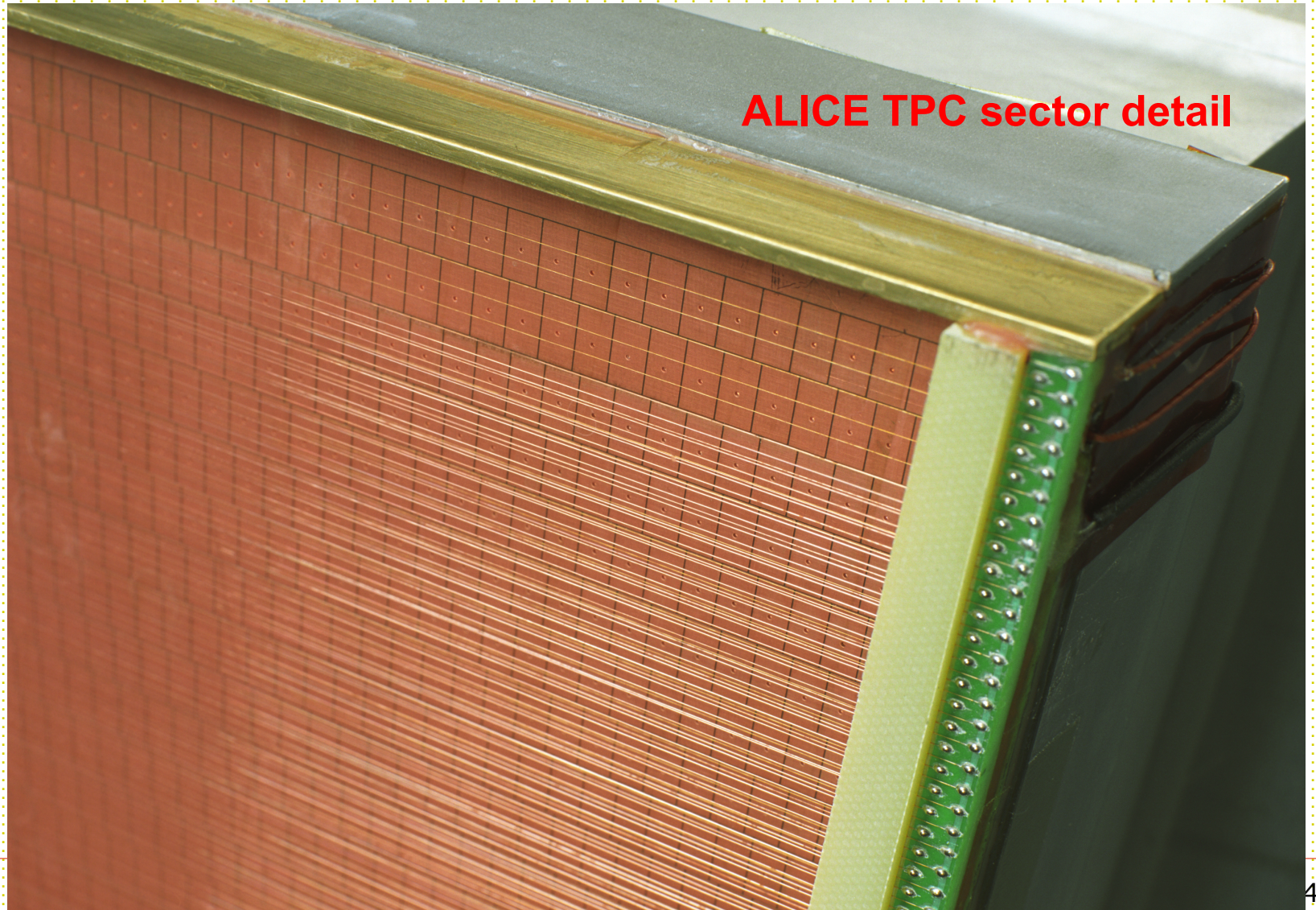


Θάλαμος Προβολικού Χρόνου (Time Projection Chamber)

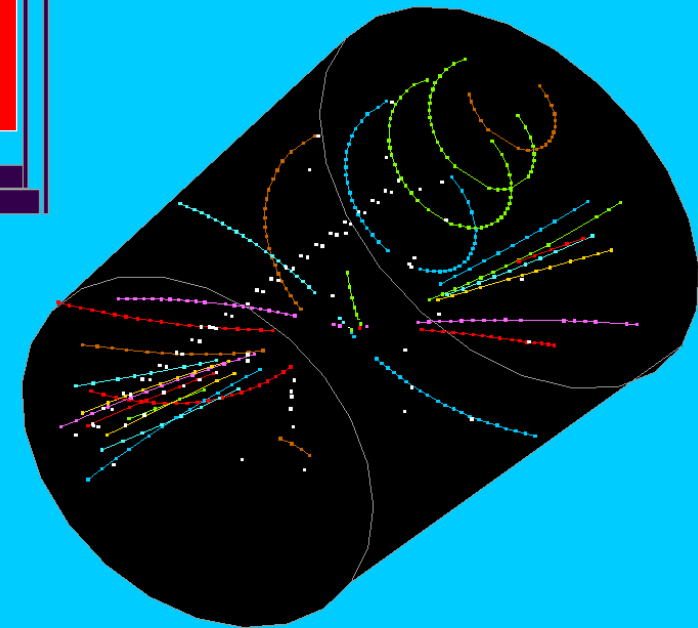
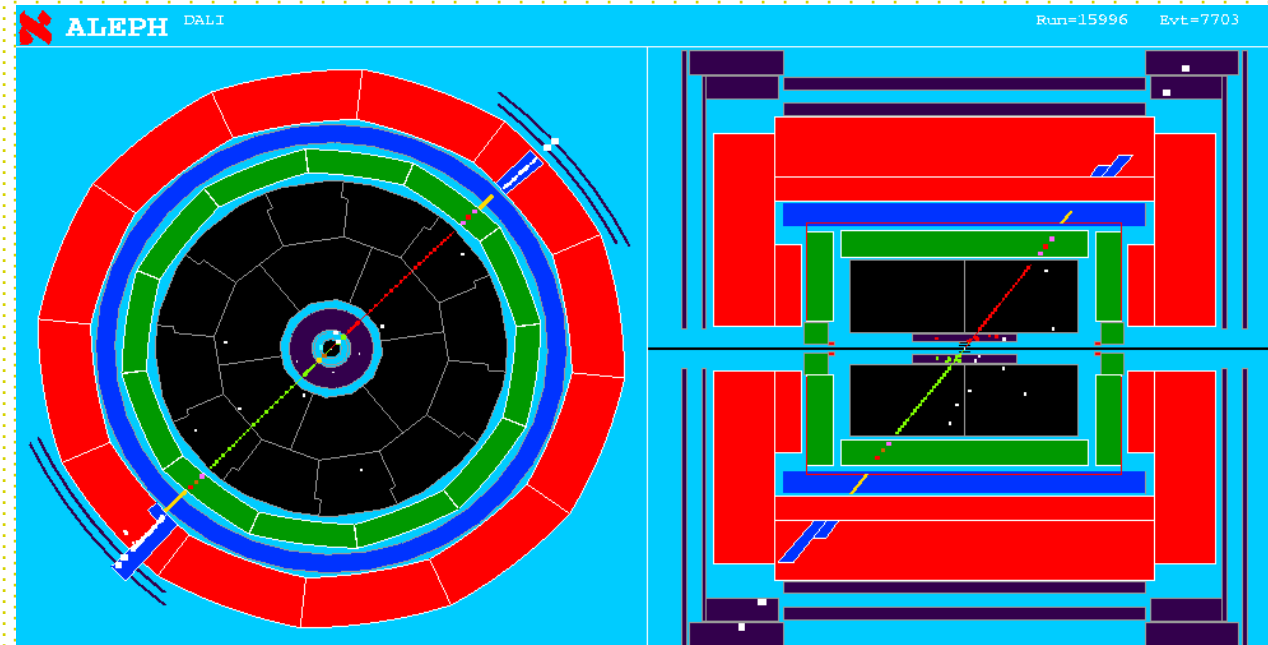


$$z = v_{drift} t$$

TPC



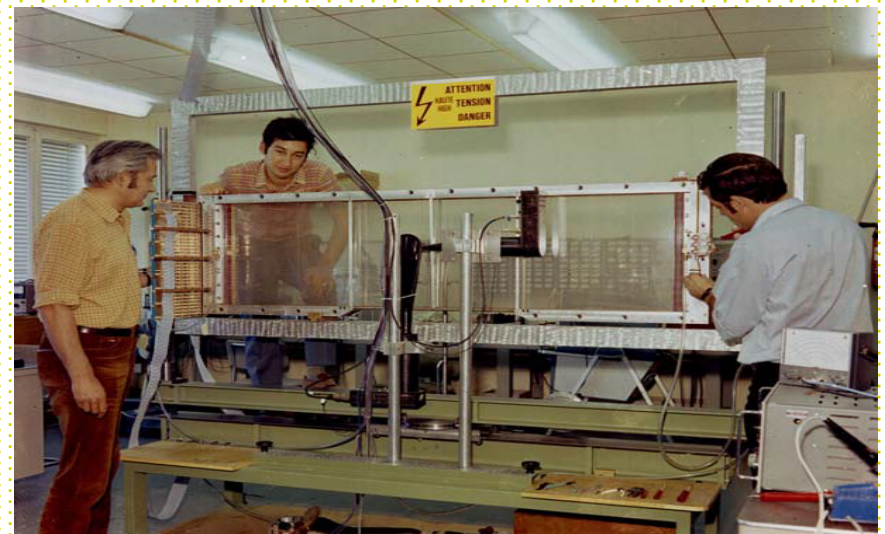
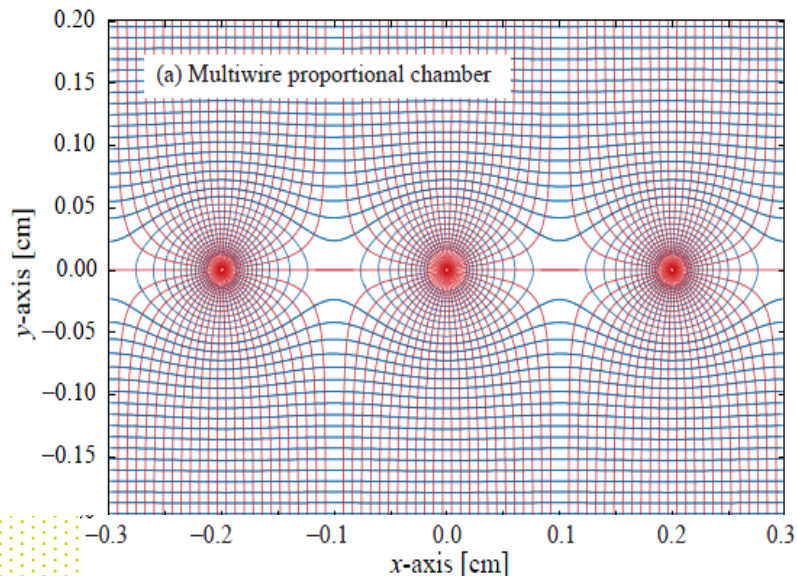
ALEPH TPC



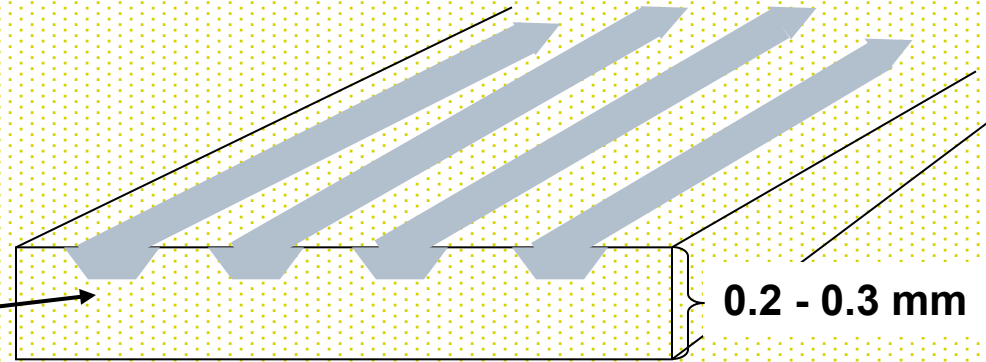
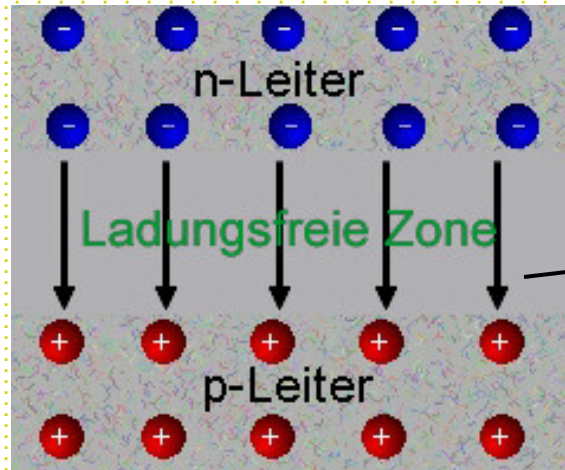
• MWPC •

Noble Prize in 1992

- Ανιχνευτές χρήγορου προσδιορισμού θέσης (1968)
- Συνεχής λειτουργία
- Ικανότητα ανίχνευσης σε ροές μέχρι MHz/cm²
- Ακρίβεια προσδιορισμού θέσης υπό-mm

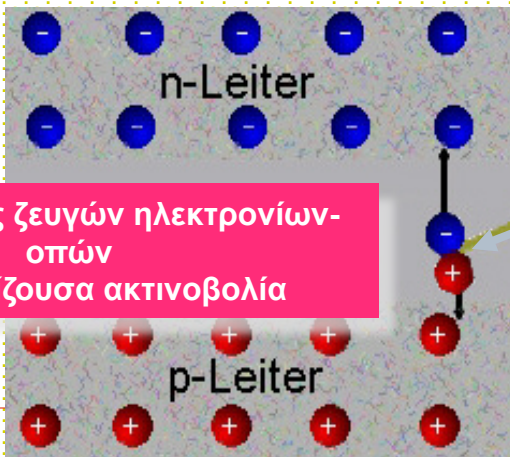


Ανιχνευτές Μικρολωρίδων Πυριτίου

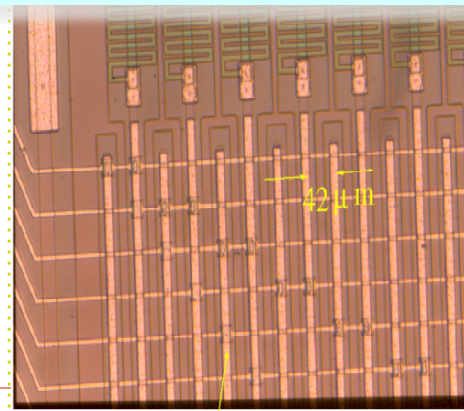


Ανιχν. πυριτίου

Η ακρίβεια μέτρησης περιορίζεται από την απόσταση των μικροταινιών
10 - 100 mm

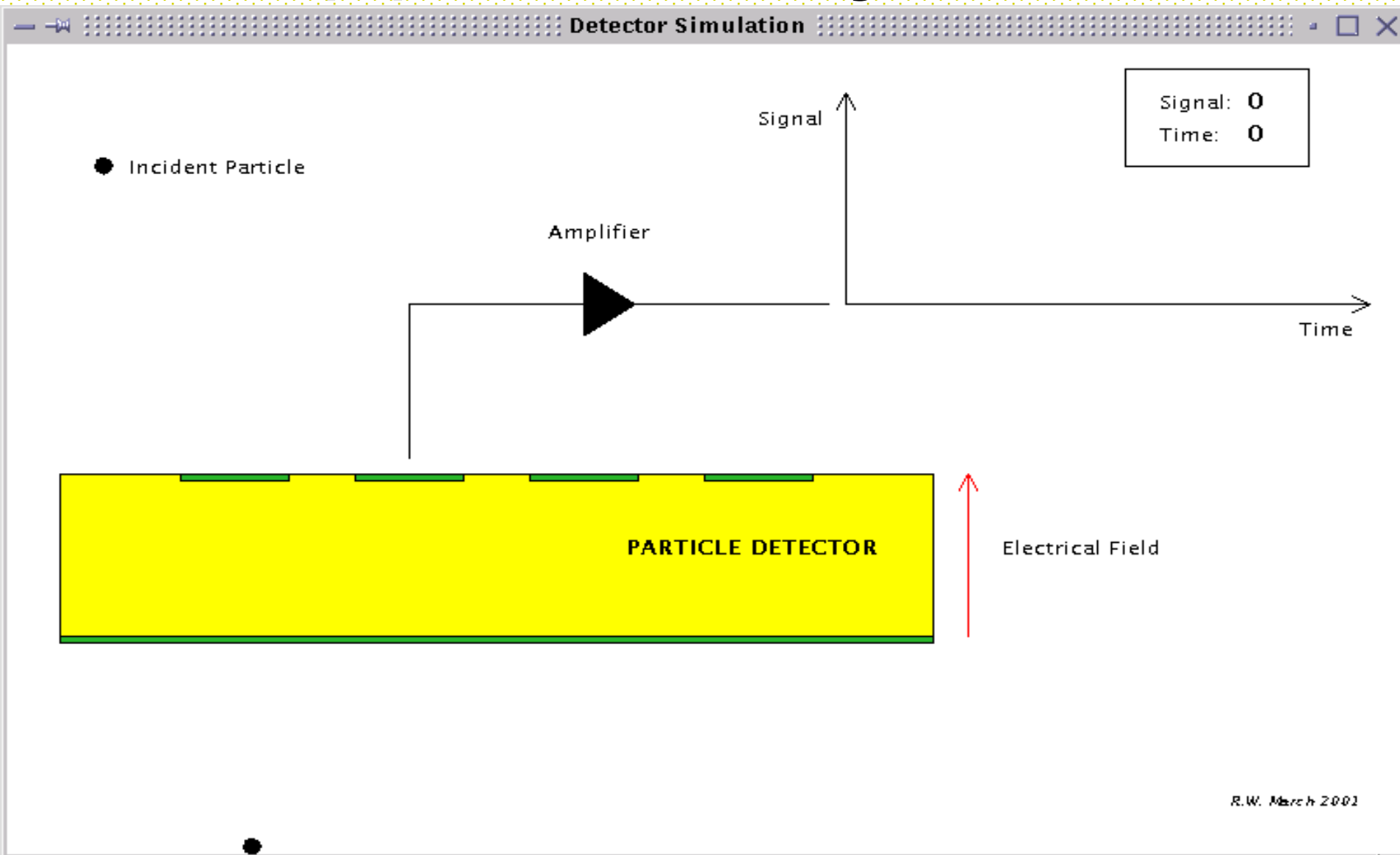


Σχηματισμός ζευγών ηλεκτρονίων-οπών από ιοντίζουσα ακτινοβολία



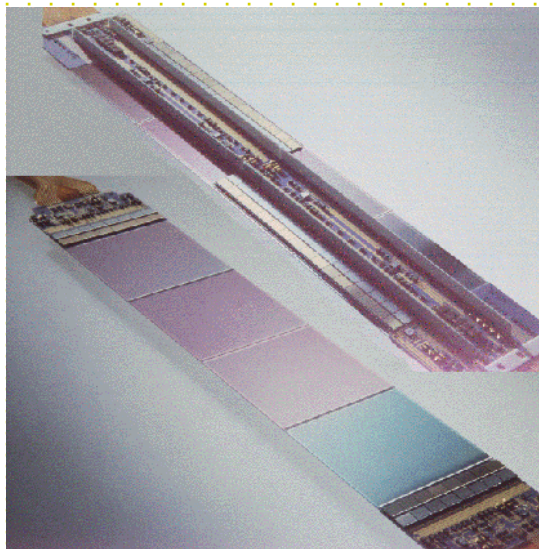
Ανιχνευτές Σωματιδίων, ΟΣ
Ίδια αρχή με τους ανιχνευτές αερίου

Λειτουργούν κάπως έτσι:

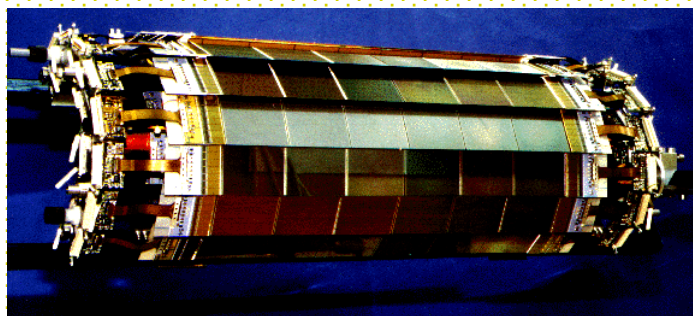


R.W. March 2001

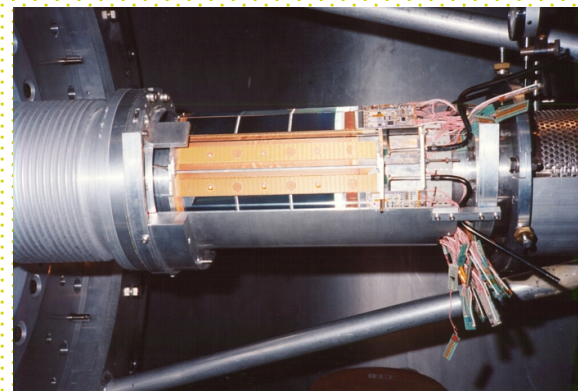
Ανιχνευτές Μικροταινιών Πυριτίου



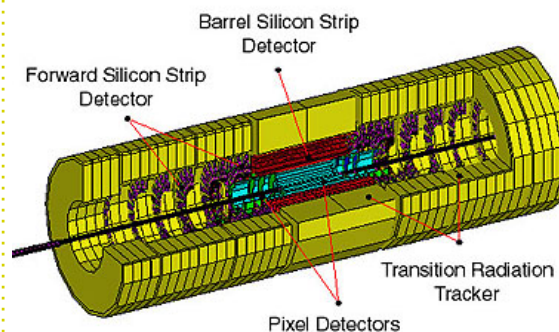
ALEPH VDET



OPAL VDET



Ανιχνευτής τροχιών ATLAS



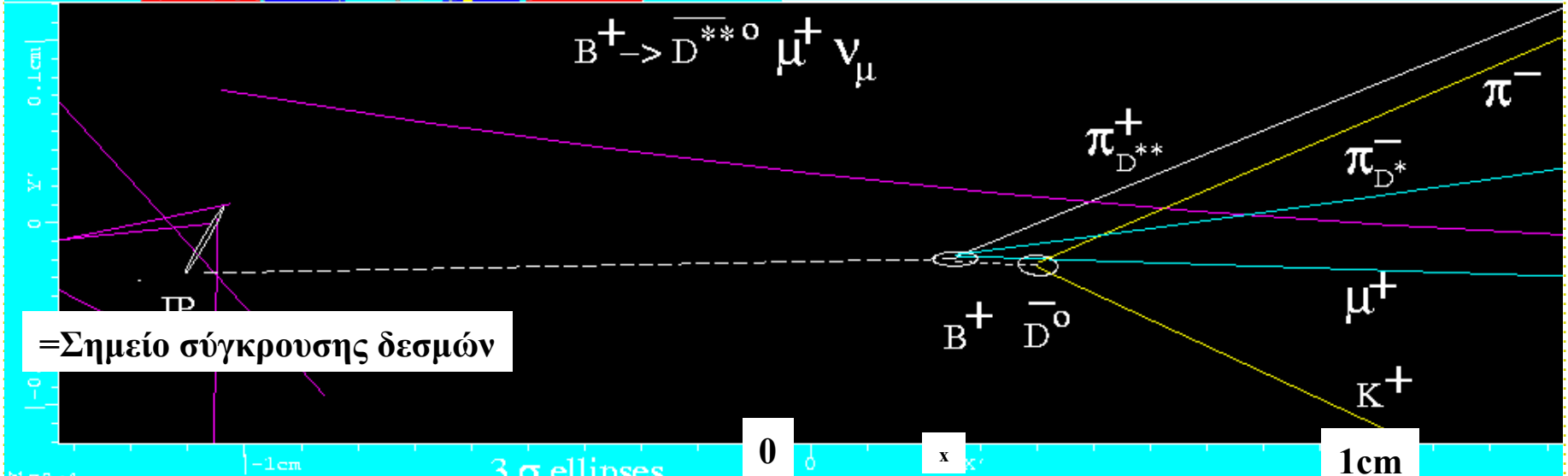
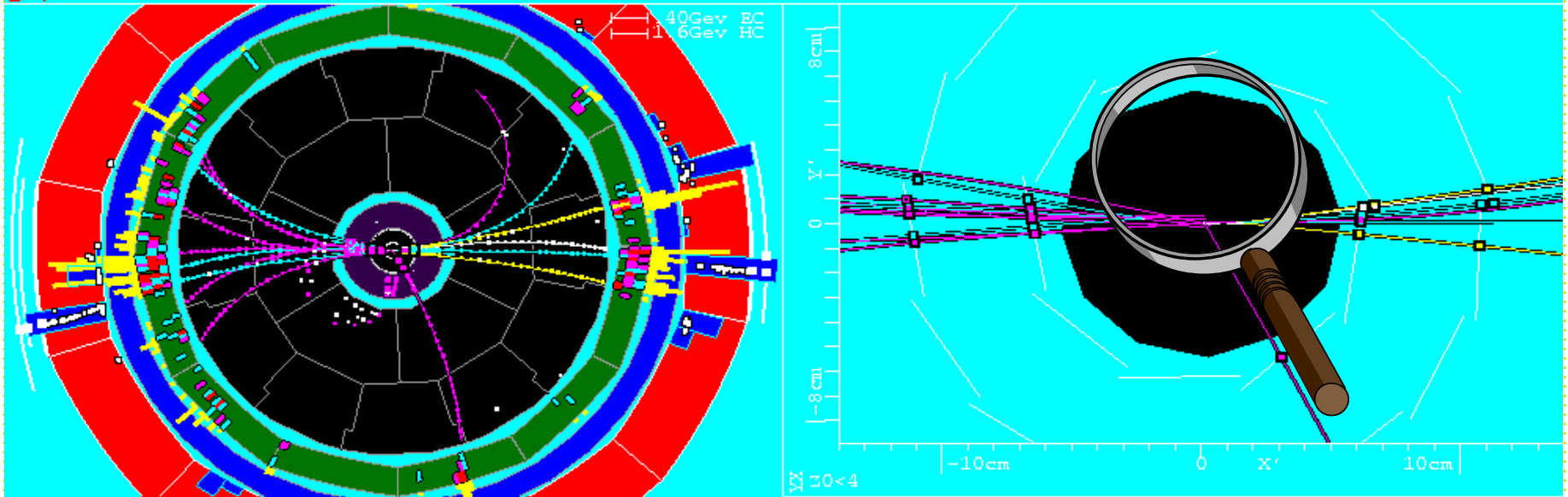
Inner Tracker

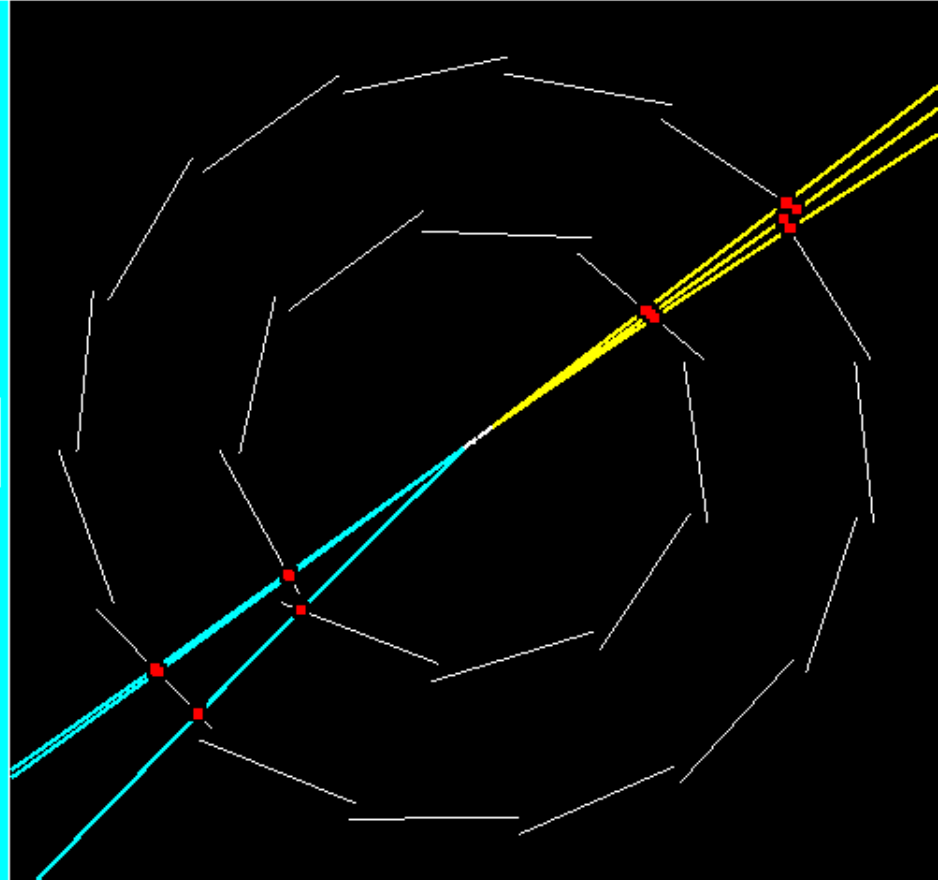
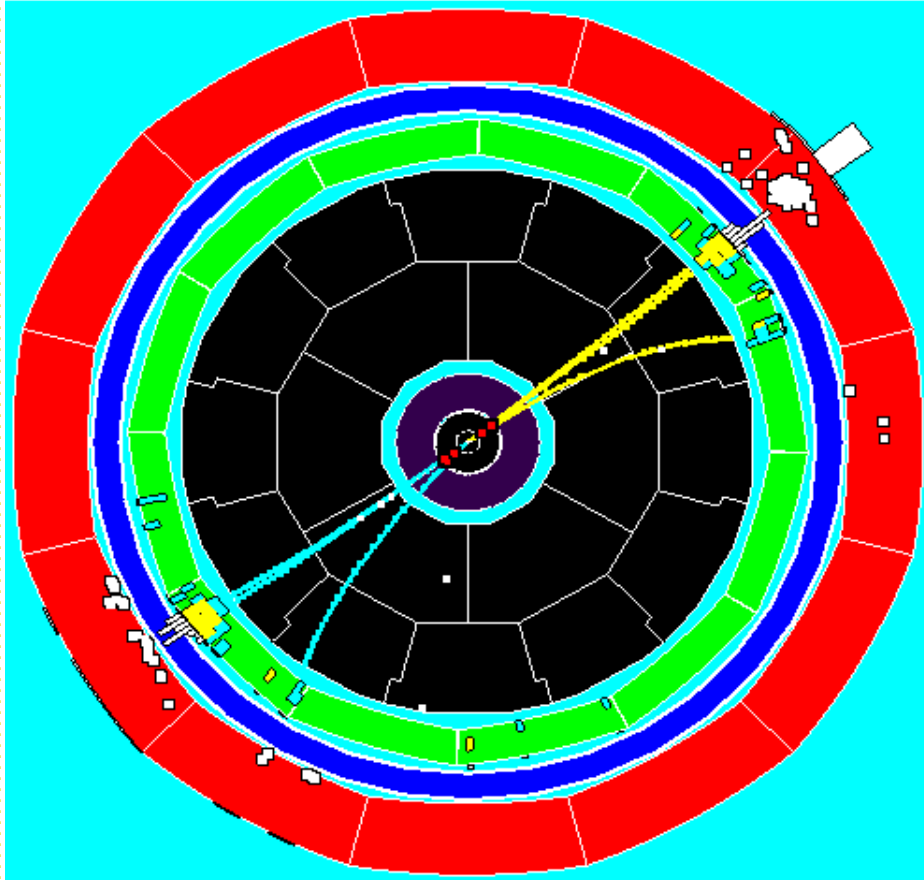


Εξαιρετική Ακρίβεια και ... διάκριση των τροχιών

ALEPH

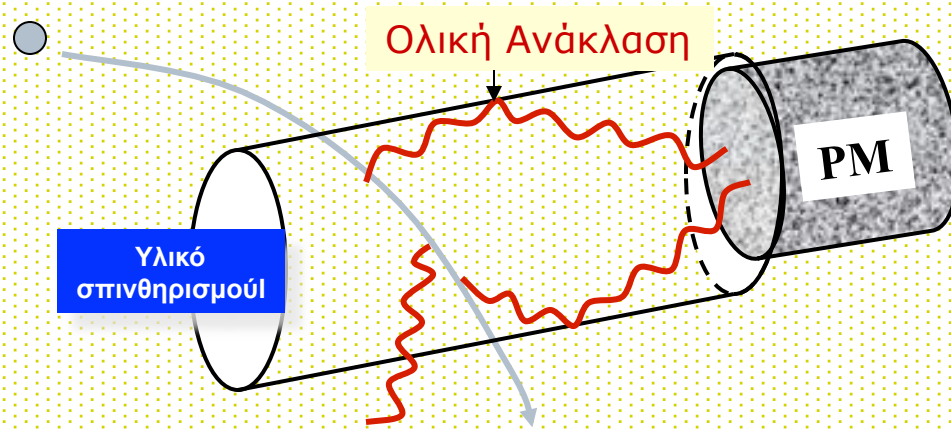
run = 15419 event = 5991





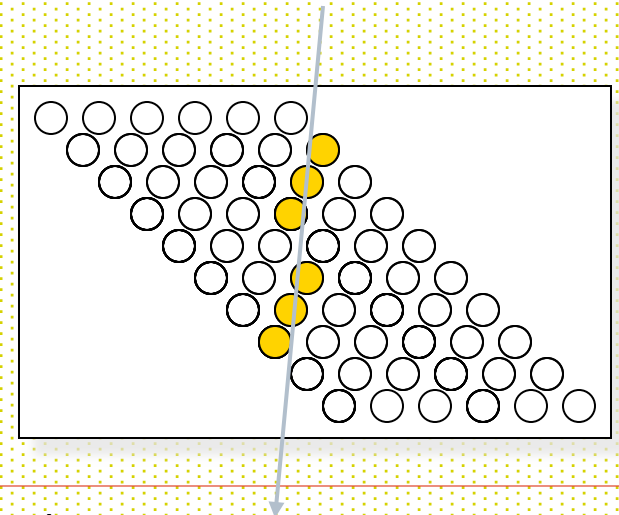
Μέσος χρόνος ημι-ζωής του tau $t=290 \times 10^{-15} \text{ sec}!! \rightarrow ct = 87 \text{ mm}!$

Ανιχνευτές Σπινθηρισμού

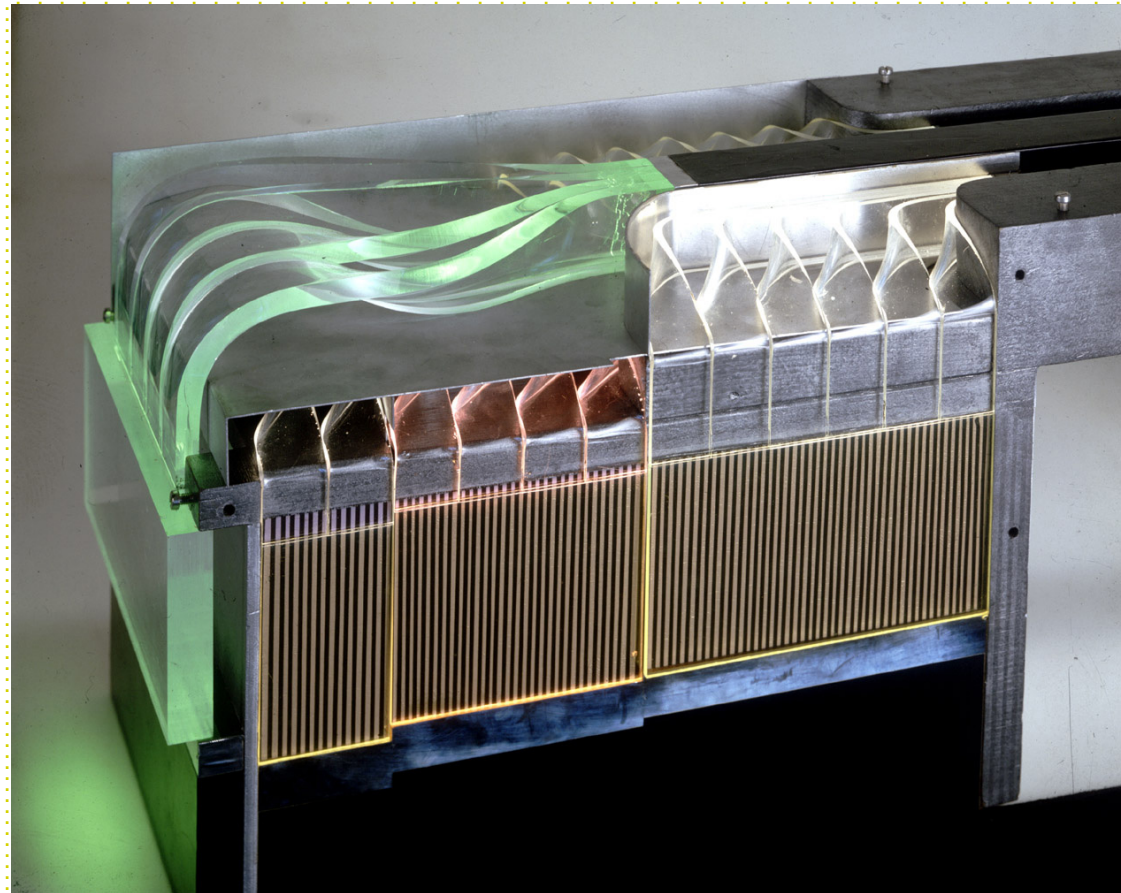


Φωτοπολλαπλασιαστής: μετατρέπει το φως σε σήμα ηλεκτρονίων

Χρησιμοποιώντας πολλές οπτικές ίνες πολύ κοντά
--> Γίνεται η τροχιά ορατή

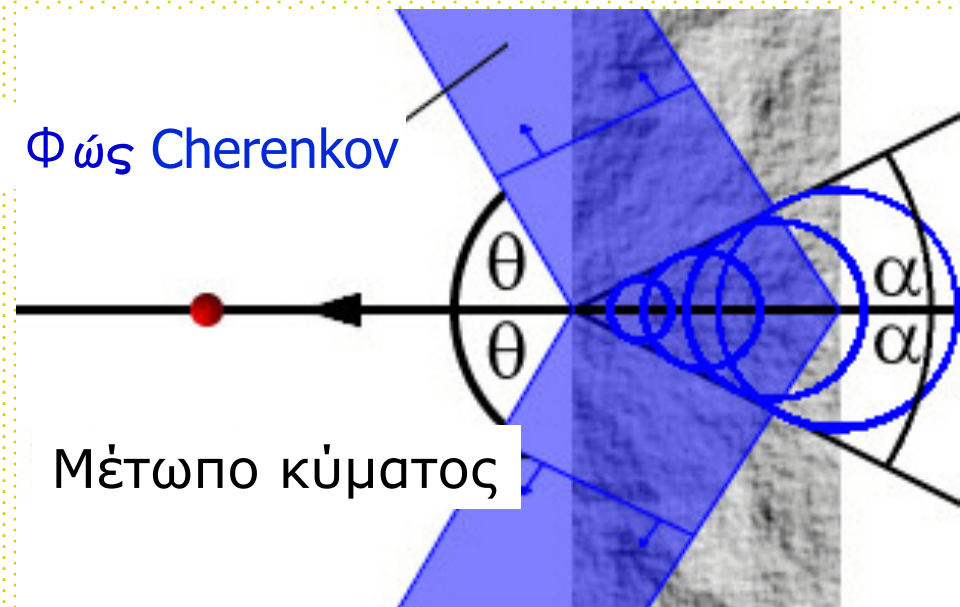


Τώρα είμαστε έτοιμοι να ανιχνεύσουμε τις ακτινοβολίες: Cherenkov και Διέλευσης



Ανιχνευτές Σωματιδίων, 09-15
Αυγούστου 2014

Ακτινοβολία Cherenkov



- Τα σωματίδια μέσα σε ένα υλικό ταξιδεύουν **με ταχύτητα μεγαλύτερη από εκείνη του φωτός** και εκπέμπουν ακτινοβολία:

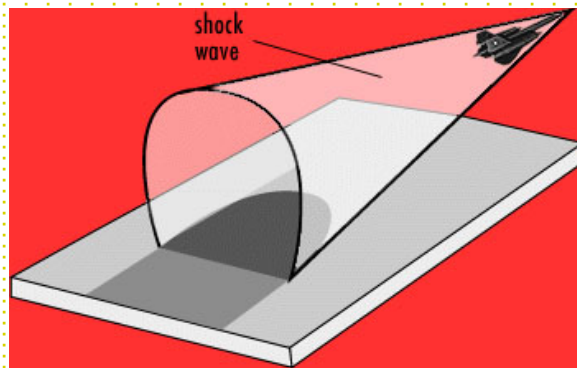
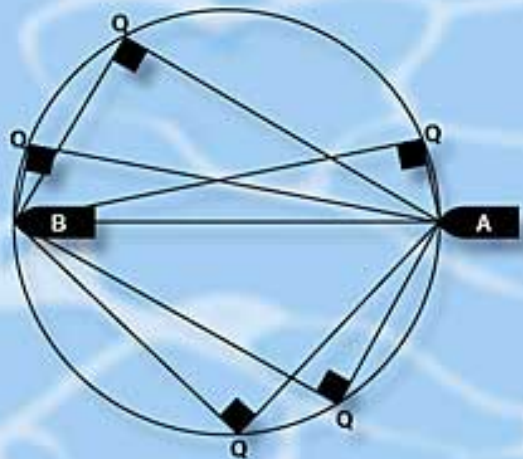
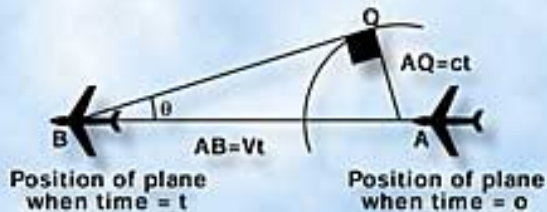
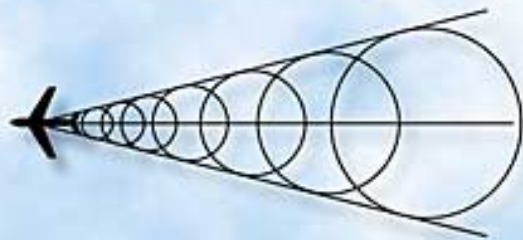
Ακτινοβολία Cherenkov

$$\sin \alpha = \frac{c}{v} = \frac{c_0}{n v} \Rightarrow \frac{c_0}{n v} = 0.5 \Rightarrow$$
$$v = \frac{c_0}{1.5 \cdot 0.5} = \frac{2c_0}{1.5} > c_0$$

Αν έστω $\sin \alpha = 0.5$ ($\alpha = 30^\circ$)
και $n = 1.5$
 $c_0 =$ ταχύτητα φωτός στο κενό

Ακτινοβολία Cherenkov

και
άλλα
κρουστικά
κύματα



Τα κρουστικά κύματα
αλλοιώνουν τον
προσανατολισμό των πουλιών

**SONIC JET
DELTA**



Ίσως και τα
αντίστοιχα των
φαριών?



Scram jet

Συμπεράσματα

- Εισαγωγή και Αντικείμενο Μελέτης
- Ιδιότητες των Στοιχειωδών Σωματιδίων και πως μετρώνται?
- Ανιχνευτές ΦΥΕ @ CERN
 - Κύρια Ανιχνευτικά Συστήματα
 - Υποδομή